

双初级耦合直线感应电动机研究

孙兆龙¹, 刘德志¹, 马伟明¹, 鲁军勇¹, 许金¹, 张育兴²

(1. 舰船综合电力技术国防科技重点实验室(海军工程大学), 湖北省 武汉市 430033;
2. 西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

Double-primary Coupling Linear Induction Motors

SUN Zhaolong¹, LIU Dezhi¹, MA Weiming¹, LU Junyong¹, XU Jin¹, ZHANG Yuxing²

(1. National Key Laboratory for Vessel Integrated Power System Technology(Naval University of Engineering), Wuhan 430033, Hubei Province, China; 2. College of Electric Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: A linear induction moter (LIM) with m primaries (m is an integer and $m \geq 2$) and just one secondary was designed for improving its redundancy and reliability. On this basis, even if any single primary malfunctions, the others will accomplish the scheduled target. This paper introduced a technique for modeling double-primary ($m=2$) coupling LIM based on the analysis of the relationship between coupling primaries. Calculation results in performances of terminal voltage and electromagnetic thrust were presented and compared with the test data, which indicated that the double-primary coupling LIM has a larger thrust than that summed up from two primaries LIM when independently operated; while it has a lower terminal voltage with both efficiency and thrust density improved.

KEY WORDS: linear induction motor (LIM); equivalent circuit; mathematic model; electromagnetic performance

摘要: 为提高可靠性和冗余性, 可以将直线感应电动机的初级按照上下方向布置 m 台并联运行, 且 m 台初级共用 1 个次级。这样即使一台初级发生故障, 仍可以通过另外 $m-1$ 台初级过载完成预先设定的任务。对双初级耦合直线感应电动机 ($m=2$) 的模型及性能进行了研究, 分析了双初级的耦合关系及其对电机等效电路和参数的影响, 在此基础上对不同工况下的端口电压、电磁推力等性能进行分析计算。计算和实测结果表明, 双初级直线电机同时通入同相电流时, 推力大于 2 台初级单独工作时的推力之和, 而端口电压低于单独初级工作时的电压, 效率和推力密度与单初级电机相比有所提高。

关键词: 直线感应电动机; 等效电路; 数学模型; 电磁性能

0 引言

近年来, 直线感应电动机 (linear induction motor, LIM) 在汽车加速碰撞试验等大载荷运输场

合^[1-3]的应用受到越来越高的关注。上述场合要求直线电机适合做高速运动, 同时具有高可靠性和冗余性。为满足上述要求, 可以将直线电机设计为双边长初级短次级结构, 次级仅为 1 块金属板, 如图 1 所示。这样除了质量轻适合高速运动外, 还基本消除了动态纵向边端效应^[4]。文献[5-7]对这种电机的静态纵向边端效应、仿真模型以及电机瞬态模型进行了详细研究。为了满足高可靠性和冗余性的要求, 双边长初级短次级直线电机可以设计为 m 台长初级并联运行, 共用 1 个次级, 这样在运行过程中即使一台初级发生故障, 仍然可以通过另外 $m-1$ 台初级短时过载完成预先设定的任务。目前对各类短初级直线感应电动机以及永磁直线电动机的研究较多^[8-14], 对双初级耦合直线感应电动机的研究还显见报道。

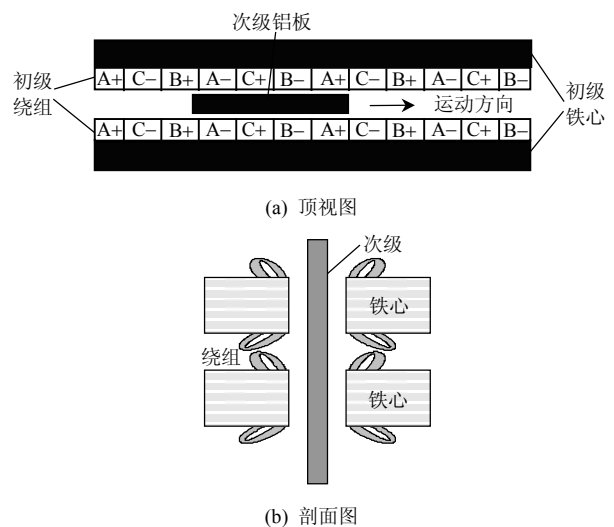


图 1 双初级耦合直线感应电动机结构示意图
Fig. 1 Structural of double primaries coupling LIM

由于空间的限制,双初级相隔较近,线圈间的磁场耦合将影响T型等效电路定子侧的参数;同时双初级共用1个次级,存在电路的耦合,从而影响T型等效电路次级侧参数。由于等效电路拓扑结构及其参数发生了改变,故电机的性能如端口电压、推力等和单初级直线电机不同。

