

# 分段初级直线感应电动机的建模与仿真

胡 钉<sup>1</sup> 蒋 映<sup>2</sup>

(1. 湖南省岳阳市岳阳县职业中专 岳阳 414100; 2. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院 北京 100191)

**摘要:**为了提高长初级直线感应电动机的效率以节约电能,在实际应用中需要将其初级分段。以分段长初级直线感应电动机为研究对象,采用有限元方法,建立了单段初级高阶非线性数学模型,同时给出了电感和感应电势关于次级位置的参数方程。最后,以 ANSOFT 电路编辑器模块和 Maxwell 有限元模块相结合,完成电源主电路和驱动控制电路的设计以及整个系统动态特性的仿真。仿真结果表明,所搭建模型较好的反映了系统的动态过程以及分段供电的可行性。

**关键词:**直线感应电机;分段供电;变参数;仿真

**中图分类号:** TM301.4 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470

## Modeling and simulation of segmented primary linear induction motor

Hu Ding<sup>1</sup> Jiang Ying<sup>2</sup>

(1. The Secondary Vocational Technical School of Yueyang County, Yueyang 414100, China;

2. School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China)

**Abstract:** The significance is increasing efficiency and saving energy for segmenting the long primary linear induction motor(LIM) into blocks. As the research object, a high order and non-linear model for single segment primary is built by using the finite element method (FEM), and the equations of inductance and induced electromotive force are established with the position of secondary as a parameter. Then, with the combination of the ANSOFT circuit editor module and the Maxwell finite element module, the main circuit and the driving control circuit are designed. Finally, The system's dynamic characteristics are simulated and analyzed, by software ANSOFT. The simulation results show that the proposed model can reflect the dynamic process of the system and the feasibility of the segmented feeding well.

**Keywords:** linear induction motor; block feeding; variable parameter; simulation

### 1 引言

直线电动机可以将电能直接转换成直线运动机械能,自 20 世纪 70 年代以来,直线电动机就广泛应用于工业、交通与国防等领域<sup>[1]</sup>。根据直线电动机初次级的相对长度,直线感应电动机分为:长初级直线电动机和短初级直线电动机<sup>[2]</sup>。长初级直线电机是将轻巧且无需供电的次级做成运动部分,这种结构在高速大推力的场合明显的优于短初级<sup>[3]</sup>。但也正是这种长初级短次级的结构,使得电机初级漏感大、电压利用率低,因此通常采用初级分段供电来提高供电效率<sup>[4-5]</sup>。目前,国内外研究的热点主要是永磁直线同步电动机(PMLSM)<sup>[6-7]</sup>和直线感应电动机(LIM)<sup>[8-9]</sup>。文献[10-11]对多段初级永磁同步电动机驱动进行了整体的建模仿真和运行过程分析。海军工程大学

舰船综合电力技术国防重点实验室对双边分段式长初级 LIM 从边端效应<sup>[12]</sup>、物理建模<sup>[13]</sup>、控制方法<sup>[8]</sup>和动态仿真<sup>[14]</sup>进行了研究,而对于单边分段式长初级 LIM 驱动系统方面研究很少。考虑到单边式长初级 LIM 的不对称结构以及初级分段时次级位置对电机整个系统运行的影响,所以有必要对单边式长初级 LIM 驱动进行整体的建模仿真和运行过程分析。

本文将分段长初级 LIM 类比异步旋转电机,建立了单段初级 LIM 的数学模型;然后考虑到次级进出某段初级时,电感和励磁磁链随次级位置变化的复杂性,这里将其有效值合理线性化,以便求得随次级位置变化的电感、感应电动势、电磁力和运动方程。最后结合多段初级直线感应电动机的非线性、不对称和变参数的特点,利用 ANSOFT 的有限元法对其进行动态性能的仿真研究。

