

# 100 MeV 强流质子回旋加速器 主磁铁电磁力的数值模拟

杨建俊<sup>1,2</sup>, 张天爵<sup>1</sup>, 钟俊晴<sup>1</sup>

(1. 中国原子能科学研究院 串列加速器升级工程技术部, 北京 102413;

2. 清华大学 工程物理系, 北京 100084)

**摘要:**本工作研究计算中国原子能科学研究院目前正在设计、建造中的 100 MeV 强流质子回旋加速器 CYCIAE-100 主磁铁电磁力。计算中选用虚位移法和麦克斯韦应力张量法两种方法。在利用电磁场三维有限元分析程序计算得到紧凑型等时性回旋加速器主磁铁电磁场的基础上, 先采用虚位移法估算电磁吸力, 然后基于麦克斯韦应力张量法在 MATLAB 环境下编写数值计算程序, 详细研究磁极和磁轭受到的电磁吸力。两种方法的计算结果接近。计算得到的主磁铁磁极间吸力大于磁极与盖板间吸力, 二者之差由磁极和盖板间的螺栓承担。电磁力的计算结果为主磁铁结构变形计算和结构方案选取提供了依据。

**关键词:**电磁力; 麦克斯韦应力张量法; 虚位移法; 回旋加速器

**中图分类号:** TL503.8      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-6931(2008)02-0180-05

## Numerical Calculation of Electromagnetic Force for 100 MeV H<sup>-</sup> Cyclotron

YANG Jian-jun<sup>1,2</sup>, ZHANG Tian-jue<sup>1</sup>, ZHONG Jun-qing<sup>1</sup>

(1. *China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275-3, Beijing 102413, China;*

2. *Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China*)

**Abstract:** A 100 MeV compact proton cyclotron CYCIAE-100 is under design and construction at China Institute of Atomic Energy. The electromagnetic force of the machine was numerically investigated via virtual work method and Maxwell stress tensor method. In practice, the magnetic field distribution was achieved from a FEM code and we got an estimation of the electromagnetic force through virtual work method. Then a new code was written based on Maxwell stress tensor method and implemented in MATLAB environment. The code was used to calculate the electromagnetic force numerically for detailed study. It shows that the results of two different methods are comparable. The attractive force between two opposite poles is larger than the attractive force between a pole and top/bottom yoke, and the difference of the two forces is borne by the bolts

which fix the pole on the yoke. This study provides foundation for the calculation of magnet deformation and selection of mechanical structure.

**Key words:** electromagnetic force; Maxwell stress tensor method; virtual work method; cyclotron

中国原子能科学研究院正在进行 HI-13 串列加速器升级工程,升级工程完成后,可产生放射性核素,用以进行多种学科领域的研究。该工程将建造 1 台紧凑型强流质子回旋加速器 CYCIAE-100。主磁铁系统是回旋加速器的主体,也是回旋加速器两个关键部件之一。加速器的整体结构和主磁铁的模型分别示于图 1、2。串列加速器升级工程技术部研究人员已完成了主磁铁初步物理设计,计算得到比较理想的磁场分布<sup>[1-2]</sup>。

在 CYCIAE-100 的整体设计中,满足各种束流动力学要求的磁场分布的实现是最关键的环节。在紧凑型回旋加速器中,由于磁极间隙

很小,在 CYCIAE-100 中只有 4~5 cm,因此,磁铁极面的形变将严重影响中心平面及其附近的磁场分布,引起磁场的畸变,进而影响带电粒子束在磁场中的运动行为。除磁极面形状的加工偏差外,导致磁铁变形的主要因素有电磁力、磁铁自身的重力和外界的大气压力。所以,对电磁力的准确计算是主磁铁结构设计的重要内容,对 CYCIAE-100 最终磁场达到高精度具有重要意义。

## 1 电磁力计算方法的选用和发展

根据 CYCIAE-100 主磁铁的结构特点,选用虚位移法和麦克斯韦应力张量法两种方法计算主磁铁的电磁力。为了满足这样的计算要求,在现有数值计算程序的基础上,开发了适合于计算 CYCIAE-100 主磁铁电磁力的专用程序。

### 1.1 虚位移法

虚位移法假设物体从原来位置轻微移动所做功来计算电磁力  $F$ :

$$F = -\nabla W(r) \quad (1)$$

式中: $W(r)$  为储能,是关于矢量位移  $r$  的一个函数,单位体积储能可表示为  $(B \cdot H)/2$ ,  $B$  为磁感应强度,  $H$  为磁场强度。

