

CSRm 二极铁磁场分散性的研究^{*}

苏雅龙^{1,2;1)} 何源¹ 韩少斐¹ 袁平¹ 刘维军^{1,2}
马力祯^{1,2} 张思玲¹ 王文进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 介绍了国家大科学工程 HIRFL-CSR 中主环二极磁铁的分散性测量的原理、测量方法,以及垫补的位置和垫补量与磁铁分散大小的关系. 最后给出了 CSR 主环二极磁铁最终垫补后的分散性结果、测量误差以及影响测量精度的因素.

关键词 二极磁铁 垫补 磁场测量 分散性 标准差

1 引言

国家大科学工程 HIRFL-CSR(兰州重离子加速器冷却存储环)系统^[1]的主环(CSRm)是一同步加速器. 整个系统在离子加速过程中,随着离子被加速,磁铁要将带电离子约束在轨道内,也就是说磁场的变化要同步. 磁场同步变化要考虑的因素较多,这样控制就变得很复杂. 要解决这个问题,需要所有 17 台起偏转作用的二极磁铁(包含一台参考磁铁)用一台电源串联供电,但同类型磁铁在实际加工过程中不可避免地存在着偏差,分散性的大小表明了偏差的大小. 有效地减小磁铁之间的分散性是二极磁铁加工中的关键问题.

2 CSRm 二极磁铁介绍

CSRm 二极磁铁采用 H 型,在立柱中心平面处分为上下对称的两部分铁芯,铁芯由同一冲模冲出的互相绝缘的无取向硅钢片叠装而成^[2]. 为了能够在测磁过程中对磁铁的等效长度进行调节,降低 17 台(16 台待测磁铁和 1 台参考磁铁)二极磁铁间的分散性而采用活极头结构,可以在活极头内增加或

减少 0.5mm 的硅钢片改变铁芯长度来调节磁铁的等效积分长度. 表 1 是 CSRm 二极磁铁的性能参数. 图 1 给出了 CSRm 二极磁铁的俯视图,图 2 给出了 CSRm 二极磁铁活极头的主要结构.

表 1 二极磁铁参数

最大电流/A	磁场范围/T	偏转半径/m	偏转角度/(°)	铁芯长度/m
3000	0.1—1.6	7.6	22.5	2.906
磁极宽度/mm	气隙/mm	有效直线长度/m	有效孔径/mm ²	磁场均匀度
350	80	2.965	170×60	$\pm 2.0 \times 10^{-4}$

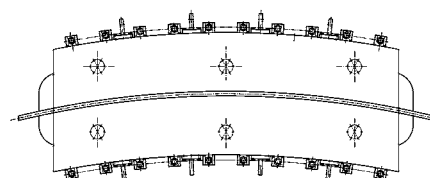


图 1 CSRm 二极磁铁俯视图

2004-08-16 收稿

^{*} 国家大科学工程——兰州重离子加速器冷却存储环(HIRFL-CSR)项目资助

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

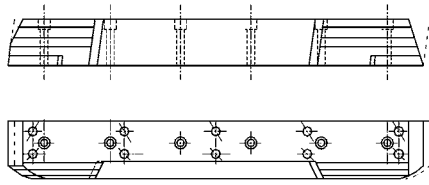


图 2 CSRm 二极磁活极头结构图

3 积分磁场测量分散性的原理

主环二极铁的分散性采用脉冲磁场的方法测量^[3]. 若作绝对测量,测得的 $\int B(0)dl$ 值很大,要达到 1×10^{-4} 的误差精度很困难. 若用两个线圈作相对测量,即用 1 台电源对两台磁铁串联供电,两台磁铁中的测量线圈串联反接,这样可直接测量 $\Delta \int B(0)dl$, 并且可以消除电源供电和电压积分计数产生的误差.

将磁铁 1(作为测量磁铁(M))和磁铁 2(作为参考磁铁(R))串联供电,在两台磁铁的中心处静止地放置两个积分长线圈. 线圈 1 作为测量线圈(M),线圈 2 作为参考线圈(R),两个线圈串联反接.

积分测量线圈在中轴线上测量积分磁场. 近似认为在线圈宽度范围内磁场的平均值等于线圈中心圆弧处的磁场值,且磁感应强度方向与线圈平面垂直,则穿过线圈平面的磁通量 Φ 可用以下公式表示^[4]

$$\Phi = NW \int B(0, l) = NWBL,$$

其中 NW 为线圈常数(N 是线圈匝数, W 是线圈宽度), L 为积分线圈的弧长. 得到测量线圈和参考线圈积分场的差值

$$\Delta\Phi = \Phi_M - \Phi_R, \quad (1)$$

则测量分散性可定义为

$$\xi = \Delta\Phi / \Phi_R = \Delta BL / BL. \quad (2)$$

由于导线的有限尺寸、机械加工的公差、引线端的杂散面积等原因的影响, NW 的设计值和真实值之间总是存在误差. 而该线圈的半径为 7.6m, 弦长为 3.4m, 很难找到相应大小的均匀二极磁场对 NW 真值进行标定, 因此也就无法得到 $\Delta\Phi$ 的绝对值^[5]. 我们采用了互换测量线圈消去线圈差异的方法来解决这个问题. 通过改变电流可得到线圈的磁通量. 第一次将参考线圈置入参考磁铁中(测得的磁通量记为 Φ_{RR}), 测量线圈置入测量磁铁中(测得的磁通

