

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.018

# 初级分段连续布置垂动 PMLSM 运行特性研究\*

朱 军,李香君,吴宇航,王 栋

(河南理工大学 电气工程与自动化学院,河南 焦作 454000)

**摘要:**针对初级分段连续布置永磁直线同步电机(PMLSM)垂直提升系统段间过渡会对 PMLSM 整体性能产生不利影响的问题,利用有限元分析法研究初级分段连续布置垂动 PMLSM 运行特性,建立了符合现有样机的垂动 PMLSM 独立单元电机(16P15S)和初级分段连续布置 PMLSM 二维有限元模型,确定了 PMLSM 单元电机的参数以及电源在不同频率(6Hz、14Hz、25Hz)时的功角特性、功角电流特性,分析了单元电机在连续布置时同功角、不同段间间隙(0、0.5mm、1.5mm)时的推力波动情况及反电势状况。研究表明:PMLSM 低频运行时,电枢电阻作用与频率成反比,易引起失步;PMLSM 单元电机轻载时电枢电流出现拐点,拐点两侧负载变化均使电枢电流增加,正常工作域时,电流较小,功率因数和效率较高。

**关键词:**垂直运行;初级分段连续布置;PMLSM;单元电机;功角特性;推力波动

中图分类号:TH39;TM30

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)07-0867-06

## Operation characteristics of vertical hoisting system about primary section continuous layout PMLSM

ZHU Jun, LI Xiang-jun, WU Yu-hang, WANG Dong

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Aiming at the period of transition will bring an adverse effect to the overall performance about the primary section continuous layout permanent magnet linear synchronous motor (PSCL-PMLSM) of vertical lift system, the working characteristics of PSCL-PMLSM was studied by using Finite element method, the independent unit machine and PSCL-PMLSM 2D FEM was established in accordance to the existing prototype, both parameters of PMLSM unit machine and characteristics of power-angle, angle-current were determined at different power frequencies(6 Hz, 14 Hz, 25 Hz), the thrust ripple and back EMF were analyzed at the same power-angle between different sections gap(0 mm, 0.5 mm and 1.5 mm). The results indicate that: PMLSM run in low frequency, the armature resistance is inverse proportional to the frequency, so it's easy to step out. The unit machine of PMLSM in light load, the armature current appears inflection point, the armature current increase on both sides of the inflection point, so in normal operation area, the current is low, the power factor and efficiency are high.

**Key words:** vertical transportation; primary section continuous layout(PSCL); permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); unit machine; power-angle characteristics; thrust ripple

## 0 引 言

随着人口的增加和地表浅层资源的日益枯竭,高层

建筑不断向空中延伸,矿山开采不断向深层和超深层地下延伸,由永磁直线同步电机(PMLSM)直接驱动的新型无绳提升系统因其具有推力密度大、系统效率高、提

收稿日期:2016-01-27

**基金项目:**中国煤炭工业协会科学技术研究项目(MTKJJ2012-376);河南省高校基本科研业务费专项资金资助项目(NSFRF140115);河南省教育厅科学技术重点研究项目(12A4700);河南理工大学博士基金资助项目(B2011-104)

**作者简介:**朱 军(1984-),男,内蒙古兰察布人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事特种电机驱动与控制方面的研究. E-mail: zhujun@hpu.edu.cn

