

文章编号 1004-924X(2017)08-2149-06

重复控制与积分正反馈组合的磁轴承低功耗控制

徐向波, 陈 劭*, 刘晋浩

(北京林业大学 工学院, 北京 100083)

摘要: 本文提出一种重复控制与积分正反馈相结合的控制方法, 以抑制磁轴承系统功耗。首先建立了磁轴承系统的数学模型, 分析了由重力、转子不平衡和位移传感器噪声引起的电流噪声的频率特性, 分析发现其可分为直流和多谐波两大类; 其次推导了用于消除直流电流的控制器需满足的条件, 在此基础上, 设计了一种电流积分正反馈算法。通过调节转子的悬浮位置, 利用混合磁轴承中永磁体产生的磁力抵消重力, 抑制电流的直流分量, 采用根轨迹方法确定保证闭环系统稳定的参数取值范围; 然后提出一种嵌入式重复控制方法抑制转子不平衡和位移传感器引起的多谐波电流噪声, 采用重构谱理论判定系统的稳定性。最后以磁悬浮控制力矩陀螺为测试平台, 对所提出的控制算法进行仿真和实验研究。结果表明: 采用该算法后, 电流的直流分量基本被抑制, 谐波分量的峰峰值减小了 88.3%, 功耗减小了 7W, 验证了该算法的有效性。

关键词: 磁轴承; 直流电流; 多谐波电流; 低功耗; 重复控制; 积分正反馈

中图分类号: V448.22; TP273.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172508.2149

Low power control of magnetic bearing combined by repetitive control and positive integral feedback

XU Xiang-bo, CHEN Shao*, LIU Jin-hao

(School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

* Corresponding author, E-mail: chenshaol019@163.com

Abstract: A control method combined by repetitive control and positive integral feedback was proposed to restrain system power consumption of magnetic bearing. Firstly, mathematical model of magnetic bearing system was established. Frequency characteristics of current noise caused by gravity, rotor imbalance and displacement sensor noise were analyzed, and found the current noise could be divided into two types of direct component and harmonic component. Controller conditions of eliminating direct current were deduced, a current positive integral feedback was designed. By adjusting suspension position of rotor, magnetic force produced by permanent magnet in hybrid magnetic bearing was used to offset gravity and suppress direct current component. A root locus method was employed to analyze the stability of the closed-loop system and to determine the parameters range. Then a plug-in repetitive control method was proposed to suppress multiple-harmonic current noise caused by rotor imbalance and displacement sensor. The absolute stability of the whole system was analyzed with the help

收稿日期: 2016-12-27; 修订日期: 2017-04-14.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(No. 51605031); 中国博士后科学基金面上资助项目(No. 2016M600051)

of the regeneration spectrum. Finally, simulation and experimental research were implemented for proposed control algorithm taking magnetically suspended control moment gyro as test platform. Results indicate that: after applying proposed algorithm, direct current component is suppressed basically, peak-to-peak value of harmonic component is decreased by 88.3% and power consumption is decreased by 7 W, which verifies effectiveness of the algorithm.

Key words: magnetic bearing; direct component; harmonic component; low power consumption; repetitive control; positive integral feedback

1 引言

磁轴承具有无接触、高转速、支承特性可控等显著优点^[1], 广泛应用在飞轮、控制力矩陀螺和高速电机等设备中^[2-4]。功耗是高速旋转设备的一项重要指标, 也是制约磁轴承在航天、储能等能耗要求严苛的领域中应用的关键因素^[5]。

重力、转子不平衡和位移传感器噪声是磁悬浮旋转机构的主要干扰, 它们分别引起直流、同频和谐波频率的电流噪声, 造成损耗增大、壳体振动和精度下降等问题^[6-8]。主动磁轴承采用减小偏置电流的方法减小功耗^[9], 但减小幅度很小。而混合磁轴承采用永磁体提供偏置, 可大幅降低悬浮功耗^[10]。虽然采用前馈装置可大幅消除重力、陀螺力矩引起的直流损耗, 但抑制效果受系统建模精度的影响^[11]。虽然通用陷波器可有效抑制同频电流^[8], 然而转子不平衡和位移传感器噪声引起的谐波电流噪声的频率较为丰富, 若并联或串联多个陷波器分别抑制各个频率, 计算量将显著增大^[12]。通过调研国内外相关文献, 发现重复控制能同时抑制所有频次谐波, 且计算量小^[13], 适用于谐波电流噪声的抑制。

