



ISSN 1000-5013

CN 35-1079/N

CODEN HDZIEF

华侨大学学报

(自然科学版)

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

第 36 卷 第 2 期

Vol. 36 No. 2

2015

福建·泉州

ISSN 1000-5013



9 771000 501156



《 华 侨 大 学 学 报 (自 然 科 学 版) 》
第 六 届 编 辑 委 员 会
The Sixth Editorial Committee of
Journal of Huaqiao University (Natural Science)

主 编 (Editor in Chief)

乌东峰 (WU Dong-feng)

副主编 (Associate Editor in Chief)

陈国华 (CHEN Guo-hua)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

编 委 (Members) (按姓氏笔划为序)

王加贤 (WANG Jia-xian)

王全义 (WANG Quan-yi)

方柏山 (FANG Bai-shan)

叶民强 (YE Min-qiang)

刘 攀 (LIU Gong)

江开勇 (JIANG Kai-yong)

张认成 (ZHANG Ren-cheng)

吴季怀 (WU Ji-huai)

吴逢铁 (WU Feng-tie)

陈锻生 (CHEN Duan-sheng)

周克民 (ZHOU Ke-min)

胡日东 (HU Ri-dong)

高轩能 (GAO Xuan-neng)

黄心中 (HUANG Xin-zhong)

童昕 (TONG Xin)

蔡灿辉 (CAI Can-hui)

欧阳明安 (OUYANG Ming-an)

编辑部主任 (Director)

黄仲一 (HUANG Zhong-yi)

目 次

基于布尔求差的对数螺旋锥齿轮精确建模
..... 向铁明, 顾立志, 李鹏, 陈维周 (121)

渐开线齿轮齿廓偏差测量中的采样分析
..... 李兴旺, 黄富贵, 王宇, 马冬冬 (127)

利用电磁辐射信号的串并联电弧故障检测
..... 丁浩江, 张认成, 杨凯, 杨建红, 陈首虹 (132)

工业机器人运动碰撞的仿真实现
..... 陈胜奋, 谢明红 (137)

应用小波变换和支持向量机的商业电力负荷预测
..... 杨屹洲, 方瑞明, 黄文权, 梁颖, 汪亮 (142)

理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光束的聚焦特性
..... 陈姿言, 何艳林, 陈婧, 吴逢铁 (147)

布拉格反射波导双光束边发射半导体激光器
..... 苏道军, 计伟, 崔碧峰, 邱伟彬, 佟存柱, 张松, 王晓玲, 凌小涵, 王加贤 (151)

一种雾天退化场景快速复原方法
..... 王伟鹏, 戴声奎, 项文杰 (156)

微熵率算法分析及实证研究
..... 黄奕, 谢维波 (161)

采用小波变换的脑电图信号分析及其应用
..... 蔡琼, 陈鹏慧, 魏武 (166)

超宽带小尺寸介质谐振器天线	曾小虎,葛悦禾 (171)
一种可编程逻辑控制程序的竞态检测方法	黄颖坤,罗继亮 (175)
开源 Linux 的嵌入式安全 SOHO 路由器设计	朱龙,刘长君 (179)
海洋着色菌 <i>Marichromatium gracile</i> YL28 静息细胞对无机三态氮的相互转化作用	蒋鹏,洪璇,赵春贵,杨素萍 (185)
多溴联苯醚气相色谱相对保留时间的定量结构-活性关系	吴志渊,薛秀玲,邱其俊 (190)
空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式	杜彦,田琦,杨晋明,郭卫强 (199)
小分子靶向受体酪氨酸激酶抑制剂 TW9183 的合成及体外抗肿瘤活性	雷春花,王雪玉,杨育才,吴振,王立强 (205)
泉州湾海岸线变迁的分形分析	李朦,林从谋,黄逸群 (211)
激光测距仪在海崖剖面形态快速测量中的应用	常方强,孟希,罗才松 (215)
考虑轴向应变不均匀性的 RC 柱轴压性能研究	许鹏红,刘亚,刘阳,黄秋来,黄群贤 (221)
战略导向下大型建设企业多项目组合决策模型	张云波,李悦,祁神军 (226)
信息非对称的城市大型公共建筑项目决策影响力分析	黄远辉,王诗才 (232)
一类极小系统的动力性状	颜棋,尹建东 (237)

CONTENTS

Accurate Modeling for Logarithmic Spiral Bevel Gear Based on Boolean Subtraction Operation	
.....	XIANG Tie-ming, GU Li-zhi, LI Peng, CHEN Wei-zhou (121)
Sampling Analysis of Involute Gear Tooth Profile Deviation Measurement	
.....	LI Xing-wang, HUANG Fu-gui, WANG Yu, MA Dong-dong (127)
Series and Parallel Arc Fault Detection Using Electromagnetic Radiation Signal	
.....	DING Hao-jiang, ZHANG Ren-cheng, YANG Kai, YANG Jian-hong, CHEN Shou-hong (132)
Simulation of Industrial Robot Motion Collision	
.....	CHEN Sheng-fen, XIE Ming-hong (137)
Commercial Power Load Forecasting Using Wavelet Transform and SVM	
.....	YANG Yi-zhou, FANG Rui-ming, HUANG Wen-quan, LIANG Ying, WANG Liang (142)
Focal Characteristics of Ideal Axicon and Vaulted Axicon on Bessel Beams	
.....	CHEN Zi-yan, HE Yan-lin, CHEN Jing, WU Feng-tie (147)
Twin Beam Edge-Emitting Semiconductor Laser with Bragg Reflection Waveguide	
.....	SU Dao-jun, JI Wei, CUI Bi-feng, QIU Wei-bin, TONG Cun-zhu, ZHANG Song, WANG Xiao-ling, LING Xiao-han, WANG Jia-xian (151)
A Fast Method for Haze Image Restoration	
.....	WANG Wei-peng, DAI Sheng-kui, XIANG Wen-jie (156)
Analysis and Empirical Research of the Entropy Ratio Method	
.....	HUANG Yi, XIE Wei-bo (161)
Analysis and Application of Electroencephalography Signal Based on Wavelet Transform	
.....	CAI Qiong, CHEN Peng-hui, WEI Wu (166)
A Compact Ultra-Wideband Dielectric Resonator Antenna	
.....	ZENG Xiao-hu, GE Yue-he (171)

A Race Detection Method for Programs in Programmable Logic Controllers	 HUANG Ying-kun, LUO Ji-liang (175)
Design of an Embedded Security SOHO Router Apparatus of the Open Source Linux	 ZHU Long, LIU Chang-jun (179)
Reciprocal Transformation of Inorganic Nitrogen by Resting Cells of <i>Marichromatium gracile</i> YL28	 JIANG Peng, HONG Xuan, ZHAO Chun-gui, YANG Su-ping (185)
Quantitative Structure-Activity Relationships on Gas Chromatographic Relative Retention Time of Polybrominated Diphenyl Ethers	 WU Zhi-yuan, XUE Xiu-ling, QIU Qi-jun (190)
Research of Optimizing Running Modes for Direct Radiant Floor Heating System with Air-Source Heat Pump	 DU Yan, TIAN Qi, YANG Jin-ming, GUO Wei-qiang (199)
Synthesis and Anti-Tumor Activities in Vitro of Small Molecule Targeted Receptor Tyrosine Kinase Inhibitor TW9183	 LEI Chun-hua, WANG Xue-yu, YANG Yu-cai, WU Zhen, WANG Li-qiang (205)
Fractal Analysis of Quanzhou Bay Coastline Change	 LI Meng, LIN Cong-mou, HUANG Yi-qun (211)
Application of Laser Distance Meter in Rapid Measurement of Sea-Cliff Profiles	 CHANG Fang-qiang, MENG Xi, LUO Cai-song (215)
Study on the Axial Compression Performance of RC Columns Considering the Nonuniformity of Axial Strain	 XU Peng-hong, LIU Ya, LIU Yang, HUANG Qiu-lai, HUANG Qun-xian (221)
Research on Decision Model in Large-Scale Construction Enterprises of Multi-Project Portfolio Based on Strategic Orientation	 ZHANG Yun-bo, LI Yue, QI Shen-jun (226)
Research on Large-Scale Public Construction Project Decision Making Based on Information Asymmetry	 HUANG Yuan-hui, WANG Shi-cai (232)
Dynamical Propertise for a Class of Minimal Dynamical Systems	 YAN Qi, YIN Jian-dong (237)

基于布尔求差的 对数螺旋锥齿轮精确建模

向铁明^{1,2}, 顾立志¹, 李鹏¹, 陈维周²

(1. 华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021;
2. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024)

摘要: 为了获得新型螺旋锥齿轮——对数螺旋锥齿轮的小齿轮的精确三维模型,提出一种新的建模方法,即基于对数螺旋锥齿轮的形成机理,建立精确的等螺旋角圆锥对数螺旋线,并作为对数螺旋锥齿轮的齿向线,对数螺旋锥齿轮大小两端的齿廓线采用精确渐开线及圆弧过渡,通过沿引导线精确扫掠的方式建立第一个齿槽,对齿槽进行阵列,用面锥与齿槽进行布尔求差的方式实现对数螺旋锥齿轮三维模型的精确建模,建模理论误差为零,实际距离误差 $\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$.以齿数为 9,模数为 4.5 mm,压力角为 20° ,螺旋角为 35° 的对数螺旋锥齿轮小齿轮为例进行建模,在德玛吉 DMU 40 五轴联动铣床进行数控加工,证明方法的有效性和实用性.

关键词: 对数螺旋锥齿轮;精确建模;对数螺旋线;等螺旋角;布尔求差

中图分类号: TH 132.41 **文献标志码:** A

螺旋锥齿轮,又称为弧齿锥齿轮,弧齿伞齿轮,具有传动平稳,噪音低,重合度高的特点,广泛应用于航空航天、机床、船舶及汽车工业^[1].螺旋锥齿轮因齿向线上各点螺旋角不同,造成在制造螺旋锥齿轮时要调整包括刀盘和机床的大量参数,即使这样,也不能做到啮合点螺旋角相等^[1].文献[1-3]提出的对数螺旋锥齿轮,其齿向线是圆锥对数螺旋线,从原理上体现出对数螺旋锥齿轮的优越性,但实际效果及可行性仍需要在设计、CAE 分析^[4]、加工制造、装配及使用过程中对其进行研究和验证.目前,螺旋锥齿轮的建模日趋成熟.常规螺旋锥齿轮的建模主要有两类方法^[5-6],一类是齿面方程推导为主的拟合建模^[7-13];另一类是虚拟现实的仿真加工建模^[14-23].对数螺旋锥齿轮的建模及研究较少报道,本文根据对数螺旋锥齿轮的形成原理进行精确建模,建模理论误差为零,但在实际建模时,因受计算机建模在数值计算时的截断误差和舍入误差的影响,实际距离误差 $\leq 0.1\text{ }\mu\text{m}$.

1 圆锥对数螺旋线方程的推导

在圆锥面上形成的定倾曲线(曲率与挠率之比为常数的曲线)称为圆锥对数螺旋线^[24-27],如图 1 所示.

设正圆锥面上有动点 M ,它由 M_0 运动到 M_1 时,在锥面上转过一个 τ 角.当动点由 M_1 转到 M_2 时,在锥面上变化一个 $d\tau$ 角,则 M_1 点到原点(锥顶)的矢径 r 也相应增大 dr ,曲线 M_1, M_2 在 M_2 的切线与过 M_2 点的圆锥母线 OM_2 所成角度 β ,令 β 为一恒定值,则可推导出圆锥对数螺旋线的矢径方程为

$$r = a \exp(\varphi \sin \alpha \cdot \cot \beta).$$

(1)

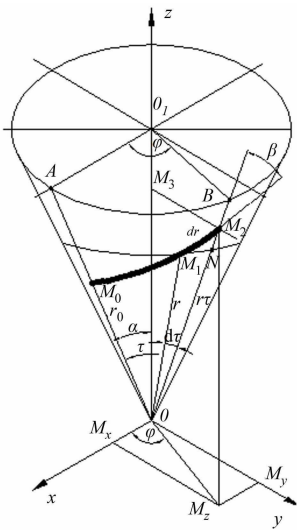


图 1 圆锥对数螺旋线
Fig. 1 Conical logarithmic spiral line

式(1)中: a 为圆锥对数螺旋线起点距离锥顶的距离; φ 为自变量,表示动点转过的角度在底面的投影; α 为圆锥的锥顶半角; β 为螺旋角.

把式(1)化成参数方程形式^[1-3],有

$$\left. \begin{aligned} x &= OM_x = a \exp(\varphi \sin \alpha \cdot \cot \beta) \cdot \sin \alpha \cdot \cos \varphi, \\ y &= OM_y = a \exp(\varphi \sin \alpha \cdot \cot \beta) \cdot \sin \alpha \cdot \sin \varphi, \\ z &= OM_z = a \exp(\varphi \sin \alpha \cdot \cot \beta) \cdot \cos \alpha. \end{aligned} \right\}$$

(2)

2 对数螺旋锥齿轮精确建模

2.1 对数螺旋锥齿轮精确建模思路

面锥体与齿槽体采用布尔求差的方式,对数螺旋锥齿轮进行三维建模.

2.2 对数螺旋锥齿轮的基本参数

根据某一微型汽车主减速器的格里森制螺旋锥齿轮参数,设计对数螺旋锥齿轮,拟用对数螺旋锥齿轮取代格里森制螺旋锥齿轮,对数螺旋锥齿轮的小齿轮主要参数如下:齿数为 9,大端端面模数为 4.5 mm,大端分度圆直径为 40.5 mm,压力角为 20°,螺旋角为 35°,齿顶高系数为 0.85,顶隙系数为 0.188.

2.3 齿轮基本曲线的创建

基本曲线包括:齿轮的轴线、面锥母线、节锥母线、根锥母线、基锥母线、背锥母线和前锥母线. 根据几何关系可推导出关系式,有

$$\left. \begin{aligned} d &= m \times z_1, \\ d_a &= m \times z_1 + 2 \times a_h^* \times \cos \delta_1, \\ d_b &= d \times \cos \alpha, \\ d_f &= m \times z_1 - 2 \times (a_h^* + c^*) \times m \times \cos \delta_1. \end{aligned} \right\}$$

(3)

式(3)中: d 为大端分度圆直径; d_a 为大端齿顶圆直径; d_b 为大端基圆直径; d_f 为大端齿根圆直径; δ_1 为小齿轮分锥角; z_1 为小齿轮齿数; a_h^* 为齿顶高系数; c^* 为顶隙系数.

2.4 齿轮大端和小端的当量齿轮基本圆的创建

大端当量齿轮的基本圆包含大端当量齿轮分度圆,大端当量齿轮齿顶圆,大端当量齿轮基圆和大端当量齿轮齿根圆. 其数值计算为

$$\left. \begin{aligned} d_2 &= \frac{m \times z_1}{\cos \delta_1}, \\ d_{a_2} &= \frac{m \times z_1 + 2 \times a_h^* \times \cos \delta_1}{\cos \delta_1}, \\ d_{b_2} &= \frac{d \times \cos \alpha}{\cos \delta_1}, \\ d_{f_2} &= \frac{m \times z_1 - 2 \times (a_h^* + c^*) \times m \times \cos \delta_1}{\cos \delta_1}. \end{aligned} \right\}$$

(4)

式(4)中: d_2 为大端当量齿轮分度圆直径; d_{a_2} 为大端当量齿轮齿顶圆直径; d_{b_2} 为大端当量齿轮基圆直径; d_{f_2} 为大端当量齿轮齿根圆直径.

2.5 布尔求差

设 A, B 分别表示两个实体,由计算几何学及计算机图形学的知识^[26]可知,实体 A, B 进行布尔求差运算表示为

$$A - B = A \text{ out } B + (B \text{ in } A)^{-1}.$$

(5)

式(5)中: $A \text{ out } B$ 表示实体 A 表面处于实体 B 外的部分; $(B \text{ in } A)^{-1}$ 表示实体 B 表面在实体 A 内的部分的补集.

在式(4)所示表达式中, $d_2, d_{a_2}, d_{b_2}, d_{f_2}$ 的一般形式为无理数,建模如果采用根锥 B 与轮齿 A 进行布尔求和,那么计算机在处理无理数问题时,必须对其进行截断.

因截断所产生的误差,造成两者无法相交而运算失败,且误差直接反应在轮齿的工作部分上面,如

图 2(a)所示. 采用面锥 D 与齿槽实体 C 进行布尔求差运算方式的建模方法, 如图 2(b)所示. 不仅可以成功完成运算, 而且还可以把误差累计到齿槽中去, 确保了轮齿工作部分的建模精度.

2.6 圆锥对数螺旋线创建

根据 UG 的表达式功能, 分别选择 $t, \log x, \log y, \log z$ 为规律曲线的内部变量、 x 坐标、 y 坐标、 z 坐标, 在分锥上创建圆锥对数螺旋线. $r_0=1$ 处作为起始点, 半锥角 $\alpha=\delta_1$, 螺旋角 $\beta=35^\circ$, φ 角为旋转 360° 的圆锥对数螺旋线. 分锥上的圆锥对数螺旋线即为齿向线, 也为精确建模的扫引线.

2.7 大、小端齿轮扫引截面和齿向线的描述与可视化表达

对数螺旋锥齿轮的端面为渐开线齿廓, 根据渐开线方程

$$\left. \begin{aligned} x_t &= r \times \cos \theta + r \times \sin \theta \times t \times \left(\frac{\pi}{2}\right), \\ y_t &= r \times \sin \theta - r \times \cos \theta \times t \times \left(\frac{\pi}{2}\right), \\ z_t &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式(6)中: x_t, y_t, z_t 为渐开线坐标; $r=\frac{d_b}{2 \times \cos \delta}$ 为大端当量基圆半径; θ 为渐开线展开角; t 为 UG 系统内部变量, 其变化范围 $0 \sim 1$.

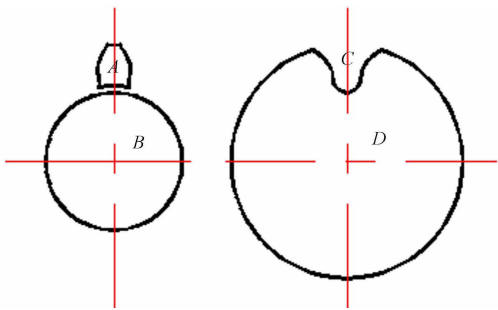
采用 UG 的规律曲线功能, 绘制大端渐开线, 并把渐开线沿着相应的对称中心进行镜像. 其中: 渐开线与齿根圆通过 r_2 圆弧进行过渡, 圆弧半径定义为

$$r_2 = \begin{cases} 0.38 \times m, & 1 \leq a_h^*, \\ 0.46 \times m, & 0 < a_h^* < 1. \end{cases} \quad (7)$$

同理, 按照小齿轮大端当量渐开线齿槽的建模过程, 可以建立小齿轮小端当量渐开线齿槽, 如图 3 所示.

用节锥的上、下两个底面, 去截断节 2.6 所生成的圆锥对数螺旋线, 得到结果如图 4 中实线所示, 即为对数螺旋锥齿轮的扫引线(扫掠路径).

利用 UG 软件的扫掠功能, 选择图 4 中左、右两端渐开线齿槽为扫掠截面, 选择齿向线为扫掠路径, 进行扫掠实体建模, 得图 5 所示的一个齿槽实体模型.



(a) 布尔求和 (b) 布尔求差

图 2 布尔运算

Fig. 2 Boolean operation

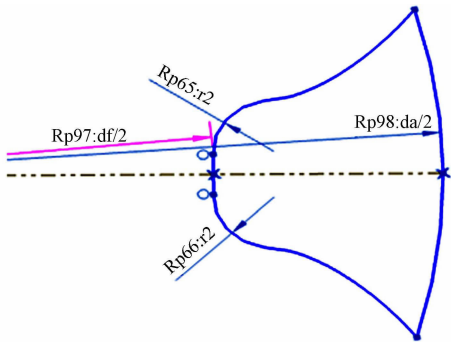


图 3 大端齿轮当量渐开线齿槽

Fig. 3 Equivalent involute space of gear big end

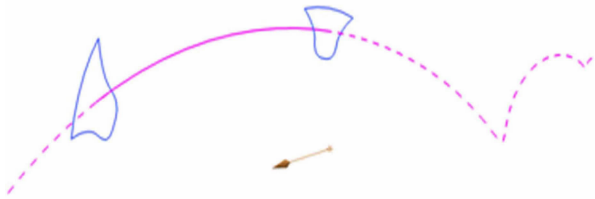


图 4 扫掠截面与路径

Fig. 4 Sweeping section and path



图 5 扫掠得出齿槽实体

Fig. 5 Cogging entity obtained by sweeping

2.8 完整齿轮齿面构建

根据对数螺旋锥齿轮面锥的尺寸, 建立面锥的实体模型, 并将图 5 所示的齿槽实体, 按照轴线中心进行 z_1-1 个数目的阵列^[27], 得到图 6 所示的效果图.

对图 6 所示的模型, 进行布尔运算, 求差, 目标体选择面锥体, 工具体选择 z 个齿槽体, 进行布尔求差后即得到对数螺旋锥齿轮的小齿轮的三维模型, 结果如图 7 所示.

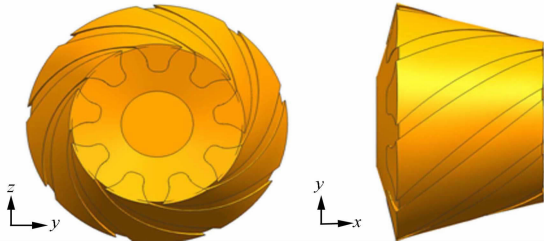


图 6 阵列齿槽

Fig. 6 An array of coggings



图 7 对数螺旋锥齿轮模型

Fig. 7 Model of logarithmic spiral bevel gear

3 实体样件加工与测量

为了验证模型的正确性,采用 45 号钢作为材料,先在普通卧式车床 C6140A1 上加工出齿坯,再在如图 8 所示的德玛吉 DMU 40 monoBLOCK 五轴联动数控铣床上进行齿坯的精铣和数控铣削加工(铣齿),得出零件的实体样件,如图 9 所示。



图 8 五轴铣床加工

Fig. 8 Five axis milling machine



图 9 小齿轮加工样件

Fig. 9 Sample of pinion

在 CONTURA G3 三维坐标测量仪上,通过测量大端齿顶圆上的三点,求齿顶圆直径,计算大端齿顶圆直径,测量的数值,如表 1 所示。

表 1 CONTURA G3 三维坐标测量数值

Tab. 1 Three-dimensional coordinate measurement values of CONTURA G3

组数	齿	x/mm	y/mm	z/mm	d_a/mm
一	1	25.437	16.665	0.001	47.936 120
	4	-16.077	16.663	0.004	
	7	4.678	-19.288	-0.004	
二	2	12.876	27.201	0.003	47.935 615
	5	-18.926	0.519	0.002	
	8	20.085	-13.681	-0.004	
三	3	-3.518	27.202	0.004	47.937181
	6	-10.728	-13.682	-0.002	
	9	28.284	0.519	-0.003	

德玛吉 DMU 40 monoBLOCK 五轴联动数控铣床在某一轴向的线性误差为 0.001 mm,蔡司 CONTURA G3 三维坐标测量仪在某一轴向的线性误差为 0.001 8 mm,使用 UG 软件建模,进行数值计算时的截断误差和舍入误差为 $0.1\text{ }\mu\text{m}=0.000\text{ 1 mm}$ 。则在某一轴向的累计线性误差为 0.002 9 mm,在空间的线性误差为

$$0.002\text{ 9}\times(1^2+1^2+1^2)^{1/2}=0.005\text{ 1 mm}.$$

利用蔡司 CONTURA G3 三维坐标测量,大端齿顶圆直径测量的平均值为 47.936 3 mm,根据大端齿顶圆的计算值 $d_a=d+2\times a_n^*\times\cos\delta_1=47.933\text{ 3 mm}$,测量值和计算值之间的误差为

$$47.936\ 3 - 47.933\ 3 = 0.003\ 0\ \text{mm}.$$

4 结论

1) 基于布尔求差的建模方法,采用面锥与齿槽进行布尔求差的方法建模,成功解决了根锥与轮齿求和的方式建模中存在的根锥与轮齿不相交的问题。

2) 以齿数为9,模数为4.5 mm,压力角为 20° ,螺旋角为 35° 的对数螺旋锥齿轮小齿轮为例,对其进行了精确建模,建模理论误差为零,实际距离误差 $\leq 0.1\ \mu\text{m}$ 。

3) 采用45号钢作为材料,在普通卧式车床C6140A1上加工出齿坯,在德玛吉DMU 40五轴联动铣床上对所建模型进行了数控铣齿加工,得实体样件。

4) 在蔡司CONTURA G3三维坐标测量仪上分三组进行,对大端齿顶圆上最外侧三点进行了三坐标值的测量,大端齿顶圆测量值和计算值之间的误差为0.003 0 mm。

参考文献:

- [1] 李强,闫洪波.对数螺旋锥齿轮啮合理论[M].北京:冶金工业出版社,2012:3-84.
- [2] 李强,翁海珊,王国平.对数螺旋线齿锥齿轮齿面的形成及传动原理(I)[J].辽宁工程技术大学学报:自然科学版,2008,27(1):107-109.
- [3] TAN Ru-long, CHEN Bing-kui, PENG Chang-yan, et al. Study on spatial curve meshing and its application for logarithmic spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 86(4):172-190.
- [4] ANI U, GERD H, PAUL A, et al. Three-dimensional, parallel, finite element simulation of fatigue crack growth in a spiral bevel pinion gear[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2005, 72(8):1148-1170.
- [5] 丁撼,阿达依·谢尔亚孜旦,汪永胜.球面渐开线螺旋锥齿轮精确模型设计[J].机械设计与制造,2014,51(3):23-26.
- [6] 丁撼,阿达依·谢尔亚孜旦.弧齿锥齿轮建模的方法及展望[J].机械设计与制造,2014,51(1):257-260.
- [7] TSAI Y C, HSU W Y. The study on the design of spiral bevel gear sets with circular-arc contact paths and tooth profiles[J]. Mechanism and Machine Theory, 2008, 43(9):1158-1174.
- [8] JERZY B, ALBERT S, ROMAN P, et al. 3D modeling of induction hardening of gear wheels[J]. Journal of Computational and Applied Mathematics, 2014, 270(11):231-240.
- [9] CHEN Shu-hung, FONG Zhang-hua. Study on the cutting time of the hypoid gear tooth flank[J]. Mechanism and Machine Theory, 2015, 84(2):113-124.
- [10] LI Hai-tao, WEI Wen-jun, LIU Ping-yi, et al. The kinematic synthesis of involute spiral bevel gears and their tooth contact analysis[J]. Mechanism and Machine Theory, 2014, 79(9):141-157.
- [11] 唐进元,蒲太平,戴进. SGM法加工的螺旋锥齿轮几何建模研究[J].机械传动,2008,32(1):43-46,83.
- [12] 孙玉文,刘宏基,刘健.基于NURBS的自由曲面精确拟合方法研究[J].机械工程学报,2005,40(3):10-14.
- [13] 魏巍,张连洪.计及刀尖圆角和根切的螺旋锥齿轮实体建模[J].机械设计,2011,28(3):9-12.
- [14] XU Yan-wei, ZHANG Lian-hong, WEI Wei, et al. Virtual machining on monolithic structure spiral bevel gear milling machine[J]. Transactions of the CSAE, 2008, 24(12):71-75.
- [15] FAN Qi. Computerized modeling and simulation of spiral bevel and hypoid gears manufactured by gleason face hobbing process[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 128(11):1315-1327.
- [16] LITVIN F L, WANG A G, HANDSCHUH R F. Computerized generation and simulation of meshing and contact of spiral bevel gears with improved geometry[J]. Comput Methods Appl Mech Engrg, 1998, 158(3):35-64.
- [17] LITVIN F L, FUENTE A, QI Fan, et al. An invariant approach for gear generation with supplemental motions[J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(5):275-295.
- [18] 李敬财,王太勇,何改云,等.基于加工方法和啮合理论的螺旋锥齿轮精确实体造型[J].吉林大学学报:工学版,2008,38(6):1315-1319.
- [19] 房怀英,洪尚任,杨建红.克林贝格螺旋锥齿轮的建模与仿真[J].华侨大学学报:自然科学版,2004,25(1):67-70.
- [20] CHEN Hai-feng, TANG Jin-yuan, ZHOU Wei. Modeling and predicting of surface roughness for generating grinding gear[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(5):717-721.

[21] JAVED H S, NEELESH K J. Modeling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing process[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(2): 200-209.

[22] LITVIN F L, FUENTES A, HAYASAKA K. Design, manufacture, stress analysis, and experimental tests of low noise high endurance spiral bevel gears[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(1): 83-118.

[23] SIMON V. Computer simulation of tooth contact analysis of mismatched spiral bevel gears [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(3): 365-381.

[24] CHRISTOPH B, GERALD F. Approximation of logarithmic spirals[J]. Computer Aided Geometric Design, 1997, 14(1): 515-532.

[25] JOEL T A, MICHELE G, JEAN P V. Designing and manufacturing spiral bevel gears using 5-axis computer numerical control (CNC) milling machines[J]. Journal of Mechanical Design, 2013, 135(2): 024502(1-6).

[26] 陈学工, 杨兰, 黄伟, 等. 三维网格模型的布尔运算方法[J]. 计算机应用, 2011, 32(6): 1543-1545, 1584.

[27] JIN Xiang-yuan, ZHANG Tie-feng, YANG Han-lin. Research on the 3D solid modeling of high efficient gear tooth based on proE[J]. Procedia Engineering, 2012, 29(2): 2990-2994.

**Accurate Modeling for Logarithmic Spiral Bevel Gear
Based on Boolean Subtraction Operation**

XIANG Tie-ming^{1,2}, GU Li-zhi¹, LI Peng¹, CHEN Wei-zhou²

(1. College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China)

Abstract: The logarithmic spiral bevel gear is a new type of spiral bevel gear. In order to obtain the accurate three dimension model of the pinion, a new modeling method is presented in this paper. It can be described as follows. Based on the formation mechanism of logarithmic spiral bevel gear, an equal spiral angle conical logarithmic spiral line as the logarithmic spiral bevel gear is constructed. The both transverse tooth profile lines of logarithmic spiral bevel gear are constructed by precise involutes and arcs. The first tooth space is established by sweeping the precise transverse tooth profile lines along the logarithmic spiral line. All tooth spaces can be formed by arraying the first tooth space. The high precision logarithmic spiral bevel gear three dimension model can be built by Boolean subtraction operation between face cone and all tooth spaces. There is no theory error of this three dimension model while the actual distance error is less than 0.1 μm. Taking a pinion as an example for modeling, which the number of the gear's teeth are 9, module is 4.5 mm, the pressure angle is 20 degrees and spiral angle is 35 degrees. The numerical control processing on the DMG DMU 40 five axis NC milling machine has been done to demonstrate the validity and practicability of this new modeling method.

Keywords: logarithmic spiral bevel gear; accurate modeling; logarithmic spiral line; equal spiral angle; Boolean subtraction operation

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 杨建红)

渐开线齿轮齿廓偏差测量中的采样分析

李兴旺, 黄富贵, 王宇, 马冬冬

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 渐开线圆柱齿轮齿廓测量中采样方式的不同会对齿廓偏差产生影响,而标准中未对其进行规定.依据采样定理,首先通过齿廓形状偏差的临界频率确定出齿廓上的采样频率;然后,利用所测齿轮精度等级与齿面粗糙度标准之间关系,确定出齿廓展开长度上的理论采样间距;最后,进行齿廓偏差采样实验,验证结果表明:所提出的采样方法是可行的.

关键词: 齿廓偏差; 采样定理; 齿轮精度; 粗糙度

中图分类号: TG 83; P 207 **文献标志码:** A

齿轮传动是在机械设备中应用最广泛的传动类型,它通过轮齿齿面直接接触来传递运动和载荷.渐开线齿廓偏差作为评定齿轮传动精度的重要参数,直接影响齿轮传动的平稳性以及接触状态,进而决定着设备的传动性能和使用寿命^[1].作为齿轮精度指标测试中必检项目之一,渐开线齿廓检验一直是讨论和研究的重点及难点.根据 GB/T 10095—2008《圆柱齿轮 精度》规定,齿廓偏差是实际齿廓偏离设计齿廓的量,该量在端平面内且垂直于渐开线齿廓的方向计值^[2].目前,渐开线齿廓偏差测量的方法主要包括标准曲线法、标准轨迹法(展成法)和坐标法等^[3].GB/T 13924—2008《渐开线圆柱齿轮精度检验细则》规定了齿廓偏差的检验方法:将被测齿廓上点的实际坐标与理论坐标或者实际渐开线与理论渐开线进行比较得出齿廓偏差,而对于齿廓采样方法并无明确规定^[4].在现有的文献中,对齿廓偏差的采样研究也不多.对于齿廓偏差计算,喻彩丽等^[5]利用渐开线法线法得出齿廓偏差;史恩秀等^[6]提出渐开线展角法;杨全超等^[7]采用直接拟合渐开线的方法,但对其采样方法均未进行详细说明^[8].在齿轮实际加工生产中,生产厂家和客户分别对相同的产品进行验收,在对齿廓偏差测量时采用不同的采样方法,得出的结果可能截然不同,导致对产品的合格性产生误判.因此,采样点的选取将会对齿廓偏差的评定产生至关重要的影响,在测量过程中必须要对采样方法进行选择.本文主要研究采样过程中不同的采样方式对齿廓偏差影响,并且提出合适的采样方法.

1 渐开线齿廓偏差测量原理

渐开线齿廓偏差主要是利用展成法测量,其原理是以被测齿轮的回转轴为基准,测量探头在齿轮基圆切线方向上接触齿廓.当回转轴以一定角速度旋转时,齿廓偏差的测量运动是由测量探头沿齿轮基圆切线方向(即齿廓展开长度方向)的直线运动和齿轮绕其回转中心的旋转运动组成^[9].

测量齿廓偏差的示意图,如图 1 所示.由图 1 可知:当被测齿轮旋转一定角度 $\Delta\theta$ 时,测量探头沿基圆切线 L 轴方向位移为 ΔL .若探头相对于齿轮的运动轨迹是一理论渐开线,则在 L 轴方向上的直线运动位移与主轴 O 旋转角度之间的关系应满足

$$\Delta L = r_b \times \Delta\theta.$$

(1)

式(1)中: r_b 为基圆半径.

而在实际生产中, 齿轮必然存在齿廓偏差, 则同一齿廓上各测量点的齿廓偏差为

$$\Delta f_{t,i} = \Delta L_i - r_b \times \Delta \theta_i.$$

(2)

则该齿廓总偏差为

$$F_a = \max(\Delta f_{t,i}) \cdot \min(\Delta f_{t,i}).$$

(3)

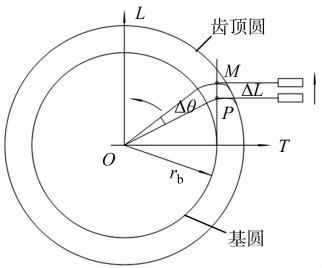
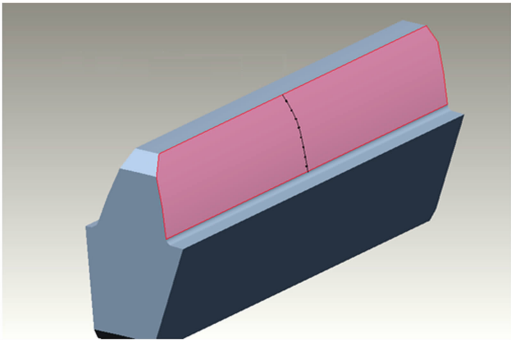


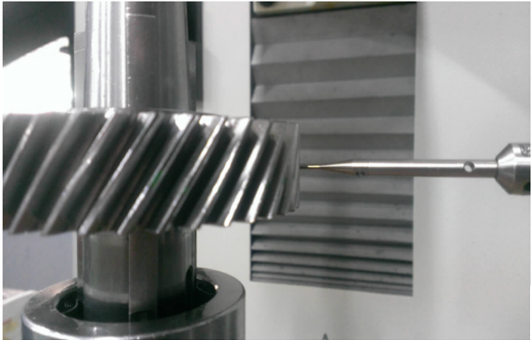
图 1 齿廓偏差测量原理
Fig. 1 Principle of gear profile deviation measurement

采样是将时域或频域上的连续量转化成离散量的过程. 被测齿廓曲线是连续信号, 则齿廓偏差也应是连续量^[10]. 齿廓偏差测量的局部示意图, 如图 2(a)所示. 在齿廓上选取一系列点作为采样点, 提取齿廓的实际要素. 若采样点过少, 齿廓的实际偏差不能被全部的反映出来; 而采样点过多, 不仅耗时, 而且会引入新的误差.

为进一步验证采样点数不同对齿廓偏差的影响, 在格里森 GMM475 型齿轮测量中心上对某设计要求为 8 级精度的渐开线圆柱齿轮进行齿廓偏差测量, 分别采用均匀分布下不同采样点数的测量, 如图 2(b)所示, 测量结果如表 1 所示. 表 1 中: $\Delta f_{t,i}$ 为齿廓偏差; n 为采样点数.



(a) 齿廓偏差测量局部示意图



(b) 齿廓偏差测量

图 2 齿廓偏差测量示意图

Fig. 2 Schematic of tooth profile deviation measurement

表 1 不同采样点数对应的齿廓偏差测量结果表

Tab. 1 Tooth profile deviation measurement result corresponding to the different sampling points

n	5	6	8	13	17	21	26	32
$\Delta f_{t,i}/\mu\text{m}$	6.093	7.201	9.08	9.732	10.554	10.736	11.259	11.521
n	38	43	52	65	87	131	262	
$\Delta f_{t,i}/\mu\text{m}$	11.860	12.093	12.371	12.693	13.097	13.552	14.081	

从表 1 分析结果可以看出: 不同的采样点数所得到的测量结果是不相同的. 产生这种结果的主要原因是: 在实际测量中, 无法做到在整个齿廓上连续采样, 故只能采用离散取点, 用离散采样点的信息来代替整个被测齿廓的信息, 所以不可避免的会发生信息缺失现象. 通过实例测量可以看出: 当采样点数较少时, 所得到的测量结果偏小; 随着采样点逐渐增多时, 齿廓偏差也逐渐正大, 测量值越来越接近于真实值, 且随着采样点数继续增加而逐渐趋于稳定. 因此, 选取合适的采样点数是齿廓偏差测量的一个至关重要的问题. 而采样点数是依靠采样间距确定的, 所以可以将采样点数的多少问题转化为确定采样间距的问题.

2.1 确定采样间距

一般来说, 在理想情况下, 采样间距越小越能反映出连续变化量的实际状况. 在单位长度上, 采样间距越小, 采样点数会相应增多, 这样过多的采样信息会增加数据处理的复杂程度, 造成不必要的设备浪费. 此外, 过多的采样信息会导致测量误差, 是因为引入了测量仪器不需要的高频误差信号. 若采样间距过大, 会丢失过多的有用信息, 导致不能完全反映被测量齿廓的实际情况, 同样也造成测量误差. 因此, 有必要确定合适的采样间距.

根据采样定理可知:如果一个具有有限频谱的连续信号由离散的采样值所替代,要从离散信号(图 3(a))不失真地还原原有的连续信号(图 3(b)),则对连续信号的采样频率要至少应该大于连续信号的最高频率的两倍,即

$$f \geqslant 2f_c.$$

(4)

式(4)中: f 为采样频率; f_c 为连续信号的最高频率.

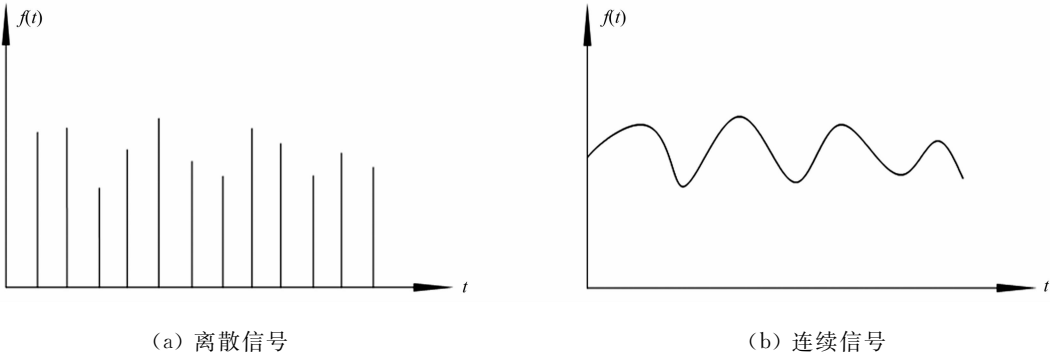


图 3 连续信号的离散采样

Fig. 3 Discrete sampling of continuous signal

对于渐开线齿廓偏差测量,可以使用下述方法确定其采样频率(或采样间距):在齿廓偏差中所包含频率最高的信号,即为小周期误差信号.因此,若要确定齿廓偏差信号的上限频率 F ,则只需确定出该小周期误差信号的频率值即可.鉴于齿廓偏差属于形状误差范畴,上限频率 F 应是除了齿面粗糙度信号以外的其他信号(宏观几何形状、波纹度)的频率最大值.考虑到齿面粗糙度测量也必须遵循粗糙度国家标准,同时齿面粗糙度 R_a 与齿轮精度等级有一定的关系(表 2),因此,可以以此为依据确定信号的上限频率值^[11].

表 2 齿轮精度等级与粗糙度之间关系

Tab. 2 Relationship between the level of gear accuracy and roughness

齿轮精度等级	4 级	5 级	6 级	7 级	8 级	9 级	10 级	11 级
$R_a/\mu\text{m}$	0.1	0.2	0.4	0.8	1.6	3.2	6.3	12.5

粗糙度测量国家标准中,已经明确了取样长度 l_r 的取值^[12],如表 3 所示,节距大于取样长度 l_r 的信号被认为是几何形状误差的信号.因此,可认为 l_r 是作为几何形状误差的最小节距^[11],即上限频率 F 的周期为 $\Delta S \leqslant l_r/2$.

表 3 粗糙度与取样长度的对应关系

Tab. 3 Correspondence between the roughness and sampling length

$R_a/\mu\text{m}$	$\geqslant 0.008 \sim 0.020$	$> 0.02 \sim 0.10$	$> 0.1 \sim 2.0$	$> 2.0 \sim 10.0$	$> 2.0 \sim 10.0$
l_r/mm	0.08	0.25	0.80	2.50	8.00

在实际测量中,为避免产生混频现象,则要求采样频率至少取 $4F^{[13]}$,即 $\Delta S \leqslant l_r/4$.

2.2 采样方法的确定

由于齿轮测量中心是应用电子展成的原理,所以在展开角度或展开长度上等间距采样比较容易实现.设以等间距 ΔL 在齿轮展开长度上采样,如图 4 所示.由图 4 可知:在齿廓上的采样间距是渐变的.在靠近齿根处的区域采样间距比较小,逐渐接近齿顶处时,采样间距也相应增大,直至齿顶处达到最大.

由 $\Delta L = r_b \times \Delta\theta$,可得 $\Delta\theta = \Delta L/r_b$.在实际的齿轮生产测量中,齿廓的测量区域是在展开长度上设定的起测点到终测点之间的部分.

齿廓偏差的测量部分,如图 5 所示,从 a 点到 b 点的渐开线展开长度 $S_x^{[14]}$ 为

$$S_x = \int_{\theta_a}^{\theta_b} ds = \int_{\theta_a}^{\theta_b} r_b \theta d\theta.$$

(5)

根据以上分析,测量时若要使齿面上的采样间距遵循采样定理,则只须在测量范围的最后 1 个采样间距 $\Delta S_n \leqslant l_r/4$ 即可,即

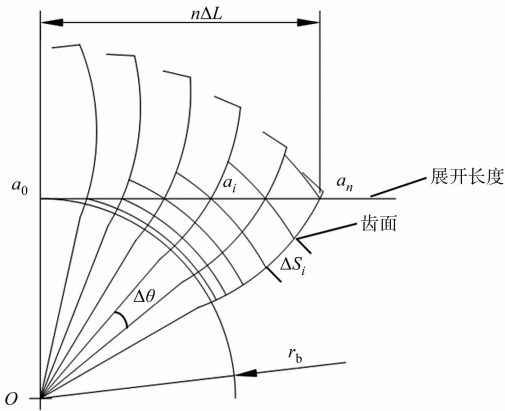


图 4 展开长度等间距采样

Fig. 4 Equally spaced sampling of unfolded length

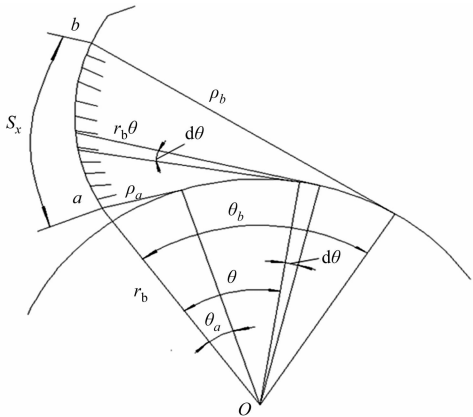


图 5 渐开线齿廓测量部分

Fig. 5 Measurement section of involute tooth profile

$$\Delta S_n = \int_{\theta_b - \Delta\theta}^{\theta_b} r_b \theta d\theta = \frac{r_b}{2} (2\theta_b \Delta\theta - \Delta\theta^2) \leq \frac{l_r}{4}.$$
 (6)

则相应展开角度或展开长度上的采样间距满足

$$\Delta\theta \leq \theta_b - \sqrt{\theta_b^2 - \frac{l_r}{2r_b}}, \quad \Delta L \leq L_b - \sqrt{L_b^2 - \frac{l_r r_b}{2}}.$$
 (7)

式(5)~(7)中:θ_a 为起测点展角;θ_b 为终测点展角;L_b 为终测点展开长度.

3 实例验证

对某齿轮厂的图纸设计要求为 8 级精度的变速器齿轮在格里森 GMM475 型齿轮测量中心进行齿廓偏差测量,并分析验证.

- 1) 齿轮参数 $m_n=2.1, Z=32, \alpha_n=20^\circ, \beta=31^\circ$.
- 2) 齿面粗糙度 $R_a=1.6 \mu\text{m}$;根据表 2 得取样长度 $l_r=0.8 \text{ mm}$;起测点展开长度 $L_a=8.218 \text{ mm}$;终测点展开长度 $L_b=20.18 \text{ mm}$.
- 3) 计算参数 $r_b=\frac{m_n Z}{2 \cos \beta} \cos \alpha_n=36.081 \text{ mm}$.
- 4) 展开长度等间距采样 $\Delta L=L_b-\sqrt{L_b^2-\frac{l_r r_b}{2}}=0.361 \text{ mm}$.

将齿轮安装在齿轮测量中心上,在展开长度 L 上分别按照系统默认的采样间距 ΔL'及理论的采样间距 ΔL 进行齿廓偏差测量.实验分别选择齿轮的序号为 1,9,17 的齿进行测量,结果如表 4 所示.表 4 中:N 为测量点数;Δf_{i,i} 为齿廓偏差.通过对比发现 2 次测量后所得的齿廓偏差结果相近,而通过文中方法所确定的测量点数远远小于系统默认的采样设置,并且测量时间大大减少.

表 4 测量结果对比

Tab. 4 Comparison of measurement results

序号	采样方案	L/mm	ΔL'/mm	N	Δf _{i,i} /μm
1 #	默认设置	11.962	0.043	262	14.07
	理论	11.962	0.361	33	12.90
9 #	默认设置	11.962	0.043	262	15.49
	理论	11.962	0.361	33	13.94
17 #	默认设置	11.962	0.043	262	11.67
	理论	11.962	0.361	33	10.21

4 结束语

利用齿轮测量中心检测渐开线齿轮齿廓偏差,采用在展开长度等间距采样的方法,根据采样定理以

及齿面粗糙度和齿轮精度等级的关系,首先确定出展开长度上采样间距 ΔL ,然后通过设置在展开长度上的采样间距并进行实验.结果表明:得出的测量结果和实际测量中系统默认采样间距得出的结果相近,证明方法可行.因此,文中提出的方法可以为实际生产中齿轮齿廓偏差测量提供参考,以期提高测量效率.

参考文献：

[1] 苑惠娟,韩立美,孙永全.大齿轮齿形偏差测量方法研究[J].机械设计与制造,2013(3):169-171.

[2] 郑州机械研究所,机械科学研究总院. GB/T 10095—2008 圆柱齿轮 精度制 第 1 部分:轮齿同侧齿面偏差的定义和允许值[S]. 北京:中国标准出版社,2008:2-3.

[3] 齿轮手册编委会. 齿轮手册[M]. 北京:机械工业出版社,2000:22-23.

[4] 中国计量科学研究院,北京工业大学,郑州机械研究所. GB/T 13924—2008 渐开线圆柱齿轮精度 检验细则[S]. 北京:中国标准出版社,2008:9-11.

[5] 喻彩丽,吴作伦. 齿轮齿形误差的测量和求解新方法[J]. 新技术新工艺,2002(5):19-20.

[6] 史恩秀,田小红,李永堂. 渐开线圆柱齿轮齿形误差的测量与计算[J]. 太原重型机械学院学报,2000,21(1):18-21.

[7] 杨全超. 渐开线圆柱齿轮各项偏差计算及精度等级评定[D]. 苏州:苏州大学,2012:19-22.

[8] 肖威,孙永厚. 渐开线圆柱齿轮齿廓偏差的评定方法研究[J]. 机械设计与制造,2014(3):244-246.

[9] 劳奇成,刘波,尚雅层. 用 CNC 测量中心对圆柱齿轮进行自动测量与评定[J]. 西安工业学院学报,1996,16(1):52-55.

[10] 庄葆华,李真. 齿轮近代测量技术与仪器[M]. 北京:机械工业出版社,1984:105-106.

[11] 浦昭邦. 齿形测量和齿轮整体误差测量中的采样分析[J]. 宇航计测技术,1985(5):6-14 .

[12] 中机生产力促进中心,哈尔滨量具刃具集团有限责任公司,中国计量科学研究院,等. GB/T 1031—2009 产品几何技术规范(GPS)表面结构 轮廓法 表面粗糙度参数及其数值[S]. 北京:中国标准出版社,2009:2-3.

[13] 黄振平. 采样频率的合理选择[J]. 世界地质工程,1998,14(3):63-67.

[14] 秦川机床厂“七·二一”工人大学《磨齿工作原理》编写组. 磨齿工作原理[M]. 北京:机械工业出版社,1977:33-34.

Sampling Analysis of Involute Gear Tooth Profile
Deviation Measurement

LI Xing-wang, HUANG Fu-gui, WANG Yu, MA Dong-dong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Different sampling methods would affect tooth profile deviation in involute tooth profile measurement, while the standard has provided anything about it. In this paper, based on the sampling theorem, first of all, the sampling frequency of the tooth profile would be determined by critical frequency of tooth profile shape deviation, then the relationship between the accuracy class and the tooth surface roughness standards is used to determine the theoretical sampling in the longitudinal direction of the tooth profile expanded, and finally the experiment of tooth profile deviation sampling is conducted and verified. The results demonstrate that the method is feasible.

Keywords: tooth profile deviation; sampling theorem; gear accuracy; roughness

(责任编辑：黄晓楠 英文审校：杨建红)

利用电磁辐射信号的串并联电弧故障检测

丁浩江, 张认成, 杨凯, 杨建红, 陈首虹

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对电弧故障检测过程中的漏判问题,提出一种新的检测方法.通过电容耦合方式获取电弧故障产生的电磁辐射信号,采用对数放大器压缩其动态范围以增加小幅值电弧故障辐射信号的增益,经电平比较器将放大器输出转换为电平脉冲,最终根据电平脉冲宽度的特性实现电弧故障的检测.样机研制和测试结果表明:该方法对串联和并联电弧故障都具有较为理想的检测精度,适应于串、并联电弧的检测.

关键词: 电弧故障;串、并联;电磁辐射;对数放大器

中图分类号: TM 930.12 **文献标志码:** A

电弧故障是引发电气火灾的主要原因之一^[1-2],其检测方法已成为建筑配电系统安全与火灾防范领域的关键技术.电弧故障检测的关键问题是要揭示电弧故障与正常负载电弧以及插头插拔电弧的本质区别,检测方法应使各种负载及电弧类型具有普适性.电弧故障的检测方法多基于回路中电流有无电弧故障时的状态特征^[3].典型的诊断方法包括频域分析法^[4]、时域波形分析法^[5]、自回归模型参数法^[6]、高阶谱分析法^[7]等.但因电弧模型物理参数不易获取及电弧故障的可屏蔽性、负载的多样性,上述方法尚不能较好地解决电弧故障误识别及漏识别问题.为解决这些问题,许多学者进行了有益的探讨^[8-13].将电磁辐射信号作为电弧故障诊断的特征量,降低了电弧故障识别的误识率和漏识率,但由于电弧故障发生位置的随机性,利用天线接收电磁辐射信号在工程应用中可行性不高.本文采用电容耦合器从供电回路接收辐射信号的高频成分,经检波和对数放大后压缩高频信号的动态范围,使高频信号中的低幅值成分幅值增大,高幅值成分幅值降低,以期提高电弧故障的检测效果.

1 电弧的电磁辐射现象

电弧是两电极间气体放电的一种特殊形式.当放电进入弧光放电区,放电通道有明显的边界,通道中的温度可达 6 000 K,电流密度可达 $10\text{ A}\cdot\text{m}^{-2}$,电离方式主要为热电离,电极间隙被具有良好导电性能的等离子体贯通.等离子体粒子所处的能量状态发生变化时,对外表现为各种形式的辐射现象.

电流元沿 x 轴产生的磁场,如图 1 所示.在距离为 R 处,由一长度为 δ 的电流元在沿 x 轴方向所产生的电场大小^[14]可表示为

$$E_{\text{rad}}(\boldsymbol{R},t)\approx\frac{\sin\theta}{4\pi\epsilon_0\boldsymbol{R}c^2}\int_0^\delta\frac{\text{d}i}{\text{d}t}\text{d}y.$$
 (1)

式(1)中: θ 为电流与 $\boldsymbol{R}$ 向量之间的夹角; i 为电流; ϵ_0 为介电常数; c 为光速.假设电弧电阻在整个动态过程中保持不变,在忽略电弧电感的情况下,其功率谱^[11]可近似表示为

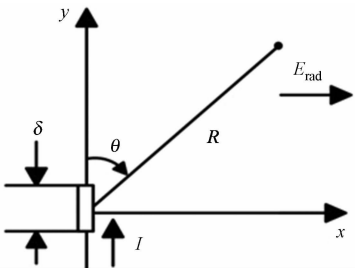


图 1 电流元沿 x 轴产生的磁场
Fig. 1 Electromagnetic field radiated by a current component oriented along x -axis

$$P_{\text{arc}}(\omega) \approx \frac{k^2 I_{\text{arc}}(0)^2 \omega^2 R_{\text{arc}}^2 C_{\text{S}}^2}{1 + R_{\text{arc}}^2 C_{\text{S}}^2 \omega^2}. \tag{2}$$

式(2)中: k 为常量; $I_{\text{arc}}(0)$ 为电弧电流初始上升率; C_{S} 为两触点之间的容值; R_{arc} 为电弧电阻; ω 为电弧固有频率. 当角频率 ω 趋近无穷大时, 式(2)将达到最大值 $k^2 I_{\text{arc}}(0)^2 \omega^2$; 当 $\omega = 1/R_{\text{arc}} C_{\text{S}}$ 时, 功率谱达到最大值的一半. Kayano 等^[15] 在一项电极为银的电弧放电实验中发现: 放电初始阶段的辐射信号频率高达 10 MHz, 电弧阶段将超过 100 MHz.

电弧辐射产生的电磁波是以波动形式存在的电磁场, 可在空气及金属导体中传播. 发生电弧故障时, 天线及回路导线都能接收到辐射电磁波. 在导电介质中传播时, 电磁波因介质导电吸收能量振幅逐渐衰减, 其衰减快慢与导电介质的介电常数、电导率及电磁波波长有关.

2 电弧故障诊断

2.1 电弧电磁辐射信号的获取

利用高频电容耦合电路感测电弧故障发生时产生的电磁辐射信号, 输入端并联在负载电源端, 输出端作为检测电路的输入, 如图 2 所示. 电容耦合器在获取信号的同时, 也起到强弱电的隔离作用. 耦合器中选用容量为 10 nF, 耐压值为 400 V 的聚丙烯电容. 在串联电弧故障试验中, 以电阻炉作为负载, 供电电压为 220 V/50 Hz 交流电, 从变压器端采集高频电压信号(图 3(a)), 采集工具为 DPO4104-L 型示波器, 采样率为 50 MHz. 由图 3(a)可知: 高频信号轮廓呈现马鞍形状, 两侧的高频信号较中间的幅值更大, 同时信号出现周期性零休, 零休周期为 100 Hz. 高频信号的零休与电弧电流的零休是一致的, 在电弧电流零休期间, 电弧熄灭, 弧隙间的电离现象趋于停止, 消电离作用极为强烈, 上述的辐射现象也将减少.

2.2 电弧故障诊断方法

电弧故障特征信号处理过程, 如图 3 所示. 对数检波放大器在对高频信号检波的基础上进行对数放大, 输出信号与固定电平进行比较, 高于该电平输出高电平; 否则, 反之, 由此得到脉冲信号. 高频信号的“零休”、“幅值波动”等特征被集中转换为脉冲波宽度的随机变化, 微处理器通过捕获脉宽实现电弧故障诊断: 10 ms 内捕获脉宽大于设定阈值时, 判定当前半波为电弧故障半波; 移动累加 0.5 s 内电弧故障半波总数, 总数大于阈值则判定发生电弧故障.



图 2 耦合电路
Fig. 2 Coupling circuit

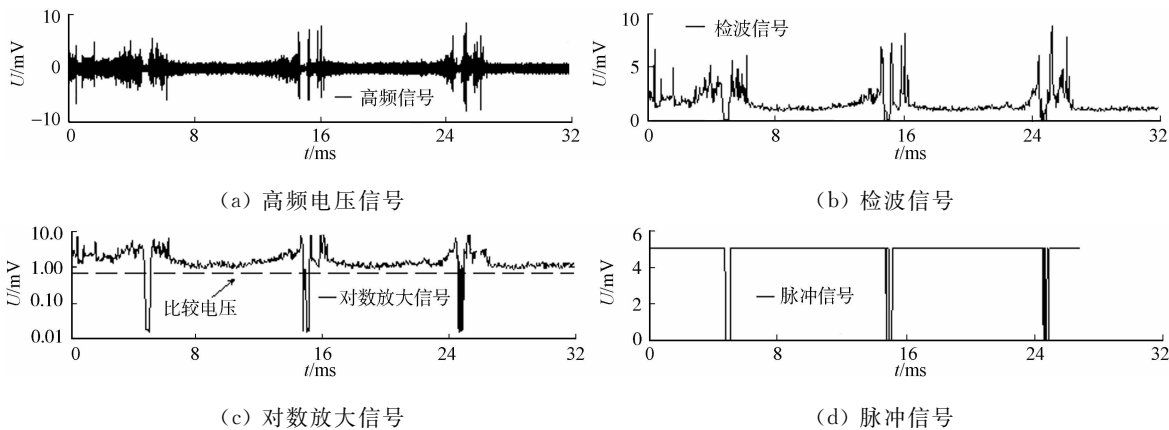


图 3 电弧故障高频信号处理过程

Fig. 3 Processing of arc fault high frequency signal

比较电平的大小对电弧故障的诊断起决定性作用. 将检波信号直接输入电平比较器(图 3(b)), 若比较电平过低, 微小噪声信号易被识别为电弧故障信号, 导致误判; 若比较电平过高, “马鞍”中间检波信号幅值低于比较电平, 造成电弧故障信号损失, 导致漏判. 检波信号经对数放大后, “马鞍”两侧高幅值信号被压缩, 中间低幅值信号幅值增大(图 3(c)), 即电弧期间的信号维持在高幅值水平, 电弧零休期间的信号停留在低幅值水平, 拉开了有无电弧故障时信号幅度的距离. 参考 UL 1699《故障电弧断路器标

准》,对吸尘器、手电钻、开关电源、空压机等典型负载进行大量实验,确定检测效果较理想的比较电平。

2.3 对数放大

为实现对数放大,在耦合电路后增加一级连续检波式对数放大器^[16].理想的输入输出间的关系为

$$V_{out} = V_y \log_{10}(V_{in}/V_x).$$
(3)

式(3)中: V_{out} 为输出电压; V_{in} 为输入电压; V_x 为截止电压; V_y 为斜率电压,用以调节增益.在实际电路中,当输入电压低于截止电压值时,输出输入不再维持对数关系,输出电压将稳定在一个固定值.对数放大器的增益 K 为

$$K = \frac{\partial V_{out}}{\partial V_{in}} = \frac{V_y}{V_{in}} \frac{1}{\ln 10}.$$
(4)

由式(4)可知:对数放大器的增益与输入信号有关,输入信号越小,放大器的增益越大;反之,输入信号越大,增益越小,从而起到压缩大信号幅值,增大小信号幅值的作用。

3 实验部分

3.1 实验平台

电弧故障发生平台,如图 4 所示.碳化路径电弧故障试验机利用 8 000 V 交流电压碳化破损导线形成碳化路径,模拟线路老化或接触不良产生的电弧故障(图 4(a));电缆切割电弧故障试验机模拟利器切割并行导线时产生的电弧故障(图 4(b));点接触电弧发生器利用铜与碳之间的点接触产生电弧故障(图 4(c)).



图 4 实验设备
Fig. 4 Experimental equipment

3.2 实验方案

实验包括碳化路径串联电弧故障试验、碳化路径并联电弧故障试验、电缆切割电弧故障试验、点接触串联电弧故障试验.研究表明:建筑供电系统中,22~24 MHz 频率范围内背景噪声较小,电弧高频信号具有较高的信噪比^[17].因此,在耦合电路与对数放大器之间配置一个中心频率为 23 MHz 的带通滤波电路,用以减小背景噪声带来的影响。

测试在 220 V/50 Hz 的供电情况下进行,试验电路如图 5 所示.数据采集工具为 DPO4104-L 型示波器,采样率为 50 MHz,同时采集高频滤波信号及对数放大器输出信号.串联电弧测试负载类型有吸尘器、手电钻、卤素灯、空压机、开关电源、调光灯,其额定功率分别为 1 100,850,360,2 200,400,1 000 W.

3.3 对数放大器输出效果

以典型负载吸尘器为例,电缆切割电弧故障高频信号幅值较小,且具有周期性(图 6(a));点接触电弧故障高频信号幅值较大,且不规则(图 6(b)).无电弧故障时,对数检波信号稳定在低水平;有电弧故障时,幅值随高频信号包络线变化.碳化路径串、并联电弧故障试验与电缆切割电弧故障试验结果类似。

3.4 峰值线性检波与对数检波效果对比

为了验证对数检波放大器对数放大的作用,搭建峰值线性检波电路对比二者的检波效果.碳化路径串联试验中两检波效果对比图,如图 7 所示.由图 7 可知:电弧故障辐射的高频信号幅值较小时,线性检

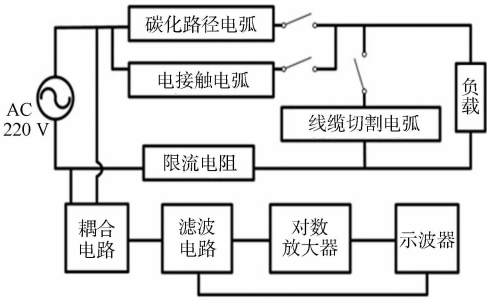
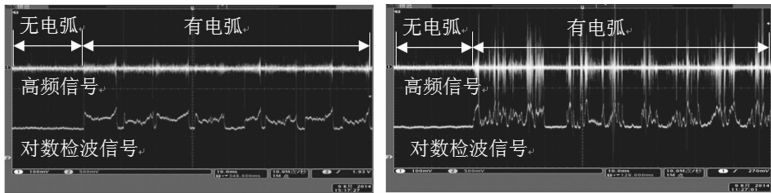


图 5 试验电路
Fig. 5 Experimental circuit

波后的信号幅值较小或截止,造成电弧故障诊断信息的损失. 对数放大器在输入信号微小的情况下,依旧能保持较大的幅值输出,最大程度保留电弧故障特征信息.



(a) 电缆切割电弧故障 (b) 点接触电弧故障

图 6 对数放大器输出

Fig. 6 Output of logarithmic amplifier

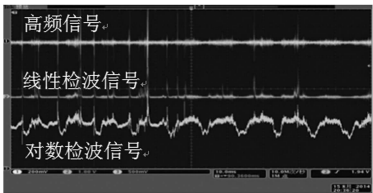


图 7 检波效果对比

Fig. 7 Comparison of detection effect

4 电弧故障检测装置及测试结果

为验证检测方法的可行性,设计了一款电弧故障检测电器(AFDD)样机,其结构如图 8 所示. 整个系统主要由脱扣电路、高频耦合电路、滤波电路、对数放大器、比较器、微处理器、电源等部分组成. 电源直接从零火线上取电,将市电转换为 5 V 直流电为比较器、对数放大器、微处理器供电. 达到脱扣要求时,微处理器发出脱扣信号断开回路.

