

可控励磁直线同步电机磁悬浮系统集成模糊控制的研究*

鲁煜莹, 蓝益鹏

(沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁 沈阳 110870)

摘要: 可控励磁直线同步电机磁悬浮控制系统具有非线性以及扰动不确定性的特点, 采用模糊 PID 控制具有很强的针对性, 然而, 模糊 PID 控制器为三输入单输出控制器, 其规则数太多, 使得控制器设计非常复杂。因此, 对可控励磁直线同步电机磁悬浮控制系统提出合成模糊控制。研究可控励磁直线同步电机的结构, 建立磁悬浮直线同步电机的数学模型。合成模糊控制器采用模糊 PD 控制器和模糊积分器的合成构成模糊 PID 控制器, 在减少模糊控制规则数的同时提高磁悬浮控制系统的稳态精度, 因此分别设计模糊 PD 控制器和模糊积分控制器, 包括模糊化、模糊推理、去模糊化等。在 MATLAB 中建立可控励磁直线同步电机磁悬浮控制系统的仿真模型并进行仿真研究。结果表明合成模糊控制器具有良好的控制效果, 可以减小稳态误差提高控制精度。

关键词: 可控励磁直线同步电机; 合成模糊控制; 模糊 PD 控制器; 模糊积分器

中图分类号: TM 383 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)01-0008-06

doi: 10.12177/emca.2020.163

Synthetic Fuzzy Control of the Magnetic Levitation System of Controllable Excitation Linear Synchronous Motor*

LU Yuying, LAN Yipeng

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

Abstract: The magnetic levitation system of controllable excitation linear synchronous motor has the characteristics of nonlinearity and disturbance uncertainty, and the fuzzy PID control has strong pertinence. However, the fuzzy PID controller is a three-input single-output controller with too many rules, so that the design of the controller is very complex. Therefore, a synthetic fuzzy control system for the controllable excitation linear synchronous motor is proposed. The structure of the motor is studied, and the mathematical model is established. The fuzzy PID controller is composed of fuzzy PD controller and fuzzy integral controller, which can improve the steady-state accuracy of the controlled motor and reduce the number of fuzzy control rules. The fuzzy PD controller and fuzzy integral controller are designed respectively, including fuzzification, fuzzy reasoning, deblurring and so on. The simulation model of the controlled motor is established in MATLAB. The simulation results show that the synthetic fuzzy controller has good control effect, reduces the steady-state error, and improves the control accuracy.

Key words: controllable excitation linear synchronous motor; synthetic fuzzy control; fuzzy PD controller; fuzzy integrator

收稿日期: 2020-09-16; 收到修改稿日期: 2020-10-20

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51575363)

作者简介: 鲁煜莹(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电机及其控制。

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

0 引言

直线同步电机驱动的数控机床有许多优点,其中最显著的为响应速度快和电磁推力大。但由于从电机的主轴到工作平台间所经历的中间环节无法避免地会发生形变,且在此过程中静止的导轨与运动中的机床平台不断发生摩擦,该摩擦为非线性摩擦力,有可能在直线电机低速运行时产生爬行,影响进给系统的控制精度和稳定性^[1]。

磁悬浮直线同步电机是在传统数控机床基础上的一种改良电机。该电机不仅保留了传统数控机床的优点,并且改善了传统数控机床不可避免存在的摩擦力的影响。磁悬浮直线同步电机在定子铁心中设置绕组,使运动平台悬浮于电机的轨道上,以此实现运动平台的进给无摩擦,电磁吸力可以调节悬浮高度,并随着励磁电流的强弱而改变^[2]。

在进给平台中其重要的子系统磁悬浮系统自身具有变化参数不确定性、非线性、多扰动等特点。这些特性严重影响了该系统的稳定性,因此对电机的控制难度提升。为此可以利用模糊控制的非线性特征来实现对电机更精确的控制。

