

DOI:10.11830/ISSN.1000-5013.201709054



采用 C# 的多轴联动石材桥切机 控制系统设计与仿真分析

邵辉^{1,2}, 王磊^{1,2}, 胡伟石³, 晏来成^{1,2}, 黄吉祥⁴

- (1. 华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 厦门 361021;
2. 福建省电机控制与系统优化调度工程技术研究中心, 福建 厦门 361021;
3. 华侨大学 实验室与设备管理处, 福建 厦门 361021;
4. 华侨大学 制造工程研究院, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计基于 PC 机和运动控制卡的多轴联动石材桥切机控制系统, 自动提取绘图交换格式 (DXF) 文件的图形信息, 采用直线拟合法加工轮廓曲线, 实现刀具的自动化加工, 并用 C# 语言自动生成机床常用的数控 G 代码和运动控制卡代码 (Galil 代码). 通过 VeriCut 软件仿真及软硬件的实机测试表明: G 代码成功地用于机床仿真加工, Galil 代码成功地用于机床实验平台自动化空载运行, 且实现了圆盘锯加工圆弧和椭圆轮廓.

关键词: 石材桥切机; 绘图交换格式文件; G 代码; Galil 代码

中图分类号: TH 16; TP 27 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2018)02-0166-06

Control System Design and Simulation Analysis for Multi-Axis Bridge Stone Cutting Machine Based on C#

SHAO Hui^{1,2}, WANG Lei^{1,2}, HU Weishi³,
YAN Laicheng^{1,2}, HUANG Jixiang⁴

- (1. College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
2. Fujian Engineering Research Center of Motor Control and System Optimal Schedule, Xiamen 361021, China;
3. Laboratory and Equipment Management Division, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;
4. Institute of Manufacturing Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

Abstract: Based on the automatic control system for multi-axis stone bridge cutting machine constructed using PC and motion control card, the graphical information of DXF (drawing exchange format) files can be extracted. A line fitting method is used to process designed contour, the automatic machining procedure is achieved. The common G code and Galil code (motion controller code) are automatically generated for machine tools in C# language. The simulation in VeriCut software and the experiment testing in soft-hardware test platform show that the G code is used successfully in simulation process of the machine tool, the Galil code is used successfully in automatic no load machining process of the machine platform, and arc and ellipse contour processing in circular saw are implemented.

Keywords: bridge stone cutting machine; drawing exchange format file; G code; Galil code

收稿日期: 2017-09-20

通信作者: 邵辉(1973-), 女, 副教授, 博士, 主要从事机器人控制、运动规划的研究. E-mail: shaohuihull@163.com.

基金项目: 福建省自然科学基金资助项目(2017J01117); 福建省科技计划项目(2015H0026); 福建省泉州市科技计划项目(2017T001); 第 48 批留学回国人员科研启动基金(Z1534004)

随着石材产品的需求量逐渐增加^[1-2], 石材产品朝着异型化、复杂化发展, 从而推动了石材加工设备的多功能化、自动化、数控化^[3-6]. 设计多功能、高效率、高自动化、加工范围广的石材数控桥切机, 是石材加工行业发展的迫切要求^[7-8]. 国外已将传统普通桥切机升级为多功能、数控桥切机, 实现圆锯片在 XY 平面 360° 回转和锯片摆头功能^[9-10]. 金成毅等^[11]采用可编程逻辑控制器(PLC)控制系统实现了石材分片自动切割, 此系统只用三轴进行直线切割, 是目前国内石材行业普遍采用的切割方式. 刘玉梅^[12]采用 PC+RTX() + I/O 卡结构, 使用 VC++ 开发三轴数控系统, 然而, 该系统只用铣刀进行简单异型板材轮廓加工, 加工范围有限. 文献[13-14]采用 PC+运动控制卡结构, 使用 VC++ 开发四轴数控系统, 但这些讨论只针对圆弧轮廓. 针对上述问题, 本文设计了石材桥切机控制系统, 使用直线拟合法^[15-17]以加工小线段的形式进行曲线轮廓加工; 同时, 使用 C# 语言编程, 生成刀路 G 代码用于 VeriCut 软件进行机床仿真, 生成 Galil 代码用于下载到运动控制卡进行机床走刀.

