

嵌入式测温工具系统的结构设计及模态分析

李广慧¹ 尹凝霞¹ 徐红² 谭光宇¹

1. 广东海洋大学, 湛江, 524088 2. 济南大学泉城学院, 蓬莱, 265600

摘要:为测量采用 BT 刀柄工具系统的立铣切削温度, 在 BT40 刀柄的内部嵌入了测温模块。建立 BT40 测温工具系统的三维实体模型, 借助有限元模态分析构建了测温工具系统动力学模型, 求解该工具系统分别在自由状态和工况约束状态下的固有频率和振型。有限元分析和模态实验结果证明, 该 BT40 测温工具系统的动力特性和平衡特性完全符合实际切削要求。

关键词: BT40 刀柄; 模态分析; 固有频率; 振型

中图分类号: TG714

DOI: 10.3969/j.issn.1004-132X.2015.21.004

Structure Design and Modal Analysis of Embed Temperature Measuring Tool System

Li Guanghui¹ Yin Ningxia¹ Xu Hong² Tan Guangyu¹

1. Guangdong Ocean University, Zhanjiang, Guangdong, 524088

2. University of Jinan Quancheng College, Penglai, Shandong, 265600

Abstract: In order to measure the end milling temperature of a BT handle tool system, the temperature measurement unit was embedded in the interior of the BT40 handle. A three-dimensional solid model of BT40 temperature measuring tool system was established. With the aid of finite element modal analysis, the dynamic model of the temperature measurement unit was constructed as well. Under the free and constraint states, the frequencies and modal shapes were calculated respectively. The results of finite element analysis and modal experiments show that the dynamic and balance characteristics of the BT40 temperature measurement system can completely meet the demands of the actual cutting.

Key words: BT40 tool holder; modal analysis; natural frequency; modal shape

0 引言

数控铣床和铣加工中心采用电主轴结构, 通过主轴内部传输温度测量数据已不可能, 更多的是从外部测量刀具刃部的切削温度, 这样测量的温度是不连续的^[1]。为了测量立铣刀切削温度, 人们通过改进刀柄的结构, 把测温数据采集模块安装到刀柄内部, 通过无线通信将数据传输到上位机, 读取并转换为温度值实时显示, 实现高速切

削刀具刃区温度的实时、直接、连续测量, 为刀具磨损破损研究提供温度数据。

本文将测温模块嵌入到应用广泛的 BT40 刀柄内, 根据国家标准规定的锥柄结构及温度数据采集模块的要求设计出热电偶测温刀柄, 在对刀柄不断优化和改进的基础上, 完成 BT40 工具系统的结构设计。为了使所设计研制的刀柄能够满足高速切削过程温度测量的要求, 基于振动分析理论, 对新设计的工具系统进行动力学性能分析, 并利用有限元软件分析工具系统的固有特性^[2]。

收稿日期: 2014-10-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51175096, 51375099)

[60] Holkup T, Cao H, Kolá P, et al. Thermo-Mechanical Model of Spindles[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2010, 59(1): 365-368.

[61] Hwang Y K, Lee C M. Development of Automatic Variable Preload Device for Spindle Bearing by Using Centrifugal Force[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2009, 49(10): 781-787.

[62] Kim D H, Lee C M. A Study on the Development of a New Conceptual Automatic Variable Preload

System for a Spindle Bearing[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 65(5/8): 817-824.

(编辑 苏卫国)

作者简介: 芮执元, 男, 1962 年生。兰州理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。主要研究方向为成套装备、计算机仿真与虚拟技术。李 特, 男, 1987 年生。兰州理工大学机电工程学院博士研究生。雷春丽, 女, 1977 年生。兰州理工大学机电工程学院副教授、硕士研究生导师。胡赤兵, 男, 1952 年生。兰州理工大学机电工程学院教授、博士研究生导师。

在工具系统的设计阶段,仿真和预测该刀柄的动力学特性,保证其动力特性与机床的整体特性等因素相匹配。

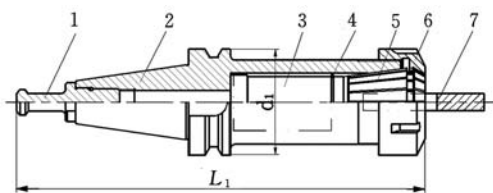
1 BT40 工具系统结构设计

1.1 测温电路板的设计

根据 BT 刀柄内的有限空间,以及小型化、密集化原则和减小电路板的动不平衡量的要求,在电路布局上尽量将电子元器件靠近回转中轴布置。经过优化设计,将测温模块电路板设计为双面板。