本文从直线电机数学模型出发,以感应电机经典T型等效电路为基础,推导考虑上下初级耦合时直线感应电动机的模型及其参数变化,计算其端口电压、电磁推力等电磁特性,并和单初级的电磁特性进行比较,给出相应的结论。

1 双初级耦合直线感应电动机模型

1.1 单台初级直线感应电动机模型

忽略上下初级耦合即单台初级工作时,直线电机的模型和传统的三相旋转感应电机基本一致,该模型是构建双初级以及多初级直线电机数学模型的基础。假设直线感应电动机为三相电机,且沿次级运动方向的绕组分布为 $A^+C^-B^+A^-C^-B^-$,对应的稳态等效电路如图2所示。图2中: L_m 为激磁电感; L_L 为初级漏感; R_s 为初级电阻; R_R 为次级电阻; s 为转差频率, $s=(v_e-v_s)/v_e$,其中 v_e 为同步速度, v_s 为次级的运动速度, v_e 、 v_s 分别由参考位置 X_e 和动子位置 X_s 对时间求微分得到。定义 β 为线速度角速度转换系数, $\beta=\pi/\tau$, τ 为电机初级绕组极距;根据 β 可以得到同步电角速度和次级电角速度: $\omega_e=\beta v_e$; $\omega_s=\beta v_s$ 。

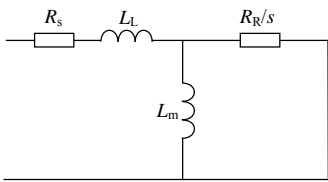


图2 单台长初级直线感应电动机稳态等效电路

Fig. 2 Steady state equivalent circuit of long primary LIM

根据派克(Park)变换^[15],可以得到单初级直线感应电动机的动态方程:

$$\mathbf{u} = \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\psi}} + \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \omega_s \boldsymbol{\psi} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \omega_s \boldsymbol{\psi} + \mathbf{R}\mathbf{i}$$

式中: \mathbf{D} 为微分算子; $\boldsymbol{\psi} = [\psi_{sq} \ \psi_{sd} \ \psi_{s0} \ \psi_{rq} \ \psi_{rd}]^T$; $\mathbf{i} = [i_{sq} \ i_{sd} \ i_{s0} \ i_{rq} \ i_{rd}]^T$; $\mathbf{u} = [u_{sq} \ u_{sd} \ u_{s0} \ 0 \ 0]^T$,其中 $\boldsymbol{\psi}$ 为磁链, \mathbf{u} 为电压, \mathbf{i} 为电流;下标s,r分别表示初级

和次级,下标 d 、 q 分别表示 d 轴分量和 q 轴分量。

为了便于分析双初级的耦合关系,可以将上述电机动态方程转换成另外一种形式,即利用电感矩阵代替磁链矩阵,具体为

$$\mathbf{u} = \mathbf{L} \frac{d\mathbf{i}}{dt} + [\omega_s \mathbf{L}_s + \omega_e \mathbf{L}_e + \mathbf{R}]\mathbf{i} \quad (1)$$

其中,

$$\mathbf{L} = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{ss} & \mathbf{L}_{sr} \\ \mathbf{L}_{sr}^T & \mathbf{L}_{rr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_m + L_L & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m + L_L & 0 & 0 & L_m \\ 0 & 0 & L_m + L_L & 0 & 0 \\ L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_m \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{L}_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{L}_{ssr} & \mathbf{L}_{srr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -L_m & 0 & 0 & -L_m \\ L_m & 0 & 0 & L_m & 0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{L}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{css} & \mathbf{L}_{csr} \\ -\mathbf{L}_{csr}^T & \mathbf{L}_{crr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & L_m + L_L & 0 & 0 & L_m \\ -(L_m + L_L) & 0 & 0 & -L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 & 0 & L_m \\ -L_m & 0 & 0 & -L_m & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{R}_{rr} \end{bmatrix} = \text{diag}(R_s, R_s, R_s, R_R, R_R) \quad (5)$$