每组测试进行 50 次重复性试验,试验结果如表 1 所示. 表 1 中: δ 为漏判率,由表 1 可知:样机对串、并联电弧的检测均有效. 在误脱扣实验中,分别测试每种负载下启动、功率调节、正常运行 3 种工况下的误判率($\eta_1 \sim \eta_3$),每种工况下进行 50 次重复性实验,测试结果如表 2 所示. 表 2 中:“—”表示不存在此工况. 由表 2 可知:负载为手电钻时,其功率疾速变化,样机易受手电钻电刷电弧影响而脱扣,其他情况下样机并未因负载差异或工况变化而脱扣.

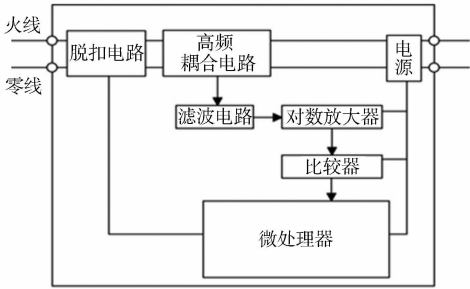


图 8 样机结构

Fig. 8 Structure of prototype

表 1 电弧故障检测试验结果

Tab. 1 Result of arc fault detection test

测试项目	电弧类型	$\delta/\%$
碳化路径电弧故障试验	串、并联电弧	4
电缆切割电弧故障试验	并联电弧	4
点接触电弧故障试验	串联电弧	2

表 2 误动作测试试验结果

Tab. 2 Result of mal operation test

								%
负载	η_1	η_2	η_3	负载	η_1	η_2	η_3	
吸尘器	0	0	0	空压机	0	0	—	
手电钻	0	0	5	开关电源	0	0	—	
卤素灯	0	0	—	调光灯	0	0	0	

5 结束语

通过电容耦合方式接收电弧故障辐射信号,利用对数检波放大器压缩其动态范围. 测试结果表明:文中方法降低了电弧故障诊断的漏判率,适用于串并联电弧故障的检测,检测方法受负载差异或工况变化影响较小,可为现有 AFDD 装置设计提供参考.

参考文献:

[1] GREGORY G D, WONG K, ROBERT F. More about arc-fault circuit interrupters[C]// Industry Applications Conference. [s. l.]: IEEE Press, 2003: 1306-1313.

- [2] PARISE G, MARTIRANO L, GRASSELLI U, et al. The arc-fault circuit protection[C]// Industry Applications Conference. [s. l.]: IEEE Press, 2001: 1817-1822.
- [3] 施惠冬, 潘东强, 付华. 电弧故障检测的分析和研究[J]. 低压电器, 2013(6): 15-20.
- [4] LEE W J, SAHNI M, METHAPRAYOON K, et al. A novel approach for arcing fault detection for medium-/low-voltage switchgear[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(4): 1475-1483.
- [5] 占友雄, 张认成, 杨建红, 等. 基于 Cambera 距离的串联电弧故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 30-36.
- [6] 雍静, 桂小智, 牛亮亮, 等. 基于自回归参数模型的低压系统串联电弧故障识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 213-219.
- [7] YANG Kai, ZHANG Ren-cheng, YANG Jian-hong, et al. Research on low-voltage series arc fault detection based on higher-order cumulants[J]. Advanced Materials Research, 2014, 889/890: 741-744.
- [8] SODJI T S, SACHDEV M S, SAGOO G S, et al. Detection and location of low-level arcing faults in metal-clad electrical apparatus[C]// Developments in Power System Protection. New Jersey: IEEE Press, 2001: 157-160.
- [9] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S, et al. A new technique for detection and location of arcing faults in power system apparatus[C]// Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. New Jersey: IEEE Press, 1992: 185-188.
- [10] SIDHU T S, SINGH G, SACHDEV M S, et al. Protection of power system apparatus against arcing faults[C]// Region 10 International Conference. [s. l.]: IEEE Press, 1998: 436-439.
- [11] KIM C J. Electromagnetic radiation behavior of low-voltage arcing fault[J]. Power Delivery, IEEE Transactions, 2009, 24(1): 416-423.
- [12] RESTREPO C E, CARLOS E. Arc fault detection and discrimination methods[C]// Proceedings of the Annual Holm Conference on Electrical Contacts. New Jersey: IEEE Press, 2007: 115-122.
- [13] 杨晟健, 钟清华. 基于 FFT 和电磁辐射的低压电弧故障检测[J]. 现代电子技术, 2012, 35(18): 86-88.
- [14] BONDIOU A, LABAUNE G, MARQUE J P, et al. Electromagnetic radiation associated with the formation of an electric breakdown in air at atmospheric pressure[J]. Journal of Applied Physics, 1987, 61(2): 503-509.
- [15] KAYANO Y, NAKAMURA T, MIYANAGA K, et al. Current and radiation noise up to GHz band generated by slowly breaking silver compound contacts[J]. IEICE Trans Electron, 2007, 90(7): 1504-1506.
- [16] 庞佑兵, 梁伟. 一种低噪声大动态连续检波式对数放大器的设计[J]. 微电子学, 2001, 31(4): 282-284.
- [17] MARTEL J M, ANHEUSER M, HUEBER A, et al. Schutz gegen parallele störlichtbögen in hauselektroinstallation[C]// Kontaktverhalten und Schalten. Berlin: VDE VERLAG, 2011: 1-11.

Series and Parallel Arc Fault Detection Using Electromagnetic Radiation Signal

DING Hao-jiang, ZHANG Ren-cheng, YANG Kai,
YANG Jian-hong, CHEN Shou-hong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In order to resolve the missing judgement in detecting arc fault, a new detecting method is put forward in this paper. The electromagnetic radiation signal radiated by arc fault is obtained through a capacitive coupling method, aimed at increasing the gain of the radiation signal radiated by arc fault of low amplitude, a logarithmic amplifier is applied to compress the radiation signal, the output of the amplifier is processed into pulse signal via a comparator. Finally, the detection of arc fault is achieved according to the characteristics of the width of pulse signal. Prototype development and test result show that this method has an ideal detecting precision for both series arc fault and parallel arc fault, it is suitable for both series and parallel arc fault detection.

Keywords: arc fault; series and parallel; electromagnetic radiation; logarithmic amplifier

工业机器人运动碰撞的仿真实现

陈胜奋, 谢明红

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 在对工业机器人模型进行碰撞检测时,提出一种把 AABB 和 OBB 结合的改进包围盒法.首先,在各个杆件模型的坐标系下,利用八叉树结构建立杆件模型的改进层次包围盒;其次,把在包围盒内的模型三角面序号存放在对应叶子节点的数组里;将包围盒位姿转换到基坐标系下的位姿,利用 OBB 包围盒的分离轴理论进行碰撞检测;接着,利用叶子节点里的索引序号索引到对应三角面并进行精确的三角面求交;最后,生成一个应用程序并进行仿真.实验结果表明:生成的应用程序能够快速和精确地检测出模型碰撞,且运行流畅.

关键词: 包围盒; 分离轴; 碰撞检测; 叶子节点

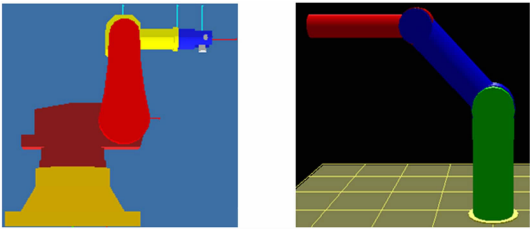
中图分类号: TG 659 **文献标志码:** A

工业机器人工作的范围广、灵活性强等特点使其在自动化领域得到了广泛的应用^[1].但工业机器人在运动过程中容易发生碰撞,碰撞的后果十分严重^[2].因此,工业机器人的碰撞检测是十分必要的.目前,对碰撞检测普遍的做法是以包围盒碰撞检测进行快速粗检测,然后以三角形面片求交进行精检测.包围盒法的思想是用略大且规则的简单包围盒代替复杂的模型.包围盒(长方体)模型主要有 AABB、OBB 等,每一种包围盒都具有各自的优势和不足^[3].对包围盒进行粗略的碰撞检测可以节省时间^[4-5].当前,对包围盒碰撞的研究有很多. Gottschalk 等^[6]采用 OBB 树进行碰撞检测研究; Wang 等^[7]采用 AABB 包围盒近似表述模型并粗略判断碰撞的位置; Chang 等^[8]结合包围盒和包围球进行快速碰撞检测.但是,很少有对包围盒本身进行研究.在综合考虑层次包围盒检测效率下,本文提出一种改进的层次包围盒法的碰撞检测方法,以提高检测速度.

1 工业机器人模型的建立

工业机器人的碰撞检测是判断各个杆件之间是否存在碰撞或干涉,其中首要任务是建立工业机器人模型.建立模型的方法一般有:1)使用 glut 库函数代码编程,由于 glut 库函数只有一些简单的三维模型,如圆柱,长方体等,这样生成的模型也就相对简单;2)使用三维建模软件,如 UG,PRO/E,这些软件可以建立各种各样的模型且操作简便.相比采用第二种方法生成的模型可以达到更好的仿真效果.

由三维建模软件建立各个杆件模型并将模型保存为 3ds 格式文件,再由 VC++ 代码编程,读取杆件模型的文件,通过 VC++ 代码将各个杆件进行一系列的平移和旋转,变换到空间相应位置并用 OpenGL 显示^[9-10],以实现工业机器人的模型建立.工业机器人两种不同的建模方式,如图 1 所示.比较图 1(a),1(b)可知:三维建模软件建立的工业机



(a) 结合 PRO/E 和 OpenGL 建模 (b) 使用 glut 库建模

图 1 工业机器人两种不同的建模方式

Fig. 1 Two different modeling methods of building industrial robot

器人模型可以相对复杂且更有效率.

2 改进层次包围盒的建立

2.1 改进包围盒的建立

构造 AABB 包围盒计算量较少,只需比较模型对象各点元素的坐标值,就可以得到坐标轴上的最大值与最小值.这些值构成了 AABB 包围盒的顶点(图 2(a)).OBB 包围盒计算则相对复杂,首先得通过这些点元素的坐标值计算出协方差矩阵;然后计算协方差矩阵的特征值和特征向量;最后以特征向量为新的坐标轴,把所有点元素的坐标投影到新的坐标轴上,得到在新坐标轴上坐标最大值和最小值,这些值构成了 OBB 包围盒的顶点(图 2(b)).

综上可知,AABB 包围盒计算简单,但结构不紧凑;OBB 包围盒结构紧凑,但计算复杂.因此结合两者的优点,提出了一种基于 AABB-OBB 结合改进的包围盒(图 2(c)).程序仿真的工业机器人模型是由代码读取每个独立的杆件模型文件并显示,以实现快速建模.每个杆件模型都有各自的坐标系,每个包围盒都是基于对应杆件模型的坐标系建立的.选择合适的杆件坐标系是十分必要的,它可以减少包围盒建立的计算量,一般选择杆件旋转中心为坐标系原点.各个杆件模型的坐标系是独立的,不相互影响,所以构造的包围盒只需在对应杆件模型的坐标系下,通过比较点元素坐标最值,由最值构造出改进的包围盒顶点.改进的包围盒除了坐标系与原来包围盒坐标系不同外,其他的步骤与构造传统 AABB 包围盒相同.由图 2 可知:改进的包围盒既有 OBB 包围盒的紧凑,又有 AABB 包围盒构造的简便.

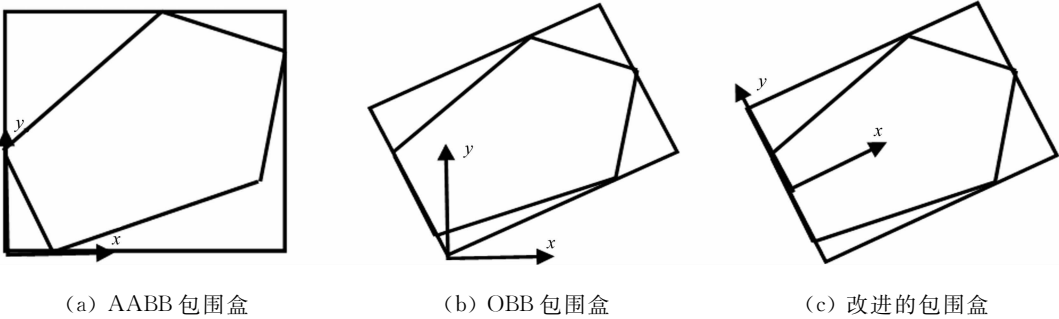


图 2 包围盒的二维示意图
Fig. 2 2D schematic diagram of bounding box

工业机器人作业时,杆件模型会发生旋转,各模型点元素坐标就会变化,构造的包围盒也会随着变化.AABB 或 OBB 采用重构的方法是先重新计算新的杆件模型点元素坐标,再由原先构造包围盒的步骤进行重构;而改进的包围盒针对这种情况采用的方法比较灵活,只需计算杆件模型坐标系间的变换矩阵,无需重新计算点元素坐标.较传统包围盒重构,改进的包围盒重构减少了大量运算,提高了效率.

2.2 八叉树结构的建立

八叉树是层次包围盒进行有效快速分割的一种方法^[11].从根节点出发将根节点分割成 8 个节点,再将节点分割成新的 8 个节点.重复此步骤直至满足分割深度条件时,把包围盒内的三角形序号存储到对应的叶子节点数组内.八叉树结构的示意图和建立流程图,分别如图 3,4 所示.



图 3 八叉树结构示意图
Fig. 3 Octree structure diagram

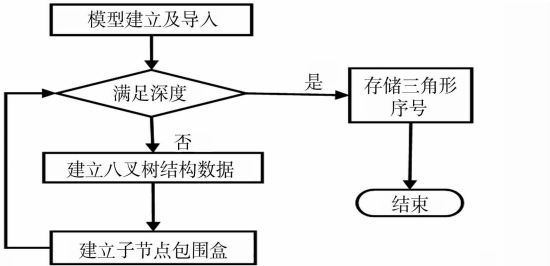


图 4 八叉树建立的流程图
Fig. 4 Flow chart of establishing octree

构建层次包围盒模块需要构造一个合适的存储数据结构,以便代码程序调用.一般构造层次包围

盒采用的数据结构有链表和数组. 定义数组时, 数组长度大小必须是已知的, 但包围盒的层数是变化的, 很容易造成数组的越界或者内存空间的浪费. 链表采用指针的方式, 可以动态申请内存空间, 需要时就向系统申请内存, 不需要时也可以动态删除. 这样既避免了越界的风险, 又提高了对内存空间的利用.

定义存储数据结构如下

```
Class COctree{public:
    int maxdepth;//包围盒的层数,最小值为 0
    vector<int>index;//对应包围盒内的三角形(面)的序号索引
    float xmin,xmax,//x 坐标的最小值和最大值
    ymin,ymax,//y 坐标的最小值和最大值
    zmin,zmax;//z 坐标的最小值和最大值
    void setSize(COctree * root,int maxdepth,float xmin,float xmax,
    float ymin,float ymax,float zmin,float zmax);//设置包围盒的大小
    COctree * chldnodes[8];//八个节点的指针
}
```

3 碰撞检测

3.1 粗略检测

依据分离轴理论^[12], 不同杆件模型的包围盒碰撞检测需在同一个坐标系下进行. 由于改进的包围盒都是基于对应杆件模型的坐标系, 所以不同杆件模型坐标系之间的相对位姿就显得格外重要. 工业机器人模型初始的位置和姿态信息保存在装配文件里, 通过 VC++ 编程读取装配文件获得所需的位置和姿态, 通常位姿信息是用 4 维方阵表示. 由杆件模型的初始位姿信息和工业机器人运动学性质^[13], 可以得出 2 个不同杆件模型 a, b 之间的相对位置和姿态关系, 即

$$\mathbf{M}_a^b = \mathbf{M}_a^{a+1} \times \mathbf{M}_{a+2}^{a+3} \times \cdots \times \mathbf{M}_{b-1}^b = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_a^b & \mathbf{l}_a^b \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式(1)中: $\mathbf{M}_a^b$ 为杆件模型 a 和 b 之间的相对位置和姿态关系; $\mathbf{T}_a^b$ 为 3×3 姿态矩阵; $\mathbf{l}_a^b$ 为位置向量.

在进行检测前, 需将不同包围盒的中心位置转换到同一个坐标系下. 包围盒间的中心位置随着杆件模型运动变化, 而包围盒中心坐标相对于对应的模型坐标系是不变的. 因此, 只需知道模型坐标系间的相对位姿关系, 就可以快速将改进包围盒中心位置转换到同一坐标系下. 式(1)的相对位姿是两杆件模型的旋转点之间的位姿. 杆件模型旋转中心为杆件坐标系原点, 在杆件模型坐标系下, 包围盒的相对姿态 $\mathbf{T}_a^b$ 不随点移动而变化. 可以得到不同包围盒的中心相对姿态, 即

$$\mathbf{M}_{ac}^{bc} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_a^b & -\mathbf{i} + \mathbf{j} \\ 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

式(2)中: $\mathbf{M}_{ac}^{bc}$ 包围盒中心点相对位姿; $\mathbf{i}$ 为杆件模型 a 的中心在自身坐标系下的位置矢量; $\mathbf{j}$ 为杆件模型 b 的中心在 a 坐标系下的位置矢量.

把不同包围盒坐标转换到同一坐标系后, 依据分离轴理论, 经过 15 次投影判断, 就可以快速判断包围盒是否碰撞.

3.2 精确检测

八叉树层数越多, 包围盒就越能准确地包围模型, 碰撞检测结果也就越近似模型碰撞结果. 但如果仅依靠增加八叉树层数来提高判断精度, 模型碰撞会产生误判, 使正常加工难以进行. 这是因为采用层次包围盒并不能精确表示模型, 包围盒碰撞检测只能确定可能发生碰撞的区域, 并不能确定工业机器人模型在该区域发生碰撞. 当八叉树层数超过一定数目时, 系统会占用很大的内存, 造成程序不能顺畅运行. 所以, 判断模型是否产生碰撞, 不能仅通过增加八叉树层数, 而需要新的方法来进行精确碰撞检测.

虽然机器人造型的软件各不相同, 但一般通过软件建立的模型都是由三角网格面构成的. 模型的三角网格就可以精确表示模型, 所以对模型进行精确的碰撞检测就可以变成对不同杆件模型之间的三角

网格求交的问题. 只要三角面片相交, 对应的两个模型就会发生碰撞.

粗略碰撞检测确定了碰撞区域后, 可以通过索引直接获得区域的三角形序号 i 及三角形的三个顶点坐标 p_0, p_1, p_2 ; 然后采用 Devillers 算法, 即通过两个三角形的顶点构成的行列式的正负来判断点与面之间的相对位置; 接着计算与平面的交点的位置是否在三角形内, 判断两个三角形是否产生干涉, 流程如图 5 所示.

求线段两端点相对三角形的位置函数为 `bool vector4_det(float3 p0, float3 p1, float3 p2, float3 p3, float3 p4)`; 求线段与三角形交点的位置函数为 `bool ValidPoint(float3 p0, float3 p1, float3 p2, float3 p3, float3 p4)`. 其中, p_0, p_1, p_2 是 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 的三个顶点坐标; p_3, p_4 是 $\triangle p_3 p_4 p_5$ 两顶点 p_3 和 p_4 坐标. 通过函数 `vector4_det` 的返回值来判断线段 $p_3 p_4$ 的两端点相对 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 的位置, 如果是 `true` 就表示 p_3 和 p_4 在 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 异侧; 否则, 就是同侧. 通过函数 `ValidPoint` 的返回值判断线段与三角形交点的位置, 如果是 `false`, 则线段 $p_3 p_4$ 与 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 的交点不在 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 内, $\triangle p_3 p_4 p_5$ 中的线段 $p_4 p_5$ 和 $p_3 p_5$ 重复判断线段 $p_3 p_4$ 的过程; 如果是 `true`, 则 $\triangle p_0 p_1 p_2$ 和 $\triangle p_3 p_4 p_5$ 相交, 可判定杆件模型产生碰撞. 重复区域内所有的三角形之间的干涉检测, 只要有一次判断干涉, 工业机器人就产生碰撞.

4 软件仿真实实现实例

定义 `ModelContext` 类存储读入的杆件的基本属性; 定义 `GSMatrix4X4_f` 四维矩阵存储杆件的位置和姿态; 定义 `COctree` 类存储八叉树的子节点、深度、索引号等信息; 定义 `CVector` 类存储点坐标和矢量坐标等.

应用 `VC++` 和 `OpenGL` 进行软件编程. 读入杆件模型文件和装配信息文件, 把基本信息属性存储在 `ModelContext` 类, 把杆件模型的位置和姿态存储在 `GSMatrix4X4_f` 类. 根据 `ModelContext` 类和 `GSMatrix4X4_f` 类的数据信息建立改进的层次包围盒(图 6(a)), 并把包围盒的数据存储在 `COctree` 类里. 依据 `COctree` 类和 `GSMatrix4X4_f` 类的数据信息可以进行粗略的碰撞检测(图 6(b)). 精确碰撞检测(图 6(c))则需要 `ModelContext` 类、`COctree` 类和 `GSMatrix4X4_f` 类的的数据, 得出碰撞的精确检测. 通过时间测量, 构造 `AABB` 包围盒并完成精确检测约需要 5.6 ms, 构造 `OBB` 包围盒并完成精确检测约需要 5.5 ms, 而构造改进的包围盒并完成精确检测约需要 5 ms, 减少了检测时间.



图 6 软件实现的过程示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the software implement

5 结束语

采用三维建模软件建立工业机器人模型, 用 `VC++` 编程读取模型文件并显示, 这种方法可以快速建立比较复杂的模型. 首先, 在各自模型的坐标系下建立对应的包围盒; 其次, 通过坐标系间的变换关系, 把包围盒坐标转换到同一个坐标系下, 再应用分离轴理论进行包围盒碰撞检测; 然后, 利用三角形求交

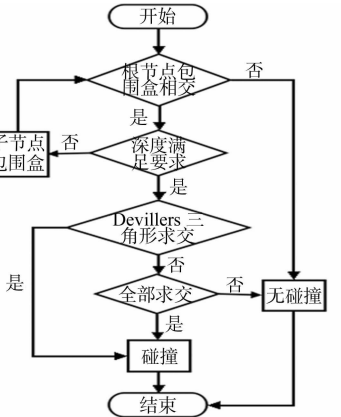


图 5 碰撞检测的流程图
Fig. 5 Flow charts of collision detection

的方法进行精确检测;最后,生成一个实例程序完成碰撞检测的整个过程.通过时间测量,改进的算法提高了检测速度.

参考文献:

[1] 孙志杰,王善军,张雪鑫.工业机器人发展现状与趋势[J].吉林工程技术师范学院学报,2011,27(7):61-62.

[2] 刘雄伟.基于三角面片检测的五轴数控加工碰撞干涉检测智能算法研究[D].广州:广东工业大学,2011:1-4.

[3] 邹益胜,丁国富,许明恒,等.实时碰撞检测算法综述[J].计算机应用研究,2008,25(1):8-10.

[4] GARCIA-ALONSO A,SERRANO N,FLAUER J. Solving the collision detection problem [J]. IEEE Computer Graphics and Applications,1994,14(3):36-43.

[5] GOTTSCHALK S. Collision queries using oriented bounding boxes[D]. North Carolina:University of North Carolina at Chapel Hill,2000:64-86.

[6] GOTTSCHALK S,LIN M,MANOCHA D. OBBtree: A hierarchical structure for rapid interference detection[C]// Proceedings of the 23rd Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. New Orlean:ACM,1996:171-180.

[7] WANG Yao,HU Yan-juan,FAN Jiu-chen. Collision detection based on bounding box for NC machining simulation [J]. Physics Procedia,2012,24(1):247-252.

[8] CHANG J W,KIM M S. Efficient triangle-triangle intersection test for OBB-based collision detection[J]. Computer and Graphics,2009,33(3):235-240.

[9] 侯俊杰.深入浅出 MFC[M]. 2 版. 武汉:华中科技大学出版社,2001:309-334.

[10] 牛书涛,库祥臣.基于 Visual C++ 与 OpenGL 的数控车削加工仿真系统研究[J].机电一体化,2012,8(3):35-39.

[11] 吴明华,余勇翔,周济.采用空间分割技术的八叉树干涉检验算法[J].计算机学报,1997,20(9):849-854.

[12] 吴峰,于东,张晓辉,等.数控机床实时碰撞检测算法的研究与实现[J].组合机床与自动化加工技术,2011(12):49-51.

[13] 于靖军,刘辛军,丁希仑,等.机器人机构学的数学基础[M]. 北京:机械工业出版社,2008:278-281.

Simulation of Industrial Robot Motion Collision

CHEN Sheng-fen, XIE Ming-hong

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In the collision detection of the industrial robot model, an improved octree method based on combination of AABB and OBB is put forward. Firstly, in various rod model coordinates, each improved bounding box of manipulator model by octree is built; secondly, the triangles numbers in the model box are stored in an array of corresponding leaf nodes; and the pose of bounding box is translated to the pose in the base coordinates systems, then collision detection is done using OBB separation axis theory; next, the corresponding triangle in the leaf nodes is found by index ordinal, then triangular surface precise intersection is done; finally, an application is built and simulated. The results have proven that the application can quickly and accurately detect the collision and run smoothly.

Keywords: bounding box; separation axis; collision detection; leaf node

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:杨建红)

应用小波变换和支持向量机的 商业电力负荷预测

杨屹洲¹, 方瑞明¹, 黄文权¹, 梁颖¹, 汪亮²

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门埃锐圣电力科技有限公司, 福建 厦门 361002)

摘要: 提出一种基于小波分解和支持向量机相结合的模式, 将其应用于预测商业建筑电力负荷. 首先, 基于商业建筑配电系统的数据采集系统实时监测数据, 分析商业负荷用电特性, 指出商业负荷的随机特性造成单一预测模型精度难以满足要求. 其次, 提出了一种基于小波分解和粒子群支持向量机的商业电力负荷预测算法. 通过小波变换把负荷序列分解为不同频段的子序列, 再对这些子序列分别采用不同的粒子群支持向量机模型进行预测, 引入粒子群算法对支持向量机模型参数进行寻优. 最后, 将各分量预测值重构得到最终预测值. 实验结果证明: 小波分解后和粒子群支持向量机相结合的模型精度明显优于单一支持向量机模型.

关键词: 商业电力; 负荷预测; 支持向量机; 小波分解; 节能; 数据采集系统; 粒子群算法

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

随着经济的高速发展和城市化进程的不断加快, 商业用电在能源消耗中所占比重越来越大. 对商业建筑电力负荷进行准确预测, 能够使管理者及时掌握用电情况, 灵活调整用电节能策略, 这对于提高商业建筑的用电效率和节能降耗具有十分重要的意义^[1]. 目前, 预测模型大多是依据天气和历史负荷数据对商业电力负荷进行预测^[1-5], 常用的预测模型主要有: 人工神经网络法、支持向量机法、时间序列法等. 其中支持向量机(SVM)是根据结构风险最小化准则取得最小的实际风险, 在电力负荷预测领域已取得较好的效果^[6-7]. 商业建筑配电系统安装的数据采集系统 SCADA(supervisory control and data acquisition)采集到的负荷数据表明: 商业电力负荷有明显的日、周、月、年等周期变化的特性, 包含规律性较好的低频分量; 然而受到天气等随机因素的影响, 又具有波动性较大的高频分量. 单纯使用 SVM 模型对负荷进行预测, 无法反映出众多不同规律的叠加影响, 短期规律被极大削弱、甚至消失. 而适当的小波变换能有效地分离和提取负荷不同的周期性、非线性和依赖关系, 使每个分解序列都具有较好的规律性^[8]. 因此, 本文提出了一种将小波变换和粒子群优化 SVM 相结合的组合预测模型——小波粒子群支持向量机(PSO-WSVM), 并用其对商业电力负荷进行预测.

1 小波变换

多尺度小波分解可通过 Mallat 算法实现, 即

$$c_{j+1} = Hc_j, \quad d_{j+1} = Gc_j, \quad (1)$$

式(1)中: c_j 和 d_j 分别为低通滤波器和高通滤波器输出对应信号的高频部分(细节分量)和低频部分(近似分量), $j=0, 1, \dots, J$, J 为最大分解层数.

经滤波分解会产生多于原数据点的数据序列, 因此, Mallat 算法分解后的信号, 可采用降采样的方

收稿日期: 2013-11-26

通信作者: 方瑞明(1972-), 男, 教授, 博士, 主要从事电气装置智能诊断、特种电机分析与设计的研究. E-mail: fangrm@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2012J01223)

法完整包含原信号的信息内容^[9].

2 支持向量回归算法

支持向量机算法应用于回归领域,先给定 i 组关系未知的样本 $(\mathbf{x}_1, y_1), (\mathbf{x}_2, y_2), \dots, (\mathbf{x}_i, y_i)$, 其中 $\mathbf{x}_i$ 为输入向量, y_i 为输出值. 采用的回归函数为

$$f(x) = \omega \varphi(x) + b. \tag{2}$$

$\varphi(x)$ 将 x 映射到 l 维特征空间中, 在该特征空间中进行线性回归, 回归问题转化优化问题为

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} \|\omega\|^2 + C \frac{1}{l} \sum L_\epsilon(y_i, f(\mathbf{x}_i)). \tag{3}$$

式(3)中: 第 1 项是使函数更为平坦, 从而提高函数的泛化能力; 第 2 项为减小误差.

采用 ϵ 不灵敏惩罚函数, 常数 $C > 0$ 控制对超出误差样本的惩罚程度, 且有

$$L_\epsilon(y_i - f(\mathbf{x}_i), \mathbf{x}_i) = \max(|y_i - f(\mathbf{x}_i)| - \epsilon, 0). \tag{4}$$

寻找核函数 $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j)$, 可将问题转化对偶优化问题, 即

$$\left. \begin{aligned} \min_{i=1}^N \quad & \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^N (a_i^* - a_i)(a_j^* - a_j) K(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) + \epsilon \sum_{i=1}^N (a_i^* - a_i) - \sum_{i=1}^N y_i (a_i^* - a_i), \\ \text{s. t.} \quad & \sum_{i=1}^N (a_i - a_i^*) = 0, \quad 0 \leq a_i - a_i^* \leq \frac{C}{N}. \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

并求得最优解为

$$\bar{\mathbf{a}} = [\bar{a}_1, \bar{a}_1^*, \dots, \bar{a}_N, \bar{a}_N^*],$$

从而构造回归函数, 有

$$f(x) = \sum_{i=1}^N (\bar{a}_i^* - \bar{a}_i) K(x, \mathbf{x}_i) + \bar{b}, \tag{6}$$

$$\bar{b} = y_i - \sum_{j=1}^N (\bar{a}_j^* - \bar{a}_j) K(x, \mathbf{x}_i) + \epsilon. \tag{7}$$

3 预测模型

商业电力负荷预测流程图, 如图 1 所示. 预测过程为: 1) 首先将商业建筑 SCADA 系统采集的负荷序列数据进行小波分解; 2) 应用支持向量机分别针对不同的分量进行预测, 获取各分量的预测值, 流程如图 2 所示; 3) 将各分量对应的预测结果重构得到最终预测值.

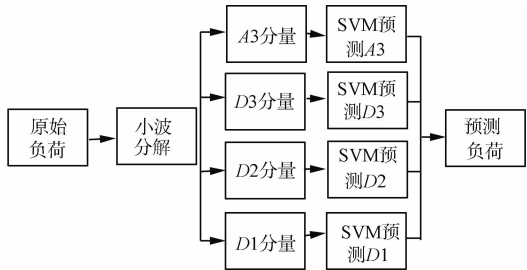


图 1 商业电力负荷预测流程图

Fig. 1 WSVM load forecasting model

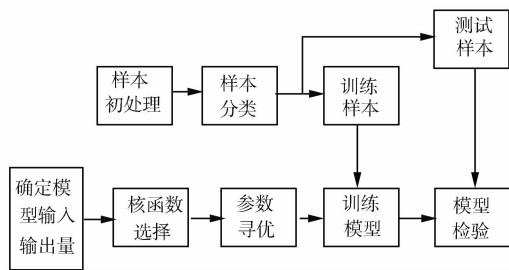


图 2 SVM 回归建模流程图

Fig. 2 Flow chart of SVM modeling

4 实例仿真

4.1 小波分解

选用了厦门某商场连续 600 h 的历史负荷数据, 采用 db3 小波基进行小波分解^[10]. 原始负荷及其分解后的各分量曲线, 如图 3 所示. 图 3 中: a_0 为原始负荷曲线, 由于商场用电高峰时段有较频繁的负荷波动, 这给预测结果准确性的提高增加了难度; a_3 为分解后序列的低频部分, 是负荷的基荷部分, a_3

曲线降低了负荷序列的非平稳性特征,具有明显的日周期性,并保持了原负荷曲线的基本形状,因此,可预测性较强;高频分量 d_2 、 d_3 具有隐含的日周期性;高频分量 d_1 数值较小,表现出较强的随机性.

4.2 各分量进行 SVM 建模

4.2.1 输入量的选择 对于商业负荷短期预测,其输入量的选择对负荷预测的精度有很大影响,而影响负荷变化的因素多种多样.参考文献[11],结合商业负荷特性进行分析,影响商业负荷变化的因素主要有:周期性变化因素、相似日因素和天气变化因素.各分量预测模型的输入量,如表 1 所示.表 1 中: $P_{LA3}(d,h)$, $P_{LD3}(d,h)$, $P_{LD2}(d,h)$, $P_{LD1}(d,h)$ 表示各分量负荷序列在第 d 天, h 时刻的负荷; T_{avg} 表示日平均气温; F 表示天气类型; D 表示日期类型.

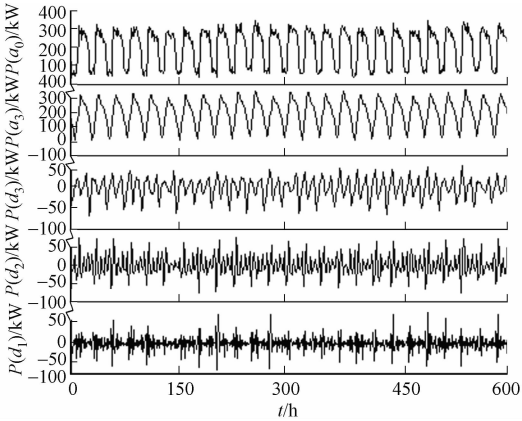


图 3 原始负荷曲线及其小波分解分量
Fig. 3 Original load curves and its wavelet decomposition components

表 1 各分量预测模型输入量
Tab. 1 Input of each components of the forecasting models

分量	各层输入变量
A3	$P_{LA3}(d-7,h), P_{LA3}(d-2,h), P_{LA3}(d-1,h), P_{LA3}(d-1,h-1), P_{LA3}(d-7,h+1), T_{avg}(d), F(d), D(d),$
D3	$P_{LD3}(d-7,h), P_{LD3}(d-2,h), P_{LD3}(d-1,h), P_{LD3}(d-1,h-1), P_{LD3}(d-7,h+1), T_{avg}(d), F(d), D(d)$
D2	$P_{LD2}(d-7,h), P_{LD2}(d-2,h), P_{LD2}(d-1,h), \cdots, P_{LD2}(d-1,h-11)$
D1	$P_{LD1}(d-7,h), P_{LD1}(d-2,h), P_{LD1}(d-1,h), \cdots, P_{LD1}(d-1,h-11)$

4.2.2 模型参数的选择 选择径向基函数作为 ϵ -SVR 模型的核函数^[12]. 研究中发现:惩罚系数 C 和核宽参数 σ 的选择对 SVM 回归估计的精度影响很大,PSO 对模型参数进行寻优. 粒子群算法具有分布性、自组织性、鲁棒性强等优点,已被成功地应用于函数优化、神经网络等领域^[13]. PSO 对各层 SVM 模型参数进行以下寻优步骤.

- 步骤 1 初始化得到一群随机粒子(随机解),设其种群规模为 20,最大迭代次数为 200.
- 步骤 2 通过 libsvm 调用训练数据集,使用当前解作为参数进行回归训练,使用训练精度作为其函数适应值.
- 步骤 3 通过对适应值的比较,更新个体最优值 p_{best} 和全局最优值 g_{best} .
- 步骤 4 更新粒子速度和位置为

$$v_{i+1} = \omega \cdot v_i + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (p_{best} - x_i) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (g_{best} - x_i),$$

(8)

$$x_{i+1} = x_i + v_{i+1}.$$

(9)

式(8),(9)中: ω 是惯性因子; $\text{rand}()$ 代表 0 到 1 之间的随机数; x_i 是粒子位置; v_i 为粒子速度; p_{best} 和 g_{best} 是粒子群搜索到的个体最优值和全局最优值.

步骤 5 判断是否满足迭代次数,若是则停止迭代,输出最优解;若否,则转至步骤 2^[14].

使用粒子群法对各层 SVM 模型参数寻优之后,分别采用模型对预测日各层分量进行预测,最后重构. 将预测日 24 h PSO 和网格寻优结果与误差进行对比,测试结果如表 2 所示. 表 2 中: E_{MAPE} 为平均相对误差. 由表 2 可知: PSO-WSVM 的精度高于网格法 WSVM.

表 2 两种算法得到的最优参数和测试结果
Tab. 2 Optimal parameters and result of two algorithms

WSVM	A3		D3		D2		D1		$E_{MAPE}/\%$
	C	σ	C	σ	C	σ	C	σ	
PSO	100	0.503 12	1.053 6	0.010 0	0.100 00	1.752 3	8.265 2	0.010 00	4.43
网格法	4	0.125 00	9.189 6	3.031 4	0.108 82	3.031 4	0.062 5	0.031 25	4.93

4.3 预测结果分析

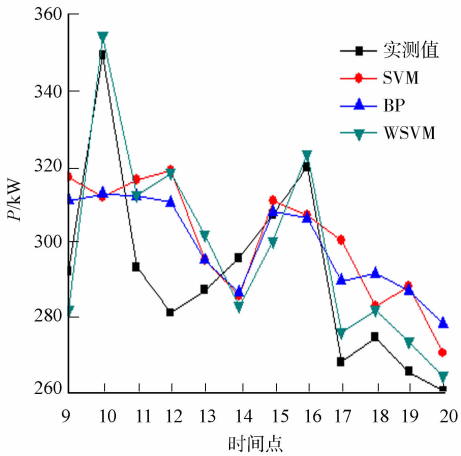
选取厦门市某商场 380 V 母线预测日的前 4 周,共 672 h 的历史负荷数据作为训练样本,提前预测日一日进行连续预测.表 3 为 24 h 预测误差指标.表 3 中:平均相对误差为 E_{MAPE} ;均方误差为 E_{MSE} ;最大绝对误差为 E_{MAE} .从表 3 中可以看出:PSO-WSVM 在 E_{MAPE} , E_{MSE} , E_{MAE} 上均优于其他两种模型,并能达到实际应用要求.

采用文中方法训练的预测模型,休息日和工作日的预测结果,如图 4 所示.图 4 中:9:00 至 20:00 是商场客流量较大的时间段.为了进一步探讨模型性能,同时采用 SVM 和 BP 神经网络预测模型进行对比研究.从图 4 可以看出:3 种模型都较好地跟踪了商业负荷的变化趋势,体现了 3 种预测模型的有效性,PSO-WSVM 在负荷曲线突变处和总体的预测精度好于其他方法.

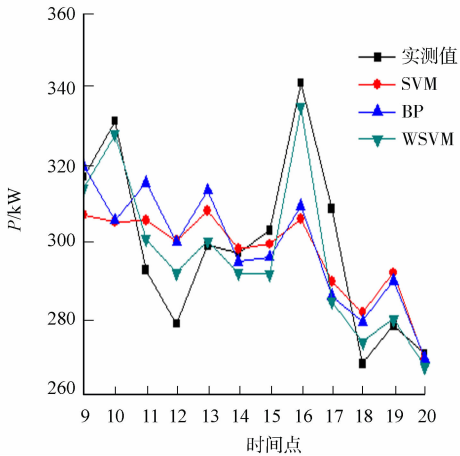
表 3 3 种预测模型预测误差

Tab.3 Error comparison of the three forecasting models

预测方法	工作日			休息日		
	$E_{MAPE}/\%$	$E_{MSE}/\%$	E_{MAE}/kW	$E_{MAPE}/\%$	$E_{MSE}/\%$	E_{MAE}/kW
SVM	6.67	8.78	37.6	7.30	9.58	35.5
BP	6.94	8.81	36.9	7.74	11.10	37.3
PSO-WSVM	4.43	5.70	35.2	5.66	8.32	33.1



(a) 工作日



(b) 休息日

图 4 工作日负荷预测结果

Fig.4 Forecasting load for workday

5 结论

基于 SCADA 系统,采用小波变换和 SVM 相结合的模型对商业电力负荷预测进行了研究.利用小波变换对商业负荷序列进行分解,获得的分量规律性更强.对不同分量建立不同的 SVM 模型使负荷预测更具针对性.实验结果表明:与网格 WSVM 和直接使用 SVM 及 BP 神经网络的预测结果相比,应用文中方法得到预测精度更高,并且易于推广到其他地区和建筑.

参考文献:

[1] DONG Bing,CAO Cheng,LEE S E. Applying support vector machines to predict building energy consumption in tropical region[J]. Energy and Buildings,2005,37(5):545-553.

[2] KISSOCK J K. A methodology to measure retrofit energy savings in commercial buildings[D]. Texas:Texas A and M University,1993:32-57.

[3] DHAR A,REDDY T A,CLARIDGE D E. A fourier series model to predict hourly heating and cooling energy use in commercial buildings with outdoor temperature as the only weather variable[J]. Journal of Solar Energy Engineering,1999,121(1):47-53.

[4] DONG B,LEE S E,SAPAR M H. A holistic utility bill analysis method for baselining whole commercial building energy consumption in Singapore[J]. Energy and Building,2005,37(2):167-174.

[5] GUILLERMO E. New artificial neural network prediction method for electrical consumption forecasting based on building end-uses[J]. Energy and Building,2011,43(11):3112-3119.

[6] 方瑞明. 支持向量机理论及其应用分析[M]. 北京:中国电力出版社,2007:15-19.

[7] 曾劭炜,徐知海,吴键. 基于粒子群优化和支持向量机的电力负荷预测[J]. 微电子与计算机,2001,28(1):147-153.

[8] 王红瑞,刘晓红,唐奇,等. 基于小波变换的支持向量机水文过程预测[J]. 清华大学学报:自然科学版,2010,50(9):1378-1381.

[9] 张华,郁永静,冯志军. 基于小波分解与支持向量机的风速预测模型[J]. 水利发电学报,2012,31(1):208-212.

[10] 韩勇,李红梅. 基于小波分解的支持向量机母线负荷预测[J]. 电力自动化设备,2012,32(4):88-91.

[11] 李元诚,方廷健,郑国祥. 短期电力负荷预测的小波支持向量机方法研究[J]. 中国科学技术大学学报,2003,33(6):726-732.

[12] 梁颖,方瑞明. 基于 SCADA 和支持向量回归的风电机状态在线评估方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):8-12.

[13] 付宝英,王启志. 自适应粒子群优化 BP 神经网络的变压器故障诊断[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2013,34(3):262-266.

[14] 路志英,李艳英,陆洁,等. 粒子群算法优化 RBF-SVM 沙尘暴预报模型参数[J]. 天津大学学报:学报自然科学版,2008,41(4):413-418.

Commercial Power Load Forecasting Using
Wavelet Transform and SVM

YANG Yi-zhou¹, FANG Rui-ming¹, HUANG Wen-quan¹,
LIANG Ying¹, WANG Liang²

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Akson Power Technology Limited, Xiamen 361002, China)

Abstract: A model based on wavelet transform and support vector machine (SVM) was proposed, and which is applied to power load forecasting of commercial buildings. Firstly, this paper is based on real time monitoring data of the data acquisition system of the electrical distribution system for commercial buildings which analyzes the characteristics of commercial model load, and states the fact that the precision of single forecasting model is difficult to meet the requirement because of the random characteristic of commercial load. Secondly, a predictive algorithm for commercial power load based on wavelet transform and particle swarm optimization (PSO)-SVM is proposed through the wavelet transform decomposition of load sequence into the components of different frequencies, then a PSO-SVM model is built for each component to forecast and the PSO algorithm is used to output the optimal parameters. Finally, reconstruct the forecasting result of each component to obtain the final forecast. Experimental result shows that the wavelet PSO-SVM model is a more accurate model to predict electricity consumption than that of the model only based on SVM.

Keywords: commercial power; load forecasting; support vector machine; wavelet transform; saving energy; data acquisition system; particle swarm optimization

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对 无衍射光束的聚焦特性

陈姿言, 何艳林, 陈婧, 吴逢铁

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 分析圆顶轴棱锥与理想轴棱锥对 Bessel 光束的聚焦特性. 基于广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分理论推导出 Bessel 光经过理想轴棱锥和圆顶轴棱锥后的光强表达式, 并对理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦的 Bessel 光束的传输特性进行描述, 数值模拟不同截面下的光强分布图和径向光强分布图. 研究表明: 圆顶轴棱锥和理想轴棱锥都可以产生周期性的局域空心光束(Bottle beam), 但是相比于理想轴棱锥, 圆顶轴棱锥所产生的 Bottle beam 周期较短, 并且中心光强较强, 暗斑尺寸较小.

关键词: 理想轴棱锥; 圆顶轴棱锥; 局域空心光束; 贝塞尔光束

中图分类号: O 436.1

文献标志码: A

由于无衍射光的特殊性质, 使它得到广泛的研究和应用, 国内外已用多种光学元件实现了近似无衍射贝塞尔光束. 轴棱锥是目前用于产生无衍射光束最常用的光学元件之一, 它是 1954 年由 Mcleod 提出来的非球面线聚焦透镜^[1-2], 利用轴棱锥产生无衍射光束具有转换效率高、光损伤阈值大, 可直接成腔等优点. 无衍射 Bessel 光束经轴棱锥聚焦后可直接产生局域空心光束(Bottle beam), 这是一种在传播方向上中心光强为零, 在此区域外三维空间都围绕着高强度的光. 理想轴棱锥是常用的产生 Bessel 光束的轴棱锥, 它聚焦无衍射 Bessel 光束能够产生周期性的 Bottle beam, 但其中心光斑最弱的地方光强并不为零, 散射作用较强, 对要囚禁的粒子有一定的损伤, 且其光强梯度不大. 由于理想轴棱锥对尖顶的加工要求精度非常高, 稍有误差可能就会变成圆顶轴棱锥^[3], 它的圆顶部分平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后, 产生多个具有高强梯度的 Bottle beam^[4]. 目前, 国内外已将轴棱锥对无衍射光的聚焦特性这个理论应用在各个领域. 何西等^[5-6]提出的新型 LED 透镜产生光学 Bottle beam 以及非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束; Craig Snoeyink 等^[7]提出的贝塞尔光束显微镜(BBM), 都为此项研究开辟了新的方向. 本文是通过对比理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光的聚焦特性进行比较, 分析各自产生周期性 Bottle beam 的优缺点.

1 理论分析与数值模拟

1.1 理想轴棱锥对无衍射光束的聚焦特性

光束入射到理想轴棱锥上的无衍射光束的光场分布^[8]为

$$E_1(r_1) = A_0 J_0(k_r \cdot r_1), \tag{1}$$

式(1)中: $A_0 = 1$ 是复振幅常数; $k_r = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma$ 是径向波矢分量, γ 为轴棱锥底角; r_1 是径向坐标.

轴棱锥的透过率函数为 $t(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r]$, 用理想轴棱锥对无衍射 Bessel 光束进行聚焦,

收稿日期: 2014-10-29

通信作者: 吴逢铁(1958-), 男, 教授, 博士, 主要从事光束传输与变换, 短脉冲技术及非线性光学的研究. E-mail: fengtie@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61178015); 福建省科技创新平台计划项目(2012H2002); 福建省泉州市科技重点项目资助课题(2014Z127, 2012Z97)

可以得到轴棱锥后的光场分布为

$$E(r,z)=-\frac{ik}{z}\exp(ikz)\exp(ik\frac{r^2}{2z})\int_0^bE_1(r_1)J_0(\frac{krr_1}{z})(t(r_1)\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-ik(n-1)\gamma r_1)r_1dr_1. \tag{2}$$

光强分布为

$$I(r,z)=\frac{k^2}{z^2}|\int_0^bE_1(r_1)J_0(\frac{krr_1}{z})(t(r_1)\exp(\frac{ikr_1^2}{2z})r_1dr_1|^2. \tag{3}$$

式(3)中:波数 $k=2\pi/\lambda$; n 为轴棱锥的折射率; b 为无衍射光束入射到轴棱锥的光束半径. 根据式(3)取参量:波长 $\lambda=632.8\text{ nm}$; 轴棱锥底角 $\gamma=1^\circ$; 轴棱锥折射率 $n=1.458$; 波数 $k=2\pi/\lambda$; $b=z_0(n-1)\beta$; $r=0.4\text{ mm}$. 两轴棱锥之间的距离 $f=300\text{ mm}$ 进行模拟仿真, 得到不同截面光强分布图和径向光强分布图, 如图 1 所示.

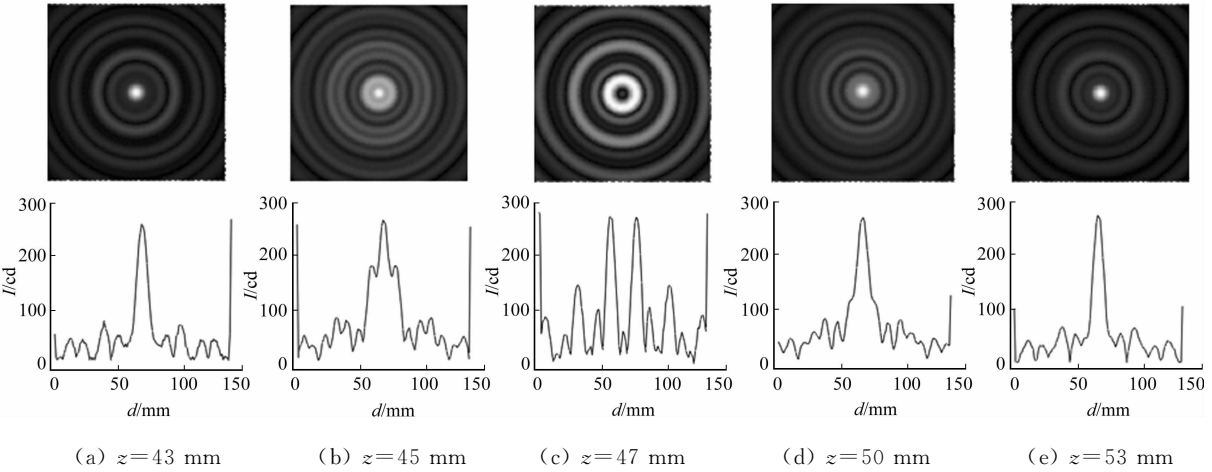


图 1 理想轴棱锥模拟所得不同距离的截面光强和径向光强分布图

Fig. 1 Intensity distribution of cross section at different propagation distance and intensity distribution of radial in simulation of ideal axicon

由图 1 可以看出:光斑经历了从轴上中心光强最强(图 1(a))到中心光强最弱(图 1(c))再到光斑中心光强最强的过程, 而图 1(e)中光斑又恢复到初始状态(图 1(a))的光斑, 其周期约为 10 mm .

1.2 圆顶轴棱锥的聚焦特性

圆顶轴棱锥如图 2(a)所示, 其聚焦的基本原理是利用圆顶部分平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉, 产生多个具有高强梯度的局域空心光束^[9].

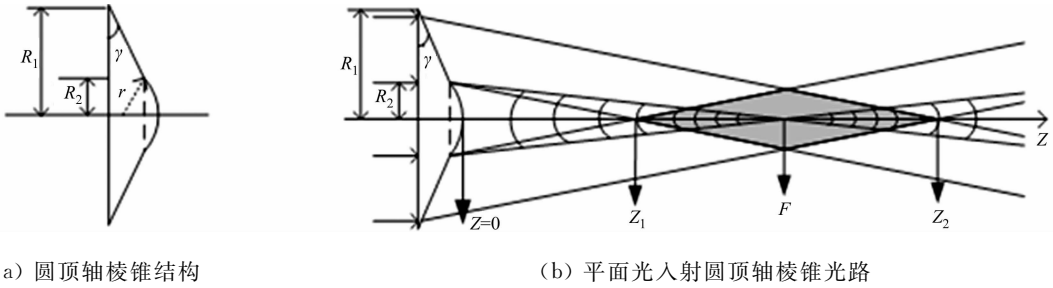


图 2 圆顶轴棱锥原理图

Fig. 2 Schematic diagram of vaulted axicon

如图 2(b)所示, 当平面波入射圆顶轴棱锥时, 被分为两部分:第一部分为 $0<R<R_2$ 的区域, 经过该区域的光线被平凸透镜汇聚于焦点 F 处;第二部分为 $R_2<R<R_1$ 的区域, 该区域的光线经过底角为 γ 的轴棱锥产生锥面波^[10]. 根据柯林斯公式可求得两部分光场经圆顶轴棱锥变换后的场强分布^[11]分别为

$$E_1(r_2,z)=-\frac{ik}{z}\exp[ik(z+\frac{r_2^2}{2z})]\int_0^{R_2}E_0J_0(\frac{kr_1r_2}{z})\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-\frac{ikr_1^2}{2f})r_1dr_1, \tag{4}$$

$$E_2(r_2,z)=-\frac{ik}{z}\exp[ik(z+\frac{r_2^2}{2z})]\int_0^{R_2}E_0J_0(\frac{kr_1r_2}{z})\exp(\frac{ikr_1^2}{2z}-ik(n-1)\gamma r_2)r_2dr_2. \tag{5}$$

式(4)~(5)中: $k=2\pi/\lambda$ 为波矢; r_1, r_2 分别为圆顶轴棱锥入射面和光场接收面的径向坐标; E_0 为入射光

场; n 为轴棱锥的折射率. 圆顶轴棱锥后的光场为 E_1 和 E_2 的相干叠加, 光强分布为

$$I(r_2, z) = |E_1(r_2, z) + E_2(r_2, z)|^2. \quad (6)$$

式(6)中: I 为光强; Z 为柱坐标系的轴向坐标. 取参量 $\lambda = 632.8 \text{ mm}$, $n = 1.458$, $\gamma = 1^\circ$, $R_1 = 4 \text{ mm}$, $R_2 = 1.4 \text{ mm}$, $f = 300 \text{ mm}$, 根据式(4)~(6)进行模拟仿真可得不同距离处的截面光强分布图和径向光强分布图, 如图 3 所示.

由图 3 可知: 光斑经历了从轴上中心光强最强(图 3(a))到中心光强最弱(图 3(c))再到光斑中心光强最强的过程^[12], 而图 3(e)中光斑又恢复到初始状态(图 3(a))的光斑, 其周期约为 8 mm .

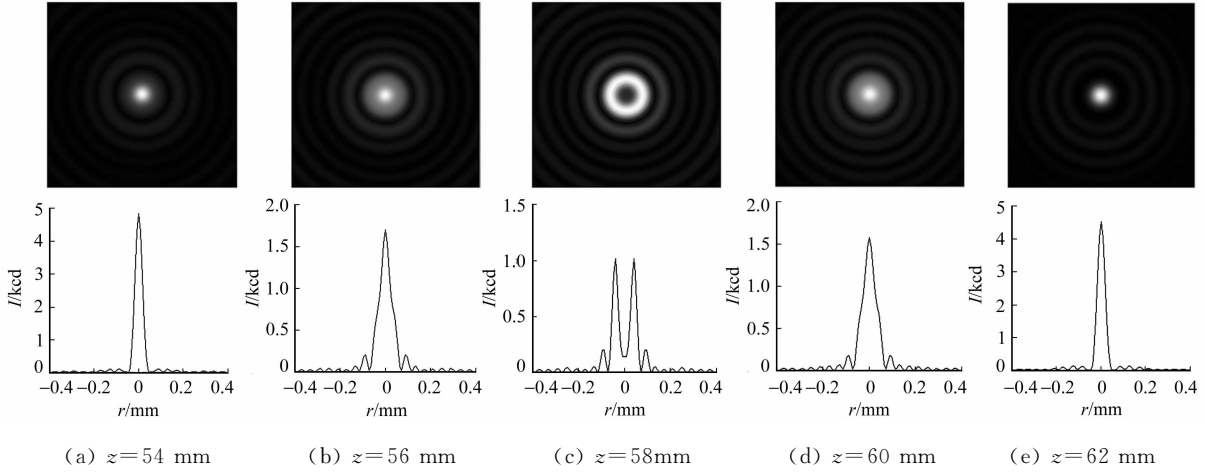


图 3 圆顶轴棱锥模拟所得不同距离的截面光强和径向光强分布图

Fig. 3 Intensity distribution of cross section at different propagation distance and intensity distribution of radial in simulation of vaulted axicon

2 比较与分析

理想轴棱锥与圆顶轴棱锥都可以产生 Bottle beam^[13], 但对比图 1 和图 3, 圆顶轴棱锥产生的 Bottle beam 中心光强相比理想轴棱锥较强, 更利于对粒子的囚禁, 并且圆顶轴棱锥圆顶部分形成的平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后, 可以产生多个具有高强梯度的局域空心光束^[14]. 而高强度梯度的局域空心光束可以对处于暗域处的粒子施以大的散射力, 将粒子稳固地囚禁在暗域处, 提高了囚禁粒子的效率. 从图 1 和图 3 中也可看出: 理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期, 为了更好地比较 Bottle beam 的周期, 将利用公式计算出理论值, 从而验证模拟值的正确性.

由文献[15]可知: 根据干涉产生局域空心光束的周期公式, 则有

$$Z_T = \left| \frac{2\pi}{k'_z - k_z} \right|. \quad (7)$$

式(7)中: $k_z = \sqrt{k^2 - [(n-1)\gamma k]^2}$ 为 Bessel 光束的轴向波矢分量; k'_z 为球面波的轴向波矢分量, 即

$$k'_z = k \frac{f}{\sqrt{f^2 + r^2}}. \quad (8)$$

由式(8)可以得出: 球面波的轴向波矢分量与径向距离 r 有关, 而在圆顶轴棱锥中 $r = (R_1 + R_2)/\gamma$.

利用式(7)和式(8)可以计算 Bottle beam 的周期, 则计算出理想轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期 $Z_T = 10.56 \text{ mm}$, 与图 1 模拟所得的周期 10 mm 基本相符. 计算出圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期 $Z_T = 7.67 \text{ mm}$, 与图 3 模拟所得的周期 8 mm 基本相符. 由此可以得出: 相比于理想轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期, 圆顶轴棱锥聚焦产生 Bottle beam 的周期较短, 对控制微粒的准确度更高, 更有利于 Bottle beam 对粒子的囚禁^[16].

3 结论

基于广义的惠更斯-菲涅耳衍射积分理论推导出 Bessel 光经过理想轴棱锥和圆顶轴棱锥后的光强

表达式,并对理想轴棱锥与圆顶轴棱锥对无衍射光束的聚焦进行了分析.数值模拟了不同截面的光强分布和径向光强分布,并计算了理想轴棱锥与圆顶轴棱锥聚焦所产生的局域空心光束的周期.

将两类轴棱锥对比后得出,理想轴棱锥与圆顶轴棱锥都可以产生周期性的 Bottle beam,理想轴棱锥所产生的 Bottle beam 质量较好,而圆顶轴棱锥所产生的 Bottle beam 周期较短,对控制微粒的准确度更高,并且圆顶轴棱锥圆顶部分形成的平凸透镜的聚焦将光场能量集中在焦点附近与锥面波干涉后,产生多个具有高强梯度的局域空心光束,更利于对粒子的控制.

参考文献:

- [1] 杜团结,王涛,吴逢铁.轴棱锥对无衍射光束的线聚焦特性[J].物理学报,2013,62(13):134103.
- [2] 吴逢铁,陈婧,程治明.圆顶轴棱锥底角及焦距对局域空心光束的影响[J].强激光与粒子束,2013,25(3):569-573.
- [3] 程治明,吴逢铁,方翔,等.圆顶轴棱锥产生多个局域空心光束[J].物理学报,2012,61(21):2142011-2142015.
- [4] 江新光,吴逢铁,邱振兴.不同轴棱锥的光传输特性[J].光学学报,2009,29(6):1659-1663.
- [5] 何西,杜团结,吴逢铁.新型 LED 透镜产生光学 Bottle beam[J].物理学报,2014,63(7):074201.
- [6] 何西,吴逢铁,李攀,等.非相干 LED 光源产生高阶 Bessel 光束[J].中国科学,2014,35(7):705-711.
- [7] SNEOYINK C, WERELEY S. Single-image far-field subdiffraction limit imaging with axicon[J]. Optics Letters, 2013,38(5):625-627.
- [8] 方翔,吴逢铁,程治明.产生不同类型局域空心光束的可拆式组合轴棱锥[J].光学学报,2012,32(8):08260021-08260025.
- [9] 谢晓霞,吴逢铁,李冬.双焦透镜对 Bessel 光束传输的影响[J].物理学报,2014,63(18):180201.
- [10] 李冬,吴逢铁,李攀,等.用于产生 Bessel 光的广义轴棱锥[J].华侨大学学报:自然科学版,2013,34(5):500-504.
- [11] ARLT J, PADGETT M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: The optical bottle beam[J]. Opt Lett, 2000,25(8):191-193.
- [12] TATARKOVA S A, SIBBETT W, DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. Phys Rev Lett, 2003,91(12):038101(1-4).
- [13] MACDONALD M P, PATERSON L, VOLKE-SEPULVEDA K, et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science, 2002,29(6):1101-1103.
- [14] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature, 2003,42(4):810-816.
- [15] 张前安,吴逢铁,郑维涛.新型锥透镜产生局域空心光束[J].物理学报,2011,60(9):094201.
- [16] TOPUZOSKI S. Fraunhofer diffraction of Laguerre-Gaussian laser beam by helical axicon[J]. Optics Communications, 2014,23(8):1016-1018.

Focal Characteristics of Ideal Axicon and Vaulted Axicon on Bessel Beams

CHEN Zi-yan, HE Yan-lin, CHEN Jing, WU Feng-tie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: This paper analyzes the focal characteristics of the vaulted axicon and ideal axicon on Bessel beams. The expressions of light intensity of Bessel beam passing through an ideal axicon and a vaulted axicon are derived based on the generalized Huygens-Fresnel diffraction integral theory. This paper also describes the transformation of Bessel beam focused by the ideal axicon and vaulted axicon, and numerically simulate the light intensity distribution graph and intensity distribution of radial in different cross sections. Studies show that vaulted axicon and ideal axicon could both produce periodical Bottle beams. However, compared to ideal axicon, the Bottle beams produced by a vaulted axicon have shorter cycle time, stronger central light intensity and smaller size of dark spots.

Keywords: ideal axicon; vaulted axicon; Bottle beam; Bessel beam

文章编号:1000-5013(2015)02-0151-05

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.02.0151

布拉格反射波导双光束边发射半导体激光器

苏道军^{1,2}, 计伟², 崔碧峰^{2,3}, 邱伟彬¹, 佟存柱⁴,
张松², 王晓玲², 凌小涵², 王加贤¹

(1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 北京工业大学 电子信息与控制工程学院, 北京 100124;
3. 牡丹电子集团有限公司, 北京 100191;
4. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130000)

摘要: 报道 1 种在垂直远场方向上产生 2 个极窄的稳定对称光斑多量子阱边发射半导体激光器,在其有源区两侧设计布拉格反射波导结构.制备 100 μm 条宽的边发射激光器,在垂直方向上 $\pm 33.4^\circ$ 附近实现 2 个稳定的 7.2° 对称的近圆形光斑,对器件镀膜后进行测试,在连续和脉冲工作条件下分别得到 1.40、2.26 W 的输出,器件的特征温度可达到 91 K.

关键词: 半导体激光器; 布拉格反射波导; 双光斑激光器; 多量子阱

中图分类号: TN 48.4 **文献标志码:** A

近年来,布拉格反射波导结构的半导体激光器广泛应用于各种各样的器件中,包括高速打印机、高灵敏度的激光吸收光谱仪、先进的激光测速仪以及沟深监控系统等^[1-6].这种半导体激光器具有较高的增益系数、较强的模式识别以及较大的模式面积等优点^[7-9].产生双光斑输出通常有两种方法:一是利用光纤阵列或光束耦合器耦合 2 个单个激光器发出的光束^[10];二是利用光栅、极化棱镜、非退化的光学寄生振荡器将单个光束分散成 2 个光束^[11].但是,这些方法由于复杂的光学对准和体积的限制,应用较少.除此之外,双脊激光二极管也可以替代双光斑激光光源在横向上产生 2 个输出光斑.但是,这种激光器在工作时双脊之间相互影响产生的热效应使得激光器的输出性能严重不稳定^[12].实现双光斑输出最理想的方法是从器件的结构出发.近年来,为了得到单个稳定的具有较大光学模式尺寸的激光光束,人们提出了单个布拉格反射波导和 2 个布拉格反射波导的边发射半导体激光器^[13-15],这类激光器可以在垂直方向上分别实现极窄的单个光斑和非常发散的多个光斑.本文通过设计多量子阱有源区两侧的布拉格反射波导结构实现 2 个极窄的双光斑输出.

