

文章编号: 1001-4322(2001)05-0649-05

# HIRFL-CSR 电子冷却装置高精度螺线管 线圈制作及磁场测量\*

杨晓东<sup>1</sup>, 何 源<sup>1</sup>, 赵红卫<sup>1</sup>, 袁 平<sup>1</sup>,  
王志学<sup>1</sup>, 韩少斐<sup>1</sup>, 王保成<sup>2</sup>, 康明涛<sup>2</sup>, 赵吉祖<sup>2</sup>

(1. 中国科学院 近代物理研究所, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州电机集团有限责任公司 电机研究所, 甘肃 兰州 730050)

**摘 要:** 采用特殊工艺制作了HIRFL-CSR 电子冷却装置冷却段高精度螺线管线圈, 两个产生反向磁场的线圈同轴、平行地放置在特制的测量装置上, 高精度霍尔探头位于测量装置中心平面上, 探头测量面与测量装置轴线重合, 测量单个线圈磁场的横向分量, 调节线圈几何轴相对于测量装置轴线的夹角, 测得线圈磁轴的偏角小于 $1 \times 10^{-3}$ 。

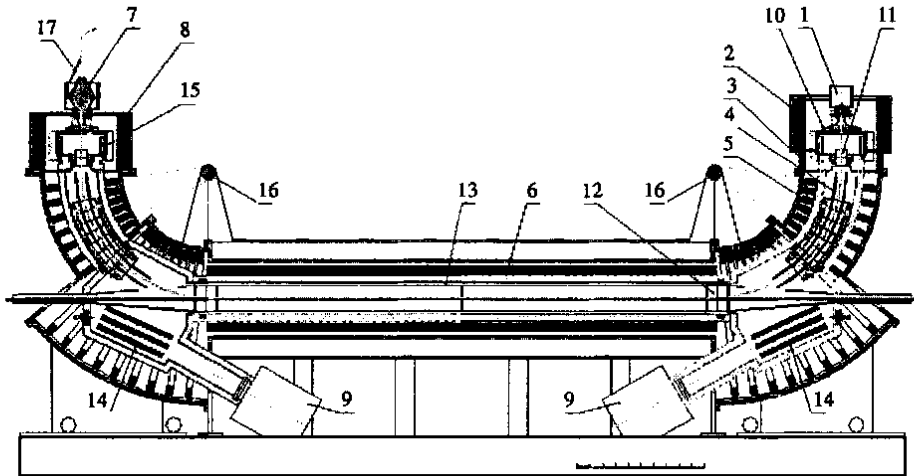
**关键词:** 线圈; 磁场平行度; 磁场测量; 高精度螺线管

中图分类号: TL 503.91

文献标识码: A

正在建造中的兰州重离子加速器电子冷却储存环<sup>[1]</sup>(HIRFL-CSR)由主环、实验环组成, 主环用于离子束的累积、加速, 实验环用于内靶实验, 每个环有一个改善离子束品质的电子冷却装置<sup>[2]</sup>。为了缩短冷却时间, 要求电子冷却装置冷却段直螺线管产生的磁场平行度好于 $1 \times 10^{-4}$ <sup>[3]</sup>。冷却段采用饼形线圈按照一定间距排列, 产生平行度好于 $1 \times 10^{-4}$ 的纵向磁场<sup>[4]</sup>。

## 1 电子冷却装置的结构



1. electron gun; 2 main solenoid of the gun; 3 auxiliary solenoid of the gun; 4 electrostatic deflector; 5 toroid; 6 cooling section solenoid; 7 collector; 8 main solenoid of the collector; 9 ion pumps; 10 compensation coil; 11 titan sputter; 12 pickup electrodes; 13 vacuum chamber; 14 getter pumps; 15 heating jackets; 16 hinge; 17. cooling system of the collector

Fig 1 General arrangement of CSR electron cooling device at electron energy of 35keV