收稿日期:2015-11

## 2 直线感应电动机的建模

### 2.1 数学模型

由于各段初级采用独立的切换供电控制,因此有必要建立单段初级随次级位置变化的体系模型。在运行过程中,对于分段初级 LIM,次级位置改变会引起该段初级与次级耦合面积的增大或减小,因此与之耦合的初级的磁路和 LIM 电磁参数的也会随之改变。所以对于建立单段初级非线性、变参数模型是很关键的一步。

根据欧姆定律和电磁感应定律可以得到 LIM 的数学模型:

其磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{AA} & L_{AB} & L_{AC} & L_{Aa} & L_{Ab} & L_{Ac} \\ L_{BA} & L_{BB} & L_{BC} & L_{Ba} & L_{Bb} & L_{Bc} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_{CC} & L_{Ca} & L_{Cb} & L_{Cc} \\ L_{aA} & L_{aB} & L_{aC} & L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{bA} & L_{bB} & L_{bC} & L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{cA} & L_{cB} & L_{cC} & L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

其电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \\ u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \\ i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \\ \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $p$  为时间对  $t$  的微分算子。

电感随时间(次级位移)的变化率:

$$p\mathbf{L}(x) = \frac{d\mathbf{L}(x)}{dt} = \frac{d\mathbf{L}(x)}{dx} * \frac{dx}{dt} = v p_x \mathbf{L}(x) \quad (3)$$

式中:  $p_x$  为对次级位移  $x$  的微分算子,  $\mathbf{L}(x)$  为电感矩阵。

$v = \frac{dx}{dt}$  为次级的运行速度。

### 2.2 感应电势与运动方程

从式(3)可以看出,自感和互感是关于次级位置的参数方程,电感的变化势必也影响着励磁磁链,这种复杂的关系是很难用准确的数学式子来表达。在这里,不妨假设 LIM 电感和励磁电势随次级位置按线性规律变化,即三

相绕组的励磁磁链是关于  $x$  的正弦函数。通过有限元分析,对各相绕组励磁磁链的基波分量进行求导,就可以得到电枢三相绕组的感应电势:

$$E_A = -\frac{d\psi_A(x)}{dt} = \psi_m(x) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (4)$$

$$E_B = -\frac{d\psi_B(x)}{dt} = \psi_m\left(x - \frac{2\tau}{3}\right) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \sin\left[\frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{2\tau}{3}\right)\right] \quad (5)$$

$$E_C = -\frac{d\psi_C(x)}{dt} = \psi_m\left(x - \frac{4\tau}{3}\right) \cdot \frac{\pi}{\tau} \cdot \sin\left[\frac{\pi}{\tau}\left(x - \frac{4\tau}{3}\right)\right] \quad (6)$$

有上述三相绕组的感应电势,可以推出第  $K$  段初级的感应电势为:

$$E_{KA} = E_A [\varepsilon(x - x_{KA1}) - \varepsilon(x - x_{KA2})] \quad (7)$$

$$E_{KB} = E_B \left[ \varepsilon\left(x - x_{KA1} - \frac{2\tau}{3}\right) - \varepsilon\left(x - x_{KA2} - \frac{2\tau}{3}\right) \right] \quad (8)$$

$$E_{KC} = E_C \left[ \varepsilon\left(x - x_{KA1} - \frac{4\tau}{3}\right) - \varepsilon\left(x - x_{KA2} - \frac{4\tau}{3}\right) \right] \quad (9)$$

式中:  $\varepsilon(x)$  为阶跃函数,  $x_{KA1}$ 、 $x_{KA2}$  分别表示 A 相绕组在第  $K$  段初级首末两端的位置。

单段初级的电磁力为:

$$f_{em}(x) = \frac{P_e}{v} \quad (10)$$

式中:  $P_e$  为对电机绕组的感生电功率。

五段初级总的电磁力为:

$$\sum f_{em}(x) = \sum_1^5 f_{em}(x)_k \quad (11)$$

式中:  $k$  取 1、2、3、4、5。

LIM 运动方程为:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = \sum_1^5 f_{em}(x)_k - f_{load} - f_r \quad (12)$$

