

研
究
开
发考虑输入滞后的磁悬浮列车悬浮
系统的鲁棒 H_∞ 容错控制严 伟^{1,2}, 滕青芳^{2,3}, 范多旺³

(1. 广州铁路(集团)公司 广州电务段, 广东 广州 510610;

2. 兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070;

3. 光电技术与智能控制教育部重点实验室(兰州交通大学), 甘肃 兰州 730070)



作者简介: 严伟(1981-), 男, 硕士, 主要研究方向为列车自动控制、容错控制。

摘 要: 以磁悬浮列车单模块悬浮系统为对象, 考虑系统存在的输入时滞, 建立了时滞悬浮系统的数学模型, 基于状态反馈和线性矩阵不等式处理方法, 设计了在执行器发生故障情况下的鲁棒 H_∞ 容错控制器, 在此基础上, 针对不同执行器故障模式, 对悬浮间隙的变化情况进行了仿真。仿真结果表明所设计的控制器在执行器故障条件下能够使磁悬浮列车稳定悬浮与运行。

关键词: 单悬浮模块; 时滞; 鲁棒 H_∞ 容错控制; 执行器失效; 线性矩阵不等式

中图分类号: U292.91+7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2012)01-0025-05

Robust H_∞ Fault Tolerant Control on Suspension System of Maglev
Train with Delayed InputYAN Wei^{1,2}, TENG Qing-fang^{2,3}, FAN Duo-wang³

(1. Communication and Signal Section of Guangzhou, Guangzhou Railway (Group) Corporation, Guangzhou, Guangdong 510610, China;

2. School of Automation and Electrical of Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China; 3. Opto-electronic Technology and Intelligent Control Key Laboratory of Ministry of Education, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, Gansu 730070, China)

Abstract: Taking into account of the input time-delay, mathematical model of the suspension system was established for single suspension module of maglev train. Based on state feedback and LMI approaches, robust H_∞ fault tolerant controller was designed under the case of actuator failures, furthermore, the gap variation in case of different actuator failures was simulated. Simulation results showed that the designed fault tolerant controller could make the maglev train suspend and run steadily with actuator failures.

Key words: single suspension module; time-delay; robust H_∞ fault tolerant control; actuator failure; linear matrix inequality(LMI)

0 引言

磁悬浮列车是一种新型的有轨交通工具, 其利用电磁力将列车以一定的间隙悬浮于轨道之上。在这个过程中, 悬浮控制系统起着重要的作用, 它的正常工作是保证列车安全运行的重要前提。传统的悬浮控制系统传感器、控制器与执行器之间传输的主要是模拟信号, 然而列车在运行过程中, 电磁干扰十分强烈, 模拟信号很容易受到影响, 从而影响了系统的稳定性。网络化的悬浮控制系统把传感器测量的模拟量信号数字化后将数据帧发送到网络中, 利用网络传输数据的高可靠性有效地降低了外界电磁场对信号传输的影响。同时, 网络化的悬浮控制系统把各个悬浮控制节点链接在一起, 构成了

一个数字化、智能化、信息化的悬浮控制系统。但是, 由于系统的网络化, 导致网络诱导时延的存在, 使得系统控制输入产生滞后, 从而恶化了悬浮系统的性能。

文献[1]以网络化悬浮控制系统为对象, 设计了一种基于模型校正的控制算法, 该算法能够补偿网络诱导时延; 文献[2-3]基于线性矩阵不等式方法, 研究了在执行器故障情况下悬浮系统容错控制器的设计问题, 证明了在磁悬浮列车悬浮系统中应用基于LMI的被动容错控制方法的有效性, 所不同的是, 文献[2]引入了权重的概念, 对所设计的控制器进行了修改, 并作了稳定性验证。本文在文献[1-6]的基础上, 将基于LMI的容错控制理论应用到具有输入时滞的磁悬浮列车单模块悬浮系统中, 针对执行器可能失效情形, 结合工程的实际控制模式, 设计了在执行器发生故障情况下的鲁棒 H_∞ 容错控制器。最后通过仿真, 表明所设计的控制器在执行器故障条件下能够使得磁悬浮列车稳定悬

收稿日期: 2011-08-28

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目(IRT0629);

甘肃省自然科学基金资助项目(3ZS061-A25-044)

浮与运行,验证了所提方法的有效性。

1 悬浮系统模型

本文针对CMS03型磁悬浮列车进行研究。该型号磁悬浮列车由4个转向架构成,每个转向架上安装有2个电磁铁模块,每个悬浮模块上分布着4个电磁铁,每个电磁铁分别对应着一个斩波器,由2个控制器单独控制。单个电磁铁是构成悬浮系统的基本单元,因此,本文从基本单元入手,以单个电磁铁模块为研究对象来分析问题。悬浮模块中单套悬浮控制系统结构模型如图1所示。