本文针对磁轴承系统的低功耗控制问题, 提出一种电流积分正反馈方法调节转子悬浮位置, 以永磁力抵消重力, 并采用一种嵌入式重复控制算法, 抑制转子不平衡和位移传感器噪声引起的谐波电流, 最终有效降低了系统功耗。

2 磁轴承系统建模与分析

磁轴承系统主要由磁轴承定子、位移传感器、磁悬浮转子、控制器和功率放大器组成, 如图 1 所示。其中定子和位移传感器采用差动形式。

O 为定子中心及坐标系原点; G 为转子重力,

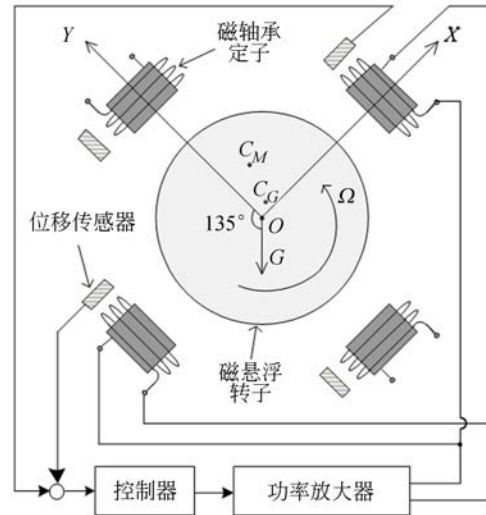


图 1 磁轴承系统结构图

Fig. 1 Structure of magnetic bearing system

Ω 为转子转速; C_G 为转子几何中心, 设 C_G 的坐标为 (x_G, y_G) ; C_M 为转子质心, 设 C_M 坐标为 (x_M, y_M) ; 转子不平衡表现为 C_G 和 C_M 的不一致, 定子以 Ω 的转速与转子同步旋转^[4], 可定义为:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M \\ y_M \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_G \\ y_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon \cos(\Omega t + \chi) \\ \varepsilon \sin(\Omega t + \chi) \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, ε 和 χ 分别为转子不平衡的幅值和初始相位。

磁轴承系统 X 和 Y 两方向参数对称。以 X 为例进行分析, 磁悬浮转子动力学和轴承力方程可表示为:

$$\begin{cases} m \ddot{x}_M = f_x - \frac{\sqrt{2}}{2} G \\ f_x = k_i i_x + k_x x_G \end{cases}, \quad (2)$$

其中, f_x 为 x 轴的轴承力, k_i 和 k_x 分别为电流刚度和位移刚度。

X 方向磁轴承系统如图 2 所示, 其中 $C_i(s)$ 为控制器, 且 $C_i(s) = k_p + k_I/s + K_D s$, k_p , k_I 和 k_D 为其比例、积分和微分系数; $G_w(s)$ 是简化为一阶

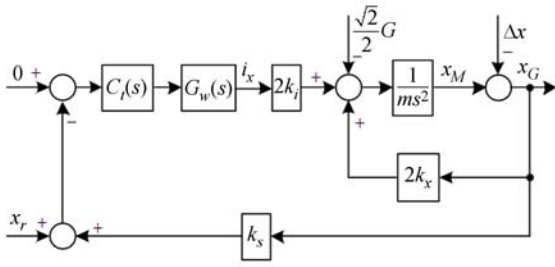


图 2 X 方向磁轴承系统原理图

Fig. 2 Diagram of magnetic bearing system in X axis

低通滤波器的功率放大器模型, k_w 和 ω_w 分别为其幅值和截止频率。 k_s 为位移传感器增益, x_r 表现为转速同频和倍频位移传感器噪声, 且^[8]:

$$x_r = \sum_{i=1}^n x_{ri} \sin(i\Omega t + \alpha_{ri}), \quad (3)$$

其中, i 为传感器位移噪声的谐波阶次, x_{ri} 和 α_{ri} 分别为 i 次谐波的幅值和初始相位。

则 X 方向磁轴承电流方程可整理为:

$$i_x(s) = \frac{k_s G_w(s) C_t(s)}{m s^2 - 2k_x + 2k_i k_s G_w(s) C_t(s)} \frac{\sqrt{2}}{2} G(s) + \frac{k_s m s^2 G_w(s) C_t(s)}{m s^2 - 2k_x + 2k_i k_s G_w(s) C_t(s)} \Delta x(s) - \frac{G_w(s) C_t(s) (m s^2 - 2k_x)}{m s^2 - 2k_x + 2k_i k_s G_w(s) C_t(s)} x_r(s), \quad (4)$$