1.2 测温刀柄的结构设计

以 $\phi 10$ mm 硬质合金立铣刀为例,选取 ER40-10 弹簧夹头及配套螺母,根据现行刀柄标准 MAS-403 确定刀柄与数控机床主轴连接部分尺寸。由于刀柄内部空间有限,所以尽量缩小数据采集模块及发射装置的体积,使其在满足条件的基础上尽可能地紧凑,故采用集成化模块并采用内部供电装置。通过在刀柄内部开设两个键槽的方式来安装测温模块,并选用弹性挡圈进行轴向固定。加工时温度信号由热电偶通过内冷铣刀直接拾取。测温装置直接安装在刀柄内部,对机床和刀具本身的加工或振动并不产生影响,只要刀具进行切削加工,就可以测量出切削温度,通过无线传输技术收集加工时的温度信号就可以进行实时分析处理。BT40 刀柄测温系统组成、结构及装配图见图 1。利用 Pro/E 5.0 软件建立零件三维实体模型并进行装配。



1.拉钉 2.BT40 测温刀柄 3.测温装置及可充电电池 4.挡圈
5.ER40 弹簧夹头 6.ER 锁紧螺母 7.硬质合金立铣刀

图 1 测温 BT40 刀柄装配图

2 装配体特征值计算

现阶段模态分析常用的方法有数值模态分析和试验模态分析两种方法^[3-4],本文同时采用这两种方法对测温工具系统进行分析。特征值(固有频率和振型)是转子动力学的重要部分,是分析其他动力学(如谐响应分析、瞬态动力学等)的基础。动力学分析方程^[5-6]为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{C}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

采用最简单的线性无阻尼动力结构进行分

析,其阻尼矩阵 $\mathbf{C} = 0, \mathbf{f}(t) = 0$,则运动方程可简化为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{x}} + \mathbf{K}\mathbf{x} = 0 \quad (2)$$

式中, \mathbf{M} 为结构整体质量矩阵; \mathbf{K} 为结构整体刚度矩阵; $\ddot{\mathbf{x}}$ 为结构节点位移的 2 阶导数; \mathbf{x} 为结构节点位移。

在自由振动时,假设各质点在平衡位置附近做简谐运动,则各节点的位移可表示为

$$\mathbf{x} = \mathbf{x}_0 \cos(\omega t + \psi) \quad (3)$$

式中, \mathbf{x}_0 为各节点的振型; ω 为各振型下的振动频率; ψ 为相位角。

将式(3)代入式(2)并化简,得

$$(-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K})\mathbf{x}_0 = 0 \quad (4)$$

可以看出式(4)是一个以 ω^2 为参数的齐次代数方程组。在结构发生振动过程中,各节点的振幅不可能全部为 0。由线性代数理论知,该方程组有非零解的唯一条件是系数行列式为 0,即

$$|-\omega^2 \mathbf{M} + \mathbf{K}| = 0 \quad (5)$$

其中, \mathbf{K} 和 \mathbf{M} 是 m 阶正定矩阵。将式(5)展开可得到一个关于 ω^2 的 m 次方程,由此可解出 m 阶固有频率 $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \dots, \omega_m$,将每个固有频率 ω_i 代回式(4)就可得各节点的振幅值 x_{0i} ,即工程上通常所称的结构的振型。

3 BT40 测温工具系统的有限元模态分析

3.1 材料设置及网格划分

下面以新设计的 BT40 型非标测温刀柄和平底四刃立铣刀组成的工具系统为研究对象,各个部分的材料属性如表 1 所示。由于 ER 弹簧夹套和立铣刀之间的连接结构比较复杂,使用现有的分析软件并不能充分地表现它们之间真实的接触情况,因此简化为“绑定”的形式将它们连接为一体。这种简化可能对结果产生一定的影响,但并不会影响系统整体的变化趋势。

