

轴向充磁圆筒型永磁直线同步电机 气隙磁场解析计算*

任宁宁^{1,2}, 范乐¹, 杨科科¹, 李长乐³

[1. 河南工业职业技术学院 机电自动化学院, 河南 南阳 473000;

2. 南阳智驱防爆电气有限公司, 河南 南阳 473000;

3. 上海电器科学研究所(集团)有限公司, 上海 200063]

摘要:介绍了一种基于许-克变换法的轴向充磁结构圆筒型永磁直线同步电机(TPMLSM)气隙磁场解析计算方法。首先采用许-克变换法计算出无齿槽时电机的气隙磁场;然后利用许-克变换法求取初级铁心开槽时的气隙相对比磁导函数,分析铁心开槽对气隙磁场的影响;最后通过无齿槽时的气隙磁场与有齿槽时的气隙磁场相对比磁导函数得到有齿槽时电机的气隙磁场分布。同时给出了该种充磁结构 TPMLSM 气隙磁场解析计算表达式,并以 1 台 36/12 极槽配合轴向充磁 TPMLSM 样机进行试验。试验结果证明空载气隙磁场的有限元分析值与解析值较吻合,空载电动势(EMF)计算值、试验测试值、有限元分析值一致。

关键词:圆筒型永磁直线同步电机;轴向充磁;相对比磁导;气隙磁场;许-克变换

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)10-0001-05

Analytical Calculation of Air Gap Magnetic Field in Axially Magnetized Tubular Permanent Magnet Linear Synchronous Motor*

REN Ningning^{1,2}, FAN Le¹, YANG Keke¹, LI Changle³

[1. College of Mechanical and Electrical Automation, Henan Polytechnic Institute, Nanyang 473000, China;

2. Nanyang Intelligent Drive Explosion Protection Electric Co., Ltd., Nanyang 473000, China;

3. Shanghai Electrical Apparatus Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200063, China]

Abstract: An analytical calculation method of air gap magnetic field in axially magnetized tubular permanent magnet linear synchronous motor (TPMLSM) based on Schwarz-Christoffel (S-C) transformation method was introduced. Firstly, the air gap magnetic field distribution of the slotless motor was analytically calculated based on S-C transformation method. Then, the air gap relative ratio permeance function of slotted motor was obtained based on S-C transformation to consider the effect of stator core slots. Finally, the air gap magnetic field distribution of the slotted motor was obtained by the basic air gap magnetic field of the slotless motor and the air gap relative ratio permeance function. The analytical formulas of the air gap magnetic field distribution were derived for the axially magnetized TPMLSM. Experiment was carried out using a 36-slot 12-pole axially magnetized TPMLSM. The predicted air gap magnetic field distribution matched the corresponding finite element result, and the measured no-load electromotive force (EMF) of the prototype was also consistent with the analytical and the finite element value, so the validity of the proposed method was proved.

Key words: tubular permanent magnet linear synchronous motor (TPMLSM); axial magnetization; relative ratio permeance; air gap magnetic field; Schwarz-Christoffel transformation

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51507180)

作者简介: 任宁宁(1984—),男,博士,研究方向为直线电机优化设计及驱动控制。

范乐(1985—),女,研究方向为永磁直线电机设计。

杨科科(1982—),女,研究方向为电机本体优化设计。

0 引言

随着电力电子技术的发展,越来越多的机械传动系统采用永磁直线电机作为系统的驱动源。该电机能够大大简化传动系统结构,取消了由旋转运动转化为直线驱动的传统机械装置,不仅使传动系统结构更加简单,同时提高了传动系统的动态性能和可靠性,能够直接驱动整个传动系统工作,从而实现机械传动系统的直驱化。

目前,直线电机已广泛应用于各种需要直线驱动的场所,且应用领域越来越广泛,如加工制造业、轨道交通、军工及其他民用领域。圆筒型永磁直线电机(TPMLSM)具有直线电机和永磁式电机的双重优点,如无法向力、无端部绕组、高功率因数和高推力密度等,因此在高性能伺服传动系统中应用广泛。

