

文章编号 1004-924X(2011)06-1291-07

# 基于经验模态分解和希尔伯特-黄变换的 精密孔镗削颤振特征提取

李欣,梅德庆\*,陈子辰

(浙江大学现代制造工程研究所 浙江省先进制造技术重点实验室,浙江 杭州 310027)

**摘要:**针对精密孔镗削加工过程中容易出现颤振现象,影响精密孔的表面质量问题,建立了镗削加工的监测系统,对镗削颤振信号进行特征提取,以实现镗削颤振的快速预报。首先,根据颤振信号的时频特点,将经验模态分解(EMD)和希尔伯特-黄变换(HHT)引入颤振特征提取过程,并介绍了其基本原理及具体实现过程。然后,在线拾取镗杆的振动信号,并对振动信号进行EMD分解和HHT变换。最后,通过对各本征模态函数分量的Hilbert谱分析,提取出了颤振发生的征兆特征。实验结果表明,利用EMD和HHT对镗削振动信号进行特征提取,可以在颤振形成之前0.5 s得到颤振爆发的征兆,为后续的颤振抑制工作赢取时间,进而确保精密孔的表面加工质量。

**关键词:**精密孔镗削;颤振;经验模态分解(EMD);希尔伯特-黄变换(HHT);特征提取

**中图分类号:**TG53;TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20111906.1291

## Feature extraction of chatter for precision hole boring processing based on EMD and HHT

LI Xin, MEI De-qing\*, CHEN Zi-chen

(Zhejiang Province Key Laboratory of Advanced Manufacturing Technology, Institute of Advanced Manufacturing Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

\* Corresponding author, E-mail: medqmei@zju.edu.cn

**Abstract:** For the chatter occurred frequently in precise hole boring processing and resulted in low quality of finished surface, a chatter monitoring system was established to finish the feature extraction of the chatter to predict the chatter and gain the precious time for chatter suppression. Firstly, according to the characteristics of chatter signals, Empirical Mode Decomposition (EMD) and Hilbert-Huang Transform (HHT) were introduced to extract the chatter feature, and their basic theories were investigated. Then, the vibration of boring bar was picked up online during the process, and the vibration signal was decomposed by EMD and then transformed by HHT. Finally, the feature of chatter symptom was extracted by analyzing the Hilbert spectrum of each Intrinsic Mode Function (IMF). The experimental results show that extracting chatter feature from vibration of boring bar by EMD and HHT can gain the chatter symptom by 0.5 s ahead of the chatter outbreak, which can provide sufficient

收稿日期:2010-07-14;修订日期:2010-10-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50405036);浙江省自然科学基金资助项目(No. Y104462);中央高校基本科研业务费专项基金资助项目(No. 2009QNA4004)

guarantee for follow-up chatter suppression and can provide the high quality surface for workpieces.

**Key words:** precision hole boring processing; chatter; Empirical Mode Decomposition (EMD); Hilbert-Huang Transform (HHT); feature extraction

## 1 引言

颤振是指在金属加工中刀具与工件之间的强烈自激振动。在精密加工中,镗削颤振会对工件的加工质量造成很大的影响,极易损坏工件的表面质量,在精密仪器设备加工中是万万不能容忍的。因此,有必要对镗削颤振进行有效的识别预报,以进行抑制、消除,确保加工质量。对镗削颤振进行识别预报,必须先从最能反映机床工作状态的振动信号中提取镗削颤振的特征。颤振信号为典型的非线性非平稳时变信号,包含丰富的频率成分,采用传统的频谱分析方法,难以对其进行合理的分析,也无法准确地揭示颤振爆发过程振动信号的时频变化细节。为了顺利完成颤振特征的提取,有必要引入一种更为有效的时间序列分析方法。

为了更好地处理非线性非平稳时变信号,近年来学者们提出了不少新的信号处理方法,其中较为著名的是经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)。该方法由 Huang 等<sup>[1]</sup>于 1998 年提出,可同时将信号不同频率尺度的波动或趋势逐级分解开来,得到一系列不同特征尺度的数据序列,称为本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF),再对每个由 EMD 分解所得到的 IMF 进行希尔伯特变换,从而组合成信号的时频谱图,这个过程统称为希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)。由于 IMF 分量不但在频域上具有显著的缓变波包特征,也在时域上具有局部化特征,从时频分析的角度出发,HHT 变换最终得到了在时域和频域都具有较高分辨率的特征谱图。HHT 方法非常适合于具有非线性和非平稳特征的时间序列的分析处理,被认为是近年来信号处理领域的一个重大突破<sup>[2]</sup>。目前,该方法在经济学、地球物理学、海洋学、生物医学、电力系统故障信号分析、机械故障诊断等领域已经得到了广泛的应用,并取得了良好的效果<sup>[3-8]</sup>。

