

# 兰州重离子加速器冷却储存环磁场测量系统

何源, 韩少斐, 马力祯, 袁平, 刘维军, 熊慧, 苏雅龙, 张思玲

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

**摘要:** 文章涉及兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)的磁场测量系统。对霍尔片点测量系统、积分长线圈测量系统和谐波线圈测量系统的构成、控制与获取系统,以及新建成设备和探头的结构特点、参数作了详细描述。本测磁系统的精度和重复性完全满足CSR大型高精度磁铁测量的需要,已经完成了对CSRm注入线所有二极磁铁和四极磁铁的测量,正在进行其它各类磁铁的测量。

**关键词:** 磁场测量; 霍尔片; 积分长线圈; 谐波线圈; 重复性

**中图分类号:** TL503.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6931(2005)03-0257-06

## Magnetic Measurement System for Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou

HE Yuan, HAN Shao-fei, MA Li-zhen, YUAN Ping, LIU Wei-jun,  
XIONG Hui, SU Ya-long, ZHANG Si-ling

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

**Abstract:** Magnetic measurement system is an indispensable part of National Scientific Major-project Cooling Storage Ring of Heavy Ion Research Facility in Lanzhou(HIRFL-CSR). Three measurement systems, Hall probe mapping, integral coils and harmonic coils system were developed. The structure and parameters of main devices were described in details in the paper. And the manufacturing technics and the checking results were also involved. By means of a long time repeat testing, it is proved that the repeatability and stability of the systems match the requirements of CSR. The systems are applying in CSR project now.

**Key words:** magnetic measurement; Hall probe; integral coil; harmonic coil; repeatability

兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)系统是兰州重离子加速器研究装置(HIRFL)的后续工程,是一个多用途的实验装

置,系统布局参见文献[1]。HIRFL-CSR由两个储存环——主环(CSRm)、实验环(CSR<sub>e</sub>)和两条传输线——CSRm注入线以及连接两个环

收稿日期:2003-10-10;修回日期:2004-03-24

基金项目:国家重大科学工程——兰州重离子加速器冷却储存环(HIRFL-CSR)资助项目

作者简介:何源(1973—),男,甘肃敦煌人,高级工程师,博士,加速器磁铁设计与测量专业

的谱仪线(RIBLL2)构成,原有的两台回旋加速器 SFC( $k=69$ )和 SSC( $k=450$ )将作为 CSR 的注入器。CSR 主要磁铁的磁场参数要求详情参见文献[2]。所有磁铁均具有大规模、高精度的特点,它要求有高精度的磁场测量系统对各种参数进行准确测量,对均匀度、分散性和谐波量测量的重复性要求至少好于待测值的 1/3。相应的磁场测量系统<sup>[3]</sup>由 3 部分组成:霍尔片点测量系统、积分长线圈测量系统和谐波线圈测量系统,以针对不同的测量工作。

### 1 霍尔片点测量系统

霍尔片点测量系统主要测量 CSR 各类磁铁的二维磁场品质、等效长度和杂散场,也可用来测量、分析三维磁场的性质。图 1 是霍尔片点测量系统的测量与控制结构框图。测量所用霍尔探头为 AREPOC 公司生产的 HHP-NP 型,霍尔系数的温度漂移小于  $1 \times 10^{-4}$ 。测量前用核磁共振高斯计(NMR)在均匀二极磁场

中标定探头的霍尔系数和温度系数。六维点测量支架驱动装有霍尔探头的碳纤维测量臂在磁铁的待测区域内移动,电机驱动控制卡上的计数器实时记录来自光栅尺的位置信号,当探头到达预置的取样位置时,通过数字 I/O 触发程控开关,先后测量霍尔电压和霍尔片温度。整个测量过程在行进运动中完成,以减小探头震颤造成的误差。