式中:  $m$  为 LIM 运动部分的质量,  $f_{load}$  为负载力,  $f_r$  为 LIM 运行过程中的摩擦力及阻力。

### 2.3 运行过程

分段供电技术是对长初级分段,只将次级附近的初级段通电,其他初级段不通电,随着次级的运动,分段初级逐段切换供电<sup>[7]</sup>。如图 1 所示为长初级 LIM 的分段供电示意。

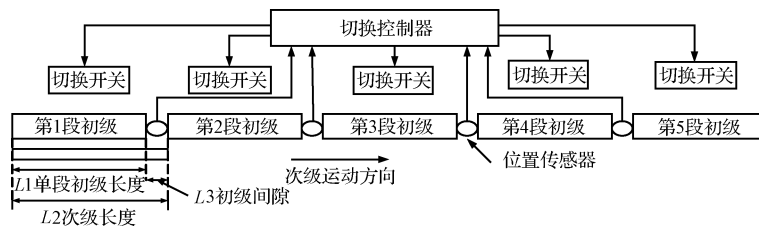


图 1 长初级 LIM 的分段供电示意

假设  $t=0$  时, LIM 的次级处于初始位置如图 1 所示, 此时  $x=0$ ; 首先切换控制器在接收到位置传感器的信号后, 通过控制切换开关开始给第 1、2 段初级通电, 次级开始在电磁推力作用下起动加速, 与第 2 段初级开始耦合, 同时也逐步退出第 1 段初级; 当第 1、2 段间的位置传感器检测到次级末端离开第 1 段初级时, 切换控制器通过切换开关开始作用, 将第 1 段初级的通电断开; 当第 2、3 段间的传感器检测到次级首端进入第 3 段初级时, 切换开关开始给第 3 段通电。以此类推, 各段初级供电顺序为: 1、2; 2、3; 3、4; 4、5。又有  $L_2 = L_1 + L_3$ , 其中  $L_1$  为单段初级长度、 $L_2$  为次级长度、 $L_3$  为初级间隙, 即可以保证任何时刻次级在经过不同初级时, 初次级的耦合面积不变。

### 3 仿真研究

#### 3.1 驱动电路模型

要实现长初级 LIM 分段供电的控制, 那么必须对次级位置进行定位。也就是说长初级 LIM 的分段供电控制依赖于位置传感器检测到的次级位置信号, 从而为三相电压提供正确的通断控制。这里在 ANSOFT 仿真中加入外电路编辑。由于 ANSOFT 带有位置变量  $P$ , 可以利用变量  $P$  得到动子运行的位移, 为长初级直线感应电机提供分段供电。电机由恒压源供电:

$$\begin{cases} u_A = 220\sqrt{2}\sin(2\pi ft) \\ u_B = 220\sqrt{2}\sin(2\pi ft - 2\pi/3) \\ u_C = 220\sqrt{2}\sin(2\pi ft + 2\pi/3) \end{cases} \quad (13)$$

根据式(13), 可以利用 Maxwell 2D 提供的电路元件搭建简单的三相电源主电路模型如图 2 所示。驱动电路模型如图 3 所示。

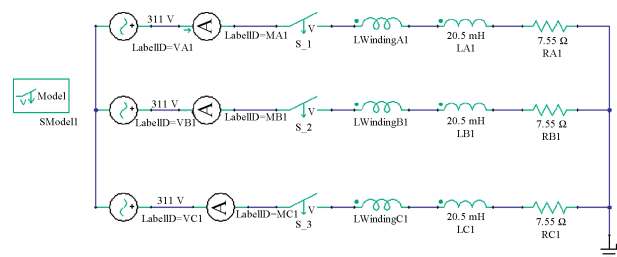


图 2 三相电源主电路

#### 3.2 仿真结果分析

如表 1 所示为本文所用到的单边长初级非磁性次级直线感应电动机的主要参数。

第 1 段至第 5 段初级对应的动态特性(感应电势和电流)分别如图 4~8 所示。

5 段初级在刚通电时, 均出现初级电流幅度在瞬间加大, 且三相电流不对称的现象。这是因为对长初级 LIM 的初级进行了分段供电, 在进行有限元分析时相当于建立了 5 个独立模型, 因此在各段初级独立通电的瞬间, 均会

