

立铣动力学系统模态参数辨识及实验

陈勇, 黄国钦

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 厦门 361021)

摘要: 设计完整的铣削加工模态分析实验和动力学实验,完成铣削力和振动信号的采集和分析,并以刀具振动系统为例提出模态参数辨识计算方法.对比动力学实验测量和计算机仿真信号的时域幅值、功率谱特性可知:基于实验模态分析实现系统模态参数辨识技术路线可行,预测精度较高,可较好地应用于铣削力-振动等信号及其时域和频域特性的动态仿真.

关键词: 立铣; 动力学; 模态分析; 参数辨识; 计算机仿真

中图分类号: TG 54; TP 391.9 **文献标志码:** A

实验模态分析技术是综合运用动态测试技术、振动理论、参数识别和信号处理方法等手段,实现系统模态参数辨识的过程^[1].其理论依据主要是通过实验测量出振动系统激励及其响应的时间历程,结合数字信号处理技术求解获得系统传递函数模型,然后运用参数辨识方法,进而求得系统模态参数或根据需要再进一步确定系统的物理参数^[2].为了验证基于再生振动和刀具偏心模型而改进的铣削加工动力学方程及其计算机仿真系统模态参数辨识可靠性和预测精度,包括验证铣削加工过程动态铣削力数学模型^[3]、刀具-工件系统振动特性以及基于系统辨识建立的传递函数模型精度^[4].本文设计一套完整的铣削加工模态分析实验和动力学实验,通过对相应系统模态参数辨识原理的深入分析,较好地实现了铣削力和铣削振动的时频域特性仿真,并进行了实验验证.

1 系统模态参数辨识原理

1.1 实验原理

目前,基于快速傅里叶变换技术的频响函数(或传递函数)的测试广泛使用宽频带激振技术,主要有阶跃激励、脉冲激励、快速正弦扫描等瞬态激励和纯随机、瞬态随机、周期随机等激励方法^[1].为有效测取铣削力-振动闭环控制系统传递函数并用模态分析理论实现参数辨识,文中模态分析实验采用常见的脉冲激励法,即锤击法.

模态分析实验原理如图 1 所示.从图 1 可知:刀具与工件上分别连接三相加速度计,脉冲锤由锤头、压电式力传感器和锤柄组成;传感器通过放大器和功率单元将测量的电荷信号转化为放大的电压信号;放大后的力信号和加速度信号连接在动态信号分析仪(Signal Calc Mobilyzer),用于分析其频域特性,进而通过模态分析软件 STAR 辨识获得系统模态参数.

实验信号测取过程中,脉冲锤产生的力可作为很窄的脉冲甚至冲击对待,因此在冲击工件的瞬间,

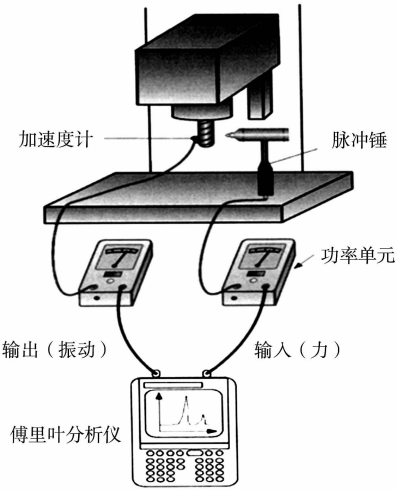


图 1 模态分析实验原理
Fig. 1 Experimental principle of modal analysis

需在上一次响应完全衰减后才能进行第二次冲击,否则频响函数的测量误差较大.尤其需要注意在对小阻尼系统模态测试时,如果分析频率高,而采样时间过短且响应衰减较慢,均容易导致响应信号被截断而产生能量泄漏.另外,由于力脉冲信号持续时间短,脉冲后面均为干扰信号,可采用加力窗函数的方法,获得理想的响应信号.

