

铣削颤振稳定域叶瓣图确定方法研究

迟玉伦, 李郝林

(上海理工大学 机械工程学院 上海 200093)

摘 要: 铣削颤振是一种非稳定性振动, 会损伤工件表面质量, 降低切削效率。本文提出了通过理论模型计算与实验设计相结合方法确定铣削颤振稳定域叶瓣图。基于实验测量数据和理论分析计算, 利用遗传算法来优化确定各常数参数, 从而绘制出与实验测量结果相一致的铣削颤振稳定域叶瓣图。该叶瓣图可有效应用到该机床实际铣削加工过程中的参数选择, 对提高铣削加工效率和加工质量有重要意义。

关键词: 铣削; 颤振稳定域; 实验设计; 遗传算法

中图分类号: TH123+.1

文献标识码: A

DOI: 10.13465/j.cnki.jvs.2014.04.016

Determination of chatter stability field lobe diagrams for a milling processing

CHI Yu-lun, LI Hao-lin

(Mechanical Engineering College, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Milling chatter is a kind of instable vibration, it usually affects workpiece surface quality and reduces productivity efficiency. Here, a method to determine milling chatter stability field lobe diagrams was proposed based on a theoretical model and a test design. The genetic algorithm was used to optimize and determine constant parameters based on the measurement data and the theoretical calculation. Then, the stability field lobe diagrams were made to be consistent with the test results. The obtained lobe diagrams could be used to choose parameters for milling processing with the milling machine used in the test. They were significant to improve milling efficiency and processing quality.

Key words: milling; chatter stability field; test design; genetic algorithm

随着高速数控机床向高加工精度、高生产效率的发展, 伴随切削加工一个严重问题就是颤振。颤振是发生在切削过程中一种强烈的自激振动, 颤振会严重制约切削效率、降低零件的加工精度、损坏刀具甚至是机床。目前, 很多学者对颤振现象进行了大量工作^[1-7]。避免颤振发生最有效方法是使用颤振稳定性叶瓣图。稳定性叶瓣图是把切削稳定区、非稳定区表示成轴向切削深度与主轴转速之间的函数^[2]。Altinas 等^[1]提出的颤振稳定域求解方法已经得到了实验验证^[3]。由于铣削过程的复杂性以及各参数测量计算方法等原因, 无法准确确定刀具刚度、径向切削力系数、切向切削力系数等常数参数, 致使铣削颤振稳定域叶瓣图难以准确确定。Quintana 等^[6-7]提出了通过切削倾斜工件表面的实验设计方法来有效确定颤振稳定域叶瓣图。但该实验设计方法往往需要上百次切削实验

才能完整确定出颤振稳定域叶瓣图, 在实际加工中难以得到应用。

基于上述研究, 本文提出了通过理论模型计算与实验设计相结合方法确定铣削颤振稳定域叶瓣图。在建立铣削颤振稳定域数学模型基础上, 选取 4~7 个主轴转速对斜表面工件进行切削实验, 实验过程中利用声发射信号分别识别出对应于各主轴转速的临界切削深度。运用锤击法获得振动系统固有频率和阻尼比。基于实验测量数据和理论模型计算, 利用遗传算法来优化确定各常数参数, 从而绘制出与实验测量结果相一致的铣削颤振稳定域叶瓣图。该叶瓣图可有效应用到该机床实际铣削加工过程中的参数选择, 对提高铣削加工效率和加工质量有重要意义。

1 铣削颤振稳定性叶瓣图数学模型

如图 1 所示, 铣削系统可简化为 X、Y 两个方向上的二自由度振动系统^[8-9], 以用矩阵形式表示的动态铣削力为:

$$\{F(t)\} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} [A_0] \{\Delta(t)\} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金项目(51005158); 上海高校青年教师培养资助计划