表 1 长初级 LIM 的主要参数

起动推力: 225 N	同步速率: 4.5 m/s
电压额定值: 380 V	电源频率: 50 Hz
相数: 3	极对数(计算值): 3.5/段
初级槽数: 24/段	每极每相槽数: 1
初级齿宽: 4 mm	初级齿距: 15 mm
极距: 45 mm	机械气隙: 2 mm
绕组型式: 双层叠绕式无补偿整距绕组, 星形接法	
次级结构: 钢铜复合次级, 铜板厚度为 2 mm、钢板厚度为 6 mm, 长度为 370 mm, 宽度为 110 mm	
初级结构: 总长为 1 844 mm, 分为 5 段, 每段长 364 mm, 各段间距 6 mm, 各段两边端采用半填充槽结构, 各段初级槽数为 24。	

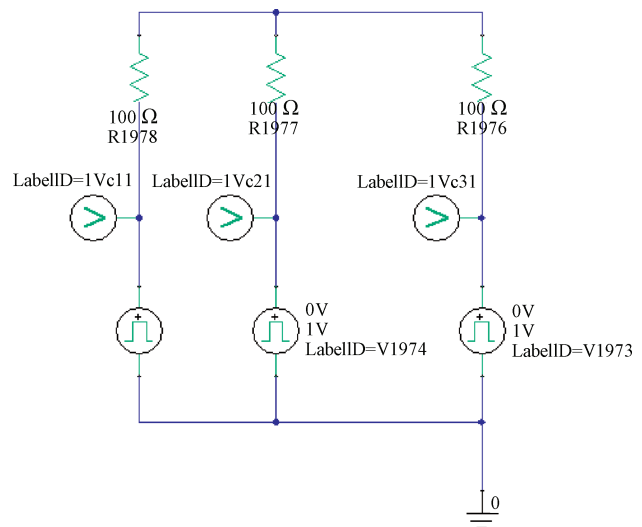


图 3 驱动电路模型

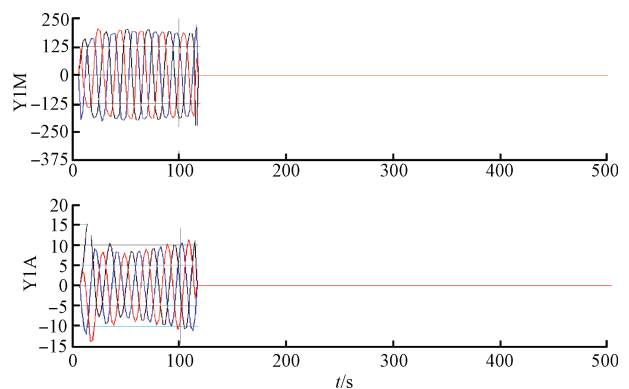


图 4 第 1 段初级动态特性

出现各自独立的气隙磁场建立的暂态过程; 再加上初次级铁心的断开, 使得磁路不对称引起负序电流导致三相电流不平衡。

第 1 段初级电流不断增大, 第 2~4 段初级电流有一个先增大后减小的过程, 而第 5 段初级电流是不断减小, 直至 0.35 s 左右达到设定的 band 边界转而处于堵转状