如何快速准确地对电机本体进行各项参数计算、仿真分析模型建立及本体优化设计,是研究TPMLSM的主要课题。解决上述问题的前提是对电机的气隙磁场及磁场分布进行精准计算。因此,如何对轴向充磁永磁直线同步电机(TPMLSM)气隙磁场进行解析计算是关键。

国内外学者及专家对永磁直线电机气隙磁场的计算进行了大量的科学研究,并取得了丰硕的研究成果。文献[1-5]利用许-克变换法对无齿槽永磁直线电机的气隙磁场进行了解析计算,并给出了气隙磁场解析计算的表达式。文献[6-7]采用等效磁路法对漏磁较小且磁路简单的模型进行了磁场解析计算研究,但具有一定的局限性。

文献[8]通过给定较高要求的边界解析条件,利用矢量磁位法对径向充磁结构永磁直线电机的反电动势、推力及电感进行了解析计算,但计算较复杂且边界条件要求较高。文献[9]利用镜像法,建立二维场解析计算模型,对平板型永磁直线电机的气隙磁场进行了解析计算分析。文献[10]利用分离变量法,通过求解偏微分方程对PMLSM的气隙磁场进行了解析计算研究,但求解结果偏差较大。

文献[11-13]利用有限元法,对永磁直线电机的气隙磁场进行计算研究。但该方法不能快速得到电机相关参数对电机电磁场的影响,只适合

对本体方案进行精确核算。

本文采用许-克变换法分别计算了无齿槽时电机各段的气隙磁场分布及有齿槽时气隙相对比磁导函数,从而进一步求得有齿槽时该充磁结构电机气隙中的磁场分布,给出了气隙磁场解析计算的表达式。经对1台36/12极槽配合的轴向充磁TPMLSM样机进行了气隙电磁场及反电动势解析计算,同时对样机的空载反电动势进行了试验测试。试验结果表明:气隙电磁场的解析值与有限元仿真值较吻合,空载反电动势解析值与有限元分析结果及试验值一致,验证了所提磁场解析计算方法的有效性。

1 无齿槽气隙磁场解析计算

1.1 气隙磁场解析计算模型

针对本文提出的轴向充磁TPMLSM气隙磁场解析计算方法,首先对解析计算模型作以下假设:(1)铁心的磁导率无穷大;(2)磁钢退磁曲线线性;(3)忽略边端效应。轴向充磁TPMLSM气隙磁场分布解析计算模型如图1所示。

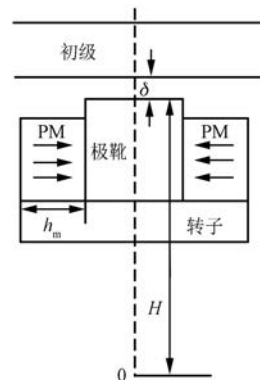


图1 轴向充磁TPMLSM气隙磁场分布解析计算模型

图1中, h_m 为永磁体充磁高度, H 为极靴半径, δ 为气隙长度。

图1中,电机次级定子极靴表面及相对应的初级铁心表面分别为等磁位面,其中极靴表面磁动势为 F_m 或 $-F_m$,即铁心表面磁动势为零。由于次级磁极结构对称,则仅需要对电机的半个极距进行电磁场解析计算,由此可得到半个磁极在 Z 平面的情况。同样,初级铁心表面的磁通可采用许-克变换和对数变换得到,并利用 Z 、 W 、 T 平面

进行转换,分别如图 2~图 4 所示。

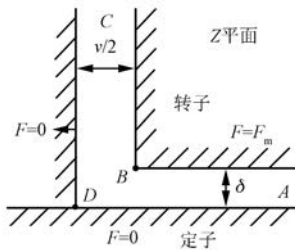


图 2 Z 平面

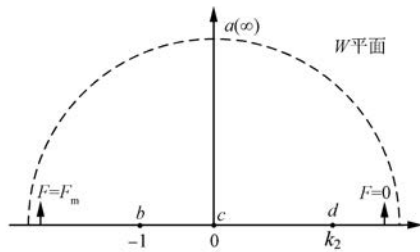


图 3 W 平面

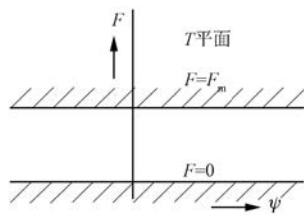


图 4 T 平面

表 1 所示为 Z 平面和 W 平面中相应点的关系,其中 k_2 为待定量, v 为极间距离, j 为虚部符号。由此可得该电机半个极距在 W 平面上的情况,如图 3 所示。