由上述分析可知, 重力、转子不平衡和位移传感器噪声分别引起直流、同频和谐波形式的电流噪声。

3 低功耗控制算法设计

3.1 直流电流抑制算法设计

为抑制重力引起的直流电流分量, 本文设计了一种电流积分正反馈控制器 $C_g(s)$, 如图 3 所示。

$C_g(s)$ 、 $C_t(s)$ 和 $G_w(s)$ 组成局部闭环控制器 $C_{lg}(s)$, 其闭环传递函数可表示为:

$$C_{lg}(s) = \frac{C_t(s) G_w(s)}{1 - C_t(s) G_w(s) C_g(s)}. \quad (5)$$

将式(5)代入式(4)可得到采用积分正反馈后 $i_x(s)$ 的表达式, 若要完全消除 $i_x(s)$ 的直流分量, 需要满足:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} i_x(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s i_x(s) = 0. \quad (6)$$

解算上式, 可得 $C_g(s)$ 的通用表达式:

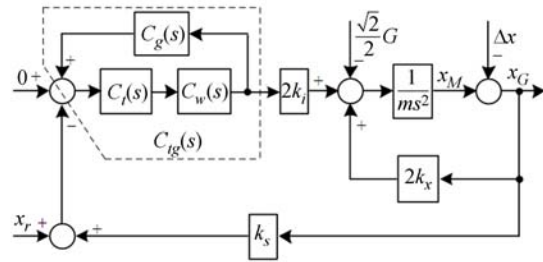


图 3 直流电流抑制系统原理图

Fig. 3 Diagram of direct current suppression system

$$C_g(s) = \frac{q(s)}{s^m p(s)}, \quad (7)$$

其中, m 为自然数, $q(s)$ 与 $p(s)$ 为关于 s 的互质多项式, 分母中必须含有 s^m 项, 且不可约。

为简化控制器的设计, $C_g(s)$ 可设计成一个典型的积分控制器, 则:

$$C_g(s) = k_g \frac{1}{s}, \quad (8)$$

其中 k_g 为积分反馈增益。

重力表现为阶跃形式, 其函数表达式为 mg/s , 由式(8)可知 $C_g(s)$ 即为积分控制器, 与重力扰动的传递函数类似。因此该控制器的设计符合内膜原理, 可完全抑制重力引起的直流电流分量。

采用根轨迹方法分析系统稳定性并确定 k_g 的取值范围, 如图 4 所示。显然 k_g 的稳定域为 $0 \sim 934$ 。随着 k_g 取值的增大, 系统阻尼比减小, 响应速度加快, 稳定裕度变小, 实际 k_g 的取值可根据系统收敛精度和时间等特性进行手动调试和确定。

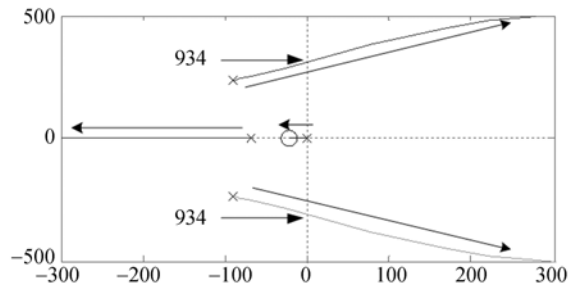


图 4 k_g 的根轨迹

Fig. 4 Root locus of k_g

3.2 谐波电流抑制算法设计

为抑制转子不平衡和位移传感器噪声引起的多谐波电流, 本文设计了一种嵌入式重复控制器, 如图 5 所示, k_r 为重复控制器增益; $e^{-T_p s}$ 为时延

