

电磁型混合磁极直接自适应模糊悬浮控制方案的研究

徐正国, 徐绍辉, 史黎明, 金能强

(中国科学院电工研究所, 北京市海淀区 100080)

STUDY ON DIRECT FUZZY ADAPTIVE CONTROL FOR HYBRID MAGNETS USED ON EMS MAGLEV SYSTEMS

XU Zheng-guo, XU Shao-hui, SHI Li-ming, JIN Neng-qiang

(Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The levitation system of an EMS maglev train is a typical open loop unstable, nonlinear and time-varying system. This paper gives the design method of a direct fuzzy adaptive controller on the base of analysis of the mathematic model of the system. In order to make the adaptive procedure faster while the air gap length varies, a revised adaptive law containing more expert experiences is adopted in this paper. Results of computer simulation and experiments show the feasibility of the given control strategy.

KEY WORDS: EMS(Electromagnetic suspension); Hybrid magnet; Maglev; Linear motor; Direct fuzzy adaptive control; Fuzzy control

摘要: 电磁型电磁永磁混合悬浮磁悬浮列车的悬浮系统是一个开环不稳定、强非线性时变系统。该文在分析了混合悬浮系统的工作原理的基础上,给出了一种电磁型磁悬浮系统直接自适应模糊控制器的设计方法。为了使控制算法在气隙变化的情况下能更快地收敛,提出了一种新的复合自适应算法。该算法能更加充分利用已有的先验知识,从而使系统的动态响应速度更快,跟踪误差更小。计算机仿真和实验结果都验证了理论分析的正确性。

关键词: 电磁型; 混合磁极; 磁悬浮; 直线电机; 直接自适应模糊控制器; 模糊控制

1 引言

2002年世界上第一条商业化运营的磁悬浮示范线在上海投入运行。上海磁悬浮示范线采用了德国的TRANSRAPID磁悬浮系统,是电磁型(Electromagnetic Suspension, EMS)磁悬浮的典型代表。与电动型(Electrodynamical Suspension, EDS)^[1]磁悬浮系

统不同,传统的电磁型悬浮系统悬浮功耗较大和悬浮气隙较小的特点使得悬浮系统的结构复杂、轨道梁的加工精度要求高,这也是传统的电磁型磁悬浮系统造价高昂的原因之一。基于这个原因,人们提出了电磁永磁混合悬浮的方案^[2-4]。这种方案借助于永磁体来产生大部分的悬浮力,从而可以大大减少悬浮系统的功耗,显著降低车载电源的容量;并且可以使悬浮气隙适当增加,从而使系统更安全,造价也有相应的降低。另一方面,由于模糊自适应算法在解决非线性和慢时变系统的控制问题时具有良好的鲁棒性和动静态性能,因此在应用领域得到了越来越多的关注^[5-7]。本文在分析混合悬浮系统数学模型的基础上,给出了悬浮系统直接自适应模糊控制器的设计方法,并在此基础上提出了一种能更充分地利用先验知识的自适应算法,它使自适应过程收敛更快。

2 电磁型混和磁极的数学模型

一般而言,由于小车车体的刚性,安装在一个磁悬浮小车模型四角的4个磁极的运动之间存在耦合,整个系统为一个多输入多输出(MIMO)耦合系统。深入研究表明,当小车车体的长度与宽度的比值较大时,磁极之间的运动耦合比较弱,可以忽略耦合效应的影响,从而将各个磁极分开单独控制。忽略制造工艺上的差别可以认为4个磁极具有相同的几何结构,在下面的分析中只考虑其中的1个磁极,其余的3个磁极的分析方法与之相同。

磁悬浮系统定、转子之间的实际电磁关系是极

其复杂的^[8], 为了抓住主要矛盾, 在进行系统数学模型分析之前首先做如下假设:

(1) 不考虑直线电机定子绕组对悬浮磁极的法向力。

(2) 忽略漏磁。

(3) 忽略铁心和导轨磁路的磁阻。

单磁极磁悬浮系统的简化结构图如图1所示。

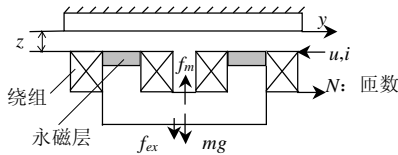


图1 单磁极磁悬浮系统的简化结构

Fig. 1 A simplified structure of a single hybrid magnet

根据基本电磁学原理和上述3点假设可得^[9]

$$B = \mu_0 \frac{Ni_e}{2z_e} \quad (1)$$

$$z_e = z + \mu_0 H_c h_m / B_r \quad (2)$$

$$i_e = i + 2h_m H_c / N \quad (3)$$

式中 i_e 为将混合磁极等效为纯电励磁磁极时的等效励磁电流; z_e 为等效气隙长度; i 为混合磁极实际的励磁电流的大小; z 为实际的机械气隙的大小; μ_0 为真空磁导率; N 为磁极的线圈匝数; H_c 为永磁体的剩余矫顽力; B_r 为永磁体的剩磁; h_m 为永磁层的厚度。

轨道对一个磁极的吸引力大小为

$$f_m = \frac{B^2 S}{\mu_0} = \frac{\mu_0 N^2 S}{4} \left(\frac{i_e}{z_e}\right)^2 \quad (4)$$

式中 S 为一个磁极的极面积。

系统的运动学方程和力学方程为

$$\begin{cases} u(t) = Ri + N\dot{F} \\ m\ddot{z}(t) = -f_m + mg \end{cases} \quad (5)$$

其中, F 为气隙磁通; m 为磁极质量; g 为重力加速度 ($g=9.8\text{m/s}^2$)。由式(5)可知, 即便经过了很大程度的简化, 系统仍然是一个强非线性的系统, 并且是一个正反馈的开环不稳定系统, 要使系统稳定必须采用反馈校正的办法。

3 电磁型悬浮系统控制方案研究现状

电磁型磁悬浮系统的控制方案大体分为两类, 即线性控制和非线性控制两类。线性控制以悬浮系统在工作点处的线性化模型为基础, 以PID控制^[10]和状态反馈控制^[11]为代表。非线性控制包括模糊控制^[12]、滑模变结构控制^[13]等。由于磁悬浮系统具有

时变和强非线性的特征, 综合考察目前的研究成果可以发现, 非线性控制方案在系统的鲁棒性和动、静态特性方面都具有天然的优势, 因此非线性控制已经成为磁悬浮控制领域的主流研究方向。文献[12]所提出的模糊控制方案综合了线性控制和模糊控制的优点, 但是控制参数的整定仍然是以系统在工作点处的特性来进行的, 尤其是控制器中线性部分的设计。因此, 对于系统参数(如悬浮质量和悬浮气隙)经常大范围变化的电磁型磁悬浮系统来说, 文献[12]所提出的模糊控制方案仍有改进的余地。同样的问题对于文献[13]也存在, 而且滑模变结构控制中如何确定滑模切换面也是一个比较困难的问题。

4 电磁型悬浮系统模糊自适应控制

设实际的悬浮系统可用如下式子来描述

$$\begin{cases} \dot{z} = f(z, \dot{z}, \ddot{z}) + bu \\ y = z \end{cases} \quad (6)$$

其中, f 为不确知的连续函数; b 为未知常数; z 为悬浮气隙, 其状态向量取为 $\mathbf{z} = (z, \dot{z}, \ddot{z})^T$, 且所有状态变量均可测, 输出隶属度函数的中心值向量为 $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_7)^T$ 。控制任务为求出一个反馈控制 $u = u(\mathbf{z}|\mathbf{q})$ 和参数向量 \mathbf{q} 的自适应律, 使得

(1) 在所有变量 $\mathbf{z}(t)$ 、 $\mathbf{q}(t)$ 和 $u(\mathbf{z}|\mathbf{q})$ 一致有界的意义上, 闭环系统一定具有全局稳定性。即对于所有的 $t \geq 0$, 都有 $\|\mathbf{z}(t)\| \leq M_x < +\infty$, $\|\mathbf{q}(t)\| \leq M_q < +\infty$ 以及 $\|u(\mathbf{z}|\mathbf{q})\| \leq M_u < +\infty$ 成立, 其中, M_x 、 M_q 和 M_u 为设计参数。

(2) 在满足约束(1)的情况下跟踪误差 $e = y_r - y$ 尽可能小。

定义跟踪误差和跟踪误差多项式分别为

$$\begin{cases} \mathbf{e} = (e, \dot{e}, \ddot{e}) \\ \mathbf{S} = \mathbf{c}^T \mathbf{e} \end{cases}$$

