

文章编号: 1000-8152(2008)04-0711-06

永磁型无轴承电机悬浮系统的 H_∞ 鲁棒控制

黄 雷, 赵光宙, 年 珩, 贺益康

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了提高永磁型无轴承电动机悬浮系统的稳定性和抗干扰能力, 从运行原理出发, 对悬浮系统提出了基于混合灵敏度的 H_∞ 鲁棒控制. 通过选取适当的灵敏度和补灵敏度加权函数, 设计了 H_∞ 控制器. 应用该控制器实现了基于转子磁场定向控制的永磁型无轴承电机悬浮控制系统. 仿真结果表明, 所提出的 H_∞ 控制器具有良好的抗干扰能力和鲁棒稳定性, 性能优于常规PID控制器. 最后进行了实验研究, 证明了该控制方法的有效性.

关键词: 鲁棒控制; 永磁型无轴承电机; 悬浮系统控制; 转子磁场定向控制

中图分类号: TP273; TM301 **文献标识码:** A

H-infinity robust control of the suspension system for a bearingless motor of permanent magnet type

HUANG Lei, ZHAO Guang-zhou, NIAN Heng, HE Yi-kang

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027, China)

Abstract: To improve the stability and disturbance rejection for the suspension system for a bearingless motor of permanent magnet type, a mixed sensitivity robust control strategy is proposed based on the operating principle of suspension system. The controller is designed by selecting the appropriate sensitivity and complementary sensitivity weighting functions. The suspension control system for the bearingless motor with rotor flux orientation is also implemented on the basis of proposed controller. Simulation results show that the performances of the proposed controller are superior to those of the traditional PID controller with the robustness in modeling the system and disturbances. The validity of proposed algorithm is also effectively evaluated by experiment study.

Key words: robust control; bearingless motor of the permanent magnet type; suspension system control; rotor flux oriented control

1 引言(Introduction)

无轴承电机是一种结构新颖的交流电机, 其定子中嵌放有两套不同极对数的绕组—转矩绕组和悬浮绕组, 通过对两套绕组的控制使电机转子同时具有旋转和自悬浮支撑能力, 从而实现电机定、转子间的无机械轴承支撑运行^[1]. 与磁轴承电机相比, 无轴承电机无需独立的径向磁轴承支撑, 可靠性提高, 还可突破超高转速和大功率的限制, 因而极大地拓宽了高速电机的应用领域.

永磁型无轴承电机采用永磁体建立气隙磁场, 无需定子转矩绕组电流提供励磁, 故具有结构简单、运行可靠、功率密度大等显著优点. 永磁型无轴承电机转矩绕组控制一般采用转子磁场定向控制, 悬浮绕组控制中通过实时检测转子位移得到参考悬浮力信号, 再通过表达悬浮力与悬浮绕组电流关系的悬

浮力模型产生悬浮绕组参考电流, 继而实现悬浮绕组的闭环控制.

无轴承电机稳定悬浮运行的关键是根据转子位移变化实时、准确地产生相应悬浮力, 这在无轴承电机悬浮系统控制中目前大多是采用PID控制实现^[2]. 但无轴承电机系统是一个无法精确建模的机电一体化系统, PID控制算法难以保证系统在各种工况下的悬浮性能, 需要进行分段处理, 同时参数难以调整, 控制效果较差, 故必须寻求鲁棒性更强的控制策略.

H_∞ 鲁棒控制理论可以有效抑制系统中的各种干扰对系统输出的影响, 并已在电磁轴承的悬浮控制中证明具有优良的抗干扰能力和鲁棒稳定性^[3~6]. 鉴于电磁轴承悬浮系统和无轴承电机悬浮系统在电气控制和机械动力学特性上有一定的相似性, 故研究 H_∞ 鲁棒控制策略在无轴承电机悬浮系统中的实

现具有重要的理论意义和实用价值。

本文首先建立了永磁型无轴承电机的悬浮力模型,提出了基于 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制的悬浮力控制策略,进而构建建立了永磁型无轴承电机 H_∞ 鲁棒控制系统.与传统PID控制的仿真结果对比表明, H_∞ 鲁棒控制器具有良好的悬浮稳定性和鲁棒性,实验结果同样验证了算法的有效性.

