

多极磁环二维场分布的有限元计算

黄平, 韩满贵

(电子科技大学微电子与固体电子学院 成都 610054)

【摘要】为提高多极磁环的设计和制作效率,采用有限元法对多极磁环的二维磁场分布进行数值模拟。在假设磁性材料的导磁率为1.2,矫顽力为11 000 Oe的前提下,对稀土材料制作的四极内封闭和外封闭磁体进行了计算机仿真计算,得到了四极内封闭和外封闭磁体的磁力线分布和磁场强度分布图。并与传统的采用公式计算多极磁环的磁场分布的方法进行了比较,得到了较为一致的图形结果。同时采用有限元法得到的场分布为多极磁环的研究提供了更为详细的数据和图形结果,并且考虑了各磁体之间的相互作用和影响,使其仿真结果更接近真实磁场分布。

关键词 计算机仿真; 有限元方法; 磁路; 磁性器件

中图分类号 TM144

文献标识码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2010.03.027

FEM Simulation for Multipolar Magnetic Circular

HUANG Ping and HAN Man-gui

(School of Micro-Electronic and Solid-electronic, University of Electronic Science and Technology of China Chendu 610054)

Abstract For improving the efficiency of the design and manufacture of multipolar magnetic circular, finite element method (FEM) has been used for the field distribution simulation of multipolar magnetic circular. Supposing magnetic material's permeability is 1.2, coercive force is 11 000 Oe, the charts of magnetic-flux distribution and magnetic-field distribution were obtained by computer simulation for four-polars inner-closed circular and out-closed circular magnetisms made by rare-earth magnetic material and are compared with those by traditional formula simulation. FEM provides more detailed numerical and chart results for the research of multipolar magnetic circular and considering the affection and effect between the magnetisms.

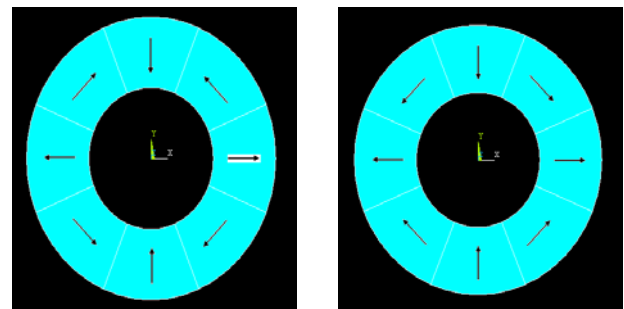
Key words computer simulation; finite element method; magnetic circuits; magnetic devices

磁极沿圆周周期交替排列所构成的多极场在电力机械(如永磁电机)、磁力机械(如磁力耦合器)以及带电离子偏转聚焦装置(如磁透镜)等中有着广泛的用途。 n 极简易渐变环形系统,每个磁极均由切向和径向两种磁化的小磁体构成,小磁体的几何形状为扇形(也可能为其他形状)。在每个小磁体内部,磁化强度 M 的方向和数值保持不变;在小磁体之间, M 的方向跳跃性地渐变,但其绝对值仍保持不变。这种结构可有“内封闭”与“外封闭”两种不同形式,系统在垂直纸面方向(圆柱坐标的 Z 方向)仍考虑为无限长。

1 原理和方法

在传统的计算方法中,首先计算出某一点的磁势,然后由磁势求梯度得到磁场。四极内封闭和外

封闭磁环如图1所示。



a. 四极内封闭磁环

b. 四极外封闭磁环

图1 四极磁环截面磁化图

传统的公式算法如下:

在极坐标下,假设每个小磁体内各点的磁化强度 M 均有 M_r 和 M_θ 两个分量,可得场中任意一点 (r_0, θ_0) 的磁势为:

$$\varphi_m(r_0, \theta_0) = \frac{M}{4\pi} \sum_{l=1}^{n-1} (-1)^l \times \int_{R_1}^{R_2} \left\{ \int_{\frac{l}{n}2\pi-\alpha}^{\frac{l}{n}2\pi+\alpha} \left[f_1 \cos\left(\theta - \frac{l}{n}2\pi\right) - f_2 \sin\left(\theta - \frac{l}{n}2\pi\right) \right] d\theta + \int_{\frac{2l+1}{n}\pi-\beta}^{\frac{2l+1}{n}\pi+\beta} \left[f_1 \sin\left(\theta - \frac{2l+1}{n}\pi\right) + f_2 \cos\left(\theta - \frac{2l+1}{n}\pi\right) \right] d\theta \right\} dr \quad (1)$$

式中 R_1 、 R_2 为磁体的内、外半径； (r, θ) 为源点坐标， (r_0, θ_0) 为场点坐标； $\alpha = \beta = \pi/n$ 。其中：

$$f_1 = \int_{-\infty}^{+\infty} r \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + r^2 + z^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)}} \right) dz = \frac{2}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)} \frac{r^2 - r_0r \cos(\theta_0 - \theta)}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)}$$

$$f_2 = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{\sqrt{r_0^2 + r^2 + z^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)}} \right) dz = \frac{2}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)} \frac{r_0r \sin(\theta_0 - \theta)}{r_0^2 + r^2 - 2r_0r \cos(\theta_0 - \theta)}$$

由磁势求梯度得到 $r_0 < R_1$ 时，磁场强度的两个分量分别为：

$$\begin{cases} H_{\theta_0}(r_0, \theta_0) = \frac{2nM}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{m^2 - 1} \sin\left(\frac{m+1}{2n}\pi\right) \times \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{m-1} \right] \left(\frac{r_0}{R_1}\right)^{m-1} \cos(m\theta_0) \\ H_{r_0}(r_0, \theta_0) = -\frac{2nM}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{m}{m^2 - 1} \sin\left(\frac{m+1}{2n}\pi\right) \times \left[1 - \left(\frac{R_1}{R_2}\right)^{m-1} \right] \left(\frac{r_0}{R_1}\right)^{m-1} \sin(m\theta_0) \end{cases} \quad (2)$$

式中

$$H(r_0, \theta_0) = \sqrt{H_{r_0}^2(r_0, \theta_0) + H_{\theta_0}^2(r_0, \theta_0)} \approx A + B \cos 2m\theta_0 + \dots$$

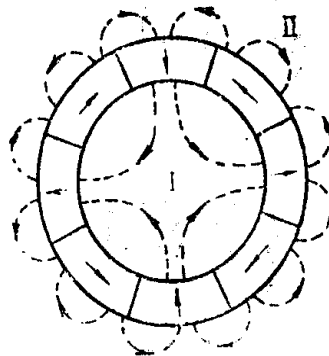
$$\phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S} = \mu \mathbf{H} \cdot \mathbf{S} = \mu \pi r_0^2 (A + B \cos 2m\theta_0 + \dots)$$

$$m = (4i + 1)n/2 \quad i = 0, 1, 2, \dots$$

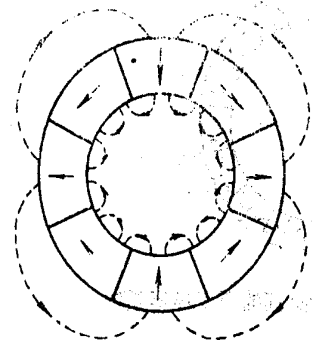
由此得到磁通量线(磁感线)分布如图2所示。

以上传统的计算方法是对求解区域中的磁场一点一点地进行计算，由于磁场为无穷级数的和，得到的磁场为近似值，最后得到的场分布也为近似值。此文中用有限元法(FEM)进行场的计算。FEM是一种通用的数值计算方法，该方法把求解区域进行分割，然后利用能量最低原理，一次计算出整个求解区域的磁场。得到的数值解虽然也为近似值，但考虑了磁体间的相互影响，具有更高的求解精度。并

