

基于 Halbach 阵列的永磁直线电机的有限元分析^①

党常亮

(宝鸡文理学院电子电气工程系 陕西宝鸡 721007)

摘要:本文介绍了永磁体的一种新型排列方式—Halbach阵列。将此阵列引入到永磁直线电机的设计中,利用有限元分析软件ANSYS进行了建模和仿真,绘制了磁场分布曲线,电磁力分布曲线以及气隙分布密度曲线等。

关键词:Halbach阵列 永磁直线电机 ANSYS 有限元

中图分类号:TM341

文献标识码:A

文章编号:1672-3791(2013)01(a)-0003-03

Finite — Element — Method Analysis of the PM Liner Motor Based on Halbach

Dang Changliang

(Department of Electronics & Electric Engineering, Baoji University of Arts and Science, Baoji 721007, China)

Abstract:This paper presents a new arrangement of PWs,Halbach Array,which is brought to the design of PM liner motor.Besides, modeling and simulating work are carried out under the environment of ANSYS.Then the situation of magnetic field and power are shown as curves.

Key Words:Halbach;PM liner motor;ANSYS;Finite element method

直线电机在原理上,与传统的旋转电机完全一样,它能将电能直接转换成直线运动的机械能,并且不需要任何中间转换机制。随着科学技术的快速发展,直线电机在很多领域中都发挥着越来越重要的作用。例如:在交通运输业,直线电机被广泛应用于磁悬浮列车中,时速可以达到每小

时500 cm;在国防工业中,它可用来制造各种电磁炮,同时在火箭和导弹的发射领域也有着令人期待的应用前景。永磁直线电机融合了永磁电机和直线电机的双重特点,与一般的直线电机相比,永磁直线电机的力能指标更高,重量更轻,体积更小,并且具有发电制动功能,因而其应用范围也

更为广泛^[1]。Halbach 阵列是一种新型永磁体的排列方式,与传统的切向或径向式排列方式相比,有其独有的特点,若将其与永磁直线电机相结合,将会对电机的结构形式、工作原理及性能指标等产生重要的影响^[2]。本文利用有限元分析软件ANSYS对Halbach永磁直线电机进行了数值分析,得到磁场分布,电磁力分布,磁场强度分布等等,并对结果进行了比较和后处理。

1 Halbach电机的工作原理和特点

1979年8月,美国伯克利实验室的物理学家K.Halbach发表了一片题为《Design of Permanent Multiple Magnets with Oriented Rare Earth Cobalt Material》的论文。在这篇论文中,针对永磁体的构造,他提出了一种新颖的设计方法,即利用永久磁铁的分布来形成正弦磁场(见图1)。在以后的研究中他不断完善这一理论,从而形成了一种特殊的永磁电机——Halbach电机。

根据电机设计理论,增大磁负荷即提高电机气隙的磁通密度,可以有效地减小电机制造体积,提高工作效率。对永磁电机而言,增加气隙磁密的方法一般有两种,即尽可能选用剩磁高的永磁材料和改变磁体排列方式。在电机制造成本等因素的制约下,后一种方式在电机设计中使用较多(图1)。