1 器件结构设计

布拉格反射波导边发射半导体激光器结构,如图 1 所示.量子阱有源区的两侧具有非 $1/4$ 波长布拉格反射波导结构(BRW),每一侧都是由 6 对厚度分别为 100 nm/750 nm 的 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 分布式布拉格反射镜组成.量子阱有源区的材料为 2 个 $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}/\text{GaAs}$ 量子阱组成,布拉格反射波导的界面有 20 nm 的组分渐变层, P^+ 的重掺杂欧姆接触层到有源区厚度为 5.3 μm ,整个外延层的厚度为 12.7 μm .此外,在量子阱有源区和上下布拉格反射波导之间有一层 750 nm 的 $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 层.文中所设计的器件各层结构的折射率分布,如图 2 所示.

收稿日期: 2013-12-26
通信作者: 王加贤(1955-),男,教授,博士,主要从事激光与光电子技术的研究. E-mail: wangjx@hqu.edu.cn.
基金项目: 集成光电子学国家重点联合实验室开放课题(IOSKL2012KF12); 半导体材料科学重点实验室开放课题(KLSMS-1201); 福建省泉州市科技计划重点项目(2003Z19)

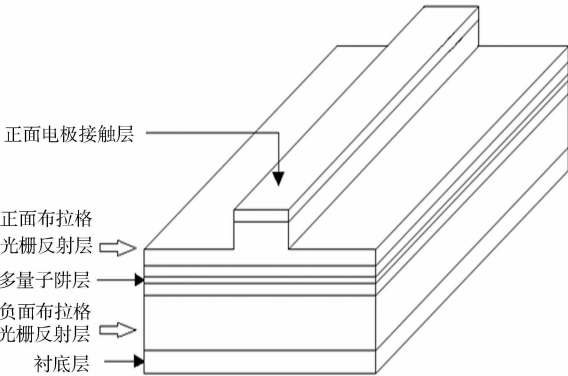


图 1 布拉格反射波导边发射半导体激光器

Fig. 1 Edge-emitting semiconductor laser with Bragg reflection waveguide

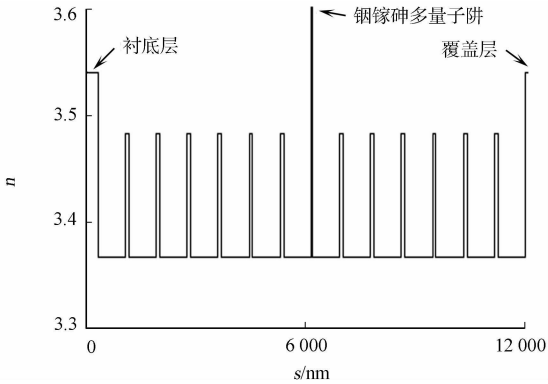


图 2 布拉格反射波导边发射半导体激光器折射率

Fig. 2 Refractive index of edge-emitting semiconductor laser with Bragg reflection waveguide

边发射半导体激光器的远场发散形式是由近场的电磁场分布的傅里叶变化决定的. 由于近场的电磁场分布具有周期性的最大值和最小值的变化, 所以这种电磁场分布可以用正弦函数或者余弦函数来近似表示^[12]. 对于文中所设计的器件结构, 在端面附近的垂直电场分布可近似表示为余弦函数与高斯函数的乘积, 即

$$E_{\text{NF}}(x) = E_{\text{NF}}(0) \times \cos(2\pi \frac{x}{2\Lambda}) \times \text{Gaus}(\frac{x}{w}). \tag{1}$$

式(1)中: $\text{Gaus}(\frac{x}{w}) = \exp[-\pi(\frac{x}{w})^2]$, x 为横向远离近场中心的距离, w 为由实际近场光场强度决定的模式的光斑宽度; $E_{\text{NF}}(0)$ 为布拉格反射波导边发射激光器中心位置的电场幅值; Λ 为布拉格反射镜的厚度, 即 $\text{Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}/\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 的厚度和界面处的 2 个 20 nm 的组分渐变层.

标准的瑞利-索末菲(Rayleigh-Sommerfeld)衍射积分^[12]为

$$I_{\text{FF}}(\theta) \propto | \cos \theta \cdot \int_{-\infty}^{+\infty} E_{\text{NF}}(x) \exp(-ik_0 x \sin \theta) dx |^2. \tag{2}$$

由式(2)可得到远场光束强度, 即

$$I_{\text{FF}}(\theta) \propto | \frac{E_{\text{NF}}(0) \cdot w \cdot \cos \theta}{2} |^2 \cdot | \text{Gaus}[w(\frac{\sin \theta}{\lambda} - \frac{1}{2\Lambda})] + \text{Gaus}[w(\frac{\sin \theta}{\lambda} + \frac{1}{2\Lambda})] |^2. \tag{3}$$

式(3)中: θ 为远场发散角. 由式(3)可知: 布拉格反射波导边发射激光器的远场光束在 $\theta = \pm \arcsin[\lambda/(2\Lambda)]$ 处存在 2 个高斯形状的光斑, 可通过改变布拉格反射波导的周期厚度来控制; 对于文中所设计的器件结构, $\Lambda = 0.89 \mu\text{m}$, 带入可计算出在 $\Lambda = \pm 33.4^\circ$ 处出现 2 个高斯光斑.

由以上分析可知: 布拉格反射波导结构的周期厚度决定了垂直方向上的 2 个高斯光斑之间的角度, 而垂直方向上单个高斯光斑的远场发散角主要是由光学波导厚度来决定的. 因此, 可以通过设计布拉格反射波导结构来精确控制布拉格反射波导边发射激光器的垂直光场分布.

2 器件制备与测试

2.1 器件的制备

采用金属有机物化学气相沉积法(MOCVD), 在(100)方向的 $\text{n}^+\text{-GaAs}$ 衬底依次外延缓冲层、 n-DBR 、多量子阱有源区、 p-DBR 和 p^+ 重掺杂的欧姆接触层形成布拉格反射波导边发射激光器的外延结构. 外延生长完成后, 利用标准的光刻工艺和湿法腐蚀工艺形成条宽为 $100 \mu\text{m}$ 的脊型波导结构, 湿法腐蚀的深度约为 280 nm. 然后, 采用等离子体增强化学气相沉积法(PECVD)淀积 200 nm 的 SiO_2 作为电绝缘层; 利用标准光刻工艺制作电极窗口, 溅射正面电极 Ti/Au , 厚度为 50 nm/300 nm; 经过背面减薄, 溅射 50 nm/300 nm 的背面电极 AuGeNi/Au 后, 在 430°C 条件下快速合金 35 s. 最后, 溅射 100 nm 的金层. 为了测试镀膜对器件性能的影响, 将制备好的器件分为两部分: 一部分以自然解理面作为谐振腔的腔面; 另一部分则在器件的反射面和出光面分别镀上 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜, 解离成单个

器件后分别进行测试.

2.2 拟合内量子效率和内损耗

F-P 腔的边发射半导体激光器的外微分量子效率和内量子效率及内损耗的关系^[16]为

$$\eta_d = \eta_i \cdot \frac{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2}}{\frac{1}{2L} \ln \frac{1}{R_1 R_2} + \alpha_i} \tag{4}$$

式(4)中: η_d 为外微分量子效率; η_i 为内量子效率; α_i 为内损耗; L 为谐振腔腔长; R_1, R_2 分别为腔面的反射率. 对式(4)两边取倒数后可得

$$\frac{1}{\eta_d} = \frac{1}{\eta_i} + \frac{2\alpha_i L}{\eta_i \ln(R_1 R_2)^{-1}} \tag{5}$$

由式(5)可知: 腔长与外微分量子效率的倒数呈线性关系. 因此, 可通过测试不同的腔长对应的外微分量子效率, 利用 Origin 软件经过线性拟合算出内量子效率和内损耗. 实验分别进行了 800, 1 200, 1 500 μm 等 3 种腔长的器件测试, 其结果如图 3 所示. 由拟合结果可知: 内量子效率 η_i 为 47.64%; 内损耗 α_i 为 1.265 cm^{-1} .

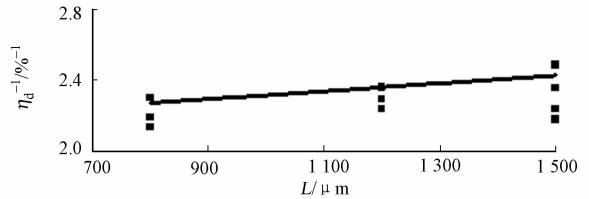


图 3 内量子效率和内损耗拟合曲线
Fig. 3 Fit curve of internal quantum efficiency and internal loss

2.3 器件镀膜测试

将制备好的外延片解离成 1 mm 腔长的单管管芯, 然后 P 面向下烧结在镀有铜的铜热沉上, 将铜热沉封装在 TO-3 的管座上, 用 LD2002C4 型半导体激光器测试仪进行测试. 施加 1 A 的连续电流, 测得器件的 P - I - V 曲线和垂直发散角, 如图 4 所示.

由图 4 可知: 器件的输出光束在垂直方向附近出现 2 个光斑, 其位置与理论推导到的 $\pm 33.4^\circ$ 有一定偏差, 这是由于在封装时摆放管芯的过程中, 芯片距离中心位置有一定的偏移. 器件的阈值电流较大, 达到 400 mA, 这是由器件的结构所决定的. 器件外延结构在多量子阱有源区两侧具有对称的非 1/4 波长的 DBR 结构, 注入的电子和空穴复合后发射出的光子除了在水平方向上的谐振腔内的损耗和腔面损耗外, 还有一部分光子在上下 DBR 之间谐振, 使得器件的阈值电流比普通 F-P 腔的边发射半导体激光器的阈值电流大.

为了得到较大的输出功率, 对激光器的腔面进行镀膜, 一端镀上 90% 的高反膜, 另一端镀上 1.3% 的增透膜. 器件的测试结果, 如图 5 所示. 镀膜后对器件施加 3 A 的连续电流, 可得到 1.40 W 的输出功率. 在脉冲条件下, 器件在 4 A 的驱动电流作用下, 可得到 2.26 W 的输出功率. 但此时阈值电流是 490 mA, 与镀膜之前相比有了一定的增加, 这是因为当器件的前后腔面镀完膜后, 器件的腔面损耗增大, 总损耗增加, 从而使器件的阈值电流变大.

2.4 变温测试

半导体激光器的输出特性与温度密切相关. 随着温度的升高, 激光器的阈值电流增加, 输出功率降低, 发射波长漂移, 造成激光器模式不稳定, 从而影响器件的寿命. 对腔长为 1 mm, 镀有 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜的单管器件在 283~343 K 温度范围内进行变温测试, 其 P - I - V 曲线如图 6 所示.

由图 6 可知: 随着温度的升高, 器件的阈值电流将会增加. 这主要是因为随着温度的升高, 器件的热效应越来越显著, 使得器件中的损耗系数增加, 漏电流增加, 内量子效率降低, 阈值电流增大. 此外, 器件的输出功率也会逐渐较小, 这是由于随着温度的升高, 注入的电子中参与非辐射复合的电子数越来越多; 从器件外部来看, 器件注入的电功率转化为焦耳热的比例越来越大, 最终导致输出功率逐渐减小.

实验中进一步研究了阈值电流与温度的变化关系. 阈值电流与温度的关系满足指数关系^[16]为

$$I_{th}(T) = I_{th}(T_r) \cdot \exp\left(\frac{T - T_r}{T_0}\right) \tag{6}$$

式(6)中: T_r 为室温; $I_{th}(T_r)$ 为室温下的阈值电流; T_0 为表征半导体激光器温度稳定性的重要参数, 称为特征温度, 它与激光器的材料和结构有关, T_0 越大, 表明激光器对温度的敏感程度越小, 热特性越好.

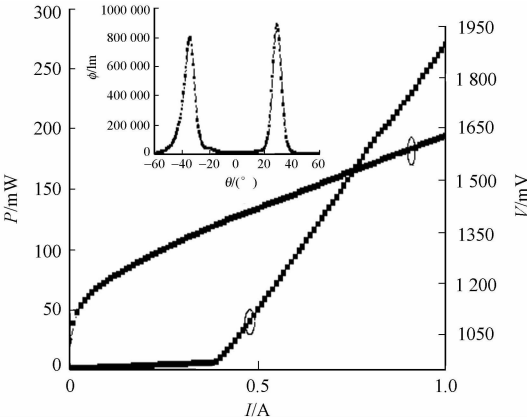


图 4 腔面镀膜前器件的 P - I - V 曲线及垂直远场发散角
Fig. 4 Device cavosurface with no coating film P - I - V surge and divergence angle in the far field vertical direction
阈值电流和中心波长随温度的变化关系,如图 7 所示.

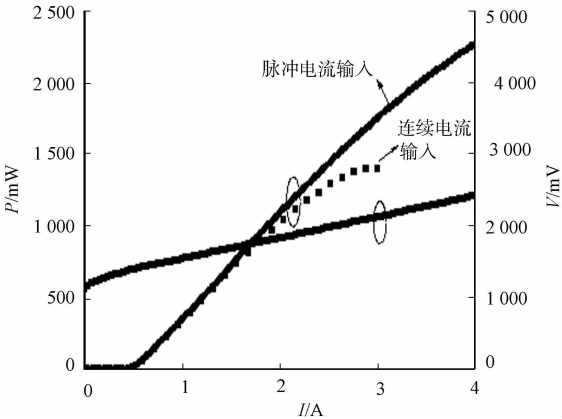


图 5 腔面镀膜后器件的 P - I - V 曲线
Fig. 5 Device cavosurface with coating film P - I - V surge

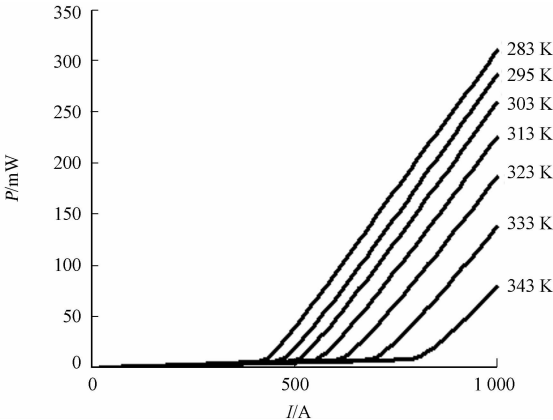


图 6 不同温度下器件 P - I - V 曲线
Fig. 6 P - I - V surge of different temperature

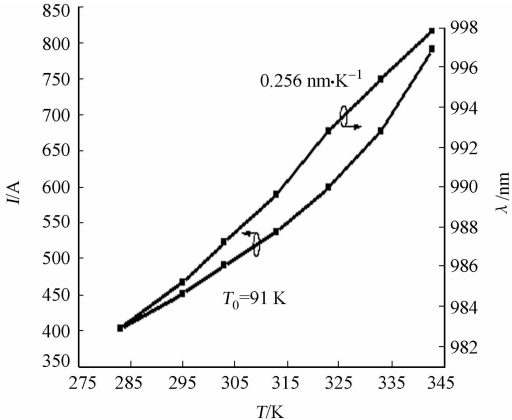


图 7 阈值电流及中心波长随温度变化趋势
Fig. 7 Threshold current and central wavelength of different temperature

对式(6)两边取对数得 $\ln I_{th}(T) = \ln I_{th}(T_r) + (T - T_r)/T_0$. 做 $\ln I_{th}(T) \sim T$ 的关系曲线. 由此可知:该曲线为 1 条直线,且斜率为 $1/T_0$,拟合数据后得到在 283~343 K 温度范围内对应的特征温度为 91 K. 当温度升高时,有源区半导体材料禁带宽度将会减小,激射波长将会增大,即红移,如图 7 所示. 随温度升高,红移速率为 $0.256 \text{ nm} \cdot \text{K}^{-1}$.

3 结束语

设计 1 种新型的具有波长布拉格反射波导结构的边发射半导体激光器,其输出功率主要集中在垂直方向上 $\pm 33.4^\circ$ 处. 通过拟合,得到器件的内量子效率为 47.64%,内损耗为 1.265 cm^{-1} . 为了得到较大功率的输出,对器件的前后端面分别镀上 90% 的高反膜和 1.3% 的增透膜. 由实验可知:在连续注入 3 A 电流时,可实现 1.40 W 的功率输出;脉冲注入 4 A 电流时,可实现 2.26 W 的功率输出. 此外,器件在 283~343 K 的温度范围内对应的特征温度可达到 91 K.

参考文献:

[1] KATAOKA K. Analysis of banding problem in multiple beam scanning system of laser printer[J]. Optical Review, 2008,15(4):196-203.
[2] ARIMOTO A,SAITOH S,MOCHIZUKI T,et al. Dual beam laser diode scanning system for ultrahigh speed laser beam printers using a spot control method[J]. Applied Optics,1987,26(3):2554-2557.

[3] HEIDMANN A, HOROWICZ R J, REYNAUD S, et al. Observation of quantum noise reduction on twin laser beams[J]. Physical Review Letters, 1987, 59(22): 2555-2557.

[4] THANH N T K, REES J H, ROSENZWEIG Z. Laser-based double beam absorption detection for aggregation immunoassays using gold nanoparticles[J]. Anal Bioanal Chem, 2002, 374(7/8): 1174-1178.

[5] KAWAJASJO M, HOSOI K. Dual-beam-sweep laser speckle velocimetry[J]. Exp Fluids, 1991, 11(4): 278-280.

[6] AMARY P, CATTELAN D. A new polarimetric camera for real-time trench depth monitoring in micromachining applications[J]. Horiba, 2003(7): 82-85.

[7] LEDENTSOV N N, SHCHUKIN V A, NOVIKOV I I, et al. High-power edgeemitting laser diode with narrow vertical beam divergence[J]. Electronics Letters, 2011, 47(24): 1339-1341.

[8] LI Jie, CHIANG K S. Guided modes of one-dimensional photonic bandgap waveguides[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2007, 24(8): 1942-1950.

[9] SHCHUKIN V, LEDENTSOV N, POSILOVIC K, et al. Tilted wave lasers: A way to high brightness sources of light[J]. Quantum Electron, 2011, 47(7): 1014-1027.

[10] 朱松林, 章献民, 池灏, 等. 用统一耦合模理论分析含布拉格光栅的对称光纤耦合器的传输特性[J]. 光学学报, 2001, 21(8): 991-995.

[11] CHI Ming-jun, BØGH N S, THESTRUP B, et al. Improvement of the beam quality of a broad-area diode laser using double feedback from two external mirrors[J]. Applied Physics Letters, 2004, 85(7): 1107-1109.

[12] LONGFIELD N, LIESHOUT T, de WUT I, et al. Improving laser welding efficiency[J]. Weld J, 2007, 86(5): 52-54.

[13] BHAVIN J, BIJLANI, AMR S. Helmy Bragg reflection waveguide diode lasers[J]. Optics Letters, 2009, 34(23): 3734-3736.

[14] YEH P, YARIV A, HONG C S. Electromagnetic propagation in periodic stratified media[J]. Journal of the Optical Society of America, 1977, 67(4): 423-438.

[15] XIE Jing. Dual beam laser welding[J]. Weld J, 2002, 81(10): 223-230.

[16] 江剑平. 半导体激光器[M]. 北京: 电子工业出版社, 2000: 52-76.

Twin Beam Edge-Emitting Semiconductor Laser with Bragg Reflection Waveguide

SU Dao-jun^{1,2}, JI Wei², CUI Bi-feng^{2,3}, QIU Wei-bin¹,
TONG Cun-zhu⁴, ZHANG Song², WANG Xiao-ling²,
LING Xiao-han², WANG Jia-xian¹

(1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. College of Electronic Information and Control Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

3. Beijing Peony Electronic Group Company, Beijing 100191, China;

4. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics Chinese Academy of Sciences, Changchun 130000, China)

Abstract: A multiple quantum wells edge-emitting semiconductor laser which can generate twin ultra-narrow, stable and symmetrical beams in the far field vertical direction was designed and fabricated. The Bragg reflection waveguide structure was designed on both side of the active layer. Laser with 100 μm stripe width exhibited two stable near-circular beams symmetrically located at about $\pm 33.4^\circ$ with full-width at half maximum of 7.2° in the vertical direction. Texting the laser after coating, which showed an output power of 1.40 W under continuous wave operation and 2.26 W in pulsed mode. The characteristic temperature of the device is about 91 K.

Keywords: semiconductor lasers; Bragg reflection waveguide; twin-beam lasers; multiple quantum wells

一种雾天退化场景快速复原方法

王伟鹏,戴声奎,项文杰

(华侨大学 信息科学与工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 针对雾天条件下图像退化的问题,提出一种新的场景复原方法.首先,结合大气散射模型与光学反射成像的特性,对大气耗散函数提出物理约束条件,利用双边滤波的边缘保持特性得到大气耗散函数的初始估计.然后,引入局部均值与局部标准差近似估计图像对比度,从而降低对比度较强的部分区域的雾浓度估计来获取更加准确的大气耗散函数.最后,求解雾图成像方程,恢复理想光照条件下的辐射强度.实验结果表明:该方法对图像的细节和颜色恢复非常有效,并能有效克服边缘残雾现象以及颜色过饱和等不足.

关键词: 去雾;图像复原;大气散射模型;双边滤波;图像增强

中图分类号: TP 391.4

文献标志码: A

雾霾是由于大气中悬浮的微小颗粒和气溶胶的折射、散射等复杂作用,导致能见度严重降低的现象.它直接影响交通运输的安全和户外监控系统的正常工作.因此,对雾天降质图像进行有效的清晰化处理是使户外成像系统可靠、稳健工作的保证.图像去雾是一个具有挑战性的课题,因为单幅图像中雾气所依赖的深度信息是未知的,从而使这一问题的解决受到制约.近年来,基于先验信息或假设的单幅图像去雾技术成为研究的热门对象^[1-7].本文结合雾图成像模型,提出一种新的场景复原算法.

1 雾图成像模型及其特性

在计算机视觉和图形学中,描述雾天成像的基本模型^[8-9]为

$$L(x, y) = L_0(x, y) \exp(-\beta d(x, y)) + A(1 - \exp(-\beta d(x, y))). \quad (1)$$

式(1)中: $L(x, y)$ 为观测到的雾天图像,即输入图像; $L_0(x, y)$ 为场景的光线强度,即复原图像,也称为场景反照率; β 为大气散射系数; $d(x, y)$ 为场景深度; $\exp(-\beta d(x, y))$ 表示透射率分布; A 为大气光辐射强度,一般假设为全局常量.

由式(1)可知:雾图成像模型由 $L_0(x, y) \exp(-\beta d(x, y))$ 和 $A(1 - \exp(-\beta d(x, y)))$ 两项组成.第 1 项表示直接衰减,由于大气中介质粒子的散射作用,部分物体的反射光因散射而损失,未散射部分直接到达成像传感器的强度;第 2 项为环境光模型,反映全局大气光强度的散射,导致场景颜色的偏移.

对式(1)进行改写,得到另一种等价形式,即

$$L(x, y) = L_0(x, y) \left(1 - \frac{V(x, y)}{A}\right) + V(x, y). \quad (2)$$

式(2)中: $V(x, y)$ 表示大气耗散函数,即 $V(x, y) = A(1 - \exp(-\beta d(x, y)))$.因此,只需估计出 $V(x, y)$ 和 A ,即可求得 $L_0(x, y)$,得到理想条件下的无雾图像.

2 图像复原算法

2.1 大气耗散函数的物理约束条件

雾天场景下的图像采集过程中,物体的颜色是由于对光的 3 个颜色分量的反射和吸收特性生成,对

于颜色丰富的彩色物体或者单一的灰白色物体,至少有 1 个颜色分量的反射系数较低,强度值较小. 因此,对于雾天图像,其大气耗散函数应该满足物理特性的约束条件,即

$$0 \leq V(x, y) \leq W(x, y). \quad (3)$$

式(3)中: $W(x, y) = \min_{c \in \{R, G, B\}} L^c(x, y)$. 对于彩色图像, W 表示 L 中 3 个颜色通道的最小值,对于灰度图像,则有 $W = L$. 这基本上与文献[3]的观点保持一致,即大气耗散函数的每个像素值应介于 0 与原图像的最小通道值之间.

2.2 大气耗散函数的生成

根据大气耗散函数 V 与场景深度 d 的关系可知:在同一景深或变化平缓的区域, V 基本不变;当 d 跳变时, V 同样产生跳变,即大气耗散函数的取值仅与景深相关,与目标物体的细节纹理无关. 因此,需要消除图像中的细节信息,同时保留景深跳变的边缘. 该细节的平滑和边缘的保护可以看作是一类滤波问题,而双边滤波器能够满足这类要求.

双边滤波^[10]是 1 种保持边缘的非线性平滑滤波方法,它的权重由空域 S 和值域 R 平滑函数的乘积给出,滤波窗口内各像素点的权重值与该像素点距离窗口中心点的距离,以及两者的灰度差值相关. 文中使用空间域和幅值域均为高斯函数的双边滤波器,即

$$BF(I)_p = \frac{\sum_{q \in S} (G_\sigma(\|p - q\|) G_\sigma(|I_p - I_q|) I_q)}{\sum_{q \in S} G_\sigma(\|p - q\|) G_\sigma(|I_p - I_q|)}. \quad (4)$$

式(4)中: G_σ , G_σ 分别为空间域和幅值域上以 σ_s , σ_r 为参数的核函数; S 为以 p 为中心点的邻域; I_p , I_q 分别为像素点 p , q 对应的灰度值. 由此可见:该滤波方法同时考虑了幅值的相似关系和空间的邻近关系,可以有效保持图像的边缘信息,从而抑制复原图像中由于景深跳变而在边缘处引入的光晕现象.

文献[4-5]提出了用最小颜色分量 W 来粗略估计大气耗散函数,然后,采用双边滤波操作得到局部平滑的结果. 文献[7]则是对 W 进行 2 次不同尺度的双边滤波来估计大气耗散函数和局部对比度. 在此基础上,文中同样利用双边滤波的局部平滑特性对 $W(x, y)$ 进行预处理,滤除纹理细节的同时,保留了图像中的边缘特性,从而得到大气耗散函数的初始估计,即

$$W_{BF}(x, y) = BF(W(x, y)). \quad (5)$$

通过式(5)计算得到的结果,如图 1(b)所示. 由图 1(b)可知:远景房子与前景草地的 3 个颜色分量值较高, $V(x, y)$ 的估计值较大,若直接用该结果作为最终的大气耗散函数,则易将灰度较亮的目标错误地估计为浓雾区域. 因此,有必要进一步修正部分区域的雾浓度估计.

由于大气耗散函数仅与大气光值 A 和场景深度 d 相关,而大气光值假定为全局常量. 因此,在雾浓度较高的远景处,大气耗散函数的取值较大,在雾浓度较低的近景处,取值较小,即远景区域相对于近景区域受到全局大气光的散射程度更高,对比度更低. 局部对比度可以通过灰度标准差来近似表示,文献[3]和文献[5]分别采用中值滤波和双边滤波器来估计局部均值和标准差. 然而,此类滤波器属于非线性滤波方法,由于其在边缘处的特殊性,导致估计的结果不够理想. 因此,通过均值滤波器准确估计 $W(x, y)$ 的局部均值 $E(x, y)$ 和局部标准差 $D(x, y)$,进一步区分近景和远景区域,有

$$E(x, y) = AF(W(x, y), s), \quad (6)$$

$$D(x, y) = \sqrt{AF((W(x, y) - E(x, y))^2, s)}. \quad (7)$$

式(6), (7)中: $AF(\cdot, s)$ 为局部均值滤波,选取 $s \times s$ 的矩形窗口进行移动式搜索处理. 通过对 $W(x, y)$ 执行局部均值计算来估计标准差可以保证估计的可靠性和鲁棒性,较文献[3]和文献[5]的方法更准确. 由于对比度较好的纹理区域雾气较少,因此,应减少该部分的雾浓度估计,即用大气耗散函数的初始估计减去 $W(x, y)$ 的局部标准差,有

$$V'(x, y) = W_{BF}(x, y) - D(x, y). \quad (8)$$

当近景区域出现颜色鲜艳的目标且细节较丰富时,使用上述方法减弱该区域的去雾处理,可有效避免复原结果出现颜色过饱和的现象. 最后,考虑物理约束条件 $0 \leq V(x, y) \leq W(x, y)$,求得大气耗散函数的最终估计,即

$$V(x, y) = \max(\min(pV'(x, y), W(x, y)), 0). \quad (9)$$

式(9)中: $p \in (0, 1)$ 为去雾调节参数,有针对性地保留远景的小部分雾气,使去雾后的图像更加自然.

为了提高运算速度,采用快速双边滤波^[11-12]的近似方法来进行加速,该算法将双边滤波器表示为三维空间中的线性卷积,在降采样的高维空间中执行高斯低通滤波,通过三维线性插值来获得最终的滤波结果.由于该方法可以并行计算,因此,可采用 GPU 进一步加速.

2.3 图像的复原

求解雾图成像方程的另一个关键因素是大气光 A 值的估计,也可理解为雾最浓处的像素值估计.文献[2]选取暗通道图像前 0.1% 亮的像素值,对应雾天图像中的最大像素作为大气光.然而,该方法只取单个最大值不具有鲁棒性,因为降质图像中可能伴随噪声的影响.由以上分析可知:大气耗散函数 V 近似体现了雾气浓度分布.因此,在文献[2]的基础上,根据 V 的直方图统计来估计 A 值.假设 V 的总像素个数为 N ,直方图为 V_{hist} ,计算其直方图累加 $\sum_{i=0}^{255} V_{\text{hist}}$.当 $\sum_{i=0}^j V_{\text{hist}} > 99\% \cdot N$ 时,寻找 V 中灰度值为 j 的像素所在区域,在雾天图像中的相应区域即可认定为浓雾区域.然后,分别计算该浓雾区域中 3 个颜色通道的平均值,将最大的平均值作为大气光 A 值的估计.这种方法简单有效,比文献[2]中采用浓雾区域的“最高亮度像素”的方法具有更强的鲁棒性.

利用已估计的大气耗散函数 V 和全局大气光 A ,可根据式(2)恢复出场景在理想条件下的辐射强度,有

$$L_o(x,y) = \frac{A(L(x,y) - V(x,y))}{A - V(x,y)}.$$

(10)

利用文中方法得到的大气耗散函数及复原结果,如图 1 所示.由图 1 可知:由 $V(x,y)$ 的初始估计直接恢复结果会导致去雾后图像中的房子和草地的颜色过于饱和,与原图像的色调不符,如图 1(d)所示;而利用文中方法进一步修正部分区域的雾浓度估计,得到准确的大气耗散函数,如图 1(c)所示;复原结果如图 1(e)所示.该结果很好地将雾气去除,同时保留了背景中颜色较亮的区域,以及房子和草地的真实色彩.



(a) 雾气图像 (b) $V(x,y)$ 初始估计 (c) $V(x,y)$ 最终估计 (d) 图 1(b) 复原结果 (e) 图 1(c) 复原结果

图 1 文中算法结果

Fig. 1 Result of proposed algorithm

3 实验结果和分析

文中算法去雾调节参数 p 用于控制雾气移除的比例,若取 0,则没有去雾效果;若取 1,则完全将雾气去除.文中取 90%,目的是保留小部分雾气,使复原结果更加自然.双边滤波的参数自适应的取 $\sigma_s = 0.05 \cdot \min(w,h)$, $\sigma_r = 0.1 \cdot (|w-h|)$.其中: w 和 h 为图像的宽和高.均值滤波的矩形窗口 s 决定了局部标准差的精度,取值越小则精度越高,文中大部分实验中取较小值 5.所有实验均在 3.40 GHz 的 AMD Athlon 双核处理器、系统内存为 2 GB 的普通 PC 机上运行.

3.1 实验结果比较

文中算法的去雾效果及局部细节对比,如图 2 所示.去雾后图像整体的能见度和对比度得到极大改善,还原了晴天条件下的真实场景,且避免了光晕效应和颜色过饱和现象,这得益于雾图成像模型的有效性和文中估计大气耗散函数的准确性.图 2(c)为复原前后图像的局部细节放大,通过比较可知:文中方法对于图像的细节和颜色恢复非常有效,有利于图像特征的分析 and 识别.

为验证文中方法的优势,将其与 He 方法^[2]及 Tarel 方法^[3]的结果进行比较,如图 3 所示.图 3(a),

(e),(i)为相关雾天场景的原始图像. 图 3(b),(f),(j)为 He 算法的结果,该方法对场景色彩、对比度等信息实现了较好的恢复,但图 3(b)的复原结果偏暗,图 3(f)远景楼房的去雾效果还不够理想. 图 3(c),(g),(k)为 Tarel 算法的结果图,该算法在处理场景深度跳变的边缘时,去雾效果欠佳. 图 3(c),(g)中细小树叶之间的雾气没有完全去除,图 3(k)的复原结果显得颜色失真. 图 3(d),(h),(l)为文中处理结果,相比 He 算法而言,图 3(d)整体亮度有所提升,层次感更强,图 3(h)的远景城市更清晰,能够识别更多细节信息,并且克服了 Tarel 方法中的边缘残雾和颜色失真现象. 图 2,3 的实验结果表明:对于不同雾天环境、不同场景深度以及不同光照条件下的降质图像,文中方法均能够获得较理想的场景反照率.

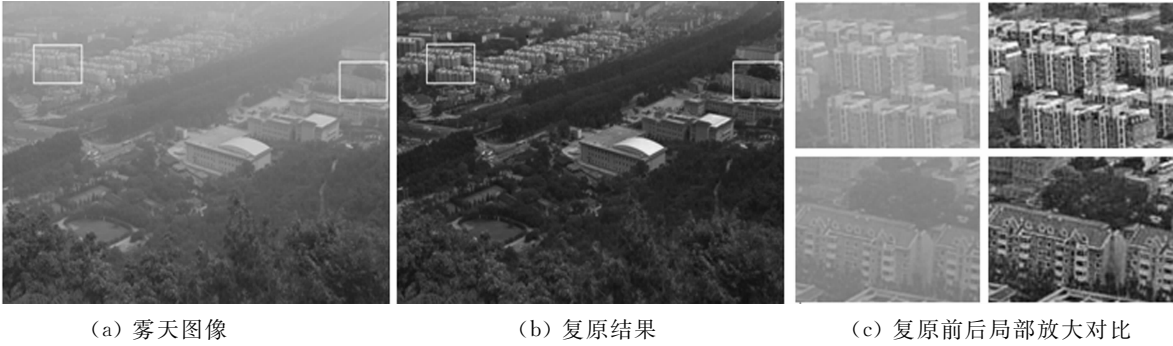


图 2 文中方法对图像细节的提升

Fig. 2 Enhancement of image detail using proposed method

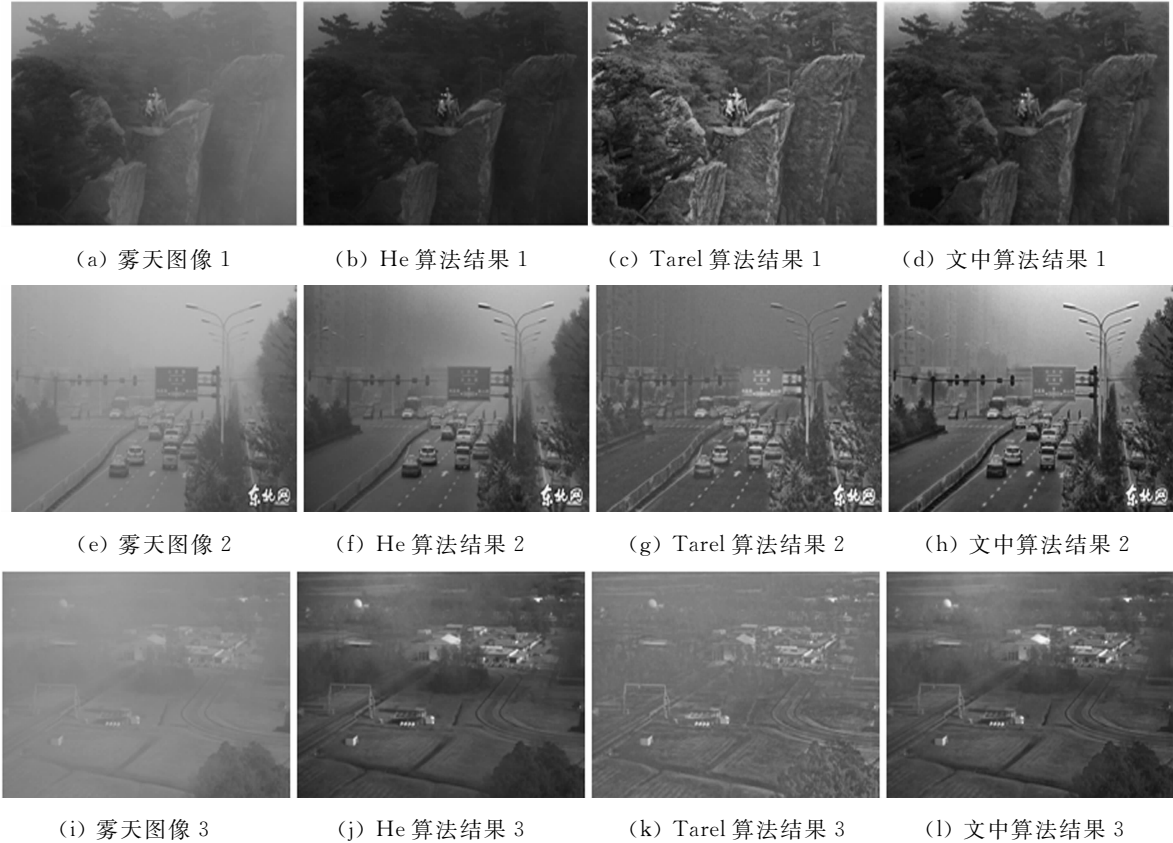


图 3 文中算法与其他算法的结果比较

Fig. 3 Comparisons with other methods

3.2 时间复杂度分析

He 方法中修复透射率采用的软抠图算法^[2]是 1 个大规模稀疏线性矩阵的求解问题,对系统的资源及计算能力要求较高. 对图像尺寸为 $x \times y$, Tarel 算法^[3]的时间复杂度为 $O(xy s^2 \ln s)$. 其中: s 为中度滤波的模板尺寸,在图 3 中 s 取 45. 而文中算法所用快速双边滤波器^[11-12]的时间复杂度可达到 $O(xy)$,是图像像素数量的线性函数,其他步骤均较为简单. 因此,具有很高的执行效率.

4 结束语

提出 1 种快速雾天退化场景的复原方法. 该算法结合雾图成像模型与光学反射成像机理分析大气耗散函数的物理特性, 利用双边滤波器的边缘保持特性对其进行初步估计; 通过引入局部标准差来降低部分区域的去雾处理, 缓解颜色过饱和现象, 达到更加完善的复原效果. 通过与当前去雾效果较好的方法进行对比, 验证文中方法对于图像细节和颜色恢复的有效性, 同时可避免边缘残雾现象和颜色失真等不足. 然而, 当图像中出现大面积灰色天空时, 复原结果会显得偏暗, 导致视觉效果不够自然, 下一步工作将是针对这一不足进行改进, 实现更加完善的图像去雾功能.

参考文献:

- [1] FATTAL R. Single image dehazing[J]. ACM Transactions on Graphics, 2008, 27(3): 1-9.
- [2] HE Kai-ming, SUN Jian, TANG Xiao-ou. Single image haze removal using dark channel prior[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami; IEEE Press, 2009: 1956-1963.
- [3] TAREL J, HAUTIERE N. Fast visibility restoration from a single color or gray level image[C]//IEEE 12th International Conference on Computer Vision, Kyoto; IEEE Press, 2009: 2201-2208.
- [4] 禹晶, 李大鹏, 廖庆敏. 基于物理模型的快速单幅图像去雾方法[J]. 自动化学报, 2011, 37(2): 143-149.
- [5] 孙抗, 汪渤, 周志强, 等. 基于双边滤波的实时图像去雾技术研究[J]. 北京理工大学学报, 2011, 31(7): 810-814.
- [6] 张冰冰, 戴声奎, 孙万源. 基于暗原色先验模型的快速去雾算法[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(2): 184-188.
- [7] 甘佳佳, 肖春霞. 结合精确大气散射图计算的图像快速去雾[J]. 中国图象图形学报, 2013, 18(5): 583-590.
- [8] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Removing weather effects from monochrome images[C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Washington DC; IEEE Press, 2001: 186-193.
- [9] NARASIMHAN S G, NAYAR S K. Contrast restoration of weather degraded images[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2003, 25(6): 713-724.
- [10] TOMASI C, MANDUCHI R. Bilateral filtering for gray and color images[C]//Proceedings of IEEE international Conference on Computer Vision, Bombay; IEEE Press, 1998: 839-846.
- [11] CHEN J W, PARIS S, DURAND F. Real-time edge-aware image processing with the bilateral grid[J]. ACM Transactions on Graphics, 2007, 26(3): 103-111.
- [12] PARIS S, DURAND F. A fast approximation of the bilateral filter using a signal processing approach[J]. International Journal of Computer Vision, 2009, 81(1): 24-52.

A Fast Method for Haze Image Restoration

WANG Wei-peng, DAI Sheng-kui, XIANG Wen-jie

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: According to the problem of image degraded in hazy condition, a new haze image restoration method is proposed. Based on the physical property of atmospheric scattering model and optical reflectance imaging, the physical constraint of atmospheric veil is presented at first. The rough atmospheric veil is obtained by using bilateral filter which has good abilities of keeping edge. Then the local mean and local standard deviation are introduced to estimate the contrast of image, therefore the estimation of local haze density is decreased through good contrast region in order to get more accurate atmospheric veil. Finally, the ideal scene radiance is recovered through solving the equation of haze image. Experimental results show that this method not only achieve great restoration for image detail and color information, but also avoid the shortcomings of edge effect and over saturated.

Keywords: haze removal; image restoration; atmospheric scattering model; bilateral filter; image enhancement

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

微熵率算法分析及实证研究

黄奕^{1,2}, 谢维波^{1,2}

(1. 华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021;

2. 华侨大学 厦门软件园嵌入式技术开放实验室, 福建 厦门 361008)

摘要: 利用微熵率法进行相空间重构,并以 Henon map 混沌特性的理论结果为依据,分别选取两组初值以验证 Henon 序列混沌特征的稳定性,实证研究微熵率算法的各个环节.实验结果表明:利用微熵率法重构相空间能够有效地捕捉混沌序列的特性.

关键词: 微熵率法;替代数据;Henon map;混沌特性;实证研究

中图分类号: TP 311

文献标志码: A

在时间序列的分析中,决定序列的可观测因素很多,且相互作用的动力学方程往往是非线性的.20 世纪 80 年代以来,由于 Takens 对 Whitney 早期在拓扑学方面工作的发展,使得深入分析时间序列的背景和动力学机制成为可能.在确定性的基础上对序列动力学因素的分析,目前广泛采用的是相空间重构法.微熵率法是 Gautam 等提出的一个基于样本时间序列及其替代数据的相空间重构方法^[1].熵率是指随机源(1 个随机过程)随时间变化的平均不确定性;1 个随机过程的熵率是该过程平均每产生 1 个随机变量其不确定度大小的度量.微熵率法中的替代数据方法为 iAAFT. iAAFT 是一种性能稳定的替代数据产生方法,能很好匹配原始数据的傅里叶幅度谱和概率密度分布,在数据的非线性检验中被广泛采用.本文以 Henon map 混沌系统为数据源,以 Henon map 混沌特性的理论为依据,实证研究微熵率算法的各个环节.

1 Henon map 混沌系统

1976 年,Michel Henon 给出了 Henon map 混沌系统^[2-3].此后,许多学者就 Henon map 混沌系统的全局结构进行数值与仿真研究,并将 Henon map 系统扩展到更高维^[4].

1.1 Henon 混沌序列

Henon 混沌序列为

$$x_k = 1 - ax_{k-d}^2 + bx_{k-2d}. \quad (1)$$

式(1)中: a, b 为系统参数; d 为系统延迟.当 $a=1.4, b=0.3$ 时,系统具有混沌特性.经过足够多次的迭代,Henon 序列呈现“混沌”现象.

Henon 混沌序列($d=1$),如图 1 所示.图 1 中:对应初值为($x_0=0.4, x_1=0.6$)和($x_0=0.4+10^{-8}, x_1=0.6$)的 Henon 混沌序列利用 Matlab 仿真的情况(实验均采用 Matlab 完成).

大约在 $0 < k < 40$ 的范围内, x_k 序列基本一致;当 $k > 40$ 之后,初始值微小扰动(10^{-8})的两组 x_k 序列呈现急剧的差异,体现了混沌序列“初值敏感性”的特征.

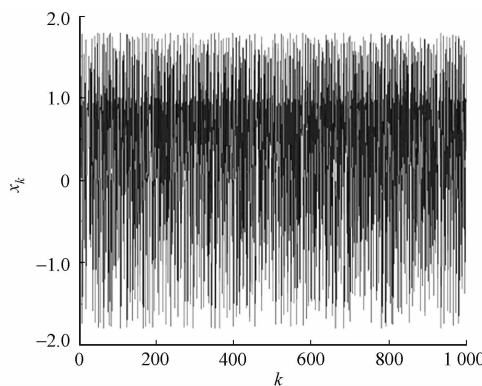


图 1 Henon 混沌序列

Fig. 1 Henon chaotic sequence

1.2 Henon map 奇异吸引子

奇异吸引子是混沌运动的主要特征. 令

$$y_k = x_{k-d}, \tag{2}$$

由式(1),(2)可得

$$x_k = 1 - ax_{k-d}^2 + by_{k-d}. \tag{3}$$

式(2),(3)构成了 Henon map 混沌系统^[5]. 点集 (x_k, y_k) 组成一条不封闭的曲线, 即 Henon map 混沌系统的奇异吸引子相图.

图 1 两种序列的奇异吸引子相图, 如图 2 所示. 由图 2 可知: 两种序列几乎“完全重合”. 尽管图 1 两种序列存在急剧的差异, 点集 (x_k, y_k) 却呈现“相同的轨迹”. 显然, 由图 1 可知: 对应点出现的“顺序”是不同的, 但是轨迹却几乎“完全重合”. 奇异吸引子给出的“确定性轨迹”, 体现了 Henon map 混沌系统的稳定性, 奠定了混沌系统发展规律的研究基础.

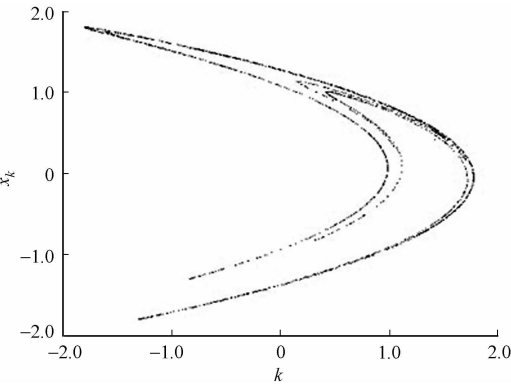


图 2 Henon map 混沌系统奇异吸引子相图
Fig. 2 Henon map chaotic system attractor

2 替代数据

为实现时间序列分析的统计学检验, 时间序列需要足够多样本. 样本的获取, 可通过构造产生时间序列的系统, 或者直接构造时间序列本身. 后者产生时间序列样本的方法, 称为替代数据法^[6]. 替代数据能够尽可能精确地复制原始数据的性质(包括时间概率分布和自相关函数), 但同时又是尽量随机的.

2.1 AAFT 生成算法

振幅调节傅里叶变换(AAFT)有以下 4 个步骤^[7].

- 步骤 1 原始数据 $\{x_n^0\}$, 排列序号 $\{\text{rank}_n^0\}$, 当 x_n^0 是 $\{x_n^0\}$ 中第 k 小时, rank_n^0 .
- 步骤 2 高斯白噪声 $\{g_0\}$, 按 $\{\text{rank}_n^0\}$ 重排得 $\{g'_n\}$.
- 步骤 3 对 $\{g'_n\}$ 傅里叶变换和相位随机化处理, 得序列 $\{s'_n\}$.
- 步骤 4 求 $\{s'_n\}$ 的排列序号 $\{\text{rank}_n^s\}$, 原始数据 $\{x_n^0\}$ 按 $\{\text{rank}_n^s\}$ 重排得替代数据 $\{s_n\}$.

替代数据 $\{s_n\}$ 是原始数据 $\{x_n^0\}$ 的重排, 保证了替代数据与原始数据有相同的时间概率分布. 因此, 也有一样的均值方差等一、二阶统计量. 替代数据 $\{s_n\}$ 的随机性体现在高斯白噪声 $\{g_n\}$, 及其傅里叶变换的相位随机化处理.

然而, 原始数据功率谱密度(自相关函数)的性质被改变了, 因为发生在步骤 2 和步骤 4 的两个重排在严格意义上不是彼此的逆操作. 这种差异导致替代数据的功率谱密度在原始数据的基础上被白化. 二者的差异程度取决于原始数据的时间概率分布与高斯分布的相似程度, 简而言之, AAFT 算法适用于类高斯分布的时间序列.

2.2 iAAFT 生成算法

为了解决 AAFT 替代数据的功率谱白化问题, 1996 年 Schreiber 提出了 AAFT 迭代生成算法(iAAFT). iAAFT 是一种性能稳定的替代数据产生方法, 能很好匹配原始数据的傅里叶频谱和概率密度分布, 在数据的统计学检验中被广泛采用. 具体有以下 4 个步骤^[8].

- 步骤 1 原始数据 $\{x_n^0\}$, 排列序号 $\{\text{rank}_n^0\}$, 傅里叶变换的幅度值 $|X_k|$, 计算 AAFT 替代数据 $\{s_n\}$.
 - 步骤 2 记 $\{s_n\}$ 傅里叶变换 $S_k = |S_k| \exp(j\varphi(k))$, 保持相位不变, 幅度值用 $|X_k|$ 代替, 得 $S'_k = |X_k| \exp(j\varphi(k))$.
 - 步骤 3 对 S'_k 进行傅里叶反变换得 $\{s'_n\}$, 再按 $\{\text{rank}_n^0\}$ 重排得 $\{s''_n\}$.
 - 步骤 4 重复步骤 2, 3, 直至所得数据 $\{s''_n\}$ 和原始数据有相近的功率谱密度.
- 确保 $\{s''_n\}$ 和原始数据的统计性质(时间概率分布、功率谱密度)趋于一致, 该算法有两个基本假设.
- 1) 步骤 2 对傅里叶变换幅度值的矫正, 造成时间概率分布的扭曲都比上一次迭代的小.
 - 2) 步骤 3 的重排, 造成功率谱密度的扭曲都比上一次迭代的小.

Schreiber 等^[7]证明:对于非线性自相关过程,替代数据的功率谱将会逐渐趋近原数据的功率谱.

3 微熵率法确定时间序列最佳嵌入参数

3.1 微熵率法

时间序列可观测性的决定因素很多,其相互作用的动力学方程往往是非线性的,甚至是混沌的.同时,计算的复杂性、有限的测量精度,以及可能存在的本质上的非确定性等多方面困难,严重制约着人们对时间序列内在机制的理解.20 世纪 80 年代,Takens^[9]对 Whitney 早期在拓扑学方面工作的发展,为深入分析时间序列的背景和动力学机制奠定基础.在确定性的基础上,对序列动力学因素的分析,目前广泛采用的是延迟坐标状态空间重构法(相空间重构法)^[10].一般来说,非线性系统的相空间可能维数很高,甚至无穷,在大多数情况下维数并不知道.

对于给定的时间序列,相空间重构法表明存在一个最优的嵌入维数 m 和时延 τ .如果 τ 太小,为了使 $m \cdot \tau$ 覆盖(大于)“捕捉信号的动力学性质所需的最小时间距”, m 将变得相当大;相反,如果 τ 大于最佳值,模型的性质将变得太离散,导致捕捉不到信号的动力学性质.Gautama 等提出基于样本时间序列及其替代数据的微熵率方法,用于确定相空间的最佳嵌入维数 m 和时延 τ .

3.2 微熵率法详细步骤

微熵率法有以下 4 点详细步骤^[1].

步骤 1 原始数据 $\{x(k) : k=1,2,\dots,N\}$, 计算其 N_s 组替代数据,记为

$$\{x_{s,i}(k) : k=1,2,\dots,N\} : i=1,2,\dots,N_s.$$

步骤 2 嵌入维数 m 和时延 τ 的相空间.原始数据的相空间为

$$\begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(N-(m-1)\tau) \\ x(1+\tau) & x(2+\tau) & \cdots & x(N-(m-2)\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(1+(m-1)\tau) & x(2+(m-1)\tau) & \cdots & x(N) \end{bmatrix}.$$

相空间的状态向量记为

$$\mathbf{X}(k) = [x(k) \quad x(k+\tau) \quad \cdots \quad x(k+(m-1)\tau)]^T, \quad k=1,2,\dots,N-(m-1)\tau.$$

替代数据的相空间(共 N_s 个),即

$$\begin{bmatrix} x_{s,i}(1) & x_{s,i}(2) & \cdots & x_{s,i}(N-(m-1)\tau) \\ x_{s,i}(1+\tau) & x_{s,i}(2+\tau) & \cdots & x_{s,i}(N-(m-2)\tau) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{s,i}(1+(m-1)\tau) & x_{s,i}(2+(m-1)\tau) & \cdots & x_{s,i}(N) \end{bmatrix}.$$

相空间的状态向量记为

$$\mathbf{X}_{s,i}(k) = [x_{s,i}(k) \quad x_{s,i}(k+\tau) \quad \cdots \quad x_{s,i}(k+(m-1)\tau)]^T, \quad k=1,2,\dots,N-(m-1)\tau.$$

其中: $\mathbf{X}(k)$ 和 $\mathbf{X}_{s,i}(k)$ 又称为延迟矢量,延迟矢量的个数为 $M=N-(m-1)\tau$.

步骤 3 基于原始数据及其替代数据,确定原始数据 $\{x(k) : k=1,2,\dots,N\}$ 的熵率为

$$R_{\text{ent}}(m, \tau) = I(m, \tau) + \frac{m}{M} \ln M.$$

其中: $I(m, \tau) = H(x, m, \tau) / (H(x_{s,i}, m, \tau))_i$. 由原始数据构成的相空间,其熵为

$$H(x, m, \tau) = \sum_{j=1}^M \ln(M\rho_j) + \ln 2 + C_E = \sum_{j=1}^{N-(m-1)\tau} \ln(\rho_j) + M \ln M + \ln 2 + C_E.$$

其中:欧拉常数 $C_E = 0.5772$; ρ_j 是第 j 个延迟矢量与其最近邻点的欧氏距离,即

$$\rho_j = \min\{|X(j) - X(p)|_2, p=1,2,\dots,M, p \neq j\}.$$

相应地有

$$H(x_{s,i}, m, \tau) = \sum_{j=1}^M \ln(M\rho_{s,i,j}) + \ln 2 + C_E = \sum_{j=1}^{N-(m-1)\tau} \ln \rho_{s,i,j} + M \ln M + \ln 2 + C_E,$$

$$\rho_{s,i,j} = \min\{|X_{s,i}(j) - X_{s,i}(p)|_2, p=1,2,\dots,M, p \neq j\}.$$

由 N_s 组替代数据构成的 N_s 个相空间,其平均熵为 $(H(x_{s,i},m,\tau))_i = \frac{1}{N_s} \sum_{i=1}^{N_s} H(x_{s,i},m,\tau)$. 可见,熵率体现为原始数据相空间的熵与 N_s 个替代数据相空间平均熵之比.

步骤 4 计算 $R_{\text{ent}}(m,\tau)$ 的最小值,相应的 m 和 τ 即最佳嵌入维数 m_{opt} 和时延 τ_{opt} .

4 数值实验

4.1 实验数据的选取

Henon 序列混沌特性的理论结果:当 $a=1.4, b=0.3$ 时,式(1)具有混沌特性,其参数 d 为时间延迟,对应最佳嵌入时延 τ_{opt} .

不当的初值选择会造成式(1)的发散,分别选取两组初值以验证 Henon 序列混沌特征的稳定性. 经过足够多次的迭代, Henon 序列才会进入“稳定的”混沌状态^[11]. 取 Henon 序列 10 000 个数据后的 500 个作为数据源,才得出“稳定的”结果.

4.2 实验结果

Henon 序列的时延 $d=4$,初值取 $(x_0=0.2, x_1=0.6, x_2=0.4, x_3=0.3, x_4=0.1, x_5=0.5, x_6=0.8, x_7=0.7)$ 和 $(x_0=0.2+10^{-8}, x_1=0.6, x_2=0.4, x_3=0.3, x_4=0.1, x_5=0.5, x_6=0.8, x_7=0.7)$,生成两组上述的数据源($N=500$),应用微熵率法分别求最佳嵌入维数 m_{opt} 和时延 τ_{opt} . 其中: N_s 的选取,以 $(H(x_{s,i},m,\tau))_i$ 趋于稳定为准,文中取 $N_s=10$.

图 3,表 1,2 对应 $d=4$ 的 Henon 序列. 图 3 和表 1 对应的初值取 $(x_0=0.2, x_1=0.6, x_2=0.4, x_3=0.3, x_4=0.1, x_5=0.5, x_6=0.8, x_7=0.7)$ 的结果. 表 2 对应的初值取 $(x_0=0.2+10^{-8}, x_1=0.6, x_2=0.4, x_3=0.3, x_4=0.1, x_5=0.5, x_6=0.8, x_7=0.7)$ 的结果. 从表 1,2 可以看出: $m=3, \tau=4$ 时,熵率 $R_{\text{ent}}(m,\tau)$ 均取得最小值,即最佳嵌入维数 $m_{\text{opt}}=3$ 和时延 $\tau_{\text{opt}}=4$ (对应 $d=4$),实证了不同的初值下 Henon 序列混沌特征的稳定性.

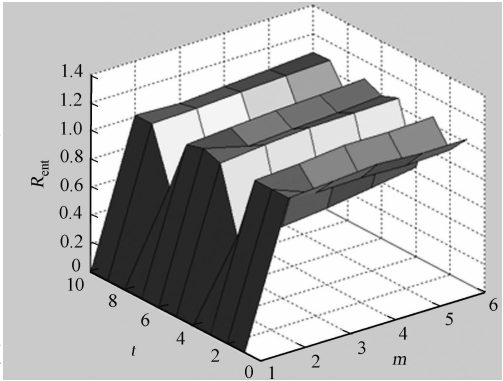


图 3 $R_{\text{ent}}(m,\tau)$ 三维示意图
Fig. 3 3D-diagram of $R_{\text{ent}}(m,\tau)$

表 1 第一组初值对应的 R_{ent}							
Tab. 1 R_{ent} of the first set initial value							
$m \backslash \tau$	1	2	3	4	5	6	7
2	1.039 4	1.045 9	1.036 9	0.515 5	1.022 4	1.028 3	1.021 1
3	1.037 9	0.924 5	1.041 4	0.490 3	1.026 5	0.986 5	1.042 4
4	1.051 6	0.931 3	1.053 2	0.521 6	1.053 5	1.016 0	1.054 0
5	1.032 6	0.920 1	1.054 0	0.563 4	1.060 8	1.028 2	1.064 7
6	1.035 9	0.929 1	1.065 6	0.613 0	1.076 1	1.043 3	1.079 2
7	1.044 8	0.944 8	1.078 8	0.663 8	1.088 3	1.063 1	1.091 1
8	1.056 3	0.966 2	1.091 6	0.716 6	1.105 5	1.082 1	1.106 7

表 2 第二组初值对应的 R_{ent}							
Tab. 2 R_{ent} of the second set initial value							
$m \backslash \tau$	1	2	3	4	5	6	7
2	1.009 3	1.028 6	1.017 6	0.468 4	1.005 5	1.010 0	1.021 7
3	1.041 1	0.915 7	1.040 8	0.455 0	1.042 0	0.983 4	1.034 5
4	1.045 1	0.920 1	1.054 0	0.492 7	1.052 2	0.999 4	1.044 6
5	1.030 6	0.909 0	1.051 7	0.534 5	1.055 1	1.009 5	1.060 5
6	1.031 9	0.916 5	1.062 2	0.580 7	1.066 2	1.031 0	1.074 2
7	1.040 8	0.929 3	1.076 2	0.630 2	1.082 8	1.050 3	1.090 1
8	1.052 5	0.949 8	1.089 9	0.681 5	1.099 4	1.070 6	1.106 7

对应 Henon 序列的不同时延 d ,表 3 给出基于微熵率的辨识结果(初值取 $[0,1]$ 的随机数),包括 $m_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}}, R_{\text{ent}}(m_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}})$. 由表 3 可知: m_{opt} 的值恒为 3, τ_{opt} 的值始终与 d 保持一致;有效地验证了 Henon

序列混沌特征的稳定性,这种稳定性奠定了混沌系统的研究基础.

表 3 不同时延的微熵率法辨识
Tab. 3 Differential entropy of different time delay

d	m_{opt}	τ_{opt}	$R_{\text{ent}}(m_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}})$	d	m_{opt}	τ_{opt}	$R_{\text{ent}}(m_{\text{opt}}, \tau_{\text{opt}})$
1	3	1	0.463 1	4	3	4	0.496 8
2	3	2	0.460 7	5	3	5	0.488 3
3	3	3	0.494 1	6	3	6	0.523 5

参考文献：

[1] GAUTAMA T,MANDIC D P,VANHULLE M M. A differential entropy based method for determing the optimal embedding parameters of signal[C]//Processing of the Int Conf on a Coustics, Speech and Signal Processing. Hong Kong:[s. n.],2003;29-32.

[2] 王光义,郑艳,刘敬彪. 一个超混沌 Lorenz 吸引子及其电路实现[J]. 物理学报,2007,56(6):3113-3120.

[3] GALLAS J A C. Structure of the parameter space of the Hénon map[J]. Physical Review Letters,1993,70(18):2714.

[4] HENON M. A two dimensional mapping with stranger attractor[J]. Commun Math Phys,1976,50(1):69-77.

[5] BENEDICKS M,CARLESON L. The dynamics of the Henon map[J]. Annals of Mathematics. 1991,163(3):749-841.

[6] THEILER J,EUBANK S,LONGTIN A,et al. Testing for nonlinearity in time series: The method of surrogate data [J]. Physica D: Nonlinear Phenomena,1992,58(1):77-94.

[7] SCHREIBER T,SCHMITZ A. Improved surrogate data for nonlinearity tests[J]. Physical Review Letters,1996,77(4):635.

[8] KEYLOCK C J. Constrained surrogate time series with preservation of the mean and variance structure[J]. Physical Review E,2006,73(3):036707.

[9] 王海燕,盛昭瀚. 混沌时间序列相空间重构参数的选取方法[J]. 东南大学学报:自然科学版,2000,30(5):113-117.

[10] TAKENS F. Detecting strange atractors in turbulence[J]. Lecture Notes in Mathematics,1982,898(12):198-366.

[11] GRASSBERGER P,KANTZ H,MOENIG U. On the symbolic dynamics of the Hénon map[J]. Journal of Physics A:Mathematical and General,1989,22(24):5217.

Analysis and Empirical Research of the Entropy Ratio Method

HUANG Yi^{1,2}, XIE Wei-bo^{1,2}

(1. College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Open Laboratory of Embedded Technology, Xiamen Software Park, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Using differential entropy ratio method to reconstruct phase space and based on the theoretical results of the chaotic characteristic of Henon map, two groups of initial value were selected to verify the stability of the chaotic characteristics of Henon sequence. In this process, all aspects of differential entropy ratio algorithm was demonstrated either. The experimental results showed that using differential entropy ratio method to reconstruct phase space can effectively capture the characteristic of the the chaotic sequences.

Keywords: differential entropy ratio method; surrogate data; Henon map; chaotic characteristics; empirical research

(责任编辑：钱筠 英文审校：吴逢铁)

采用小波变换的脑电图信号分析及其应用

蔡琼¹, 陈鹏慧¹, 魏武²

(1. 湖南信息职业技术学院 电子工程学院, 湖南 长沙 410200;
2. 华南理工大学 自动化科学与工程学院, 广东 广州 510641)

摘要: 为解决用小波变换方法进行脑电图(EEG)多分类自动识别容易出现特征信号混同化、识别率不高的问题,将小波变换中小波基的选取方法由单个的小波母函数改为能适应不同波形的多小波基,然后用支持向量机的方法进行分类.结果表明:在典型的脑电波 EEG 信号自动识别中,与传统的单小波母函数相比,多小波基(小波母函数序列)能检测出更多的特征波形;用基于多小波基的小波变换识别方法要明显优于基于传统的 Coif, Morlet 等单小波基小波变换方法.

关键词: 脑电图; 自动识别; 多小波基; 小波变换; 支持向量机

中图分类号: R 444; TN 911.6 **文献标志码:** A

1929 年,自德国精神病医生 Berger 进行人的脑电图(EEG)信号的最早期研究后,EEG 就一直被用作一个临床诊断和研究的工具^[1]. EEG 检查对神经系统疾病诊断、病情监测及疗效观察有重大作用.通过脑电波就可以发现异常生物电,通过仪器还原,可以发现哪部分大脑发生了疾病^[2].因此,EEG 检查已广泛应用于临床医学、心理学和认知神经科学的研究中. EEG 自动识别方法主要有 Lyapunov 指数法^[3]与时频分析法.无论是谱分析的方法,还是非线性动力学的方法,在研究 EEG 信号时都要求信号是平稳的.但 EEG 信号是非线性非平稳信号,这就对连续的动态分析形成了挑战.于是,以如维格纳分布等时频分析为代表的非平稳分析方法引起了人们的极大兴趣.然而,对于多通道分量 EEG 信号而言,维格纳分布的时间、频率双线性会使其存在严重的交叉项干扰,阻碍其对 EEG 信号的有效分析及分量参数的提取,大大降低自动识别的效果,从而影响了维格纳分布在 EEG 信号中的应用与推广^[4].小波分析是由 Grossman 和 Morlet 引入到信号分析领域的.由于神经生物科学和计算机信息科学的交叉融合,小波分析才在 EEG 信号消除噪声、信号分析、特征检测、自动识别等领域中引起关注^[5].本文将能适应不同波形的多小波基(小波母函数序列)代替小波变换中的单个小波母函数,然后用支持向量机的方法进行分类,并应用于典型的脑电波 EEG 信号的自动识别中.

