

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.06.018

大功率直线感应电机的优化设计研究

崔霆锐¹, 宗立明¹, 李 熙^{1*}, 宋文芳²

(1. 北京市地铁运营有限公司地铁运营技术研发中心, 北京 102208;

2. 哈尔滨泰富电机有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150060)

摘要: 针对北京地铁机场线进口直线电机车辆维修成本高、售后服务迟缓、购买备品备件困难等问题, 开展了具有自主知识产权的大功率强迫风冷式直线感应电机轨道交通车辆的研究。就车辆电机研发过程从理论上推导了直线感应电机修正的 T 型等效电路, 通过有限元分析电磁特性提出了一种新的电磁设计程序算法。在此基础上利用现代电机设计技术, 采用电磁场和电路计算等手段, 对大功率牵引直线电机的电磁参数和机械结构参数进行优化设计和计算。仿真与试验结果表明, 自主研发的国产化直线感应电机具有良好的加减速性能, 其力特性及电特性满足设计要求, 提出的电磁设计程序和控制策略可行。安装了研制电机的直线电机轨道交通样车在各种工况下均能在试验线上可靠稳定运行。

关键词: 直线感应电机; 电磁计算; 优化设计; 城市轨道交通

中图分类号: TH39; TM359.4

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2015)06-0825-05

Optimization design of high-power linear induction motor

CUI Ting-rui¹, ZONG Li-ming¹, LI Xi¹, SONG Wen-fang²

(1. Beijing Subway Operation Technology Center, Beijing 102208, China;

2. Harbin Taifu Electric Co., Ltd., Harbin 150060, China)

Abstract: Aiming at solving the maintenance problems, such as high cost, slow service, difficulties to buy spare parts, of imported vehicles for Beijing Subway Airport Line, the domestic research of subway vehicles with forced air-cooled and high-power linear motor was investigated. Theoretically, a modified T-type equivalent circuit of linear induction motor for subway vehicle was derived. Then a novel program algorithm for electromagnetic characteristics design was proposed with finite element analysis method. On this basis, applying modern motor designing technology, the electromagnetic parameters and mechanical structure parameters for high-power linear motors were optimized by means of electromagnetic and circuit calculation. The simulation and experimental results show that the linear induction motor independent localization researched has excellent acceleration and deceleration performance, and that the strength characteristics and electrical characteristics meet the design requirements. The feasibility of the proposed control scheme is verified. The vehicle installed the linear motor developed can be running reliably and stably in various conditions.

Key words: linear induction motor(LIM); electromagnetic calculation; optimization design; urban rail transit

0 引 言

直线感应电机驱动的轮轨交通已有二十多年的开发历史, 加拿大和日本开发最多, 著名的有加拿大庞巴迪公司开发的温哥华空中列车系统和日本东京地铁的都营 12 号线等。面对国内轨道交通的旺盛需求, 为了发展我国的直线电机轨道交通技术, 迫切需要掌握和形成这种新型轨道交通系统的核心技术和自主创新能力^[1]。

北京地铁机场线 QKZ5 型车辆为庞巴迪公司配套车辆, 维修维护成本较高。国内亟待研制具有自主知识产权的非黏着节电型强迫风冷式直线电机轨道交通车辆。首都机场线直线感应电机的推力~速度特性, 是本课题进行直线感应电机设计需满足的主要特性。其最大推力为 20.25 kN, 额定运行(41 km/h)时推力为 17.2 kN。

针对北京地铁机场线车辆直线感应电机的设计, 本研究以最大牵引效率和最大牵引力系数等为优化目

收稿日期: 2015-01-13

基金项目: 北京市地铁运营有限公司科研资助项目(2014000501081001)

作者简介: 崔霆锐(1982-), 女, 北京人, 工学硕士, 主要从事电力电子与电力传动领域方面的研究. E-mail: cuitingrui007@163.com

通信联系人: 李 熙, 男, 博士后, 高级工程师. E-mail: bjtulx@163.com

标,并提出以下主要要求:

- (1) 按照 750 V 直流母线电压设定电机运行电压;
- (2) 电机推力 ~ 速度特性与首都机场线所用进口电机相同;
- (3) 电机效率与首都机场线所用进口电机相当;
- (4) 电机电流、容量等电气参数与首都机场线所用进口电机相近;
- (5) 电机绝缘等级按照 H 级;
- (6) 机械气隙 9 mm ~ 11 mm;
- (7) 电机次级与首都机场线次级相同;
- (8) 外形及安装尺寸与首都机场线所用进口电机相同。

