



·粒子束及加速器技术·

HIAF 电子冷却装置高精度线圈磁轴测量*

沙小平^{1,2}, 冒立军¹, 陆海娇¹, 杨晓东¹, 杨颜冰^{1,2}, 汤梅堂^{1,2}, 赵丽霞¹,
马 伏^{1,2}, 马晓明¹, 李 杰¹, 何 仑¹, 孙晓龙¹

(1. 中国科学院近代物理研究所, 兰州 730000; 2. 中国科学院大学核科学与技术学院, 北京 100039)

摘 要: 强流重离子加速器装置(HIAF)将采用电子冷却技术,降低重离子束流的发射度和动量分散,提高核物理及原子物理实验的精度与亮度。电子冷却装置的冷却段磁场均匀度是影响冷却效率的主要参数,HIAF 电子冷却装置采用多个独立高精度线圈串联产生纵向磁场的设计,获得极高的冷却段磁场均匀度。本文介绍了一种测量高精度线圈磁轴偏角的装置,采用定位装置测量线圈的几何对称轴,通过旋转霍尔探头测量线圈中心平面上的径向与轴向磁场分布,再根据磁场测量数据计算出线圈磁轴与几何对称轴之间的偏角。实际测量表明该装置的磁轴偏角测量精度达到 ± 0.10 mrad。测量得到的 HIAF 电子冷却装置冷却段线圈样品的磁轴偏角为 (1.28 ± 0.10) mrad,达到设计要求。

关键词: 电子冷却; 纵向磁场; 磁场测量; 磁轴; 重离子加速器

中图分类号: TL503.91

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202133.210073

Magnetic axis measurement of the high precision coil for the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility electron cooler

Sha Xiaoping^{1,2}, Mao Lijun¹, Lu Haijiao¹, Yang Xiaodong¹, Yang Yanbing^{1,2}, Tang Meitang^{1,2}, Zhao Lixia¹,
Ma Fu^{1,2}, Ma Xiaoming¹, Li Jie¹, He Lun¹, Sun Xiaolong¹

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

2. School of Nuclear Science and Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Electron cooling method is used for the High Intensity heavy-ion Accelerator Facility (HIAF), in order to reduce the beam emittance and momentum spread of heavy ion beams, hence to improve the accuracy and luminosity of nuclear physics and atomic physics experiments. The magnetic field homogeneity of the cooling section is the key parameter related to the cooling effect. A new type of cooling section solenoid composed of several coils was used in the HIAF electron cooling device to produce a high parallelism magnetic field. In this paper, a device for the magnetic field axis measurement of high-precision coils is presented. The geometric symmetrical axis of the coil is measured by a positioning device. The radial and axial magnetic field distribution in the center plane of the coil is measured by the rotating Hall probes. Finally, the relative angle between the coil magnetic field axis and the geometric symmetrical axis is calculated by the measurement results. The accuracy of the measured angle is within ± 0.10 mrad. The measured angle of the prototype coil is (1.28 ± 0.10) mrad, which satisfies the physics requirement.

Key words: electron cooling; longitudinal magnetic field; magnetic field measurement; magnetic field axis; heavy-ion accelerator

强流重离子加速器装置(HIAF)是国家“十二五”重大科技基础设施建设项目,是研究原子核奇特结构、重元素起源以及高能量密度物质性质等前沿科学问题的重要平台^[1]。HIAF 装置主要由高电荷态电子回旋共振离子源(ECR)、超导直线加速器(iLinac)、增强器(BRing)、放射性次级束流分离器(HFRS)和高精度环形谱仪(SRing)构成。通常情况下,ECR 提供的高电荷态重离子束流,经过 iLinac 预加速之后注入到 BRing,束流在 BRing

* 收稿日期:2021-03-08; 修订日期:2021-06-18

基金项目:国家自然科学基金项目(11575264);国家重点研发计划项目(2019YFA0405400)

作者简介:沙小平(1988—),男,硕士研究生,工程师,从事电子冷却磁场测量方面研究。

通信作者:冒立军(1980—),男,博士,研究员,从事电子冷却技术研究。

中被进一步加速至高能量,引出并传输到静止靶处,打靶产生次级离子。次级离子束流在 HFRS 中进行分离鉴别之后注入到 SRing,开展核物理和原子物理实验。为了提高束流品质和实验亮度,SRing 中设计建造一台电子冷却装置^[2]。

电子冷却是一种减小储存环中离子束流的发射度和动量分散、补偿内靶实验能量损失的有效手段^[3],通过具有相同速度的离子束和电子束在冷却段中的库仑碰撞,将离子束流的振荡能量转移到电子束,并利用不断更新电子束流实现离子束流相空间体积压缩。冷却段纵向磁场均匀度是决定束流冷却速率的主要物理量,SRing 电子冷却装置将采用 132 个独立线圈串联产生纵向磁场,通过调节每个线圈在支架上的位置,获得较高的纵向磁场均匀度。每个线圈的磁轴与几何对称轴之间的夹角,即磁轴偏角^[4],是决定串联安装之后整体的纵向磁场均匀度的关键因素,根据 HIAF 电子冷却装置线圈布局方案,每个独立线圈的磁轴偏角要求小于 1.5 mrad,才能够实现 SRing 电子冷却装置冷却段纵向磁场均匀度小于 10^{-4} 的设计要求^[5-6]。

本文介绍了 SRing 电子冷却装置冷却段的结构以及单个线圈的设计方案,描述了磁轴偏角的测量方法和相应的测量平台设计,详细介绍并分析了线圈样品的测量数据。结果表明,该测量平台测量线圈磁轴偏角的精度优于 0.10 mrad,已加工完成的线圈样品的磁轴偏角测量结果为 (1.28 ± 0.10) mrad,满足 SRing 电子冷却装置的设计要求。