模块, T_p 为延迟时间; $F_L(s)$ 为改善系统稳定性的低通滤波器, 可设计为一阶形式; $C_f(s)$ 为相位超前环节, 可补偿功放系统引起的相位滞后,

$$F_L(s) = \frac{\omega_L}{s + \omega_L}, \quad (9)$$

$$C_f(s) = \frac{s + \omega_w}{k_{op}s + \omega_w}, \quad (10)$$

其中, ω_L 为滤波器的截止频率, 为有效抑制磁轴承系统的各次谐波, ω_L 应大于被考虑的最高次谐波频率值; k_{op} 为分度系数, 为提高系统带宽, k_{op} 可取为 0.1。

为分析重复控制对谐波噪声的抑制效果, 常在重复控制器前后嵌入测量系统灵敏度函数的衰减函数。本系统的衰减函数可表示为:

$$M_x(s) = \frac{1 - F_L(s)e^{-T_p s}}{1 - \left[1 - \frac{C_f(s)G_w(s)}{1 + C_x(s)G_w(s)} \right] F_L(s)e^{-T_p s}}, \quad (11)$$

其中,

$$C_x(s) = 2k_i k_s \frac{C_t(s)}{m s^2 - 2k_x}.$$

抑制谐波电流, 须满足:

$$\lim_{s=j\Omega} |M_x(s)| = 0, \quad (12)$$

即:

$$F_L(s)e^{-i\Omega T_p} = 1, \quad (13)$$

解算式(13)可确定 T_p :

$$T_p = \frac{2\pi}{\Omega} \left[1 - \frac{1}{2\pi} \arctan \left(\frac{\Omega}{\omega_L} \right) \right]. \quad (14)$$

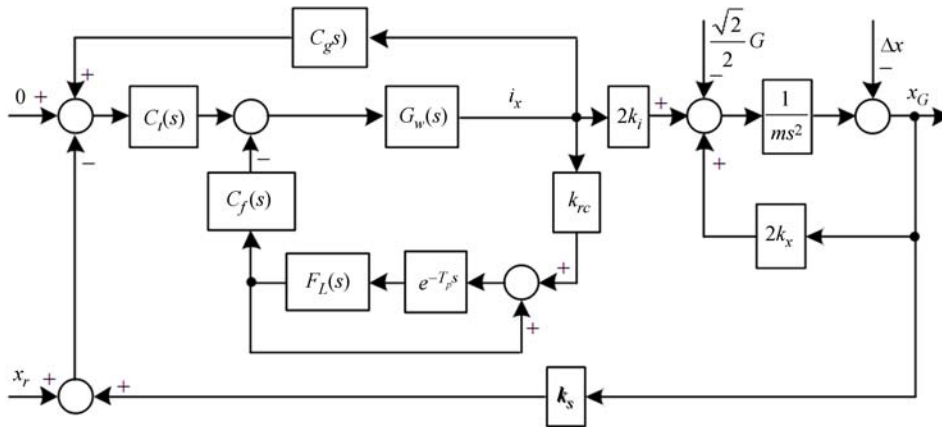


图 5 采用组合控制的磁轴承原理图

Fig. 5 Schematic diagram of AMB system based on composite control method

时延系统的稳定性可采用重构谱进行分析^[13], 实际上为简化设计, 重复控制器只剩下一个未确定的参数 k_{rc} , 其值可根据系统静态和动态性能的实际需求确定。随着 k_{rc} 值的增大, 系统的收敛时间减小、稳定裕度降低。实际上磁轴承系统动态响应要求不高, k_{rc} 可取一个较小的值, 以保证较高的稳定裕度。

4 实验研究

采用磁悬浮控制力矩陀螺系统进行实验研究, 如图 5 所示, 以验证所提算法的有效性。本系统共有示波器、线路盒、电源、磁悬浮控制力矩陀螺和真空泵 5 个部分。其中磁悬浮控制力矩陀螺内部有一个利用混合磁轴承支承的高速转子系

