

文章编号 1000-5013(2006)01-0071-05

# 立铣加工切削力和振动的计算机仿真与实验

陈 勇 刘雄伟 俞铁岳

(华侨大学机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要** 在改进的非线性立铣加工铣削力数学模型和动力学方程基础上,采用变步长数值积分算法(四阶显式 Runge-Kutta 算法),建立动态铣削加工过程的计算机仿真模型.通过铣削加工动力学实验,对仿真模型输出的铣削力和铣削振动的时域特性预测精度进行验证,进一步对其频域特性进行分析.结果表明,该仿真模型作为高效低耗的研究平台,可较好地用于立铣加工铣削力与铣削振动的预估及其频域特性分析.

**关键词** 立铣加工, 切削力, 振动, 动力学, 计算机仿真

**中图分类号** TG 540.214; TP 391.9

**文献标识码** A

铣削加工振动机理的复杂性,在很大程度上限制了其理论在实际生产中的深层次应用,很难适应灵活多变的现代化制造系统的要求<sup>[1]</sup>.目前大多数企业在常规铣削加工中,包括使用计算机数控加工系统,由于无法预知加工过程中刀具和工件的动态振动特性,使得在加工过程中容易产生较大振动,导致工件加工表面质量降低,并影响刀具乃至机床的使用寿命.为避免或减小较大铣削振动的出现,实际加工中常被迫强制改变铣削加工参数,如降低铣削深度或进给速度.但这又妨碍充分利用机床额定功率,导致加工周期或加工成本上升.本文在改进的动态铣削力时滞非线性数学模型的基础上,研制实用且预测精度较好的铣削加工过程计算机仿真模型.同时,对建立相应的计算机仿真模型的算法和仿真过程进行了深入研究,较好地实现了动态铣削力和刀具-工件系统振动特性的预估和实验验证.

## 1 改进的动态铣削力数学模型

在综合考虑再生振动效应和刀具偏心模型对动态铣削过程影响的基础上,作者建立了一种实用有效的动态铣削力时滞非线性数学解析模型<sup>[2]</sup>.在此,以圆柱螺旋铣刀顺铣加工切削力为例简述如下.圆柱螺旋铣刀实体参数的几何关系,如图 1 所示.可以看出,作用在螺旋铣刀上的瞬时切削力是沿着螺旋槽轴向连续变化的空间分布力.在距基面为  $z$ ,且在与铣刀轴线垂直的平面内,螺旋铣刀第  $i$  个刀齿在微元单位  $dz$  上的瞬时法线方向( $X$  向),以及进给方向( $Y$  向)上的铣削分力  $dF_{ix}$  和  $dF_{iy}$  可表示为<sup>[2]</sup>

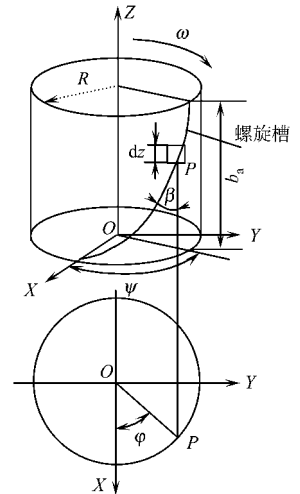


图 1 圆柱螺旋铣刀实体图

$$\left. \begin{aligned} dF_{ix} &= -uR\cot\left[(f_t + y_c - y_c(-T)) - y_w + y_w(-T)\right](\sin^{1.8} i + c_1 \sin^{0.8} i \cos i) + \\ &\quad (x_c - x_c(-T) - x_w + x_w(-T))(\sin^{0.8} i \cos i + c_1 \sin^{-0.2} i \cos^2 i + \\ &\quad t_i(-i)(\sin^{0.8} i + c_1 \sin^{-0.2} i \cos i)Jd i, \\ dF_{iy} &= -uR\cot\left[(f_t + y_c - y_c(-T)) - y_w + y_w(-T)\right](\sin^{0.8} i + \cos i - c_1 \sin^{1.8} i) + \\ &\quad (x_c - x_c(-T) - x_w + x_w(-T))(\sin^{-0.2} i \cos^2 i - c_1 \sin^{1.8} i + \\ &\quad t_i(-i)(\sin^{0.8} i \cos i - c_1 \sin^{0.8} i)Jd i. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