图1 电子冷却装置结构图

\* 收稿日期: 2000-11-20; 修订日期: 2001-05-25

基金项目: 国家重大科学工程 HIRFL-CSR 冷却储存环项目资助

作者简介: 杨晓东(1966-), 男, 甘肃天水人, 博士, 副研, 从事加速器物理及技术研究; yangxd@hirfl.lzb.ac.cn; 兰州31信箱。

如图1所示,HRFL-CSR 电子冷却装置<sup>[5]</sup>主要包括电子枪、加速段、冷却段、减速段、收集器,这些元件放置在由电子枪直螺线管、加速段直螺线管、电子枪端弯曲螺线管、冷却段直螺线管、收集器端弯曲螺线管、减速段直螺线管及收集器直螺线管产生的磁场中。磁场方向与电子运动方向相同。

## 2 线圈结构及安装

每个饼形线圈为6层,每层6匝,共36匝,由尺寸为 $7\text{mm} \times 7\text{mm} \times 4\text{mm}$ 的外方内圆铜导线绕制而成,线圈内直径为 $0.40\text{m}$ 。相邻两层为反向螺旋,层与层平滑过渡。线圈外有三个用于调节单个线圈相对于电子冷却装置冷却段轴线角度的支撑装置,在制作过程中,这三个支撑的中心面与线圈的几何中心面重合,与线圈成刚性连接,成为一体,调节这个平面即可改变单个线圈相对于电子冷却装置冷却段轴线的角度,从而调节该线圈产生的磁场的方向。

HRFL-CSR 电子冷却装置冷却段长 $4\text{m}$ ,由68个饼形线圈组成,线圈间距为 $0.015\text{m}$ ,每个线圈厚度为 $0.0575\text{m}$ ,所有的线圈被安装在铁磁材料的基座上,与线圈结构相对应,基座有三个与线圈三个支撑配合的平面,上面的两个平面在 $4\text{m}$ 长范围内误差不大于 $0.05\text{mm}$ ,外侧为带有双向调节能力的固定装置,用于调节每个线圈相对于系统几何轴的角度,下面的支撑将承受线圈的重量,可以调节线圈的高低位置。安装之前,用下述方法测量每一个线圈的磁轴偏角,初步调整线圈角度,使得每个线圈磁轴偏角小于 $1 \times 10^{-3}$ ,并记录该结果,将线圈按照测量结果给出的调节量安装在基座上,用磁针方法<sup>[6]</sup>测量沿冷却段几何轴线的磁场分布,根据这个结果,将线圈重新排列,利用磁场叠加原理,将磁轴偏角相反的线圈相邻放置,以获得最佳的磁场分布。最后微调线圈的角度,测量冷却段几何轴线的磁场分布,反复多次,可获得磁场平行度好于 $1 \times 10^{-4}$ 的磁场。

## 3 磁场测量方法及装置

两个线圈同轴、平行放置,间距为 $0.02\text{m}$ ,霍尔探头固定于两个线圈的中心平面,平行通过轴线。两个线圈串联,由一台电源供电,这样,两个线圈产生方向相反的磁场,轴向分量相互抵消。如果固定的线圈的磁场轴线与测量装置的几何轴线重合,那么霍尔探头测到的是上面的可动线圈的横向分量。由于霍尔探头的位置是固定的,所以只能测量到垂直于霍尔探头面的磁场,当上面的线圈旋转时,测量结果为一个近似的正弦形状,即磁场在两个线圈中心平面上(图2中middle plane)的投影正好垂直于霍尔探头面时,出现峰值,峰值的方向表示面向或背向霍尔探头面。

测量中所采用的霍尔探头工作电流为 $50\text{mA}$ ,此时灵敏度为 $229.4\text{mV/T}$ ,测量区域为 $0.5\text{mm} \times 1.25\text{mm}^2$ ,灵敏度随温度的变化小于 $0.01\%$ 。霍尔探头工作电流由标准恒流源提供,其电流稳定性为 $\pm 1 \times 10^{-5}/24\text{h}$ 。霍尔电压用高精度数字电压表测量。另外在测量电路中串联了阻值为 $1\Omega$ 的标准电阻,用数字多用表测量标准电阻两端的电压,以监测霍尔探头工作电流的稳定性。

