

磁悬浮储能飞轮线性变参数鲁棒增益调度控制

陈峻峰, 刘 昆, 肖 凯

(国防科学技术大学 航天与材料工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对强陀螺效应的磁悬浮储能飞轮转速快变引起的模型变化而带来的控制问题, 设计了线性变参数增益调度鲁棒控制器. 根据飞轮的线性变参数模型, 设计的鲁棒增益调度控制器, 能够保证其全转速范围内的鲁棒稳定性和性能. 为降低控制器设计的保守性, 在设计控制器时, 可缩小转速区间, 使控制性能得到提高. 与按照非时变模型设计的鲁棒控制器相比, 线性变参数鲁棒增益调度控制器可以实现以转速为参数的自适应调节, 在全转速范围内, 其鲁棒稳定性和性能均具有显著优势. 仿真结果验证了此控制器的有效性和先进性.

关键词: 磁轴承; 线性变参数; 鲁棒增益调度控制; 储能飞轮系统

中图分类号: TP273 文献标识码: A

Linear parameter-varying gain-scheduled robust control for active magnetic bearings of flywheel energy storage system

CHEN Jun-feng, LIU Kun, XIAO Kai

(Institute of Aerospace and Material Engineering, National University of Defense Technology, Changsha Hunan 410073, China)

Abstract: A linear parameter-varying gain-scheduled robust controller design method is developed to deal with the model-varying problem in controlling the active magnetic bearings of the flywheel energy storage system with strong gyroscopic effect. Model-varying phenomenon is induced by the rapid change in flywheel rotation speed. Thus, a speed-dependent linear parameter-varying model of flywheel is derived; and a gain-scheduled robust controller is designed which guarantees the robust stability and performance in the entire speed range of the flywheel. To reduce the design conservatism, the speed range can be limited to improve the performance in the controller design. Compared with the robust controller based on linear time-invariant model, the linear parameter-varying gain-scheduled robust controller realizes the adaptive parameter adjustment with the varying speed, and has remarkable advantages in robust stability and performance in the entire speed range. The simulation validates the effectiveness and advancement of the designed controller.

Key words: active magnetic bearings; linear parameter-varying; gain-scheduled robust control; flywheel energy storage system

1 引言(Introduction)

采用飞轮储能系统(flywheel energy storage system, FESS)储能是具有广泛应用前景的机械储能方式, 它是由飞轮的升速和降速, 实现能量的存储和释放. 近年来, 磁轴承(active magnetic bearings, AMB)作为一种新型的轴承形式, 与飞轮储能技术相结合, 消除了飞轮与轴承的机械摩擦, 具有低功耗和超高速运转等优点. 作为新型的储能方式, 磁悬浮飞轮储能技术在电力系统调峰、风力发电、车辆供电、不间断电源、低地轨道卫星储能等领域得到了广泛研究^[1,2]. 磁悬浮储能飞轮在运行时, 转速变化范围大、速度快, 利用单一的线性时不变(linear time invariant, LTI)控制器对其进行控制很难同时满足系统的稳定性和一定的性能指标. 增益调度方法在磁轴承控制方面已有广泛的研究, 而采用传统的增益

调度方法费时费力, 且对工作点的选取需要一定的经验, 具有一定的局限性. 自上世纪90年代以来, 基于 H_∞ 控制理论的鲁棒增益调度技术得到了非常迅速的发展^[3~5], 鲁棒增益调度技术综合运用线性变参数(linear parameter-varying, LPV)控制和 H_∞ 控制设计方法, 能够根据时变参数实时生成满足性能指标的全局LPV鲁棒控制器, 可以很好地克服传统增益调度技术的局限性.

关于磁悬浮飞轮增益调度技术的研究, 文献[6]以PD控制器设计为基础, 通过串联零极点对和低通滤波器提高控制器在章动频率附近的相位超前, 实现对转子章动的抑制. 然而, 通过设计插值函数使控制器参数随转速平滑切换不仅需要一定的工程经验, 而且切换的稳定性缺乏必要的理论证明. 文献[7]在转速范围的两个端点处分别设计

鲁棒控制器,运用插值的方法得到转速区间内的控制器,但该方法对切换系统的公共Lyapunov函数的解缺少讨论,从而很难保证控制器切换时系统的稳定性.文献[8]针对设计的磁轴承系统验证了LPV鲁棒控制器,其对象为细长型转子,转动惯量比(J_p/J_d)小,陀螺效应影响也较小,建模时时变参数对磁轴承各通道耦合影响相对较小.

