

转子在线动平衡嵌入式控制系统开发与验证^{*}

樊红卫^{1,2}, 景敏卿¹, 智静娟¹, 辛文辉³, 李 猛¹, 刘 恒¹

(1. 西安交通大学机械工程学院 西安, 710049) (2. 西安科技大学机械工程学院 西安, 710054)

(3. 西安理工大学机械与精密仪器工程学院 西安, 710048)

摘要 为了快速、有效抑制由于质量不平衡引起的转子振动并在线监测转子的实时平衡状态,基于模块化设计思想设计了一种针对电磁式主动平衡装置的嵌入式在线自动平衡控制系统。使用数字信号处理器(digital signal processor,简称 DSP)和现场可编程门阵列(field programmable gate array,简称 FPGA)构建了一种快速平衡控制器,基于影响系数法建立了自适应平衡控制模型,采用 C 和 C# 语言分别开发了多线程的平衡控制软件和人机交互界面,针对某国产电主轴完成了整个系统功能的试验验证。结果表明:当主轴在 3 kr/min 平稳运行时,通过该自平衡系统可将其振动大约降低 43%。

关键词 转子不平衡; 在线自动平衡; 嵌入式控制系统; 自适应控制; 数字信号处理器

中图分类号 TH113.2⁺5; TP273⁺.2

引 言

随着现代工业技术的飞速发展,旋转机械逐步向高速化、精密化、智能化的方向发展,这使得机器的振动问题越发突显。机器的剧烈振动对机器本身及周围环境都会带来一系列的危害。在这些有害振源中,由质量不平衡所引起的基频振动是最为常见的振动形式之一。因此,研究转子特别是精密用途的转子的精密、智能动平衡技术具有重要的工程应用价值^[1-2]。

在动平衡技术领域,根据机器是否需要停机可将转子动平衡方法分为离线平衡和在线平衡^[3-4]。在线平衡根据是否需要外部能量和控制系统又分为主动平衡和被动平衡^[5]。由于主动平衡是一种基于实时测试信号的平衡方式,因此它不依赖于转子-轴承系统的精确动力学模型,故其应用范围极广。在线主动平衡实际上是利用传感器和一套测控装置,在线检测工作中的转子振动幅值及相位,通过相应的控制算法得到平衡执行装置应该产生的平衡补偿矢量,最终依靠外部能量驱动执行装置运动到目标位置,从而实现转子质量分布不均匀的补偿,达到抑制转子振动的目的。

国内外已有诸多学者对在线主动平衡技术进行了探索^[6-14]。国外已有成熟的在线动平衡系统应用

于磨床;而国内对在线主动平衡技术的研究才刚起步,依然停留在理论研究和实验阶段,未得到真正工程应用。

本课题组自 2010 年以来对新的电磁式主动平衡技术进行了持续研究。笔者首先介绍用于电磁平衡装置^[13]的在线主动平衡测控系统方案及原理,其中,控制器核心部分由 DSP 与 FPGA 协同工作。这里, FPGA 实现信号采集与存储, DSP 实现信号处理、控制算法执行及与上位机通信等。针对构建的控制硬件,完成了软件开发,包括自适应控制算法、多线程底层程序、人机交互界面开发等。针对一台国产刚性电主轴,完成了整个平衡系统的功能验证。

1 在线主动平衡系统设计方案

1.1 在线主动平衡技术要求

笔者讨论的动平衡控制系统是针对文献^[13]提出的电磁圆环形平衡装置设计的,该平衡装置是通过线圈通电产生电磁场从而达到平稳驱动携带偏心质量的配重盘转动实现对转子质量的重新分布,进而达到抑制振动的目的。为此,相应的测控系统应考虑以下方面的要求:选择对不平衡具有最敏感反映的电涡流位移传感器作为测振传感器;采用滤波、放大等必要预处理提高信号的信噪比,并实现快速

^{*} 国家自然科学基金资助项目(51175410)

