

基于 JMAG 的无铁心永磁直线电机优化设计

Optimal Design of Coreless Permanent-Magnet Linear Motor Based on JMAG

孙明冲 郝双晖 宋益明 刘吉柱

(哈尔滨工业大学 机电工程学院, 哈尔滨 150001)

摘 要: 针对高速运行时有铁心直线电机铁耗大、效率低的不足, 提出一种动磁式无铁心永磁直线电机模型。采用专业电磁分析软件 JMAG 对无铁心直线电机电磁场进行了瞬态分析计算。以电磁推力及其波动为优化目标, 分别计算了不同电磁参数对电磁推力及其波动的影响。利用瞬态分析进行电机优化设计, 提高了电机设计的精度。

关键词: 无铁心直线电机; JMAG; 瞬态; 电磁推力; 推力波动

Abstract: According to the large iron loss and low efficiency defect occurred in the core linear motor high speed situation. Proposed a motive permanent-magnet linear coreless motor model. Transient analysis and calculation was carried out for the electromagnetic field of coreless linear motor, which based on professional electromagnetic analysis software JMAG. Take electromagnetic thrust and its fluctuation as the optimization target. Various electromagnetic parameters which influence to the electromagnetic thrust and its fluctuation had been calculated. Using transient analysis method makes motor optimal design, improve the motor design precision.

Key words: Coreless linear motor; JMAG; Transient; Electromagnetic thrust; Thrust fluctuation

1 引言

电磁发射技术的基本工作原理是借助电磁力做功, 将电磁能转化成动能, 完成对物体进行加速以达到发射物体的目的^[1,2]。电磁弹射则是在电磁发射技术的基础上出现和发展起来的一种新型发射技术。在电磁弹射中, 被发射的物体不需要启动自身的动力装置, 而是靠弹射器的电磁推力为加速手段从而获得足够的运动能量实现飞机起飞^[3,4]。从电机设计角度出发, 直线驱动电机作为电磁弹射器中的重要组成部分, 其电磁推力特性对电磁弹射系统有着十分重要的影响。因此在电磁弹射系统中, 大推力、高效、高性能的驱动直线电机一直是电磁弹射技术研究的关键问题^[5]。目前, 国内外已经研究了多种用于电磁弹射器的直线电机模型, 其中主要有感应直线电机, 永磁同步直线电机以及磁阻电机等类型。并设计了一系列大推力的驱动直线电机, 但这些研究大部分都是集中在有电枢铁心的模型结构上的研究^[6,7]。由于舰载机速度从零开始被加速, 需要较大的牵引力, 因此在速度不是很高的情况下有铁心结构的驱动直线电机具有较好的应用价值。但有铁心直线电机由于齿槽结构造成了齿槽力的存在, 使得电机的推力波动较大。同时, 当弹射物体高速运行时, 电机铁耗大, 电机效率受到了严重的影响。

本文对无铁心直线电机进行了设计研究。通常进行电机优化设计时, 大多数文献都是进行静态电磁力的有限元优化计算, 但电机运行的过程中, 推力是波动的。静态分析只记录了当前某一工作步下的推力值大小, 仿真精度较低。本文利用有限元软件 JMAG 对无铁心直线电机的各个电磁参数进行了瞬态优化分析。

