

电主轴振动故障诊断与治愈研究进展*

樊红卫^{①②} 张旭辉^{①②} 寇发荣^{①②} 邵偲洁^① 程文杰^③ 肖玲^③

(^①西安科技大学机械工程学院 陕西 西安 710054; ^②陕西省矿山机电装备智能监测重点实验室 陕西 西安 710054; ^③西安科技大学理学院 陕西 西安 710054)

摘要: 电主轴是主轴与电机一体化的新型主轴,是高速机床的首选主轴。加工过程中电主轴振动故障时有发生,影响回转精度、使用寿命和工件质量。综述了近年来机床电主轴振动故障诊断与治愈即振动控制的研究进展。电主轴振动故障诊断主要采用信号处理和机器学习两个思路,前者以振动信号频谱和时频分析为核心,后者以故障数据集降维、分类和聚类分析为重点。故障治愈是故障诊断目标,主要有转子主动平衡、轴承和电机主动调控3个手段。电主轴故障诊断还缺乏神经网络、深度学习和趋势预测等方面研究,故障治愈技术的实用化程度尚不高,智能电主轴的研发仍需持续努力。

关键词: 电主轴; 振动; 诊断; 治愈; 控制

中图分类号: TG50, TH17 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2020.09.010

Research progress on vibration fault diagnosis and cure of motorized spindle

FAN Hongwei^{①②}, ZHANG Xuhui^{①②}, KOU Farong^{①②}, SHAO Sijie^①,
CHENG Wenjie^③, XIAO Ling^③

(^①School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, CHN;
^②Shaanxi Key Laboratory of Mine Electromechanical Equipment Intelligent Monitoring, Xi'an 710054, CHN;
^③College of Science, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, CHN)

Abstract: Motorized spindle (MS) is a new type of spindle integrated with motor, and is the first choice of high-speed machine tool spindle. In the process of machining, vibration fault of MS often occurs, which affects the rotary precision, service life and workpiece quality. In this paper, research progress of vibration fault diagnosis and cure namely vibration control of machine tool MS in recent years is reviewed. Vibration fault diagnosis of MS mainly adopts two ideas: signal processing and machine learning. The former focuses on frequency spectrum and time-frequency analysis of vibration signal, and the latter focuses on dimension reduction, classification and clustering analysis of fault data set. Fault cure is the target of fault diagnosis, which includes active balancing of rotor and active adjusting and controlling of bearing and motor. Research on fault diagnosis of MS is still lack of neural network, deep learning and trend prediction, and application degree of fault cure technology is not high, which still needs the continuous effort to develop intelligent MS.

Keywords: motorized spindle; vibration; diagnosis; cure; control

机床电主轴^[1]是主轴与电机一体化的新型主轴结构,电机的转子即机床主轴,相比皮带轴和齿轮轴,电主轴取消了中间传动环节,是一种直驱主轴。由于电主轴前端直接安装刀具或砂轮进行切削加工,因此电主轴工作状态对加工质量的影响极大。

在电主轴加工过程中,转轴、轴承和电机等关键部件故障时有发生。转轴不平衡和弹性弯曲,轴承滚道和滚动体损伤,以及电机气隙偏心与故障等,均会引起主轴系统强烈振动。特别是高速下,主轴振动对回转精度、使用寿命和加工质量危害极大,需要对加工过程

* 国家自然科学基金项目(51605380, 51974228, 51775426)

中电主轴振动故障进行主动诊断与治愈^[2](主要指振动控制)。

本文对近年来机床电主轴振动故障诊断和治愈研究的最新成果进行调查分析,梳理研究思路,归纳研究方法,指出问题和发展方向,为智能电主轴^[3]研发提供参考。

1 电主轴振动故障诊断方法

针对状态监测所得数据,采用信号处理或机器学习方法进行特征提取进而判定故障部位、类型和程度,实现电主轴故障诊断。

1.1 基于信号处理的电主轴故障诊断研究

基于信号处理的故障诊断主要通过特征频率进行故障识别,某个特征频率的出现预示着主轴存在某种故障,故障类型与特征频率之间具有对应关系。若主轴工作在恒定转速和负载下,可将其振动信号按平稳信号处理,采用以快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)或希尔伯特变换(Hilbert transform, HT)为代表的频谱分析方法确定故障频率;若主轴工况不稳定或变速变载运行,须将振动信号按非平稳信号处理,采用以小波变换(wavelet transform, WT)或经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)及其变种算法(如小波包分解、变分模态分解等)为代表的时频分析方法确定故障频率,进而完成故障诊断。

