

CSR 二极磁铁积分磁场测量系统*

熊 慧, 何 源, 袁 平, 韩少斐, 刘维军

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘 要: 介绍了兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)积分磁场测量系统以及积分测量的基本原理和数据处理方法, 对测量结果的分析表明整个系统运行可靠稳定, 可用于 CSR 磁铁的积分测量.

关键词: 积分磁场测量; 磁场分布; 重复性

中图分类号: O441.5 **文献标识码:** A

1 引言

加速器磁铁的品质直接关系到束流的传输效率, 为了保证加速器建成后高效率地投入运行, 必须对磁铁的品质进行全面地测量, 验证磁铁是否达到设计要求, 检验磁铁加工中的缺陷和偏差, 给出同型号磁铁间的分散性, 并且将测量结果用于加速器参数的预置计算和加速器物理的研究^[1]. 所以磁铁的磁场测量是加速器建造中的一个重要环节. 为此, 必须有一套可靠、稳定的磁场测量系统.

2 积分测量原理

在加速器磁场测量中有三种基本的方法: 核磁共振法、霍尔效应法和磁通量法. 积分测量是利用探测线圈上磁通量的改变来测量磁场强度, 是属于第三种, 其基本原理是法拉第电磁感应定理^[2]:

$$\epsilon = -N \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

其中 ϵ 表示感应电动势, N 为线圈的匝数, Φ 是通过线圈横截面的磁通量, t 表示时间. 等式两边同时对时间求积分可以得到:

$$\int \epsilon dt = -N\Delta\Phi, \quad (2)$$

ϵ 对时间的积分可以直接用积分器测量. 我们用两种方法: 改变励磁电流和平移线圈, 使穿过线圈的

磁通量发生改变.

在二极磁铁的积分测量中, 可以认为磁感应强度 B 与线圈的截面始终垂直, 线圈的宽度 W 也处处相等^[1]. 因此, 对于积分长线圈来说, 通过线圈截面的通量为

$$\Phi = \iint B(l) dS = W \int B(l) dl, \quad (3)$$

l 表示线圈的长度, $B(l)$ 表示磁场强度, S 表示线圈的截面. 将(3)式代入(2)式可以得到:

$$\begin{aligned} \int \epsilon dt &= -NW \int [B_2(l) - B_1(l)] dl \\ &= -A \int [B_2(l) - B_1(l)] dl, \end{aligned} \quad (4)$$

其中 $B_2(l)$ 表示线圈平移时终点的磁场值, $B_1(l)$ 表示平移起点的磁场值. $A = NW$ 称为线圈常数.

CSR 二极磁铁积分磁场的均匀度在 10^{-4} 量级, 直接测量积分磁场的绝对值很难将测量精度提高到 10^{-5} 量级. 另外, CSR 磁场测量中用到的积分线圈的弦长大都在 3 m 以上, 在均匀磁场中校准线圈常数 A 是不太现实的. 如果按设计参数计算, 得到的 A 值误差较大, 最终导致绝对测量的误差偏大. 因此 CSR 积分测量系统采用相对测量的方法来提高二极磁铁积分磁场测量的精度.

相对测量是指测量同一块磁铁中不同位置处的

收稿日期: 2002 - 07 - 31; 修改日期: 2002 - 12 - 05

* 基金项目: 兰州重离子加速器冷却储存环(CSR)工程

作者简介: 熊 慧(1978-), 女(汉族), 江西南昌人, 研究生, 从事 CSR 二极磁铁的积分测量研究.

磁场相对值, 即相对偏差量

$$\frac{\int [B(x) - B(0)] dl}{\int B(0) dl}, \quad (5)$$

$B(0)$ 表示轨道中心处的场强值, 通过改变励磁电流得到 $\int B(0) dl$, 通过线圈在磁铁内移动切割磁力线得到 $\int [B(x) - B(0)] dl$.

3 积分测量装置

3.1 积分长线圈的设计和加工

在束流轨道上对磁场的积分或梯度的积分是束流动力学计算的主要依据^[3]. 为此在加速器磁场测量技术中, 通常用与束流轨道形状相同的长线圈测量二极磁铁的积分磁场. 表 1 中给出了线圈的各个参数.