表 1 Z 平面和 W 平面相应点的对应关系

Z 平面		W 平面	
点	坐标	点	坐标
A	$\infty + j\delta, \infty$	a	$\pm\infty$
B	$v/2 + j\delta$	b	-1
C	$v/2 + j\infty, j\infty$	c	0
D	0	d	k_2

基于表 1 的 Z 平面和 W 平面中相应点的对应关系及许-克变换,可采用微分方程把 Z 平面转换到 W 平面。转换微分方程如下:

$$\frac{dz}{dw} = k_1(w+1)^{0.5}w^{-1}(w-k_2)^{-0.5} \quad (1)$$

式(1)中变量 z 为

$$z = \int \frac{1}{w} \sqrt{\frac{w+1}{w-k_2}} dw + k_3 \quad (2)$$

假定: $\bar{B} = \sqrt{\frac{w-k_2}{w+1}}$ ($0 \leq \bar{B} \leq 1$), \bar{B} 为归一化的磁密,则式(2)可表示为

$$z = \frac{2k_1}{\sqrt{k_2}} \arctan\left(\frac{\bar{B}}{\sqrt{k_2}}\right) + k_1 \ln\left(\frac{1+\bar{B}}{1-\bar{B}}\right) + k_3 \quad (3)$$

设变量 $z=0$, 则 $w=k_2$, 由此可得: $k_3=0$ 。

进一步积分可得:

$$k_1 = \delta/\pi \quad (4)$$

$$k_2 = (\delta/v)^2 \quad (5)$$

其中: $v = (1-a_p)\tau$ 。

式中: a_p ——极弧系数;

τ ——极距。

进一步将式(4)、式(5)代入式(3)可得:

$$z = \frac{2v}{\pi} \arctan\left(\frac{v\bar{B}}{\delta}\right) + \frac{\delta}{\pi} \ln\left(\frac{1+\bar{B}}{1-\bar{B}}\right) \quad (6)$$

W 平面和 T 平面可采用对数变化公式进行变换:

$$t = \psi + jF = \frac{F_m}{\pi} \ln w \quad (7)$$

电机初级铁心表面的磁通密度在 T 平面的情况可表述为

$$B = \mu_0 \frac{dt}{dz} = \mu_0 \frac{dt}{dw} \frac{dw}{dz} \quad (8)$$

式中: μ_0 ——空气的磁导率。

将式(1)和式(7)代入式(8),可得初级铁心与次级极靴表面相对应的内表面磁通密度:

$$B_r = \mu_0 \frac{F_m}{\pi} \frac{1}{w} \frac{\pi}{\delta} w \sqrt{\frac{w-k_2}{w+1}} = \mu_0 \frac{F_m}{\delta} \bar{B} \quad (9)$$

由该种充磁结构可知,2 个磁极的中心线位置的磁动势为零,则极间中心线部分的磁通密度 B_y 一样可采用式(8)和式(9)求得:

$$B_y = \mu_0 \frac{F_m}{b_j} \bar{B}_y = B_{\max3} \bar{B}_y \quad (10)$$

式中: $B_{\max3}$ ——磁极部分的最大磁通密度值;

\bar{B}_y ——极间中心线部分的归一化磁通密度。

1.2 电机磁动势计算

永磁电机采用永磁体励磁提供磁路所需要的磁动势 F_m 和总磁通 Φ_m 。

由于磁通是连续的,则磁路中的磁通关系可表示为

$$\Phi_m = \Phi_0 + \Phi_3 + \Phi_4 \quad (11)$$

式中: Φ_0 ——主磁通;