2 JMAG 电磁分析软件

简介

JMAG 是应用广泛的专业电磁场分析软件。可对各种电机及电磁设备进行精确

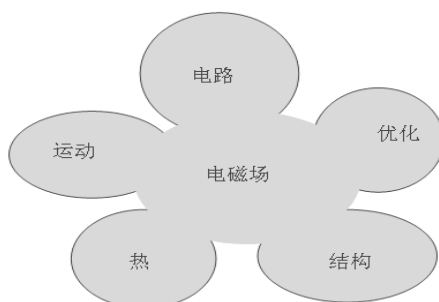


图 1 JMAG 软件的耦合功能

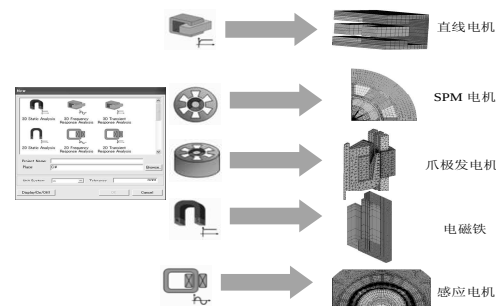


图 2 JMAG 软件分析的电机类型

的电磁场分析。实现静态场、瞬态场、轴对称场和谐波场的二维和三维模型分析。图 1 展示了 JMAG 所具有的强大耦合功能。JMAG 的界面及其可以分析的电机种类如图 2 所示。同时, JMAG 提供了丰富的材料数据库, 包括各型号电工钢磁化曲线与损耗曲线, 各型号永磁体的退磁曲线。对于特殊材料, 如铁粉材料, 磁滞材料以及非常规型号等, 可自行输入曲线数据, JMAG 均能据此进行仿真。鉴于 JMAG 的专用直线电机分析模块, 可以方便的计算电磁推力、铁耗等。本文采用该软件对无铁心永磁直线电机进行优化设计。与 ANSYS、ANSOFT 等有限元软件一样, JMAG 软件的分析流程也分为: 前处理、求解、后处理三个阶段。

3 直线电机有限元模型瞬态计算分析

3.1 电机模型

与有铁心永磁直线同步电机一样, 无铁心永磁直线电机同样有两种结构形式: 动磁式和动圈式。对于面向电磁弹射器用的无铁心永磁直线电机来说, 动圈式结构需要拖着电缆一起运动, 同时动子需要和弹射的舰载机连接。这无疑给电磁弹射系统增加了麻烦, 因此动磁式结构在此具有更大的优越性。将有铁心直线电机的电枢齿去掉, 绕组不再围绕电枢齿绕线就得到一种无铁心直线电机模型。电机采用集中绕组形式, 为了绕线方便, 在单个线包中设置了一块非导磁的间隔板, 具体结构如图 3、4 所示。

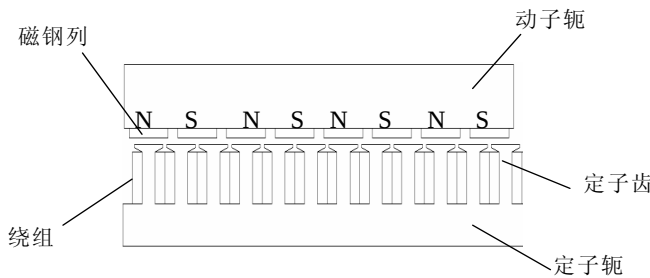


图 3 有铁心直线电机模型

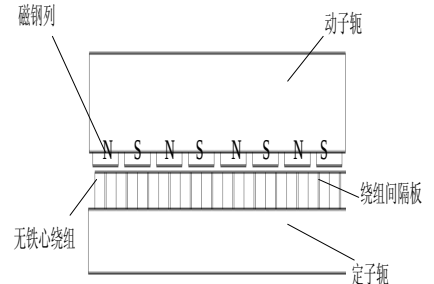


图 4 无铁心直线电机模型

3.2 有限元模型的建立

根据直线电机的演变原理可知, 直线电机的模型尺寸应该满足如下关系:

$$Q \times t = 2p \times \tau \quad (1)$$

式中: Q — 槽距; t — 槽距; p — 极对数; τ — 极距。

在无铁心直线电机中不存在定子齿和槽, 但其演变原理是不变的, 同样需满足上述关系式。因此在无铁心直线电机中以虚槽数和虚槽距代替了有铁心直线电机的槽数和槽距。JMAG 软件支持其他绘图软件的导入模型, 本文在 CAD 中建模之后直接导入到 JMAG 软件中进行分析, 提高了建模效率。单边无铁心直线电机采用双层集中绕组。其模型基本参数如表 1 所示。