已有很多学者将模糊控制器应用在永磁同步电机、直线电机、永磁磁悬浮轴承系统等领域^[3-5]。文献[3]针对磁悬浮系统高度非线性,扰动不确定和控制精度不高的问题,提出了距离性模糊控制的策略,应用于进给平台直线电机磁悬浮系统中,改善了系统性能,且提高了控制精度。文献[4]提出了改进的PID模糊控制。文献[5]提出了变论域模糊控制。

虽然PID控制结构简单易于实现,同时提高了系统的控制精度,但提高模糊控制的精度时必须对语言变量取更多的语言值,即分档越细性能越好。这就会带来规则数和计算量大大增加的缺点,从而使调试更加困难。因此,本文提出采用模糊PD控制器和模糊积分器合成模糊控制器来实现对电机的控制,在提高控制精度的同时,降低所取语言值的数量以便减少计算量^[6-7]。

1 可控励磁直线同步电机的结构与数学模型

1.1 可控励磁直线同步电机的结构

使用可控励磁直线同步电机驱动的进给平台

由基座、辅助导轨、运动平台、可控励磁直线同步电机组成。

在平台基座的下方安装定子铁心,并与辅助导轨和光栅尺组成固定平台,运动平台上安装电机的动子,平台运行时固定平台与运动平台毫无接触,定子上的励磁绕组产生悬浮力,而动子上的电枢绕组产生电磁推力^[8],如图1所示。

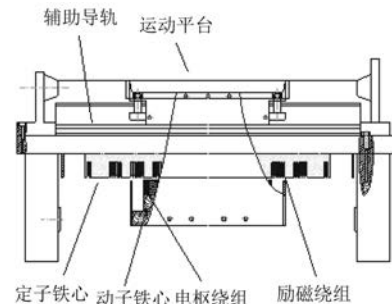


图1 磁悬浮进给平台结构示意图

可控励磁直线同步电机基座上装有缠绕着励磁绕组的定子铁心,为了保证在气隙中有恒定的励磁磁场存在,需要给励磁绕组通入直流电流,使平台稳定悬浮的条件是平台自身重力与动子铁心和励磁磁场间的悬浮力相等。悬浮力由于具有许多不确定的外部扰动,气隙长度会随着电机的运行而变化,需调节励磁电流改变悬浮高度。磁悬浮直线同步电机的动子铁心上缠绕电枢绕组,并通入对称的三相电流会在气隙中产生行波磁场,在与励磁磁场相互作用时产生使电机做直线运动的水平方向的推力^[9]。

1.2 可控励磁直线同步电机的数学模型

可控励磁直线同步电机的电压方程为

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

式中: u_d 、 u_q 为电枢绕组 d 、 q 轴端电压分量; ψ_d 、 ψ_q 为 d 、 q 轴的磁链; v 为动子运动速度; r_s 为电枢绕组电阻; i_d 、 i_q 为电枢绕组 d 、 q 轴电流分量; u_f 为励磁电压折算到定子的值; ψ_f 为磁极磁链分量; r_f 为磁极励磁绕组折算到定子的电阻; i_f 为励磁电流折算到定子的值。

可控励磁直线同步电机的磁链方程为

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

式中： L_σ 为电枢绕组漏感； L_{md} 、 L_{mq} 为 d 、 q 轴的主电感； $L_{\sigma f}$ 为励磁绕组漏感。

假设铁心磁导无限大，气隙磁通只需考虑基波分量，齿槽效应用卡特系数考虑， d 、 q 轴主电感的值近似与气隙长度成反比。

在可控励磁直线同步电机上有一个水平方向作用的力，是由励磁磁场和电枢磁场相互作用产生的，电机悬浮平台的水平方向运动方程和水平推力为

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau} [\psi_d i_q - \psi_q i_d] \quad (3)$$

$$m \frac{dv}{dt} = F_x - F_L \quad (4)$$

$$v = 2f\tau \quad (5)$$

式中： F_x 为电机的推力； m 为动子及负载质量； F_L 为负载的阻力； f 为电源供电频率。

可控励磁直线同步电机驱动的运动平台，其中励磁磁场对动子铁心作用的力为悬浮力，垂直方向的运动方程和垂直方向的悬浮力为

$$F_y = \frac{3}{2} \left[(i_d + i_f) \frac{\partial \psi_d}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial \psi_q}{\partial \delta} \right] \quad (6)$$

$$m \frac{d^2 \delta}{dt^2} = F_y - mg - f_y = K \left(\frac{i_f}{\delta} \right)^2 - mg - f_y \quad (7)$$