收稿日期 2005-07-11

作者简介 陈 勇(1974-),男,讲师,博士,主要从事铣削加工动力学研究. E-mail:chenyong@hqu.edu.cn

基金项目 福建省自然科学基金资助项目(A0540003);国务院侨务办公室科研基金资助项目(04QZR05)

对照图 1 和式(1),参数  $R$  为刀具半径;  $\gamma$  为刀具螺旋角;  $f_t$  为铣削加工每齿进给量;  $y, y(-T)$  和  $x, x(-T)$  分别表示因再生振动效应引起的当前刀齿和相邻前一刀齿经过该位置时的进给方向( $Y$  向)和法线方向( $X$  向)的动态振动位移,下标  $c$  和  $w$  分别表示螺旋铣刀与工件;  $c_1$  为切向与径向切削力的比例系数;  $i$  为第  $i$  个刀齿在微元单位  $dz$  的齿位角;  $t_i(i)$  由于刀具偏心引起的动态切削厚度偏差. 变量  $u = u_0(1 - \frac{e - e_0}{100})(\frac{t_0}{f_t})^{0.2}$ . 其中,  $u_0$  为稳态切削力系数,可通过切削实验获得;  $t_0$  为初始切削厚度;  $e_0$  为刀具初始有效前刀角;  $e$  为刀具有效前刀角. 根据式(1)计算出的第  $i$  个刀齿在微元单位  $dz$  上的瞬时切削力,沿着刀具螺旋槽逐步轴向积分,即可得到顺铣加工时每个切削刃的总切削力. 最后将  $m$  个铣刀齿上的切削力累积后,可得整个铣削刀具法线方向和进给方向所受的总切削力<sup>[2]</sup>.

2 铣削加工过程计算机仿真模型

2.1 铣削加工动力学方程

通过激振试验表明,在铣床切削部位法线和进给坐标方向测得的相对动柔度曲线中,主轴振型最突出,其他振型均较小. 因此,可以用相互垂直的两自由度弹性-阻尼系统来构成基本的铣削加工动力学物理模型<sup>[3]</sup>. 系统参数可取在  $X$  和  $Y$  方向上,与固有频率相接近的主轴振型的模态参数. 对于一般铣削加工过程,其动力学方程可以表达为

$$F_x(t) = m_x \ddot{x}(t) + c_x \dot{x}(t) + k_x x(t), \quad F_y(t) = m_y \ddot{y}(t) + c_y \dot{y}(t) + k_y y(t).$$
 (2)

在式(2)中,  $x(t), y(t), \ddot{x}(t), \ddot{y}(t), \dot{x}(t), \dot{y}(t)$  分别为刀具-工件系统在  $X$  和  $Y$  方向上的振动位移、振动加速度和振动速度;  $m_x, m_y, c_x, c_y, k_x, k_y$  分别为刀具-工件系统在  $X$  和  $Y$  方向上的模态质量、模态阻尼和模态刚度. 可以看出,式(2)中的两个方程均为二阶常系数非齐次线性微分方程. 由于铣削加工过程的再生振动效应,使得方程左边的铣削力表达式  $F(t)$  项含有时滞非线性项. 对于这类方程,采用解析法和一般的数值方法很难求解获得其铣削振动位移的解析表达式,可采用在时域范围内计算机仿真的方法寻求其数值解.