专为 CSR 磁铁测量设计制造的六维点测量支架有 3 个平动自由度和 3 个转动自由度,具有大行程、高精度的特点,是目前同类设备中最大的。测磁支架的 3 个转动自由度使得测量臂可绕  $x、y、z$  3 个轴旋转。绕  $x$  轴 360 度旋转,改变霍尔探头的朝向,测量不同的磁场分量;绕  $y$  轴,用定位销定位,精确旋转 90°,调整测量臂从平行于  $z$  向转到平行于  $x$  向;绕  $z$  轴  $\pm 5^\circ$  小范围调整,用以补偿测磁臂挠度引起的误差。表 1 列出六维点测量支架的各项参数指标。3 个平动自由度均达到了很高的运动和定位精度。

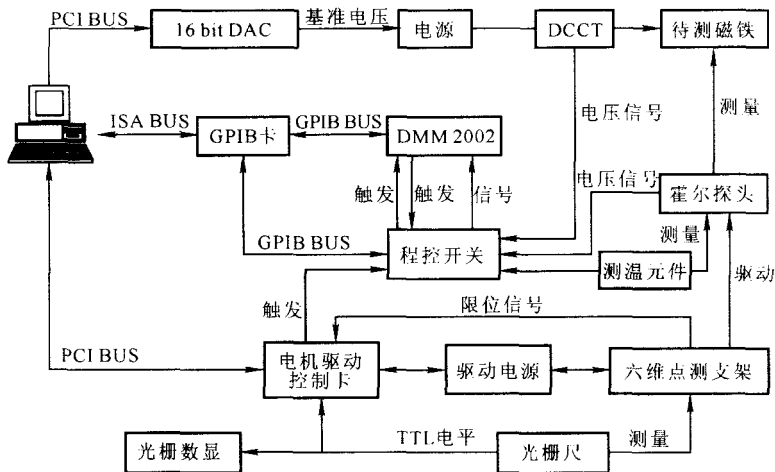


图 1 霍尔片点测量系统  
Fig. 1 Hall probe mapping system

表 1 CSR 六维点测量支架参数

Table 1 Parameters of 6D mapping machine for CSR

方向	行程/mm	定位精度/mm	运动直线度/mm	/°	三轴垂直度/mrad
$x$	1 000	0.005	$\pm 0.02$	$\pm 5^\circ$	0.02 ( $xy$ )
$y$	500	0.005	$\pm 0.02$	$90^\circ$	0.05 ( $yz$ )
$z$	3 000	0.01	$\pm 0.04$	$360^\circ$	0.05 ( $zx$ )

## 2 积分长线圈测量系统

积分长线圈系统<sup>[4]</sup>主要用来测量 CSR 各类磁铁三维磁场的品质,如积分传递函数、积分磁场横向分布、积分高阶误差谐波量等。同时也测量磁铁的涡流效应、同类磁铁分散和磁铁的动态特性。图 2 是积分长线圈测量系统的测量与控制结构框图。

积分长线圈测量系统的探头是与束流轨道形状相同的长线圈,用来测量磁场沿束流轨道的积分值。弯曲二极磁铁的测量线圈为圆弧形,由半径与磁铁半径相同的两个移心圆弧构成,测量线圈中的磁通量。四极磁铁的测量线圈为矩形,由一对有固定间距的相同线圈串联反接而成,测量两线圈中的磁通量差。积分测

磁支架带动探测线圈在磁铁的中平面上横向移动,测量二极磁铁中积分磁场或四极磁铁中积分磁场梯度沿横向位置的变化量。电机驱动控制卡通过光栅尺检测的位置,在预置位置触发精密数字积分器(PDI 5025)记录线圈中通量的变化量。当固定线圈位置在束流中心轨道时,改变励磁电流可以得到磁铁中心轨道在不同电流时的磁通量。综合两种测量,可以求出磁铁的横向相对积分分布和积分传递函数。表 2 列出了 CSRm 二极磁铁和四极磁铁探测线圈的参数。线圈骨架材料为 G11,绕线材料为多股扁平电缆<sup>[5]</sup>。线圈 DR7600 是目前国内最大的弯线圈,采用分段加工后拼接的技术,减小了线圈形变。