1 基于小波变换的 EEG 分析

小波基函数(母函数)选取及计算尺度 a (分辨率)的选取都是小波分析过程中亟待解决.有限带宽的 EEG 脑电波信号在某一尺度下的小波相当于一个带通滤波器^[6],若此带通滤波器用来分析 EEG 信号,则在频域空间上必须与待分析的 EEG 信号有交集,具体分析模型为

$$W_{\Psi}^S(a,\tau) = (S(t), \Psi(t)) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} S(t) \Psi(\frac{t-\tau}{a}) dt. \tag{1}$$

选取 EEG 时频分析中最常用的非正交性 Morlet 复值小波为小波基函数,即

$$\Psi(t) = \frac{1}{\sqrt{\pi f_b}} \cdot \exp(t^2/f_b) \cdot \exp(i\pi f_c t). \tag{2}$$

收稿日期: 2015-03-20
通信作者: 蔡琼(1982-),女,讲师,博士,主要从事智能控制、信号处理、图像识别的研究. E-mail: caiqiong@mail.hniu.cn.
基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助项目(12C1174)

式(2)中: f_c 为小波的中心频率; f_b 为带宽参数. Morlet 小波变换中的小波中心频率对应不同的带宽或分辨率. 这是由于 Morlet 小波有一个恒定的比率 $K=2f_c/f_b$, 实际应用中, f_c/f_b 一般取值大于 2.5.

在分析 EEG 的阿尔法波形时候^[7], 中心频率 $f_c=10$ Hz(阿尔法波峰值), 阿尔法波随着时间变化的能量分布为

$$E_f(f, t_0) = \int_0^{t_0+t} |S(t) * \phi(t)|^2 dt. \quad (3)$$

将 EEG 信号与小波信号进行卷积平方并积分, 通过实验数据分析得出, 获取 EEG 信号中阿尔法波与脑机能有一定的关系.

小波神经网络是基于小波分析而构造的一种新的神经网络模型^[8]. 在小波神经网络中的神经网络函数不再是传统的 Sigmoid 函数, 而采用的是非线性小波基. 脑电波信号重构的方法是通过将所选取的非线性小波基进行线性叠加来实现. 脑电波信号 $S(t)$ 可用非线性小波基进行拟合, 即

$$S^*(t) = \sum_{k=1}^K w_k h\left(\frac{t-b_k}{a_k}\right). \quad (4)$$

式(4)中: $w_k, h(t), b_k, a_k$ 分别为权值、小波基, 平移因子和伸缩因子, k 为小波基的个数. 神经网络参数可以通过最小均方差能量函数进行优化, 即

$$E = \frac{1}{2} \sum_{m=1}^M [S(t_m) - S^*(t_m)]^2. \quad (5)$$

式(5)中: M 为数据采样总数. 这里选用 Morlet 母小波为小波基, 该小波是余弦调制的高斯波, 分辨率高. 令 $t' = (t - b_k)/a_k$, 则有

$$g(w_k) = \frac{\partial E}{\partial w_k} = - \sum_{m=1}^M [s(t_m) - s^*(t_m)] \cdot \cos(1.75t'_m) \cdot \exp(-t'^m)^2. \quad (6)$$

$$\text{同理, } g(b_k) = \frac{\partial E}{\partial b_k}, g(a_k) = \frac{\partial E}{\partial a_k}.$$

采用共轭梯度法优化网络 w_k, b_k, a_k , 分别令向量 $\mathbf{w} = (w_1, w_2, \dots, w_k)$, $\mathbf{g}(\mathbf{w}) = (g(w_1), g(w_2), \dots, g(w_k))$, $\mathbf{s}(\mathbf{w})_i$ 为 $\mathbf{w}$ 第 i 次循环搜索方向, 则有

$$\mathbf{s}(\mathbf{w})_i = \begin{cases} -\mathbf{g}(\mathbf{w})_i, & i = 1, \\ -\mathbf{g}(\mathbf{w})_i + \frac{\mathbf{g}(\mathbf{w})_i [\mathbf{g}(\mathbf{w})_i]^T}{\mathbf{g}(\mathbf{w})_{i-1} [\mathbf{g}(\mathbf{w})_{i-1}]^T} \mathbf{s}(\mathbf{w})_{i-1}, & i \neq 1. \end{cases} \quad (7)$$

同理, 定义 $\mathbf{s}(\mathbf{b})_i, \mathbf{s}(\mathbf{a})_i$.

$\mathbf{w}$ 按照如下公式进行调整, 即

$$\mathbf{w}_i = \mathbf{w}_{i-1} + \alpha_{w(i-1)} \delta \mathbf{w}_{i-1}. \quad (8)$$

同理, $\mathbf{b}, \mathbf{a}$ 都可按照式(8)进行调整.

通过一维搜索变步长法, 计算最佳步长 $\alpha_{w_i}, \alpha_{a_i}, \alpha_{b_i}$, 并按照最佳步长调节网络参数 $\mathbf{w}, \mathbf{b}, \mathbf{a}$, 直到 E 满足特定误差为止.

该方法适合用于 EEG 多通道复杂信号的分析, 具有很好的信号特征提取和屏蔽随机噪声能力, 有效信息有助于癫痫棘波、棘慢波的临床诊断.

2 基于小波变换的 EEG 信号应用

2.1 EEG 信号的自动识别系统设计

所设计脑电波(EEG)自动识别系统, 如图 1 所示. EEG 信号自动识别系统主要分为预处理、特征提取和分类三大模块. 自动识别系统读取 EEG 数据, 选取合适小波基进行多分辨分析, 并计算 SWE(小波熵)值; 然后, 通过 SVM(支持向量机)来进行不同病症的分类; 最后, 给出识别报告, 即通过自动识别系统检测出病患脑电波是否为正常脑电波的结论. 结合临床, 如果是脑内伤患者, 则在各导联会出现弥漫性的慢波, EEG 信号能量低, 且阿尔法波的比列减少; 如果出现棘波和棘慢波则考虑可能是癫痫.

2.2 采样数据及其预处理

多通道 EEG 数据是中南大学湘雅医学院附属二医院精神科提供的. EEG 脑电波采用国际系统安

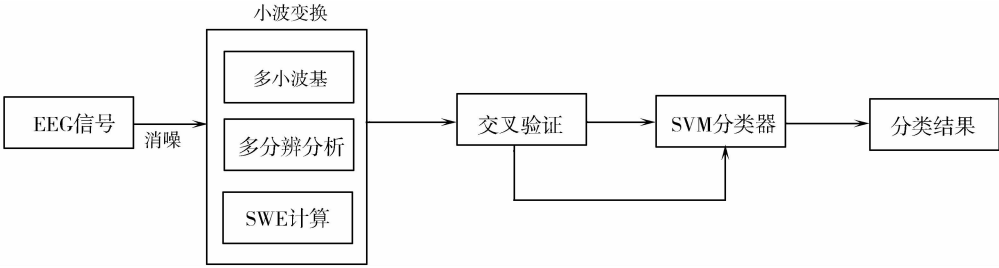


图 1 脑电波自动识别系统框图

Fig. 1 EEG automatic identification system block diagram

置电极的仪器,采样频率 f_c 为 250 Hz,头皮单导联为 16 通道,选取其中几个导联的数据. 每组 EEG 脑电数据记录时间为 10 s. EEG 采集仪系统已经进行了基本的消噪处理,图 2 为某位 39 岁健康男子的 EEG 数据采样图.

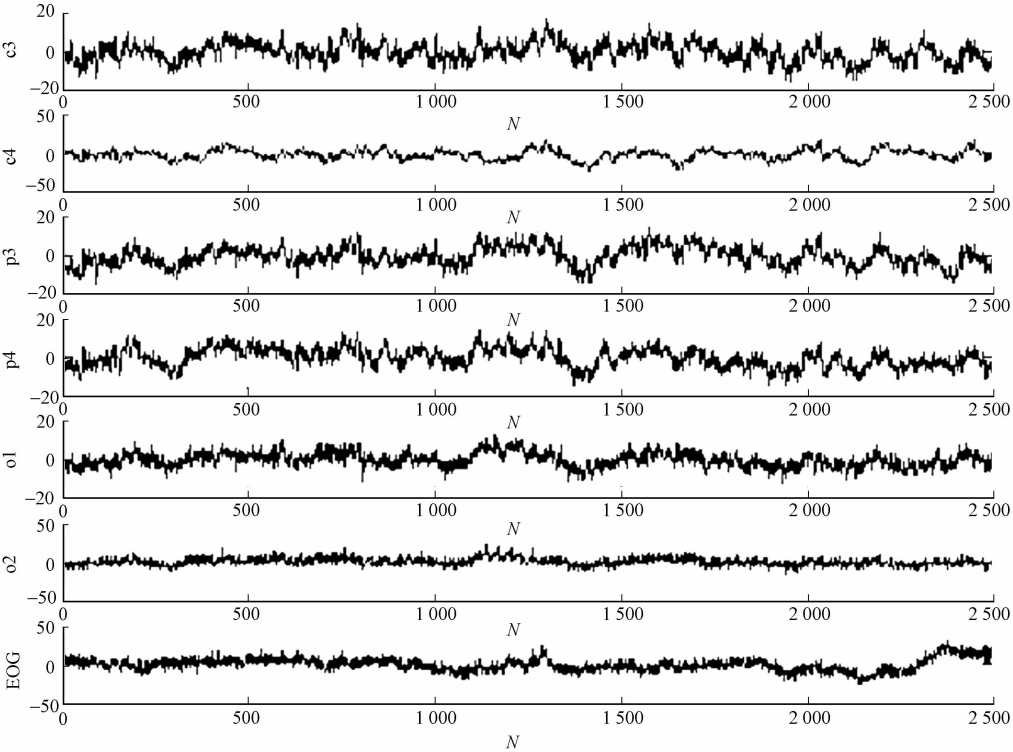


图 2 某健康男子 EEG 的采样图

Fig. 2 Healthy man EEG sampling chart

2.3 小波变换

2.3.1 小波基的选取 计算各小波基对待分析 EEG 的小波系数及方差值. 在连续小波变换中进行多分辨分析的小波基有 *coif* 系小波、*rbio* 系小波、*haar* 小波、*db* 系小波、*dmey* 系小波、*sym* 系小波、*bior* 系小波等. 哪组小波基所获得小波系数最大且方差值小,就选取这组小波基.

2.3.2 多分辨分析 如果进行 6 层分解,则各分量所对应的子频带成分大致与 EEG 脑电波中 low δ , high δ , θ , α , β , γ 一一对应. 采用 6 层分解后,一一对应的各频带具有明确的物理含义. 因此,将 EEG 的原始信号 $f(t)$ 进行 6 层分解^[9],则有

$$f(t) = A_6 + D_6 + D_5 + D_4 + D_3 + D_2 + D_1.$$
 (9)

小波系数长度向量 L_{coef} 和小波分解系数向量 C_{coef} 为小波变换分解后输出的结构. 其中,系数向量 C_{coef} 结构为

$$C_{coef} = [cA_6 + cD_6 + cD_5 + cD_4 + cD_3 + cD_2 + cD_1].$$
 (10)

2.3.3 基于多小波基的小波熵计算 对用不同的频率子带计算其能量分布 *SWE* 值,则有

$$\left. \begin{aligned} \text{SWE} &= - \sum_i p_i \log(p_i), \\ p_j &= \sum_k \|c_{j,k}\|^2 / \sum_j \sum_k \|c_{j,k}\|^2. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

式(11)中: p_j 是在尺度 j 下的能量和所有尺度下能量和之比; $c_{j,k}$ 为各尺度下的 C_{coef} .

2.4 支持向量机分类器的设计

支持向量机(SVM)的基本思想是如何解决一个非线性问题转换到另一个线性空间的问题^[10]. 这里需要的本库分为正常、癫痫、脑病、脑内伤, 因此, 要解决的就是一个 4 分类问题(正常人 EEG、癫痫 EEG、脑血管 EEG、脑病 EEG).

标准的 SVM 是解决两类分类问题, 文中采用的是“One Against One”SVM 分类法. 该算法是将多分类问题(l 类)转换为 $C_l^2(l(l-1)/2)$ 个二分类 SVM 问题. 当 SVM 分类器分类 i, j 类时, 在训练样本中选取对应的训练样本(正常人 EEG、癫痫 EEG、脑血管 EEG、脑病 EEG), 并将第 i 类记为正分类, 第 j 类记为负分类, 且满足

$$\left. \begin{aligned} \min_{w^{i,j}, b^{i,j}, \xi^{i,j}} \quad & \frac{1}{2} (w^{i,j})^T + c \sum_l \xi_l^{i,j}, \\ \text{s. t} \quad & (w^{i,j})^T + b^{i,j} \geq 1 - \xi_l^{i,j}, \quad y_i = i, \quad \xi_l^{i,j} \geq 0, \\ & (w^{i,j})^T \varphi(x_l) + b^{i,j} \leq -1 + \xi_l^{i,j}, \quad y_i = j, \quad \xi_l^{i,j} \geq 0. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

训练样本正常脑电波、癫痫脑电波、脑血管病脑电波、脑内伤脑电波各位 50 组. 训练次数(n)与脑电波识别率(γ)对比, 如图 3 所示.

2.5 性能对比

传统单小波基小波变换和文中设计方法(自适应多小波基小波变换、SVM 分类方法相结合)的性能对比, 如图 4 所示. 从图 4 中可以发现: 文中方法分类效果要优于传统的单小波基的小波变换.

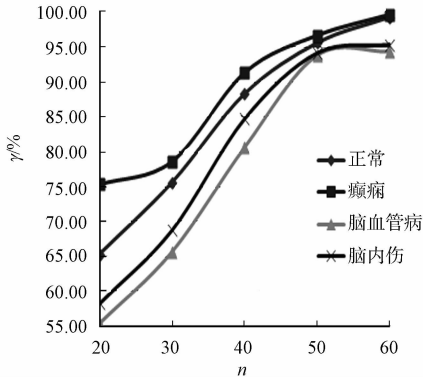


图 3 训练次数与脑电波识别率对比图

Fig. 3 Training number and EEG recognition rate comparison chart

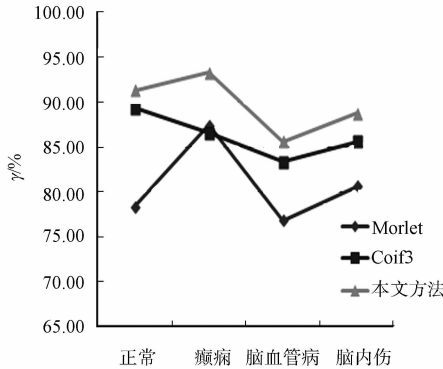


图 4 各类脑电图分类正确率统计图

Fig. 4 All kinds EEG classification correct rate statistical chart

3 结论

利用小波变换进行 EEG 的特征信号的提取时, 先将小波基的选择进行了优化. 文中采用的是自适应小波基的方法, 匹配检测 EEG 与各类小波基, 取小波系数且方差值最小者. 因此, 对于待分析的 EEG 可能有多个不同的小波基进行小波分析. 经过多分辨分析后, 计算所获得的系数 SWE 值, 通过 SVM 进行分类. 通过实验表明: 基于 Morlet 小波变换的自动识别和基于 Coif3 小波变换方法相比, 文中采用方法的自动识别率要更高一些.

EEG 自动识别的应用领域不仅仅在临床医学上对癫痫、脑炎、帕金森、阿尔茨海默病、威尔逊^[11]、脑瘤、癫痫、心律不齐等病的判定上^[12], 还可应用于辅助治疗精神创伤、意志消沉等. 在检测到特征波形时, 可以进行相应的干预治疗, 将检测、治疗自动智能化^[13].

EEG 自动识别还可以应用于提高人脸识别的身份验证的可靠性上. 目前, 用来进行身份识别方法

和手段有很多,利用生物特征是比较安全可靠的方法.但是,如果这个人处于被胁迫的状态,那么单靠人脸识别的人脸检测就不够了.因此,可以利用人的脑电波和人脸识别技术相结合的方法提高安全性,保证信息的安全,使得系统的稳定性更高.

参考文献:

[1] BERGER H. Über das elektrenkephalogramm des menschen[J]. Arch Psychiatr Nervenkr,1929,87(1):527-570.

[2] 凌朝东,黄群峰,张艳红,等. 脑电信号提取专用电极芯片的设计研究[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2007,28(3): 76-79.

[3] 谢惠琴,王全义. 时延细胞神经网络的指数稳定性和周期解[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2004,25(1),22-26.

[4] 季忠,秦树人. 基于 Wigner 分布的脑电信号处理[J]. 信号处理,2002 ,18 (6):570-573.

[5] 凌朝东,刘蓉,钱江,等. 基于 5/3 提升小波变换的心电信号压缩算法及 VLSI 实现 [J]. 信号处理,2010,26(6):930-935.

[6] 杨帮华,颜国正,鄢波. 基于离散小波变换提取脑机接口中脑电特征[J]. 中国生物医学工程学报,2006,25(5):518-521.

[7] 王浩,陈志华,邹飒枫,等. 基于 Morlet 小波变换的 EEG 信号 α 波持续性的分析[J]. 生物医学工程学杂志,2010, 27,(4):745-747.

[8] 张永胜,刘爱萍,郁可. 脑电信号数据压缩及棘波识别的小波神经网络方法[J]. 生物医学工程学杂志,1999,16(2): 1-7.

[9] 曾小军,黄宜坚. 利用 AR 模型和支持向量机的调速阀故障识别[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(1):13-18.

[10] WALLACE B E, WAGNER A K, WAGNER E P, et al. A history and review of quantitative electroencephalography in traumatic brain injury[J]. J Head Trauma Rehabil,2001,16(2):165-190.

[11] CHU N S, CHU C C, TU S C, et al. EEG spectral analysis and topographic mapping in Wilson's disease[J]. J Neurol Sci,1991,106(1):1-9.

[12] 阮月平,张佃中,张屹. 心律不齐患者心电图变异的小波分析[J]. 生物医学工程学杂志,2012,29(4):650-652.

[13] van COTT A C. Epilepsy and EEG in the elderly[J]. Epilepsia,2002,43(S3):94-102.

Analysis and Application of Electroencephalography Signal
Based on Wavelet Transform

CAI Qiong¹, CHEN Peng-hui¹, WEI Wu²

(1. College of Electronic Engineering, Hunan College of Information, Changsha 410200,China;
(2. School of Automation Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641,China)

Abstract: In order to solve problem confused characteristic signal and low recognition rate when wavelet transform used in the electroencephalography (EEG) multi classification, we change the wavelet basic sequences for the single wavelet basic which can adapt to the different waveform. Multi wavelets can detect more characteristic waveform compared with single wavelet basis, and support vector machine (SVM) is used for classification. In the typical EEG signal automatic, multi wavelet transform method is better than the tradition Coif or Morlet wavelet transform method.

Keywords: electroencephalogram; automatic identify; multi wavelets; wavelet transfer; support vector machine

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 吴逢铁)

超宽带小尺寸介质谐振器天线

曾小虎, 葛悦禾

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 研究一种工作于 3.1~10.6 GHz 频段的超宽带叠层介质谐振器天线. 将低介电常数薄介质片插入介质谐振器和金属地面之间, 可有效降低介质谐振器的 Q 值, 展宽天线带宽. 在介质谐振器下部切去 1 个小四面体, 产生 1 个空气缝隙, 进一步展宽天线带宽并提高阻抗匹配. 对空气缝隙尺寸进行优化, 使各个工作模式的频带相互重叠, 产生超宽带工作带宽. 在天线一侧短接金属壁, 减小天线总尺寸一半以上. 对设计的介质谐振器天线进行仿真实验, 结果表明: 试验和仿真结果一致性较好; 介质谐振器天线实现 4 : 1 的带宽(相对带宽约 118%), 带内增益为 4~8 dBi.

关键词: 介质谐振器天线; 介质谐振器; 叠层天线; 超宽带天线

中图分类号: TN 822 **文献标志码:** A

天线小型化和带宽展宽技术是天线设计的一个重要内容. 以往天线工程师为了减小天线尺寸, 不得不使用窄带天线. 随着无线系统性能的不断提高, 工程师们一直尝试设计具有小尺寸和宽带性能的天线, 而介质谐振器天线是一个较好的选择. 早在 1983 年, 介质谐振器就被用作辐射单元^[1]. 之前, 无负载的高 Q 值介质谐振器在微波电路中已经广泛运用. 介质谐振器的带宽、高辐射效率、极化方式和低剖面等性能都已得到深入研究^[2-6]. 使用高介电常数的介质谐振器可使天线小型化, 但会减小天线的带宽. 因此, 需要额外的技术来减小介质谐振器天线尺寸^[2,7-9]. 为了降低天线的复杂度和减小天线尺寸, 许多研究人员通过在介质谐振器和地面之间加入多层介质板来拓宽天线的带宽. 研究表明: 在介质谐振器底部和地面之间引入一层低介电常数介质板, 可有效辐射并提高带宽^[7,10]. 在前期设计的超宽带介质谐振器天线^[7]中, 超宽带范围内有多个频率点的驻波比超过 2, 使天线在这些频率点不能很好匹配. 本文运用新技术改进超宽带介质谐振器的阻抗匹配, 并进一步提高天线的超宽带带宽.

1 超宽带介质谐振器天线的设计

改进文献^[7]的叠层超宽带介质谐振器天线, 进一步提高带宽和阻抗匹配. 文中设计的介质谐振器天线结构, 如图 1 所示. 图 1 中: a 为 12 mm; b 为 8 mm; $c+h_1$ 为 12 mm; d 为 3 mm; $h-d$ 为 1.9 mm; 空气缝隙的尺寸 g_d, g_h, h_1 , 以及与探针短接的正方形金属贴片的边长 s 为待定参数. 介质谐振器天线由矩形介质谐振器和低介电常数的薄介质片以及金属地面组成. 介质谐振器和介质片堆叠在地面上方, 金属探针通过地面, 穿过介质片, 伸入介质谐振器进行馈电. 同时, 在介质谐振器下表面或者介质片上表面

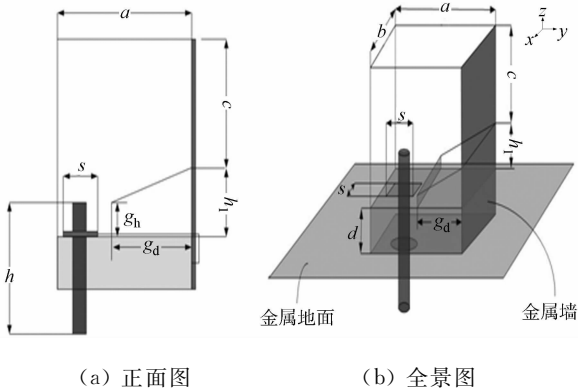


图 1 介质谐振器天线的结构
Fig. 1 Structure of the dielectric resonator antenna

探针位置处放置 1 个正方形的薄金属片,与探针短接.介质谐振器一侧的下部被切去 1 个四面体,当其安置在薄介质片上时,切去的部分成为空气间隙.在空气间隙一侧短接 1 个金属导体板,该导体板短接地面.

在介质谐振器和地面之间插入低介电常数薄介质片可使介质谐振器和地面隔离,从而提高天线的带宽,降低介质谐振器的 Q 值.在一侧放置短接地面的金属板,可以视为 1 个等效地面.根据镜像原理,介质谐振器天线的尺寸在某些工作模式下可以减小一半^[7].在薄介质片之间引入空气间隙,在介质片上表面加入与探针短接的金属片,不仅增加了天线带宽,还提高了天线带内的阻抗匹配.

对设计的介质谐振器天线进行仿真实验,仿真结果均出自商业软件 Ansoft HFSS.金属贴片和空气间隙对天线驻波比(VSWR)的影响,如图 2 所示.由图 2 可知:当不加金属贴片和空气间隙时,在 3~10.6 GHz 频带内,8,10 GHz 附近的阻抗匹配不好;当加金属贴片,不加空气间隙时,10 GHz 附近的阻抗匹配不好;当不加金属贴片,加空气间隙时,阻抗匹配性能可以接受,但由 $VSWR < 2$ 确定的带宽无法覆盖到 10.6 GHz;当加金属贴片和空气间隙时,在 3~11.5 GHz 范围内, $VSWR < 2$,且阻抗匹配好于上述 3 种情况.

仿真研究发现:当正方形贴片边长 s 为 3 mm 时,结果较好;当 s 在 3 mm 附近微小变化时,对带宽和阻抗匹配结果影响不大.因此, s 取 3 mm.当 g_h 为 1 mm, h_1 为 2 mm 时, g_d 对驻波比的影响,如图 3 所示.由图 3 可知:当 g_d 为 7~9 mm 时,天线的阻抗带宽均较好,且 g_d 越大,天线在高频匹配越好.当 g_d 为 7 mm, h_1 为 2 mm 时, g_h 对驻波比的影响,如图 4(a)所示.由图 4(a)可知:当 g_h 为 3 mm 时,天线高频段阻抗匹配较好;而取其他值时,天线在高频时匹配较差.当 g_d 为 7 mm, g_h 为 3 mm 时, h_1 对驻波比的影响,如图 4(b)所示.由图 4(b)可知:当 h_1 为 2 mm 时,天线频带内匹配性能较好.

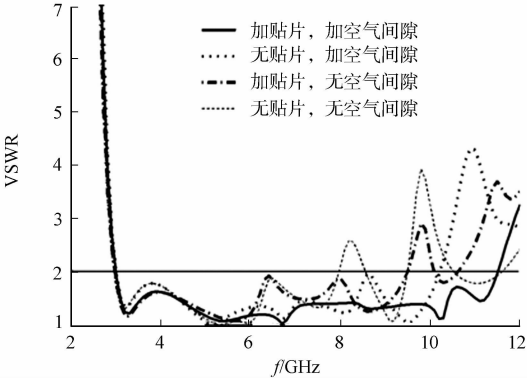


图 2 金属贴片和空气间隙对驻波比的影响
Fig. 2 Effects of the metallic patch and the air gap on the VSWR

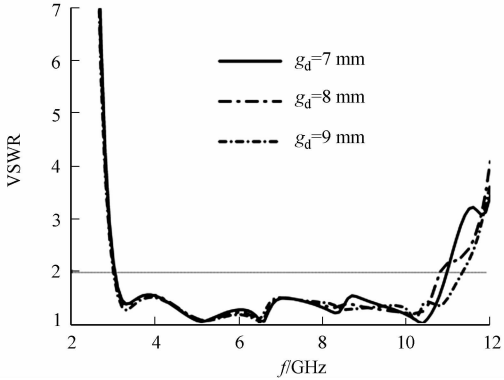
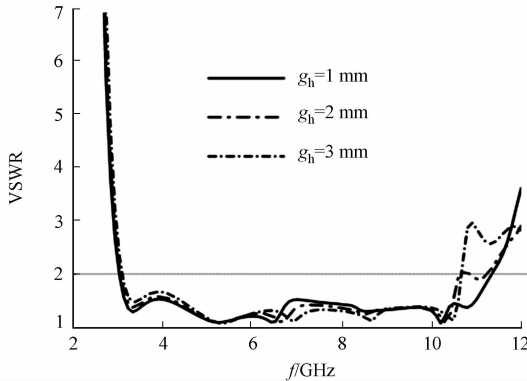
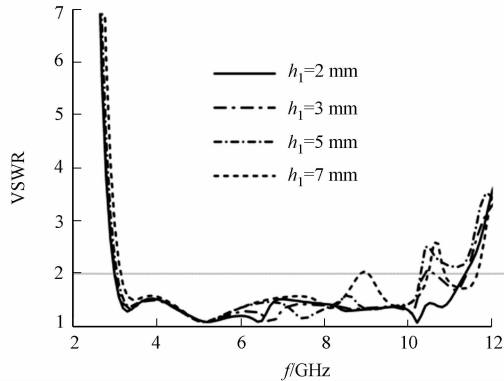


图 3 g_d 对驻波比的影响
Fig. 3 Effects of g_d on the VSWR



(a) g_h



(b) h_1

图 4 g_h, h_1 对驻波比的影响
Fig. 4 Effects of g_h and h_1 on the VSWR

2 设计实例和结果

由上文分析可得介质谐振器天线的最佳参数: a 为 12 mm; b 为 8 mm; c 为 12 mm; d 为 3 mm; h 为 5.2 mm; g_h 为 1 mm; g_d 为 7 mm, h_1 为 2 mm. 介质谐振器和薄介质片材料分别为 Rogers TMM10, Rogers Duroid 5880, 其介电常数分别为 9.2, 2.2. 天线地面选用厚度为 1 mm 的铝板, 尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm. 介质谐振器天线实物, 如图 5 所示. 天线的一面用铜箔短路到地面. 天线的阻抗匹配和辐射特性分别用 E5071C 型矢量网络分析仪(美国安捷伦科技有限公司)和近场测试系统(美国 NSI 公司)进行测试.

天线驻波比的测量值与仿真值, 如图 6 所示. 理论上驻波比小于 2 的带宽为 2.95~11.70 GHz, 相对带宽超过 118%. 在整个频段内测得的驻波比接近仿真值. 其中的误差来自于介质谐振器的加工误差. 由于 Rogers TMM10 是一种陶瓷材料, 较脆, 在加工空气缝隙和馈电探针的孔隙时存在较大的误差. 联邦通信委员会(FCC)超宽频范围内天线增益的测量值, 以及由商业软件 CST 得出的增益理论值, 如图 7 所示. 由图 7 可知: 在频带范围内, 增益测量值和仿真值都在 4~7 dBi.

实测的辐射方向, 如图 8 所示. 由图 8 可知: 在 XOZ 平面, 方向图在上述频率下有相似之处; 在 YOZ 平面, 随着频率的不同, 方向图有一些改变. 因为随着频率的扫描, 不同的谐振模式占据了主导地位. 显然, 最大功率辐射方向为上半球, 所以这种类型的天线可用于定向和全向无线通信设备类型.

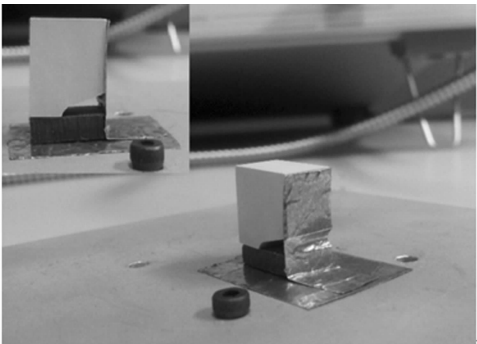


图 5 介质谐振器天线实物
Fig. 5 Prototype of the proposed dielectric resonator antenna

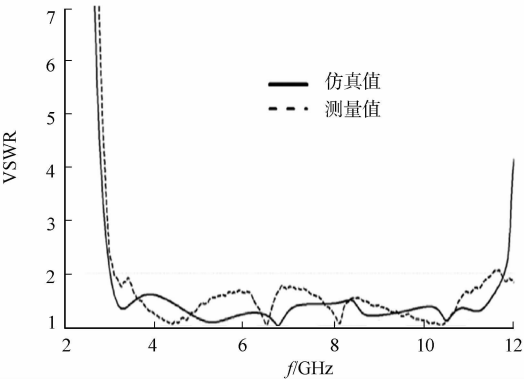


图 6 天线驻波比的仿真值和测量值
Fig. 6 Measured and simulated VSWR

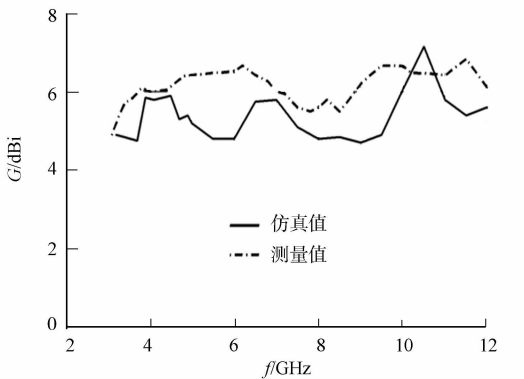


图 7 介质谐振器天线增益的仿真值和测量值
Fig. 7 Measured and simulated gain of the dielectric resonator antenna

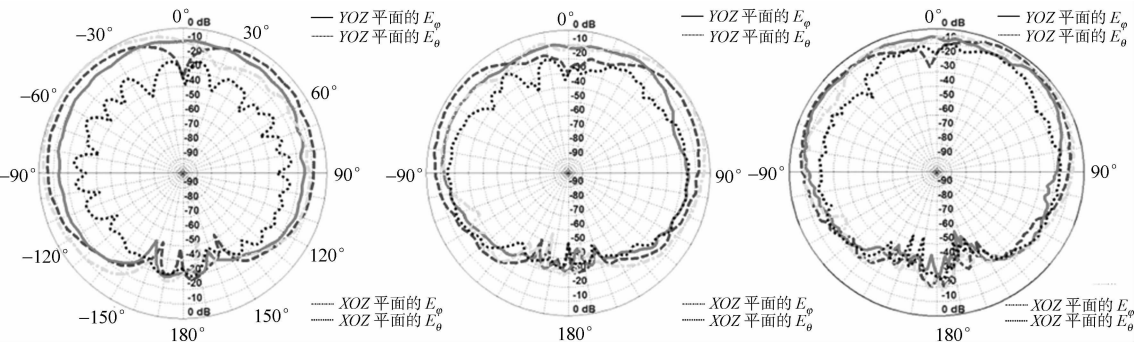


图 8 实测方向图
Fig. 8 Measured radiation patterns

3 结 束 语

加入低介电常数薄介质片,在介质谐振器内部引入空气间隙,增加介质谐振器天线的工作带宽.在天线一侧加入短接地面金属壁,减少一半以上的天线体积.通过适当的优化参数,介质谐振器天线具有超宽带、高增益和低交叉极化的法向辐射的特点.设计实例的实测带宽可覆盖完整的 FCC 频带,其 2 : 1 的驻波比带宽为 4 : 1(相对带宽约 118%).该天线具有较小的横截面尺寸 12 mm×8 mm($0.124\lambda_0\times 0.083\lambda_0$),高度为 15.0 mm($0.155\lambda_0$).

参考文献:

[1] LONG S,MCALLISTER M,SHEN L. The resonant cylindrical dielectric cavity antenna[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,1983,31(3):406-412.

[2] KISHK A A,AHN B,KAJFEZ D. Broadband stacked dielectric resonator antennas[J]. Electronics Letters,1989,25(18):1232-1233.

[3] SHUM S M,LUK K M. Characteristics of dielectric ring resonator antenna with an air gap[J]. Electronics Letters, 1994,30(4):277-278.

[4] FAN Z,ANTAR Y M M,ITTIPIBOON A,et al. Parasitic coplanar three-element dielectric resonator antenna subarray[J]. Electronics Letters,1996,32(9):789-790.

[5] KISHK A A. Experimental study of broadband embedded dielectric resonator antennas excited by a narrow slot [J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters,2005,22(4):79-81.

[6] PETOSA A. Dielectric resonator antenna handbook[M]. Boston:Artech House,2007:153-204.

[7] GE Yue-he,ESSELLE K P,BIRD T S. Compact dielectric resonator antennas with ultrawide 60%-110% bandwidth [J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation,2011,59(9):3445-3448.

[8] MONGIA R K,ITTIPIBOON A,ANTAR Y M M,et al. A half-split cylindrical dielectric resonator antenna using slot-coupling[J]. IEEE Microwave and Guided Wave Letters,1993,3(2):38-39.

[9] KISHK A A. Wide-band truncated tetrahedron dielectric resonator antenna excited by a coaxial probe[J]. Transactions on Antennas and Propagation,2003,51(10):2913-2917.

[10] 葛悦禾,汤炜,张海. 宽带叠层矩形介质谐振器天线的设计与仿真[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2012,33(6): 627-629.

A Compact Ultra-Wideband Dielectric Resonator Antenna

ZENG Xiao-hu, GE Yue-he

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: An ultra-wideband staked dielectric resonator antenna operating at 3.1-10.6 GHz band is studied. By inserting a low-permittivity thin dielectric sheet between the dielectric resonator and the ground, the *Q* factor of the dielectric resonator can be reduced effectively and broadening the antenna bandwidth. When cutting a small tetrahedron at the lower part of the dielectric resonator, an air gap is generated the bandwidth and the impedance matching of the antenna are enhanced. Through adjusting the dimensions of the air gap, multiple operating modes can be overlapped, resulting in an ultra-wide operating band. A shorting metal wall, based on the image theory, is placed on one side of the dielectric resonator, to reduce more than 50% of the antenna size without compromising the performance of the antenna. By simulating and testing to the dielectric resonator antenna, the result shows: the proposed dielectric resonator antenna achieves 4 : 1 a bandwidth (up to 118%) and the gain of 4-8 dBi over the bandwidth.

Keywords: dielectric resonator antenna; dielectric resonator; staked antennas; ultra wideband antennas

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)

一种可编程逻辑控制程序的竞态检测方法

黄颖坤, 罗继亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 针对可编程逻辑控制器中竞态检测的高计算复杂性,提出一种基于梯形图程序的特征结构用于检测竞态的方法.提出关系图的概念,并给出梯形图到关系图的转化方法.通过关系图的环形结构与可编程逻辑控制器的竞态之间的必然关系,给出梯形图中无竞态的判据.结果表明:该方法可以快速判断梯形图无竞态,并具有多项式级计算复杂度.

关键词: 竞态; 梯形图; 关系图; 可编程逻辑控制器

中图分类号: TP 271.8 **文献标志码:** A

梯形图具有形象、直观、实用等特点,是目前使用最多的一种可编程逻辑控制器(programmable logic controller,PLC)的编程语言^[1].但是,梯形图容易产生竞态,而竞态很难用传统的方法检测出来^[2],且验证程序的正确性需要极大的代价,动辄就是上百万美元.由于验证需要耗费大量时间,使得工厂、企业长时间停工.目前的研究成果大多是基于形式化方法^[3-4],包括模型检测和定理证明.模型检测是用一种形式化语言描述系统,生成系统行为的形式化描述,遍历系统模型的状态空间检验系统行为是否与需求相一致.国内外学者^[5-11]普遍使用 Petri 网或自动机为系统建模,将系统行为用另一种形式化语言描述,再用模型检测工具进行竞态检测.虽然模型检测可以实现检验过程的自动化,但是要遍历系统模型的状态空间,面临着“状态空间爆炸”的问题.定理证明可以处理无限的状态空间,它使用类似于结构化的推导过程来证明具有无限状态的系统.Kramer 等^[12]提出了 Higher Order Logic 分析 PLC 程序的方法.陈钢等^[13]用 COQ 定理证明器辅助 PLC 程序验证和分析.但是,定理证明大多数是交互的,需要人的参与,所以不仅提高了出错的概率,也降低了自动验证的可行性.尽管目前出现了用依赖图^[14-15]描述程序之间关系的研究,但是它将一个梯级看成结点,忽略了很多细节,无法清楚地表达梯形图各元素的逻辑关系.因此,本文提出了关系图的概念,通过梯形图转化为关系图;然后,从关系图的结构检验梯形图不存在竞态;最后,通过实例探讨该方法在竞态检验上的应用.

1 梯形图和竞态

梯形图是在原继电器-接触器控制系统的继电器梯形图基础上演变而来的一种图形语言.由于梯形图直观易懂,成为目前使用最广泛的一种 PLC 编程语言.梯形图的一个执行周期可以看成能量流从左垂直线经过 A,B 到达 C,然后从下一梯级的左母线经过 C 到达 B 的过程,如图 1 所示.

梯形图的竞态是指在输入和功能模块状态不变的情况下,输出发生变化.如图 1 的梯形图存在竞态,假设线圈 C 是输出线圈,触点 A 是输入触点.保持触点 A 是导通的,由于触点 B 是常闭触点,所以第一 PLC 扫描周期线圈 C 为高电平,当第二梯级执行完后,触点 B 为高电平;第二 PLC 扫描周期,由于触点 B 是常闭触点,此时为高电平,所以 C 变为低电

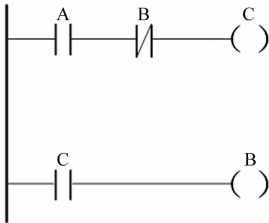


图 1 简单的梯形图
Fig.1 Simple ladder diagram

平. 因为输出状态的变化不是功能模块引起的, 所以梯形图存在竞态.

2 关系图的定义

从形式化的角度, 一个关系图 D 由非空有限集 $V(D)$, $V'(D)$, $A(D)$ 和 c 构成, 可以被定义为一个四元组, 记为 $D=(V, V', A, c)$. 其中: $V=\{v_1, v_2, \cdots, v_n\}$ 表示有限非空实结点的集合; $V'=\{v'_1, v'_2, \cdots, v'_m\}$ 表示有限非空虚结点的集合, $V \cap V' = \varnothing, V \cup V' \neq \varnothing$; $A \subseteq (V \times V') \cup (V' \times V)$ 是实结点和虚结点组成的二元组的集合, 表示从实结点到虚结点或虚结点到实结点的有向弧集合; $c: A \rightarrow \mathbf{Z}^+$ 表示关系图中每一条弧上的权值, $\mathbf{Z}^+$ 表示正整数集合.

用关系图描述梯形图的逻辑关系. 关系图的实结点用“□”表示, 对应为梯形图的图符单元, 如触点、线圈、功能模块等; 虚结点表示逻辑关系“与”, 用“|”来表示, 没有具体的意义; 弧上权值大小为对应梯形图的梯级, 如权值为“1”表示第一个梯级, “2”表示第二个梯级, 以此类推. 图 1 梯形图对应的关系图, 如图 2 所示. 图 2 表示的逻辑关系为实结点 V_c 受实结点 V_a, V_b 同时控制的, 对应到梯形图表示为线圈 C 的状态受触点 A, B 的状态共同控制, 符合图 1 梯形图的描述. 同理, 实结点 V_b 受实结点 V_c 控制, 对应到梯形图表示为触点 B 受线圈 C 控制, 也符合梯形图的描述. 因此, 可以用关系图等价的描述梯形图的逻辑关系.

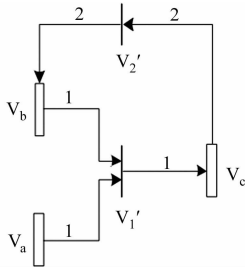


图 2 图 1 梯形图的关系图模型
Fig. 2 Relation graphs model of ladder diagram shown in figure 1

为了更好地认识关系图, 引入几个概念. 如果一个实结点只有输入有向弧没有输出有向弧, 称该实结点为根结点; 实结点到虚结点的有向弧或虚结点到实结点的有向弧, 称为关系图的线路, 简称线路; 如果一个实结点, 存在一条线路, 使之沿着这条线路能回到原点, 称该线路是一个关系图的环.

3 梯形图转化为关系图方法

梯形图间的逻辑关系较复杂, 从梯形图的结构无法直观地表示变量之间的逻辑关系. 因此, 提出将梯形图的逻辑关系转化为关系图来表示, 使梯形图内各元素之间的逻辑关系清晰化, 便于竞态的检测.

定义 1 在梯形图中, 由触点、功能模块以及连接它们之间的导线组成的线路称为梯形图的路径.

定义 2 可使能量流从左母线到线圈(右母线)的路径, 称为梯级路径. 从图 1 的梯形图实例可以看出: 梯形图有 2 条梯级路径. 梯级路径的个数等于梯形图的梯级数.

定义 3 由梯级路径中的触点、功能模块组成的集合, 并且删除该集合内的任意元素, 都会使梯级路径断开, 则称该集合为梯级路径的割集, 简称割集.

定义 4 从左母线到功能模块所有端口的路径, 由这些路径上的触点组成的集合, 并且删除该集合内的任意元素, 都会使功能模块不能正常工作, 称该集合为模块割集.

提出梯形图到关系图的转化方法, 给定一个梯形图, 假设其第一个梯级为 1, 以此类推. 转化方法为以下 7 个步骤.

步骤 1 将梯形图的触点、线圈、功能模块模拟为实结点.

步骤 2 任选梯形图的一个线圈, 假设该线圈为 C_x , 对应的实结点为 V_x .

步骤 3 确定 C_x 的割集的个数 m , 创建 m 个虚结点.

步骤 4 遍历 1 个割集内的元素, 连接元素对应实结点到该割集对应的虚结点的有向弧; 连接虚结点到 V_x 的有向弧; 为从实结点到实结点的有向弧赋予权值. 重复上述步骤, 直到遍历完所有的割集.

步骤 5 取 C_x 梯级路径上的一个触点, 判断梯形图是否存在以该触点为输出线圈的路径, 如果有, 重复步骤 3, 4; 如果没有, 取另一个触点进行判断, 直到遍历完所有触点.

步骤 6 若还存在其他没有遍历的线圈, 重复步骤 2~5, 直到遍历完所有线圈.

步骤 7 取梯形图的 1 个功能模块, 假设对应的实结点为 V_y . 确定模块割集的数目 n , 创建 n 个虚结点. 遍历一个模块割集内的元素, 连接元素对应的实结点到该模块割集对应的虚结点的有向弧; 连接虚结点到 V_y 的有向弧; 为弧赋予权值. 重复上述步骤, 直到遍历完所有的模块割集.

4 梯形图不存在竞态的充分条件

通过分析关系图的结构,可得出梯形图不存在竞态的充分条件.

定理 1 给定一个梯形图,如果它的关系图中不存在环,那么该梯形图中一定不存在竞态.

证明 反证法. 假设一个无环的关系图对应的梯形图存在竞态. 对于无环的关系图,取任意非根结点,假设为 V_1 ,可以找到控制其状态的实结点,假设为 V_2 ; 同样, V_2 如果不为根结点,可以找到控制其状态的实结点,以此类推,直到遍历到根节点. 非根结点 V_1 最后总可以看成控制了一个根结点的状态. 由于根结点的状态在 PLC 的扫描周期内是不变的,所以 V_1 不变. 如果 V_1 对应梯形图的输出线圈,说明输出线圈在程序执行的过程中状态不变,结论与假设矛盾,所以该充分条件成立.

根据竞态的定义和上述的充分条件可得:如果关系图存在环,且环内包含有实结点对应为梯形图的功能模块,对应的梯形图不存在竞态.

5 实例分析

梯形图存在计数器 C0,计数器的预设值为“2”,如图 3 所示. 当计数器的脉冲输入端 CU 为上升沿时,计数器加“1”;当计数器达到预设值时,C0 输出高电平;如果 R 端为高电平时,计数器清零,输出为低电平. 根据前面提出的方法,将该梯形图中的触点、线圈、功能模块模拟为实结点,得到的实结点集合 $V = \{v_{m_{0,0}}, v_{m_{0,1}}, v_{m_{0,2}}, v_{q_{0,0}}, v_{q_{0,1}}, v_{i_{0,0}}, v_{c_0}\}$;选取线圈 $Q_{0,1}$,其对应的实结点为 $v_{q_{0,1}}$. 遍历线圈 $Q_{0,1}$ 可以得到 $Q_{0,1}$ 的割集为 $\{M_{0,1}, M_{0,2}\}, \{M_{0,2}, M_{0,3}\}$,所以创建 2 个虚结点 v'_1, v'_2 ;遍历 2 个割集内的元素,连接对应结点之间的有向弧,然后给弧赋上相应的权值.

通过遍历线圈 $Q_{0,1}$ 梯级路径上的触点可知:不存在以梯级路径上的触点为输出线圈的路径,所以取另一个线圈 $M_{0,0}$ 进行遍历. 步骤同上,可知 $M_{0,0}$ 的割集只有 1 个 $\{M_{0,1}\}$,所以创建 1 个虚结点 v'_3 ,连接对应结点之间的有向弧,最后给弧赋上相应的权值.

遍历所有线圈直到没有可遍历的线圈. 由于该梯形图存在功能模块,所以遍历功能模块,确定其模块割集 $\{I_{0,0}, M_{0,0}, Q_{0,0}\}$;创建 1 个虚结点 v'_5 ;连接模块割集内的元素对应的结点之间的有向弧,即连接 $v_{i_{0,0}}, v_{m_{0,0}}, v_{q_{0,0}}$ 到 v'_5 的有向弧;连接 v'_5 到 v_{c_0} 的有向弧;为弧赋予权值. 得到的关系图,如图 4 所示. 图 4 的关系图存在环结构,但是环内有代表功能模块的结点,根据提出的竞态判据,该梯形图不存在竞态.

从时序图的角度观察,如图 5 所示. 从图 5 中可以看出:输出 $Q_{0,0}$ 的变化是由计数器 C0 到达预设值引发的,当计数器 C0 为低电平时,输出 $Q_{0,0}$ 为低电平,根据竞态的定义可知,梯形图不存在竞态.

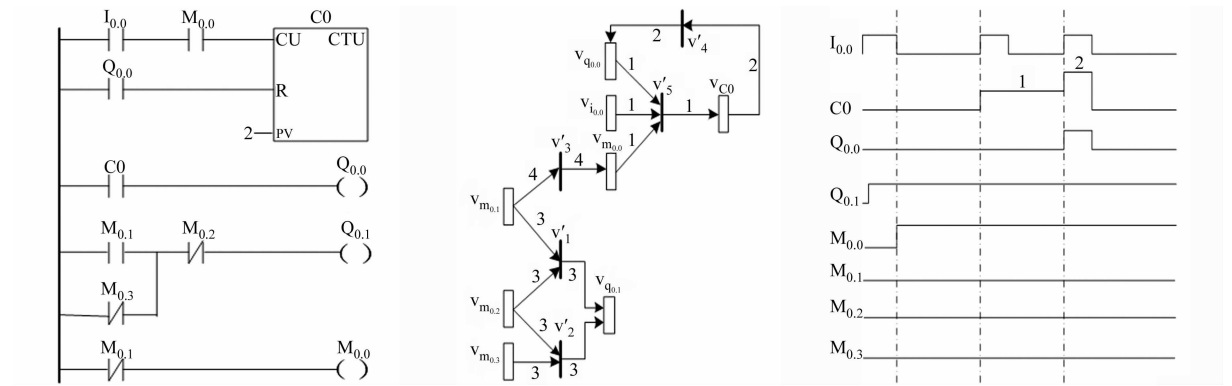


图 3 不存在竞态的梯形图
Fig. 3 A ladder diagram free of race

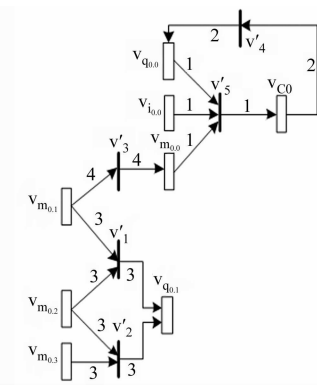


图 4 图 3 梯形图的关系图模型
Fig. 4 Relation graphs model of ladder diagram shown in figure 3

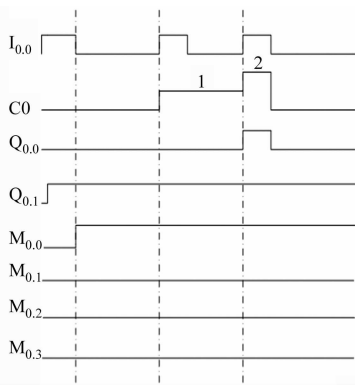


图 5 图 3 梯形图的时序图
Fig. 5 Timing chart of ladder diagram shown in figure 3

6 结束语

竞态本质上是由梯形图内部触点以及梯级的排列顺序产生的,即梯形图的结构影响到竞态的产生. 所以从梯形图的结构入手,提出了用关系图来描述梯形图的逻辑关系,从而快速的判断出梯形图不存在

竞态. 当需要检测一个大型梯形图程序是否存在竞态,传统的模型检测会耗费大量的时间,文中为竞态的检测提出了一个新的思想. 通过将梯形图转化为关系图,根据所提出的充分条件,可以较快的判断梯形图不存在竞态. 为了实现构建过程的自动化及完善关系图的判断方法,未来的工作主要是基于提出的方法给出转化算法,并给出梯形图存在竞态在关系图中的充分条件.

参考文献:

[1] 吕卫阳. PLC 技术综述[J]. 自动化博览,2008(增刊 1):16-19.

[2] AIKEN A,FAHNDRICH M,SU Zhen-dong. Detecting races in relay ladder logic programs[J]. International Journal on Software Tools for Technology Transfer,2000,3(1):93-105.

[3] 吕毅. 形式化方法介绍及其在工程中的应用[J]. 微电子学与计算机,2003(10):26-34.

[4] 张广泉. 关于软件形式化方法[J]. 重庆师范学院学报:自然科学版,2002,19(2):1-4.

[5] 杨年华,虞芑群,孙华. 带抑制弧的时延着色 Petri 网模型检测技术[J]. 计算机科学,2011,38(1):170-176.

[6] 沈云付,解晓方. 基于 on-the-fly 的 Petri 网模型检查技术研究 with 实现[J]. 计算机应用与软件,2011,28(5):82-85.

[7] BENDER D F,COMBEMALE B,CRÉGUT X,et al. Ladder metamodeling and PLC program validation through time Petri nets[C]// 4th European Conference on Model Driven Architecture-Foundations and Applications. Berlin: Springer,2008:121-136.

[8] NGALAMOU L,MYERS L. Combining software methods for effective deployment of programmable logic controllers[J]. International Journal of Computer Science and Network Security,2010,10(12):134-145.

[9] WIGHTKIN N,BUY U,DARABI H. Formal modeling of sequential function charts with time Petri nets[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2011,19(2):455-464.

[10] MOKADEM H B,BERARD B,GOURCUFF V,et al. Verification of a timed multitask system with UPPAAL[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2010,7(4):921-932.

[11] TSAI J,TENG C C. Constructing an abstract model for ladder diagram using Petri nets[J]. Asian Journal of Control,2010,12(3):309-322.

[12] KRAMER B J,VAOLKER N. A highly dependable computing architecture for safety-critical control application [J]. Real-Time Systems,1997,13(3):237-251.

[13] 陈钢,宋晓宇,顾明. COQ 定理证明辅助 PLC 程序验证和分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2010,46(1):30-34.

[14] FERRANTE J,OTTENSTEIN K J,WARREN J D. The program dependence graph and its use in optimization[J]. ACM Transactions on Programming Languages and Systems,1987,9(3):319-349.

[15] 赵营,严义. 基于梯形图复杂依赖关系的分解研究[J]. 机电工程,2012,29(5):605-608.

A Race Detection Method for Programs in Programmable Logic Controllers

HUANG Ying-kun, LUO Ji-liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: For the high computational complexity of detecting races in the programmable logic controller, a race detection method based on ladder diagram is proposed. The relation graph is defined, and a method is presented to transform ladder diagrams into relation graphs. It is proved that races depend on loop structures in a relation graph. According to it, a criterion is presented to judge whether a ladder diagram is free of race. The results show that this method can quickly detect the free of race in ladder diagrams, and its computational complexity is polynomial.

Keywords: race; ladder diagram; relation graph; programmable logic controller

开源 Linux 的嵌入式安全 SOHO 路由器设计

朱龙, 刘长君

(四川信息职业技术学院 图书馆, 四川 广元 628040)

摘要: 在嵌入式平台上实现一个基于开源 Linux 系统,面向小规模网络的集成路由和防护功能的网络接入设备,并对其路由和网络防护性能进行测试.结果表明:系统可以满足小规模网络的接入和保护需求,支持直观简单的 Web 管理(WBM)配置方式,同时也为具备一定网络技能的用户提供传统的 Telnet 路由配置方式.

关键词: 网络防护; 网络接入; 嵌入式; 路由器; Web 管理; Linux 系统

中图分类号: TP 393.08 **文献标志码:** A

随着互联网的迅速发展,SOHO(小型办公和家庭办公)用户数量迅速增加.为了向 SOHO 用户提供低成本、高性能的网络接入和网络防护,小型路由器和防火墙产品应运而生^[1].小型路由器和防火墙大多是在嵌入式平台上运行比较成熟的商业软件系统,如 Router OS, Mono Wall 等.但使用商业软件系统不可避免地会引入较高的软件成本和版权问题.嵌入式系统发展到现在,其处理能力已经较为强大.在此基础上,本文在嵌入式平台上,设计一款同时具备路由功能和防火墙功能的网络接入设备,并对其网络防护性能进行测试.

1 系统平台分析

1.1 硬件平台与交叉编译

设计选用的硬件平台为华恒公司的 PPC860 嵌入式开发板,包含核心板和基板.核心板搭载了 MPC860 处理器,16 MB 的 SDRAM 及 4 MB 的 FLASH 存储器;基板为用户提供了外设接口,有 10 MB 以太网接口、100 MB 快速以太网接口,以及串口和用于调试的 BDM 口.

嵌入式开发过程中常用的开发方式是交叉编译,即在宿主机上编写程序,用交叉编译、汇编、链接工具形成可执行程序,然后在目标板上通过串口和以太网口以 mount 的方式下载宿主机中的可执行程序并调试、运行^[2].在本设计中,宿主机中所使用的编译工具,是开发板自带开发套件中用于 Power PC 处理器指令集的 powerpc-gcc 编译器.在宿主机中用 powerpc-gcc 编译器编译、链接源程序,生成可用于开发板的可执行程序,供开发板通过交叉编译环境下载调试、运行.交叉编译环境的搭建过程如下:

- 1) 配置宿主机 NFS(Network File System,网络文件系统)和 TFTP 服务器;
- 2) 通过交换机建立宿主机到目标板的网络连接(也可以用交叉线直连宿主机与目标板);
- 3) 建立宿主机到目标板的串口连接;
- 4) 通过 minicom 程序经串口控制目标板,使其通过以太网口下载宿主机可执行程序,调试、运行.

1.2 系统功能模块分析

在设计操作系统平台选择上,选用了 2.4 版本的 Linux 内核.虽然 2.6 版本内核已经比较成熟,但其抢占内核和崩溃恢复机制对本设计性能提高不大,因此选择比较稳定、驱动支持较好的 2.4 版本 Linux 内核.在 Linux 内核之上的软件架构按照功能划分为路由模块和防火墙功能模块.

路由模块采用的是 Zebra-0.95a 开源路由软件,同时为用户提供灵活的 Telnet 配置方式;防火墙功能模块则是采用了 Linux 系统中常见的 Netfilter/Iptables 防火墙架构,通过 Iptables 工具配置防火墙规则,然后由 Linux 内核中的 Netfilter 机制实现规则的应用.在系统软件架构的最高层提供了用户基于 Web 管理的方式^[3-4].

通过页面服务器 Boa 向用户提供 Web 的配置界面,以便对防火墙规则和简单路由进行配置,配置的实现则是由 Boa 执行后台 CGI 程序完成;Linux 内核及相应的功能模块存储在只读的 Cramfs 文件系统中;用户信息及路由、安全配置文件保存在读写的 JFFS2 文件系统中^[5-6].系统软件功能模块分析,如图 1 所示.

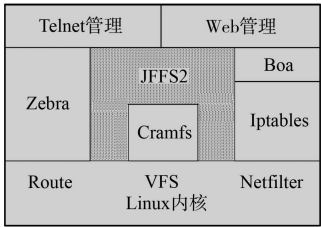


图 1 系统功能模块分析图

Fig. 1 System function module diagram

2 系统软件的架构设计

2.1 Linux 内核剪裁

使用开源 Linux 内核作为操作系统,以避免采用商业软件引入的软件成本和版权问题.为避免出现软件漏洞或安全问题,同时也出于对嵌入式硬件平台 Flash 存储器容量考虑,需要将 2.4.18 版本的 Linux 内核进行剪裁,以满足系统需求.

在内核源码路径下运行 make menuconfig 命令可对 Linux 内核进行剪裁.在剪裁过程中,保留了 Power PC 处理器支持、内存管理、进程管理、系统中断向量、文件系统支持等基本功能模块,以及以太网口驱动、串口驱动、能源管理等扩展功能模块.

在内核剪裁过程中,需要保证剪裁的内核对 ramdisk、JFF2 文件系统的支持^[7].因为剪裁过的 Linux 内核以 ramdisk 系统烧写到开发板 Flash 存储器中,对 JFFS2 文件系统的支持则是为了实现大容量 Flash 存储器可读写文件系统扩展.在内核剪裁过程中要保留 Netfilter 功能模块;Netfilter 功能模块和 Iptables 防火墙配置软件共同实现设计的防火墙功能^[8].

2.2 Zebra 路由模块设计

Zebra 是一个支持 RIP,OSPF 等路由协议,基于 TCP/IP 服务的开源路由软件.Zebra 支持 IPv4 和 IPv6,在实际应用中,具有较强的可扩展性.Zebra 提供了一个高质量的多服务路由引擎,它为每个路由协议提供交互接口,并支持通用客户端命令.在设计中采用了 Zebra0.95a 作为路由功能模块.

Zebra 的源码包中指定的用于编译、重建的编译器默认为适用于 X86 架构的 gcc 编译器.在本设计中,要将 Zebra 路由软件运行于 PowerPC 架构的嵌入式开发平台上,因此在配置源码之前,要对配置文件进行修改.在 Zebra 源码路径下用 CC=/LinuxPPC/CDK/bin/PowerPC-gcc 命令来指定配置源码所使用的编译器.其中,/LinuxPPC 路径为开发板所使用开发套件在宿主机中的安装路径,/LinuxPPC/CDK/bin/PowerPC-gcc 指定了用于 PowerPC 架构处理器的 C 语言编译器.

执行 Zebra 源码路径下的 configure 配置脚本,并对配置过的源码用 make 命令进行编译,最后用 make install 命令完成安装.Zebra 安装完成之后还要对其配置文件/usr/local/etc/zebra.conf 进行修改,使之符合系统需求,同时修改相同路径下的 RIP,OSPF,BGP 路由协议的配置文件.完成配置之后,以后台守护进程的方式执行 Zebra 路由软件——zebra-d.这样 Zebra 路由软件就在开发板上运行,宿主机或者同一网段内其他主机可以通过 Telnet 方式访问并对其进行配置.Zebra 路由模块正常运行时,对其远程 Telnet 登录将出现用户登录密码输入提示.

2.3 Netfilter/Iptables 防火墙模块设计

在 1.1 版本的 Linux 内核中提供了基本的包过滤功能,在经历过 2.2 版本 Linux 中的 Ipchains 防火墙机制之后,当前在 2.4 版本 Linux 内核中使用的是 Netfilter/Iptables 机制的第三代包过滤防火墙.其中,Netfilter 组件运行于内核空间,是 Linux 内核的一部分,这也是在进行 Linux 内核剪裁过程中,要求保留 Netfilter 功能模块的原因.它是由一些信息过滤表组成,包含了内核用来控制数据包过滤处理的规则集.Iptables 组件是一个防火墙规则配置工具,运行于用户空间,Iptables 向用户提供一个命令行模式的防火墙规则管理工具,使用户可以灵活准确的插入、修改、删除数据包过滤表中的防火墙规则.

