

文章编号: 1000-8152(2005)01-0047-05

## 多模自适应模糊控制器及其在精密伺服系统中的应用

吕 刚<sup>1</sup>, 焦留成<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 北京 100044; 2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450052)

**摘要:** 永磁直线同步电动机(PMLSM)的理论研究还不十分完善并且其工业应用也没有实现, 因此不能利用其数学模型或简单模糊控制的方法对垂直运动的 PMLSM 实现良好控制. 设计了直线伺服系统的多模自适应模糊控制器. 首先应用自组织模糊控制器, 它可以在先验知识十分缺乏的情况下自动形成良好的控制表. 然后考虑到被控对象的多动态特性, 加入自整因子层对量化因子和比例因子进行在线模糊修改, 从而改善了控制器的动态和静态特性. 为克服模糊控制不能实现无静差控制的不足, 使用无静差的双模设计, 提高了伺服系统稳态精度和动态响应速度. 实验证明, 该伺服系统能够消除 PMLSM 固有的负载扰动、端部效应、参数时变对系统伺服性能的影响; 并且具有自组织自学习能力强, 快速跟踪, 定位精确, 鲁棒性强等特点.

**关键词:** 自适应模糊控制器; 多模控制器; 伺服系统; 永磁直线同步电动机; 垂直提升系统

**中图分类号:** TP273, TM351

**文献标识码:** A

### Application to precise servo-system using multi-adaptive fuzzy controllers

LÜ Gang<sup>1</sup>, JIAO Liu-cheng<sup>2</sup>

(1. Electric Engineering Institute, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Electric Engineering Institute, Zhengzhou University, Zhengzhou Henan 450052, China)

**Abstract:** Since the theory of permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM) is not consummated and has not been applied to industry, the servo-system of the PMLSM vertical movement cannot be designed based on its math model or by using simple fuzzy controller. A multi-adaptive fuzzy controllers is proposed for the servo-system in this paper. First, the self-organizing fuzzy controller is designed and can get fuzzy rules automatically without expert experiments. Then, multi-dynamic characteristics of PMLSM are considered, so a self-adjusting layer is made to modify the quantitative factors and proportional factor and improve its static and dynamic characters. In order to eliminate the static error that fuzzy controller inheres, two fuzzy controllers without the static error are designed, and hence the servo-system will have better static and dynamic characters. The experiment results show that the design system can eliminate the influence of the load disturbances, end effects, and the change of system parameters. In fact, it has a strong robustness to uncertainties of control object, a strong ability of self-organization, a good tracking and positioning performance.

**Key words:** self-adaptive fuzzy controller; multi-fuzzy controllers; servo-system; linear synchronous motor; vertical hosting system

### 1 引言(Introduction)

永磁直线同步电动机(PMLSM)是不需中间转换装置就能产生直线运动的新型驱动器. 它具有推力大, 损耗低, 时间常数小, 响应速度快等特点. 但 PMLSM 在基础理论上的研究还十分不完善(稳态特性已基本完成, 动态特性的研究还很不足<sup>[1,2]</sup>)并且垂直运动的 PMLSM 在结构上、控制机理上均与旋转电机以及水平运动的直线电机不同. 尤其采用定子分段后加剧了边端效应, 其垂直提升整体分析更

加复杂. 因此, 利用其数学模型进行控制很困难. 另外, PMLSM 的工业应用还基本没实现, 实际操作经验相对缺乏, 用简单模糊控制器无法进行良好控制. 因此, 研究新的控制策略非常必要.

### 2 自组织自整因子模糊控制器的原理与设计(Theory and design of self-adaptive fuzzy controller)

通常意义上的自组织模糊控制器仅对控制规则

收稿日期: 2003-03-25; 收修改稿日期: 2004-03-02.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69674021); 河南省自然科学基金资助项目(004040500); 河南省重大科技攻关项目(0223025300).

进行自动修改.考虑到量化因子与比例因子对系统的动态特性和稳态特性影响极大,因此在自组织模糊控制器上加入因子自调整层,以提高动稳态特性,且称之为自组织自整因子模糊控制器.结构如图 1 所示.