测量之前用核磁共振法<sup>[7]</sup>对霍尔探头进行标定。标定用的标准磁铁在磁感应强度 $1.8\text{T}$ 时,磁场均匀度 $\Delta B/B < 1 \times 10^{-5}$ ,磁场稳定度好于 $1.2 \times 10^{-5}/0.5\text{h}$ 。标定霍尔探头所用的NMR 数字高斯计的分辨率为 $10^{-6}\text{T}$ ,精度为 $5 \times 10^{-6}$ 。标定时,将NMR 探头和待校准的霍尔探头处在均匀磁场的同一位置(标准磁铁的磁场中心),并同时获取磁感应强度 $B$ 和霍尔电压 $V_H$ 。改变标准磁铁的电流,得到一组对应的 $V_H-B$ 测量值,用最小二乘法将所有的测量数据拟合成10阶多项式,得到的拟合值与各点实测值的相对误差最大不超过 $\pm 0.5 \times 10^{-4}$ 。

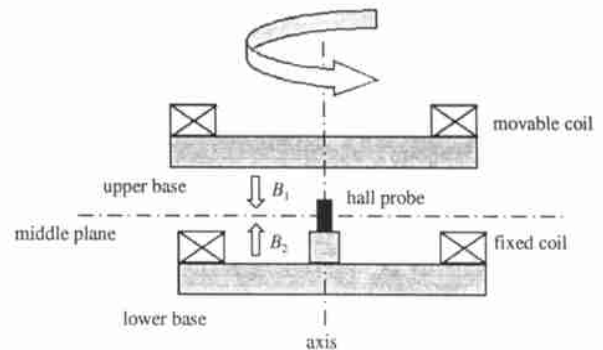


Fig 2 Measurement setup

图2 测量原理图

取霍尔探头磁屏蔽时霍尔电压的平均值作为零点漂移电压, 在计算时消除掉霍尔电压漂移和接触电势的影响, 这样影响测量结果的因素只有霍尔探头工作电流的漂移、霍尔电压的测量精度和霍尔系数的温度漂移。磁场测量值的相对误差<sup>[8]</sup>可由下式求出

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{\Delta V_H}{V_H} + \frac{\Delta I_H}{I_H} + \frac{\Delta K_H}{K_H} \tag{1}$$

霍尔探头工作电流  $I_H = 50\text{mA}$  时电流稳定度  $\Delta I_H$  小于  $0.5\mu\text{A}$ 。在实际测量过程中, 一个测量周期所用的时间不到  $5\text{min}$ , 在这个时间内环境温度的变化量不超过  $0.1^\circ\text{C}$ , 霍尔片温度系数是  $1 \times 10^{-4}/^\circ\text{C}$ , 那么霍尔系数  $K_H$  的误差  $\Delta K_H$  为  $1 \times 10^{-5}$ 。测量值始终在零磁场附近, 因此霍尔电压  $|V_H| < 3\text{mV}$ , 数字电压表在  $3\text{mV}$  量程、 $5\text{分钟} \pm 1$  时的精度  $\Delta V_H$  为  $\pm$  (读数的  $5\text{ppm} +$  量程的  $9\text{ppm}$ ), 由以上数据计算得

$$\frac{\Delta V_H}{V_H} < 1.4 \times 10^{-5}, \quad \frac{\Delta I_H}{I_H} = 10^{-5}, \quad \frac{\Delta K_H}{K_H} = 1 \times 10^{-5}$$

所以  $\frac{\Delta B}{B} < 1.4 \times 10^{-5} + 1 \times 10^{-5} + 1 \times 10^{-5} = 3.4 \times 10^{-5}$