表 1 无铁心 PMLSM 有限元结构参数

项目	符号	数值
相数	m	3
虚槽数	Q	12
槽距	t	15mm
铁心长	L	50mm
极数	$2p$	8
极距	τ	22.5mm

根据电磁场的有限元基本理论, 假定电机内磁场及矢量磁位沿 z 轴方向均匀分布, 则二维稳态电磁场的 Maxwell 基本方程用矢量磁位 A 表示, 其满足准泊松方程^[8]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -(J_0 + J_M) \quad (2)$$

式中: A_z — A 的 Z 方向分量; μ — 材料磁导率; J_0 — 初级电枢电流密度; J_M — 永磁体等效磁化电流

密度。由变分原理,将式(2)的边值问题转化为在给定求解域 Ω 和边界条件上求解,得出使能量泛函 $\Pi(A_z)$ 达到极小值的函数 $A_z(x,y)$

$$\Pi(A_z) = \frac{1}{2} \iint_{\Omega} \left[\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 - A_z (J_0 + J_M) \right] d\Omega \quad (3)$$

在 JMAG 中对导入的电机 CAD 模型进行设置处理,指定直线电机各部分材料属性、运动条件、求解参数、绕组电路、模型剖分网格大小等。JMAG 软件中采用 ICCG 算法进行迭代求解,由磁量矢位 A 可求得电流、磁链、电磁转矩等。图 5 为在 JMAG 中设置好瞬态求解条件并剖分后的无铁心直线电机有限元模型。

瞬态求解完成后进入后处理阶段,提取出计算结果并用 MATLAB 重新处理可得到无铁心直线电机的空载气隙磁密分布如图 6、7 所示。从图 6 和 7 可以看出法向气隙磁密在端部磁密幅值没有明显下降,这说明了无铁心直线电机在端部漏磁较少。同时,横向气隙磁密波形畸变比较严重。利用 JMAG 后处理功能得到了直线电机空载磁力线分布如图 8 所示。由图 8 可以看出,由于沿磁力线闭合回路磁导相等,因此无铁心直线电机磁力线呈对称分布。