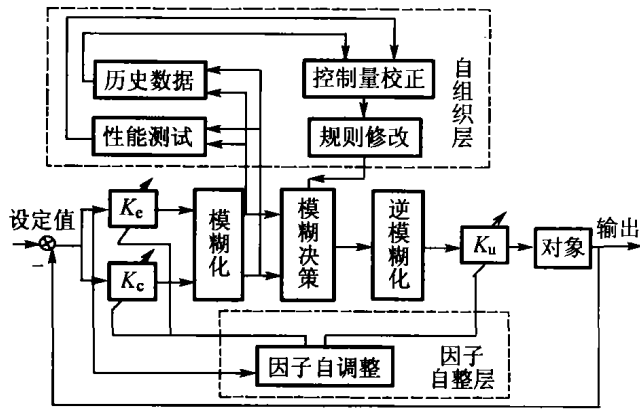


图 1 自组织自整因子模糊控制器  
Fig. 1 Self-adaptive fuzzy controller

2.1 自组织层(Self-organization layer)

自组织层主要是对模糊规则进行修改,也是模糊控制器自学习的过程.由以下部分组成:

- 1) 历史数据.用于存放从 \$(nT - mT)\$ 时刻到 \$nT\$ 时刻所有的误差,误差变化和控制量.
- 2) 性能测量<sup>[3]</sup>.此部分中,利用实际响应与期望响应之差作为系统的性能指标,由此计算出对应输出特性应该进行的校正量,校正量用 \$P\$ 表示.由于性能参数 \$E\$、\$EC\$ 与 \$P\$ 之间可以用模糊命题来表示,即与控制规则相同的形式,例如:

- i) IF \$E = NM\$ and \$EC = PS\$ THEN \$P = PS\$;
- ii) IF \$E = NS\$ or \$NO\$ and \$EC = PS\$ THEN \$P = ZO\$;
- iii) IF \$E = NM\$ and \$EC = PL\$ or \$PM\$ THEN \$P = ZO\$.

其中, i)表示当偏差为负中且特性上升较慢时,进行正小校正. ii)表示当偏差为负小或负零,并且特性上升较慢时,不需校正. iii)表示当偏差为负中且特性上升较快即正中或正大时,不需校正.如此,对偏差、偏差变化率、校正量分别取量化域,而后依据模糊命题,采用与基本模糊控制器构造模糊控制表相同的方法,便可离线计算出性能测试表供在线查询来满足实时性要求.

3) 控制量校正.这部分的功是由性能测试得的校正量 \$P(nT)\$,计算作用于对象的校正量 \$Q(nT)\$,以使下一次特性得到改善.

输出校正量与输入校正量之间的关系为 \$Q(nT) = M^{-1}P(nT)\$,其中 \$M\$ 为增量模型,表示某

一输出量和那些输入量有关.不失一般性,考虑一个双输入双输出纯滞后较小的过程,其状态方程为

$$\begin{cases} \dot{X} = F(X, U, V), \\ \dot{Y} = G(X, U, V). \end{cases} \quad (1)$$

当输入变化很小时,输出变化为

$$\begin{bmatrix} \delta\dot{X} \\ \delta\dot{Y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \partial F/\partial U & \partial F/\partial V \\ \partial G/\partial U & \partial G/\partial V \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta U \\ \delta V \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在一个足够短的采样周期 \$T\$ 中,当输入为 \$\Delta U\$ 和 \$\Delta V\$ 时,输出变化 \$\Delta X\$ 和 \$\Delta Y\$ 近似表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} T\delta\dot{X} \\ T\delta\dot{Y} \end{bmatrix} = TJ \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta V \end{bmatrix} = M \begin{bmatrix} \Delta U \\ \Delta V \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令输出校正量是 \$P(nT)\$,输入校正量是 \$Q(nT)\$.则 \$Q(nT) = M^{-1}P(nT)\$.若控制量与输出量都归一化,则 \$M\$ 的各元素均在 \$-1 \sim +1\$ 之间,并且当过程是单输入单输出纯滞后较小的系统时, \$M = 1\$.另外,对滞后较大的对象,要求控制量提前校正,提前量要根据对被控对象的判断来确定.

实际上,具体给出精确的 \$M\$ 是困难的.一般是先大致确定一个 \$M\$,然后经过自学习和重复校正以克服 \$M\$ 矩阵初始给定的粗糙性.