当系统中的受力物体发生虚位移时,只有发生畸变的单元的磁场能量发生了变化,所以,采用虚位移法时,只需考虑形状发生畸变的单元。对于刚体的受力,只需考虑刚体周围的气隙单元,积分只涉及到包围物体的外层气隙单元<sup>[3]</sup>。

### 1.2 麦克斯韦应力张量法

麦克斯韦应力张量法利用沿包围物体的闭合面求局部应力积分得到物体总的受力  $F$ <sup>[4]</sup>:

$$F = \oint_{\mu} \frac{1}{\mu} T \cdot dS \quad (2)$$

式中: $\mu$  为磁导率; $S$  是包围磁体的任何一个闭合曲面, $dS$  取物体边界面的外法线方向; $T$  为麦克斯韦应力张量,在笛卡尔坐标系中, $T$  可表

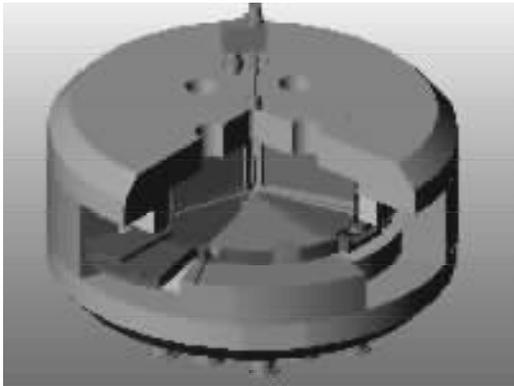


图 1 CYCIAE-100 的主体结构

Fig. 1 General view of CYCIAE-100

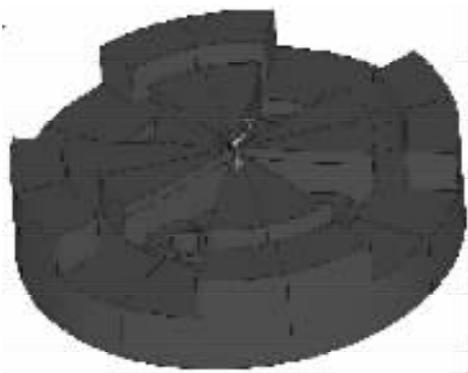


图 2 主磁铁的二分之一模型

Fig. 2 Half model of cyclotron main magnet

示为矩阵:

$$T = \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_y B_x & B_y^2 - \frac{1}{2}|B|^2 & B_y B_z \\ B_z B_x & B_z B_y & B_z^2 - \frac{1}{2}|B|^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中:  $B_x$ 、 $B_y$ 、 $B_z$  分别为  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的磁感应强度。

## 2 CYCIAE-100 电磁力计算

### 2.1 用虚位移法估算电磁力

根据虚位移法原理,理想情况下二极磁铁两磁极间的吸力为:

$$F_z = - \frac{dW}{dz} = - \frac{B^2 A}{2\mu} \quad (4)$$

其中:  $B$  为两磁极间的磁感应强度;  $A$  是磁极面积。

文献[5]考虑了在磁极长度远大于宽度的情况下,磁极边界的漏磁效应对气隙区域中磁场的影响,推导出每单元长度上力的更加精确的近似公式,有:

$$F_z = \frac{B^2 w}{2\mu_0} \left( 1 + \frac{2d}{\pi w} + \frac{\beta_l + \beta_r}{2w} - \frac{\beta_l \theta_l}{\pi w} - \frac{\beta_r \theta_r}{\pi w} \right) \quad (5)$$

式中各参数对应的物理意义如图 3 所示。

当  $\beta_l = \beta_r = 0$  时,式(5)简化为:

$$F_z = \frac{B^2 w}{2\mu_0} \left( 1 + \frac{2d}{\pi w} \right) \quad (6)$$

利用式(6)估算 CYCIAE-100 两磁极间的电磁吸力。

在等时性回旋加速器中,为满足束流回旋和高频场间的等时性要求,磁场随着半径逐渐

增大。为了提高估算的精度,将磁极叶片分为 3 个部分(图 4),每部分的磁场值近似为二极均匀磁场。

每部分取不同的磁场值。在 H1 区考虑外边界和两侧面的漏磁,H2 和 H3 区考虑两侧面的漏磁。3 个区的参数及计算得到的电磁力列于表 1。

由此,得到相对两个磁极叶片间的吸力为 1.15 MN,合 117.2 t。

然后,估算磁极和盖板间的吸力。

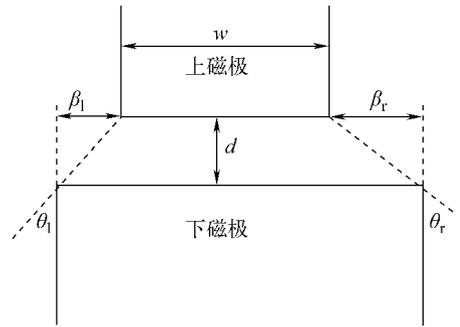


图 3 两相对矩形磁极的横断面  
Fig. 3 Section plane of two opposite rectangular poles

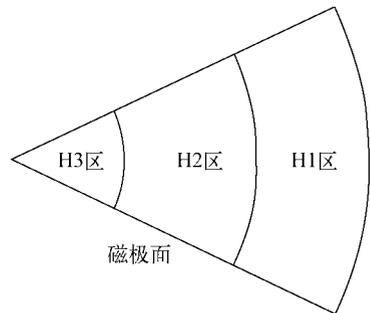


图 4 扇形磁极的 3 个区  
Fig. 4 Three segments of a sector pole

表 1 扇形磁极参数和电磁吸力

Table 1 Some parameters and attractive forces of a pole

磁极区域	$B_z/T$	内径 $R_1/$ m	外径 $R_2/$ m	角宽度 $\theta/$ ( $^\circ$ )	磁极间隙 $d/$ mm	电磁吸力 $F_z/$ MN
H1	1.35	1.3	1.9	50	40	0.660
H2	1.25	0.6	1.3	50	45	0.386
H3	1.17	0.015	0.6	50	50	0.106

基于环路定理计算得到此处垂直方向的平均磁场为 1.257 T,因此,磁极与盖板间的吸力为:

$$F_2 = \frac{B_z^2 A}{2\mu_0} = 0.99 \text{ MN}$$

磁极间吸力大于磁极和盖板间吸力,二者之差为 160 kN,合 16.3 t,由连接磁极与盖板间的螺栓承担。

由于回旋加速器的磁极是扇形叶片,半径方向和角度方向尺寸相差不大,且磁场是随着半径逐渐变化的,所以,利用式(6)计算得到的结果存在一定的误差。

### 2.2 麦克斯韦应力张量法数值计算吸力

在主磁铁的详细设计中,利用大型通用有限元数值模拟程序 ANSYS (ANSYS 9.0 Documentation, ANSYS, Inc. 2004)建模并计算电磁场。在 ANSYS 中,可用麦克斯韦应力张量法或虚位移法求得磁力,但只适用于邻近被空气层包围着的磁铁部件,无法直接用来计算 CYCIAE-100 紧密接触的磁极与盖板间的受力。

为解决此问题,从 ANSYS 软件得到的磁场分布中插值得到磁极与盖板交界面上的磁场,由式(2)出发,编程计算电磁力,以解决麦克斯韦应力张量的面积分问题。

在理论上,积分路径可是物体本身的表面,也可是空气中包围物体的任意闭合曲面。但不同路径的计算精度是不同的,合理选择路径极其重要。文献[3,6]指出,选择通过单元中线的面作为麦克斯韦应力张量法的积分路径时,得到的解的精度最高。所以,在求解 CYCIAE-100 磁极的电磁力时,除了在盖板和磁极相连部分选择连接面作为积分路径外,其余部分在包围磁极的外层空气单元中线的面上进行积分。

在磁铁的精细设计阶段,为详细分析电磁力及其引起的变形对气隙中磁场分布的影响,在 MATLAB 环境上开发了专用程序。首先从有限元程序中输出求解电磁力所需的磁场数据文件,并读入到 MATLAB 程序中。几何上相邻的 4 个点组成 1 个一阶线性四边形单元面,然后,从物理坐标系  $(x, y)$  映射成基准坐标系  $(u, v)$  中的标准单元面(图 5)。最后,在基准坐标系中利用高斯数值积分求得每个单元面

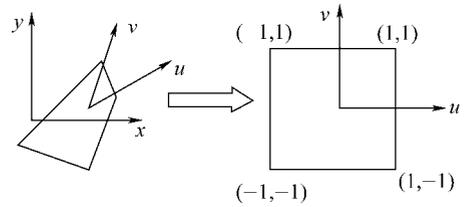


图 5 任意四边形映射为正方形  
Fig. 5 Mapping from arbitrary quadrangle to normal square

上的受力  $F_e$ :

$$F_e = \iint_{S_e} \frac{1}{\mu} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} dx dy = \iint_{-1-1}^{1-1} \frac{1}{\mu} \mathbf{F}(u, v) du dv = \frac{1}{\mu} \sum_{i,j=1}^4 A_{ij} \mathbf{F}(u_i, v_j) = \frac{1}{\mu} \sum_{i,j=1}^4 A_i A_j \mathbf{F}(u_i, v_j) \quad (7)$$

