基于 HALF 磁铁的平移长线圈磁测系统研制*

朱伟豪，刘宝厚，张子靖，孙天昊，黄鑫，徐宏亮#

(中国科学技术大学国家同步辐射实验室，合肥 230029)

摘要： 合肥先进光源（HALF）储存环 120 台二极磁铁全部采用电磁型变气隙纵向梯度二极磁铁，其积分场及均匀性的精确测量，是保证束流品质的重要环节之一。为满足大批量磁铁高效、高精度的测量需求，HALF 研制了一套平移长线圈磁场测量系统。该系统设计了独特的双层测量线圈，可在单次扫描中同步获取磁铁孔径内两个高度平面的积分场及其均匀性信息。开发了自动测量功能，该系统可实现磁铁自动标准化励磁循环及自动加载励磁电流并进行磁场测试。测试结果表明，积分场测量重复精度优于 1×10^{-4}，积分场均匀性重复精度优于 5×10^{-5}，优于霍尔点测法通常达到的 10^{-4} 量级重复精度。该系统的成功研制为 HALF 二极磁铁的批量检测提供了可靠的技术手段，具有重要的工程应用价值。

关键词： 平移长线圈；磁场测量；积分场；合肥先进光源

中图分类号： TL503　　**文献标志码：** A　　**doi：**

ChinaXiv:202604.00214v1

1 引言

合肥先进光源（Hefei Advanced Light Facility，HALF）是基于衍射极限储存环的第四代同步辐射装置，该装置由注入器和储存环组成，注入器为储存环提供全能量（2.2 GeV）电子束流，储存环储存发射度为 86 pm • rad 的电子束流，并通过磁场作用产生同步辐射光[1]。HALF 储存环周长约为 480 m，采用 20 个周期的 H6BA（混合型六弯铁消色散）结构，每个聚焦单元里含有 6 台纵向梯度二极磁铁（Longitudinal Gradient Bend，LGB）、16 台四极磁铁、4 台二四极组合功能磁铁、6 台六极磁铁、2 台八极磁铁、以及 10 台独立校正磁铁，磁铁布局如图 1 所示[2][3]。

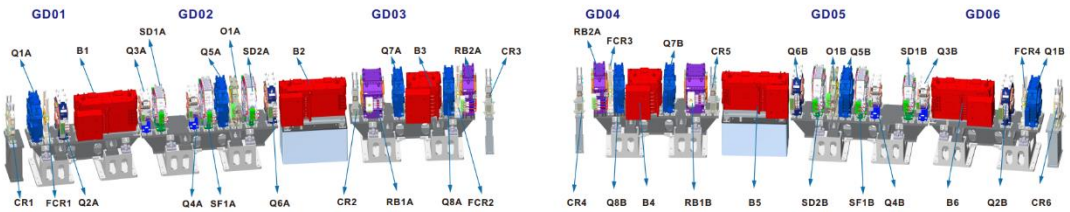

图 1 HALF 储存环单个周期磁铁结构

为了实现第四代光源 86 pm • rad 的极低发射度[2]，二极磁铁的磁场必须具有纵向梯度，并且好场区内

收稿日期： yyyy-mm-dd; **修改日期：** yyyy-mm-dd

基金项目： 合肥先进光源国家重大科技基础设施项目(2205-000000-04-01-877238)

作者简介： 朱伟豪(1999—)，男，安徽定远人，硕士研究生，从事加速器磁场测量研究； E-mail:zhuweihao@mail.ustc.edu.cn

通信作者： 徐宏亮，E-mail: hlxu@ustc.edu.cn

This version posted 2026-04-16.

的积分场均匀性优于 5×10^{-4}，电子通过磁铁后的轨道偏差小于 0.1 mm。因此，HALF 储存环中二极磁铁全部采用电磁型变气隙纵向梯度二极磁铁，每台磁铁包含五对或三对磁极，每对磁极都会产生不同的二极磁场[1][4]，图 2 为一台由五对磁极组成的 LGB。尽管采用 OPERA 等三维磁体设计与仿真软件可以实现高精度的磁场数值模拟，但在实际加工过程中，由于磁体材料特性、加工装配误差等因素会不可避免地导致实际磁场与仿真结果存在偏差[5]。因此，研制高精度的磁场测量系统，通过对样机及批量生产的磁铁进行精确测量，是验证磁铁加工质量、保障加速器束流品质与运行稳定性的关键环节[6]。