1 直线感应电机磁场及其基本特性分析

作为直线轨道交通系统的核心部件之一,大功率牵引直线感应电机是一个非线性、强耦合的时变系统,其励磁电感和次级电阻等重要参数随电机速度、气隙长度等而变化,并影响着电机的牵引特性^[2-3]。由于与旋转电机在结构上的不同,直线感应电机存在动、静态纵向端部效应、横向端部效应、边端极“半填充槽”、电磁气隙大、次级反应板集肤效应等问题^[4],其理论分析和特性计算更为困难和复杂,必须采用电磁场分析求解其气隙磁场的解析解,然后才能计算其运行特性。但对于轨道交通直线感应电机,采用 T 型等效电路^[5]进行电机的电磁设计及特性计算是最简便、直接的方法,其突出优点是可以很快完成设计并进行性能仿真,为控制系统设计提供数据。

1.1 直线感应电机修正的 T 型等效电路

对于该系统所研制的直线感应电机来说,为了获得较准确的运行特性,不能忽略其结构所带来的特殊性,因此,需对传统旋转电机 T 型等效电路进行修正^[6]。修正系数采用如下解法:首先从电磁场基本方程出发,建立场量满足的拉氏方程或泊松方程,代入边界条件,求出考虑电机结构特殊性条件下的各区域磁场分布。然后求出由行波电流层传至次级和气隙中的复功率。再利用“场路复量功率相等”的关系推导出虚拟的初级相电势、次级电流、次级电阻、次级漏抗、励磁电抗的求解公式。最后用等效的“端部影响系数” K'_r 、 K'_x 、 C_r 、 C_x 来体现纵、横向端部效应的影响,用集肤效应系数 K_f 体现集肤效应,而“半填充槽”影响是采用等效极对数 p_e 取代实际极对数 P 及初级绕组“缩减系数” α_w 进行考虑。

所得到的修正的 T 型等效电路如图 1 所示。

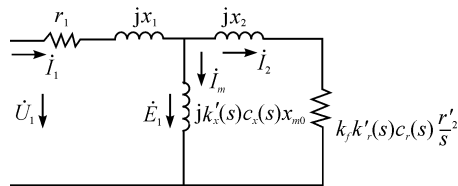


图 1 计及端部效应等影响的直线感应电机的 T 型等效电路

图 1 中的各修正系数如式(1~4):

(1) 次级相电阻纵向动态端部效应修正系数 $K'_r(s)$:

$$K'_r(s) = \frac{sG}{2p_e \tau} \frac{C_1^2 + C_2^2}{\sqrt{1 + (sG)^2}} \frac{1}{C_1} \quad (1)$$

(2) 每相磁化电抗纵向动态端部效应修正系数 $K'_x(s)$:

$$K'_x(s) = \frac{1}{2p_e \tau} \frac{C_1^2 + C_2^2}{\sqrt{1 + (sG)^2}} \frac{1}{C_2} \quad (2)$$

(3) 次级相电阻的第二种横向端部效应修正系数 $C_r(s)$:

$$C_r(s) = \frac{sG \{ \text{Re}^2[T] + \text{Im}^2[T] \}}{\text{Re}[T]} \quad (3)$$

(4) 次级磁化电抗的第二种横向端部效应修正系数 $C_x(s)$:

$$C_x(s) = \frac{\text{Re}^2[T] + \text{Im}^2[T]}{\text{Im}[T]} \quad (4)$$

式中: τ —极距; s —滑差率; G —品质因数; p_e —等值极对数, $p_e = (2p - 1)^2 / [4p - 3 + \varepsilon / (mq)]$,其中: p —极对数, ε —短距的槽数, q —每极每相槽数, α_w —初级绕组“缩减系数”, $\alpha_w = [2p - 1.5 + \varepsilon / (2mq)] / (2p - 1)$ 。