其中:  $\mathbf{n}$  为积分面外法线方向单位矢量;  $A_i$  为高斯积分权函数。

$$\begin{aligned} F(u, v) = & \left[ |J_{yz}| \left( B_z^2 - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) + J_{zx} |B_x B_y| + J_{xy} |B_x B_z| \right] \mathbf{i} + \\ & \left[ |J_{yz}| |B_y B_x| + J_{zx} \left( B_y^2 - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) + J_{xy} |B_y B_z| \right] \mathbf{j} + \\ & \left[ |J_{yz}| |B_y B_x| + J_{zx} |B_x B_y| + J_{xy} \left( B_z^2 - \frac{1}{2} |\mathbf{B}|^2 \right) \right] \mathbf{k} \end{aligned} \quad (8)$$

其中:  $|J_{x_i x_j}| = \begin{vmatrix} \frac{\partial x_i}{\partial u} & \frac{\partial x_j}{\partial u} \\ \frac{\partial x_i}{\partial v} & \frac{\partial x_j}{\partial v} \end{vmatrix}$  是坐标变换的雅可比行列式。

叠加所有平面元的力,得到整个磁极受到的电磁力。

对于当前的主磁铁结构,每个磁极受垂直方向的净电磁力为 202 kN,合 20.6 t,由盖板和磁极间的螺栓分担。两磁极间的吸力为 1.10 MN,合 112.2 t。

### 3 结束语

本文先利用虚位移法估算了 CYCIAE-100 主磁铁的电磁力,然后基于实际问题,确定了利用麦克斯韦应力张量法计算电磁力的方案,利用有限元程序得到的电磁场计算结果,在 MATLAB 环境中编制程序计算电磁

力,克服了当前有限元程序 ANSYS 等无法计算不完全被空气区包围的实体的电磁力的困难。

电磁力的获得为主磁铁结构形变分析和电磁场精确模拟计算打下了基础,为主磁铁结构方案的选定提供依据。

#### 参考文献:

- [1] ZHANG Tianjue, GUAN Xialing, LI Zhenguo, et al. Research activities related to low energy accelerators in CIAE [C]//Proceedings of the Second Asian Particle Accelerator Conference. Beijing:[s. n.], 2001: 54-58.
- [2] 钟俊晴, 张天爵, 杨建俊, 等. 100 MeV 紧凑型回旋加速器主磁铁的三维磁场有限元分析技术[J]. 原子能科学技术, 2005, 39(2): 110-113.
- ZHONG Junqing, ZHANG Tianjue, YANG Jianjun, et al. 3D finite element analysis method for main magnet design of 100 MeV compact cyclotron[J]. Atomic Energy Science and Technology, 2005, 39(2): 110-113(in Chinese).
- [3] 阎秀恪, 谢德馨, 高彰燮, 等. 电磁力有限元分析中麦克斯韦应力张量法的积分路径选取的研究[J]. 电工技术学报, 2003, 18(5): 32-36.
- YAN Xiuke, XIE Dexin, GAO Zhangxie, et al. Research on integration path selection of Maxwell stress tensor method used in electromagnetic force FEM analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(5): 32-36(in Chinese).
- [4] 劳塞尔 D A, 席尔凡斯特 P P. 电磁装置计算机辅助设计[M]. 唐任远, 译. 北京: 机械工业出版社, 1989:72-120.
- [5] BRZEZINA W, LANGERHOLC J. Lift and side force on rectangular pole pieces in two dimensions[J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(4): 1 869-1 872.
- [6] COULOMB J L. A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness[J]. IEEE Trans Mag, 1994, 30: 3 471-3 474.

## 钠冷快堆主容器单点接触式钠泄漏探测器

【公开日】2007. 11. 14

【分类号】G21C17/025

【公开号】CN101071654

【申请号】200710111257.4

【申请日】2007. 06. 20

【申请人】中国原子能科学研究院

【文摘】本发明公开了一种钠冷快堆主容器单点接触式钠泄漏探测器。该探测器是由 1 根不锈钢包壳、氧化铝绝缘的不锈钢双芯铠装电缆制成,双芯导体绞接焊接后置于前端保护套内,保护套侧面有布置成 2 层的 4 个进钠孔,以防止头部空腔憋气,导体焊点与包壳绝缘。这种探测器由于头部触点受护套保护,因此,便于在细长导管内安装,不会损坏探测器。可在役检验,适用于钠冷快堆主容器钠泄漏探测。这种探测器可长时间承受 600 °C 的高温。

摘自中国原子能科学研究院《核科技信息》