表 1 刀柄-刀具系统材料属性

名称	材料	弹性模量 E(GPa)	密度 (kg/mm ³)	泊松比
BT 刀柄	20CrMnTi	212	7860	0.289
弹簧夹头	65Mn	212	7820	0.288
ER 螺母	42Cr	212	7870	0.277
刀具	硬质合金	600	14 800	0.33
拉钉	45 钢	209	7890	0.269

在网格划分和求解过程中,将对整体分析结果影响不大的结构,如尺寸较小的螺纹、倒角等进行忽略简化处理,以便节省和优化实体单元模型。确定 BT40 工具系统的三维模型和材料属性之后,利用 ANSYS Workbench13.0 对装配体进行仿真分析,为了更好地得到关键部分(刀柄锥部、

端部和刀具等)的求解精度,在自由划分网格的基础上,适当细化关键部分的网格。

3.2 BT40 工具系统有限元自由模态分析

在对工具系统进行自由模态分析时,应该保证整个结构的自由度全部不受限制,即结构处于无约束状态,而后,求解四种工具系统前 10 阶固有频率和振型。在求解结果中,剔除刚体模态参数,由于结构的对称性,会出现频率和振型相同的情况,在本文中按一种情况处理。其前四阶的固有频率和振型如表 2 所示,振型云图见图 2。

表 2 不同刀柄自由状态模态参数比较

模态阶数	频率(Hz)	振型描述
第一阶	66.88	刀柄和刀具整体摆动
第二阶	139.69	刀柄和刀具整体扭转
第三阶	4168.1	拉钉和刀具一次弯曲
第四阶	6009.0	刀柄和刀具二次弯曲

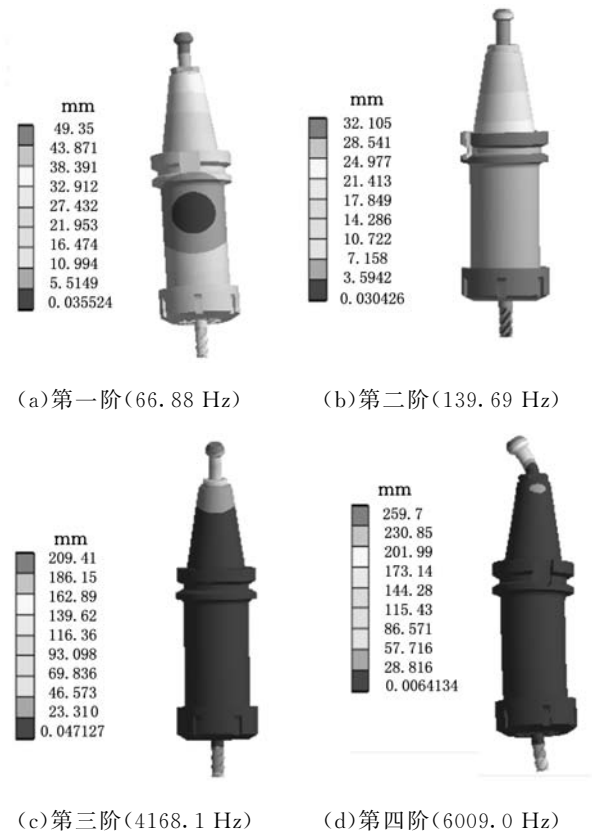


图 2 BT40 测温刀柄自由模态振型图

3.3 BT40 测温工具系统工况模态分析

众所周知,工具系统是一个必须和主轴连接才能发挥其性能的结构件,所以模拟实际工况条件下的模态情况才更有实际意义。所建立的有限元模型及网格划分类型与自由模态分析一致。

(1)边界约束条件。根据刀柄只有锥面定位的实际工况要求,在圆柱坐标系中限制锥面的径向平移自由度和切向平移自由度,让轴向自由度及其他旋转自由度处于无约束状态^[6]。

(2)工具系统工况模态的计算。在结果分析

中,剔除刚体模态参数,对于频率和振型相同的情况,按一种情况处理。其前四阶的固有频率和振型如表 3 所示,BT40 测温工具系统振型云图见图 3。

表 3 不同刀柄工况状态模态参数比较

模态阶数	频率(Hz)	振型描述
第一阶	1056.6	刀柄下部及刀具弯曲
第二阶	4589.3	刀柄下部及刀具扭转
第三阶	6397.6	刀柄与刀具同向弯曲
第四阶	8243.0	刀具弯曲