C_1 、 C_2 、 T 为公式(1~4)推导中的过渡变量,是电机结构参数、滑差率、初级频率、极数、品质因数等的函数,且均为复数量^[7]。

这样,就得到了考虑直线感应电动机的端部效应、集肤效应及端部半填充槽等结构特点的 T 型等效电路,可以进行电机的各种特性计算。

本研究按照该系统对牵引直线感应电动机的要求,编制了电机电磁计算和设计程序。电机电磁设计过程与旋转感应电机的设计过程类似,也需经过主要尺寸、绕组参数确定,磁路计算、电路参数计算等过程^[8]。但考虑到直线电机与旋转电机结构上不同,对设计过程进行一些修改。由求得的等效电路参数,可求得次级输出的有功功率 P_{e2} 及电磁推力 F :

$$P_{e2} = mI_2^2 r'_2 \frac{1-s}{s} \quad (5)$$

$$F = \frac{P_{e2}}{V_2} = \frac{mI_2^2 r'_2}{V_s s} \quad (6)$$

式中: V_2 —车速, V_s —同步速度, r'_2 —归算后的次级等效电阻, m —相数, I_2 —次级等效电流。

1.2 直线感应电机电磁设计及特性计算

电机电磁场的数值解法常用的有差分法及有限元法,有限元法由于剖分灵活,对求解区域边界的逼近优于差分法,计算精度更高,应用更广泛^[9]。

以变分原理为基础的有限元法在求解电机电磁场问题时,其步骤大致如下:

- (1) 建立问题的变分表述;
- (2) 单元剖分插值;
- (3) 对变分问题离散化;
- (4) 求解代数方程组;
- (5) 电机特性计算。

本研究根据计算得出的各场量,求出电机的感应电势、电磁力、参数、损耗等相关量。对于上述具有非线性导磁材料的直线感应电机磁场,需采用瞬态场进行分析,将矢量磁位 A 作为该磁场的描述函数,所需求解的非线性磁场的边值问题可描述为:

$$\begin{cases} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) + \sigma \left[\frac{\partial A}{\partial t} - v \times (\nabla \times A) \right] = J_s & (\Omega) \\ A = 0 & (\Gamma) \end{cases} \quad (7)$$

式中: Ω —求解域, Γ —求解域的外边界, v —媒质相对于参考坐标系的运动速度, J_s —外部强加的源电流密度, σ —媒质的电导率, μ —媒质的磁导率。

采用有限元法求解电机磁场的过程如图 2 所示。各场量求解之后可采用软件的后处理功能,对求解结果进行相应的电磁特性分析。

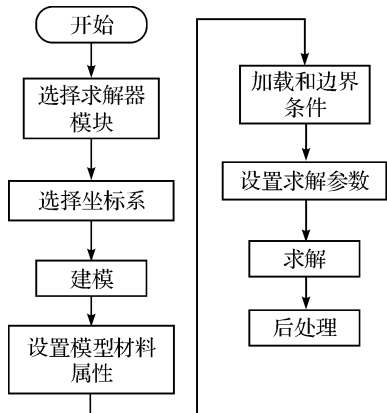


图2 有限元法求解电机磁场的过程框图

2 电磁设计程序的验证

电磁设计程序框图如图 3 所示。为了验证提出的电磁设计程序算法应用于轨道交通直线感应电机的合理性,在进行电磁设计之前,笔者首先采用上述算法,分别对日本 12000 型、广州地铁四号线、加拿大 ICTS 型直

线感应电机特性进行了大量的分析计算和比较验证。

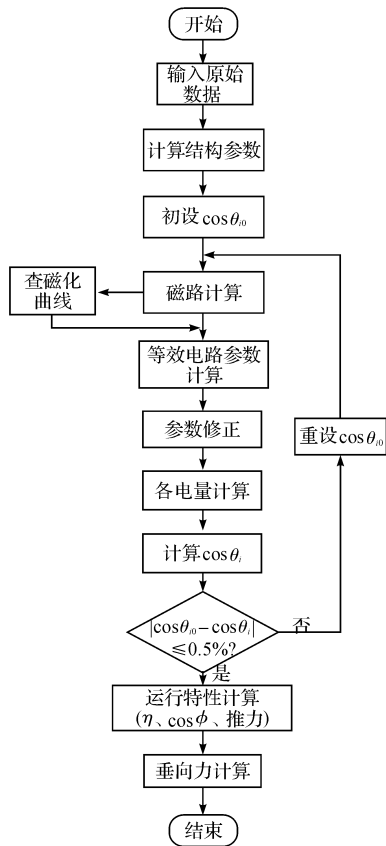


图3 电磁设计程序框图

3 种直线电机各参数的所计算结果与资料所给结果的比较如表 1 所示。从所得结果可知,计算结果与资料所给结果的平均相差在 8% 之内,因此可以认为所计算结果在工程允许的误差范围内,说明提出电磁设计算法合理可行。需要说明的是,对于加拿大 ICTS 型电机,由于在低滑差率区域,推力急剧下降,在该区域内,初、次级铁心磁饱和,铁磁材料导磁率的非线性导致计算误差增大,因此在推力下降区域误差普遍偏大。

