直线感应电机间接磁场定向悬浮牵引联合控制

史黎明[1], 何晋伟[1,2], 王珂[1,2], 张洪波[1,2]
(1. 中国科学院电工研究所,北京 100190; 2. 中国科学院研究生院,北京 100190)

摘 要: 基于气隙磁密分析,建立了适用于间隙变化的直线感应电机动态数学模型以及推力和法向力表达式。针对直线感应电机的运行状况,分析了法向力的排斥力分量和吸引力分量的特点,提出了一种新颖的基于间接次级磁场定向的推力、法向力独立控制策略。仅仅依靠单边直线感应电动机,实现了静态和动态稳定悬浮、以及悬浮状态下的稳定牵引运动,并在一台直线感应电机模型车辆上进行了实验。实验结果表明,提出的解耦控制方案对直线感应电机的悬浮牵引联合控制具有良好的效果。

关键词: 直线感应电机; 间接磁场定向; 解耦控制; 推力; 法向力
中图分类号: TM359.4 **文献标识码**: A **文章编号**: 1007-449X(2009)02-0179-05

Combined control of levitation and propulsion for linear induction motor based on IFO method

SHI Li-ming[1], HE Jin-wei[1,2], WANG Ke[1,2], ZHANG Hong-bo[1,2]
(1. Institute of Electrical Engineering, Beijing 100190, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China)

Abstract: Dynamic mathematic model with thrust and normal force of a single sided linear induction motor (SLIM) were established by flux distribution analysis, which was suitable for gap-length changing. Repulsive component and attractive component in normal force were analyzed according to SLIM's operation characteristics. A novel decoupling strategy was proposed to control independently thrust and normal force based on indirect flux orientation (IFO). The stable levitation and propulsion during levitation was realized in a SLIM model vehicle of combined levitation and propulsion by using proposed decoupling control strategy.

Key words: linear induction motors; indirect flux orientation; decoupling control; thrust force; normal force

1 引 言

直线感应电动机结构简单,能够直接产生直线运动,在交通、工业生产等各领域得到了广泛的应用。次级带背铁的单边直线感应电机的初级和次级间存在着较大的吸引法向力,在悬浮和轮轨的直线驱动系统中通常采用控制转差频率的方法进行抑制[1],使得电机的运行效率偏低。例如,在 HSST系统中,悬浮和牵引是两套独立的系统,为了克服直线电机法向力的影响,悬浮系统需要更多的能量消耗。

收稿日期: 2008-10-06
基金项目: 国家自然科学基金 (50577062)
作者简介: 史黎明 (1964-),男,研究员,博士生导师,主要研究方向为直线电机和驱动控制、电力电子变流、磁悬浮技术;
何晋伟 (1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为直线电机与控制、电力电子变流技术;
王 珂 (1983-),男,博士研究生,主要研究方向为直线电机与控制、电力电子变流技术;
张洪波 (1984-),男,硕士研究生,主要研究方向为直线电机与控制。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

直线电机驱动的城轨车辆系统中,法向力加大了摩擦损耗。悬浮牵引兼用直线感应电机系统仅依靠直线感应电机的法向力和牵引力,对其实施解耦控制可以同时实现吸引式悬浮和牵引[2]。如果用于磁浮车辆系统可省去悬浮电磁铁,在城轨磁浮交通和直线电机地铁等系统中,可有效控制法向力大小,提高牵引效率。

牵引力和法向力的解耦是悬浮牵引联合控制实现的关键。文献[2,3]分别基于转差频率控制和直接力矩控制(direct torque control, DTC)实现了牵引力和法向力的解耦。转差频率控制基于直线电机的稳态数学模型,虽然可实现完全解耦,但动态响应不理想。DTC控制在低速时存在着推力和法向力的脉动等。文献[4]主要考虑了对法向力的抑制,没有实施解耦控制,且控制过程复杂。

本文从次级导体板带背铁的单边直线感应电机气隙磁密的特点出发,推导出了适合解耦控制用的直线感应电机动态数学模型和牵引力/法向力的解析式,提出了一种运算简便、新颖的基于次级间接磁场定向的直线感应电机牵引力和法向力解耦控制方法,在研制的模型车装置上进行了实验。

