

直线同步电动机磁悬浮系统区间二型 模糊控制的研究^{*}

张萌，蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院,辽宁 沈阳 110870)

摘要: 针对可控励磁直线同步电动机(CELSM)磁悬浮系统,提出一种区间二型模糊控制策略改善系统性能。根据 CELSM 磁悬浮系统的结构特点及控制原理,建立其数学模型。设计区间二型模糊控制器实现对 CELSM 磁悬浮系统的控制,采用磁悬浮平台气隙高度的误差及其变化率作为控制器输入,用三角形隶属度函数,建立 9 条模糊控制规则进行模糊推理,最后用 Nie-Tan(NT)降阶算法得到系统输出。根据控制系统结构,在 MATLAB 软件中搭建仿真模型,经仿真验证,采用区间二型模糊控制的 CELSM 磁悬浮系统具有起动性能好、抗干扰能力强的优点。

关键词: 直线同步电动机; 磁悬浮系统; 区间二型模糊系统; 模糊控制

中图分类号: TM383 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)05-0001-07

doi: 10.12177/emca.2022.005

Research on Interval Type-2 Fuzzy Control for Magnetic Levitation System of Linear Synchronous Motor^{*}

ZHANG Meng, LAN Yipeng

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

Abstract: Aiming at the controllable excitation linear synchronous motor (CELSM) magnetic levitation system, an interval type-2 fuzzy control strategy is proposed to improve the system performance. Based on the structural characteristics and control principle of the CELSM magnetic levitation system, the mathematical model is established. The interval type-2 fuzzy controller is designed to realize the control of the CELSM magnetic levitation system. The error of the air gap height of the magnetic levitation platform and its change rate are used as the input of the controller. The membership function uses a triangular function, and nine fuzzy control rules are established for fuzzy reasoning. Finally, the Nie-Tan (NT) order reduction algorithm is used to obtain the system output. According to the control system structure, the simulation model is built in MATLAB software. Simulation results show that the CELSM magnetic levitation system with interval type-2 fuzzy control has the advantages of good starting performance and strong anti-interference ability.

Key words: linear synchronous motor; magnetic levitation system; interval type-2 fuzzy system; fuzzy control

0 引言

数控机床直线同步电动机磁悬浮驱动系统

凭借其高精度、高效率、无摩擦以及无需润滑等优点受到广泛关注^[1]。可控励磁直线同步电动机(CELSM)磁悬浮驱动系统结构简单,但

收稿日期: 2022-02-24; 收到修改稿日期: 2022-03-21

*基金项目: 国家自然科学基金项目(51575363)

作者简介: 张萌(1999—),女,硕士研究生,研究方向为电机及其控制。

蓝益鹏(1962—),男,教授,博士生导师,研究方向为电机及其控制、数控技术。

在驱动过程中,不确定的外部影响因素,比如负载扰动及直线电动机中特有的端部效应,会影响系统控制。同时其复杂的数学模型也不利于对系统实现稳定的控制。故选取合适的控制策略来改善 CELSM 磁悬浮驱动系统的性能尤为重要。

在常见的控制策略中,PI 控制器应用广泛^[2],但其对数学模型复杂的磁悬浮系统无法精准控制。鲁棒控制作为现代控制策略之一,可应用于磁悬浮系统,使得系统稳定运行^[3]。神经网络控制在处理磁悬浮系统时也具有良好的控制效果^[4]。模糊控制因无需具体数学模型、有助于解决复杂系统的非线性问题而受到欢迎^[5]。文献[6]便将模糊控制应用于磁悬浮系统中,有效地提高了系统的性能。但模糊控制规则一般源于研究人员的总结,对不同的个体不可避免地存在差异性,无法达到完善合理,故传统的模糊控制在处理非线性和外部干扰较强的复杂系统时存在局限性。为了改进传统模糊控制的不足,二型模糊集(T2FS)被提出,其隶属度为一型模糊集,这使得模糊控制在处理系统不确定问题时有了进步^[7]。随着研究对象逐渐变得复杂,二型模糊控制的计算过程也变得缓慢。为了提高运算速度,研究人员定义了区间二型模糊集(IT2FS),其次隶属度函数值恒为1。自此区间二型模糊逻辑系统得到了较快发展,不少学者将其应用于控制研究中,取得了丰硕成果^[8]。文献[9]中研究人员在研究移动机器人时,采用了区间二型模糊逻辑进行控制,研究表明,在面临扰动和参数不确定性问题时,此控制器表现优异,鲁棒性好。Huang 等^[10]在研究移动两轮倒立摆的自主运动问题时,同样构建了区间二型模糊控制器,验证表明,区间二型模糊控制能够更好地应对建模的不确定性。

