

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.10.016

# 一种大推力凸极永磁直线同步电机特性分析\*

汪旭东,翟中飞,许孝卓,孙伟翔,师宇飞  
(河南理工大学 电气学院,河南 焦作 454000)

**摘要:**针对现有永磁直线同步电机(PMLSM)推力密度较低的问题,提出了一种凸极 Halbach 永磁直线同步电机(SH-PMLSM)的设计方案。首先,提出了凸极 Halbach 永磁直线电机的拓扑结构,基于有限元分析了该型电机的次级磁场分布,确定了电机初级绕组方案,在旋转电机尺寸关系基础上,确定了该电机的主要尺寸;其次,建立了 SH-PMLSM 的 16 极 15 槽单元电机的模型,分析了该型电机的电磁特性;最后,在等永磁体用量、相同的初级和气隙条件下,将其与隐极式永磁直线电机(S-PMLSM)进行了对比,并分析了凸铁高度和宽度以及永磁体磁化方向对 SH-PMLSM 性能的影响。研究表明:SH-PMLSM 单元电机具有更大的推力密度,输出推力比隐极 PMLSM 提高了 10.61%;借助 Halbach 阵列具有的磁屏蔽性,SH-PMLSM 改善了常规凸极永磁直线电机存在的漏磁较大、推力不足的问题。

**关键词:**凸极 Halbach;永磁直线电机;有限元;特性分析

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)10-1100-06

## Characteristic analysis of salient pole halbach permanent magnet synchronous linear motor

WANG Xu-dong, ZHAI Zhong-fei, XU Xiao-zhuo, SUN Wei-Xiang, SHI Yu-fei  
(School of Electrical Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of low thrust density of existing permanent magnet linear synchronous motor, a salient pole halbach permanent magnet Linear synchronous motor(SH-PMLSM) was proposed. Firstly, the topology of salient pole halbach permanent magnet linear motor was introduced, based on the finite element method, the secondary magnetic field distribution of the motor was analyzed, the primary winding scheme of the motor was fixed. According as the rotating electrical machine characteristics, the main size of the SH-PMLSM was determined. Secondly, the finite element simulation model of 16 pole 15 slots SH-PMLSM unit motor was established, and the electromagnetic characteristics of the motor were researched. Lastly, under the same condition of permanent magnet dosage, primary winding and air-gap, made comparisons with the S-PMLSM, and the influence of changes of the salient pole's width, height and PM's magnetization direction on the performance of SH-PMLSM was investigated. The simulation results indicate that the SH-PMLSM unit motor has a higher thrust density than S-PMLSM, the thrust of SH-PMLSM increased by 10.61% than S-PMLSM. With good magnetic shielding of Halbach array, the problem of magnetic leakage and low thrust of conventional PMLSM is improved.

**Key words:** salient pole halbach; permanent magnet linear motor; finite element; characteristic analysis

## 0 引言

近年来,随着矿山开采深度的不断延伸,高层建筑不

断向空中延伸,传统曳引提升系统的局限性愈发凸显:

(1)一次性提升高度受到钢丝绳单位长度绳重、钢丝绳强度、根数及安全系数的影响,大部分情况下需

收稿日期:2018-01-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1504506);河南省科技厅科技攻关项目(162102210222)

作者简介:汪旭东(1967-),男,江西景德镇人,教授,博士生导师,主要从事特种电机及其控制、直线驱动系统方面的研究。E-mail:wangxd@

要多级提升<sup>[1]</sup>。且钢丝绳过长易变形,引起轿厢震动严重从而造成提升系统控制困难;

(2)提升速度受钢丝绳缠绕速度所限,无法满足人们对于提升机高度运行的需求<sup>[2]</sup>;

(3)占用大量建筑空间,导致成本巨大<sup>[3]</sup>。

为解决上述问题,亟待提出一种新的提升模式。由于永磁直线同步电机(PMLSM)具有结构简单、力能指标高、动态性能好、功率密度高等优点<sup>[4-5]</sup>,在垂直提升系统领域内,由直线电机驱动的无绳提升系统无疑将是最好的选择。

PMLSM 垂直提升系统取消了传统曳引提升系统的配重,轿厢动力源全部来自于直线电机,这就要求 PMLSM 具有足够大的推力密度,然而,现有的 PMLSM 推力密度较低,仍不能满足实际工业发展的需求,且常规结构的凸极永磁直线同步电机对气隙要求较高,气隙长度小时永磁体有较高的利用率,但气隙长度增大时,漏磁显著增大,电机功率将明显减小<sup>[6]</sup>。因此,开展大推力 PMLSM 的结构创新及电磁特性的研究,对于扩展直线电机垂直提升系统的应用范围具有重要意义。