鉴于此,本文针对扁平型、大转动惯量比的磁悬浮储能飞轮样机,考虑转子陀螺效应对径向四轴控制的影响,采用LPV鲁棒增益调度方法设计控制器,解决飞轮充放电过程转速快变及干扰抑制问题.对轴向平动采用磁轴承主动控制方式设计PID控制器进行控制,本文对轴向控制方法不作讨论.

2 磁悬浮飞轮的LPV模型(Flywheel LPV model based on AMB)

本文研究的磁悬浮储能飞轮为短粗型圆柱结构,具有大转动惯量比,建模分析时,可将转子作为刚体分析.结构示意图见图1.位移传感器1~4安装在定子下环,5~8安装在定子上环.磁轴承下环坐标系和上环坐标系分别为 $x_1o_1y_1$ 和 $x_2o_2y_2$.磁轴承到转子质心之间的距离分别为 l_1 和 l_2 .

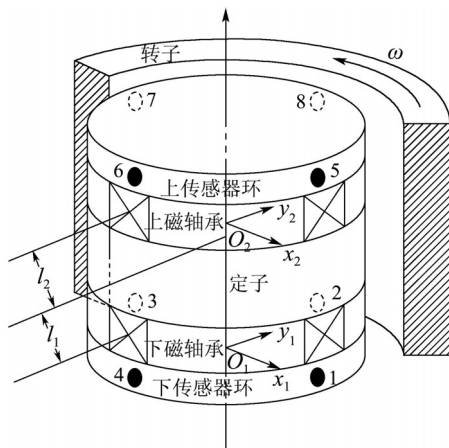


图1 磁悬浮储能飞轮系统结构
Fig. 1 Structure of FESS based on AMB

由欧拉动力学方程推导得到飞轮LPV动力学模型如下[8,9]:

$$\dot{X}_p = A_p(\omega)X_p + B_pU, \quad (1)$$

$$Y = C_pX_p, \quad (2)$$

式中:

$$X_p = [x_1 \ x_2 \ y_1 \ y_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ \dot{y}_1 \ \dot{y}_2]^T,$$

$$U = [i_{x1} \ i_{x2} \ i_{y1} \ i_{y2}]^T, Y = [x_1 \ x_2 \ y_1 \ y_2]^T,$$

$$A_p = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} & \mathbf{I}_{4 \times 4} \\ M_B^{-1}K_s & -M_B^{-1}G_B \end{bmatrix}, B_p = \begin{bmatrix} \mathbf{0}_{4 \times 4} \\ M_B^{-1}K_i \end{bmatrix},$$

$$C_p = [\mathbf{I}_{4 \times 4} \ \mathbf{0}_{4 \times 4}], M_B = T_F^{-1}MT_Z, G_B = T_F^{-1}GT_Z,$$

$$M = \begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_x \end{bmatrix}, T_Z = \frac{1}{l_a + l_b} \begin{bmatrix} l_b & l_a & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & l_b & l_a \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix},$$

$$T_F = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ l_a & -l_b & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -l_a & l_b \end{bmatrix}, G = \Omega \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I_z \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_z & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

其中: X_p, U, Y 为状态变量矩阵、控制输入矩阵、输出矩阵; M_B, M 为广义质量矩阵; G_B, G 为陀螺矩阵; T_F, T_Z 为质心坐标系到磁轴承上下环坐标系的变换矩阵.在平衡点处对电磁力进行局部线性化,得到的电流刚度矩阵 K_i 和位移刚度矩阵 K_s :

$$K_s = \begin{bmatrix} k_{sax} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{sbx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{say} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{sby} \end{bmatrix},$$

$$K_i = \begin{bmatrix} k_{iax} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & k_{ibx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & k_{iay} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{iby} \end{bmatrix}.$$

系统的具体参数定义见表1.表中: I_x, I_y 为赤道转动惯量, $k_{sax}, k_{sbx}, k_{say}, k_{sby}$ 为位移刚度系数, $k_{iax}, k_{ibx}, k_{iay}, k_{iby}$ 为电流刚度系数.

