

空心 and Halbach 永磁直线同步电机的牵引力和法向力分析*

刘恒坤, 张 晓, 弥 柱

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 针对由空芯线圈和 Halbach 永磁结构组成的直线同步牵引电机, 提出其牵引力和法向力的一种解析计算方法。首先从相同结构的旋转电机出发, 推导得到其牵引力和法向力的解析计算公式; 然后, 将所得结果推广到直线电机结构, 得到基于空芯线圈和 Halbach 永磁结构的直线同步电机牵引力和法向力的计算方法。所得解析解的有效性由有限元分析软件 Ansoft Maxwell 得到验证。此方法为基于空芯线圈和 Halbach 永磁结构的直线同步电机的结构设计和性能分析提供了基础。

关键词: 同步直线电机; Halbach 永磁体; 磁场; 有限元方法

中图分类号: TM351; TM359 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-2486(2012)03-0094-04

Analytical computation of normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets

LIU Hengkun, ZHANG Xiao, MI Zhu

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: An analytical method of calculating the normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets is developed. First, the analytical solution to the normal and tangential forces of the rotary motor with the same structure is deduced. Then, the proposed method is extended to linear motor, and the analytical method of computing the normal and tangential forces in linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets is obtained. Finally, the effectiveness of the proposed analytical method is validated by Ansoft Maxwell, which is a famous finite element analytical software. The proposed solution provides an important tool for structure design and performance analysis of linear synchronous motor with air-core and Halbach permanent magnets.

Key words: Linear Synchronous Motor; Halbach permanent magnets; magnetic field; finite element

永磁直线同步电机(PMLSM)因其动态性能好、可靠性高,越来越受到人们的关注^[1-3]。随着永磁直线同步电机的广泛应用,对其性能的要求也越来越高^[4]。永磁直线同步电机的牵引力波动是影响其性能的主要因素;此外,电机的法向力的大小也成为衡量电机性能的一个指标。对电机的力分析表明,若能得到标准的正弦气隙磁密,则能极大地减小电机的波动。采用常规磁体结构时不能得到理想的正弦波气隙磁密分布。为此,将 Halbach 磁体结构应用于永磁电机,这不仅可以使气隙磁密正弦化,而且气隙磁通也会增加,这意味着电磁牵引力增大^[5-7]。为进一步提高电机牵引力的平稳性,同时减弱电机法向力,初级采用空心线圈。常规带铁芯的同步直线电机,牵引力存在着6次谐波^[8-9],这会影响电机牵引力的平稳性。采用空心线圈作为初级,可以消除6次谐波的影响,使电机的牵引力更加平稳;另外,采用空心初级线圈,可以极大地减小初级与次级之间的

法向力,由此可以减弱电机对外设在法向力上的不利影响。

1 Halbach 结构永磁体介绍

1978年8月,美国物理学家 K. Halbach 提出了一种新颖的永磁体结构^[10-12],见图1。将这种结构用于电机便形成了一种特殊的永磁电机——Halbach 电机。这种结构电机的气隙磁密波形比常规磁体结构电机的气隙磁密波形具有更好的正弦性,并具有很好的转子轭部磁屏蔽作用,这对于提高电动机的转矩密度和功率密度极为有利^[13-14]。

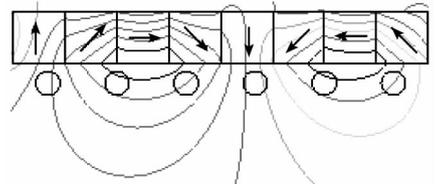


图1 Halbach 永磁结构图

Fig. 1 Halbach permanent magnet structure

* 收稿日期:2011-07-31

作者简介:刘恒坤(1975—),男,重庆江津人,讲师,博士,E-mail:liberry@sina.com

图1中,箭头为永磁的充磁方向,6个圆圈为三相线圈,封闭的曲线为磁力线。相邻两个永磁铁之间的充磁方向相差45°。由图可知,磁铁一侧磁力线分布较密,另外一侧几乎没有磁力线通过,这是 Halbach 结构磁场分布的重要特征。

2 电机的结构描述

本文研究的三相直线同步电机,其初级采用空心线圈,次极采用 Halbach 结构的永磁,采用软件 Ansoft Maxwell 建立电机模型如图2所示。[15]