由此可知, 实际的磁场测量相对不稳定性小于  $3.4 \times 10^{-5}$ 。

### 4 结果与讨论

首先测量环境的本底磁场, 图3为测量结果, 可以看出, 在线圈未加电流时, 环境本底约为  $0.644 \times 10^{-4}\text{T}$ 。其次, 测量并确定参考线圈磁轴相对于测量装置中心轴之间的角度, 将该角度调节到最小, 认为此时参考线圈磁轴与测量装置中心轴重合。

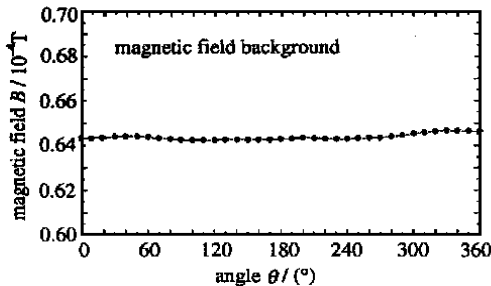


Fig 3 Magnetic field background of the measurement environment

图3 测量环境的磁场本底

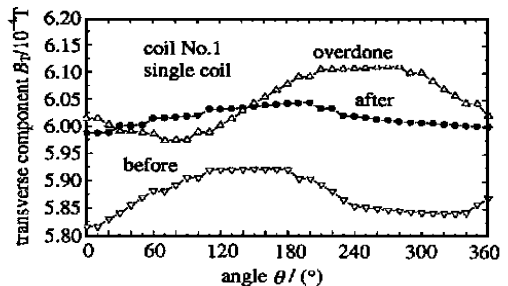


Fig 4 Measurement result of No. 1 coil in the case of one coil

图4 单个线圈(第一号)的测量结果

将一个线圈放置在可转动的上支撑平面, 该平面与下参考面同轴、平行。当这个线圈施加  $87\text{A}$  的电流时, 测得磁场纵向分量为  $0.0105\text{T}$ , 旋转线圈, 测量横向分量, 获得图4所示的结果, 图中空心上三角所示为未调整线圈角度之前磁场横向分量随方位角的变化, 实心圆所示为调节之后的结果, 空心下三角所示为过调整后的结果, 可以看出, 过调整后, 所测得的波形变为调整前的反向, 说明线圈磁场轴从一个方向变为相反方向。将该线圈移至下支撑平面, 保持最佳结果时线圈的三个支撑处的调节量, 这个线圈即为参考线圈, 在上支撑平面放置被测线圈。

图5为第二号、第三号线圈的测量结果, 调整线圈之前, 磁场的横向分量, 即所测得的峰值约为  $0.2 \times 10^{-4}\text{T}$ , 调整线圈之后, 磁场的横向分量为  $0.02 \times 10^{-4}$ , 磁场轴相对于测量装置中心轴的角度为  $2 \times 10^{-4}$ 。图6为两个电流值下第三号线圈横向分量的测量结果, 当电流为  $200\text{A}$  时, 磁场纵向分量为  $0.0241\text{T}$ , 相应的横向分量为  $0.1 \times 10^{-4}\text{T}$ 。

从理论上讲, 如果霍尔探头精确地位于两个线圈的中心平面, 探头平面平行地通过轴线, 则测量值在零点波动。由于霍尔探头的安装位置、角度存在偏差, 将会引入一个固定的值; 另外, 如果测量支架的两个参考面不平行, 也将产生误差; 第三, 对于参考线圈而言, 在上参考面调整到最佳时, 移动到下参考面, 如果两个参考面之间存在偏差, 实际上就是参考线圈未放置到理想位置和角度, 也将引入一个固定的值。