式中： F_y 为悬浮力； δ 为动子实际气隙长度； f_y 为垂直方向的扰动分量。

由于同一个气隙内的磁场影响着可控励磁直线同步电机的悬浮和水平推进系统，2 个系统的变量调节时相互影响，在进给过程中电机的悬浮和推进系统存在耦合现象，影响可控励磁直线同步电机的运行平稳性和悬浮高度定位精度，因此进行解耦来改善^[10]。在对系统进行悬浮力和电磁推力的解析计算以及有限元分析时，气隙磁场主要是由励磁磁场产生的，因此电枢电流产生的磁场对悬浮力产生的作用有限，可以不考虑其耦合作用。

磁悬浮系统存在耦合现象，负载扰动、端部扰动和不确定扰动会直接作用磁悬浮系统，影响系

统性能。采用 $i_d = 0$ 的控制方式最大程度减少了对磁悬浮系统的影响，悬浮力主要部分来自电机磁极的电磁铁与动子铁心之间的相互作用力，其中有励磁磁场对动子铁心的吸引力、电枢磁场在垂直方向对定子铁心的吸引力、电枢磁场和励磁磁场相互作用产生的垂直方向的力。为了降低控制复杂度，可控制的悬浮力只考虑励磁磁场和动子铁心的吸引力，而悬浮力的其它部分作为悬浮系统的扰动，悬浮力计算式和悬浮系统运动方程如下。

当 $i_d = 0$ 时，可控励磁直线同步电机的垂直方向的悬浮力和水平推力可简化为

$$F_y = \frac{3}{2} \left[i_f^2 \frac{\partial L_{md}}{\partial \delta} + i_q \frac{\partial L_{mq}}{\partial \delta} \right] \quad (8)$$

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau} \psi_d i_q \quad (9)$$

综上，令 $x_1 = \delta$ ， $x_2 = \frac{d\delta}{dt}$ ， $x_3 = i_f$ 时，磁悬浮系统的状态方程：

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ \frac{Kx_3^2}{mx_1^2} - g \\ x_3 x_2 - \frac{3R_f x_3 x_1}{2K} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{3x_1}{2K} \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{1}{m} \\ 0 \end{bmatrix} f \quad (10)$$

式中： K 为磁悬浮系数， $K = 5.659 \times 10^{-6}$ 。

2 合成模糊控制器的设计

在模糊控制中选取的语言值数量越多，模糊控制系统的跟踪性能和精度越好，但同时会增加规则数和计算量，导致控制器的实时性难以满足要求。为此，采用将模糊 PD 控制器和模糊积分器合成的方式，来实现对磁悬浮直线同步电机的控制，在既减小规则数与计算量的同时又能达到提高控制精度的目的。

采用合成模糊控制器控制运动平台的悬浮高度。合成模糊控制器中，模糊 PD 控制器的控制算法原理图^[11-12]如图 2 所示。

将模糊 PD 控制器应用于可控励磁直线同步电机的模型中，以可控励磁直线同步电机运动平台的悬浮高度为控制对象，设 e 及 ec 作为输入量，其中 e 为磁悬浮直线同步电机运动平台悬浮