2 直线感应电机间接磁场定向模型

基于单边直线感应电机的悬浮牵引兼用模型车系统如图1所示。该系统包含2台结构、参数完全相同的单边直线感应电机,分别安装在车体前后两端,非悬浮状态时,由前后4只轴承支撑。系统不设置悬浮电磁铁,直线感应电机既起悬浮作用、又起牵引作用。2台电机分别由2台电压源逆变器单独控制,在实现悬浮牵引的同时,可有效地抑制由边缘效应等所造成的俯仰运动。电机的主要参数为:槽数 $z=24$;极距 $\tau=51$ mm;初级铁心长 $L=410$ mm;初级铁心宽 $w=70$ mm;次级铝板厚为2 mm;极数 $p_1=7$。

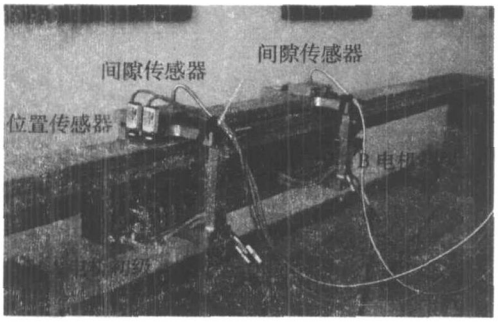

图1 单边直线感应电动机悬浮牵引兼用装置

Fig. 1 SLM based levtation-propulsion combined system

电机极数较多时,纵向边缘效应较弱[5,6],次级磁链定向直线感应电机在两相同步运动d-q坐标系下的电压方程与旋转感应电机转子磁场定向类似[7,8],次级交轴磁链 ψ_{rq} 为零,次级磁链 ψ_r 即为次级直轴磁链 ψ_{rd}。初级电压表达式为

$$\left.\begin{aligned} u_{sd} &= R_s i_{sd} + L_{s\sigma}\frac{di_{sd}}{dt} + \frac{L_m}{L_r}\frac{d\psi_r}{dt} - \omega_s L_{s\sigma} i_{sq}, \\ u_{sq} &= R_s i_{sq} + L_{s\sigma}\frac{di_{sq}}{dt} + \omega_s\left(\frac{L_m}{L_r}\psi_r + L_{s\sigma} i_{sd}\right)。\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

次级磁链 ψ_r 为

$$\psi_r = \frac{L_m}{T_r p + 1} i_{sd}。 \quad (2)$$

式中:u_{sd}、u_{sq} 分别为初级d-q轴电压;R_s、R_r 分别为初级和次级电阻;$L_{s\sigma}$ 为初级漏感;L_m 为励磁电感;L_r 为次级电感;i_{sd}、i_{sq} 分别为初级d-q轴电流;ω_s 为同步电角速度;$T_r=L_r/R_r$ 为次级时间常数,p为微分算子。

用于直线牵引的直线感应电机与普通旋转感应电机不同[9,10],机械气隙 δ 随运动过程可能改变,进而励磁电感 L_m 也随 δ 发生变化,实时计算励磁电感较困难。通过有限元方法计算出磁通分布,利用后处理逐点计算,可以得出对应不同间隙长度的励磁电感,如图2所示。针对本文的电机,电感随间隙变化情况可以拟合成式(3)和图2中的曲线。实际控制应用中,可通过查表获得[11,12]。

$$L_m = f(\delta)。 \quad (3)$$

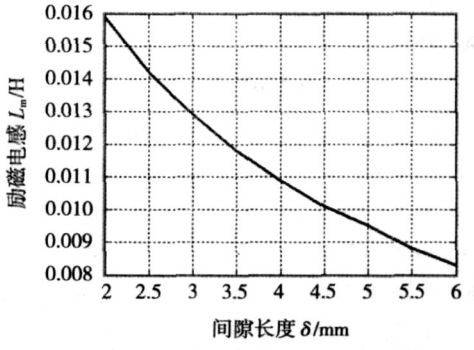

图2 有限元方法计算出的励磁电感曲线

Fig. 2 Magnetizing inductance calculated by FEM

直线电机的推力可以表示为

$$F_x = \frac{3\pi}{2\tau}\frac{L_m}{L_r}\psi_r i_{sq}, \quad (4)$$

式中 τ 为极距。

直线电机的法向力可用张量法来表示[6,7],为

$$F_z = \frac{w}{2\mu_0}\int_0^L (B_{sz}B_{sz}^* - B_{sx}B_{sx}^*)\,dx。 \quad (5)$$