郭贵中等^[4]利用小波包分解对电主轴故障信号进行分解、重构和倒频谱分析(cepstrum analysis, CA),将结果与阈值比较实现预警。邓华波等^[5]提出了基于时域平均和FIR滤波的自动跟踪相关滤波算法,开发了LabVIEW程序并进行了仿真,实验证明了振幅精度比传统方法提高了约27%。胡振邦等^[6-7]采用数学形态学滤波器和FFT结合方法对主轴振动信号进行降噪,对转子工频幅值、相位进行提取,用影响系数法对转子失衡进行识别;同时,对突加不平衡,提出了采用小波降噪与短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)结合的特征提取方法。万海波等^[8]研究了基于希尔伯特-黄变换(Hilbert-Huang transform, HHT)的主轴振动特征提取方法,研制了监测软硬件,实现了实时监测与诊断。雷群等^[9]研究了变分模态分解(variational mode decomposition, VMD)的轴承故障诊断方法,用于识别主轴轴承早期故障,以缩短加速寿命测试周期。雷春雨等^[10]提出了基于小波包层次熵的电主轴特征提取方法,与FFT相比考虑了时间序列低频成分和低频成分。张珂等^[11]采用FFT、多项式

拟合和胡克定律结合方法,开发了电主轴不平衡识别算法,证明了其可行性。

此外,樊红卫等^[12]提出将一维振动转化为二维灰度图像,从而进行可视化诊断的思路,利用局部二值模式提取灰度图像纹理特征,通过二维傅里叶变换提取灰度图像特征,用二维矩阵平方和表征图像明暗程度,实现了电主轴故障诊断。

1.2 基于机器学习的电主轴故障诊断研究

基于机器学习的故障诊断主要通过对大量故障数据集进行降维、分类或聚类实现故障识别。降维算法能很好地压缩数据和约减特征,提高在线诊断效率,常用算法主要有主成分分析(principal component analysis, PCA)、核主成分分析(kernel principal component analysis, KPCA)和独立分量分析(independent component analysis, ICA)等;分类算法是对带类别标签故障数据集依照某种规则(如距离)进行学习而实现待分样本的故障识别,常用算法主要有K近邻(K-nearest neighbor, KNN)、决策树(decision tree, DT)、支持向量机(support vector machine, SVM)和关联分析(association analysis, AA)等;聚类算法则对无标签数据集进行学习,获得故障分类规则,常用算法有模糊C均值聚类(fuzzy C-means, FCM)等。

1.2.1 电主轴故障数据降维方法研究

针对电主轴故障诊断数据的降维,沈阳建筑大学石怀涛等^[13-16]进行了系列研究,其将多项式核函数和高斯径向基核函数进行线性组合得到混合核函数,通过人工蜂群(artificial bee colony, ABC)^[13]和粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)^[14]算法对KPCA参数进行了优化;同时,针对ICA提出基于相对变换的RTICA(relative transformation ICA)方法,分别用欧氏距离^[15]和马氏距离^[16],降低了数据维数,通过田纳西-伊斯曼过程仿真验证了算法有效性。

1.2.2 电主轴故障分类与聚类方法研究

对主轴故障分类算法的研究相对较多。黄国荣等^[17]提出了基于PCA与KNN结合的电主轴故障诊断方法,将主成分特征向量作为KNN输入,对比了其方法与决策树等方法的分类效果,证明PCA-KNN故障分类精度更高。杜守印等^[18]以铣床电主轴为对象提出了基于决策树的数据融合故障预警方法。李国发等^[19]研制了加工中心状态监测系统,将小波降噪和EMD-SVM算法用于信号分析,实现了主轴故障诊断。张爱华等^[20]将灰关联分析用于主轴故障识别,实验验证了待检主轴运行状态与灰关联分析结果一致。除上

述算法外,基于规则的分类算法在主轴故障诊断中也有一定应用。战红等^[21]研究了改进的多源信息融合诊断方法,对静态融合采用D-S证据理论(dempster-shafer theory, DST)与理论组合规则性质分析(dezert-smarandache theory, DSmT)自适应融合方法,对动态融合采用自由DSm和混合DSm模型进行融合,通过实例证明该方法既减小了计算量和复杂度,又提高了置信度。

