



HIAF-BRing快脉冲二极磁铁磁场测量系统

张翔 金利安 杨静 张京京 韩晓科 冯文天 赵丽霞 吕明邦 梅恩铭 杨文杰 姚庆高 马力祯

Magnetic Field Measurement System of the BRing Fast Ramping Dipole Magnet in HIAF

ZHANG Xiang, JIN Li' an, YANG Jing, ZHANG Jingjing, HAN Xiaoke, FENG Wentian, ZHAO Lixia, L Mingbang, MEI Enming, YANG Wenjie, YAO Qinggao, MA Lizhen

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.39.2022027>

引用格式:

张翔, 金利安, 杨静, 张京京, 韩晓科, 冯文天, 赵丽霞, 吕明邦, 梅恩铭, 杨文杰, 姚庆高, 马力祯. HIAF-BRing快脉冲二极磁铁磁场测量系统[J]. 原子核物理评论, 2022, 39(4):470-475. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2022027

ZHANG Xiang, JIN Li' an, YANG Jing, ZHANG Jingjing, HAN Xiaoke, FENG Wentian, ZHAO Lixia, L Mingbang, MEI Enming, YANG Wenjie, YAO Qinggao, MA Lizhen. Magnetic Field Measurement System of the BRing Fast Ramping Dipole Magnet in HIAF[J]. Nuclear Physics Review, 2022, 39(4):470-475. doi: 10.11804/NuclPhysRev.39.2022027

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

医用加速器二极磁铁的非单一工作模式电源控制器设计

Design of Non-single Operation Mode Dipole Magnet Power Supply Controller for Medical Accelerator

原子核物理评论. 2021, 38(2): 159-165 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2020074>

基于PID算法的磁场闭环控制技术研究

Research on Closed Loop Control Technology of Magnetic Field Based on PID Algorithm

原子核物理评论. 2021, 38(3): 265-269 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021002>

超导离子源铌三锡六极线圈镜像磁场约束结构的优化设计

Optimum Design of the Magnetic Mirror Structure for Testing Nb₃Sn Sextupole Coil

原子核物理评论. 2020, 37(4): 854-858 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.37.2020034>

斯格明子在均匀磁场中的性质 (英文)

Skyrmion Properties in an Uniform Magnetic Field

原子核物理评论. 2017, 34(1): 8-12 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.34.01.008>

激光等离子体在螺线管发散磁场中的特性研究

Characteristics of Laser Ablation Plasma in the Diverging Magnetic Field of a Solenoid

原子核物理评论. 2021, 38(3): 270-276 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.38.2021017>

储存环HIAF-SRing等时性模式的非线性磁场影响研究

Effects of Field Imperfections in the Isochronous Mode of the HIAF-Sring

原子核物理评论. 2018, 35(2): 147-153 <https://doi.org/10.11804/NuclPhysRev.35.02.147>

文章编号: 1007-4627(2022)04-0470-06

HIAF-BRing快脉冲二极磁铁磁场测量系统

张翔^{1,2}, 金利安¹, 杨静¹, 张京京¹, 韩晓科¹, 冯文天¹, 赵丽霞¹, 吕明邦^{1,2},
梅恩铭^{1,2}, 杨文杰¹, 姚庆高^{1,2,†}, 马力祯^{1,2}

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 介绍了强流重离子加速器装置 HIAF(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility) 项目增强器 BRing (Booster Ring) 快脉冲二极磁铁的性能指标、测量要求和测量方法, 描述了快脉冲二极磁铁稳态磁场测量系统及动态磁场测量系统的构成。在稳态磁场测量中, 为提高积分磁场测量精度和测量效率, 长线圈测量系统采用了 on fly 技术; 在动态磁场测量中, 研制了用于磁场延迟及磁场畸变测量的矩阵线圈。通过样机磁铁的测量, 完成了测量系统的性能指标验证和磁铁的稳态磁场测量。实测结果表明, 样机磁铁的设计和制造均达到了预期指标, 并依据测量数据完成了磁铁的二次削斜。