综上所述,区间二型模糊控制策略适于处理具有非线性和不确定性的系统,且控制效果优异。本文依据区间二型模糊逻辑系统的构成及其运算步骤,选取合适的输入变量、规则库、推理方式、降阶解模糊算法,设计区间二型模糊控制器,用于控制 CELSM 磁悬浮驱动系统。仿真验证表明此控制器能明显提高系统的起动性能及抗干扰能力。

— 2 —

1 直线同步电动机控制原理及数学模型

1.1 CELSM 磁悬浮系统结构

直线同步电动机磁悬浮系统主要由 CELSM、运动平台、辅助导轨等部分组成,其结构如图 1 所示。其中运动平台上装有电枢绕组和动子铁心,辅助导轨及装有励磁绕组的定子铁心则安装在平台基座上。

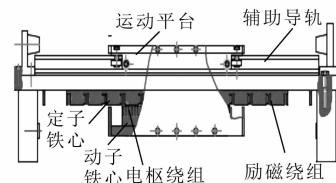


图 1 磁悬浮系统结构

1.2 CELSM 磁悬浮系统的控制原理

要实现对系统的稳定控制需要一悬浮力与平台重力平衡。因此,对电动机励磁绕组施加直流电,此时气隙中的励磁磁场与动子铁心作用,便可产生悬浮力,此力可通过调节励磁电流大小而改变。故励磁电流为直线同步电动机磁悬浮系统的主要控制对象。此外,平台沿水平方向运动,需要一水平推力。对电枢绕组施加三相交流电,产生的行波磁场与励磁磁场作用,可产生此电磁推力^[11]。

1.3 CELSM 磁悬浮系统的数学模型

为了简化系统的数学模型,假设如下条件:忽略端部效应及铁心饱和,不计铁心损耗且磁极无阻尼绕组,并以三相正弦对称交流电通入电枢绕组^[12]。可得电枢绕组在 d 、 q 轴的电压分量 u_d 、 u_q 及励磁回路的电压 u_f :

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

式中: i_d 、 i_q 为电枢绕组在 d 、 q 轴的电流分量; i_f 为励磁电流; r_s 、 r_f 为电枢绕组、励磁绕组的电阻值; τ 为极距; v 为电机运行速度; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴磁链; ψ_f 为磁极磁链分量。

各磁链的表达式为

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

式中: L_{md} 、 L_{mq} 为 d 、 q 轴主电感; L_σ 、 $L_{\sigma f}$ 为电枢绕组、励磁绕组的漏感。

采用 $i_d=0$ 的控制方式, 削弱电动机的耦合现象, 此时 i_d 对悬浮力的影响即可忽略, 得悬浮力方程:

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

式中: δ 为磁悬浮气隙高度。

式(3)中, $\frac{3}{2} i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta}$ 为定子上励磁磁极和动子铁心的吸引力, 受 i_f 影响; $\frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta}$ 受电枢电流影响, 跟随负载变化, 故可将其视为扰动项, 得:

$$F_{y1} = \frac{3}{2} i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} \quad (4)$$

电动机 d 轴电枢反应电抗为

$$X_{md} = 4\mu_0 f \frac{m(Nk_{w1})^2}{\pi p} b_E \frac{\tau}{\delta_{eff}} K_d \quad (5)$$