针对现有的直线电机垂直提升系统所存在的电机推力自重比较低的问题,本文提出一种凸极 Halbach 永磁直线同步电机的设计方案,并对凸铁宽度、高度和永磁体磁化方向对 SH-PMLSM 单元电机性能的影响进行研究<sup>[7]</sup>。

## 1 SH-PMLSM 原理及结构设计

### 1.1 结构原理

常规凸极永磁直线电机结构如图 1 所示。

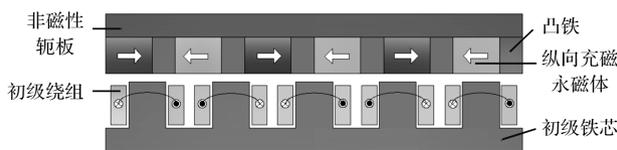


图 1 常规凸极永磁直线电机结构

凸极 Halbach 永磁直线电机如图 2 所示。

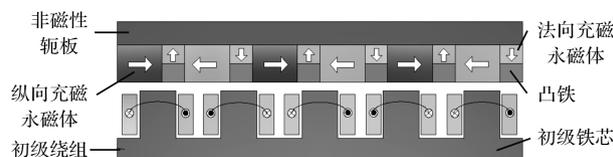


图 2 凸极 Halbach 永磁直线电机结构

本文提出的凸极 Halbach 永磁直线电机为单边电机结构<sup>[8]</sup>,主要分为次级动子和初级定子两大部分,

综合了 Halbach 电机、凸极电机和永磁直线电机的结构和优越性,次级部分由非磁性轭板、永磁体和凸铁构成,次级永磁体的结构是将常规凸极直线电机磁极结构置于 Halbach 阵列中<sup>[9-11]</sup>。

有限元仿真磁场分布如图 3 所示。

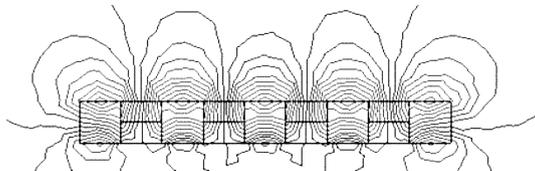


图 3 SH-PMLSM 磁极永磁体结构磁场分布

由图 3 可以看出:绝大部分磁场分布在永磁体结构一侧,而另一侧几乎不受磁场影响,这种特殊的磁场分布改善了常规凸极直线电机受气隙长度约束的情况<sup>[12]</sup>。通过分析,SH-PMLSM 在大气隙的工况下,漏磁较少,相应的推力密度较高,可解决常规凸极结构永磁直线电机在提升系统中推力不足的问题。

### 1.2 初级绕组方案

本文所设计电机采用节距为 1 的分数槽集中绕组。对于直线电机,初级绕组采用分数槽集中绕组有助于提高绕组的分布系数和槽满率,通过合理的设计可以使分数槽集中绕组节距为 1,即每个齿上套一个线圈,线圈端部仅跨过一个槽距,使线圈的总长度和端部伸出长度缩短,从而减少总用铜量,降低铜耗,进而提高电机效率,且端部绕组不会交叠,不用设计相间绝缘<sup>[13]</sup>。

本研究对电机分数槽绕组进行分析,确定该电机极槽配合方式为 16 级 15 槽,绕组系数为 0.951,绕组接线如图 4 所示。

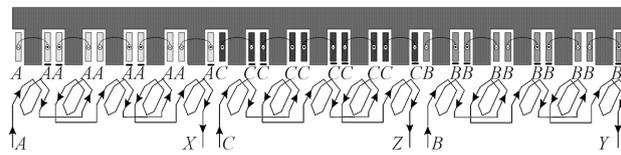


图 4 绕组接线示意图

初级每个齿上嵌套一个线圈,相邻齿上线圈反向串联,5 个线圈串联构成一相,三相间无重叠绕组<sup>[14]</sup>。

本研究在旋转电机尺寸关系的基础上,对直线电机主要尺寸之间的关系进行推导,进而确定该电机纵向长度为 360 mm,电枢计算长度为 70 mm,最后选定该电机所用硅钢为 50W470 型无取向硅钢,选定永磁体材料为钕铁硼<sup>[15]</sup>。