方程(2)为变压器电势对应的电感矩阵,方程(3)~(4)为切割电势(旋转电势)对应的电感矩阵。

1.2 双初级耦合直线感应电动机模型

双初级同时工作时的耦合关系主要体现在初级的端部漏感和次级的感应涡流路径,为了方便分析上述耦合关系,对电机参数进行分解,其中初级漏感和次级电阻可以分解为

$$L_L = 2L_e + L_1 \quad (6)$$

$$R_R = 2R_x + R_r \quad (7)$$

式中: L_e 为初级端部漏感;定义 L_1 为除端部漏感之外的初级杂散漏感(包括谐波漏感、槽漏感等); R_x 为次级横向电阻; R_r 为次级有效电阻。上述参数可以在单初级通电以及双初级同时通电时测量得到。

根据上述分析以及假设,可得到在旋转坐标系下双初级同时工作时的直线感应电机数学模型及其参数,其中电机动态方程的最终形式和单台初级工作时相同,如式(1)。

双初级同时工作时，变压器电势对应的电感矩阵 L 除了在维数上增加一倍之外，还应考虑双初级端部漏感耦合对该矩阵的影响，考虑该耦合关系时，变压器电势对应的电感矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} L_{ss} & L_{sr} & L_{e12} & 0 \\ L_{sr}^T & L_{rr} & 0 & 0 \\ L_{e12} & 0 & L_{ss} & L_{sr} \\ 0 & 0 & L_{sr}^T & L_{rr} \end{bmatrix} \quad (8)$$

其中，

$$L_{e12} = \begin{bmatrix} -L_c & 0 & 0 \\ 0 & -L_c & 0 \\ 0 & 0 & -L_c \end{bmatrix}$$

旋转电动势对应的电感矩阵 L_s 和动子速度相对应，因此双初级的耦合对该电感矩阵没有影响，只是矩阵的维数增加了一倍，如式(9)所示。 L_c 和同步速度相对应，考虑双初级的耦合时该电感矩阵如式(10)所示。

$$L_s = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ L_{ssr} & L_{srr} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & L_{ssr} & L_{srr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$L_c = \begin{bmatrix} L_{ess} & L_{esr} & L_{r12} & \mathbf{0} \\ -L_{ess}^T & L_{err} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ L_{r12} & \mathbf{0} & L_{ess} & L_{esr} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & -L_{ess}^T & L_{err} \end{bmatrix} \quad (10)$$

其中，

$$L_{r12} = \begin{bmatrix} 0 & -L_c & 0 \\ L_c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

电阻矩阵主要表现为双初级共用次级的电阻的耦合，考虑该耦合关系时的电阻矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} R_{ss} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_{rr} & \mathbf{0} & R_{xr} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & R_{ss} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_{xr} & \mathbf{0} & R_{rr} \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中，

$$R_{xr} = \text{diag}(R_x, R_x, R_x)$$

根据上述数学模型可以得到考虑双初级耦合时的直线感应电机稳态等效电路，如图 3 所示。

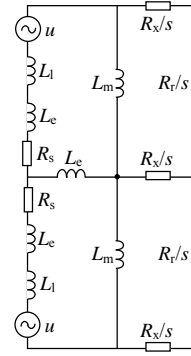


图 3 双初级耦合直线感应电动机稳态等效电路

Fig. 3 Steady state equivalent circuit of double primaries coupling LIM

2 双初级耦合直线感应电动机性能分析

2.1 不同工况的等效电路及其参数分析

基于集总参数模型的电机电磁性能计算主要取决于参数的大小，如电机端口电压和电磁推力的计算分别取决于初级漏感和励磁电感的大小，因此分析不同工况下各个等效电路参数是进行电磁性能分析的基础。本文研究单初级通电以及双初级同时通电 2 种工况，双初级同时通电工况又包括同时通入同幅值的同相或反相电流 2 种极端情况。

根据上述电机模型，双初级励磁电感并不存在耦合关系，因此各个工况下的励磁电感相同，故理论上最大推力应该相等；然而试验发现，各个工况下的最大推力存在差异，这主要是由于上述电机模型忽略了次级漏感导致的。为了不影响上述电机模型的应用，可以将次级漏感等效折算到 T 型等效电路的定子侧。由于各个工况下次级漏感不同，折算到定子侧时导致励磁电感等参数也发生变化，具体折算原则为

$$\begin{cases} L'_m = \frac{L_m^2}{L_m + L_{Lr}} \\ R'_R = R_R \left(\frac{L_m}{L_m + L_{Lr}} \right)^2 \\ L'_L = L_L + \frac{L_{Lr} L_m}{L_{Lr} + L_m} \end{cases} \quad (12)$$