升速度快、提升高度无限制、空间利用率高、安全性能好等一系列优势,受到大量学者的广泛关注与研究。<sup>[1]</sup>

对于由 PMLSM 驱动的无绳提升系统,文献[2-4]提出分段式垂直运动 PMLSM 的设计、建模、参数分析;文献[5]为 PMLSM 优化设计提供了方法,文献[6]提出双边长定子型 PMLSM,并采用 2D 有限元法对其进行最优化设计和电磁力分析。直线电机由于两端开断,端部效应不可忽视,推力波动明显增大,可以从电机本体和电机控制策略 2 个方面采取措施,<sup>[7]</sup>电机本体方面,文献[8]以 8 极 9 槽和 4 极 6 槽为例,对 LSM 和 PMLSM 的推力和推力波动情况进行了对比分析。针对端部效应,文献[9]采用斜磁极和辅助齿的方法,用 3D 有限元法来分析定子不连续电枢 PMLSM,文献[10]采用辅助极的方法,并且推导出磁极的位置和宽度,然后分析了 5 种典型的极槽组合。控制方面,文献[11]采用模糊控制和 PID 相结合的方法来研究 PMLSM 伺服系统,文献[12]针对常规 PI 动态响应慢、输出超调量大等问题,提出模糊自适应 PI 速度控制器,文献[13]采用矢量控制和基于虚拟仪器的 SVPWM,搭建 PMLSM 仿真平台,文献[14]分析段间推力波动机理,提出采用双逆变器交替供电,定子段间电流同步跟踪控制来减小各段间电流差异,提高系统动态性能。在 PMLSM 的安全性能上,文献[15-16]分析了分段式 PMLSM 提升系统的失电保护。文献[17]采用双模态模糊控制,以功角为控制量,改变电压和电机运行速度,来预防电机发生失步带来的危险。

分段式 PMLSM 垂直提升系统可分为初级分段连续布置和初级分段不连续布置,均由单元电机组组合而成,便于加工制造,方便组装拆卸、易于维护、节能、应用范围灵活等。大量参考文献中的垂直提升系统,为了减小推力波动,初级段间间隙设为极距的 2-3 倍;或是初级分段连续布置,没有任何段间间隙。目前,关于初级分段连续布置的垂动 PMLSM 样机鲜有报道,垂动 PMLSM 在安装过程中,单元电机连续布置理论上可认为紧密相邻,但实际上段间微小间隙是不可避免的,从而影响 PMLSM 整体性能。为此通过研究两台紧密相邻的单元电机在段间过渡时的运行特性,可以为提高垂动 PMLSM 的整体运行性能提供参考条件。

鉴于此,本研究结合河南理工大学直线电机与现代驱动研究所第三代垂直提升用家用电梯实验样机开展研究。首先,分析 16 极 15 槽(16P15S)单元电机在不同频率时的功角力特性和功角电流特性。其次,笔者研究单元电机在同功角、不同段间间隙时的推力波

动情况,以段间间隙为 0.5 mm、运行频率为 14 Hz、同步运行速度为 0.63 m/s 为例分析其反电势、功角力特性,并与单元电机的特性进行对比分析。

## 1 单元电机参数及模型结构

### 1.1 分数槽集中绕组单元电机参数

在实际的电机生产中总是希望有较高的绕组系数、较低的齿槽转矩和转矩波动、较低的噪声、较小的损耗和较高的效率以及安装的灵活性等。<sup>[18-19]</sup>因此进行分段式 PMLSM 设计,首要考虑的是单元电机的极槽配合问题,为了减小推力波动,减少用铜量,增大单位面积的出力,根据实际的运行方式选择不同的极槽配合和线圈嵌放方式,本研究采用分数槽集中绕组。直线电机采用分数槽绕组,可以解决极数多槽数有限的矛盾。本研究垂直提升用 PMLSM,单元电机为 16P15S,其结构参数如表 1 所示。

表 1 16P15S 单元电机样机结构参数

初级	参数值/mm	次级	参数值/mm
总长	360	背铁高	12
齿宽	16	永磁体长	70
齿高	20	永磁体宽	20
初级总高	0.8	永磁体高	11
导线裸径	0.06	极距	22.5
漆膜厚度	0.06	初次级气隙	33

其计算参数如表 2 所示。

表 2 16P15S 单元电机样机计算参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
电枢电阻( $\Omega$ )	7.97	短距系数	0.995
端部漏感(H)	0.007 6	分布系数	0.957
每槽最多导体数(匝)	216	绕组系数	0.951
实际放置导体数(匝)	194	反电势常数	112
槽满率	0.89	单元电机力常数	168