式中: μ_0 为真空磁导率; f 为电源供电频率; m 为动子及平台质量和; N 、 k_{w1} 分别为动子绕组每相串联匝数及基波系数; p 为极对数; b_E 为动子铁心有效宽度; K_d 为 d 轴电枢反应系数; δ_{eff} 为有效气隙,

$$\delta_{eff} = K_c \delta \quad (6)$$

式中: K_c 为卡特系数。

整理得:

$$F_{y1} = 3\mu_0 \frac{m(Nk_{w1})^2 b_E}{\pi^2 p} \frac{\tau}{K_c} K_d \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 \quad (7)$$

式中: K 为磁悬浮系数, 其取值为 5.659×10^{-6} 。

悬浮运动方程为

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 \delta}{dt^2} &= F_y - mg - f_y = \\ &\frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] - mg - f_y = \\ F_{y1} - mg - \left(f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right) &= K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 - mg - f_1 \end{aligned} \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度; f_y 为垂直方向扰动分量。

将悬浮力中的扰动项与 f_y 视为垂直方向的总扰动, 有:

$$f_1 = f_y - \frac{3}{2} i_q^2 \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \quad (9)$$

其中: $|f_1| \leq D$, D 是扰动上界且为大于零的常数。

取状态变量 $x_1 = \delta$, $x_2 = \frac{d\delta}{dt}$, 得到可控励磁直线同步电动机的状态空间方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ Ki_f^2 - g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} f_1 \quad (10)$$

2 区间二型模糊控制器的设计

2.1 区间二型模糊系统

设 \bar{A} 为论域 X 上的一个二型模糊集合, 对于 $\forall x \in X$, 有:

$$\begin{aligned} \bar{A} &= \int_{x \in X} \mu_{\bar{A}}(x)/x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u)/u \right] /x, \\ J_x &\subseteq [0, 1] \end{aligned} \quad (11)$$

$$\mu_{\bar{A}}(x) = \int_{u \in [0, 1]} f_x(u)/u, u \in J_x \subseteq [0, 1] \quad (12)$$

式中: $J_x \subseteq [0, 1]$ 为主隶属度; u 为次隶属度值。

用 $\mu_{\bar{A}}(x) = \int_{u \in [0, 1]} f_x(u)/u$ 表示次隶属度函数, 其中 $f_x(u)$ 为主隶属度值的隶属度值, 即次隶属度函数值。

当 $f_x(u) = 1$ 时, \bar{A} 为区间二型模糊集合^[13], 此时其表达式为

$$\bar{A} = \int_{x \in X} (\int_{u \in J_x} 1/u)/x, \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (13)$$

区间二型模糊集也可用图 2 表示。

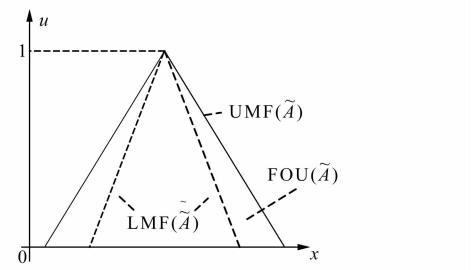


图 2 区间二型模糊集合

UMF、LMF 均为一型模糊集合, 分别定义二者为上、下隶属度函数。不确定覆盖域 FOU 为以 UMF 和 LMF 为上下边界围成的区域, 可用公式表示为

$$FOU(\tilde{A}) = U_{x \in X} J_x \quad (14)$$

$$UMF(\tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}^+(x) = FOU(\tilde{A})$$

$$LMF(\tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}^-(x) = FOU(\tilde{A}) \quad (15)$$