表 1 3 种直线电机各参数计算值与资料所给数值的平均相差(单位:%)

	相电流	相电压	功率因数
12000 型	2.09	—	5.77
广州	3.91	1.59	—
ICTS	—	4.06	—
	效率	推力	垂直力
12000 型	2.22	—	—
广州	2.40	—	7.62
ICTS	—	7.18	—

按照系统提出的技术要求,本研究采用以上程序进行了强迫风冷电机设计,并对设计进行了优化。经过大量的方案比选之后,确定了电机的设计方案。

3 强迫风冷直线感应电机的设计结果

强迫风冷电机的设计结果如表 2、表 3 所示。气

隙 11 mm 时电机的特性计算曲线如图 4 所示。电机的“推力~速度”特性如图 4(a)所示。由于逆变器电压的限制,高速区推力略小于所需推力^[10]。相电压及电流特性如图 4(b)所示,在高速区采用恒压控制;电机的效率及功率因数特性如图 4(c)所示。

表 2 轨道交通实验线强迫风冷电机的结构参数

铁心/mm	铁心宽/mm	铁心高/mm	极数
1 929	220	152	6
相数	初级 W_1 /kg	F_x/W_1	
3	748	0.023 0	

表 3 轨道交通实验线强迫风冷电机的额定性能

气隙/mm	推力/kN	效率	$\cos\varphi$	$\eta\cos\varphi$	S_1 /kVA
11	17.2	0.614 4	0.573 3	0.352 2	546
9	17.2	0.618 0	0.594 5	0.367 4	524
U_1 /V	I_1 /A	F /Hz	F_x/S_1	热负荷	
306	595	27	0.031 5	13 769	
300	582	27	0.032 8	13 200	

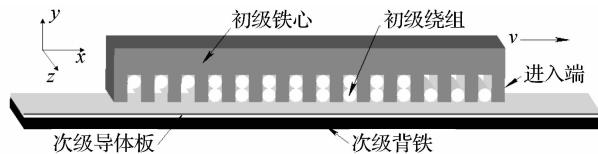


图 5 电机计算模型

磁场量 B 及 H , 并根据 Maxwell 张量法求出推力和法向力:

$$F_x = \int_{s_0} j_m \cdot B_z ds \quad (8)$$

$$F_y = \frac{1}{2\mu_0} \int_{s_0} (B_y \cdot B_y - B_x \cdot B_x) ds \quad (9)$$

式中: μ_0 —真空磁导率; s_0 —一次级有效面积; j_m —一次级感应板表面的电流密度; B_y, B_x —一次级反应板表面的法向和切向磁密。

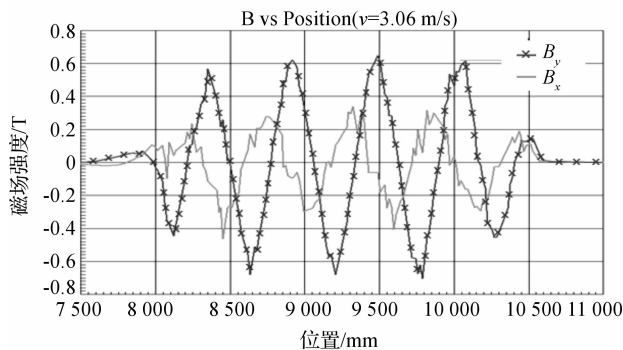
所取计算域包括了直线感应电机的整个初级及初级,且次级取得足够长,以留出电机运行区间。边界条件为零边界,即:

$$x, y, z \rightarrow \pm \infty \quad A_z = 0 \quad (10)$$

磁场计算结果如图 6 所示。



(a) 磁场分布



(b) 磁场强度

图 6 $t = 4.1$ s 时次级表面磁场计算结果

电机的电磁力随速度变化曲线如图 7 所示。由图 7 可知,电机气隙磁场建立响应速度迅速,电磁力能很好地追踪速度变化。

5 动态试验

笔者研制的两台强迫风冷牵引直线电机已经成功应用于直线电机轨道交通的样车,并在长春轨道客车厂试验线上平稳运行。该次试验为研制的国产电机正式在北京地铁机场线装车运行做准备。