1 控制系统结构

四轴桥切机设计控制系统硬件主要由 PC 机、Galil-DMC 运动控制卡、安川 Σ -V 系列伺服驱动器和伺服电机等电器部件组成. 该硬件结构具有器件少、电气线路少、组建方便等优点, 如图 1 所示.

利用 C# 语言实现面向对象和模块化的设计. C# 语言具有易用、少出错、垃圾收集自动内存管理的功能, 可提高开发效率, 缩短开发周期^[18-19]. 软件结构系统主要分为 6 大模块, 如图 2 所示.

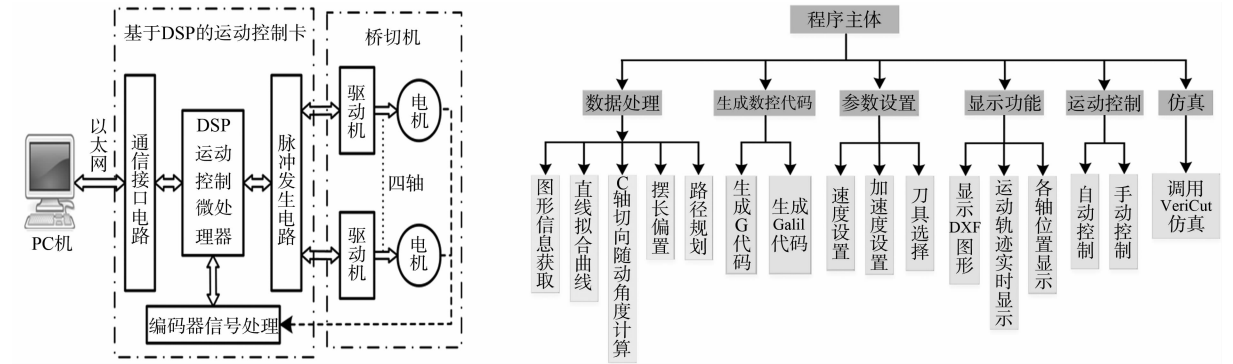


图 1 控制系统硬件结构

Fig. 1 Hardware structure of control system

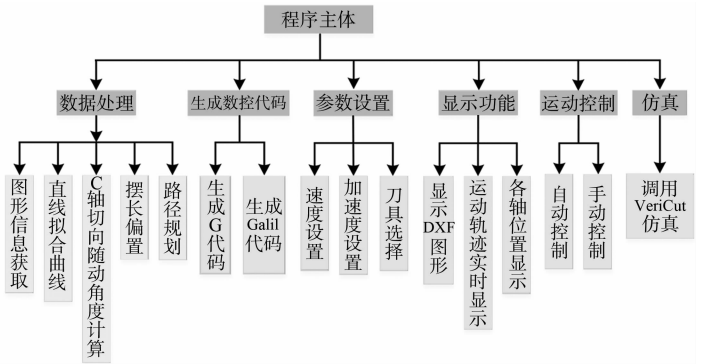


图 2 软件结构

Fig. 2 Software structure

2 数据的处理

2.1 DXF 图形信息获取

DXF 图形文件的几何信息存储在其实体段(ENTITIES)中, 因此, 先找到 ENTITIES 段, 再在这一段中查找 LINE, ARC, CIRCLE, Ellipse 等图元类型, 并提取相应组码后的图形元素. 各图元类型和图元信息, 如表 1 所示.

2.2 直线拟合曲线及拟合误差分析

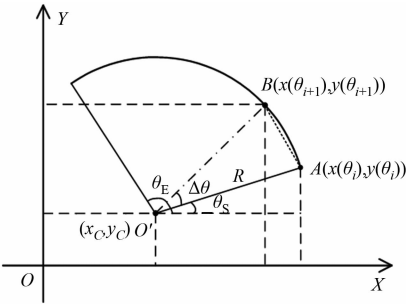
在数控加工中, 只有直线和圆弧插补功能, 其他形式的曲线需用小线段或圆弧进行拟合. 根据圆弧和椭圆的参数方程, 每隔一定的角度 $\Delta\theta$ 计算出圆弧和椭圆上的点坐标, 用一系列小线段拟合圆弧和椭圆. 在拟合误差满足板材切割精度的条件下, 此方法具有计算简单方便的特点.