表 1 积分线圈各个参数的指标

参 数	指 标
线圈半径 / mm	2 000
线圈骨架弦长 / mm	3 200
线圈骨架高度 / mm	50
线圈骨架宽度 / mm	60
线圈宽度 / mm	10
绕线深度 / mm	11
线圈中心高度 / mm	32.5
绕线匝数 / 匝	100

在制作线圈骨架时, 选用环氧玻璃纤维板, 因为这种材料具有低吸湿性, 在很宽的温度和湿度范围内有良好的电性能, 但加工的难度大. 加工要求骨架下表面光滑平整, 骨架底面及垫板上下的平面度保证在 0.02—0.03 mm 间. 同时使用直径约为 0.1 mm 的漆包铜线来绕制线圈, 将线圈绕制成单层 100 匝. 绕线时尽量张紧导线, 使之失去弹性形变的能力, 提高线圈常数的稳定性, 最后环氧固化定形.

设计积分线圈时, 选择线圈的长度 L 符合

$$L \geq L_m + 8G,$$

L_m 是磁铁的弧长, G 表示气隙. 这样长线圈覆盖所有场区就可以使轴向的定位不必过分严格, 又有利于测磁准确度的保证. 线圈常数由理论计算给出, 为了保证线圈常数 $A = NW$ 的均匀性, 使线圈宽度 W 的加工精度控制在 ± 0.025 mm 以内.

3.2 测控系统

二极磁铁积分测量采用基于 PC 机的测控系统 (结构框图如图 1 所示). 磁铁电流的升降通过一个 16 位二进制数的 DAC 远程控制, 使用直流电流传感器 (DCCT) 监测电流变化, 并用 1801 数字电压表 (DVM) 准确读取相应电流的电压值. 另一方面, PC 机通过 PCI 总线初始化电机驱动卡 PCL-839 内的各个参数, PCL-839 卡是一种可以实现三轴连动的板卡, 卡上配有 I/O 接口及电机驱动接口, I/O 接口向积分器发送外部触发命令及同步脉冲, 控制积分器等位移记数, 而电机驱动接口用于控制步进电机驱动器控制两台相同型号的步进电机去驱动滚轴丝杠转动, 从而带动固定在测量支架上的线圈在磁铁内平行移动. 一个测量支架上配有磁感应光栅尺测量线圈的位置, 同时将位置量的 BCD 码通过 PCL-731 数字 I/O 卡送回到 PC 机. 另外, 积分器测量线圈截面上磁通的变化量, 再将测量结果通过 RS232 总线输送给 PC 机.

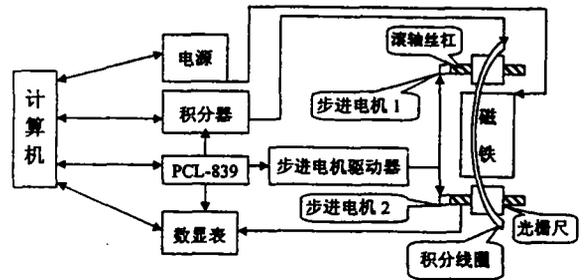


图 1 硬件设备连接图

测量系统中使用的数据采集装置 PDI 5025 型积分器是一种高精度的数字电压积分器, 可输出带符号位的 32 位二进制数, 最小单位是 $10^{-8} \text{ V} \cdot \text{s}$. 其主要功能是对线圈上产生的感应电压进行时间积分得到磁通的变化量, 通过 RS232 总线与计算机通讯, 被广泛应用于磁场的测量和分析. 在测量中, 积分器的增益被设置为 10, VFC 的振荡频率被设置为 500 kHz 时, 此时积分器的最小分辨率可以达到 $4 \times 10^{-6} \text{ V} \cdot \text{s}$.

4 测量及数据处理

4.1 主磁场测量及数据处理

在测量轨道中心处的主磁场值 $\int B(0) dl$ 时, 采用改变励磁电流的方法. 为减小剩磁影响, 在正式

测量前先进行几个大循环, 再将线圈由轨道中心处匀速移出磁场作用域, 积分器等间隔取点记数, 重复移动 10 个来回求平均值, 得到剩磁. 之后控制电流匀速上升到某一待测值, 同时积分器记数. 依次测量下去, 测量的电流值与理论计算值相对应. 当电流上升到磁铁工作的最大电流时, 开始做返回操作, 电流按逆序依次下降, 最终又回到初始态.

