

可控磁悬浮系统的转子周期性振动抑制

苏文军^{1,2}, 孙岩桦^{1,2}, 虞烈^{1,2}

(1. 西安交通大学机械电子及信息系统研究所, 710049, 西安; 2. 西安交通大学
强度与振动教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为了有效抑制电磁轴承支承转子的周期性振动, 研制了一种结构为重复控制和比例-积分-微分(PID)控制相结合的混合控制器. 该混合控制器不仅保证了磁轴承的动态特性, 而且消除了系统中的周期性扰动. 通过讨论重复控制器的增益系数、截止频率对磁轴承的响应速度、稳定性的影响, 给出了控制器的设计过程和参数整定方法. 采用高速磁悬浮电机对磁轴承的性能进行了试验, 试验结果表明, 该控制器具有良好的动态特性, 可有效地抑制电磁轴承-转子系统的周期性振动, 并减少了转子频谱中的三倍频成分, 从而提高了电磁轴承的支承精度.

关键词: 可控磁悬浮系统; 周期性振动; 振动抑制

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)07-0055-04

Rotor Periodic Vibration Suppression for Controlled Magnetic Levitation System

SU Wenjun^{1,2}, SUN Yanhua^{1,2}, YU Lie^{1,2}

(1. Institute of Mechatronics and Information Systems, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. MOE Key Laboratory of Strength and Vibration, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To efficiently suppress the rotor periodic vibration in rotating mechanism, a controller combining PID control and repetitive control is presented for an active magnetic bearing(AMB). The PID controller ensures the system dynamic response, and the add-on type repetitive controller effects of removes the periodic disturbance from the rotor vibration. The effects of proportional gain and cut-off frequency of repetitive controller on bearing response speed and stability is discussed, and the controller's design and corresponding parameters tuning method are presented. The experiments are conducted with a high-speed magnetic levitation motor. The experimental results show the validities to suppress the rotor periodic vibration, reduce the third order harmonic components, and improve the control precision of AMB.

Keywords: controlled magnetic levitation system; periodic vibration; vibration suppression

电磁轴承是集电磁学、电子学、机械学等多门学科于一体的最具代表性的机电一体化产品之一. 作为典型的开环不稳定系统, 电磁轴承通过主动控制器, 利用可控电磁力为支承转子提供高精度的位置控制和振动阻尼控制, 使得电磁轴承特别适合于高转速、高精度旋转机械的应用, 如: 高精度机床、陀螺仪、高速电机等.

高精度机床、高速/超高速电机等对转子的性能要求越来越高, 而转子振动补偿-抑制是保证高速高精度综合性能的必要条件. 在旋转机械中, 转子的振动往往是与转速相关的周期信号, 因此可以作为加到控制系统中的周期性扰动进行处理. 孙岩桦等^[1]讨论了旋转机械由于转子的质量不平衡所引起周期性振动的问题, 并且基于自适应陷波器提出了一种

实用的电磁轴承不平衡补偿方法. 孙耀杰等^[2]讨论了由步进电机的电磁转矩周期性波动引起的电机振荡问题. 中野道雄^[3]的研究表明, 重复控制对于周期的目标输入具有非常高的跟踪精度, 对周期性的扰动具有良好的抑制能力.

本文针对可控磁悬浮系统, 将比例-积分-微分(PID)控制和重复控制相结合, 利用PID控制来保证磁轴承系统获得满意的动态品质和稳定性. 通过嵌入式重复控制来抑制转子的周期性振动, 提高控制精度, 并利用高速磁悬浮电机验证了混合控制策略的有效性和实用性.

1 磁悬浮系统模型

电磁轴承支承的刚性转子横向振动的机电耦合方程^[4]为

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{z}} + \mathbf{G}\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{F} \quad (1)$$

且

$$\mathbf{z} = [x \quad \beta \quad y \quad -\alpha]^T$$

$$\mathbf{F} = [f_x \quad p_y \quad f_y \quad -p_x]^T$$

式中: $\mathbf{M}$ 为质量矩阵; $\mathbf{G}$ 为陀螺矩阵; $\mathbf{F}$ 为轴承力矩阵; x, y 表示质心的位移; α, β 表示转子的倾斜角; f_x, f_y 是转子在水平垂直方向上力的总和; p_x, p_y 是质心绕水平垂直方向的力矩. 电磁铁线圈的端电压为

$$u(t) = I_0 R + \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \Psi(i, x)}{\partial x} \frac{dx}{dt} \quad (2)$$

式中: R 为线圈电阻; $\Psi(i, x)$ 为磁通量匝数; $i(t)$ 为控制电流; I_0 为偏置电流.