Halbach阵列是一种新型的永磁体排列方式,当永磁体采用Halbach阵列排列方式

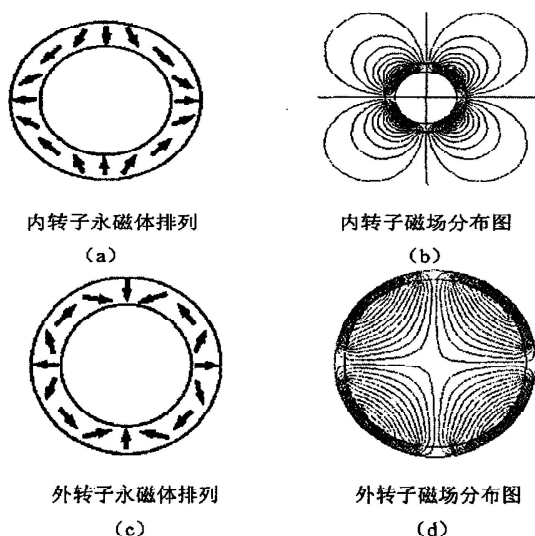


图1 Halbach 磁场分布图

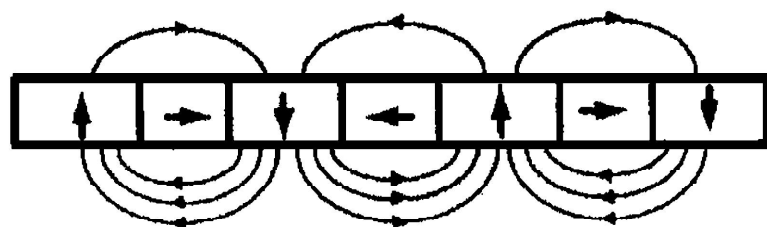


图3 Halbach 阵列对磁场的增强和减弱效果

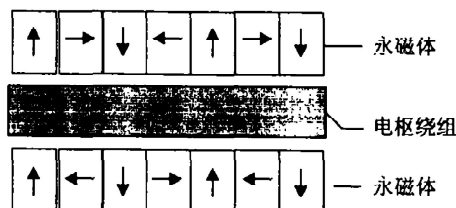


图2 Halbach 阵列在 900 时的磁场分布



图4 ANSYS 建模步骤

① 作者简介:党常亮(1984—),男,硕士,助教,研究方向为电力系统分析、控制和保护。

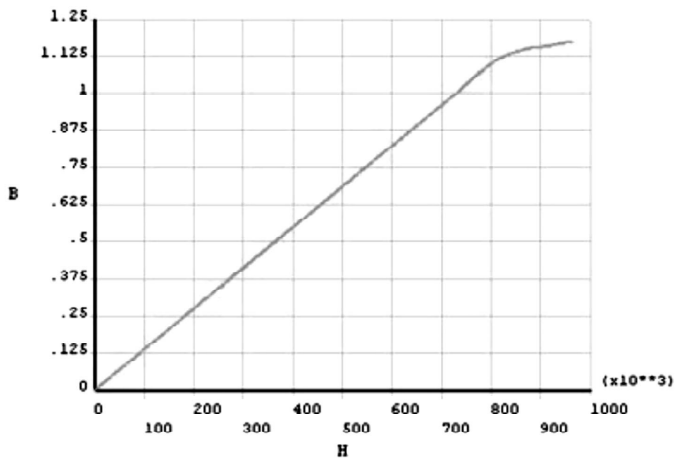


图5 永磁体的B-H曲线

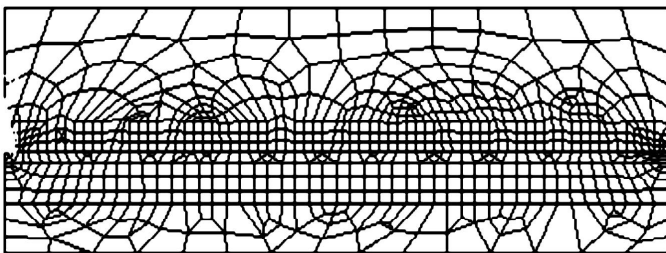


图7 电机划分网格后的图形

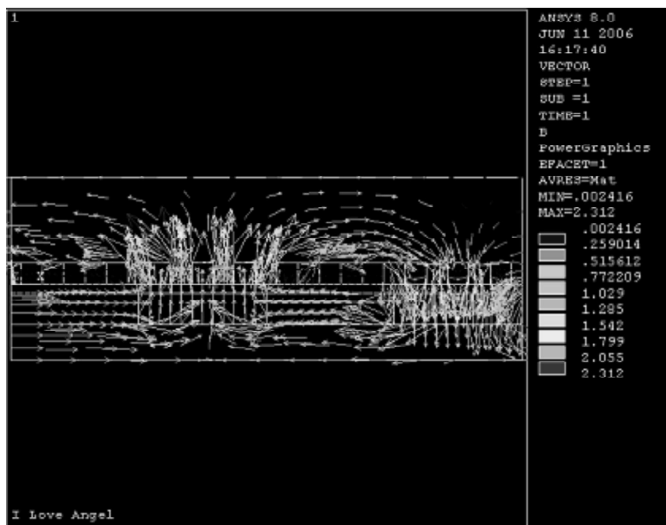


图9 电机磁通密度分布图

后,其最显著的特点是气隙磁通增强,同时转子轭部磁通减小,并得到正弦波形的气隙磁场。这些对减小电机体积和提高电机力能密度十分有利。Halbach阵列打破了传统的径向、切向磁钢排列方式,它的概念是使磁化矢量的方向作为沿着阵列距离的函数连续旋转,即每两个相邻磁化矢量在方向上存在着夹角。在实际应用中,夹角常常取为 45° 、 60° 和 90° (图2)。