1 SRing 电子冷却装置冷却段结构

SRing 电子冷却装置的结构如图 1 所示,热阴极电子枪和静电高压加速管位于电子枪端螺线管内,由热阴极产生的强流电子束,通过静电高压加速管加速至与被冷却离子的速度相同之后,由弯曲螺线管磁场和位于弯曲螺线管内的静电偏转板产生的电场共同引导并传输至冷却段。冷却段位于 SRing 中的直线节,在冷却段中电子与离子发生库仑碰撞,离子束的热量被传递给电子束。之后电子束被偏转出冷却段并进入收集器收集。通过不断更新的电子束与循环离子束的作用,最终离子束的温度被冷却至与电子束相同。在电子冷却装置中,电子束从产生到收集,都是在一系列不同规格螺线管产生的纵向磁场中运动,其中冷却段是电子与离子发生相互作用的唯一区域,依据 Parkhomchuk 电子冷却理论^[7],冷却段纵向磁场均匀度是决定电子冷却效率的重要参数,因此冷却段螺线管线圈系统是 SRing 电子冷却装置最重要的组成部分。

SRing 电子冷却装置冷却段磁场由一系列独立线圈串联产生,如图 2(a)所示。每个线圈的厚度为 57.75 mm,线圈之间的间距为 1.5 mm,所有线圈被安装在铁磁材料的基座上,基座设有底部和左右三个支撑架,分别与线圈的三个支撑座配合。如图 2(b)所示,线圈以三饼串联焊接的方式绕制,每饼线圈有 3 层,每层 2×6 匝,线圈总共 36 匝。为了减小冷却段横向磁场分量,线圈采用顺时针和逆时针两种绕制方式制作,由于两种绕制方式的匝间跳线方向相反,因此它们的磁轴偏角的方位角也相反。在安装之前,需要对所有线圈的磁轴偏角进行准确测量,根据

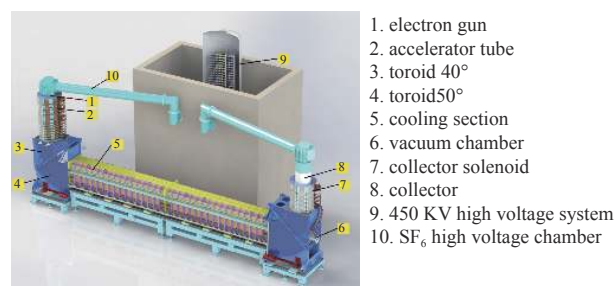


Fig. 1 3D structure of the SRing electron cooler

图 1 SRing 电子冷却装置三维结构

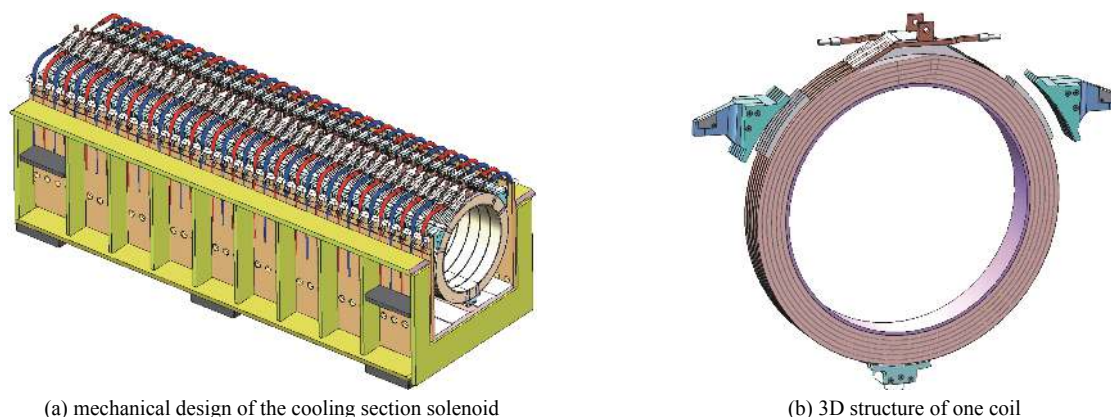


Fig. 2 Cooling section design of the SRing electron cooler

图 2 SRing 电子冷却装置冷却段设计

磁场叠加原理,将磁轴偏角大小接近、方向相反的线圈相邻放置,以尽可能抵消磁场的横向分量。线圈的三个支撑座同时也是该线圈的几何准直参考点,用于确定线圈中心平面和几何对称轴。位于线圈底部的圆形支撑座放置在基座上,用于承受线圈的重量,同时可以调节线圈的高低位置。位于线圈左右两端的支撑座由基座左右两侧的支撑架固定,支撑架安装定位螺丝,可以分别调节和固定线圈的左右位置,改变线圈的水平角度,或同时调节左右支撑座的位置,改变线圈的垂直角度。安装之后,首先采用霍尔探头初步测量冷却段中心轴线上的横向磁场分量^[8],调节线圈支架位置,然后再采用灵敏磁针法^[9-10]精确测量轴线上的横向磁场分量,通过反复微调每个线圈在支撑架上的位置,最终获得磁场均匀度优于 10^{-4} 的冷却段纵向磁场^[11]。由此可见,精确测量单个线圈的磁轴偏角,是实现冷却段高均匀度纵向磁场的关键。

依据冷却段整体机械设计,相邻独立线圈之间的间距为 1.5 mm ,因此每个线圈的可调节范围为 $\pm 0.75\text{ mm}$ 。线圈的关键尺寸如图3(a)所示,线圈安装之后,底部支撑座的位置保持不变,通过调节左右支撑座位置,实现线圈在水平和垂直方向的小角度转动。如图3(b)所示,以底部支撑底面中心为原点 O ,以线圈垂直对称轴为 y 轴,以线圈中心平面内过原点且垂直 y 轴的直线为 x 轴,以线圈中心平面垂直且过原点的直线为 z 轴,建立直角坐标系。调节磁轴垂直角 θ_z 时,左右支撑座 A 和 B 沿着 z 方向调节,线圈外沿偏移最大的位置在线圈的顶点 D 上,设偏移量 δz ,线圈平面沿 x 轴旋转,旋转半径为线圈的高度 CD ,线圈的最大偏移量 δz 与垂直角 θ_z 的关系表示为