式中:w 为初级横向宽度;L 为初级长度;B_{sz}、B_{sz}^* 为初级表面的法向磁密向量及共轭向量;B_{sx}、B_{sx}^* 为初级表面的切向磁密向量及共轭向量。式(5)第一项表示吸引分量,第二项表示排斥分量,这与文献[13, 14]中

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

将法向力分为初级励磁磁场与次级铁心的吸引力和初级励磁电流与次级导体板中感应涡流的排斥力本质上意义相同。

如果忽略气隙漏磁通,可认为穿过初级表面和穿过次级表面的气隙磁链相等,可得

$$\frac{2}{\pi} w\tau N_s |B_{sz}| = \psi_{ms} = \psi_{mr}。\tag{6}$$

式中:$|B_{sz}|$为初级表面磁密向量幅值;ψ_{ms}、ψ_{mr}分别为初级表面气隙磁链和次级表面气隙磁链;N_s为考虑了分布系数后每相有效串联匝数。

当直线感应电机次级铝板较薄并且为无槽结构时,控制中可忽略次级漏感,得

$$\psi_{mr} = \psi_r。\tag{7}$$

由式(2)、式(6)和式(7)可得

$$|B_{sz}| = K_1\psi_r = \frac{K_1 L_m}{T_r p + 1} i_{sd},\tag{8}$$

式中 $K_1 = \pi/2\tau w N_s$为电机结构常数。可以看出,初级表面的法向磁密仅由 i_{sd}决定,而和 i_{sq}无关,也即法向力公式(5)中的吸引分量仅和 i_{sd}相关。

根据安培环路定理,初级表面 B_{sx}幅值表示为

$$|B_{sx}| = J_m = K_2 \sqrt{I_{sd}^2 + I_{sq}^2}。\tag{9}$$

式中:J_m为初级表面电流密度幅值;$K_2 = m_1 N_s / p_1 \tau$为与电机结构有关的常数;m_1为相数;p_1为极数。由此可知,式(5)中初级表面切向磁密和法向力的排斥分量由 i_{sd}和 i_{sq}共同决定。

对直线电机车辆系统,通常需要较大的吸引力来悬浮车辆,并且电机在悬浮后由于几乎没有摩擦阻力,需要的牵引力并不大,所以 i_{sd}远大于 i_{sq}。同时,气隙磁场的法向分量 B_z远大于切向分量 B_x,即法向力中的吸引分量远大于排斥分量,如图 3所示。另外,由于 i_{sq}仅仅能够影响排斥分量,排斥分量对法向力总和的影响较吸引分量小,可认为法向力仅和 i_{sd}有关,近似表示为

$$F_z \doteq \frac{wL}{4\mu_0} [(K_1\psi_r)^2 - (K_2 i_{sd})^2]。\tag{10}$$

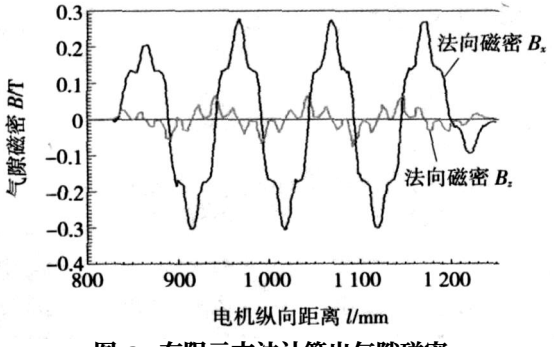

图 3　有限元方法计算出气隙磁密

Fig. 3　Flux distribution calculated by FEM

由此可知,通过调节 i_{sd}和 i_{sq},可独立控制法向力和牵引力,实现悬浮和牵引的联合控制。实际运行过程中,由于载荷变化或电气干扰等因素,可能致使悬浮间隙发生变化,通过调节与之对应的 i_{sd}和励磁电感 L_m可实现法向力的动态解耦。

3　解耦控制算法实现

电机车辆系统垂直方向的运动方程可表示为

$$mg - F_z = m\frac{d^2\delta}{dt}。\tag{11}$$

悬浮控制通过在预期的稳定工作点线性展开后进行[15, 16]。将式(2)、式(3)、式(10)代入式(11),在间隙稳定工作点 δ_0线性展开,通过调节 i_{sd}来控制法向力,实现稳定悬浮。控制律为

$$i_{sd}^* = K_{Pd}\Delta\delta + K_{Dd}\frac{d\Delta\delta}{dt} + K_{Ad}\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + i_{sd0},\tag{12}$$