收稿日期: 2012-11-19 修改稿收到日期: 2013-03-15

第一作者 迟玉伦 男, 博士生, 1982 年 10 月生

式中, K_{tc} 为径向切削力系数, a_p 为轴向切削深度, $\{\Delta(t)\}$ 为动态位移向量, $[A_0]$ 为平均方向性系数矩阵。

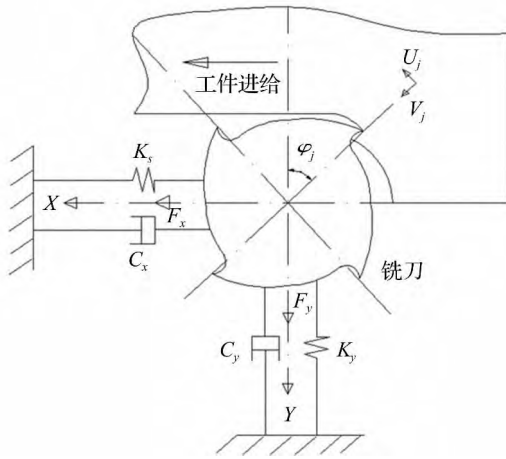


图1 铣削系统动力学模型

Fig. 1 Milling system dynamic model

由于 $[A_0]$ 只有在刀具切入角 ϕ_{st} 与切出角 ϕ_{ex} 之间时才有效, 即 $g(\phi_j) = 1$, 故上式可表示为:

$$[A_0] = \frac{1}{\phi_p} \int_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} [A(\phi)] d\phi = \frac{N}{2\pi} \begin{bmatrix} a_{xx} & a_{xy} \\ a_{yx} & a_{yy} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, 平均方向系数可表示为:

$$\left. \begin{aligned} a_{xx} &= \frac{1}{2} [\cos 2\phi - 2K_r\phi + \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ a_{xy} &= \frac{1}{2} [K_r \cos 2\phi - 2\phi - \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ a_{yx} &= \frac{1}{2} [K_r \cos 2\phi + 2\phi - \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \\ a_{yy} &= \frac{1}{2} [-\cos 2\phi - 2K_r\phi - \sin 2\phi]_{\phi_{st}}^{\phi_{ex}} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, K_r 为径向切削力系数 K_{rc} 与切向切削力系数 K_{tc} 之比。

考虑到再生效果的动态铣削力可表示为:

$$\{F\} e^{i\omega_c t} = \frac{1}{2} a_p K_{tc} (1 - e^{-\omega_c T}) [A_0] [\Phi(i\omega_c)] \{F\} e^{i\omega_c t} \quad (4)$$

式中, ω_c 为颤振频率, $[\Phi(i\omega_c)]$ 为刀具与工件频响函数之和, 如下式:

$$[\Phi(i\omega)] = \begin{bmatrix} \Phi_{xx}(i\omega) & \Phi_{xy}(i\omega) \\ \Phi_{yx}(i\omega) & \Phi_{yy}(i\omega) \end{bmatrix} \quad (5)$$

式(4)有非奇异解的条件为:

$$\det\{[I] - \Lambda[\Phi_0(i\omega_c)]\} = 0 \quad (6)$$

式中, $[I]$ 为单位矩阵, $[\Phi_0(i\omega_0)]$ 为有向传递函数矩阵。

该特征方程的特征值, 可表示为:

$$\Lambda = -\frac{N}{4\pi} a_p K_{tc} (1 - e^{-\omega_c T}) \quad (7)$$

式中, N 为刀齿数, 忽视交叉传函 Φ_{xy} 和 Φ_{yx} , 可以得到特征值 Λ 为:

$$\Lambda = -\frac{1}{2a_0} (a_1 \pm \sqrt{a_1^2 - 4a_0}) \quad (8)$$

式中:

$$a_0 = \Phi_{xx}(i\omega_c) \Phi_{yy}(i\omega_c) (a_{xx}a_{yy} - a_{xy}a_{yx}) \quad (9)$$

$$a_1 = a_{xx}\Phi_{xx}(i\omega_c) + a_{yy}\Phi_{yy}(i\omega_c)$$

因为传递函数为复数, 故其特征值包含实部和虚部, 而轴向切深为实数, 将 $\Lambda = \Lambda_R + i\Lambda_I$ 及 $e^{-\omega_c T} = \cos(\omega_c T) - i\sin(\omega_c T)$ 代入式(7), 并令虚数部分必为零, 得:

$$\kappa = \frac{\Lambda_I}{\Lambda_R} = \frac{\sin(\omega_c T)}{1 - \cos(\omega_c T)} \quad (10)$$