鉴于 EMD 分解方法和 HHT 变换技术在非

线性非平稳信号处理的众多领域的出色表现,本文将它们应用于镗削颤振信号处理领域,通过对镗削振动信号进行 EMD 分解,得到多个不同频率的本征模态函数分量,分别对各分量进行 HHT 变换,分析其能量和频率随时间变化的特性,并结合颤振产生机理,分析各分量产生的原因,提取出颤振爆发的征兆。

## 2 EMD 和 HHT 的基本原理

### 2.1 EMD 基本原理与方法

为了更好地理解振动信号的 EMD 分解过程,将 EMD 的基本原理和算法描述如下。

#### 2.1.1 本征模态函数定义

本征模态函数(IMF)必须满足以下两个条件<sup>[1,3,9]</sup>:(1)在全局特性上看,整个数据的极值点数和过零点数相差不能超过一个;(2)在局部特性上看,任意数据点处由局部极大值点定义的包络线和局部极小值定义的包络线的均值都为 0。

IMF 分量具有显著的缓变波包的特性,各 IMF 分量是平稳信号,具有非线性特征,其缓变波包特征意味着不同特征尺度波动的波幅随时间变化,因而也具有时域上的局域化特征。

#### 2.1.2 经验模态分解方法

经验模态分解(EMD)假设任何信号都可以由一系列的 IMF 所组成,IMF 可以是线性的,也可以是非线性的,表征着信号的内在波动特征<sup>[1]</sup>。EMD 过程就是将非线性不稳定信号由高频到低频分解成多个 IMF 的过程,也是信号稳定化的过程,并且每个 IMF 包含的频率分辨率也是随着原始信号变化而变化,是一种自适应的多分辨率信号处理方法。

对信号  $x(t)$ ,其 EMD 分解过程为<sup>[1]</sup>:

(1)首先求出数据序列  $x(t)$  所有的极大值点和极小值点,再利用三次样条曲线进行插值拟合得到数据的上、下包络线,并计算出上、下包络线的均值  $m_1$ ,从而求出原数据序列  $x(t)$  和包络均值的差值  $h_1 = x(t) - m_1$ 。

(2)判断  $h_1$  是不是 IMF,如果不是则对其重

复上述过程,直到第  $k$  次的  $h_{1k}$  为  $IMF$ ,令  $c_1 = h_{1k}, c_1$  为从原始数据中提取出来的第一个  $IMF$ ,包含信号的最高频率成分。

(3) 求出原始数据  $x(t)$  与第 1 个  $IMF$   $c_1$  的差值  $r_1 = x(t) - c_1$ ,将  $r_1$  作为新数据序列重复上述步骤,可以递推得到其它  $IMF$ ,直至趋势分量  $r_n$  单调或只有一个极值。

(4) 原始数据序列最终可分解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n, \quad (1)$$

其中,  $r_n$  为趋势分量,为单调函数或均值函数,代表信号的平稳趋势;  $c_1, c_2, \dots, c_n$  为所得到的各个  $IMF$  分量,包含了信号由高频段到低频段的不同成分。

### 2.2 HHT 时频分析方法

HHT 处理非平稳信号的基本过程包含了上述 EMD 分解过程,并且进一步将由 EMD 分解得到的每一个  $IMF$  进行 Hilbert 变换,从而形成原始信号的 Hilbert 谱。具体如下<sup>[1]</sup>:

对式(1)中每个  $c_i(t)$  作 Hilbert 变换得:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} P \int_{-\infty}^{\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau, \quad (2)$$

通过构造解析函数并对式(2)进行析构可以得到幅值函数  $a_i(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]}$  和相位函数  $\theta_i(t) = \arctan[H[c_i(t)]/c_i(t)]$ ,再求导即得到瞬时频率  $\omega_i(t) = d\theta_i(t)/dt$ 。这样,原始信号  $x(t)$  可以展开如下:

$$x(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt}, \quad (3)$$

式中,  $\text{Re}$  表示取实部。

式(3)中每个分量的幅值和相位都是随时间变化的时间的函数。式(3)的右部称为信号  $x(t)$  的 Hilbert 时频表示,记为:

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\int \omega_i(t) dt}. \quad (4)$$