由表 2 可知,此 16P15S 单元电机样机计算参数具有较高的槽满率、较大的绕组系数、电机力常数等,这可以有效的节省用铜量、降低成本,增大电机的出力。

### 1.2 单元电机槽电势星形图及结构特点

该单元电机的显著特点是:

(1)采用分数槽集中绕组,即 1 个齿上套 1 个线圈,不仅可以最大限度的降低绕组端部长度,也在很大程度上改善气隙磁密、抑制推力波动、解决系统运行平稳性等问题,绕组端部无交叉重叠,有效减小用铜量,有利于减小成本,简化嵌线工艺和接线,有较高的绕组系数;

(2)初级槽距(24 mm)与极距(22.5 mm)接近,该配合模式可有效抑制电磁推力的波动,并能保证高推

力密度;

(3)极数相对较多,可以改善气隙磁场的正弦性,有效抑制端部效应,减少振动和噪音。

本研究中的单元电机槽电势星形图如图 1 所示。

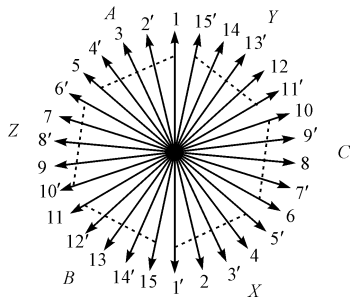


图 1 槽电势星形图

S(1,2,3...15)—实际的槽;S'—虚槽

由槽电势星形图可知,其仅与槽数有关、与极数无关。因此,槽电势星形图可以表示同一槽数不同极数的分数槽单元电机,由于槽距角不一样,线圈放置顺序不同,本研究中 1 号槽在 A 相带,A 相共有 5 个线圈,6 号槽在 C 相带,因此线圈嵌放顺序为 A、C、B,此单元电机线圈排列次序为 aAAaaAAaaAcCCccCCccCbBBbbBBbbB,其中,小写字母代表电流方向为出,大写字母代表电流方向为进,线圈通入三相互错 120° 正弦交流电。

## 2 单元电机功角特性

功角特性是 PMLSM 最重要的特性,通过功角的变化来适应不同的负载。传统旋转电机,由于  $R_s \ll X_T$ ,因此功角特性是简单的正弦函数,如下式所示:

$$F_{em1} = \frac{nE_0 U_s}{v_s X_T} \sin\theta \quad (1)$$

PMLSM 由于磁路开断、运行频率低、电枢电阻压降的作用会显著增大,电机绕组的漏阻抗比同步电抗大很多,考虑漏阻抗效应,此时沿用传统的功角特性已不合适,PMLSM 推力如下式所示<sup>[20]</sup>:

$$\begin{aligned} F_{em2} &= \frac{nE_0 I_p}{Z^2 v_s} = \frac{nE_0}{Z^2 v_s} [(U_s \cos\theta - E_0)R_s + X_T U_s \sin\theta] \\ &= \frac{nE_0 U_s}{Z v_s} \sin(\theta + \alpha) - \frac{nE_0^2 R_s}{Z^2 v_s} \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $n$ —相数, $E_0$ —空载反电势, $U_s$ —外加电枢绕组电压, $R_s$ —电枢电阻, $X_T$ —电枢电抗, $Z$ —电枢阻抗, $v_s$ —同步运行速度, $\theta$ —PMLSM 功角。

由 PMLSM 推力公式(1,2)可知,较传统旋转电机的功角特性相比,直线电机功角向左平移  $\alpha = \arctan(R_s/X_T)$  电角度,向下平移  $\beta = mE_0^2 R_s/(Z^2 v_s)$  距离。

考虑实际运行工况,假设初级无限长,赋偶对称边界条件。在保证提升能力的前提下,尽可能减小电机的轴向长度(此单元电机轴向拉伸 70 mm),降低法向力,抑制固有法向吸引力对系统性能的影响,而提升能力的提高通过增加单元电机的台数来实现。

本研究采用改变电源的初始相位角来改变 PMLSM 的功角,功角获得方法如下:

- (1) 断开电源,仿真可得在不同频率时的反电势;
- (2) 设置不同的初始相位角,使得转矩为 0;
- (3) 由反电势和转矩为 0 时的角度,经傅里叶分析得到 PMLSM 单元电机的功角  $\theta$ 。

通过功角的变化来适应不同的负载,不同频率下单元电机的运行参数如表 3 所示。

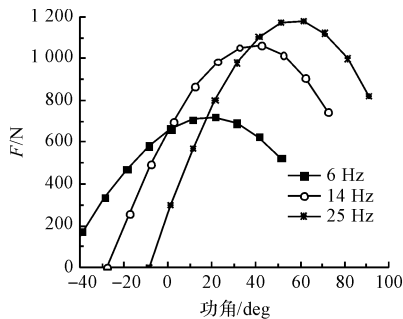
表 3 不同频率下单元电机的运行参数

参数名称	参数值	参数值	参数值
电源频率/Hz	6	14	25
同步速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0.27	0.63	1.125
初始相位角/deg	-80	-60.6	-43.2
不同功角下的最大推力/N	718.5	1062	1120

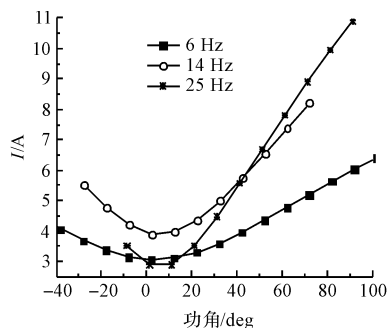
## 3 仿真结果分析

### 3.1 16P15S 单元电机功角特性分析

本研究建立 16P15S 单元电机 2D 有限元模型,分析其不同电源频率(6 Hz、14 Hz、25 Hz)时的功角力特性、功角电流特性如图 2 所示。



(a) 6 Hz、14 Hz、25 Hz 时的功角力特性



(b) 6 Hz、14 Hz、25 Hz 时的功角电流特性

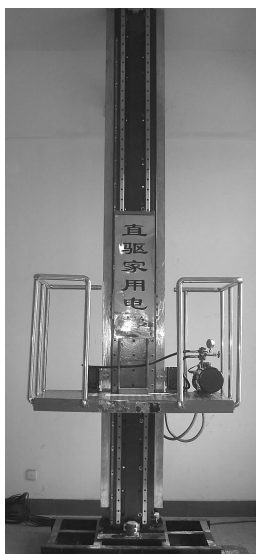
图 2 单元电机不同电源频率时功角力、功角电流特性

由图 2(a)可知,6 Hz、14 Hz、25 Hz 对应的转矩为 0 时的功角分别为  $-47.89^\circ$ 、 $-27.68^\circ$ 、 $-8.68^\circ$ ,运行频率越低,电阻作用越明显,功角向左平移的电角度越多,向下平移的距离越多,对应的最大电磁推力越小,最大电磁推力时的功角越小,越容易引起失步。因此,为了改变低频推力特性,需要提高低频运行时的输出电压,以产生足够的电磁推力,防止正向运行时电机发生失步现象,进而提高系统的安全性能。

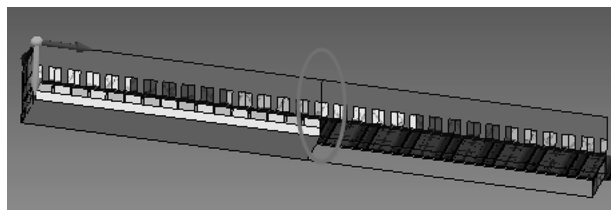
由图 2(b)所示,发现轻载时电枢电流出现拐点,拐点两侧负载减小或增加,电枢电流均增加。考虑 1.2-1.3 的过载倍数,在电机正常工作区域时的功角较小,此时对应的电流较小,则相应的损耗较小,功率因数和效率就会较高;功角过大时,电枢电流较大,电磁推力出现拐点数值并不是很大,并且此时单元电机出现较多地方的饱和,不利于电机的出力和功率因数的提高。