且已有现成的求解程序，一次性可以得到求解区域上的磁通量分布、磁感应强度分布和磁场强度分布的数据和图形结果。程序模块化，不必从源程序的编写入手。本文解决了使用Ansys软件的单元选择、参数输入和坐标旋转等技术难点后，成功地用有限元法求解了四极磁环的磁场分布问题。



a. 四极内封闭磁环的磁力线分布

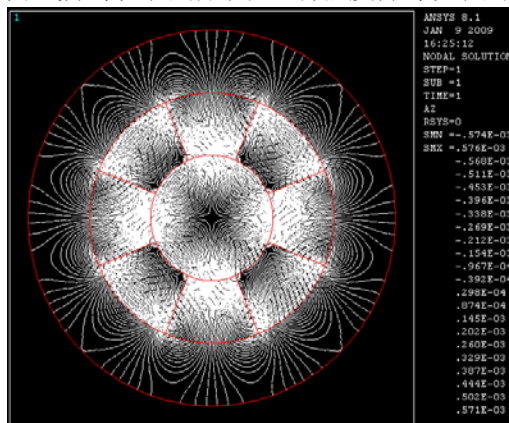


b. 四极外封闭磁环的磁力线分布

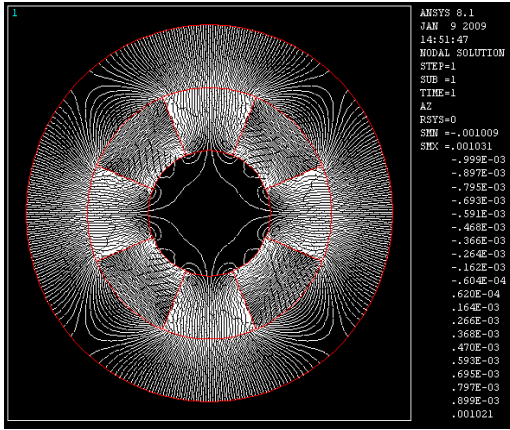
图2 四极磁环磁感线分布图

2 结果和讨论

本文在假设各向异性磁性材料的导磁率为1.2，矫顽力为11 000 Oe，小磁体的半径为1 cm，磁体内、外区域半径各为1 cm的条件下，用有限元法计算出的磁力线分布如图3所示；磁场强度分布如图4所示。

