

电励磁直线同步电动机磁悬浮系统 H_∞ 鲁棒控制的研究*

蓝益鹏 张明慧

(沈阳工业大学电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要:为解决电励磁直线同步电动机磁悬浮系统状态变量之间的非线性和不确定性扰动问题,提出一种磁悬浮系统 H_∞ 鲁棒控制方法。由电励磁直线同步电动机磁悬浮系统的运行机理,建立电励磁直线同步电动机悬浮系统的悬浮力方程和运动方程,推导悬浮系统的状态空间模型,针对状态空间模型的非线性,在平衡工作点处对其进行线性化,将系统对抗扰动的抑制问题归结为 H_∞ 鲁棒控制器的设计,通过解 Riccati 不等式的正定解,得到悬浮系统的 H_∞ 鲁棒控制器。最后,采用 MATLAB/Simulink 软件进行仿真研究,通过与 PI 控制比较,结果证明 H_∞ 鲁棒控制方法可使电励磁直线同步电动机具有良好的抑制扰动的能力。

关键词:电励磁直线同步电动机;磁悬浮系统;平衡点线性化; H_∞ 鲁棒控制; Riccati 不等式

中图分类号: TM341 **文献标识码:** A

DOI: 10.19287/j.cnki.1005-2402.2022.01.013

Research on H_∞ robust control of magnetic levitation system of electrically excitation linear synchronous motor

LAN Yipeng, ZHANG Minghui

(School of Electric Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, CHN)

Abstract: In order to solve the nonlinearity of state variables, disturbance and parameter uncertainty of magnetically levitated linear synchronous motor, a H_∞ robust control method of magnetically levitated system was proposed. By electric excitation linear synchronous motor running mechanism of the magnetic levitation system, establish electric excitation linear synchronous motor suspension system of levitation force equation and the equation of motion, the state space model of suspension system is derived, in view of the nonlinear state space model, adopt the method of balance linearization for linearization, the system of disturbance rejection problem due to the design of the controller, By solving the positive definite solution of the Riccati inequality, the H_∞ robust controller of the suspension system is obtained. Finally, MATLAB/Simulink software is used for simulation research. Compared with the PI control, the results show that the H_∞ robust control method can make the electroexcited linear synchronous motor have good disturbance suppression ability.

Keywords: electrically excitation linear synchronous motor; maglev system; equilibrium point linearization; H_∞ robust control; Riccati inequality

传统数控机床采用“旋转电机+滚珠丝杠”的驱动系统,由于存在中间传动装置,不能够满足现代工业所要求的高加工精度^[1]。

较传统电机而言,直线电机没有中间传动环节,没有冲击、响应速度快、磨损和噪声小,但是运动平台和导轨之间存在较大的摩擦^[2-4]。将电励磁直线磁悬浮

同步电动机作为数控机床驱动系统,其水平方向产生的推力和垂直方向产生的悬浮力使电动机实现直线进给和稳定悬浮,改善平台和导轨间的摩擦。

但是电励磁磁悬浮直线进给平台系统具有较强的不稳定性,且在受到不确定性扰动或者端部效应等影响时,其参数也会发生变化,极大地增加了控制难

* 国家自然科学基金资助项目 (51575363)

度^[5]。因此既要保证零传动,又要实现高效、可靠的控制性能,是系统控制器的设计难点^[6]。

H_∞ 鲁棒控制主要为了解决被控对象的不确定性扰动的问题,通过设计 H_∞ 鲁棒控制器可以使系统有更好的稳定鲁棒性和品质鲁棒性。

正是如此, H_∞ 鲁棒控制也被许多学者相继研究。文献[7]设计了一种在非线性系统中执行器失效时 H_∞ 鲁棒控制系统,但是它的抗扰能力和容错能力有一定的范围。文献[8]提出混合 H_2/H_∞ 鲁棒预测控制器设计方法,使永磁同步伺服电机系统负载变化时起到更好的抑制扰动的作用和稳定性。文献[9]则是基于线性矩阵不等式(LMI)设计了鲁棒 H_∞ 滑模速度控制器和电流控制器,该控制系统能够很好的抑制不确定性的外部扰动。