### 3.2 两段初级不同段间间隙时推力波动情况

由单元电机组合而成的初级分段连续布置垂动 PMLSM 样机及考虑段间间隙的 2D 有限元模型如图 3 所示。



(a) 提升系统样机



(b) 考虑段间间隙的二维有限元模型

图 3 垂直提升系统样机及二维有限元模型

微小间隙是不可避免的,本研究在同初始相位角、同功角下,分析其在 0、0.5 mm、1.5 mm 下的推力波动情况,2 段初级采用段间同步供电控制,即通过逆变器为相邻两段定子提供幅值和相位均相同的驱动电流,使 2 段定子内的磁场同步来减小段间推力波动,不同段间间隙时的推力如图 4 所示。

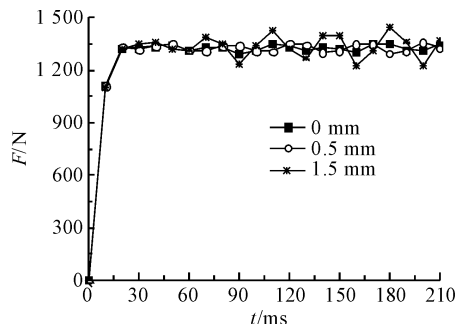


图 4 2 段初级不同段间微小间隙时的推力

由图 4 推力波动情况可以直观地看出,2 段初级间,段间间隙越大,推力波动越大。段间间隙分别为 0、0.5 mm、1.5 mm 时,段间推力波动分别为  $1356 \pm 40$  N、 $1325 \pm 54$  N、 $1344 \pm 139$  N,1.5 mm 较 0.5 mm 时的推力情况波动明显增大。由于初级齿槽的存在及磁路开断,造成初级铁芯磁阻变大,磁阻力变大,进而引起电机的推力波动、振动和噪音,尤其在低速区,恶化电机的性能。在安装时,应尽量提高安装精度,减小推力波动。造成推力波动的原因有很多,可以从电机本体设计和电机控制策略等方面来抑制磁阻力。

### 3.3 段间间隙为 0.5 mm 时的反电势

初级分段垂动 PMLSM 2 段初级段间间隙为 0.5 mm、运行频率为 14 Hz、同步运行速度为 0.63 m/s 时,两段单元电机运行时的空载反电势如图 5 所示。其中,动子离开第一段初级时各相反电势如图 5 所示。

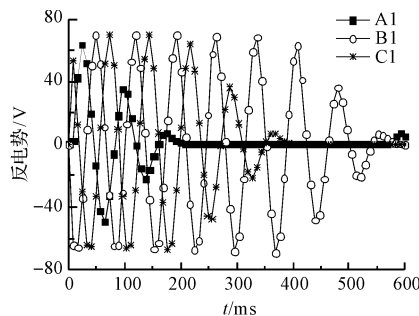


图 5 动子逐渐离开初级时反电势

随着动子逐渐离开与之相耦合的第一段初级,

如图 3(b)圈中所示,2 段初级之间安装时的段间

耦合面积越来越小,反电势也在逐渐减小,A1、C1、B1相分别在190.5 s、381 s、571.5 s时减小至0。动子离开第二段初级进入下一段初级的反电势如图6所示。