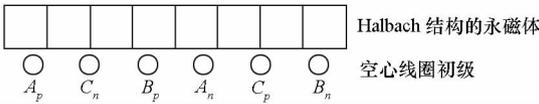


图2 有限元电机模型

Fig.2 Diagram of Finite element motor model

电机参数如下:极距 258mm,电机厚度 170mm,初级线圈采用铜线,其直径 30mm,永磁截面尺寸 64.5mm × 64.5mm,永磁材料 NdFe48。

3 牵引力和法向力的计算

3.1 解析计算

直线电机可以由旋转电机剖开得到,为便于分析,这里以旋转电机为对象进行展开研究,不失一般性,带铁芯的旋转电机模型如图3所示。[2]

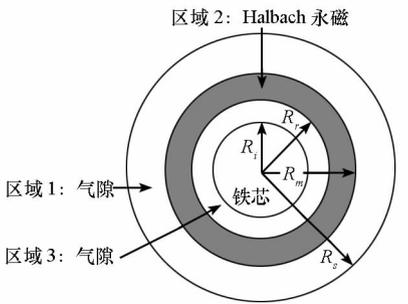


图3 Halbach 永磁电机结构示意图

Fig.3 Halbach permanent magnet motor

如图3中区域2是 Halbach 永磁,其余两个区域为空气。 R_s 、 R_m 、 R_r 和 R_i 分别为外铁芯半径、永磁外径、永磁内径和内铁芯半径。当 R_s 为无穷大,且 R_i 为 0 时,即为空心初级电机。计算时作如下假设:(1)磁体为理想 Halbach 结构;(2)忽略轴向长度的影响;(3)铁芯的磁导率无穷大。

在图3中建立极坐标系 $r - O - \theta$,其原点 O 位于电机的中心,径向坐标和圆周方向的坐标分别定义为 r 和 θ 。由于 Halbach 永磁结构磁化强度的分布 M 呈正弦变化,其在极坐标系中可表

示为^[2]

$$M = \frac{B_r}{\mu_0} \cos p \theta e_r \pm \frac{B_r}{\mu_0} \sin p \theta e_\theta \quad (1)$$

其中 p 为电机的极对数,负号代表永磁磁场在永磁体的外部,正号代表永磁磁场在永磁体的内部, e_r 和 e_θ 分别是沿坐标系径向和圆周方向的单位矢量。

图3中, Halbach 永磁结构在区域1、2和3中产生的磁场可由标量磁势进行表示。

区域1内, $R_m < r < R_s$, 磁势 φ_1 满足^[2]:

$$\nabla^2 \varphi_1 = \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_1}{\partial \theta^2} = 0 \quad (2)$$

区域2内, $R_r < r < R_m$, 磁势 φ_2 满足^[2]:

$$\nabla^2 \varphi_2 = \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_2}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_2}{\partial \theta^2} = \frac{\nabla M}{\mu_r} \quad (3)$$

区域3内, $R_i < r < R_r$, 磁势 φ_3 满足^[2]:

$$\nabla^2 \varphi_3 = \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_3}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 \varphi_3}{\partial \theta^2} = 0 \quad (4)$$

式(2)~(4)的通解分别为

$$\varphi_1(r, \theta) = (C_1 r^p + C_2 r^{-p}) \cos p \theta \quad (5)$$

$$\varphi_2(r, \theta) = \left(C_3 r^p + C_4 r^{-p} + \frac{B_r}{\mu_0 \mu_r} \frac{r}{1 \pm p} \right) \cos p \theta \quad (6)$$

$$\varphi_3(r, \theta) = (C_5 r^p + C_6 r^{-p}) \cos p \theta \quad (7)$$

图3的电机结构具有如下边界条件:

$$H_{\theta 1} = 0, \quad (r = R_s) \quad (8)$$

$$B_{r 1} = B_{r 2}, \quad (r = R_m) \quad (9)$$

$$H_{\theta 1} = H_{\theta 2}, \quad (r = R_m) \quad (10)$$

$$B_{r 2} = B_{r 3}, \quad (r = R_r) \quad (11)$$

$$H_{\theta 2} = H_{\theta 3}, \quad (r = R_r) \quad (12)$$

$$H_{\theta 3} = 0, \quad (r = R_i) \quad (13)$$

磁势 φ 和磁通 H 满足以下条件:

$$H_r = -\frac{\partial \varphi}{\partial r}, \quad H_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \varphi}{\partial \theta} \quad (14)$$