针对电励磁直线电动机的磁悬浮系统,本文提出一种磁悬浮系统 H_∞ 鲁棒控制方法,对电励磁直线同步电动机悬浮系统方向的状态空间模型进行线性化,将系统对扰动的不确定抑制问题归为 H_∞ 控制问题,通过解 Riccati 不等式的正定解,得到悬浮系统的 H_∞ 鲁棒控制器,并对其进行仿真研究。

1 电励磁直线电动机的结构和运行机理

电励磁直线电动机磁悬浮进给平台主要由运动平台,电励磁直线同步电动机与辅助导轨组成。如图1所示。

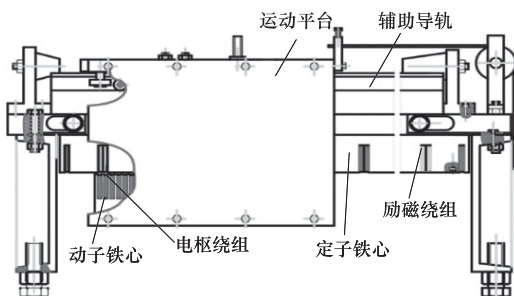


图1 磁悬浮进给平台结构图

从图1可知其运动平台主要为两部分:动子部分和定子部分。

(1) 动子部分: 动子铁心和电枢绕组。在三相交流电的作用下,电枢绕组产生电枢磁场,从而产生电磁推力,推动平台运行。

(2) 定子部分: 定子铁心、励磁绕组、辅助导轨以及端座组成。在直流电的作用下,励磁绕组产生励磁磁场,从而铁心在磁场的作用下受到垂直向上的吸引力,吸引力与运动平台重力相当时,可保证电机的稳定悬浮。

2 电励磁直线电动机的数学模型

2.1 数学模型

在 $d-q$ 轴坐标系下的电压方程和磁链方程^[10-11]。电压方程:

$$\begin{aligned} u_d &= r_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \frac{\pi}{\tau} v \psi_q \\ u_q &= r_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \frac{\pi}{\tau} v \psi_d \\ u_f &= r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

其中: u_d 、 u_q 为电枢绕组 d 、 q 轴的电压分量; u_f 为励磁绕组的电压; i_d 、 i_q 为 d 、 q 轴的电流分量; i_f 为励磁绕组电流; r_s 为电枢绕组电阻, r_f 为励磁绕组电阻; v 为运动平台的运动速度, τ 为极距; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴的磁链; ψ_f 为励磁磁极磁链分量。

磁链方程:

$$\begin{aligned} \psi_d &= i_d L_{md} + i_d L_\sigma + i_f L_{mf} \\ \psi_q &= i_q L_{mq} + i_q L_\sigma \\ \psi_f &= i_f L_{mf} + i_f L_{\sigma f} + i_d L_{md} \end{aligned} \quad (2)$$

其中: L_{md} 、 L_{mq} 为直轴与交轴的主电感; L_σ 为电枢绕组漏感; $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组漏感。

由电压方程和磁链方程可将电励磁直线电动机磁悬浮系统的数学模型描述为:

磁悬浮力方程:

$$F_y = \frac{3}{2} \left[(i_d + i_f)^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] \quad (3)$$

为实现电磁推力与悬浮力控制的解耦采用 $i_d^* = 0$ 矢量控制方式^[12]。由此可得到磁悬浮力方程为:

$$F_y = \frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] \quad (4)$$

式中: $[i_q^2(\partial L_{mq}/\partial \delta)]$ 这一项为电枢绕组交轴电流对定子铁心的吸引力,其随负载变化不断变化,为便于分析,将其归类到悬浮方向扰动中。式(4)可改写为:

$$F_y = \frac{3}{2} i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} = K_1 \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 \quad (5)$$

悬浮方向的运动方程:

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_y - mg - f_y \quad (6)$$

电压方程:

$$u_f = i_f r_f + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (7)$$

式中: m 为运动平台的重量; δ 为运动平台实际悬浮的气隙高度; f_y 为不确定性扰动; K_1 是磁悬浮系数, $K_1 = 5.659 \times 10^{-6}$ 。

选取状态变量 $\xi_1 = \delta$, $\xi_2 = \dot{\delta}$, $\xi_3 = i_f$, 令 $\xi = [\xi_1 \ \xi_2 \ \xi_3]^T$, 选择输出 $y = \xi_1 = \delta$, 可以得到

$$\dot{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_2 \\ \frac{K_1 \xi_3^2}{m \xi_1^2} - g \\ \xi_3 \xi_2 - \frac{3r_f \xi_3 \xi_1}{2K_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{3\xi_1}{2K_1} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} f_y \quad (8)$$

从式(8)可看出存在状态变量之间的非线性。即电励磁直线电动机磁悬浮系统是一个典型的非线性系统,由线性化后的线性模型可得到描述系统 H_∞ 鲁棒控制的状态空间模型。

2.2 模型的线性化

磁悬浮系统的模型线性化^[13]:在系统平衡工作点对模型进行线性化,用泰勒公式在平衡点展开,忽略二阶以后的高阶项,从而得到一阶数学模型,再采用传统控制策略对其进行控制,借此取得良好的控制效果。所以本文在平衡点 (i_0, δ_0) 附近对磁悬浮系统进行线性化处理^[14]。

$$F_y(i, \delta) = F_y(i_0, \delta_0) + K_\delta \Delta \delta + K_i \Delta i \quad (9)$$

$$\Delta u = r_f \Delta i + L_i \Delta \dot{i} + L_\delta \Delta \dot{\delta} \quad (10)$$

$$m \Delta \ddot{\delta} = K_\delta \Delta \delta + K_i \Delta i + f_y \quad (11)$$

其中:

$$\begin{cases} F_y(i_0, \delta_0) = mg \\ K_\delta = \frac{-2K_1 i_0^2}{\delta_0^3} \\ K_i = \frac{-2K_1 i_0}{\delta_0^2} \\ L_i = \frac{2K_1}{3\delta_0} \\ L_\delta = -\frac{2K_1 i_0}{3\delta_0^2} \end{cases} \quad (12)$$

由式(9)~(11)可得

$$\Delta \ddot{\delta} = \frac{K_\delta}{m} \Delta \delta + \frac{K_i}{m} \Delta i + \frac{f_y}{m} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{i} = \frac{\Delta u}{L_i} - \frac{r_f \Delta i}{L_i} - \frac{L_\delta \Delta \dot{\delta}}{L_i} \quad (14)$$

$$\Delta \ddot{\delta} = \frac{r_f K_\delta}{m L_i} \Delta \delta - \frac{r_f}{L_i} \Delta \dot{\delta} + \frac{K_i}{m L_i} \Delta u + \frac{\dot{f}_y}{m} + \frac{r_f}{m L_i} f_y \quad (15)$$

令 $x_1 = \Delta \delta, x_2 = \Delta \dot{\delta}, x_3 = \Delta \ddot{\delta}, u = \Delta u$, 线性化后的悬浮状态方程为:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_\delta r_f}{m L_i} & 0 & -\frac{r_f}{L_i} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{r_f}{m L_i} \end{bmatrix} u \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{r_f}{m L_i} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_y \\ \dot{f}_y \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_i}{m L_i} \end{bmatrix} u \\ z = \begin{bmatrix} \sqrt{q_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{q_2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{q_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} x + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{\rho} \end{bmatrix} u \\ y = x \end{cases} \quad (16)$$

取 $x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T, w = [f_y \ \dot{f}_y]^T$, 可将上述状态方程简写为:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \\ z = C_1 x + D_{12} u \\ y = x \end{cases} \quad (17)$$

其中: A 、 B_1 、 B_2 矩阵分别对应于式(16)中简写之后的矩阵; y 为输出,即观测量等于系统的状态变量; z 为评价函数; C_1 和 D_{12} 为加权系数矩阵; u 为输出; w 为干扰。