应用式(4)可以将信号的时间-频率-幅值的三维关系表达出来。可以用三维图或等高图表示作为时间函数的瞬时幅值和瞬时频率,如只需分析某些分量的瞬时幅值或瞬时频率,也可作时间-幅值图或时间-频率图等。

上述 EMD 分解和对应的 Hilbert 变换统称为 Hilbert-Huang 变换。由以上各式可以看出,由 Hilbert 变换得到的幅值和频率都是时间的函

数,而傅里叶变换的幅值和频率则是不随时间而变化的,因此 Hilbert-Huang 变换可以看作是傅里叶变换的一般化,即傅里叶变换是 Hilbert-Huang 变换的一个特例。

## 3 镗削振动信号的 EMD 分解

### 3.1 镗削颤振监测实验平台的搭建

为了对金属镗削颤振的特征提取进行深入研究,在车床 CA6140 上搭建了磁流变智能镗杆的颤振监测实验系统,该系统原理框图如图 1 所示。智能镗杆安装在专用刀架上,工件夹在车床卡盘上,加速度传感器安置在镗杆自由端的水平方向,通过 B&K 电荷放大器、DASP 信号采集仪传输到工控机,实现镗杆振动信号的采集。通过对所采集的振动信号进行分析处理,监测镗削加工的状态,当监测到颤振要发生时则利用工控机对智能镗杆发出抑制颤振的指令实现颤振的抑制。图 2 为实验设备照片,其中智能镗杆的具体结构及颤振抑制原理方法见文献<sup>[10-11]</sup>。

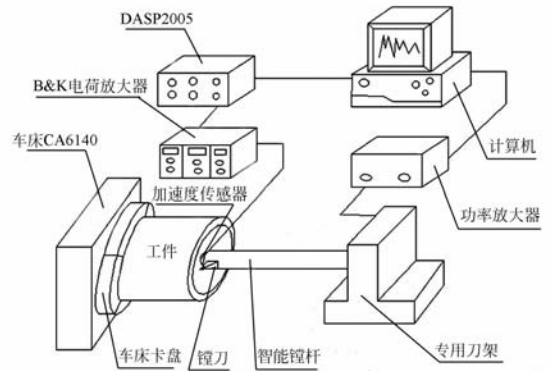


图 1 智能镗杆颤振监测实验系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of chatter monitoring system

在上述实验系统中,按以下实验条件进行镗削加工:主轴转速为 720 r/min,进给量为 0.1 mm/r,切削深度为 0.5 mm,进给方式为机床自动走刀。其中加工试件为 45 号钢制成的圆形管件,其外径为 130 mm,内径为 95 mm,试件悬伸长度为 150 mm。图 3 为镗削加工中采集下来的由正常镗削到颤振爆发整个过程的刀具振动加速度信号时域波形图,其中采样频率为 2816 Hz。

从图 3 可以看出,开始阶段,镗削处于平稳切削状态,1 s 左右进入颤振孕育阶段,振动信号的振幅也不断增大,当接近 2 s 左右的时候,能量积

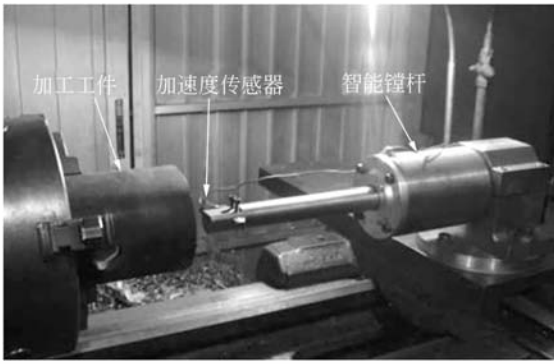


图 2 智能镗杆颤振监测实验加工现场照片  
Fig. 2 Photo of chatter monitoring system

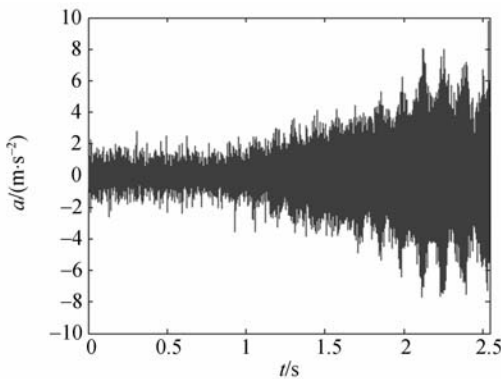


图 3 镗削加工过程中刀具振动波形图  
Fig. 3 Vibration signal of cutting tool during boring process