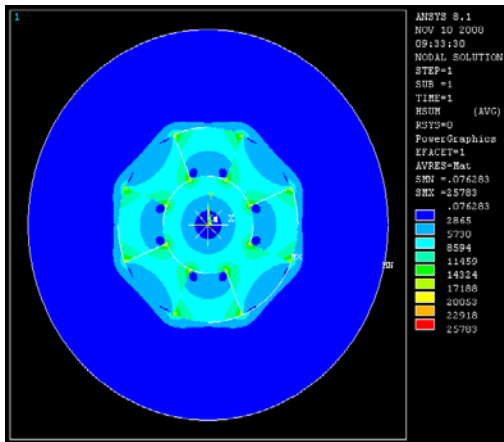


a. 四极异方内封闭磁环的磁感线分布图

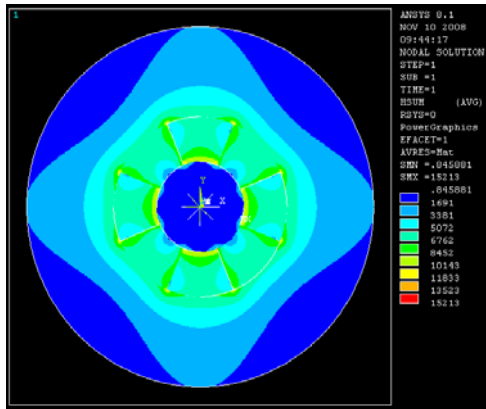


b. 四极异方外封闭磁环的磁感线分布图

图3 四极异方磁环磁感线分布图



a. 四极异方内封闭磁环的磁场强度分布图



b. 四极异方外封闭磁环的磁场强度分布图

图4 四极异方磁环磁场强度分布图

从图中可以看出,传统的计算方法(公式算法)与有限元算法比较,所得到的磁感线分布图轮廓基本相同。本文所用的计算结果都是用Ansys有限元软件进行仿真的。在解决了仿真过程中所遇到的所有技术难点后,得到了磁场分布的数值解。由于所用的各项参数都具有确定值,改变所用参数,将会得到不同的结果,为多极磁环的分析和设计带来了极大的方便。并且,有限元法考虑了磁体之间的相互作用和影响,计算结果更精确。

3 结 语

本文用通用的FEM数值计算方法对多极磁环进行计算机仿真计算,并与传统的公式算法进行比较,得到了更精细的图形结果。但该方法还存在一些不足,如磁场分布值与求解区域的边界位置有关,划分单元的选择和网格划分的精细程度对数值结果也有很大的影响。但有限元法为多极磁环的分析研究提供了更为详细的数据和图形结果;为多极磁环的分析、设计和制作奠定了基础。同时,有限元法考虑了磁体之间的相互作用和影响,随着计算机技术和材料科学的发展,其仿真精度也将不断提高。

参 考 文 献

- [1] CHURKIN I, BATRAKOV A, BRIQUEZ F, et al. Elliptical undulator HU256 for synchrotron soleil: Magnetic design, computations and measurements[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2006,16(2): 1852-1854.
- [2] MICLOS S, NICULESCU V I R, GIURGIU L. A schematic layout of a magnetic field for an undulator model[C]// Proceedings of The International Semiconductor Conference. Romania: CAS, 2004: 491-494.
- [3] BUZULUKOVA N, FOK M C, MOORE T E, OBER D M. Generation of plasmaspheric undulations[J]. Eophysical Research Letters, 2008, 35(13): L13105.
- [4] KEAVENY ERIC E, EMAXEY MARTIN R. Interactions between comoving magnetic microswimmers[J]. Hysical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics, 2008, 77(4): 041910.
- [5] BAHRDT J, FRENTRUP W, GAUPP A, et al. Dynamic multipole shimming of the APPLE undulator UE112[C]// Rocoedings of The IEEE Particle Accelerator Conference. US: IEEE Press, 2007: 941-943.
- [6] JANG P, RHIE K, LEE B. Feasibility study of micro-undulator for T-ray sources by using FEM[J]. Hysica Status Solidi (A) Applications and Materials, 2007, 204(12): 4194-4197.
- [7] 易敬曾. 磁场计算与磁路设计[M]. 成都: 电子科技大学出版社, 1987: 100-144.
YI Jin-zheng. Magnetic field calculation and magnetic circuit design[M]. Chengdu: Press of University of Electronic Science and Technology of China, 1987:100-144.
- [8] 刘兴民, 方以坤, 李岫梅, 等. 一次模压成形生产的高性能NdFeB径向多极环[J]. 磁性材料及器件, 2007, 38(3): 50-51, 62.
- [9] LIU Xing-min, FANG Yi-kun, LI Xiu-mei, et al. High performance sintered NdFeB radially oriented multi-pole ring magnet produced by single molding process[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices, 2006, 38(3): 50-51, 62.
- [9] 蒋芳芳 郑 颖. 永磁铁氧体多极磁环磁场取向和充磁系统研究[J]. 磁性材料及器件, 2006, 37(3): 57-58,61.
JIANG Fang-fang, ZHENG Ying. Magnetic orienting and magnetizing system for multi-polar ring permanent[J]. Journal of Magnetic Materials and Devices. 2006, 37(3): 57-58,61.

编 辑 张 俊