4) 控制量的修改.此部分目前使用较多的是直接修改控制规则的方法,但此法会造成控制规则迅速增加,导致规则库剧烈膨胀.加上考虑到 PMLSM 是快速运动的驱动器,实时性要求很高,所以采用最大隶属度法决策,直接修改控制表以满足实时控制的要求.其修改规则如下<sup>[4]</sup>:

初始状态时,1)若相邻的采样周期的偏差或偏差变化不相等,则将控制表中的 \$e(nT - mT), c(nT - mT)\$ 对应的控制量修正为 \$v(nT - mT) = u(nT - mT) + p(nT)\$. 2)若相邻的采样周期的偏差和偏差变化相等,则将控制表中对应的控制量修正为

$$\langle 1/2 \{ \prod_{m} [e(nT - mT), c(nT - mT)] + v(nT - mT) \} \rangle,$$

其中 \$\langle a \rangle\$ 表示取与 \$a\$ 同号且最接近 \$a\$ 的整数.

变换状态时,按 2)进行修改,经不断修改得到性能良好的控制表.

综上所述,采用最大隶属度法修改控制规则的过程简化为仅把控制表对应的控制量进行了修改,而其余项不变.从而避免直接修改控制规则造成的规则膨胀和由此引起的实时性变差的不足.

2.2 因子自调整层(Self-adjusting parameter layer)

简单模糊控制器中量化因子与比例因子是固定的.而实际上,要使系统达到快速响应且无超调,在参数选择上存在矛盾,单凭固定的量化因子和比例因子很难达到 PMLSM 的高要求.因此,应根据 \$E\$ 和

EC 对量化因子与比例因子进行在线调整.

考虑到量化因子与比例因子的变化趋势正好相反,为方便起见取量化因子的变化倍数与比例因子的变化倍数互为倒数,设量化因子变化倍数为  $N$ . 这样,  $E$ ,  $EC$  和  $N$  可用模糊命题表示. 例如:

i) IF ( $E = PL$  and  $EC = PL$ ) or ( $E = NL$  and  $EC = NL$ ) THEN  $N = PS$ ;

表示当  $E$  和  $EC$  较大时,控制系统主要是减少误差,加快动态过程,应取较大的控制量,所以比例因子应增大,量化因子应减少;

ii) IF ( $E = PS$  and  $EC = PS$ ) or ( $E = NS$  and  $EC = NS$ ) THEN  $N = PL$ ;

表示当  $E$  和  $EC$  较小时,系统将接近稳值,应放大量化因子,同时减小比例因子,使控制量阶跃变化小,最终达到稳态误差要求;

所以可以仿照性能测试表的构造方法离线模糊推理计算,得出因子修改表供在线查询,即所谓因子自调整层.

### 3 交流伺服系统设计 (Design of the servo-system)

交流伺服系统采取位置反馈,速度反馈和电流反馈三闭环结构.其结构如图 2 所示<sup>[5,6]</sup>:

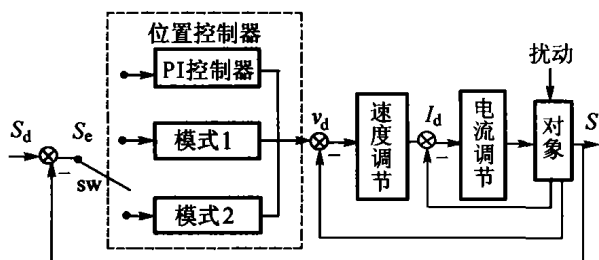


图 2 双模无静差伺服系统

Fig. 2 Servo-system of two fuzzy controllers without the static error

### 3.1 位置控制器设计 (Design of position controller)

位置控制器主要是保证系统稳态精度和动态跟踪性能,它是反馈主通道,直接关系到伺服系统的稳定与高性能运行.因此它的性能好坏至关重要,其设计主要包括<sup>[7,8]</sup>:

1) 使用自组织自整因子模糊控制器.由于 PMLSM 本身的严重非线性,强耦合性及其控制经验缺乏,加上它对伺服系统动态,稳态特性品质的高要求.因此,使用自组织自整因子模糊控制器以克服以上困难<sup>[9]</sup>.