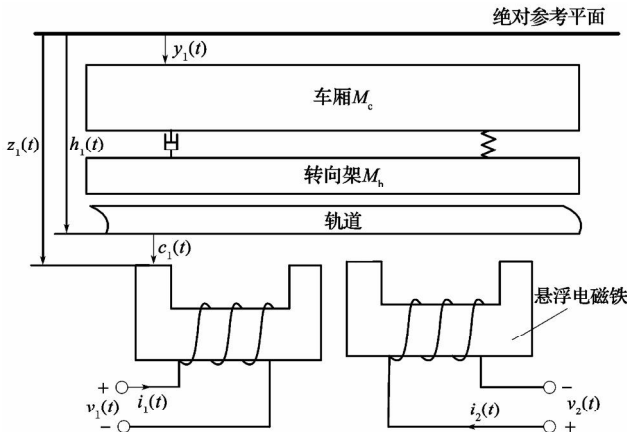


图1 悬浮模块中单套悬浮控制系统结构模型

文中各符号代表的物理意义如下^[7]: M_c 为列车车厢在单套悬浮控制系统上的等效质量; M_b 为列车转向架在单套悬浮控制系统上的等效质量; $i(t)$ 为电磁铁1或2的线圈电流; A 为电磁铁极面积; N 为单个电磁铁绕组匝数; μ_0 为真空磁导率; $c(t)$ 为电磁铁的悬浮间隙; $h(t)$ 为绝对参考平面到轨道的位移; $y(t)$ 为绝对平面到车厢的位移; $z(t)$ 为绝对参考平面到电磁铁的位移; $v(t)$ 为对应线圈两端电压; x_0 为平衡工作点时弹簧的长度; $d(t)$ 为系统的输入滞后。

为了简化问题,假设:

①认为轨道是平顺的,即认为 $h(t)=h_0$ 为常数,则有 $\dot{z}(t)=\dot{c}(t)$, $\ddot{z}(t)=\ddot{c}(t)$; ②不考虑导轨和铁心中的磁阻,铁磁材料在电磁铁磁路中的磁导率被视为无穷大,并且气隙中磁势是均匀分布的; ③只考虑竖直方向上的运动,规定向下方向为力的正方向,取状态变量 $x_1=c$, $x_2=\dot{c}$, $x_3=i_1$, $x_4=i_2$, 输入 $u_1=v_1$, $u_2=v_2$, $X=(x_1, x_2, x_3, x_4)^T=(\Delta c, \Delta \dot{c}, \Delta i_{10}, \Delta i_{20})^T$, 控制变量 $u=(\Delta v_1, \Delta v_2)^T$, 由此得到悬浮模块中单套悬浮控制系统模型的动力学方程,如式(1)所示。

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ \frac{k_{z1}+k_{z2}}{M_b} & 0 & -\frac{k_{i1}}{M_b} & -\frac{k_{i2}}{M_b} \\ 0 & \frac{k_{i1}}{L_0} & -\frac{R}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{k_{i2}}{L_0} & 0 & -\frac{R}{L_0} \end{bmatrix} X + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{1}{L_0} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} (t-d(t))$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] X$$

$$(L_0 = \frac{\mu_0 N^2 A}{2c_0}, k_{i1} = \frac{\mu_0 N^2 A i_{10}}{2c_0^2}, k_{i2} = \frac{\mu_0 N^2 A i_{20}}{2c_0^2}, k_{z1} = \frac{\mu_0 N^2 A i_{10}^2}{2c_0^3}, k_{z2} = \frac{\mu_0 N^2 A i_{20}^2}{2c_0^3})$$

2 控制方案设计

2.1 问题的描述

考虑不确定输入时变时滞线性状态系统:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t-d(t)) + B_w w(t) \\ y(t) &= C_1 x(t) \\ x(t) &= \phi(t), \forall t \in [-\tau, 0] \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: $x(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统状态变量; $y(t) \in \mathbb{R}^r$ 是测量输出; $u(t-d(t)) \in \mathbb{R}^m$ 为系统实际控制输入; $w(t) \in \mathbb{R}^1$ 为能量有限的干扰信号; $\phi(t) \in \mathbb{R}^n$ 为系统初始向量函数; A 、 B 、 B_w 、 C_1 为具有适当维数的已知常数矩阵。