关键词: 快脉冲二极磁铁; 磁场测量系统; 动态磁场测量; 矩阵线圈

中图分类号: TL503 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.39.2022027

1 引言

强流重离子加速器装置 HIAF(High Intensity heavy-ion Accelerator Facility) 项目是中国科学院近代物理研究所承担的“十二五”国家重大科技基础设施项目。HIAF 项目布局如图 1 所示: 包括超导离子源(SECRI)、超导直线(iLinac)、增强器(BRing)、放射性束流线(HFRS)、高精度谱仪环(SRing)以及传输线、终端等。其中 BRing 为 HIAF 项目的主体之一, 它将 iLinac 加速后的重离子束进行再加速并传输到 HFRS 及高能试验终端进行相关科学试验。BRing 磁铁包括 48 台二极磁铁、78 台四极磁铁、30 台六极磁铁及 80 台校正磁铁。BRing 二极磁铁特点是: 磁场变化范围大(0.047~1.580 T); 磁场质量要求高, 高、中、低场下积分场均匀度及谐波量均要求好于 3×10^{-4} ; 磁场上升速率快, 最大磁场上升速率达到 12 T/s; 四台串联供电, 不同磁铁之间的磁场离散性要求好于 $\pm 3 \times 10^{-4}$ 。针对上述物理要求, BRing 快脉冲二极磁铁的磁场测量内容包含积分场励磁曲线、均匀度和离散性测量, 动态磁场延迟测量及磁场畸变测量。

2 HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁

HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁具有偏转半径大、偏

转角度小、好场区范围宽、磁场范围广、快脉冲运行等特点, 磁铁参数如表 1 所列。由于 BRing 二极磁铁的弦弧高较小, 设计上采用 H 型直铁结构以降低磁铁加工难度, 同时获得高的磁场对称性。束流加速过程中束流发射度随束流能量提高逐渐减小, 因此, 随着磁场增加, 磁场好场区范围相应缩小, 为同时实现高、中、低场下积分场均匀度提供了可能, 有利于磁铁磁场和尺寸优化。快脉冲运行模式下, 为降低磁铁电感和感应电压, 磁铁线圈匝数少、励磁电流大, 测量过程专门定制了 4 000 A 电源进行稳态磁场测量。设计完成后通过开展样机研制和测量进行磁铁性能验证。稳态磁场测量完成后通过极头端部削斜的方式进行积分场质量调节和二次测量。

3 磁场测量系统及测量方法

针对磁铁磁场特性及设计参数, 在磁场测量上不仅要求进行高精度、高效率的稳态磁场测量, 同时要求进行动态磁场测量。为了测量磁铁在高、中、低场下的积分磁场均匀度、谐波量及离散性, 设计了测量效率和测量精度更高的长线圈稳态磁场测量系统^[1]。同时设计了矩阵线圈动态磁场测量系统^[2-3], 用于测量磁铁在快脉冲模式下涡流效应造成的磁场延迟及磁场畸变。

收稿日期: 2022-03-07; 修改日期: 2022-04-12

基金项目: 兰州市科技计划项目(E139973SQ0)