2 永磁型无轴承电机悬浮力模型(Mathematical model of suspension system)

图1表示了静止两相 α, β 坐标系中永磁型无轴承电机悬浮力产生的原理,其中: N_A 和 N_B 为4极转矩绕组, N_α 和 N_β 为2极悬浮绕组.永磁转子产生的四极磁场如图1所示.如果按图示极性给悬浮绕组通入相应电流,则2极磁场将与4极磁场相叠加,致使区域1气隙磁密增加、区域2气隙磁密减少,不平衡的气隙磁密使电机转子承受沿 β 方向的磁悬浮力,促使转子上浮.同理在悬浮绕组通入电流,可在转子上产生沿 β 方向的悬浮力.因此,通过控制 N_α 和 N_β 绕组的电流就可以控制磁悬浮力的大小和方向,使电机获得稳定悬浮运行.

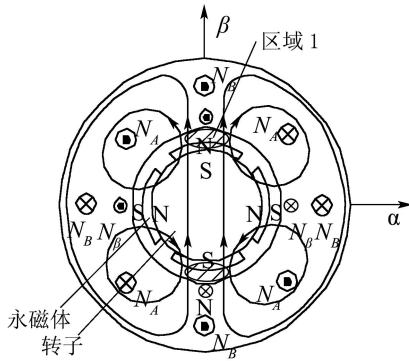


图1 永磁型无轴承电机悬浮力产生原理图
Fig. 1 Principle of suspension force generation for permanent magnet type bearingless motor

忽略电机磁路饱和,可控悬浮力与悬浮绕组电流的关系为^[7]

$$\begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} = \sqrt{\lambda_m^2 + (Mi_{4q})^2} \times \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \theta) & \sin(2\omega t + \theta) \\ \sin(2\omega t + \theta) & -\cos(2\omega t + \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{2\alpha} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix}. \quad (1)$$

式中: λ_m 为定子绕组磁链, F 为可控悬浮力, i 为定子绕组电流, M 为转矩绕组与悬浮绕组间互感系数,下标4,2分别为转矩绕组和悬浮绕组相应分量,下标 α, β 为两相静止坐标系 α, β 轴分量, ω 为转子机械角速度, $\theta = \arctan(M_q i_q / \lambda_m)$.

无轴承电机由于电机装配制造、负载扰动、传感

器安装及径向位移检测误差等原因存在气隙偏心,因此转子上产生与偏心位移量成正比的单边磁拉力.考虑单边磁拉力后,根据运动方程得到转子的悬浮力控制模型为

$$\begin{cases} F_x + ki_f^2 x = m\ddot{x}, \\ F_y + ki_f^2 y = m\ddot{y}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: k 为常系数, i_f 为永磁体等效励磁电流, m 为转子质量, x, y 为转子位移在两相静止坐标系 α, β 轴分量.

为了简化问题,忽略径向两个自由度 x, y 之间的耦合,并将陀螺耦合效归入 x 或 y 方向的外加干扰,当考虑单自由度 x 方向的转子运动时,在没有外界干扰下, x 方向转子悬浮力控制模型用传递函数可表示为

$$P_1(s) = \frac{X(s)}{F(s)} = \frac{1}{ms^2 - ki_f^2}. \quad (3)$$

考虑到执行部件的放大作用,被控对象的传递函数为

$$P(s) = 300P_1(s). \quad (4)$$

3 悬浮系统的 H_∞ 鲁棒控制器设计(H_∞ robust controller design for suspension system)

转子位移系统是开环不稳定的,控制器性能不仅决定了稳定悬浮运行的实现,而且决定了当存在模型不确定性及干扰时系统的鲁棒性和稳定性.作为鲁棒控制中较为成熟的方法 H_∞ 控制,就是设法保持系统的稳定性和品质鲁棒性,这对于悬浮系统中位移扰动的抑制具有良好的效果.

将输入和扰动等作为系统的输入变量,对系统进行增广并加权后的结构图如图2所示.

图2中: $[r, u]^T$ 及 $[z_1, z_2, z_3, y_2]^T$ 分别为增广系统的输入、输出向量. $W_1(s), W_2(s), W_3(s)$ 都是加权函数.这些加权函数应该使 $P(s), W_1(s), W_3(s)P(s)$ 均为正则.