结合式(1)~(14)即可求出各个区域的磁场强度和磁通密度。观察图2和图3可知,图2中直线电机初级线圈所处的磁场环境即为图3中旋转电机的区域1,对应到本文所指的空心 Halbach 直线电机模型,即 $R_s \rightarrow \infty, R_i = 0$, 由于篇幅原因,这里只给出区域1内磁通密度表达式:

$$B_{r 1} = \mu_0 H_{r 1} = -\mu_0 \frac{\partial \varphi_1}{\partial r} = B_0 \cos p \theta \quad (15)$$

$$B_{\theta 1} = \mu_0 H_{\theta 1} = -\mu_0 \frac{1}{r} \frac{\partial \varphi_1}{\partial \theta} = B_0 \sin p \theta \quad (16)$$

其中:

$$B_0 = \frac{-\frac{2B_r p}{1+p}(1+\mu_r)\left[1 - \left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{p+1}\right]\left(\frac{R_m}{r}\right)^{p+1}}{(1-\mu_r)^2\left(\frac{R_r}{R_m}\right)^{2p} - (1+\mu_r)^2} \quad (17)$$

$$R_r = \frac{p \times 0.516}{2\pi}$$

$$R_m = R_r + 0.0645$$

$$r = R_m + 0.025$$

图 2 中的三相电流可分别表示为

$$I_a = A \sin(2\pi f \cdot t + \theta_0) \quad (18)$$

$$I_b = A \sin(2\pi f \cdot t + \theta_0 - \frac{2\pi}{3}) \quad (19)$$

$$I_c = A \sin(2\pi f \cdot t + \theta_0 + \frac{2\pi}{3}) \quad (20)$$

其中 A 为电流的幅值, f 是电流的变化频率, θ_0 为初始相位。

在图 2 中, 定义 X 轴水平向右, Y 轴垂直向上, 则各线圈沿 X 轴的受力表现为电机的牵引力, 沿 Y 轴的受力表现为电机的法向力。考虑 Halbach 磁场表达式 (15) 和 (16), 利用通电线圈在磁场中的受力公式, 直线电机中各线圈受的牵引力和法向力可分别计算为

$$F_{apx} = B_0 \cos\theta_{ap} \cdot I_a \cdot L \quad (21)$$

$$F_{apy} = B_0 \sin\theta_{ap} \cdot I_a \cdot L \quad (22)$$

$$F_{anx} = -B_0 \cos\theta_{an} \cdot I_a \cdot L \quad (23)$$

$$F_{any} = -B_0 \sin\theta_{an} \cdot I_a \cdot L \quad (24)$$

$$F_{bpx} = B_0 \cos\theta_{bp} \cdot I_b \cdot L \quad (25)$$

$$F_{bpy} = B_0 \sin\theta_{bp} \cdot I_b \cdot L \quad (26)$$

$$F_{bnx} = -B_0 \cos\theta_{bn} \cdot I_b \cdot L \quad (27)$$

$$F_{bny} = -B_0 \sin\theta_{bn} \cdot I_b \cdot L \quad (28)$$

$$F_{cpx} = B_0 \cos\theta_{cp} \cdot I_c \cdot L \quad (29)$$

$$F_{cpy} = B_0 \sin\theta_{cp} \cdot I_c \cdot L \quad (30)$$

$$F_{cnx} = -B_0 \cos\theta_{cn} \cdot I_c \cdot L \quad (31)$$

$$F_{cny} = -B_0 \sin\theta_{cn} \cdot I_c \cdot L \quad (32)$$

其中 L 为电机的宽度。各式中 θ_0 的变化可以改变电机的功角。由于力的相互作用, 永磁体所受的力的大小即为空心线圈所受的力, 只不过方向相反, 这里不考虑力的方向, 根据式 (21) ~ (32) 可知, 图 2 所示结构的直线同步电机产生的牵引力和法向力可计算为

$$F_x = F_{apx} + F_{anx} + F_{bpx} + F_{bnx} + F_{cpx} + F_{cnx} \quad (33)$$

$$F_y = F_{apy} + F_{any} + F_{bpy} + F_{bny} + F_{cpy} + F_{cny} \quad (34)$$

图 2 所示的直线电机结构可以看作是由图 3 所示的旋转电机展开得到的, 式 (1) ~ (34) 的推导可推广应用到图 2 的直线电机结构。

下面给出一个计算实例。选取图 2 所示电机结构中, Halbach 永磁体的高度为 64.5mm, 单周期阵列包括 8 块永磁体, 长度为 516mm。从而等效到图 3 所示的电机结构中, 有