Φ_3 、 Φ_4 ——2 个转子磁极内外表面的漏磁通。

主磁通可由式(12)进行求解:

$$\Phi_0 = B_{\max 0} \Phi_1 \quad (12)$$

其中: Φ_1 可由 \bar{B}_r 求出。

外表面漏磁通 Φ_3 为

$$\Phi_3 = B_{\max 3} \Phi_2 = \mu_0 \frac{F_m}{b_j} \Phi_2 \quad (13)$$

其中: Φ_2 可由 \bar{B}_y 求出。

永磁工作特性曲线如图 5 所示。

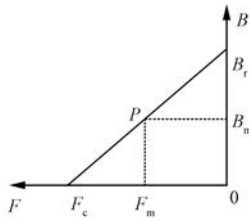


图 5 永磁工作特性曲线

根据图 5,可得工作时磁钢的磁感应强度为

$$B_m = B_r - \frac{B_r}{F_c} F_m \quad (14)$$

其中: $F_c = H_{cj} h_m$ 。

式中: H_{cj} ——矫顽力;

B_r ——剩余磁感应强度。

由式(14)可得磁钢提供的总磁通为

$$\Phi_m = B_r S - \frac{B_r S}{H_{cj} h_m} F_m \quad (15)$$

内表面的漏磁通 Φ_4 为

$$\Phi_4 = F_m \Lambda_1 \quad (16)$$

将式(12)、式(13)、式(15)和式(16)代入式(11),可求出永磁体向外磁路提供的磁动势:

$$F_m = \frac{B_r b_m l}{\frac{\mu_0}{\delta_{\min}} \Phi_1 + \frac{\mu_0}{\xi_{\min}} \Phi_2 + \Lambda_1 + \frac{B_r b_m l}{H_{cj} h_m}} \quad (17)$$

通过式(9)和式(10)还可求出无齿槽轴向充

磁结构 TPMLSM 气隙中的磁场分布。

2 有齿槽气隙磁场解析计算

由于齿槽影响气隙磁场分布,所以电机开槽后气隙磁场解析计算可通过计算无齿槽时的磁场和有齿槽时的相对比磁导函数得到。由此可知,只需求解开槽后的气隙相对比磁导函数,便可得到有齿槽电机的气隙磁场。

设定槽中心线为初始位置,由 Heller 及 Hamata 公式可得单个槽的气隙比磁导为^[14]

$$\lambda(r, a) = \begin{cases} \Lambda_0 \left[1 - \beta(r) - \beta(r) \cos \frac{\pi}{0.8a_0} a \right], & |a| \leq 0.8a_0 \\ \Lambda_0, & 0.8a_0 \leq a \leq a_1/2 \end{cases} \quad (18)$$

其中: $\Lambda_0 = \mu_0 / \delta'$

式中: a ——距离槽中心线的位置角;

$\beta(r)$ ——气隙磁感应强度变化率;

a_1 ——槽距角。

将齿面位置的比磁导设置为基值,则单个齿距初级铁心内表面不同位置的相对比磁导函数为

$$\bar{\lambda}(r, a) = \frac{\lambda(r, a)}{\Lambda_0} \quad (19)$$

由于相对比磁导以一个初级齿距为周期,则可得相对比磁导函数的傅里叶级数形式为

$$\bar{\lambda}(r, a) = \sum_{k=0}^{\infty} \bar{\Lambda}_k(r) \cos kQ_s(a + a_{sa}), k = 1, 2, \dots \quad (20)$$

根据上述求出的无齿槽时气隙磁场分布及有齿槽时气隙相对比磁导函数,可求解得到有齿槽时电机的气隙磁场分布为

$$B_{r-\text{slot}}(r, \theta) = B_r \bar{\lambda}(r, a) \quad (21)$$

3 磁场解析计算及验证

以 1 台 36/12 极槽配合轴向充磁结构 TPMLSM 样机电磁场进行解析计算分析,同时采用有限元法对磁场解析结果进行验证。电机的主要参数如表 2 所示。

进一步搭建了样机的试验测试平台对电机的空载反电动势进行测试,样机及试验测试平台如图 6 所示。其中,样机的接线方式为 1 路整距 Y 接。

表 2 样机的主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
初级铁心外径/mm	110	齿宽/mm	4
初级铁心内径/mm	59	槽口宽/mm	2
轴径/mm	20	永磁体	钕钴
初级槽数	36	永磁体内径/mm	20
极对数	6	永磁体外径/mm	48
极距/mm	30	充磁高度/mm	14
槽距/mm	10	最小气隙/mm	1.5