累达到了最高,颤振已经形成,振幅维持在很高的水平,这严重影响镗削加工,破坏了工件的加工表面,在加工表面留下了振纹。图 4 为对应的工件加工表面照片放大图。如能在颤振孕育阶段发现颤振的形成征兆,并对颤振进行抑制,就能避免加

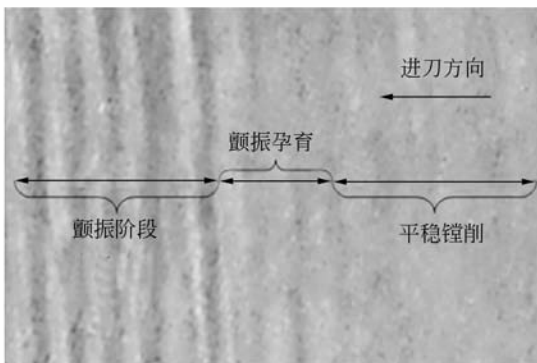
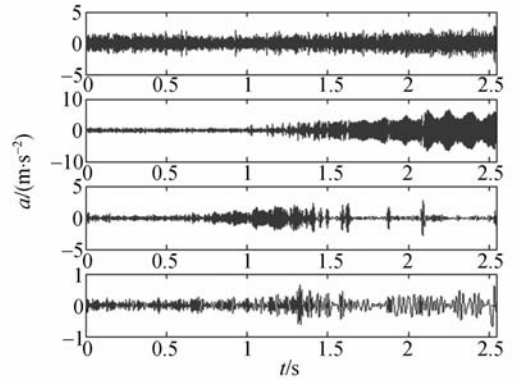


图 4 镗削实验的加工表面照片放大图(3 倍)  
Fig. 4 Amplified photo of workpiece surface(3×)

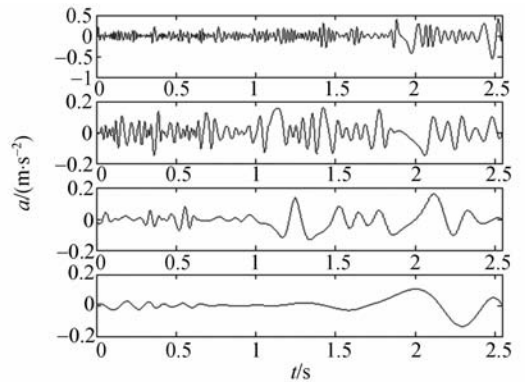
工表面的损坏,为此,下文对镗削振动信号进行 EMD 分解、HHT 变换等处理分析,提取颤振的形成征兆。

### 3.2 振动信号的 EMD 分解

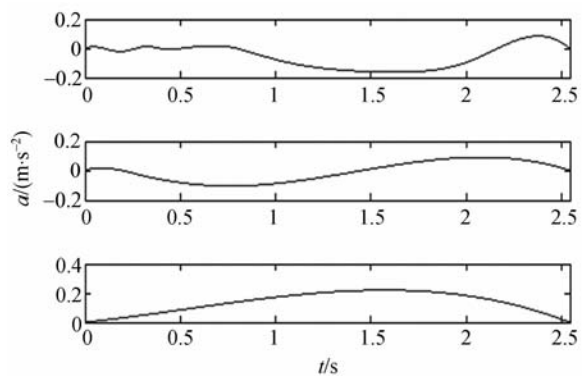
对图 3 所示的镗削振动信号进行了 EMD 分解,分解结果如图 5 所示。



(a) IMF1~IMF4 的波形图  
(a) IMF1~IMF4 of EMD



(b) IMF5~IMF8 的波形图  
(b) IMF5~IMF8 of EMD



(c) IMF9~IMF10 及 RES 的波形图  
(c) IMF9, IMF10 and RES of EMD

图 5 镗削振动信号的本征模态函数图  
Fig. 5 IMFs of boring vibration signals

如图5所示,通过对原始镗削振动信号进行EMD分解,可将其由高频段到低频段分解为10个IMF分量及趋势分量RES。从图中可以看出,EMD分解所得的IMF分量的能量主要集中在前三阶,而且第二阶即IMF2分量的能量最大。