3 H_∞ 鲁棒控制器的设计

由式(16)知磁悬浮系统具有不确定性的扰动。这种不确定的扰动在磁悬浮伺服系统中,将会降低磁场定向的精度,影响控制系统稳态和动态性能。为解决被控对象的不确定性扰动的问题,采用 H_∞ 鲁棒控制,所以接下来将对电励磁直线电动机进行 H_∞ 鲁棒控制器的设计。

设系统增广被控对象的状态空间描述为

$$\dot{x} = Ax + B_1 w + B_2 u \quad (18)$$

$$z = C_1 x + D_{12} u \quad (19)$$

且 $\text{rank} D_{12} = p$, (A, B_2) 可稳定。即

$$G(s) = \begin{bmatrix} A & B_1 & B_2 \\ C_1 & O & D_{12} \\ I & O & O \end{bmatrix} \quad (20)$$

由此设计悬浮系统状态反馈控制器

$$u = Kx, K \in R^{p \times n} \quad (21)$$

定理 1^[15]: 对于给定的 $\gamma > 0$, 存在状态反馈矩阵 K 使得闭环系统(20)和(21)内部稳定且

$$\|T_{zw}(s)\|_{\infty} < \gamma \quad (22)$$

成立的充分必要条件是存在正定矩阵 $X > 0$ 满足 Riccati 不等式

$$A^T X + XA + \gamma^{-2} X B_1 B_1^T X + C_1^T C_1 - (X B_2 + C_1^T D_{12}) (D_{12}^T D_{12})^{-1} (B_2^T X + D_{12}^T C_1) < 0 \quad (23)$$

如果上述不等式有正定解 $X > 0$, 则使闭环系统稳定且式(22)式成立的反馈阵由下式给出

$$K = - (D_{12}^T D_{12})^{-1} (B_2^T X + D_{12}^T C_1) \quad (24)$$

由式(16)可知增广被控对象中 A 、 B_1 、 B_2 矩阵分别为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_{\delta} r_f}{m L_i} & 0 & -\frac{r_f}{L_i} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \frac{r_f}{m L_i} & \frac{1}{m} \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_i}{m L_i} \end{bmatrix} \quad (27)$$

加权系数矩阵 C_1 和 D_{12} 为:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{q_1} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{q_2} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{q_3} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{\rho} \end{bmatrix} \quad (29)$$

式(28)和(29)中: q_1 、 q_2 、 q_3 、 ρ 为待取的加权系数。

已知励磁绕组电阻值 $r_f = 5 \Omega$, 电机动子和平台质量的总重量 $M = 10 \text{ kg}$, $K_1 = 5.659 \times 10^{-6}$, 将计算所得的控制器用于本系统的平衡工作点 $i_0 = 2.6 \text{ A}$, $\delta_0 = 0.0025 \text{ m}$ (在本文中令 $\gamma = 0.8$)。

所以由式(12)可计算得到

$$\begin{cases} A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1.6224 \times 10^6 & 0 & -3311.989 \end{bmatrix} \\ B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 331.331 & 0.1 \end{bmatrix} \\ B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -312 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (30)$$

经过反复取试, C_1 和 D_{12} 选择如下:

$$C_1 = \begin{bmatrix} \sqrt{3609603262} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt{9660} & 0 \\ 0 & 0 & \sqrt{0.12} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

$$D_{12} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \sqrt{2} \end{bmatrix} \quad (32)$$

之后利用 MATLAB 解 Riccati 不等式(23), 可得:

$$X = \begin{bmatrix} 62902 \times 10^3 & 544710 & 158.6748 \\ 544710 & 10037 & 2.9781 \\ 158.6747 & 2.9781 & 9.0806 \times 10^{-4} \end{bmatrix} \quad (33)$$