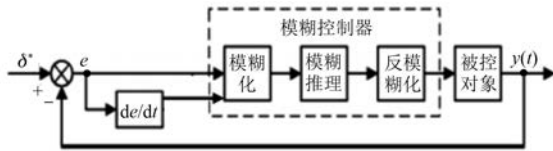


图2 模糊控制器原理图

的高度误差, ec 为其误差变化率, 输出量为控制变量 u , 有^[13]:

$$e = \delta^* - \delta \quad (11)$$

式中: δ^* 为电机运动平台悬浮高度给定值; δ 为电机运动平台实际悬浮高度台。

对误差的变化率 ec 、误差 e 以及控制变量 u , 设定的模糊集与该模糊集的论域: 误差变化率、误差和控制变量的模糊集全部建立为 $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, 以及其论域皆为 $[-6, 6]$ 。 e 、 ec 和 u 在其论域上建立的隶属度函数采用等腰三角形函数曲线分布, 并且其函数曲线分布均相等, 如图3~图5所示。

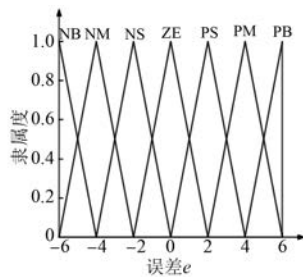


图3 误差 e 的隶属度函数

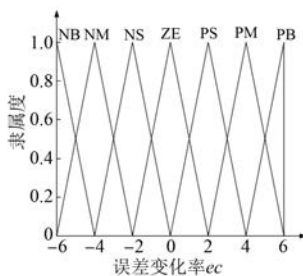


图4 误差变化率 ec 的隶属度函数

合成模糊控制器是由模糊 PD 控制器和模糊积分器共同控制, 形成了新的模糊 PID 控制器。在合成控制器中模糊积分器是由单输入单输出规则库来控制的, 而模糊 PD 控制器是二输入单输出, 模糊 PD 控制器和模糊积分器规则库的输出分别为当前控制值 U 和控制增量 ΔU ^[14]。如果误

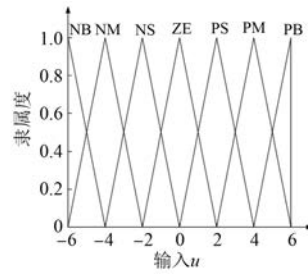


图5 输入 u 的隶属度函数

差只对模糊积分器的输出量有影响, 规定该模糊积分器的规则: If e is E^r , then du is ΔU^r ($r = 1, 2, \dots, N$)

模糊 PD 控制器的规则库如表1所示。

表1 模糊控制规则库

u	ec						
	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NM	NM	NS	ZE	PS	PM
e	ZE	NB	NS	NS	ZE	PS	PM
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PM	PB	PB	PB

已知输入和输出语言变量的语言值均相同, 如表2所示。

表2 隶属度函数值

u	ec						
	-6	-4	-2	0	2	4	6
PB	-0.75	-0.72	-0.65	-0.58	-0.38	-0.31	-0.12
PM	-0.63	-0.62	-0.50	-0.37	-0.35	-0.04	0.21
PS	-0.12	-0.06	0.07	0.25	0.51	0.62	0.85
e	ZE	0.65	0.82	0.37	1.02	0.37	1.26
NS	1.10	1.29	1.39	1.43	1.52	1.57	1.67
NM	1.32	1.40	1.46	1.49	1.55	1.62	1.71
NB	1.49	0.52	0.49	1.53	1.59	1.72	1.78

对于一个二维的控制器规则库, 在输入7个语言值时一共有49条规则, 如果要在条件下实现传统的模糊PID规则库, 那么此时需要的规则数大大增加。由此设计了模糊PD控制器和模糊

积分器的合成模糊控制方法,并且建立模糊积分器的规则库,其输出增益 ΔU 的规则库如表 3 所示。

表 3 模糊输出增益 ΔU 的规则库

E	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
ΔU	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB

模糊逻辑推理的算法采用 Mamdani 算法,该模糊推理算法蕴涵关系有: If e is A , then u is C 。模糊判决有许多不同的方法,其中重心法因为计算比较复杂,所以在实时性较高的系统中不采