其中, 向量 $\mathbf{c} = (c_1, c_2, 1)^T$, 其取值选择应满足多项式 $h(p) = p^2 + c_2 p + c_1 = 0$ 的所有根均位于左半开平面内。定义状态与边界层的距离为

$$S_\Delta = S - j \text{sat}(S/j)$$

其中, j 为边界层的厚度^[10]。

设闭环系统的控制电压为

$$u = u_{fc}(\mathbf{z}|\mathbf{q}) + k_c u_c \quad (7)$$

公式(6)中等号右面第一项 $u_{fc}(\mathbf{z}|\mathbf{q})$ 为模糊逼近控制电压, 其值取为下面的模糊逻辑系统

$$u_{fc}(\mathbf{z}|\mathbf{q}) = \sum_{l=1}^M q_l x_l(\mathbf{z}) = \mathbf{q}^T \mathbf{x}(\mathbf{z}) \quad (8)$$

其中, $\mathbf{q} = (q_1, \dots, q_M)^T$; $\mathbf{x}(\mathbf{z}) = (x_1(\mathbf{z}), \dots, x_7(\mathbf{z}))^T$,

$x_1(z) \sim x_7(z)$ 为模糊基函数。

式(7)中等号右面第二项为补偿控制分量， 为补偿控制电压， 其值规定为

$$u_c = \text{sgn } S(|S| > j)$$

$$u_c = \dot{S} + I_d S(|S| \leq j)$$

其中， k_c 为补偿控制增益， 其值由两部分构成， 即

$$k_c = w + K_d \tag{9}$$

其中， w 称为逼近误差控制增益； K_d 为外界干扰抑制增益， 且

$$\dot{w} = h_2 |S| \tag{10}$$

$$K_d = D/b_l \tag{11}$$

其中， $h_2 \geq 0$ 为 w 的学习律； D 为外扰的上界， b_l 为原系统的控制增益的下界， 即 $0 < b_l < b$ 。

取参数 q 的自适应律为

$$\dot{q} = h \cdot S_\Delta \cdot x(z) \tag{12}$$

可以证明^[14]， 非线性系统(6)的控制器采用式(7)， 其中模糊逼近控制器采用式(8)， 相应参数自适应律采用式(12)， 逼近误差控制增益的自适应律采用式(10)， 外界干扰抑制增益采用式(11)， 则闭环系统的状态 z 和控制电压 u 有界， 并且跟踪误差收敛于零的邻域内。

依据上述理论分析结果可以得到电磁型磁悬浮系统的直接自适应模糊控制方案的总框图如图 2 所示。

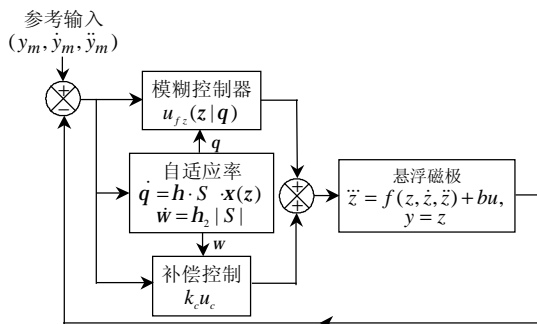


图 2 直接自适应模糊控制方案总框图

Fig.2 The overall scheme of direct fuzzy adaptive control

整个控制系统的核心为由式(8)所描述的模糊控制器。该三维模糊控制器的输入分别为悬浮气隙误差、速度和加速度信号。考虑到工程实际应用要求控制系统可靠性高、实时性好以及调试方便的原则，采用模糊在线推理，并且每个输入信号只包含正 (P)、负 (N) 和零 (Z) 共 3 个模糊集；每一条规则的后件对应一个输出电压的模糊集，因此输出电压一共有 7 个模糊集，并且模糊集个数与规则数相同。所有隶属度函数均为三角形或梯形，如图 3