2.2.1 直线拟合圆弧和椭圆 根据节 2.1 所得圆弧的圆心坐标 $O'(x_c, y_c)$, 半径 R , 起点角度 θ_s 和终点角度 θ_E , 建立平面任意位置圆弧, 如图 3(a) 所示. 其参数方程为

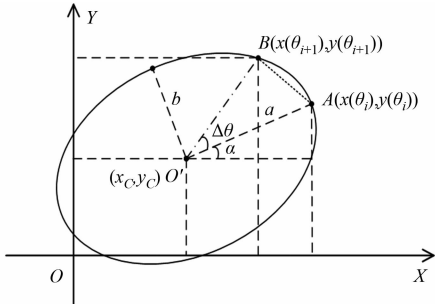
$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= x_c + R\cos\theta, & \theta_s \leq \theta \leq \theta_E, \\ y(\theta) &= y_c + R\sin\theta, & \theta_s \leq \theta \leq \theta_E. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

根据节 2.1 所得椭圆(图 3(b))的中心点坐标 $O'(x_c, y_c)$, 相对于中心点的长轴端点 (x_L, y_L) , 短轴与长轴的比例 M , 起点角度 θ_s 和终点角度 θ_E , 计算出椭圆长半轴 $R_L = \sqrt{x_L^2 + y_L^2}$ 和椭圆长轴倾斜角 $\alpha = \arctan(y_L/x_L)$; 再由短轴与长轴的比例 $M=R_s/R_L$, 计算出椭圆短半轴 $R_s=M \cdot R_L$; 建立平面任意位置椭圆的参数方程为

$$\left. \begin{aligned} x(\theta) &= x_c + R_L \cos \theta \cos \alpha - R_s \sin \theta \sin \alpha, \\ y(\theta) &= y_c + R_L \cos \theta \sin \alpha + R_s \sin \theta \cos \alpha. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$



(a) 圆弧



(b) 椭圆

图 3 线段拟合圆弧和椭圆

Fig. 3 Line segment fitting circular arc and fitting ellipse

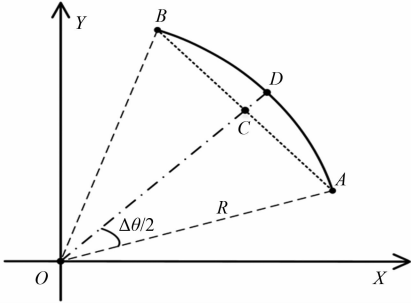
根据方程(1)或方程(2), θ_i 从 θ_s 开始到 θ_E , 每隔 $\Delta\theta$ 取值, 即 $\theta_i = \theta_s + i \cdot \Delta\theta (i=0, 1, 2, \dots)$, 计算得圆弧和椭圆上的点坐标 $(x(\theta_i), y(\theta_i))$, 用一系列小线段逼近整个圆弧或椭圆。

2.2.2 拟合误差分析 圆弧拟合误差, 如图 4(a) 所示。 $\Delta\theta$ 角对应圆弧 AB , OD 是 $\angle AOB$ 的角平分线, R 为圆弧半径, 线段 AB 拟合圆弧的误差为弓高误差 $|CD|$ 。 由几何关系, 误差计算式为

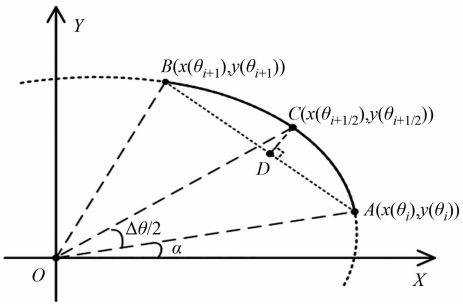
$$e = |CD| = R(1 - \sqrt{1 - \sin(\Delta\theta/2)}).$$

椭圆的拟合误差, 如图 4(b) 所示。 第 $i(i=0, 1, 2, \dots)$ 个线段的起点描述为 $A(x(\theta_i), y(\theta_i))$, 终点描述为 $B(x(\theta_{i+1}), y(\theta_{i+1}))$, 则直线 AB 的方程为

$$(y(\theta_i) - y(\theta_{i+1}))x + (x(\theta_{i+1}) - x(\theta_i))y + x(\theta_i)y(\theta_{i+1}) - x(\theta_{i+1})y(\theta_i) = 0. \quad (4)$$