用^[15-16]。最大隶属度方法是最为简单的但代表性不强,因此将模糊输出量转化为控制器所需的具体控制量,采用加权平均模糊输出:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^7 uk_i}{\sum_{i=1}^7 k_i} \quad (12)$$

3 仿真研究

为了验证模糊 PD 控制器和模糊积分器合成模糊控制器方法的有效性,用 MATLAB 进行仿真分析。可控励磁直线同步电机原理框图如图 6 所示^[17]。

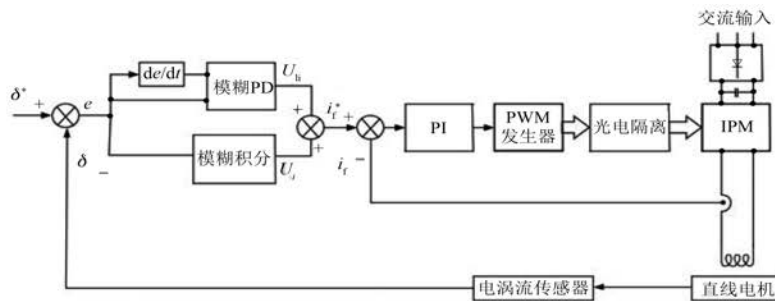


图 6 模糊 PD 和模糊积分合成模糊控制的原理框图

在 MATLAB 仿真中分别采用 PI 控制器和合成模糊控制器来控制电流环和位置环,将本文所采用的模糊 PD 控制器和模糊积分器合成模糊控制器,并与传统模糊 PID 控制器相比较。图 7 为空载时的悬浮高度响应曲线。在空载启动时,悬浮系统迅速由现有高度达到规定的气隙悬浮高度。

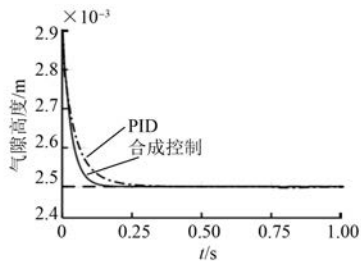


图 7 空载时悬浮高度响应曲线

由图 7 可知,在无扰动的前提下模糊 PID 控制器在 0.4 s 时到达规定的悬浮高度,而模糊 PD 控制器和模糊积分器合成模糊控制器在 0.23 s 时到达规定的悬浮高度,由此可见合成模糊控制器更快到达规定的悬浮高度响应速度更快。

给可控励磁磁悬浮直线同步电机施加一个悬浮高度信号 2.5 mm,系统达到稳定后,在 0.3 s 时对系统突加一个 20 N 的外界扰动,并在 0.6 s 时去掉扰动,结果如图 8、图 9 所示。

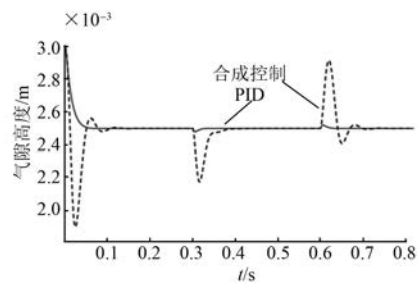


图 8 突加负载时悬浮高度响应曲线

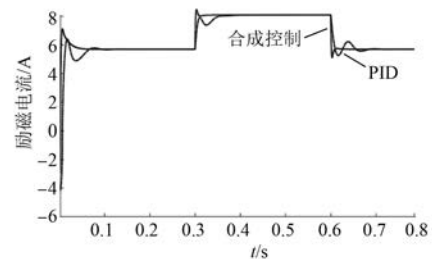


图 9 突加负载时励磁电流响应曲线

图 8 显示了分别在合成模糊控制器和常规 PID 控制下的平台悬浮高度响应曲线。在 PID 控制下的悬浮系统调节时间为 0.8 s, 气隙的悬浮高度波动为 3.5×10^{-5} m; 而在合成模糊控制器控制下系统调节时间为 0.015 s, 且气隙的悬浮高度仅波动了 1.5×10^{-5} m, 由此可见合成模糊控制器控制时调节位置高度时间短, 性能更好且更平稳。