时变时滞 $d(t)$ 满足: $0 \leq d(t) \leq \tau$ 且 $\dot{d}(t) \leq \mu < 1$ 。

设被调输出为:

$$z(t) = Cx(t) + Du(t-d(t)) \quad (3)$$

式中: C 为调整系统性能的权值矩阵; D 为限制控制器增益的系数,通过调节 D 可以达到限制控制器增益的目的。

对式(2),取状态反馈控制:

$$u(t) = Kx(t) \quad (4)$$

考虑到执行器的可能失效情形,文中执行器故障模型采用开关型,设故障开关矩阵为 L ,并将该矩阵放在矩阵 B 和反馈控制矩阵 K 之间,其形式为:

$$L = \text{diag}(l_1, L, l_m), L \in \Omega \text{ 且 } L \neq 0 \quad (5)$$

式中:

$$l_i = \begin{cases} 1 & \text{第 } i \text{ 个执行器正常} \\ 0 & \text{第 } i \text{ 个执行器完全失效} \end{cases} \quad (6)$$

Ω 为执行器开关型故障中各种可能的故障组成的一个集合。

2.2 控制器设计与正确性证明

考虑执行器可能失效情形,式(2)所表示的线性系统在式(4)的作用下,存在如下故障闭环系统:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + BLKx(t-d(t)) + B_w w(t) \\ \dot{z}(t) &= Cx(t) + DLKx(t-d(t)) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

对于 $t \geq \tau$ 有:

$$x(t-d(t)) = x(t) - \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta) d\theta \quad (8)$$

式中,

$$\xi(\theta) = Ax(\theta) + BLKx(\theta-d(\theta)) + B_w w(\theta) \quad (9)$$

将 $x(t-d(t))$ 代入式(7)得:

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}(t) &= [A + BLK]x(t) + B_w w(t) - BLK \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta) d\theta \\ z(t) &= Cx(t) + DLKx(t-d(t)) \\ x(t) &= \phi(t), \forall t \in [-2\tau, 0] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

这里需要注意的是式 (10) 需要满足区间 $[-2\tau, 0]$ 上的初始条件, 当 $\forall t < -\tau$ 时; $x(t)=0$ 。

本节主要讨论输入时滞系统的鲁棒 H_∞ 容错控制器的设计问题。

$$\begin{bmatrix} \Theta & -PBLKM^T R + C^T DLK & PB_w & \tau A^T & \tau PBLK(M^T R + I) \\ -(PBLKM^T R)^T + (DLK)^T C & -(1-\mu)Q + (DLK)^T DLK & 0 & \tau(BLK)^T & 0 \\ B_w^T P & 0 & -\gamma^2 I & \tau B_w^T & 0 \\ \tau A & \tau BLK & \tau B_w & -\tau S & 0 \\ \tau(RM + I)(BLK)^T P & 0 & 0 & 0 & -\tau R \end{bmatrix} < 0 \quad (11)$$

式中:

$$\begin{aligned} \Theta = & PA + A^T P + PBLK + (PBLK)^T + Q + \\ & C^T C + PBLKM^T R + (PBLKM^T R)^T \end{aligned}$$

则对于任意执行器失效 $L \in \Omega$, 系统存在一个鲁棒容错控制器 $u(t)=Kx(t)$, 且在其作用下, 系统式 (7) 鲁棒渐进稳定具有 H_∞ 范数界 γ 。

证明: ① 先证明矩阵不等式 (11) 能够保证系统式 (10) 一致渐进稳定且具有鲁棒容错性。

选取如下 Lyapunov 函数:

$$\begin{aligned} V(x(t), w(t)) = & x^T(t)Px(t) + \int_{t-d(t)}^t x^T(s)Qx(s)ds + \\ & \int_{-d(t)}^0 \int_{t+s}^t \xi^T(\theta)S^{-1}\xi(\theta)d\theta ds \end{aligned} \quad (12)$$

Lyapunov 函数沿方程式 (10) 的解轨迹导数为:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x(t), w(t)) = & \dot{x}^T(t)Px(t) + x^T(t)P\dot{x}(t) + \\ & x^T(t)Qx(t) - (1-\dot{d})x^T(t-d)Qx(t-d) + \\ & d(t)\xi^T(t)S^{-1}\xi(t) - \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)S^{-1}\xi(\theta)d\theta \end{aligned} \quad (13)$$

在以下推导中省略了变量 t , 将 $\dot{x}(t)$ 的表达式代入式 (13), 并令 $x(t-d)=x_d$, 则有:

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, w) = & x^T A^T Px + x^T PAx + x^T (PBLK)^T x + \\ & x^T PBLKx + x^T PB_w w + w^T B_w^T Px - \\ & 2x^T PBLK \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta)d\theta + x^T Qx - (1-\dot{d})x_d^T Qx_d + \\ & d\xi^T S^{-1}\xi - \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)S^{-1}\xi(\theta)d\theta \end{aligned} \quad (14)$$

为了降低保守性, 根据文献[8], 应用该文中引理 1 中的式 (4)^[8], 有

$$\begin{aligned} -2x^T PBLK \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta)d\theta \leq & \tau x^T PBLK(M^T R + I)R^{-1} \cdot \\ & (RM + I)(PBLK)^T x + x^T PBLKM^T R \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta)d\theta + \\ & \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)R\xi(\theta)d\theta + \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)d\theta RM(PBLK)^T x \end{aligned} \quad (15)$$

将式 (15) 代入式 (14), 得

$$\begin{aligned} \dot{V}(x, w) \leq & x^T [A^T P + PA + (PBLK)^T + PBLK + Q]x + \\ & x^T PB_w w + w^T B_w^T Px + \tau \xi^T(t)S^{-1}\xi(t) + \\ & \tau x^T PBLK(M^T R + I)R^{-1}(RM + I)(PBLK)^T x + \end{aligned}$$

对于线性时滞系统 (7), 如果存在矩阵 K, M , 对称正定矩阵 P, Q, R, S 以及正常数 τ 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{aligned} & x^T PBLKM^T R \int_{t-d(t)}^t \xi(\theta)d\theta + \\ & \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)d\theta RM(PBLK)^T x - \\ & (1-\mu)x_d^T Qx_d + \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)R\xi(\theta)d\theta - \\ & \int_{t-d(t)}^t \xi^T(\theta)S^{-1}\xi(\theta)d\theta \end{aligned} \quad (16)$$

取 $R = S^{-1}$, 并将 $\int_{t-d(t)}^t \xi(\theta)d\theta = x(t) - x(t-d(t))$ 代入式 (16), 得

$$\dot{V}(x, w) \leq W^T(t) \Pi W(t) \quad (17)$$

$$W(t) = \begin{bmatrix} x^T(t) & x^T(t-d(t)) & w^T(t) \end{bmatrix}^T$$

$$\Pi = \begin{bmatrix} \Pi_{11} & \Pi_{12} & PB_w + \tau A^T S^{-1} B_w \\ \Pi_{12}^T & \Pi_{22} & \tau(BLK)^T S^{-1} B_w \\ B_w^T P + \tau B_w^T S^{-1} A & \tau B_w^T S^{-1} BLK & \tau B_w^T S^{-1} B_w \end{bmatrix}$$

式中:

$$\begin{aligned} \Pi_{11} = & PA + A^T P + PBLK + (PBLK)^T + Q + \\ & \tau A^T S^{-1} A + PBLKM^T R + (PBLKM^T R)^T + \\ & \tau PBLK(M^T R + I)R^{-1}(RM + I)(PBLK)^T \end{aligned}$$

$$\Pi_{12} = -PBLKM^T R + \tau A^T S^{-1} BLK$$

$$\Pi_{22} = \tau(BLK)^T S^{-1} BLK - (1-\mu)Q$$

当不考虑干扰, 即 $w(t)=0$ 时, 由式 (11) 及 Schur 补引理^[9], 知

$$\Pi < 0 \quad (18)$$

因而, 不等式 $\dot{V}(x(t), 0) < 0$ 成立。根据 Lyapunov 稳定理论, 式 (10) 表示的系统是一致渐进稳定的, 这也说明了闭环系统式 (7) 也是一致渐进稳定的。在推导过程中, 不等式 (11) 考虑了执行器失效的情况, 从而进一步说明了闭环系统式 (7) 是具有鲁棒容错性能的。

② 其次证明在零初始条件下不等式 (11) 能够保证闭环系统式 (7) 具有 H_∞ 范数界 γ , 具体证明过程如下:

假设初始状态 $x(t)=0, \forall t \in [-2\tau, 0]$, 同时引入函数:

$$J_{zw} = \int_0^\infty [z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t)]dt \quad (19)$$

故障闭环系统的鲁棒稳定性可以保证 $\|z(t)\|_2$ 的有界性且使得 $\lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = 0$ 成立, 因此, 在零初始状态下, 对