$$\theta_z = \frac{\delta z}{CD} \quad (1)$$

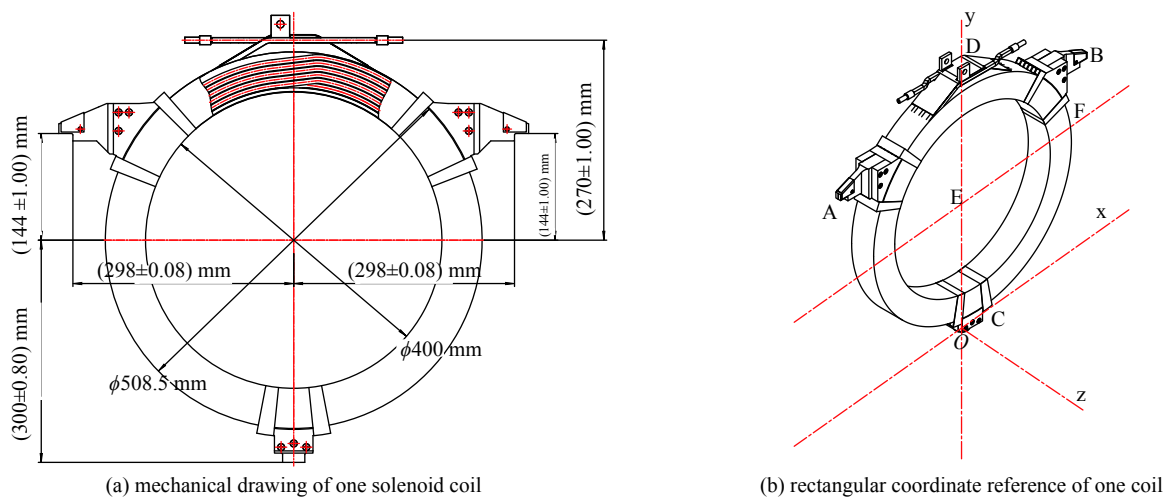


Fig. 3 Key mechanical parameters of one solenoid coil and its adjusting system

图3 高精度线圈关键尺寸及调节方式

调节磁轴水平角 θ_x 时,左右支撑座 A 和 B 沿着 z 方向反向调节,线圈外沿偏移最大的位置在线圈外沿 F 点上,线圈平面沿 y 轴旋转,旋转半径为线圈的半径 EF ,线圈的最大偏移量 δz 与水平角 θ_x 的关系表示为

$$\theta_x = \frac{\delta z}{EF} \quad (2)$$

调节线圈其它方位角 ϕ 上的偏角时,线圈沿过原点 o 且与磁轴方位角垂直的直线为轴做旋转,旋转半径 R 可表示为

$$R = L_{CE} |\cos \phi| + r \quad (3)$$

其中, L_{CE} 为底部支撑底面中心到线圈圆心的距离, r 为线圈外沿到线圈圆心的距离。线圈外沿上的最大偏移量 δz 与磁轴偏角大小 θ 的关系可以表示为

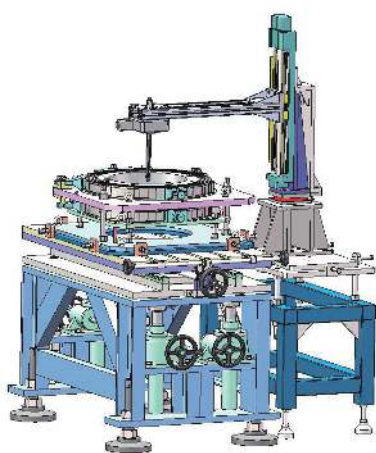
$$\theta = \frac{\delta z}{R} \quad (4)$$

由式(3)和式(4),当 $\phi = 0^\circ$ 或 $\phi = \pm 180^\circ$, $\delta z = 0.75\text{ mm}$ 时, $R = 570\text{ mm}$, $\theta = 1.32\text{ mrad}$ 。即垂直角最大可调 1.32 mrad ,当 $\phi = \pm 90^\circ$, $\delta z = 0.75\text{ mm}$ 时, $R = 254.25\text{ mm}$, $\theta = 2.95\text{ mrad}$,即水平角最大可调 2.95 mrad 。其余方位角 ϕ 上, θ 的最大可调的范围为 1.32 mrad 至 2.95 mrad 。

2 高精度线圈磁轴测量平台

SRing 电子冷却装置冷却段线圈磁轴测量采用霍尔探头测量方法, 测量平台如图 4 所示, 包含线圈固定平台、测量臂、测量杆、位于测量底顶端的霍尔探头、步进电机、平台位置调节螺丝及平台角度调节螺丝, 其中测量杆的位置固定, 仅能带动霍尔探头上下移动或转动。测量平台位于恒温恒湿间内, 温度设置为 $(26\pm 1.5)^\circ\text{C}$, 湿度设置为 $65\%\pm 5\%$, 以保证霍尔探头的测量精度和稳定性。线圈平台设置有上下两个线圈固定装置, 可以进行单个线圈或两个线圈组合的磁轴测量。以单个线圈的测量过程为例, 测量时, 首先将待测线圈放置在水平测量台上, 连接冷却水和高精度直流测磁电源。测量台上的 3 个可上下调节的支撑架分别与线圈的支撑座固定。采用 2.4 m 六轴关节臂对支撑座进行位置精确测量, 并通过调节支撑架, 最终保证线圈的中心平面与测量杆垂直, 且霍尔探头位于线圈的中心点, 即测量杆与线圈几何中心轴重合。位于测量杆底端的霍尔探头, 由两块相互垂直安装的霍尔片组成, 霍尔片型号为 MPT-231, 用于测量线圈的径向磁场和轴向磁场大小。磁轴偏角的测量精度由两方面决定, 分别是霍尔探头的测量精度和线圈位置的测量精度。线圈磁场测量选用 DTM-151 型数显式霍尔效应高斯计, 配合 MPT-231 霍尔探头, 霍尔探头有效面积 $1\text{ mm}\times 0.5\text{ mm}$, 量程为 0.03 T , 绝对精度为 $\pm 1.8\times 10^{-6}\text{ T}$ 。在恒温 $(26\pm 2)^\circ\text{C}$ 条件下, 556 s 内的环境磁场测量结果及稳定性分析如图 5 所示, 图中横坐标表示霍尔片测得磁场, 纵坐标为测量值落在不同磁场区间的概率, 磁场的概率密度分布近似符合高斯分布, 采用高斯拟合方法对该概率密度分布进行拟合, 拟合曲线如图中蓝色曲线所示。径向霍尔片测量数据拟合得到的标准差为 $\pm 0.31\times 10^{-6}\text{ T}$, 轴向霍尔片测量数据拟合得到的标准差为 $\pm 0.21\times 10^{-6}\text{ T}$ 。

