

控制与决策

Control and Decision

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

蓝益鹏, 李洁

引用本文:

蓝益鹏, 李洁. 直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制[J]. *控制与决策*, 2021, 36(3): 693–698.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0774>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[四旋翼无人机抗干扰轨迹跟踪控制](#)

Anti-interference trajectory tracking control of quadrotor UAV

控制与决策. 2021, 36(2): 379–386 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0875>

[一种改进的紧格式无模型自适应控制方法](#)

An improved compact form model free adaptive control method

控制与决策. 2021, 36(2): 436–442 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0635>

[带有输出约束的柔性关节机械臂预设性能自适应控制](#)

Prescribed performance adaptive control of flexible-joint manipulators with output constraints

控制与决策. 2021, 36(2): 387–394 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0974>

[一类非线性大系统分散自适应预设性能有限时间跟踪控制](#)

Decentralized adaptive prescribed performance finite-time tracking control for a class of large-scale nonlinear systems

控制与决策. 2020, 35(12): 3045–3052 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0623>

[考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法](#)

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制

蓝益鹏[†], 李 洁

(沈阳工业大学 电气工程学院, 沈阳 110870)

摘要: 提出一种自适应模糊滑模控制方法用以提高可控励磁直线同步电动机 (controllable excitation linear synchronous motor, CELSM) 磁悬浮控制系统的性能. 根据 CELSM 的特定结构和运行机理, 建立 CELSM 磁悬浮系统的数学模型, 包括励磁回路的电压方程、磁悬浮力方程和运动方程; 设计积分滑模面和分段趋近律, 系统状态轨迹可以根据距滑模面的距离自动切换趋近速度, 以很小的斜率穿越滑模面, 减小系统的抖振, 推导出相应的滑模控制器; 为了克服不确定性扰动对系统的影响, 设计自适应律使自适应模糊系统对不确定性扰动进行实时估计, 用该估计值进行前馈补偿控制, 减小控制律中的切换增益和系统的抖振, 进一步推导出自适应模糊滑模控制器; 用 Matlab 对控制系统进行仿真, 仿真结果表明, 采用自适应模糊滑模控制的 CELSM 磁悬浮系统的性能得到改善.

关键词: 可控励磁; 直线同步电动机; 磁悬浮系统; 自适应律; 模糊系统; 自适应模糊滑模控制

中图分类号: TM359.4

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2019.0774

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 蓝益鹏, 李洁. 直线同步电动机磁悬浮系统的自适应模糊滑模控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(3): 693-698.

Adaptive fuzzy sliding mode control for magnetic suspension system of linear synchronous motor

LAN Yi-peng[†], LI Jie

(School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

Abstract: This paper proposes a kind of adaptive fuzzy sliding mode control method to improve the performance of the magnetic suspension control system of a controllable excitation linear synchronous motor (CELSM). According to the specific structure and operation mechanism of a CELSM, the mathematical model of a CELSM magnetic suspension system is established, including the voltage equation of the excitation circuit, the magnetic suspension force equation and the motion equation. The integral sliding mode surface and the piecewise approach law are designed. The system state trajectory can automatically switch the approach speed according to the distance from the sliding mode surface, cross the sliding mode surface with a small slope to reduce the chattering of the system, and the corresponding sliding mode controller is deduced. In order to overcome the influence of uncertainty disturbance on the system, an adaptive law is designed to make the adaptive fuzzy system estimate the uncertainty disturbance in real time, and the feedforward compensation control is carried out with the estimated value to reduce the switching gain in the control law and the chattering of the system, and the adaptive fuzzy sliding mode controller is further derived. Matlab is used to simulate the control system, and the simulation results show that the performance of the CELSM magnetic suspension system with adaptive fuzzy sliding mode control is improved.

Keywords: controlled excitation; linear synchronous motor; magnetic suspension system; adaptive law; fuzzy system; adaptive fuzzy sliding mode control

0 引言

采用直线电动机驱动数控机床, 代替传统滚珠丝杠加旋转电动机的传动方式, 具有高速度和高精度的特点^[1-2]. 机床运动平台与导轨之间存在的摩擦力, 影响系统运行效率, 降低系统灵敏度, 采用 CELSM 驱动

数控机床, 能够从根本上消除摩擦对系统的影响^[3]. CELSM 磁悬浮系统是一个非线性强耦合、参数时变且极易受到扰动干扰的系统. 首先, CELSM 的磁悬浮系统与进给系统共用气隙磁场, 存在电磁耦合现象, 同时, 磁悬浮系统存在磁路饱和、磁滞和不同悬

收稿日期: 2019-06-02; 修回日期: 2019-08-26.