2.2 计算机仿真的求解算法和过程

应用四阶显式 Runge-Kutta 算法实现铣削加工计算机仿真的计算过程,如图 2 所示. 完成铣削加工

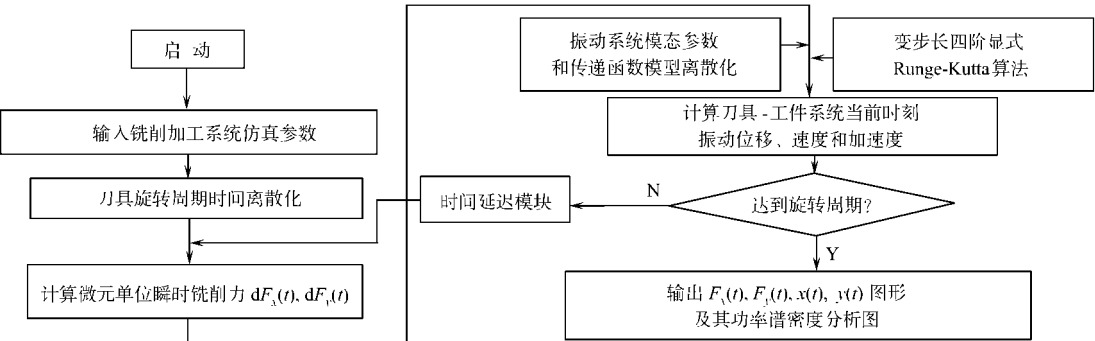


图 2 铣削计算机仿真流程图

过程的计算机仿真,必须将建立的铣削系统的解析物理模型转变成能够在计算机上运行的仿真模型. 仿真系统数学模型是根据计算机的特点、仿真方式、计算方法、精度要求等,将原始系统数学模型转换为计算机程序. 由于计算机只能进行离散的数值计算,因而必须推导出连续系统的递推数学公式,将其转化为能在计算机上运行的仿真模型. 这也就是计算机仿真算法的设计过程. 对于本文提出的二阶常系数非齐次微分方程,用传统的解析法求解此类方程显得无能为力,一般均采用数值解法. 求解此类问题的数值解法,通常有离散递推法、基于数值微分的 Eluer 方法、改进的 Eluer 方法、显式 Runge-Kutta 方法、Simpson 方法和 Adams 方法<sup>[4]</sup>. 通过对上述多个求解算法的求解效率、求解精度及其稳定性和收敛性的对比分析<sup>[4]</sup>,本文在求解该动力学方程时采用收敛的四阶显式 Runge-Kutta 方法. 同时,为保证 Runge-Kutta 公式的局部截断误差满足精度要求,可通过对比节点处的计算值的局部截断误差与迭代公差的关系,采用变步长的数值解法.

3 铣削加工动力学实验验证

3.1 实验原理

为了验证改进的非线性铣削力数学模型,以及建立的计算机仿真模型的有效性和可靠性,设计若干组具有不同铣削加工过程参数和刀具几何参数的铣削加工动力学试验. 在同一台三轴立式 CNC 加工中心(Cincinnati Arrow2-500)上完成铣削力信号和振动加速度信号的采集,实验测量原理图如图 3 所示. 从图中可以看出,在主轴端部和加工工件上分别连接三相加速度计,用于测量法线方向和进给方向的铣削振动加速度信号. 将测量获得的加速度信号输入动态信号分析仪,用于分析主轴和工件铣削振动的频域特性. 在工件与运动工作台之间安装 Kistler 压电式力传感器,用于测量铣削加工过程法线方向和进给方向的动态切削力信号. 测量信号经电荷放大器和 A/D 转换后,输入计算机中存储,并用于后续信号分析.

3.2 铣削加工实验条件

为验证建立的计算机仿真模型运行的可靠性及预测精度,可设计一组仿真条件完成动态铣削加工过程的研究.