1.2 铣削力-振动系统传递函数模型及其参数辨识

按照图 1 所示实验原理,利用冲击锤和加速度计在铣削振动系统进给和法线方向上分别进行激振和拾振,并测量获得激励和响应信号.经模态分析软件处理之后,辨识获得铣削刀具-工件振动系统在对方向上的模态参数,进而利用模态分析理论求解建立振动系统的传递函数模型^[5-6].以刀具振动系统模态分析实验测量数据为例,分析传递函数模型及其参数的辨识过程.

刀具振动系统传递函数模型可以表示为 n 个独立的二阶微分方程,即

$$[H(s)] = \sum_{k=1}^n \frac{[R]_k}{s^2 + 2\xi_k \omega_{n,k}s + \omega_{n,k}^2}.$$

(1)

式(1)中: $\omega_{n,k}$, ξ_k 分别为刀具振动系统模态 k 的固有频率和模态阻尼比; s 为拉普拉斯算子; $[R]_k = [\alpha + \beta s]_k$ 代表系统模态 k 在 $[n \times n]$ 维传递函数矩阵 i 行 l 列的留数^[5], α, β 为对应方向上的模型系数.

由式(1)可以看出:传递函数模型的元素只是相应的分子形式(留数)不同,但都具有相同的分母.因此,传递函数曲线可由分母具有 $(2 \times n)$ 阶多项式的曲线拟合而成.由此可知,若已知传递函数拟合曲线,则可通过数据分析估算出各阶模态的留数、阻尼比和固有频率的数值,进而构建系统传递函数模型.通过以上分析可知:对于给定的固有模态数,在模态分析软件中代入 $s = j\omega$, 扫描感兴趣的频率所对应的模态参数,获得其最大共振幅值及其对应频率,相应传递函数实部为零的频率即为系统的固有频率.

由于采用加速度计测量铣削刀具-工件振动信号,故在测量前需将传感器的标定因子转化后输入至傅里叶分析仪,以获得振动位移信号的正确测量单位.即必须先将留数转化为位移单位(对各阶模态的留数除以 $\omega_d^2 \exp(j\pi)$, 按 $\alpha = 2(\xi \omega_n \sigma - \omega_d v)$, $\beta = 2\sigma$ 计算出各阶模态的 $\alpha_{i,j}$ 和 $\beta_{i,j}$, 其中 σ, v 为实验测量的模态留数系数)^[5].代入式(1),可得

$$h_{i,l}(s) = \sum_{k=1}^2 \frac{\alpha_{i,l,k} + \beta_{i,l,k}s}{s^2 + 2\xi_k \omega_{n,k}s + \omega_{n,k}^2},$$

(2)

即可求解获得刀具振动系统传递函数矩阵的进给和法线方向的直接和交叉传递函数模型.

在系统传递函数矩阵求解时还必须注意,傅里叶分析仪测量获得的传递函数矩阵通常是以每个频率的实部和虚部的频域形式存储的.虽然分析仪带有可将测量数据进行时域和频域表示形式转换的程序,但在计算时仍需借助模态分析软件,将测量的频域传递函数数据($h_{i,l}$)转换成数字计算形式,然后代入式(2)进行计算.

1.3 实验数据分析

刀具振动系统采用二阶模态辨识,辨识后获得的系统模态参数如表 1 所示.将模态参数输入铣削加工动力学仿真系统的传递函数模块^[7-8],结合动态铣削力离散计算机仿真信号和传递函数模型,即可求解获得刀具动态振动位移信号.表 1 中: $\alpha_{c,x}, \beta_{c,y}$ 为模态参数; ζ_c 为阻尼系数; ω_{nc} 为固有频率.

表 1 刀具振动系统模态参数辨识

Tab. 1 Modal parameters identification of cutter vibration system

参数	法向模态		进给方向模态	
	一阶	二阶	一阶	二阶
$\alpha_{c,x}$	$1.840\ 6 \times 10^{-4}$	$-8.363\ 1 \times 10^{-5}$	$-4.785\ 8 \times 10^{-6}$	$8.110\ 1 \times 10^{-5}$
$\beta_{c,y}$	0.177 6	0.879 6	0.177 6	1.022 0
ζ_c	0.120	0.020	0.024	0.030
$\omega_{nc}/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	452.77	1 148.50	516.00	1 407.66