Iptables 的板上移植过程与 Zebra 类似,首先通过指定开发板所用编译器对源码进行配置、编译和

重建,然后将生成的可执行程序下载到开发板运行。

在防火墙功能模块设计过程中,着重关注两个要点:一是防火墙功能扩展;二是对防火墙规则冲突的检测和避免。

2.3.1 Iptables 功能模块扩展 Iptables 提供了一种灵活准确的防火墙规则配置方式,它支持部分基本的配置规则,例如数据包协议匹配、端口匹配和 IP 地址匹配等。但是在实际应用中防火墙的配置需求更加复杂,例如字符串匹配的内容过滤、连接数量匹配、防护策略时间规则和 P2P 数据包匹配等。这些复杂的防火墙规则实现是通过安装特定的 Netfilter/Iptables 功能 patch 实现的。在本设计中使用的 4 种扩展规则模块。

1) Iptables string match. 这个 patch 中增加了 CONFIG_IP_NF_MATCH_STRING,允许在一个数据包里匹配一个字符串,用来进行内容过滤。

2) Iptables connlimit match. 这个 patch 为 Iptables 扩展了连接数量匹配,用于限制每个远程 IP 地址的并发 TCP 连接数量。

3) Detects some P2P packets. 这个 patch 可以匹配部分 P2P 数据包,用于控制网络流量。这个 patch 结合连接跟踪,与数据包调度器配合,用于 P2P 流量计算和整形。

4) Iptables time match:这个 patch 为 Iptables 增加时间匹配功能,允许对其他防护规则添加时间匹配选项,可以使规则在特定时间范围内启动或关闭。

除了上述扩展功能模块,用户还可以通过指定协议类型、IP 地址、端口号来自定义防护规则,设计的防火墙功能模块可以满足日常网络防护的需求。

2.3.2 防火墙规则冲突检测避免 Iptables 提供防火墙规则配置,但是它只是顺序执行已有的防火墙规则,而不对规则冲突进行检测。Iptables 只对防火墙规则的语法格式进行检查,如果防火墙规则前后对某一个数据包配置了接受和拒绝两种策略,那么它将执行先配置的策略,而不会提示规则冲突。为了避免出现这种配置过程中规则的前后冲突,在设计中使用了基于文本的规则冲突检测避免机制^[9-11]。

在本设计中,防火墙基本设置是通过 Web 方式来配置的,页面中采用单选框的形式保证了规则的一致性。因此,防火墙规则冲突主要存在于用户自定义规则集中。用户自定义规则主要包括六个字段:协议类型、源 IP 地址、源端口号、目的 IP 地址、目的端口号、策略。

规则冲突检测避免机制工作原理:接收 Iptables 的配置命令,写入防火墙规则脚本 iptable.rules 中,将自定义的规则字段存储到 rule 结构体中。rule 结构体定义如下所示。

```
struct rule {  
    bool protocol; // 协议类型,识别 TCP 或 UDP  
    int src_ip[4]; // 源 IP 地址  
    int src_port; // 源端口号  
    int dst_ip[4]; // 目的 IP 地址  
    int dst_port; // 目的端口号  
    bool policy; // 匹配策略,接受或丢弃  
    struct rule * next; // 指向下一条规则  
}
```

所有规则的 rule 以链表的形式存储。添加新自定义规则时,先逐项匹配链表中已有的规则,如果前 5 个字段一致,而 policy 字段不同,则说明新定义规则与已有规则冲突,需要修改;如果 6 个字段均一致,则说明新定义规则之前已经定义,属于冗余,可以删除;如果前面两种情况均不满足,则说明此规则为新规则,将此规则添加到规则脚本中。

冲突检测功能代码示意如下:

```
while(p_rule != NULL)  
{  
    if(p_rule.protocol == n_rule.protocol && \  
       p_rule.src_ip == n_rule.src_ip && \  
       p_rule.dst_ip == n_rule.dst_ip && \  
       p_rule.dst_port == n_rule.dst_port && \  
       p_rule.policy != n_rule.policy)
```

```
p_rule.src_port == n_rule.src_port && \
p_rule.dst_ip == n_rule.dst_ip && \
p_rule.dst_port == n_rule.dst_port )
{
    if(p_rule.policy == n_rule.policy)
    {
        rule_redundancy();
        break;
    }
    else
    {
        rule_collision();
        break;
    }
}
p_rule = p_rule.next;
}
if (p_rule == NULL)
    rule_add();
```

其中:p_rule 为指向已有规则链表的 rule 结构体类型指针;n_rule 为用户提交添加的 nrule 结构体类型变量;nrule 与 rule 结构体类型定义区别在于 nrule 中没有形成链表的 next 指针.通过这种基于文本的规则冲突检测、避免机制避免防火墙规则集的二义性和冗余,为用户提供准确添加自定义规则的环境.

2.4 Web 配置模块设计

2.4.1 Boa 页面服务器简介 Zebra 向用户提供了基于 Telnet 的远程配置方式,但是这种配置方式采用的是通用命令行,需要一定的网络技术基础.为了便于普通用户对设备进行直观简单的配置,本设计为用户提供了基于 Web 的页面配置方式.

本设计向用户提供了基于 Web 的配置方式,这首先需要有一个 Web 页面服务器.出于硬件平台性能考虑,选用了再嵌入式开发中常用的页面服务器 Boa.它是一个单任务的 HTTP 服务器软件,只能依次完成用户的请求而不会 fork 出新的进程来处理并发的连接请求,但是可以 fork 出新进程供 CGI(Common Gateway Interface,通用网关接口)程序运行;由于设备配置过程不需要并发机制,因此 Boa 页面服务器符合设计需求^[12].Boa 页面服务器的移植过程较简单,可参考 Zebra 移植过程.

2.4.2 交互配置流程实现 Boa 向用户提供前台 HTML 配置页面,同时负责接收用户配置请求,以环境变量的方式传递给后台 CGI 程序,由 CGI 程序解释配置请求,并做出相应的配置动作^[13].配置有如下 5 个具体过程(图 2).

- 1) 表示 Boa 页面服务器生成 Web 配置页面,在远程配置端由 HTML 浏览器解释.
- 2) 用户向 HTML 页面中以表单形式填写配置信息,若配置信息不合法,则输出警报,要求重新填写;若配置信息合法,则将表单提交至 Boa 服务器.
- 3) Boa 服务器将用户配置信息以环境变量的方式传递给后台 CGI 程序处理.CGI 程序获取用户配置信息是通过读取 CONTENT_LENGTH 环境变量实现的,CGI 程序以字符串形式获取用户提交配置表单内容,然后通过对字符串的处理来获取并解释用户配置信息.
- 4) CGI 进行系统调用,完成用户请求配置后,以 HTML 代码的形式向 Boa 服务器返回处理结果.CGI 对用户请求进行处理,得到相应配置命令,经系统调用完成对路由功能或防火墙功能的配置.其中,

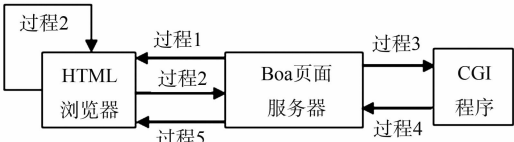


图 2 交互配置过程示意图
Fig. 2 Schematic diagram of interactive configuration process

在对防火墙功能配置过程中,系统调用之前要先调用前文所述防火墙规则冲突检测、避免机制^[14].

5) Boa 服务器将 CGI 返回的处理结果传送至用户端 HTML 浏览器,向用户显示当次配置请求的处理结果.

2.4.3 应用配置例析 以对 ICMP 协议的操作为例,分析 Web 方式管理的工作过程.用户通过浏览器向 Boa 服务器提交配置表单,在此处,表单内容很简单,包括两个单选框,Y 表示阻止 ICMP 协议,N 表示允许 ICMP 协议,缺省状况允许 ICMP 协议,用户配置点选 Y 项,即阻止 ICMP 协议.即

```
<form name=cfg method=post action=/cgi-bin/cfg>
ICMP Forbidden
<input type=radio name=yn value=0>Y
<input type=radio name=yn value=1 checked>N
<input type=submit name=submit value=submit>
```

Boa 接收到表单提交信息后,调用表单 action 选项中指定的后台 CGI 程序 cfg 来处理该配置表单信息,Boa 以字符串形势将表单信息传递给 CGI 程序 cfg,cfg 读取环境变量,即

```
n=atoi(getenv("CONTENT_LENGTH"));
for(i=0;i<n;i++)
in[i]=getc(stdin)
```

此时,in 数组中的内容:yn=0&&.submit=submit.cfg 读取 in^[3],与“0”字符进行比对,如果匹配,则通过 system 系统调用执行 Iptables 规则,iptables -A INPUT -p ICMP -j Drop;否则,执行 ACCEPT 策略,然后将此条规则添加到规则脚本文件中保存.完成操作后,向 Boa 提交返回到用户浏览器的 HTML 页面,提示操作完成.WBM 管理页面,如图 3 所示.

3 系统性能测试

3.1 路由配置模块测试

设计实现的路由功能模块有两种配置方式,可以通过 Web 管理(Web based management,WBM)配置方式进行配置,也可以通过 Telnet 方式进行配置.WBM 配置方式较为直观、简单,但配置不如 Telnet 后的命令行方式灵活.为了对路由模块的功能有更全面的了解,本部分测试是 Telnet 登陆设备之后的结果,而 WBM 配置测试是与防火墙功能模块统一进行测试的.

Telnet 方式登陆设备之后,提供了类似思科路由的通用命令行配置界面:用户模式、特权模式、配置模式.配置模式下的命令列表,如图 4 所示.

测试结果表明:路由模块可以正常工作,并且 Telnet 配置方式提供了类似思科路由器的通用命令行界面,配置方式灵活,功能完备.

3.2 防火墙基本规则测试

在对防火墙功能模块的测试过程中,以防止外部网络 Ping 入为例,对其基本防护规则进行了测试.

为了对外部网络屏蔽内网信息,防火墙基本规则中通常会拒绝外部网络使用 Ping 命令嗅探内部网络信息.在本次测试中,在配置之前,外部计算机可以通过 Ping 命令嗅探到防火墙;在配置了丢弃 IC-

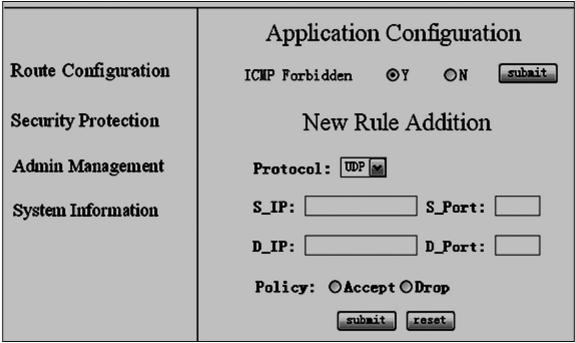


图 3 安全 SOHO 路由器 Web 管理页面

Fig. 3 Secure SOHO router Web management page

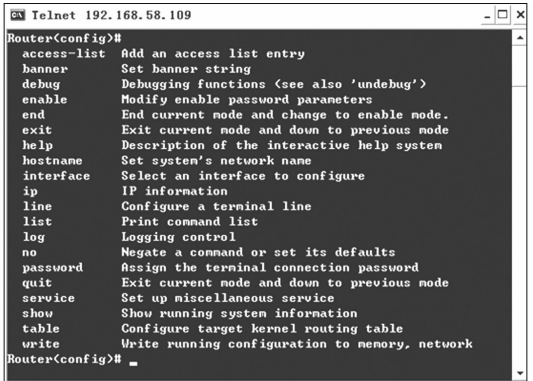


图 4 配置模式下的命令列表

Fig. 4 Configuration mode command list

MP 协议数据之后,外部计算机用 Ping 命令嗅探防火墙提示请求超时错误. 测试表明:本设计的防火墙功能模块实现了基本的应用规则防护.

4 结 束 语

设计并实现一个基于开源 Linux 的,集成了路由功能和网络防护功能的嵌入式网络接入设备. 在开发板上实现了路由功能模块和防火墙功能模块. 然后,分别从路由配置模块、防火墙基本规则设置两个方面进行测试. 结果表明:本设计可以为用户提供直接灵活的配置方式,实现了路由功能和安全防护功能在同一开发平台的集成,所得到的网络设备可以满足小规模网络的接入和防护需求.

参考文献:

[1] 游侃民,朱宁西. 基于嵌入式 Linux 的 SOHO 路由器设计[J]. 微计算机信息,2009,25(11):19-31.
[2] 褚文奎,樊晓光,黄培成. 基于 PowerPC 处理器 MPC8250 的嵌入式 Linux 系统开发[J]. 计算机工程与设计,2006,27(1):179-181.
[3] 彭涛,李声晋,芦刚,等. 远程设备监控系统中嵌入式 Web 服务器的设计[J]. 机械与电子,2008(1):65-68.
[4] 姚晓宇,赵晨. Linux 内核防火墙 Netfilter 实现与应用研究[J]. 计算机工程,2003,29(8):112-113,163.
[5] 王磊,谢维波. AdHoc 网络在嵌入式 Linux 上的实现[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2011,32(2):161-164.
[6] 张祖鹰. 嵌入式 Linux 系统的网络实现究[J]. 船海工程,2009,38(增刊 1):83-85.
[7] 刘文峰,李程远,李善平. 嵌入式 Linux 操作系统的研究[J]. 浙江大学学报:工学版,2004,38(4):447-452.
[8] 陈闯中. Linux 在嵌入式操作系统中的应用[J]. 同济大学学报:自然科学版, 2001,29(5):564-566.
[9] 张昭理,洪帆,肖海军. 一种防火墙规则冲突检测算法[J]. 计算机工程与应用,2007,43(15):111-112.
[10] 赵波,秦涛,张新有. 嵌入式防火墙规则冲突检测算法的实现[J]. 实验科学与技术,2009,7(6):153-156.
[11] 张国定,李随意,张翰林,等. 基于 IPv6 的 SOHO 宽带路由器的软件设计[J]. 河南教育学院学报:自然科学版, 2008,17(2):33-34.
[12] 张娟,张雪兰. 基于嵌入式 Linux 的 GUI 应用程序的实现[J]. 计算机应用,2003,23(4):11-13.
[13] 王金东,赵海,韩光洁,等. 基于 SNMP 的嵌入式系统 Web 管理模型 [J]. 计算机工程,2005,31(1):39-40,59.
[14] 郭松,谢维波. Linux 下 Proc 文件系统的编程剖析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2010,31(5):515-520.

Design of an Embedded Security SOHO Router
Apparatus of the Open Source Linux
ZHU Long, LIU Chang-jun

(Library, Sichuan Information Technology College, Guangyuan 628040, China)

Abstract: Based on the realization of a Linux open source system in the embedded platform, network access equipment for small scale network integrated routing and protection function, and test the performance of routing and network protection. The results show that the system can meet the access network and the protecting, supporting Web management simple and intuitive (WBM) configuration, but also provide the traditional Telnet routing configuration to the user who have a certain network skills.

Keywords: network protection; access network; embedded system; router; Web management; Linux system

(责任编辑:黄晓楠 英文审校:吴逢铁)

海洋着色菌 *Marichromatium gracile* YL28 静息细胞对无机三态氮的相互转化作用

蒋鹏¹, 洪璇^{1,2}, 赵春贵¹, 杨素萍¹

(1. 华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门医学高等专科学校 药理学系, 福建 厦门 361008)

摘要: 分析不产氧光合细菌海洋着色菌 *Marichromatium gracile* YL28 静息细胞对无机三态氮(氨氮、亚硝氮和硝氮)的去除和相互转化作用. 结果表明:在适宜温度和 pH 值的厌氧环境中, YL28 菌株静息细胞对亚硝氮和硝氮具有良好的去除能力, 并且能将氨氮转化为少量的硝氮、将亚硝氮动态地转化为硝氮, 硝氮也能动态地转化为亚硝氮, 但未检测到将硝氮和亚硝氮转化为氨氮的过程. 由此可知, YL28 菌株的静息细胞具有良好的反硝化作用, 能够去除水体中的亚硝氮和硝氮.

关键词: 海洋着色菌; 静息细胞; 氨氮; 亚硝氮; 硝氮

中图分类号: Q 939.99

文献标志码: A

集约化水产养殖的迅速发展, 水体残饵、药物、代谢和排泄物以及其他有机物的滞留和沉积, 造成了 $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 、 H_2S 和药物残留等有害污染物的形成, 严重制约了水产养殖业的健康发展^[1-2]. 如何尽快去除水体中 $\text{NH}_3\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 等有毒有害物质一直备受关注^[3]. 不产氧光合细菌(anoxxygenic phototrophic bacteria, APB)在水产养殖和水体氮素污染控制等方面已有广泛的研究和应用^[4]. 菌种(株)不同, 对无机三态氮的代谢能力以及对环境的适应能力也不同, 如 *Rhodobacter sphaeroides* P4^[5] 和 *Rhodopseudomonas* sp. wps^[6] 能在氨氮存在时去除水体中的硝氮和亚硝氮, *Rhodopseudomonas palustris* PSI^[7] 则不能去除亚硝氮. 某些菌株如 *Rhodobacter capsulatus* E1F1^[8] 能以硝酸盐为唯一氮源生长, 但能以亚硝酸盐为唯一氮源生长并高效去除亚硝氮的 APB 菌株鲜有报道, 仅本课题组报道了一株海洋着色菌 *Marichromatium gracile* YL28^[9-10]. 关于光、氧、pH 值和温度等环境因素以及不同碳源对 APB 菌株, 如 *Rhodobacter sphaeroides* 2-8^[11] 和 *Rhodopseudomonas* sp. wps^[12] 去除无机三态氮的影响已有较多报道, 表明环境因素和营养基质对微生态制剂的功效有明显影响, 但还未见 APB 静息细胞对无机三态氮的去除和转化能力的系统报道. 静息细胞代谢主要是指限制性非生长条件下细胞内酶的代谢, 静息细胞法已在生物和医学方面有广泛应用^[13]. 在水体环境中, APB 制剂的菌体可能处于水体底部黑暗厌氧环境中, 即使温度和 pH 值适宜, 菌体也生长缓慢, 似静息细胞, 在此环境中 APB 是否具有无机三态氮转化能力, 目前还不清楚. YL28 菌株能以亚硝氮为唯一氮源生长, 具有良好去除无机三态氮和环境适应能力^[9-10]. 因此, 本文研究了 YL28 菌株静息细胞厌氧去除和转化无机三态氮的能力.

1 实验部分

1.1 材料与仪器

海洋着色菌 *Marichromatium gracile* YL28 菌株, 16S rRNA 基因 GenBank 登录号为 JF719917,

收稿日期: 2014-05-06

通信作者: 赵春贵(1964-), 男, 教授, 博士, 主要从事资源与环境微生物学的研究. E-mail: chungui@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(31070054); 国家海洋公益性行业科研专项(201505026); 福建省自然科学基金资助项目(2012J01136); 福建省教育厅科技项目(JB11275)

由本实验室分离鉴定并保存. 氯化铵、亚硝酸钠和硝酸钾为国产优级纯试剂;氯化汞、氢氧化钾、酒石酸钾钠、盐酸萘乙二胺、磷酸氢二钾等为国产分析纯试剂.

UV-3200PCS 型紫外可见分光光度计(上海美普达 MAPADA 公司);TGL-20M 型台式高速冷冻离心机(上海卢湘仪公司).

1.2 实验方法

1.2.1 菌体的培养与静息细胞的制备 采用改良的 Pfennig 紫色硫细菌无机选择性培养基^[14],添加 24.3 mmol · L⁻¹无水乙酸钠,0.75 mmol · L⁻¹ Na₂S₂O₃ 取代 1.5 mmol · L⁻¹ Na₂S · 9H₂O,调节 pH 值为 7.0.接种量为 5%(体积浓度),接种后用无菌培养基充满培养瓶,于 28 ℃,3 000 lx 光照厌氧培养 5 d. 无菌操作,高速离心,收集菌体,用 pH 值为 7.0,质量浓度为 3%的 NaCl 溶液洗涤菌体 3 次,并制备成光密度 D(660)约为 1.3 的菌种悬液,在 28 ℃静置孵育 48 h 即为静息细胞悬液,使用时准确测量.

1.2.2 实验体系的设置 精确称量,配制无机氮(氯化铵、亚硝酸钠和硝酸钾)储备液,调整 pH 值为 7.0,用二次水定容,过滤除菌,其氮素质量浓度均为 30.00 g · L⁻¹.

在静息细胞悬液中添加无机氮储备液,配制成含有不同无机氮(氯化铵、亚硝酸钠、硝酸钾和无机三态氮共存)的菌悬液体系,用质量浓度为 3%的 NaCl 溶液补满培养瓶,旋紧瓶盖,将培养瓶置于 28 ℃培养箱中厌氧培养. 菌悬液体积为 310 mL,溶液起始 pH 值为 7.0,每个处理设置 3 个重复,定时取样 1 mL,用于无机三态氮质量浓度和生物量的测定.

1.2.3 生物量和无机三态氮的测定 采用比浊法测定生物量,以 D(660)表示菌体的生物量,用光程为 1 cm 的石英比色杯,于紫外可见分光光度计上测定波长为 660 nm 处光密度 D(660).

采用纳氏试剂光度法测定 NH₃-N 的质量;采用 N-(1-萘基)-乙二胺光度法测定 NO₂⁻-N 的质量;采用紫外分光光度法^[15]NO₃⁻-N 测定. 无机氮去除率(R)计算式为

$$R = (1 - c_t/c_0) \times 100\%$$

上式中:c₀ 和 c_t 分别表示无机三态氮的初始浓度和测定时刻的浓度.

无机三态氮的质量均以氮素的质量浓度计算,重复测定 3 次.

2 结果与分析

2.1 对氨氮的去除和转化

YL28 菌株静息细胞对氨氮去除及其转化过程,如图 1 所示. 图 1 中,NH₃-N 的起始浓度为 3.12 mmol · L⁻¹(空心图示□和○),6.18 mmol · L⁻¹(实心图示■和▲). 由图 1 可知:随处理时间的延长,体系中菌体生物量降低,氨氮去除率升高;1~2 d 内检测到了少量亚硝氮和硝氮的生成,随后又被完全去除. 低氨氮浓度(3.12 mmol · L⁻¹)体系处理 5.1 d,菌体生物量降低了约 17.90%,氨氮去除量和去除率分别为 0.28 mmol · L⁻¹和 9.86%;高浓度氨氮(6.18 mmol · L⁻¹)时,体系中菌体生物量未明显降低,氨氮去除量未见明显变化,但氨氮去除率明显降低.

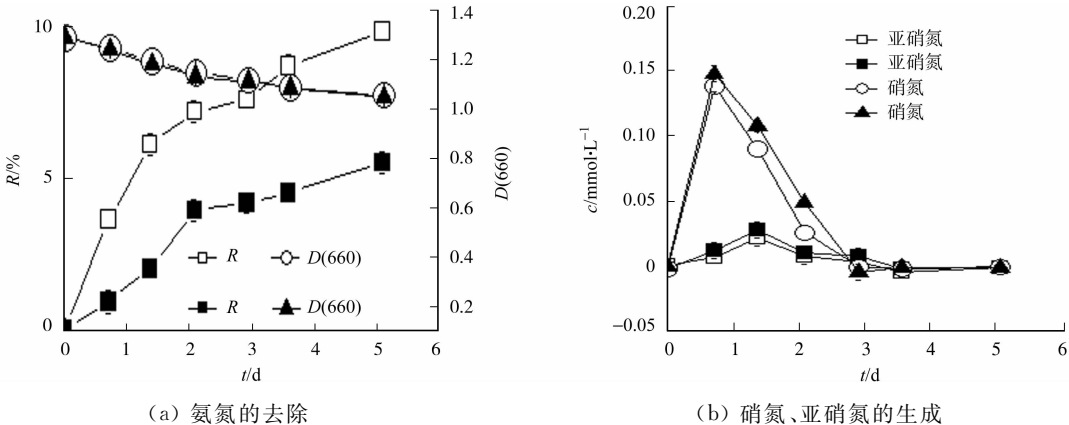


图 1 YL28 菌株静息细胞对氨氮的去除和硝氮、亚硝氮的生成过程

Fig. 1 Removal of ammonium and the production of nitrate and nitrite by YL28 resting cells

结果表明:YL28 菌株静息细胞对氨氮去除能力很弱,能将氨氮转化为少量的亚硝氮和硝氮,在体系中的菌体有一定程度的自溶,使生物量降低. 已有研究表明,YL28 菌株在生长过程中均具有良好的去除氨氮的能力^[10],而本实验中静息细胞去除氨氮的能力很低. 由此可知,YL28 菌株主要通过铵同化作用去除氨氮,由于静息细胞体系中缺乏营养物质,菌体不能通过铵同化作用生长,表现出对氨氮的去除能力较微弱.

2.2 对亚硝氮的去除和转化

YL28 菌株静息细胞对亚硝氮的去除及转化过程,如图 2 所示. 图 2 中, $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 的起始浓度为 $5.12 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\square$ 和 $\circ$), $10.08 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\blacksquare$ 和 $\bullet$). 由图 2 可知:随着处理时间的延长,亚硝氮去除率逐渐升高,然后被完全去除(图 2(a));在 1~3 d 内能检测到硝氮的生成,随后又消失,在整个过程中未检测到氨氮的生成(图 2(b)). 与低浓度亚硝氮体系相比,高浓度亚硝氮体系中亚硝氮的去除速率降低,生成的硝氮摩尔浓度较高. 结果表明:菌株的静息细胞对亚硝氮有良好的去除作用,能将亚硝氮转化为硝氮;与氨氮体系相比,由于亚硝氮具有毒性,能加快菌体自溶,致使体系中生物量明显降低.

Shapleigh^[16]报道了许多 APB 菌株具有反硝化作用,并阐明了反硝化作用的相关酶系;Schott 等^[17]报道了 *Thiocapsa* sp. KS1 和 *Rhodopseudomonas* sp. LQ17 能够在厌氧条件下通过亚硝酸盐氧化还原酶将亚硝氮转化为硝氮. 由此可知,YL28 菌株具有亚硝酸盐氧化还原酶和反硝化作用的相关酶系. 因而,其静息细胞能利用这些酶系将亚硝氮转化为硝氮,也能够通过反硝化作用去除体系中亚硝氮和硝氮.

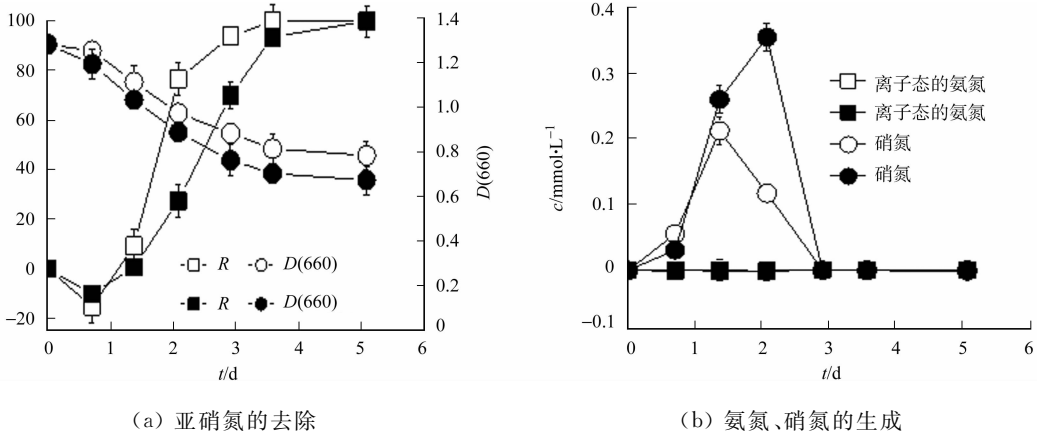


图 2 YL28 菌株静息细胞对亚硝氮的去除和氨氮、硝氮的生成过程
Fig. 2 Removal of nitrite and the production of ammonium and nitrate by YL28 resting cells

2.3 对硝氮的去除和转化

YL28 菌株静息细胞对硝氮的去除及其转化过程,如图 3 所示. 图 3 中, $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 的起始浓度为 $4.25 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\square$ 和 $\circ$), $8.18 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\blacksquare$ 和 $\bullet$). 由图 3 可知:随着处理时间的延长,硝氮去除率升高,

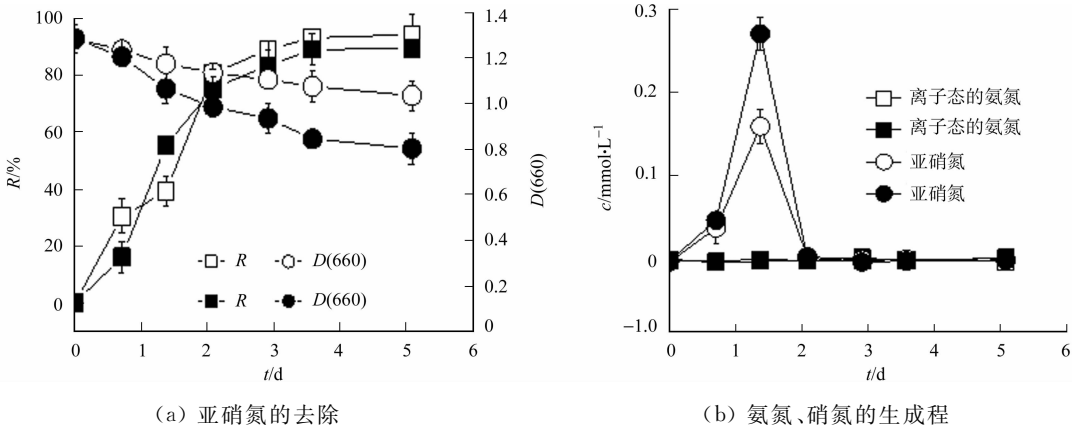


图 3 YL28 菌株静息细胞对硝氮的去除和氨氮、亚硝氮的生成过程
Fig. 3 Removal of nitrate and the production of ammonium and nitrite by YL28 resting cells

生物量逐渐降低(图 3(a));在 1~2 d 内水体中产生的亚硝氮达到最大(图 3(b)),随后又被完全去除,整个过程中未检测到氨氮的存在. 与低浓度相比,高浓度硝氮体系中硝氮的最大去除率降低,暂时性生成的亚硝氮升高,菌体生物量有所降低. 结果表明:YL28 菌株静息细胞具有良好去除硝氮的能力,能通过反硝化作用将硝氮转化为亚硝氮.

2.4 对无机三态氮共存的去除和转化特性

无机三态氮共存体系中,YL28 菌株的静息细胞对无机氮的去除和转化特性,如图 4 所示. 图 4 中, $\text{NH}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的初始浓度分别为 3.12、5.12、4.25 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 从图 4 可知:菌株的静息细胞在处理过程中,随着处理时间的延长,在处理 1 d 时,水体中亚硝氮的摩尔浓度先升高;随后迅速降低,水体中氨氮和硝氮的去除率缓慢升高至趋于稳定,最终水体中亚硝氮完全去除,硝氮的去除率为 94.25%,氨氮的去除率为 10.89%.

结果表明:YL28 菌株的静息细胞对亚硝氮和硝氮具有良好的去除作用,而对氨氮的去除能力较为微弱. 水体中亚硝氮摩尔浓度暂时性升高,主要是由于反硝化的作用将硝氮转化为亚硝氮.

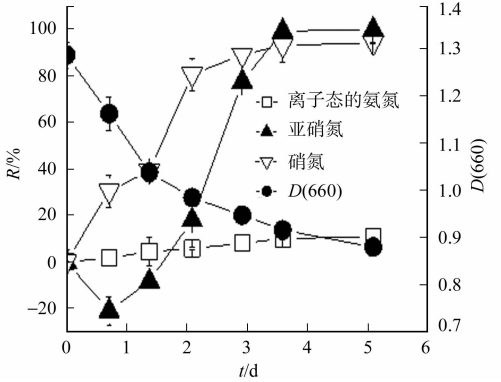


图 4 YL28 菌株静息细胞对无机氮的去除过程
Fig. 4 Removal of inorganic nitrogen
by YL28 resting cells

3 结论

研究 YL28 菌株静息细胞对无机三态氮的去除和转化特性,与菌株在生长过程中对无机三态氮的去除结果^[10]相比,菌株对亚硝氮和硝氮的去除速率明显下降,菌株对氨氮的去除量也远远偏低. 通过分析认为,在 YL28 菌株的静息细胞中,硝化作用并非是转化无机三态氮的主导途径,该菌株仅在厌氧光照条件下,以氨氮作为唯一氮源的生长过程中,才能表现出较强的硝化作用. YL28 菌株静息细胞对亚硝氮和硝氮的良好去除和转化作用,体现了该菌株本身具有良好的反硝化和亚硝酸盐厌氧氧化作用. 但是,由于微生物静息细胞对无机三态氮的去除转化研究较为少见,尚不能比较菌株的静息细胞对无机三态氮的转化途径是否相一致. 虽然菌株的静息细胞对氨氮去除和转化作用较微弱,但是研究过程中,还是发现氨氮能被转化为少量的硝氮和亚硝氮,这为 YL28 菌株中存在的氮转化途径也提供了一定实验依据.

YL28 菌株的静息细胞对亚硝氮和硝氮具有良好的去除能力,对氨氮的去除能力很微弱,能通过反硝化作用将硝氮转化为亚硝氮而去除,也能将亚硝酸盐厌氧氧化为硝氮,几乎不能通过铵同化作用去除氨氮. 实验结果表明:在适宜的温度和 pH 值条件下,该菌株在黑暗厌氧等生存环境中,虽然生长缓慢,但仍具有良好去除环境中亚硝氮和硝氮的能力. 本研究为针对性地开发适应特定环境的 APB 制剂及其应用提供参考.

参考文献:

[1] COREY P,KIM J K,DUSTON J,et al. Bioremediation potential of *Palmaria palmata* and *Chondrus crispus* (Basin Head); Effect of nitrate and ammonium ratio as nitrogen source on nutrient removal[J]. Journal of Applied Phycology,2013,25(5):1349-1358.

[2] HERBECK L S,UNGER D,WU Y,et al. Effluent, nutrient and organic matter export from shrimp and fish ponds causing eutrophication in coastal and back-reef waters of NE Hainan, tropical China[J]. Continental Shelf Research, 2013,57(S1):92-104.

[3] NEWAJ-FYZUL A,AL-HARBU A,AUSTIN B. Review: Developments in the use of probiotics for disease control in aquaculture[J]. Aquaculture,2014,431:1-11.

[4] QI Zi-zhong,ZHANG Xiao-hua,BOON N,et al. Probiotics in aquaculture of China-Current state, problems and prospect[J]. Aquaculture,2009,290(1/2):15-21.

[5] 俞吉安,张承康,陈峰. 光合细菌 P₄ 株的反硝化作用[J]. 上海交通大学学报,2000,34(11):1579-1582.

[6] 陈慧,张德民,王龙刚,等. 一株反硝化光合细菌的生物学特性及系统发育分析[J]. 微生物学报,2011,51(2):249-255.

[7] 杨莺莺,曹煜成,李卓佳,等. PS1 沼泽红假单胞菌对集约化对虾养殖废水的净化作用[J]. 中国微生态学杂志, 2009,21(1):4-6.

[8] PINO C,OLMO-MIRA F,CABELLO P,et al. The assimilatory nitrate reduction system of the phototrophic bacterium *Rhodobacter capsulatus* E1F1[J]. Biochemical Society Transactions,2006,34(1):127-129.

[9] 赵江艳,傅英楠,赵春贵,等. 一株高含玫红品的红树林海洋紫色硫细菌分离鉴定及特性[J]. 微生物学报,2011,51(10):1318-1325.

[10] 蒋鹏,赵春贵,贾雅琼,等. 一株以亚硝氮为唯一氮源生长的海洋紫色硫细菌对无机三态氮的去除特性[J]. 微生物学通报,2014,41(5):824-831.

[11] 陈燕红,杨紫红,喻国辉,等. 光照,氧气,pH 和盐度对沼泽红假单胞菌 2-8 菌株生长和亚硝酸盐消除的影响[J]. 南方水产科学,2010,6(4):1-5.

[12] 郑卉,张德民,王一农,等. 红假单胞菌去除养鱼废水三态氮及 COD 的研究[J]. 生态科学,2012,31(4):435-440.

[13] 杨大娇,任天宝,王凤芹,等. 静息细胞在发酵工业中的研究进展[J]. 食品与发酵工业,2013,39(8):187-191.

[14] TRÜPER H,PFENNIG N. The family Chlorobiaceae[M]. New York:Springer,1992:3583-3592.

[15] EATON A D,CLESCERI L S,RICE E W,et al. Standard methods for the examination of water and wastewater [M]. Washington D C:American Public Health Association,American Water Works Association,Water Pollution Control Federation,1998:547-565.

[16] SHAPLEIGH J P. Dissimilatory and assimilatory nitrate reduction in the purple photosynthetic bacteria[M]. Netherlands:Springer,2008:623-642.

[17] SCHOTT J,GRIFFIN B M,SCHINK B. Anaerobic phototrophic nitrite oxidation by *Thiocapsa* sp. strain KS1 and *Rhodopseudomonas* sp. strain LQ17[J]. Microbiology,2010,156(8):2428-2437.

Reciprocal Transformation of Inorganic Nitrogen by Resting Cells of *Marichromatium gracile* YL28

JIANG Peng¹, HONG Xuan^{1,2}, ZHAO Chun-gui¹, YANG Su-ping¹

(1. College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Department of Pharmacy, Xiamen Medical College, Xiamen 361008, China)

Abstract: The progress of removal and transformation of inorganic nitrogen including ammonium, nitrite, and nitrate by the resting cells of *Marichromatium gracile* YL28 were investigated in this work. The YL28 resting cells could remove nitrite and nitrate efficiently under the anaerobic condition with appropriate temperature and pH value. They also showed a low transformation capability of ammonium to nitrate, and the reciprocal transformation between nitrite and nitrate could be detected, followed by nitrite or nitrate products disappeared. But the transformation of nitrite and nitrate into ammonium could not be detected. These results demonstrated that the YL28 resting cells could remove nitrite and nitrate from waters efficiently, suggesting that the strain YL28 possesses good capability of anaerobic denitrification.

Keywords: *Marichromatium gracile*; resting cells; ammonium; nitrite; nitrate

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 刘源岗)

多溴联苯醚气相色谱相对保留时间的 定量结构-活性关系

吴志渊, 薛秀玲, 邱其俊

(华侨大学 化工学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 运用 Gaussian 03W 对 209 种多溴联苯醚(PBDEs)在 B3LYP/6-31G* 水平上进行结构优化. 应用偏最小二乘法(PLS)建立 PBDEs 的相对色谱保留时间(RRT)与分子结构参数的定量结构与活性关系(QSAR)模型, 并对 83 种未知的 PBDEs 的 RRT 进行预测. 实验结果表明:模型的累计交叉有效判别系数 Q_{cum}^2 为 0.931, 拟合相关系数平方 $R_{(cum)}^2$ 为 0.960, 预测值与实验值的残差范围为 $-0.083 \sim 0.168$, 模型具有较强的预测性; 分子总能量、次低占有轨道能量、电子空间广度、最低空轨道能量等量子化学参数对模型的贡献较大, 其变量投影性指标值(VIP)分别为 1.858, 1.741, 1.719, 1.712.

关键词: 多溴联苯醚; 定量构效关系; 相对色谱保留时间; 偏最小二乘法

中图分类号: O 621.2

文献标志码: A

多溴联苯醚(PBDEs)是一组溴原子数不同的联苯醚混合物, 有 209 种同系物. 因其阻燃率高、热稳定性好, 常被作为溴系阻燃剂, 广泛应用于化工、电器电子设备、家具等产品中^[1-3]. 目前, PBDEs 已在各种基质, 如沉积物、空气、水、哺乳动物、人血浆和母乳中被检出, 引起人们广泛的关注^[4-5]. PBDEs 的分析方法主要为气相色谱法和气相色谱-质谱法联用. 相对色谱保留时间(RRT)是色谱定性非常重要的热力学参数. 在一定温度下, RRT 为常数, 与色谱柱长度及内径等无关, 由化合物和固定相之间的弱作用力决定. PBDEs 属弱极性分子, 主要作用力表现为色散力. 影响色散力的主要结构因素是分子大小和空间形状. 分子的体积越大, 其变形性越大, 相应瞬间偶极越强, 其与固定相之间的色散力越大^[6], 即 RRT 值越大. 色散力主要由溶质分子中原子的净电荷、分子偶极矩、分子前线轨道能量等结构参数决定^[7]. 目前, 已有众多学者对 PBDEs 的分子结构与其 RRT 值的关系进行研究^[8-11]. 本文拟采用密度泛函理论算法中的 B3LYP 方法, 运用 Gaussian 03W 及偏最小二乘法(PLS)建立 PBDEs 与其 RRT 的分子结构参数的定量结构与活性关系(QSAR), 并对 126 种已知 PBDEs 和 83 种未知 PBDEs 的 RRT 值进行预测.

1 材料与方法

1.1 RRT 文献值的选取

209 种 PBDEs 的 RRT 数据, 如表 1 所示. 表 1 中:126 种 PBDEs 的 RRT 实验值取自 Peter 等^[8]的实验工作; 其他 83 种为待测 RRT 值的 PBDEs.

1.2 量子化学参数选取

采用 Hyper Chem 软件构图, 应用量子化学软件包 Gaussian 03W 在 B3LYP/6-31* G(d)理论水平下对 209 种 PBDEs 分子进行无对称性限制几何全优化, 获得建模参数. 以 RRT 为因变量, 选择考察了 22 个量子化学参数在内的 23 个自变量:次高占有轨道能量(E_{NHOMO});最高占有轨道能量(E_{HOMO});最低空轨道能量(E_{LUMO});次低空轨道能量(E_{NLUMO});电子空间广度(R_e);分子偶极矩(μ);分子总能量(E_T);

1,1'号碳原子与氧原子的键长($R_{C_1-O}, R_{O-C_{1'}}$);原子的带电量($Q_{C_1}, Q_{C_2}, Q_{C_3}, Q_{C_4}, Q_{C_5}, Q_{C_6}, Q_O, Q_{C_{1'}}, Q_{C_{2'}}, Q_{C_{3'}}, Q_{C_{4'}}, Q_{C_{5'}}, Q_{C_{6'}}$).此外,还考察了 $E_{LUMO} - E_{HOMO}$ 前线轨道能量组合.

1.3 模型的优化建立

应用 Simca-P(version 11.5)进行 PLS 分析建模,采用外部样本预测检验法对模型进行检验,即将 126 个已知 RRT 的 PBDEs 样本数按 5 : 1 分为模型训练组(105 个)和模型检验组(21 个).采用偏最小二乘法进行回归分析,采用截尾的方式选用前 h 个成分建立回归模型, h 通过交叉有效性判别 Q_h^2 来确定.当 $Q^2>0.097\ 5$,该主成分有意义;当累计交叉有效性判别系数 $Q_{cum}^2>0.5$,模型预测可靠性较好.综合采用 Q_{cum}^2 与拟合相关系数平方 R_{cum}^2 来评价模型的优劣,在建模过程中剔除对建模无贡献作用的变量,以提高 QSAR 模型的预测能力和拟合效果. PBDEs 的 RRT 实验值(RRT_{exp})和预测值(RRT_{th}),如表 1 所示.表 1 中: * 为模型训练组的样本;# 为模型检验组的样本;未标符号的为待预测样本;残差为实验值与预测值之差.

表 1 PBDEs 的 RRT 实验值和预测值
Tab.1 Experimental and predicted values of the RRT of PBDEs

编号	化合物	取代基位置	RRT_{exp}	RRT_{th}	残差
1*	BDE-1	2	0.095	−0.058	0.153
2#	BDE-2	3	0.097	−0.069	0.166
3*	BDE-3	4	0.099	−0.069	0.168
4*	BDE-4	2,2′	0.133	0.088	0.045
5	BDE-5	2,3	—	0.090	—
6*	BDE-6	2,3′	0.133	0.098	0.035
7#	BDE-7	2,4	0.133	0.060	0.073
8*	BDE-8	2,4′	0.139	0.106	0.033
9*	BDE-9	2,5	0.129	0.071	0.058
10*	BDE-10	2,6	0.123	0.051	0.072
11*	BDE-11	3,3′	0.137	0.137	0.000
12*	BDE-12	3,4	0.142	0.074	0.068
13*	BDE-13	3,4′	0.142	0.143	−0.001
14#	BDE-14	3,5	0.130	0.190	−0.060
15*	BDE-15	4,4′	0.147	0.088	0.059
16*	BDE-16	2,2′,3	0.214	0.227	−0.013
17#	BDE-17	2,2′,4	0.202	0.195	0.007
18*	BDE-18	2,2′,5	0.191	0.210	−0.019
19*	BDE-19	2,2′,6	0.187	0.203	−0.016
20*	BDE-20	2,3,3′	0.221	0.241	−0.020
21	BDE-21	2,3,4	—	0.227	—
22*	BDE-22	2,3,4′	0.231	0.249	−0.018
23	BDE-23	2,3,5	—	0.230	—
24	BDE-24	2,3,6	—	0.203	—
25*	BDE-25	2,3′,4	0.204	0.204	0
26#	BDE-26	2,3′,5	0.195	0.220	−0.025
27*	BDE-27	2,3′,6	0.184	0.188	−0.004
28*	BDE-28	2,4,4′	0.214	0.209	0.005
29*	BDE-29	2,4,5	0.197	0.170	0.027
30*	BDE-30	2,4,6	0.174	0.162	0.012
31#	BDE-31	2,4′,5	0.205	0.224	−0.019
32*	BDE-32	2,4′,6	0.195	0.196	−0.001
33*	BDE-33	2,3′,4′	0.214	0.239	−0.025
34*	BDE-34	2,3′,5′	0.192	0.236	−0.044
35*	BDE-35	3,3′,4	0.221	0.226	−0.005

续表

Continue table

编号	化合物	取代基位置	RRT _{exp}	RRT _{th}	残差
36 [*]	BDE-36	3,3',5	0.199	0.254	−0.055
37 [*]	BDE-37	3,4,4'	0.232	0.230	0.002
38 [*]	BDE-38	3,4,5	0.217	0.232	−0.015
39 [*]	BDE-39	3,4',5	0.208	0.257	−0.049
40 [*]	BDE-40	2,2',3,3'	0.355	0.354	0.001
41	BDE-41	2,2',3,4	—	0.342	—
42 [#]	BDE-42	2,2',3,4'	0.329	0.384	−0.055
43	BDE-43	2,2',3,5	—	0.347	—
44	BDE-44	2,2',3,5'	—	0.361	—
45	BDE-45	2,2',3,6	—	0.331	—
46 [*]	BDE-46	2,2',3,6'	0.299	0.302	−0.003
47 [*]	BDE-47	2,2',4,4'	0.313	0.348	−0.035
48 [*]	BDE-48	2,2',4,5	0.298	0.300	−0.002
49 [*]	BDE-49	2,2',4,5'	0.294	0.323	−0.029
50 [*]	BDE-50	2,2',4,6	0.272	0.295	−0.023
51 [*]	BDE-51	2,2',4,6'	0.289	0.316	−0.027
52	BDE-52	2,2',5,5'	—	0.331	—
53 [*]	BDE-53	2,2',5,6	0.264	0.282	−0.018
54	BDE-54	2,2',6,6'	—	1.036	—
55 [*]	BDE-55	2,3,3',4	0.341	0.361	−0.020
56	BDE-56	2,3,3',4'	—	0.378	—
57	BDE-57	2,3,3',5	—	0.361	—
58 [*]	BDE-58	2,3,3',5'	0.321	0.320	0.001
59	BDE-59	2,3,3',6	—	0.337	—
60	BDE-60	2,3,4,4'	—	0.369	—
61	BDE-61	2,3,4,5	—	0.369	—
62 [*]	BDE-62	2,3,4,6	0.287	0.336	−0.049
63	BDE-63	2,3,4',5	—	0.364	—
64	BDE-64	2,3,4',6	—	0.348	—
65	BDE-65	2,3,5,6	—	0.346	—
66 [#]	BDE-66	2,3',4,4'	0.328	0.314	0.014
67 [*]	BDE-67	2,3',4,5	0.303	0.288	0.015
68 [*]	BDE-68	2,3',4,5'	0.294	0.277	0.017
69 [*]	BDE-69	2,3',4,6	0.268	0.303	−0.035
70	BDE-70	2,3',4',5	—	0.351	—
71 [*]	BDE-71	2,3',4',6	0.299	0.307	−0.008
72 [*]	BDE-72	2,3',5,5'	0.281	0.342	−0.061
73 [*]	BDE-73	2,3',5,6	0.266	0.281	−0.015
74 [#]	BDE-74	2,4,4',5	0.319	0.288	0.031
75 [*]	BDE-75	2,4,4',6	0.290	0.309	−0.019
76 [*]	BDE-76	2,3',4,5'	0.322	0.392	−0.070
77 [*]	BDE-77	3,3',4,4'	0.355	0.363	−0.008
78 [*]	BDE-78	3,3',4,5	0.334	0.367	−0.033
79 [#]	BDE-79	3,3',4,5'	0.321	0.352	−0.031
80 [*]	BDE-80	3,3',5,5'	0.289	0.372	−0.083
81 [*]	BDE-81	3,4,4',5	0.350	0.341	0.009
82	BDE-82	2,2',3,3',4	—	0.461	—
83	BDE-83	2,2',3,3',5	—	0.472	—

续表

Continue table

编号	化合物	取代基位置	RRT _{exp}	RRT _{th}	残差
84	BDE-84	2,2',3,3',6	—	0.447	—
85 [*]	BDE-85	2,2',3,4,4'	0.486	0.454	0.032
86 [*]	BDE-86	2,2',3,4,5	0.462	0.487	−0.025
87 [*]	BDE-87	2,2',3,4,5'	0.460	0.457	0.003
88 [*]	BDE-88	2,2',3,4,6	0.423	0.470	−0.047
89	BDE-89	2,2',3,4,6'	—	0.453	—
90	BDE-90	2,2',3,4',5	—	0.495	—
91	BDE-91	2,2',3,4',6	—	0.465	—
92	BDE-92	2,2',3,5,5'	—	0.446	—
93	BDE-93	2,2',3,5,6	—	0.482	—
94	BDE-94	2,2',3,5,6'	—	0.463	—
95	BDE-95	2,2',3,5',6	—	0.393	—
96	BDE-96	2,2',3,6,6'	—	0.418	—
97 [#]	BDE-97	2,2',3,4',5'	0.457	0.499	−0.042
98 [*]	BDE-98	2,2',3,4',6'	0.414	0.538	−0.124
99 [*]	BDE-99	2,2',4,4',5	0.433	0.455	−0.022
100 [*]	BDE-100	2,2',4,4',6	0.405	0.423	−0.018
101 [#]	BDE-101	2,2',4,5,5'	0.410	0.418	−0.008
102 [*]	BDE-102	2,2',4,5,6'	0.396	0.404	−0.008
103 [*]	BDE-103	2,2',4,5',6	0.369	0.392	−0.023
104 [*]	BDE-104	2,2',4,6,6'	0.369	0.378	−0.009
105 [*]	BDE-105	2,3,3',4,4'	0.506	0.477	0.029
106 [*]	BDE-106	2,3,3',4,5	0.469	0.480	−0.011
107	BDE-107	2,3,3',4',5	—	0.489	—
108 [*]	BDE-108	2,3,3',4,5'	0.461	0.470	−0.009
109 [*]	BDE-109	2,3,3',4,6	0.417	0.447	−0.030
110	BDE-110	2,3,3',4',6	—	0.471	—
111	BDE-111	2,3,3',5,5'	—	0.474	—
112	BDE-112	2,3,3',5,6	—	0.487	—
113	BDE-113	2,3,3',5',6	—	0.432	—
114 [*]	BDE-114	2,3,4,4',5	0.491	0.508	−0.017
115 [*]	BDE-115	2,3,4,4',6	0.442	0.480	−0.038
116 [*]	BDE-116	2,3,4,5,6	0.444	0.477	−0.033
117	BDE-117	2,3,4',5,6	—	0.491	—
118 [#]	BDE-118	2,3',4,4',5	0.457	0.435	0.022
119 [*]	BDE-119	2,3',4,4',6	0.414	0.422	−0.008
120 [*]	BDE-120	2,3',4,5,5'	0.414	0.419	−0.005
121 [*]	BDE-121	2,3',4,5',6	0.371	0.423	−0.052
122	BDE-122	2,3,3',4',5'	—	0.451	—
123 [*]	BDE-123	2,3',4,4',5'	0.462	0.469	−0.007
124 [*]	BDE-124	2,3',4',5,5'	0.443	0.480	−0.037
125 [#]	BDE-125	2,3',4',5',6	0.424	0.407	0.017
126 [*]	BDE-126	3,3',4,4',5	0.495	0.486	0.009
127 [*]	BDE-127	3,3',4,5,5'	0.454	0.469	−0.015
128 [*]	BDE-128	2,2',3,3',4,4'	0.677	0.594	0.083
129	BDE-129	2,2',3,3',4,5	—	0.602	—
130	BDE-130	2,2',3,3',4,5'	—	0.576	—
131 [#]	BDE-131	2,2',3,3',4,6	0.586	0.577	0.009

续表

Continue table

编号	化合物	取代基位置	RRT _{exp}	RRT _{th}	残差
132	BDE-132	2,2',3,3',4,6'	—	0.571	—
133	BDE-133	2,2',3,3',5,5'	—	0.590	—
134	BDE-134	2,2',3,3',5,6	—	0.602	—
135	BDE-135	2,2',3,3',5,6'	—	0.589	—
136	BDE-136	2,2',3,3',6,6'	—	0.545	—
137	BDE-137	2,2',3,4,4',5	—	0.573	—
138*	BDE-138	2,2',3,4,4',5'	0.617	0.579	0.038
139*	BDE-139	2,2',3,4,4',6	0.577	0.611	−0.034
140*	BDE-140	2,2',3,4,4',6'	0.588	0.593	−0.005
141*	BDE-141	2,2',3,4,5,5'	0.585	0.594	−0.009
142*	BDE-142	2,2',3,4,5,6	0.598	0.613	−0.015
143	BDE-143	2,2',3,4,5,6'	—	0.569	—
144*	BDE-144	2,2',3,4,5',6	0.531	0.562	−0.031
145	BDE-145	2,2',3,4,6,6'	—	0.545	—
146	BDE-146	2,2',3,4,5,5'	—	0.596	—
147	BDE-147	2,2',3,4,5,6	—	0.609	—
148	BDE-148	2,2',3,4,5,6'	—	0.610	—
149	BDE-149	2,2',3,4,5',6	—	0.545	—
150	BDE-150	2,2',3,4,6,6'	—	0.563	—
151	BDE-151	2,2',3,5,5',6	—	0.576	—
152	BDE-152	2,2',3,5,6,6'	—	0.564	—
153*	BDE-153	2,2',4,4',5,5'	0.560	0.542	0.018
154*	BDE-154	2,2',4,4',5,6'	0.517	0.503	0.014
155*	BDE-155	2,2',4,4',6,6'	0.496	0.514	−0.018
156 [#]	BDE-156	2,3,3',4,4',5	0.640	0.622	0.018
157	BDE-157	2,3,3',4,4',5'	—	0.588	—
158*	BDE-158	2,3,3',4,4',6	0.587	0.597	−0.010
159*	BDE-159	2,3,3',4,5,5'	0.590	0.602	−0.012
160*	BDE-160	2,3,3',4,5,6	0.590	0.620	−0.030
161*	BDE-161	2,3,3',4,5',6	0.535	0.572	−0.037
162	BDE-162	2,3,3',4',5,5'	—	0.602	—
163	BDE-163	2,3,3',4',5,6	—	0.605	—
164	BDE-164	2,3,3',4',5',6	—	0.542	—
165	BDE-165	2,3,3',5,5',6	—	0.559	—
166*	BDE-166	2,3,4,4',5,6	0.621	0.622	−0.001
167 [#]	BDE-167	2,3,4,4',5,5'	0.596	0.545	0.051
168*	BDE-168	2,3,4,4',5',6	0.548	0.496	0.052
169	BDE-169	3,3,4,4',5,5'	—	0.583	—
170	BDE-170	2,2',3,3',4,4',5	—	0.722	—
171	BDE-171	2,2',3,3',4,4',6	—	0.702	—
172	BDE-172	2,2',3,3',4,5,5'	—	0.703	—
173*	BDE-173	2,2',3,3',4,5,6	0.763	0.735	0.028
174	BDE-174	2,2',3,3',4,5,6'	—	0.679	—
175	BDE-175	2,2',3,3',4,5',6	—	0.678	—
176	BDE-176	2,2',3,3',4,6,6'	—	0.654	—
177	BDE-177	2,2',3,3',4,5',6'	—	0.712	—
178	BDE-178	2,2',3,3',5,5',6	—	0.683	—
179	BDE-179	2,2',3,3',5,6,6'	—	0.664	—

续表

Continue table

编号	化合物	取代基位置	RRT _{exp}	RRT _{th}	残差
180	BDE-180	2,2',3,4,4',5,5'	—	0.709	—
181 [#]	BDE-181	2,2',3,4,4',5,6	0.754	0.741	0.013
182 [*]	BDE-182	2,2',3,4,4',5,6'	0.697	0.697	0.000
183 [*]	BDE-183	2,2',3,4,4',5',6	0.687	0.705	−0.018
184 [*]	BDE-184	2,2',3,4,4',6,6'	0.666	0.652	0.014
185 [*]	BDE-185	2,2',3,4,5,5',6	0.702	0.664	0.038
186	BDE-186	2,2',3,4,5,6,6'	—	0.681	—
187	BDE-187	2,2',3,4',5,5',6	—	0.648	—
188	BDE-188	2,2',3,4',5,6,6'	—	0.685	—
189	BDE-189	2,3,3',4,4',5,5'	—	0.706	—
190 [#]	BDE-190	2,3,3',4,4',5,6	0.763	0.741	0.022
191 [*]	BDE-191	2,3,3',4,4',5',6	0.721	0.706	0.015
192 [*]	BDE-192	2,3,3',4,5,5',6	0.707	0.704	0.003
193	BDE-193	2,3,3',4',5,5',6	—	0.675	—
194	BDE-194	2,2',3,3',4,4',5,5'	—	0.819	—
195	BDE-195	2,2',3,3',4,4',5,6	—	0.765	—
196	BDE-196	2,2',3,3',4,4',5,6'	—	0.833	—
197	BDE-197	2,2',3,3',4,4',6,6'	—	0.786	—
198 [*]	BDE-198	2,2',3,3',4,5,5',6	0.853	0.813	0.040
199	BDE-199	2,2',3,3',4,5,5',6'	—	0.793	—
200	BDE-200	2,2',3,3',4,5,6,6'	—	0.794	—
201	BDE-201	2,2',3,3',4,5',6,6'	—	0.758	—
202	BDE-202	2,2',3,3',5,5',6,6'	—	0.780	—
203 [#]	BDE-203	2,2',3,4,4',5,5',6	0.855	0.853	0.002
204 [*]	BDE-204	2,2',3,4,4',5,6,6'	0.834	0.806	0.028
205 [*]	BDE-205	2,2',3,4,4',5,5',6	0.891	0.811	0.080
206 [*]	BDE-206	2,2',3,3',4,4',5,5',6	1.027	0.960	0.067
207 [#]	BDE-207	2,2',3,3',4,4',5,6,6'	1.001	0.911	0.090
208 [*]	BDE-208	2,2',3,3',4,5,5',6,6'	0.988	0.933	0.055
209 [*]	BDE-209	2,2',3,3',4,4',5,5',6,6'	1.171	1.015	0.156

2 结果与分析

2.1 模型的建立

模型拟合参数,如表 2 所示.表 2 中:实验样本与有效成分的比例为 5 : 1,105 个样本选取第 3 个有效成分,即 h_3 .由表 2 可知:该模型的 Q^2_{cum} 为 0.931,远大于 0.5,包含了 48.7% 自变量 $R^2_{X(cum)}$ 的变异信息,对因变量 $R^2_{Y(cum)}$ 的解释能力高达 96.0%;模型的均方根误差 RMSEE 为 0.044(RMSEE 越接近 0,模型的准确性越高),说明模型具有较好的预测准确性.

表 2 模型拟合参数

Tab. 2 Fitting results of the model

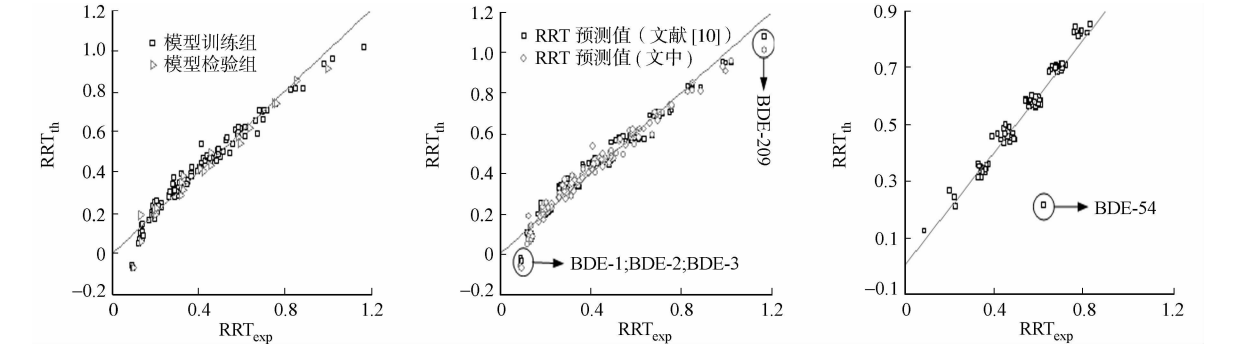
有效成分	R^2_X	$R^2_{X(cum)}$	R^2_Y	$R^2_{Y(cum)}$	Eig	Q^2	Q^2_{cum}
h_1	0.294	0.294	0.924	0.924	6.760	0.906	0.906
h_2	0.123	0.416	0.025	0.949	2.820	0.222	0.927
h_3	0.071	0.487	0.011	0.960	1.620	0.047	0.931

2.2 模型的验证

将模型检验组带入模型,实验值与预测值的残差范围为−0.060~0.166,说明所建模型预测能力较强.将 126 个已知样本的自变量带入模型,比较其预测值与实验值,结果如表 1,图 1(a)所示.

由表 1,图 1(a)可知:126 种 PBDEs 的 RRT 实验值(RRT_{exp})与预测值(RRT_{th})均分布在直线 $y=x$ 的两侧,溴取代数为 2~9 时,残差范围为-0.083~0.090,预测值与实验值的相关性较好.但一溴和十溴取代的 PBDEs,例如,BDE-1,BDE-2,BDE-3 和 BDE-209 的预测值与实验值偏离较大,残差范围为 0.153~0.168.文献[10]研究表明:一溴和十溴取代的 PBDEs 的预测值与实验值的残差较大(0.093~0.134),如图 1(b)所示.这可能是模型所含一溴和十溴的样本个数较少(3 个和 1 个),从而影响模型的预测结果^[12].

将 83 种未知的 PBDEs 的量子化学参数带入文中模型进行预测,其与文献[10]的对比结果,如表 1,图 1(c)所示.由图 1(c)可知:除 BDE-54 的预测值偏差较大,两种模型对 82 种 PBDEs 的 RRT 预测值相关性较好,相关系数 R^2 为 0.970. BDE-54 为 2,2',6,6' 位 Br 对称取代的 PBDEs,由于溴的取代可能会使 PBDEs 分子平面发生扭转,2,2' 或 6,6' 位处于两个苯环平面的中间,该位置是否被溴原子取代对 PBDEs 分子的平面结构影响较大,从而影响 BDE-54 的色谱行为,可能导致两种模型预测结果具有一定的偏差. BDE-54 准确的 RRT 值还有待进一步的实验验证.



(a) 已知 RRT 实验值与预测值 (b) 两种模型对已知 RRT 的比较 (c) 两种模型对未知 RRT 的比较
图 1 PBDEs 的 RRT 预测与验证

Fig. 1 Predicted and verified values of the RRT of PBDEs

2.3 RRT 影响因素的分析

以 RRT 为因变量建立的模型,如表 3 所示.表 3 列出了该模型的自变量(x)在方程中对应的系数(a)及相应的变量投影性指标值(VIP).所得回归模型为

$$Y(RRT) = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \cdots + C. \tag{1}$$

式(1)中: x 对应表 3 中的自变量; a 为各自变量对应的系数; C 为常数.

表 3 自变量在模型方程中的系数及其 VIP 值

Tab. 3 Variable importance in projection and variable coefficient in the model equation

x	VIP	a	x	VIP	a
E_T	1.857 830	$-9.081\ 470 \times 10^{-6}$	C_2	0.650 209	0.208 530 0
E_{NLUMO}	1.741 350	-2.548 990	C_5	0.598 301	0.082 650 1
R_e	1.719 330	$8.031\ 990 \times 10^{-6}$	C_4	0.564 856	0.088 051 1
E_{LUMO}	1.711 810	-2.064 410	C_{10}	0.561 315	0.102 581 0
E_{HOMO}	1.471 220	-2.422 940	C_{11}	0.535 524	0.148 919 0
$E_{LUMO} - E_{HOMO}$	1.365 100	-3.023 240	C_1	0.499 320	0.092 220 6
E_{NHOMO}	0.978 575	-0.426 086	$R_{(6,7)}$	0.416 409	1.121 500 0
O_7	0.931 453	2.194 400	C_8	0.410 945	-0.055 371 7
C_3	0.748 659	-0.047 351	C_6	0.356 116	0.057 346 0
C_{13}	0.732 720	0.123 097	$R_{(7,8)}$	0.346 004	-1.936 510 0
C_9	0.721 568	0.171 257	C_{12}	0.315 795	0.136 394 0
u	0.720 462	0.005 507	常数	—	2.294 360 0

在 PLS 建模中,VIP 是一个反应自变量重要性相对大小的参数,自变量的 VIP 值越大,该自变量对因变量的影响越大.由表 3 可知: $E_T, E_{NLUMO}, R_e, E_{LUMO}$ 的 VIP 值分别为 1.858,1.741,1.719,1.712,远高于其他自变量的 VIP 值,说明这 4 个自变量对 PBDEs 的 RRT 有着重要的控制作用.

在色谱分配过程中,溶质在流动相和固定相间的分配,是溶质分子和两个相中分子间的作用力所致,会影响其 RRT 值. 这些作用力包括偶极间定向作用,诱导,氢键和电子对供体-电子对受体作用等.

E_T 在一定程度上可以反映分子的体积,体积越大,越趋向于弱极性的有机相中^[13],在有机相中的停留时间越长,其 RRT 值越大. 一溴取代至十溴取代的 PBDEs 的 E_T (平均值)分别为-3 109,-5 680,-8 251,-10 822,-13 394,-15 965,-18 536,-21 107,-23 678,-26 249 eV·mol⁻¹,其 RRT(平均值)分别为 0.097,0.135,0.205,0.307,0.437,0.581,0.718,0.858,1.005,1.171. 由此可知:随着溴取代数的增多, E_T 越低,分子体积越大,溶质同固定相的作用力增大,RRT 呈上升趋势.