收稿日期:2014-03-27;修回日期:2014-06-15

采集和运算;采用具有智能、快速特点的平衡控制算法;测控器硬件应能够长期可靠工作;驱动电路应能够平稳驱动平衡头运动到预定位置;控制软件应具有良好的交互性,方便用户监控平衡过程。

1.2 在线主动平衡系统设计方案

针对数控磨床,一个完整的在线主动系统由砂轮-电主轴组合转子、传感器(电涡流位移传感器和光纤转速传感器)、平衡控制器和平衡执行装置即电磁平衡头、驱动单元以及远程主机等 6 部分组成,如图 1 所示。

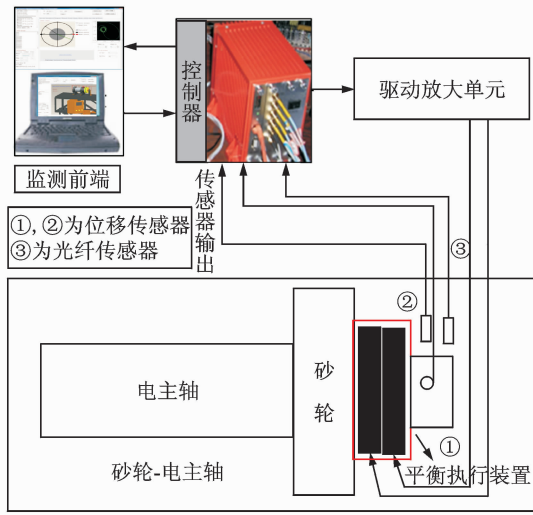


图 1 在线主动平衡测控系统基本组成

Fig. 1 Structure of online active balance control system

统信号采集。FPGA 利用其内部随机存取存储器 (random access memory, 简称 RAM) 实现先进先出 (first in first out, 简称 FIFO) 存储功能,通过 DSP 的外部存储器接口 (external memory interface, 简称 EMIF) 实现二者无缝连接,避免复杂的接口逻辑设计,解决了模拟数字转换器 (analog to digital converter, 简称 ADC) 与 DSP 的高速数据传输问题。FPGA 检测到外触发信号时,能够以指定采样频率 (转频的倍频) 进行采样,从而实现整周期采样,提高信号处理质量。当 FPGA 模块采集到指定长度的信号后通知 DSP 读取数据,大大减少了 DSP 运行负担,提高了系统效率。这种 DSP 和 FPGA 协同工作的模式保证了系统运行的高效性和条理性。

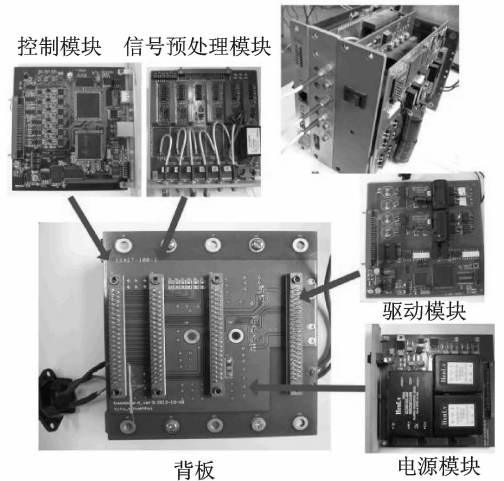


图 2 控制器硬件模块连接图

Fig. 2 Controller hardware module connection

2 在线主动平衡测控器硬件设计

2.1 硬件模块化设计

为了便于系统移植和功能扩充,将平衡控制器设计成模块化结构,每一个模块为一独立的功能单元,主要分为电源模块、信号预处理模块、控制模块和驱动模块 4 部分,各模块之间通过自定义背板总线实现通讯。若某个模块出现故障可以单独替换,系统灵活性、实用性和可靠性较高,如图 2 所示。