图 2 HALF 正在磁测中的 LGB6

积分场及其均匀性是 LGB 二极磁铁测量的关键技术指标。传统的霍尔点测法测量效率低下，且测量精度容易受到位移台的定位精度、温度湿度等环境因素影响，重复性精度一般只能达到 10^{-4} 量级，难以满足 HALF 大批量、高精度磁测需求[7]。为此，本文针对 HALF 二极磁铁的磁场测量任务，研制了一套自动化平移线圈磁场测量系统，该系统主要由长线圈、精密运动平台、数据采集系统及控制系统组成。为了实现好场区范围内磁场性能全面快速测量：测量线圈采用双层线圈结构，除了在中心平面（Y=0）布置线圈外，还在 Y=6 处增设线圈。该设计不仅避免了传统测量中因高度调整带来的二次准直误差，还实现了对 LGB 磁铁不同高度积分场分布的同步精确表征。为了提升测量效率，开发了自动测量软件，在磁铁水电连接及安装准直等准备工作完成后，磁测系统可自动对磁铁进行标准化循环以及按顺序加载待测电流自动进行磁场测试。经过实际运行测试，该系统不仅可自动完成二极磁铁的所有磁场测量内容，而且积分场测量重复精度优于 1×10^{-4}，积分场均匀性重复性精度优于 5×10^{-5}，完全满足 HALF 二极磁铁的工程测量需求。

2 长线圈设计

HALF 储存环包含三种不同规格的电磁型纵向梯度二极磁铁（LGB），其主要技术参数和尺寸如表 1 所示。一般来说，针对三种二极磁铁都需要设计相应的长线圈进行积分场均匀性的测量，考虑到成本和加工效率，我们设计了一种长线圈来满足三种二极磁铁的磁场测量需求。

表 1 HALF 电磁型纵向梯度二极铁主要技术参数

参数/单位	LGB1/6	LGB2/5	LGB3/4

ChinaXiv:202604.00214v1

This version posted 2026-04-16.

磁场强度/T	0.6287/0.3450/0.2581/0.2060/0.1690	0.3333/0.3855/0.5386/0.7926/0.4269	0.5226/0.9000/0.5226
磁极间隙/mm	30.8/33.9/45.5/57.1/69.5	55.6/48.0/34.4/31.2/43.3	31.1/30.4/31.1
外形尺寸（长×宽×高）/mm	1148×394×640	1224×380×590	616×517×640
好场区/mm	±13	±13	±8
轨道偏差/mm		<0.1	
积分场均匀度		≤0.05%	

2.1 物理设计

长线圈的物理参数设计主要包括线圈长度、宽度、匝数以及预估的电压信号和磁通信号。

（1）线圈长度：线圈长度L_{coil}必须覆盖沿束流轨道方向的全部磁场分布，包括边缘场。根据霍尔探头测量的磁场值，在超出磁铁边界 4 倍气隙（Gap）处，磁场强度已衰减至接近 0[8]。因此，线圈长度由如下经验公式确定：

$$L_{\text{coil}} > L_{\text{magnet}} + 8 \times Gap$$

其中，L_{coil}是线圈绕线长度，L_{magnet}是磁铁铁芯长度，Gap为磁铁气隙高度。根据 LGB2 磁铁有效长度及边缘场范围，线圈长度 1668.8 mm 即满足要求，并且考虑预留一定裕量，确定线圈长度为 1800 mm。

（2）线圈匝数与宽度：线圈匝数影响信号强度与稳定性。匝数过少会导致感应电压信号太弱，降低信噪比，从而导致测量的可靠性降低；匝数过多则会导致线包过厚，从而带来加工和安装的困难[5]。综合考虑电压信号强度和工程可行性，线圈匝数选定为 360 匝，对应线槽宽度为 4 mm。

（3）信号估算：本系统采用平移法测量积分场。测量线圈的平移速度设计为v，从磁场为零的位置水平推到中心磁场位置的时间Δt为 5s，感应电压与磁通信号估算如下：

$$V = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = N_{\text{coil}} \cdot \frac{\Delta B_{\text{ave}}}{\Delta t} \cdot L_{\text{eff}} \cdot W_{\text{coil}} = 360 \times \frac{0.49538}{5} \times 1.6688 \times 0.004 = 0.2381V$$

$$\Phi = N_{\text{coil}} \cdot \Delta B_{\text{ave}} \cdot L_{\text{eff}} \cdot W_{\text{coil}} = 360 \times 0.49538 \times 1.6688 \times 0.004 = 1.1904Vs$$