## 2 SH-PMLSM 特性分析

基于有限元,本文搭建凸极 Halbach 永磁直线同步电机单元电机模型,分析其静态特性与稳态特性,并

在等永磁体用量、相同的初级和气隙条件下,与隐极式永磁直线电机(S-PMLSM)进行对比分析,研究不同结构参数对SH-PMLSM 单元电机性能的影响。

### 2.1 静态特性分析

15/16 级 SH-PMLSM 结构参数如表 1 所示。

表 1 15/16 级 SH-PMLSM 结构参数

参数名称	数值	参数名称	数值
槽宽/mm	16	凸铁宽度/mm	11
槽数	15	永磁体高度/mm	15
齿宽/mm	8	永磁体剩磁/T	1.35
槽深/mm	20	极数	16
绕组匝数	194	极距/mm	22.5
气隙长/mm	4	电枢有效长/mm	70

16 极 15 槽凸极 Halbach 永磁直线电机 (SH-PMLSM) 次级由 Halbach 阵列、凸铁极和非磁性轭板构成。电机的磁体结构采取纵向充磁方式,通过两块永磁体之间法向充磁的永磁体将纵向磁场转为法向,电机运行时法向磁场为有效磁场<sup>[16]</sup>。笔者根据表 1 结构参数,通过设置无限长的初级理想边界条件,建立 16 极 15 槽的单元电机模型如图 5 所示。

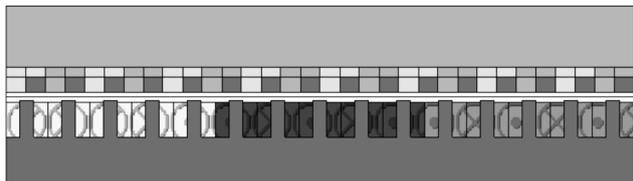


图 5 15/16 极 SH-PMLSM 单元电机模型

本研究通过软件仿真给电机模型赋予同步运行速度  $v = 1.035 \text{ m/s}$ ,求解电机的空载感应电动势  $E_0$ ,空载感应电势 (EMF) 波形如图 6 所示。

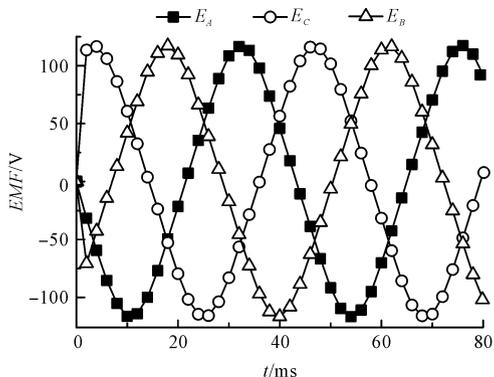


图 6 SH-PMLSM 三相感应电势

ABC 三相空载感应电动势  $E_A, E_B, E_C$  幅值一致 (有效值为 85.9 V),相位互差  $120^\circ$  电角度,正弦度较好,并计算出电机的反电势常数  $K_e$  为:

$$K_e = \frac{E_a}{v} = \frac{85.9}{1.035} = 82.9 \text{ Vp-nrms/m/s.}$$

本研究搭建的隐极型永磁直线同步电机单元电机模型如图 7 所示。



图 7 等永磁体用量条件下的 S-PMLSM 单元电机模型

求解其空载反电势,得到其反电势波形如图 8 所示。

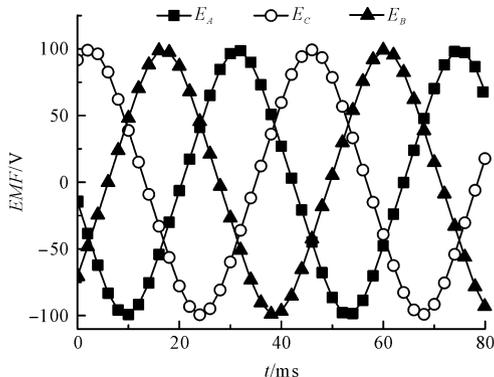


图 8 S-PMLSM 三相感应电动势

对比 SH-PMLSM,结果显示;SH-PMLSM 的电势相对提高了 15.18%,从而使 SH-PMLSM 在相对较小的初级电流情况下具有更大对的推力密度。

### 2.2 稳态特性分析

基于有限元,本研究建立 16p15s SH-PMLSM 单元电机模型,分别求解在 50%、100%、150% 负载下的稳态特性,并得出其在不同负载下的推力。

不同负载下的推力曲线如图 9 所示。

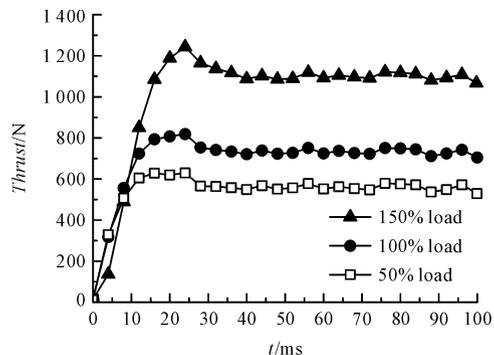


图 9 SH-PMLSM 不同负载下推力波形

从其推力波形上来看,所设计的 SH-PMLSM 至少具有 1.5 倍的过载倍数,并且推力响应较快,但存在一定的推力波动。

在永磁体用量相同、相同的初级结构和气隙条件下,分别对比不同负载角下 SH-PMLSM 与 S-PMLSM 推力、电流、功率因数及效率等稳态特性。稳态特性对

比结果如表(2~5)所示。

表 2 SH-PMLSM 与 S-PMLSM 电机推力特性对比

功角/(deg)	SH-PMLSM 推力/N	S-PMLSM 推力/N
-8	29.24	30.10
2	320.33	290.95
12	578.69	525.60
22	799.89	726.51
32	975.46	885.98
42	1 098.38	997.62
52	1 163.79	1 057.03
62	1 169.15	1 061.90
72	1 114.06	1 011.86
82	1 000.07	908.33

表 3 SH-PMLSM 与 S-PMLSM 单元电机电流特性对比

功角/(deg)	SH-PMLSM 电流/A	S-PMLSM 电流/A
-8	2.81	4.26
2	2.22	3.67
12	2.42	3.48
22	3.21	3.78
32	4.24	4.44
42	5.35	5.30
52	6.47	6.26
62	7.57	7.24
72	8.63	8.23
82	9.64	9.18

表 4 SH-PMLSM 与 S-PMLSM 单元电机功率因数特性对比

功角/(deg)	SH-PMLSM 功率因数	S-PMLSM 功率因数
-8	0.23	0.33
2	0.59	0.51
12	0.90	0.72
22	0.98	0.87
32	1.00	0.94
42	1.00	0.97
52	1.00	0.98
62	0.99	0.98
72	0.99	0.98
82	0.98	0.97

表 5 SH-PMLSM 与 S-PMLSM 单元电机效率特性对比

功角/(deg)	SH-PMLSM 效率/%	S-PMLSM 效率/%
-8	13.8	6.7
2	73.1	48.3
12	80.4	65.2
22	76.4	68.7
32	69.3	66
42	61.3	60.6
52	53.2	53.9
62	45.1	46.7
72	37.1	39.3
82	29.1	31.8

由此可以得出:SH-PMLSM 较 S-PMLSM 在推力、

功率因数、电流、效率特性等方面都有较大提高,笔者选取 1.5 倍过载倍数为额定值,通过分析得出,在额定值附近 SH-PMLSM 的推力比 S-PMLSM 提高了约 10.61%、电流则减小了约 17.34%、功率因数约提高了 12.20%、效率约提高了 11.71%。

### 3 不同参数对 SH-PMLSM 电磁特性的影响

本研究在等永磁体用量前提下,改变 SH-PMLSM 次级凸铁高度和宽度、次级永磁体磁化方向对单元电机进行仿真,分析其对单元电机推力、电流、功率因数、效率等特性的影响,优化电机的性能。

#### 3.1 改变凸铁高度对电机性能的影响

SH-PMLSM 次级永磁体用量不变,本研究改变凸铁高度,仿真得到不同凸铁高度下的电机额定值推力和电流。

不同凸铁高度下的电机额定值推力和电流如表(6,7)所示。

表 6 SH-PMLSM 不同凸铁高度下的额定值推力

凸铁高度/mm	额定值推力/N
7	638.21
7.5	647.33
8	654.17
8.5	672.91
9	677.57
9.5	733.34
10	700.03
10.5	687.56