式中:i_{sd}^*为给定初级 d轴电流;i_{sd0}为在工作点稳定悬浮时的初级 d轴电流;$\Delta\delta$为气隙实际值与给定值偏差;K_{Pd}、K_{Dd}、K_{Ad}为根据典型 PID系统设计计算出的参数。

在水平方向采用速度闭环控制,通过给定推力实施 PI调节,为

$$F_x^* = K_{FP}(v^* - v) + K_{FI}\left(\int v^* - v\right) dt。\tag{13}$$

式中:v^*为给定速度值;v为实际速度值;K_{FP}、K_{FI}为牵引力调节 PI参数。

由给定推力 F_x^*得到 q轴电流给定 i_{sq}^*为

$$i_{sq}^* = 2\tau L_r F_x^* / (3\pi L_m \psi_r^*)。\tag{14}$$

由于运动过程中气隙会发身变化,悬浮系统是一个高阶不稳定变参数系统,为了提高悬浮的稳定性,必须有较快的电流响应,这里施加一个高增益的电压环。控制律为

$$u_{sd}^* = K_P(i_{sd}^* - i_{sd}) + K_I\left(\int i_{sd}^* - i_{sd}\right) dt - \omega_s^* L_{s\sigma} i_{sq}^*,\tag{15}$$

$$u_{sq}^* = K_P(i_{sq}^* - i_{sq}) + K_I\left(\int i_{sq}^* - i_{sq}\right) dt + \omega_s^*\left(\frac{L_m}{L_r}\psi_r^* + L_{s\sigma} i_{sd}^*\right)。\tag{16}$$

式中 K_p、K_I为电流调节 PI参数。

通过快速控制初级电流 d、q分量可以同时控制法向力和牵引力,从而实现悬浮和牵引的解耦。系统的控制结构框图如图 4所示。间接转子磁场定向控制中的次级磁链由稳态方程(2)得到,磁链与定子的位置由滑差频率和速度得到。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

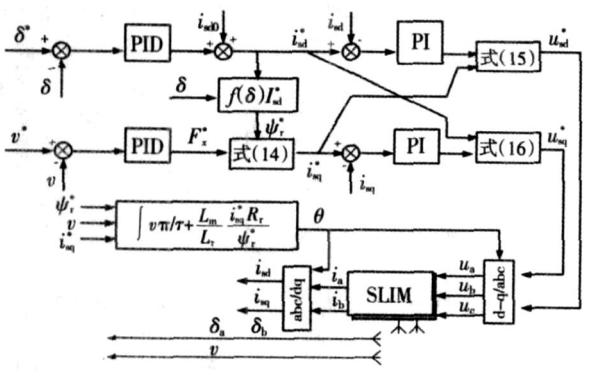

图 4 控制系统框图

Fig 4 Block diagram of control system

4 实验结果分析

在研制的一台悬浮牵引兼用感应直线电机模型车上进行实验,实验结果如图 5～图 8所示。

实验过程中,车辆经历了静止起浮、均匀加速、恒速前进、减速停车、静止落下 5个阶段。为减小悬浮非线性影响,d轴的前馈电流设为 6 A。图 5中以起浮点为时间起点,在 0～3 s,随着模型车的起浮,电机气隙从 6 mm变为 4.2 mm,在起浮过程中,电机的电流较大,最大起浮电流约为 14.5 A;当电机悬浮稳定后,d轴电流基本保持恒定,由于轨道侧面部分区段加工不平整,电机 A受导向轮和轨道摩擦影响,d轴电流有一定波动。模型车由静止匀速下落的过程中,间隙逐渐加大,电机电流有一个峰值出现,最大值约为 13.5 A。

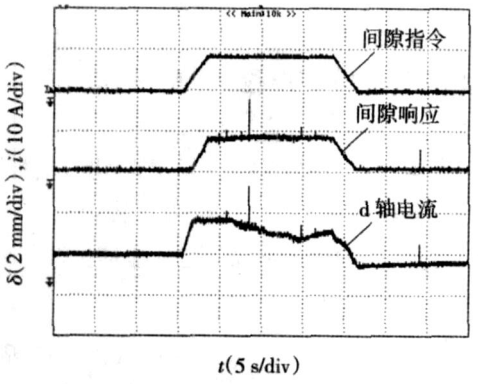

图 5 电机 A的悬浮间隙和 d轴电流

Fig 5 Levitation gap-length and i_d of SLM-A

图 6中以起浮点为时间起点,在 0～3 s,电机气隙从 6 mm变为 4.2 mm;起浮过程中,电机最大起浮电流约为 14 A;模型车悬浮稳定后,d轴电流基本保持恒定为 10 A(含 6 A前馈值)。同 A电机一样,模型车由静止匀速下落的过程中,间隙逐渐加大,电机电流有一个峰值出现,最大值约为 12.5 A。