仿真设定的参数包括仿真算法为变步长的四阶显式 Runge-Kutta 算法,仿真时间取为 2 s,原始仿真步长取为 0.000 2,迭代允差取为 0.001. 仿真和验证实验选取的铣削加工参数和刀具几何参数,是基于铣削再生颤振机理和加工消耗能量分析优化选择获得<sup>[5]</sup>,如表 1 所示. 结合实验模态分析技术并经模态分析软件 STAR 辨识,可获得计算刀具-工件系统铣削振动所需的复模态振型形式. 其加工振动系统二阶模态参数和传递函数模型,如表 2 所示.

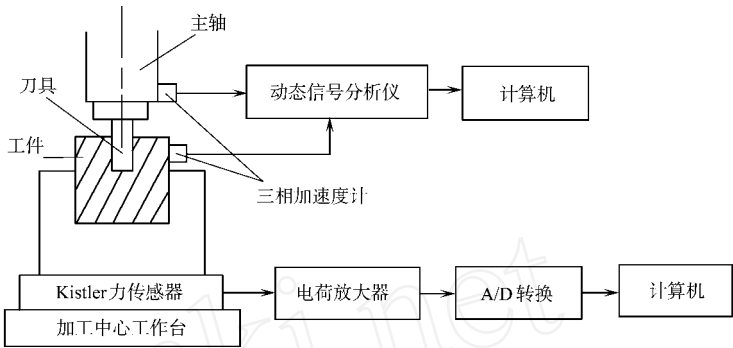


图 3 铣削动力学测量实验原理图

表 1 铣削加工实验条件

|         |                                     |         |       |          |          |
|---------|-------------------------------------|---------|-------|----------|----------|
| 工件材料    | 刀具材料                                | 刀具齿数    | 刀具螺旋角 | 刀具直径     | 刀具径向前刀角  |
| 碳钢 EN8  | 高速钢                                 | 3       | 30°   | 20 mm    | 5°       |
| 每齿进给量   | 主轴转速                                | 轴向切深    | 径向切深  | 刀具初始有效前角 | 刀具偏心值    |
| 0.05 mm | 1 751 r·min <sup>-1</sup>           | 4.92 mm | 11 mm | 0.1      | 0.005 mm |
| 切向力比例系数 | 稳态切削力系数                             | 铣削方式    | 润滑方式  |          |          |
| 0.24    | 2×10 <sup>9</sup> J·m <sup>-3</sup> | 逆铣加工    | 带切削液  |          |          |

表 2 振动系统二阶模态参数及其传递函数模型

| 系统  | 模态方向 | 固有频率 $\zeta$                     | 阻尼系数 $\gamma$         | 传递函数模型   |
|-----|------|----------------------------------|-----------------------|--|
| 工 具 | 进给方向 | $\zeta_1 = 3.471\ 9 \times 10^3$ | $\gamma_1 = 0.115\ 1$ | $H(s) = \frac{1.092\ 58 \times 10^{-2} s}{s^2 + 799.2s + 1.205\ 4 \times 10^7} + \frac{-5.508\ 1 \times 10^{-5} s}{s^2 + 206.4s + 7.889 \times 10^5}$      |
|     |      | $\zeta_2 = 888.215\ 7$           | $\gamma_1 = 0.116\ 2$ |  |
|     | 法线方向 | $\zeta_1 = 3.551\ 6 \times 10^3$ | $\gamma_1 = 0.240\ 0$ | $H(s) = \frac{-6.912\ 7 \times 10^{-2} s}{s^2 + 1\ 678.8s + 1.261\ 4 \times 10^7} + \frac{4.755\ 4 \times 10^{-4} s}{s^2 + 642.8s + 7.796\ 4 \times 10^5}$ |
|     |      | $\zeta_2 = 882.972\ 1$           | $\gamma_2 = 0.360\ 0$ |  |
| 工 件 | 进给方向 | $\zeta_1 = 2.607\ 0 \times 10^3$ | $\gamma_1 = 0.115\ 5$ | $H(s) = \frac{1.00 \times 10^{-3} s}{s^2 + 602s + 6.796 \times 10^6} + \frac{-2.566 \times 10^{-6} s}{s^2 + 173.2s + 7.057\ 39 \times 10^5}$               |
|     |      | $\zeta_2 = 840.075\ 5$           | $\gamma_2 = 0.103\ 1$ |  |
|     | 法线方向 | $\zeta_1 = 2.722\ 9 \times 10^3$ | $\gamma_1 = 0.098\ 6$ | $H(s) = \frac{-6.912\ 7 \times 10^{-2} s}{s^2 + 1\ 678.8s + 1.261\ 4 \times 10^7} + \frac{4.755\ 4 \times 10^{-4} s}{s^2 + 642.8s + 7.796\ 4 \times 10^5}$ |
|     |      | $\zeta_2 = 511.406\ 3$           | $\gamma_2 = 0.373\ 5$ |  |

