

CR环二极磁铁的磁场优化*

姚庆高^{1,2;1)} 马力祯¹ 何源¹ 李青^{1,2} 吴巍^{1,2} 卞文龙^{1,2} 袁平¹ 詹文龙¹

1(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2(中国科学院研究生院 北京 100049)

摘要 FAIR项目中的CR环二极磁铁对磁场积分场的误差分布要求很高,通过削斜与加载镜像板的方法是优化磁场的主要方法,文中介绍了对二极磁铁优化方法和对它的处理方法.利用削斜的方法来改变二极磁铁积分场的误差分布,通过复杂的削斜,已将其高场的误差分布优化到 $\pm 2 \times 10^{-4}$.加镜像板的方法主要适合高场,而对低场的调节不明显.另外处理方法的选择对结果的影响也很大,文中对两种方法作了比较.优化模拟计算软件采用的是专门的磁场计算工具OPERA.

关键词 活极头 削斜 镜像板 磁场优化

1 引言

由德国重离子研究中心(GSI)负责承建的大型科研装置-反质子及离子研究装置(Facility for Antiproton and Ion Research,简称FAIR)的研建是一个大型的国际合作项目,由包括中国在内的十几个国家联合建造.中国将负责同步加速器CR(Collecting Ring)环及超导束运线Super-FRS的五十余台二极磁铁的加工,余下的工作主要就是对磁场的优化,削斜活极头和加装镜像板是优化积分长度的主要方法.

2 磁铁结构

考虑多方面的因素,CR环二极磁铁采用H型,超导线圈、温铁结构.根据以上的基本要求,通过经验公式以及OPERA二维计算可以得到磁铁的基本尺寸,其冲片结构如图1所示.

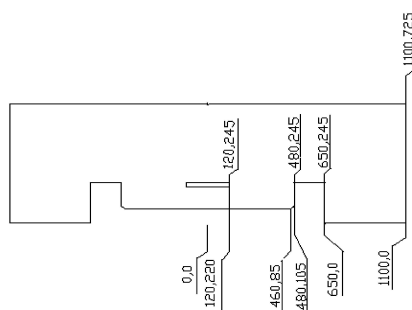


图1 冲片结构图

二维磁场计算显示这种冲片结构的高、中、低场的均匀度都能够达到设计要求,磁极中心加磁场钝化槽的结构可以有效改善磁场的质量.另外三维建模计算可知,中心长度为2020mm的铁芯便可满足积分长度为2127mm的要求,梯形铁芯结构制造组装简单,采用活极头结构并加以削斜与垫补来调节磁场的积分长度.

3 磁场优化

通过对磁铁上加装的活极头进行削斜可以调节磁铁的积分长度,从而减小积分长度之间的误差;加装镜像板屏蔽磁场可用来改变积分长度之间的误差.

3.1 削斜活极头对磁场的影响

活极头结构方便了后续磁场的调整过程,避免了直接加工庞大磁铁的工序.CR环二极磁铁的边缘角度为 7.5° ,加工 $75 \times 25 \times 960$ mm且与磁铁端部匹配的六面体钢件作为活极头(倾斜角也为 7.5°),将其安装在磁铁的端部.在其上加工一个 20×20 mm的倒角,以适当缩短积分长度,通过计算两个端点连成直线的斜率对应的角度大约为 0.67° ,考虑到对称的关系,取活极头削斜的偏转角度为 0.35° (即活极头的端面与磁铁的端面夹角为 0.35°),根据图中的分析,误差分布没有达到设计要求,需要做进一步的端部处理.图2(这里所作的误差分析横坐标对应的是好场区宽度值,纵坐

2008-01-07 收稿

* 中国科学院近代物理研究所所长基金(0615010SZO)和中国科学院西部之光人才培养项目(0715060XLO)资助

1) E-mail: yaoqinggao@impcas.ac.cn

标对应的是各点所在积分线的积分长度相对于平均值的误差,下同).