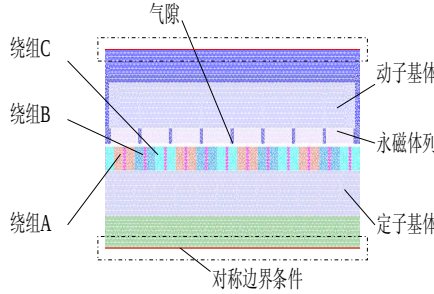


图 5 剖分后的电机模型

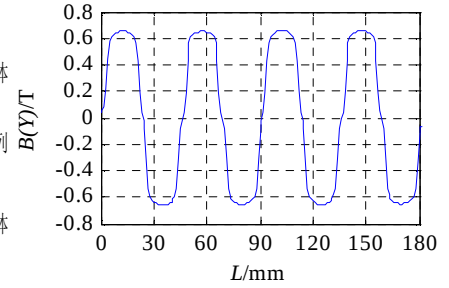


图 6 法向气隙磁密曲线

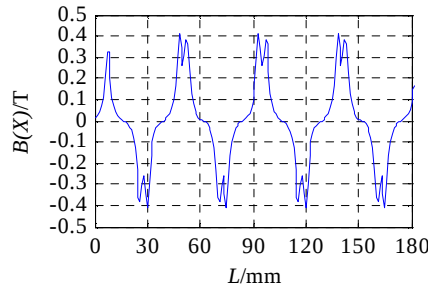


图 7 横向气隙磁密曲线

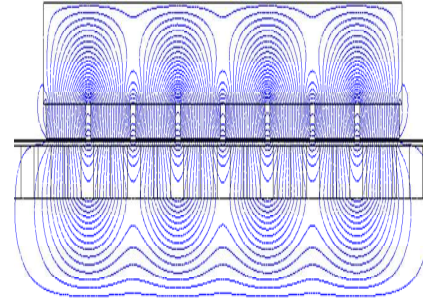


图 8 无铁心直线电机空载磁力线分布

4 电磁推力计算与优化分析

由于电磁参数的变化对于直线电机的性能有很大影响,而推力作为直线电机最重要的一个性能指标,因此对推力特性进行研究显得十分重要。本文以电机推力及其波动为优化目标,分别每次只改变一个参数的情况下进行加载,加载时保持安匝数不变,得到电磁推力并计算推力波动。然后综合考虑各种因素确定出合理的电磁参数。无铁心直线电机的绕组高度在电磁参数变化中影响是最明显的因素。由于铜线绕组的相对磁导率和空气近似相同。在无铁心

气,同时,在相同电密下,绕组高度的大小决定了所加安匝数的大小。因此绕组高度的变化对推力大小的影响是最大的。本文首先优化了无铁心直线电机的绕组高度,在优化绕组高度和间隔宽度时保持电密一致。在 JMAG 中计算得到不同绕组高度下推力变化曲线如图 9 所示。

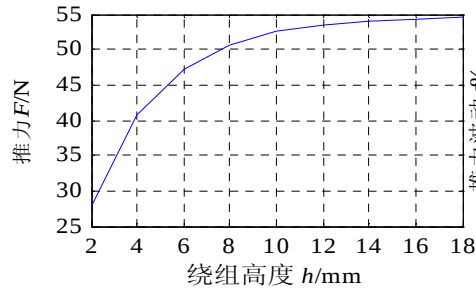


图 9 绕组高度-推力

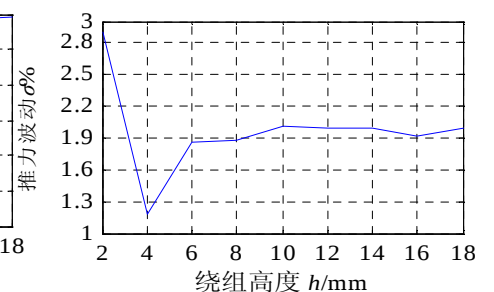


图 10 绕组高度-推力波动

直线电机推力波动的定义用最大推力与平均推力值之差在平均推力中所占的百分比来描述,即:

$$\sigma = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{F_{\max} + F_{\min}} \times 100\% \quad (9)$$

得到推力波动随绕组高度变化的曲线如图 10 所示。考虑到出力大小的同时兼顾推力波动不至于过大。由图 9、10 可以可知,绕组高度为 8mm 时,在电密一定的情况下推力逐渐饱和,因此选择绕组高度为 8mm 比较合理。确定出绕组高度后,在此基础上依次逐个变化单个线包绕组间隔、永磁体宽度、永磁体厚度、动定子基体厚度以及气隙长度从而得到了曲线图 11~24。

由图 11、12 看出当加载相同电密时随着绕组间隔的增大安匝数变少,因此推力逐渐减小并成非线性变化。推力波动交替上升或者下降,变化规律复杂;图 13、14 说明了随着永磁体宽度的增加也即极弧系数的增加推力成非线性增长,并在宽为 20mm 时趋于饱和,推力波动在此时也达到了最低点;

图 15、16 表示了推力及其波动随永磁体厚度的变化规律。随着永磁体厚度增加,永磁体激磁磁动势增大,推力增加。但当永磁体厚度增大为 5mm 以后,推力增长速度缓慢并逐渐饱和,这说明永磁体厚度的一味增加并不能带来推力的线性增长。反而增加了电机的制造成本。因此永磁体厚度的选择不能过薄或者过厚。