量记为 Φ_{MM}),

$$\Phi_{RR} = (BL)_R(NW)_R, \quad (3)$$

$$\Phi_{MM} = (BL)_M(NW)_M, \quad (4)$$

测量线圈与参考线圈的磁通量变化之差

$$\Delta\Phi_1 = \Phi_{RR} - \Phi_{MM} = (BL)_R(NW)_R - (BL)_M(NW)_M. \quad (5)$$

第二次将两个线圈交换位置, 测量线圈置入参考磁铁(测得的磁通量记为 Φ_{RM}), 参考线圈置入测量磁铁(测得的磁通量记为 Φ_{MR})可得:

$$\Phi_{RM} = (BL)_R(NW)_M, \quad (6)$$

$$\Phi_{MR} = (BL)_M(NW)_R, \quad (7)$$

测量线圈与参考线圈的磁通量变化之差

$$\Delta\Phi_2 = \Phi_{RM} - \Phi_{MR} = (BL)_R(NW)_M - (BL)_M(NW)_R. \quad (8)$$

所以

$$\begin{aligned} (\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2) / (\Phi_{RR} + \Phi_{RM}) &= \\ ((BL)_R - (BL)_M) / (BL)_R &= \xi, \end{aligned} \quad (9)$$

式中线圈常数 NW 被约去, 成为与 ξ 无关的量.

4 测量过程及结果

4.1 对同一台磁铁在不同电流状态下的分散性测量

在测量分散性的过程中, 上升电流以供电电源最低的输出为起始, 每上升 75A 电流, 电流维持恒定值 3s, 这样上升至 2400A(约 1.45T)就有 32 个电流状态对应于 32 个分散值, 其结果如图 3 所示.

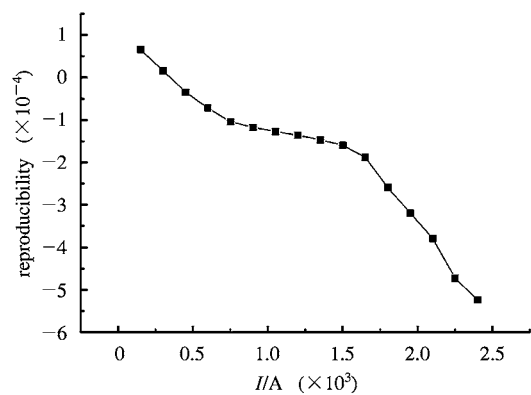


图 3 分散性和电流的关系

由图中可以看出, 电流在 75A 时, 待测磁铁的积分磁场比参考磁铁低 1.1×10^{-4} , 电流加到 1500A

时,待测磁铁的积分磁场比参考磁铁低 2.8×10^{-4} , 在这一段上分散性的降低比较平缓. 当电流从 1500A 上升到 2400A 时,磁铁的分散性降至 -5.9×10^{-4} ,在这一段上分散性的降低较第一段陡. 所以对同一台磁铁,在不同电流下,对参考磁铁的分散性是不同的. 所以我们只能选择 0.5T 附近优化二极铁磁场,在对应于 1050A 的电流状态下通过给每一台磁铁的活极头内垫加上或减去硅钢片,进行分散性的垫补,不能兼顾两头,以达到工程要求的分散值的绝对值小于 $\pm 2 \times 10^{-4}$.

4.2 二极铁活极头上端垫补和下端垫补对分散性的影响

为了确定二极铁活极头上端垫补和下端垫补对分散性的影响,在二极铁的下极头两端加上 1—5 片硅钢片,下极头也直至加到 5 片,测量 10 次分散性的结果从 0—2400A 的分散性与图 3 类似,但随片数的增加分散性曲线上移. 图 4 给出了电流为 1050A 时,分散性随硅钢片数目增加的变化曲线.