电磁轴承的电磁力作为转子位移和控制电流的函数, 在工作点附近可以近似为线性方程^[5]

$$f(x, i) = k_s x + k_i i \quad (3)$$

式中: k_i, k_s 分别为电磁轴承的电流刚度系数和位移刚度系数.

2 控制器设计

如图1所示, 由于磁轴承系统是典型的开环不稳定系统, 因此先利用PID控制使 $G_p(s)$ 成为一个自身具有良好动态特性的闭环控制系统^[4], 然后将重复控制器嵌入该控制系统中, 通过 $G_c(s)$ 抑制支承转子的周期性振动, 以提高磁轴承的支承精度.

2.1 PID 控制器的设计

设定磁轴承系统所需的轴承刚度和阻尼, 则对应于支承转子的位移响应, 支承力为

$$f_x = -kx - d\dot{x} \quad (4)$$

式中: k, d 分别表示轴承的刚度和阻尼.

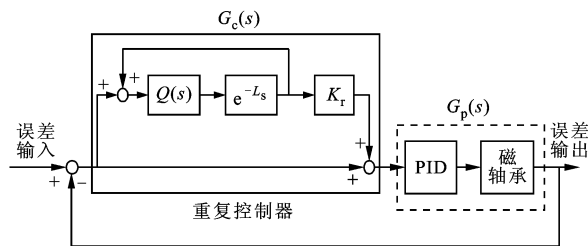
由式(3)和式(4)联立解出控制电流, 并得到所希望的控制器函数

$$i(x) = \frac{(k + k_s)x + d\dot{x}}{k_i} \quad (5)$$

是一个PD控制器, 且控制参数

$$\left. \begin{aligned} K_p &= (k + k_s)/k_i \\ K_d &= d/k_i \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: K_p, K_d 分别为比例系数和微分系数.



$Q(s)$: 低通滤波器; K_r : 增益系数; e^{-Ls} : 时滞环节;

$G_c(s)$: 重复控制器; $G_p(s)$: 控制对象

图1 混合控制器的结构图

2.2 重复控制器设计

在旋转机械中, 转子的振动往往是与转速相关的周期信号, 可以作为加到控制系统中的周期扰动进行处理. 重复控制思想源于控制理论的内模原理, 对于周期性的目标输入, 周期性的扰动具有非常高的跟踪精度和良好的抑制能力.

由小增益定理, 得到了图1改进型重复控制系统的指数渐进稳定条件^[6-8]: ① $(1 + G_p(s))^{-1} G_p(s)$ 是稳定的最小相位传递函数, 且 $G_p(s)$ 在虚轴上没有零点; ② $Q_F(s) = Q(s)(1 + G_p(s))^{-1} [1 + (1 - K_r)G_p(s)]$, 且 $\|Q_F(s)\|_\infty < 1$.

由图1可知, PID控制器已经使控制对象成为一个稳定的闭环系统, 所以磁轴承系统满足重复控制器的稳定条件①. 在重复控制器的设计中, 为了满足稳定条件②, 还需要分别确定 $Q(s)$ 和 K_r ($0 < K_r < 1$). 不失一般性, 以单自由度磁轴承为研究对象, 将 $Q(s)$ 选为二阶低通滤波器. 随着 $Q(s)$ 截至频率的增大, 系统对扰动的抑制能力增强, 但系统的稳定性却降低; 随着 $Q(s)$ 截至频率的减小, 系统的稳定性提高, 但是系统对扰动的抑制能力则下降. 因此, $Q(s)$ 的截止频率应略大于磁轴承系统的带宽频率. 考虑系统未建模的因素, 为了保证实际系统的阻尼比 ξ 在 0.707 附近, 选取 $\xi = 0.6$.

根据稳定条件②, 由 $\|Q_F(s)\|_\infty < 1$ 得到

$$|Q(j\omega)| < \left| \frac{(1+G_p(j\omega))}{[1+(1-K_r)G_p(j\omega)]} \right| = |C(j\omega)| \quad (7)$$

从图 2 中可以看出,当 $K_r < 0.7$ 时, $|Q(j\omega)| < |C(j\omega)|$,即满足 $\|Q_F\|_\infty < 1, \forall \omega$. 随着 K_r 的增加,系统的响应速度加快,稳定性降低;随着 K_r 的减小,系统的响应速度降低,稳定性增强. 根据系统的运行状态,综合考虑系统的响应速度和稳定性,合理选取 K_r .