作者简介: 张翔(1988-), 男, 甘肃靖远人, 高级工程师, 博士, 从事应用物理研究; E-mail: zhangxiang@impcas.ac.cn

† 通信作者: 姚庆高, E-mail: yaoqinggao@impcas.ac.cn

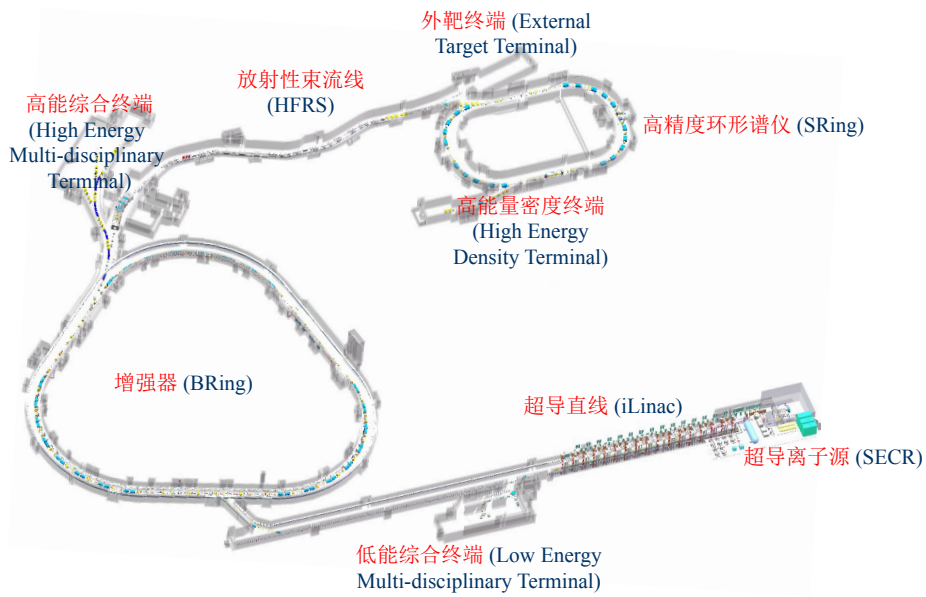


图 1 HIAF 项目布局图(在线彩图)

表 1 BRing 快脉冲二极磁铁参数

数量/台	偏转半径/m	偏转角度/(°)	边缘角/(°)	气隙/mm	磁场范围/T	最大磁场上升速率/(T·s ⁻¹)	最大电流/A	积分场均匀度	好场区范围/mm	离散性
48	21.5	7.5	3.75	104	0.047~1.580	12	3 700	±3×10 ⁻⁴	170 (0.047 T), 140 (0.800 T), 140 (1.580 T)	±3×10 ⁻⁴

3.1 积分长线圈稳态磁场测量系统

积分长线圈稳态磁场测量系统主要用来测量 HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁积分磁场品质, 包括积分磁场均匀度、高阶量、传递函数及磁铁离散性等。图 2 所示为 HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁积分长线圈测量系统结构图。积分长线圈用来测量磁场沿束流轨道的积分值, 积分长线圈为圆弧形线圈, 线圈半径与束流偏转半径一致, 线圈由利兹线(Litz)绕制而成, 为提高加工精度和长期测量线圈结构稳定性, 线圈骨架采用定制的 G10 整板加

工而成。线圈参数如表 2 所列。

根据不同的测量内容要求, HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁积分长线圈稳态磁场测量系统拥有以下 4 种测量模式:

模式 1: 积分磁场均匀度测量。电机控制器同时驱动线圈两端电机, 带动线圈在待测磁铁气隙中平面做横向往返平移运动。通过光栅尺监测和获取线圈横向位置信息, 线圈移动到预定位置时触发高精度高速数字积分器 FID2056 开始采集磁场通量变化。结合光栅尺位置回