(a) 圆弧



(b) 椭圆

图 4 圆弧和椭圆的拟合误差

Fig. 4 Fitting error of circular arc and fitting ellipse

计算最大弓高误差需找到一条与线段 AB 平行的直线, 该直线与椭圆在弧 AB 段的切点到直线 AB 的距离即为最大弓高误差, 但该方法计算较为复杂。 采用图 4(b) 中的 CD 线段长度来近似最大误差, 其中, 点 $C(x(\theta_{i+1/2}), y(\theta_{i+1/2}))$ 是 $\angle AOB$ 的角平分线与椭圆的交点, $|CD|$ 为点 C 到线段 AB 的距离。 由于椭圆在长轴端点处的曲率最大, 可知在此处的弓高误差最大。 因此, 取 $\theta_s=0, i=0$, 误差计算式为

$$e = |CD| = \frac{|(y(0) - y(\Delta\theta))x(\frac{\Delta\theta}{2}) + (x(\Delta\theta) - x(0))y(\frac{\Delta\theta}{2}) + x(0)y(\Delta\theta) - x(\Delta\theta)y(0)|}{\sqrt{(y(0) - y(\Delta\theta))^2 + (x(\Delta\theta) - x(0))^2}}. \quad (5)$$

由式(3), (5)可知, 圆弧半径 R 和椭圆方程一定时, $\Delta\theta$ 取值越小, 则拟合误差 e 越小。

2.3 C 轴切向随动角度计算

使用圆盘锯加工圆弧, 需使圆盘锯的轴向与圆弧上每一点的切线方向保持垂直, 即 C 轴跟随刀具

的切向而转动,称为 C 轴切向随动. 用小线段拟合圆弧之后,圆盘锯的轴向要与路径上的每一段小线段保持垂直,如图 5 所示. 这就需要计算 C 轴在第 i 条小线段的切向随动角度 C_i .

在机床系统中,C 轴旋转角度的 0 位置在 X 轴正向,向 Y 轴正向旋转为正角度. 线段 AB 与 X 轴正向沿逆时针方向所成的角为 β_i ,如图 6 所示. C 轴正向旋转 β_i 角度,则圆盘锯轴向与 AB 平行,要使圆盘锯轴向与 AB 垂直,C 轴需正向继续旋转 90° ,即 $C_i=\beta_i+90^\circ$.

2.4 圆盘锯摆长偏置

为了加工目标轨迹 AB,由于摆长(图 7)的存在,圆盘锯实际加工轨迹是 A''B''. 因此,需对 AB 的坐标平移一个摆长的距离,把 AB 平移到 A'B',如图 8 所示.

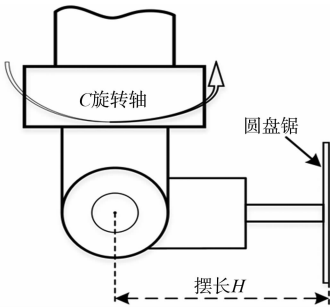


图 7 摆长示意图
Fig. 7 Diagram of pendulum length

以点 A 为例,计算公式为

$$\left. \begin{aligned} x'_i &= x(\theta_i) - H \cdot \cos C_i \\ y'_i &= y(\theta_i) - H \cdot \sin C_i. \end{aligned} \right\}$$

(6)

式(6)中: $(x(\theta_i), y(\theta_i))$, (x'_i, y'_i) 分别为 A, A' 点的 XY 轴坐标; H 为摆长长度.

3 G 代码和 Galil 代码的生成

系统的 G 代码是根据 FANUC 系统的 G 代码格式并使用 C# 语言编程生成的. 对于铣刀刀具路径,将节 2.2 计算得到的点坐标按照相应的代码(如 G01, G02, G03)格式重构. 对于圆盘锯路径,将偏置后的数据和 C 轴切向随动角度用相应的代码(如 G01, G02, G03)格式重构;再加上公英制代码(G20, G21)、工件坐标系代码(G54)、刀具选择代码(T)、主轴正反转及停止代码(M3, M4, M5)、主轴转速设定代码(S)、进给速度设定代码(F),以及其他辅助代码,即可生成完整的数控加工程序代码.