## 4 基于HHT的颤振特征提取

### 4.1 振动信号的Hilbert变换

对上述由EMD得到的各IMF分量进行Hilbert变换,即可得到与之一一对应的Hilbert谱图。本文对大量的镗削振动信号进行EMD分解,然后对各分量进行Hilbert变换,通过分析众多谱图分析可知,在由原始振动信号分解出的各IMF分量对应的Hilbert时频谱图中,能量最大的IMF分量得到的Hilbert谱在颤振发生前后的变化最为明显。经分析,这是由于颤振爆发时由于刀具与工件之间的强烈的自激振动,导致了振动能量急剧增大,从能量变化的角度出发在理论上确实是能量较大的IMF分量变化最大,也最能反映颤振爆发的本质,因而对这个分量进行深入的分析计算,即可从中提取出镗削颤振发生的征兆特征。如上文所述镗削颤振形成后振动能量最大的分量为IMF2,对该分量进行HHT变换得到对应的Hilbert时频谱图如图6所示。

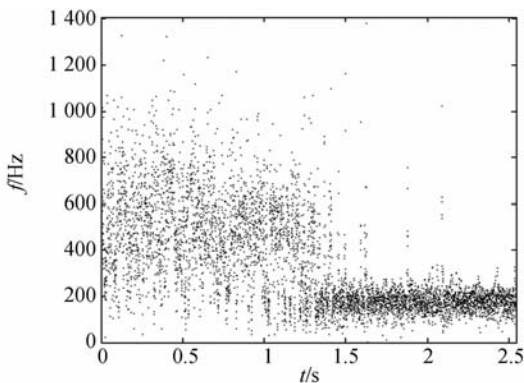


图6 IMF2的Hilbert时频谱图

Fig. 6 Time-frequency plots for IMF2

由图6中可见,随着颤振的孕育和发展,镗杆的振动主频从高频段快速向低频段移动,颤振形成后振动能量主要集中在100~200 Hz这个很窄的频段内,这符合颤振发生时振动信号的能量频移特性。

### 4.2 颤振征兆的特征提取

由图5(a)中IMF2的波形图可以发现,随着颤振的发展该频段的振动能量峰值越来越大,最后稳定在某一水平上。为了进一步研究镗削过程由平稳镗削阶段过渡为不稳定阶段的频率特性变化情况,本文对IMF2的Hilbert谱图做了进一步统计分析,统计图6中每200个频率点分布在频段100~200 Hz的数目随时间轴的变化情况,可以得到一系列数据,数据点图如图7所示。

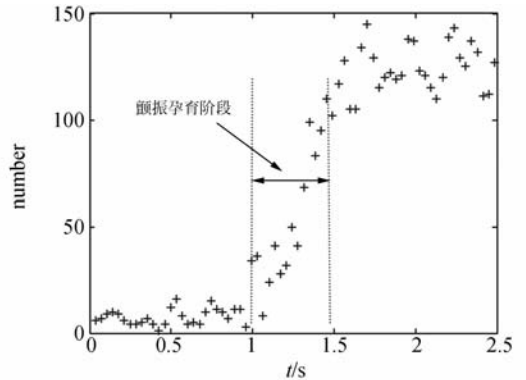


图7 频率分布点数图

Fig. 7 Point numbers of frequency distribution

由图7可知,在颤振的孕育阶段(时间轴1 s到1.5 s之间),振动信号的Hilbert谱的频率分布已经明显向100~200 Hz区间集中,频率分布点数剧增,对颤振的形成提前发出了强烈的信号,可见利用EMD分解和HHT变换得到的Hilbert谱可以有效提取出颤振爆发的征兆特征,从而完成镗削颤振的快速预报。而图7所示的频率分布数所组成的向量就可以作为后续颤振预报识别系统所需的特征向量,这就完成了镗削颤振的特征提取。

## 5 结论

本文针对镗削颤振发展过程中振动能量急剧增大、快速向低频段移动、并集中到某一个较窄的频段内的特性,利用EMD对镗削振动信号进行分解,然后再进行HHT变换得到对应的Hilbert时频图。对能量最高的IMF分量的Hilbert谱图进行了统计分析,完成了颤振爆发征兆的特征提取,将其作为颤振快速识别预报系统输入向量,从而实现在颤振孕育阶段完成颤振早期预报,进而