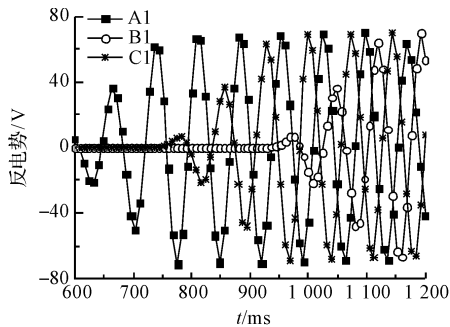


图6 动子逐渐进入下一段初级时反电势

随着耦合面积的增加,反电势也在不断地增加,在两段初级之间过渡时,反电势之间没有大的波动。将两段初级之间对应相反电势相互叠加,反电势如图7所示。

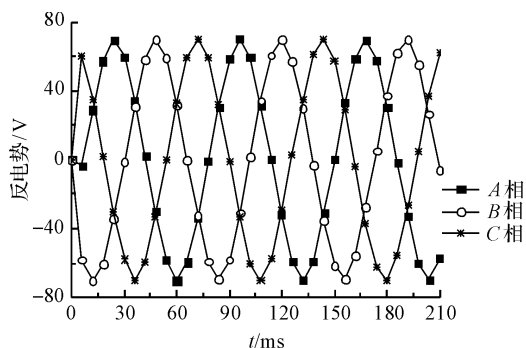


图7 两段单元电机段间间隙0.5 mm时的空载反电势叠加后,相位互差120°电角度,正弦性较好。

### 3.4 段间间隙为0.5 mm时的功角力特性与单元电机对比分析

初级分段连续布置单元电机段间间隙为0.5 mm时和单元电机在同频率、同速度时的功角力特性如图8所示。

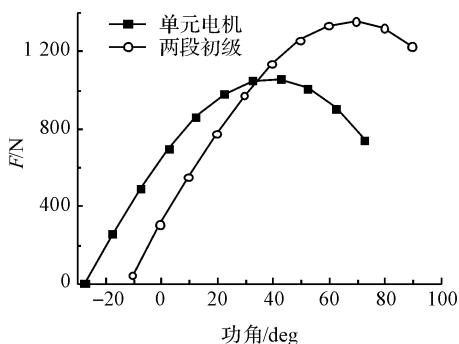


图8 段间间隙0.5 mm与单元电机的功角力特性

单元电机段间间隙为0.5 mm时,功角由-26.68°变为-10.6°,随着段间间隙的增加,电阻作用越来越不明显,功角向左偏移的电角度越少。

## 4 结束语

本研究运用有限元方法,建立了垂直提升用PMLSM单元电机及2段初级1段次级的二维有限元模型,分析了16P15S单元电机的功角力特性、功角电流特性,结合实际安装时的情况,分析了2段初级1段次级在不同段间间隙下的推力波动情况。由以上分析可得如下结论:

(1)由功角曲线可知,当供电电源频率分别在6 Hz、14 Hz、25 Hz时,功角较传统电机分别向左平移-47.89°、-27.68°、-8.68°电角度,表明PMLSM低频运行时,电枢电阻作用与频率成反比,运行频率越低,电阻作用越明显,功角向左平移的越多,对应的最大电磁推力越小,越容易引起失步,为改变低频推力特性,需要提高低频运行时的输出电压,以产生足够的推力,防止正向运行时电机发生失步现象。

(2)由PMLSM单元电机功角电流特性,发现轻载时电枢电流出现拐点,拐点两侧负载减小或增加,电枢电流均增加,在电机正常工作区域,电流较小,相应的损耗就越低,功率因数和效率较高,并且齿尖不易饱和,有利于电机的出力,功率密度高。

(3)实际安装时,推力波动随着段间间隙的增加,以极距为周期波动,间隙越大,波动越明显,段间间隙为0、0.5 mm、1.5 mm时,段间推力波动分别为 $1\ 356 \pm 40$  N、 $1\ 325 \pm 54$  N、 $1\ 344 \pm 139$  N,由此,对提升精度要求较高的场合,应提高安装精度,尽可能的减小段间间隙,从而减小震动和噪声,在低速区,提升电机的运行性能。

### 参考文献 (References):

[1] 汪旭东,封海潮,许宝玉,等. PMLSM垂直提升系统的应用研究[C]//全国直线电机、现代驱动及系统学术年会. 焦作:中国电工技术学会,2010:7-15.

[2] 王淑红,熊光煜.分段式垂直运动永磁直线同步电动机的设计[J].煤炭学报,2010,35(3):520-524.

[3] 王淑红,熊光煜.垂直运动分段式永磁直线同步电动机建模[J].中国电机工程学报,2010,29(12):204-209.