R_e 是算式 $\int r^2\rho(r)d(3r)$ 中算符 ρ 的特征值,在同系物中可用于表征不同分子间分子体积的大小关系. 分子体积越大,分子与分子间的非反应性色散作用越强,从而导致其在色谱固定相中的保留时间延长^[10],即 RRT 增大. 由表 1 可知:PBDEs 的同分异构体中,溴在醚键的邻位取代(即取代位置为 2,2',6 或 6')时,其相应的 RRT 较小,且邻位取代数越多,其 R_e ,RRT 越小. 如二溴取代同系物中 BDE-10(2,6),BDE-4(2,2'),BDE-11(2,3'),BDE-13(3,4')的 R_e 分别约为 5 017,5 306,9 754,10 848,RRT 分别约为 0.123,0.133,0.137,0.142. Sierra 等^[12]用 46 种 PBDEs 的邻位(*o*-)、间位(*m*-)、对位(*p*-)的取代基及偶极距(μ)和分子量的自然对数(ln MW)等分子描述符建立其 RRT 的模型,其结果表明:同系物中邻位取代数越多,其 RRT 越小. 曾小兰等^[14]的研究表明:PBDEs 同类物中溴在醚键的邻位取代,会引起 2 个苯环之间的扭转,减弱它们的共平面性,引起不同 PBDEs 分子的体积差异,即所谓的“邻位效应”. 这说明 PBDEs 的同分异构体中,Br 的邻位取代数越多,分子的体积越小,其变形性越大,相应瞬间偶极越强,其与固定相之间的色散力越弱,其 RRT 越小.

氢键是由价键和静电的贡献组成. E_{HOMO} 反映分子与其他分子作用时给出电子的能力, E_{LUMO} 反映分子在形成氢键时给出质子或接受电子的能力, E_{NLUMO} 反映分子进一步接受电子形成氢键的能力. E_{LUMO} 越低时,PBDEs 通过色谱柱时氢键和电荷转移的作用越大,RRT 值越大^[15]. 分子的色散力随分子间的距离增大而减小, $E_{LUMO}-E_{HOMO}$ 与分子的半径有关,其值越大,分子间的距离越大,色散力越小^[13],RRT 越小. BDE-54 为 2,2',6,6'取代,其 E_{LUMO} 值(-0.153 71)最小,远远小于其他 208 种 PBDEs 的 E_{LUMO} 值(最小为-0.080 52),其形成氢键的能力最强,即分子之间有很强的氢键作用. 因此,RRT 值(1.036)较大.

表 2 中: $E_{LUMO}-E_{HOMO}$, R_e , E_{HOMO} 的系数为负, E_T , E_{NLUMO} , E_{LUMO} 的系数为正,说明 PBDEs 同系物随着 E_T , E_{NLUMO} , E_{LUMO} 的增大,或随着 $E_{LUMO}-E_{HOMO}$, R_e , E_{HOMO} 的减小,PBDEs 的 RRT 随之增大.

3 结束语

文中所建模型的累计交叉有效判别系数 Q_{cum}^2 为 0.931,拟合相关系数平方 $R_{Y(cum)}^2$ 为 0.960,具有较强的预测能力. 研究发现, E_T , E_{NLUMO} , E_{LUMO} , R_e 对 PBDEs 的 RRT 有着重要的影响. 随着 E_T 的减小, R_e 的增大,分子的体积也随之增大,分子与分子间的非反应性色散作用越强,RRT 也越大; E_{NLUMO} , E_{LUMO} 越低,分子在形成氢键时接受电子的能力越强,色散力越强,故 RRT 越大.

参考文献:

[1] HITES R A. Polybrominated diphenyl ethers in the environment and in people: A meta-analysis of concentrations [J]. Environmental Science and Technology,2004,38(4):945-956.

[2] 刘艺凯,唐建辉,潘晓辉,等. 环境中多溴联苯醚分析方法的研究进展[J]. 环境化学,2012,31(12):1908-1915.

[3] RAHMAN F,LANGFORD K H,SCRIMSHAW M D,et al. Polybrominated diphenyl ether (PBDE) flame retardants[J]. Science of Total Environment,2001,275(1/2/3):1-17.

[4] DODDER N G,STRAMDBER B,HITES R A,et al. Concentrations and spatial variations of polybrominated diphenyl ethers and several organochlorine compounds in fishes from the Northeastern United States[J]. Environ Sci Technol,2002,36(2):146-151.

[5] PALM A,COUSINS I T,MACKAY D,et al. Assessing the environmental fate of chemicals of emerging concern: A case study of the polybrominated diphenyl ethers[J]. Environ Pollut,2002,117(2):195-213.

- [6] 金浩,王星皓,杨芬,等. 多溴联苯醚理化性质的定量构效关系[J]. 化工学报,2014,65(3):797-804.
- [7] 宋远志,张维光,尹起范,等. 酚类化合物在反相高效液相色谱中保留行为的理论分析[J]. 化学物理学报,2005,18(3):362-366.
- [8] PETER K,ADRIAN C,JACOB D B,et al. Retention-time database of 126 polybrominated diphenyl ether congeners and two bromkal technical mixtures on seven capillary gas chromatographic columns[J]. Chromatography A,2005,1065(2):239-249.
- [9] 王连生,韩朔滕. 有机物定量结构-活性相关[M]. 北京:中国环境科学出版社,1993:15-22.
- [10] 许惠英,张建英,王艳花,等. 多溴联苯醚定量结构-性质关系的分子表面静电势应用研究[J]. 环境科学,2008,29(2):398-408.
- [11] JIAO Long,XUE Zhi-wei,WANG Gang-feng,et al. QSPR study on the relative retention time of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) by using molecular distance-edge vector index[J]. Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems,2014,137(15):91-96.
- [12] SIERRA R,MICHAEL G I. Predicting gas chromatographic retention times for the 209 polybrominated diphenyl ether congeners[J]. Journal of Chromatography A,2003,1016(2):235-248.
- [13] 李小林,荆国华,周作明,等. 多环芳烃沸点和辛醇/水分配系数的 QSPR 研究[J]. 计算机与应用化学,2010,27(4):528-531.
- [14] 曾小兰,柳红霞,刘红艳. 多氯联苯醚的结构参数和热力学性质的密度泛函理论研究[J]. 化学学报,2007,65(17):1797-1806.
- [15] 柳红霞. 部分有机污染物的定量结构色谱保留关系研究[D]. 桂林:桂林工学院,2007:71.

Quantitative Structure-Activity Relationships on Gas Chromatographic Relative Retention Time of Polybrominated Diphenyl Ethers

WU Zhi-yuan, XUE Xiu-ling, QIU Qi-jun

(College of Chemical Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: In this paper, the molecular structure of all 209 polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) was optimized by using Gaussian 03W software at the B3LYP/6-31G^{*} level. Then quantitative structure-activity relationship (QSAR) between relative retention time (RRT) of PBDEs and the molecular structure parameters were correlated by partial least squares (PLS). The RRT of the 83 unknown PBDEs was also predicted. The results showed that the cross validation (Q_{cum}^2) and correlation coefficient of fitting ($R_{Y(cum)}^2$) of the optimized model RRT were 0.931 and 0.960 respectively. Residual range of predicted and experimental values was between -0.083 to 0.168, which indicates that the model has a strong predictive ability. Furthermore, there existed high correlation between molecular total energy, next lowest unoccupied molecular orbital, electronic spatial extent, lowest unoccupied molecular orbital and RRT of PBDEs, and their variable importance in projection (VIP) was 1.858, 1.741, 1.719 and 1.712 respectively, which took greater contribution to the model.

Keywords: polybrominated diphenyl ethers; quantitative structure-activity relationship; relative retention time; partial least square

(责任编辑:钱筠 英文审校:刘源岗)

空气源热泵直接地板辐射供暖系统优化运行方式

杜彦¹, 田琦¹, 杨晋明¹, 郭卫强²

(1. 太原理工大学 环境科学与工程学院, 山西 太原 030024;
2. 太原市恒星伟业冷冻空调设备有限公司, 山西 太原 030024)

摘要: 从运行方式的角度对空气源热泵直接地板辐射供暖系统进行优化,以山西某栋两层居住建筑为例,将实测数据与 DeST-h 软件模拟数据进行结合,比较全天连续运行、白天运行夜间停机、电价移峰填谷运行三种不同运行方式的经济性和舒适性.结果表明:三种运行方式均可基本满足舒适性的要求,但就经济性而言,白天运行夜间停机的运行方式既充分利用围护结构的蓄热能力,又缩短了系统运行时间,因此为最佳运行方式.
关键词: 空气源热泵; 直接地板辐射供暖; 运行方式; DeST-h 软件; 经济性
中图分类号: TU 832.1 **文献标志码:** A

目前,我国城乡建设房屋每年以 20% 的速度增长,而建筑总能耗约占社会终端能耗的 20.7%^[1],在建筑能耗中,非节能的供暖能耗占据十分重要的地位.因此,供暖能耗的节能减排刻不容缓.近几年,空气源热泵低温热水地板辐射供暖技术已得到很多专家学者的关注和研究^[2-5].空气源热泵系统在寒冷地区和夏热冬冷地区运行节能效果显著^[2,6-7].地板辐射供暖舒适卫生、热稳定性好、节省室内空间^[8-9].研究表明,当地暖盘管敷设时按照由四周向中心旋入,可大大提高辐射供暖的均匀性^[10].此外,低温热水地板辐射供暖技术相较于传统供暖方式节能 20%~30%^[11].空气源热泵直接地板辐射供暖系统是一种新型供暖方式,它将节能环保的空气源热泵技术与高换热效率的制冷剂直接地板辐射供暖技术相结合,有效提高供热效率,并且其广泛的能量来源可使此系统广泛应用于集中供热无法到达的城镇和农村居民住宅建筑.与传统的空气源热泵低温热水地板辐射供暖相比,空气源热泵直接地板辐射供暖的节能性更高(传热工质直接使用制冷剂,减少中间一次换热),且独立可控(压缩机采用数码涡旋压缩机,可大范围调节制冷剂容量).就空气源热泵供暖存在的两大问题,室外温度越低系统性能系数越低和停机除霜^[12],虽然已有大量学者提出多种解决办法^[13-15],但仍然没有确切的办法可以彻底解决这两个困扰已久的问题.本文通过对某安装了空气源热泵直接地板辐射供暖系统的住宅建筑进行实际测量,并结合 DeST-h 软件的模拟数据,得出经济性最佳的系统运行方式.

1 研究对象

1.1 供暖系统

空气源热泵直接地板辐射供暖系统是由数码涡旋空气源热泵与地板辐射盘管相结合,如图 1 所示.系统基本工作原理是逆卡诺循环,以 R22 为制冷剂,通过数码涡旋压缩机将制冷剂压缩升温,直接流入室内地埋管向屋内供暖;然后,流过节流装置降温减压,再通过空气热交换器吸收空气中的低品位能;最后,进入压缩机进行下一个循环.系统通过地埋管辐射散热,使得距地板表面 2 m 以内空间温度得到很好保证,人体对温度的感受是头冷脚热,是目前舒适度和节能性均较高的一种供暖方式.

数码涡旋压缩机的核心技术是“轴向柔性”技术(美国谷轮公司专利技术),此技术可维持涡旋盘尖

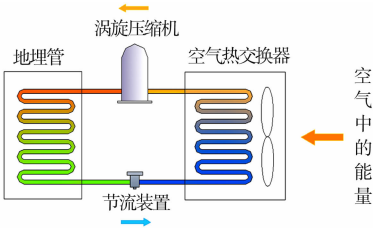


图 1 系统原理图
Fig. 1 System principle diagram

3.2 模拟方案

根据空气源热泵直接地板辐射采暖系统运行时间的不同,本实验选择三种不同的运行方式模拟运行工况,并分析这三种运行方式的舒适性和经济性.

3.2.1 全天连续运行 该运行方式是传统的运行方式,其优点是随室内温度的变化,机组自动控制,可保证室内温度始终保持在设定范围内,舒适性较好.但此运行方式没有充分利用地板辐射供暖盘管敷设面积大和蓄热性好的特点,增加了系统不必要耗电;而且,机组在低温环境下运行易造成经常性停机除霜,会导致机组性能系数急剧下降,给用户带来不舒适感.使用 DeST-h 软件模拟此方案主要用于与其他运行方式的对比.

3.2.2 白天运行夜间停机 该运行方式是在白天设定时间区间内运行,其余时间停机的间歇运行.此运行方式是为避开限制空气源热泵快速发展中夜间系统性能系数急剧下降和停机除霜两大问题.白天运行夜间停机还能充分利用地板辐射供暖围护结构蓄热的优势,即白天围护结构可以将系统供热量和太阳照射所吸收热量储存起来,夜间温度下降较快时释放到室内,大大减缓室温下降的速度.文中实测数据即为此运行方式下测得,最终模拟结果与实验结果进行比较,以此验证模拟结果真实性.

3.2.3 电价错峰填谷运行 该运行方式是在电价谷值时开启系统进行制热供暖.峰谷分时电价的时段:8:00 至 22:00 为峰电时段,其余时间为谷电时段.峰值电价比谷值电价高,当系统运行时间均在谷值电价时,耗电费用将大大减少.但必须考虑的是,在寒冷地区冬季夜间温度较低,空气源热泵系统在此时段运行的性能系数较低,且易出现停机除霜,影响供暖效果,而长期出现停机除霜,会对机组性能产生破坏性影响.

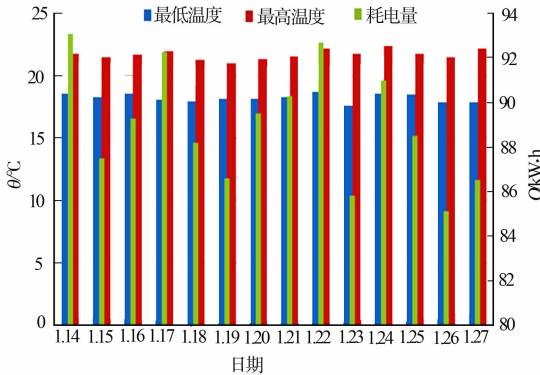
实验开始时间为 2014 年 1 月 13 日 16:00,结束时间为 2014 年 1 月 27 日 15:00.实验开始前系统已运行超过 24 h,为围护结构蓄热,以保证实验开始后室温正常变化.

3.3 模拟结果

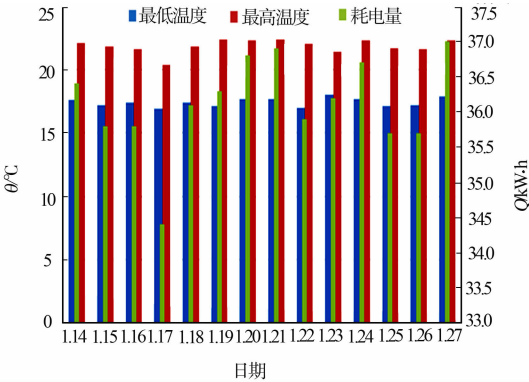
模拟试验期间,三种运行方式的室温和耗电量的模拟结果,如图 3 所示.

表 2 作息情况表
Tab.2 Schedule table

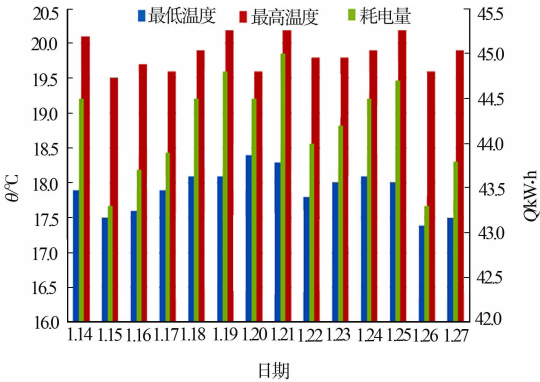
项目	主卧室		起居室	
	时间段	k_u	时间段	k_u
灯光	19:00~21:00	0.5	19:00~21:00	1.0
	21:00~22:00	1.0	21:00~22:00	0.5
设备			11:00~13:00	1.0
	全天	0	19:00~21:00	1.0
			21:00~22:00	0.5
人员	0:00~8:00	1.0		
	19:00~21:00	0.5	19:00~21:00	1.0
	21:00~24:00	1.0	21:00~22:00	0.5
热泵系统	每天 8:00~18:00 开启,其他时间关闭			



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价错峰填谷运行

图 3 不同运行方式下室内温度和耗电量模拟值

Fig.3 Simulation values of indoor temperature and power consumption under different operation modes

4 实测与模拟结果对比分析

实验模拟三种不同运行方式,其中全天连续运行是目前普遍的运行方式,节能性较差,而电价移峰填谷运行则不利于设备自身性能的保护。因此,这两种运行方式并未进行实测,只是模拟与白天运行夜间停机的运行方式进行对比分析。

4.1 耗电量分析

根据图 2 和图 3(b)可知:白天运行夜间停机的耗电量模拟结果与实测数据范围基本一致,平均偏差为 3 kW·h,相对偏差约为 9%。虽然存在一定误差,但通过误差分析进行修正后模拟数据与实测数据有较好的一致性。产生偏差的主要原因:1) 实际室外温度与软件中设定的室外气象参数不可能完全相同;2) 实测过程中,屋内人员、设备增加,人体和设备散热量变大;3) 实验期间住户仍每天开灶做饭也会产生热量。

由上述对实测数据和模拟数据的比较分析可知:耗电量模拟数据的修正系数为 0.91,修正后模拟数据可较好的反正真实情况。

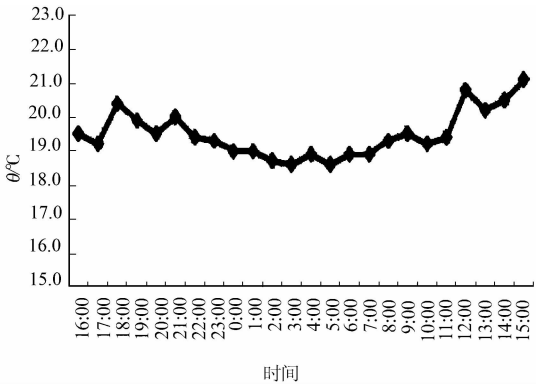
将图 3(b)与图 3(a)比较可知:全天连续运行的日平均耗电量是白天运行夜间停机的 2.4 倍。夜间室外温度急剧下降,系统在夜间运行时不仅制冷效率(coefficient of performance, COP)很低,耗电量大,而且易出现结霜的现象,不仅不能供暖,还需消耗大量电能除霜。另外,全天连续运行并未利用地板辐射供暖系统围护结构蓄热的优点,因此节能性较差。

将图 3(b)与图 3(c)比较可知:电价移峰填谷运行的日平均耗电量是白天运行夜间停机的 1.2 倍。虽然这两种运行方式的耗电量相差并不大,但电价移峰填谷运行使得系统需在温度很低的夜间运行。此时,机组不仅 COP 值很低,有结霜的问题,而且长期在低 COP 值运行对机组自身性能维护也是很不利。

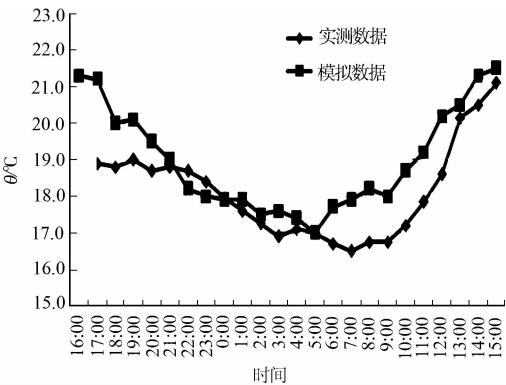
4.2 逐时室温分析

三种运行方式的室温实测与模拟结果对比结果,如图 4 所示。分析以 2014 年 1 月 15 日 16:00 至 1 月 16 日 15:00 为例进行,可代表实验期间的模拟和实测数据的一般规律。

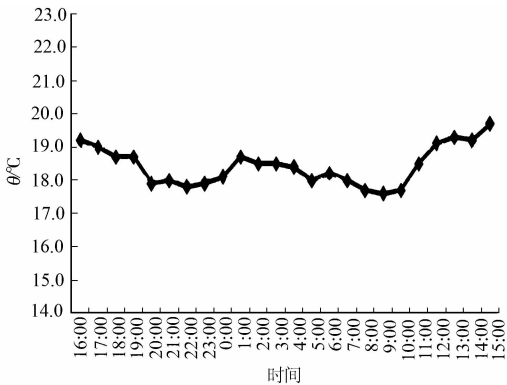
由图 4(a)可知:当系统运行方式为全天连续运行时,室内温度较平稳,夜间温度稍有下降,最低温度在凌



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价移峰填谷运行

图 4 不同运行方式下内逐时平均温度

Fig. 4 Hourly indoor temperature in running under different operation modes

晨 5 点出现,为 18.6 °C,能很好满足用户的舒适性。

由图 4(b)可知:两曲线走势基本相同,实测与模拟结果基本吻合,实测平均室温为 18.2 °C,而温度的模拟结果为 19 °C。由图 4(b)还可知:空气源热泵直接地板辐射供暖系统在开机期间,其室内温度保持在 17~21.5 °C 之间,温度基本在室温要求范围内,变化平缓,关机后室温下降;但由于地板辐射供暖

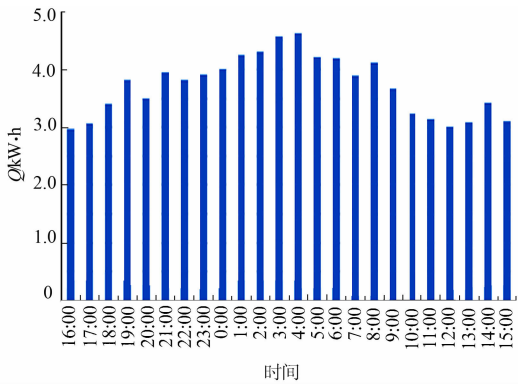
系统围护结构的蓄热性,温度下降后蓄热体放热,减缓室温下降的速度. 夜间最低温度为 17.0℃,可以满足人员夜间的热量需求.

由图 4(c)可知:系统根据电价的不同移峰填谷运行时,由于夜间开机温度在 18~20℃之间,保证了室内温度的舒适性;白天室内温度大约在 17.5~19.5℃之间,温度基本满足室内 18℃的要求.

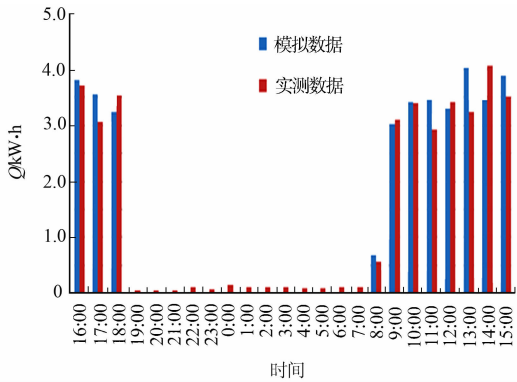
4.3 逐时耗电量分析

三种运行方式的逐时耗电量实测与模拟结果对比,如图 5 所示. 由图 5(a)可知:此运行方式的耗电量很大,24 h 耗电量为 89.3 kW·h,节能效果不佳.

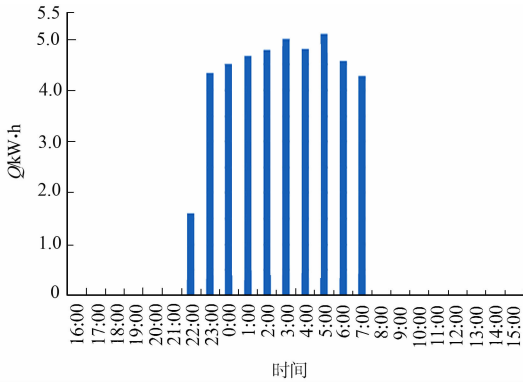
由图 5(b)可知:在开机期间实测与模拟的每小时耗电量大致趋势相同,夜间停机时由于系统仍与电源连接,所以有微小的耗电. 此图亦可以证明模拟结果的可用性. 此 24 h 的实测耗电量为 35.66 kW·h,模拟结果为 35.8 kW·h.



(a) 全天连续运行



(b) 白天运行夜间停机



(c) 电价移峰填谷运行

图 5 不同运行方式下内逐时耗电量

Fig. 5 System power consumption per hour under different operation modes

由图 5(c)可知:此运行方式耗电量集中在夜间,此 24 h 模拟得到的耗电量为 43.68 kW·h,略高于白天运行夜间停机运行方式,远低于全天连续运行方式,因此节能效果不错.

5 结论

实验运用 DeST-h 软件,对位于山西省中南部的某被测建筑建立模型,绘制建筑围护结构,设置围护结构参数、空气源热泵直接地板辐射供暖系统运行参数和室外气象参数;然后,对模拟数据和实测数据进行对比分析,所得模拟结果与现场实测数据取得较好的一致性.

由模拟和实测结果分析可知:三种运行方式中,白天运行夜间关机的运行方式同时兼顾舒适性和经济性(运行费用低). 此运行方式充分利用了空气源热泵直接地板辐射采暖系统的围护结构蓄热性能,夜间关机状态下仍能基本保证室内温度不低于 16.5℃,在节能的同时兼顾用户的舒适性. 该运行方式规避了传统空气源热泵系统因除霜而造成的高能耗、低舒适性的问题,既保证了系统的高性能系数,又减少了机组因结霜而损坏的概率.

参考文献:

[1] 江亿. 我国建筑能耗趋势与节能重点[J]. 建设科技, 2006(7):10-13,15.
[2] 许可,王树刚,蒋爽,等. 空气源热泵用于低温热水地板辐射供暖系统的模拟研究[J]. 制冷技术, 2014,34(1):12-17.
[3] 王子介. 空气源热泵用于住宅地板辐射供暖的实测研究[J]. 暖通空调, 2003,33(1):8-11.
[4] 李元哲,于涛,陈天侠. 空气源热泵地板供暖系统在北方寒冷地区应用的节能性与适用性[J]. 暖通空调, 2012,42

(2):62-65.

[5] 肖益民,付祥钊.户式空气源热泵地板供暖系统实测分析[J].湖南大学学报:自然科学版,2009,36(12):14-18.

[6] 王林,陈光明,陈斌,等.一种用于低温环境下新型空气源热泵循环研究[J].制冷学报,2005(2):34-38.

[7] 韩宗伟,李先庭,石文星.适用于寒冷地区的太阳能与低温空气源热泵复合空调系统[J].暖通空调,2011,41(1):104-107,112.

[8] 冯永杰.传统供暖方式亟待改造新型地热采暖迅速崛起[J].中国高新技术企业,2010(3):119-120.

[9] 曾章传,吴锦京,魏新利.空气源热泵直接地板辐射采暖系统实验研究及热力性能分析[J].太阳能学报,2011,32(8):1151-1157.

[10] 冉茂宇.采暖地板对室内人体热辐射的理论计算模型[J].华侨大学学报:自然科学版,2010,31(1):95-98.

[11] 王子介.低温辐射供暖与辐射制冷[M].北京:机械工业出版社,2004:2-3.

[12] 张斌,张志荣,杨彬.空气源热泵系统调试中发现的问题与对策[J].制冷空调与电力机械,2010,31(5):67-69.

[13] 董建锴,姜益强,姚杨,等.空气源热泵过冷蓄能除霜蓄能特性实验研究[J].太阳能学报,2012,33(9):1536-1540.

[14] 曲明璐,邓仕明,董建锴,等.空气源热泵蓄能换向除霜对室内热舒适的影响[J].暖通空调,2013,43(4):76-79.

[15] 王鸿雁.利用制冷剂过冷放热除霜的研究[J].制冷与空调,2009,9(1):47-49.

[16] 叶盛,陈汝东.数码涡旋 VRV 空调系统的节能因素分析[J].应用能源技术,2006(9):17-20.

[17] 王贻任.美国谷轮公司压缩机应用技术讲座(第九讲):数码涡旋技术[J].制冷技术,2003(1):35-38.

[18] 张智力,吴喜平.VRV 空调系统的节能因素分析[J].能源技术,2002,23(2):59-61.

[19] 山西省建设厅.DBJ 04-216—2006 民用建筑节能设计标准(采暖居住建筑部分)山西地区实施细则[S].北京:中国建筑工业出版社,2006:23.

Research of Optimizing Running Modes for Direct Radiant Floor Heating System with Air Source Heat Pump

DU Yan¹, TIAN Qi¹, YANG Jin-ming, GUO Wei-qiang²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2. Taiyuan Hengxingweiye Refrigeration Air-Conditioning Equipment Company, Taiyuan 030024, China)

Abstract: From the aspect of running modes, direct radiant floor heating system with air source heat pump was optimized. Installing this system in a two floor residential building in Shanxi Province, three different running modes, including all-day continuous running, intermittent running (daytime on and nighttime off), and electrovalent peak load shifting running, were compared the economy and comfort by combining the measured and simulative data from the DeST-h software. The results showed that the three running modes could all meet the comfort requirement basically, but the intermittent running could also make full use of the thermal storage capacity of the building envelope and shorten the running time economically, which indicates that the intermittent running is the best way to run.

Keywords: air source heat pump; direct radiant floor heating; operation mode; DeST-h software; economy

(责任编辑: 黄仲一 英文审校: 方德平)

小分子靶向受体酪氨酸激酶抑制剂 TW9183 的合成及体外抗肿瘤活性

雷春花¹, 王雪玉¹, 杨育才², 吴振³, 王立强¹

(1. 华侨大学 生物医学学院, 福建 泉州 362021;

2. 台湾大学 生化科学系, 台湾 台北 106170;

3. 厦门大学 药学院, 福建 厦门 361101)

摘要: 合成一系列喹啉类衍生物, 初步筛选出候选药物 TW9183, 并对其体外抗肿瘤活性进行研究. 4,7-二氯喹啉通过亲核取代、酰氯化及缩合反应得到 TW9183. 采用四甲基偶氮唑盐法(MTT)、平板克隆、划痕法、Hoechst 33342 染色、蛋白免疫印迹及流式细胞术研究 TW9183 对 3 种人类肿瘤细胞(Hela, A549, SMMC-7721)的体外抑制作用. 产物结构经红外光谱、核磁共振氢谱、碳谱、电喷雾质谱和元素分析表征确证. 实验结果表明: TW9183 能有效抑制 3 种肿瘤细胞的增殖, 但对正常人脐静脉内皮细胞(HUVEC)无影响; Hoechst 染色可见肿瘤细胞凋亡明显; TW9183 能促进 caspase-3 活化形式的表达; 划痕实验中肿瘤细胞迁移能力显著下降; 流式细胞术表明其能将 3 种肿瘤细胞阻滞于 G2/M 期.

关键词: 喹啉衍生物; 受体酪氨酸激酶抑制剂; 合成反应; 抗肿瘤活性

中图分类号: R 916

文献标志码: A

目前, 酪氨酸激酶是国际上抗肿瘤药物研发的重要靶点^[1]. 吉非替尼是一种苯胺喹啉类酪氨酸激酶抑制剂^[2], 于 2003 年获美国食品和药物管理局批准上市, 作为非小细胞肺癌的靶向治疗药物. 喹啉类化合物的构效关系表明, 药效母核喹啉环上 3-位的 N 原子可被 C 取代, 形成具有较强药理活性的喹啉类化合物^[3]. 研究表明, 苯胺嘧啶类化合物也是一类重要的蛋白激酶抑制剂, 对多种蛋白激酶有较好的抑制效果, 许多已上市和临床阶段的药物中含有此结构单元^[4]. 课题组以吉非替尼为先导, 以喹啉环替代喹啉, 在外侧苯环的 4-位引入不同的苯胺嘧啶化合物, 合成了一系列结构新颖的喹啉衍生物. 经前期体外活性验证与计算机辅助的结构优化, 筛选出候选药物 TW9183, 其化学名称为 4-(7-氯喹啉-4-氨基)-N-{4-甲基-3-[4-(4-吡啶)嘧啶-2-氨基]苯基}苯甲酰胺, 分子式为 $C_{32}H_{24}ClN_7O$. 本文对 TW9183 的合成方法及其对 3 种人类肿瘤细胞株的体外抗肿瘤作用进行研究.

1 材料与方法

1.1 仪器与试剂

人宫颈癌 Hela、人非小细胞肺癌 A549、人肝癌 SMMC-7721、HUVEC 细胞株(上海中科院细胞库); MEM, F-12K 和 RPMI-1640 培养基(美国 Invitrogen 公司); 四甲基偶氮唑盐(MTT, 美国 Sigma 公司); 胎牛血清(美国 Hyclone 公司); 二甲基亚砜(DMSO, 美国 Amresco 公司); 结晶紫、Hoechst 33342 染色液、细胞周期与细胞凋亡检测试剂盒、超敏 ECL 化学发光试剂盒(上海市碧云天生物技术研究); 兔抗人 Caspase-3 抗体、兔抗人 Actin 抗体、辣根过氧化物酶标记的羊抗兔二抗(美国 Abcam 公司); 吉非替尼(辽宁省大连美仑生物技术有限公司); 其他合成试剂(上海泰坦科技股份有限公司).

PB-10 型 pH 计、BS 224 S 型电子天平(德国 Sartorius 公司); Infinite M200 型多功能酶标仪(西班牙

收稿日期: 2014-06-07

通信作者: 王立强(1970-), 男, 教授, 博士, 主要从事药剂学和新药开发的研究. E-mail: wlq1599@163.com.

基金项目: 福建省泉州市科技计划重点项目(2013Z35)

牙 Tecan Iberica 公司);Eclipse TE2000-U 型荧光倒置显微镜(日本 Nikon 公司);ChemiDoc XRS 型凝胶成像系统;Mini-PROTEAN Tetra C 型垂直板电泳和转膜装置(美国 Bio-Rad 公司);FACS Calibur 型流式细胞仪(美国 BD 公司);FRESCO 21 型离心机(美国 Thermo 公司);WRR 型熔点仪(上海精密科学仪器有限公司);Vario EL III 型元素分析仪(德国 Elementar 公司);N-1001 型旋转蒸发仪(日本东京理化器械株式会社);UNION 400 型氢谱、碳谱(美国 Varian 公司);Esquire 3000 plus 型质谱仪(美国 Bruker 公司)。

1.2 TW9183 的合成

化合物 TW9183 的合成路线,如图 1 所示。

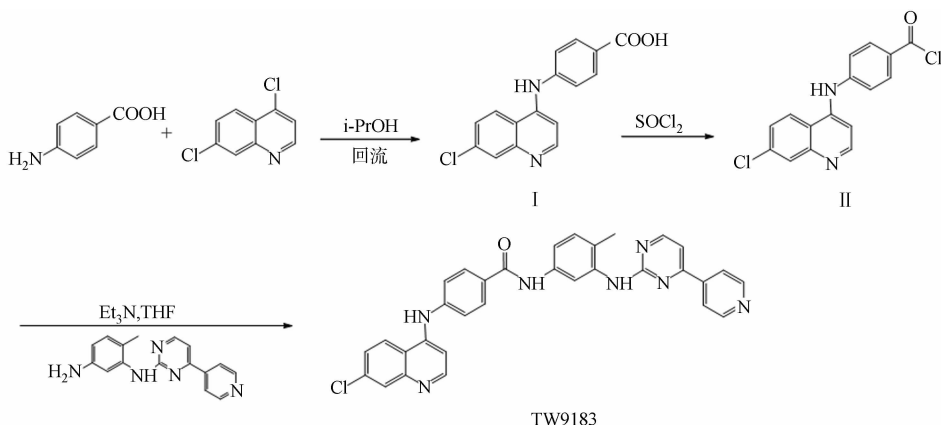


图 1 TW9183 的合成路线

Fig. 1 Synthesis route of TW9183

1.2.1 4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酸(I)的合成 在 100 mL 的圆底烧瓶中加入 4,7-二氯喹啉 1.96 g (10 mmol)、对氨基苯甲酸 1.36 g (10 mmol) 和异丙醇(*i*-PrOH) 20 mL, 搅拌使其充分溶解。缓慢升温至 85 °C, 搅拌回流 5 h, 薄层色谱(TLC)监测反应完全后, 将反应液冷却至室温, 减压蒸干, 残留固体用 30 mL 二氯甲烷洗涤 2 次, 抽滤得黄色固体中间产物(I)4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酸 2.68 g, 收率为 90%。

1.2.2 4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酰氯(II)的合成 在 100 mL 干燥的圆底烧瓶中加入含 2.982 g (10 mmol) 中间产物 I 的干燥二氯甲烷溶液 15 mL, 搅拌, 0 °C 冰浴下缓慢滴加氯化亚砷 5.35 g (45 mmol), 回流 3 h, 减压蒸馏, 得到淡黄色固体中间产物(II)4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酰氯 2.71 g, 收率为 95%。

1.2.3 TW9183 的合成 在 100 mL 干燥的圆底烧瓶中加入含中间产物 II 3.162 g (10 mmol) 及 2-(5-氨基-2-甲基苯胺)-4-(4-吡啶)嘧啶 2.35 g (8.5 mmol) 的四氢呋喃溶液 40 mL, 搅拌, 0 °C 冰浴下缓慢滴加三乙胺(Et_3N) 1.717 g (17 mmol), 搅拌 30 min, 45 °C 下反应 7 h。TLC 检测反应完全后, 抽滤, 滤液减压蒸馏, 固体用 50 mL 乙酸乙酯溶解, 80 mL 水萃取 2 次, 合并有机相, 无水硫酸钠干燥, 减压蒸馏, 用二氯甲烷/甲醇重结晶, 得目标产物(TW9183) 4.02 g, 收率为 85%, 熔点为 292~296 °C。

1.3 细胞培养

Hela, SMMC-7721, A549 和 HUVEC 细胞株分别接种于含体积分数为 10% 胎牛血清的 MEM, RPMI-1640, F-12K 培养基中, 置于 37 °C, 体积分数为 5% 的二氧化碳培养箱中培养, 所有实验均采用对数生长期细胞。

1.4 MTT 法测定细胞的增殖能力

将 Hela, A549, SMMC-7721, HUVEC 细胞以 4×10^3 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 96 孔培养板中, 细胞完全贴壁后, 分别给予不同浓度的 TW9183 (2, 4, 8, 16 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$)。阳性对照组给予相同浓度的吉非替尼, 阴性对照组给予相同体积的 DMSO, 培养 48 h 后加 MTT 检测, 计算半数抑制浓度(IC_{50})和相对细胞增殖率(RGR), 实验重复 3 次。

1.5 平板克隆法测定细胞的克隆形成能力

将 Hela, A549, SMMC-7721 细胞以 300 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 6 孔板中, 细胞完全贴壁后, 药物处理同节 1.4。48 h 后更换培养液, 培养至培养板中出现肉眼可见的集落时终止, 弃培养液, 用磷酸盐缓冲液

(PBS)洗 1 次,加入 1 mL 质量分数为 4% 的多聚甲醛固定 10 min,弃多聚甲醛,PBS 洗 2~3 次,加 600 μL 结晶紫染色液染色 10 min,流水洗去结晶紫,空气中干燥,计算克隆形成率,实验重复 3 次。

1.6 划痕法测定细胞的迁移能力

将 HeLa, A549, SMMC-7721 细胞以 1×10^5 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 24 孔板中. 细胞完全贴壁后,用 200 μL 移液枪枪头在单层细胞上呈"一"字划痕,弃培养液,PBS 洗 2 次,药物处理同节 1.4.48 h 后,置于倒置显微镜下观察并测量细胞发生迁移后的损伤距离,计算迁移率,实验重复 3 次。

1.7 Hoechst 33342 法检测凋亡细胞形态

将 HeLa, A549, SMMC-7721 细胞以 4×10^3 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 96 孔板中. 细胞完全贴壁后,药物处理同节 1.4.48 h 后吸弃培养液,每孔加入 100 μL 质量分数为 4% 的多聚甲醛固定 30 min,吸弃多聚甲醛,PBS 荡洗,每孔加入 80 μL Hoechst 33342 染色 10 min,吸弃染色液,PBS 荡洗,于荧光显微镜下观察,实验重复 3 次。

1.8 蛋白免疫印迹检测 caspase-3 蛋白的表达

将 HeLa, A549, SMMC-7721 细胞以 5×10^5 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 96 孔板中. 细胞完全贴壁后,分别给予不同浓度的 TW9183(4, 8, 16 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$),阴性对照组给予同体积的 DMSO. 48 h 后吸弃培养基,PBS 洗涤 2 次,每孔加入 150 μL Western 及 IP 细胞裂解液,冰浴裂解 30 min,1 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 5 min,收集上清液,凝胶电泳分离蛋白. 将蛋白转印至聚偏二氟乙烯膜上,质量分数为 5% 脱脂奶粉封闭后,一抗 4 $^{\circ}\text{C}$ 封闭过夜,二抗室温封闭 2 h, ECL 显色 1~2 min,荧光成像仪内曝光、检测,实验重复 3 次。

1.9 流式细胞术检测细胞周期分布

将 HeLa, A549, SMMC-7721 细胞以 2×10^5 个 $\cdot$ 孔⁻¹ 接种于 6 孔板中. 细胞完全贴壁后,药物处理同节 1.4.48 h 后消化并收集细胞,4 $^{\circ}\text{C}$ 固定过夜,加入 0.5 mL 配制好的染色液(含 PI, RNA 酶,染色缓冲液),缓慢并充分重悬细胞沉淀,于 37 $^{\circ}\text{C}$ 避光温浴 30 min,用流式细胞仪检测,实验重复 3 次。

2 结果与讨论

2.1 TW9183 的合成及结构鉴定

TW9183 的详细合成路线,如图 1 所示. 中间体 I 的结构经 ¹H-NMR, ¹³C-NMR 和 ESI-MS 表征确证,目标产物的结构经 IR, ¹H-NMR, ¹³C-NMR, ESI-MS 和元素分析表征确证,具体结果如下所述。

4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酸(I)为黄色固体粉末,收率为 90%. ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆), δ 值: 8.61(d, J =9.29 Hz, 1H), 8.47(d, J =7.03 Hz, 1H), 8.23~8.26 (m, 2H), 8.00(d, J =2.01 Hz, 1H), 7.86(dd, J =9.29 Hz, 2.26 Hz, 1H), 7.63(dd, J =6.78 Hz, 2.01 Hz, 2H), 7.11(d, J =7.03 Hz, 1H). ¹³C-NMR(400 MHz, DMSO-d₆), δ 值: 168.41, 150.39, 149.52, 148.36, 147.21, 136.12, 132.15, 130.21, 126.83, 123.29, 21.38, 18.26, 115.17, 112.85. ESI-MS, m/z 为 298.7 [M-H]⁻.

4-(7-氯喹啉-4-氨基)苯甲酰氯(II)为淡黄色固体粉末,收率为 95%。

4-(7-氯喹啉-4-氨基)-N-{4-甲基-3-[4-(4-吡啶)嘧啶-2-氨基]苯基}苯甲酰胺(TW9183)为淡黄色的固体粉末,收率为 85%,其熔点为 292~296 $^{\circ}\text{C}$. IR(KBr), σ/cm^{-1} : 3 447, 3 427, 3 372, 3 226, 3 065, 3 014, 1 625, 1 595, 1 574, 1 507, 1 427, 1 386, 1 361, 1 313, 1 225, 1 166, 1 020, 746. ¹H-NMR (400 MHz, DMSO-d₆), δ 值: 2.25(s, 3H), 7.01(d, J =7.00 Hz, 1H), 7.24(d, J =8.54 Hz, 1H), 7.47(d, J =5.26 Hz, 1H), 7.51(dd, J =8.04 Hz, 2.04 Hz, 1H), 7.64(d, J =7.76 Hz, 1H), 7.65(d, J =8.76 Hz, 2H), 7.93(dd, J =9.04 Hz, 2.00 Hz, 1H), 8.12(d, J =2.24 Hz, 1H), 8.14(d, J =2.04 Hz, 1H), 8.18(d, J =8.54 Hz, 2H), 8.55(d, J =5.26 Hz, 1H), 8.62(dd, J =6.14 Hz, 2.00 Hz, 1H), 8.63(d, J =6.8 Hz, 1H), 8.76(d, J =4.76 Hz, 1H), 8.79(d, J =9.04 Hz, 1H), 9.06(s, 1H), 9.34(s, 1H), 10.36(s, 1H), 11.14(s, 1H). ¹³C-NMR(400 MHz, DMSO-d₆), δ 值: 18.11, 101.36, 108.11, 116.73, 117.36, 117.78, 119.96, 124.79, 125.06, 126.37, 128.14, 128.27, 129.92, 130.58, 133.19, 134.04, 136.25, 137.52, 138.23, 139.14, 139.59, 140.35, 144.47, 147.57, 150.63, 155.00, 158.68, 159.02, 160.01, 161.58, 161.64, 164.88. ESI-MS, m/z 为 558.2 [M+H]⁺. Anal. (C₃₂H₂₄ClN₇O): calcd C 68.87, H 4.30, Cl 6.37, N 17.58, O 2.87; found C 68.79, H 4.32, Cl 6.35, N 17.56, O 2.88.

2.2 TW9183 对肿瘤细胞和 HUVEC 细胞增殖的影响

给药 48 h 后,阴性对照组细胞均贴壁生长旺盛,细胞呈多角形,胞质饱满,相邻细胞生长融合成片,而给药组细胞随着给药浓度的增加细胞数明显减少,Hela 细胞发生皱缩,逐渐漂浮起来,A549 和 SMMC-7721 细胞体积变大,扁平铺展.以细胞膨大为特征的细胞衰老是一种重要的抑瘤机制^[4].因此,TW9183 可能通过促进 A549 和 SMMC-7721 细胞的衰老达到抑制肿瘤的效果.TW9183 对人肿瘤细胞的抗增殖作用,如表 1 所示.由表 1 可知:TW9183 对 Hela,A549 和 SMMC-7721 肿瘤细胞株表现出比吉非替尼更高的抑制力,表明 TW9183 可能具有潜在对宫颈癌、肺癌和肝癌的治疗作用.TW9183 对 HUVEC 细胞相对增殖率的影响,如图 2 所示.由图 2 可知:TW9183 作用后的 HUVEC 细胞相对增殖率较大,与阴性对照组差异无统计学意义($P>0.05$),表明 TW9183 对正常 HUVEC 细胞在化合物作用范围内没有毒性.

2.3 TW9183 对肿瘤细胞克隆形成的影响

肿瘤细胞的克隆形成能力反映了细胞的群体依赖性和增殖能力,是肿瘤细胞成瘤的一个重要因素.TW9183 作用于肿瘤细胞后,细胞的克隆形成能力不同程度地减弱,其中,TW9183 降低 Hela 肿瘤细胞集落形成能力最为显著.对 3 种肿瘤细胞集落形成的统计值(η_1),如图 3 所示.图 3 中:横坐标 1~5 分别代表 0,2,4,8,16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TW9183,6 代表 16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吉非替尼;与阴性对照组相比,a 代表 $P<0.05$,b 代表 $P<0.01$;与相同浓度吉非替尼组(16.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)相比,c 代表 $P<0.01$.由图 3 可知:TW9183 抑制 Hela,A549 和 SMMC-7721 克隆形成的作用效果强于吉非替尼.

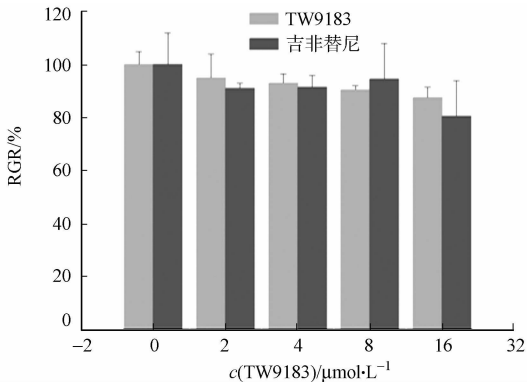


图 2 TW9183 对 HUVEC 细胞相对增殖率的影响

Fig. 2 Effects of TW9183 on relative growth rate in HUVEC cell

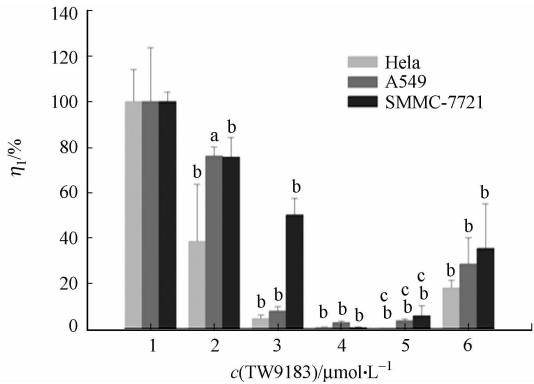


图 3 TW9183 对 Hela,A549 和 SMMC-7721 细胞克隆形成的影响

Fig. 3 Effects of TW9183 on colony formation in Hela,A549 and SMMC-7721 cells

2.4 TW9183 对肿瘤细胞迁移的影响

肿瘤转移是肿瘤致死的主要原因^[5-6],也是人们防治肿瘤时关注的重要因素.TW9183 能不同程度地抑制 Hela,A549 和 SMMC-7721 细胞的迁移,其影响如图 4 所示.图 4 中:A,B,C,D,E 分别为 0,2,4,8,16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TW9183,F 为 16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吉非替尼($\times 100$).给药 48 h 后,阴性对照组的划痕宽度不断缩小,而给药组随着给药浓度的增加,划痕愈合程度逐渐降低,细胞迁移率(η_2)明显降低,与阴性对照组相比具有统计学意义($P<0.01$),且高剂量组 TW9183(16.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)作用后的 Hela 细胞迁移率明显低于吉非替尼对照组($P<0.05$),但对 A549 和 SMMC-7721 细胞的迁移抑制作用与吉非替尼组无统计学意义.TW9183 对 Hela,A549 和 SMMC-7721 细胞迁移率的影响,如图 5 所示.图 5 中:1~5 分别代表浓度为 0,2,4,8,16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TW9183,6 代表浓度为 16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吉非替尼;与阴性对照组相比,b 代表 $P<0.01$;与相同浓度吉非替尼(16.0 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$)组相比,c 代表 $P<0.05$.

2.5 TW9183 对肿瘤细胞凋亡的影响

TW9183 作用于 3 种肿瘤细胞后,细胞数明显减少,荧光强度增加,而阴性对照组细胞的细胞核形态规则,荧光较弱,且着色均匀.不同浓度的 TW9183 和吉非替尼可使部分细胞出现致密浓染或碎块状

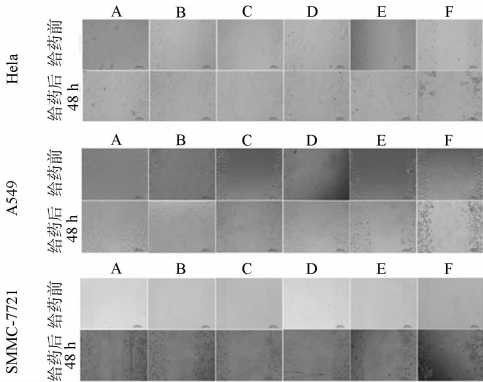


图 4 TW9183 对 HeLa, A549 和 SMMC-7721 细胞迁移的影响

Fig. 4 Effects of TW9183 on migration in HeLa, A549, and SMMC-7721 cells

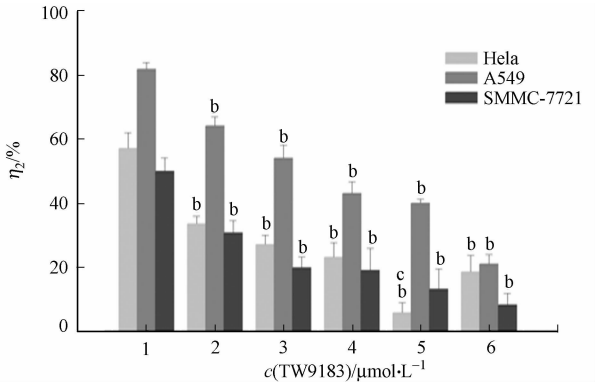


图 5 TW9183 对 HeLa, A549 和 SMMC-7721 细胞迁移率的影响

Fig. 5 Effects of TW9183 on migration rate in HeLa, A549, and SMMC-7721 cells

致密浓染,表明药物作用后细胞凋亡增加.其中,HeLa 细胞凋亡效果较明显,其结果如图 6 所示.图 6 中:A~E 分别为 0,2,4,8,16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TW9183, F 为 16 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的吉非替尼($\times 100$).

2.6 TW9183 对肿瘤细胞 caspase-3 蛋白表达的影响

细胞凋亡有多种因素参与,其中,caspase-3 蛋白酶在凋亡信号传导中起核心作用^[7].它在细胞内以无活性的前体(酶原)形式存在,激活后导致凋亡的发生. TW9183 对 HeLa, A549 和 SMMC-7721 细胞 caspase-3 蛋白表达的影响,如图 7 所示.由图 7 可知:不同浓度的 TW9183 作用 3 种肿瘤细胞 48 h 后,随 TW9183 浓度的增大,caspase-3 蛋白相对分子量 32 kD 的酶原表达量逐渐减少,17 kD 的活性成分表达量逐渐增加,提示 TW9183 作用于肿瘤细胞后可激活 caspase-3,发挥促进肿瘤细胞凋亡的效应.

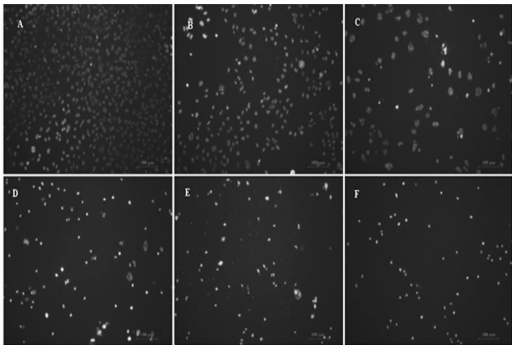


图 6 TW9183 对 HeLa 细胞凋亡的影响

Fig. 6 Effects of TW9183 on nuclear apoptosis in HeLa cells

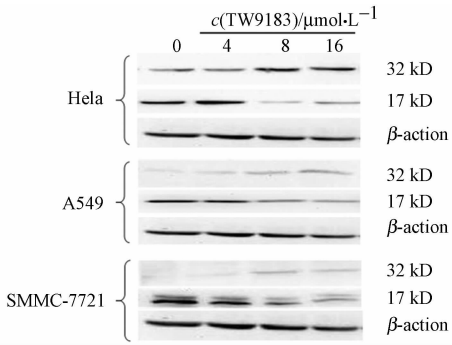


图 7 TW9183 对 HeLa, A549 和 SMMC-7721 细胞 caspase-3 蛋白表达的影响

Fig. 7 Effects of TW9183 on expression of caspase-3 protein in HeLa, A549 and SMMC-7721 cells

2.7 TW9183 对肿瘤细胞周期分布的影响

与阴性对照组相比,各浓度 TW9183 作用后,肿瘤细胞的 G2/M 期细胞比率均有不同程度的增加,且该结果呈现剂量依赖性,表明 TW9183 主要诱导肿瘤细胞阻滞于 G2/M 期;而吉非替尼主要将细胞周期阻滞于 G0/G1 期,二者阻滞的细胞周期不同,有待进一步研究.

3 结论

文中合成的目标化合物是一种新的喹啉衍生物.红外光谱、碳谱、氢谱、电喷雾质谱及元素分析结果证实该化合物与所设计的 TW9183 结构相符,其收率达到 85%.此法操作简便,原料便宜易得,反应效率高,易于进行工业化生产.

细胞异常增殖、迁移以及细胞去分化都是肿瘤形成的重要原因^[8].通过 MTT、平板克隆、划痕实验

等证实,TW9183 对 HeLa,A549 和 SMMC-7721 细胞的增殖、迁移均有一定的抑制作用. Hoechst 33342 染色、Western blot 和流式细胞术还表明:TW9183 不同程度地促进这 3 种细胞的凋亡,将细胞周期阻滞在 G2/M 期. 所有实验均证实 TW9183 较吉非替尼表现出更强的体外抗肿瘤活性,但其抗肿瘤作用机制及体内动物实验还需后续继续研究.

参考文献:

- [1] WEI L,MALHOTRA S V. Recent development of cyclic amide (pyridone/lactam) moiety containing heterocycles as protein kinase inhibitors[J]. *Current Medicine Chemistry*,2010,17(3):234-253.
- [2] WEICKHARDT A J,TEBBUTT N C,MARIADASON J M. Strategies for overcoming inherent and acquires resistance to EGFR inhibitors by targeting downstream effectors in the RAS/PI3K pathway[J]. *Current Cancer Drug Targets*,2010,10(8):824-833.
- [3] SAVAGE D G,ANTIMAN K H. Imatinib mesylate: A new oral targeted therapy[J]. *New England Journal of Medicine*,2002,346(9):683-693.
- [4] CHEN H Y,LEE Y R,CHEN R H. The functions and regulations of DAPK in cancer metastasis[J]. *Apoptosis*,2014,19(2):364-370.
- [5] TANAKA T,YUI Y,NAKA N,et al. Dynamic analysis of lung metastasis by mouse osteosarcoma LM8: VEGF is a candidate for anti-metastasis therapy[J]. *Clinical and Experimental Metastasis*,2013,30(4):369-379.
- [6] MATTHEW B,LUIS R M,REBEKA L D G,et al. Caspase-9, caspase-3 and caspase-7 have distinct roles during intrinsic apoptosis[J]. *BMC Cell Biology*,2013(14):32.
- [7] ANTO R J, MUKHOPADHYAY A, DENNING K, et al. Curaim in (diferuloylmethane) induces apoptosis through activation of caspase-8 BID cleavage and cytochrome C release its suppression by ectopic expression of bcl-2 and bcl-xl[J]. *Carcinogenesis*,2002,23(1):143-150.
- [8] EOM Y W,KIM M A,PARK S S,et al. Two distinct modes of cell death induced by doxorubicin: Apoptosis and cell death through mitotic catastrophe accompanied by senescence-like phenotype[J]. *Oncogene*,2005,24(30):4765-4777.

Synthesis and Anti-Tumor Activities in Vitro of Small Molecule Targeted Receptor Tyrosine Kinase Inhibitor TW9183

LEI Chun-hua¹, WANG Xue-yu¹, YANG Yu-cai²,
WU Zhen³, WANG Li-qiang¹

(1. School of Biomedical Sciences, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China;

2. Department of Biochemical and Technology, National Taiwan University, Taipei 106170, China;

3. School of Pharmaceutical Sciences, Xiamen University, Xiamen 361101, China)

Abstract: In this paper, a series of quinoline derivatives were synthesized. A lead compound, TW9183, was screened out preliminarily and investigated the anti-tumor activities in vitro. By nucleophilic substitution, acylchloride and condensation reaction, TW9183 could form from 4,7-dichloro quinoline. MTT plate cloning, scratching assay, Hoechst 33342 staining, western blot and flow cytometry were utilized to test the inhibitory effects of TW9183 against three types of human tumor cells (HeLa, A549, and SMMC-7721) in vitro. The structure of the product was characterized by IR, ¹H NMR, ¹³C NMR, ESI-MS and elemental analysis. The results of assay showed that TW9183 could inhibit the proliferation of three types of tumor cells effectively, but have no effect on HUVEC; Hoechst 33342 staining revealed the obvious apoptosis of tumor cells; TW9183 could promote the expression of caspase-3 activation form; scratching assay suggested that the migration ability of tumor cells decreased dramatically; and flow cytometry detection demonstrated that cell cycle of tumor cells were arrested in the G2/M phase after treated with TW9183.

Keywords: quinoline derivatives; receptor tyrosine kinase inhibitor; synthesis reaction; anti-tumor activity

泉州湾海岸线变迁的分形分析

李朦, 林从谋, 黄逸群

(华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 为判断泉州湾海岸线变迁所处的状态,引入分形分析法,对泉州湾海岸线的分维值进行计算.采用时间序列上的泉州湾海岸线数据,运用海岸线分形网格计算方法,计算了泉州湾总体海岸线及各分岸段海岸线分维数,分析了总体海岸和各分岸段分维数变化过程,并试探地将分维变化值的大小作为判断海岸线冲淤严重程度的依据.结果表明:泉州湾海岸线可用分维作其良好的表征参数;从海岸线分维值的变化趋势可判断出海岸线变迁是否处于动态平衡中的稳定状态,泉州湾分维变化幅值大于 0.035,表示海岸线冲淤程度严重.

关键词: 泉州湾; 海岸线; 分维变化; 临界值

中图分类号: P 737.1

文献标志码: A

1967 年, Mandelbrot^[1] 提出海岸线的分形理论. Philips^[2], Jiang 等^[3], Zhu 等^[4] 分别计算出美国、中国等区域的海岸线分维数. Tanner 等^[5] 利用 GIS 方法计算美国 4 种类型海岸的岸线分维数. 朱晓华等^[6] 研究了江苏省淤泥质海岸线及其他不同性质海岸的分形特征差异. 戴志军等^[7] 利用海岸分维数分析了华南弧形海岸的海岸演化稳定性, 将华南弧形海岸分为负动态平衡, 极端动态平衡, 正动态平衡 3 种平衡状态. 高俊国等^[8] 用分形分析法初步探讨了海湾冲淤演化的预测, 认为 $D=1$ 表明海岸处于平衡状态, 而 D 变大表明海岸线向着与平衡相反的方向发展, 即冲刷的继续冲刷, 淤积的继续淤积. 叶晓敏等^[9] 对胶州湾进行了分形分析, 认为大规模海岸工程造成海岸线分维减小, 小规模海岸工程造成海岸线分维增大. 倪俊勇等^[10] 分析了自然灾害发生时间序列上的分形特征. 本文以分维变化幅值为依据, 完成海岸线冲淤程度的分类.

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源与研究区段

为了不受不同年份的等温度、气候的影响, 不同年份也基本使用相近月份的数据集. 采用时间序列上的泉州湾海岸线遥感解译资料, 即 1994—2011 年经纬度范围内的泉州湾海岸线数据集, 比例尺取为 1:50 000. 鉴于海岸线分形计算对岸线数据获取空间分辨率的依赖, 为便于时间序列上海岸线分维数对比, 选取 TM 遥感提取的海岸线数据. 提取过程如下: 数据读入; 图像预处理; 开窗后纠正图像; 标准假彩色合成; 解译则采用人工目译的方法. 人工目译的精度一般在 80% 以上, 即在缺乏实测数据时, 普遍认同的精度高的屏幕数字化(相当目视判读)结果可作为不同方法精度评判的基础, 因此, 也无需统计面积数据进行检验等后续工作.

图 1 为解译结果. 从图 1 可知: 不同年份解译结果一致. 将泉州湾海岸线分段: 前见村-秀涂村为 AC 段, 府西路与丰海路的交叉点-金琦村为 DE 段, 洋埭新村-祥芝镇为 FI 段. 又将 AC 段细分: 前见村-玉前村为 AB 段; 玉前村-秀涂村为 BC 段. FI 段细分: 洋埭新村-水头村为 FG 段; 水头村-万寿塔为 GH 段; 万寿塔-祥芝镇为 HI 段.

收稿日期: 2014-05-31

通信作者: 林从谋(1957-), 男, 教授, 博士, 主要从事隧道与岩土工程设计与施工技术的研究. E-mail: cmlin@hqu.edu.cn.

基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项项目(201211039)

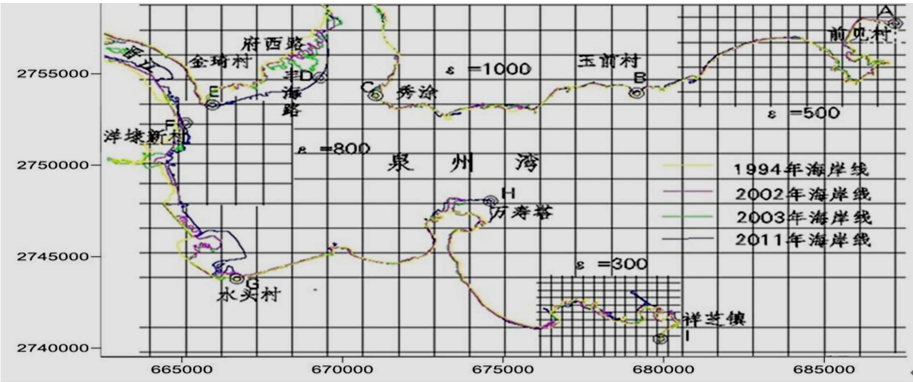


图 1 1994—2011 年泉州湾海岸线变迁

Fig. 1 Change of Quanzhou Bay coastline from 1994 to 2011

1.2 分析方法

在 GIS 软件平台上,采用网格法计算泉州湾海岸线的分维数. 网格法的基本思想是作正方形网格覆盖海岸线(图 1),按照网格边长 $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3, \dots, \epsilon_k$, 分别统计出被覆盖海岸线的 $N(\epsilon_1), N(\epsilon_2), N(\epsilon_3), \dots, N(\epsilon_k)$, 将其回归, 即

$$\lg N(\epsilon_k) = -D \lg \epsilon_k + A.$$

(1)

式(1)中: D 为计算出海岸线分维数; A 为待定常数.

2 分维值计算

根据网格法测得的数据,作 $\lg \epsilon$ 与 $\lg N(\epsilon_k)$ 的散点图. 使用最小二乘线性回归分析法对公式进行拟合,建立 $\lg \epsilon$ 与 $\lg N(\epsilon_k)$ 双对数图,得到各年各段海岸线分形维数及 $\lg \epsilon$ 与 $\lg N(\epsilon_k)$ 的相关系数,如图 2 所示. 1994—2011 年间的线性方程分别为 $y = -1.017x + 4.462, y = -1.043x + 4.527, y = -1.003x + 4.383, y = -1.062x + 4.512$; DE 段 1994—2011 年间的线性方程分别为 $y = -1.059x + 3.872, y = -1.039x + 3.829, y = -1.027x + 3.835, y = -1.020x + 3.601$; FI 段 1994—2011 年间的线性方程分别为 $y = -1.031x + 4.69, y = -1.058x + 4.746, y = -1.025x + 4.655, y = -1.075x + 4.764$.