正是 FOU 的存在增加了区间二型模糊集合主隶属度的不确定性^[14], 使得区间二型模糊控制器在处理系统不确定性问题时多了一个自由度。

以区间二型模糊集合为基础构成的模糊系统即区间二型模糊逻辑系统。系统包括模糊器(将输入模糊化)、模糊规则库、推理机、降阶器及解模糊五个模块, 如图 3 所示。

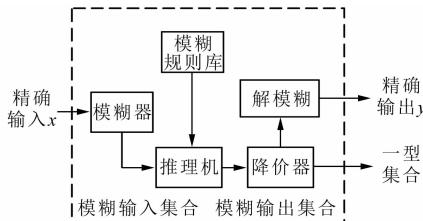


图 3 区间二型模糊逻辑系统

首先, 系统输入的精确数值需要模糊器将其转换为模糊变量输入, 模糊输入经过模糊规则库在推理机中进行模糊推理运算, 得到系统的输出。与一型模糊系统不同, 此时系统的输出为二型模糊集合, 故需要经过降阶器使输出降为一型模糊集合, 最后要得到系统精确的输出只需进行解模糊即可^[15]。

2.2 区间二型模糊器的设计

本文以区间二型模糊逻辑系统为基础设计模糊控制器。

控制器以磁悬浮平台气隙高度的误差 e 及其变化率 ec 为输入 x_1, x_2 , 控制量 y 为控制输出 u , 即:

$$\begin{cases} x_1 = e = \delta^* - \delta \\ x_2 = ec = \frac{de}{dt} \\ y = u \end{cases} \quad (16)$$

式中: δ^* 为磁悬浮系统悬浮给定高度; δ 为实际悬浮高度。

— 4 —

输入精确值 e, ec , 经过模糊器, 转换为论域范围 $[-1, 1]$ 的模糊变量 E, EC 。

为了提高控制速度, 简化模糊控制规则, 将 E, EC 均划分为三个模糊语言变量: N(负)、Z(零)、P(正)。

通过仿真, 发现应用三角形隶属度函数的控制系统, 响应速度较快且控制效果较好, 故选其为输入隶属度函数定义模糊语言变量, 如图 4 所示。图 4 中 NU、ZU、PU 分别为 N、Z、P 的上隶属度函数, NL、ZL、PL 分别为 N、Z、P 的下隶属度函数。

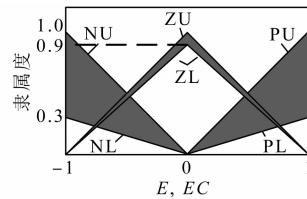


图 4 输入隶属度函数

对于输出变量, 其论域也选为 $[-1, 1]$, 并定义其语言变量为 NB(负大)、NM(负小)、Z(零)、PM(正小)、PB(正大)。为提高计算速度, 定义其为单值参数, 有: $NB = -1, NM = -0.5, Z = 0, PM = 0.5, PB = 1$ 。

在模糊控制器规则库中, 有 N 条规则的控制器, 规则形式如下:

$$R^n: \text{If } x_1 \text{ is } \tilde{X}_1^n \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{X}_2^n, \text{ then } y \text{ is } Y_n, n = 1, 2, 3, \dots, N \quad (17)$$

式中: $\tilde{X}_1^n, \tilde{X}_2^n$ 为区间二型模糊集合; Y_n 为规则后件。

由输入的 3 个模糊语言变量及研究人员总结的经验, 构建出含有 $3 \times 3 = 9$ 条模糊规则的规则库, 如表 1 所示, 即 $N=9$ 。

表 1 区间二型模糊规则库

E	N	Z	P
EC	NB	NM	Z
N	NB	NM	Z
Z	NM	Z	PM
P	Z	PM	PB

已知输入、输出变量定义参数及模糊规则后, 可进行模糊推理。

首先计算 x_1 及 x_2 在 \tilde{X}_1^n 及 \tilde{X}_2^n 上的隶属度区间:

$$\begin{cases} [\mu_{\underline{\tilde{X}_1^n}}(x_1), \mu_{\bar{\tilde{X}_1^n}}(x_1)] \\ [\mu_{\underline{\tilde{X}_2^n}}(x_2), \mu_{\bar{\tilde{X}_2^n}}(x_2)] \end{cases} \quad (18)$$