2) 双模设计.考虑到伺服系统的快速跟踪和精确定位的要求很高,二者又发生在不同的时域,而且具有矛盾性,使用一个控制器常常会顾此失彼.因此,针对不同时域按不同规则生成两组查询表和性能测试表分别满足快速性和准确性的要求,设计两个控制器,并称之为模式 1 和模式 2,见图 2.

模式 1 与模式 2 均采用自组织自整因子模糊控制器.系统中采用透射光栅作为位置控制器的传感装置,光栅密度为 100 条/mm,利用四倍频细分法可以测出 5 μm 的位移.为判断运行方向,在间隔 1/4 莫尔条纹间距处设置两个光电元件,其输出分别接入 D 触发器的 D 端和 CLK 端,则可用 D 触发器的状态“0”和“1”来表示方向.将偏差量为 8000 条纹作为双模的切换点.考虑到模式 1 主要任务是快速响应,其总等级数不用过多,取  $E = \{-5, \dots, -0, +0, \dots, 5\}$ ,  $EC$  和速度  $V$  均为  $\{-5, \dots, 0, \dots, 5\}$ ,而后由不成熟的控制规则建立模式 1 的控制表,因为控制规则十分缺乏,控制表从略,但其会在运行中由自组织层逐渐修正而形成良好控制表.自组织层中,相应的校正量  $P(nT)$  也取  $\{-5, \dots, 0, \dots, 5\}$ .由离线进行模糊推理和多次实验修改得性能测试表如表 1.

表 1 性能测试

Table 1 Performance test

E	EC										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	0	0	2	2	3	5	5	5	5	5	5
-4	0	0	2	4	5	5	5	5	5	5	5
-3	0	0	2	2	3	4	4	4	4	5	5
-2	0	0	0	0	0	2	2	2	3	4	5
-1	0	0	0	0	0	1	1	1	2	3	4
-0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3
+0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3
1	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-2	-3	-4
2	0	0	0	0	0	-2	-2	-2	-3	-4	-5
3	0	0	-2	-2	-3	-4	-4	-4	-4	-5	-5
4	0	0	-2	-4	-5	-5	-5	-5	-5	-5	-5
5	0	0	-2	-2	-3	-5	-5	-5	-5	-5	-5

因子自调整层中,与性能测试表相似,针对模式1的快速响应特点经多次实验修正得因子修改表,如表2.实际运行时,先用最初的量化因子量化,而后查表得 $N$ ,令 $K_e = K_e \cdot N, K_c = K_c \cdot N, K_u = K_u / N$ ,然后用所得 $K_e, K_c, K_u$ 进行量化和控制.

当偏差小于8000条纹时,使用模式2控制.其主要是负责控制稳定性和定位精度,因此取量化等级多一些, $E = \{-6, \dots, -0, +0, \dots, 6\}$ , $EC$ 和 $V$ 为

表2 因子修改

$E$	$EC$										
	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5
-5	1/8	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1/2	1/4	1/8
-4	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1/2	1/4
-3	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/2
-2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
-1	1	1	1	1	2	4	2	1	1	1	1
-0	1	1	1	2	4	4	4	2	1	1	1
+0	1	1	1	2	4	4	4	2	1	1	1
1	1	1	1	1	2	4	2	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1/2
4	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1	1	1/2	1/4
5	1/8	1/4	1/2	1	1	1	1	1	1/2	1/4	1/8

## 4 实验装置与实验结果分析 (Experiment equipments and result analysis)

### 4.1 实验装置 (Experiment equipments)

系统实验装置采取两级计算机控制,上位机(PC-AT)接收并存储下位机传送得数据,完成给定曲线,显示偏差曲线和响应曲线以及菜单操作管理功能.下位机完成位置环的实时控制,通过8251与PC的8250实行半双工通讯;8255的A口实现数字控制,B口接收位置信号;8279完成调试功能键显示;8259实现中断管理例如掉电、初级温度过高等故障<sup>[10]</sup>.

软件部分分为控制算法、数据采集和数据处理3部分.控制算法使用汇编语言编写,完成历史数据存储、控制量修改和PI算法等任务.数据采集软件用BC++语言编写,完成数据采集和存储工作.数据处理软件采用MATLAB语言编写.为减少占用内存,保证足够的多通道采样精度,在完成数据采集和存储之后,离线进行数据处理,主要完成小波分析进行基波提取,实时波形显示,打印等.