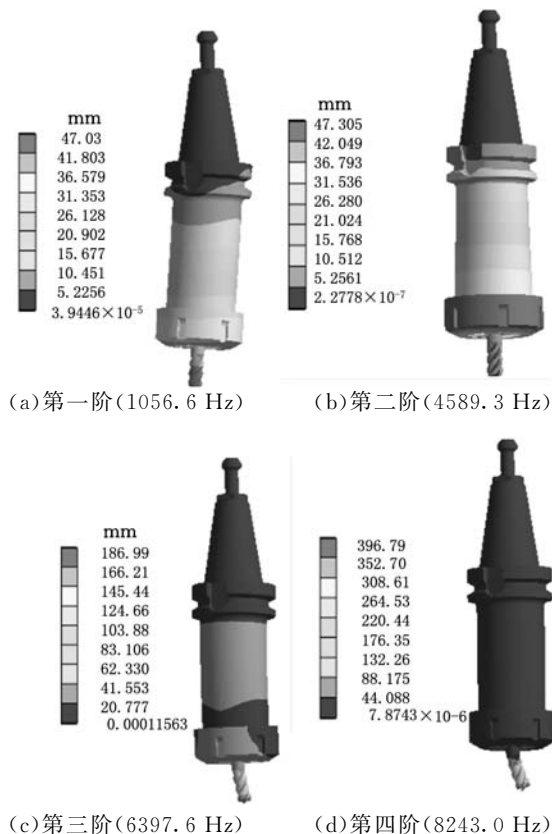


图 3 BT40 测温刀柄工况模态振型图

3.4 结果分析及其意义

通过对新设计的 BT40 测温工具系统进行有限元模态分析,可以得出以下结论:

(1)对 BT40 工具系统进行自由模态分析时,它们都存在前几阶为刚体模态的结果(理论值为 0),没有发生弹性变形,这与理论分析是一致的。

(2)从 BT40 工具系统不同阶振型图可以看出,第一阶均为刀柄和刀具整体摆动,且最大变形均在工具系统的两端,这说明此结构最薄弱位置在拉钉、刀柄锥部及刀具刀尖部分。

(3)与自由模态分析比较,工况约束条件下的工具系统整体刚性显著提高,稳定性较好。工具系统主要指弯曲振动特性,而扭转与拉缩振动并不是工具系统的主要形式。

(4)对 BT40 工具系统进行工况分析时,第一阶固有频率较大,明显大于工作转频,即它们在正

常工作条件下能够避开共振,满足工具系统稳定性要求。

(5)主轴的临界转速 n 和固有频率的关系为 $n = 60 \omega$ 。BT40 刀柄的工作最高转速一般小于 10 000 r/min,远远小于刀柄的第一阶临界转速,能有效地避开共振区。因此,从理论上分析该设计是合理的。

4 BT40 测温工具系统实验模态分析

在实际工程结构中,有限元法可以解决许多结构振动方面的问题,但是在建模过程中以及边界条件的施加方面,并不能完全符合实际装配情况。为了能够准确得到工具系统的振动参数,对其进行实验模态分析始终是一个重要的、不可或缺的方法之一。实验模态分析是对结构进行一定的激励然后测量在此激励下产生的振动响应,经过数据测试系统与软件获得激励点与响应点之间的传递函数,进行模态参数识别^[7]。它不仅能够得到相对正确的数据,而且可以验证建模及有限元分析方法的正确性,并适当地对有限元模型进行修正,进而建立符合实际要求的简化模型,为后续的动力学分析提供更加准确的理论模型。

4.1 BT40 测温工具系统自由模态测试与分析

4.1.1 实验设备

所用仪器设备主要有:SD1427 脉冲力锤,BZ1104 压电加速度传感器,BZ7201B 多功能采集仪,WSU-USB 数据采集仪及 Vib'SYS 振动分析软件,自研制的 BT40 测温工具系统,计算机一台,弹性绳两条。