在处理数据时, 先对剩磁的测量值做线性扣除, 减去积分器的漂移量, 再求平均值. 而求轨道中心处的主场值时, 由于上升电流所得到的磁通变化量 $\Delta\Phi_{up}(\Delta I)$ 包含了积分器的漂移, 用公式可以表示为 $\Delta\Phi_{up}(\Delta I) = \Delta\Phi_{real}(\Delta I) + \Phi_{漂移}$, 而下降电流得到的磁通变化量为 $\Delta\Phi_{down}(\Delta I) = -\Delta\Phi_{real}(\Delta I) + \Phi_{漂移}$. 将两式相减再除以 2, 就可以扣除积分器的漂移, 得到磁通变化的真实量 $\Delta\Phi_{real}(\Delta I)$, 表示为

$$\Delta\Phi_{real}(\Delta I) = \frac{\Delta\Phi_{up}(\Delta I) - \Delta\Phi_{down}(\Delta I)}{2},$$

再用求和运算, 依次求出不同电流下的主场值:

$$\sum \Delta\Phi_{real}(\Delta I) = [\int B(0)dl]_I.$$

4.2 磁场分布的测量及数据处理

在测量磁场分布时, 使积分器能等时间、等位移间隔的取点记数. 将磁铁的中心轨道定为坐标的原点, 线圈由内向外移动, 一个回程后回到起始点, 此时最后得到的那个积分值即为此次测量中由积分器产生的总漂移量, 在以后的数据处理中可以用线性扣除法依次扣除每个测量数中所包括的漂移量. 同时采取重复测量求平均值的方法, 进一步提高测量精度.

磁场测量中, 由积分器得到的测量结果为: $[\int (B(x) - B(x_{起点}))dl]_I$. 因此为了得到原理分析中的相对测量值 $[\int (B(x) - B(0))dl]_I$, 还要将每个测量值减去中心轨道处的测量值, 计算式为

$$\begin{aligned} & [\int (B(x) - B(x_{起点}))dl]_I - \\ & [\int (B(0) - B(x_{起点}))dl]_I \\ & = [\int (B(x) - B(0))dl]_I, \end{aligned}$$

$B(0)$ 表示轨道中心处的场强值, $B(x)$ 是位置 x 处的场强值.

最后, 将求得相对测量值除以主磁场值就得到相对偏差量, 即 $[\int (B(x) - B(0))dl] / [\int B(0)dl]_I$.

5 测量结果分析

5.1 测量内容

目前, 使用这套系统已经完成了位于 CSR 环注入线上的 MG01D01, MG01D02 及 MG01D03 三块 C 型二极磁铁的测量. 对同一块磁铁采用霍尔片点测法、移动测量法及改变电流的方法进行测量^[4], 以此来验证测量系统的可靠性. 同时还将同一天上、下午的测量结果及不同天的测量结果进行了分析和比较, 以证明测量系统的稳定性, 说明测量数据的准确与可靠.

5.2 测量系统的可靠性

图 2 显示了励磁电流为 200 A 时, 分别用霍尔片点测法、移动线圈切割磁力线的方法以及改变励磁电流的方法得到的 3 组测量值的比较, 其中磁铁中心轨道定为坐标原点: (1) 在做霍尔片点测时, 使用同一个霍尔片在积分轨道上间隔 0.1° 测一个数, 计算等效长度; (2) 在长线圈移动测量中, 移动范围为 $-60\text{ mm} - +60\text{ mm}$, 间隔 5 mm 取一个点;