2 铣削加工动力学实验

2.1 实验原理

铣削加工动力学实验用于动态加工时力信号和振动加速度信号的采集,其测量原理如图 2 所示.从

图 2 可知：三相加速度计分别与主轴端部和被加工工件相连，用于测量刀具-工件系统法向和进给方向的振动加速度信号，并将其输入动态信号分析仪，进而分析振动频域特性；压电式力传感器安装在工件与工作台之间，用于测量法向和进给方向的动态力信号，经电荷放大器和 A/D 转换后输入计算机中并用于后续信号分析。

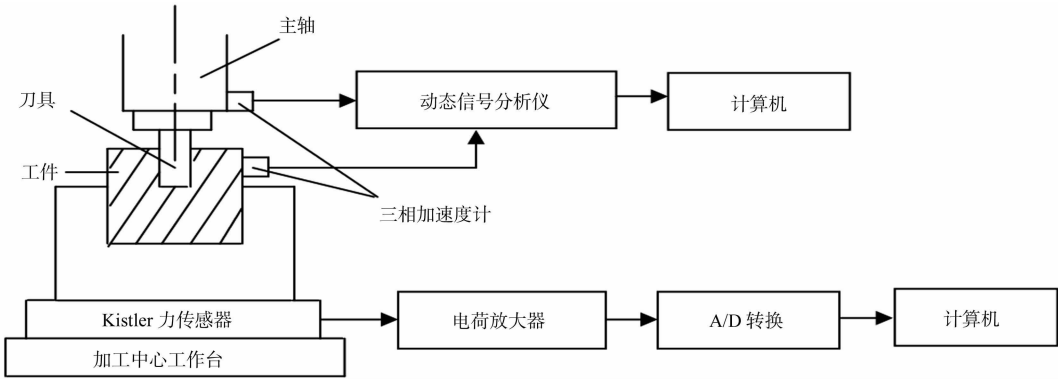


图 2 铣削动力学实验原理图

Fig. 2 Dynamic experimental principle of milling

为保证测量精度和数据分析可靠，采集测量信号时应注意以下 3 点。

- 1) 由于处于铣削加工区的旋转刀尖处的振动加速度信号无法测量，实验中只能通过测取主轴振动加速度信号代替刀具振动加速度信号。
- 2) 必须选用合理的加速度计重量和频域范围，以免对被测结构固有频率产生影响。
- 3) 必须在测量之前对力与振动加速度信号的测量通道相位特性进行标定，以免不同测量通道间的相位差引起测量信号误差。

2.2 实验条件

设计的若干组动力学实验，均在同一台 Cincinnati Arrow 2-500 型三轴立式 CNC 加工中心上进行。其中一组实验条件及刀具几何参数分别为：刀具材料和工件材料分别为高速钢和碳钢；刀具直径为 20 mm；刀具齿数为 3；刀具螺旋角为 30°；刀具径向前刀角为 5°；主轴转速 $1\,751\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ ；每齿进给量为 0.05 mm；径向切深 11 mm；轴向切深 4.92 mm；刀具偏心值 0.005 mm；刀具初始有效前角为 0.1π ；润滑方式为带切削液；铣削方式为逆铣；铣削力比例系数为 0.24；稳态铣削力系数为 $2\times10^9\text{ J}\cdot\text{m}^{-3}$ 。

2.3 实验数据分析

利用图 2 的实验装置和以上实验条件，铣削力实验采集信号经拟合后和仿真系统经时域仿真计算获得的动态铣削力(F)及其功率谱密度(PSD)，分别如图 3~5 所示。

通过表 2 计算刀具齿频 $\text{TPF}(F_{\text{TP}})=(n\times m)/60=87.55\text{ Hz}(549.8\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1})$ ，主轴振频 $\text{SF}(F_{\text{S}})=29.2\text{ Hz}(183.4\text{ rad}\cdot\text{s}^{-1})$ 。对比图 3~5 可知：在进给方向，铣削力实验测量幅值在 $-137.5\sim556.25\text{ N}$ 范围内变动时，时域仿真幅值在 $-44.4\sim533.3\text{ N}$ 范围内变动，最大幅值的预测误差控制在 4% 左右；在法线方向，铣削力实验测量幅值在 $-42.86\sim409.5\text{ N}$ 范围内变动时，时域仿真幅值在 $-23.0\sim430.7\text{ N}$