表 7 SH-PMLSM 不同凸铁高度下的额定值电流

凸铁宽度/mm	额定值电流/A
7	4.05
7.5	3.83
8	3.67
8.5	3.46
9	3.31
9.5	3.03
10	3.12
10.5	3.27

由表(6,7)可以得出:当凸铁高度改变时,SH-PMLSM 额定值的推力及电流变化都在 9.5 mm 处出现了拐点;当电机次级凸铁高度为 9.5 mm 时,额定值的推力达到最大,而对应的电流则为最小。

#### 3.2 改变凸铁宽度对电机性能的影响

SH-PMLSM 等永磁体用量前提下,改变次级凸铁宽度,仿真得到不同凸铁宽度下,单元电机额定值处的推

力、推力波动、电流变化情况,结果如表(8~10)所示。

表 8 SH-PMLSM 不同凸铁宽度下的额定点推力

凸铁宽度/mm	额定点推力/N
7	732.96
8	729.08
9	731.75
10	724.17
11	732.43
12	728.47
13	727.08
14	716.67
15	719.12

表 9 SH-PMLSM 不同凸铁宽度下的额定点推力波动

凸铁宽度/mm	额定点推力波动/%
7	5.84
8	5.81
9	4.50
10	4.75
11	4.83
12	3.84
13	6.37
14	7.35
15	9.39

表 10 SH-PMLSM 不同凸铁宽度下的额定点电流

凸铁宽度/mm	额定点电流/A
7	3.13
8	3.11
9	3.07
10	3.06
11	3.05
12	3.04
13	3.09
14	3.12
15	3.19

由以上数据可得出:改变电机次级凸铁宽度对 SH-PMLSM 推力的影响不大;但结果中推力波动、电流变化则都出现了拐点。综上可得出:当电机凸铁宽度为 12 mm 时,额定点的推力波动及电流都达到最小值。

### 3.3 永磁体磁化方向对电机性能的影响

SH-PMLSM 单元电机次级磁体结构分为上、下两层:一对极下的磁体排列如图 10 所示。

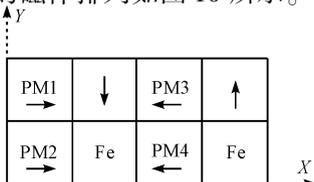


图 10 一对极下的磁体结构

上层永磁体为 Halbach 阵列,由两块 X 方向磁化的永磁体和两块 Y 方向磁化的永磁体构成;下层一对极分别由两块 X 方向磁化的永磁体和两块凸铁交替排列组成。

同时改变下层永磁体 PM2 和 PM4 的磁化偏转角度(15°、30°、45°、60°),如图 11 所示。

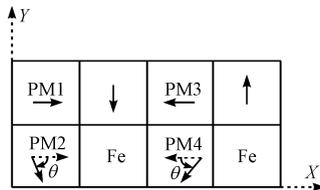


图 11 PM2 和 PM4 磁化角度改变

不同磁化方向下电机额定点的推力如表 11 所示。

表 11 PM2 和 PM4 不同磁化角度下的额定点推力

磁化角度/(deg)	额定点推力/N
0	733.85
15	733.74
30	727.52
45	709.38
60	656.41

由表 11 可知;SH-PMLSM 单元电机推力对 PM2 和 PM4 磁化方向的变化较为敏感,随着 PM2 和 PM4 磁化方向向下偏转,单元电机在额定点的推力降低较为明显。

本研究改变 SH-PMLSM 次级上层永磁体 PM1 和 PM3 的磁化偏转角度  $\theta$ ,PM1 和 PM3 的磁化方向同时偏转(15°、30°、45°、60°),如图 12 所示。

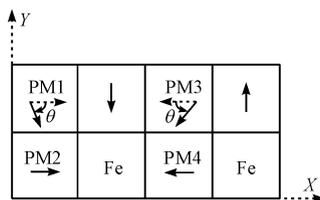


图 12 改变 PM1 和 PM3 磁化角度

SH-PMLSM 单元电机额定点推力如表 12 所示。

表 12 PM1 和 PM3 不同磁化角度下的额定点推力

磁化角度/(deg)	额定点推力/N
0	733.86
15	733.71
30	732.13
45	727.93
60	720.14

由此可见:当 PM1 和 PM3 磁化方向的偏转角度较小时,变化不明显;偏转角度较大时,变化较为明显;总体而言,随着 PM1 和 PM3 磁化方向向下偏转,单元电机额定点推力呈降低趋势。