其中，ΔB_{ave}为平均磁场强度，代入参数估算感应电压约为 0.2381 V，磁通信号约为 1.1904 Vs。FDI-2056 数字积分器的输入电压范围为±10 V，可通过增益系数扩展至±100 V，其分辨率可达 10^{-14} Vs，上述信号强度处于积分器的量程范围内，满足使用要求。长线圈的主要物理参数列于表 2。

表 2 长线圈物理设计参数

参数/单位	数值
线圈长度/mm	1800
线槽宽度/mm	4
线圈匝数/匝	360
感应电压/V	0.2381
磁通信号/Vs	1.1904

2.2 工程设计

长线圈由内部绕线骨架和外部加强骨架组成，如图 3 所示。绕线骨架选用环氧玻璃纤维布板（G10），该材料具有良好的机械强度、绝缘性及耐热、耐化学腐蚀特性；外骨架选用高硬度和化学稳定性良好的陶瓷材料。线缆采用低噪声、高导电性的 MWS 扁平漆包线，绕制过程按照“绕线—分线—脱漆—单匝测量

ChinaXiv:202604.00214v1

This version posted 2026-04-16.

—焊接—引出测量—封装”的工艺流程进行[9]。经测试，线圈未出现断线、虚焊或短路现象，满足工程测量要求。

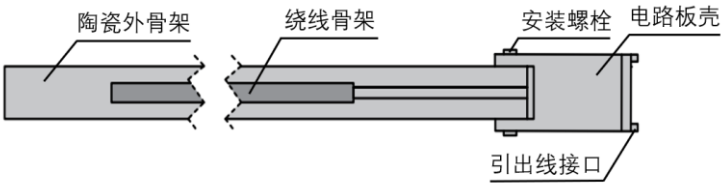

图 3 长线圈结构示意图

本设计的关键创新在于引入了双层测量结构，如图 4 所示。传统平移线圈仅在单一高度进行测量。为实现好场区范围多空间层面磁场性能测量，本线圈在绕线骨架中心线槽上方 6 mm 处增开了一道平行的线槽。由此，形成了两个空间位置严格固定的独立测量通道，可在单次扫描中同步获取两个高度平面的积分场数据，实现多平面测量与结果对比。

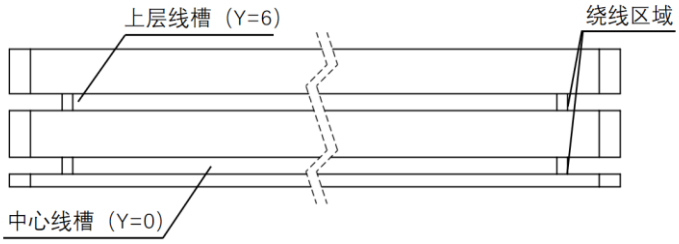

图 4 绕线骨架结构图

3 系统的组成部分

平移长线圈磁场测量系统主要由长线圈、精密运动平台、数据采集系统和控制系统组成，系统整体结构如图 5 所示。

图 5 平移长线圈磁测系统

精密运动平台为测量线圈提供一条精度高、重复性好的扫描轨迹，如图 6 所示。平台主体由高稳定性的大理石基座支撑，核心组件包括：1、驱动单元：安川伺服电机配合 THK 高精度直线导轨及研磨级滚珠丝杠。2、位置反馈：英国 Renishaw RGSZ 系列光栅尺（分辨率 0.1 μm），形成闭环控制。3、调节机构：

ChinaXiv:202604.00214v1

This version posted 2026-04-16.

磁铁支架具备垂直、水平及旋转三个自由度调节功能，确保磁铁机械中心与测量轴线的精确对准。

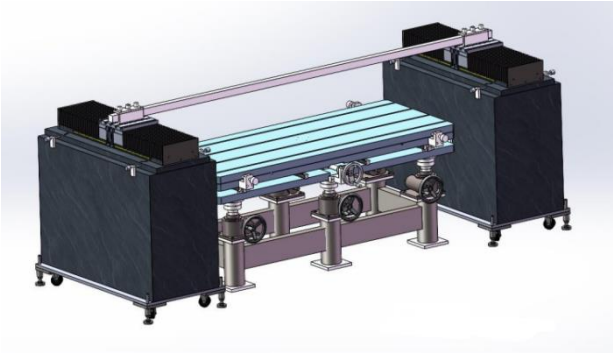

图 6 精密运动平台

数据采集系统的主要功能是将测量线圈中感应的电压信号转换为磁通变化量。系统选用 Metrolab FDI-2056 高速数字积分器，它可对线圈感应电压信号进行高精度积分运算，积分速度高达 50 万分部积分每秒，分辨率可达 10^{-14} Vs。测量过程中，线圈穿过磁场时产生的感应电动势$\varepsilon(t)$与磁通量$\Phi(t)$的变化率满足：

$$\varepsilon(t) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

积分器对$\varepsilon(t)$进行时间积分，并直接输出相对应的磁通变化量：

$$\int_{t_1}^{t_2} \varepsilon(t)dt = -\Delta\Phi = -\Delta\Phi(t_2) + \Delta\Phi(t_1)$$

