

## 磁体工作状态判断标准的改进<sup>1</sup>

吴迅雷 丁耀根

(中国科学院电子学研究所 北京 100080)

**摘要** 磁体结构优化设计需要用最少量的磁体产生最强的磁场,其要点之一是保证磁体的每一部分工作在退磁曲线上尽量靠近最大磁能积  $(BH)_{\max}$  的地方。目前用于磁场计算的程序 CTA 对磁体工作点的算法有缺陷,它对一个形状复杂磁体结构的磁场能量贡献大小的计算也不能给出唯一的结果,以便当作设计优劣的判据。作者就程序算法进行改进后,对每个磁体结构给出一个统一的平均磁能积作为判断磁体工作状态的标准,并进一步画出了磁能积的分布图。

**关键词** 磁体工作点,平均磁能积,磁能积分布

**中图分类号** O441.2

### 1 引言

由于永磁材料比较昂贵,对于电机、核磁共振成像、真空电子器件等磁铁消耗量很大的行业来说,磁体结构的优化设计意义重大。一方面可以降低生产成本,另一方面可以让产品更轻巧灵便于使用。磁场优化设计问题复杂,近几年各国科技工作者们仍在深入研究<sup>[1-5]</sup>。磁体工作点是否靠近  $(BH)_{\max}$  是磁场设计好坏的一个重要判据。令人遗憾的是即便一些昂贵的大型电磁场计算软件,如 Ansoft, Mafra 都没有磁体工作点计算或磁系统设计优化功能。

文献 [6] 的一个轴对称磁场计算程序 CTA 关于磁体工作点的算法不尽合理,有进一步改善的必要。

### 2 磁体工作点及磁能积的概念

磁路中永磁材料的作用是要在气隙中产生磁场。通常情况下,永磁体总是在开路状态下工作的。由于开路状态下磁体受到退磁场的作用,所以工作状态中的永磁体的磁感应强度要小于闭路状态下的剩磁  $B_r$ , 它对应于退磁曲线上比  $B_r$  低的某一个值  $B_d$ 。  $B_d$  及其对应于退磁曲线上的磁场强度  $H_d$ , 合起来就叫做磁体的工作点。磁体工作点的位置与退磁曲线的形状、磁体的形状和磁体间的相互作用有关<sup>[7]</sup>。磁能积是用来表示磁体对周围磁场能量贡献大小的物理量。试计算一个微小体积元磁体的磁能积。在包含磁体的全空间有:

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = 0 \quad (1)$$

$$\oiint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \quad (2)$$

考虑到磁体足够小,可以认为它的内部磁场是均匀的,因此当积分路径经过磁体、闭合曲面包含一个磁体横截面时,以上两式可写为

$$H_i l_i = - \int_C \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} \quad (3)$$

$$B_i S_i = - \iint_D \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} \quad (4)$$

其中  $l, S$  分别为微小体积元磁体沿磁场方向的长度和垂直于磁场方向的横截面的面积,下标  $i$  表示物理量在磁体内部的取值,  $C, D$  表示闭合路径、曲面在磁体以外的部分。(3)式与(4)

<sup>1</sup> 2001-09-03 收到, 2002-02-25 改回  
国家自然科学基金项目 (69881002)

式相乘可得:

$$B_i H_i V_i = \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV \quad (5)$$

式中  $V_i$  微小磁体的体积,  $V$  表示微小体积元磁体以外的全部空间。此式说明微小体积元磁体对周围磁场能量的贡献等于磁体内部磁感应强度和磁场强度之积再乘上它的体积。其中, 磁体内的磁感应强度和磁场强度就是永磁材料退磁曲线上的工作点  $(B_d, H_d)$ 。它们的乘积就是磁能积。

### 3 原有算法的缺陷

以上不严格的推导得到的(5)式只对内部均匀的微小体积元磁体成立。CTA 程序却把它用于内部不均匀, 各部分有相互作用的宏观磁体, 结果自然只能取得粗糙的近似。CTA 程序采用有限差分算法, 以矩形网格对空间进行剖分。形状复杂的磁体以方块的组合表示。原来的计算中对每一个方块给出一个工作点, 不能把磁体结构作为整体考虑。把每一个方块的几何中心处的磁感应强度和磁场强度当作它的工作点  $(B_d, H_d)$ 。例如, CTA 在轴对称柱坐标系中计算以下采用同样磁能积标号为 33MGOe 的永磁材料的同一磁体结构时 ( $-z$  表示充磁方向), 由于边界的两种划分方法不同 (如图 1, 图 2), 得到了完全不同的结果 (如表 1)。