表1 磁悬浮储能飞轮系统参数

Table 1 Parameters of FESS based on AMB

参数	数值
质量 m/kg	53
极转动惯量 $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.5855
$I_x, I_y/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	1.057
质心距 $l_a, l_b/\text{m}$	0.1
$k_{sax}, k_{sbx}, k_{say}, k_{sby}/(10^6 \cdot \text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	3.095
$k_{iax}, k_{ibx}, k_{iay}, k_{iby}/(\text{N} \cdot \text{A}^{-1})$	2010.6

从状态空间方程可以看出,陀螺矩阵 G 随转速 ω 变化,则动力学方程中的系统矩阵 A_p 也随转速实时变化.本文设计转子的极转动惯量与赤道转动惯量比为 $I_z/I_x = 1.5$,可以认为其陀螺耦合效应较为明显.与LTI模型设计的控制器相比,采用LPV建模设计的控制器能够根据转速的变化而自动调节以适应参变模型.

3 H_∞ 增益调度控制器设计(H_∞ gain-scheduled controller design)

结合LPV模型构建飞轮标准 H_∞ 模型,采用鲁棒增益调度技术设计飞轮控制器.关于鲁棒增益调度技术的详细描述见参考文献[3~5]及其引用的相关文献.容易检验磁悬浮飞轮的LPV模型满足LPV鲁

棒综合设计的条件, 因此可以直接采用LPV H_∞ 综合方法设计控制器. 为满足磁悬浮飞轮控制设计的稳定性及性能指标要求, 采用了如图2所示LPV控制系统设计结构.

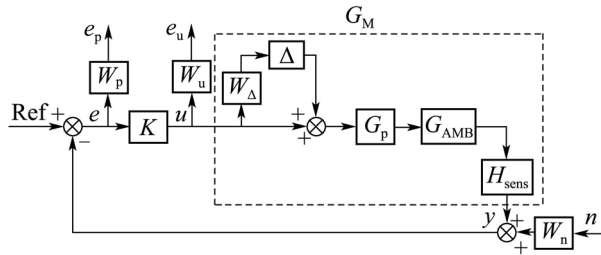


图 2 磁悬浮飞轮闭环控制结构

Fig. 2 Close-loop control structure of flywheel based on AMB step

图2中, 虚线方框表示包含飞轮模型加性不确定性环节 Δ , 功放环节 G_p , 磁轴承 G_{AMB} 和传感器环节 H_{sens} 的系统综合模型 G_M . 实际系统中将传感器环节近似等效为 $H_{sens} = 8000$, 功放环节近似等效为

$$G_p = 0.5 / (0.0003s + 1).$$

对性能加权函数的选择, W_Δ 为模型加性不确定性加权函数, 用来表征对综合模型 G_M 的高频未建模的补偿, 设置为高通环节; W_p 为稳态误差加权函数, 用来表征对飞轮位移误差的抑制程度, 设置为低通环节; W_u 为控制输入加权函数, 用来表征对控制信号高频成分的抑制程度, 设置为高通环节; W_n 表示为传感器噪声加权函数, 设置为线性定常环节. 具体表示如下:

$$W_\Delta = 5 \times 10^{-6} \frac{s + 100}{s + 5000}, W_p = 0.5 \frac{s + 3000}{s + 0.1},$$

$$W_u = 5 \frac{s + 80}{s + 10000}, W_n = 0.001.$$

将图2各部分连接起来化为标准 H_∞ 控制系统结构, 即可按 H_∞ 综合的方法设计控制器, LPV鲁棒 H_∞ 控制器设计的最终目标为:

- 1) 在转速变化范围内, 控制器使闭环系统稳定;
- 2) 控制器 K 使闭环系统二次 H_∞ 性能指标 γ 最小, 即 $\|e\|_2 < \gamma \|d\|_2$.

对于LPV鲁棒 H_∞ 综合问题的求解, 参照文献[3], 首先求解满足凸可解条件的LPV多胞模型线性矩阵不等式(LMI), 进而搜索闭环系统Lyapunov函数的正定解, 最后可以计算得到满足有界实数定理的顶点控制器 K_i . 控制器的状态空间描述可表示为

$$\begin{pmatrix} A_K(\omega) & B_K(\omega) \\ C_K(\omega) & D_K(\omega) \end{pmatrix} :=$$

$$\sum_{i=1}^r \alpha_i K_i = \sum_{i=1}^r \alpha_i \begin{pmatrix} A_{K_i} & B_{K_i} \\ C_{K_i} & D_{K_i} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

转速 Ω 的多胞形式表示为

$$\Omega = \left\{ \sum_{i=1}^r \alpha_i \omega_i : \alpha_i \geq 0, \sum_{i=1}^r \alpha_i = 1 \right\}, \quad (4)$$

其中 $(\alpha_1, \dots, \alpha_r)$ 是凸分解问题的任意情况. 转速 Ω 可以在线实时测量使控制器能实时更新.