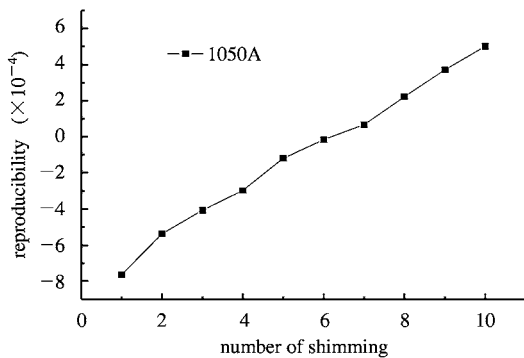


图 4 活极头两端垫补对分散性的影响

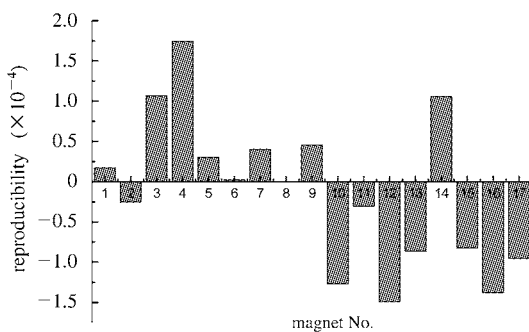


图 5 垫补后分散值的最终结果

从图 4 可以看到我们的实验和结果可以得到结论:无论垫补片增加在上极头还是下极头,对应等效长度来说并无多大的区别,但考虑到上下极头的不对称性可能会对多极量、磁中心平面的位置产生影响. 所以尽量选择上下、前后对称的垫补方法.

据此方法,在活极头前面加垫数量不等的硅钢片后,CSRm 主环 17 台二极磁铁分散性的最终垫补结果如图 5 所示.

5 重复性测量

在某一台磁铁垫补之前,重复测量了 10 次分散性,这样的重复性试验,可以得到该系统的测量误差,检验是否能够满足 CSR 磁铁分散性测量的误差要求.

图 6 是在 10 次重复性实验的数据中,通过数学统计方法分析数据,得到 10 次分散性的平均值和 10 次标准差. 标准差的现实意义是系统实际测量值与测量平均值的偏差,即系统的测量误差. 从图中可以看出,分散性在 900A 时,分散性为 $\pm 2 \times 10^{-4}$,测量误差约为 7×10^{-5} ,测量误差约占测量值的 1/3,可以满足测量要求. 从误差产生的原因分析:每次电源开机的初始电流不为零,且不重复度大约为 3A 左右,这样在初始电流以下的磁通量不能计入分散性的测量中,导致积分器在每次的测量中磁通量测量不完全重复,这是误差的主要原因. 另外,每次交换测量线圈和参考线圈的位置不能准确重复,导致所测量位置的磁场值有差异,也是误差产生的原因.

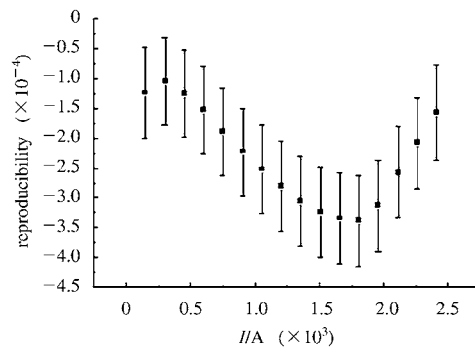


图 6 分散性的重复性误差

6 结论

从测量结果和误差分析看出,对磁铁的积分等效长度垫补是可行的,但只能选择某一电流状态.在生产过程中,磁铁实际长度和磁铁重量以及上极

头和下极头对称性都会对磁铁的分散性大小产生影响.通过加垫硅钢片的方法,可以使 CSRm 磁铁的分散性大小达到储存环工程的要求.为了更进一步提高测量精度,必须加工定位装置对积分长线圈严格定位并把磁铁剩磁的差异叠加到总的磁通量中去.

参考文献 (References)

- 1 XIA J W, ZHAN W L, WEI B W et al. Nucl. Instr. Meas., 2002, **A488**:11
- 2 YUAN P, HE Y, ZHANG B et al. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, **12**(1):321
- 3 HE Y. Magnetic Measurement System for CSR and Its Applications. Lanzhou: Institute of Modern Physics, 2003 (in Chinese)
- 4 XIONG Hui, HE Yuan, YUAN Ping et al. Nuclear Physics Review, 2003, **20**(1):34(in Chinese)
(熊慧,何源,袁平等.原子核物理评论,2003,**20**(1):34)
- 5 HE Yuan, XIONG Hui, LIU Wei-Jun et al. HEP&NP, 2003, **29**(6):532(in Chinese)
(何源,熊慧,刘维军等.高能物理与核物理,2003,**29**(6):532)

Research of Reproducibility of Dipoles for Cooler-Storage-Ring*

SU Ya-Long^{1,2;1)} HE Yuan¹ HAN Shao-Fei¹ YUAN Ping¹ LIU Wei-Jun^{1,2} MA Li-Zhen^{1,2}
ZHANG Si-Ling¹ WANG Wen-Jin¹

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

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

Abstract The measurement method and principle of dipole magnet reproducibility for cooling-storage-ring are introduced. The effects of position and number of steel sheet on the reproducibility of magnet is investigated. The measurements indicate that the reproducibility of CSRm dipoles is less than $\pm 2 \times 10^{-4}$, which can meet the requirements of CSR. In addition, the measurement errors are also analyzed.

Key words dipole, shimming, magnetic measurement, reproducibility, standard deviation

Received 16 August 2004

* Supported by National Scientific Mage-Project: Heavy Ion Researching Facility in Lanzhou-Cooler Storage Ring

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