Galil 代码是 Galil 运动控制卡使用的加工指令,指令从功能区分可以分为动作指令、查询指令和程序流程控制指令. 部分指令及说明(Galil 代码中的 A, B, C 轴分别对应于机床的 X, Y, Z 轴),如表 2 所示.

对于铣刀刀具路径,同样将节 2.2 计算得到的点坐标按照相应的代码(如 PA, PR, CR)格式重构. 对于圆盘锯路径,将偏置后的数据和 C 轴切向随动角度用相应的代码格式重构. 再加上速度、加速度、延时等辅助功能指令,即

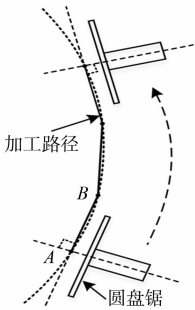


图 5 C 轴切向随动
Fig. 5 Tangential follow up of C axis

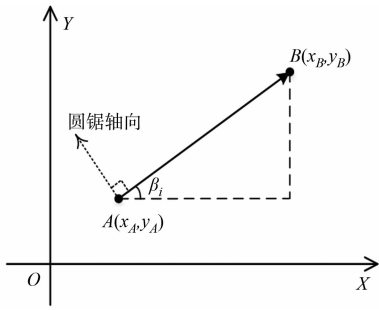


图 6 第 i 条线段与 X 轴正向的夹角
Fig. 6 Angle between i th line segment and positive direction of X axis

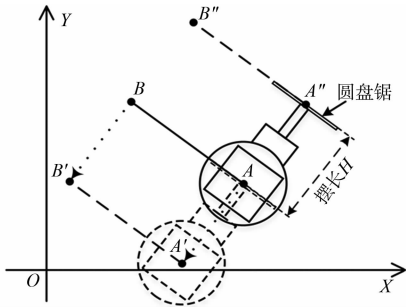


图 8 摆长偏置
Fig. 8 Offset of pendulum length

表 2 Galil 指令及指令说明

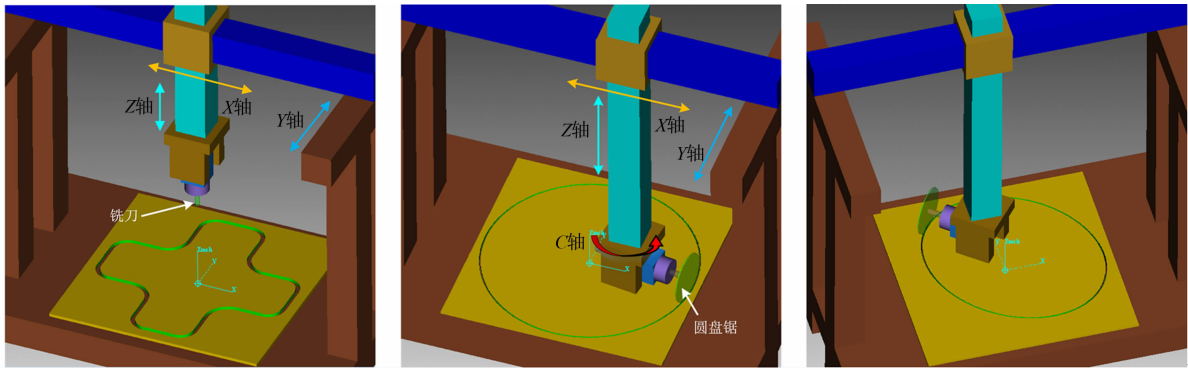
Tab. 2 Galil command and instructions

指令	指令字符	指令说明
动作指令	PR,,3000	指定 Z 轴的相对位置 3000
	SP,,2000	指定 Z 轴的速度为 2000
	BGC	开始 Z 轴运动
查询指令	PR,,?	查询 Z 轴目前设置的位移值
	SP,,?	查询 Z 轴目前的运动速度
	RPC	查询 Z 轴当前位置
程序流程	JP	跳转指令
控制指令	IF,ELSE,ENDIF	条件判断指令

可生成完整的 Galil 程序代码.