2.2 控制模块详细设计

控制模块是整个平衡控制器的核心部分,应具有强的数据处理能力和高的实时性。因此,选择高性能 DSP 芯片作为核心处理器^[15],同时选择 FPGA 作为辅助芯片。这里,DSP 选择 TI 公司 32 位浮点 TMS320C6713PYP。FPGA 选择 EP2C8Q208C8,该芯片除了实现系统逻辑控制外,同时实现控制系

为了将控制系统的数据在用户界面上实时显示以便用户操作,DSP 通过 EMIF 接口与硬件 TCP/IP 协议栈芯片连接,通过网口实现与主机交互。以 DSP 与 FPGA 为控制核心,再加上外部存储、A/D, D/A 等器件构成控制模块电路,如图 3 所示。

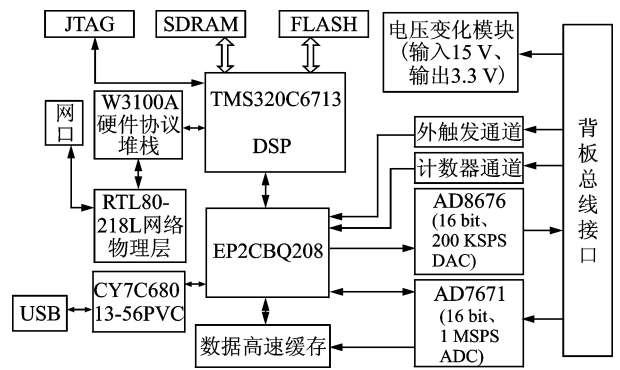


图 3 控制模块电路原理图

Fig. 3 Control module circuit principle diagram

3 在线主动平衡测控器软件设计

平衡控制器硬件为在线主动控制系统提供总的构架,是坚实的物理基础;平衡控制策略及算法的设计、软件的开发及 DSP 与 FPGA 之间的任务协调则是整个系统能否实现预定功能的关键所在,是在线主动平衡测控系统的灵魂。

3.1 在线主动平衡控制算法

在线主动平衡控制方法主要有影响系数法^[16]和基于影响系数的自适应平衡算法^[17-18]等。自适应平衡算法是在传统影响系数法基础上提出的,它兼顾了影响系数法的优点并通过引入遗忘因子有效避免了错误影响系数可能引起的振动增大问题,弥补了影响系数法的不足;同时,引入加权因子提高了系统的稳定性。

笔者针对刚性机床电主轴,提出了一种单平面自适应平衡方法,具体如下。

由单平面影响系数的定义,可知当转子角速度为 ω 时,影响系数 $a(\omega)$ 为

$$a(\omega) = \frac{u_{k+1} - u_k}{p_{k+1} - p_k} \quad (1)$$

其中: p_k, p_{k+1} 分别为第 k 次、 $k+1$ 次试重的质径积 ($g \cdot cm$); u_k, u_{k+1} 分别为第 k 次、 $k+1$ 次试重时所测得的主轴振动量 (μm)。

在线主动平衡的目标是实现 $u_{k+1} = 0$,将其代入式(1)得

$$p_{k+1} = p_k - \frac{u_k}{a(\omega)} \quad (2)$$

平衡过程中,用最近两次迭代中配重盘的配重矢量以及振动响应来估算影响系数,得

$$\hat{a} = \frac{u_k - u_{k-1}}{p_k - p_{k-1}} \quad (3)$$

由于试验现场扰动及测量噪声的存在,用式(3)计算影响系数会产生较大误差。为此,引入加权因子 β 来权衡相邻两次计算得到的影响系数的真实性,减小测量噪声对影响系数值的影响,得到第 k 次迭代时的影响系数,如式(4)所示

$$\hat{a}_k = (1 - \beta)\hat{a}_{k-1} + \beta\left(\frac{u_k - u_{k-1}}{p_k - p_{k-1}}\right) \quad (4)$$