图 17~22 反映的是动定子基体厚度对推力及其波动和动定子轭部磁密的影响。从分析结果可知,动定子厚度的改变对推力及其波动几乎没有造成影响。但动定子轭部空载磁密变化较大,磁密的大小影响着电机轭部的发热,因此动定子的厚度不能取得太薄。

图 23、24 则说明了随着气隙长度增大,推力及其波动都减小的变化趋势。上述曲线趋势表明,推力及其波动是受多个电磁参数综合影响的结果。选择时要综合考虑各个参数对电机性能的影响。最终本文选择的优化电磁参数如表 2 所示。

在 JMag 软件中计算相同推力密度下,有铁心和无铁心永磁直线电机的效率对比如图 25 所示。图 25 表明,在高速运行阶段,相同

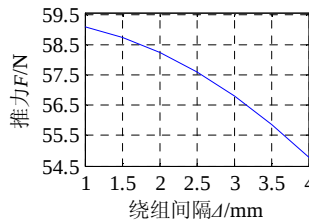


图 11 绕组间隔-推力

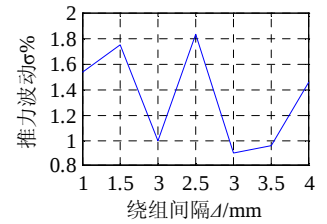


图 12 绕组间隔-推力波动

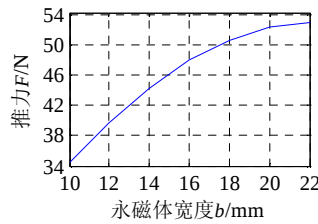


图 13 永磁宽-推力

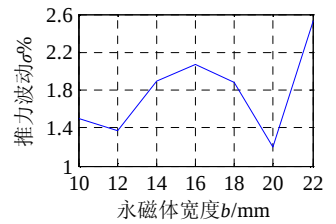


图 14 永磁宽-推力波动

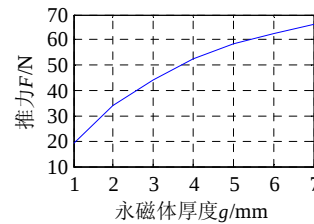


图 15 永磁厚-推力

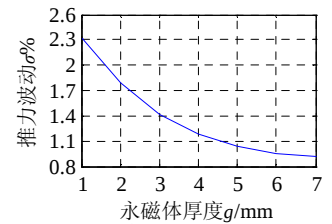


图 16 永磁厚-推力波动

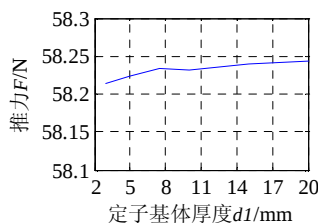


图 17 定子厚-推力

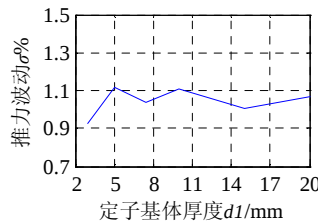


图 18 定子厚-推力波动

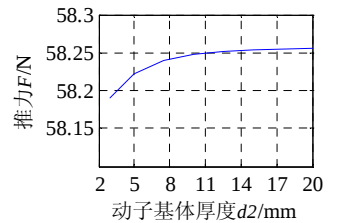


图 19 定子厚-推力

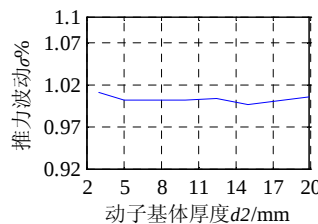


图 20 定子厚-推力波动

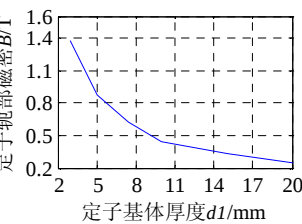


图 21 定子厚-轭部磁密

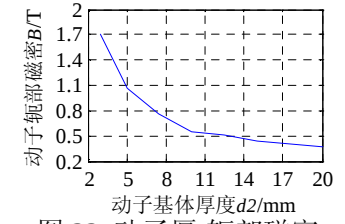


图 22 定子厚-轭部磁密

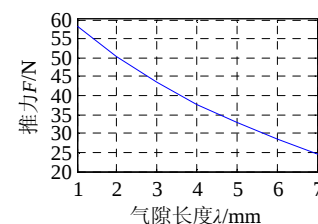


图 23 气隙长度-推力

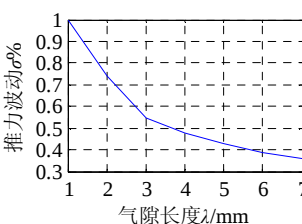


图 24 气隙长度-推力波动

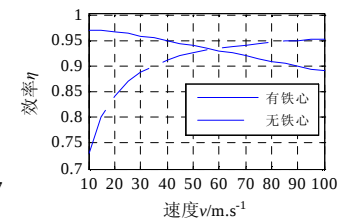


图 25 有铁心与无铁心直线电机效率对比

推力密度下无铁心直线电机的效率要高于有铁心的直线电机。

表 2 无铁心 PMLSM 有限元优化后参数

项目	符号	数值
相数	m	3
虚槽数	Q	12