3.3 铣削力仿真及实验验证

根据表 1 所述铣削实验条件,所获得的动态铣削力实验信号经拟合及计算机仿真模型时域仿真后,生成的动态铣削力图形如图 4 所示. 图中实线、虚线分别表示仿真计算和实验测量铣削力信号拟合结果. 从图中可以看出,计算机仿真模型较为准确地预测出了铣削加工过程中的最大铣削力幅值,而且铣削力的动态变化趋势吻合得较好. 表明建立的计算机仿真模型,对于同等铣削实验条件下的动态铣削力具有较好的预测精度. 但计算机仿真模型无法准确地表述当刀具离开工作区时,由于振动的衰减特性引

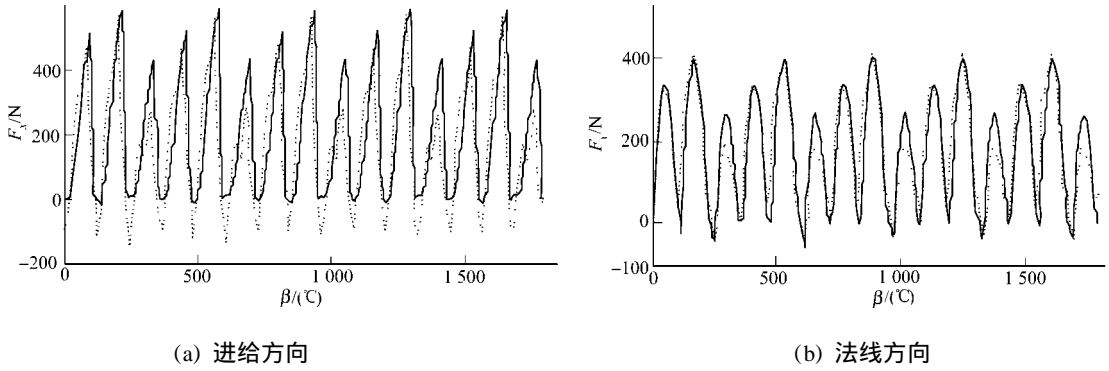


图 4 动态铣削力仿真结果和实验测量信号拟合图

起的动态铣削力的波动,而只是假设当刀具离开切削区后,铣削力变为零.这些预测误差由于比例较小,并不会对工件的最终表面质量产生很大的影响.

3.4 铣削振动仿真及实验验证

铣削加工过程是一个非常复杂且影响因素众多的过程,使得采用数值仿真生成的振动位移与真实实验测得的铣削振动在振幅、相位特性,以及频域特性方面存在一定的误差.现以刀具振动为例,对基于模态分析实验获得的刀具-工件振动系统的仿真预测与实验测量振动信号,以及两者的频域特性进行对比和分析.如前所述,实验中采用测取主轴端部的加速度信号来代替反映刀具的振动状态,并经过对加速度信号的两次积分来计算获得刀具的振动位移.在此条件下,实验测量获得的刀具振动系统在进给方向和法线方向上,其振动位移及频谱分析如图 5,6 所示.图中, $S$  为功率谱密度,  $\omega$  为频率.利用铣削加工过程计算机仿真模型,根据模态分析实验获得的传递函数模型及仿真计算得到的铣削力信号,求解得