聚类算法方面,樊红卫等^[22]提出了对称极坐标图像和FCM结合的主轴失衡故障诊断方法,对时域振动信号进行EMD降噪,用对称极坐标法将其转化为雪花图像,通过灰度共生矩阵提取特征参数,将特征向量标准化后输入FCM得到分类矩阵和聚类中心,计算贴进度实现了主轴失衡故障识别。

2 电主轴振动故障治愈方法

振动故障诊断的目的是指导用户对主轴故障进行及时治愈,可从转子、轴承或电机等角度进行主动调控,从而降低主轴系统振动,特别是失衡强迫振动和自激颤振,提高机床加工质量。

2.1 电主轴转子主动平衡方法研究

从转子角度,进行电主轴在线主动平衡,可有效控制同步振动,主要有机械式平衡头、喷液式平衡头和电磁式平衡头等。

机械式平衡头方面,樊红卫等^[23]开发了非接触机械式自平衡综合监控电主轴系统,机械式平衡头采用直流电机-蜗轮蜗杆-偏心齿轮组成的传动系统,驱动两个质量块作固定半径极坐标运动,通过矢量合成形成有效补偿矢量,控制信号发射与接收采用非接触无线方式,平衡头与电主轴集成为一体,得到了自平衡电主轴,在1 800~4 800 r/min转速范围内电主轴振动均可降至0.1 μm 。徐娟等^[24]也设计了一种极坐标式质量块型平衡头,采用蜗轮蜗杆减速器带动质量块实现定位,提出了模糊PID自适应控制策略,试验证明了较普通影响系数法具有较高平衡效率和精度。王展等^[25]对机械式平衡头质量块移动方式总结了质量块移动策略,对策略进行仿真和实验,得到了最佳移动方案。

喷液式平衡头方面,章云等^[26]设计了喷液式主轴平衡系统,通过液压系统由喷嘴向装于主轴上的扇形容腔内喷射液体形成平衡矢量,试验证明了其对高速主轴主动平衡的有效性,可将不平衡振动由1.60 mm/s降至0.34 mm/s;运侠伦等^[27]在此基础上提出了新型

采用3D打印快速成形的一体化平衡终端。张西宁等^[28]针对一种注排液型砂轮平衡装置,研究了液体控制策略,采用模糊PID控制器控制电磁阀进行多次微量注液,在2 700 r/min转速下砂轮振动下降约89%。

电磁式平衡头方面,樊红卫等^[29-31]提出了单平面自适应电磁主动平衡方法,在3 300 r/min转速下仿真证明了方法可行性;同时,设计了含永磁体电磁圆环形主动平衡头,由环形线圈通电产生脉冲磁场驱动配重盘形成平衡矢量,在不同工况下主轴振动最大降幅约60%。张珂等^[32]搭建了电磁滑环式在线动平衡装置测试台,用影响系数法进行在线动平衡实验,获得了实验台和主轴转速对在线动平衡系统影响规律;王展等^[33]基于此研究了双平面影响系数法在线平衡策略;邓华波等^[34]研究了单平面在线平衡策略。潘鑫等^[35]提出了可集成安装于主轴中空转子中的内装电磁滑环式平衡头,在3 600 r/min转速下将主轴振动降低约87.5%。

2.2 电主轴轴承和电机主动调控方法研究

相比转子主动平衡,从轴承或电机角度进行电主轴振动主动控制更加复杂和困难。

从轴承角度,采用调节轴承预紧或新型磁悬浮轴承可实现系统动态特性调节。冷怀方等^[36]采用压电叠堆作用于角接触球轴承外圈对主轴振动特性进行干预,基于线性二次型最优控制设计了反馈控制律,仿真证明了该方法在电主轴振动控制中效果明显。荣海等^[37]在传统磁悬浮电主轴零偏置电流控制基础上提出了基于多频率陷波器的不平衡抑制策略,实验证明了该方法能有效抑制转子同、倍频振动。