于任意的 $w(t) \in L_2[0, \infty)$, 有以下不等式成立:

$$\int_0^\infty W^T(t) \bar{\Pi} W(t) dt < 0 \quad (20)$$

$$J_{zw} = \int_0^\infty [z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t)] dt \leq \int_0^\infty [z^T(t)z(t) - \gamma^2 w^T(t)w(t) + \dot{V}] dt \leq$$

式中:

$$\bar{\Pi} = \begin{bmatrix} \Theta & -PBLKM^T R + C^T DLK & PB_w & \tau A^T & \tau PBLK(M^T R + I) \\ -(PBLKM^T R)^T + (DLK)^T C & -(1-\mu)Q + (DLK)^T DLK & 0 & \tau(BLK)^T & 0 \\ B_w^T P & 0 & -\gamma^2 I & \tau B_w^T & 0 \\ \tau A & \tau BLK & \tau B_w & -\tau S & 0 \\ \tau(RM + I)(BLK)^T P & 0 & 0 & 0 & -\tau R \end{bmatrix}$$

$$\Theta = PA + A^T P + PBLK + (PBLK)^T + Q + C^T C + PBLKM^T R + (PBLKM^T R)^T$$

综上所述, 给定正常数 $\gamma > 0$, 对于任意执行器失效情况 $L \in \Omega$, 如果存在矩阵 K, M , 对称正定矩阵 P, Q, R, S 以及正常数 τ 使得式 (11) 成立, 则受到干扰的故障闭环系统 (7) 是鲁棒 H_∞ 容错控制系统。证毕。

矩阵不等式 (11) 并不是线性矩阵不等式, 不利于

计算, 为了使数值计算方便, 以下设计方法将其转化成易于计算的线性矩阵不等式(LMI)。

对于线性时滞系统式 (7), 如果存在矩阵 $Y, \bar{R}$, 对称正定矩阵 $X, \tilde{Q}, \tilde{R}, S$ 以及正常数 τ 使得如下矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Xi & -BL\bar{R} & B_w & \tau XA^T & \tau BLY + \tau BL\bar{R} & XC^T \\ -(BL\bar{R})^T & -(1-\mu)\tilde{Q} & 0 & \tau(BLY)^T & 0 & (DLY)^T \\ B_w^T & 0 & -\gamma^2 I & \tau B_w^T & 0 & 0 \\ \tau AX & \tau BLY & \tau B_w & -\tau S & 0 & 0 \\ \tau(BLY)^T + \tau(BL\bar{R})^T & 0 & 0 & 0 & -\tau\tilde{R} & 0 \\ CX & DLY & 0 & 0 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (21)$$

$$\Xi = (AX + BLY) + (AX + BLY)^T + \tilde{Q} + BL\bar{R} + (BL\bar{R})^T$$

则对于任意执行器失效 $L \in \Omega$, 系统存在鲁棒容错控制器 $u(t) = Kx(t)$, 且在其控制作用下, 系统式 (7) 具有 H_∞ 范数界 γ 。控制器增益矩阵为 $K = YX^{-1}$ 。

证明: 用对角矩阵 $\text{diag}\{P^{-1}, P^{-1}, I, I, P^{-1}\}$ 分别左乘和右乘式 (11), 得:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Xi}_{11} & \bar{\Xi}_{12} & B_w & \tau P^{-1} A^T & \tau BLK(M^T R + I)P^{-1} \\ \bar{\Xi}_{12}^T & \bar{\Xi}_{22} & 0 & \tau P^{-1}(BLK)^T & 0 \\ B_w^T & 0 & -\gamma^2 I & \tau B_w^T & 0 \\ \tau AP^{-1} & \tau BLKP^{-1} & \tau B_w & -\tau S & 0 \\ \tau P^{-1}(RM + I)(BLK)^T & 0 & 0 & 0 & -\tau P^{-1}RP^{-1} \end{bmatrix} < 0 \quad (22)$$

式中:

$$\bar{\Xi}_{11} = (AP^{-1} + BLKP^{-1}) + (AP^{-1} + BLKP^{-1})^T + P^{-1}QP^{-1} + PBLKM^T RP^{-1} + (PBLKM^T RP^{-1})^T + P^{-1}C^T CP^{-1}$$