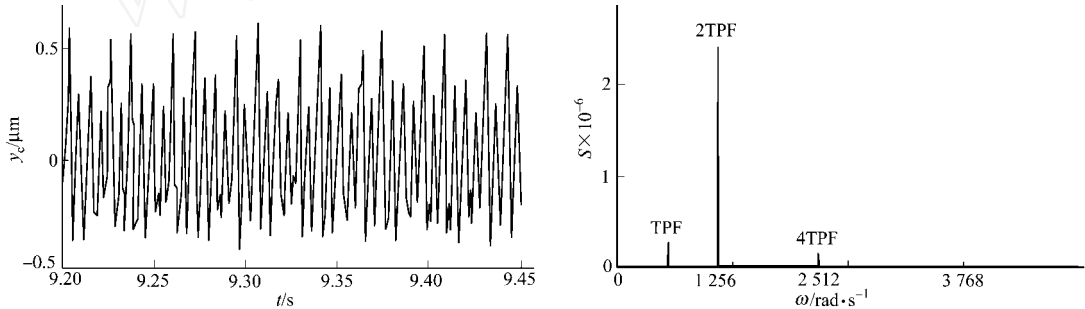


图 5 进给方向刀具振动实验测量信号及其功率谱密度图形

到的进给方向和法线方向上的刀具振动位移及其频谱分析图形,如图 7 所示.从图 5~7 可以看出,由于铣削加工过程断续切削的固有特性,使得刀具在切入和离开工作区的瞬间,刀具-工件振动系统具有较

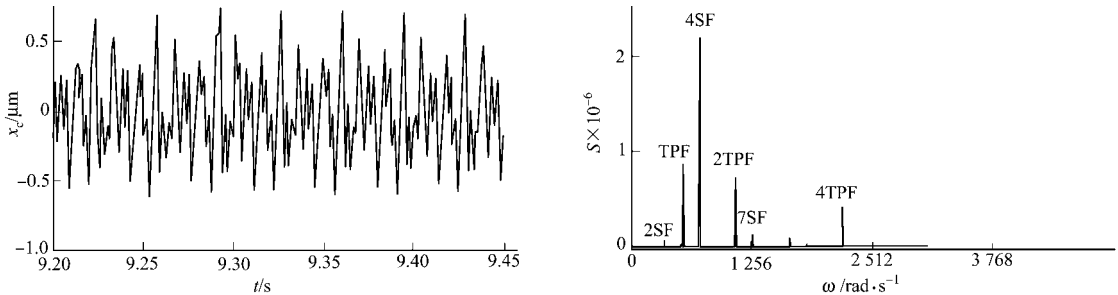


图 6 法线方向刀具振动实验测量信号及其功率谱密度图形

大的冲击,进而引起幅值有较大变化.在进给方向和法线方向上的刀具系统,其振动仿真与实测振动信号频谱分析的谱峰值均出现在刀具齿频的整数倍上.但由于实际铣削加工过程中的某些影响因素,导致刀具振动状态发生改变.使刀具系统的实测振动信号与仿真信号在不同的齿频或主轴频率整数倍处出现不同的谱峰变化,甚至某些区域内的谱峰在计算机仿真过程中无法准确进行预测.导致这一误差出现的另外两个重要原因还在于,一方面计算机仿真生成的振动信号样本长度有限.在用傅里叶进行频谱分析时,常常会由于频率截断而产生谱线泄漏(能量泄漏)、分辨率低,以及信号被淹没等缺陷造成.另一方