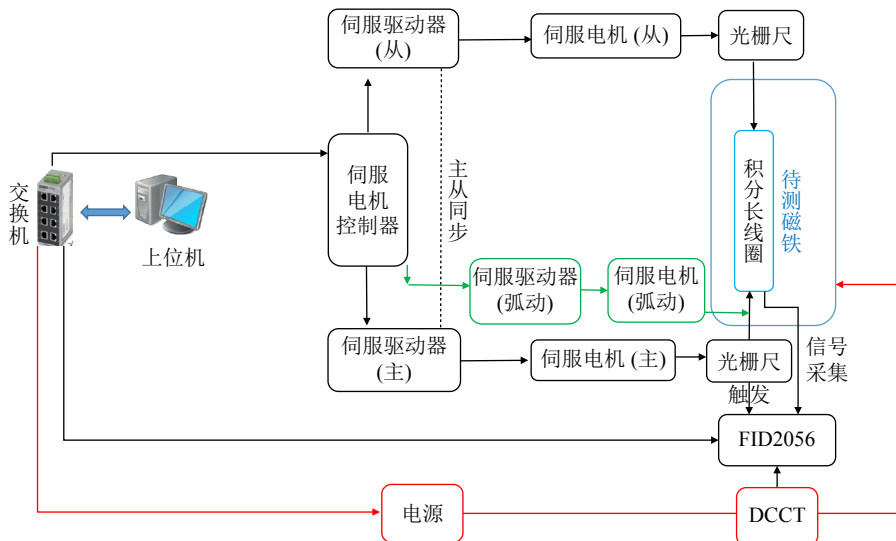


图 2 积分长线圈稳态磁场测量系统结构图(在线彩图)

表 2 BRing 快脉冲二极磁铁长线圈参数

线圈数量 /台	偏转半径 /m	线圈角度 /(°)	线圈弧长 /mm	线圈槽宽度 /mm	Litz线 规	线圈骨架宽度 /mm	线圈骨架厚度 /mm	线圈底板宽度 /mm	线圈底板厚度 /mm	线圈匝数 /匝
2	21.5	10.14	3 805	6	AWG32	60	30	400	22	4×20

读信息, 获得不同位置处的积分磁场磁通变换 $\Delta\phi$, 得到积分磁场均匀度计算如式(1): 得到积分磁场均匀度计算如式(1):

$$\frac{\Delta BL}{B_0 L} = \frac{\Delta\phi}{\phi_0}, \quad (1)$$

式中: ϕ_0 为待测磁场 B_0 下的线圈磁通量, 通过磁铁梯形波加电励磁获得积分线圈相对剩磁磁通的磁通量, 增加剩磁磁通修正量后得到对应磁场下线圈实际磁通量。高阶磁场分量通过泰勒级数展开获得。

模式 2: 积分磁场传递函数霍尔测量。测量前将霍尔传感器安装于积分线圈骨架端部, 测量前采用高精度核磁共振仪对霍尔传感器进行标定和系数修正。测量时通过端部电机控制器驱动端部电机带动线圈骨架沿轨道做弧线运动, 通过位置回读及霍尔传感器磁场回读值计算得到对应电流下的磁场传递函数 $I-BL$ 。测量过程中采用 on fly 模式提高测量效率, 即线圈骨架带动霍尔传感器连续运动, 同步采集霍尔传感器位置信息和磁场信号^[4]。正式测量前, 做 3 次标准化循环, 以消除磁滞影响。

模式 3: 积分磁场传递函数线圈测量。测量前做 3 次标准化循环, 以消除磁滞差异影响。积分长线圈测量前需标定线圈系数 (NW), 线圈固定在磁铁中心弧线上, 磁铁梯形波加电励磁过程用高精度高速数字积分器 FDI 2056 同步采集长线圈上的磁通信号, 结合霍尔传感器测量 $I-BL$ 曲线, 通过式(2)计算得到线圈系数

$$NW = \frac{\phi}{BL - BL_{Rem}}, \quad (2)$$

式中: ϕ 为线圈测量磁通值; BL 为对应霍尔测量积分磁场; BL_{Rem} 为霍尔测量剩磁积分磁场。由于线圈加电励磁过程中无法采集剩磁, 因此线圈系数标定数据处理时, 需消除剩磁影响。

线圈系数标定完成后, 采用阶梯加电方式测量不同电流平台下的磁通值, 从而快速获得不同电流平台下的励磁曲线 $I-BL$, 以此提高积分场励磁曲线测量效率。同

样地, 采用长线圈测量积分磁场励磁曲线进行数据处理时, 需进行剩磁修正。

模式 4: 积分磁场离散性测量。采用两个参数相同的积分长线圈, 线圈串联反接后置于两台磁铁中心弧线上, 对磁铁加梯形波测量, 获取不同电流下积分场差值。并通过在两台磁铁中互换线圈的方式来消除系统误差。