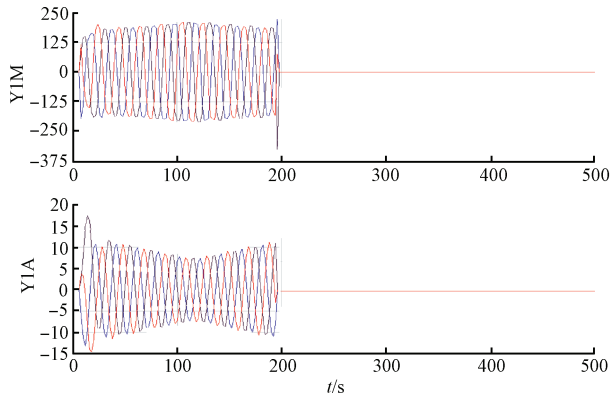


图5 第2段初级动态特性

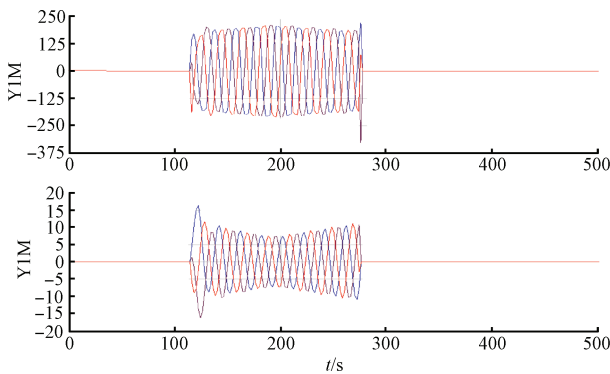


图6 第3段初级动态特性

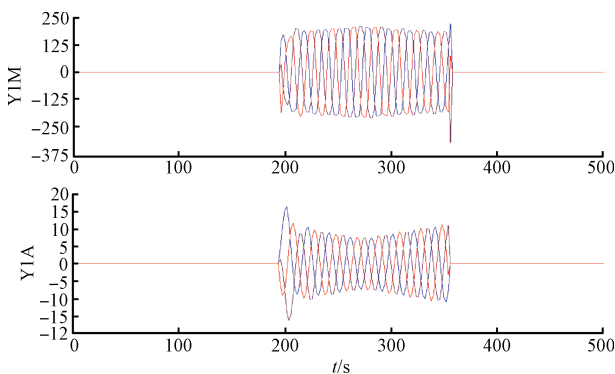


图7 第4段初级动态特性

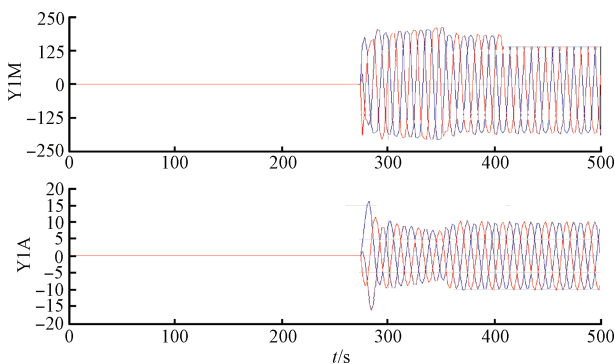


图8 第5段初级动态特性

态,电流转为电机堵转电流。这些变化的原因为:在次级进入某段初级的过程,电感和感应电动势值会随着次级与该段初级耦合面积的增加而增加,根据欧姆定律,则电枢电流会随之减小。若次级刚好完全覆盖某段初级,因为磁路结构不会发生变化,则该段初级的电感、感应电动势以及电流应该是处于恒定的状态。而当次级退出某段初级时,结果刚好会与进入段的情况相反,电感和感应电动势值减小,电枢电流增加。

如图9和10所示为系统动态特性,对比全程通电,分段通电时,在误差允许的范围内,起动推力和速度大小相差不大。但是分段供电时,电机运行达到堵转的时间略微后移,这是由速度的细微差异造成的,不影响最后的结果。由此可见分段供电能达到与全程通电相同的效果,证明了分段通电的合理性。