4.1.2 实验方案

用脉冲力锤激发工具系统的脉冲信号并传输到多功能采集仪进行放大和处理,然后将此信号传输到数据采集仪中,同时,加速度传感器测得的与激励信号相对应的加速度响应信号同样传输到数据采集仪中。利用数据采集仪中模态数据采集和处理功能,获取激励点和激励点之间的传递函数;利用振动信号采集、处理和分析软件来进行参数识别,得到模态参数。BT40 测温工具系统测试方案示意图见图 4。

4.1.3 测试方法

利用弹性绳将工具系统悬挂在自制的悬架上,悬挂时尽可能使其处于自由状态从而有更多的自由度,同时参考有限元分析的结果,使悬挂点选择处于或接近于模态节点上,从而将悬挂点位置对结果的影响降低到最小。本文采用多点激励单点响应力锤脉冲敲击法,根据工具系统的结构

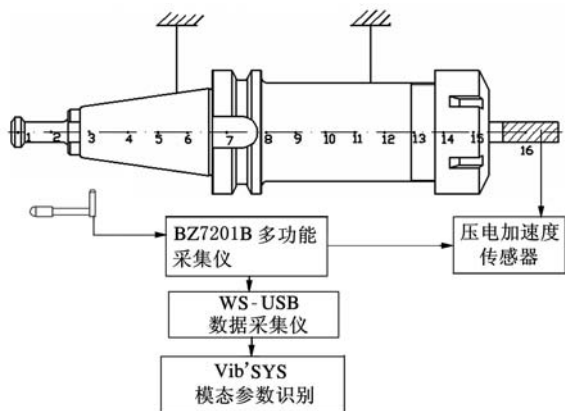


图 4 自由模态测试方案示意图

特点,确定第 1 至 15 点为按顺序排列的激励点,第 16 点为响应点。

4.1.4 实验数据采集与处理

通过对结构进行模态实验,得到其传递函数、相干函数,并从中识别出系统的固有频率。在实际测试过程中,在不同位置和方向对工具系统进行激励时,测得的传递函数峰值出现的位置和大小会出现一定的分散现象。为了得到准确合理的数据,对 15 个激励位置采用不同的方向和力度进行多次重复敲击,从而得出大量实验数据,从中找出规律。为避免固有频率丢失和尽量减小分析误差,根据出现次数多、幅值较大的频率进行频率识别,求平均值。在测量过程中,相干函数的值在 0.8~0.95 之间,这说明测量的传递函数是可信的。图 5 所示为测试的一组数据。

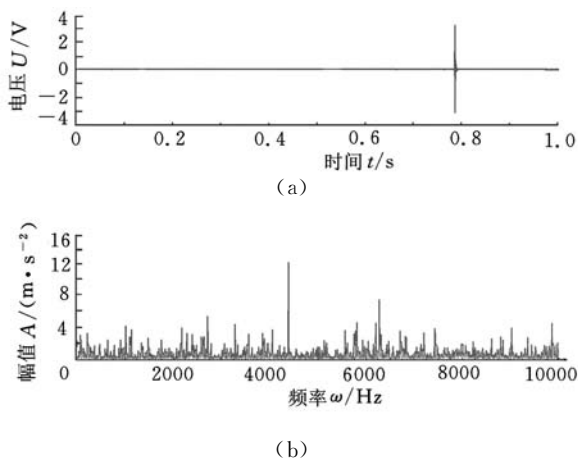


图 5 自由模态测试数据

通过参数识别得到系统固有频率(扭转拉伸除外),求平均值,得到前三阶固有频率,并与有限元分析结果进行对比分析,如表 4 所示。

表 4 自由模态实验结果

阶数	频率(Hz)	与有限元结果比较(%)
第一阶	76.98	13.12
第二阶	4477.97	6.92
第三阶	6565.06	8.47

4.2 BT40 测温工具系统工况模态测试与分析

4.2.1 实验方案

本次工况模态分析是在 XH714D 加工中心上进行的,将 BT40 测温工具系统安装在数控加工中心上;合理布置工具系统的激励点与响应点位置,其中第 1 至 8 点为按顺序排列的激励点,第 9 点为响应点;本次实验同样采用了力锤脉冲敲击法(单点响应多点激励)。测试过程如图 6 所示。