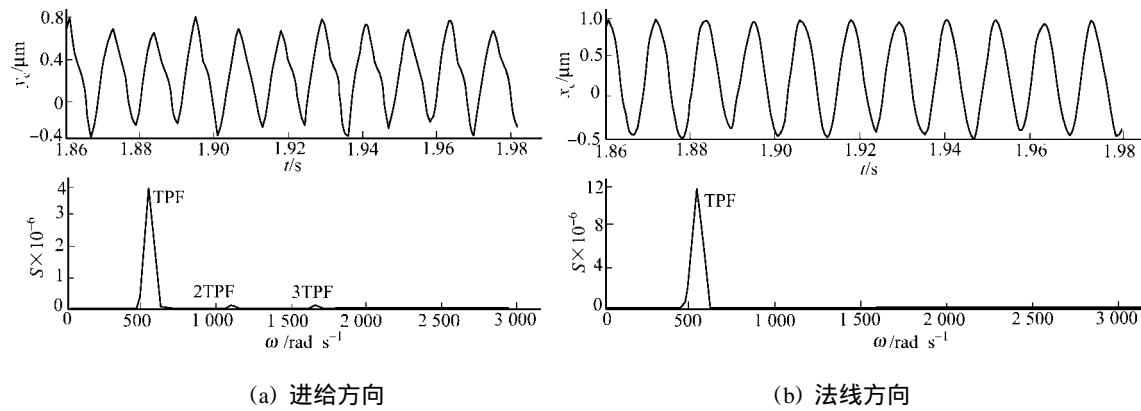


图 7 仿真生成的刀具振动位移及其功率谱密度图形

面,是由于模态分析实验中的测试精度及模态分析软件的精度等的影响,需要对计算机仿真过程及模态分析实验做出进一步优化和改进.

4 结束语

(1) 本文在改进的非线性铣削力数学模型和铣削加工动力学方程的基础上,通过对计算机仿真算法的深入研究,确定采用变步长数值积分算法(四阶显式 Runge- Kutta 算法)建立其计算机仿真模型. (2) 对比铣削加工实验和计算机仿真模型的铣削力和振动信号及其频谱分析结果,可以验证改进的非线性铣削力数学模型和相应的计算机仿真模型具有较好的稳定性和预测精度. 这为今后深入研究铣削振动的预估和铣削加工参数的优化,提供了可靠的理论依据. (3) 铣削加工动力学的计算机仿真精度,受到机床模态参数、刀具磨损状态、计算机仿真算法及模态分析实验精度等因素影响. 因此,为提高非线性铣削加工动力学建模和仿真的预测精度,还必须结合上述影响因素作进一步的改进和完善.

参 考 文 献

1 李沪曾 ,Spur G,郭大津. 机床振动学研究的历史回顾与展望[J]. 同济大学学报(自然科学版), 1994, 22(3):378 ~ 384  
2 陈 勇,刘雄伟,俞铁岳. 一种改进的非线性铣削力建模与仿真[J]. 华侨大学学报(自然科学版),2005, 26(3):291 ~ 294  
3 刘晓胜,吴乐男. 基于电流信号的铣削颤振识别技术研究[J]. 机械工程学报,2000, 36(4):25 ~ 29  
4 余得浩,汤华中. 微分方程数值解法[M]. 北京:科学出版社,2003. 45 ~ 47  
5 陈 勇,刘雄伟,俞铁岳,等. 基于 VSSPMP 的非线性立铣加工过程振动控制研究[J]. 工具技术, 2005, 39(5):29 ~ 33

Computer Simulation and Experimental Research of Cutting Force  
and Vibration in Peripheral Milling Process

Chen Yong Liu Xiongwei Yu Tiejue

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

**Abstract** On the basis of an improved nonlinear mathematic model of peripheral milling force and its dynamics equations, a computer simulation model of milling dynamics is developed by using variable step numerical integral algorithm based on an explicit fourth-order Runger- Kutta formula. Some experiments are conducted to verify the prediction accuracy of time characters of cutting force and vibration derived from the proposed model. Moreover, their frequency characters are analyzed. The results reveal that the model can be well used to predict cutting force and vibration of milling process and analyze their frequency characters.

**Keywords** peripheral milling, cutting force, vibration, dynamics, computer simulation