基金项目: 国家自然科学基金项目(51575363).

责任编辑: 冯俊娥.

[†]通讯作者. E-mail: lanyipengg@163.com.

浮高度下参数时变突出等问题,使CELSM磁悬浮系统的精准控制变得困难;其次,CELSM磁悬浮系统具有不稳定性,特别是悬浮气隙高度比较小时,悬浮平衡区域变得狭窄,难以保证控制精度;最后,由于采用了直接驱动,负载扰动等不确定扰动直接作用在CELSM上,影响系统的控制性能^[4].因此,需要选择合适的控制方法来提高系统的鲁棒性,发挥CELSM直接驱动的优势^[5].

将PI控制应用到扰动大、负载变化快的系统,存在跟随性能差、不能快速适应负载变化和抗干扰能力差的问题.采用滑模控制的系统对外界扰动不灵敏,具有良好的抗扰能力,但是切换项的存在会引起系统抖振,激发未建模动态,破坏系统的性能.基于模糊切换增益调节的滑模控制,用模糊系统估计切换增益,降低了系统的抖振.但是模糊规则选择困难并且数量有限,没有规则和参数自调整能力,当被控对象的参数随时间和环境变化时,控制质量会下降.

本文将滑模控制对外界扰动不敏感和抗干扰能力强的优点与自适应模糊系统不依赖精准的数学模型以及万能的逼近特性相结合,提出一种自适应模糊滑模控制(adaptive fuzzy sliding mode, AFSM)规律.将电枢绕组中的三相交流电流合成矢量分解成 d - q 旋转坐标系下的直轴电流和交轴电流,采用直轴电流 $i_d = 0$ 的控制方式,建立CELSM磁悬浮系统数学模型,消除磁悬浮力中的部分耦合项,降低CELSM的磁悬浮系统和进给系统之间的电磁耦合.设计分段的趋近律,根据状态轨迹离滑模面距离自动切换趋近速度,既保证收敛时间又减小抖振.设计自适应律,利用自适应模糊系统不断调整模糊规则参数对不确定性扰动进行实时估计^[6],再将估计扰动值补偿到控制器中,抵消未知扰动的影响,同时切换增益随之变小,系统抖振下降^[7-9].仿真结果表明,采用自适应模糊滑模控制的磁悬浮系统动态性能得到改善.

1 CELSM的运行机理及其数学模型

1.1 CELSM磁悬浮进给平台结构

CELSM磁悬浮进给平台结构如图1所示,主要由CELSM、电涡流传感器、光栅尺、导轨、平台基座和运动平台构成.

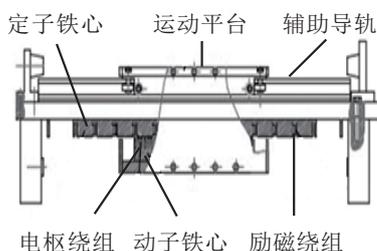


图1 CELSM磁悬浮进给平台结构

1.2 CELSM的运行机理

电枢绕组中通入三相交流电流,会在气隙中产生水平方向运动的行波磁场.励磁绕组中通入直流电流,会在气隙中产生励磁磁场.行波磁场与励磁磁场相互作用产生电磁推力,推动平台直线运动.同时,励磁磁极与转子铁心之间产生单边磁拉力,即磁悬浮力,磁悬浮力与平台重力相等时平台稳定悬浮^[10].

1.3 CELSM磁悬浮系统的数学模型

CELSM磁悬浮系统的数学模型可以描述如下.

励磁回路的电压方程为

$$u_f = r_f i_f + \frac{2K}{3\delta} i_f - \frac{2K i_f}{3\delta^2} \dot{\delta}. \quad (1)$$

其中: u_f 、 i_f 分别是励磁电压和励磁电流; r_f 是励磁绕组的电阻值; δ 是磁悬浮气隙高度; $K = 5.659 \times 10^{-6}$ 是磁悬浮系数.

磁悬浮力方程为

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

其中: L_{md} 、 L_{mq} 分别是直轴和交轴的主电感; i_q 是电枢绕组交轴电流.

在式(2)中,第2项是电枢绕组交轴电流产生的磁场对定子铁心的吸引力,随电流的变化而变化,将其作为扰动处理,得到磁悬浮力方程为

$$F_{y1} = \frac{3}{2} i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2, \quad (3)$$

其中 F_{y1} 是将 F_y 的第2项当作扰动处理的磁悬浮力.