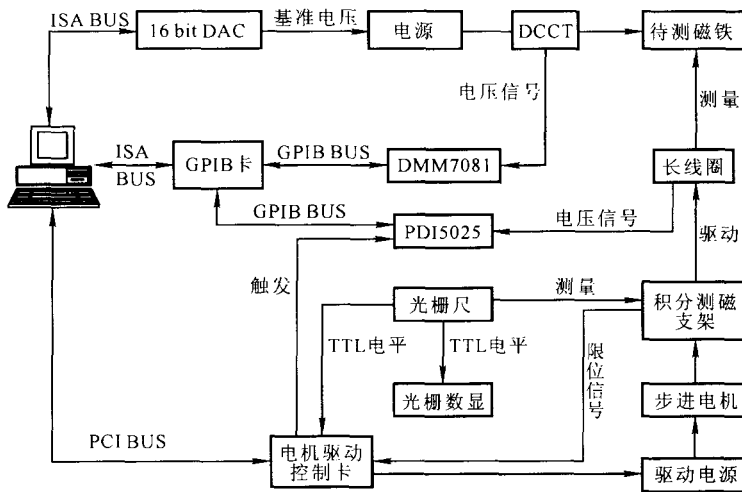


图 2 积分长线圈测量系统

Fig. 2 Integral long coil measurement system

表 2 CSRm 磁铁测磁长线圈参数

Table 2 Parameters of integral long coils for CSRm magnets

线圈名称	待测磁铁类型	待测磁铁位置	半径/mm	有效(弦)长度/mm	线圈高度/mm	线圈宽度/mm	线圈间距/mm	线圈匝数
DR7600	二极磁铁	CSRm	7 600	3 600	1.4	6(0.02)	—	400
DR2000	二极磁铁	CSRm 注入线	2 000	3 100	10	10(0.02)	—	80
QA170	四极磁铁	CSRm	—	1 400	1.4	5(0.02)	10(0.02)	400

注:括号中的数值为实际加工误差

由于 CSR 磁铁的等效长度和形状的变化很大,所以,积分测磁支架分为两个独立的部分分别位于磁铁的两边,可根据待测磁铁的类型

和大小相应放置。积分长线圈的两端分别由 4 个压轮固定在支撑平台的表面,压轮的位置可根据不同积分线圈的外形进行调整。其中一边

支架的支撑平台在线圈弦长方向有一定的自由滑动余量,可消除由于两个支架导轨不平行造成的两个固定点之间的距离改变,防止对测量线圈造成损害。表3列出了积分测磁支架的行程参数以及两边支架A、B两个导轨的运动和定位误差。

表3 CSR积分测磁支架参数  
Table 3 Parameters of benches for integral measurement

支架	行程/mm	定位精度/mm	直线度/mm
1A	500	0.005	-0.02~0
1B	500	0.005	0~+0.01
2A	500	0.005	-0.015~+0.020
2B	500	0.005	-0.015~+0.010

### 3 谐波线圈测量系统

谐波线圈测量系统主要用来测量CSR多极磁铁三维磁场的各阶误差谐波分量大小的分布情况(即多极磁铁的品质),也可测量多极磁铁的分散和等效长度等。该系统可根据误差谐波的大小分析多极磁铁加工的质量问题,并给

出磁铁的磁中心轴线相对于线圈转轴的位置,提供多极磁铁的准直依据。CSR的谐波测量系统有很高的重复精度,可用来测量比较同类磁铁之间的分散。图3是谐波测量系统的测量控制结构框图。