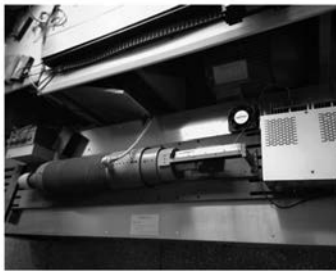


图 6 试验样机

无齿槽和有齿槽气隙磁密的分析结果分别如图 7、图 8 所示。电机的空载反电动势测试结果如图 9 所示。由图 7、图 8 可看出,利用本文所提出的气隙磁场解析计算方法解析计算得到气隙磁场分布与有限分析结果较吻合,相电压试验波形与解析结果一致,验证了该方法的正

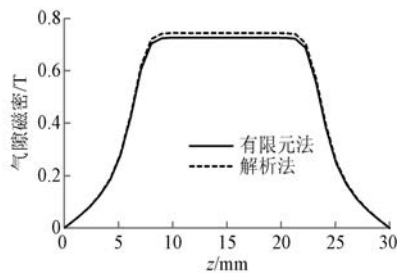


图 7 无齿槽气隙磁密

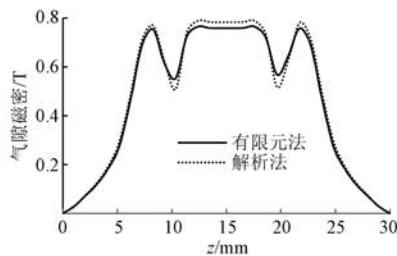


图 8 有齿槽气隙磁密

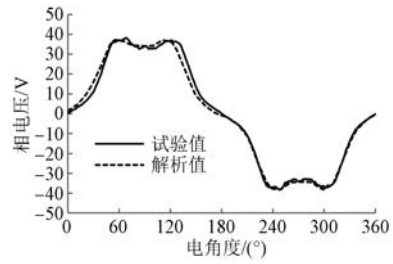


图 9 空载反电动势测试结果

确性和有效性。

4 结 语

本文介绍了许-克变换法分段求解无齿槽时的电机气隙磁场解析计算,以及有齿槽时气隙磁场的解析计算方法。研究表明:该方法能够快速准确地计算出无齿槽及有齿槽时 TPMLSM 的气隙磁场分布,为电机本体方案快速优化设计及参数精确计算提供了依据。

【参考文献】

- [1] BOUGHRARA K, ZARKO D, IBTIOUEN R, et al. Magnetic field analysis of inset and surface-mounted permanent magnet synchronous motors using Schwarz-Christoffel transformation [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45 (8) : 3166.
- [2] KROP D C J, LOMONOVA E A, VANDENPUT A J A. Application of Schwarz-Christoffel mapping to permanent-magnet linear motor analysis [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 (3) : 352.
- [3] GYSEN B L J, LOMONOVA E A, PAULIDES J J H, et al. Analytical and numerical techniques for solving Laplace and Poisson equations in a tubular permanent magnet actuator: part II. Schwarz-Christoffel mapping [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44 (7) : 1751.
- [4] 赵镜红,张俊洪,方芳,等.径向充磁圆筒永磁直线同步电机磁场和推力解析计算 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (7) : 154.
- [5] 黄克峰,李槐树,周羽.轴向充磁圆筒型永磁直线电机磁场解析 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2013, 34 (7) : 883.
- [6] 王蕾,李光友,张强.磁通反向电机的变网络等效磁路模型 [J]. 电工技术学报, 2008, 23 (8) : 18.