其中: $0 \leq \beta \leq 1$,具体值需根据现场工况调整得到。

实际动平衡过程中,用在线估测到的影响系数 \hat{a}_k 替代式(2)中的影响系数。

为进一步提高系统的稳定性,在式(2)中引入增益因子 G ,得

$$p_{k+1} = p_k - G\left(\frac{u_k}{\hat{a}_k}\right) \quad (5)$$

综合式(4)与式(5),可得每次迭代后配重盘应合成的矢量,其控制框图如图 4 所示。

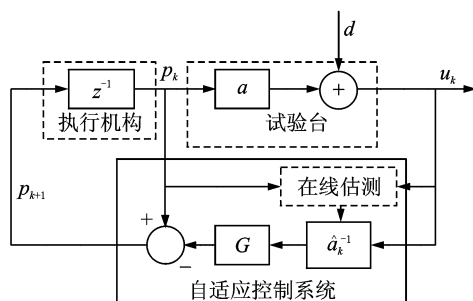


图 4 平衡控制算法框图

Fig. 4 Balancing control law block diagram

3.2 控制系统软件设计

控制系统软件包含两部分:控制器底层运行程序和用户界面程序。底层程序用 C 语言开发,利用 DSP/BIOS 模块创建 3 个线程:任务线程、数据传输线程和外触发中断线程,保证系统工作的高效性。任务线程主要包括信号采集、存储、处理及控制算法执行;数据传输线程主要包括接收控制命令、将任务线程实时数据通过结构体方式打包上传到顶层;外触发中断线程主要是检测外触发采样信号实现各路信号的同步采集,流程如图 5 示。

远程人机界面程序用 C# 语言编写,界面如图 6 所示。其中:网络连接部分通过设置 IP 和端口号实现与控制器网络连接;控制命令设置部分决定控制器是否开启,同时向底层传输控制参数初始值;采样参数设置部分设定采样长度、采样频率及采样模式(外触发采样);时域与频域信号在线显示部分显示主轴转动过程中各传感器采集到的信号的实时波形。配重盘的位置显示部分实时显示平衡过程中配重盘的位置变化。

4 试验验证

4.1 试验台

为了验证在线动平衡控制器各模块工作的有效性及控制算法的正确性,建立了带有电磁平衡头的电主轴振动测试试验台,自平衡电主轴的结构及试验台如图 7 所示。电主轴右端安装了一个自主开发的电磁平衡头,靠近电磁平衡头位置处安装有一个带螺纹孔的不平衡盘。

