

永磁同步直线电机建模及混沌搜索优化设计^{*}

杨益飞^{1,2}, 骆敏舟², 贺乃宝¹

(1. 苏州市职业大学机电工程学院, 江苏 苏州 215104;

2. 中国科学院合肥物质科学研究院先进制造技术研究所, 江苏 常州 213164)

摘要: 建立了永磁同步直线电机的电磁场有限元物理模型, 以此对气隙磁密波形畸变率进行了深入的分析。通过电机参数样本空间设计, 利用正交试验设计方法进行非线性回归建模分析, 给出了气隙磁密波形正弦度可行的电磁方案。基于混沌搜索理论和适应函数对永磁同步直线电机结构参数进行优化。仿真结果表明, 在此结构参数基础上, 电机磁极偏移后其三相反电势依然有较好的对称性, 为永磁同步直线电机及其他电磁工程设计提供了一种新的思路。

关键词: 永磁同步直线电机; 有限元分析; 混沌搜索

中图分类号: TM 351 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)09-0034-05

Chaotic Search Optimal Design and Modeling of Permanent Magnet Synchronous Linear Motor^{*}

YANG Yifei^{1,2}, LUO Minzhou², HE Naibao¹

(1. Suzhou Vocational University, Suzhou 215104, China;

2. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Hefei Institutes of Physical Science, Chinese Academy of Sciences, Changzhou 213164, China)

Abstract: A electromagnetic finite element model of permanent magnet synchronous linear motor was presented and distortion rate of the air gap flux density curve was analyzed in detail. By designing the sample space of the parameters, nonlinear regression modeling of the orthogonal experimental design was introduced. Put forward for possible air gap flux density waveform sine electromagnetic scheme. Parameters optimization of the permanent magnet synchronous linear motor was also introduced which was based on chaos search and adaptation function. Simulation results proved that the pole shifting did not affect the motor back electromotive symmetry based on the structural parameters, it provided a novel way for the optimum design of permanent magnet synchronous linear motor and other engineering.

Key words: permanent magnet synchronous linear motor; finite element analysis; chaotic search

0 引言

直线电机在工业界的应用非常广泛, 由于具有高效率及工作稳定两大优点, 所以在追求自动化生产的过程中扮演不可或缺的角色。直线电机

在所有应用于数控车床的电机中特性最优, 通常采用永磁同步的形式。Hellinger^[1]介绍了永磁同步直线电机的有限元分析以及应用向量控制法实现速度控制。随着能源危机及产品的竞争, 减少能源损失、降低生产成本及提高产品性能, 已成为

^{*} 基金项目: 中国博士后科学基金(2015M571953); 江苏省高校自然科学研究面上项目资助(15KJB470004); 江苏省自然科学基金青年基金(BK20150246); 江苏理工学院人才引进项目资助(KYY15009); 江苏省政策引导类计划(产学研合作)-前瞻性联合研究项目资助(BY2016030-19)

作者简介: 杨益飞(1983—), 男, 博士后, 研究方向为直线电机及混沌控制。

骆敏舟(1973—), 男, 博士研究生, 研究员, 研究方向为直线电机。

贺乃宝(1967—), 男, 博士研究生, 教授, 研究方向为直线电机控制。

一个非常重要的课题。结构最优化设计可以降低生产成本及能源消耗,因此,最优化设计概念逐渐得到重视。最优化设计是在限制条件的范围内,寻求目标函数的最大值或最小值,而限制条件根据实际问题需求决定。