磁悬浮系统的运动方程为

$$\begin{aligned} m \ddot{\delta} &= F_y - mg - f_y = \\ &= \frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] - mg - f_y = \\ &= F_{y1} - mg - \left(f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right) = \\ &= K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 - mg - f. \end{aligned} \quad (4)$$

其中: f_y 是端部效应和负载自身在竖直方向产生的扰动; m 是CELSM的转子及运动平台的总质量; g 是重力加速度; $\frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta}$ 是电枢绕组交轴电流 i_q 产生的磁场对定子铁心的吸引力,该吸引力是随电流 i_q 变化而变化的不确定项.将 f_y 和 $\frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta}$ 两个不确定项合并,得到竖直方向总扰动为

$$f = f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta},$$

$|f| \leq D$, D 是扰动上界且大于零的常数.

2 滑模控制器设计

2.1 切换函数设计

定义1 设磁悬浮气隙高度的参考值为 δ^* ,其实际值为 δ ,初始时刻磁悬浮气隙高度为 δ_0 ,则悬浮高度

的误差定义为

$$e = \delta^* - \delta. \tag{5}$$

磁悬浮系统中, $\delta^* = 0.0025\text{ m}$, $\delta_0 = 0.003\text{ m}$.

定义2 设 c, b 为正常数, F_0 为切换函数初值, 则系统的切换函数定义为

$$s = ce + \dot{e} + b \int_0^t e^{\frac{1}{3}} dt + F_0. \tag{6}$$

切换函数中引入气隙高度误差的积分, 可以避免系统出现稳态误差^[11]; 设置切换函数初值, 令 $s(0) = 0$, 则 $F_0 = 0.0005c$, 可以使系统状态轨迹在初始时刻位于滑模面.

2.2 趋近律设计

定义3 设 l 为切换增益, 取 $l = D + \eta, \eta > 0$, 则趋近律定义为

$$\dot{s} = -k_1 s^{\frac{1}{3}} - l \text{sat}(s). \tag{7}$$

其中

$$k_1 = \begin{cases} k_2, & |s| > \sigma; \\ \frac{k_2}{10}, & |s| \leq \sigma. \end{cases}$$

$$\text{sat}(s) = \begin{cases} \text{sign}(s), & |s| > \varphi; \\ \frac{s}{\varphi}, & |s| \leq \varphi. \end{cases}$$

k_1 是分段函数, k_2 是大于零的常数, σ 是充分小的正数; $\text{sat}(s)$ 是饱和函数, φ 是边界层厚度^[12].

分段的趋近律可以保证系统状态轨迹离滑模面远时使用大的趋近速度, 离滑模面近时使用小的趋近速度, 减小系统的抖振^[13].

2.3 滑模控制器设计

磁悬浮气隙高度误差的二阶导数为

$$\ddot{e} = g - \frac{K i_f^2}{m \delta^2}. \tag{8}$$

对式(6)求导得到切换函数的一阶导数为

$$\dot{s} = c\dot{e} + \ddot{e} + be^{\frac{1}{3}} = c\dot{e} + g - \frac{K i_f^2}{m \delta^2} + be^{\frac{1}{3}}. \tag{9}$$

根据趋近律(7)与切换函数的一阶导数(9)相等, 可得到

$$c\dot{e} + g - \frac{K i_f^2}{m \delta^2} + be^{\frac{1}{3}} + k_1 s^{\frac{1}{3}} + l \text{sat}(s) = 0, \tag{10}$$

进而推导出收敛到边界层内的控制律

$$i_f^2 = \frac{m \delta^2}{K} \left(c\dot{e} + g + be^{\frac{1}{3}} + k_1 s^{\frac{1}{3}} + \frac{l}{m} \text{sat}(s) \right). \tag{11}$$

定理1 对于含有不确定性扰动的系统(4), 选取滑模切换函数(6)和趋近律(7), 收敛到边界层内的控制律为式(11).