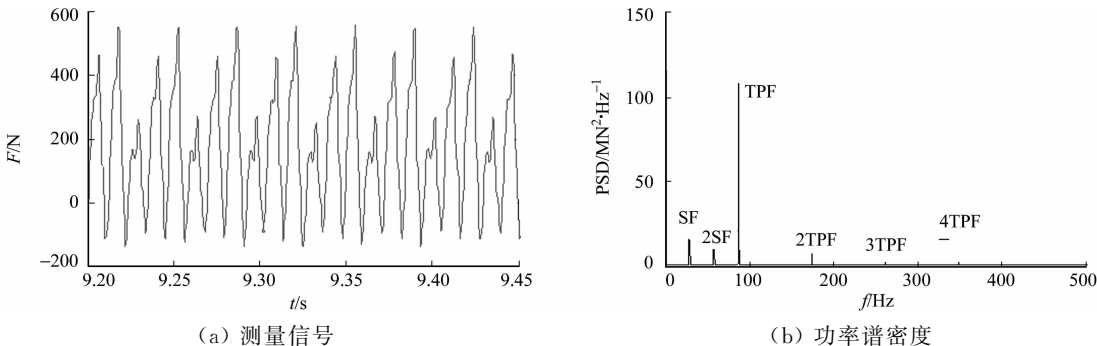


图 3 铣削力进给方向实验测量信号及其功率谱密度图形

Fig. 3 Experimental signals and their power spectral density of milling force in feed direction

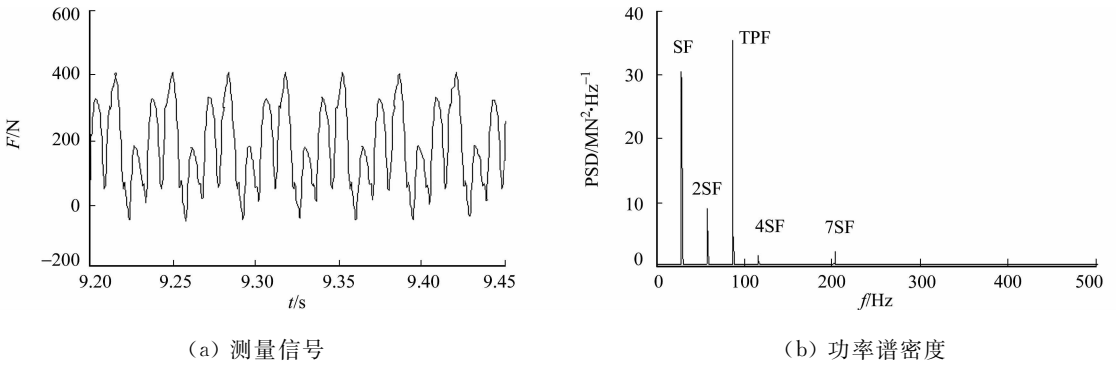


图 4 铣削力法线方向实验测量信号及其功率谱密度图形

Fig. 4 Experimental signals and their power spectral density of milling force in normal direction