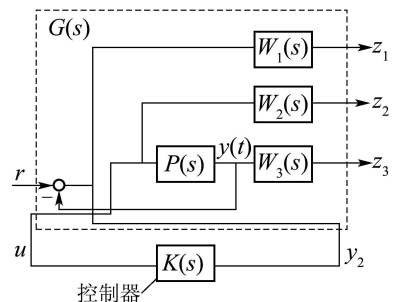


图2 径向位移反馈控制系统示意图
Fig. 2 Control system schematic of radial displacement feedback

由于无轴承电机运行过程中存在偏心,负载变化等引起的模型不确定性和各种扰动因素,系统的稳定性和抗扰动性成为设计的主要目标.与文

献[4]相比, 为了降低控制器阶次, 简化问题, 不考虑 $R(s) = K(s)S(s)$ 加权, 取 $W_3(s) = 0$, 控制问题化为鲁棒稳定性和鲁棒性能的混合鲁棒问题: 求解控制器 $K(s)$, 且 $K(s)$ 应满足下式:

$$\left\| \frac{W_1(j\omega)S(j\omega)}{W_2(j\omega)K(j\omega)S(j\omega)} \right\|_{\infty} < 1, \forall \omega \in \mathbb{R}. \quad (5)$$

其中: $S(j\omega) = [1 + P(s)K(s)]^{-1}$ 为灵敏度函数, 加权函数 $W_2(s)$ 是针对被控对象的模型不确定性而设定, $W_2(s)$ 为模型不确定性的上界:

$$|W_2(j\omega)| > |\Delta(j\omega)|, \forall \omega \in \mathbb{R}. \quad (6)$$

经过计算及考虑到H_∞问题的可解条件, 取 $W_2(s)$ 为

$$W_2(s) = \frac{s + 0.0225}{15000}. \quad (7)$$

加权函数 $W_1(s)$ 的选择主要考虑系统的抗扰动性能, 即在扰动的敏感频段内, 系统的灵敏度函数要小. 当外部扰动力是由转子质量偏心引起, 即

$$\begin{cases} f_x = m\varepsilon\omega^2 \sin(\omega t), \\ f_y = m\varepsilon\omega^2 \cos(\omega t). \end{cases} \quad (8)$$

取质量偏心 $\varepsilon = 10 \times 10^{-6}$ m, 在不同转速下, 可以计算出扰动的最大幅值 $|dy|_{\max}$. 在这样大的干扰下, 取转子围绕中心位置的振动幅值 x_m 为气隙长度的1/10. 从而期望的灵敏度函数在转速 ω 处的增益最大值为 $20 \lg(x_m/|dy|_{\max})$. 经仿真分析, 最后选择加权函数 $W_1(s)$ 为

$$W_1(s) = \frac{1}{0.005s^2 + 0.001s + 0.000001}. \quad (9)$$

实验样机的转子质量为 $m = 0.7$ kg, 单边磁拉力与位移量的比例系数 $ki_f^2 = 402000$ N/m, 则取标称模型 $P_0(s)$ 为

$$P_0(s) = \frac{300}{0.7s^2 - 402000}. \quad (10)$$

借助MATLAB的鲁棒控制工具箱^[8], 编制相应的仿真程序, 使用“hinfopt”命令得到悬浮力控制系统的H_∞控制器, 经过适当处理得

$$K(s) = \frac{12774877.8(s + 217.6)(s + 23.5)}{(s + 1.5 \times 10^5)(s + 1596)(s + 0.0004)}. \quad (11)$$

图3为系统开环传递函数 $K(s)P(s)$ 的Bode图. 可以看到开环系统有足够的相角裕量, 低频段以20 dB左右跟踪参考信号, 实现了系统良好的跟踪性能; 高频段以40 dB衰减, 实现了系统的抗高频干扰能力.