证明 构造 Lyapunov 函数为 $V = \frac{1}{2} s^2$, 则

$$\dot{V} = s \dot{s} =$$

$$\begin{aligned} & s \left(c\dot{e} + g + \frac{f}{m} - \frac{K i_f^2}{m \delta^2} + be^{\frac{1}{3}} \right) = \\ & s \left(c\dot{e} + g + \frac{f}{m} - c\dot{e} - g - be^{\frac{1}{3}} - \right. \\ & \left. k_1 s^{\frac{1}{3}} - \frac{l}{m} \text{sat}(s) + be^{\frac{1}{3}} \right) = \\ & s \left(\frac{f}{m} - k_1 s^{\frac{1}{3}} - \frac{l}{m} \text{sat}(s) \right) = \\ & -k_1 s^{\frac{4}{3}} + \frac{1}{m} (fs - l|s|) \leq \\ & \frac{1}{m} (f|s| - l|s|) \leq \\ & \frac{1}{m} (f|s| - (D + \eta)|s|) \leq \\ & -\frac{\eta}{m} |s| \leq 0, \quad \forall |s| > \varphi. \quad \square \end{aligned}$$

由上述证明可知, 为了保证 \dot{V} 为负定函数, 切换增益 l 需要满足条件 $l \geq \max |f|$. 因为 $|f| \leq D$, 所以通常取 $l = D + \eta, \eta$ 为大于零的常数, 即可克服扰动对系统的影响, 保证系统稳定. 切换增益是引起系统抖振的主要影响因素之一, 切换增益越大系统的抖振程度越剧烈. 如果能够逼近或估计出未知扰动, 将估计值补偿到控制器中, 则可以抵消扰动对系统的影响, 切换增益 l 只需要满足 $l \geq \max |w|$, w 为模糊逼近误差, 即可保证系统稳定、切换增益减小、抖振降低, 为此需要设计一个自适应模糊滑模控制器.

3 自适应模糊滑模控制器设计

3.1 未知扰动的自适应模糊逼近

定义4 自适应模糊系统的输入语言变量定义为

$$x_1 = e, x_2 = \dot{e}. \tag{12}$$

其中: e 的模糊论域为 $[-0.0025, +0.0025]$, \dot{e} 的模糊论域为 $[-0.05, +0.05]$.

定义5 输入语言变量的模糊集定义为 $A_j^{k_j}, j = 1, 2, k_j = 1, 2, \dots, 5$. 输入变量 e 的隶属函数为

$$\begin{aligned} \mu_{A_1^1}(e) &= \exp \left[- \left(\frac{(e + \pi/1200)}{\pi/4800} \right)^2 \right], \\ \mu_{A_1^2}(e) &= \exp \left[- \left(\frac{(e + \pi/2400)}{\pi/4800} \right)^2 \right], \\ \mu_{A_1^3}(e) &= \exp \left[- \left(\frac{e}{\pi/4800} \right)^2 \right], \\ \mu_{A_1^4}(e) &= \exp \left[- \left(\frac{(e - \pi/2400)}{\pi/4800} \right)^2 \right], \\ \mu_{A_1^5}(e) &= \exp \left[- \left(\frac{(e - \pi/1200)}{\pi/4800} \right)^2 \right]. \end{aligned}$$

输入变量 \dot{e} 的隶属函数为

$$\begin{aligned} \mu_{A_2^1}(\dot{e}) &= \exp \left[- \left(\frac{(\dot{e} + \pi/60)}{\pi/240} \right)^2 \right], \\ \mu_{A_2^2}(\dot{e}) &= \exp \left[- \left(\frac{(\dot{e} + \pi/120)}{\pi/240} \right)^2 \right], \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{A_2^3}(\dot{e}) &= \exp\left[-\left(\frac{\dot{e}}{\pi/240}\right)^2\right], \\ \mu_{A_2^4}(\dot{e}) &= \exp\left[-\left(\frac{(\dot{e} - \pi/120)}{\pi/240}\right)^2\right], \\ \mu_{A_2^5}(\dot{e}) &= \exp\left[-\left(\frac{(\dot{e} - \pi/60)}{\pi/240}\right)^2\right]. \end{aligned} \tag{19}$$

$$\dot{\theta}_f = r_1 s \phi(x), \tag{19}$$

其中 r_1 为设计参数, 且 $r_1 > 0$.

3.2 自适应模糊滑模控制器设计

定理2 对于含有不确定扰动的系统(4), 选取滑模切换函数(6)和趋近律(7), 并将自适应模糊系统对未知扰动的估计值引入控制律(11)中, 得到系统收敛至边界层的控制律为

$$i_f^2 = \frac{m\delta^2}{K} \left(c\dot{e} + g + be^{\frac{1}{3}} + \frac{1}{m}\hat{f} + k_1 s^{\frac{1}{3}} + \frac{l}{m} \text{sat}(s) \right). \tag{20}$$

定义6 模糊规则定义为

$$R^{(i)} : \text{if } x_1 \text{ is } A_1^{k_1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_2^{k_2}, \text{ then } \hat{f} \text{ is } B^{k_1 k_2}. \tag{13}$$

其中: $i = 1, 2, \dots, 25, j = 1, 2, k_j = 1, 2, \dots, 5, B^{k_1 k_2}$ 是输出的模糊集.