[4] 王淑红,吴攀,熊光煜.分段式永磁直线同步电动机参数分析[J].煤炭学报,2012,37(10):516-520.

- [5] 黄立人. 垂直运输系统永磁直线同步电机优化设计[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2015.
- [6] Sang-Geon Lee, Sung-An Kim, Subrato Saha, et al. Optimal Structure Design for Minimizing Detent Force of PMLSM for a Ropeless Elevator[J]. **Magn-Etics IEEE Transactions**,2014,50(1):5-10
- [7] 司纪凯,王海星,许孝卓,等. 永磁直线同步电机建模、特性分析及推力控制[M]. 北京:中国矿业大学出版社,2014.
- [8] SHOHEI OSHIMA, SHUNJI TAHARA, KOKICHI OGAWA. Thrust and thrust ripple of linear reluctance motor compared with PMLSM[C]//Electrical Machines and Systems(ICEMS),2012 15th International Conference, sapporo; IEEE,2012;1-4
- [9] EUI-JONG PARK, YONG-JAE KIM, SANG-YONG JUNG, Edge Effect Minimization of Stationary Discontinuous Armature PMLSM using Skewed Magnets and Stair Shape Auxiliary Teeth[C]//Electrical Machines and Systems(ICEMS), 2013 International Conference, Busan; IEEE, 2013: 1958-1961.
- [10] H. ZHANG, B. KOU, Y. JIN, et al. Investigation of Auxiliary Poles Optimal Design on Reduction of End Effect Detent Force for PMLSM with Typical Slot-pole Combinations [J]magnetics IEEE Transactions on,2015,51(11):1-1.
- [11] Juan WANG. Application of fuzzy PID control in PMLSM servo drive system [C]// Mechatronics and Automation (ICMA). 2015 IEEE International Conference, Beijing; IEEE,2015;6-10.
- [12] 杨自龙,叶云岳,卢琴芬. 永磁直线伺服系统模糊 PI 速度控制器研究[J]. 机电工程,2014,31(2):213-216.
- [13] LIANG WEN, JIAN XUN JIN. A platform for PMLSM using field oriented control and SVPWM based on virtual instrument[C]. Applied suppercondiutivity and Electionagnetic Derices CASEMD, 2013 IEEE Intertion conference, Beijing; IEEE,2013;9-13.
- [14] 李立毅,祝 贺,刘家曦,等. 初级绕组分段永磁直线电机段间推力优化控制[J]. 电机与控制学报,2014,18(4):79-87.
- [15] 司纪凯,陈 昊,袁世鹰,等. 分段初级永磁直线同步电机提升系统失电保护分析[J]. 煤炭学报,2008,33(7):826-830.
- [16] 张宏伟,余发山,王新环,等. 多定子永磁同步直线电机绕组切换故障特性研究[J]. 电机与控制学报,2015,19(3):37-40.
- [17] 王福忠,袁世鹰,荆鹏辉. 垂直运行 PMLSM 的失步预防策略研究[J]. 煤炭学报,2010,35(4):696-700.
- [18] 刘 军,汪全虎,陈敏祥. 基于滑模变结构 MRAS 的 PMSM 速度辨识[J]. 轻工机械,2014,32(5):47-50.
- [19] 谭建成. 三相无刷直流电动机分数槽集中绕组槽极数组合规律研究(连载)[J]. 微电机,2007,12(4):72-86.
- [20] 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):38-41.

[编辑:张 豪]

## 本文引用格式:

朱 军,李香君,吴宇航,等. 初级分段连续布置垂动 PMLSM 运行特性研究[J]. 机电工程,2016,33(7):867-872.

ZHU Jun, LI Xiang-jun, WU Yu-hang, et al. Operation characteristics of vertical hoisting system about primary section continuous layout PMLSM[J]. Journal of Mechanical &amp; Electrical Engineering, 2016,33(7):867-872.

《机电工程》杂志:http://www.meem.com.cn