试验中,在不平衡盘上加 3 个重量为 2.33g 的螺钉来模拟砂轮-电主轴在运行过程中的不平衡量,

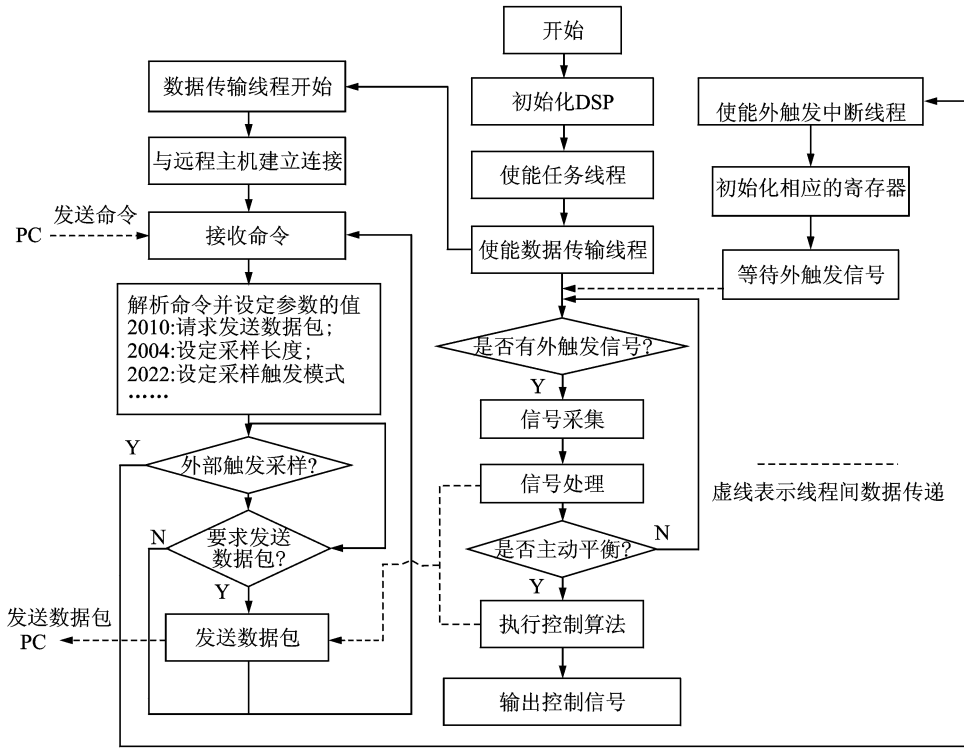


图 5 底层程序流程图
Fig. 5 Program flow diagram

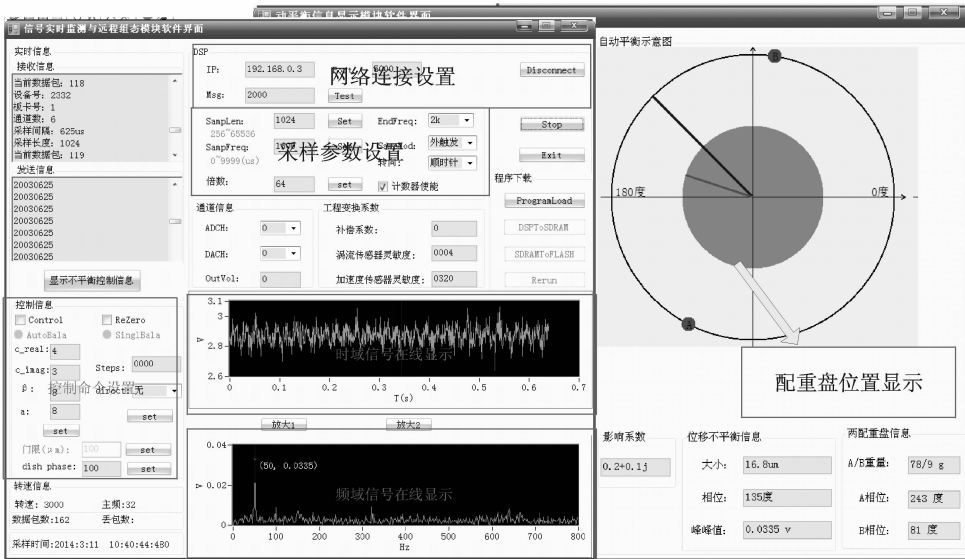


图 6 用户界面
Fig. 6 User interface

不平衡量相对于外触发点的相位为 180° 。位于电主轴轴颈外侧、相互垂直的两个电涡流位移传感器用于提取振动位移,光纤传感器用于测量主轴的真实转速,利用转速信号上升沿实现外触发采样,保证各传感器相位基准统一。