线圈串联反接磁场信号表示如式(3):

$$NW_1(BL)_1 - NW_2(BL)_2; \quad (3)$$

互换线圈后, 串联反接磁场信号表示如式(4):

$$NW_1(BL)_2 - NW_2(BL)_1. \quad (4)$$

式(4)与(3)式相减, 约化处理后得到两台待测磁铁的积分场离散性, 如式(5):

$$\frac{[(BL)_2 - (BL)_1]}{(BL)_1} = \frac{[NW_1 + NW_2] \times [(BL)_2 - (BL)_1]}{[NW_1 + NW_2] \times (BL)_1} \approx \frac{[NW_1 + NW_2] \times [(BL)_2 - (BL)_1]}{2(NW_1) \times (BL)_1}. \quad (5)$$

3.2 矩阵线圈测量系统

快脉冲运行模式下, 磁铁铁芯、真空管道等部件的涡流效应会造成磁铁气隙内的磁场延迟及磁场畸变。结合磁场上升速率, 设计了矩阵线圈进行磁场延迟及磁场畸变测量, 矩阵线圈早在欧洲核子研究组织 CERN (European Organization for Nuclear Research) 的加速器磁铁测量中被使用^[2]。

矩阵线圈构成: 矩阵线圈长度主要取决于磁铁有效长度, 为保证长期测量结构可靠性, 线圈骨架采用 G10 整板定制。矩阵线圈横向排布范围取决于磁铁好场区范围及真空管道尺寸, HIAF-BRing 二极磁铁首个矩阵线圈采用 11 个线圈等间距阵列排布, 线圈骨架机械宽度 135 mm, 测量范围 ± 61 mm。由于动态测量中更快的磁场上升速率, 设计中减少了线圈匝数以降低线圈感应电压, 矩阵线圈参数如表 3 所列。

矩阵线圈的标定: 单个线圈系数的标定方式与稳态磁场测量中的长线圈系数标定方法一致。为提高磁场畸

表 3 BRing 快脉冲二极磁铁矩阵线圈参数

线圈数量 /台	偏转半径 /m	线圈角度 /(°)	线圈弧长 /mm	线圈槽宽度 /mm	Litz线规	线圈骨架宽度 /mm	线圈阵列数 /个	阵列中心距 /mm	线圈匝数 /匝
矩阵线圈	21.5	10.14	3805	5.5	AWG32	135	11	12	1×20
参考线圈	21.5	10.14	3805	5.5	AWG32	135	1	12	1×20

变测量精度, 通过相对标定的方式提高矩阵线圈之间的系数标定精度^[3]。为此我们增加了参考线圈用于矩阵线圈标定, HIAF-BRing 二极磁铁矩阵线圈标定如图 3 所示。将参考线圈分别与每个矩阵线圈进行串联反接, 对称放置于磁铁中平面, 通过励磁, 从线圈的磁通偏差中获得线圈阵列的系数偏差, 从而保证测量精度。矩阵线圈相对参考线圈离散性计算如式 (6) 所示:

$$\frac{[(NW)_{\#} - (NW)_0]}{(NW)_0} = \frac{[(\phi)_{\#} - (\phi)_0]}{(\phi)_0} \quad (6)$$

磁场延迟测量: 将矩阵线圈单独放置在磁铁中心弧线上, 改变励磁速率, 采用积分器 FDI 同步采集不同速率下的线圈磁通与磁铁加电电流, 从而得到不同上升速率下的 I-BL 曲线, 对比计算不同速率下涡流效应造成的磁场延迟。



图 3 HIAF-BRing 二极磁铁矩阵线圈标定 (在线彩图)

磁场畸变测量: 将矩阵线圈放置在磁铁好场区范围内或者放置于真空管道内, 将不同位置线圈与矩阵线圈中心线圈进行串联反接, 改变励磁速率进行励磁测量, 从而获得不同上升速率下涡流效应造成的磁场畸变。