为后续的颤振抑制工作赢得了大于 0.5 s 宝贵时间,这基本满足了基于磁流变智能镗杆的颤振抑

制对时间的要求,可实现平稳镗削,确保精密孔的表面加工质量。

### 参考文献:

- [1] HUANG N E, ZHENG SH, STEVEN R L, *et al.*. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. *Pro Royal Society London A*, 1998:903-995.
- [2] Better algorithms for analyzing nonlinear, nonstationary data[EB/OL]. <http://tco.gsfc.nasa.gov>, 2005-07-10.
- [3] HUANG N E, WU M L, QU W D, *et al.*. Applications of Hilbert-Huang transform to non-stationary financial time series analysis[J]. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 2003, 19(3):245-268.
- [4] 杨永锋,任兴民,秦卫阳,等. 基于 EMD 方法的混沌时间序列预测[J]. *物理学报*, 2008, 57(10): 6139-6144.
- YANG Y F, REN X M, QIN W Y, *et al.*. Prediction of chaotic time series based on EMD method [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 57(10): 6139-6144. (in Chinese)
- [5] MARCUS D, TORSTEN S. Performance and limitations of the Hilbert-Huang transformation (HHT) with an application to irregular water waves [J]. *Ocean Engineering*, 2004, 31(9):1783-1834.
- [6] LIANG H L, BRESSLER S L, BUFFALO E A, *et al.*. Empirical mode decomposition of field potentials from macaque V4 in visual spatial attention[J]. *Biological Cybernetics*, 2005, 92:380-392.
- [7] SENROY N, SURYANARAYANAN S, RIBEIRO P F. An improved Hilbert-Huang method for analysis of time-varying waveforms in power quality[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, 22(4):1843-1850.
- [8] 唐贵基,向玲,朱永利. 基于 HHT 的旋转机械油膜涡动和油膜振荡故障特征分析[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(2):77-81.
- TANG G J, XIANG L, ZHU Y L. Fault analysis of oil whirl and oil whip based on hilbert-huang transform for rotor system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(2):77-81. (in Chinese)
- [9] 杨世锡,胡劲松,吴昭同,等. 基于高次样条插值的经验模态分解方法研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2004, 38(4):267-270.
- YANG SH X, HU J S, WU ZH T, *et al.*. Study on empirical mode decomposition based on high-order spline interpolation [J]. *Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, 2004, 38(4): 267-270. (in Chinese)
- [10] 孔天荣,梅德庆,陈子辰. 基于变结构刚度抑制精密孔镗削加工的颤振[J]. *光学精密工程*, 2009, 17(12):3040-3046.
- KONG T R, MEI D Q, CHEN Z CH. Suppression of chatter for precision hole boring based on variable structural stiffness [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(12):3040-3046. (in Chinese)
- [11] MEI D Q, YAO Z H, KONG T R, *et al.*. Parameter optimization of time-varying stiffness method for chatter suppression based on magnetorheological fluid controlled boring bar[J]. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2010, 46:1071-1083.

## 作者简介:



李欣(1981—),男,广西玉林人,博士研究生,2004年于浙江大学获得学士学位,主要从事振动检测与振动控制、信号检测及信号处理、模式识别等方面的研究。E-mail: mexinli@zju.edu.cn



陈子辰(1950—),男,福建福州人,教授,博士生导师,1978~1989年于浙江大学分别获得学士、硕士和博士学位,主要从事数字化制造与新型数控系统、精密工程、微系统理论与微制造技术等方面的研究。E-mail: chenzc@sun.zju.edu.cn

## 导师简介:



梅德庆(1973—),男,浙江台州人,教授,博士生导师,1995年于西安电子科技大学获得学士学位,2000年于浙江大学获得博士学位,主要从事振动检测与控制、微制造技术、氢能装备制造技术等方面的研究。E-mail: medqmei@zju.edu.cn

## ●下期预告

## “日盲”紫外折反射全景光学系统设计

王丽萍,李春,金春水

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033)

为了充分利用紫外光谱信息,研制了一套视场角为 $360^\circ \times (45^\circ \sim 90^\circ)$ 的“日盲”紫外折反射全景光学系统。利用折反射全景成像系统的大视场和噪声高屏蔽特性,将折反射全景成像技术应用于紫外目标探测研究。基于像差理论及紫外光学系统特性,从参数分配、初始结构求解入手,采用分裂透镜、加齐明镜等方法设计光学系统。分析结果表明,“日盲”紫外折反射全景光学系统各视场能量集中度为80%的弥散圆直径均小于 $20 \mu\text{m}$ ,该值小于紫外ICCD像元尺寸 $30 \mu\text{m}$ ,各视场 $\text{MTF} > 0.7 @ 17 \text{ lp/mm}$ ,满足设计指标要求。实验验证了紫外折反射全景技术用于电晕探测的可行性,实验图像获得了良好的成像效果。