式中： L_{Lr} 为次级漏感； L'_m 、 R'_R 、 L'_L 分别为折算后的励磁电感、次级电阻、初级漏感。

根据不同工况对图 3 所示等效电路进行解耦处理，经过解耦处理同时考虑次级漏感时的稳态等效电路如图 4 所示。图 4 中： L_{lr} 为次级上(下)端部漏感； L_x 为次级横向漏感。根据图 4 以及式(12)可以得到不同工况下的各个电磁参数，如表 1 所示。

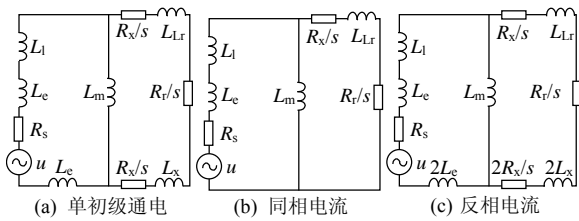


图4 不同工况下的稳态等效电路

Fig. 4 Equivalent circuit of various working conditions

表1 参数随工况变化的规律

Tab. 1 LIM parameters of various working conditions

参数	单独通电	双初级同时 通入同相电流	双初级同时 通入反相电流
次级漏感	$L_{Lr} + L_x$	L_{Lr}	$L_{Lr} + 2L_x$
次级电阻	$R_R (\frac{L_m}{L_m + L_{Lr} + L_x})^2$	$(R_R - R_x) (\frac{L_m}{L_m + L_{Lr}})^2$	$(R_R + R_x) (\frac{L_m}{L_m + L_{Lr} + 2L_x})^2$
激磁电感	$\frac{L_m^2}{L_m + L_{Lr} + L_x}$	$\frac{L_m^2}{L_m + L_{Lr}}$	$\frac{L_m^2}{L_m + L_{Lr} + 2L_x}$
初级漏感	$L_L + \frac{(L_{Lr} + L_x)L_m}{(L_{Lr} + L_x) + L_m}$	$(L_L - L_e) + \frac{L_{Lr}L_m}{L_{Lr} + L_m}$	$(L_L + L_e) + \frac{(L_{Lr} + 2L_x)L_m}{(L_{Lr} + 2L_x) + L_m}$

2.2 电机不同工况电磁性能分析

双初级耦合直线感应电动机的电磁性能参数主要包括端口电压和电磁推力。本文分别对堵转情况下($s=1$)单台初级工作、双初级同时工作时的电磁性能进行分析。双台初级同时工作的性能和上下初级通入的电流有关,这里仅分析2种极端情况:即双初级分别同时通入相同幅值的同相或反相电流。

堵转工况下,单初级通电以及双初级同时通入同相或反相电流时的端口电压 U 和推力 F 的表达式相同,具体为

$$U = (R_s + j2\pi f L_L + \frac{j2\pi f L_m R_R}{R_R + j\omega M}) I \quad (13)$$

$$F = \frac{6I^2 \pi^2}{\tau} \frac{f R_R L_m^2}{R_R^2 + 4\pi^2 f^2 L_m^2} \quad (14)$$

式中: I 为相电流有效值; ω 为电角速度, $\omega=2\pi f$; f 为供电频率(堵转情况下亦为转差频率)。

根据推力对转差频率的微分等于0,由式(14)可以得到最大推力:

$$F_{\max} = \frac{6I^2 \pi L_m}{\tau} \quad (15)$$

根据式(13)和(15)可以得出,单初级通电以及双初级同时通入同相或反相电流时的端口电压差别主要取决于初级漏感,而最大电磁推力主要取决于激磁电感。通过对不同工况下的等效电路及其参数的分析,可以得到它们各自的电磁性能。

分析表1可知,双初级同时通入同相电流时次级漏感最小,根据式(12)折算后的等效激磁电感最大,所以该工况下电磁推力最大且大于双初级分别

单独工作时的推力之和。由于次级仅为一块金属板,没有导磁材料,故次级漏感和激磁电感相比,相差近一个数量级,故双初级同时通入同相电流时等效初级漏感最小,此时端口电压低于2台初级单独工作时的电压,效率和推力密度较单初级电机提高。同理,由于双初级同时通入反相电流时的等效激磁电感最小,等效初级漏感最大,故推力小于双初级分别单独工作时的推力之和,端口电压大于2台初级单独工作时的电压,效率和推力密度较单初级电机降低。