统, 采用真空泵抽取陀螺内的空气, 以尽量减少风阻损耗。线路盒主要由控制器和功率放大器组成, 其中磁轴承系统采用 DSP 结合 FPGA 的数字

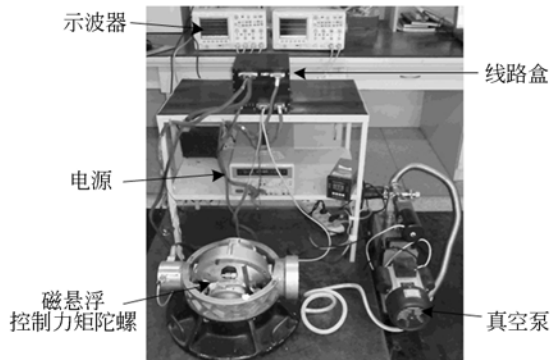


图 6 磁悬浮控制力矩陀螺实验系统

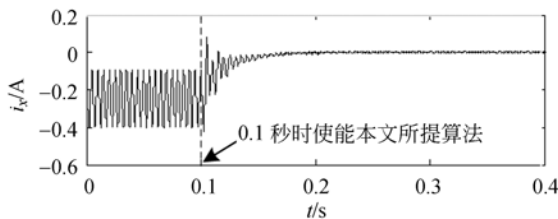
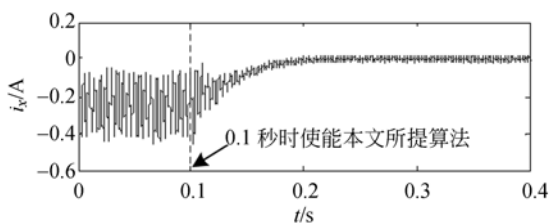
Fig. 6 Magnetically suspended control moment gyro setup

控制系统,功率放大器采用H桥逆变器。磁轴承系统的位移和电流信号分别采用涡流传感器和霍尔电流传感器测量,并通过示波器进行显示、分析和保存。电源提供28V的恒定直流电压,并可显示当前电流值。磁轴承系统参数如表1所示。

表1 磁轴承系统参数

Tab.1 Parameters of magnetic bearing system

系统参数	参数值
转子质量 m/kg	15.7
位移传感器增益 $k_s/\text{V} \cdot \text{m}^{-1}$	7.6×10^4
电流刚度 $k_i/\text{N} \cdot \text{A}^{-1}$	220
位移刚度 $k_x/\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$	9×10^5
运算放大器增益 $k_w/\text{A} \cdot \text{V}^{-1}$	0.22
运算放大器截止频率 $\omega_w/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	3 142
转速 Ω/Hz	200
比例系数	0.4
积分系数	8.7
微分系数	0.000 62
积分正反馈增益 k_g	500
滤波器截止频率 $\omega_f/\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$	10 000
重复控制器增益 k_r	0.8

图7 i_x 的仿真结果Fig. 7 Simulation results of i_x 图8 i_x 的实验结果Fig. 8 Experiment results of i_x

采用本文算法时 i_x 变化过程的仿真结果如图7所示。由图7可知,初始无任何电流抑制算法时的电流直流量和峰峰值分别约为0.25 A和0.36 A,在 $t=0.1$ s时,使能电流积分正反馈和重复控制算法,之后 i_x 直流量和峰峰值均逐渐减小,且没有明显的超调或不理想振荡,大约0.04s后, i_x 偏移值基本被抑制,电流峰峰值收敛至0.017A。实验结果如图8所示,经过0.09s后,直流量被完全抑制,峰峰值收敛至0.042A。虽然实验中 i_x 的收敛时间和谐波电流的抑制效果比仿真结果大,但实验结果中 i_x 的曲线与仿真结果具有较好的一致性,这可证明本文算法的有效性。直流电源箱显示的电流值从0.49A降低到0.24A,与直流电压值(28 V)相乘,可得功耗下降了7 W,这进一步验证了低功耗控制方法的有效性。

5 结 论

本文针对磁轴承应用中的功耗抑制问题,基于永磁偏置的混合磁轴承,提出了一种基于电流积分正反馈和重复控制的磁轴承系统低功耗控制算法。介绍了磁轴承系统的原理和数学模型,并分析了重力、转子不平衡和位移传感器噪声引起的电流噪声的频率特点,通过研究抑制电流的直流和谐波分量的控制器设计要求,得知其符合内膜控制原理,接着,采用磁悬浮控制力矩陀螺测试系统进行了实验研究。仿真和实验结果均表明所提算法可有效抑制电流的直流分量,谐波电流的峰峰值减小了88.3%。采用本文算法后,磁轴承系统的功耗降低了7 W,验证了该算法的有效性。

参考文献:

- [1] 崔培玲,潘智平,李海涛. 基于 α 阶逆系统的两自由度主被动磁悬浮转子解耦控制[J]. 光学精密工程, 2014,22(10): 2747-2756.