研究人员提出诸多解决方案,但很少提出最优化结构方案^[2]。研究人员使用了各种技术,在多种最优化设计理论中,为了满足工程上的需求,其中高阶启发式搜寻法可以解决复杂的最优化问题。这是由模拟自然现象的启发式搜寻法,在模拟自然过程尝试找到最优解的随机方式,避免陷入局部最优解的解决方案。这类搜寻法只利用少量的数学要求,不需要非常明确的数学模型。大多数现象模拟法理论,是模拟自然界中各种生物的行为模式,称为集群智能^[3],这里介绍一种混沌搜索方法。混沌理论已经在不同领域有不同的研究,有些研究显示混沌理论已被用来在全局搜索的基础上进行再次局部细搜索的能力,并且搜索结果具有很好的稳定性^[4]。本文结合了混沌理论和适应函数^[5]的改进以及控制参数,增强搜寻能力,并避免陷入局部最优解^[6-7]。

本文首先对永磁同步直线电机气隙磁密波形进行了深入的分析与计算,得到了气隙磁密波形正弦度可行的电磁方案;最后在非线性模型的基础上利用混沌搜索和适应函数求取最优解。在此结构参数基础上,利用磁极分组偏移减小电机齿槽力的方法,求解出磁极偏移后电机的反电势。通过对比分析,发现此方法不会影响电机反电势的对称性。仿真试验结果验证了该方法的有效性。

1 永磁同步直线电机有限元分析

永磁同步直线电机的数学模型是一个高阶、非线性、强耦合的多变量系统。通过等效磁化强度法分析永磁体的励磁作用,其等效磁化强度空间分布函数 $M(x)$ ^[8] 可用傅里叶级数表示:

$$M(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4B_r}{\mu_0 \tau m_n} \sin \frac{m_n \tau}{2} \sin \frac{m_n \tau_m}{2} \sin m_n x \quad (1)$$

其中:

$$m_n = \frac{(2n-1)\pi}{\tau} \quad (2)$$

式中: B_r ——永磁体剩余磁化强度;

μ_0 ——空气磁导率;

τ_m ——永磁体宽度;

τ ——永磁体极距。

根据麦克斯韦(Maxwell)方程组,建立气隙区域和永磁体区域的泊松方程组^[9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 A_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_1}{\partial y^2} = 0 \\ \frac{\partial^2 A_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_2}{\partial y^2} = -\mu_0 \frac{\partial M(x)}{\partial x} \end{cases} \quad (3)$$

式中: A_1, A_2 ——气隙区域和永磁体区域的矢量磁位。

气隙区域和永磁体区域满足如下边界条件:

$$\begin{cases} B_{y1} \big|_{y=\frac{g}{2}} = B_{y2} \big|_{y=\frac{g}{2}}, H_{x2} \big|_{y=\frac{g}{2}} = H_{x1} \big|_{y=\frac{g}{2}} \\ H_{x2} \big|_{y=\frac{g}{2}+h_m} = 0, H_{x1} \big|_{y=0} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到气隙磁通密度:

$$\begin{cases} B_{x1} = \sum_{n=1}^{\infty} m_n (A_{n1} \cosh m_n y + B_{n1} \sinh m_n y) \cos m_n x \\ B_{y1} = - \sum_{n=1}^{\infty} m_n (A_{n1} \sinh m_n y + B_{n1} \cosh m_n y) \sin m_n x \end{cases} \quad (5)$$

其中:

$$\begin{cases} A_{n1} = 0 \\ B_{n1} = T_n \sinh(m_n h_m) / \sinh \left[m_n \left(h_m + \frac{g}{2} \right) \right] \\ T_n = \frac{4B_r}{\tau m_n^2} \sin \frac{m_n \tau}{2} \sin \frac{m_n \tau_m}{2} \end{cases}$$

式中: h_m ——永磁体厚度;

g ——气隙长度。

永磁同步直线电机主要参数如表1所示。

表1 永磁同步直线电机主要参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定电压/V	300	槽宽/mm	4.7
初级长/mm	80	槽口宽/mm	2
初级外径/mm	75	槽距/mm	6.7
次级外径/mm	25	极数	8
气隙长/mm	0.55	定子槽数	12