Halbach电机最大的特点就是其磁极磁场呈正弦分布,这与其具有的特殊结构有关。一般情况下,永磁电机中永磁材料都是离散分布的,如果我们改变磁场的分布而

形成平面集中分布的话,便得到了Halbach平面阵列。下图(图3)就是利用有限元分析后得到的平面Halbach阵列的磁场分布图,这种磁场分布的Halbach阵列的使用价值在磁悬浮列车系统中得到了很好的验证。

在通常情况下,永磁电机设计中的永磁体多采用径向(垂直)或切向(水平)阵列结构。而Halbach阵列是将径向与切向阵列融汇结合的一种新型磁性结构。由(图3)可以看出,径向与切向永磁体阵列的合成(Halbach阵列),使一边的磁场增强而使另一边的磁场减弱。

Halbach电机的优越性有以下几点。

(1)功率密度大。相对于普通永磁体结构,由于Halbach阵列分解后的切向磁场与径向磁场的相互叠加使得气隙一侧的磁场强度大幅度提高,这样可有效地减小电机的体积,提高电机的功率密度。

(2)定转子不再需要斜槽。在普通永磁电机中,由于气隙磁场不可避免的存在谐波,一般在定转子结构上采取斜槽削弱其影响。在Halbach电机中,由于气隙磁场正弦分布程度较高,谐波含量小,定转子自然无需再用斜槽。