图 7表示稳定悬浮后的牵引过程。当电机静止悬浮的时候,电机 q轴电流为零。当电机在悬浮状态下向前推进时,由于悬浮状态下的摩擦力很小,需要的牵引力也很小,故整个牵引过程中的最大 q轴电流仅约为 1.5 A,牵引最大速度 0.15 m/s。由此可知,q轴电流在整个悬浮牵引过程中都远小于 d轴电流。

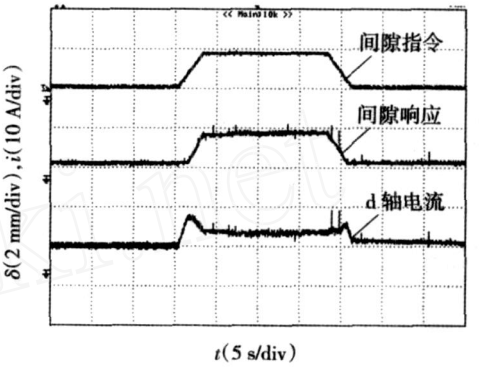

图 6 电机 B的悬浮间隙和 d轴电流

Fig. 6 Levitation gap-length and i_d of SLIM-B

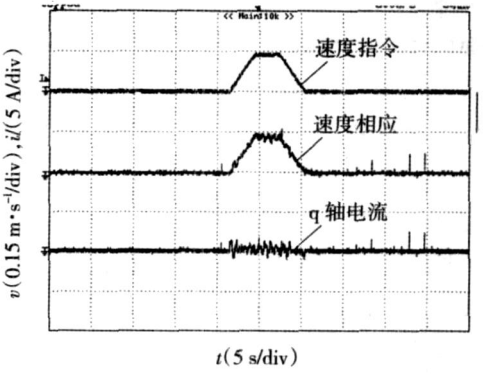

图 7 小车速度和电流变化曲线

Fig. 7 Vehicle velocity and current curve

图 8表示前后 2台电机的电流。模型车在起始悬浮后的 6s开始牵引运行,牵引运行时最大频率为 7 Hz。匀速运行 3 s后,开始制动,3 s后停止牵引运行。由相电流波形可以看出,当电机静止悬浮时,相电流为直流电,仅提供悬浮力。牵引运行结束后,电机电流只有 d轴的直流,根据停止牵引的时刻,停止牵引后电机 A的 a相电流基本为零,电机 B的 a相电流约为 7 A。电机某相电流在停止牵引时的电流大小由停止牵引瞬间初级电流向量大小和角度共同决定。

实验结果表明,2台电机的实际气隙能够较好地跟随指令输入,在车辆加减速运行过程中,气隙的控制精度约为 ±0.2 mm。在小车侧面受到一定的摩擦力干扰时候,前后 2台电机气隙变化仍然一致,电机的俯仰运动得到有效抑制。尽管小车的运行速度较低,小车实际运行速度在大部分时间内都能很好地跟踪给定值,仅在局部出现小的波动。

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

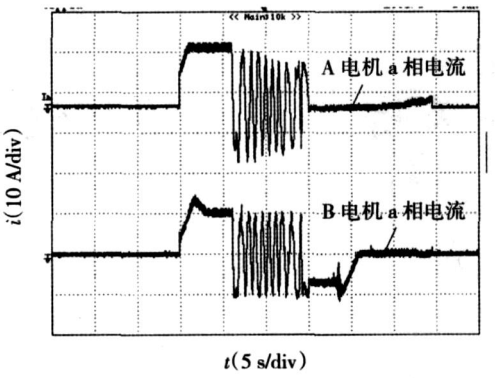

图 8　电机 A和 B的初级 a相电流

Fig 8　Primary curent of SLM A and B(phase a) (10 A/div)

5 结　语

分析了单边直线感应电机气隙磁密分布,牵引力、法向力与电流和磁链的关系,提出了一种基于间接次级磁场定向的单边直线感应电机法向力和牵引力解耦控制方法。在没有悬浮电磁铁的情况下,仅仅独立控制直线电机的法向力和牵引力实现了车辆的稳定悬浮和牵引。结果表明,利用该方法能控制基于单边直线感应电机的悬浮牵引稳定运行,悬浮气隙和速度均能较好的跟踪给定指令。提出的控制方案可为直线感应电机的高效驱动提供重要参考。

参 考 文 献:

[1] MASADA E, FUJISAKI K, XU C. Voltage-fed inverter with single-sided linear induction motor for railway traction[C]//*Proceedings of International Conference on Electric Machines*, Laussane, September 18 - 21, 1984: 534 - 537.