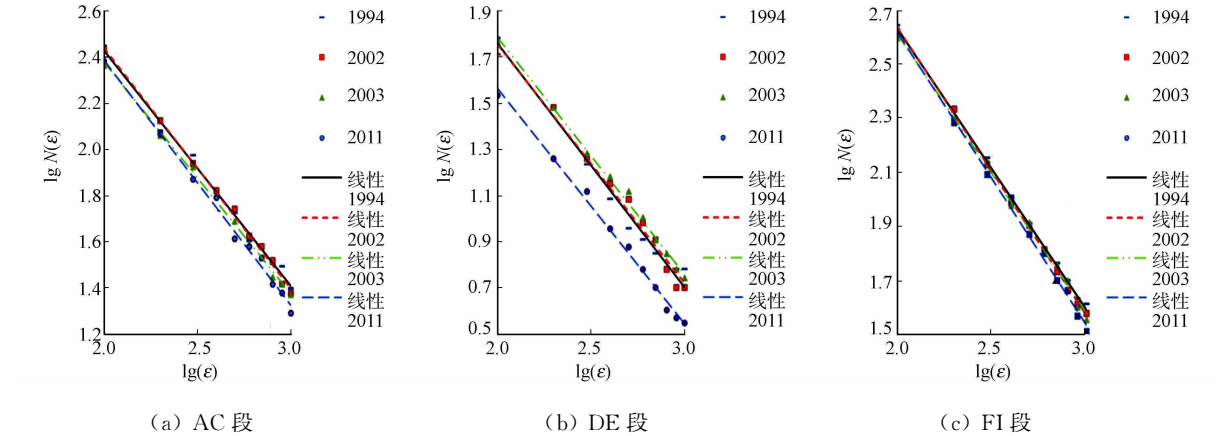


图 2 泉州湾不同年份海岸线分维计算

Fig. 2 Fractal dimension calculation of the coastline in different years

3 不同岸段分维变化规律分析

1994—2011 年,泉州湾各分段海岸线整体分维变化,如表 1 所示. 由表 1 可知:各时间序列及各岸段的海岸线分维数回归方程相关系数计算值 R^2 均在 0.99 以上,因此,分维数可作为表征其特征的良好参数.

泉州湾海岸线的分形维数 D 在不同岸段的分维变化也是不同的,AC,FI 段的分维都先后经历了增

大(1994—2002 年)、减小(2002—2003 年)、再增大(2003—2011 年)的 3 个变化阶段,而 DE 段分维则一直处于减小阶段(1994—2011 年).

表 1 1994—2011 年泉州湾各分段海岸线整体分维变化

岸段	1994 年		2002 年		2003 年		2011 年	
	D	R^2	D	R^2	D	R^2	D	R^2
AC	1.010	0.992	1.017	0.994	1.003	0.997	1.062	0.994
DE	1.059	0.984	1.039	0.985	1.027	0.995	1.020	0.995
FI	1.031	0.998	1.039	0.998	1.025	0.996	1.075	0.997

从变化幅度来看,AC,FI 段在 2003—2011 年间的变化幅度相对较大,而 DE 段的变化幅度则是逐年减弱.据戴志军等^[7],高俊国等^[8]对海岸线稳定状态的分类,易知 AC,FI 段在 1994—2003 年间处于稳定动态平衡状态;而 2003 年后由于海岸工程活动等的影响力、潮汐或海浪侵蚀等自然灾害已超出了海岸线维持稳定平衡状态的能力,故在分维表现为变化幅度较大.DE 段一直向稳定平衡状态靠拢,虽然 DE 段一直处于淤积状态,但每年的淤积程度相对于上一年是越来越小,表现为分维值的变化越来越小.由此,据分维的变化幅度可推知作用力(泉州湾周围海岸工程活动等的影响力、潮汐或海浪侵蚀等自然灾害)是否已超出了承载力(海岸线维持本身稳定平衡状态的能力),这对于政府加强对泉州湾海岸的管理有一定的帮助.

不妨假设两年间的海岸线分维变化幅度大于某一特定的值,即表示该段海岸线的人类活动影响力已超出海岸维持自身稳定平衡状态的能力该特定的值,因所用的分维值计算方法或所计算图形的不同而存在精度上的差异,故取值有待进一步的探讨和研究.文中临界值为 0.035.

同理,各分段海岸线局部分维,如表 2 所示.

表 2 泉州湾各分段海岸线局部分维

岸段	1994 年		2002 年		2003 年		2011 年	
	D	R^2	D	R^2	D	R^2	D	R^2
AB	1.008	0.996	1.067	0.993	1.002	0.996	1.062	0.990
BC	1.042	0.985	1.005	0.999	1.004	0.991	1.062	0.994
FG	1.045	0.994	1.131	0.994	1.079	0.993	1.078	0.998
GH	1.020	0.995	1.023	0.995	1.017	0.998	1.071	0.996
HI	1.031	0.998	1.042	0.993	1.007	0.995	1.078	0.990

根据表 2,可求出相邻年间分维变化值,相邻年间泉州湾各分段海岸线局部分维变化值,如表 3 所示.由表 1,2 可知:泉州湾海岸线各局部分维之间,局部分维与整体分维之间具有相关性,满足分形地貌中的合并原理.即分形集子集 S_1 和 S_2 有效组成分形集 S ,而两分形子集的分维数分别为 D_1 和 D_2 ,且 $D_1>D_2$,则分形集 S 分维介于 D_1 和 D_2 之间.2011 年,泉州湾 FI 海岸段 $D=1.075$,介于 FG,GH 段之间.HI 段的 $D_1=1.078,D_2=1.071,D_3=1.078$.同理,其他年份的 AC 段,FI 段海岸线经计算,也均满足合并定理.

以 AC 段为例分析各分段及各子分段的分维变化关系,AC 段 1994—2002 年间分维变化小的原因在于 AB 段的分维变很大,而 BC 段的分维变很小;2002—2003 年间分维变化的不大的原因在于 AB 段的分维变很大,而 BC 段的分维几乎没变化;2003—2011 年间分维变化大的原因在于 AB,BC 段的分维都变很大.

表 3 相邻年间泉州湾各分段海岸线局部分维变化值

岸段	D		
	1994—2002 年	2002—2003 年	2003—2011 年
AC	0.007	−0.014	0.059
DE	−0.020	−0.012	−0.007
FI	0.008	−0.014	0.050
AB	0.059	−0.065	0.060
BC	−0.037	−0.001	0.058
FG	0.086	−0.052	−0.001
GH	0.003	−0.006	0.054
HI	0.011	−0.035	0.071

4 结 论

1) 分维可作为表征泉州湾海岸线自相似特征的良好参数,且分维遵循分形地貌学中的合并原理,即整体分维介于局部分维最大值与最小值之间。

2) 泉州湾不同岸段的分维变化趋势有所不同. 前见村-秀涂村岸段、洋埭新村-祥芝镇岸段的分形都经历了增大、减小再增大的变化,且变化幅值呈增大趋势,即这两段都整体上处于动态平衡的不稳定状态;而府西路与丰海路的交叉点-金琦村岸段的分形则一直处于减小阶段,且变化幅值呈减小趋势,即该段整体上处于动态平衡的稳定状态。

3) 泉州湾不同岸段的年分维变化幅度较大,表示该年段内海岸工程活动、潮汐或海浪侵蚀等自然灾害较严重. 泉州湾以 0.035 的分维变化幅值为临界值,则 1994—2002 年的前见村-玉前村段,玉前村-秀涂村段,洋埭新村-水头村段,2002—2003 年的前见村-玉前村段,水头村-万寿塔段,万寿塔-祥芝镇段,2003—2011 年的前见村-玉前村段,玉前村-秀涂村段,水头村-万寿塔段,和万寿塔-祥芝镇段均属于海岸工程活动较多、潮汐或海浪侵蚀等自然灾害较严重的岸段,应得到相应的重视。

参考文献:

[1] MANDELBROT B. How long is the coast of Britain? statistical self-similarity and fractional dimension[J]. Science, 1967,156(3775):636-638.

[2] PHILIPS J D. Spatial analysis of shoreline erosion Delaware Bay[J]. Annals of the Association of Amerian Geographers,1986,76(1):50-62.

[3] JIANG Jun-wei,PLOTNICK R E. Fractal analysis of the complexity of united states coastlines[J]. Mathematicalal Geology,1998,30(5):535-546.

[4] ZHU Xiao-hua,CAI Yun-long,YANG Xiu-chun. On fractal dimensions of China's coastline[J]. Mathematical Geology,2004,36(4):447-451.

[5] TANNER B R,PERFECT F,KELLEY J T. Fractal analysis of Maine's glaciated shoreline tests established coastal classification scheme[J]. Journal of Coastal Research,2006,22(5):1300-1304.

[6] 朱晓华,王建,陈霞. 海岸线空间分形性质探讨:以江苏省为例[J]. 地理科学,2001,21(1):70-76.

[7] 戴志军,李春初,王文介,等. 华南弧形海岸的分形和稳定性研究[J]. 海洋学报,2006,28(1):176-180.

[8] 高俊国,边淑华. 分形分析法用于海湾冲淤演化预测的初步探讨[J]. 海洋科学进展,2004,22(3):334-339.

[9] 叶晓敏,纪育强,郑全安,等. 胶州湾海岸线历史变迁的分形分析[J]. 海洋科学进展,2009,27(4):495-501.

[10] 倪俊勇,刘希林. 自然灾害发生时间序列的分形特征及 R/S 分析[J]. 自然灾害学报,2005,7(1):37-41.

Fractal Analysis of Quanzhou Bay Coastline Change

LI Meng, LIN Cong-mou, HUANG Yi-qun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: With the introduction of fractal analysis, the fractal dimension of Quanzhou Bay coastline is calculated, to determine the state of Quanzhou Bay shoreline change. According to time series data, based on the coastline fractal grid method, the coastline fractal dimension of overall Quanzhou Bay shoreline and branch coast Quanzhou Bay shoreline is discussed, the change process of the overall coastal and sub-coastal section fractal dimension is analyzed, the value variation of the fractal dimension is tentatively regarded as a judgment based on the severity of coastline erosion. The results show that: the fractal dimension is a benign characterization parameters of Quanzhou Bay shoreline; whether coastline change is in dynamic equilibrium steady state or unstable state can be judged by the trend of the fractal dimension change of the coastline; the variation of amplitude of the fractal dimension of Quanzhou Bay is greater than the magnitude of change 0.035, indicating the degree of shoreline erosion and siltation is serious.

Keywords: Quanzhou Bay; coastline; fractal dimension change; critical value

激光测距仪在海崖剖面形态快速测量中的应用

常方强¹, 孟希¹, 罗才松²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 福建工程学院 土木工程学院, 福建 福州 350108)

摘要: 提出一种利用激光测距仪快速测量海崖及海蚀槽剖面形态的方法. 选取福建省平潭岛东北部的 7 条海崖作为测量研究区, 定时段进行崖面剖面形态的测量. 结果表明: 研究区中的 4 个海蚀槽均发育在距崖底 1.0 m 高度范围内, 且海蚀槽上部崖面的倾角大于下部崖面的倾角; 一个断面的剖面测量只需 7~16 min, 且能够测量人不易达到的区域.

关键词: 激光测距仪; 海崖; 海蚀槽; 剖面

中图分类号: P 741.6

文献标志码: A

海岸带地形地貌测量是海洋工程师和学者们关注的重要问题. 对海岸剖面进行高度、宽度、坡度和沉积物体积等测量, 能够获得海岸地形地貌形态及其变化情况^[1]. 迄今为止, 海岸带地形地貌测量已发展了多种剖面测量方法, 主要包括地面测量方法和空中测量方法^[2-5]. 地面测量方法结合高精度 GPS 可以提高测量精度, 将误差控制在 1 cm 之内, 但对于难以攀爬的海蚀崖(以下简称海崖)以及一些局部地貌形态则难以测量出剖面形状. 空中测量方法较为先进, 适合大范围的测量, 对于局部地貌形态则无法测量, 或测量精度较低, 花费较大. 上述测量方法对于坡度较小的海滩剖面测量适用性较好, 对于坡度较大(30°以上)的海崖适用性较差, 对于海崖上部海蚀槽和海蚀平台等微地貌形态则无法测量. 在保证测量人员的人身安全以及满足经济需求适用性等前提下, 本文提出一种基于激光测距仪的快速、简易、低成本的海崖剖面形态的测量方法, 特别地, 该方法能够测量出海蚀槽的剖面形态.

1 测量仪器和方法

1.1 测量仪器

选用 GLM80 型手持式激光测距仪(德国博世(BOSCH)公司), 尺寸为 111 mm×51 mm×30 mm, 内置充电式锂电池, 总质量为 140 g. 该仪器内置±60°倾角传感器, 能同时测出距离和倾角, 借助此功能, 可连续测出距离和倾角一组数据, 进而绘制出海崖的剖面形状. 测量距离可达 80 m, 精度为±1.5 mm; 倾斜度测量范围为±60°, 精度为±0.2°.

对于海崖的剖面形状测量, 毫米级的误差完全能够满足要求. 测量数据可以自动存储在仪器里, 为了避免数据丢失, 测量时手动记录在记录表上. 仪器后部安置有固定螺丝, 为减小测量误差, 将固定螺丝拧到三角架上配合使用.

1.2 测量方法

将三脚架置于崖面前方的海滩上, 支脚插入砂土中进行固定. 为了获得较佳的测量质量, 测距仪倾斜角度控制在 30°以内, 测量距离控制在 50 m 以内, 三脚架离崖面的垂直距离 L 为

收稿日期: 2014-10-10

通信作者: 常方强(1980-), 男, 副教授, 博士, 主要从事海岸与海洋工程地质的研究. E-mail: changfq@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41306051)

$$(H-H_0)/\tan 30\leqslant L\leqslant 50.$$

(1)

若三脚架高度取 1.0 m,即

$$1.7H-1.7\leqslant L\leqslant 50.$$

(2)

式(1),(2)中: H 为海崖的垂直高度; H_0 为三脚架高度.

将测距仪安置于三脚架上部,激光发射口对准崖面,调整测距仪的倾角使其为零,此时测距仪处于水平状态.水平转动测距仪测量几组距离数据,距离最小时,表明激光垂直于崖面,此时,拧紧三脚架水平转动的螺丝,防止其发生水平转动.测量时,使激光发射点对准崖面的脚部,按下启动键进行测量,记录距离和倾角.然后,抬高测距仪激光发射口一端,使测距仪倾角变小.普通崖面的剖面形态测量,倾角每次变化 1.0° ,海蚀槽的剖面形态测量,倾角每次变化 0.5° ,记录距离和倾角,直至激光发射点达到崖顶.依此方法,获得一组崖面距离和倾角的数据.

利用 Auto CAD 软件将现场实测的崖面数据绘制成崖面形状.首先,确定一个点.例如,可将 Auto CAD 的坐标原点定为测距仪的测量基点,输入“@距离<角度”命令,绘制出一条直线.依此方法,绘制出所有数据的直线,利用样条曲线连接其末端即可获得崖面的形状.

2 测量结果

为了检验测量方法的可靠性,选取福建省平潭岛东北部流水镇流水码头附近的海崖作为测量研究区,进行崖面剖面形态测试.共测试不同位置的 7 条崖面的剖面形态(从流水码头至西楼村方向,编号分别为 1#~7#),每条剖面的测量位置采用 GPS 定位和木桩基准点定位,具体位置如表 1 所示.表 1 中:1#,3#,4#为普通崖面;2#,5#,6#,7#为发育有海蚀槽的海崖.

为了检测该仪器的可靠性,在室外一直立墙面前方 10 m 处放置该测距仪,不断变化角度,测量直立墙面的剖面形状,测量结果与竖直墙面的理论形状十分接近,误差在 ± 0.2 mm 以内.

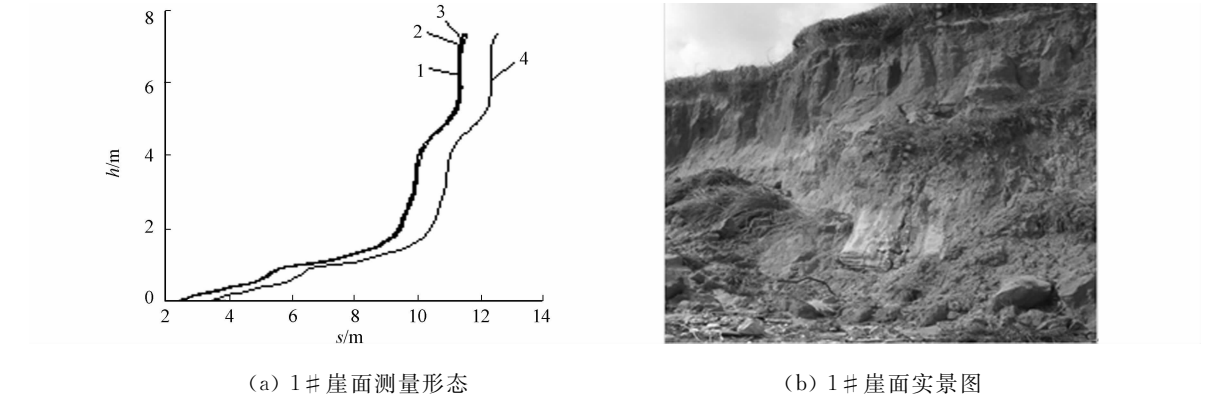
表 1 剖面位置

Tab. 1 Location of profiles

编号	经度	纬度	编号	经度	纬度
1#	119°50'9"	25°34'19"	5#	119°50'11"	25°34'18"
2#	119°50'10"	25°34'19"	6#	119°50'12"	25°34'18"
3#	119°50'10"	25°34'18"	7#	119°50'12"	25°34'17"
4#	119°50'11"	25°34'18"			

2.1 普通崖面形态

崖面的测量结果,如图 1 所示.图 1 中: s 为离基准点水平距离; h 为海崖高度.1#崖面的剖面形状共测试 4 次,以检测该方法重复测量的可靠性.其中,前 3 次位于同一地点,第 4 次测试地点比前 3 次远离崖面 0.5 m,测试结果如图 1(a)所示.由图 1(a)可知:同一位置测量的剖面形状几乎完全重合,最大差距为 0.8 mm,可能是由于现场测量时风力较大导致三脚架和仪器微振动引起的.测量结果记录在笔记本上,每测量 15 组数据检查其正确性,每条崖面的测量时间为 7~16 min.3#,4#普通崖面的测量结果,如图 1(c)和图 1(e)所示.



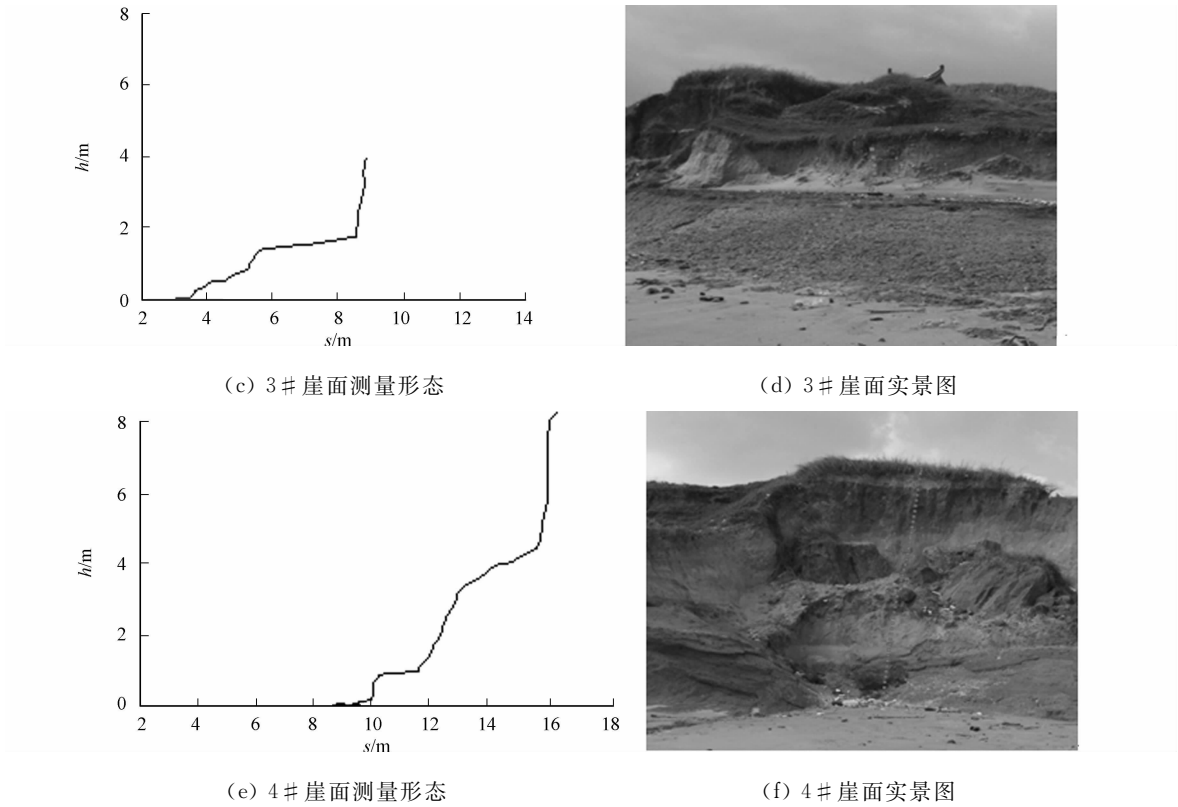
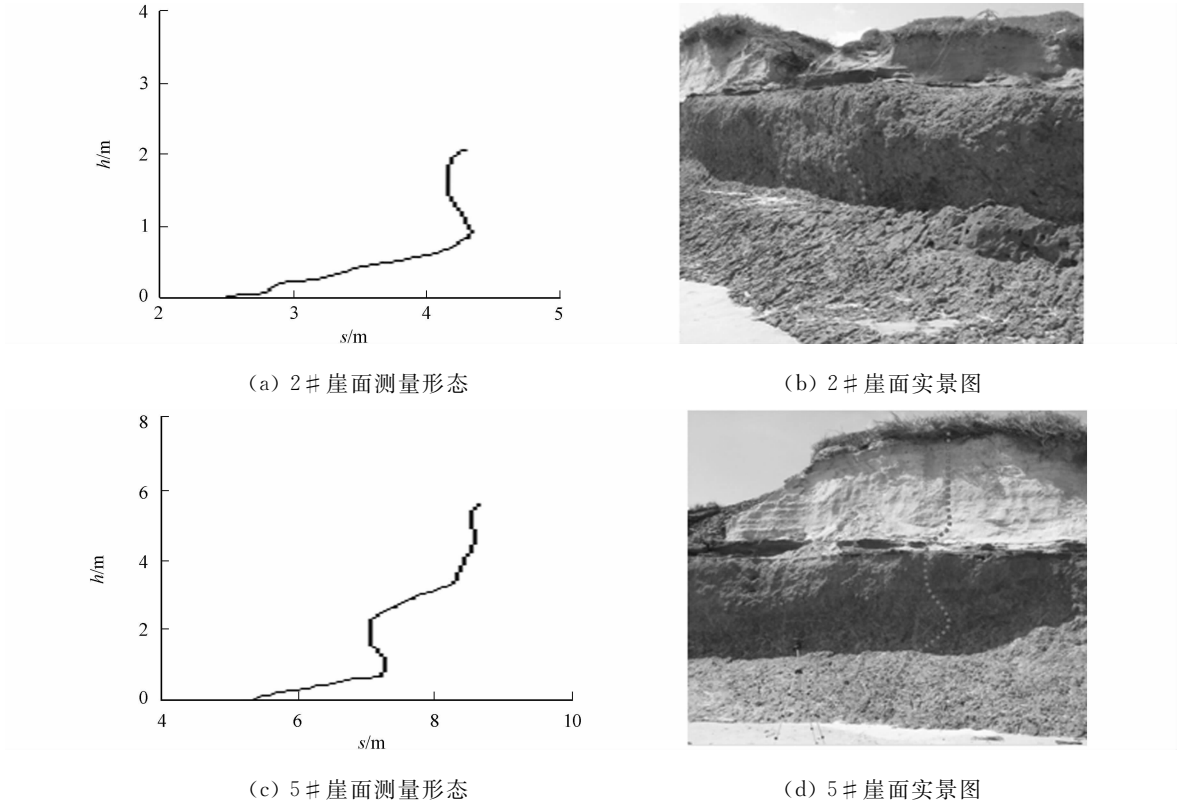


图 1 海蚀崖面的测量结果
Fig. 1 Results of measured sea-cliff profiles

2.2 海蚀槽形态

为了测量到海蚀槽的局部形态,测距仪倾角每次变化 0.5° ,其他位置每次变化 1.0° ,在研究区 330 m 的岸线范围内,共观测到 2# ,5# ,6# ,7# 等 4 处崖面发育有海蚀槽.测量结果如图 2 所示.图 2 中: s 为离基准点水平距离; h 为海崖高度.



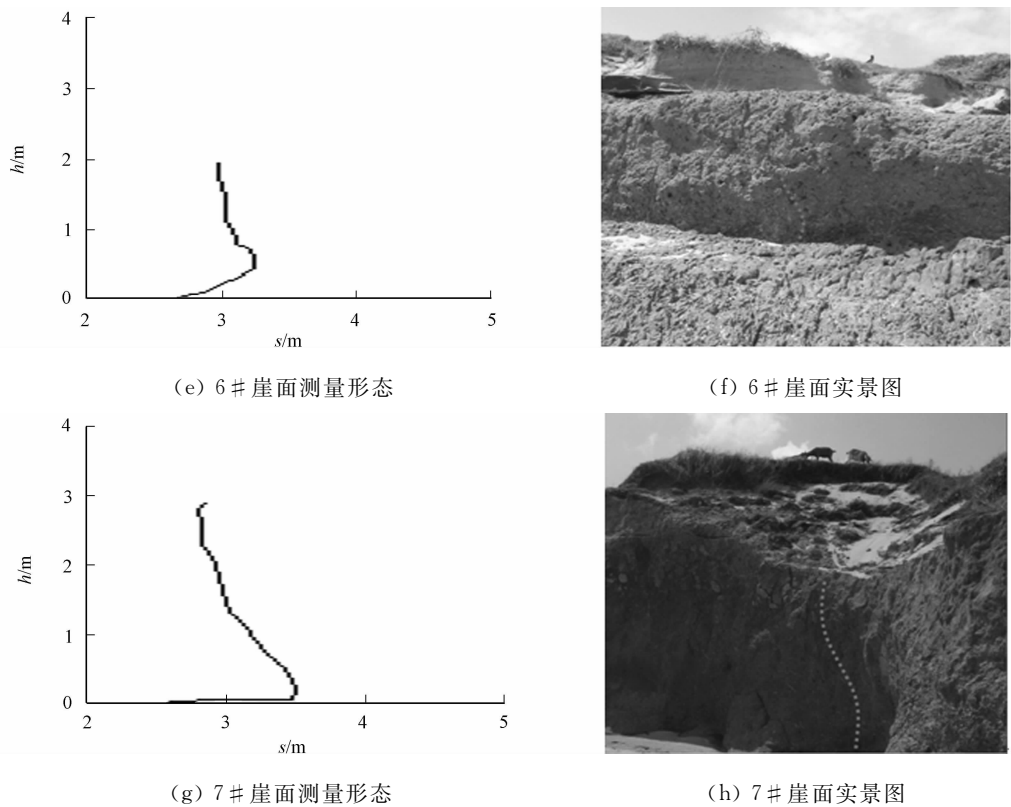


图 2 海蚀槽的剖面形态

Fig. 2 Results of measured marine notches

3 讨论

3.1 测量海崖剖面形态的原因

受海平面上升、波浪、降雨等因素影响,海崖逐年后退^[6]. 对于快速蚀退的海崖,明确其形状和位置具有重要意义. 采用极限平衡法计算海崖土体的大规模滑塌时,海崖高度、坡度等形状数据是必需的参数. 了解崖面形态,特别是局部地貌形态有助于理解蚀退诱发因素、蚀退过程和机制. 每隔一段时间测量海崖的位置,能计算出蚀退速率. 测量海崖的剖面形态,通过对比海崖剖面形态的变化能估算出蚀退土体的体积,如图 3 所示. 每次测量时,测距仪确保在水平面上的同一位置(测量基点),结合高精度 GPS 定位和打设桩体定位. 估算海崖的蚀退速率和蚀退量可为海崖保护和城乡土体规划提供参考建议.

3.2 测量海蚀槽剖面形态的原因

海蚀槽是发育在海崖(软质海崖或岩质海崖)上的沟槽,其走向平行于海岸线. 海蚀槽形成的主要原因是波浪、潮汐的动力作用及化学溶解. 随着波浪等作用的持续,海蚀槽发育越来越大,当发育到一定程度时,上覆土体失去支撑作用而发生大规模滑塌,造成海崖的一次性严重蚀退. 海蚀槽的位置和高度也常用于海平面变化的调查. Pirazzoli^[7]指出除了海蚀槽的高度,海蚀槽的形状也非常重要,并给出了 9 种可能发育有海蚀槽的地层. 迄今为止,细致地测量出海蚀槽的文献报道较少,多数是通过简单测量后手绘出来. Pirazzoli 建议海蚀槽形态的测量包括:1) 海蚀槽顶点位于崖底的以上高度;2) 海蚀槽槽底边缘和槽顶边缘的垂直高度,即槽高(图 4);3) 海蚀槽的深度,简称槽深,即顶点至崖面的距离^[7].

研究区观测到的 4 个剖面中发育的海蚀槽形态,其各部分要素如表 2 所示. 表 2 中: h_1 为距崖底的高度; h_2 为槽高; h_3 为槽深; θ 为海蚀槽倾角. 由表 2 可知:各个海蚀槽均发育在距崖底 1.0 m 的高度范围内;7# 断面处,海蚀槽槽底紧贴海滩面,发育 2 个相邻的海蚀槽,可能是由于该处原先存在一花岗岩球状风化大孤石,经波浪侵蚀搬运后形成的. 离 7# 断面大约十几米的地方,有一处非常明显的球状凹坑存在,其成因同 7# 断面. 海蚀槽倾角位于 $23^{\circ}\sim 29^{\circ}$ 范围内,且海蚀槽上部崖面的倾角大于下部崖面的倾角. 上部土体的蚀退破坏面几乎是垂直的,以块状形式蚀退;下部是波浪逐渐崩解侵蚀土颗粒,以粒状形式蚀退.

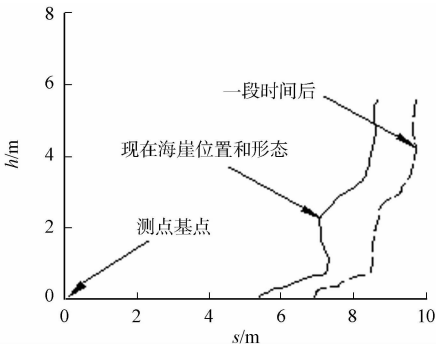


图 3 不同时间海崖剖面形态的测量

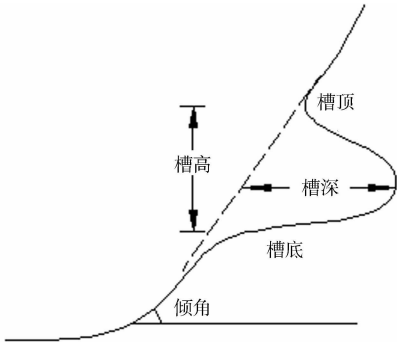


图 4 海蚀槽形态要素

Fig. 3 Measuring of profiles of sea-cliff at different time

Fig. 4 Profile factors of marine notches

表 2 研究区海蚀槽形态要素

Tab. 2 Profile factors of marine notches under investigation

要素	2 井	5 井	6 井	7 井
h_1/m	0.91	0.93	0.55	0.04
h_2/m	0.91	1.00	0.56	1.20
h_3/m	0.45	0.73	0.27	0.49
$\theta/(\text{^\circ})$	23	24	29	—

3.3 影响测试结果的因素

在现场测试过程中,阳光、测试距离与倾角、平台、植被等因素会对测试结果产生影响. 阳光对激光测距有一定干扰,这是因为阳光光谱宽度较大,能够“淹没”测距仪发出的激光束,导致接收器不能正确接收本身发出的信号;再者阳光较强时,可能无法观测到发射出的激光点位置. 为解决这个问题,测试可以选择在没有阳光的天气里进行,如阴天或早上、傍晚没有阳光的时段. 此外,适当缩短测量距离,选择量程较大的测距仪均有助于提高精度. 文中测距仪的有效量程为 80 m,选择在阴天的凌晨时段进行测量,最大测量距离控制在 20 m 以内. 因此,测量结果的精度较高.

在测量过程中,测量距离不应超出仪器的有效量程,倾角也不应超过有效倾角范围. 若测量倾角过大,仪器会自动提醒. 因此,仪器应位于崖面前适当距离,具体可参见式(1),(2). 当崖面存在平台时,平台上的局部地貌形态,如凹坑则无法测量出来,这是文中测量方法的缺陷. 若要测量平台的地貌形态,可将测距仪移至平台. 当崖顶或崖面有草丛时,激光无法反射回来,因此无法测量有草丛的崖面. 本次测量中的崖面上没有植物,测量到崖顶的植物时,数据异常. 此外,由于仪器不耐水,下雨时无法测量;当风势较大时,可能导致测距仪摆动,从而降低测量精度.

3.4 与其他测试方法的比较

传统的测量方法,如 Emery 地方法^[2]、水平尺方法、经纬仪和全站仪,以及 LiDAR 等方法均能够测量一定范围内滩面形态,但这些方法受人力、地质环境、工具自身局限性的影响均无法测量坡度较大的海崖剖面形态,更无法测量海崖的细微变化. Kershaw 等^[8]给出了一种利用卷尺和木杆测量海蚀槽剖面的方法,但只限于人能够接触的位置,由于皮尺自身直度、风力影响、量程等因素亦限制了该测量方法的精度,且在测量的过程中,容易偏移方向,产生较大的误差. 激光测距仪能够很好地规避卷尺、木杆测量的问题,对于经纬仪、全站仪测量中坡度较大和人无法达到的位置亦可以精确测量,且测量工作量大大幅降低. LiDAR 方法虽然可测量大面积海滩地形情况^[9],但文中方法在经济上更实惠,既适用于各种小型工勘测程建,也适用于军事抢滩行动对滩地地形的掌握. 文中方法根据仪器精度与光照和反射条件,测量的崖面高度可达 20~30 m,测量距离可达 80 m.

利用激光测距仪测量海崖剖面形态的方法,其优势在于:1) 测距仪体积小、重量轻、携带和操作方便;2) 不需事先设置,且消耗较少电能;3) 测量快速,且能够测量人不能到达的区域;4) 测量精度高,方便测出长度和角度,进而利用绘图软件容易绘出海崖剖面形态和海蚀槽形态,为计算蚀退速率和土体蚀退量提供基础数据.

4 结 束 语

提出一种利用激光测距仪测量海崖剖面形态的方法,该方法能测出海崖的局部地貌形态,如海蚀槽的几何形态.该方法的测量精度高、速度快,一个断面的测量只需 7~16 min,且能够测量人不易到达的区域.这种测量方法能够为研究海崖的蚀退机制、海崖防护和城乡土地规划等提供参考建议.

参考文献:

[1] SHORT A D. Handbook of beach and shoreface morphodynamics[M]. New York:John Wiley and Sons Ltd,2000: 15.

[2] EMERY K O. A simple method of measuring beach profiles[J]. Limnology and Oceanography,1961,6(1):90-93.

[3] DOLAN R,FERM J C. Temporal precision in beach profiling[J]. The Professional Geographer,1967,19(1):13-15.

[4] DENNY M W,GAINES S D. Encyclopedia of tidepools and rocky shores[M]. Berkeley:University of California Press,2007:705.

[5] ROSSER N J,PETLEY D N,LIM M,et al. Terrestrial laser scanning for monitoring the process of hard rock coastal cliff erosion[J]. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology,2005,38(4):363-375.

[6] 刘建辉,蔡锋,雷刚,等. 福建软质海崖蚀退机理及过程分析:以平潭岛东北海岸为例[J]. 海洋环境科学,2010,29(4):525-530.

[7] EUGEN S. Sea-level research: A manual for the collection and evaluation of data[M]. Amsterdam,Elsevier Science Publishers B V,1986:361-400.

[8] KERSHAW S,GUO L. Marine notches in coastal cliffs: Indicators of relative sea-level change, Perachora Peninsula, Central Greece[J]. Marine Geology,2001,179(16):213-228.

[9] ADAM P,YOUNG R E,FLICK R,et al. Comparison of short-term seacliff retreat measurement methods in Del Mar, California[J]. Geomorphology,2009,112(3/4):318-323.

Application of Laser Distance Meter in Rapid
Measurement of Sea-Cliff Profiles

CHANG Fang-qiang¹, MENG Xi¹, LUO Cai-song²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. College of Civil Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)

Abstract: One method for rapid measuring the form of sea-cliff and marine notches with laser distance meter was presented. Seven sea-cliff profiles at the northeast of Pingtan island in Fujian province were investigated, and the form of profiles were measured at certain time intervals. The results shows, four marine notches developed in the height range of 1.0 m from the bottom of the cliff, and the angles of cliff upper part are greater than those at the lower part. One cross-section measuring just spends 7-16 min and it can measure these areas where manpower is hard to reach.

Keywords: laser distance meter; sea-cliff; marine notches; profiles

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

考虑轴向应变不均匀性的 RC 柱轴压性能研究

许鹏红^{1,2}, 刘亚³, 刘阳^{1,4}, 黄秋来², 黄群贤^{1,4}

- (1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 北京华巨建筑设计有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361008;
3. 中国联合工程公司厦门分公司, 福建 厦门 361021;
4. 福建省结构工程与防灾重点实验室, 福建 厦门 361021)

摘要: 为评价变形不均匀性对钢筋混凝土(RC)柱轴向变形性能的影响,采用 MATLAB 编制计算程序,对 RC 柱在单调轴压工况下的荷载变形关系进行计算分析.通过与已有试验结果和有限元方法的对比,验证程序的合理性,并在此基础上进行参数分析.研究表明:是否考虑轴向变形不均匀,对 RC 柱峰值荷载所对应轴向变形的影响不明显,但是对 RC 柱极限荷载所对应变形的影响显著,最大差异可超过 50%.

关键词: 钢筋混凝土柱; 轴向应变; 不均匀; 轴压性能; 约束混凝土; 体积配箍率

中图分类号: TU 318

文献标志码: A

目前,国内外关于钢筋混凝土(reinforced concrete,RC)柱的轴压性能已经做了一系列的试验研究.1984 年,Mander^[1]对 RC 柱的轴压性能进行了大量的试验,试验参数包括圆形截面、方形截面和矩形截面的 RC 柱,得到了相应的应力-应变关系曲线.在此基础上,Mander 等^[2]又提出了不同截面和配箍形式的 RC 柱相应的约束混凝土本构模型.1993 年,Cusson 等^[3]进行了 50 个足尺高强混凝土的 RC 柱的轴压试验研究,研究了不同混凝土强度、纵筋配筋率以及箍筋间距对其性能的影响.杨勇新等^[4]对 7 个配置 HRBF 500 级钢筋混凝土柱进行了轴压试验,研究不同混凝土强度、配筋率和长细比对试件破坏形态、承载力的影响.刘阳等^[5-6]完成了 2 个 RC 柱和 4 个 CSRC 柱的轴压性能试验,研究不同配筋率和配箍特征值对试件轴压承载力和变形能力的影响.史庆轩等^[7]进行了 31 根高强螺旋箍筋约束高强混凝土方形截面柱的轴心受压试验,研究不同箍筋强度、箍筋间距、箍筋形式及截面尺寸对轴压性能的影响.关于 RC 柱轴压变形的计算,传统方法均假设其轴向压应变是均匀分布的,并取试件最不利截面进行分析得到试件的轴向变形.而实际上,由于箍筋约束的影响,不同截面处的轴向应变分布是不同的,传统方法计算结果与试件的实际轴向变形存在偏差.国内外学者在 RC 柱的加固方面也开展了一些研究^[8-9],额外增加的约束在一定程度上加剧了试件轴向应变的不均匀分布,但已有研究均未考虑其对试件轴向变形的影响.为评估传统方法对 RC 柱轴向变形计算的误差,本文考虑了 RC 柱轴向应变的不均匀性,编制 MATLAB 程序,在试验和有限元验证的基础上,进行了参数分析.

1 编程编制

将钢筋混凝土柱构件沿轴向划分为 N 段,共 $(N+1)$ 个截面,分别为箍筋所在截面、箍筋中部截面及上下底面,截面编号如图 1 所示.由图 1 可知:在相同轴力下,箍筋所在截面 $i-i$ 由于箍筋约束的影

收稿日期: 2014-05-14

通信作者: 刘阳(1982-),男,副教授,博士,主要从事工程结构抗震减灾的研究. E-mail: lyliuyang@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51208219);福建省科技重大项目(2013Y4006);福建省科技重点项目(2012Y0051);福建省泉州市科技计划项目(2012Z93)

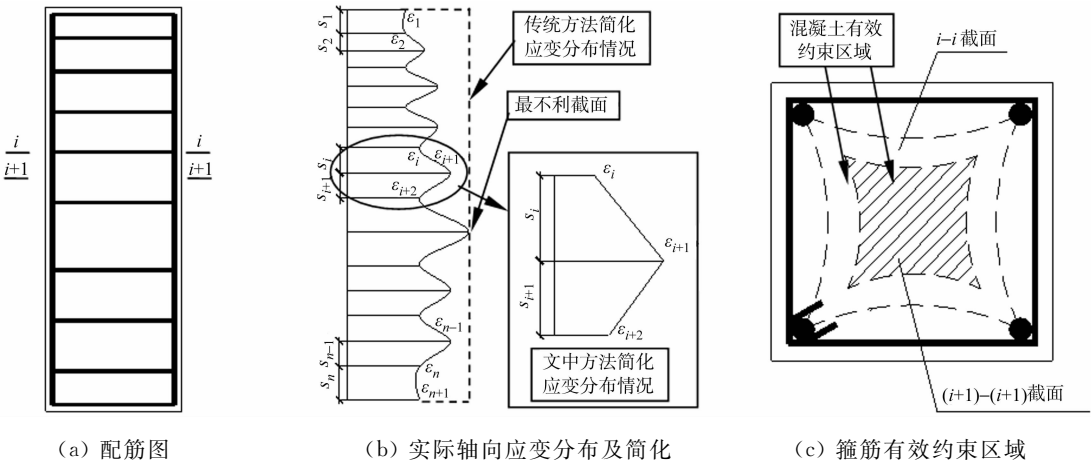


图 1 轴压 RC 柱轴向应变及截面受力示意图

Fig. 1 Axial strain and cross section of RC columns under axial compression

响较强,轴向应变较小,两道箍筋之间的截面 $(i+1)-(i+1)$ 受到的箍筋约束效应较弱,轴向应变较大.各截面的轴向应变连续变化,试件轴向变形即为应变沿轴向的积分.为了编程和计算方便,做以下假设:

- 1) 试件受均匀轴向压力,且各材料间变形协调,无相对滑移;
- 2) 不考虑试件端部约束的影响;
- 3) 相邻截面轴向应变线性变化,如图 1(b)所示;
- 4) 纵筋和箍筋采用理想弹塑性本构;
- 5) 混凝土划分为约束区和无约束区,如图 1(c)所示,无约束混凝土采用 Saenz 模型^[10],约束混凝土采用 Mander 模型^[2].

编程计算流程图,如图 2 所示.

无约束区混凝土承担的轴力 N_{co} ,约束区混凝土承担的轴力 N_{cc} 和纵筋承担的轴力 N_s 的计算式分别为

$$N_{co} = \sigma_{co} \cdot A_c, \tag{1}$$

$$N_{cc} = \sigma_{cc} \cdot A_c, \tag{2}$$

$$N_s = \sigma_s \cdot A_s. \tag{3}$$

式(1)~(3)中: σ_{co} 为无约束混凝土的应力; σ_{cc} 为约束混凝土相对于不考虑箍筋约束时的应力提高幅度; $\sigma_s = E_s \epsilon (\leq f_y)$ 为纵筋的应力; E_s 为纵筋弹性模量; ϵ 为轴向应变; f_y 为纵筋屈服强度; A_c 为混凝土的净截面积; A_e 为箍筋约束混凝土的有效约束面积; A_s 为纵筋的截面积. σ_{co}, σ_{cc} 计算式分别表示为

$$\sigma_{co} = \frac{E_0 \epsilon}{1 + (\frac{E_0}{E_s} - 2)(\frac{\epsilon}{\epsilon_0}) + (\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2}, \tag{4}$$

$$\sigma_{cc} = \sigma_{co}(-2.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94 f'_1}{f_{co}}} - 2 \frac{f'_1}{f_{co}}). \tag{5}$$

式(4)~(5)中: E_0 为初始弹性模量; $E_s = \sigma_0 / \epsilon_0$ 为应力达峰值时的割线弹性模量; σ_0, ϵ_0 分别为应力达峰值时的应力和应变; f_{co} 为未约束混凝土的抗压强度; f'_1 为箍筋约束下的侧向有效约束应力.

2 算例验证

分别选取文献[11]中的试件 GC,BC 和文献[12]中的试件 RC1,RC2 进行计算对比. 分别采用文中

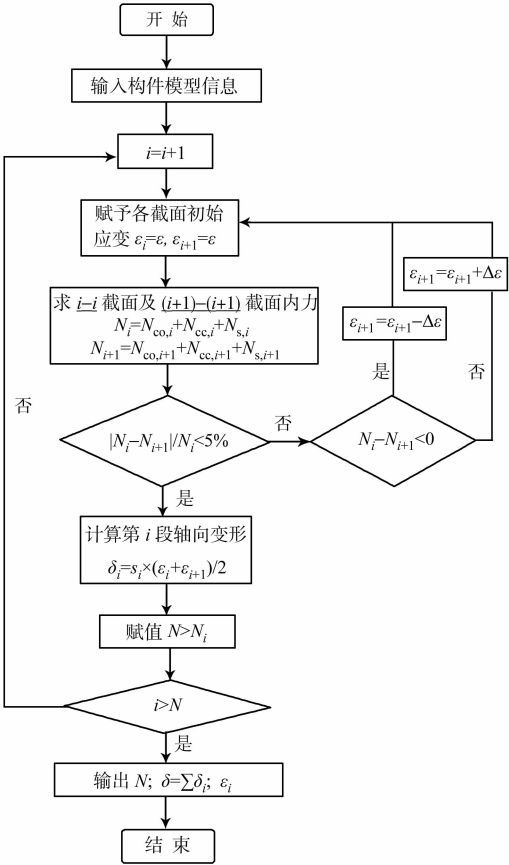


图 2 计算流程图
Fig. 2 Calculation flow chart

提出的方法、传统方法和 ABAQUS 计算试件的荷载(P)-位移(Δ)曲线,与试验结果的对比如图 3 所示。

由图 3(a),(b)可知:试件 GC,BC 的轴向变形通过量测加载端板间的相对变形得到,由于试验中存在不可避免的虚变形成分,如试件加载面的平整度、设备连接之间的虚变形、设备本身的弹性变形等,试验曲线的位移明显大于其他 3 种方法的计算结果。由图 3(c),(d)可见:试件 RC1,RC2 的轴向变形通过试件端部设置预埋件量测得到,避免了设备误差的影响,所得到的试件轴向变形与计算结果吻合良好。

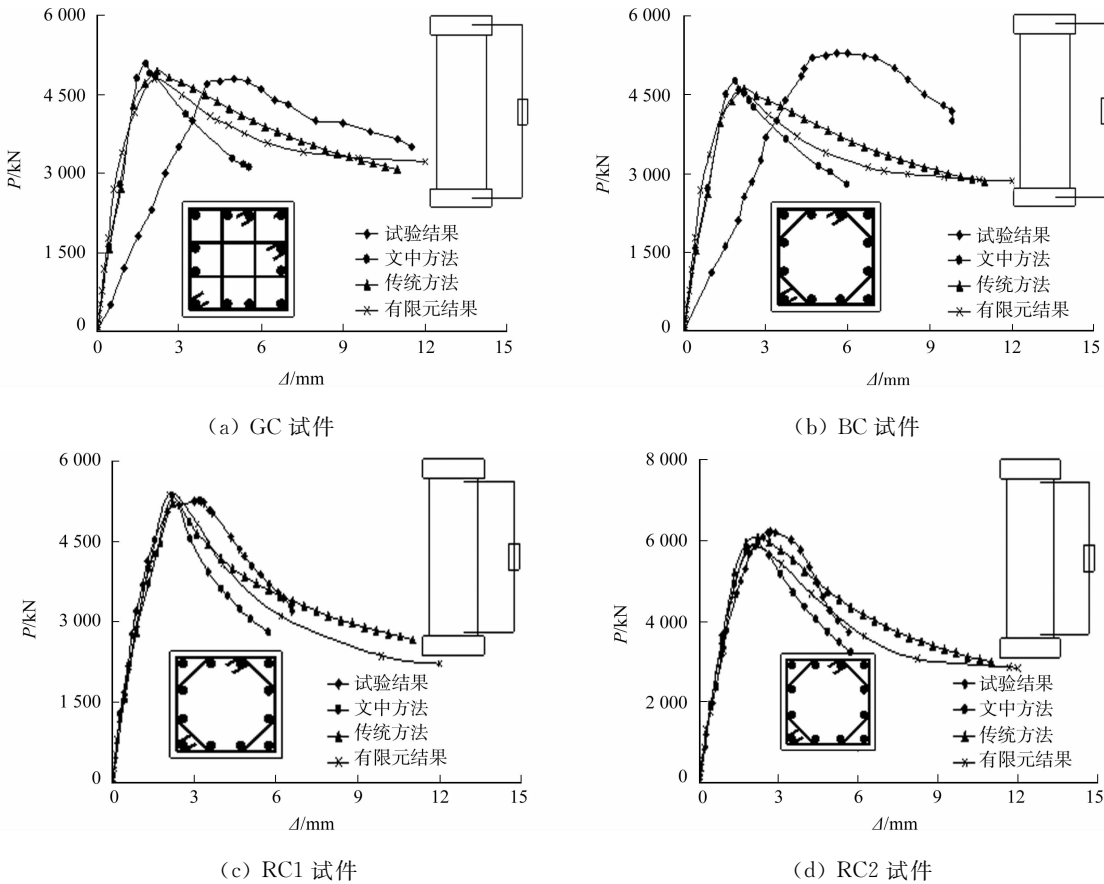


图 3 计算结果与试验结果的对比

Fig. 3 Comparison between experimental results and different calculation ones

考虑轴向应变不均匀计算所得试件的荷载位移曲线与传统方法计算结果相比,在峰值荷载之前,两者差别不大。超过峰值荷载之后,前者计算所得试件轴向变形小于后者,且两者的差异随加载历程的发展不断增大。前者计算变形与试验结果更加吻合,说明文中采用的计算方法合理可靠。ABAQUS 计算结果介于两种方法之间。

3 参数分析

对轴压 RC 柱轴向应变不均匀性影响最显著的因素是箍筋的构造形式,包括箍筋间距、箍筋直径、截面配箍形式和箍筋强度等级等。以一截面尺寸为 $400\text{ mm}\times 400\text{ mm}$,高度为 $1\,200\text{ mm}$ 的 RC 柱为研究对象进行参数分析,混凝土采用 C30,纵筋采用 HRB 335 级钢筋。荷载-位移曲线极限点(下降段上 80%峰值荷载对应点)处,文中方法与传统方法计算所得试件轴向变形的相对误差用符号 δ 表示。

3.1 箍筋间距的影响

箍筋间距(s)对 δ 的影响,如图 4 所示。采用八角复合箍,箍筋直径为 10 mm ,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋间距分别采用 $50, 90, 130\text{ mm}$ 进行计算,纵筋为 $12\Phi 16$ 。由图 4 可知:箍筋间距越小,试件轴向应变不均匀性越明显,不考虑轴向应变不均匀性导致的计算误差越大, δ 最大可达 55.85% 。

3.2 箍筋直径的影响

箍筋直径(d)对 δ 的影响,如图 5 所示。采用八角复合箍,箍筋间距为 100 mm ,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋直径分别采用 $8, 10, 12\text{ mm}$ 进行计算,纵筋为 $12\Phi 16$ 。由图 5 可知:箍筋直径越大,试件轴

向应变不均匀性越明显, δ 最大为 51.6%.

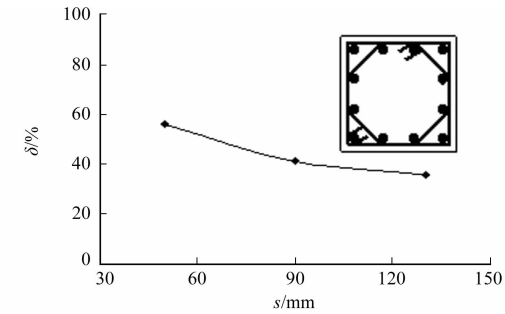


图 4 箍筋间距对轴向变形的影响
Fig. 4 Influence of stirrup spacing on axial deformation

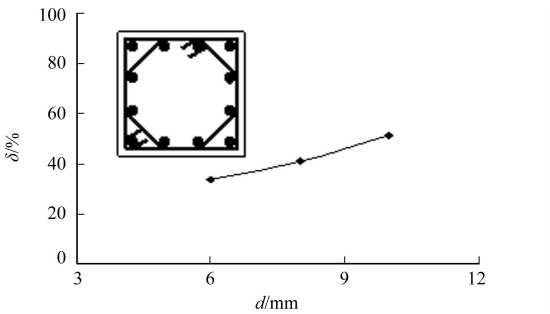


图 5 箍筋直径对轴向变形的影响
Fig. 5 Influence of stirrup diameter on axial deformation

3.3 截面配箍形式的影响

截面配箍形式对 δ 的影响,如图 6 所示. 箍筋截面形式为双肢箍、菱形复合箍和八角复合箍,箍筋采用 HPB 300 级钢筋,箍筋直径为 10 mm,间距为 100 mm. 由图 6 可知:八角复合箍对试件轴向变形不均匀性的影响最大, δ 值为 46.15%;双肢箍的影响最小, δ 值仅为 10.88%.

3.4 箍筋强度的影响

箍筋强度(f_{yv})对 δ 的影响,如图 7 所示. 采用八角复合箍,箍筋直径为 10 mm,箍筋间距为 100 mm,箍筋分别采用 HPB 300, HRB 400, HRB 500 级钢筋,对应屈服强度分别为 300, 400, 500 MPa, 纵筋为 12 Φ 16. 由图 7 可知:随着箍筋强度的增大,试件轴向变形不均匀性越明显, δ 最大为 52.67%.

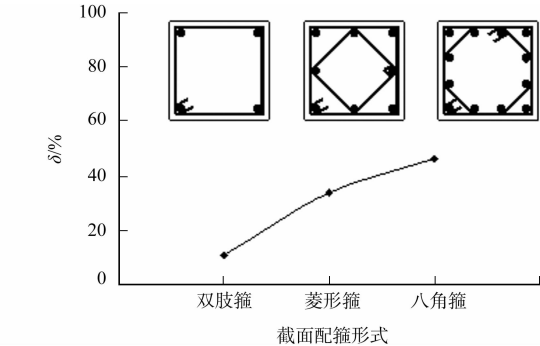


图 6 截面配箍形式对轴向变形的影响
Fig. 6 Influence of section stirrup form on axial deformation

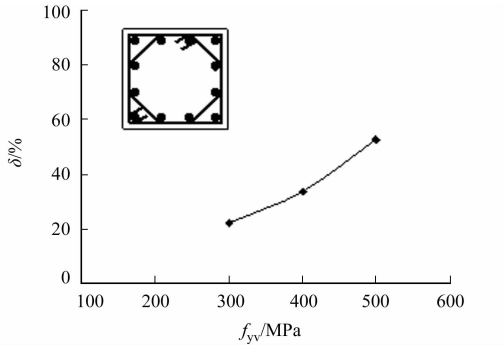


图 7 箍筋强度对轴向变形的影响
Fig. 7 Influence of stirrup strength on axial deformation

4 结 论

- 1) 文中方法可以合理准确地计算 RC 柱的轴压荷载-变形曲线,相对于传统方法,文中方法的计算结果与试验结果和有限元分析结果整体更加吻合.
- 2) 轴压 RC 柱考虑轴向应变不均匀计算所得变形在峰值荷载之前,与不考虑轴向应变不均匀计算结果差别不明显,超过峰值荷载后,前者计算结果小于后者,两者差别随试件弹塑性的发展不断增加.
- 3) 箍筋间距越小、箍筋直径越大、箍筋强度越大,其对试件轴向应变不均匀性的影响越明显.
- 4) 八角复合箍对试件轴向应变不均匀性的影响要强于菱形复合箍和双肢箍,双肢箍的影响最小.

参考文献:

[1] MANDER J B. Seismic design of bridge piers[D]. New Zealand: University of Canterbury, 1983: 96-257.
[2] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R. Theoretical stress-strain model for confined concrete[J]. Journal of Structure Engineering, 1988, 114(8): 1804-1826.
[3] CUSSON D, PAULTRE P. Stress-strain model for confined high-strength concrete[J]. Journal of Structure Engi-

neering,1995,121(3):468-477.

[4] 杨勇新,赵进阶,岳清瑞,等. HRCBF500 钢筋混凝土柱轴压试验研究[J]. 工业建筑,2009,39(11):26-28.

[5] 刘阳,郭子雄,谢吓弟. 核心型钢混凝土柱轴压性能试验研究[J]. 哈尔滨工业大学学报,2007,39(增刊 2):137-141.

[6] 谢吓弟,郭子雄,刘阳. CSRC 柱轴压性能试验及非线性全过程分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2008,29(4):584-587.

[7] 史庆轩,杨坤,刘维亚,等. 高强箍筋约束高强混凝土轴心受压力学性能试验研究[J]. 工程力学,2012,29(1):141-149.

[8] 郭子雄,曾建宇,黄群贤,等. 预应力钢板箍加固 RC 柱轴压性能试验研究[J]. 建筑结构学报,2012,33(11):124-131.

[9] BERTHET J F,FERRIER E,HAMELIN P. Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: Experimental study[J]. Construction and Building Materials,2005(19):223-232.

[10] SAENZ L P. Discussion of equation for the stress strain curve of concrete[J]. ACI Journal,1964,61(12):1229-1235.

[11] 袁彬. 高强约束足尺 RC 柱轴压性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2011:23-46.

[12] 许鹏红. 核心型钢混凝土柱轴压性能试验研究[D]. 厦门:华侨大学,2013:9-53.

Study on the Axial Compression Performance of RC Columns Considering the Nonuniformity of Axial Strain

XU Peng-hong^{1,2}, LIU Ya³, LIU Yang^{1,4},
HUANG Qiu-lai², HUANG Qun-xian^{1,4}

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Beijing VAGE Architechture Designing Company Limited (Xiamen Branch), Xiamen 361008, China;

3. China United Engineering Company, Xiamen 361021, China;

4. Key Laboratory for Structural Engineering and Disaster Prevention of Fujian Province, Xiamen 361021, China)

Abstract: The load-deformation relationship of reinforced concrete (RC) columns under monotonic axial load was analyzed by calculation program writing of MATLAB to evaluate effect of axial deformation nonuniformity on the axial deformation performance of RC columns. The program was validated by comparison between existed experimental results and calculation results by FEM method. The parametric study was then carried out. It is indicated that the influence of axial deformation nonuniformity on the axial deformation corresponding to the peak load is not obvious, while the influence on the ultimate axial deformation is remarkable, the maximum difference can be more than 50%.

Keywords: reinforced concrete column; axial strain; nonuniformity; axial compressive performance; confined concrete; stirrup ratio

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)

文章编号:1000-5013(2015)02-0226-06

doi:10.11830/ISSN.1000-5013.2015.02.0226

战略导向下大型建设企业多项目组合决策模型

张云波,李悦,祁神军

(华侨大学 土木工程学院,福建 厦门 361021)

摘要: 在分析大型建设企业的企业战略目标的选择与分析、项目组合的实施过程的基础上,以实现企业整体战略目标和提高核心竞争力为目标,建立战略导向下大型建设企业项目组合决策评价指标体系.综合采用模糊综合评价法与数据包络分析法(DEA),构建战略导向下大型建设企业项目组合决策模型.以某企业近期所承建的 5 个工程项目为实证,验证了该模型的有效性和科学性.研究结果表明:战略导向下大型建设企业项目组合评价指标体系反映了企业战略与多项目实施的一致性,且该决策模型能够较为科学地对多项目进行组合决策,能有效排除主观因素带来的项目组合决策偏差,为大型建设企业决策者对项目组合的决策提供一个有效的措施和路径.

关键词: 建筑企业;项目组合;战略决策;数据包络分析;模糊综合评价法;评价决策模型

中图分类号: TU 723; F 282

文献标志码: A

随着我国现代化建设的不断发展与推进,大型建设企业承接的项目趋于跨地域、多项目化、大型化和复杂化.为了顺应市场经济发展和社会环境的变化,从单项目管理到多项目管理的转变已经成为大型建设企业提高企业核心竞争力、提升项目管理水平和实现战略目标的必然趋势.但从项目管理角度上看,大多数建设企业对于多个项目的管理,只是停留在单个项目的战术水平,忽视了战略目标的引导,不利于企业在整体水平上合理分配资源.如何在企业资源有限和信息不全的条件下,选择符合企业发展战略目标的工程项目进行组合管理,是我国建筑业能否持续高速发展的一个关键问题.国内外学者们在项目组合评价决策等方面做了一系列的研究.程鸿群等^[1]通过构建识别框架、确定可信度函数以及信息合成,阐述了项目组合管理的评价方法与步骤.Zapata 等^[2]运用决策树方法论证基于实物期权理论的项目组合价值评价方法的有效性.程鸿群等^[3]针对项目实施过程中的多种约束,应用 0-1 规划与支界定法建立项目组合选择模型.Amir 等^[4]建立 F-DEA 模型对研发项目的不确定性和相互影响进行评价.这些研究为项目组合的选择评价方法提供了新思路,但忽略了企业的战略目标对项目组合决策及评价的影响.宋红艳等^[5]基于战略导向目标,建立三维空间模型对项目组合进行配置研究.李随科等^[6]在企业战略导向及资源约束下建立项目组合模型,并进行优化处理.杨鑫等^[7]构建基于战略目标的项目组合选择评价指标体系,并以综合模糊评价法为基础对各组合方案的优劣程度进行对比分析.这些方法充分论证了企业战略目标对项目组合的导向性作用,但并未考虑到项目间的相关性与管理实施过程对项目组合评价决策的影响.鉴于此,本文以项目组合的理论为基础,充分考虑大型建设企业的战略目标和多项目之间的相关性,建立战略导向下项目组合评价决策指标体系,并将模糊综合评价法与数据包络分析法(DEA)相结合,建立大型建设企业战略导向下的项目组合决策模型.

1 战略导向下项目组合评价指标体系

1.1 战略目标选择与分解

战略目标的定位是大型建设企业确定战略发展方向的最重要环节,为企业提供正确判断符合企业

收稿日期: 2015-03-20

通信作者: 张云波(1962-),男,教授,博士,主要从事建筑企业管控的研究. E-mail: zhangyb@hqu.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(71303082);福建省自然科学基金青年创新项目(2012J05095);中央高校基本科研业务基金资助项目(11QZR06)

的生存状态与长远发展的战略方案,关系着企业未来的发展前景和企业所有参与者的利益. 选择符合大型建设企业实际的战略目标,对实现企业长远发展,提高企业核心竞争力有着重要作用. 在企业总体战略的层次上定位符合企业发展的战略方案,考察备选项目组合对战略的符合程度^[8],对大型建设企业战略目标进行分解,如图 1 所示.

1.2 项目组合实施过程分析

项目组合作为企业项目和战略之间的桥梁,在项目组合的过程中,必须确保在项目组合目标与企业战略目标一致的基础上,通过企业管理者合理组合项目,对项目组合实施过程进行有效控制,使得项目组合对企业与社会的贡献率最大,保证企业战略顺利实施^[9]. 文中基于项目组合管理流程研究,结合项目间相关性分析与项目管理理论,将项目组合与管理过程划分为以下几个步骤,如图 2 所示.

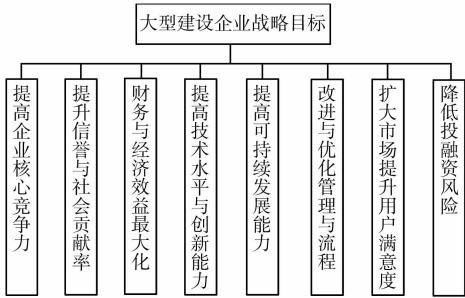


图 1 大型建设企业战略目标分解

Fig. 1 Strategic target decomposition of large construction enterprises

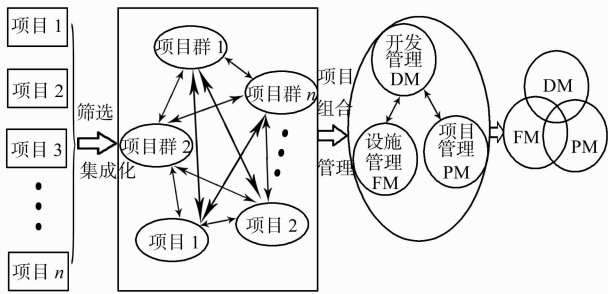


图 2 大型建设企业项目组合与管理过程图

Fig. 2 Project portfolio and management process of large construction enterprises

- 1) 基于企业战略对各个项目进行筛选与集成,将具有可行性的项目排出优先顺序,进入下一阶段项目组合实施方案的评估.
- 2) 从项目组合角度出发,分析项目间的资源相关性,技术相关性,收益相关性与地域相关性等产生的协同效应,根据模型求解出最优函数值,对各个项目组合方案进行综合评价.
- 3) 在项目组合管理的基础上,具体开展项目管理、开发管理与设施管理,通过项目组合统一的资源规划与技术协作,保证各个项目顺利完成.