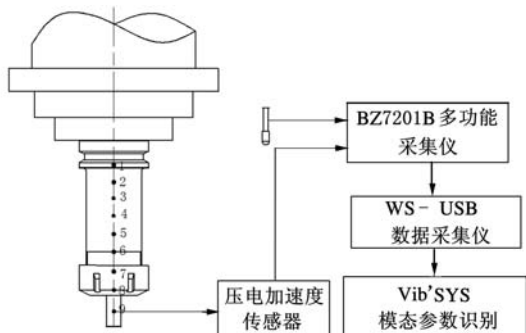
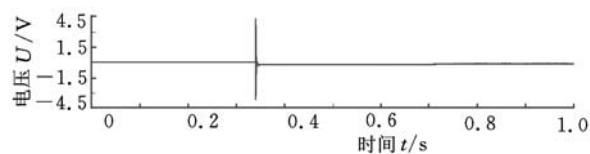


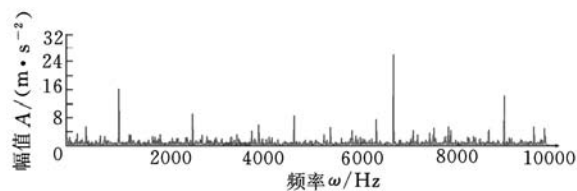
图 6 工况模态测试方案示意图

4.2.2 实验数据采集与处理

与自由模态方法类似,在不同位置和方向对工具系统进行激励,求得模态实验的传递函数、相干函数,从而得出大量实验数据,从中找出规律。为避免固有频率丢失和尽量减小分析误差,根据出现次数多、幅值较大的频率进行频率识别。图 7 所示为测试的一组数据。



(a)



(b)

图 7 工况模态测试数据

通过参数识别得到系统固有频率(摆动、扭转拉伸除外),求平均值,得到 BT40 测温刀柄前二阶固有频率,并与有限元分析结果进行对比分析,如表 5 所示。由表 5 可以看出,实验分析与有限元仿真结果有一定差距,但是总体看来,其计算结果还是合理可信的,从另一方面证明构建的模型是正确的。

表 5 工况模态实验结果

阶数	频率(Hz)	与有限元结果比较(%)
第一阶	1152.34	8.30
第二阶	6806.64	6.01

5 结语

根据 BT40 刀柄的结构和测温需求设计出了嵌入式测温刀柄,并对所设计的工具系统进行有限元模态分析和实验模态分析研究。实验结果与有限元仿真结果对比表明,该刀柄的结构设计及三维仿真模型是正确性的和合理的,同时,验证了该测温工具系统具有较好的固有特性,工况模态分析时,其第一阶固有频率($\omega_1 = 1152.34$ Hz)完全能满足 15 000 r/min 转速的要求,不会产生系统的共振。

参考文献:

- [1] 全燕鸣,赵婧,何振威,等.切削温度测量信号的获取与处理[J].中国机械工程,2009,20(5):573-577.
Quan Yanming, Zhao Jing, He Zhenwei, et al. Acquiring and Processing of Cutting Temperature[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(5): 573-577.
- [2] 张力,林建龙,项辉宇,等.模态分析与实验[M].北京:清华大学出版社,2011.
- [3] 梁军,赵登峰.模态分析方法综述[J].现代制造工程,2006(6):139-141.
Liang Jun, Zhao Dengfeng. Summary of The model Analysis Method[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2006(6): 139-141.
- [4] 杨建中,李江威,屈文晓,等.铣削加工过程稳定性分析[J].中国机械工程,2013,24(3):360-365.
Yang Jianzhong, Li Jiangwei, Qu Wenxiao, et al. Analysis of Milling Process Stability[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(3): 360-365.
- [5] 李德葆,陆秋海.实验模态分析及其应用[M].北京:科学出版社,2001.
- [6] 韩清凯,于涛,王德友,等.故障转子系统的非线性振动分析与诊断方法[M].北京:科学出版社,2010.
- [7] 沈春根.高速加工工具系统的动力学特性及应用基础研究[D].镇江:江苏大学,2011.

(编辑 苏卫国)

作者简介:李广慧,女,1960年生。广东海洋大学工程学院教授。研究方向为金属切削理论、高速切削技术。发表论文 30 余篇,主编教材 6 部。尹凝霞,女,1975年生。广东海洋大学工程学院讲师。徐红,女,1988年生。济南大学泉城学院工学院助教。谭光宇,男,1957年生。广东海洋大学工程学院教授。