采用乘积推理机、单值模糊器和平均解模糊器的自适应模糊系统^[14]表示为

$$\hat{f}(x/\theta_f) = \frac{\sum_{k_1=1}^5 \sum_{k_2=1}^5 y^{k_1 k_2} \left(\prod_{j=1}^2 \mu_{A_j^{k_j}}(x_j) \right)}{\sum_{k_1=1}^5 \sum_{k_2=1}^5 \left(\prod_{j=1}^2 \mu_{A_j^{k_j}}(x_j) \right)}. \tag{14}$$

其中: $\mu_{A_j^{k_j}}(x_j)$ 是输入变量的隶属函数值; $y^{k_1 k_2}$ 是自由参数, 满足 $\mu_B(y^{k_1 k_2}) = 1$, 放入集合 $\theta_f \in R^{(25)}$ 中, 引入25维模糊基向量 $\phi(x)$, 第 $k_1 k_2$ 个元素为

$$\phi(x) = \prod_{j=1}^2 \mu_{A_j^{k_j}}(x_j) / \sum_{k_1=1}^5 \sum_{k_2=1}^5 \left(\prod_{j=1}^2 \mu_{A_j^{k_j}}(x_j) \right). \tag{15}$$

自适应模糊系统的输出式(14)变为

$$\hat{f} = \theta_f^T \phi(x), \tag{16}$$

其中 θ_f 向量的25个初值均为0.01.

定义7 自适应模糊系统的逼近误差定义为

$$w = f(x) - \theta_f^{*T} \phi(x), \tag{17}$$

其中 $|w| \leq w_N, w_N$ 是误差上界. 切换增益取 $l = w_N + \eta, \eta > 0$.

定义8 参数估计误差定义为

$$\tilde{\theta}_f = \theta_f^* - \theta_f, \tag{18}$$

其中 θ_f^* 是最优参数.

定义9 系统的自适应律定义为

证明 选取 $V = \frac{1}{2}s^2 + \frac{1}{2mr_1}\tilde{\theta}_f^T\tilde{\theta}_f$ 的Lyapunov函数, 则

$$\begin{aligned} \dot{V} &= s\dot{s} + \frac{1}{mr_1}\tilde{\theta}_f^T\dot{\tilde{\theta}}_f = \\ &= s\left(c\dot{e} + g + \frac{f}{m} - \frac{Kif^2}{m\delta^2} + be^{\frac{1}{3}}\right) - \frac{1}{mr_1}\tilde{\theta}_f^T\dot{\theta}_f = \\ &= s\left(c\dot{e} + g + \frac{f}{m} - c\dot{e} - g - be^{\frac{1}{3}} - \frac{\hat{f}}{m} - \right. \\ &\quad \left. k_1 s^{\frac{1}{3}} - \frac{l}{m}\text{sat}(s) + be^{\frac{1}{3}}\right) - \frac{1}{mr_1}\tilde{\theta}_f^T\dot{\theta}_f = \\ &= s\left(\frac{1}{m}(f - \hat{f}) - k_1 s^{\frac{1}{3}} - \frac{l}{m}\text{sat}(s)\right) - \frac{1}{mr_1}\tilde{\theta}_f^T\dot{\theta}_f = \\ &= s\left(\frac{1}{m}(\theta_f^{*T}\phi(x) + w - \theta_f^T\phi(x)) - \right. \\ &\quad \left. k_1 s^{\frac{1}{3}} - \frac{l}{m}\text{sat}(s)\right) - \frac{1}{mr_1}\tilde{\theta}_f^T\dot{\theta}_f = \\ &= \frac{w}{m}s - k_1 s^{\frac{4}{3}} - \frac{l}{m}|s| + \frac{1}{m}\tilde{\theta}_f^T\left(s\phi(x) - \frac{1}{r_1}\dot{\theta}_f\right) \leq \\ &= -k_1 s^{\frac{4}{3}} + \frac{w}{m}|s| - \frac{l}{m}|s| \leq \\ &= \frac{1}{m}(w|s| - (w_N + \eta)|s|) \leq \\ &= -\frac{\eta}{m}|s| \leq 0, \forall |s| > \varphi. \quad \square \end{aligned}$$

显然, 采用自适应模糊滑模控制的 CELSM 磁悬浮系统是稳定的.

4 仿真研究

图2是 CELSM 控制系统结构框图, 电流环采用 PI 控制器, 位置环采用自适应模糊滑模控制器.