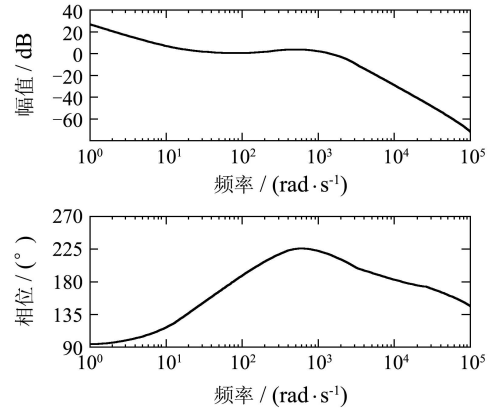


图3 开环传递函数Bode图

Fig. 3 Bode diagram of open-loop transfer function

4 仿真研究(Simulations)

得到了H_∞鲁棒控制器(式(11))后, 就可用以实施悬浮系统控制, 改善无轴承电机悬浮运行的动、静态性能. 仿真所用样机参数见表1.

表1 样机设计参数

Table 1 Parameters of prototype motor

样机参数	参数值
定子外径	96 mm
定子内径	50 mm
铁心长度	60 mm
气隙长度	1 mm
定子槽数	24
定子每相电阻	1.91 Ω
转矩绕组电感	0.0065 H
主磁极磁通	0.1602 Wb
永磁体等效励磁电流	41.08 A
转矩绕组极对数	2
转动惯量	0.244×10^{-3} kg·m ²

图4为基于H_∞鲁棒控制永磁型无轴承电机悬浮控制系统框图. 图中: VR(vector rotation)为矢量旋转变换, INV(inverter)为逆变器, PMBLM(permanent magnet type bearingless motor)为永磁型无轴承电机.

由基于混合灵敏度H_∞鲁棒控制得到的悬浮力指令值 F_x^* 及 F_y^* , 并由式(12)得到悬浮绕组电流给定值 $i_{2\alpha}^*$, $i_{2\beta}^*$:

$$\begin{bmatrix} i_{2\alpha}^* \\ i_{2\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{\lambda_m^2 + (Mi_{4q})^2}} \times \begin{bmatrix} \cos(2\omega t + \theta) & \sin(2\omega t + \theta) \\ \sin(2\omega t + \theta) & -\cos(2\omega t + \theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x^* \\ F_y^* \end{bmatrix}. \quad (12)$$

转矩控制子系统采用 $i_d = 0$ 的转子磁场定向控制, 其数学模型为

$$i_d^* = 0, i_q^* = \frac{T^*}{p\Psi_{pm}}. \quad (13)$$

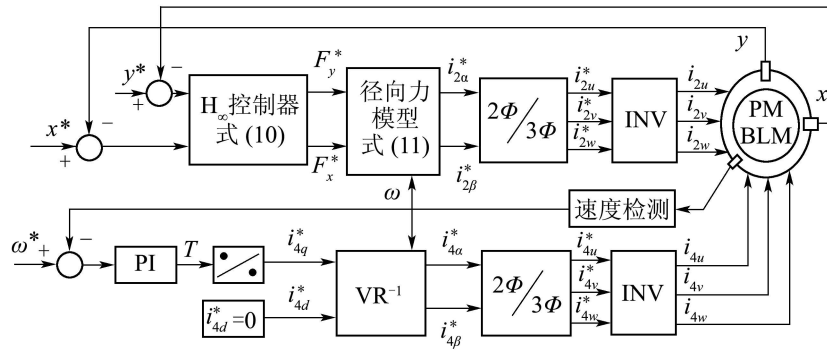


图4 永磁无轴承电机控制系统

Fig. 4 Control system of permanent magnet type bearingless motor

通过将采样的速度和转矩绕组电流信号经过速度闭环及电流闭环实现无轴承电机的转矩控制.

仿真中采用了PID控制对比. 所采用PID控制器的等效传递函数为: $(0.0005s^2 + 0.03s + 0.005)/s$, 系统开环传递函数的Bode图如图5所示. 可以看到高频增益大, 衰减速率不够快, 对高频干扰抑制能力较差.

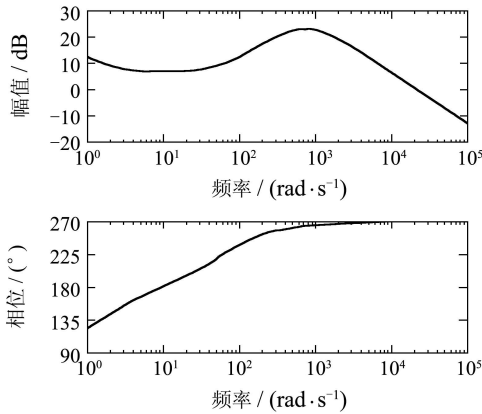


图5 采用PID控制器时开环传递函数Bode图
Fig. 5 Bode diagram of open-loop transfer function by PID controller

图6(a)(b)分别为电机从0 r/min~6000 r/min空载启动时采用H-infinity控制器和传统PID控制器时转子在beta方向的位移变化曲线, 其中beta方向初始值为-0.3 mm, 径向负载为50 N.