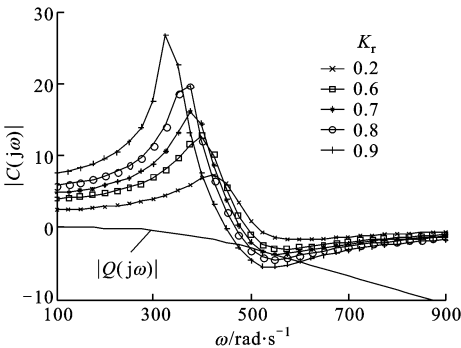


图 2 不同 K_r 时 $C(j\omega)$ 的幅频特性曲线

3 试验结果

为了验证混合控制策略的有效性,选用自制的 50 kW 高速磁悬浮电机进行测试,支承转子是动平衡良好的高速刚性转子,电机结构如图 3 所示. 电磁轴承的主要设计参数如表 1 所示.

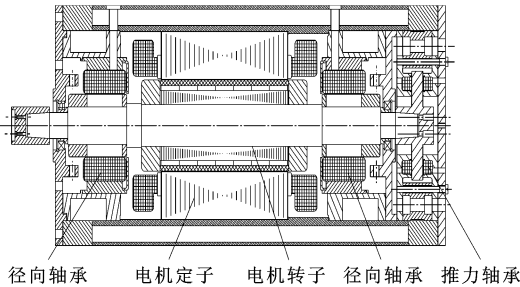


图 3 50 kW 高速磁悬浮电机的结构图

表 1 磁轴承系统的主要参数

转子质量/kg	18.50
轴承气隙/mm	0.50
$k_s/\text{MN} \cdot \text{m}^{-1}$	1.94
$k_i/\text{A} \cdot \text{m}^{-1}$	173.10
位移传感器增益/ $\text{kV} \cdot \text{m}^{-1}$	8.00

试验系统如图 4 所示,含有重复控制的磁轴承混合控制器由 dSPACE 实时仿真系统实现,其控制参数可以通过仿真系统进行在线整定. 支承转子的

位移信号和控制信号分别采用 12 位 AD/DA 芯片输入/输出. 通过 dSPACE 系统,将混合控制器转换为数字控制器,控制系统的信号采样-转换频率均为 10 kHz.

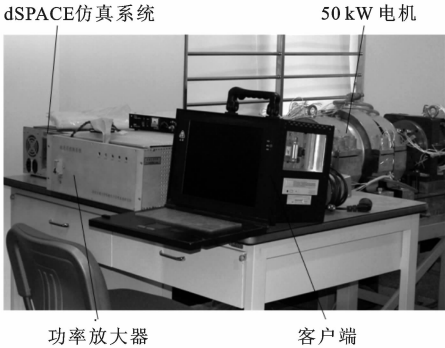


图 4 磁轴承混合控制器的试验系统

当磁悬浮电机低速运行时,忽略电磁轴承非线性因素和转子陀螺效应影响^[9]后的 5 自由度磁轴承系统可以解耦为 5 个独立的单自由度系统. 试验的集总式 PID 控制器参数 $K_p=170\%$, $K_i=5 \text{ s}$, $K_d=2.2 \text{ ms}$,试验结果如图 5~图 7 所示.

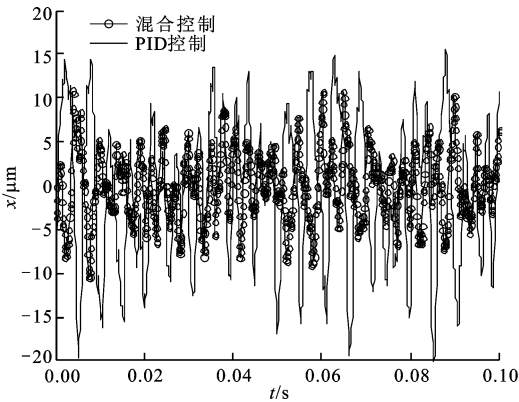


图 5 静态悬浮时的转子位移曲线

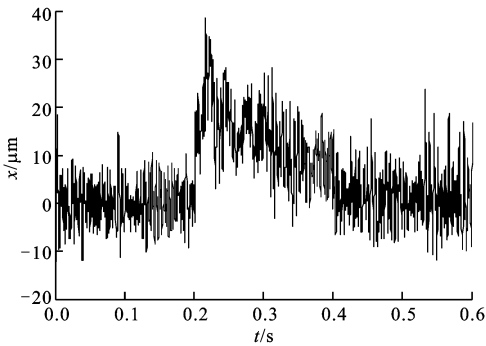
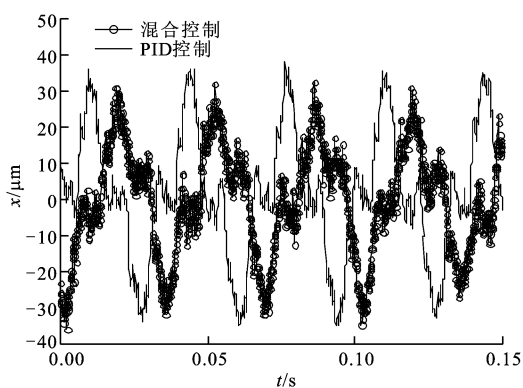