从电机角度,通过增加新绕组或主动阻尼器可产生附加电磁场以调节主轴系统振动特性。乔晓利等^[38-39]提出了内置力执行器的砂轮-电主轴不平衡振动主动控制方案,通过在原电主轴定子中增加一组绕组形成双绕组无轴承感应电机,仿真和试验证明了该方案能有效提高铣削稳定区域并抑制颤振。Wan等^[40]设计了电主轴用比例-微分控制线性电磁阻尼作动器,装于主轴刀具端,通过阻尼器附加磁场调节电主轴系统阻尼,以控制铣削过程中主轴颤振。

3 结语

机床电主轴振动故障诊断与治愈技术对运行状态保持和加工质量提升至关重要。诸多学者对此已进行大量探索,取得了不少理论与应用成果,对智能电主轴做出了积极贡献。表1总结了近年来我国在此领域

(不含动力学建模、分析与固有振动特性研究) 颇为活跃的学者及其代表性成果。

表1 近年我国电主轴振动故障诊断与治愈领域活跃学者及其代表性成果^[3, 5-7, 11-16, 22-23, 25-34, 38-39]

序号	研究机构	主要学者	成果方向	代表性成果
1	西安交通大学	梅雪松, 章云, 胡振邦等	振动信号处理, 主动平衡	喷液式主动平衡
2		张西宁等	振动信号处理, 主动平衡	喷液式主动平衡
3		曹宏瑞等	颤振机理及主动监控	主轴颤振抑制
4	沈阳建筑大学	吴玉厚, 张珂, 石怀涛, 王展等	主动平衡, 振动数据降维	机械、电磁式平衡, 在线影响系数法
5	西安科技大学	樊红卫等	主动平衡, 振动图像聚类	电磁、机械式平衡, 自适应平衡方法
6	浙江大学	祝长生, 乔晓利等	高速主轴电机	电机电磁调控

随着智能诊断与治愈技术的发展, 未来还需在以下方向进行探索或深入研究:

(1) 故障数据降维。除了线性方法外, 应加强以流形学习为主的非线性降维方法研究, 如多维度标度法(MDS)、保距映射法(Isomap)、t-SNE 和自编码器等。

(2) 故障分类方法。应扩展逻辑回归(LR)、贝叶斯网络(BN)、集成学习(EL) 和人工神经网络(ANN) 等分类方法, 特别是以 BP 神经网络(BPNN)、径向基函数神经网络(RBFNN) 和自组织映射网络(SOMNN) 等为代表的 ANN 方法应受到重视, 提高非线性数据的分类精度。

(3) 基于深度学习的分类方法, 应对大数据挑战。研究卷积神经网络(CNN), 并将自编码器(AutoEncoder)、深度信念网络(DBN) 等用于 CNN 预训练, 提高 CNN 方法的模型泛化能力即适应性, 实现大规模数据驱动的故障诊断。

(4) 挖掘历史数据, 开展故障趋势预测研究, 响应预测性维护需求。研究线性回归、多项式回归、逐步回归等经典预测方法和 SVM 岭回归、套索回归、弹性网回归、决策树回归和长短时记忆网络(LSTM) 等方法, 提高故障长时预测的准确度。

(5) 研究电主轴电磁振动、热致振动的监测诊断和治愈及机械振动与二者的耦合, 发展综合性宽频振动监控技术。

(6) 应用方面, 开发可靠的诊断与控制软硬件, 实现全转速非平稳载荷下的调控; 将诊断/控制系统与数控系统对接实现故障反馈控制; 将平衡头与电主轴一体化设计, 提升主轴产品原始创新。