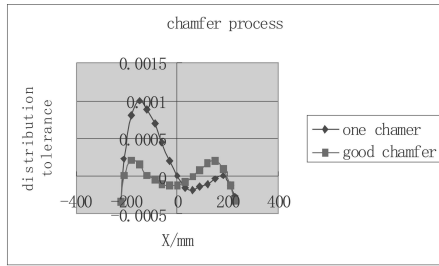


图2 磁场优化中的磁场积分分布比较

给出了削斜过程中其中一次削斜与优化好的积分长度的分布误差. 在 $\pm 225\text{mm}$ 的范围内, 它的积分场误差已经接近了设计精度, 达到了 $\pm 2.5 \times 10^{-4}$, 这种削斜的效果对磁场的优化是非常明显的. 活极头削斜形状如图3所示.

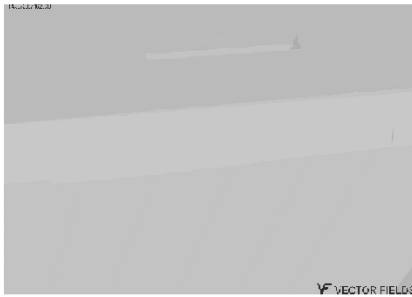


图3 端部削斜

3.2 镜像板对磁场的影响

镜像板加在平行于磁铁端面200mm的地方. 根据计算发现, 镜像板不仅增加了磁铁内的场强, 而且附加了一个四级量, 使得磁场的积分长度的误差分布变差, 如图4所示. 镜像板对高场有一定的影响, 但对低场的影响很小.

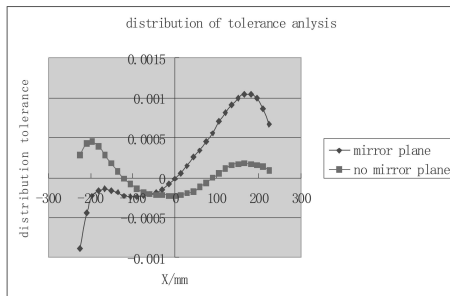


图4 高场时镜像板对积分误差的影响

分析原因, 可知在高场的情况下磁铁的漏磁很严重, 外面所加的镜像板对磁场起到了屏蔽磁场的作用, 从而影响积分长度的误差分布. 而在低场情况下, 磁场被约束在铁芯内, 漏磁很小, 镜像板的磁屏蔽作用不十分明显, 积分长度的误差不受多大影响.

另外, 对通过偏转镜像板来调整积分长度的误差也做了一定的分析, 经过计算发现镜像板的偏转对低场的积分长度的误差基本上没有多大影响, 只对高场有一定的影响. 所以镜像板仅适合于高场, 调整低场还需其它方法.

从这里可以看出, 通过加镜像板来使磁铁的高、中、低场兼容很难做到, 所以要使磁场的高中低场都能达到设计要求, 一个活极头是不容易满足要求的, 考虑到CR环是个加速环, 环对高场的要求比较苛刻, 设计两个活极头是比较可取的, 当需要低场时换用另一个活极头.

3.3 处理方法的选取

二极铁产生的磁场并非是一个纯粹的二极场, 而是一个以二极场为基本的场分布叠加上高阶的场分布的合成磁场. 在对磁铁的积分长度进行分析时便会遇到如何处理高阶量的问题. 这里所用的处理方法是将所得到的积分长度与积分线所在的好场区位置 -225 — $+225$ 进行高阶拟合, 得出多阶公式, 然后再从积分长度中扣除二极矩与四极量便可得到有关高阶量的值. 如上面2.2中镜像板对磁场的影响, 其中加镜像板拟合的二阶公式为

$$L_i = 0.2638 X_i + 2127.7. \quad (1)$$

不加镜像板拟合的公式为

$$L_i = 0.256 X_i + 2127.4, \quad (2)$$

其中 X_i (取值范围为 -225 — $+225$)为积分.