$$\bar{\Xi}_{12} = -PBLKM^T RP^{-1} + P^{-1}C^T DLKP^{-1}$$

$$\bar{\Xi}_{22} = -(1-\mu)P^{-1}QP^{-1} + P^{-1}(DLK)^T DLKP^{-1}$$

$$\text{令 } X = P^{-1}, Y = KX, \tilde{Q} = XQX, \tilde{R} = P^{-1}RP^{-1},$$

$\bar{R} = KM^T RP^{-1}$, 并由 Schur 补引理^[9]可得线性矩阵不等式 (21)。证毕。

3 在磁悬浮列车悬浮系统中的仿真分析

考虑图 1 所示磁悬浮列车悬浮系统模型, 已知具体的系统物理参数如下: $M_b = 500 \text{ kg}$, $M_c = 1\,000 \text{ kg}$, $A_1 = A_2 = 0.021 \text{ m}^2$, $N = 324$, $c_0 = 0.008 \text{ m}$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, $i_{10} = i_{20} = 26 \text{ A}$, $R_1 = R_2 = 0.5 \text{ }\Omega$, $k_{c1} = k_{c2} = 0.12$ 。

则对应系统故障下的状态空间方程为

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + BLu(t-d(t)) + B_w w(t) \\ y(t) = C_1 x(t) \end{cases}$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 7315.2 & 0 & -1.1254 & -1.1254 \\ 0 & 3250.7 & -2.8885 & 0 \\ 0 & 3250.7 & 0 & -2.8885 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 5.777 & 0 \\ 0 & 5.777 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \ 0 \ 0 \ 0], B_w = [1 \ 1 \ 1 \ 1]^T$$

被调输出函数为

$$z(t) = Cx(t) + Du(t-d(t))$$

式中: C 为状态变量在被调函数中的权值矩阵; D 为控

制输入在被调函数中的权值矩阵。

在试验中发现, 控制器内部的斩波器是磁悬浮列车主要的干扰源, 斩波开关的瞬间会产生很强的电磁干扰, $w(t)$ 采用幅值为 0.2、采样时间为 0.1s 的白噪声来模拟悬浮系统在实际工作中受到的干扰, 输入时滞 τ 取 1s, μ 取 0.6s, γ 取 1, 考虑任意执行器失效情况, 采用本文的控制器设计方法, 利用 Matlab-LMI 工具箱求解线性矩阵不等式 (21), 得到控制器增益矩阵:

$$K = 10^5 \times \begin{bmatrix} 2.5138 & -0.8398 & -0.0003 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