(3)永磁体利用率高。由于Halbach阵列分向磁化的结果,导致其永磁体工作点较

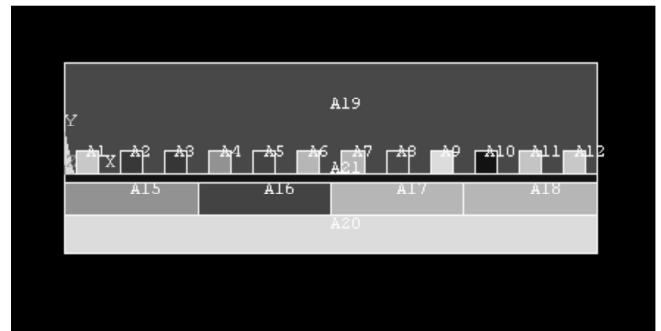


图6 永磁直线电机模型

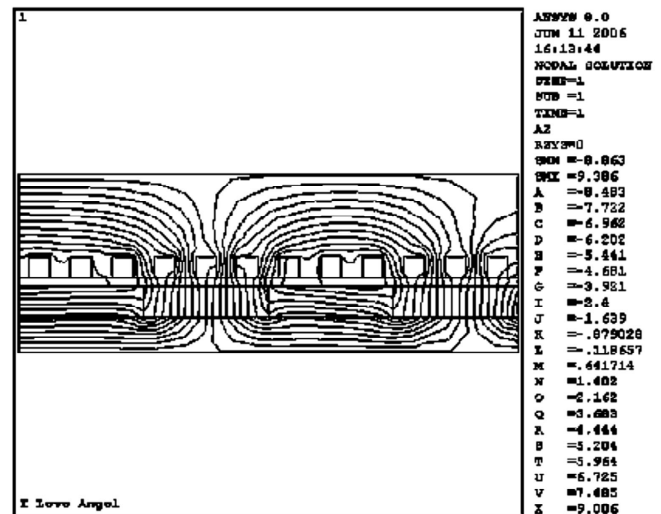


图8 电机通量线分布图

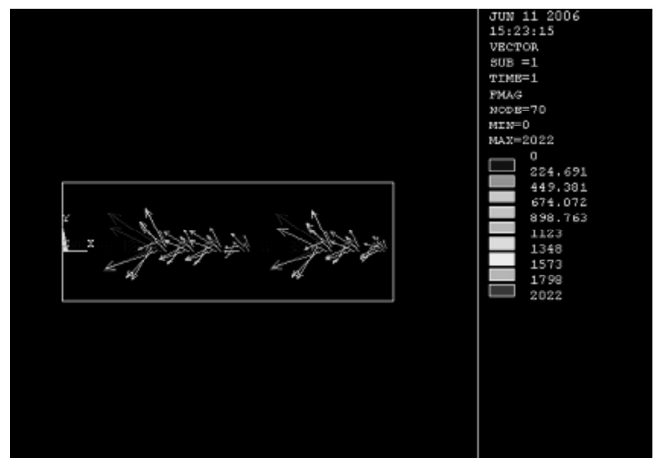


图11 气隙磁通密度分布图

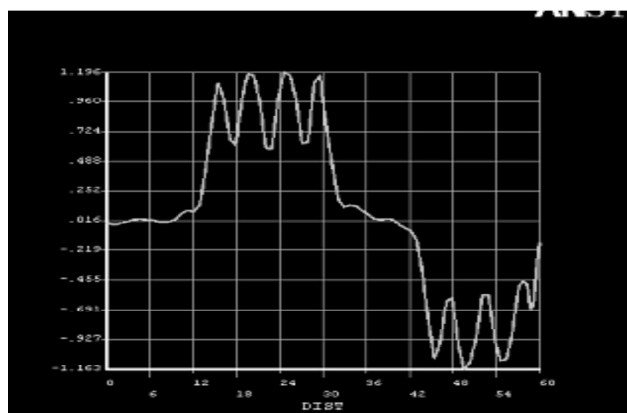


图10 电机电磁力分布图

高,一般均超过0.9,提高了永磁体的利用率。

(4)可使用集中式绕组。普通永磁电机中往往采用分布式绕组来削弱谐波磁势的影响。在Halbach电机中由于其磁场正弦分布程度较高,谐波磁场影响较小,可通过采用集中式绕组来降低线包高度。

2 ANSYS环境下永磁直线电机模型的建立

ANSYS是目前全球范围内应用最广泛的有限元分析系统。可以这样描述有限元法:把求解的区域划分为若干小区域,这些小区域称为“单元”和“有限元”,进而采用线性(有时也可以采用非线性)方法来求解每个小区域,然后把各个小区域的结果总和便得到了整个区域的解。整体区域划分为小区域后,在小区域上求解变得非常简单,仅是一些代数运算,如在小区域内应用线性插值就能得到小区域内未知点的值,而区域积分则成为小区域的求和。这正是有限元分析方法的简单思想^[3]。

在ANSYS中,建模步骤可以用如图4所示的示意图表示。

本文分析的对象——一台永磁直线同步电机的主要参数如下:额定电压 $U_n=220V$,启动推力 $F_{st}=3300N$,相数 $m=3$,额定频率 $f=50Hz$,同步速度 $V_s=30m/s=108km/h$,钕铁硼牌号为NTP-264H,剩磁 B_{r20} 为1.15,磁感矫顽力为 $8.75E+5A/m$,硅钢片相对磁导率 $\mu_r=6000$,极数为 $2p=4$,额定功率因数 $\cos\phi=0.85$,效率 $\eta=0.88$ 。

在ANSYS软件系统环境下建立上述永磁直线电机的模型。选择PLANE13单元,选用的材料有硅钢片,线圈绕组,永磁体,空气。定义材料特性如下:硅钢片相对磁导率 $\mu_r=6000$,线圈绕组和空气的相对磁导率 $\mu_r=1$,即 $\mu=\mu_0=4\pi\times10^{-7}$,定义永磁体的矫顽力,定义永磁体的B-H曲线如(图5)所示。