考虑到直线电机的边端效应,将电机两端的空气和次级周围的空气也作为模型的一部分来研究。利用永磁同步直线电机的轴对称性,加上对

应的边界条件,绘制出电机的几何模型,如图 1 所示。



图 1 永磁同步直线电机模型

得出二维几何模型后,对其进行网格剖分设置,不同区域对其选择不同的网格密度。具体参数如表 2 所示。

表 2 网格剖分设置

设置密度	分配区域
Length_band=0.2 cm	Band 域
Length_coil=0.25 cm	定子绕组区域
Length_stator=0.3 cm	定转子铁心
Length_PM=0.2 cm	永磁体
Length_outregion=0.4 cm	外层区域

具体剖分情况,如图 2 所示。

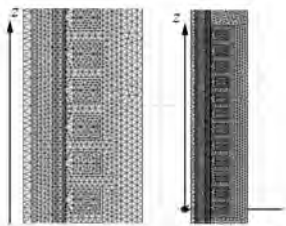


图 2 网格剖分

完成电机的物理模型后,分析其行波磁场。为了得到较为精确的气隙磁密波形,就必须抑制其谐波,而对其谐波有影响的因素有三个,分别是:齿槽宽度、气隙大小和磁极厚度。

具体可以采取正交试验的方法。所谓正交试验:就是设计规范的正交表,提出合适的试验方案和参数,通过比较得出最好的条件,是一种十分科学的试验方法。本次设计具体可以通过安排模拟试验和制作正交试验表选出最优的参数,分析其气隙磁密曲线。

首先对三个有影响的因素分别安排三个水平,目的是得出正弦度较好的气隙磁密波形,具体如表 3 所示。

表 3 正交试验因素水平表

编号	A:齿槽宽度/mm	B:气隙大小/mm	C:磁极厚度/mm
水平 1	4.7	0.45	2.8
水平 2	5	0.5	3
水平 3	5.3	0.55	3.2

通过气隙磁密的有效值和其基波分量的有效值的比值,得出其波形的畸变率,结构参数因素水平及计算结果如表 4 所示。

表 4 正交试验表及计算结果

方案	A	B	C	畸变率/%
1	1	1	1	29.31
2	1	2	2	27.83
3	1	3	3	27.53
4	2	1	2	28.63
5	2	2	3	28.80
6	2	3	1	28.07
7	3	1	3	30.22
8	3	2	2	28.38
9	3	3	1	28.17

通过表 4 可以发现,方案 3 的畸变率最小,即 $A_1B_3C_3$ 的参数下得出的气隙磁密曲线最好,具体如图 3 所示。

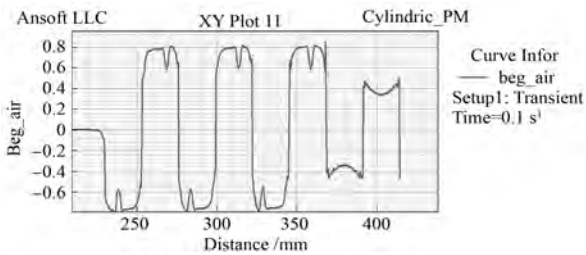


图 3 气隙磁密曲线

模型完成后,观察直线电机的磁力线分布和磁密云图,如图 4 和图 5 所示。

通过对图 4 和图 5 对比观察可以发现,图 5 中部分绕组顶端的磁密较强,而对应的图 4 中,此部分的磁力线也十分的密集,充分证明这部分的磁场强度很高。

设置永磁同步直线电机的速度为 2.3 m/s,观察运行时动子移动位置,ABC 三相绕组磁链曲线分别如图 6 和图 7 所示,由此可见设计出的直线电机具有良好的动态特性。