4 仿真(Simulations)

为检验LPV鲁棒增益调度控制器的优点, 在同等条件下对LPV鲁棒增益调度控制器和LTI鲁棒控制器的闭环控制性能进行仿真分析. 在转速区间 $[0, 30000] \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 设计LPV鲁棒增益调度控制器, 求解用MATLAB robust control toolbox中HINFGS函数^[10], 经过LMI 71次迭代, 得到46阶控制器. 对在转速区间 $[0, 30000] \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 设计的LPV鲁棒增益调度控制器与在 $25000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时设计的LTI鲁棒控制器进行闭环控制性能对比. 在单位阶跃作用, 转子的位移响应曲线如图3所示. 与LTI鲁棒控制器相比较, LPV鲁棒增益调度控制器控制超调量较大且调节时间较长, 在固定转速时的控制性能稍劣于LTI鲁棒控制器. 反映在其鲁棒性能指标 γ 上, LPV鲁棒增益调度控制器性能指标 $\gamma_{GS} = 16.844$ 大于LTI鲁棒控制器性能指标 $\gamma_{RB} = 5.011$. 但以控制性能的降低为代价, LPV鲁棒增益调度控制器能适应大范围转速的变化而保持鲁棒性能不变. 如图4所示, 在幅值为 1×10^{-4} 的方波扰动指令作用下, 采用两种方法设计 $25000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速时的控制器, LTI鲁棒控制器在 $25000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 转速使闭环系统稳定且具有一定鲁棒性, 而在 $24000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 和 $28000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 时导致系统失稳, 这是由于转速变化导致的模型变化可以等效为模型不确定性成分, 固定转速设计的鲁棒控制器只在固定转速具有鲁棒性, 只能保证系统在该转速附近闭环稳定, 当转速变化较大导致模型相差较大时, 固定转速设计的鲁棒控制器无法保证闭环系统的稳定性. 而LPV鲁棒增益调度控制器能根据转速实时更新以适应当前模型, 具有良好的自适应调节能力. 图4中, 实线表示LPV鲁棒增益调度, 虚线表示LTI鲁棒控制.

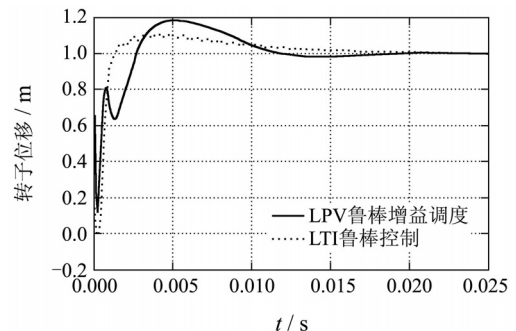
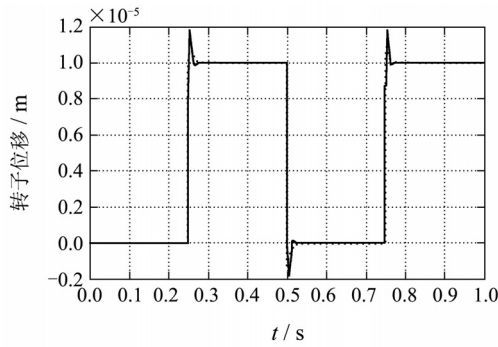
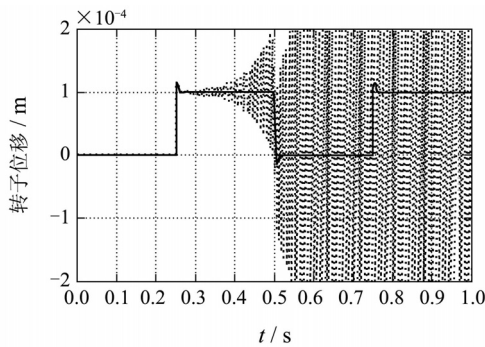