采用磁场定向矢量控制时电制动施加条件下的速度、相电流和直流母线电压试验波形如图 8(a)所示,列车最高运行速度为 37 km/h,列车的最大加速度约为 1 m/s^2 ,电制动最大减速度为 -0.75 m/s^2 。电制动施加条件下列车的最大加速度为 1.1 m/s^2 时的相应试验波形如

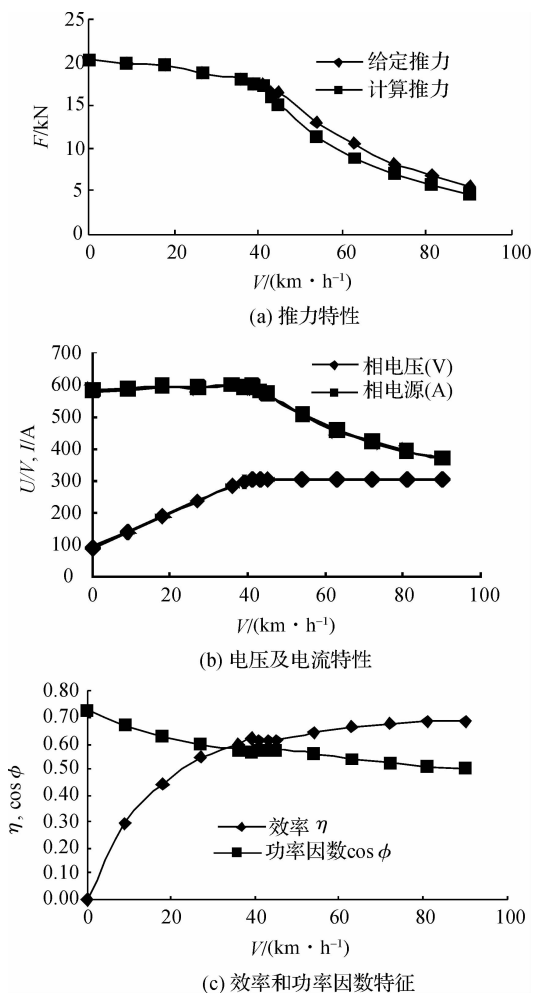


图 4 电机特性计算曲线

4 电机运行特性有限元法的仿真

本研究也采用了电磁场有限元法对该电机进行了仿真计算,所采用的电机计算模型如图 5 所示。

本研究由式(7)求得矢量磁位 A , 然后求出电机的电

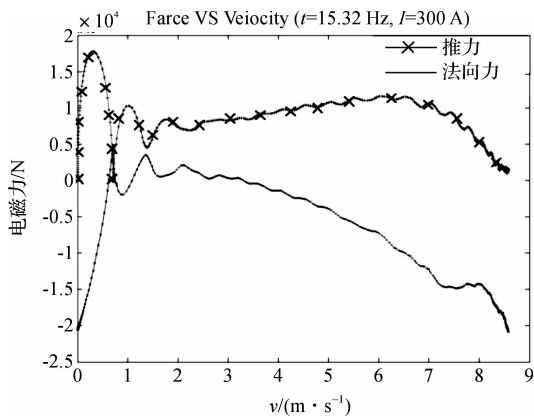
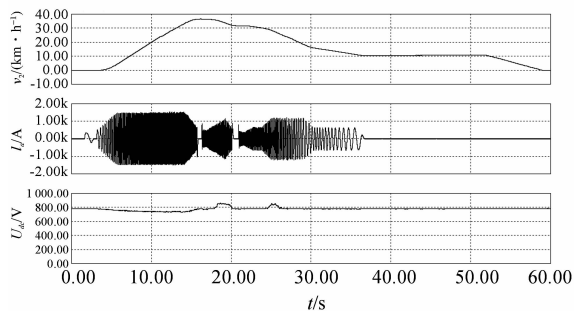
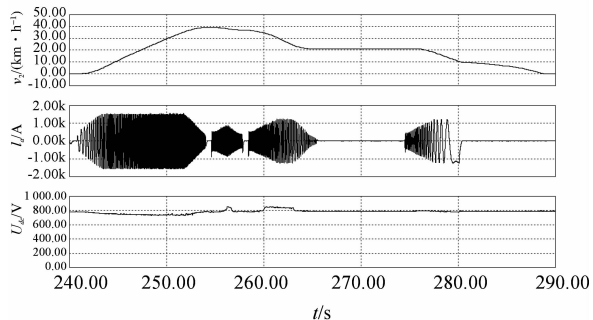