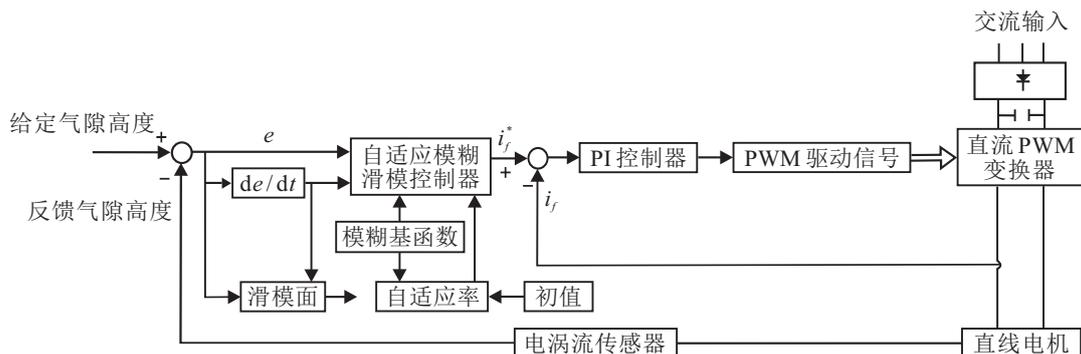


图2 CELSM控制系统结构

控制器中各个参数对系统输出影响如下: c 和 b 影响系统的响应速度、超调量和抖振程度. c 值选取大, 响应速度会下降; 选取小, 系统超调量会增大. b 值选取大, 系统抖振剧烈; 选取小, 响应速度会变慢. 综合考虑系统性能, 通过仿真实验得到 $c = 440, b = 100$. k_1 值选取大时, 系统趋近速度快, 抖振程度大; 选取小时, 抖振程度小, 趋近速度也会下降. 对 k_1 进行分段设计, 根据仿真实验得到离滑模面的距离大于 $\sigma = 0.0001 \text{ m}$ 时选取 $k_1 = k_2 = 80$, 小于 $\sigma = 0.0001 \text{ m}$ 时选取 $k_1 = k_2/10 = 8$, 可以保证系统抖振小和趋近速度快同时满足. l 是切换增益, 满足条件 $l \geq \max |w|$, 其值影响系统抖振, 根据仿真实验得到 $l = 1$. φ 为边界层厚度, 其值选取的大削弱抖振效果明显, 抗扰能力变差, 反之抗扰能力强, 抖振程度大, 仿真得到 $\varphi = 0.0005$. r_1 的取值影响 $\dot{\theta}_f$ 的大小, 进而影响自适应模糊系统的输出, 为了保证自适应模糊系统可以逼近阶跃扰动, r_1 应选择较大的值, 根据仿真实验得到 $r_1 = 6 \times 10^5$.

搭建仿真模型, 对控制算法进行仿真研究. 电流环均采用 PI 控制器, 位置环采用自适应模糊滑模控制, 与基于切换增益调节的模糊滑模控制 (FSM) 和 PI 控制方法进行比较.

1) 考察 CELSM 的起动性能. 图 3 为起动时磁悬浮气隙高度响应曲线. 采用 PI 控制的系统, 响应过程没有超调, 约 0.12 s 达到给定的磁悬浮气隙高度, 上升时间为 0.0357 s, 调节时间为 0.0506 s, 稳态误差为 $1 \times 10^{-7} \text{ m}$. 采用模糊滑模控制的系统, 响应过程无超调, 约 0.07 s 达到给定气隙高度, 上升时间为 0.0355 s, 调节时间为 0.0503 s, 无稳态误差. 采用自适应模糊滑模控制的系统, 系统响应超调约 1%, 0.04 s 达到给定的气隙高度, 上升时间为 0.0285 s, 调节时间为 0.0362 s, 无稳态误差. 综上, 自适应模糊滑模控制的上升时间、调节时间和到达给定磁悬浮气隙高度的时间明显快于另外两种控制算法, 系统响应速度最快, 具有良好的动态性能.