CSR谐波线圈为径向线圈,采用双线圈反抵结构,用来提高测量精度。线圈由两组共面、同轴、半径和匝数不同的线圈串联反接而成<sup>[6]</sup>。对于四极磁铁线圈,双线圈对1、2阶磁场谐波分量的灵敏度为零;对于六极磁铁,双线圈对2、3阶磁场谐波分量的灵敏度为零。步进电机驱动线圈转动,角度编码器在等间隔的角度位置触发精密数字积分器记录数值。步进电机和编码器分别位于谐波线圈转轴的两端,以保证角度测量的准确性。步进电机和线圈转轴用波纹管联轴器连接,以减少轴线不重合和电机振动造成的测量误差。表4列出了CSRm各谐波线圈的参数。QHA100是第1台实验器,加工误差较大。不论从孔径还是长度上,QHA170和SHA190都是目前国内最大的谐波线圈。为保证线圈的加工精度,采用了防变形孔、加强筋和固定基准面的加工工艺。

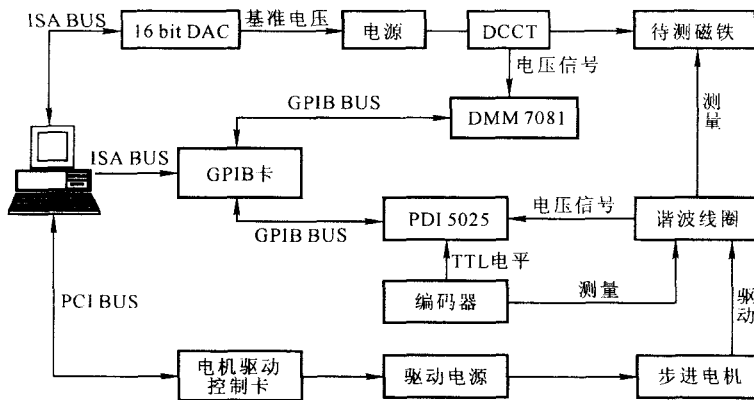


图3 谐波线圈测量系统  
Fig. 3 Harmonic coil measurement system

表4 CSRm谐波线圈参数

Table 4 Parameters of harmonic coils for CSR magnets

谐波线圈	磁铁	位置	半径				匝数 $N_i$	匝数 $N_e$	有效长度 $L/mm$
			$R_{e1}/mm$	$R_{e2}/mm$	$R_{i1}/mm$	$R_{i2}/mm$			
QHA170	四极磁铁	CSRm	-43(0.02)	67(0.02)	-10(0.02)	34(0.02)	400	160	1400
QHA100	四极磁铁	CSRm 注入线	-24(0.03)	40(0.20)	-8(0.12)	24(0.11)	400	200	1000
QHA080	四极磁铁	CSRm 注入线	-16(0.002)	32(0.01)	-4(0.02)	20(0.02)	400	200	700
SHA190	六极磁铁	CSRm	-49.09	80.77	-38.01	51.76	400	120	1100

注:括号中的数值为实际加工误差;角标“e”表示外线圈,“i”表示内线圈

### 4 CSR测磁系统重复性

CSR 磁场测量系统建成初期,测试、分析了积分系统和谐波系统的测量重复性,以确定系统是否满足 CSR 磁铁测量的要求。

图 4 为 CSR<sub>m</sub> 注入线 C 型二极磁铁<sup>[7]</sup>的积分测量结果。磁铁半径 2 m,测量线圈为 DR2000。图中纵坐标是不同横向位置处积分磁场相对于束流中心轨道处的差别 ( $\Delta BL/B_0L$ ),横坐标  $x$  是磁铁的横向位置,束流中心轨道的位置为零。图 4a 为 60° 偏转磁铁的积分磁场的横向相对分布在两个电流状态下霍尔片点测与长线圈测量结果比较<sup>[18]</sup>。可以看到,两种测量方法得到的测量值非常接近,有着基本相同的分布趋势。两种测量结果的均方根误差在低场时为  $1.0 \times 10^{-4}$ ,高场时为  $1.4 \times 10^{-4}$ 。图 4b 为 21.6° 偏转磁铁积分磁场的横向相对分布。图中实线是 1 个月内 10 次测量结果的平均值,每个点上的短线是该点 10 次测量的均方根误差。为了尽可能地包含各种可能因素对测磁系统稳定的影响,在 1 个月时间内随机挑选了一些时间,使测量时有着不同的环境温度 and 外部环境条件。每个测量点的均方根误差约相当于该点测量值平均值的 9%。虚线是