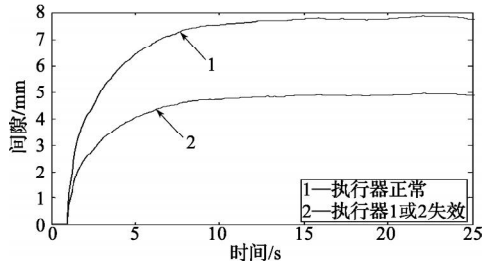


图2 未考虑输入滞后且未采取容错措施时悬浮间隙阶跃响应曲线

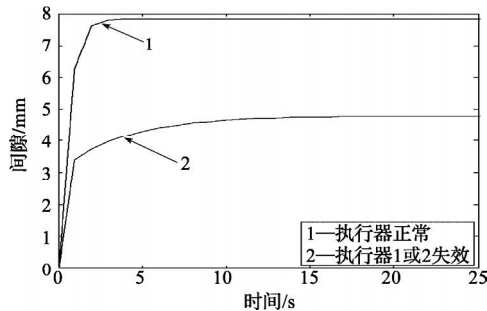


图3 未采取容错措施时悬浮间隙阶跃响应曲线

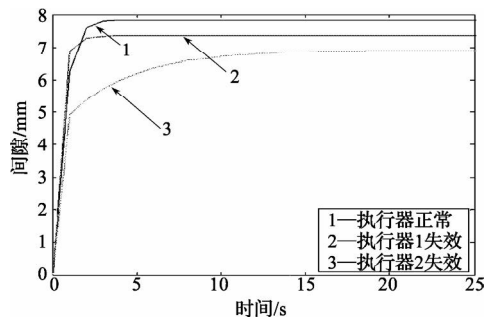


图4 采取容错措施后悬浮间隙阶跃响应曲线

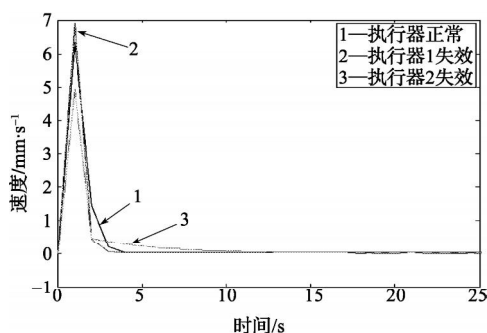


图5 悬浮系统速度响应曲线

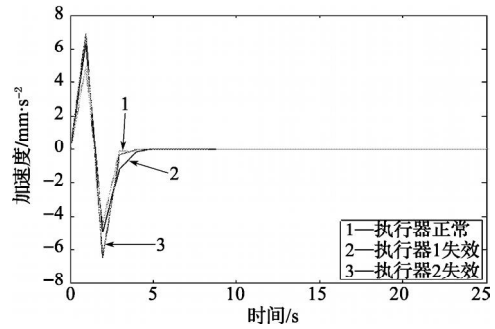


图6 悬浮系统加速度响应曲线

下面检验系统的容错性, 在 Matlab/Simulink 平台上搭建模块, 绘出系统的仿真曲线, 先绘出系统在未考虑输入滞后和未采取容错措施且执行器失效时, 悬浮间隙的阶跃响应曲线, 如图2所示, 再绘出系统未采取容错措施, 执行器失效时悬浮间隙的阶跃响应曲线, 如图3所示, 然后将所求得的控制律 K 代入式 (7), 得到在执行器失效情况下悬浮系统悬浮间隙的阶跃响应曲线, 如图4所示。

对比图2和图3可以看出, 当未考虑输入滞后时, 系统响应时间变长, 且输出也不稳定。从图3和图4可以看出, 当执行器发生故障时, 若不采取容错措施, 悬浮距离达不到所要求的高度值, 悬浮系统将不能稳定悬浮, 而采取容错措施后, 悬浮距离虽比执行器正常时小, 但与故障状态时相比, 悬浮效果大大改善。

为了进一步检验所设计的控制器的容错性能, 下面对悬浮系统的速度响应和加速度响应情况进行仿真, 图5为列车从启动到正常运行时悬浮系统的速度响应曲线, 图6所示为在与图5相同情况下悬浮系统的加速度响应曲线 (这里说的都是竖直方向上的速度与加速度, 而不是水平方向上的)。

从图5可看出, 当执行器正常时, 在启动瞬间, 悬浮系统垂向速度的峰值为 4.9 mm/s, 当执行器1或2发生故障后, 采用本文所设计的控制器, 其垂向速度响应的峰值分别为 6.3 mm/s 和 6.9 mm/s, 与故障前相比, 虽超调量有所增加, 但经过几秒钟的调整以后, 最终都能达到稳定状态。从图6可看出, 当执行器正常时, 在启动瞬间, 悬浮系统的垂向加速度经过短暂的波动后达到稳定状态, 波动的峰值为 $\pm 4.5 \text{ mm/s}^2$, 当执行器1或2发生故障后, 采用本文所设计的控制器, 其垂向加速度响应的峰值比执行器正常时有较小的增加, 最终同样能达到稳定状态。

综上所述, 采用本文所用的被动容错控制方法设计的容错控制律能够使悬浮系统在故障前后稳定悬浮, 系统在故障前后基本保持稳定。

4 结语

本文以磁悬浮列车单模块悬浮系统为对象, 考虑系统存在的输入时滞, 基于状态反馈和线性矩阵不等

(下转第32页)

同的齿厚对场中的涡并没有太大的影响,主要是密封齿处流场的变化较大,齿厚较小时,密封齿的节流效果较强,密封性能较好,随着齿厚的增大,节流效果逐渐减弱,泄漏量逐渐上升,但是随着齿厚的继续增大,流体经过密封齿间隙时摩擦损失增加,造成流体的能量损失增加,泄漏量又缓慢减小。

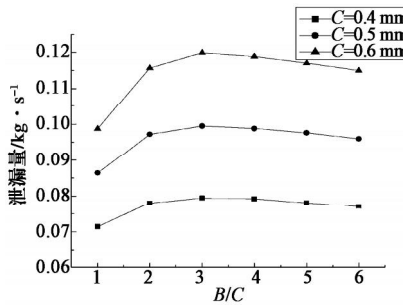


图4 齿尖相对厚度对泄漏量的影响

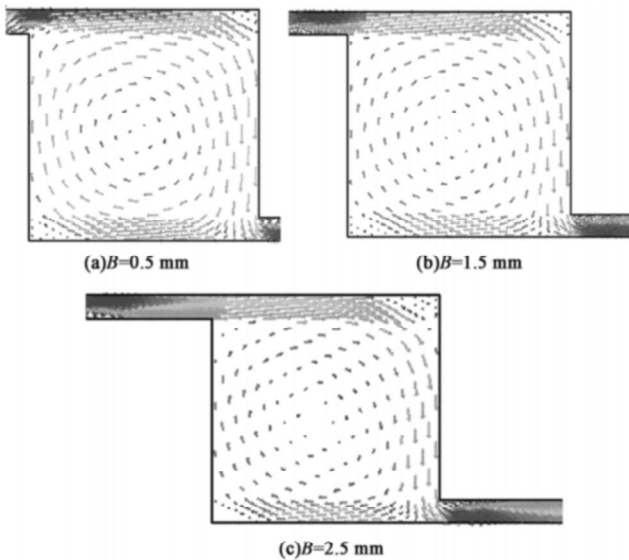


图5 不同齿厚时流场的分布 ($C=0.5\text{ mm}$)