3 试验验证

本文试验数据来自多段双初级耦合直线感应电动机,该电机最大出力14000N,峰值功率400kW。性能测试主要是堵转工况时的端口电压和电磁推力。试验系统以蓄电池为试验电源,逆变器将直流源转换成三相电压给直线感应电动机供电,利用高精度LEM电流霍尔传感器、高精度电阻组成的电压分压板以及nicolet数据采集系统采集电机端口电压、电流波形。电磁推力采用拉力计测量(量程10000N,精度1N)。试验设备及其直线感应电动机如图5所示。



(a) 逆变器及数据采集系统



(b) 高速长定子直线感应电动机

图5 双初级耦合直线感应电动机试验装置

Fig. 5 Experimental facility of double-primary coupling LIM

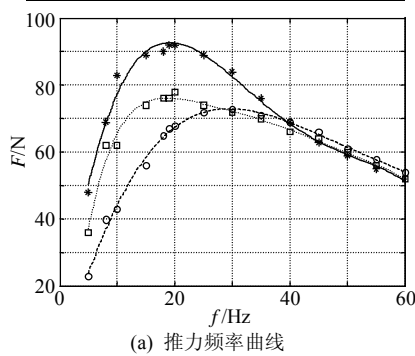
测试内容包括双初级单独通电、双初级同时通入同相电流或反相电流3种工况下,初级电流为35A、频率为5、8、10、18、19Hz,20~60Hz(每隔5Hz一个测试点)堵转时的电磁推力以及端口电

压。样机的电磁参数如表 2 所示。试验测量结果和模型计算结果的对比如图 6，不同工况下最大推力(上下初级分别单独通电时的实测电磁推力之和)和 $f=60\text{Hz}$ 时的实测端口电压的对比如表 3 所示。

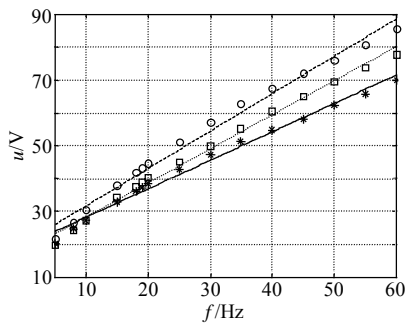
表 2 样机电磁参数

Tab. 2 Electromagnetic parameters of prototype

参数	数值
初级铁心高度/mm	52.000
单段初级铁心长度/m	13.000
次级长度/m	25.000
每相电阻/ Ω	0.239 4
激磁电感/mH	1.334 4
初级漏感/mH	2.320 0
初级端部漏感/mH	0.250 0
次级电阻/ Ω	0.169 1
次级横向电阻/ Ω	0.024 0
次级端部漏感/mH	0.044 5
次级横向漏感/mH	0.021 2
定子材料	铝板



(a) 推力频率曲线



(b) 电压频率曲线

注：* 同相电流工况实测点；—— 反相电流工况计算曲线；
 —— 同相电流工况计算曲线；□ 单初级工况实测点；
 ○ 反相电流工况实测点；—— 单初级工况计算曲线。

图 6 不同工况下推力频率、电压频率曲线

Fig. 6 Curves of thrust and terminal voltage vs. frequency

表 3 不同工况下电磁性能的对比

Tab. 3 Performance comparison of various working conditions

工况	端口电压/V	最大电磁推力/N
单初级通电	77.8	78
通入同相电流	70.0	92
通入反相电流	85.7	73

由图 6 和表 3 可知，双初级同时通入幅值相同的同相电流时最大推力(92 N)大于双初级分别单独

通电的推力之和(78 N)，端口电压(70 V)小于单初级通电的电压(77.8 V)，推力密度和效率相对单初级电机分别提高约 15%和 10%。由此可以看出，双初级耦合直线感应电动机可以增加系统的冗余性能，当双初级同时通入同相电流时，效率和功率密度较单初级电机均有所提高，当双初级同时通入的电流存在相位差甚至是完全反相时，电机的效率和推力密度与单初级电机相比降低。由以上分析可知，在电机控制过程中，务必保证通入幅值和相位均相同的电流。