约 30 min 内连续重复 10 次测量的结果,每个点上的短线表示的也是均方根误差,其中的最大值为  $3.0 \times 10^{-5}$ 。因此,长期测量时,较大的重复性误差主要是由于温度等外部环境变化引起的,温度变化会改变磁铁的气隙,从而导致磁场的绝对值和横向分布发生变化。所以,长期的重复性误差中包含着磁铁场形本身发生的改变。另外,还可看到,图 4 中的均方根误差随着测量值的减小而减小,这个测量精度已能满足 CSR 对积分磁场横向分布的测量精度要求 ( $5.0 \times 10^{-5}$ )。

图 5 是 CSR<sub>m</sub> 注入线四分片四极磁铁的谐波测量结果。磁铁孔径 100 mm,所用线圈为 QHA100。图 5a 显示高阶误差谐波的重复性,纵坐标是高阶误差分量的模  $C_n$  与四极量  $C_2$  的比值,1 单位表示  $1 \times 10^{-4}$ ;横坐标是误差谐波(多极量)的阶数。图 5a 中柱形是 1 周之内的不同时间重复测量 10 次的平均值,柱上端的小短线代表的是该阶分量 10 次测量的均方根误差,其中的最大误差为  $0.1 \times 10^{-4}$ ,比待测谐波量的大小低 1 个量级,满足 CSR 对多极磁铁误差谐波测量的要求 ( $0.5 \times 10^{-4}$ )。图 5b 是主磁场分量(四极量)的重复性,纵坐标是每

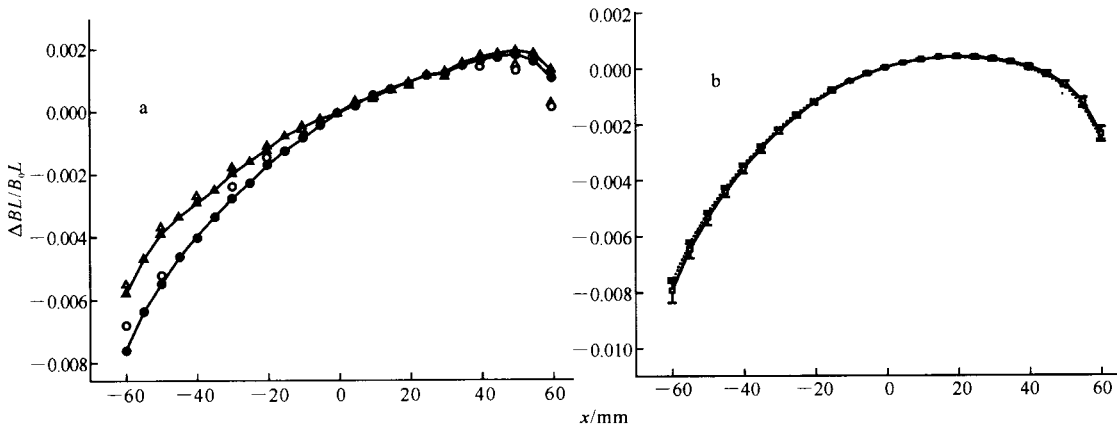


图 4 积分测量结果

Fig. 4 Results of integral measurements

a: 60° 偏转磁铁;  
 ——霍尔片、100 A, ——霍尔片、1 050 A, ▼——长线圈、100 A, ——长线圈、1 050 A  
 b: 21.6° 偏转磁铁;  
 实线 ——1 个月内 10 次测量结果的平均值,虚线 ——30 min 内 10 次测量结果的平均值