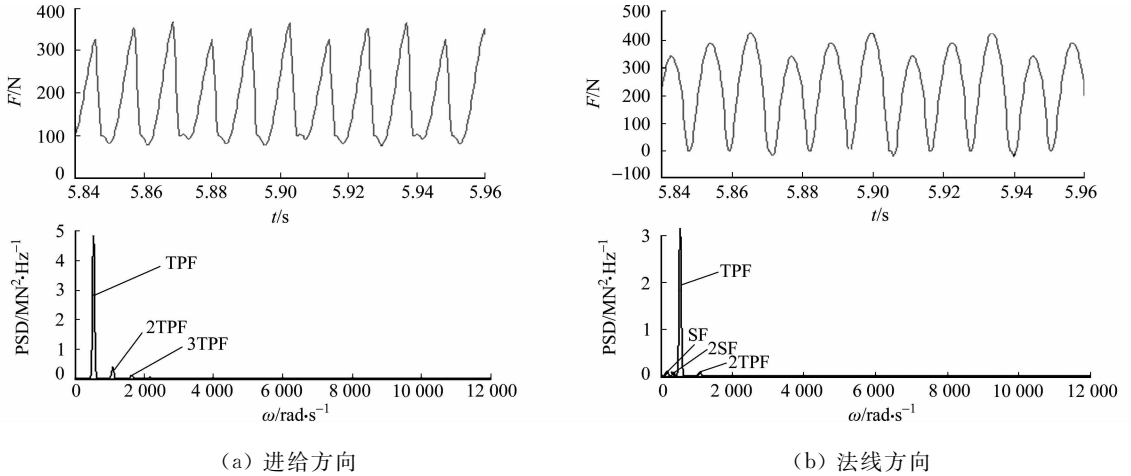


图 5 时域仿真生成的铣削力及其功率谱密度图形

Fig. 5 Milling force and its power spectral density by time-domain simulation

范围内变动,最大幅值预测误差控制在 5% 左右. 由于刀具离开工件的瞬间运动惯性无法较好地实现动力学仿真,使铣削力在最小幅值预测区间仍存在一定的误差.

同时从频谱分析图中也可看出:实验测量和时域仿真的铣削力信号谱峰值大都出现在刀具齿频的整数倍上,即 TPF, 2TPF 和 3TPF,并在主轴振频整数倍处出现少量谱峰. 由上述分析可知,基于实验模态分析辨识获得力-振动传递函数模型的动态仿真系统较准确地预测出了最大铣削力幅值,预测误差基本控制在 5% 范围内,且在幅值区间和频域特性的动态变化趋势与实验结果吻合较好.

3 铣削刀具振动时域仿真分析

刀具振动系统实验采集信号经拟合后和仿真系统结合模态参数辨识构建的传递函数模型,通过时域仿真计算获得的进给方向和法线方向振动位移(d)及其频谱分析,分别如图 6~8 所示.

由于铣削加工过程非常复杂且影响其动态特性预测精度的因素众多,如机床结构参数、解析模型简化程度、模态分析实验精度、传递函数辨识算法、力-振动加速度信号测取与转换精度、刀具-工件材料等. 这使得计算机时域仿真生成的振动位移结果,与真实实验测量值在振幅、频域特性及相位特性方面不可避免地存在一定误差^[9-11].

对比图 6~8 可以看出:在进给方向,刀具振动实验测量幅值在 $-0.4 \sim 0.63 \mu\text{m}$ 范围内变动时,时域仿真幅值在 $-0.33 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内变动,最大幅值预测误差达 27% 左右. 但值得注意的是,若采集时域仿真图中稳定振动区域的幅值范围在 $-0.22 \sim 0.67 \mu\text{m}$ 进行比对,则最大幅值预测误差可有效控制在 6.3% 左右. 这充分说明刀具切入和离开工件的瞬间冲击对振动系统预测精度影响较大. 同理可知:在法线方向,刀具振动实验测量幅值在 $-0.62 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 范围内变动,时域仿真幅值在 $-0.57 \sim 0.9 \mu\text{m}$ 范围内变动,最大幅值预测误差在 12.5% 左右.