参 考 文 献

- [1] Abele E, Altintas Y, Brecher C. Machine tool spindle units[J]. CIRP Annals—manufacturing Technology, 2010(59): 781–802.
- [2] 高金吉. 机器故障诊治与自愈化[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [3] Cao Hongrui, Zhang Xingwu, Chen Xuefeng. The concept and progress of intelligent spindles: a review[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2017, 112: 21–52.
- [4] 郭贵中, 毛新华. 基于 Matlab 的机床电主轴故障监测与诊断系统研究[J]. 煤矿机械, 2012, 33(8): 260–262.
- [5] 邓华波, 李婷婷, 王国新, 等. 基于 LabVIEW 的高速机床主轴振动信号提取方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2018, 34(3): 523–532.
- [6] 胡振邦, 张东升, 章云, 等. 数学形态学滤波器在转子失衡识别中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1038–1044, 1167–1168.
- [7] 胡振邦, 许睦旬, 姜歌东, 等. 基于小波降噪和短时傅里叶变换的主轴突加不平衡非平稳信号分析[J]. 振动与冲击, 2014, 33(5): 20–23, 36.
- [8] 万海波, 杨世锡. 基于 HHT 的数控机床主轴振动监测系统的研制[J]. 振动与冲击, 2014, 33(6): 48–52.
- [9] 雷群, 张翰乾, 郭伟科, 等. 基于加速寿命的机床主轴轴承寿命研究[J]. 机电工程技术, 2019, 48(8): 9–11, 80.
- [10] 雷春丽, 杨晓燕, 成彦伟, 等. 基于小波包层次熵的电主轴振动信号特征提取方法[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(5): 40–45.
- [11] 张珂, 李桐, 邓华波, 等. 一种电主轴在线动平衡测试算法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2016, 32(1): 148–155.
- [12] 樊红卫, 邵德洁. 基于灰度图像纹理分析的电主轴不平衡故障诊断方法[J]. 制造技术与机床, 2019(11): 130–134.
- [13] 石怀涛, 赵纪宗, 宋文丽, 等. 基于人工蜂群优化核主元分析故障检测方法[J]. 控制工程, 2018, 25(9): 1686–1691.
- [14] 石怀涛, 宋文丽, 张珂, 等. 基于粒子群优化的核主元分析的故障检测方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2016, 32(4): 710–717.
- [15] 石怀涛, 周乾, 王雨桐, 等. 基于相对变换的 ICA 故障检测方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(7): 1040–1046.
- [16] 石怀涛, 刘建昌, 薛鹏, 等. 一种改进的马氏距离相对变换主元分析方法及其故障检测应用(英)[J]. 自动化学报, 2013, 39(9): 1533–1542.
- [17] 黄国荣, 何亚飞, 杭琦. 基于 PCA 和 KNN 的电主轴故障诊断方法研究[J]. 上海第二工业大学学报, 2018, 35(4): 273–279.
- [18] 杜守印, 李斌, 胡鑫. 基于决策树的数据融合技术在电主轴故障分析与预测中的应用[J]. 天津科技, 2016, 43(10): 15–17, 20.
- [19] 李国发, 王大川, 张新戈, 等. 基于小波降噪和 EMD-SVM 的加工中心主轴系统状态监测技术[J]. 航空制造技术, 2019, 62(6): 47–52.
- [20] 张爱华, 任工昌, 燕向阳. 基于灰色关联度分析的数控机床主轴系统故障诊断方法[J]. 机械设计与制造, 2010(11): 160–161.

(下转第 64 页)

种台面模块作为优先系列模块。从表4可以看出,优先系列台面模块的直径差在分布比较合理,在直径分布的两端间距比较大,而密集分布的中间则比较小;同时优选的模块相对来说原有的重用率比较高,9种模块的重用次数达到60,占总共使用情况的75%。实际应用中可以根据企业的实际情况取不同的 Q_{ij} 值获得理想的模块系列化结果。

3 结语

本文提出用模块系列化设计解决小批量定制产品在模块化过程中存在的很多模块相似度高、重用率低以及模块配置不合理等问题,并结合惯性测试转台台面模块对模块系列化设计方法进行了研究。确定直径为台面模块的主参数,给出当量直径差、加权直径差的定义与计算,基于模块重用和相关计算初步选取优先系列模块并进行优化,然后得到优先系列模块的配置。优选了9种模块(为总数的37%)作为优先系列模块,并在保证加权直径差小于0.1的前提下兼容原有的24种模块。

参 考 文 献

[1]周济. 智能制造—“中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273-2284.

(上接第59页)