所示，图 3 (a)、图 3(b)和图 3(c)分别为气隙误差、速度和加速度输入的隶属度函数，图 3(d)为输出电压的初始隶属度函数。

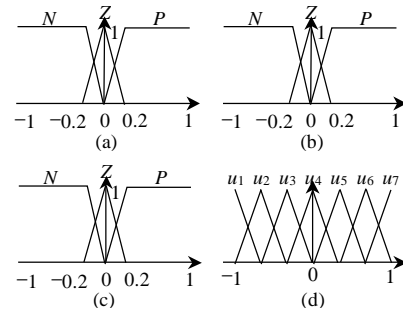


图 3 输入输出的隶属度函数

Fig. 3 Input and output membership functions

模糊控制器采用单点模糊化、和积模糊推理与中心平均法解模糊。

规则是模糊控制器的核心和灵魂，规则太多则在线推理时间过长而难以保证控制的实时性，规则太少又无法获得理想的控制效果，综合考虑上述两个方面，该模糊控制器采用有 7 条规则构成的完备模糊集。规则的制定以人的直观经验为基础：大误差时应使系统迅速响应，小误差时应防止出现过大的超调。模糊规则用一系列的 if-then 结构来描述。7 条规则列写如下：

- (1) if e is P , then output is u_1
- (2) if e is Z and \dot{e} is P , then output is u_2
- (3) if e is Z and \dot{e} is Z and \ddot{e} is P , then output is u_3
- (4) if e is Z and \dot{e} is Z and \ddot{e} is Z , then output is u_4
- (5) if e is Z and \dot{e} is Z and \ddot{e} is N , then output is u_5
- (6) if e is Z and \dot{e} is N , then output is u_6
- (7) if e is N , then output is u_7

模糊控制优于传统控制的一个重要方面是能够将人的经验以规则的形式融入到控制过程中去。为了更充分地利用先验知识并加快算法的收敛速度，对规则 4 的输出隶属度函数 u_4 采用复合的自适应算法。规则 4 描述的是系统在稳定悬浮时的情况，理想情况下 u_4 的中心值应该等于系统进入稳态时的控制电压，而额定负载条件下不同悬浮气隙的稳态悬浮电压是可以测量出来的，为了充分利用这一点，将 q_4 的值分为两部分

$$q_4 = q_{4_{fc}} + q_{4_{fs}} \tag{13}$$

其中， $q_{4_{fc}}$ 为依据式(12)得到的值； $q_{4_{fs}}$ 为单输入单输出 $T-S$ 模糊系统的输出。该 $T-S$ 模糊系统的输入为气隙的实际值，输出是悬浮质量为额定时在该气

隙下稳定悬浮时的控制电压值。在输入 x 的论域 (10mm, 20mm) 上定义了 5 个模糊语言变量 A_1, \dots, A_5 , 采用三角形全交叠均匀分布的隶属度函数。每条规则后件的输出多项式均只含有常数项 C_1, \dots, C_5 。T-S 模糊系统采用单点模糊和加权平均法解模糊。if-then 规则一共有 5 条, 记为如下形式:

$$\text{if } x \text{ is } A_i, \text{ then } q_{A_{fis}} \text{ is } C_i \quad (i=1, \dots, 5)$$

5 仿真和实验结果

该混合悬浮磁悬浮小车模型的额定悬浮质量为 87kg, 借助于 Matlab^[15] 中的模糊控制工具箱 (Fuzzy Inference System) 和 Simulink 工具箱对控制系统进行了仿真计算。悬浮磁极的仿真模型为由式 (4) 和式 (5) 所定义的非线性系统。仿真中取向量 $c = (4000, 140, 1)^T$; 常数 $K_d = 10$ 。分别对模型小车由停放在轨道上 (此时气隙为 20mm) 缓慢浮起直至稳定悬浮在额定气隙 12.5mm 的过程和给定气隙从 12.5mm 快速跳变至 13.5mm 过程中实际气隙的跟踪情况进行了仿真。仿真结果分别如图 4 和图 5 所示。