虚槽距	t	15mm
绕组高	h	8mm
绕组间隔	Δ	2mm
永磁体宽	b	20 mm
永磁体厚	g	5 mm
定子基体厚	$d1$	15 mm
定子基体厚	$d2$	15 mm
气隙长度	λ	1mm
铁心长	L	50mm
极数	$2p$	8
极距	τ	22.5mm

5 结论

针对有铁心直线电机在电磁弹射器高速运行时的铁耗大、效率低的缺点,对无铁心直线电机进行了研究。利用专业电磁有限元分析软件 JMAG 进行电磁场瞬态分析,以电磁推力及其波动为优化目标,综合考虑各电磁参数对其的影响。优化出了一台无铁心直线电机电磁参数。通过瞬态电磁场分析的方法进行电机优化设计,更能贴近电机的实际运行状态。比单纯采用静态电磁计算的方法进行电机设计提高了仿真精度,得出的优化结果能提供更精确的设计依据。仿真结果表明在高速运行阶段,相同推力密度下无铁心直线电机的运行效率高于有铁心直线电机。

6 参考文献

- [1] M. Cowan. Exploratory Development of the Reconnection Launcher[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1991, 27(1):563~567
- [2] Michael R. Doyle, Douglas J. Samuel, Thomas Conway, et al. Electromagnetic Aircraft Launch System – EMALS[J]. IEEE Transactions on Magnetics. 1995, 31(1):528
- [3] 李勇, 董化新, 程树康 等. 无刷电磁弹射器中电磁力的仿真计算[J]. 微特电机. 2002, 30(5):22~24
- [4] 罗宏浩, 吴俊, 常文森. 新型电磁弹射器的动态性能仿真[J]. 系统仿真学报. 2006, 18(8):2285~2288
- [5] 崔鹏. 新型电磁发射技术的研究[D]. 国防科学技术大学. 2005:4~5
- [6] 司纪凯, 汪小东, 陈昊 等. 永磁直线同步电机出入端磁阻力齿槽分量分析[J]. 电机与控制学报. 2008, 12(5):154~156
- [7] 潘开林, 傅建中, 陈子辰. 永磁直线同步电机磁阻力分析及其最小化研究[J]. 中国电机工程学报. 2004, 24(4):112~115
- [8] 唐任远. 现代永磁电机的理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社. 1997: 62~63

作者简介: 郝双晖 (1963-), 男, 教授, 主要从事高精度位置检测技术, 高精度伺服控制
孙明冲 (1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向永磁同步电机及其控制技术。