4 测量与分析

4.1 积分场均匀度及高阶量测量

在 HIAF-BRing 二极磁铁样机积分场均匀度的首次测量中, 采用了霍尔测量和积分长线圈测量进行对比验证, 两种测量方式的测量结果偏差很小。根据二极磁铁首次测量结果进行二次削斜和磁场复测, 磁场均匀度及高阶量均达到设计要求。图 4 所示为首次削斜后的积分场均匀度霍尔测量和长线圈测量对比结果。图 5 所示为二次削斜后的积分场均匀度测量结果, 高、中、低场下积分场均匀度均好于 $\pm 3 \times 10^{-4}$ 。表 4 所列为样机高、中、低场下高阶量测量结果, 各高阶量均好于 $\pm 3 \times 10^{-4}$ 。均匀度及高阶量二次削斜后测量结果满足物理要求。

4.2 磁铁离散性测量

HIAF-BRing 二极磁铁开展磁铁批量加工后, 我们

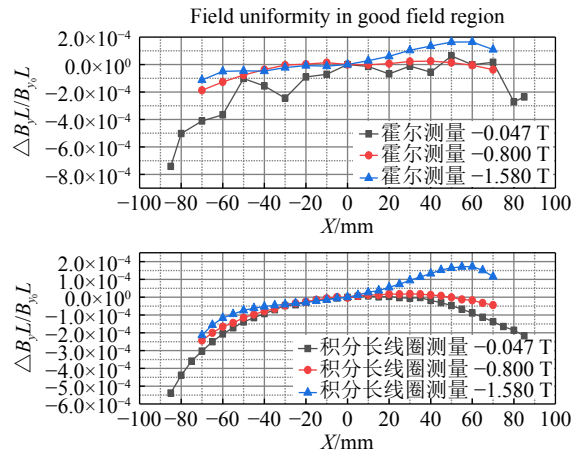


图 4 霍尔测量与积分长线圈测量对比 (在线彩图)

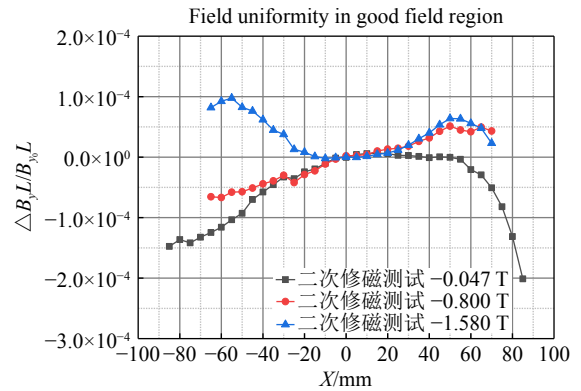


图 5 二次削斜后测量结果 (在线彩图)

表 4 HIAF-BRing 二极磁铁样机高阶量测量结果

阶数	1	2	3	4	5	6	7
0.047 T	10 000	±0.40	-1.50	±1.80	1.10	±2.40	-1.30
0.800 T	10 000	±0.55	-0.34	±0.72	0.77	±0.76	-0.54
1.580 T	10 000	±0.02	1.64	±0.75	0.60	±0.60	1.80

选取 2 台磁铁进行了离散性测量。为验证测量的准确性, 测量分 2 次进行, 每次测量重复 3 次, 2 次测量相隔 1 天, 每次测量重新标定和准直。测量结果如图 6 所示, 两次测量重复性均好于 5×10^{-5} 。

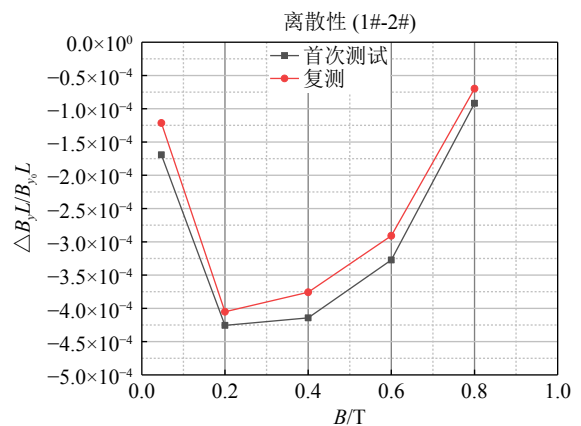


图 6 HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁积分场离散性测量结果 (在线彩图)