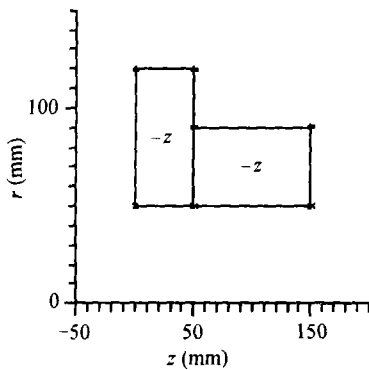


图 1 磁体横向分割示意图

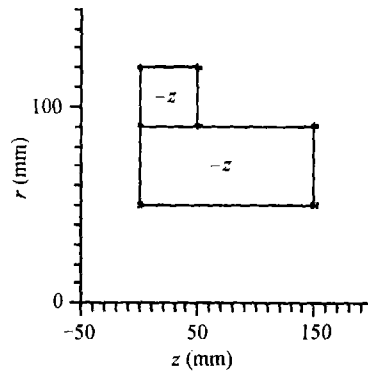


图 2 磁体纵向分割示意图

CTA 按两种边界的划分分别给出了磁体的两个工作点和两个磁能积。如果每一种磁体结构由多个工作点或磁能积来表示它的工作状态, 当然难以判断哪一种磁体结构设计得更合理。表 1 中, 若试图以每一个方块磁能积乘上它的面积, 再算出总横截面上的贡献的磁场能量, 以便得到一个统一的判断标准, 在同样横截面上却得到两种截然不同的总磁能。

显然, 这样的结果不能为判断磁场设计的优劣提供可靠的标准。故必需对原程序加以改善。

表 1 CTA 旧算法的结果

	磁体工作点				磁能积 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )		横截面总磁能 ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ )
	$B_d(\text{T})$		$H_d(\text{A}/\text{m})$				
磁体横向分割	0.9751	0.5891	$-1.64 \times 10^5$	$-4.456 \times 10^5$	160	262.4	1.353
磁体纵向分割	0.9697	0.5746	$-1.68 \times 10^5$	$-4.562 \times 10^5$	163	262.0	1.569

### 4 改进办法及结果

依据上文推导的逻辑, 可以把磁体中每一网格当作微小磁体, 算出它的工作点, 然后求得磁体中全部网格的磁能积的平均值, 以之作为整个磁体结构优劣的评价标准。按照这个办法, CTA 程序经改进后在以上实例中, 两种边界划分都可以算出一样的结果 (如表 2)。

表 2 CTA 新算法的结果

	平均磁能积 ( $\text{kJ}/\text{m}^3$ )	横截面总磁能 ( $\text{kJ}/\text{m}^2$ )
磁体横向分割	215.4	1.616
磁体纵向分割	215.4	1.616

一个磁体结构的平均磁能积靠近材料磁能积标称值的程度, 从一个侧面显示了这种设计方案充分利用材料性能的程度。一个磁体结构也只有一个平均磁能积, 这样我们就得出一个新的判断磁体工作状态的统一标准。并且, 改进后的程序还给出每一种设计的平均磁能积分布图。在上例磁体中不同的边界划分得到了同样的磁能积分布 (如图 3)。图中曲线表示磁感应强度  $z$  分量沿  $z$  轴的分布。图形顶端的色棒表示磁能积的划分, 左端数值为零, 右端为  $262\text{kJ}/\text{m}^3$ 。图 4、图 5 给出了磁能积分布图的一个具体应用。这是一种回旋管的磁体结构。图 4 中阴影所示为纯铁, 标有充磁方向的部分是磁铁, 其余的地方为真空或空气。从图中可以看到磁体的一些部分磁能积很低, 设计者从中得知这样布置磁铁和纯铁, 磁体的使用效率偏低。(图中曲线意义同上。)