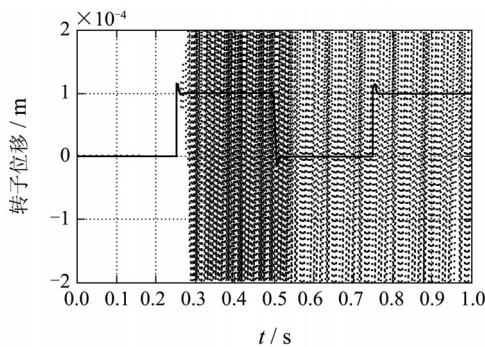
图 3 单位阶跃响应曲线
Fig. 3 Step response



(a) 对25000 r·min⁻¹模型的方波响应



(b) 对24000 r·min⁻¹模型的方波响应



(c) 对28000 r·min⁻¹模型的方波响应

图4 不同转速的控制鲁棒稳定性检验

Fig. 4 Robust stability test for different speed step controllers

为降低LPV鲁棒设计的保守性,可针对局部转速区间设计控制器以提高其控制性能.表2所示不同转速范围设计的LPV鲁棒增益调度控制器在转速为25000 r·min⁻¹时鲁棒性能的对比.表中结果表明,随着转速范围的缩小,鲁棒性能指标 γ_{GS} 不断减小,鲁棒控制性能得到提高,性能提高的极限为LTI鲁棒控制器在25000 r·min⁻¹的性能指标 γ_{RB} .

表2 不同转速区间的闭环H_∞范数

Table 2 Closed-loop H_∞ norm in different speed area

转速区间/(r·min ⁻¹)	γ_{GS}
[0, 30000]	16.844
[10000, 30000]	12.191
[20000, 30000]	8.356
[23000, 28000]	6.174
[24999, 25001]	5.023

5 结论(Conclusions)

本文将LPV鲁棒增益调度方法用于强陀螺效应耦合的磁悬浮储能飞轮控制器设计,以解决系统参数快变和干扰抑制问题.仿真结果表明,LPV鲁棒增益调度控制器随飞轮转速变化而实时调节,保证了系统大转速范围的鲁棒稳定性和性能.本文研究结果的工程实用性将在后续研究中通过磁悬浮储能飞轮样机进行实验验证.

参考文献(References):

- [1] JACK G, BITTERLY. Flywheel technology past, present, and 21st century projections[J]. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 1998, 13(8): 13 – 16.
- [2] 蒋书运, 卫海岗, 沈祖培. 飞轮储能技术研究的发展现状[J]. *太阳能学报*, 2000, 21(4): 427 – 433. (JIANG Shuyun, WEI Haigang, SHEN Zupei. The situation of the flywheel energy storage research[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2000, 21(4): 427 – 433.)
- [3] APKARIAN P, GAHINET P, BECKER G. H_∞ control of linear parameter – varying systems: a design example[J]. *Automatica*, 1995, 31(9): 1251 – 1261.
- [4] PACKARD A. Gain scheduling via linear fractional transformations[J]. *Systems and Control Letters*, 1994, 22(2): 79 – 92.
- [5] APKARIAN P, GAHINET P. A convex characterization of gain-scheduled H_∞ controllers[J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 1995, 40(5): 853 – 864.
- [6] 张凯, 赵雷, 赵鸿宾. 磁悬浮飞轮低阶变增益鲁棒控制器设计[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(9): 198 – 201. (ZHANG Kai, ZHAO Lei, ZHAO Hongbin. Low order gain schedule robust controller design of a magnetic-bearing-supported flywheel[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(9): 198 – 201.)
- [7] 韩辅君, 房建成, 刘刚. 磁悬浮飞轮磁轴承系统变增益H_∞控制器设计[J]. *系统工程与电子技术*, 2008, 30(9): 1748 – 1751. (HAN Fujun, FANG Jiancheng, LIU Gang. Gain scheduled H_∞ controller design for magnetic bearing system of flywheel[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2008, 30(9): 1748 – 1751.)
- [8] BEI L, HEEJU C, GREGORY D, et al. Linear parameter-varying techniques for control of a magnetic bearing system[J]. *Control Engineering Practice*, 2008 16(10): 1161 – 1172.
- [9] 吴刚. 混合磁轴承飞轮系统设计与控制方法研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2006. (WU Gang. *Study on system design and control methods of hybrid magnetic bearing momentum flywheel*[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2006.)
- [10] BALAS G, CHIANG R, PACKARD A, et al. Robust control toolbox: for use with MATLAB[S]. *The MathWorks*, 2005: 10116 – 10117.

作者简介:

陈峻峰 (1983—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为磁轴承系统建模与控制、鲁棒控制、增益调度控制, E-mail: cjfhn0227@126.com;

刘昆 (1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为磁轴承设计与系统分析、飞行器动力学与控制、飞行器总体设计与分析, E-mail: liukun@nudt.edu.cn;

肖凯 (1971—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为磁轴承设计与控制、飞行器动力学与控制, E-mail:xiaokai@nudt.edu.cn.