对于匀速平移的矩形线圈，该磁通量变化量$\Delta\Phi$与磁场沿运动路径的积分（即积分场）呈线性关系。

控制系统基于 NI LabVIEW 平台开发[10]，实现了对系统运动、数据采集以及电源的综合控制。上位机通过运动控制器协调两个线性位移台的联动，实现测量线圈的无抖动匀速扫描，为抑制积分器漂移和位置滞后误差，系统采用往返扫描测量方式。测量前，程序提供待测磁铁参数、环境信息等测量信息的录入，并支持对积分器、运动控制器及电源参数进行预设与记录，确保测量条件的可追溯性。测量过程中，程序控制面板实时显示各测点的实时分段磁通、磁通积分以及积分场误差曲线。其中，分段磁通是指数字积分器在固定空间步长对感应电压积分而输出的磁通变化量（$\Delta\Phi$），磁通积分为磁通变化量的累加总和。测量完成后，程序对原始数据进行自动处理，计算积分场、场分布均匀性、重复误差等关键指标，并将测量参数、原始数据及处理结果统一保存，确保实验数据的完整性。

为进一步提高系统测量效率与自动化程度，在测量程序中开发了自动化测量模块，实现了磁铁自动标准化励磁循环以及自动加载励磁电流并进行磁场测量。用户只需在测量前一次性输入所有待测励磁电流点或设定标准化励磁循环参数，测量时程序就会按照预设序列自动控制电源完成励磁电流的加载，并在每个电流点稳定后自动触发测量程序，完成对应电流下的积分场测量。自动化测量功能显著提高了系统的测量效率，且自动标准化励磁循环的引入，有效减小了磁铁磁滞效应对测量结果的影响，为 HALF 工程中大批量 LGB 磁铁的高效率、高一致性积分场测量提供了有力保障。

ChinaXiv:202604.00214v1

4 测量结果

4.1 位移台运行调试

在磁测系统安装后，首先利用电子水平仪对两套线性位移台进行水平调平，随后利用激光跟踪仪对两平台进行等高与平行度校准，保证两轴运动轨迹在空间上保持一致，以最大限度降低平台安装误差对磁场测量结果的影响。在此基础上，使用激光干涉仪对两套线性位移台进行精度检验，包括重复定位精度和运动直线度（俯仰与偏摆）两方面。

测试方案为：在位移台全行程（700 mm）范围内选取 8 个基准点，进行正反向各 3 次重复定位测试，并记录每次的实际到达位置与目标位置的偏差。重复定位精度检验结果（图 7）表明，两个位移轴的双向综合重复精度分别为 1.7 μm 和 2.1 μm；直线度精度的检验结果（图 8）显示，两轴在全行程内的最大俯仰误差为 14.6 角秒，最大偏摆误差为 8.6 角秒。结果表明，位移台的重复定位精度达到微米量级，运动直线度误差控制在极小范围内，为后续开展 HALF 二极磁铁高精度积分场测量提供了可靠的机械运动基础。