再由式(24)可以得到控制器的参数 K 如下所示:

$$K = [24753 \quad 464.5877 \quad 0.1417] \quad (34)$$

4 仿真研究

电励磁直线电动机控制系统的仿真框图如图 2 所示, 系统的位置环节是 H_{∞} 鲁棒控制器, 电流环用的是传统 PI 控制器。

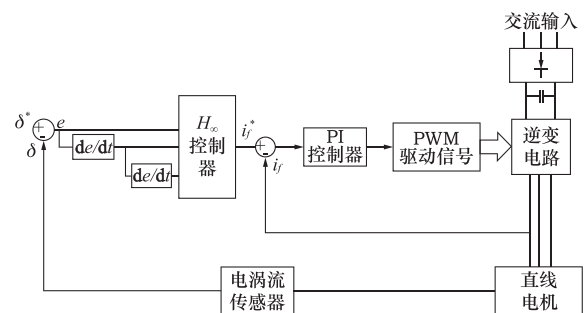


图2 EELSM磁悬浮控制系统仿真框图

EELSM 参数: 电枢电阻 $R_s = 1.2 \Omega$, 直交轴电感 $L_d = L_q = 0.01874 \text{ H}$, 直轴主电感 $L_{md} = 0.095 \text{ H}$, 极距 $\tau = 0.048 \text{ m}$, 极对数 $P_n = 3$, 电机动子以及平台质量 $M = 10 \text{ kg}$, 励磁电流 $i_f = 5.7 \text{ A}$ 。

用 Simulink 对所提的控制策略进行仿真研究,并与 PI 控制器进行对比。

(1) 电励磁直线同步电动机磁悬浮系统起动性能。

如图 3 为电动机磁悬浮系统起动时的气隙高度响应曲线。由图可以得出:磁悬浮系统采用 PI 控制时,大约 0.138 4 s 稳定在系统给定气隙高度,上升时间 t_r 约为 0.002 537 s,稳态误差 e_{ss} 约 8×10^{-7} m,没有超调;磁悬浮系统采用 H_∞ 鲁棒控制时,大约 0.072 46 s 达到稳定值,上升时间 t_r 约 0.002 535 s,没有稳态误差,没有超调。如图 4,磁悬浮系统采用 H_∞ 鲁棒控制时,励磁电流到达稳定比 PI 控制系统所需时间较短。由上述可得, H_∞ 鲁棒控制较 PI 控制系统来说,其到达稳定时间,上升时间,系统响应速度都比较快,动态性能和稳态性能都很好。

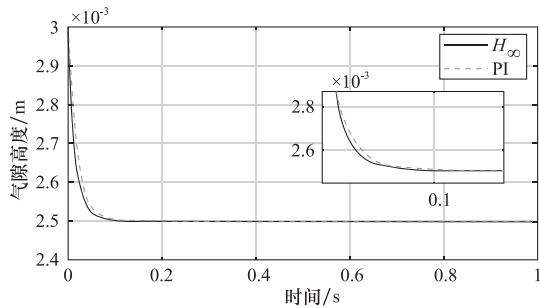


图3 起动时悬浮系统气隙高度曲线

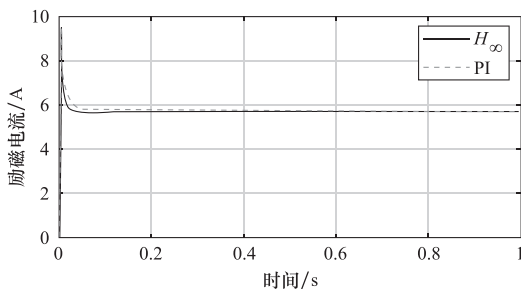


图4 起动时悬浮系统励磁电流曲线

图 5 为悬浮系统起动时高度误差曲线,从图中可以看出起动时 PI 控制的系统误差为 2.531×10^{-7} m, H_∞ 鲁棒控制的响应速度快,系统误差几乎为 0 m,可忽略不计。