图 4 和图 5 中的实线表示气隙给定值 y_r , 虚线表示实际气隙 y 的大小, 点划线所示为浮起过程中的跟踪误差 e 变化情况。

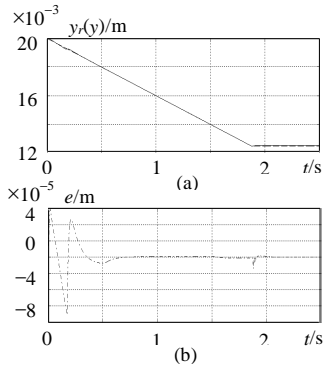


图 4 缓慢浮起过程仿真
Fig. 4 Simulation of soft levitation

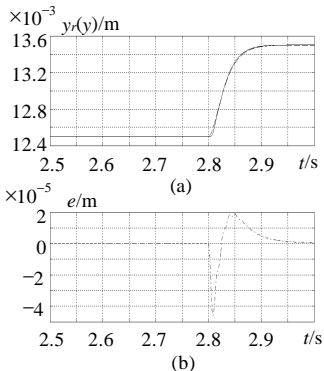


图 5 动态过程仿真
Fig. 5 Simulation of dynamic procedure

实际实验系统控制器的核心为一片德州仪器公司生成的高速 DSP (TMS320F2407), 4 个磁极独立控制。每个磁极的励磁绕组各由一 H 型斩波器分别独立供电。斩波器直流环节的母线电压为 75V。模糊控制程序采用在线模糊推理来实现。

图 6~图 8 给出了实验的部分结果。其中图 6 所示为小车从静止状态 (气隙值 20mm) 缓慢浮起至额定气隙 (气隙值 12.5mm) 过程中的情况, 浮起过程中气隙的给定值按照固定的斜率变化。图 7 所示为小车给定气隙由 12.5mm 快速跳变至 13.5mm 过程中的情况。在图 6 和图 7 中, (a) 图为气隙给定与实际气隙值的示波器记录, (b) 图为气隙给定 (上) 与跟踪误差 (下) 的示波器记录。

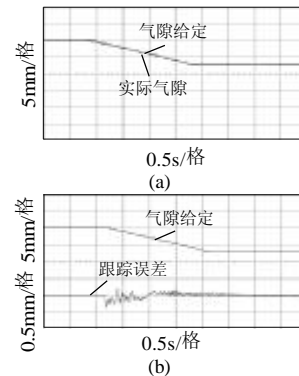


图 6 缓慢浮起过程实验结果
Fig. 6 Experimental results of soft levitation

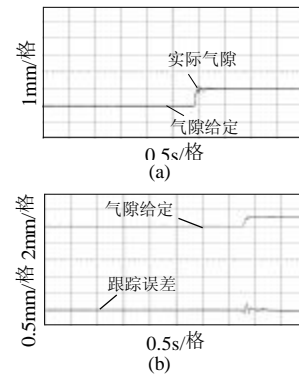


图 7 动态过程实验结果
Fig. 7 Experimental results of dynamic procedure

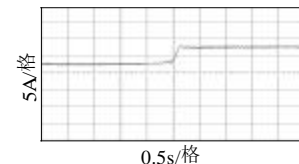


图 8 突加负载时磁极的电流变化情况
Fig. 8 Current of the electromagnet after a positive step of load of 8kg is exerted to it

为了考验控制系统的鲁棒性, 对系统做突然加载实验。实验过程为在小车一个磁极正上方位置突

然加上质量为 8kg 的重物。由于系统悬浮刚度很大, 因此在此过程中气隙的大小几乎没有变化, 显示了系统动态响应的快速性和控制系统的强鲁棒性。图 8 所示为突然加载实验中被加载磁极的励磁电流的变化情况, 可以看到磁极电流迅速达到新稳态且几乎没有超调。

计算机仿真和实验结果都表明, 本文所述的控制方案不但动态响应速度快、无静差、鲁棒性好, 而且跟踪误差也能控制在一个很小的范围内。

6 结论

电磁型磁悬浮系统是一种典型的强非线性和时变系统, 由于实际电磁关系的复杂性, 因此要得到系统的精确数学模型非常困难。针对电磁型磁悬浮系统的上述特点, 本文设计了针对该系统的直接自适应模糊控制方案, 提出了加速系统自适应收敛速度的复合自适应算法。计算机仿真和具体的实验结果都表明, 本文所提出的控制方案对于电磁永磁混合悬浮的电磁型磁悬浮系统是可行的, 系统不但动态响应速度快、静态无差、鲁棒性好, 而且跟踪能力也很令人满意。这表明本质非线性的模糊控制与自适应技术相结合对于解决电磁型磁悬浮系统的控制问题是一个很有竞争力的方案。