其次假设 n 条规则激发隶属度上、下限为 \bar{f}^n 、 \underline{f}^n , 采用乘积推理的方式, 得到第 n 条规则的激活度区间 $F^n(x)$:

$$\begin{aligned} F^n(x) = & \\ [\mu_{\underline{\tilde{X}_1^n}}(x_1) \times \mu_{\underline{\tilde{X}_2^n}}(x_2), \mu_{\bar{\tilde{X}_1^n}}(x_1) \times \mu_{\bar{\tilde{X}_2^n}}(x_2)] = & \\ [\underline{f}^n, \bar{f}^n] \end{aligned} \quad (19)$$

最后进行降阶处理。在进行降阶处理时, 常用的 KM 降阶法属于一种迭代算法, 计算繁琐复杂。本文选用简化的 Nie-Tan(NT) 降阶算法来进行计算^[16]: 首先计算 \bar{f}^n 与 \underline{f}^n 的平均值, 其次采用常用的集合中心法直接得到解模糊后的结果。如下:

$$\omega_n = \frac{\bar{f}^n + \underline{f}^n}{2} \quad (20)$$

$$y = \frac{\sum_{n=1}^9 \omega_n \times y_n}{\sum_{n=1}^9 \omega_n} = \frac{\sum_{n=1}^9 (\bar{f}^n + \underline{f}^n) \times y_n}{\sum_{n=1}^9 (\bar{f}^n + \underline{f}^n)} \quad (21)$$

式中: y_n 为第 n 条规则的输出。

根据以上步骤, 可得模糊控制面三维图, 如图 5 所示, 它表明了控制器输入-输出的所有信息。对于两个输入的每个可能值, 都能得到基于规则的相应输出。

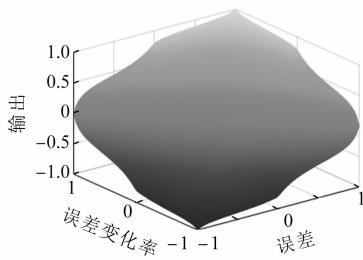


图 5 模糊控制面三维图

3 仿真研究

区间二型模糊控制系统结构如图 6 所示。系

统采用了区间二型模糊控制器作为位置环控制器, 电流内环则用 PI 控制。

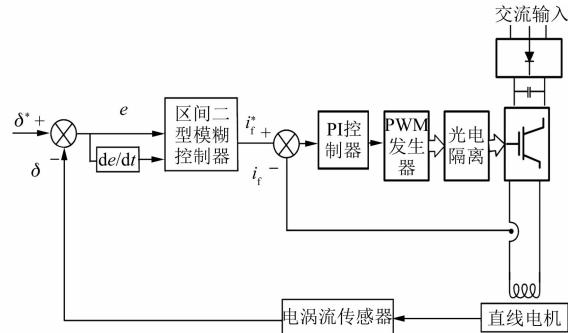


图 6 系统控制框图

区间二型模糊控制器具体结构如图 7 所示。

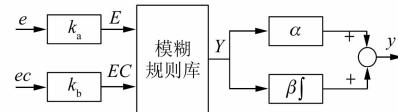


图 7 区间二型模糊控制器结构图

根据图 6 和图 7, 在 MATLAB/Simulink 中搭建模型, 分三种情况对系统进行仿真, 并与 PI 控制及一型模糊(T1F)控制的系统进行对比。

在仿真过程中, 电动机仿真参数: 电枢电阻 $R_s = 1.2 \Omega$, d, q 轴电感 $L_d = L_q = 0.01874 \text{ H}$, 极对数 $p = 3$, $i_f = 5.7 \text{ A}$, $L_{md} = 0.095 \text{ H}$, $\tau = 0.048 \text{ m}$, $m = 10 \text{ kg}$ 。

区间二型模糊控制器参数通过仿真测试, 得到最佳参数为: $k_a = 1$, $k_b = 20$, $\alpha = 60$, $\beta = 14500$ 。