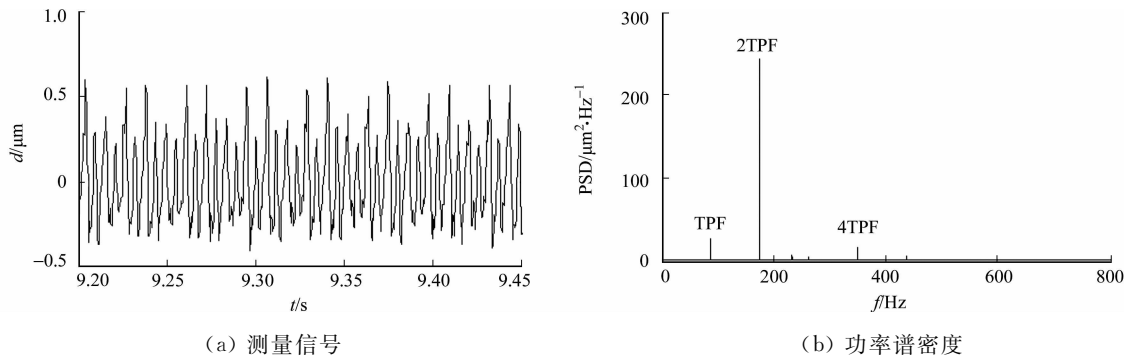


图 6 进给方向刀具振动实验测量信号及其功率谱密度图形

Fig. 6 Experimental signals and their power spectral density of cutter vibration in feed direction

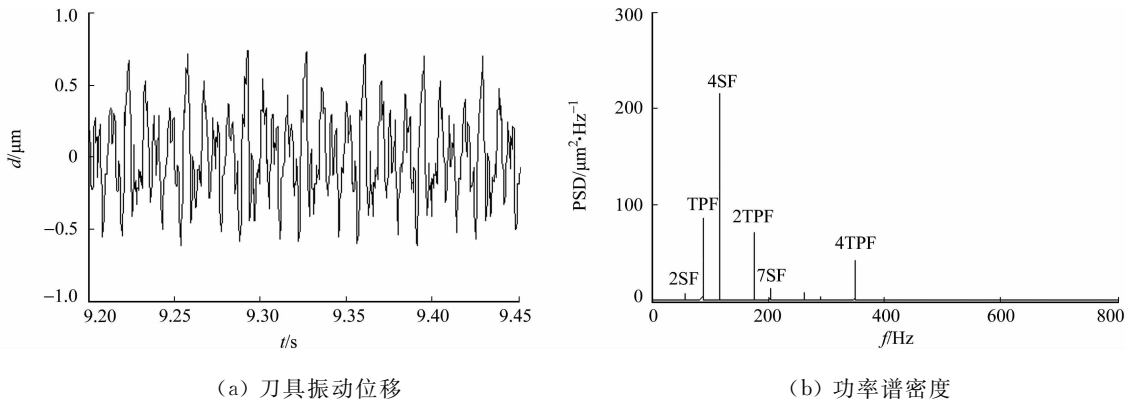


图 7 法线方向刀具振动实验测量信号及其功率谱密度图形

Fig. 7 Experimental signals and their power spectral density of cutter vibration in normal direction