图 7 电磁力—速度曲线

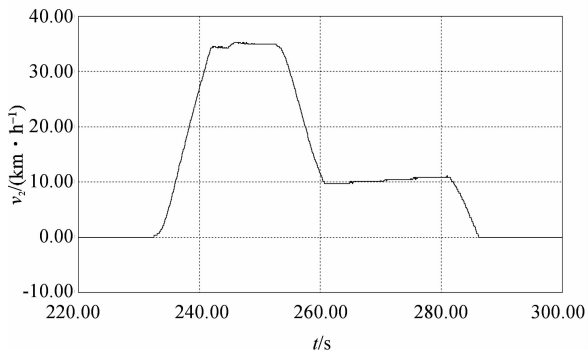
图 8(b)所示,列车最高运行速度为 39 km/h。列车最大加速度为 1.2 m/s^2 时的速度试验波形如图 8(c)所示。



(a) 最大加速约为 1 m/s^2 电制动施加时



(b) 最大加速约为 1.1 m/s^2 电制动施加时



(c) 最高加速约为 1.2 m/s^2 时速度波形

图 8 磁场定向控制下列车运行试验波形

从图 8(a~c)所示的列车运行试验波形可以发现,电机电流过渡平滑,没有过流及冲击现象发生,验证了电机性能及控制策略的有效性。安装了研制电机的直线电机轨道交通样车具有很好的加速和制动特性,从而说明了研制的强迫风冷式大功率直线感应电机的力特性及电特性能满足北京地铁机场线车辆技术设计要求。

6 结束语

根据轨道交通系统的牵引特性,从节能和提高牵引性能入手,在加拿大和日本等国已有系统的基础上,本研究利用现代电机设计技术,采用电磁场和电路计算等手段,以最大牵引效率和最大牵引力系数等为优化目标,提出一种新的电磁设计程序算法,应用于大功率牵引直线电机的电磁参数和机械结构参数设计计算,实现了所研制的大功率直线感应电机与国外产品相比具有同等或更优的技术性能,满足了北京地铁机场线电机的设计要求。

参考文献 (References) :

- [1] 张振生. 直线电机城市轨道交通车辆综述[J]. 变流技术与电力牵引, 2003(4) :1-7.
- [2] 张达众, 廖有用, 李国平. 直线电机的发展及其磁阻力优化综述. 机电工程[J]. 2013, 30(9) :1051-1054.
- [3] 陈勤, 曾岳南, 陈康平, 等. 基于 DSP/BIOS 的直线电机伺服系统设计[J]. 机电工程技术, 2013(5) :48-51.
- [4] FAIZ J, JAFARI H. Accurate modeling of single-sided Linear induction motor considers end effect and equivalent thickness [J]. **IEEE Transaction on Magnetics**, 2000(5) :3785.
- [5] BOSE B K. Modern power electronics and AC drives[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [6] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- [7] 龙遐令. 直线感应电动机的理论和电磁设计方法[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [8] 尚静. 异步起动永磁同步电动机性能参数的准确计算及结构优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学电气工程学院, 2004.
- [9] YAMAGUCHI T, KAWASE Y, YOSHIDA M, et al. 3-D finite element analysis of a linear induction motor[J]. **IEEE Trans Magn**, 2001, 37(5) :3668-3671.
- [10] 卢琴芬, 方牧同, 叶云岳. 大气隙 LIM 的力特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21) :132-136.

[编辑: 洪炜娜]

本文引用格式:

崔霆锐, 宗立明, 李熙, 等. 大功率直线感应电机的优化设计研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6) :825-829.

CUI Ting-rui, ZONG Li-ming, LI Xi, et al. Optimization design of high-power linear induction motor[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(6) :825-829.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>