## 4 结束语

本文提出并研究了一种凸极 Halbach 永磁直线同步电机 (SH-PMLSM), 分析了电机次级凸极 Halbach 永磁阵列结构特点和磁场分布; 对电机分数槽绕组进行了分析, 选定了电机 16 极 15 槽的极槽配合方式; 确定了 SH-PMLSM 的主要尺寸; 基于有限元建立了 SH-PMLSM 的单元电机模型, 分析了该型电机的静态、稳态特性, 以及不同凸铁高度、宽度、永磁体的磁化方向对电机性能的影响。

研究表明: 由于 Halbach 阵列良好的磁屏蔽性, SH-PMLSM 改善了常规凸极永磁直线电机在提升系统中存在的漏磁较大、推力不足的问题。但该新型电机尚有许多方面有待研究, 如推力波动、磁链电感计算、样机制作等。

### 参考文献 (References):

- [1] 杜小强, 梅德庆, 陈子辰. 高速曳引电梯时变元模型与水平振动响应分析[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2009, 43(1): 148-152.
- [2] TAKAHASHI N, YAMADA T, MIYAGI D MARKON. Basic study of optimal design of linear motor for rope-less elevator[C]. 2008 IET 7th International Conference on Computation in Electromagnetics, Brighton: IEEE, 2008.
- [3] AHMET U, LEVENT O. Fuzzy elevator group controller with floor priority constraints[C]. Applied Electronics International Conference, Pilsen: IEEE, 2009.
- [4] WANG Xu-dong, FENG Hai-chao, XU Bao-yu, et al. Research on PM linear synchronous motor for rope-less hoist system [J]. *Journal of Computers*, 2012, 7(6): 1361-1368.
- [5] 刘 泉, 张建民, 王先逵. 直线电机在机床工业中的最新

应用及技术分析[J]. 机床与液压, 2004(6): 1-3.

- [6] HALBACH K. Permanent magnets for production and use of high energy beams[C]. Proceedings of the 8th International Workshop on Rare-earth Permanent Magnets and their Applications, California: Vniversity of Callifornia Berkeley, 1985.
- [7] 李 琛, 章跃进, 井立兵. Halbach 阵列半闭口槽永磁电机全局解析法研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 85-94 + 11.
- [8] 朱焜秋, 陈雷刚, 李亚伟, 等. Halbach 阵列无轴承永磁电机有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(4): 45-49.
- [9] DWARI S, PARSAL L, KARIMI K J. Design and analysis of halbach array permanent magnet motor for high acceleration applications[C]. Electric Machines and Drives Conference, Miami: IEEE, 2009.
- [10] 陈敏祥, 王 帅, 王宗培. 混合式永磁同步电机弱磁性能的研究[J]. 机电工程, 2017, 34(6): 613-616.
- [11] 管兆康, 刘贵杰. 直线式波浪能发电装置设计[J]. 机电工程, 2017, 34(5): 491-497.
- [12] 上官璇峰, 李正修, 蒋思远. 转子槽参数对开槽实芯转子永磁电机的影响研究[J]. 机电工程, 2017, 34(11): 1293-1298.
- [13] Komez A, Wiak S, Rakoczy Z. Investigation of motion dynamics of a galvanizing plant hoist using linear motors [J]. *Scientific Journal of Technical University of Lodz*, 1983(74): 347-356.
- [14] 黄学良, 张 前, 周 赣. 一种无铁 Halbach 型永磁直线电机[J]. 电工技术学报, 2010, 25(6): 1-6.
- [15] 张 鲁, 寇宝泉, 赵斌超, 等. 新型 Halbach 次级结构永磁同步直线电机[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 39-45.
- [16] 李春生, 杜玉梅, 平 畴, 等. 磁浮列车工程中的 Halbach 永久磁体结构的优化[J]. 工程设计学报, 2007, 14(4): 334-337, 348.

[编辑: 李 辉]

### 本文引用格式:

汪旭东, 翟中飞, 许孝卓, 等. 一种大推力凸极永磁直线同步电机特性分析[J]. 机电工程, 2018, 35(10): 1100 - 1105.

WANG Xu-dong, ZHAI Zhong-fei, XU Xiao-zhuo, et al. Characteristic analysis of salient pole halbach permanent magnet synchronous linear motor[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2018, 35(10): 1100 - 1105.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>