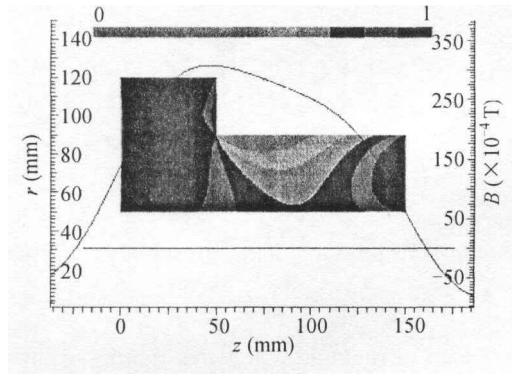


图 3 程序输出的磁能积分布图

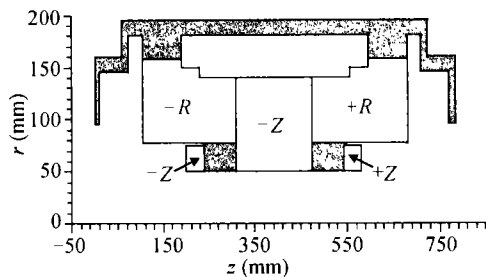


图 4 一种回旋管的磁体结构

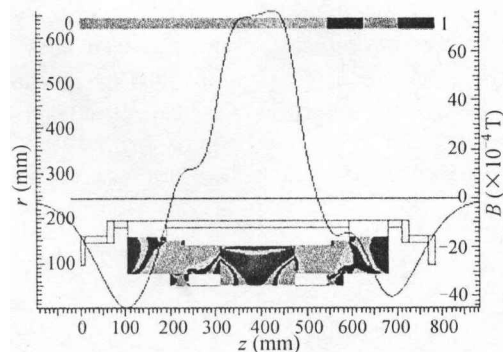


图 5 一种回旋管磁体结构的磁能积分布

## 5 结论

程序经改进后, 得出平均磁能积的数据, 为判断磁场设计中材料消耗是否合理提供了唯一的标准。磁能积分布图显示磁体中各部分的相互作用, 为设计者提供直观的信息。每一个网格的磁能积都算出, 为进一步的优化设计提供了又一种决策变量的选择。

## 参 考 文 献

- [1] J. H. Jensen, Optimization method for permanent-magnet structures, *IEEE Trans. on Magnetics*, 1999, 35(6), 4465-4472.
- [2] J. H. Jensen, M. G. Abele, Maximally efficient permanent magnet structures, *J. Appl. Phys.*, 1996, 79(2), 1157-1163.
- [3] K. R. Davey, Magnet design optimization using variable metrics, *IEEE Trans. on Magnetics*, 1995, 31(6), 3566-3568.
- [4] F. Bloch, O. Cugat, Innovating approaches to the generation of intense magnetic fields: design and optimization of a 4 Tesla permanent magnet flux source, *IEEE Trans. on Magnetics*, 1998, 34(5), 2465-2468.
- [5] Xie Dexin, *et al.*, Shape design optimization in non-linear magnetic problems using simulated annealing with complex strategy, *IEEE Trans. on Magnetics*, 1995, 31(6), 3569-3571.
- [6] Wu Xunlei, *et al.*, Calculation of nonlinear magnetic fields in cylindrically symmetric system.
- [7] 周寿增, 董清飞著, 超强永磁体, 北京, 冶金工业出版社, 1999年, 63-68.

AN IMPROVED CRITERION TO JUDGE  
THE ENERGY CONTRIBUTION OF MAGNETS

Wu Xunlei    Ding Yaogen

*(Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)*

**Abstract** The optimum design of magnet structures requires that every part of the magnets work at a point on the demagnetization curve which is as near to  $(BH)_{\max}$  as possible. CTA is a program for the computation of magnetic fields in axisymmetric systems. It has some defects in its search for magnet working points, and furthermore, for a complex structure it cannot provide a sole result to judge how much magnetic energy is contributed by the magnets. In this paper the authors introduce average magnetic energy product to serve as a criterion for the judgment of the work state of magnets. For every magnet structure the improved CTA can present a unique average magnetic energy product and a map of the energy product distribution.

**Key words** Magnet working point, Average energy product, Energy product distribution

吴迅雷: 男, 1967年生, 讲师, 专业为物理电子学.

丁耀根: 男, 1942年生, 博士生导师, 专业为微波电子学.