设: B_r 为扣本底的径向分量; B_{r0} 为本底径向分量; B_{r1} 为测得径向分量; B_z 为扣本底的轴向分量, B_{z0} 为本底轴向分量, B_{z1} 为测得轴向分量; 磁轴偏角大小为 θ , 则有



(a) 3D Structure design of magnetic field measurement platform

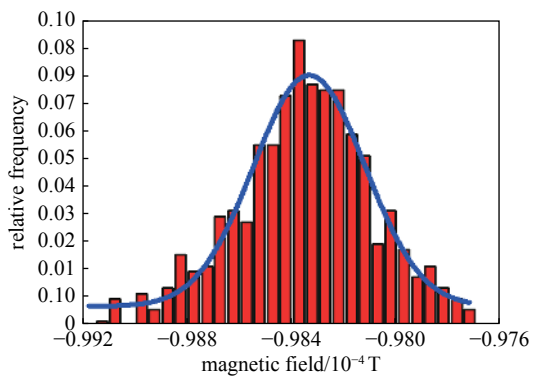


(b) photo of magnetic field measurement platform

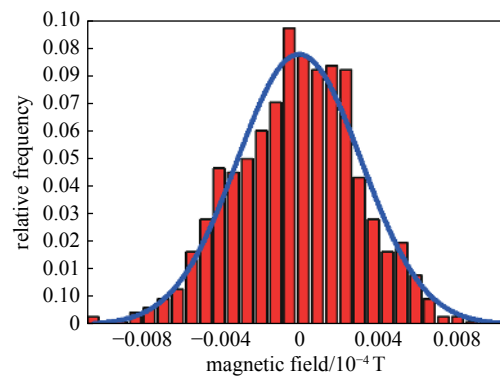
1. measurement arm
2. stepping motor
3. measurement rod
4. Hall probes
5. position adjusting screws
6. angle adjusting screws
7. support of coil

Fig. 4 Structure of magnetic field measurement platform

图 4 磁场测量装置结构



(a) distribution of the radial magnetic field measurement



(b) distribution of the axial magnetic field measurement

Fig. 5 Magnetic field measurement results and stabilities

图 5 霍尔探头的磁场测量结果及稳定性分析

$$B_r = B_{r1} - B_{r0} \quad (5)$$

$$B_z = B_{z1} - B_{z0} \quad (6)$$

$$\theta = \frac{B_r}{B_z} \quad (7)$$

根据误差传递公式有

$$\sigma_{B_r} = \sqrt{\sigma_{B_{r0}}^2 + \sigma_{B_{r1}}^2} \quad (8)$$

$$\sigma_{B_z} = \sqrt{\sigma_{B_{z0}}^2 + \sigma_{B_{z1}}^2} \quad (9)$$

$$\sigma_\theta = \sqrt{\left(\frac{\partial\theta}{\partial B_r}\right)^2 \sigma_{B_r}^2 + \left(\frac{\partial\theta}{\partial B_z}\right)^2 \sigma_{B_z}^2} = \sqrt{\left(\frac{1}{B_z}\right)^2 \sigma_{B_r}^2 + \left(-\frac{B_r}{B_z^2}\right)^2 \sigma_{B_z}^2} \quad (10)$$

其中 $\sigma_{B_{r0}}$ 、 $\sigma_{B_{r1}}$ 、 σ_{B_r} 分别为径向磁场本底测量、加载电流测量和扣本底后的标准差； $\sigma_{B_{z0}}$ 、 $\sigma_{B_{z1}}$ 、 σ_{B_z} 分别为轴向场本底测量、加载电流测量和扣本底后的标准差； σ_θ 为磁轴偏角的标准差。 $\sigma_{B_{r0}} = 0.31 \times 10^{-6}$ T, $\sigma_{B_{r1}} = 0.31 \times 10^{-6}$ T, $\sigma_{B_{z0}} = 0.21 \times 10^{-6}$ T, $\sigma_{B_{z1}} = 0.21 \times 10^{-6}$ T, 根据线圈典型工作参数, 取 B_r 为 10^{-4} T, B_z 为 1.25×10^{-4} T, 则

$$\sigma_{B_r} = \sqrt{\sigma_{B_{r0}}^2 + \sigma_{B_{r1}}^2} = 0.44 \times 10^{-6} \text{ T}$$

$$\sigma_{B_z} = \sqrt{\sigma_{B_{z0}}^2 + \sigma_{B_{z1}}^2} = 0.30 \times 10^{-6} \text{ T}$$

$$\sigma_\theta = \sqrt{\left(\frac{1}{B_z}\right)^2 \sigma_{B_r}^2 + \left(-\frac{B_r}{B_z^2}\right)^2 \sigma_{B_z}^2} = 3.5 \times 10^{-5}$$

将待测线圈放置于测磁平台上, 首先测量测量杆的位置坐标, 并作为系统的垂直坐标轴 z , 并将霍尔探头的位置作为原点 O 。调节平台位置调节螺丝, 将线圈中心调至坐标原点。调节平台角度支撑架, 将线圈的三个支撑点中心平面调节至 $\Delta d = \pm 0.01$ mm 内, 此时线圈几何中心平面在坐标系 XOZ 平面上, 即线圈几何轴与测量杆垂直。2.4 m 六轴关节臂的测量精度为 $\delta d = \pm 0.01$ mm, 线圈平面产生的最大角度偏差

$$\Delta\theta = 2(\Delta d + \delta d) / C_G = 9.0 \times 10^{-5} \quad (11)$$

式中: $\Delta\theta$ 即线圈位置的测量精度, 其中 $C_G = 444$ mm 为左右支撑点连线到下支撑平面中心的距离。

总误差 δ_θ 为霍尔探头的测量精度 σ_θ 和线圈位置的测量精度 $\Delta\theta$ 的叠加, 即

$$\delta_\theta = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \Delta\theta^2} = \sqrt{(3.5 \times 10^{-5})^2 + (9.0 \times 10^{-5})^2} = 9.7 \times 10^{-5} \quad (12)$$