结合上述式(7)和式(9), 可以得到临界轴向切削深度的最终表达式为:

$$a_{plim} = -\frac{2\pi\Lambda_R(1 + \kappa^2)}{NK_{tc}} \quad (11)$$

主轴转速可以通过求得刀齿切削周期 T 得到:

$$n = \frac{60}{N[(2k+1)\pi - 2\tan^{-1}(\Lambda_I/\Lambda_R)]} \quad (12)$$

式中 k 为叶瓣数 $k=0, 1, 2, \dots$ 。

综上所述, 对于给定的刀具、根据刀具系统的固有频率 ω_n 、阻尼比 ζ 、刀具刚度 K 、径向切削力系数 K_{rc} 、切向切削力系数 K_{tc} 及颤振频率, 利用式(8)可计算出特征值的实部和虚部, 进而利用式(10)~(12)计算出轴向临界切深 a_{plim} 及相应的主轴速度 n , 针对所选叶瓣数和颤振频率范围重复上述过程, 可获得颤振稳定域分析。

运用锤击法对机床的刀具系统进行锤击试验, 可获得固有频率 ω_n 和振动系统的阻尼系数 ζ 。由于铣削过程的复杂性以及各参数测量计算方法等原因, 无法准确确定刀具刚度 K 、径向切削力系数 K_{rc} 、切向切削力系数 K_{tc} 等常数参数, 致使铣削颤振稳定域叶瓣图不能准确确定。本文通过理论模型计算与实验设计相结合方法来确定参数 K 、 K_{rc} 、 K_{tc} 的值。

2 实验研究

2.1 实验

如下图2所示, 本实验机床为 VMC850E 三轴立式加工中心, 被加工工件材料为 45 钢, 切削刀具为 $\Phi 10$ mm 双刃平底刀, 刀具伸长长度为 58 mm。实验加工过程中, 通过声发射信号对铣削颤振现象进行辨别, 该实验利用 SBS 声发射传感器 AE1000 对切削加工过程进行监测, 其声发射信号通过高速数据采集卡 Spectrum M1.3120(2 通道, 12 位 A/D 转换) 传输到计算机, 采样频率设置为 1 MHz。

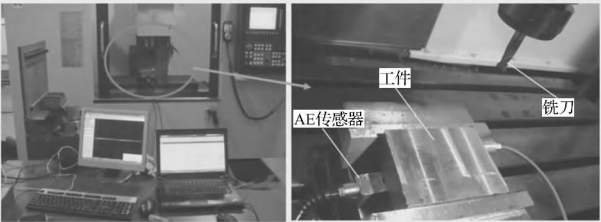


图2 铣削实验装置

Fig.2 Milling experiment setup

如图3所示,该实验的工件形状长为100 mm、高为5 mm。设置机床不同加工参数,如下表1所示,每齿进给量 f 为0.06 mm,本实验选用5个不同主轴转速对工件材料进行单边逆铣切削,在切削过程中,刀具的切削深度是从一开始0 mm逐渐增大到5 mm。

表1 铣削加工工艺参数表

Tab.1 Parameters of milling process

| 实验序号 | 主轴转速 $S/(r \cdot \min^{-1})$ | 每齿进给量 f/mm | 进给速度 $F/(\text{mm} \cdot \min^{-1})$ |
|------|---------------------------------|------------------------|---|
| 1 | 2 389 | 0.06 | 287 |
| 2 | 3 344 | 0.06 | 401 |
| 3 | 4 299 | 0.06 | 516 |
| 4 | 5 255 | 0.06 | 631 |
| 5 | 6 210 | 0.06 | 745 |