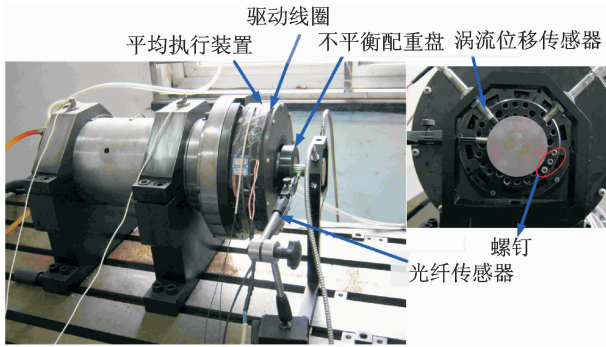
4.2 系统考核试验

电主轴转速设为 3 kr/min,待转速稳定后在顶

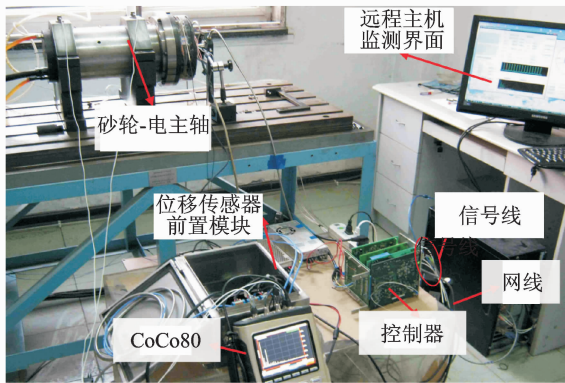
层用户界面设定控制策略为自动控制,初始影响系数为 $0.2+0.1i$,加权系数为 0.9,增益系数为 0.8,设定平衡门限值为 $10 \mu\text{m}$ 即当电主轴振动量大于 $10 \mu\text{m}$ 时开启在线主动平衡。

在线主动平衡之前,电主轴初始基频振动为 $20.35 \mu\text{m}$ 、相位为 131° ;在线平衡后,基频振幅降至 $11.675 \mu\text{m}$ 、相位变为 141.5° ,振动幅值减小了 43%。

在线主动平衡前、后轴心轨迹如图 8 所示。可

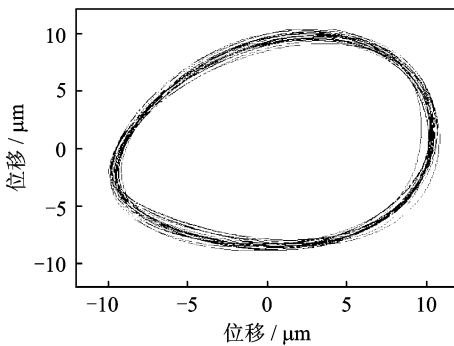


(a) 自平衡电主轴结构
(a) Self-balancing electric spindle

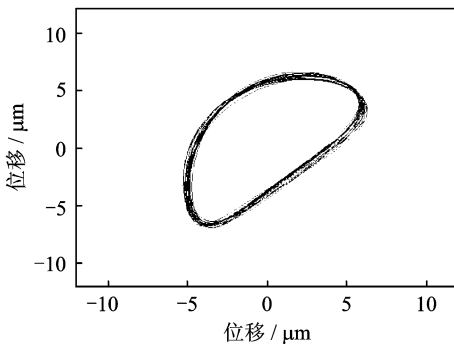


(b) 测控系统电气连接
(b) Controller electrical connection

图7 试验台
Fig. 7 Test bed



(a) 平衡前
(a) Before balance



(b) 平衡后
(b) After balance

图8 轴心轨迹
Fig. 8 Shaft orbit

以看出:a.轴心轨迹在平衡后明显缩小,轴的动态运行精度因此提高;b.电主轴轴心轨迹仍然呈近似椭圆状,这是残余不平衡所致。

试验结果证明了所开发的自动平衡测控器是可行、有效的,它与顶层之间的通信、基频信号的提取及平衡算法的执行都是正常的,与电磁平衡头协同工作能够实现对刚性主轴转子的单平面在线主动平衡。

5 结论

1) 针对砂轮-电主轴组合转子,提出了一种单平面在线主动平衡方案,主要提出了基于DSP和FPGA的在线主动平衡控制系统,其模块化的设计便于自由重构和功能扩展(如软/硬件向双面平衡扩展)。

2) 对这种平衡系统,从硬件设计、平衡算法和软件开发等方面进行了详细介绍,特别是建立了单平面平衡的自适应控制算法,保证了平衡试重过程无需依靠人为操作,平衡过程具有高智能性。

3) 建立了系统考核试验台,完成了功能验证。结果表明:当主轴转速为3 kr/min时,基频振动由初始 $20.35 \mu\text{m}$ 降至平衡后的 $11.675 \mu\text{m}$,振幅减小了约43%。这说明提出的平衡算法是有效的、所开发的控制系统工作是可靠的。本研究工作为机床主轴的在线主动平衡提供了新的技术途径,对于其他刚性转子具有一定的参考价值 and 推广前景。