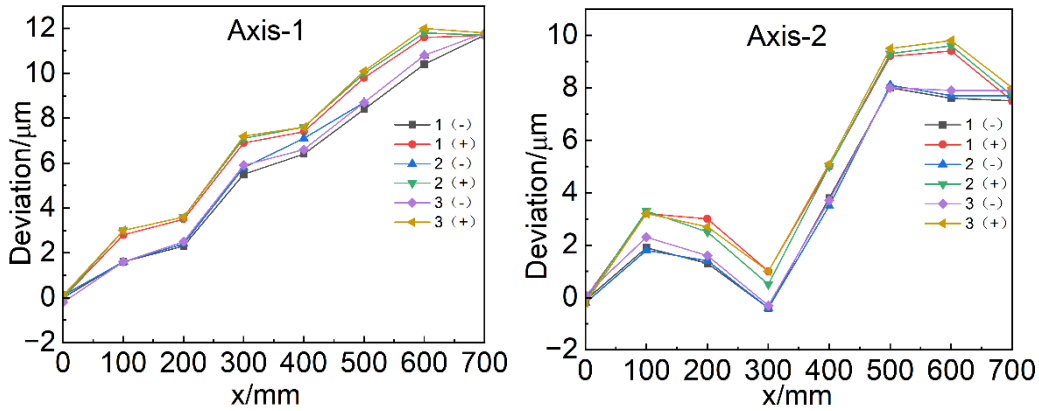

图 7 重复定位精度检验结果

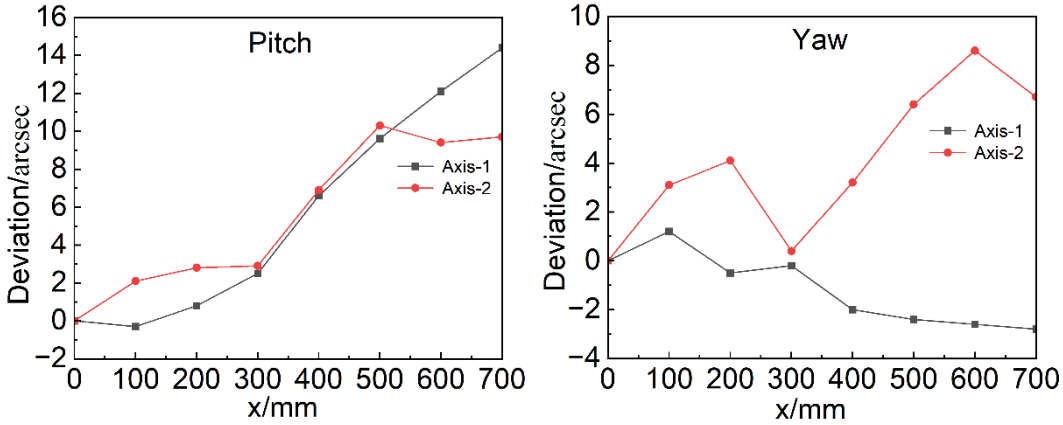

图 8 直线度精度检验结果

4.2 磁场测量结果

ChinaXiv:202604.00214v1

在完成平移长线圈磁测系统的安装、调试与运动精度验证后，对 HALF 储存环一块 LGB6 磁铁进行了积分场测量实验。测量在恒定工况下进行：工作电流 157.15 A、电压 15.43 V、环境温度 23.8 ℃、湿度 30 %RH、冷却水压差 5.25 kg/cm²、进水温度 23 ℃、回水温度 25 ℃。在此条件下，对 Y=0 mm 和 Y=6 mm 两个平面的积分场进行了 10 次测量。

中心位置积分场测量结果如图 9 所示，其中积分场测量精度定义为测量结果的标准差与平均值之比，两平面积分场测量重复精度误差分别为 6.63×10^{-6} 和 8.02×10^{-6}。积分场均匀性分布选取五次测量结果，如图 10 所示。积分场均匀性重复误差定义为同一位置多次测量结果中的最大值与最小值之差，并在所有测量位置中取最大值作为系统的积分场均匀性重复精度，图 11 为各个位置积分场均匀性的最大偏差。结果显示，两平面积分场均匀性重复精度分别为 4.35×10^{-6} 与 5.34×10^{-6}。上述测量精度均优于设计指标，完全满足 HALF 工程对 LGB 磁铁磁场测量的需求。