4 仿真与实验分析

采用仿真加工对生成的路径代码进行验证,以便提前发现并改正错误,减少实际加工中因反复试切造成的浪费和刀具损坏.采用 VeriCut 软件搭建四轴机床仿真模型,使用“fan0m.ctl”控制系统文件,调用 VeriCut 软件加载节 3 中生成的数控程序(G 代码),分别以铣刀路径代码和圆盘锯路径代码为例进行加工仿真,仿真结果如图 9 所示.



(a) 铣刀复杂轮廓加工 (b) 圆盘锯圆轮廓加工 (c) 圆盘锯椭圆轮廓加工

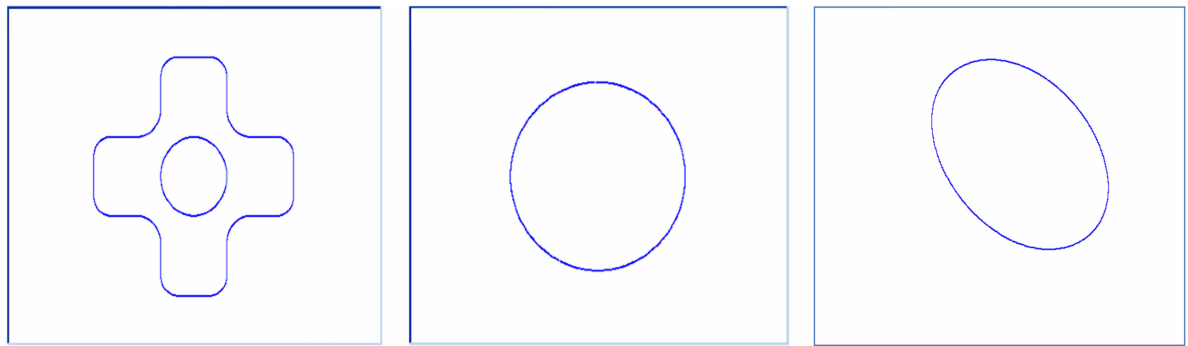
图 9 铣刀和圆盘锯加工仿真结果

Fig. 9 Simulation results of milling cutter and circular saw

圆盘锯路径仿真中,圆盘锯的半径设计为 150 mm,板材(毛坯)厚度设为 15 mm,圆的半径 $R=800$ mm, $\Delta\theta=0.05^\circ$,由式(3)计算得拟合误差 $e=0.175$ mm.椭圆的中心点坐标 $O'(100,100)$,长轴 $R_L=800$ mm,短轴 $R_S=650$ mm,倾斜角 $\alpha=135^\circ$, $\Delta\theta=0.05^\circ$,由参数方程(2)和式(5)计算得椭圆的最大拟合误差 $e=0.243$ mm.若要使拟合误差更小,只需将 $\Delta\theta$ 取更小的值.

由仿真结果可知:利用生成的 G 代码,铣刀和圆盘锯都可以加工出目标图形轮廓;且圆盘锯加工过程中,实现了 C 轴切向随动, $\Delta\theta$ 取更小的值可以满足更高的的机床精度要求.

使用 PC 机、运动控制卡和机床搭建实验平台,将节 3 中生成的 Galil 代码下载到运动控制卡,验证轴联动运行情况.实验初期,让机床空载运行并采集电机编码器信号,将加工路径实时显示,其空载走刀轨迹如图 10 所示.



(a) 铣刀复杂轮廓 (b) 圆盘锯圆轮廓 (c) 圆盘锯椭圆轮廓

图 10 铣刀与圆盘锯的空载走刀轨迹

Fig. 10 No load tool path of milling cutter and circular saw

由图 10 可知:生成的铣刀和圆盘锯路径 Galil 代码都成功实现了目标图形轮廓的走刀.