径向霍尔片和轴向霍尔片与测量杆之间的安装角度误差, 也会对磁轴偏角测量带来误差。在霍尔片的实际安装过程中, 径向霍尔片平面法线与测量杆做不到完全垂直, 轴向霍尔片平面法线与测量杆做不到完全平行, 所以径向霍尔片会测到部分轴向场, 而轴向霍尔片会测到部分径向场, 具体分析如图6所示。

以线圈中心平面中心位置为原点 O , 线圈几何轴为 z 轴, 线圈中心平面为 XOY 面, 建立直角坐标系。测量杆位于 z 轴上, 径向霍尔片灵敏区位于原点 O 。线圈在中心处产生的磁感应强度为 B , 径向分量最大值为 B_{rm} , 磁轴偏角大小为 θ ; 径向霍尔片实际测量得到的磁感应强度为 B_r^* , 轴向霍尔片实际测量得到磁感应强度为 B_z^* , 根据测量值计算得到的磁轴偏角大小为 θ^* 。设轴向霍尔片法线与测量杆的角度为 α , 径向霍尔片法线与测量杆的角度为 β 。则有以下关系

$$B_z = B \cos\theta \quad (13)$$

$$B_{rm} = B \sin\theta \quad (14)$$

$$B_r^* = B_z \cos\beta + B_r \sin\beta \quad (15)$$

$$B_z^* = B_z \cos\alpha + B_r \sin\alpha \quad (16)$$

测量杆旋转一周径向霍尔片测得的分布为 $B_r^*(\phi)$, 轴向霍尔片测得的分布为 $B_z^*(\phi)$, ϕ 为测量杆旋转角度, 则有

$$B_r^*(\phi) = B_z \cos\beta + B_{rm} \sin\beta \cos\phi \quad (17)$$

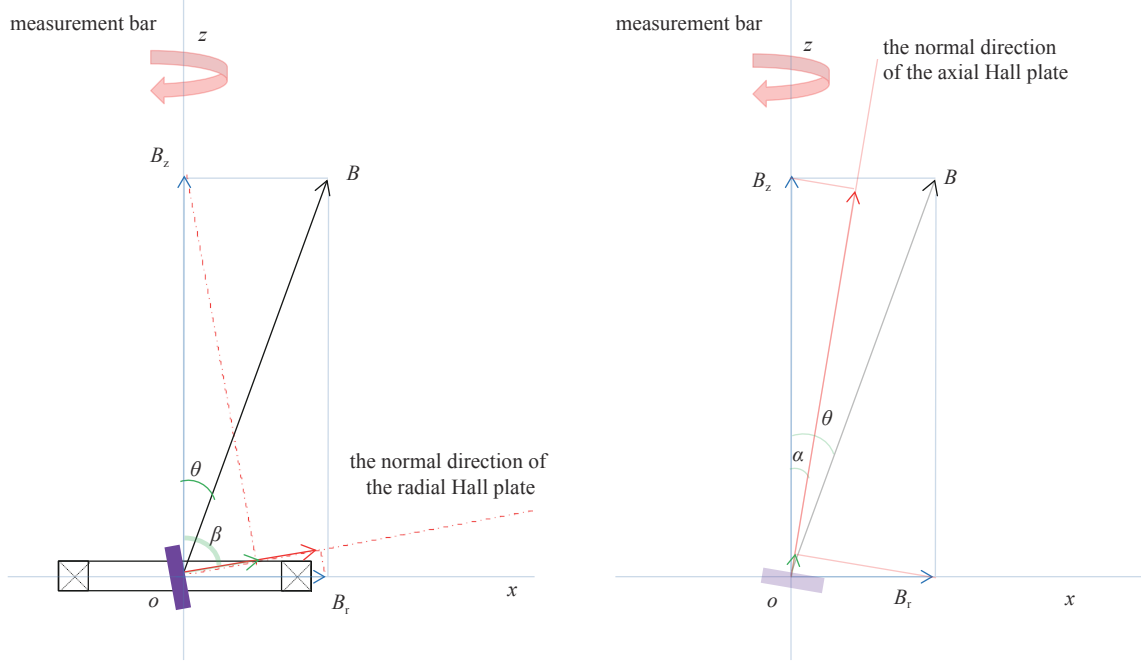


Fig. 6 Vector analysis of magnetic field
图 6 磁场矢量分析

$$B_z^*(\phi) = B_z \cos \alpha + B_{rm} \sin \alpha \cos \phi \quad (18)$$

由径向霍尔片测得分布数据, 可得到 $B_{rm} \sin \beta$, 则

$$\theta^* = \frac{B_{rm} \sin \beta}{B_z^*(\phi)} \quad (19)$$

其中, $\overline{B_z^*(\phi)}$ 为测量杆旋转一周轴向霍尔片测得值的平均值。将式(13)、(14)、(18)代入(19), 简化后为

$$\theta^* = \theta \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} \quad (20)$$

$$\Delta \theta_1 = \frac{\theta^* - \theta}{\theta} = \frac{\sin \beta}{\cos \alpha} - 1 \quad (21)$$

式中: $\Delta \theta_1$ 为由霍尔片安装误差造成的磁轴偏角测量相对误差。设轴向霍尔片的安装误差为 $\Delta \alpha$, 径向霍尔片的安装误差为 $\Delta \beta$, 则有 $\alpha = 0^\circ + \Delta \alpha$, $\beta = 90^\circ + \Delta \beta$ 。

$$\Delta \theta_1 = \frac{\sin(90^\circ + \Delta \beta)}{\cos(0^\circ + \Delta \alpha)} - 1 = \frac{\cos \Delta \beta}{\cos \Delta \alpha} - 1 \quad (22)$$