另外选取永磁材料的参数为

$$B_r = 1.2603, \quad \mu_r = 1.085$$

线圈中电流的参数为

$$A = 1414, \quad f = 50$$

电机的宽度 $L = 170\text{mm}$ 。

当电机位于图 2 所示的位置时

$$\theta_{ap} = 0, \quad \theta_{cn} = \frac{\pi}{3}, \quad \theta_{bp} = \frac{2\pi}{3},$$

$$\theta_{an} = \pi, \quad \theta_{cp} = \frac{4\pi}{3}, \quad \theta_{bn} = \frac{5\pi}{3}.$$

图 4 为不同电机极对数 p , 功角 θ 在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内变化时, 一个周期 Halbach 永磁体所受力的仿真结果。当电机极对数 p 较少时, 容易理解, 图 2 所示的直线电机与图 3 所示旋转电机的误差较大。为此, 需要取合适的电机极对数 p , 以减小计算误差。

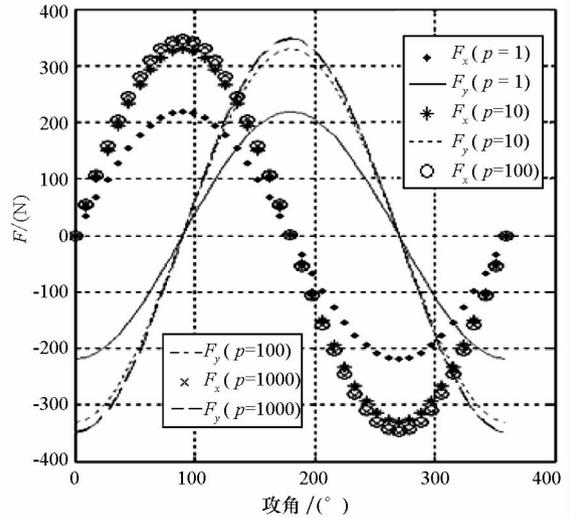


图 4 极对数 p 变化时的结果

Fig. 4 Diagram of result while p is varying

图 4 中, F_x 为牵引力, F_y 为法向力。由图可知, 牵引力为正弦分布, 法向力为余弦分布。从图中可以看出, 当电机极对数 p 较大时, 如 p 为 100 以上时, 牵引力和法向力随极对数增加变化缓慢。

3.2 有限元结果

由于初级和次级沿垂直于次级运动方向的每一横截面的形状均相同, 因此采用 2D 长定子模型进行分析。利用 Ansoft Maxwell 软件, 取一个周期的 Halbach 永磁, 建立 2D 模型。初级与次极的相对位置如图 2 所示, 功角 θ 在 $0 \sim 360^\circ$ 范围内变化时, 求出永磁体的受力有限元结果, 并将 p 取

1000 时的解析结果与之对比,二者的对比结果见图 5。

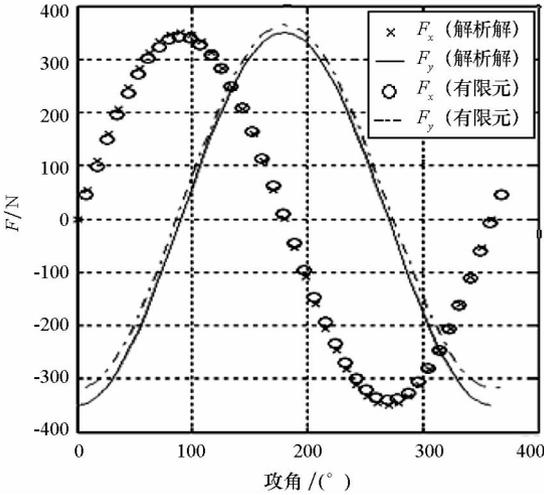


图 5 有限元与解析解的对比

Fig. 5 Finite element result and analytical result

图 5 中, F_x 表示牵引力, F_y 表示法向力, 由有限元与解析解比较可知, 二者所得到的永磁体的受力情况基本一致。两者之间误差的原因在于, 解析计算时认为永磁磁场是理想的正弦磁场, 同时忽略了线圈切割永磁磁场产生的电势及直线电机端部效应的影响。

4 结 论

对于空心 Halbach 永磁直线电机, 给出了其模型。利用旋转电机模型进行解析分析, 得到气隙磁场分布的解析解, 进而得出直线电机磁场分布的解析结果, 计算出永磁体的受力情况。利用有限元计算结果与解析结果进行对比, 验证了二者的一致性。解析计算方法相对于有限元方法而言, 计算量小, 计算时间少, 设计方便, 这种方法在永磁直线同步电机设计的初期具有很强的实用性: 在设计电机时, 根据电机的性能指标, 利用这种方法, 能够快速计算出电机的参数, 然后再利用有限元方法对电机参数进一步优化, 提高了电机设计的效率。