参考文献

- [1] 金志颖, 杨仕友, 倪光正, 等. EMS 型磁悬浮列车电磁系统动态电磁场的有限元分析及其悬浮与牵引力特性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(10): 22-25.
Jin Zhiying, Yang Shiyu, Ni Guangzheng *et al.* A time-stepping fem for transient electromagnetic field analysis and levitation and propellant force study of an ems maglev train[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 22-25.
- [2] Atherton D L. Maglev using permanent magnets[J]. IEEE trans. On Magnetics, 1980, 16(1): 146-148.
- [3] Wang T C, Tzeng Yeou-kuang. A new electromagnetic levitation system for rapid transit and high speed transportation[J]. IEEE trans. On Magnetics, 1994, 30(6): 4734-4736.
- [4] Hennerberger G, Contactless D R. Transportation vehicle with 4 hybrid-excited magnets and energysaving levitation control [C]. Nagasaki Japan: Proc. Of The First International Symposium on Linear Drives for Industry Applications(LDIA'95), 1995.
- [5] 夏长亮, 徐绍辉, 史婷娜, 等. 基于遗传算法的超声波电机模糊自适应速度控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 99-103.
Xia Changliang, Xu Shaohui, Shi Tingna *et al.* Fuzzy adaptive speed control for ultrasonic motor based ongeneticalgorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 99-103.
- [6] 胡一倩, 吕剑虹, 张铁军. 一类自适应模糊控制方法研究及在锅炉气温控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 136-140.
Hu Yiqian, Lü Jianhong, Zhang Tiejun. A kind of adaptive fuzzy control method and its application to system temperature control of the boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 136-140.
- [7] 王国玉, 梅华, 韩璞, 等. 电动悬浮型磁悬浮列车悬浮与导向技术剖析[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 230-235.
Wang Guoyu, MEI Hua, Han Pu *et al.* Fuzzy adaptive predictive functional control in main system temperature system [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 230-235.
- [8] 万尚军, 钱金根, 倪光正, 等. 电动悬浮型磁悬浮列车悬浮与导向技术剖析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 133-137.
Wan Shangjun, Qian Jingen, Ni Guangzheng *et al.* Study of the levitation and guidance technology for electrodynamic suspension maglev vehicle[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 133-137.
- [9] Morishita M, Azukizawa T, Kanda S *et al.* A new maglev system for magnetically levitated carrier system[J]. IEEE Trans. on vehicular technology, 1990, 38(4): 230-236.
- [10] Xu Shaohui, Xu Zhengguo, Jin Nengqiang *et al.* Acceleration sensorless levitation control scheme for the hybrid maglev system [C]. Shanghai: Proc. of Int. Conf. on Magnetically levitated system'2004, 2004.
- [11] Xu Zhengguo, Shi Liming, Xu Shaohui *et al.* Maglev system with hybrid-excited magnets and an air-gaplength control[C]. Shanghai: Proc. of Int. Conf. on Magnetically levitated system'2004, 2004.
- [12] Wang L Y, Wang P J. A novel fuzzy-adaptive controller for maglev systems based on controlled-pm electromagnets[C]. Cairns, Australia: Proc. of Int. Conf. on Magnetism, 1997.
- [13] Yeou K T, Tsih CW. A novel compensation approach for self-sensing maglev system with controlled-PM electromagnets [J]. IEEE Trans. on magnetics, 1995, 31(6): 4208-4210.
- [14] 张化光, 何希勤. 模糊自适应控制理论及其应用[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2002.
- [15] 刘万林, 晁勤, 张新燕, 等. 应用 MATLAB 设计模糊控制器及仿真[J]. 陕西工学院学报, 2004, 20(2): 7-9.
Liu Wanlin, Chao Qin, Zhang Xinyan *et al.* Design and simulation of a fuzzy controller by matlab[J]. Journal of Shanxi Institute of Technology, 2004, 20(2): 7-9.

收稿日期: 2005-07-25。

作者简介:

徐正国 (1974-), 男, 中科院研究生院博士研究生, 研究方向为电力电子与电力传动、智能控制;

徐绍辉 (1975-), 男, 中科院研究生院博士研究生, 研究方向为直线电机及其控制;

史黎明 (1964-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为直线电机及其控制;

金能强 (1942-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向为直线电机设计及智能控制。