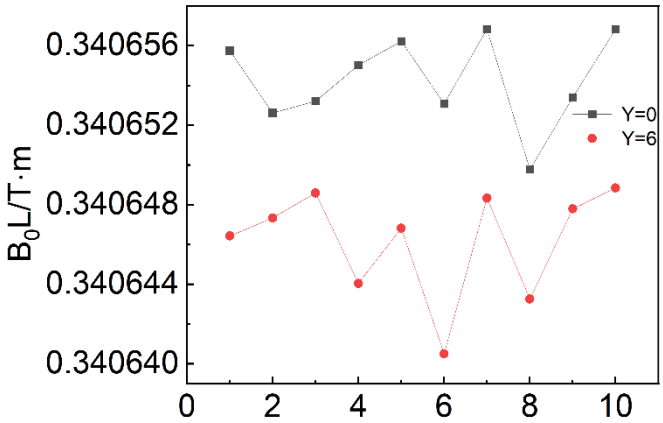

图 9 中心位置积分场测量结果

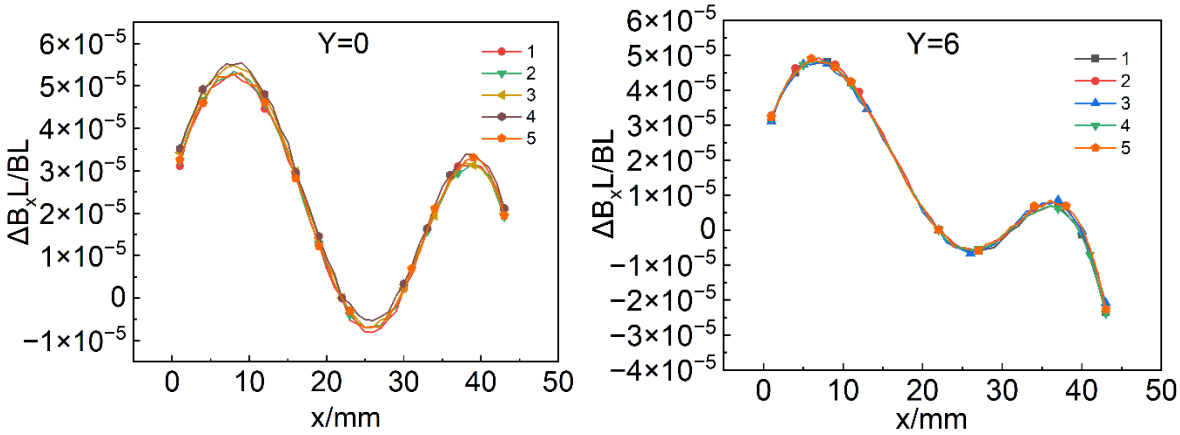

图 10 积分场均匀性分布曲线

ChinaXiv:202604.00214v1

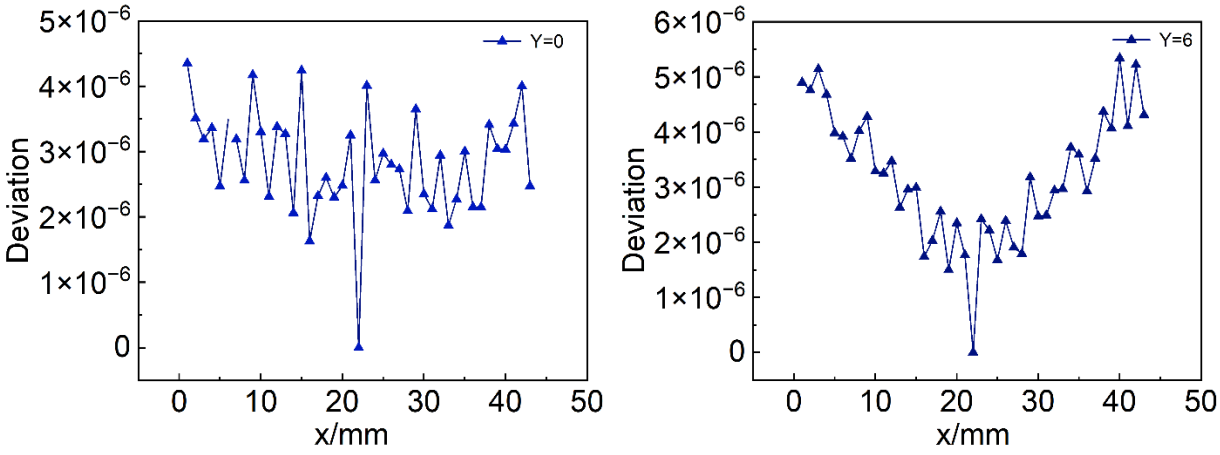

图 11 各位置积分场均匀性最大偏差

4.3 长期稳定性验证

为了进一步评估该系统在不同时间尺度下的长期稳定性和重复性性能，设计了跨天重复性验证实验。在完成首次测量两周后，在相同工况下对同一台磁铁进行了积分场测量实验。中心位置积分场测量结果如图 12 所示，两平面积分场测量重复精度误差分别为 2.03×10^{-6} 和 6.37×10^{-6}。积分场均匀性分布如图 13 所示，两平面积分场均匀性重复精度分别为 2.89×10^{-6} 与 3.81×10^{-6}，上述结果与首次实验测量结果处于同一量级。此实验结果表明，该系统在跨天测量条件下仍能保持优良的测量一致性与稳定性，进一步验证了该系统在 HALF 二极磁铁批量、高精度磁场测量中的可靠性。