- CUI P L, PAN ZH P, LI H T. Decoupling control of 2-DOF passive and active hybrid magnetically suspended rotor based on α -order system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22 (10): 2747-2756. (in Chinese)

- [2] 高辉,李怀良,翟长国,等. 电动汽车磁悬浮飞轮电

- 池储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 186-190.
- GAO H, LI H L, ZHAI CH G, *et al.*. Design of energy storage for maglev flywheel battery of electric vehicles [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(1): 186-190. (in Chinese)
- [3] 谢进进, 刘刚, 文通. 双框架磁悬浮控制力矩陀螺磁轴承负载力矩复合补偿的控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(8): 2211-2219.
- XIE J J, LIU G, WEN T. Composite compensation for load torque of active magnetic bearing in DGM-SCMG [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(8): 2211-2219. (in Chinese)
- [4] 王英广, 房建成, 郑世强, 等. 磁悬浮电机的高效高精度在线动平衡[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2884-2892.
- WANG Y G, FANG J CH, ZHENG SH Q, *et al.*. Field balancing of magnetically levitated motor in high-efficiency and high-accuracy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2884-2892. (in Chinese)
- [5] 张凯, 赵雷, 赵鸿宾, 等. 磁悬浮飞轮低功耗控制方法仿真研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 14(3): 301-303.
- ZHANG K, ZHAO L, ZHAO H B, *et al.*. Zero-power control method for a flywheel suspended by active magnetic bearings [J]. *J. Tsinghua Univ. (Sci & Tech)*, 2004, 14(3): 301-303. (in Chinese)
- [6] HOQUE M E, MIZUNO T, ISHINO Y, *et al.*. A three-axis vibration isolation system using modified zero-power controller with parallel mechanism technique [J]. *Mechatronics*, 2011, 21(6): 1055-1062.
- [7] 刘超, 刘刚, 赵光再. 主被动磁悬浮高速转子系统的自动平衡控制[J]. 光学精密工程, 2015, 23(3): 714-722.
- LIU CH, LIU G, ZHAO G Z. Autobalancing control of high-speed suspended by active-passive magnetic bearings [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(3): 714-722. (in Chinese)
- [8] XU X, CHEN S. Field balancing and harmonic vibration suppression in rigid AMB-rotor systems with rotor imbalances and sensor runout [J]. *Sensors*, 2015, 15: 21876-21897.
- [9] TSOTRAS P, WILSON B C. Zero- and low-bias control designs for active magnetic bearings [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2003, 11(6): 889-904.
- [10] SUN J, FANG J Ch. A novel structure of permanent-magnet-biased radial hybrid magnetic bearing [J]. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 2011, 323(2): 202-208.
- [11] REN Y, FANG J Ch. High-stability and fast-response twisting motion control for the magnetically suspended rotor system in a control moment gyro [J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2013, 18(5): 1625-1634.
- [12] CUI P L, LI SH, WANG Q R, *et al.*. Harmonic current suppression of AMB rotor system at variable rotation speed based on multiple phase-shift notch filters [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(11): 6962-6969.
- [13] SUN J J, GONG J W, CHEN B F, *et al.*. Analysis and design of repetitive controller based on regeneration spectrum and sensitivity function in active power filter system [J]. *IET Power Electronics*, 2014, 7(8): 2133-2140.

作者简介:



徐向波(1982—),男,山东烟台人,讲师,2009年、2013年于北京航空航天大学分别获得硕士、博士学位,现为北京林业大学工学院讲师,主要从事磁悬浮执行机构、精密机电控制系统技术等方面的研究。E-mail: xuxiangbo@bjfu.edu.cn



陈劭(1963—),男,北京人,副教授,硕士生导师,2007年于北京林业大学获得博士学位,现担任北京林业大学工学院副院长、中国林学会林业机械分会理事、北京内燃机协会理事,主要从事振动分析与抑制、水泵动力学分析等方面的研究。E-mail: chenshao@bjfu.edu.cn