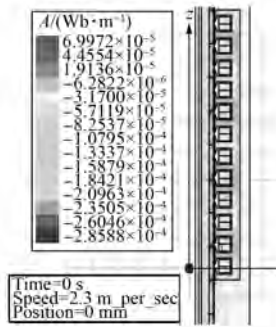


图4 磁力线分布

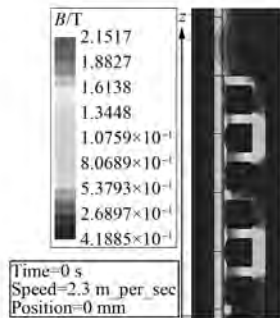


图5 磁密云分布

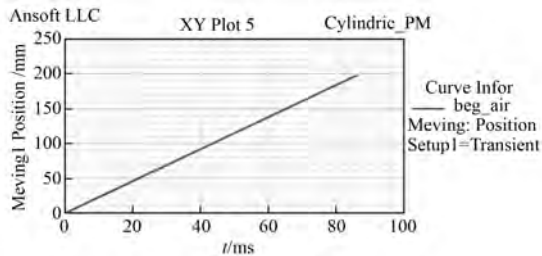


图6 直线电机动子移动位置

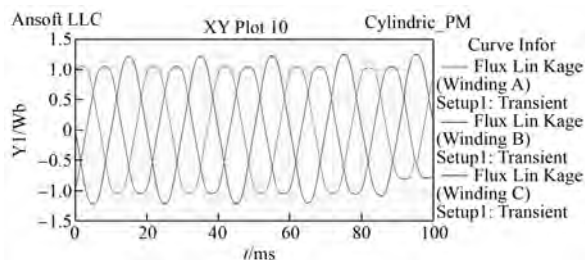


图7 A、B、C三相绕组磁链曲线

2 基于混沌优化算法的优化设计

结构参数优化方法可以应用于永磁同步直线电机的有很多,如遗传算法、单纯形法、混沌优化

方法等^[10-11]。但是传统的优化方法容易陷入局部极小,遗传算法的优化结果具有随机性,多次执行算法程序会得到不同的优化结果,仍需人工做出选择^[4]。选用混沌优化方法对永磁同步直线电机参数进行优化设计。基本电磁设计可由一个简单的函数关系式表示,需要优化的电机结构参数和优化目标之间的关系可表示为

$$\begin{aligned} \text{Minimize: } W(x) &= \sum_{i=1}^n \frac{\gamma_i}{\sigma_i} \\ \text{subject to } &\begin{cases} 4.7 \leq A \leq 5.3 \\ 0.45 \leq B \leq 0.5 \\ 2.8 \leq C \leq 3.2 \end{cases} \end{aligned} \quad (6)$$

式中: γ_i ——气隙磁密的有效值;

σ_i ——基波分量的有效值。

为了达到永磁同步直线电机进行参数优化的目标,即使气隙磁密波形的畸变率最小,从而得出正弦度较好的气隙磁密波形,合理选择主要的结构参数(A :齿槽宽度; B :气隙大小; C :磁极厚度)为独立的输入变量,搜寻空间的选择基于上述电磁场设计的结果。

从优化结构分析中可以得到气隙磁密波形的畸变率,这些将进入惩罚函数计算并比较容许限制条件,依据式(7)表示:

$$g_j(x) = \left| \frac{b_j}{(b_a)_j} \right| - 1 \leq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $g_j(x)$ ——限制函数;

b_j ——第 j 个气隙磁密波形畸变率;

$(b_a)_j$ ——气隙磁密波形畸变率约束值。

依据目标函数及束制条件,组合成一适应函数^[5]:

$$f(x) = \left(1 + \varepsilon_1 \sum g \right)^{\varepsilon_2} \times W(x) \quad (8)$$

式中: $f(x)$ ——适应函数;

ε_1 、 ε_2 ——惩罚系数, ε_2 固定为 1.5^[12], ε_1 可以自行调整选择。

通过对参数空间的整体和局部搜寻,得到了最终结果倾向于最优优化目标。混沌优化结果如表 5 所示。

根据表 5 可以得出,最优优化结果是一致的,同时也证明了最优优化结果的有效性。根据最优优化结果验证结构参数磁极偏移后对反电势的影响,对原电机模型和磁极偏移后的电机模型进行