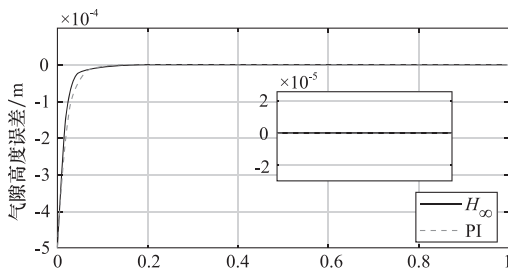


图5 起动时悬浮系统气隙高度误差曲线

(2) 电励磁直线同步电动机磁悬浮系统抗扰性

能。如图 6 和图 7,在 0.3 s 处突加 15 N 阶跃扰动,之后在 0.6 s 去掉扰动,观察其抗扰性能。

如图 6 为阶跃扰动时气隙高度曲线,从图 6 中可以观察到悬浮系统采用 PI 控制时,气隙高度动态降落较大,大约 6.0×10^{-5} m,再次恢复到给定高度时间约为 0.172 8 s;系统采用 H_∞ 鲁棒控制时,系统气隙高度降落约为 1.6×10^{-5} m,恢复到给定高度时间约 0.05 s。由此可见 H_∞ 鲁棒控制控制系统时,系统的抗扰性能更好。

图 7 为阶跃扰动时悬浮系统励磁电流曲线,由图 7 可以看出:PI 控制时,加扰动之后,系统电流恢复时间约为 0.02 s,且抖振较大; H_∞ 鲁棒控制加扰动之后系统电流恢复时间 0.003 2 s,抖振较小。通过比较两种控制方法, H_∞ 鲁棒控制抗扰性能更好。

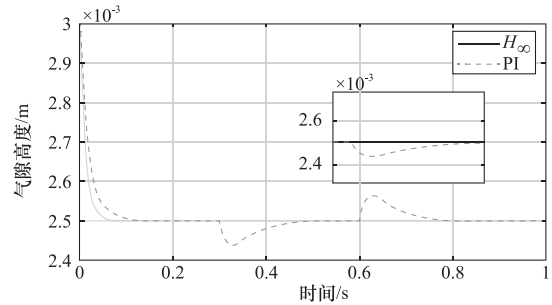


图6 加阶跃扰动时悬浮系统气隙高度曲线

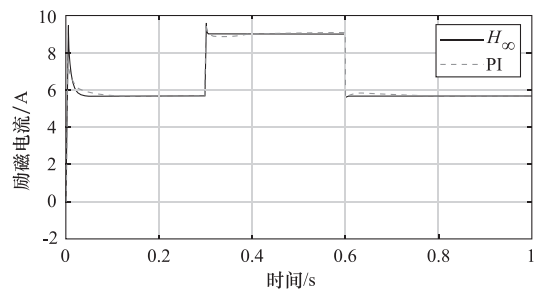


图7 加阶跃扰动时悬浮系统励磁电流曲线

(3) 电励磁直线同步电动机磁悬浮系统对端部效应的抗扰性能。用正弦函数 $f = 15\sin(20t)$ N 来模拟端部效应,在 0.3 s 处加入正弦扰动,观察系统的抗扰能力。

图 8 是悬浮系统加入正弦扰动时的气隙高度曲线。由图 8 可看出:系统采用 PI 控制在加正弦扰动后,振荡比较大,抗扰能力差;采用 H_∞ 鲁棒控制的系统没有明显的振荡,跟随性能较好,抗扰能力较 PI 控制有明显的优越性。