可以看到, 采用H-infinity控制器时径向位移的收敛时间大约是0.09 s; 而采用PID控制, 位移响应到0.2 s时还没有完全收敛. 可见H-infinity控制器有很好的阻尼特性, 响应快, 超调小, 可以使转子很快达到中心位置并保持稳定悬浮.

当转子存在质量不平衡时, 所引起的周期正弦干扰力是影响系统稳定的重要因素. 图7为考虑转子质量偏心0.1 mm且转速从0 r/min~1000 r/min升速时转子在beta方向的位移变化曲线. 其中图7(a)为采用H-infinity控制器的结果, 转子位移在中心振动幅

值最大为 0.5×10^{-4} m, 满足稳定悬浮的要求, 在图7(b)中, 采用PID的控制已不能保证正常悬浮. 可见H-infinity控制器显示出了良好的干扰抑制能力.

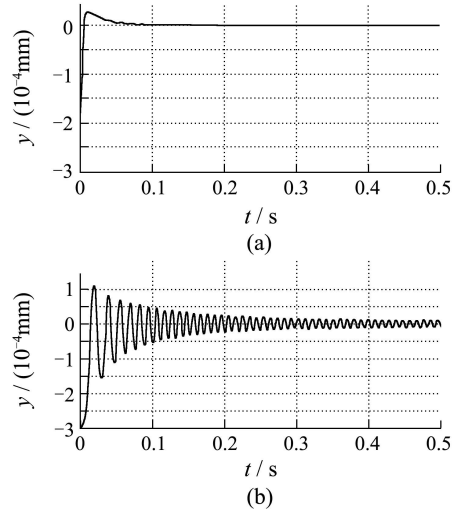


图6 带负载升速时转子径向位移曲线
Fig. 6 Radial displacement curve under loaded and speed-up condition

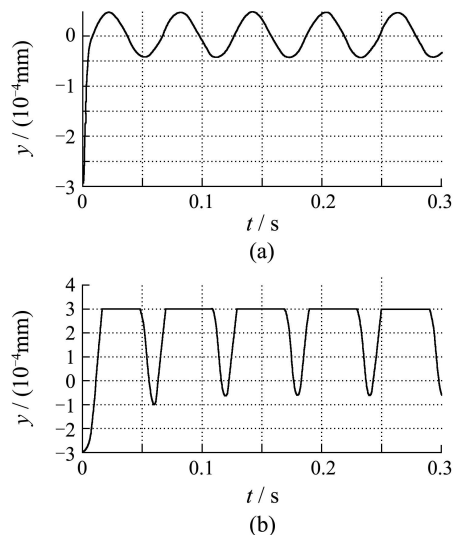


图7 存在外部周期干扰时的转子径向位移曲线
Fig. 7 Radial displacement curve with periodical disturbance

5 实验研究(Experiments)

为实现实验研究, 采用双线性变换法对式(11)进行离散, 离散时间步长取0.0001 s, 得离散化方程如下:

$$K(z) = \frac{70.43(z - 0.978)(z - 0.998)(z + 1)}{(z + 0.767)(z - 0.852)(z - 1)} \quad (14)$$

将上式变成输入输出函数形式:

$$\begin{aligned} c(k) = & 1.087 c(k - 1) + 0.564 c(k - 2) - \\ & 0.652 c(k - 3) + 70.473 r(k) - \\ & 68.795 r(k - 1) - 70.473 r(k - 2) + \\ & 68.795 r(k - 3). \end{aligned} \quad (15)$$

式中: $c(k)$ 是 k 时刻控制器输出, $r(k)$ 是 k 时刻控制器输入, 其余类推.

图8(a)(b)是基于H_∞鲁棒控制的永磁型无轴承电机在静止以及转速为1500 r/min时转子 α, β 方向径向位移波形. 图中可见, 转子转速为零时, 转子保持在气隙中央, 此时系统具有良好的静态性能; 当转速为1500 r/min时, 转子位移可保持为75 μm 左右, 电机可稳定悬浮运行, 具有较好的悬浮特性.