参 考 文 献

- [1] Kim J S, Lee S H. The stability of active balancing control using influence coefficients for a variable rotor system[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 22: 562-567.
- [2] 纪跃波. 弱非平稳转速下转子动平衡方法[J]. 振动、测试与诊断, 2012, 32(4): 597-601.
Ji Yuebo. Dynamic balancing of the rotor with weakly non-stationary rotational speed [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(4): 597-601. (in Chinese)
- [3] 章云, 梅雪松. 高速主轴动平衡及其在线控制技术[J]. 中国工程科学, 2013, 15(1): 87-92.
Zhang Yun, Mei Xuesong. Study of online balancing control technique for high-speed spindles [J]. Engineering Sciences, 2013, 15(1): 87-92. (in Chinese)
- [4] 伍良生, 张云禧, 周大帅, 等. 以DSP为核心的高速主轴在线动平衡控制器的设计[J]. 现代制造工程, 2008

- (8):12-15.
Wu Liangsheng, Zhang Yunxi, Zhou Dashuai, et al. The design of high-speed spindle dynamic balancing controller based on DSP [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2008(8):12-15. (in Chinese)
- [5] Steger R, Lin K, Adelstein B D, et al. Design of a passively balanced spatial linkage haptic interface[J]. Journal of Mechanical Design, 2004(126): 984-991.
- [6] Dyer S W, Ni J. Adaptive influence balancing systems for rotating machinery[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2001,123(2): 291-298.
- [7] 尹明泉. 转子在线主动平衡测控集成系统研究[D]. 西安:西安交通大学,2011.
- [8] 孙宝东. 高速转子自动平衡技术的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1995.
- [9] 贺世正. 释放液体式自动平衡头的研究[J]. 浙江大学学报,2001,35(4):418-422.
He Shizheng. Study of liquid release auto balancing head [J]. Journal of Zhejiang University, 2001, 35 (4): 418-422. (in Chinese)
- [10] 葛哲学. 刚性转子自动平衡系统研究[D]. 长沙:国防科技大学,2002.
- [11] 杨庆坤. 高速主轴在线动平衡装置的设计与研究[D]. 北京:北京工业大学,2006.
- [12] 周卫华. 基于自适应影响系数控制算法的转子自动平衡研究[D]. 北京:北京化工大学,2005.
- [13] 樊红卫,景敏卿,王仁超,等. 磁力配重型在线自动平衡头的作动原理研究[J]. 西安交通大学学报,2013,47 (2):97-102.
Fan Hongwei, Jing Minqing, Wang Renchao, et al. Actuating principle of online automatic balancer with counter weight driven by magnetic force [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47 (2): 97-102. (in Chinese)
- [14] 马石磊,裴世源,王琳,等. 采用新型电磁动平衡装置的动平衡研究[J]. 西安交通大学学报,2012,46(3):21-26.
Ma Shilei, Pei Shiyuan, Wang lin, et al. Dynamic balancing with online electromagnetic balancing device [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46 (3): 21-26. (in Chinese)
- [15] 于凤芹. TMS320C6000DSP 结构原理与硬件设计 [M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2008:96-124.
- [16] Goodman T P. A least-squares method for computing balance corrections [J]. Transactions of the ASME; Journal of Engineering for Industry, 1964(8): 273-279.
- [17] Moon J D, Kim B S, Lee S H. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients [J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2006, 46: 978-987.
- [18] Stephen W D. Adaptive optimal control of active balancing for high-speed rotating machinery [D]. United States: The University of Michigan, 1999.



第一作者简介:樊红卫,男,1984年10月生,博士生。主要研究方向为旋转机械状态监测与在线动平衡,磁力机械等。曾发表《Study on pinion tooth surface generation strategy of spiral bevel gears》(《Chinese Journal of Mechanical Engineering》2012, Vol. 25, No. 4)等论文。
E-mail: fanhongwei84@163.com