5 结束语

设计基于 PC 机和 Galil 运动控制卡的石材桥切机控制系统,实现了提取 DXF 图形信息并显示、小线段拟合复杂轮廓曲线、C 轴切向随动、摆长偏置等处理,并对拟合误差进行分析计算,分别生成铣刀和

圆盘锯刀路 G 代码和 Galil 代码。仿真加工和机床空载走刀结果证明了系统的可行性和直线拟合法的有效性。更进一步来说,该系统实现了圆盘锯加工圆弧和椭圆轮廓,对于采用圆盘锯加工其他形式复杂曲线的研究具有一定的借鉴意义和参考价值。

参考文献:

- [1] 谭金华. 我国石材加工设备行业的发展现状及市场前景[J]. 石材, 2013(12): 16-17. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3352. 2013. 12. 005.
- [2] 许国亮. 浅谈石材锯切机械的现状与发展[J]. 石材, 2016(11): 4-6. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3352. 2016. 11. 003.
- [3] CAO Shukun, YANG Shangwei, CHEN Xiusheng, *et al.* Milling machine design based on open CNC system[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011, 52/53/54: 887-892. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/AMM. 52-54. 887
- [4] 赵民. 近十年中国石材加工装备与技术评述[J]. 石材, 2016(2): 25-29. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005-3352. 2016. 02. 008.
- [5] XIAO Mingming. Development of intelligent controlled system for object special-shaped stone[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 244(1): 1139-1142. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/AMM. 52-54. 887.
- [6] LIU Wen. Automatic cutting equipment for processing stone floor tile: WO 2014008723 A1[P]. 2014-01-16.
- [7] YUSOF Y, LATIF K. New interpretation module for open architecture control based CNC systems [J]. Procedia Cirp, 2015, 26: 729-734. DOI: 10. 1016/j. procir. 2014. 07. 051.
- [8] 李显, 王明红, 王越. 基于开放式运动控制器 PMAC 的数控系统的研究[J]. 控制工程, 2007(增刊 2): 150-152. DOI: 10. 14107/j. cnki. kzgc. 2007. s2. 060.
- [9] 许贵, 晏辉. 浅谈意大利石材深加工设备[J]. 石材, 2017(4): 45-52. DOI: 10. 14030/j. cnki. scaa. 2017. 0072.
- [10] 廖原时. 国内外异型石材制品加工设备介绍[J]. 石材, 2016(12): 19-24. DOI: 10. 14030/j. cnki. scaa. 2016. 0276.
- [11] 金成毅, 熊瑞平. 一种基于 PLC 控制的石材切割机的液压系统[J]. 液压与气动, 2012(4): 48-51. DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-4858. 2012. 04. 018.
- [12] 刘玉梅. 面向石材异型制品的 CAD/CAM 一体化数控系统研究与开发[D]. 济南: 山东大学, 2008. DOI: 10. 7666/d. y1349116.
- [13] LÜ Zhenfei, LIU Jianqun, SHI Wei. Development of the open numerical control system for the stone bridge cutting machine[J]. Machine Tool and Hydraulics, 2013, 41(1): 100-103. DOI: 10. 3969/j. issn. 1001-3881. 2013. 01. 029.
- [14] WU Xianfu, LIU Jianqun, XU Dongwei, *et al.* Design and implementation of the circular saw CNC machining of the stone bridge cutting machine[J]. Key Engineering Materials, 2013, 579/580: 289-294. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/KEM. 579-580. 289.
- [15] XU Dongwei, LIU Jianqun, WU Xianfu, *et al.* Design and implementation of the stone elliptical arc contour fitting algorithm[J]. Key Engineering Materials, 2013, 579/580: 241-247. DOI: 10. 4028/www. scientific. net/KEM. 579-580. 241.
- [16] XU Dongwei, LIU Jianqun, LIN Gan. Design and implementation of non-circular curve parameterized fitting algorithm[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2014(4): 30-34. DOI: 10. 13462/j. cnki. mmtamt. 2014. 04. 008.
- [17] 朱虹. 基于等误差直线拟合优化算法的非圆曲线加工技术研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(2): 75-77. DOI: 10. 3969/j. issn. 1009-0134. 2013. 01(x). 21.
- [18] 祁享年, 汪杭军. 面向. Net 战略的 C# 语言[J]. 浙江农林大学学报, 2001, 18(3): 329-332. DOI: 10. 3969/j. issn. 2095-0756. 2001. 03. 025.
- [19] 王志喜, 王润云. 新一代程序设计语言 C# 中的面向对象机制[J]. 计算机工程与应用, 2003, 39(7): 107-110. DOI: 10. 3321/j. issn: 1002-8331. 2003. 07. 035.

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 崔长彩)