磁轴偏角的测量值与实际值之间的相对误差与霍尔片的安装角度误差之间的关系如图 7 所示, 其中, x 轴表示径向霍尔片的安装误差 $\Delta \beta$, y 轴表示轴向霍尔片的安装误差 $\Delta \alpha$, z 轴表示磁轴偏角测量相对误差 $\Delta \theta_1$ 。可见, 在霍尔片安装误差在 $\pm 1^\circ$ 之内时, 测量得到的磁轴偏角大小与实际磁轴偏角大小之间的相对误差范围 $\Delta \theta_1 \in (-0.015\%, 0.015\%)$ 。由于霍尔片安装角度误差可以控制在 $\pm 1^\circ$, 且线圈的磁轴偏角在 mrad 量级, 故由霍尔片安装误差造成的磁轴偏角绝对误差在 10^{-7} 数量级, 相对于霍尔探头的测量误差造成的磁轴偏角测量误差 $\sigma_\theta = 3.5 \times 10^{-5}$ 和线圈几何轴测量误差造成的磁轴偏角测量误差 $\Delta \theta = 9.0 \times 10^{-5}$ 小两个数量级, 故可忽略。

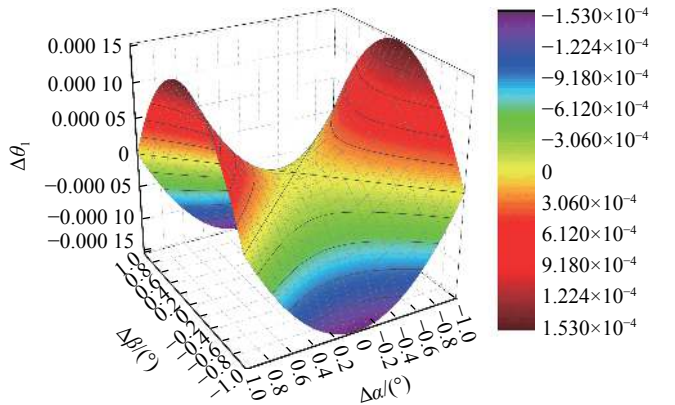


Fig. 7 Angle relative error between the coil magnetic field axis and the geometric symmetrical axis due to Hall plates installation error
图 7 霍尔片安装误差引起的磁轴偏角测量相对误差

3 测量结果与讨论

该装置首次用来测量 SRing 电子冷却装置冷却段线

圈样机。线圈样机采用 $7\text{ mm}\times 7\text{ mm}/\phi 4\text{ mm}$ 外方内圆无氧铜空心导线绕制, 导线外部用聚酰亚胺绝缘包裹, 并用玻璃丝带缠绕, 以便环氧浇注。浇注前把绕制完成的 3 个单饼线圈通过工装对齐, 每饼线圈之间垫放饼间环氧垫板, 合为一个线包。线包外表面使用玻璃丝带缠绕。线包合好后安装支撑座组件, 并在支撑座组件的凹槽处垫放 G10 垫块, 之后再将线圈进行整体浇注。浇注完成后精确加工支撑座基准面, 并在左右支撑中心面刻线。放置于测磁平台上的线圈如图 8 所示。

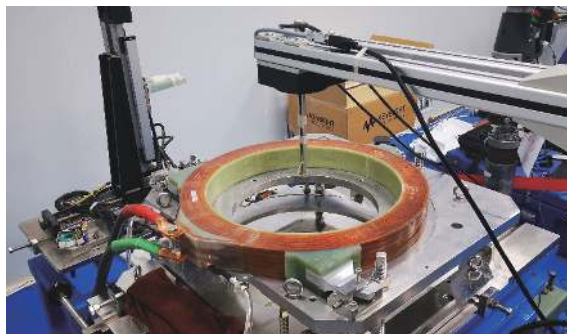


Fig. 8 Photo of coil on the magnetic field measurement

图 8 位于测磁平台上的线圈照片

开始时, 首先关闭线圈供电电源, 测量环境磁场的分布数据。通过多次测量, 分别计算环境磁场轴向分量的平均值和不同方位角径向分量的平均值。在之后的测量中, 环境磁场的平均值将作为本底予以扣除。完成本底测量之后, 开始给线圈施加不同电流分别多次测量磁场分布。由于在 SRing 电子冷却装置运行时冷却段为直流运行, 不会改变纵向磁场强度, 因此仅测量不同电流下的静态磁场分布, 而不考虑磁场改变过程中的磁轴变化。

理论上径向霍尔探头测得读数 B_r^* 与旋转测量杆旋转角度 ϕ 的函数关系为

$$B_r^*(\phi) = B_{rm} \cos \phi + B_z \cos \beta + d \quad (23)$$

式中: d 为霍尔探头的零点漂移。 β , d 为常数, 磁场稳定后 B_{rm} 和 B_z 也为常数, 因此, 将径向磁场分布测量数据用函数

$$y = a \cos(x + b) + c \quad (24)$$

拟合, 得到参数 a , b , c 。其中 a 为磁场径向分量幅值 B_{rm} , $-b$ 为磁场径向分量最大值方位角, 拟合环境本底磁场时, c 为霍尔探头的零点漂移, 拟合线圈径向磁场数据时, c 为径向霍尔探头安装误差而测到的部分磁场轴向分量。

环境磁场本底测量数据如图 9 所示。图(a)为径向磁场分量随方位角的分布, 10 次测量数据的平均值在图中用黑色散点表示, 误差棒表示 10 次测量的标准差, 蓝色曲线为平均后的数据以式(24)拟合得到的曲线。可以看出, 测量数据与所选的拟合函数符合的很好。测量得到的环境磁场方向为从南指向北, 幅值大小约为 $0.22 \times 10^{-4}\text{ T}$, 主要来源于地磁场。图(b)为轴向磁场随方位角的分布, 10 次测量数据的平均值在图中用黑色散点表示, 误差棒表示 10 次测量的标准差。