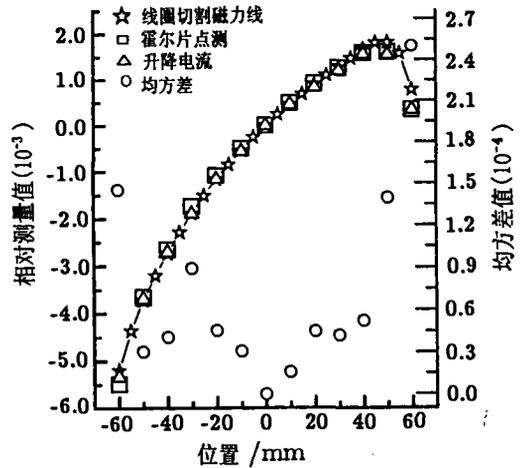


图 2 比较霍尔片测量与积分测量的结果

(3) 改变励磁电流测量时, 将线圈放在与移动测量相对应的各个位置处, 改变电流测量. 由图中的均方差值可以看出在好场区范围内, 3 种测量方法所得到的结果重复性很好, 对应的测量值间的偏差基本上都在万分之一以内, 达到了磁铁测量的精度要求. 说明这套测量系统得到的结果是可信的, 可以

用于二极磁铁的积分测量。

5.3 测量系统的可靠性与稳定性

通过同一天上、下午测量结果比较得到其均方差在十万分之二点二以内,由此可知温度及其它外部环境对测量系统的影响很小。

图 3 显示了从 5 月 9 日到 6 月 3 日测得的 6 组数据的比较情况,其中横、纵坐标的意义与图 2 的相同。由图中的显示可以看出 6 条磁场相对分布的曲线重合得非常好,其均方差值在万分之三以内,而在磁铁的好场区范围 $-50 \text{ mm} \sim +50 \text{ mm}$ 间,其均方差都在万分之一点六以内。

通过对这套积分测量系统的描绘和对测量数据的分析,说明了这套系统是稳定可靠的,可以准确地得到磁场分布情况,它完全可以用于 CSR 二极磁铁的积分测量。

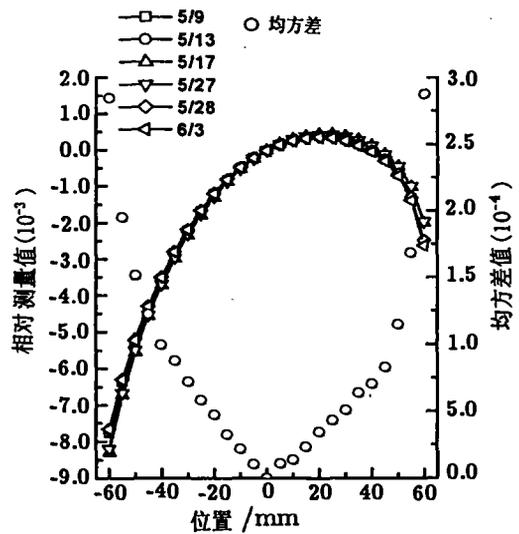


图 3 不同天测量所得的结果(励磁电流 560 A)

参 考 文 献

- [1] 何 源. HIRFL 磁场测量系统的改进和 CSR 磁场测量方案 [D]. 兰州: 中国科学院近代物理研究所, 1999 年.
- [2] Bryant P J. Basic Theory for Magnet Measurement[A]. In: Turner S ed. Magnetic Measurement and Alignment[C]. Geneva; CERN Accelerator School, 1992, 52.
- [3] Wilson E J N. The Motivation for Magnet Measurements [A]. In: Turner S ed. Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets[C]. Geneva; CERN Accelerator School, 1998, 27.
- [4] Wanderer P. Magnet Measurements for Series Production[C]. In: Turner S ed. Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets [C]. Geneva; CERN Accelerator School, 1998, 273.

Integral Magnetic Field Measurement of Dipole Magnets*

XIONG Hui, HE Yuan, YUAN Ping, HAN Shao-fei, LIU Wei-jun

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

The Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: This article presents the basic principle of dipole integral magnetic field measurement. The integral coil which has the same radius with the dipole magnets was used to measure the integral magnetic field of different magnets in Cooler Storage Ring(HIRFL-CSR). The article also generally introduced the software and hardware systems of the automatic measurement device. According to the repetitive experiments, a suit of better measurement got to be summarized. On the other hand, the article recommends the way of the data processing which were decided by the measuring instrument and environment influence. The practical measured results proved the measurement system is reliable and stable.

Key words: integral magnetic field measurement; magnetic field distribution; repeatability

* Foundation item: Heavy Ion Accelerator Cooling Storage Ring of Lanzhou