4.3 基于 on fly 模式下的传递函数测量

积分磁场传递函数测量，传统测量方式采用霍尔测量平台进行传递函数测量。由于大型二极磁铁一般为弯转磁铁且磁铁有效长度往往大于测量平台的测量行程。因此，使用霍尔测量平台测量积分磁场时，单次准直后只能实现半长度范围内的磁场测量，全长度范围内的磁场测量需通过磁铁翻转和二次准直来实现。这种翻转磁铁的测量方式会引入二次准直误差，而且霍尔传感器的封装精度误差也会造成测量精度 $1/10\ 000\sim 2/10\ 000$ 的精度误差。本系统采用在线圈骨架上安装霍尔传感器，由线圈骨架带动霍尔传感器在中心弧线上运动的方法实现全长度范围内连续磁场测量。另外，为了提高效率，测量过程采用了 on fly 测量模式。图 7 所示为 0.6 T 磁场下 on fly 模式积分磁场重复性测量结果，测量重复性好于 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。图 8 所示为 on fly 模式积分场励磁曲线测量结果。

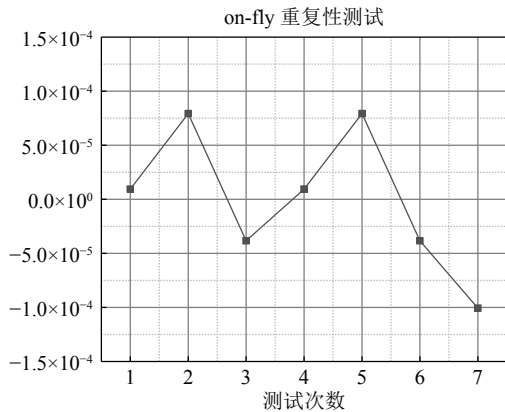


图 7 on fly 模式积分磁场重复性测量

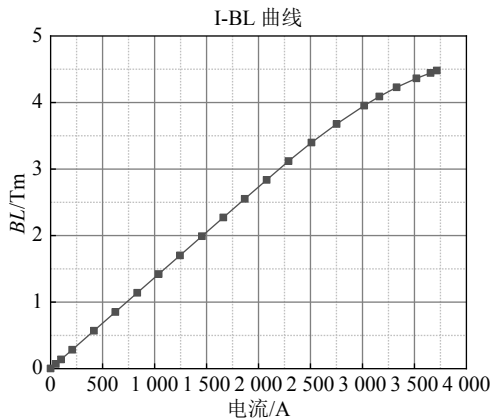


图 8 积分场励磁曲线测量

4.4 矩阵线圈标定

HIAF-BRing 快脉冲二极磁铁磁场均匀度要求达到 $\pm 3 \times 10^{-4}$ ，因此矩阵线圈系数相对精度需小于 1×10^{-4} 。BRing 快脉冲二极磁铁矩阵线圈的线圈槽加工由加工中

心完成，加工精度小于 $50\ \mu\text{m}$ ，但由于线圈为手工绕制，不同的矩阵线圈之间会存在较大的系数离散。因此测量前需要对矩阵线圈进行线圈系数相对标定，BRing 快脉冲二极磁铁矩阵线圈系数相对标定结果如图 9 所示，11 个矩阵线圈系数相对偏差最大为 1%。