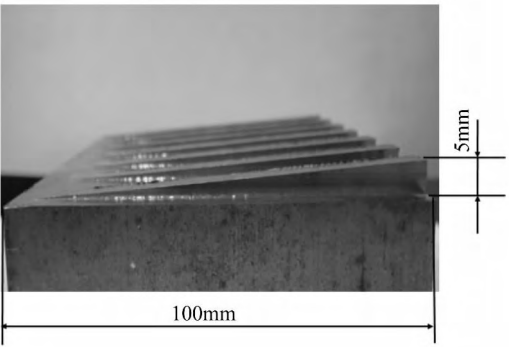


图3 切削工件材料形状图

Fig.3 Shape of milling workpiece

根据Dornfeld等^[10-11]研究沿倾斜工件表面铣削加工时,随着切削深度增大,系统会由强迫振动转变成自激振动,铣削过程发生颤振而不稳定。如下图4(a)所示,当机床转速为 $S1=2\,389\text{ r/min}$ 时,利用声发射信号监测铣削过程中发生颤振时的临界切削深度,其中B点为强迫振动和自激振动的转化点,即为发生颤振时的临界切削深度 $a_{\max1}=2.18\text{ mm}$,如下图4(b)所示,与声发射监测信号相对应的切削工件表面质量情况,证明了该方法监测铣削过程颤振的有效性和实用性。

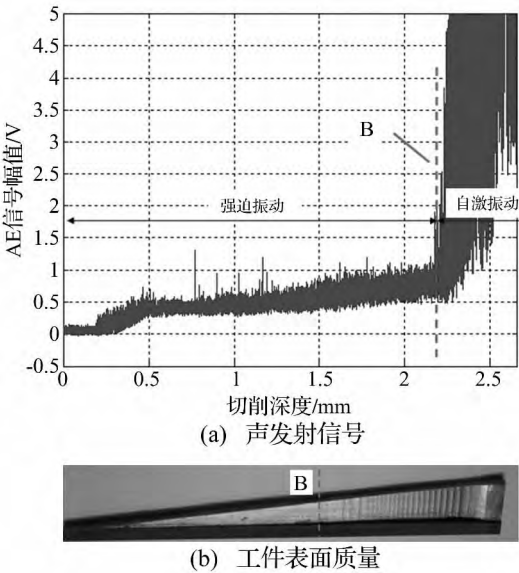


图4 基于声发射信号的铣削颤振识别

Fig.4 Milling chatter recognition based on AE signal

基于上述声发射信号识别铣削颤振方法,分别对其他主轴转速 $S2=3\,344\text{ r/min}$ 、 $S3=4\,299\text{ r/min}$ 、 $S4=5\,255\text{ r/min}$ 和 $S5=6\,210\text{ r/min}$ 进行切削实验,获得各主轴转速下发生颤振时的临界切削深度 $a_{\max2}=2.80\text{ mm}$ 、 $a_{\max3}=1.91\text{ mm}$ 、 $a_{\max4}=1.55\text{ mm}$ 、 $a_{\max5}=4.55\text{ mm}$,如下表2所示。

表2 实验测量各主轴转速对应临界切削深度

Tab.2 Critical cutting deeps with different spindle speed experiment

| 实验序号 | 主轴转速 $S/(r \cdot \min^{-1})$ | 临界切削深度 a_{\max}/mm |
|------|------------------------------|-----------------------------|
| 1 | 2 389 | 2.18 |
| 2 | 3 344 | 2.80 |
| 3 | 4 299 | 1.91 |
| 4 | 5 255 | 1.55 |
| 5 | 6 210 | 4.55 |

最后,运用锤击法对机床的刀具系统进行锤击试验,将加速度计安装在主轴末端刀尖部位,用力锤在另一侧敲击,被测加速度和力信号经放大后被采集到计算机,经处理后可获得振动系统固有频率 $\omega_n=453\text{ Hz}$ 和阻尼比 $\zeta=0.036\,3$ 。