4 结论

为提高直线感应电动机的冗余性能，本文提出了一种双初级耦合直线感应电动机，并构建了该型电机的模型，通过该模型对电机性能进行了计算，并和实测数据进行对比，得到以下结论：

1) 与单初级直线感应电动机模型相比，双初级耦合直线感应电动机模型主要考虑了初级端部漏感的耦合和次级感应涡流的耦合；

2) 双初级耦合直线感应电动机的上下初级同时通入幅值和相位均相同的电流时，推力密度和效率相对单初级电机分别提高约 15%和 10%；

3) 双初级耦合直线感应电动机的上下初级同时通入存在相位差甚至是完全反相的电流时，推力密度和效率相对于单初级电机有所降低；

4) 为提高双初级耦合直线感应电动机的效率和推力密度，必须在电机控制过程中同时给上下初级通入幅值和相位均相同的电流。

参考文献

[1] Doyle M R, Samuel D J, Conway T. Electromagnetic aircraft launch system-EMALS[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(1): 528-533.

[2] Doyle M, Sulish G, Lebron L. The benefits of electromagnetically launching aircraft[J]. Naval Engineering Journal, 2000, 112(3): 77-82.

[3] Wolcot B. Induction for the birds[J]. Mechanical Engineering, 2000, 122(2): 66-70.

[4] 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(30): 73-78.
 Lu Junyong, Ma Weiming, Li Langru. Research on longitudinal end effect of high speed long primary double-sided linear induction motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(30): 73-78(in Chinese).

[5] 鲁军勇, 马伟明, 孙兆龙, 等. 多段初级直线感应电动机静态纵向边端效应研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(33): 95-101.
 Lu Junyong, Ma Weiming, Sun Zhaolong, et al. Research on static longitudinal end effect of linear induction motor with multi-segment primary[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 95-101(in Chinese).

- [6] 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.
Lu Junyong, Ma Weiming, Xu Jin. Modeling and simulation of high speed long primary double-sided linear induction motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(27): 89-94(in Chinese).
- [7] Hall D, Kapinski J, Krefta M, et al. Transient electromechanical modeling for short secondary linear induction machines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(3): 789-795.
- [8] Pai R M, Boldea I, Nasar S A. A complete equivalent circuit of a linear induction motor with sheet secondary[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1988, 24(1): 639-654.
- [9] Idir K, Dawson G E, Eastham A R. Modeling and performance of linear Induction motor with saturable primary[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1993, 29(6): 1123-1128.
- [10] Kim D K, Kwon B I. A novel equivalent circuit model of linear induction motor based on finite element analysis and its coupling with external circuits[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(10): 3407-3409.
- [11] 上官璇峰, 励庆孚, 袁世鹰, 等. 不连续定子永磁直线同步电动机运行过程分析[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(12): 1292-1295.
Shangguan Xuanfeng, Li Qingfu, Yuan Shiyong, et al. Analysis on running process of permanent linear synchronous motors with discontinuous stators[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1292-1295(in Chinese).
- [12] Seki K, Watada M, Torii S. Discontinuous arrangement of long stator linear synchronous motor for transportation system[C]//2nd International Conference on Power Electronics and Drive System, Singapore, 1997.
- [13] 梁得亮, 鲁军勇, 丰向阳. 永磁直线无刷直流电动机的建模与仿真[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(2): 186-189.
Liang Deliang, Lu Junyong, Feng Xiangyang. Modeling and simulation of linear permanent magnet brushless DC motor[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(2): 186-189(in Chinese).
- [14] Lu Junyong, Ma Weiming. Modeling, simulation and testing of linear permanent magnet DC motor[C]//13th International EML Symposium, Potsdam, Germany, 2006.
- [15] Zhang Gaifan, Ma Weiming. Transient analysis of synchronous machines[M]. Wuhan: Hubei Science and Technology Press, 2001: 41-42.



孙兆龙

收稿日期: 2010-07-01。

作者简介:

孙兆龙(1985), 男, 博士研究生, 研究方向为直线电机设计及控制, brucesunzl@126.com;

刘德志(1953), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力集成、电力电子技术;

马伟明(1960), 男, 中国工程院院士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力集成、电力电子、电力系统、电磁兼容技术;

鲁军勇(1978), 男, 博士, 副教授, 研究方向为直线电机设计及控制。

(编辑 李婧妍)