图 9 是悬浮系统加入正弦扰动时的气隙高度误差曲线。从图 9 中可以观察到 PI 控制的高度误差很大,且加入正弦扰动之后波动较大;而 H_∞ 鲁棒控制则气隙

高度误差很小,并且扰动之后几乎没有波动,有较好的抗扰能力。

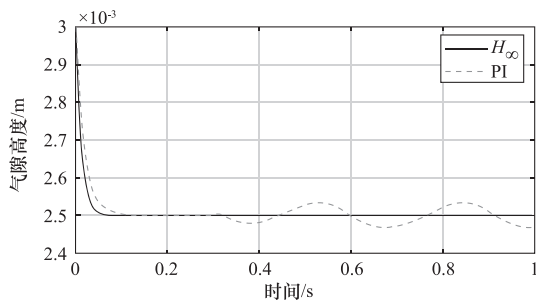


图8 加正弦扰动时悬浮系统气隙高度曲线

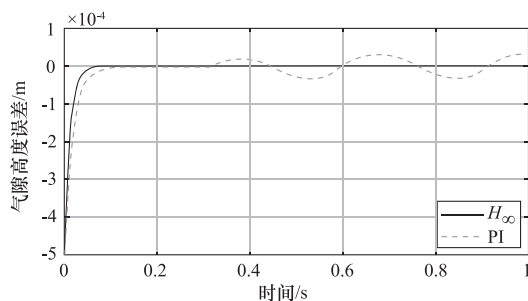


图9 加正弦扰动时悬浮系统气隙高度误差曲线

5 结语

针对电励磁直线电动机磁悬浮系统,为提高其抗扰性能,提出一种 H_∞ 鲁棒控制策略,得到结论如下:

(1)对 EELSM 的结构和悬浮系统的悬浮机理进行分析,由于电枢绕组交轴电流产生的磁场对定子铁心的吸引力是随负载的变化而变化的,具有不确定性,将其作为扰动处理之后,从而可得到含有不确定性扰动的磁悬浮力方程,进一步推导出磁悬浮系统的运动方程。

(2)针对推导所得而建立的系统状态空间方程具有非线性,采用平衡点线性化的方法进行线性化处理,得到线性状态空间方程。

(3)对磁悬浮控制系统中存在扰动的不确定性,提出用 H_∞ 鲁棒控制策略抑制系统扰动,同时仿真结果

表明 H_∞ 鲁棒控制策略使系统具有更好的抗扰效果。

参 考 文 献

- [1] 叶云岳. 直线电机在现代机床业中的应用与发展[J]. 电机技术, 2010(3): 1-5.
 - [2] 王会永, 周保华, 李向男. 直线电机的应用现状及发展趋势研究[J]. 微电机, 2016, 49(9): 86-89, 92.
 - [3] 邱书恒, 黄元峰, 艾程柳. 新型圆筒型错相式横向磁通永磁直线发电机结构及其漏磁分析与优化[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7357-7365, 7508.
 - [4] 张育增, 周睿智, 李帅. 永磁同步直线电机模糊滑模速度控制研究[J]. 电气技术, 2020, 21(12): 23-29.
 - [5] 刘欣. 电励磁直线电机磁悬浮系统距离型模糊控制策略研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
 - [6] Kim C H. Robust control of magnetic levitation systems considering disturbance force by LSM propulsion systems[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2017, 53(11): 1-5.
 - [7] 付兴建, 姚朋朋. 基于观测器的非线性系统鲁棒 H_∞ 可靠控制[J]. 兰州理工大学学报, 2018, 44(1): 80-84.
 - [8] 王凯东, 李宏浩. 基于 LMI 的永磁同步伺服电机的混合 H_2/H_∞ 鲁棒预测控制器[J]. 微电机, 2019, 52(7): 40-44.
 - [9] 王雨虹, 张威, 韩冰. 基于 LMI 的永磁同步电机鲁棒 H_∞ 自补偿滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(5): 81-90.
 - [10] Poltschak F. Bearing-less four-coil oscillatory linear motor[C]. Linear Drives for Industry Applications (LDIA), 2019: 1-5.
 - [11] 胡学成. 可控励磁直线电动机磁悬浮控制系统的研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2017.
 - [12] 李红斌, 王双喜, 张晶晶. 基于端口耗散哈密顿系统的电机控制方法[J]. 沈阳工业大学学报, 2020, 42(6): 607-612.
 - [13] 徐绍辉. 电磁永磁混合悬浮系统悬浮控制研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(电工研究所), 2006.
 - [14] 苏华. 磁浮列车悬浮控制器设计与仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2009.
 - [15] 申铁龙. H_∞ 控制理论及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- 第一作者/通讯作者: 蓝益鹏, 男, 1962年生, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机及其控制、数控技术等。E-mail: lanyipengg@163.com

(编辑 李 静)

(收稿日期: 2021-05-17)

文章编号: 20220115

如果您想发表对本文的看法, 请将文章编号填入读者意见调查表中的相应位置。