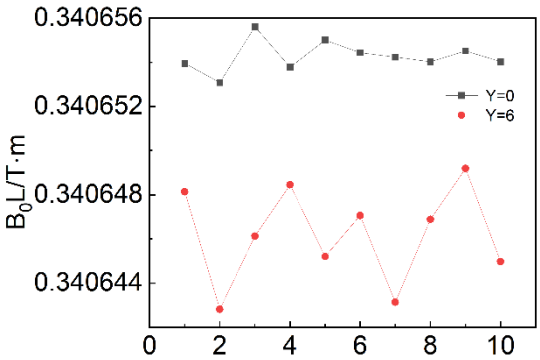

图 12 中心位置积分场测量结果

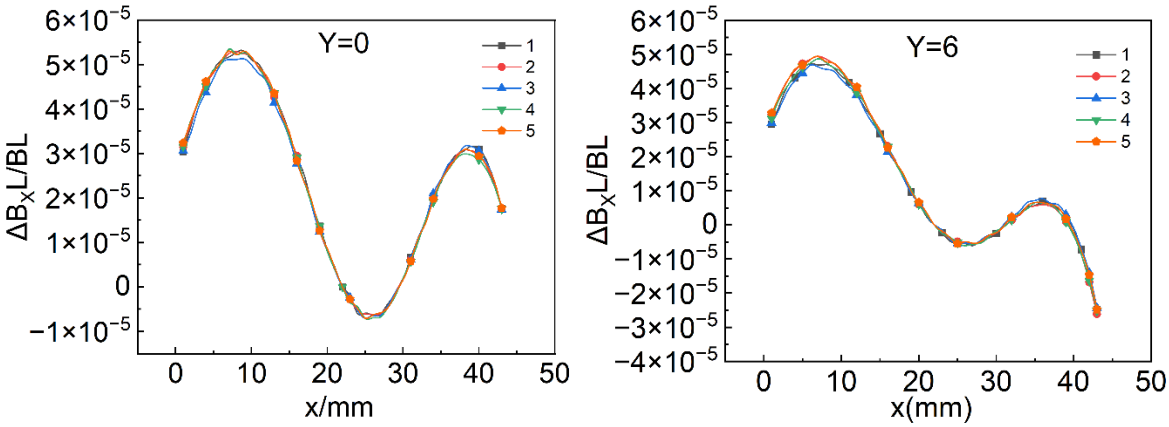

图 13 积分场均匀性分布曲线

ChinaXiv:202604.00214v1

5 结论

为满足合肥先进光源（HALF）工程对纵向梯度二极磁铁（LGB）高效与高精度测量的需求，本文成功研制了一套平移长线圈磁测系统。该系统通过集成高刚性精密运动平台、数据采集系统及自动化控制软件，实现了磁场信号的精确获取与处理，并创新性地设计了双层线圈，实现了在单次扫描过程中对不同高度磁场信号的同步获取。开发了自动测量功能，实现了磁铁自动标准化循环及自动加载励磁电流进行磁场测量。对 LGB6 磁铁的重复磁测实验表明，系统积分场测量精度优于 1×10^{-4}，积分场均匀性重复精度优于 5×10^{-5}，各项关键指标均超越设计目标。目前，该系统已正式投入使用，将承担 HALF 工程 120 台 LGB 二极磁铁的批量测试任务，为装置的束流品质与运行稳定性提供关键的数据支撑。

ChinaXiv:202604.00214v1

参考文献（References）

[1] SUN Tianhao, HUANG Xin, ZHANG Zijing, et al. Status of longitudinal gradient bending magnets for Hefei Advanced Light Facility[J]. J Instrum, 2025, 20(04): P04028. doi:10.1088/1748-0221/20/04/P04028.

[2] BAI Zhenghe, LIU Gangwen, HE Tianlong, et al. Preliminary physics design of the Hefei Advanced Light Facility storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2022, 34: 104003(in Chinese). doi: 10.11884/HPLPB202234.220137
(白正贺，刘刚文，何天龙，等. 合肥先进光源储存环初步物理设计[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 104003. doi: 10.11884/HPLPB202234.220137)

[3] JIAO Yi, BAI Zhenghe. Physics design and optimization of the fourth-generation synchrotron light sources[J]. High Power Laser Part Beams, 2022, 34: 104004(in Chinese). doi: 10.11884/HPLPB202234.220136.
(焦毅， 白正贺. 第四代同步辐射光源物理设计与优化[J]. 强激光与粒子束, 2022, 34: 104004. doi: 10.11884/HPLPB202234.220136.)