2.2 铣削颤振稳定域叶瓣图的确定

由上述实验可获得系统的固有频率 $\omega_n=453\text{ Hz}$ 和阻尼比 $\zeta=0.036\,3$ 。为准确确定刀具刚度 K 、径向切削力系数 K_{rc} 、切向切削力系数 K_{tc} 等常数参数,本文利用遗传算法对此常数参数优化,设 K 、 K_{rc} 、 K_{tc} 的约束条件为 $K_{\min} \leq K \leq K_{\max}$, $K_{rc\min} \leq K_{rc} \leq K_{rc\max}$, $K_{tc\min} \leq K_{tc} \leq K_{tc\max}$, 对应于任一组参数 $\{K, K_{rc}, K_{tc}\}$,可计算出铣削颤振稳定域叶瓣图在各主轴转速 $S1 \sim S5$ 的理论临界切削深

度 $h_1 \sim h_5$,基于上述表 2 实验测量各主轴转速 S1 ~ S5 的实验临界切削深度 $a_{\max 1} \sim a_{\max 5}$,设目标优化函数 P_{\min} :

$$P_{\min} = \sum_{i=1}^m (h_i - a_{\max i})^2 \tag{13}$$

式中 m 为实验次数 ,本实验 $m = 5$ h_i 为理论计算的临界切削深度 $a_{\max i}$ 为实验测量的临界切削深度。

正规化后 ,常数参数作为个体的表现形式为:

$$\left. \begin{aligned} K &= \frac{K - K_{\min}}{K_{\max} - K_{\min}} (2^l - 1) \\ K_{rc} &= \frac{K - K_{rc\min}}{K_{rc\max} - K_{rc\min}} (2^l - 1) \\ K_{tc} &= \frac{K - K_{tc\min}}{K_{tc\max} - K_{tc\min}} (2^l - 1) \end{aligned} \right\} \tag{14}$$

选定遗传算法的参数 ,世代数为 30 ,个体数 100 ,一个变量个体的位长 $l = 9$,交叉率为 0.6 ,突然变异率为 0.001。其优化结果 $K = 1.1 \times 10^7$ N/m , $K_{rc} = 810$ N/mm² , $K_{tc} = 176$ N/mm² , $P_{\min} = 0.05$ 。

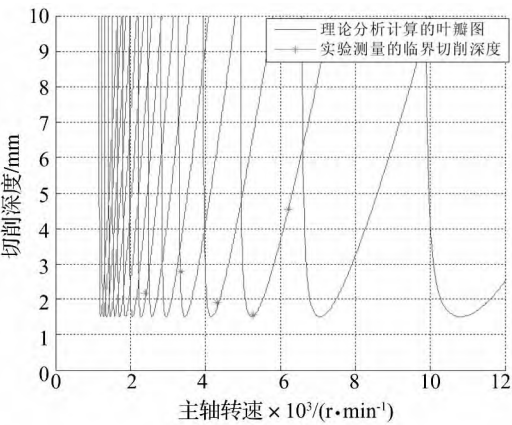


图 5 铣削颤振稳定域叶瓣图
Fig. 5 Milling chatter stability lobe diagrams

利用上述确定的各常数参数绘制出的铣削颤振稳定域叶瓣图 ,如图 5 所示 ,理论计算的颤振稳定域叶瓣图与实验测量结果相一致。理论上实验测量点数 m 越大 ,理论计算的叶瓣图越准确 ,考虑到快速方便建立该叶瓣图 ,通常选择实验测量点数 $m = 4 \sim 8$ 。

2.3 实例应用

将上述方法应用到某机床生产企业的 BVMC1370 三轴立式加工中心 ,被加工工件材料为 45 钢 ,切削刀具为 $\Phi 12$ mm 双刃平底刀 ,刀具伸长长度为 60 mm ,其主轴转速最高为 10 000 r/min ,最大切削进给速度为 12 000 r/min。