(下转第 13 页)

及磁钢所受应力将急剧增加;当其过盈量小于一定值 b 时,高速高温运转将使磁钢与转轴分离,磁钢开始打滑,因此,过盈量可以取 $a \sim b$ 范围之内。

【参考文献】

- [1] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速电机发展与设计综述[J].电工技术学报,2016,31(7): 1.
- [2] KRACK M, SECANELL M, MERTINY P. Cost optimization of hybrid composite flywheel rotors for energy storage [J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2010, 41(5): 779.
- [3] ZWYSSIG C, KOLAR J W, THALER W, et al. Design of a 100 W, 500 000 rpm permanent-magnet generator for mesoscale gas turbines [C] // Fourtieth IAS Annual Meeting Conference Record of the 2005 Industry Applications Conference, 2005.
- [4] 张凤阁,杜光辉,王天煜,等.高速永磁电机转子不同保护措施的强度分析[J].中国电机工程学报, 2013, 33(增刊1): 195.
- [5] SCHNEIDER T, BINDER A. Design and evaluation of a 60 000 rpm permanent magnet bearingless high speed motor [C] // 2007 7th International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2007.
- [6] KENNY B H, KASCAK P E, JANSEN R, et al. Control of a high-speed flywheel system for energy storage in space applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(4): 1029.
- [7] HONG D K, WOO B C, KOO D H. Rotordynamics of 120 000 r/min 15 kW ultra high speed motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2009, 45(6): 2831.
- [8] 张超,朱建国,韩雪岩.高速表贴式永磁电机转子强度分析[J].中国电机工程学报,2016,36(17): 4719.
- [9] 王继强,王凤翔,鲍文博,等.高速永磁电机转子设计与强度分析[J].中国电机工程学报,2005,25(15): 140.
- [10] BORISAVLJEVIC A, POLINDER H, FERREIRA J A. On the speed limits of permanent-magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 220.
- [11] 陈亮亮,祝长生,王萌.碳纤维护套高速永磁电机热态转子强度[J].浙江大学学报(工学版),2015,49(1): 162.
- [12] 王保俊,毕刘新,陈亮亮,等.碳纤维绑扎表贴式高速永磁电机转子强度分析[J].浙江大学学报(工学版),2013,47(12): 2101.
- [13] 吴震宇,曲荣海,李健,等.表贴式高速永磁电机多场耦合转子设计[J].电机与控制学报,2016,20(2): 98.
- [14] 官能平,夏源明,毛天祥.复合材料飞轮的三维应力分析[J].复合材料学报,2002,19(1): 113.
- [15] 李松松.碳纤维复合材料高速转子的力学特性研究及其储能密度优化 [D]. 长春:中国科学院长春光学精密机械与物理研究所,2003.

收稿日期: 2019-06-05

(上接第5页)

- [7] CLARK R E, SMITH D S, MELLOR P H, et al. Design optimization of moving-magnet actuators for reciprocating electromechanical systems [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1995, 31(6): 3746.
- [8] 赵镜红,张晓锋,张俊洪,等.径向充磁圆筒永磁直线同步电机磁场分析[J].上海交通大学学报, 2010, 44(7): 989.
- [9] TRUMPER D L, KIM W, WILLIAMS M E. Design and analysis framework for linear permanent magnet machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(2): 371.
- [10] 王淑红,熊光煜.永磁直线同步电动机气隙磁场及磁阻力分析[J].煤炭学报,2006,31(6): 824.
- [11] MAHMOUDI A, RAHIM N A, PING H W. Axial-flux permanent-magnet motor design for electric vehicle direct drive using sizing equation and finite element analysis [J]. Progress in Electromagnetics Research, 2012, 122: 467.
- [12] TERATA M, FUJII N. Permanent magnet linear synchronous motor with high air-gap flux density for transportation [J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics, 2012, 39: 997.
- [13] TOMCZUK B, SCHRODER G, WAINDOK A. Finite-element analysis of the magnetic field and electromechanical parameters calculation for a slotted permanent magnet tubular linear motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(7): 3229.
- [14] ZHU Z Q, HOWE D. Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors, part III: Effect of stators slotting [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1993, 29(1): 143.

收稿日期: 2019-06-11