[2] YOSHIDA K, SHI L, YOSHIDA T. A proposal of decoupled control of attractive-normal and thrust forces in a slim for maglev vehicle[C]//*Proceedings of the 6th International Conference on Electrimacs*, Lisboa, Portugal, September 14 - 16, 1999: 221 - 226.

[3] TAKAHASHI Isao, IDE Yuji. Decoupling control of thrust and attractive of a lim using a space vector control[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1993, 29(1): 565 - 570.

[4] RATHORE A K, MAHENDRA S N. Decoupled control of attraction force and propulsion force in linear induction motor drive [C]//2003 *IEEE International Conference on Industry Technology*, Maribor, Slovenia, December 10 - 12, 2003, 1: 524 - 529.

[5] GASTLI A. Asymmetrical constants and effect of joints in the secondary conductors of a linear induction motor[J]. *IEEE Transactions on Energy conversion*, 2000, 15(3): 251 - 256.

[6] 张广溢. 直线电机静态纵向边端效应研究[J]. 电工技术学报, 1999, 14(10): 18 - 20.
ZHANG Guangyi. Research on the static longitudinal end effect of linear electric machine[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 1999, 14(10): 18 - 20.

[7] KANG G, NAM K. Field-oriented control scheme for linear induction motor with the end effect[J]. *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, 2005: 1565 - 1572.

[8] 任晋旗,李耀华,王珂. 动态边端效应补偿的直线感应电机磁场定向控制[J]. 电工技术学报, 2007, 22(12): 61 - 65.
REN Jinqi, LI Yaohua, WANG Ke. Indirect field oriented control of linear induction with end effect compensation[J]. *Transactions of China Electro Technical Society*, 2007, 22(12): 61 - 65.

[9] 焦留成,汪旭东,袁世英. 直线感应电机的优化设计研究[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 81 - 83.
JIAO Liucheng, WANG Xudong, YUAN Shiying. Study on optimal design of linear induction motor [J]. *Proceedings of the CSEE*, 1999, 19(4): 81 - 83.

[10] 卢琴芬,方攸同,叶云岳. 大气隙直线感应电机的力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 132 - 136.
LU Qinfen, FANG Youtong, YE Yunyue. A study on force characteristic of large air gap linear induction motor[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(21): 132 - 136.

[11] SHI Liming, HE Jinwei. Parameter identification for vector control in combined levitation and propulsion SLM[C]//*The 6 th International Symposium on Linear Drives for Industrial Applications*, Lille, France, September 16 - 19, 2007: 83 - 86.

[12] SHI Liming, HE Jinwei. Parameters calculation and normal-and-thrust forces control in SLM[C]//*33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Taipei, Taiwan, November 5 - 8, 2007: 1204 - 1207.

[13] MASADA E, KAWAMURA A. Rotational motion of the short-stator in the single-sided linear induction motor[C]//*International Conference on Electrical Machine*, Athens, Greece, September 15 - 17, 1980: 117 - 124.

[14] DRAGO Dolinar, GORAZD Stumberger, BOJAN GrCar. Calculation of the linear induction motor model parameters using finite elements[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1998, 34(5): 3640 - 3643.

[15] 佘龙华. 多级串联悬浮电磁铁的动态控制模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(7): 166 - 168.
SHE Longhua. The dynamic control model research of serial multi-pole levitation electro - magnets[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(7): 166 - 168.

[16] 徐正国,徐绍辉,史黎明,等. 电磁型混合磁极直接自适应模糊悬浮[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(18): 157 - 161.
XU Zhengguo, XU Shaohui, SHI Liming, *et al*. Study on direct fuzzy control adaptive control for hybrid magnets on EMS maglev system[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(18): 157 - 161.

(编辑:张诗阁)

© 1994-2009 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net