根据上述理论方法对单边逆铣切削过程的工艺参数进行优化选取 ,并与原有经验参数对比如表 3 所示。显然根据该理论分析方法选取的切削加工参数更加合

理 ,加工效率也更高 ,切削加工结果验证了该方法的有效性和实用性。

表 3 BVMC1370 加工中心优化前、后参数对照表

Tab. 2 BVMC1370 machine center before and after parameter optimization

| BVMC1370 加工中心 | 主轴 转速/ (r · min ⁻¹) | 切削 深度/ mm | 每齿 进给量/ mm (mm ³ · min ⁻¹) | 材料 去除率/ (mm ³ · min ⁻¹) | 颤振 现象 |
|---------------|--|-----------------|--|---|----------|
| 原经验参数 | 7 500 | 2 | 0.05 | 9 000 | 无 |
| 参数优化后 | 8 150 | 3.6 | 0.05 | 17 604 | 无 |

考虑到实际切削过程中 ,如工件材料 ,刀具型号以及机床结构等各种因素的影响 ,需对不同机床加工条件状况下进行实验测量与理论分析建模(机床 – 刀具系统可简化为单自由度系统) ,可根据上述方法绘制出各自的颤振稳定域叶瓣图后进行加工参数优化选取。

通常机床 – 刀具系统为多自由度系统 ,反映到机床 – 刀具接触区频响函数(简称 FRF) 的图形具有多峰^[3] ,可将每个峰作为单自由度进行处理 ,依据上述实验原理方法依次构造出每个模态所对应的稳定性叶瓣图 ,保留每个转速下的最小临界切削深度对图形进行修剪 ,可得到多自由系统的稳定性叶瓣图。

3 结 论

(1) 对于经典颤振稳定域数学模型 ,有些常数参数难以准确确定 ,本文提出了基于实验设计的确定颤振稳定域叶瓣图的方法。

(2) 设计了基于声发射信号识别铣削颤振的实验方案 ,选取多个主轴转速对斜表面工件进行切削实验 ,利用声发射信号分别识别出对应于各主轴转速的临界切削深度。运用锤击法获得振动系统固有频率和阻尼比。

(3) 基于实验测量数据和理论模型计算相结合方法 ,建立约束条件和目标函数 ,利用遗传算法来优化确定各常数参数 ,从而绘制出与实验测量结果相一致的铣削颤振稳定域叶瓣图。

(4) 最后 ,本文将该方法应用到某机床生产企业的 BVMC1370 三轴立式加工中心的实际加工过程中的切削参数优化选取 ,取得了较好的实验结果。后续文章将对该方法在机床 – 刀具多自由度系统中的应用进行更多研究。

参 考 文 献

[1] Altintas Y ,Stepan G ,Merdol D ,et al. Chatter stability of milling in frequency and discrete time domain [J]. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 2008 ,1: 35 – 44.

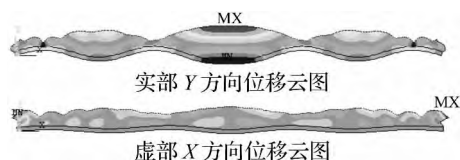


图 11 激励频率为 1 420 Hz 时的 ANSYS 振动位移

Fig. 11 ANSYS vibration displacement at 1 420 Hz

上述关于边界反射的结论对于水平激励也成立,只是由于纵波波长比弯曲波波长大很多,所以其受边界反射的影响要大得多。

综合 2、3 节的讨论可以看出:自由阻尼梁的结构损耗因子主要由激励所能激励起的波类型所决定,在一定程度上受到边界反射影响。

4 结 论

(1) 垂直激励主要激励起最高阶弯曲波或者某些低阶纵波,水平激励主要激励起最高阶纵波;

(2) 梁越长,激励点离边界越远,边界反射对结构损耗因子影响越小;

(3) 不同边界条件的结构损耗因子一般情况下比较接近,但是在一些频率点会存在较大差异;

(4) 自由阻尼梁的结构损耗因子主要由激励所能激励起的波类型所决定,在一定程度上受到边界反射影响。

参 考 文 献

[1] 戴德沛. 阻尼减振降噪技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1986.