图 9 为突加负载时的励磁电流响应曲线, 显示了分别在合成模糊控制器和 PID 控制器控制下突加负载时的励磁电流响应曲线。在合成模糊控制器控制下, 恢复时间为 0.09 s, 且电流波动为 1 A, 可以更快地抑制扰动; 而 PID 控制恢复时间需要 0.15 s, 且电流波动为 1.9 A。由此可见, 合成模糊控制比 PID 控制下的系统电流恢复时间更短且电流波动更小。

4 结 语

对磁悬浮直线同步电机进行建模, 设计模糊 PD 控制器和模糊积分器合成模糊控制器, 对可控励磁磁悬浮直线同步电机的磁悬浮平台的悬浮高度进行控制, 该系统动态响应快跟踪性能好且精度高。在系统出现扰动时, 合成模糊控制器可以快速消除扰动, 具有良好的抑制外界扰动的能力。此外, 该模糊控制算法也减少了规则个数和计算量, 采用离线计算, 在线查表的方法可以满足对系统实时控制的要求。

【参 考 文 献】

- [1] 秦伟, 范瑜, 李硕, 等. 电磁电动式磁悬浮装置的磁场分析和力特性研究[J]. 电机与控制学报, 2012, 16(1): 67.
- [2] 瞿田华. 磁悬浮运动平台控制系统设计与控制方法研究[D]. 长沙: 中南大学, 2012.
- [3] 蓝益鹏, 刘欣. 进给平台直线电动机磁悬浮系统控制策略的研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(8): 105.
- [4] 谢磊, 聂洪平, 何莹. 改进型 PID 控制永磁偏置磁悬浮轴承[J]. 微特电机, 2017, 45(2): 23.
- [5] 蓝益鹏, 高旭峰. 磁悬浮直线同步电动机励磁系统变论域模糊控制的研究[J]. 电工技术, 2019(1): 11.
- [6] 张佳楫. 五自由度磁悬浮平面电机控制技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2012.
- [7] 王杰, 吴强. 锅炉烟气含氧量的混合 Fuzzy-PI+PD 控制[J]. 锅炉技术, 2009, 40(6): 24.
- [8] ZHETPISSOV Y, KAIBALDIYEV A, DO T D. PI anti-windup speed control of permanent magnet synchronous motor based on feedforward compensation [C]//2018 ELEKTRO, 2018.
- [9] 郝双晖, 唐梓力, 郝明晖, 等. 高速电机高精度伺服控制[J]. 天津大学学报, 2010, 43(5): 411.
- [10] 唐勇斌. 精密运动平台用永磁直线同步电机的磁场分析与电磁力研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [11] XI J S, DONG Z G, DING Y, et al. An adaptive 2DoF P-PI controller based on an improved just-in-time learning technique for ultra-low-velocity linear stages driven by PMLSMs [J]. Precision Engineering 2018, 52: 392.
- [12] 令朝霞. 复合模糊 PID 在温度控制滞后控制系统中的应用[J]. 机械工程与自动化, 2012(4): 160.
- [13] 智淑亚, 吴洪兵. 数控进给伺服系统摩擦补偿控制仿真[J]. 沈阳工业大学学报, 2019, 41(4): 361.
- [14] 贾宝柱, 曹辉, 马捷, 等. 模糊 PD 与 PI 控制切换的航线跟踪算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(5): 562.
- [15] 姚发闪, 张涛, 潘海迪, 等. 模糊 PID 和变频器在导热油温度控制中的应用[J]. 自动化与仪表, 2013, 28(5): 36.
- [16] TRAPANESE M. A model of a linear synchronous motor based on distribution theory [J]. Journal of Applied Physics, 2012, 111(7): 07E731.
- [17] 周妮娜. 一种新的双模糊控制器的设计[J]. 科学技术与工程, 2011, 11(2): 352.

扫码关注
《电机与控制应用》
微信公众号