1.3 项目组合评价决策指标体系

在大型建设企业进行项目组合的评价决策过程中,应充分考虑企业各个系统的各部分之间协作关系,确定项目间的资源相关性、收益相关性、技术相关性、地域相关性、企业组织体制与项目管理团队等产生的协同效应,建立一个多目标、多层次、多指标的大型建设企业项目组合评价决策指标体系.

在总结杨小平等^[10]建立的项目选择评价指标体系的基础上,将该指标体系进一步优化,以战略为导向,结合项目实施过程分析,基于评价决策指标构建原则,确定 3 个一级指标分别是项目组合战略符合度、项目组合经济效益与项目组合抗风险能力. 其中,项目组合战略符合度的二级指标战略目标一致性 B_1 、核心竞争力符合度 B_2 、企业贡献率 B_3 、信誉与知名度为定性指标 B_4 ;项目组合经济效益的二级指标为内部收益率 B_5 、净现值率 B_6 、投资回收期 B_7 、投资收益率 B_8 为定量指标;项目组合抗风险能力的二级指标财务风险可行性 B_9 、技术风险可行性 B_{10} 、市场风险可行性 B_{11} 、经营风险可行性 B_{12} 为定性指标^[11],项目组合评价决策指标体系,如图 3 所示.

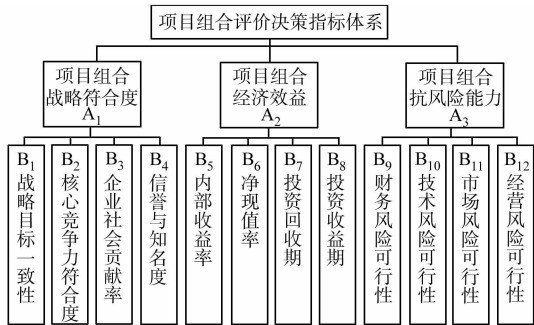


图 3 项目组合评价决策指标体系

Fig. 3 Index system of portfolio evaluation decision-making

2 项目组合评价决策模型的构建

在进行项目相似性、项目间的资源相关性、收益相关性、技术相关性分析优化的项目组合评价指标体系的初步筛选后,根据大型建设企业项目组合评价指标体系,建立评价决策指标集 B ,将指标集划分

为模糊评价决策指标集合 B_x 和精确评价决策指标集合 $B_l, B=\{B_x, B_l\}$. 其中, 战略目标一致性 B_1 、核心竞争力符合度 B_2 、企业贡献率 B_3 、信誉与知名度 B_4 、财务风险可行性 B_9 、技术风险可行性 B_{10} 、市场风险可行性 B_{11} 、经营风险可行性 B_{12} 为模糊评价决策指标, 内部收益率 B_5 、净现值率 B_6 、投资回收期 B_7 、投资收益率 B_8 为精确评价决策指标.

根据项目组合评价决策指标体系, 项目组合各评价决策指标权向量为 L . 其中, 确定精确评价决策指标权向量 L_l 和模糊评价决策指标的权向量 L_x . 在大型建设企业的备选项目中, 选取 n 个项目组合评价决策对象, 用 DMU_j 表示. 其中, $j=1, 2, \cdots, n$, 决策单元有 m 种输入和 s 种输出. 将模糊综合评价法与 DEA 方法相结合, 对 n 个项目组合评价对象的评价决策指标进行评价, 定义评语等级度数为 5 级, 对项目组合评价的评语等级向量为 $P=(P_1, P_2, P_3, P_4, P_5)=(\text{好}, \text{较好}, \text{一般}, \text{较差}, \text{差})$. 并对每个项目组合 DMU 建立模糊关系矩阵, 即

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_{1,1} & w_{1,2} & \cdots & w_{1,5} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ w_{n,1} & w_{n,2} & \cdots & w_{n,5} \end{bmatrix}. \tag{1}$$

项目组合决策单元 DMU_j 的输入是 $X_j=(x_{1,j}, x_{2,j}, \cdots, x_{i,j})$, 输出是 $Y_j=(y_{1,j}, y_{2,j}, \cdots, y_{o,j})$, $V=(v_1, v_2, \cdots, v_m)$ 为输入的评价指标权重向量, $U=(u_1, u_2, \cdots, u_m)$ 为输出的评价指标权重向量. 满足各个项目组合决策单元的条件

$$E_j = \frac{\sum_{o=0}^s \mu_o y_{o,j}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i,j}} \leqslant 1, \quad 1 \leqslant j \leqslant n. \tag{2}$$

通过运用 DEA/AR 模型, 选取适当的评价指标的权向量, 确定权系数 v_i , 对第 t 个决策单元 DMU 进行相对效率评价, 即

$$\left. \begin{aligned} \max E_t &= \frac{\sum_{o=0}^s \mu_o y_{o,t}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i,t}}, \quad t = 1, 2, \cdots, n, \\ \text{s. t.} \quad E_j &= \frac{\sum_{o=0}^s \mu_o y_{o,j}}{\sum_{i=1}^m v_i x_{i,j}}, \quad j = 1, 2, \cdots, n. \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

式(3)中: $1 \leqslant t \leqslant n; \mu_o \geqslant \epsilon; 1 \leqslant o \leqslant s; 1 \leqslant i \leqslant m$. 将上述模型转化为等价线性规划, 即

$$\left. \begin{aligned} \max E_t &= \sum_{o=0}^s \mu_o y_{o,t}, \quad 1 \leqslant o \leqslant s, \\ \text{s. t.} \quad \sum_{o=0}^s \mu_o y_{o,j} - \sum_{i=1}^m v_i x_{i,j} &\leqslant 1, \quad j = 1, 2, \cdots, n, \\ \sum_{i=1}^m v_i x_{i,t} &= 1, \quad \alpha_i, \beta_o \geqslant \epsilon, \quad 1 \leqslant i \leqslant m, \quad 1 \leqslant o \leqslant s. \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

由此得出大型建设企业各项目组合的决策单元 DMU 的最优解相对效率评价价值 E_t , 确定 DMU 有效. 当模型的最优解满足 $E_t=1$ 时, 该 DMU 称为 DEA 有效; 当模型 $E_t<1$ 时, 该 DMU 是非效率决策单元. 项目组合精确评价决策指标 B_l , 权向量为 L_l , 确定精确评价决策指标的隶属度向量 Q_l . 将精确评价决策指标的隶属度向量与模糊评价决策指标隶属度向量合并, 得到综合隶属度向量 $Q=\{Q_l, Q_x\}$.

定义项目组合在战略符合度方面的最优函数值为 $D_{A_1}=l_1 \times q_1$, 经济效益方面的最优函数值 $D_{A_2}=l_2 \times q_2$, 抗风险能力方面的最优函数值 $D_{A_3}=l_3 \times q_3$, 项目组合评价决策指标的总分为项目组合精确评价指标与模糊评价指标的评价结果之和, 即 $D=L \times Q=[L_l, L_x] \times [Q_l, Q_x]$.

3 实证分析

在大型建设企业已中标的备选项目中选取 5 个项目进行组合评价决策分析,通过项目间的关联性、相似性与资源约束条件对项目组合方案进行初步筛选. 其中,有 5 个项目组合方案满足要求. 通过构建基于模糊综合评价法的数据包络分析模型,对各个项目组合方案在战略符合度、经济效益与抗风险能力方面进行综合评价,得出项目组合方案的优劣顺序并验证该模型的可行性.

3.1 项目组合评价指标权重和评价等级集的确定

特邀 10 名专家,向专家提供对项目组合评价的指标与 5 个备选项目的背景资料. 项目 A 为城市花园二期建设项目,集科技产业、教育中心与购物中心于一体的市中心房地产开发项目,总投资 15 449.87 万元,内部收益率 70.88%,净现值 5 116.46 万元,动态投资回收期 2.59 a,总投资收益率为 67.79%. 项目 B 是某商业综合体项目,与会展区域和新城 CBD 联系紧密,地处核心商圈,项目投资规模大,属于新的业务范围,具有较好的发展潜力,总投资 380 149 万元,净现值 41 980 万元,内部收益率 12.3%,动态回收期 8.73 a,投资收益率 11.74%. 项目 C 是某园起步区住宅设施建设项目,为营造有利于科技城建园区提供良好的科技与机制创新环境,项目总投资 9 950.44 万元,投资收益率 19%,投资回收期为 1.92 a,净现值 1 039.66 万元,内部收益率 41.17%. 项目 D 为四季花园建设项目,为打造居住理想之所,技术要求高,施工难度大,工艺要求高,随之可能增加建筑成本,总投资 28 983.13 万元,投资收益率 45.5%,净现值 6 666.524 万元,内部收益率 50.7%,投资回收期 2.1 a. 项目 E 是某大型酒店建设项目,该地区集珠宝首饰、休闲娱乐和旅游购物为一体,客流量大,属于未来的 CBD,项目总投资 79 765 万元,净现值 12 368 万元,投资回收期 12.23 a,内部收益率 15.32%,投资收益率 12.45%.

运用专家评分法,由专家设定项目组合评价指标的权重. 对初步筛选出的 5 个项目组合决策单元在战略目标一致性(B_1)、核心竞争力符合度(B_2)、企业贡献率(B_3)、信誉与知名度(B_4)、财务风险可行性(B_5)、技术风险可行性(B_{10})、市场风险可行性(B_{11})、经营风险可行性(B_{12})的模糊评价决策指标上的表现给出的模糊评价进行分析汇总. 将统计结果反馈给专家,专家根据反馈结果修正自己的意见,经过多轮匿名征询和意见反馈,得出各专家对项目组合评价指标赋予的权重. 对所有专家给出的权重进行加权平均,可得项目组合评价指标权重,如表 1 所示.

表 1 项目组合评价指标权重
Tab.1 Weight of portfolio evaluation index

评价指标	A_1	B_1	B_2	B_3	B_4
权重	0.28	0.24	0.36	0.13	0.27
评价指标	A_2	B_5	B_6	B_7	B_8
权重	0.46	0.27	0.38	0.23	0.12
评价指标	A_3	B_9	B_{10}	B_{11}	B_{12}
权重	0.26	0.38	0.13	0.24	0.25

3.2 项目组合评价最优目标函数值矩阵与评价结果

由于大型建设企业决策者最希望选择项目组合战略符合度高与项目组合抗风险能力强的一组项目组合. 因此,选取好(P_1)和较好(P_2)作为项目组合评价决策模型的系统输出,选取一般(P_3)、较差(P_4)、差(P_5)为项目组合评价决策模型的系统输入. 以求解战略目标一致性的最优函数值为例,通过项目组合战略目标一致性的隶属度矩阵的转置矩阵作为 DEA 的输入和输出数据,对项目组合进行效率评价,通过 LINGO 软件求解线性规划模型,可得各个项目组合在战略目标一致性方面的最优目标函数值为

$$\begin{aligned} \max DMU(B,E) &= 0.950, & \max DMU(B,D) &= 0.500, \\ \max DMU(A,C,D) &= 0.667, & \max DMU(A,B,E) &= 1.000, \\ DMU(A,C,D,E) &= 0.900. \end{aligned}$$

综合上述方法,可得项目组合各评价指标隶属度,如表 2 所示.

通过评价指标的权重与隶属度相结合,根据项目组合评价决策模型得出的评价结果,项目组合方案 $DMU(A,B,E)$ 得分最高,方案 $DMU(A,C,D,E)$ 次之. 可得项目组合各方案的评价结果,如表 3 所示.

表 2 项目组合各评价指标隶属度

Tab. 2 Membership degree of portfolio evaluation

项目组合 决策单元	A ₁			
	B ₁	B ₂	B ₃	B ₄
DMU(B,E)	0.950	1.000	0.909	0.825
DMU(B,D)	0.500	0.500	1.000	0.800
DMU(A,C,D)	0.667	0.353	0.400	0.750
DMU(A,B,E)	1.000	0.930	0.890	1.000
DMU(A,C,D,E)	0.900	0.182	0.889	0.960

项目组合 决策单元	A ₂			
	B ₅	B ₆	B ₇	B ₈
DMU(B,E)	0.590	0.380	0.500	0.130
DMU(B,D)	0.650	0.450	0.400	0.240
DMU(A,C,D)	0.560	0.480	0.500	0.350
DMU(A,B,E)	0.540	0.510	0.600	0.220
DMU(A,C,D,E)	0.630	0.550	0.600	0.180

项目组合 决策单元	A ₃			
	B ₉	B ₁₀	B ₁₁	B ₁₂
DMU(B,E)	0.750	0.875	0.375	0.667
DMU(B,D)	0.930	0.950	1.000	0.444
DMU(A,C,D)	0.250	0.300	0.900	0.333
DMU(A,B,E)	0.965	1.000	0.769	1.000
DMU(A,C,D,E)	1.000	0.880	0.800	0.585

表 3 项目组合评价结果

Tab. 3 Results of portfolio evaluation

评价对象	D _{A₁}	D _{A₂}	D _{A₃}	D
DMU(B,E)	0.928 9	0.434 3	0.655 6	0.630 3
DMU(B,D)	0.646 0	0.467 3	0.827 9	0.611 1
DMU(A,C,D)	0.541 7	0.490 6	0.433 3	0.490 0
DMU(A,B,E)	0.960 5	0.504 0	0.931 3	0.742 9
DMU(A,C,D,E)	0.656 3	0.538 7	0.832 7	0.648 1

3.3 项目组合决策分析

项目组合方案 DMU(A,B,E)在战略符合度上的最优函数值为 0.960 5,在经济效益上的最优函数值为 0.504 0,抗风险能力的最优函数值为 0.931 3. 虽然在经济效益上略低于方案 DMU(A,C,D,E),但是从综合评价上来看,方案 DMU(A,B,E)是最为有效的组合. 方案 DMU(B,E)在战略符合度上的符合程度高,仅次于方案 DMU(A,B,E),虽然综合得分 $D=0.630\ 3$,但在经济效益方面的表现较差,不建议将项目 B 和项目 E 进行组合. 方案 DMU(B,D)的抗风险能力较高,综合得分 $D=0.611\ 1$,但在经济效益方面与战略符合度方面表现一般,不建议选择项目 B 和项目 D 进行组合. 方案 DMU(A,C,D)的经济效益在 5 个项目组合中处于中等位置,但在战略的符合程度低,抗风险能力低且综合三个指标的得分 $D=0.490\ 0$,建议不选择项目 A、项目 C 和项目 D 进行组合. 方案 DMU(A,C,D,E)在战略符合度上的最优函数值为 0.656 3,经济效益上的最优函数值为 0.538 7,抗风险能力的最优函数值为 0.832 7,在经济效益上的最优函数值是 5 个方案中的最高值,抗风险能力强,战略符合度较好,综合评价上来看,方案 DMU(A,B,E)可作为备选的项目组合,项目 C,D 与剩余备选项目重复上述程序进行组合评价.

4 结论

构建了项目组合评价决策指标体系,提出基于模糊综合评价法和数据包络分析法相结合的战略导向下的大型建设企业多项目组合评价指标体系和决策模型,并以实证为研究论证评价指标体系和决策模型的合理性和有效性. 研究可得出以下两点结论.

- 1) 基于战略导向视角,考虑企业项目组合战略的一致性、经济效应和抗风险能力等因素,建立大型建设企业项目组合评价模型与项目组合评价指标体系,具有一定科学性。
- 2) 在大型建设企业进行项目组合初步筛选过程中,考虑项目间的相关性与相似性,可有效提高企业在多项目中的决策效率,在对多项目资源的合理配置与组织架构的优化将是进一步研究的问题。

参考文献:

[1] 程鸿群,余红伟,叶子菀.项目组合管理能力评价[J]. 同济大学学报:自然科学版,2012,40(1):148-153.

[2] ZAPATA J C,REKLAITIS G V. Valuation of project portfolios: An endogenously discounted method[J]. European Journal of Operational Research,2010,206(3):653-666.

[3] 程鸿群,邱辉凌,邹敏,等.项目组合评价及选择[J]. 武汉大学学报:工学版,2014,47(1):90-95.

[4] GHAPANCHI A H,TAVANA M,KHAKBAZ M H,et al. A methodology for selecting portfolios of projects with interactions and under uncertainty[J]. International of Project Management,2012,30(7):791-803.

[5] 宋红艳,郭云涛,白思俊.基于战略导向的项目组合配置研究[J]. 科技管理研究,2013,4(16):186-189.

[6] 李随科,白思俊.企业战略导向及资源约束下的项目组合模型[J]. 项目管理技术,2013,11(9):17-21.

[7] 杨鑫.基于战略目标的项目组合选择研究[J]. 科技管理研究,2014(7):214-216.

[8] 吴卫红,李小伟,张爱美.基于战略层次的项目导向型企业项目组合选择[J]. 技术经济,2013,32(4):89-93.

[9] 曹涛,白思俊,郭云涛.基于战略导向的企业项目组合管理流程研究[J]. 科技管理研究,2014(10):206-208.

[10] 杨小平,何江波.项目群管理中项目选择评价指标体系研究[J]. 项目管理技术,2011,9(9):65-68.

[11] 项剑平,王玉芳,张云波,等.代建制多项目管理风险评价指标体系的构建[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2014,35(5):581-586.

Research on Decision Model in Large-Scale Construction Enterprises of Multi-Project Portfolio Based on Strategic Orientation

ZHANG Yun-bo, LI Yue, QI Shen-jun

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the selection and analysis of corporate strategic objectives and implementation of the project portfolio of large-scale construction enterprises, the portfolio evaluation system is established, in order to achieve their overall strategic objectives and enhance the core competitiveness as the goal. Using a combination of fuzzy comprehensive evaluation and data envelopment analysis (DEA), build a decision model in large-scale construction enterprises of multi-project portfolio is built based on strategic orientation. The effectiveness the model is validated by five projects in large-scale construction enterprises. The results show that the portfolio evaluation system in large-scale construction enterprises of multi-project portfolio based on strategic orientation reflects more scientific consistency of corporate strategy and multi-project implementation, and the decision model on multi-project portfolio decisions is more scientific, can effectively decrease the project portfolio decision deviation caused by the subjective factors, can provide an effective way to measure and project portfolio decisions for large construction business decision-makers.

Keywords: construction enterprise; project portfolio; strategic decisions; data envelopment analysis; fuzzy comprehensive evaluation method; evaluation decision model

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 方德平)

信息非对称的城市大型公共建筑 项目决策影响力分析

黄远辉^{1,2}, 王诗才³

(1. 武汉大学 经济与管理学院, 湖北 武汉 430072;
2. 广西机电职业技术学院 工商管理系, 广西 南宁 530007;
3. 华中科技大学 管理学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在非对称信息视角下,对影响大型公共建筑项目投资决策的现状进行实地调查. 数据结果表明:仅有 7.46% 的公众,11.43% 的专家和 12.50% 的承建者对城市大型公共建筑的决策是很满意的. 然后,采用 SPSS 16.0 的统计分析法,将项目决策主体的影响力进行对比分析. 结果表明:政府、承建者、专家和公众四个决策主体在项目生命周期的项目生命阶段、可行性研究阶段、招投标阶段,其影响力的平均值分别为 4.37,3.70,3.40,2.27,且各主体影响力的博弈格局逐渐形成. 最后,有针对性地提出实现项目的“投资-建设”分离建议、专家充权、公众充权、约束投资决策主体的行为和保护公共利益等大型公共建筑投资决策建议.

关键词: 公共建筑; 非对称信息; 决策主体; 项目生命周期; 影响力

中图分类号: TU 723; F 282 **文献标志码:** A

大型公共建筑一般指建筑面积在 2 万 m² 以上,用于商业、办公、科教文卫、旅游、通信和交通运输等具有公共利益和公众利益的特点建筑^[1]. 大型公共建筑项目涉及投资者、承建者、使用者等多方利益,使得大型公共建筑投资决策具有较大的敏感度,项目的成功与否,不仅取决于关键核心技术,而且还取决于投资决策主体的相互影响、相互制约和激励^[2]. 在市场的作用下,项目的每个参与者拥有的信息并不相同,即为非对称信息. 我国大型公共建筑项目的规划和建设中,由于信息的非对称,存在很多诸如对决策主体的责任语焉不详,对决策行为的监督力度不够,专家和咨询机构参与决策不够深入,以及没有引入市场竞争机制等问题^[3]. 在现行的政府决策效率不高的舆论压力下,为了提高大型公共建筑决策的科学化和民主化,使社会资源分配效能最大化,促使社会和谐和可持续发展,具有较现实的研究意义^[4]. 本文在非对称信息视角下,把大型公共公共建筑投资项目决策主体多元化与决策过程进行关联分析,实证调查分析各主体在项目生命各阶段的不同影响力.

1 决策主体主动参与的形成机理

决策主体主动参与的内在表现为“意愿”,它是由内、外部环境因素共同作用的结果^[5],其形成机理如图 1 所示. 内部因素包括“认识”的形成和“态度”的倾向,外部因素是各种“外部环境”共同作用、共同引导和共强化的结果. 当前,我国大型公共工程的建设程序比较完善,但是在敏感环节上的决策透明度不够,缺乏决

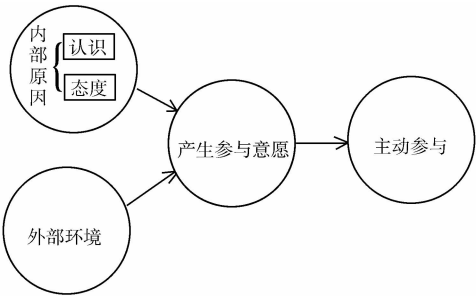


图 1 决策主体参与的形成机理
Fig. 1 Formation mechanism of decision-making participation

策主体参与。决策主体在评估的时候,往往感觉到压力而孤立无援而放弃原有的立场和原则,使得专家们权威科学的决策依据流于形式^[6]。

2 决策主体参与项目的态度调查分析

随着我国经济建设的发展,大型公共建筑在城市中扮演着越来越重要的角色。政府在加大城市公共建筑项目建设的同时,也遗留了诸如形象工程、豆腐渣工程等后遗症,使得公众对大型城市公共建筑项目的决策效果并不满意^[7]。

为了详细了解大型公共建筑项目投资决策的现状,分别从公众、专家和承建者中,分别随机抽取 80 人作为样本,共发放问卷 240 份,回收问卷 226 份,从公众参与项目决策的态度来作具体分析,结果如表 1 所示。其中:收回公众、专家和承建者问卷分别为 72 份、76 份、72 份,有效问卷分别为 67 份、70 份、64 份,问卷回收率分别为 90.00%,95.00%,90.00%,有效问卷回收率分别为 83.75%,87.50%,80.00%,

从表 1 可知:仅有 7.46%的公众对城市大型公共建筑的决策是很满意的,而不满意(有点不满意和非常不满意)的比率达到 57.50%,也就是说,超过一半的公众对项目决策态度是不满意的;对城市大型公共建筑的决策是很满意的专家和承建者分别仅有 11.43%和 12.50%,而对城市大型公共建筑的决策不满意(有点不满意和非常不满意)的专家和承建者也分别占到 48.57%和 45.31%,也就是说,超过将近一半的专家和承建者对项目决策的态度也是不满意的。由此可见,目前城市大型公共建筑项目的投资决策还存在很多漏洞,急需改变当前投资决策的现状、创新投资决策理念及方法,让投资决策主体真正地参与投资决策。

3 决策主体投资决策影响力的调查

3.1 调查过程

为探析非对称信息条件下各投资决策主体对城市大型公共建筑项目的投资决策影响力,深入调查政府、承建者、专家和公众四个主体。其中:政府部门包括规划部、环保部门、政府采购中心、公共项目管理中心等;承建者包括勘察设计院、管理咨询有限公司、建筑承建公司、监理单位等;专家包括行业协会、高校学者等;公众包括社会公民、项目使用者等。在设计调查问卷时,调查问卷的内容包括调查者基本信息,调查者对四个决策主体影响力的判断,以及调查者对项目决策的意见和建议等 3 个方面。

调查问卷的发放形式主要是对政府、承建者和专家和公众进行面对面的访谈、面对面填写调查问卷或者网络发信函等方式进行,调查问卷共发放 360 份,问卷回收 333 份,回收率为 92.50%,有效问卷为 306 份,有效率为 85.00%。其中:政府、承建者、专家和公众四个主体的调查问卷发放数量分别为 60、90、100、111 份,占比分别为 17%,25%,28%,30%。

3.2 分析方法

根据研究需要,将大型公共建筑投资项目的生命阶段分为项目可行性研究阶段、项目招投标阶段和项目投资开发运营三个阶段,考察对象为政府、承建者、专家和公众这四个主体。被调查者分别对上述四个主体在不同项目生命阶段进行评价,决策影响力以五级量表来衡量,各数值含义如表 2 所示。

表 1 决策主体参与项目决策的态度汇总分析

Tab. 1 Attitude Meta-analysis of decision-making entity in project				
对象	态度	人数	占比/%	总人数
公众	很满意	5	7.46	67
	有点满意	9	13.43	
	一般	14	18.80	
	有点不满意	19	28.36	
	非常不满意	20	29.85	
专家	很满意	8	11.43	70
	有点满意	14	20.00	
	一般	14	20.00	
	有点不满意	15	21.43	
	非常不满意	19	27.14	
承建者	很满意	8	12.50	64
	有点满意	14	21.86	
	一般	13	20.31	
	有点不满意	16	25.00	
	非常不满意	13	20.31	

表 2 决策影响力五级量表

Tab. 2 5 grades of decision-making influence		
等级	数值	含义
一级	1	影响力非常弱,完全没有参与项目,毫不知情
二级	2	影响力较弱,仅仅象征性地参与项目,如被告知或接受咨询等
三级	3	影响力一般,有限地参与项目部分实质性的工作
四级	4	影响力较强,平等地参与实质性工作
五级	5	影响力非常强,主导型参与并具有决定权

使用 SPSS 16.0 版本的软件调查问卷数据进行汇总并统计分析. 在本调研中, 为了使数据更加合理可信, 还向有关专家学者就个案进行深入调研和咨询.

3.3 各决策主体在项目生命各阶段的影响力特征

经过整理和统计, 计算各决策主体在项目生命不同阶段的影响力均值和方差, 结果如表 3 所示.

表 3 各决策主体在项目生命各阶段的影响力的均值与方差

Tab. 3 Mean value and variance of influence of decision-making entities at every stage of the project life

项目生命阶段	指标	政府	承建者	专家	公众
可行性研究阶段	均值	4.680	3.180	3.280	2.200
	标准差	0.630	0.862	0.853	1.167
招投标阶段	均值	4.450	3.620	3.490	2.330
	标准差	0.850	0.957	0.886	1.089
投资开发运营阶段	均值	3.880	4.310	3.430	2.280
	标准差	0.865	0.694	0.950	1.198
均值的平均值		4.370	3.700	3.400	2.270

比较上表中项目在不同生命阶段, 各决策主体的影响力大小, 可以得出以下 4 点主要结论.

1) 从 3 个阶段均值的平均值比较可知: 政府的决策影响力是最大的, 表现为影响力较强, 平等地参与实质性工作; 其次是承建者、专家, 表现为影响力一般, 有限地参与项目部分实质性的工作; 最后是公众, 影响力较弱, 仅仅象征性地参与项目, 如被告知或接受咨询等.

2) 从横向数据比较可知: 各决策主体在项目生命各阶段的决策影响力不尽相同. 在项目可行性研究阶段, 决策影响力的大小依次为政府、专家、承建者、公众; 在项目的招投标阶段, 决策影响力的大小依次为政府、承建者、专家、公众; 在项目的投资开发运营阶段, 决策影响力的大小依次为承建者、政府、专家、公众. 然而, 不管在项目生命的哪个阶段, 公众的影响力始终是最小的, 3 个阶段的平均值仅为 2.27 分, 影响力较弱, 仅仅象征性地参与项目, 如被告知或接受咨询等.

3) 从纵向数据比较可知: 政府的影响力在项目可行性研究阶段和项目招投标阶段的决策影响力一直占据主导地位, 但是在项目投资开发运营阶段, 政府的决策影响力分值为 3.88 分, 表现为影响力一般, 有限地参与项目部分实质性的工作. 这体现了政府在决策中的指导地位作用, 但是在具体项目开发实施阶段中, 在具体的操作事宜中, 将权利授予相关承建单位. 承建者在项目投资开发运营阶段的决策影响力分值最大, 达到 4.31 分, 表现为影响力较强, 平等地参与实质性工作. 这体现了在项目的具体施工过程中, 承建单位所肩负的重大责任和对项目建设资源的绝对支配地位. 专家在项目可行性研究阶段的影响力仅次于政府, 超过了承建者. 这体现了专家的在科学决策中的权威性和重要性^[8].

4) 各决策主体在项目生命的不同时期, 决策影响力不尽相同. 这体现出了在非对称信息条件下, 大型公共建筑投资决策各主体的分工趋向明显, 决策与实施分离, 投资与建设分离, 使得政府的只能更加明显, 过程更加透明. 在调查中, 绝大部分被调查者一致认为, 公众在大型公共建筑投资决策的影响力得到了不断提升. 这是由于公众是大型公共建筑的使用者, 对项目有着最具体、最直观的接触, 这也是民主社会和信息社会发展的必然趋势.

3.4 各决策主体在项目生命各阶段中影响力的关系

为分析各决策主体在项目生命各阶段中影响力之间的关系, 列出项目各生命阶段中不同决策主体间的影响力矩阵, 如表 4 所示. 表 4 中: * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关. 分析表 4 可以得出以下 4 点主要结论.

1) 政府与承建者的相互影响力在可行性研究阶段和招投标阶段呈现正相关性, 在投资开发运营阶段呈现负相关性. 当前, 大型公共建筑投资建设项目的建设, 虽然设立投资建设公司, 但是仍然避免不了政府的干预. 这种干预既有宏观的规划调控, 也有政府官员为了种种利益而进行的人为干预^[9]. 随着项目的施工和运营, 投资建设公司开始实行专业化的施工和管理, 政府的干预逐渐减弱, 直至呈现负相关性.

2) 政府与专家之间的相关性并不是很明显, 说明政府对专家的影响力不大; 反过来说, 专家在专业领域具有权威性.

3) 政府与公众的影响力在项目生命的三个阶段都呈现负相关性, 说明公众参与度越高, 影响力就

越大,那么政府的决策权越低,影响力就越小.

4) 专家与公众的影响力仅在投资开发运营阶段表现为负相关性,说明专家和公众在某种程度上有不同的利益诉求,而在可行性研究和招投标阶段,专家和公众的利益趋于一致.

表 4 各决策主体在项目生命各阶段中影响力关系

Tab. 4 Relationship of influences of decision-making entities at every stage of the project life

项目生命阶段	决策主体	统计分析	政府	承建者	专家	公众
可行性研究阶段	政府	Pearson 相关性	1.000	0.246*	−0.044	−0.149*
		显著性(双侧)	—	0	0.428	0.006
	承建者	Pearson 相关性	0.246*	1.000	0.149*	0.083
		显著性(双侧)	—	0	0.004	0.137
	专家	Pearson 相关性	−0.044	0.149*	1.000	0.099
		显著性(双侧)	0.428	0.004	—	0.096
	公众	Pearson 相关性	−0.149*	0.083	0.099	1.000
		显著性(双侧)	0.006	0.137	0.096	—
招投标阶段	政府	Pearson 相关性	1.000	0.164*	0.063	−0.466*
		显著性(双侧)	—	0.003	0.273	0
	承建者	Pearson 相关性	0.164*	1.000	−0.432*	0.059
		显著性(双侧)	0.003	—	0	0.275
	专家	Pearson 相关性	0.063	−0.432*	1.000	−0.101
		显著性(双侧)	0.273	0	—	0.058
	公众	Pearson 相关性	−0.466*	0.058	−0.101	1.000
		显著性(双侧)	0	0.275	0.059	—
投资开发运营阶段	政府	Pearson 相关性	1.000	−0.202*	0.203*	−0.288*
		显著性(双侧)	—	0	0	0
	承建者	Pearson 相关性	−0.202*	1.000	−0.207*	0.046
		显著性(双侧)	0	0	0.380	—
	专家	Pearson 相关性	0.203*	−0.207*	1.000	−0.237*
		显著性(双侧)	0	0	—	0
	公众	Pearson 相关性	−0.288*	0.046	−0.237*	1.000
		显著性(双侧)	0	0.380	0	—

4 结论和建议

大型公共建筑投资决策的主体代表不同集团利益,其决策过程就是一个利益分配过程,项目生命不同阶段,各决策主体为保障本集团利益而表现出不同的态度和行为. 相关数据显示,代表公民社会的专家、公众和代表市场经济的项承建者在一定程度上出现了协同互动态势,这有利于项目决策民主化和科学化的平衡^[10].

从表面上来看,政府与承建者是代表不同的决策力,但是由于政府的特有的行政权力,使得承建者往往执行着政府的旨意,投资与承建的职能实际上并没有真正独立分离.

在非对称信息的大背景下,政府职能依然处于宏观调控的主导地位. 但是,随着民主化和科学分工的发展,政府职能角色发生转变,大型公共建筑决策权逐渐从政府、承建者手中逐渐向专家和公众转移,权威专家和公众意见得以采纳. 现阶段我国的公众参与不再是以往单方面的渴望,而是政府需求和公众自愿相结合的双向参与^[11].

通过实证调查分析各主体在项目生命各阶段的影响力,提出大型公共建筑投资决策的 4 点建议.

1) 实现项目的“投资-建设”分离. 这需进一步转变政府职能,减少政府在微观事务操作上的干预,发挥承建者在建筑设计和施工等技术环节上的专业特长,促使资源有效整合、优化配置,真正实现投资与建设、决策与实施的分离.

2) 专家充权. 进一步完善专家在决策主体的地位和作用,避免专家论证流于形式. 首先要为专家咨询提供背景,是专家具有话语权;其次要强化专家咨询意见的反馈机制,公布专家处理意见;第三是明

确专家角色定位,避免越权、越位处理事务的发生.

3) 公众充权. 在非对称信息条件下,为使投资决策趋于科学化,需要引入公众参与的投资决策机制,建立有效的信息传递和反馈渠道,充分采纳公众意见,使公众决策成为大型公共建筑投资决策的重要影响力,提高大型公共建筑项目绩效水平.

4) 加快法治建设,约束投资决策主体的行为和保护公共利益. 由于大型公共建筑项目的公共性与政府的行政权力过大^[12],而使得大型公共建筑项目的科学化和民主化成为社会焦点. 贪污腐败、投资效能低等是当前较为突出的问题. 为此,应促进公众参与投资决策,加快法治建设,用法律约束各种贪污腐败,用制度来规范决策行为,以保障公众的合法权益.

参考文献:

[1] 胡云亮. 大型公共建筑绿色度评价研究[D]. 天津:天津大学,2008:1-2.

[2] 段辉霞,张云波,项剑平,等. 代建制下多项目管理风险等级评价[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2014,35(4):454-459.

[3] 李红星,张洪德. 对政府投资决策科学性的研究分析[J]. 学术交流,2005(12):108-110.

[4] 谢洪涛,王孟钧. 我国重大工程项目决策阶段工作现状与问题问卷调查分析[J]. 中国工程科学,2010,12(1):18-23.

[5] 王文宾,陈祥东,达庆利,等. 制造商竞争环境下逆向供应链的政府奖惩机制研究[J]. 运筹与管理,2014,23(3):136-145.

[6] 张锐. 大型公共建筑项目投资决策中的公众参与影响因素研究[D]. 广州:广州大学,2013:10-12.

[7] 武乾,吴清,高书华,等. 基于维修质量的大型公共建筑物维修周期决策研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版,2011,43(4):517-521.

[8] 王艳艳,任宏. 非对称信息下节能建筑开发商激励机制研究[J]. 科技进步与对策,2013,30(23):44-47.

[9] 张婕. 基于柔性理论的大型工程投资决策研究[D]. 南京:河海大学,2007:150-154.

[10] 李尽法. 项目绩效预算的决策权限格局构建研究[J]. 安阳师范学院学报,2010(4):26-29.

[11] 谢琳琳. 公共投资建设项目决策机制研究[D]. 重庆:重庆大学,2005:78-80.

[12] 牛静敏. 我国房地产项目利益相关者影响力分析[J]. 经济论坛,2010(3):11-14.

Influence Research on Large-Scale Public Construction Project
Decision Making Based on Information Asymmetry

HUANG Yuan-hui^{1,2}, WANG Shi-cai³

(1. School of Economics and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;
2. Department of Business Administration, Guangxi Technological College of Machinery and Electricity, Nanning 530007, China;
3. School of Management, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430072, China)

Abstract: Under the asymmetric information perspective, the large-scale public construction project decision making is investigated in situ. The current situation of the construction project investment decision-making data results shows that the only 7.46% of the public, 11.43% of experts and 12.50% of large public constructor are satisfactory with of decision-making. Using SPSS 16.0 statistical analysis method, the influence of the project decision-making are analyzed. Four decision-making main entities include the government, operators, experts and public. The average influences of four main entities are 4.37, 3.70, 3.40, and 2.27 in the project life cycle stages of the project life, the feasibility study stage, and bidding stage. The influence game pattern of the different entities forms gradually. Some suggestions are put forward, such as "investment-construction" separation, expert empowerment, public empowerment, constraints of investment decision-making behavior and protection of public interests in large-scale public construction investment decision-making.

Keywords: public construction; asymmetric information; decision-making main entity; project life cycle; influence

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)

一类极小系统的动力性状

颜 棋, 尹建东

(南昌大学 理学院, 江西 南昌 330031)

摘要: 引进了真弱几乎周期点极小系统这一新概念, 即一个含有真的弱几乎周期点而不存在真子系统具有此性质的系统, 并证明了该系统是拓扑传递, 具有满测度中心. 结果表明: 该系统是 Takens-Ruelle 混沌的, 强遍历和完全遍历敏感的.

关键词: 弱几乎周期点; 极小系统; 强遍历; 遍历敏感

中图分类号: O 189.1

文献标志码: A

(X, f) 为一个紧致系统, X 为紧致度量空间, f 为 X 上的连续自映射. 要研究 (X, f) 的动力性状, 一种常见的用法是研究该系统的全部子系统, 即系统的全部不变子集, 并弄清楚各子系统的性质及原系统之间的关系. 从而那些不可再分解的更小的系统成为研究的主要对象. 拓扑动力系统的核心问题是研究点的轨道渐近性或拓扑结构. 为了能够更深刻地刻画拓扑动力系统中点的轨道结构与遍历内涵, 相继引进了弱几乎周期点和拟弱几乎周期点这两个概念^[1-2], 并指出存在真的弱几乎周期点. 1993 年, Coven 等^[3] 定义了熵极小系统概念, 如果有非空不变闭子集 $Y \subseteq X$, 使得 $\text{ent}(f|_Y) = \text{ent}(f)$, 则 $Y = X$, 即熵极小系统没有真子系统和原系统的熵一致, 熵极小系统是拓扑传递的, 以及线段上拓扑传递分段单调的连续映射是熵极小的. 王肖义等^[4] 定义了混沌极小系统概念, 如果它本身在 Li-Yorke 意义下是混沌的, 并且所有真子系统都不是 Li-Yorke 混沌的, 讨论其部分动力性状. 本文给出了真弱几乎周期点极小系统这一新概念, 即 f 是有真的弱几乎周期点, 若 Y 是 X 的关于 f 不变的非空闭子集, 且 $f|_Y$ 具有真的弱几乎周期点, 则 $Y = X$.

1 基本概念和记号

设 (X, f) 是一个紧致系统, $\mathbf{Z}_+$ 为正整数集. 假设 $U, V \subseteq X$ 是两个非空开集, $x \in X$. 记 $N(U, V) = \{n \in \mathbf{Z}_+ \mid U \cap f^{-n}(V) \neq \emptyset\}$ 和 $N(x, U) = \{n \in \mathbf{Z}_+ \mid f^n(x) \in U\}$.

设 $S \subseteq \mathbf{Z}_+$, 令 $\eta(S) = \limsup_{n \rightarrow \infty} \frac{\# \{S \cap (1, 2, 3, \dots, n)\}}{n}$, 这里 $\#(\cdot)$ 表示集合的基数. 若 $\eta(S) > 0$, 则称 S 有正上密度(PUD).

设 $x \in X$, x 在 f 的作用下生成的轨道 $\{x, f(x), f^2(x), \dots, f^n(x), \dots\}$ 记作 $\text{orb}(x)$, 易见 $\overline{\text{orb}(x)}$ 是对 f 不变的闭子集.

$A \subseteq \mathbf{Z}_+$ 称为相对稠密的, 若存在 $N \in \mathbf{Z}_+$ 使得对于任意 $n \in \mathbf{Z}_+$, $[n, n+N] \cap A \neq \emptyset$.

如果对任意的两个非空开集 U, V , 有 $N(U, V) \neq \emptyset$, 则称 f 是拓扑传递的; 如果对任意的两个非空开集 U, V , $N(U, V)$ 具有正上密度, 则称 f 是拓扑遍历的; 如果对任意的两个非空开集 U, V , $N(U, V)$ 是相对稠密的, 则称 f 是拓扑强遍历的.

M 称为极小的, 如果 M 是 X 的非空不变闭子集, 且不存在 M 的真子集满足上述性质. 假如 $M \subseteq X$

收稿日期: 2014-08-30

通信作者: 尹建东(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事拓扑动力系统的研究. E-mail: yjdaxf@163.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11261039); 江西省自然科学基金资助项目(20132BAB201009)

是极小的, $x \in M$, 则称 x 是 f 的一个极小点, f 所有的极小点的集合记为 $A(f)$.

点 $x \in X$ 称为 f 的一个弱几乎周期点, 对任意的 $\epsilon > 0$, 存在整数 $N_\epsilon > 0$, 使得基数

$$\#(\{r \mid f^r(x) \in V(x, \epsilon), 0 < r < nN_\epsilon\}) \geq n, \quad \forall n > 0.$$

上式中: $V(x, \epsilon) = \{y \in X \mid d(x, y) < \epsilon\}$ 是 x 的半径为 ϵ 的球形邻域; f 的所有弱几乎周期点的集合记为 $W(f)$.

给定一个紧致系统 (X, f) , 如果 $W(f) - A(f) \neq \emptyset$, 则称该系统含有真的弱几乎周期点^[1].

用 $M(X)$ 表示可测空间 $(X, \beta(X))$ 上的全体概率测度的集合, 这里 $\beta(X)$ 表示由 X 上的开集所生成的 Borel- σ 代数, 它是一个可度量紧致有仿射结构的凸空间, 其上拓扑称为 ω^* 拓扑. $m \in M(X)$ 称作 f 的不变测度, 如果 $m(f^{-1}(A)) = m(A)$ 对于任意的 $A \in \beta(X)$ 成立. f 的全体不变测度的集合记为 $M(X, f)$. 设 $m \in M(X, f)$, 用 $\text{supp}(m)$ 表示 m 的全体支撑点的集合, 即

$$\text{supp}(m) = \{x \in X \mid \forall \epsilon > 0, m(V(x, \epsilon)) > 0\}.$$

(X, f) 称为 E -系统, 若 f 是拓扑传递的, 且存在 $m \in M(X, f)$, 使得 $\text{supp}(m) = X$. 如果存在 X 中的非空不变闭子集 E , 使得 $m(E) = 1$ 对于任意的 $m \in M(X)$ 成立, 且 E 无真子集满足上述条件, 则称 E 是 f 相对 X 的测度中心, 将 f 的测度中心记为 $M(f)$ ^[5-6].

设 $V \subseteq X, \delta > 0$, 记 $S_f(V, \delta) = \{n \in \mathbf{Z}_+ \mid d(f^n(x), f^n(y)) > \delta, x, y \in V\}$. f 是初值敏感依赖的, 如果存在 $\delta > 0$, 对于 X 中的任意非空开集 V , 集合 $S_f(V, \delta)$ 是非空的. 此时, δ 称为 f 或 (X, f) 的敏感依赖系数. f 是遍历敏感的, 如果存在 $\delta > 0$, 对于 X 中的任意非空开集 V , 集合 $S_f(V, \delta)$ 有正上密度. f 称为完全遍历敏感的, 如果对任意的 $n > 0, f^n$ 是遍历敏感的^[7].

f 是 Takens-Ruelle 混沌的, 如果 f 是拓扑传递的和初值敏感的. 设 (X, f) 和 (Y, g) 都是紧致系统, 如果存在同胚映射 $h: X \rightarrow Y$ 使得 $hf = gh$, 则称 f 和 g 拓扑共轭, 记作 $f \sim g$.

定义 1 (X, f) 称为真弱几乎周期点极小的, 是指 f 具有真的弱几乎周期点, 如果 Y 是 f 的非空不变闭子集, $f|_Y$ 具有真的弱几乎周期点, 则 $Y = X$. 显然, 每一个真弱几乎周期点极小系统都不是极小的.

注 1 熵极小系统和混沌极小系统均可以不是真弱几乎周期点极小系统.

2 主要结论和证明

引理 1 设 (X, f) 是一个紧致系统, X 中没有孤立点, $\Lambda \subset X$ 是对 f 不变的闭子集, 则有

$$1) W(f) \cap \Lambda = W(f|_\Lambda);$$

$$2) A(f) \cap \Lambda = A(f|_\Lambda).$$

证明 对于任意的 $x \in W(f) \cap \Lambda$, 由弱几乎周期点定义知: 对任意的 $\epsilon > 0$, 存在 $N_\epsilon > 0$ 使得基数

$$\#(\{r \mid f^r(x) \in V(x, \epsilon), 0 < r < nN_\epsilon\}) \geq n, \quad \forall n > 0.$$

由于 $x \in \Lambda$, 且 Λ 关于 f 不变, 所以对于任意的 $n \in \mathbf{Z}_+$, 有 $f^n(x) \in \Lambda$. 如果 $f^r(x) \in V(x, \epsilon)$, 显然有 $f^r(x) \in V(x, \epsilon) \cap \Lambda$, 从而有

$$\#(\{r \mid f^r(x) \in V(x, \epsilon) \cap \Lambda, 0 < r < nN_\epsilon\}) \geq n, \quad \forall n > 0.$$

由弱几乎周期点的定义知: $x \in W(f|_\Lambda)$, 故 $W(f) \cap \Lambda \subset W(f|_\Lambda)$.

对于任意的 $x \in W(f|_\Lambda)$, 显然 $x \in \Lambda$, 又由弱几乎周期点定义知: 对任意 $\epsilon > 0$, 存在 $N_\epsilon > 0$, 有

$$\#(\{r \mid (f|_\Lambda)^r(x) \in V(x, \epsilon), 0 < r < nN_\epsilon\}) \geq n, \quad \forall n > 0.$$

$$\#(\{r \mid f^r(x) \in V(x, \epsilon) \cap \Lambda \subset V(x, \epsilon), 0 < r < nN_\epsilon\}) \geq n, \quad \forall n > 0.$$

$x \in W(f)$, 则 $x \in W(f) \cap \Lambda$, 故 $W(f|_\Lambda) \subset W(f) \cap \Lambda$. 综上所述: $W(f) \cap \Lambda = W(f|_\Lambda)$.

对于任意的 $x \in A(f) \cap \Lambda$, 由几乎周期点定义知: 对任意 $\epsilon > 0$, 存在整数 $N > 0$, 对任意整数 $q > 0$, 存在整数 $r, q < r \leq q + N$, 有 $f^r(x) \in V(x, \epsilon)$. 又 $\Lambda \subset X$ 是对 f 不变的闭子集, 且 $x \in \Lambda$, 有 $f^r(x) \in \Lambda$, 则 $f^r(x) \in V(x, \epsilon) \cap \Lambda$, 即 $(f|_\Lambda)^r(x) \in V(x, \epsilon)$, 则 $x \in A(f|_\Lambda)$.

故 $A(f) \cap \Lambda \subset A(f|_\Lambda)$.

对于任意的 $x \in A(f|_\Lambda)$, 显然 $x \in \Lambda$, 且必存在一个非空的不变子集 $M \subset \Lambda$, 使得 $f|_M$ 对于 Λ 是极小的, 显然 $f|_M$ 对于 X 是极小的, 并且有 $x \in A(f)$, 则 $x \in A(f) \cap \Lambda$. 故 $A(f) \cap \Lambda \supset A(f|_\Lambda)$. 综上所述:

$$A(f) \cap \Lambda = A(f|_{\Lambda}).$$

定理 1 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 是拓扑传递的.

证明 由于 f 具有真的弱几乎周期点, 则存在 $x \in X$ 使得 $x \in W(f) - A(f)$. 由轨道定义知: $(\overline{\text{orb}(x)}, f|_{\overline{\text{orb}(x)}})$ 是 (X, f) 的一个子系统, 且 $x \in W(f)$, $x \in \overline{\text{orb}(x)}$. 由引理 1 中 1) 知: $x \in W(f|_{\overline{\text{orb}(x)}})$, 由引理 1 中 2) 知: $A(f|_{\overline{\text{orb}(x)}}) \subseteq A(f)$. 从而 $x \in W(f|_{\overline{\text{orb}(x)}}) - A(f|_{\overline{\text{orb}(x)}})$, 即 x 也是子系统 $f|_{\overline{\text{orb}(x)}}$ 的一个真的弱几乎周期点.

由于 (X, f) 是真弱几乎周期点极小系统, 根据定义知: $\overline{\text{orb}(x)} = X$. 由于 X 中无孤立点, 所以 f 是拓扑传递的.

注 2 若 f 是拓扑传递的, 则 (X, f) 不一定是真弱几乎周期点极小系统.

定理 2 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 具有满测度中心, 即 $M(f) = X$.

证明 由定理条件知: $W(f) - A(f) \neq \emptyset$, 又 $(M(f), f|_{M(f)})$ 是 (X, f) 的一个子系统. 设 $x \in W(f) - A(f)$, 即 $x \in W(f)$ 但 $x \notin A(f)$. 由于 $\overline{W(f)} = M(f)$, 则 $x \in M(f)$. 由引理 1 中 (1) 知: $x \in W(f|_{M(f)})$, 又由引理 1 中 (2) 知: $x \notin A(f|_{M(f)})$. 则 $x \in W(f|_{M(f)}) - A(f|_{M(f)})$, 即 x 是子系统 $(M(f), f|_{M(f)})$ 的一个真的弱几乎周期点. 又 (X, f) 是真弱几乎周期点极小系统, 根据定义知: $M(f) = X$.

引理 2^[8] 设 (X, f) 是紧致系统, 若 f 是拓扑传递的, 且 $M(f) = X$, 则 (X, f) 是一个 E -系统, 且 f 是强遍历的.

定理 3 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 是强遍历的.

证明 由定理 1, 2 知: f 是拓扑传递的, 且 $M(f) = X$. 则由引理 2 知: f 是强遍历的.

引理 3^[6] 非极小的 E -系统是初值敏感的.

引理 4 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 是初值敏感的.

证明 由定义 1 知: f 不是极小的. 定理 1, 2 知: f 是拓扑传递的, 且 $M(f) = X$, 则由引理 2 知: (X, f) 是一个 E -系统. 由引理 3 知: f 是初值敏感的.

定理 4 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 是 Takens-Ruelle 混沌的.

证明 由定理 1 知: f 是拓扑传递的, 由引理 4 知: f 是初值敏感的. 根据 Takens-Ruelle 混沌的定义可得, f 是 Takens-Ruelle 混沌的.

引理 5^[7] 设 (X, f) 是一个紧致系统, 若 f 是初值敏感的, 且 $f \times f$ 的弱几乎周期点在 $X \times X$ 中稠密, 则对于任意 $n > 0$, f^n 是遍历敏感的, 即 f 是完全遍历敏感的.

引理 6 设 $(X, f), (Y, g)$ 是 2 个紧致系统, 则 $M(f) \times M(g) = M(f \times g)$. 特别地, $M(f) \times M(f) = M(f \times f)$.

证明 设 $(x, y) \in M(f) \times M(g)$, 对于 (x, y) 任意邻域 U , 存在 x 的一个邻域 $U_1 \subseteq X$ 和 y 的一个邻域 $U_2 \subseteq Y$, 使得 $U_1 \times U_2 \subseteq U$. 由于 $x \in M(f), y \in M(g)$, 则 x, y 分别是 f 和 g 的支撑点, 于是存在 $\mu_1 \in M(X), \mu_2 \in M(Y)$, 使得 $\mu_1(U_1) > 0, \mu_2(U_2) > 0$.

令 $m(U_1 \times U_2) = \mu_1(U_1) \times \mu_2(U_2)$, 则 m 可以延拓到 $M(X)$ 上而成为一个不变测度, 记延拓后的测度为 m , 则 $m \in M(X \times Y)$, 且 $m(U) \geq m(U_1 \times U_2) > 0$, 所以 (x, y) 是 $f \times g$ 的一个支撑点, 于是 $(x, y) \in M(f \times g)$.

反之, 由于 $\overline{W(f)} = M(f), \overline{W(g)} = M(g)$, 且 $\overline{W(f \times g)} = M(f \times g)$, 只需证明 $M(f \times g) \subseteq W(f) \times W(g)$. 设 $(x, y) \in M(f \times g)$, 对任意的 $\epsilon_1 > 0$ 和 $\epsilon_2 > 0$, 取 $\epsilon = \min\{\epsilon_1, \epsilon_2\}$, 则 $V((x, y), \epsilon)$ 是 (x, y) 的一个邻域, 且

$$V((x, y), \epsilon) \subseteq V(x, \epsilon_1) \times V(y, \epsilon_2).$$

令 $V_1 = V(x, \epsilon_1), V_2 = V(y, \epsilon_2)$, 由于 $(x, y) \in M(f \times g)$, 根据弱几乎周期点的定义知: 存在 $N > 0$, 使得对于任意 $n \geq 0$,

$$\begin{aligned} n &\leq \#(i \mid (f \times g)^i(x, y) \in V((x, y), \epsilon), 0 \leq i < nN) \leq \\ &\quad \#(i \mid (f \times g)^i(x, y) \in V_1 \times V_2, 0 \leq i < nN) = \\ &\quad \#(i \mid (f)^i(x) \in V_1, (g)^i(y) \in V_2, 0 \leq i < nN) \end{aligned}$$

则 $\#(i \mid (f)^i(x) \in V_1, 0 \leq i < nN) \geq n$, 且 $\#(i \mid (g)^i(y) \in V_2, 0 \leq i < nN) \geq n$.

故 $x \in M(f), y \in W(g)$. 则证明得 $W(f \times g) \subseteq W(f) \times W(g)$. 从而

$$M(f \times g) = \overline{W(f \times g)} \subseteq \overline{W(f) \times W(g)} = \overline{W(f)} \times \overline{W(g)} = M(f) \times M(g).$$

定理 5 设 (X, f) 是一个真弱几乎周期点极小系统, 则 f 是完全遍历敏感.

证明 由引理 4 知: f 是初值敏感的. 由定理 2 知: f 具有满测度中心, $W(f) = X$. 根据引理 6 知: $\overline{W(f \times f)} = M(f \times f)$, 即 $f \times f$ 的弱几乎周期点在 $X \times X$ 中稠密. 由引理 5 可得: f 是完全遍历敏感的.

引理 7^[2] 假设 $(X, f), (Y, g)$ 是两个紧致系统, $f \sim g$, 且 $h: X \rightarrow Y$ 是从 f 到 g 的拓扑共轭, 那么 $h(W(f)) = W(g)$.

定理 6 设 $f \sim g$, 且 $h: X \rightarrow Y$ 是从 f 到 g 的拓扑共轭, 若 (X, f) 是真弱几乎周期点极小系统, 则 (Y, g) 也是真弱几乎周期点极小系统.

证明 假设 (Y, g) 不是真弱几乎周期点极小系统, 即存在 (Y, g) 的真子系统 $(U, g|_U)$ 中含有真弱几乎周期点, 即 $W(g|_U) - A(g|_U) \neq \emptyset$, 显然 $(h^{-1}(U), f|_{h^{-1}(U)})$ 是 (X, f) 的真子系统, 且 $f|_{h^{-1}(U)}$ 与 $g|_U$ 共轭. 由引理 7 知: $h(W(f|_{h^{-1}(U)}) - hA(f|_{h^{-1}(U)})) \neq \emptyset$, 则 $W(f|_{h^{-1}(U)}) - A(f|_{h^{-1}(U)}) \neq \emptyset$, 则 (X, f) 的真子系统 $(h^{-1}(U), f|_{h^{-1}(U)})$ 含弱几乎周期点, 与已知矛盾, 假设不成立.

故 (Y, g) 是真弱几乎周期点极小系统.

注 3 此定理说明两个紧致系统拓扑共轭, 若其中一个为真弱几乎周期点极小系统, 另一个系统也为真弱几乎周期点极小系统. 若 h 只是从 X 到 Y 的拓扑半共轭, 上述结论可能不成立.

参考文献:

[1] 周作领. 弱几乎周期点和测度中心[J]. 中国科学: A 辑, 1992, 22(6): 572-581.
[2] 周作领, 何伟弘. 轨道结构的层次与拓扑半共轭[J]. 中国科学: A 辑, 1995, 25(5): 457-464.
[3] COVEN E, SMITAL J. Entropy-minimality[J]. Acta Math Univ Comenianae, 1993, 62(1): 117-121.
[4] 王肖义, 黄煜. 不含混沌真子系统的 Li-Yorke 混沌[J]. 数学学报, 2012, 55(4): 749-756.
[5] 周作领, 尹建东, 许绍元. 拓扑动力系统: 从拓扑方法到遍历理论方法[M]. 北京: 科学出版社, 2011: 117-120.
[6] 叶向东, 黄文, 邵松. 拓扑动力系统概论[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 29-60.
[7] LI Ri-song. A note on stronger forms of sensitivity for dynamical systems[J]. Chaos, Solitons and Fractals, 2012, 45: 753-758.
[8] YIN Jian-dong, ZHOU Zuo-ling. A characterization of topologically transitive attributes for a class of dynamical system[J]. Chinese Annals of Mathematics, 2012, 33(3): 419-428.

Dynamical Propertise for a Class of
Minimal Dynamical Systems

YAN Qi, YIN Jian-dong

(School of Science, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

Abstract: A new concept of proper weakly almost periodic point minimal system is introduced, that is, a system contains proper weakly almost periodic points containing no proper subsystem with these properties. We prove that such a system is topologically transitive and has a full measure center. It can be proved further that such a system is Taken-Ruelle chaos, strongly ergodic and totally ergodically sensitive.

Keywords: weakly almost periodic point; minimal system; strongly ergodic; ergodically sensitive

(责任编辑: 陈志贤 英文审校: 黄心中)

《华侨大学学报(自然科学版)》简介

BRIEF INTRODUCTION TO JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY (NATURAL SCIENCE)

《华侨大学学报(自然科学版)》(下称《学报》)创刊于1980年,是福建省教育厅主管,华侨大学主办,面向国内外公开发行的自然科学综合性学术理论刊物。

《学报》的办刊宗旨是:坚持四项基本原则,贯彻“百花齐放,百家争鸣”和理论与实践相结合的方针,广泛联系海外华侨和港、澳、台、特区的科技信息,及时反映国内尤其华侨大学等高等学府在理论研究、应用研究和开发研究等方面的科技成果,为发展华侨高等教育和繁荣社会主义科技事业服务。

《学报》以创新性、前瞻性、学术性为办刊特色,主要刊登机械工程及自动化、测控技术与仪器、电气工程、电子工程、计算机技术、应用化学、材料与环境工程、化工与生化工程、土木工程、建筑学、应用数学等基础研究和应用研究方面的学术论文,科技成果的学术总结,新技术、新设计、新产品、新工艺、新材料、新理论的论述,以及国内外科技动态的综合评论等内容。

《学报》既是中文综合性科学技术类核心期刊,又是国内外重要数据库和权威性文摘期刊固定收录的刊源。在历次全国及福建省的科技期刊评比中,《学报》都荣获过大奖。曾获得1995年“全国高等学校自然科学学报系统优秀学报一等奖”,1997年“第二届全国优秀科技期刊奖”,1999年,2008年“全国优秀自然科学学报及教育部优秀科技期刊”,并于2001年入选“中国期刊方阵‘双效期刊’”。

《学报》现为双月刊,A4开本。中国标准连续出版物号:CN 35-1079/N;国际标准连续出版物号:ISSN 1000-5013;国内邮发代号:34-41;国外发行代号:NTZ1050。

Journal of Huaqiao University (Natural Science) (abbreviated to the Journal), started publication in 1980, is a comprehensive and academic journal about natural science, open distribution at home and abroad, sponsored by Huaqiao University; Fujian Bureau of Education is responsible for its work.

The Journal has its purpose: adhering to the four cardinal policies, carrying out the principles of the “Flowers Blossom; Schools of Thought Contend” and theory combined with practice, collecting information of science and technology from overseas and those in Hong Kong, Macao, Taiwan and special economic zones and all sides, and in time reflecting the scientific and technological achievements about domestic theoretical research, applied research and development research in our university and others, and serving for development of the overseas Chinese higher education and the socialist prosperity on science and technology.

The Journal, with characteristics of creative, perspective and academic study, publishes the articles of fundamental and applied research on mechanical engineering and automation, observing and controlling technology and instruments, electric and electronic engineering, computer, applied chemistry, materials and environmental engineering, chemical and biochemical engineering, civil engineering, architecture, applied mathematics, etc. and the academic reports on achievements of science and technology, theses on new technology, new design, new products, new crafts, new materials, new theories, and the comprehensive reviews on scientific and technological developments at home and abroad.

The Journal is not only a core Chinese periodical on comprehensive science and technology, but also an important data base at home and abroad and periodical source that the authoritative abstracts have been recorded regularly. The Journal won the prizes among the national and provincial evaluation of scientific and technological periodicals such as “the first prize of good natural science of the national higher education periodicals” in 1995, “the good prize of the second national periodicals of science and technology” in 1997, “the good scientific and technological periodicals of the national natural science journals and the State Education Department” in 1999 and 2008, and selected into “‘double-effect periodical’ of the China periodicals matrix” in 2001. The Journal welcomes the contributors from our university and others.

The Journal is bimonthly publication, with format of A4. China standard serial number: CN 35-1079/N; International standard serial number: ISSN 1000-5013; Domestic mail number: 34-41; International issue number: NTZ1050.

- 《中文核心期刊要目总览》
- ISTIC 中国科技核心期刊
- RCCSE 中国核心学术期刊
- 全国优秀科技期刊
- 中国期刊方阵“双效期刊”
- 华东地区优秀期刊
- 中国科技论文在线优秀期刊

本刊被以下国内外检索期刊和数据库列为固定刊源

- | | |
|-----------------|-------------------------|
| · 美国《化学文摘》(CAS) | · 俄罗斯《文摘杂志》(AJ, VINITI) |
| · 波兰《哥白尼索引》(IC) | · 荷兰《文摘与引文数据库》(Scopus) |
| · “STN 国际”数据库 | · 德国《数学文摘》(Zbl MATH) |
| · 中国科学引文数据库 | · 中国学术期刊综合评价数据库 |
| · 中国科技论文统计期刊源 | · 中国期刊网 |
| · 中国学术期刊(光盘版) | · 万方数据库 |
| · 中文科技期刊数据库 | · 中国机械工程文摘 |
| · 中国力学文摘 | · 中国化学化工文摘 |
| · 中国生物学文摘 | · 中国无线电电子学文摘 |
| · 中国数学文摘 | · 中国物理文摘 |

华侨大学学报(自然科学版)

Huaqiao Daxue Xuebao (Ziran Kexue Ban)

(双月刊, 1980 年创刊)

第 36 卷 第 2 期 (总第 142 期) 2015 年 03 月 20 日

JOURNAL OF HUAQIAO UNIVERSITY

(NATURAL SCIENCE)

(Bimonthly, Started in 1980)

Vol. 36 No. 2 (Sum. 142) Mar. 20, 2015

主管单位: 福 建 省 教 育 厅

主办单位: 华 侨 大 学

(中国 福建 厦门 361021)

编辑出版: 华侨大学学报自然科学版编辑部

电 话: 0595-22692545
 电子信箱: journal@hqu. edu. cn
 网 址: www. hdxh. hqu. edu. cn

主 编: 乌 东 峰

印 刷: 泉 州 晚 报 印 刷 厂

国内发行: 福建省泉州市邮政局

订 购 处: 全 国 各 地 邮 政 局 (所)

国外发行: 中国出版对外贸易总公司

(北京 782 信箱, 邮政编码 100011)

Competent Authority: Department of
 Education of Fujian Province

Sponsor: Huaqiao University
 (Xiamen 361021, Fujian, China)

Edited and Published by Editorial
 Department of Journal of
 Huaqiao University (Natural Science)

Tel: 0595-22692545
 E-mail: journal@hqu. edu. cn
 Http://www. hdxh. hqu. edu. cn

Editor in Chief: WU Dong-feng

Distributed by China Publication Foreign
 Trading Corporation

(P. O. Box 782, Beijing, 100011, China)

刊 号: ISSN 1000-5013
 CN 35-1079/N

代 号: 国内邮发 34-41
 国外 NTZ 1050

国内定价: 8.00 元/期
 48.00 元/年