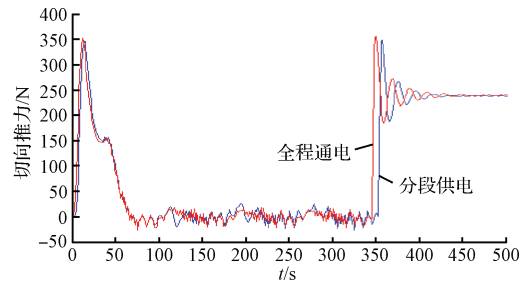


图9 电机起动过程推力对比

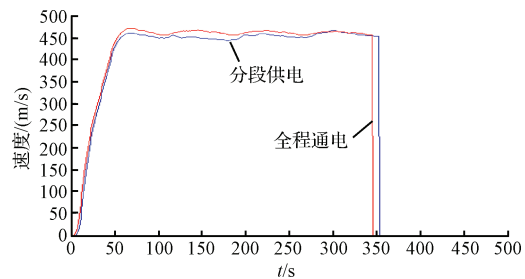


图10 电机起动过程速度对比

#### 4 结论

本文以分段长初级直线感应电动机为研究对象,经过合理的假设,建立了单段初级 LIM 的高阶、非线性、强耦合的数学模型。经过合理推算,得到了随次级位移变化的电感、感应电势和运动方程。然后利用 ANSOFT 软件对电机进行了仿真,采用外电路编辑中位置信号 P 对次级位置进行定位,从而准确控制电机的供电通断。仿真结果表明,次级在进入初级时,随着与该段初级耦合面积的增加,该段初级的感应电势以及电感值增大,最后导致电枢电流减小。而次级退出该段初级时,结果则与之相反。最后,将分段供电与全程供电时的推力和速度的对比,结果表明分段供电在减小对电源要求的同时完全可以达到电机全程通电的效果。本文所得的结论与仿真将为长初级直线

感应电动机的分段设计以及控制提供参考。

#### 参考文献

- [1] 张明元,马伟明,何娜.长初级直线电动机分段供电技术综述[J].中国电机工程学报,2013(27):96-104.
- [2] 鲁军勇,马伟明,李朗如.高速长初级直线感应电动机纵向边端效应研究[J].中国电机工程学报,2008,28(33):95-101.
- [3] 鲁军勇,马伟明,许金.高速长定子直线感应电动机的建模与仿真[J].中国电机工程学报,2008,28(27):89-94.
- [4] 崔小鹏,王公宝,马伟明,等.直线电机分段供电故障诊断研究[J].电机与控制学报,2013,17(8):9-14.
- [5] 许金,马伟明,鲁军勇,等.分段供电直线感应电机气隙磁场分布和互感不对称分析[J].中国电机工程学报,2011,31(15):61-68.
- [6] KIM S A, ZHU Y W, LEE S G, et al. Electromagnetic normal force characteristics of a permanent magnet linear synchronous motor with double primary side[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2014, 50(1): 1-4.
- [7] LI L, MA M, KOU B, et al. Analysis and design of moving-magnet-type linear synchronous motor for electromagnetic launch system [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39 (1): 121 - 126.
- [8] 李卫超,胡安,马伟明,等.新型长定子直线感应电机闭环控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(增刊1):226-231.
- [9] PERREAULT B M. Optimizing operation of segmented stator linear synchronous motors[J]. Proceedings of the IEEE,2009,97(11):1777-1785.
- [10] 上官璇峰,励庆孚,袁世鹰.多段初级永磁直线同步电动机系统建模及制动仿真[J].西安交通大学学报,2006,40(6):694-698.
- [11] 上官璇峰,励庆孚,袁世鹰,等.多段初级永磁直线同步电动机驱动系统整体建模和仿真[J].电工技术学报,2006,21(3):52-57.
- [12] 孙兆龙,马伟明,鲁军勇,等.长初级双边直线感应电动机静态纵向边端效应及阻抗矩阵研究[J].中国电机工程学报,2010,30(18):72-77.
- [13] 许金,马伟明,鲁军勇,等.分段供电直线感应电机气隙磁场分布和互感不对称分析[J].中国电机工程学报,2011,31(15):61-68.
- [14] 卞林玉,陈志辉.基于DSP的直线感应电动机矢量控制[J].微特电机,2012,40(3):57-60.

#### 作者简介

胡钉,1984年出生,研究员,主要研究方向为电路与系统。

E-mail:gxyhuding@126.com

蒋映(通讯作者),1990年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。

E-mail:jy090672@163.com