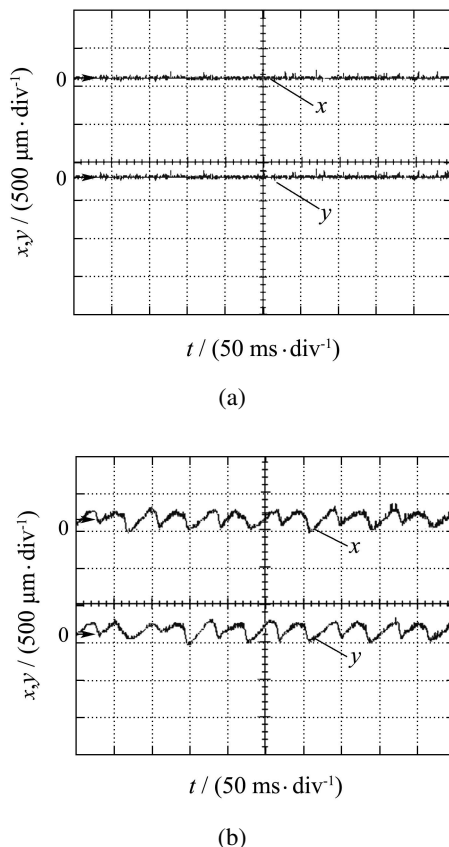


图8 转子 α, β 方向位移波形
Fig. 8 Rotor displacement curve in α, β direction

为考核基于H_∞鲁棒控制的无轴承电机控制系统的抗负载扰动能力, 进行了0 r/min~1500 r/min空载起动实验, α, β 方向径向位移和转速变化的动态响应如图9所示. 可以看出, H_∞鲁棒控制可有效保持无轴承电机系统的稳定性和鲁棒性, 确保电机从静止到给定速度能实现成功起动和稳定悬浮运行.

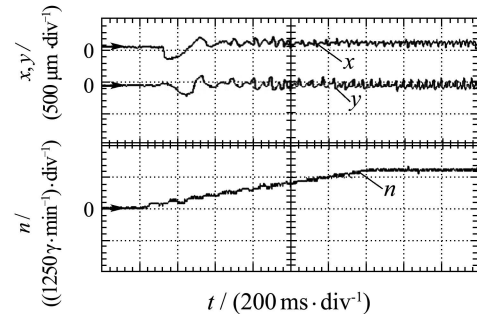


图9 永磁型无轴承电机悬浮运行性能
Fig. 9 Suspension performance of permanent magnet bearingless motor

6 结论(Conclusions)

本文针对永磁型无轴承电动机悬浮控制系统存在外部扰动以及未建模动态的实际情况, 利用混合灵敏度的H_∞鲁棒控制方法设计了悬浮力系统控制器, 通过选取适当的灵敏度和补灵敏度加权函数, 设计了H_∞鲁棒控制器. 仿真结果及与PID控制效果的比较表明, 所设计的控制器悬浮性能优良, 对悬浮力控制系统的外部扰动等不确定因素有很好的鲁棒性, 并通过实验证明了该控制算法的有效性.

参考文献(References):

- [1] CHIBA A, TEIDO T, FUKAO T. An analysis of bearingless AC motors[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 1994, 9(1): 61 - 67.
- [2] OSHIMA M, MIYAZAWA S, TEIDO T. Characteristics of a permanent magnet type bearingless motor[J]. *IEEE Transactions on Industry Application*, 1996, 32(2): 363 - 370.
- [3] MATSUMURA F, NAMERIKAWA T, HAGIWARA K, et al. Application of gain scheduled H_∞ robust controller to a magnetic bearing[J]. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 1996, 9(5): 484 - 492.
- [4] ZHOU T, FUJITA M, MASUMURA F. Robust control of a two-axis, magnetic suspension, flexible-beam system based on H-infinity optimization theory[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 1992, 2(3): 165 - 182.
- [5] MASAYUKI F, KAZUHIRO H, FUMIO M. Loop shaping based robust control of a magnetic bearing[J]. *IEEE Transactions on Control System*, 1993, 13(4): 57 - 65.
- [6] 王广雄, 刘彦文, 何朕. 采样系统的H_∞混合灵敏度设计[J]. *控制理论与应用*, 2006, 23(3): 351 - 354. (WANG Guangxiong, LIU