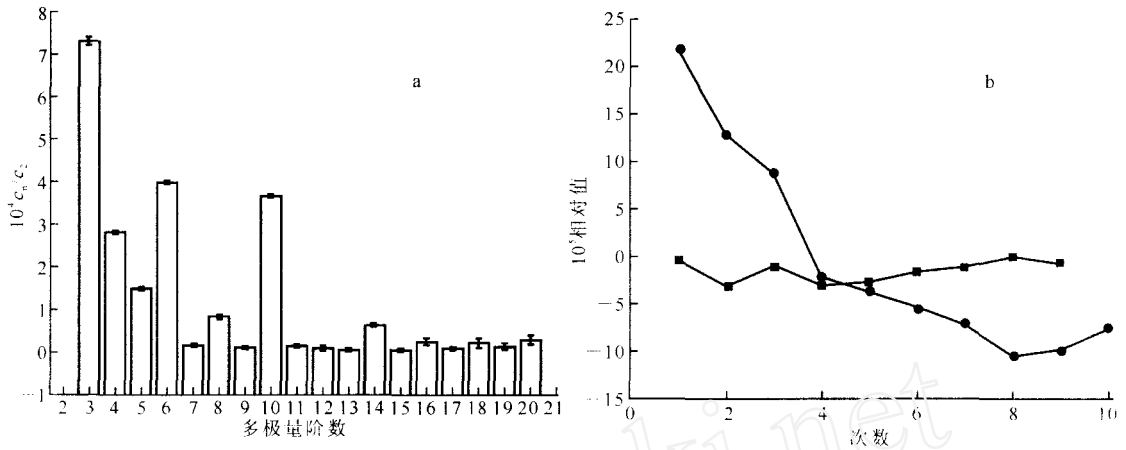


图5 谐波测量结果

Fig. 5 Results of harmonic measurements

a——高阶误差谐波

b——主磁场分量; ————保持电流不变, ————重复加电流

次测量值偏离平均值的比例,横坐标是测量次数。图中方点为保持电流不变的重复测量结果,均方根误差为  $1.16 \times 10^{-5}$ ;圆点为重复加电流到固定电流值后测量的结果,均方根误差为  $1.09 \times 10^{-4}$ ,这一测量误差中包含了电源重复性误差和磁滞效应的影响。主磁场的测量精度也满足 CSR 对多极磁铁分散性测量的精度要求 ( $1.5 \times 10^{-4}$ )。

## 5 结论

这套专门设计用来测量 CSR 大规模磁铁的高精度、自动化磁场测量系统已正式投入运行,多项参数指标均达到了国内领先水平。对系统重复性的实际测试结果表明,该系统完全能够满足 CSR 大型高精度磁铁测量需要。目前,使用这套系统已完成了 CSRm 注入线所有二极磁铁和四极磁铁的测量,正在进行 CSRm 各类磁铁的测量工作。

## 参考文献:

[1] Xia JW, Zhan WL, Wei BW, et al. The Heavy Ion Cooler storage ring Project (HIRFL-CSR) at Lanzhou[J]. Nucl Instrum Meas A, 2002, 488:

11~25.

[2] Yuan P, He Y, Zhang B, et al. Magnet System for HIRFL-CSR Project[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 321~324.

[3] 何源. CSR 磁场测量系统的建立及应用[D]. 兰州:中国科学院近代物理研究所, 2003.

[4] 熊慧,何源,袁平,等. CSR 积分磁场测量系统[J]. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 34~37.

[5] Green MI. Fabrication and Calibration of Search Coils[A]. Turner S. CAS: Magnetic Measurement and Alignment[C]. Geneva: CERN, 1992. 103~121.

[6] Jain A. Harmonic Coils[A]. Turner S. CAS: Measurement and Alignment of Accelerator and Detector Magnets[C]. Geneva: CERN, 1998. 175~218.

[7] Yuan P, Liu WJ, Xiong H, et al. Magnet Prototypes for CSRm Injection Beam Line[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 325~328.

[8] 何源,熊慧,刘维军,等. CSR 60°二极 C 型磁铁磁场特性的研究[J]. 高能物理与核物理, 2003, 29(6): 532~536.