实验样机为3m高、双边形PMLSM垂直提升系统,采用定子分段,分段供电.主要参数:初级电枢绕组5段,单段定子槽数39,极数12,磁体长15mm,极距24mm,磁体宽80mm,动子材料NdFeB,额定电压100V,额定电流25A,额定速度1.5m/s.

$\{-6, \dots, 0, \dots, 6\}$ . 它的控制表,性能测试表,因子修改表的设计原则同模式1.

3) 无静差设计.理论上模式2分级再多也不可能实现无静差,况且分级太多就失去了模糊的意义.因此在将要到达给定位置时,将模式2切换到PI控制器.因为模式2偏差为14档8000条纹,考虑到模式2与PI必须过渡准确和无波动,经多次实验选取偏差为580条纹为切换点.

### 4.2 实验内容 (Experiment processes)

首先不加PI环节,将位置控制器投入后,运行了5次.从响应曲线可以看出(曲线已使用小波分析进行了基波提取),其适应能力是非常强的.最初的响应是不好的,这是由于初始的控制规则是由非常不成熟的经验得到所造成的.但是经过自适应调整后,特性很快变好.如图3所示:

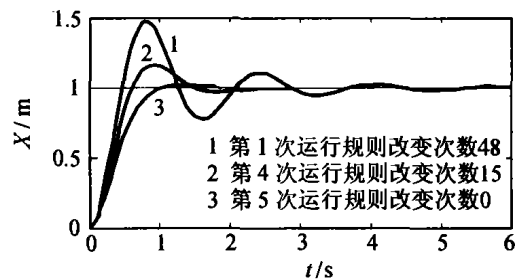


图3 自组织自整因子模糊控制器的自学习过程  
Fig. 3 Self-adaptive fuzzy controller's self-study process

将上述特性良好的位置控制器投入运行,在4.0s加入3kg的扰动,结果系统最大超调1.2%,恢复时间0.6s.而对同样的扰动,常规的模糊控制器超调4.9%,恢复时间1.4s.可见对PMLSM由铁心开断,绕组不连续造成的波动及外来扰动,该控制器均具有很强的鲁棒性和抗干扰性.而且,自组织自整因子模糊控制器的响应时间为2.1s(相对于稳态误

差为 1.2%),超调 0.0%;常规的模糊控制器响应时间为 2.89 s,超调 0.9%。由此可见自组织自整因子

模糊控制器中的双模设计和自整因子部分对提高响应速度、抑制超调的表现均令人满意。如图 4 所示:

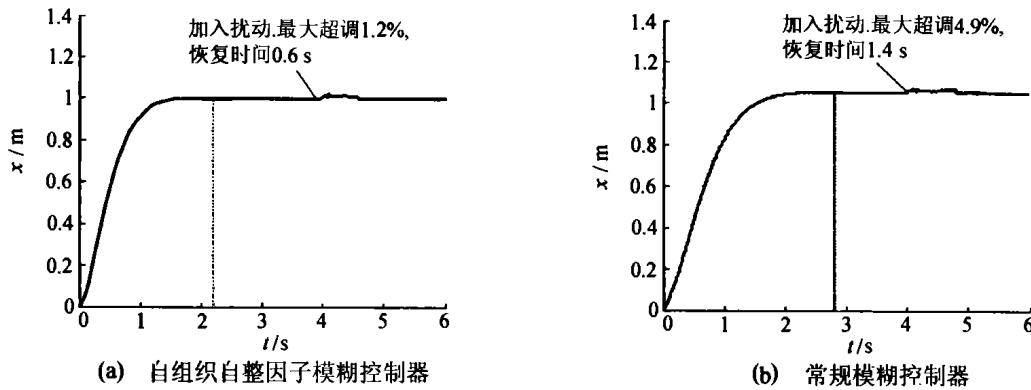


图 4 自组织自整因子模糊控制器与常规模糊控制器的比较

Fig. 4 Compare between self-adaptive fuzzy controller and simple fuzzy controller

加入 PI 环节,如图 5 所示曲线表明在 2.7 s 之后,稳态误差为 0.0%,而未加入 PI 的双模自组织自整因子模糊控制器为 0.8%。可见,PI 环节的加入完全消除了静差。