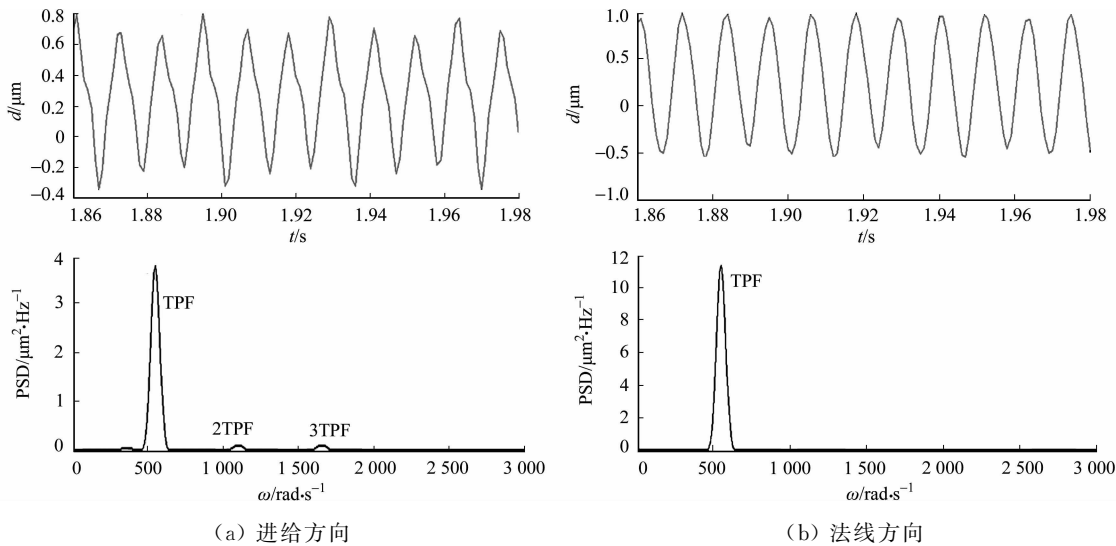


图 8 仿真生成的刀具振动位移及其功率谱密度图形

Fig. 8 Simulated vibration displacement of cutter and its power spectral density

从频谱分析图中可以看出：刀具系统在进给方向和法线方向振动的时域仿真信号，与实测信号的谱密度峰值均出现在刀具齿频的整数倍上，这与刀具切入工作区和离开工作区的瞬间会引起刀具-工件振动幅值产生较大变化的实际情况相吻合。由上述分析可知，经时域仿真的振动信号在最大幅值和频域特性及其动态变化趋势方面与实验测量值较为接近，表明基于实验模态分析理论获得振动系统参数的技术路线可行，仿真预测误差可基本控制在 13% 以内。

4 结论

1) 通过实验模态分析测量和辨识，获得铣削加工动力学系统二阶传递函数模型及其模态参数，其

技术路线可行,并可较好地用于铣削加工动力学动态特性(包括力和振动)的时域和频域特性的计算机仿真.对比动力学实验和仿真结果可以看出:基于模态参数辨识理论的力-振动系统时域仿真结果稳定可靠,预测精度较高.

2) 由于铣削加工过程受机床模态参数、刀具磨损状态和传动系统扭振等众多非线性因素影响,在系统传递函数建模和模态参数辨识过程中尚无法统一考虑,使得时域仿真最佳模态参数测试技术和辨识算法,以及如何获得更高求解精度,仍有待深入研究和改进完善.

参考文献:

[1] 傅志方,华宏星. 模态分析理论与应用[M]. 上海:上海交通大学出版社,2000:35-40.
[2] 韩光文. 辨识与参数估计[M]. 北京:国防工业出版社,1980:50-52.
[3] 陈勇,刘雄伟,俞铁岳,等. 再生振动和刀具偏心对立铣加工精度综合影响的研究[J]. 工具技术,2006,40(5):28-31.
[4] 陈勇,刘雄伟,俞铁岳. 立铣再生颤振闭环控制系统的设计与应用研究[J]. 华侨大学学报:自然科学版,2006,27(3):288-291.
[5] ALTINTAS Y. 数控技术与制造自动化[M]. 罗学科,译. 北京:化学工业出版社,2002:200-206.
[6] 余得浩,汤华中. 微分方程数值解法[M]. 北京:科学出版社,2003:135-140.
[7] 吴旭光,王新民. 计算机仿真技术与应用[M]. 西安:西北工业大学出版社,1998:120-124.
[8] 徐昕,李涛,伯晓晨,等. Matlab 工具箱应用指南-控制工程篇[M]. 北京:电子工业出版社,2000:70-75.
[9] 李锡文,杜润生,杨叔子. 铣削力模型的频域特性研究[J]. 工具技术,2000,34(7):3-6.
[10] 李沪曾,张国红,魏衡. 多齿端铣切削振动的计算机仿真[J]. 同济大学学报:自然科学报,2000,28(1):55-59.
[11] 郭卫,王昀睿. 切削参数智能仿真优化集成方法研究[J]. 制造业自动化,2001,23(8):25-28.

Modal Parameters Identification and Experiments of
Dynamic System on Vertical Milling Process

CHEN Yong, HUANG Guo-qin

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

Abstract: A series of experiments, including modal analysis experiments and milling dynamic experiments are designed and performed to collect and analyse milling force and vibration signals. Meanwhile, aking cutter vibration system as example, modal parameters identification methods are put forward. Then, time domain amplitude and power spectrum of dynamic experimental measurement and computer simulation signals are contrasted. The results show that the modal parameters identification technology based on experimental modal analysis are feasible. It has high prediction accuracy and can be better applied to simulate cutting force and vibration signals and their characters in time and frequency domains.

Keywords: vertical milling; dynamics; modal analysis; parameter identification; computer simulation

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 杨建红)