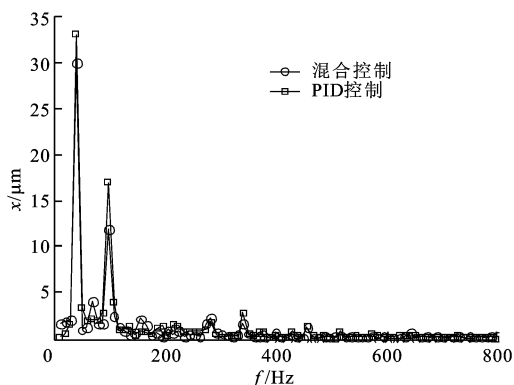
图 6 转子的冲击响应曲线

图 5 所示的试验结果表明,混合控制器降低了静态悬浮转子的振动峰值,使转子振动更加平稳. 图

6 是静态悬浮且转子受到 400 N 冲击力时的响应曲线。试验结果表明,混合控制器为系统提供了良好的刚度和阻尼,使转子迅速回到了平衡位置。



(a)转子的位移曲线



(b)转子位移的幅值谱

图7 转子在水平方向的位移曲线

当转速 $n=1\ 800\ \text{r/min}$ 时,转子的位移曲线如图7所示。从图7a的试验结果可以看出,混合控制系统的输出补偿效果比较明显。从图7b的分析可以看出,转子振动信号的基频谱峰幅值减小了9.1%,3倍频谱峰幅值减小了29.4%,电磁轴承的支承精度有一定的提高。因此,系统的控制精度要优于原有的PID控制系统。

4 结 论

本文从主动磁悬浮支承系统的功能需求出发,针对转子的周期性振动抑制问题,在传统PID控制中嵌入了改进型重复控制器。该混合控制系统结合了PID控制器和重复控制器的优点,使磁悬浮系统具有良好的动态性能,同时对转子的周期性振动起到一定的抑制作用,从而提高了系统的控制精度。试

验结果表明,本文控制器具有较强的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 孙岩桦,罗岷,虞烈. 基于自适应陷波器的电磁轴承不平衡补偿方法[J]. 振动工程学报, 2000, 13(4): 610-615.
SUN Yanhua, LUO Min, YU Lie. Unbalance compensation based on adaptive notch filter to active magnetic bearings[J]. Journal of Vibration Engineering, 2000, 13(4): 610-615.
- [2] 孙耀杰,左贺,康龙云,等. 抑制混合式步进电机转矩波动的时变重复控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 183-187.
SUN Yaojie, ZUO He, KANG Longyun, et al. Time-varying repetitive control of restraining torque ripple for hybrid stepping motor system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 183-187.
- [3] 中野道雄. 重复控制[M]. 吴敏,译. 长沙: 中南工业大学出版社, 1994: 78-95.
- [4] POLAJZER B, RITONJA J, STUMBERGER G, et al. Decentralized PI/PD position control for active magnetic bearings[J]. Electrical Engineering, 2006, 89(1): 53-59.
- [5] GCHWEITZER G, TRAXLER A, BLEULER H. 主动磁轴承基础、性能及应用[M]. 虞烈,袁崇军,译. 北京: 新时代出版社, 1997: 125-141.
- [6] HARA S, YUTAKA Y, TOHRU O, et al. Repetitive control system; a new type servo system for periodic exogenous signals[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1988, 33(7): 659-668.
- [7] PARK S W, JEONG J, YANG H S. Repetitive controller design for minimum track misregistration in hard disk drives[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41(9): 2522-2528.
- [8] DOH T Y, RYOO J R, CHUNG M J. Design of a repetitive controller; an application to the track-following servo system of optical disk drives[J]. IEEE Proc Control Theory Appl, 2006, 153(3): 323-330.
- [9] 沈钺,孙岩桦,王世琥,等. 磁悬浮飞轮系统陀螺效应的抑制[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(11): 1105-1109.
SHEN Yue, SUN Yanhua, WANG Shihu, et al. Reduction of gyroscopic effect of a magnetic bearing supported flywheel system[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(11): 1105-1109.

(编辑 管咏梅)