表 5 优化结果

优化结果	A	B	C	畸变率/%
混沌全局优化	4.679 9	0.549 9	3.199 3	27.531 2
混沌局部优化	4.699 2	0.549 7	3.199 8	27.536 8
圆整结果	4.7	0.55	3.2	27.530 5

仿真,仿真结果如图 8、图 9 所示。由图 8 可知,磁极偏移前电机反电势幅值为 358 V,而磁极偏移后的电机反电势幅值为 357 V。由图 9 可知,电机磁极偏移后其三相反电势依然有较好的对称性。由此可见,此方法不会影响电机反电势的对称性,对其三相反电势幅值影响也很小。

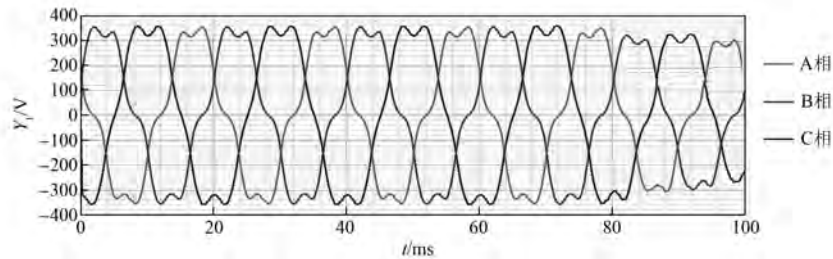


图 8 原电机反电势

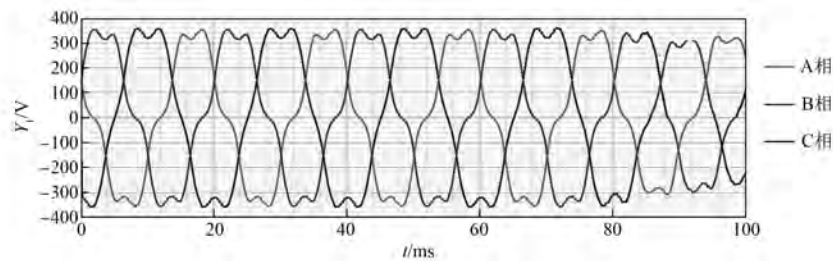


图 9 磁极偏移后电机的反电势

最后,得到了如图 10 所示较为精确的减小推力波动。

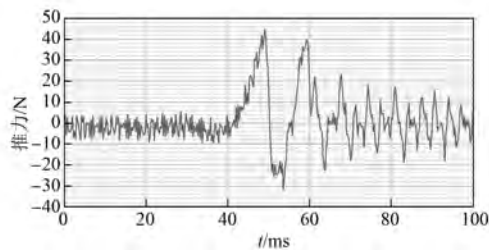


图 10 直线电机定位推力

基于有限元方法建立的建模方法精度较准确、计算效率很高,使用传统正交试验的方法得出了可行的电磁方案。在此模型的基础上,利用混沌搜索算法和适应函数优化结构参数,得到了最优解,使电机的气隙磁密波形畸变率在相同条件下达到了最小化。通过仿真可知,其对电机的反电势不会造成太大的影响,可以得到较为精确的推力。该结论可对永磁同步直线电机的控制系统设计研究起到一定的帮助作用。

【参考文献】

[1] HELLINGER R, MNICH P. Linear motor-powered transportation: history, present status, and future outlook[J]. Proceedings of IEEE, 2009, 97 (11): 1892-1900.

[2] SIGMUND O. Topology optimization: a tool for the tailoring of structures and materials[J]. Philos Trans R Soc A, 2000, 358(1765): 211-227.