建立好的永磁直线电机模型如(图6)所示,图中A1~A12的区域为线圈绕组,A19,A20区域为硅钢片,A15~A18为永磁体阵列。4个永磁体组成了2对共4个极,中间的A21区域为空气隙。交叠操作的目的是保证各个面相粘结,以保证在划分网格时它们是共节点的,从而使解收敛。

分配好单元类型后便是对模型进行网格划分,本设计采用系统默认的划分大小,划分好的网格如(图7)所示。

3 仿真结果

在施加了边界条件和电流载荷后,ANSYS便对整个永磁直线电机的磁场进行处理,(图8、9、10)分别表示处理后的电机通量线分布图,磁通密度分布图以及电磁力的分布图。

从(图10)可以看到在X和Y方向上都存在分力。可以进一步查看X方向和Y方向上力的大小和方向:

```
SUM ALL THE ACTIVE ENTRIES
IN THE ELEMENT TABLE
TABLE LABEL      TOTAL
FX                -94250.2
FY                25535.8
```

可以看到在向上方向即Y方向上的合力大小为25535.8N,并且合力的方向是向上的。说明Halbach电机由于Halbach阵列的特殊结构而使得竖直方向上的力即悬浮力的大小变得很大,达到了25535.8N,这说明悬浮力的表现是很不错的。还可以看出X方向上的合力大小为94250.2N。

此外,还可继续考察气隙磁场的分布情况,根据前面所述的关于Halbach阵列的基础知识可以知道,由于Halbach阵列中永磁体异向充磁的结果使得气隙中的磁通密度成正弦分布的情况,在命令窗口中输入查看磁通密度的指令后,即得到如(图11)所示的气隙磁通密度分布图。

从(图11)中不难看出,气隙上的磁通密度分布可以近似为正弦分布,这正体现出Halbach电机的气隙磁场正弦分布程度较高,谐波含量小,因而谐波磁场对于主磁场的影响很小,这为电机设计和加工带来便利,降低成本,如可通过采用集中式绕组来降低线包高度等。这也是Halbach永磁电机比之普通永磁电机的一个重要优势。

4 结论

本文在有限元分析软件ANSYS环境下建立了永磁直线电机的模型,将Halbach阵列的特点和永磁直线电机结合起来,研究了当永磁体采用Halbach阵列的排列方式下的磁场分布曲线,电磁力分布曲线以及气隙分布密度曲线等,从结果可以看出Halbach永磁直线电机的气隙磁场正弦分布程度高,谐波含量小等优点,从而为直线电机进一步的优化设计提供了依据。

参考文献

- [1] 商进.直线电机的电磁场的有限元分析及其仿真的实现[J].自动化技术与应用,2005(24):14-16.
- [2] 周赣.Halbach型永磁阵列的磁场分析[J].微特电机,2008(7):31-33.
- [3] 张朝晖.ANSYS工程应用范例入门与提高[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [4] James F.Hoburg.Modeling Maglev Passenger Compartment Static Magnetic Fields From Linear Halbach Permanent-Magnet Arrays.IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS.VOL.40 NO.1.JANUARY 2004.

(上接2页)

及基本设置。

3.4 硬件配置

通过项目的实践证明,Revit MEP对计算机的硬件配置要求还是比较高的。当创建的项目模型是大的图形文件时,计算较快的运算速度,将加快设计进度。

4 结语

Revit MEP三维配管软件设计通过在昆钢120 t转炉余热锅炉汽化冷却系统中成

功的应用,说明该软件应用于大型工厂工艺装置配管设计是可行的,可以比较好的解决各种管道之间及管道与设备之间的碰撞问题。由于Revit MEP包含的模块很多,要熟练地掌握、驾驭,必须经过一定的实践探索过程,没有实践,纸上谈兵是不行的,浅尝则止也是不行的。必须在不断的配管设计过程中积累建模技巧,总结经验教训,开拓思维,大胆创新,举一反三,灵活运用。只有这样,才能提高三维设计效率,提高设计质量。

参考文献

- [1] 氧气顶吹转炉汽化冷却设计[M].包头钢铁设计研究院出版发行,1979.
- [2] Autodesk Revit MEP 2011应用宝典[M].上海:同济大学出版社,2010.