- Yanwen, HE Zhen. H-infinity mixed sensitivity for sampled-data system[J]. *Control Theory & Applications*, 2006, 23(3): 351 – 354.)
- [7] 年珩, 贺益康, 周媛. 内插式永磁型无轴承电机磁悬浮力模型及其关键参数萃取[J]. 机械工程学报, 2006, 42(10): 53 – 58.
(NIAN Heng, HE Yikang, ZHOU Yuan. Analytical modeling and parameter extraction of the magnetic levitation force for an inset permanent magnet type bearingless motor[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(10): 53 – 58.)
- [8] 薛定宇. 反馈控制系统设计与分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.

作者简介:

- 黄雷** (1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为无轴承电机控制, E-mail: huangleizju@yahoo.com;
- 赵光宙** (1946—), 男, 博士生导师, 研究方向为电气传动及其自动化、非线性系统控制、计算机控制技术等;
- 年珩** (1978—), 男, 博士, 研究方向为无轴承电机设计及其控制, E-mail: nianheng@zju.edu.cn;
- 贺益康** (1941—), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为电机及其控制、电力电子技术.

(上接第710页)

参考文献(References):

- [1] 王小平, 齐欢, 肖恒辉, 等. 基于串联排队网络的三峡-葛洲坝水利枢纽联合调度模型[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3): 82 – 86.
(WANG Xiaoping, QI Huan, XIAO Henghui, et al. Co-scheduling model of Three Gorges-Gezhou Dam based on series queuing network[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2006, 6(3): 82 – 86.)
- [2] 赖炜, 齐欢. 三峡船闸运行调度中的多属性决策问题[J]. 控制与决策, 2002, 17(2): 163 – 166.
(LAI Wei, QI Huan. The MADM of Three Gorges ship gates running[J]. *Control and Decision*, 2002, 17(2): 163 – 166)
- [3] 刘云峰, 齐欢. DFS算法在三峡永久船闸优化编排中的应用[J]. 计算机工程, 2002, 28(8): 224 – 226.
(LIU Yunfeng, QI Huan. Application of DFS algorithm in the arranging of Three Gorges permanent lock chamber[J]. *Computer Engineering*, 2002, 28(8): 224 – 226.)
- [4] 刘云峰, 齐欢. 二维优化编排启发算法及其在三峡永久船闸调度决策系统中的应用[J]. 计算机与现代化, 2002, (1): 1 – 3.
(LIU Yunfeng, QI Huan. The Two-dimension optimization arranging heuristic algorithm and its application in the Yangtse Gorges permanent ship lock decision system[J]. *Computer and Modernization*, 2002, (1): 1 – 3.)
- [5] 杜经农, 余绍明. 三峡工程船舶智能调度系统的动态规划建模与算法[J]. 计算机与数字工程, 2003, 31(3): 47 – 50.
(DU Jingnong, YU Shaoming. Dynamic programming model and algorithm of shiplock scheduling problem[J]. *Computer and Digital Engineering*, 2003, 31(3): 47 – 50.)
- [6] LIU J Y, MACCARTHY B L. A global MILP model for FMS scheduling[J]. *European Journal of Operational Research*, 1997, 100(3): 441 – 453.
- [7] LOW C Y, YIP Y, WU T H. Modelling and heuristics of FMS scheduling with multiple objectives[J]. *Computers & Operations Research*, 2006, 33(3): 674 – 694.
- [8] LOW C Y, WU T H. Mathematical modelling and heuristics approaches to operation scheduling problems in an FMS environment[J]. *International Journal of Product Research*, 2001, 39(4): 689 – 708.

作者简介:

- 张晓盼** (1978—), 男, 博士, 讲师, 从事调度问题以及复杂系统分析与集成研究, E-mail: zxp.china@gmail.com;
- 齐欢** (1948—), 男, 教授, 博士生导师, 从事大系统建模以及集成、决策理论和方法等研究;
- 袁晓辉** (1971—), 男, 博士, 副教授, 从事智能优化算法理论和应用等研究.