- [21]战红, 谭继文, 杜岩. 基于多传感器融合的高速电主轴振动故障诊断研究[J]. 制造业自动化, 2013, 35(12): 30-32.
- [22]樊红卫, 邵德洁, 张旭辉, 等. 一种对称极坐标图像模糊C均值聚类的主轴失平衡故障诊断方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(12): 57-62, 86.
- [23]樊红卫, 邵德洁, 杨一晴, 等. 一种机械式自平衡电主轴系统及试验研究[J]. 制造技术与机床, 2019(3): 50-54.
- [24]徐娟, 陈时桢, 何祥剑, 等. 基于模糊PID的平衡头自适应控制策略研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(6): 895-902.
- [25]王展, 涂伟, 李洁, 等. 高速主轴在线动平衡控制策略与实验研究[J]. 机床与液压, 2019, 47(11): 61-66.
- [26]章云, 梅雪松. 高速主驱动平衡及其在线控制技术[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 87-92.
- [27]运侠伦, 梅雪松, 姜歌东, 等. 喷液式一体化在线动平衡终端的设计与实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(10): 79-84, 111.
- [28]张西宁, 刘旭, 张雯雯, 等. 注排液型砂轮平衡装置控制策略与实验研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(15): 223-230.
- [29]樊红卫, 景敏卿, 刘恒, 等. 转子单平面自适应平衡控制仿真及电主轴平衡试验[J]. 西安科技大学学报, 2018, 38(5): 792-799.
- [30]Fan Hongwei, Jing Mingqing, Wang Renchao, et al. New electromagnetic ring balancer for active imbalance compensation of rotating machinery[J]. Journal of Sound and Vibration, 2014, 333(1718): 3837-3858.
- [31]樊红卫, 智静娟, 史必佳, 等. 转子自适应主动平衡算法及电磁平衡头单盘平衡试验[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(8): 15-21, 29.
- [32]张珂, 张驰宇, 张丽秀, 等. 电磁滑环式在线动平衡系统特性分析与

- [2]Zheng P, Xu X, Yu S Q. Personalized product configuration framework in an adaptable open architecture product platform[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43(3): 422-435.
- [3]Yang C, Lan S L, Shen W M, et al. Towards product customization and personalization in IoT-enabled cloud manufacturing[J]. Cluster Computing, 2017, 20(2): 1717-1730.
- [4]Zhang J, Gu P H, Peng Q J, et al. Open interface design for product personalization[J]. CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 173-176.
- [5]Wu J B, Wu Z L. Improved fuzzy C-means clustering for personalized product recommendation[J]. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2013, 6(3): 393-399.
- [6]经有国, 但斌, 张旭梅, 等. 基于本体的非结构化客户需求智能解析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(5): 1026-1033.
- [7]董惠敏, 徐文汇, 章信华, 等. 偏航行星减速器的模块化、系列化设计方法[J]. 机械传动, 2016, 40(2): 44-48.
- [8]谌炎辉, 周德俭. 基于相异度计算的模块库聚类分析方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 19(3): 466-471.

第一作者: 谌炎辉, 男, 1973年, 博士, 教授, 研究方向为数字化设计、模块化设计, 已发表论文50多篇。

(编辑 谭弘颖)

(收稿日期: 2020-03-16)

文章编号: 20200914

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。

实验[J]. 振动、测试与诊断, 2018, 38(1): 34-38, 203.

- [33]王展, 涂伟, 朱峰龙. 基于影响系数法的主轴在线动平衡实验研究[J]. 机床与液压, 2018, 46(13): 28-32.
- [34]邓华波, 郭建成, 王玮琪, 等. 主轴电磁滑环式平衡头单平面动平衡调整方法[J]. 沈阳建筑大学学报: 自然科学版, 2019, 35(2): 355-364.
- [35]潘鑫, 何啸天, 吴海琦, 等. 内装电磁滑环式主动平衡系统的研究[J]. 振动与冲击, 2019, 38(20): 7-11.
- [36]冷怀方, 孟利波, 合烨. 采用压电叠堆的电主轴振动主动控制研究[J]. 现代制造工程, 2017(9): 74-80.
- [37]荣海, 周凯, 毛飞龙. 基于零偏置电流的磁悬浮电主轴动不平衡力抑制[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2019, 59(8): 683-688.
- [38]乔晓利, 祝长生. 基于内置力执行器的铣削颤振的主动控制[J]. 机械工程学报, 2012, 48(1): 185-192.
- [39]乔晓利, 祝长生. 砂轮不平衡振动主动控制的实验研究[J]. 振动工程学报, 2017, 30(1): 55-61.
- [40]Wan Shaoke, Li Xiaohu, Su Wenjun, et al. Active damping of milling chatter vibration via a novel spindle system with an integrated electro-magnetic actuator[J]. Precision Engineering, 2019, 57: 203-210.

第一作者: 樊红卫, 男, 1984年生, 博士, 硕士生导师, 主要研究方向为智能主轴与振动监测、诊断与控制。

(编辑 兰希)

(收稿日期: 2020-02-20)

文章编号: 20200913

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。