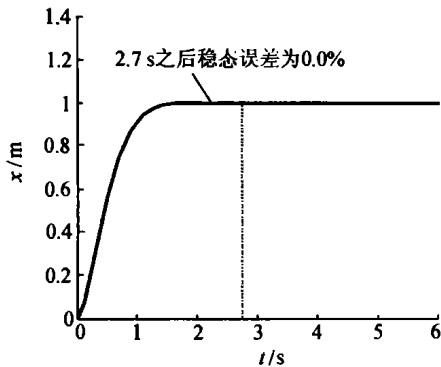


图 5 加入 PI 的无静差表现

Fig. 5 Elimination of the static error with PI

## 5 结论(Conclusion)

1) 将自组织模糊控制器和自整因子算法结合构成自组织自整因子模糊控制器,克服了 PMLSM 没有精确的数学模型,控制规则缺乏而难以良好控制的缺点,改善了控制器本身的动态和静态特性,同时也表现出很强的鲁棒性和抗干扰性。

2) 自组织层中最耗费计算时间的控制规则修改部分采用最大隶属度法,使规则修改简化为仅修改控制表中相应的控制量,避免了规则膨胀,满足了 PMLSM 实时控制的要求。

3) 使用双模设计,解决了快速跟踪和精确定位之间的矛盾,使得动态响应迅速,稳态精度提高,满足了 PMLSM 的精密伺服要求。

4) 使用 PI 与模式 2 自动切换,实现无静差控制。

## 参考文献(References):

[1] INOUE M, SATO K. An approach to a suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous mo-

- tors [J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 2000, 36(4): 1890 - 1893.
- [2] 焦留成, 袁世鹰. 垂直运动永磁直线同步电动机运行特性分析 [J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(4): 37 - 40. (JIAO Liucheng, YUAN Shiyong. Study on the operating characteristics of permanent magnet linear synchronous motor for vertical movement [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2002, 22(4): 37 - 40.)
- [3] LI Chun-shien, LEE Chun-yi. Self-organizing neuro-fuzzy system for control of unknown plants [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2003, 11(1): 135 - 150.
- [4] JANABI-SHARIFI F; FAN J. Self-tuning fuzzy loop control for rolling mills [C]// *Proc of the IEEE Conf on Decision and Control*. New York: IEEE Press, 2000, 1: 376 - 381.
- [5] LIN W S, TSAI C H. Self-organizing fuzzy control of multi-variable systems using learning vector quantization network [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2001, 124(1): 197 - 212.
- [6] WAI Rong-jong, LIN Chih-min, HSU Chun-fei. Self-organizing fuzzy control for motor-toggle servomechanism via sliding-mode technique [J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 131(2): 235 - 249.
- [7] TSAI M C, CHEN J H. Practical implementation of a linear induction motor drive using new generation DSP controller [C]// *Proc of the 1999 IEEE Int Conf on Control Applications*. New York: IEEE Press, 1999, 2: 945 - 949.
- [8] LIN Faa-jeng, LIN Chih-hong, SHEN Po-hung. Variable-structure control for linear synchronous motor using recurrent fuzzy neural network [C] // *Proc of Industrial Electronics Conference*. New York: IEEE Press, 2002, 3: 2108 - 2113.
- [9] SUNG Jeong-hyun, NAM K. New approach to vector control for a linear induction motor considering end effects [C]// *IEEE Industry Applications Conference Thirty-fourth IAS Annual Meeting*. New York: IEEE Press, 1999, 4: 2284 - 2289.
- [10] WIDDOWSON G P, LIAO Youyong, GAUNEKAR A S, et al. Design of a high speed linear motor driven gantry table [C]// *Proc of the IEEE Int Conf on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*. Piscataway, NJ, New York: Wiley, 1998, 2: 936 - 941.

## 作者简介:

吕刚 (1976—), 男, 博士, 主要从事智能控制、电力系统自动化和直线电机理论、应用等方面的研究, E-mail: lvgang1976@sina.com;

焦留成 (1950—), 男, 教授, 博士, 主要从事电机及控制系统理论和应用、矿山电气工程、直线电机理论和应用等方面的研究。