以下给出系统的计算机仿真分析。待平台加工完成后再进行试验验证。

(1) 分析 CELSM 磁悬浮系统的起动性能。系统初始气隙高度 3 mm, 运行到达目标高度 2.5 mm。图 8 为磁悬浮气隙高度响应曲线。为方便描述, 以下用 IT2F 表示区间二型模糊控制。

由图 8 可知, PI 控制的系统, 约 0.242 s 到达目标高度, 调节时间较长; T1F 控制器控制的系统, 调节时间减少, 约 0.153 s 到达 2.5 mm; 而 IT2F 控制的系统, 约 0.084 s 到达目标高度, 到达稳定所需的时间最短, 响应时间比前两种控制方法分别缩短了 45.1% 和 65.3%。结果表明, 采用 IT2F 控制的系统响应时间最短, 起动性能最优越。

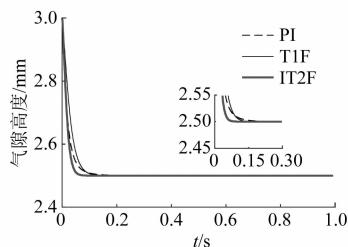


图 8 磁悬浮气隙高度响应曲线

(2) 分析 CELSM 磁悬浮系统对突加负载扰动的抑制能力:采用 $f=10 \text{ N}$ 的阶跃信号模拟负载扰动,当系统运行到 0.3 s 时加入该信号,并于 0.6 s 去除该信号。图 9 所示为加入负载扰动后的气隙高度响应曲线。

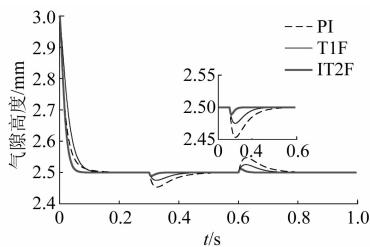


图 9 突加负载后气隙高度响应曲线

分析可知,采用 PI 控制的系统,在突加扰动后,气隙高度降落约 0.047 mm,恢复到 2.5 mm 约需要 0.243 s,系统降落幅度大,恢复时间长。采用 T1F 控制的系统,在受到负载扰动后动态降落约 0.025 mm,恢复时间约需 0.146 s,系统降落幅度减小且恢复时间变短。采用 IT2F 控制的系统,受到负载扰动的影响后,气隙高度降落约 0.011 mm,恢复到稳定约需 0.043 s,所需时间最短,受扰动影响最小,与前两者相比动态降落分别减少了 76.6% 和 56.0%,恢复时间缩短了 82.3% 和 70.5%。可见 IT2F 控制系统对外界扰动不灵敏,有着良好的抗干扰能力。

图 10 为突加负载扰动后的励磁电流响应曲线。

由图 10 可知,采用 PI 控制及 T1F 控制时,超调量分别约为 2.26% 及 1.54%,恢复时间分别约为 0.45 s 及 0.41 s;与前两者对比,IT2F 控制的系统,超调量减少,约为 1.35%,恢复时间也变短,约为 0.30 s。说明采用 IT2F 控制的系统抑制扰动能力强。

(3) 分析 CELSM 磁悬浮系统对端部效应扰

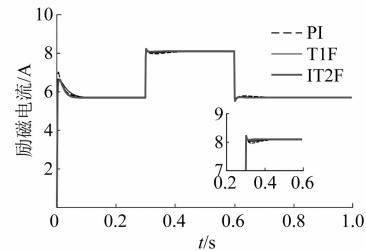


图 10 励磁电流响应曲线

动的抑制能力:采用正弦函数 $f=\sin(20t)$ 模拟端部效应扰动,在 0.3 s 加入该扰动。图 11 为其磁悬浮气隙高度响应曲线。

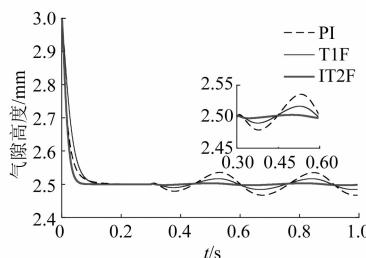


图 11 加入端部扰动后气隙高度响应曲线

由图 11 可知,PI 控制器控制的系统在面临端部效应时,气隙高度难以恒定,波动较大;T1F 控制的系统,较 PI 控制波动变小;而 IT2F 控制的系统,与前两者相比波动不明显,响应曲线平缓。由此可见,IT2F 控制器对系统所受端部效应扰动抑制能力较强。同时由以上分析可知,在加入扰动信号后,采用 IT2F 控制的系统磁悬浮气隙高度变化较小,符合 CELSM 磁悬浮系统的刚度要求。