(下转第 43 页)

3 结 语

永磁同步直线电机由于其结构的特殊性,导致了其内部磁场分布具有明显的特性,只有采用有限元数值方法求解才能获得比较精确的解。永磁同步直线电机的畸变率是影响其气隙磁密波形正弦的重要因素。优化电机的定转子结构,使得电机的畸变率最小化是本文的根本出发点。

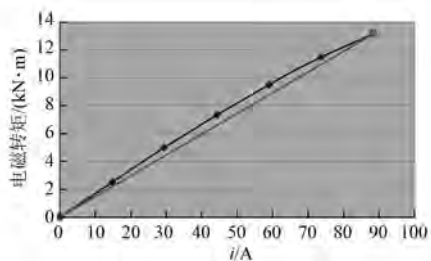


图8 力矩-电流曲线

结果如图9所示,电机运行2 h后,绕组温升94 K,稳态温度120℃。

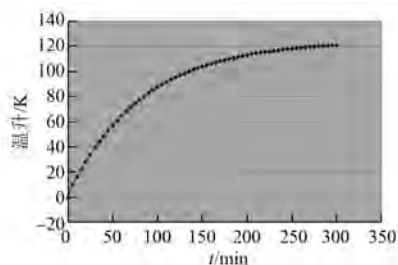


图9 绕组最热点温升-时间曲线

4 结 语

本文利用有限元分析方法对所设计的交流永磁力矩电机的空载特性、转矩线性度、定位力矩和转矩波动进行了仿真分析,并对其电磁设计、高力矩密度与高过载能力设计、定位力矩和波动力矩的抑制展开了研究。从分析结果可知本文设计的交流永磁力矩电机的相关技术指标完全符合技术要求。该电机设计方法,可为同类电机的设计与分析提供一定的指导。

【参考文献】

- [1] 陈世坤.电机设计[M].北京:机械工业出版社,2002.
- [2] 陈永校,诸自强,应善战.电动机噪声的分析和控制[M].杭州:浙江大学出版社,1987.
- [3] 邹继斌,王铁成,孙桂英,等.永磁力矩电机磁钢径向力的分析与计算[J].哈尔滨工业大学学报,1998(30): 125-128.
- [4] 赵博,张洪亮. Ansoft12 在工程电磁场中的应用[M].北京:中国水利水电出版社,2010.

收稿日期: 2017-03-12

(上接第38页)

- [3] XIANG T, LIAO X, WONG K. An improved particle swarm optimization algorithm combined with piecewise linear chaotic map[J]. Appl Math Comput, 2007, 190(2): 1637-1645.
- [4] 鲍晓华,群京,倪有源,等.爪极发电机建模及参数优化设计[J].中国电机工程学报,2006,26(21): 138-142.
- [5] KAVRHA A, SHEIKHOLESLAMI R, TALATAHARI S, et al. Chaotic swarming of particles: a new method for size optimization of truss structures[J]. Comput Struct, 2014, 67(1): 136-147.
- [6] COELHO L D S. A quantum particle swarm optimizer with chaotic mutation operator[J]. Chaos Solit Fract, 2008, 37(5): 1409-1418.
- [7] LIU B, WANG L, JIN Y H, et al. Improved particle swarm optimization combined with chaos[J]. Chaos Solit Fract, 2005, 25(5): 1261-1271.
- [8] MEESSEN K J, GYSEN B L J, PAULIDES J J H, et al. Halbach permanent magnet shape selection for

slotless tubular actuators[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2008, 44(11): 4305-4308.

- [9] 李立毅,唐勇斌,刘家曦,等.多种群遗传算法在无铁心永磁直线同步电机优化设计中的应用[J].中国电机工程学报,2013,33(15): 69-77.
- [10] COELHO L S, MARIANI V C. Combining of chaotic differential evolution and quadratic programming for economic dispatch optimization with valve point effect[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006, 21(2): 989-996.
- [11] WANG L, SMITH K. On chaotic simulated annealing[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1998, 9(4): 716-718.
- [12] TALATAHARI S, FARAHMAND A B, SHEIKHOLESLAMI R, et al. Imperialist competitive algorithm combined with chaos for global optimization[J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simul, 2012, 17(3): 1312-1319.

收稿日期: 2016-12-19