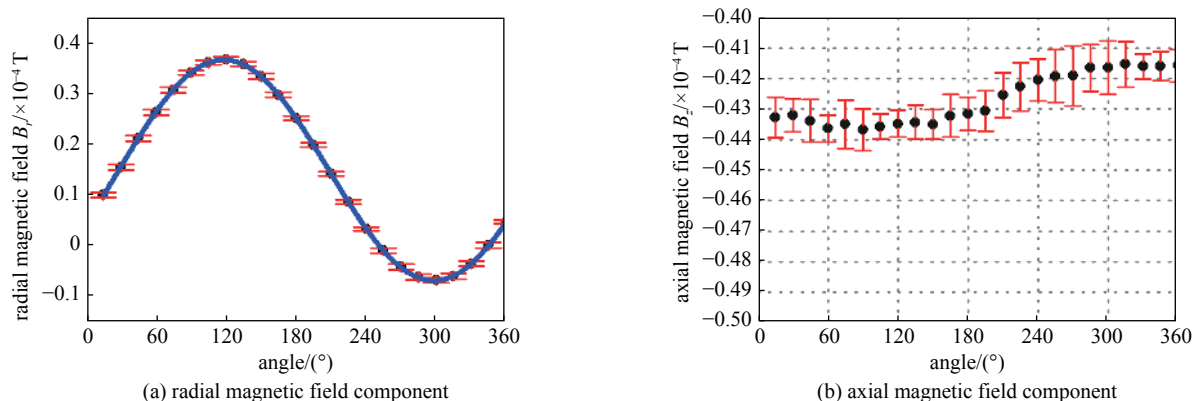


Fig. 9 Background magnetic field measurement result

图 9 本底磁场测量结果

之后, 线圈加载 125 A 电流, 重新测量轴向和径向磁场的分布数据, 通过 10 次测量, 分别计算磁场在轴向的磁场分量和不同方位角的径向磁场分量的平均值, 扣除相应的本底后, 结果如图 10 所示。图(a)为径向磁场分量随方位角的分布, 径向分量的分布数据在图中用黑色散点表示, 误差棒表示 10 次测量的标准差, 蓝色曲线为数据以式(24)拟合得到的曲线。拟合结果为 $a = 0.16782 \pm 0.00061$, $b = 79.46459 \pm 0.21472$, $c = 0.02012 \pm 0.00043$ 。即磁场径向分量幅值为 $B_r = (0.16782 \pm 0.00061) \times 10^{-4}\text{ T}$, 径向磁场分量最大值偏向 -79° 。图(b)为轴向磁场随方位角的分布, 10 次测量数据的平均值在图中用黑色散点表示, 误差棒表示 10 次测量的标准差。测得轴向磁场为 $B_z = (-130.859 \pm 0.023) \times 10^{-4}\text{ T}$ 。由式(7)、(12)可知, 线圈磁轴偏角大小为 $\theta = (1.28 \pm 0.10)\text{ mrad}$ 。由于 B_z 为负, 磁轴偏向

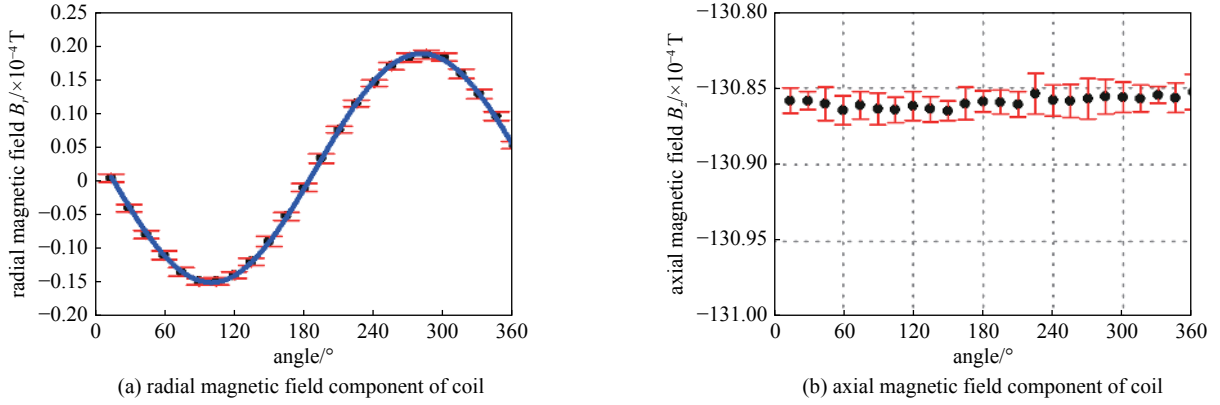


Fig. 10 Magnetic field measurement of one coil with the current of 125 A (front side)

图 10 线圈在 125 A 电流下的磁场测量结果(正面)

与径向磁场分量最大值偏向反向,为 101° 。

完成上述测量之后,将线圈沿 y 轴旋转 180° ,重新加载 125 A 电流,测量轴向和径向磁场分布。扣除本底后的分布如图 11 所示。拟合得到参数 $a = 0.17749 \pm 0.00108$, $b = -66.74765 \pm 0.34826$, $c = -0.0447 \pm 0.00078$,即磁场径向分量幅值为 $B_r = (0.17749 \pm 0.00108) \times 10^{-4} \text{ T}$,径向磁场分量最大值偏向 67° 。测得轴向磁场为 $B_z = (131.322 \pm 0.013) \times 10^{-4} \text{ T}$ 。由式(7)、(12)可知,线圈磁轴偏角大小为 $\theta = (1.35 \pm 0.10) \text{ mrad}$ 。由于 B_z 为正,磁轴偏向与径向磁场分量最大值偏向一致,为 67° 。