参考文献 (References)

[1] 毛军红, 罗俊航, 姜强, 等. 一种永磁直线电机的永磁体阵列设计[J]. 西安交通大学学报, 2007, 41(3): 353-357.
MAO Junhong, LUO Junhang, JIANG Qiang, et al. Design of magnet arrays for a permanent magnetic linear motor[J]. Journal of Xi'an Jiao Tong University, 2007, 41(3): 353-357. (in Chinese)

[2] 何仁, 牛润新, 董颖. 永磁磁轨制动技术在轨道交通中的应用[J]. 中国安全科学学报, 2007, 17(1): 167-171.
HE Ren, NIU Runxin, DONG Yin. Application of permanent magnet track braking technique in railway[J]. China Safety Science Journal, 2007, 17(1): 167-171. (in Chinese)

[3] 宋国强, 赵朝会. Halbach 列永磁电机的研究[J]. 电机与控制应用, 2008, 35(7): 12-17.
SONG Guoqiang, ZHAO Chaohui. Study of Halbach array PM machines[J]. EMCA, 2008, 35(7): 12-17. (in Chinese)

[4] 崔皆凡, 蒋莉莉, 王贺敏, 等. Halbach 磁体结构应用于永磁直线同步电机的研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 29(4): 400-403.
CUI Jiefan, JIANG Lili, WANG Hemin, et al. Research on permanent magnet linear synchronous motor with Halbach array[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2007, 29(4): 400-403. (in Chinese)

[5] Xia Z P, Zhu Z Q, Howe D. Analytical magnetic field analysis of Halbach magnetized permanent magnet machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2004, 40(4): 1864-1872.

[6] Moon G L, Sung Q L, Gweon D G. Analysis of Halbach magnet array and its application to linear motor [J]. Mechatronics, 2004, 14(5): 115-128.

[7] 潘孟春, 陈棣湘, 罗飞路, 等. 常导高速磁悬浮列车电磁场的分析与测量[J]. 铁道学报, 2004, 26(4): 126-128.
PAN Mengchun, CHEN Dixiang, LUO Feilu, et al. Electromagnetic field analysis and measurement of high speed normal magnetic levitation vehicle system[J]. Journal of the China Railway Society, 2004, 26(4): 126-128. (in Chinese)

[8] 陈棣湘, 潘孟春, 罗飞路, 等. 高速磁悬浮列车电磁场的模拟计算[J]. 国防科技大学学报, 2003, 25(4): 76-78.
CHEN Dixiang, PAN Mengchun, LUO Feilu, et al. The simulated calculation on electromagnetic fields of the high speed magnetic levitation vehicle[J]. Journal of National University of Defense Technology, 2003, 25(4): 76-78. (in Chinese)

[9] 徐衍亮, 姚福安, 房建成. Halbach 磁体结构电动机及其常规磁体结构电动机比较研究(II)[J]. 电工技术学报, 2004, 19(6): 58-62.
XU Yanliang, YAO Fuan, FANG Jiancheng. Halbach array permanent magnet machine and its performance comparison with the normal array one(II)[J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2004, 19(6): 58-62. (in Chinese)

[10] Merritt B T, Post R F, Reifuerst G R, et al. Halbach array motor/generators-A novel generalized electric machine [C]// Halbach Festschrift Symposium, 1995.

[11] Halbach K. Physical and optical properties of rare earth cobalt magnets [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1981, 187: 109-117.

[12] Halbach K. Perturbation effect in segmented rare earth cobalt magnets [J]. Nuclear Instruments and Methods, 1982, 198: 213-215.

[13] Zhu H Q, Xia Z P, Atallah K, et al. Powder alignment system for anisotropic bonded NdFeB Halbach cylinders [R]. 2000 IEEE, 0018-9464.

[14] Zhu Z Q, Howe D. Halbach permanent magnet machines and applications 2a review [C]// Proceedings Inst. Elect. Eng. Electric Power Applications, 2001, 148(4): 299-308.

[15] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅. Ansoft 工程电磁场有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.
LIU Guoqiang, ZHAO Lingzhi, JIANG Jiya. Ansoft engineering electromagnetic field analysis [M]. Beijing: Electronic Engineering Press, 2006. (in Chinese)