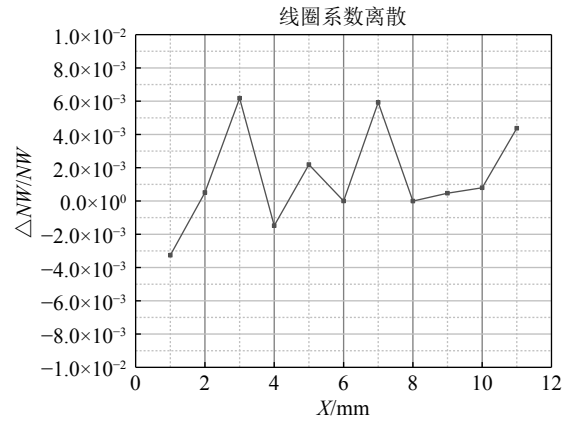


图 9 矩阵线圈标定结果

目前国际上已有采用 PCB(Printed Circuit Board) 印刷电路板线圈阵列来提高线圈的加工精度的技术，如 CERN 研制的 PCB 阵列线圈，线圈相对系数偏差达到 5×10^{-5} [3]。而且 PCB 线圈具有长期放置后稳定性好、不易变形的优点。因此未来将尝试采用 PCB 线圈阵列代替手工绕制的方式提高矩阵线圈系数精度。

5 结论

针对 HIAF 项目 BRing 快脉冲二极磁铁特性，在传统测量系统的基础上进行了长线圈测量系统的升级和动态测量系统搭建。经过样机磁铁的测量，测量系统精度及稳定性得到了验证。同时通过二极磁铁磁场测量，完成了样机磁铁的二次削斜，测量结果满足物理要求。
致谢 首先感谢在测量系统搭建及调试过程中各位同事、同学的热心帮助。其次感谢兰州市科学技术局对重离子加速器高性能磁铁研制及测量的大力支持。最后感谢兰州科近泰基新技术有限公司在磁铁加工及测量过程的支持和配合，以及合肥科焯电物理设备制造有限公司工程师在磁铁测量系统搭建、调试过程的全力配合和建设性意见。

参考文献:

[1] HE Yuan. Magnetic Measurement System for CSR and Its Applications[D]. Lanzhou: Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, 2003: 65. (in Chinese)
(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: 65.)
[2] PRIANO C, BAZZANO G, BIANCULLI D, et al. Magnetic Model-

- ing Measurements and Sorting of the CNAO Synchrotron Dipoles and Quadrupoles[C]//Proceedings of IPAC'10, 2010: MOBEP004.
- [3] GOLLUCCIO G, BEAUMONT A, BUZIO M, et al. PCB Coil Array for Measuring Curved Accelerator Dipoles: Two Case Studies on the MedAustron Accelerator [C]//20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th International Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn Benevento, 2014: 816.
- [4] YAO Chenggui, JIA Qika, XU Chaoyin, et al. *Journal OF Scientific Instrument*, 2003, 24(4): 150.

Magnetic Field Measurement System of the BRing Fast Ramping Dipole Magnet in HIAF

ZHANG Xiang^{1,2}, JIN Li'an¹, YANG Jing¹, ZHANG Jingjing¹, HAN Xiaoke¹, FENG Wentian¹, ZHAO Lixia¹, LÜ Mingbang^{1,2}, MEI Enming^{1,2}, YANG Wenjie¹, YAO Qinggao^{1,2,†}, MA Lizhen^{1,2}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The fast-ramping dipole magnet's performance indices, test specifications, and measurement techniques of BRing in HIAF project are presented, and the components of the fast-ramping dipole magnet steady-state magnetic field measurement system and dynamic magnetic field measurement system are described. In the steady-state magnetic field measurement, the on fly measurement technique is adopted for the long coil measurement system to improve the integrated magnetic field measurement accuracy and test efficiency. In the dynamic magnetic field measurement, the matrix coil for magnetic field delay and magnetic field distortion measurement is developed. Through the testing of the magnet prototype, the performance index verification of the test system and steady-state magnetic field measurement of the prototype magnet are completed. Based on the test data, the secondary trimming of the magnet is completed.

Key words: fast-ramping dipole magnet; magnetic field measurement system; dynamic magnetic field measurement; matrix coil

Received date: 07 Mar. 2022; Revised date: 12 Apr. 2022

Foundation item: Lanzhou Science and Technology Project(E139973SQ0)

† Corresponding author: YAO Qinggao, E-mail: yaoqinggao@impcas.ac.cn