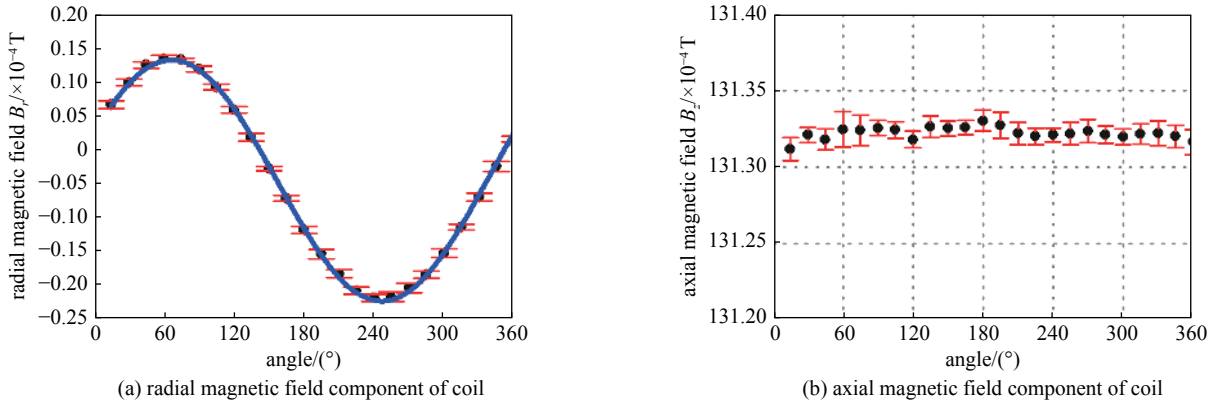


Fig. 11 Magnetic field measurement of one coil with the current of 125 A (opposite side)

图 11 线圈在 125 A 电流下的磁场测量结果(反面)

从正反面测量结果来看,磁轴偏角大小符合,径向磁场最大值偏向关于 y 轴基本对称,证明采用该平台测量高精度线圈磁轴偏角的可行性。为了进一步分析线圈的磁轴偏角,测量了不同电流下的磁轴偏角和径向磁场最大值方向,结果如图 12 所示。由式(10)可知, B_z 越小, σ_θ 越大,即线圈加载电流值较小时,测量结果误差较大,与测量结果基本一致。

测得磁轴偏角大小为 $(1.28 \pm 0.10) \text{ mrad}$,磁轴偏向为 101° 时,由式(3)、(4)可得,线圈外沿最大偏移 $(0.40 \pm 0.03) \text{ mm}$,理论上可将磁轴偏角调节到 0,偏移量小于 0.75 mm ,线圈合格。

4 结 论

用旋转霍尔探头测量方法测得 HIAF 电子冷却装置冷却段高精度线圈磁轴偏角,正反面两次测量结果磁轴偏角大小一致,径向磁场最大值朝向关于翻转轴对称,测量方法和测量结果可信。根据理论计算和实际测量,该磁轴测量装置测量磁轴偏角精度达到 $\pm 0.10 \text{ mrad}$,满足 HIAF 电子冷却装置冷却段线圈磁轴偏角测量要求。样品线圈磁轴偏角 $(1.28 \pm$

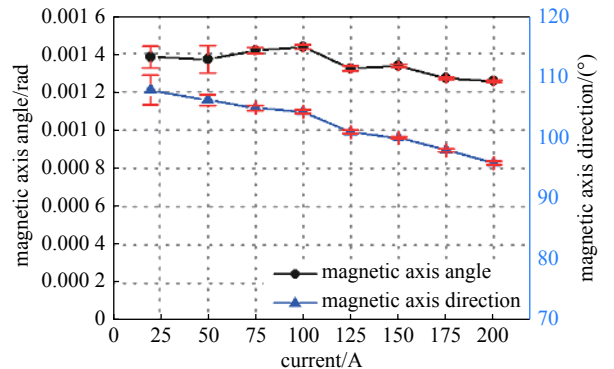


Fig. 12 Measurement results of magnetic field axis angle and direction with different operation current

图 12 不同电流下磁轴偏角大小和偏向测量结果

0.10) mrad, 磁轴偏向 101° 方向, 理论上线圈在可调范围内可将磁轴偏角调节到 0, 满足 HIAF 电子冷却装置冷却段线圈的设计要求。

参考文献:

- [1] Yang Jiancheng, Xia Jiawen, Xiao Guoqing, et al. High intensity Heavy Ion Accelerator Facility (HIAF) in China[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2013, 317: 263-265.
- [2] Mao Lijun Li Jie, LuHaijiao, et al. The electron cooling system for HIAF project in China[C]//Proc of COOL'2019. 2019: 15-17.
- [3] SchmoKiller T, Zwignagel G, Toepffer C. Numerical simulaion of the adiabatic acceleration of electron beams[J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, 2000, A441: 50-53.
- [4] 杨晓东, 何源, 赵红卫, 等. HIRFL-CSR电子冷却装置高精度螺线管线圈制作及磁场测量[J]. *强激光与粒子束*, 2001, 13(5): 649-652. (Yang Xiaodong, He Yuan, Zhao Hongwei, et al. Manufacture and magnetic field measurement of high precision solenoid coils for HIRFL-CSR electron cooling device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, 13(5): 649-652)
- [5] Bocharov V N, Bublei A V, Konstantinov S G, et al. Precision measurements and compensation for the transverse components of the solenoids' magnetic field[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2005, 48: 772-779.
- [6] 杨晓东, Parkhomchuk V V. HIRFL—CSR实验环电子冷却装置参数优化[J]. *强激光与粒子束*, 2000, 12(6): 771-775. (Yang Xiaodong, Parkhomchuk V V. Parameters optimization of HIRFL-CSR experiment ring electron cooling device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2000, 12(6): 771-775)
- [7] Parkhomchuk V V, Skrinsky A N. Electron cooling: 35 years of development[J]. *Physics-Uspekhi*, 2000, 43(5): 433-452.
- [8] Tranquille D, Joergensen L V, Luckin D, et al. The CERN-ELENA electron cooler magnetic system[C]//9th International Particle Accelerator Conference. 2018: 842-845.
- [9] 冒立军, 杨晓东, 李杰, 等. HIRFL-CSR实验环电子冷却装置磁场测量[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(7): 1106-1110. (Mao Lijun, Yang Xiaodong, Li Jie, et al. Magnetic field measurement of HIRFL-CSR experimental ring electron cooling device[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(7): 1106-1110)
- [10] Bocharov V, Bublei A, Konstantinov S, et al. Precise measurements of a magnetic field at the solenoids for low energy coolers[C]//AIP Conference Proceedings. 2006.
- [11] Antokhin E I, Bocharov V N, Bublei A V, et al. Conceptial project of an electron cooling system at an energy electrons of 350 keV[J]. *Nucl Instr & Meth in Phys Res*, 2000, A441: 87-91.