4 结语

为了便于根据 CELSM 磁悬浮系统的结构特性进行控制,分析了其控制原理,推导了其电压及磁链方程,并令 $i_d=0$ 构建其悬浮力方程和运动方程,以确定系统的状态空间方程。

为了充分展现系统优势,提出了区间二型模糊控制策略,依据区间二型模糊系统的运算步骤,以气隙高度误差及其变化率为输入,通过 9 条模糊规则的规则库进行推理,采用 NT 算法降阶解模糊得到控制器输出,设计了模糊控制器。

为了证明控制器的有效性,在 MATLAB 软件中搭建区间二型模糊控制的系统模型,分三种情况与 PI 控制及一型模糊控制的系统进行对

比分析。结果表明,采用区间二型模糊控制的系统性能最佳,系统起动性、稳定性、抗干扰性皆占优势。

【参考文献】

- [1] 王眇,张振明,李龙,等.数控技术发展状况及在智能制造中的作用[J].航空制造技术,2021,64(10): 20.
- [2] 崔业兵,左月飞,桂亮,等.基于复合PI控制器的永磁伺服电机电流控制[J].电机与控制学报,2019,23(4): 105.
- [3] 孙凤,夏鹏涛,孙兴伟,等.可控磁路式永磁悬浮系统的鲁棒控制[J].振动与冲击,2019,38(10): 65.
- [4] 崔国栋.基于神经网络的磁悬浮控制研究[D].济宁:曲阜师范大学,2020.
- [5] 崔雅博,罗清元.自适应模糊反演算法的双关节机械手控制[J].沈阳工业大学学报,2021,43(4): 450.
- [6] 邢丰.同心式绕组磁悬浮永磁同步平面电机建模及控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
- [7] 伍冬睿,曾志刚,莫红,等.区间二型模糊集和模糊系统:综述与展望[J].自动化学报,2020,46(8): 1539.
- [8] 毛晨斐,李江荣,李琳,等.区间二型模糊不确定时滞系统的鲁棒 H_∞ 控制[J].模糊系统与数学,2021,35(5): 76.
- [9] 佃松宜,梁伟博,赵涛.基于改进 QPSO 的两轮移动机器人区间二型模糊逻辑控制[J].控制与决策,2019,34(2): 261.
- [10] HUANG J, RI M H, WU D, et al. Interval type-2 fuzzy logic modeling and control of a mobile two-wheeled inverted pendulum[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(4): 2030.
- [11] 蓝益鹏,姚婉婷,杨文康,等.数控机床直线同步电动机磁悬浮系统的神经网络直接自适应控制[J].机械工程学报,2021,57(17): 236.
- [12] WEN C, LIU J, WANG W, et al. Research on improved permanent magnet linear synchronous motor for direct-drive application[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(10): 8107007.
- [13] 赵涛岩.二型模糊系统的建模与控制[D].西安:西北工业大学,2019.
- [14] 刘帅.二型模糊集的构造、降型和区间二型推理系统性能研究[D].北京:北京理工大学,2018.
- [15] 刘职,刘宜成,邹栋,等.弓网接触力的区间二型模糊 PID 半主动控制[J].机械科学与技术,2021,40(5): 787.
- [16] 施建中,李荣,杨勇,等.基于 NT 降阶的乘积型区间二型模糊控制器结构分析[J].计算机应用研究,2019,36(4): 1055.

【期刊简介】

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于1959年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月10日出版,国内外公开发行,邮发

代号4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。