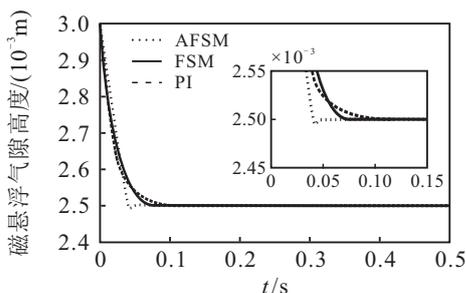


图 3 起动时磁悬浮气隙高度响应曲线

2) 考察系统对扰动的抑制能力. 系统稳定运行后, 在 0.4 s 加入 $f = 30 \text{ N}$ 的阶跃负载扰动. 图 4 是加

入阶跃扰动磁悬浮气隙高度响应曲线. 采用 PI 控制的系统在加入扰动后动态降落为 $4.5 \times 10^{-5} \text{ m}$, 恢复给定气隙高度的时间为 0.2 s. 采用模糊滑模控制的系统动态降落为 $3.5 \times 10^{-5} \text{ m}$, 恢复时间为 0.03 s. 采用自适应模糊滑模控制的系统动态降落和恢复时间均没有明显变化, 说明自适应模糊滑模控制的系统抗干扰能力强, 对外界扰动不灵敏, 且加入扰动后的稳态误差为零, 反映了系统良好的对扰动的抑制能力.

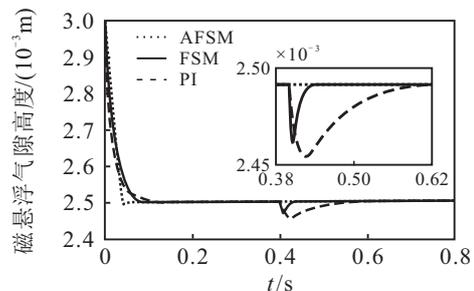


图 4 加入阶跃扰动磁悬浮气隙高度响应曲线

图 5 是阶跃扰动 f 的模糊逼近, 由图 5 可知自适应模糊系统具有较强的逼近能力, 能快速适应系统的扰动变化.

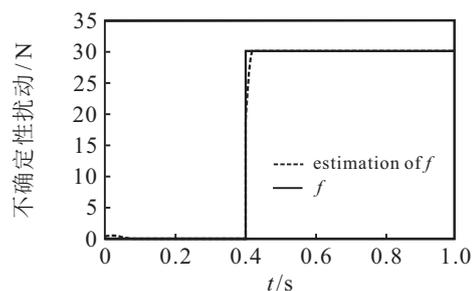


图 5 阶跃扰动 f 的模糊逼近

3) 考察系统对直线电动机特有的端部效应的抑制能力. 在 0.3 s 加入 $f = 15 \sin(20t) \text{ N}$ 的正弦扰动, 观察系统的抗扰能力. 图 6 为加入正弦扰动磁悬浮气隙高度响应曲线. 采用 PI 控制系统在加入正弦扰动后波动剧烈, 误差为 $3 \times 10^{-5} \text{ m}$, 抗干扰能力差. 采用模糊滑模控制的系统误差为 $1 \times 10^{-5} \text{ m}$, 波动程度为 PI 控制的三分之一, 抗扰能力强于 PI. 采用自适应模糊滑模控制的系统没有明显波动, 系统误差很小, 可忽略不计, 跟随性能好, 抗扰能力明显优于上述两种控制算法.

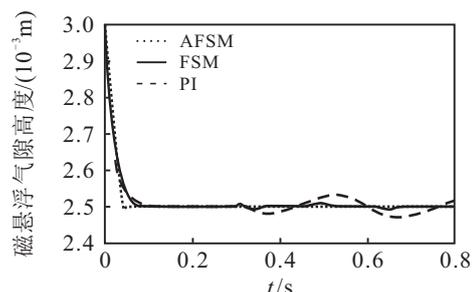


图 6 正弦扰动下磁悬浮气隙高度响应曲线

5 结论

为了提高 CELSM 磁悬浮控制系统的性能, 本文提出了一种自适应模糊滑模控制算法. 首先, 对 CELSM 的结构和运行机理进行分析, 建立了磁悬浮系统励磁回路的电压方程. 电枢绕组交轴电流产生的磁场对定子铁心的吸引力随着负载的变化而变化, 具有不确定性, 将其作为扰动处理, 从而得到含有不确定性扰动的磁悬浮力方程, 并进一步推导出磁悬浮系统的运动方程. 然后, 选取积分滑模面和分段趋近律, 设计了滑模控制器, 可以根据系统状态轨迹离滑模面的距离自动切换趋近速度, 保证系统状态变量以最快的速度减小为零, 同时削弱系统的抖振. 最后, 选取特定的自适应律, 采用自适应模糊系统对不确定扰动进行估计, 并将估计值前馈给控制器, 抵消不确定性扰动的影响, 降低了切换增益的取值范围, 削弱了抖振. 通过构造李雅普诺夫函数对所设计的自适应模糊滑模控制器进行了数学证明, 表明所设计的控制律可以使系统渐近收敛至边界层内, 仿真结果表明了自适应模糊滑模控制规律的有效性.