[4] CHEN Chao, DU Shuangsong, HU Rui, et al. Development of a superconducting longitudinal gradient bend prototype for Hefei Advanced Light Facility storage ring[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2024, 36: 084002(in Chinese). doi: 10.11884/HPLPB202436.230407
(陈超，杜双松，胡锐，等. 合肥先进光源储存环超导纵向梯度弯铁样机研制[J]. 强激光与粒子束, 2024, 36: 084002. doi: 10.11884/HPLPB202436.230407)

[5] LIANG Hui, YANG Jun, QIN Bin, et al. Design of the Integral Field Measurement System of Dipole Magnets[J]. IEEE Trans Appl Supercond, 2018, 28(3): 1-5. doi: 10.1109/TASC.2018.2799596.

[6] RUSSENSCHUCK S. Rotating- and translating-coil magnetometers for extracting pseudo-multipoles in accelerator magnets[J]. COMPEL, 2017, 36(5): 1552-1567. doi: 10.1108/COMPEL-02-2017-0059.

[7] ZHOU Jianxin, KANG Wen, LI Shuai, et al. AC magnetic field measurement using a small flip coil system for rapid cycling AC magnets at the China Spallation Neutron Source (CSNS)[J]. Nucl Instrum Meth A, 2018, 880: 80-86. doi:10.1016/j.nima.2017.10.040.

[8] XIONG Hui, HE Yuan, YUAN Ping, et al. Integral Magnetic Field Measurement of Dipole Magnets[J]. Nucl Phys Rev, 2003, 20(1): 34-37(in Chinese). doi: 10.11804/NuclPhysRev.20.01.034.
(熊慧，何源，袁平，等. CSR二极磁铁积分磁场测量系统[J]. 原子核物理评论, 2003, 20(1): 34-37. doi: 10.11804/NuclPhysRev.20.01.034.)

[9] ZHANG Xiang, JIN Li'an, YANG Jing, et al. Magnetic Field Measurement System of the BRing Fast Ramping Dipole Magnet in HIAF[J]. Nucl Phys Rev, 2022, 39(4): 470-475(in Chinese).doi:10.11804/NuclPhysRev.39.2022027.
(张翔，金利安，杨静，等.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.)

[10] ISHAFIT I, INDRATNO T K, PRABOWO Y D, et al. Arduino and LabVIEW-based remote data acquisition system for magnetic field of coils experiments[J]. Physics Education, 2019, 55(2): 025003. doi: 10.1088/1361-6552/ab5ed6.

This version posted 2026-04-16.

末页外文脚注格式（脚注中各项内容字体为 8pt）

Development of Long Moving Coil Magnetic Field Measurement System Based on HALF Magnets

ZHU Weihao [1)]，LIU Baohou，ZHANG Zijing，SUN Tianhao，HUANG Xin，XU Hongliang[#]，

（National Synchrotron Radiation Laboratory, University of Science and Technology of China）

Abstract: All 120 dipole magnets in the Hefei Advanced Light Facility (HALF) storage ring are electromagnetic longitudinal gradient bend magnets with variable gaps. The precise measurement of their integral field and uniformity is crucial for ensuring beam quality. To meet the demand for efficient, high-precision measurement of these magnets in large quantities, HALF has developed a long moving coil magnetic field measurement system.The system features a uniquely designed double-layer measurement coil, enabling the simultaneous acquisition of integral field and uniformity data from two vertical planes within the magnet aperture during a single scan. It also incorporates an automated measurement function, allowing for automatic standardized magnet excitation cycles and sequential testing at pre-programmed excitation currents.Test results demonstrate that the measurement repeatability for the integral field is better than 1×10^{-4}, and for field uniformity, better than 5×10^{-5}, which is superior to the typical 10^{-4} level achieved by the Hall probe method. The successful development of this system provides a reliable technical solution for the batch testing of HALF's dipole magnets, holding substantial value for engineering applications.

Key words：long moving coil;magnetic field measurement; integral field;Hefei Advanced Light Facility

Received date：yyyy-mm-dd; **Revised date**：yyyy-mm-dd

Foundation item： Hefei Advanced Light Facility National Major Science and Technology Infrastructure Project(2205-000000-04-01-877238)

Corresponding author: XU Hongliang, E-mail: hlxu@ustc.edu.cn

ChinaXiv:202604.00214v1

This version posted 2026-04-16.