线所在的好场区位置. L_i 为二极矩与四极量对积分长度的贡献. 用 L_H 表示高阶场积分长度, L_{eff} 表示有效积分长度, L_0 表示中心积分长度:

$$L_H = L_{\text{eff}} - L_i. \quad (3)$$

于是便可得到磁场积分分布的误差:

$$U = L_H / L_0, \quad (4)$$

以积分线的中心位置做为横坐标, 以 U 做为纵坐标便可得到如图4所示的误差分析图, 处理过程中减掉了磁铁本身的四极量.

另外, 如果不扣除四极量, 仅仅扣除二极矩对积分长度的贡献值, 在处理结果中便可以看出四极量的影响, 如图5所示, 图中是磁铁有无镜像板的另外一种处理方法, 从图中的趋势便可以看出两种完全不同的结果. 在这里镜像板附加的四极量正好抵消了磁铁产生的四极量, 从而达到了优化的目的. 所以选取哪种处理方法需要符合加速器物理设计时对磁铁高阶量的要求.

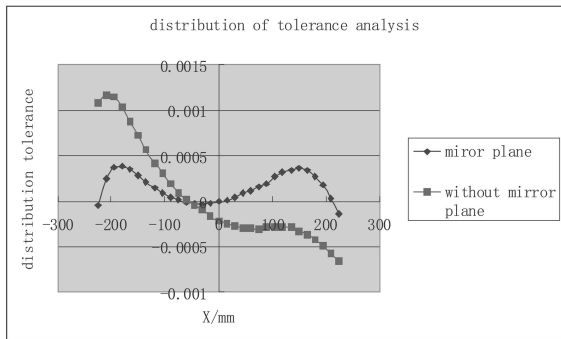


图 5 不同处理方法的误差分布图

4 结论

磁场的优化是磁铁设计中很重要的工作, 传统的优化方法是活极头削斜与镜像板屏蔽. 在进行磁场模拟计算分析后可知, 活极头的削斜对磁场的积分长度影响很大, 但活极头对高中低场积分长度误差的兼容性比较差. 镜像板仅对磁铁的高场产生影响, 对低场积分长度的影响很小, 所以利用镜像板优化磁场使磁铁的高中低场兼容是不可取的. 为磁铁的高场与低场各设计一个活极头是可取的方案.

参考文献(References)

- 1 Vector Fields Limited, OPERA-2d\3d User Guide and Reference Manual.[Z], Oxford, 1999
- 2 LI Quan-Feng. Magnetic Numerical Calculation and Magnet Design, Beijing: Tsinghua University Press, 2002 (in Chinese)
(李泉凤. 电磁场数值计算与电磁铁设计, 北京: 清华大学出版社, 2002)

Optimization of Magnetic Field for CR Dipole Magnet^{*}

YAO Qing-Gao^{1,2;1)} MA Li-Zhen¹ HE Yuan¹ LI Qing² WU Wei²
BIAN Wen-Long² YUAN Ping¹ ZHAN Wen-Long¹

1(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

2(Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract High homogeneity of the CR (collector ring) dipole magnet for FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) project at GSI is essential. The two optimized and analysis methods are introduced in detail. In order to obtain an ideal integral magnetic field distribution, the complicated end chamfer has been designed. By chamfering the removable pole, the distribution tolerance of high magnetic field is optimized to $\pm 2 \times 10^{-4}$. The method of adding a mirror plane is suitable for the high magnetic field and it doesn't fit the low one. The OPERA is used to optimize the dipole magnetic field.

Key words removable pole, chamfer, mirror plane, optimization

Received 7 January 2008

^{*} Supported by Director Foundation of Institute of Modern Physics of CAS (0615010SZO) and Western Light Talents Training Program of CAS (0715060XLO)

1) E-mail: yaoqinggao@impcas.ac.cn