- [2] Lyon R H. Statistical energy analysis of dynamical system: theory and application [M]. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, 1975.
- [3] Gavric L. Computation of propagative waves in free rail using a finite element technique [J]. Journal of Sound and Vibration, 1995, 185(3): 531–543.
- [4] Shorter P J. Wave propagation and damping in linear viscoelastic laminates [J]. Journal of Acoustical Society of America, 2004, 115(5): 1917–1925.
- [5] Finnvede S. Spectral finite element analysis of the vibration of straight fluid-filled pipes with flanges [J]. Journal of Sound and Vibration, 1997, 199(1): 125–154.
- [6] Ungar E E, Kerwin E M. Loss factor of viscoelastic systems in term of energy concept [J]. Journal of Acoustical Society of America, 1962, 34(7): 954–957.
- [7] Wilson C J, Carnevali P, Morris R B, et al. Viscoelastic damping calculations using a p-type finite element code [J]. Journal of Apply Mechanics, 1992, 59(1): 696–700.
- [8] 张少辉, 陈花铃. 共固化复合材料粘弹阻尼结构的损耗因子研究 [J]. 航空材料学报, 2005, 25(1): 53–57. ZHANG Shao-hui, CHEN Hua-lin. Damping analysis of cocured composites with interleaved viscoelastic layers [J]. Journal of Aeronautical Materials, 2005, 25(1): 53–57.
- [9] 潘剑利, 张博明, 戴福洪. 简谐激励下共固化复合结构粘弹阻尼材料的损耗因子研究 [J]. 振动与冲击, 2008, 27(2): 57–60, 175–176. PAN Li-jian, ZHANG Bo-ming, DAI Fu-hong. Study on loss factor of cocured composites with an interleaved viscoelastic damping layer under a harmonic excitation [J]. Journal of Vibration and Shock, 2008, 27(2): 57–60, 175–176.
- [10] Cremer L, Heckl M, Ungar E E. Structure-Borne Sound [M]. Springer-Verlag, 2005.

(上接第 93 页)

[2] 李忠群, 刘 强. 基于频响函数的高速铣削颤振稳定域快速分析与研究 [J]. 制造技术与机床, 2008(4): 53–61. LI Zhong-qun, LIU Qiang. Rapid analysis on chatter stability lobes for high speed milling based on frequency response function [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008: 53–61.

[3] Li Z Q, Liu Q. Solution and analysis of chatter stability for end milling in the time-domain [J]. Chinese Journal of Aeronautics 21(2008): 169–178.

[4] Tang W X, Song Q H, Yu S Q, et al. Prediction of chatter stability in high-speed finishing end milling considering multi-mode dynamics [J]. Journal of Materials Processing Technology 2009, 209: 2585–2591.

[5] 刘安民, 鹏 程, 刘吉兆, 等. 高速铣削时颤振的诊断和稳定加工区域的预报 [J]. 机械工程学报, 2007(1): 164–169. LIU An-min, PENG Cheng, LIU Ji-zhao, et al. Detection of chatter and prediction of stable cutting zones in high-speed milling [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007(1): 164–169.

[6] Quintana G, Ciurana J, Ferrer I, et al. Sound mapping for identification of stability lobe diagrams in milling processes [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2009, 49: 203–211.

[7] Quintana G, Ciurana J, Teixidor D. A new experimental methodology for identification of stability lobes diagram in milling operations [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture 2008, 48: 1637–1645.

[8] 刘 强, 李忠群. 数控铣削加工过程仿真与优化 [M]. 北京: 航空工业出版社, 2011, 7.

[9] Wan M, Zhang W H, Dang J W, et al. A unified stability prediction method for milling process with multiple delays [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50: 29–41.

[10] Dornfeld D. Precision Manufacturing, first ed., [M]. Springer, New York, NY, 2007.

[11] Ding Y, Zhu L M, Zhang X J, et al. A full-discretization method for prediction of milling stability [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50: 502–509.