参考文献(References)

- [1] 宋宏智, 杨庆东, 牟冰. 数控机床直线电机负载突变控制策略研究[J]. 机械工程与自动化, 2015(4): 160-161. (Song H Z, Yang Q D, Mou B. Research on load mutation control strategy of linear motor of numerical control machine tools[J]. Mechanical Engineering and Automation, 2015(4): 160-161.)
- [2] 周颖, 何磊, 郑凤. 具有时延和数据丢失的直线电机迭代学习控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(12): 1631-1636. (Zhou Y, He L, Zheng F. Linear motor iterative learning control with delay and data loss[J]. Control Theory and Applications, 2017, 34(12): 1631-1636.)
- [3] 孙宜标, 王亚朋, 刘春芳. 永磁直线电机自适应区间二型模糊滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2017, 39(6): 601-606. (Sun Y B, Wang Y P, Liu C F. Adaptive interval type-2 fuzzy sliding mode control for permanent magnet linear motor[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2017, 39(6): 601-606.)
- [4] 夏加宽, 王成元, 李峰东, 等. 高精度数控机床用直线电机端部效应分析及神经网络补偿技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2003(8): 101-105. (Xia J K, Wang C Y, Li H D, et al. Analysis of end effects of linear motor and research on neural network compensation technology for high precision numerical control machine tools[J]. Proceedings of the CSEE, 2003(8): 101-105.)
- [5] 刘春芳, 胡雨薇. 磁悬浮平台电磁悬浮系统的模糊滑模控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2015, 37(6): 607-612. (Liu C F, Hu Y W. Fuzzy sliding mode control for electromagnetic suspension system of magnetic suspension platform[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2015, 37(6): 607-612.)
- [6] 刘云峰, 缪栋. 电液伺服系统的自适应模糊滑模控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2006(14): 140-144. (Liu Y F, Miu D. Research on adaptive fuzzy sliding mode control of electro-hydraulic servo system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006(14): 140-144.)
- [7] Wai R J, Su K H. Adaptive enhanced fuzzy sliding-mode control for electrical servo drive[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2006, 53(2): 569-580.
- [8] Wai R J. Fuzzy sliding-mode control using adaptive tuning technique[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2007, 54(1): 586-594.
- [9] Liu X D, Wu Y J, Liu B T. The research of adaptive sliding mode control for motor servo system using fuzzy upper bound on disturbances[J]. International Journal of Control, Automation, and Systems, 2012, 10(5): 1064-1069.
- [10] 蓝益鹏, 胡学成, 陈其林, 等. 可控励磁磁悬浮进给平台电磁特性的有限元分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(4): 184-189. (Lan Y P, Hu X C, Chen Q L, et al. Finite element analysis of electromagnetic characteristics of controllable excitation magnetic suspension feed platform[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(4): 184-189.)
- [11] 张强, 袁铸钢, 许德智. 基于干扰观测器的一类不确定非线性系统自适应二阶动态终端滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(2): 179-187. (Zhang Q, Yuan Z G, Xu D Z. A class of uncertain nonlinear system adaptive second order dynamic terminal sliding mode control based on disturbance observer[J]. Control Theory and Applications, 2017, 34(2): 179-187.)
- [12] 刘金琨. 滑模变结构控制 Matlab 仿真基本理论与设计方法[M]. 第3版. 北京: 清华大学出版社, 2015: 1-4. (Liu J K. Sliding mode control design and Matlab simulation the basic theory and design method[M]. 3rd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2015: 1-4.)
- [13] 方世鹏, 胡昌华, 扈晓翔, 等. 基于切换滑模控制的抖振抑制方法[J]. 控制与决策, 2017, 32(7): 1210-1216. (Fang S P, Hu C H, Hu X X, et al. Chattering suppression method based on switched sliding mode control[J]. Control and Decision, 2017, 32(7): 1210-1216.)
- [14] 邹权, 钱林方, 蒋清山. 永磁同步电机伺服系统的自适应模糊滑模控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(6): 817-822. (Zou Q, Qian L F, Jiang Q S. Adaptive fuzzy sliding mode control of permanent magnet synchronous motor servo system[J]. Control Theory & Applications, 2015, 32(6): 817-822.)

作者简介

蓝益鹏(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电机及其控制、数控技术等研究, E-mail: lanyipengg@163.com;

李洁(1995—), 女, 硕士生, 从事电机及其控制的研究, E-mail: 2225960112@qq.com.

(责任编辑: 齐 粟)