3 结论

①随着空腔深宽比的增加,泄漏量先减小后增加,存在一个最佳深宽比值,使泄漏量达到最小,对于本文的计算模型,最佳深宽比在0.9左右。随着空腔宽度的变大,深宽比对泄漏量的影响变得更加明显,最优值存在的范围更小。

②随着齿尖相对厚度的增加,泄漏量先快速增加然后缓慢减少。较小的齿厚无法满足强度的要求,齿厚较大时会减小空腔宽度和空腔数量,因此应该选择合适的密封齿厚度,既能保证良好的密封性能,又能满足工艺要求。

参考文献:

- [1] CHUPP R E, HENDRICKS R C, LATTIME S B, et al. Sealing in Turbomachinery [J]. Journal of Propulsion and Power, 2006, 22 (2):313-349.
- [2] CHUPP R E, GHASRIPOOR F, TURNQUIST N A, et al. Advanced seals for industrial turbine applications: dynamic seal development [J]. Journal of Propulsion and Power, 2002, 18(6): 1260-1266.
- [3] 王建中, 黄守龙. 直通式迷宫密封的静态工作特性 [J]. 武汉工业大学学报, 1994, 16 (4): 86-90.
- [4] 小茂鸟和生. Leakage of Air through Labyrinth Paeking [C] // 日本机械学会, 日本机械学会论文集. 1955:605-613.
- [5] David LRhode, Richard G Adams. Rub-Groove Width and Depth Effects on Flow Predictions for Straight-Through Labyrinth Seals [J]. Journal of Tribology, 2004, 126: 781-787.
- [6] 王福军. 计算流体动力学分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.

(上接第29页)

式处理方法,设计了在执行器发生故障情况下的鲁棒 H_{∞} 容错控制器,并将所设计的容错控制器应用于磁悬浮列车悬浮系统中,对悬浮间隙的变化情况进行了仿真。仿真结果表明所设计的控制器在执行器故障条件下能够使得磁悬浮列车稳定悬浮与运行,验证了上述所提各方法的有效性,为磁悬浮列车悬浮系统的容错控制提供了一种安全可靠且具有工程实际意义的研究方法。

参考文献:

- [1] 龙志强, 陈慧星, 常文森. 考虑电磁铁故障的磁浮列车单悬浮模块的容错控制 [J]. 控制理论与应用, 2007, 24(6): 1033-1037.
- [2] 龙志强, 薛松, 陈慧星. 基于LMI的磁浮列车悬浮系统被动容错控制 [J]. 计算机仿真, 2008, 25(2): 265-268.
- [3] 李云, 龙志强. 磁悬浮系统网络化控制器的设计与实现 [J].

系统仿真学报, 2009, 21(14): 4420-4423.

- [4] Teng Q F, Fan D W, Gao F. Design of Delay Dependent Robust H_{∞} Reliable Controller for Uncertain Time Varying Delay Systems against Actuator Failure [C] // Automation Institute of Ludong University, Proceedings of the 20th Chinese Control and Decision Conference. Yantai: IEEE Press, 2008: 504-509.
- [5] Sung H K, Cho H J, Yoo M H. Fault-tolerant Control of Electromagnetic Levitation System [C] // Institute of Electrical Engineering Chinese Academy Sciences, Proceedings of the 18th International Conference on Magnetically Levitated System and Linear Drives. Shanghai: IEEE Press, 2004: 676-689.
- [6] 孙金龙, 滕青芳, 王国林. 输入滞后结构振动系统的 H_{∞} 可靠控制 [J]. 控制工程, 2010, 17(3): 279-282.
- [7] 薛松. 低速磁浮列车悬浮系统的故障诊断与容错控制技术 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2007.
- [8] 柴琳, 费树岷. 一类改进的输入时滞的线性时滞系统的 H_{∞} 控制 [J]. 控制理论与应用, 2006, 23(5): 800-804.
- [9] 俞立. 鲁棒控制-线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.