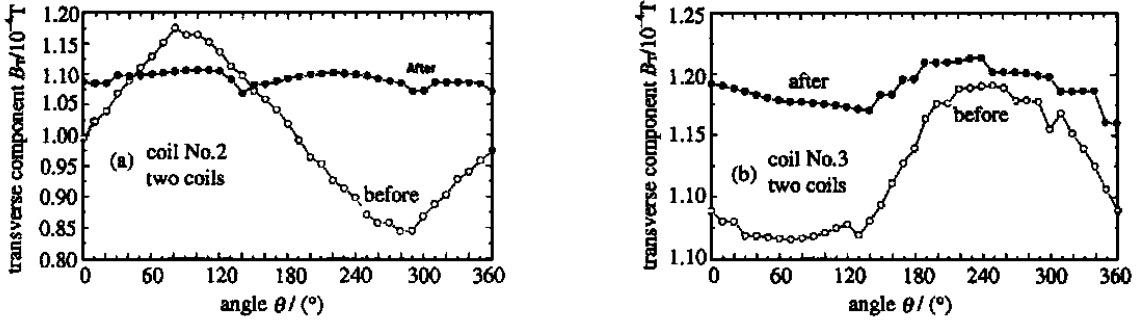


Fig 5 The transverse components of magnetic field of No. 2 and No. 3 coil as a function of azimuth before and after adjustment in the case of two coils

图5 调节线圈角度前后第二号和第三号线圈磁场横向分量沿方位角的变化

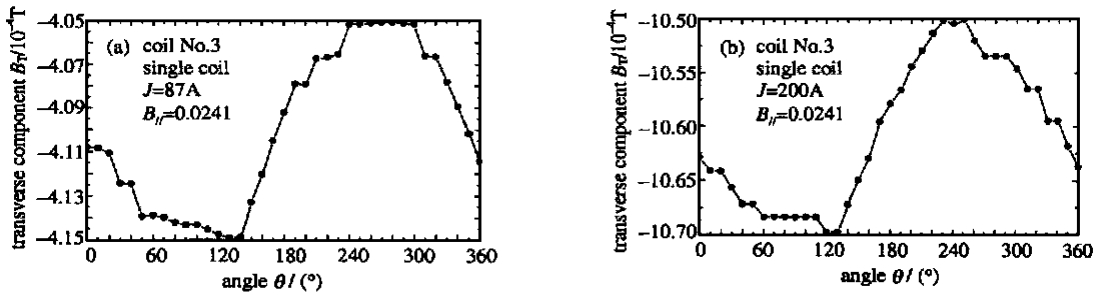


Fig 6 The transverse component of magnetic field of No. 3 coil as a function of the azimuth in the case of one coil

图6 第三号线圈磁场横向分量沿方位角的变化

## 5 结论

采用特殊工艺制作的高精度螺线管线圈,通过调节线圈三个支撑相对于测量装置基准平面的高度,改变了线圈磁场轴相对于测量装置中心轴的角度,使得该角度小于 $1 \times 10^{-3}$ ,满足电子冷却装置的设计要求,为获得平行度好于 $1 \times 10^{-4}$ 的磁场提供了保证。

## 参考文献:

- [1] 夏佳文,詹文龙,魏宝文,等.兰州重离子冷却储存环工程[J].原子核物理评论,2001,18(1):35—38 (Xia J W, Zhan W L, Wei B W, et al Heavy ion ring project in Lanzhou *Nuclear Physics Review*, 2001, 18(1): 35—38)
- [2] Bosser J. Electron cooling in CAS CERN accelerator school fifth advanced accelerator physics course[R]. Geneva: 1995. 673—730
- [3] 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 X D, Parkhomchuk V V. Parameters optimization of HIRFL-CSR experiment ring electron cooling device *High power laser and particle beams*, 2000, 12(6): 771—775)
- [4] Antokhin E I, Bocharov V N, Buble A V, et al Conceptual project of an electron cooling system at an energy electrons of 350 keV [J]. *Nucl Instr & Meth in Phys Res*, 2000, A441: 87—91
- [5] Sukhina E I, Antokhin E I, Bocharov V N, et al Projects of an electron cooling system at an energy of electrons of 35 and 350 keV for MP(Lanzhou, China) [A]. Proceedings of European Particle Accelerator Conference[C], Vienna Austria: 2000. 2480—2482
- [6] Arapov L N, Dikansky N S, Kokoulin V I, et al Precision solenoid for electron cooling [A]. Proceedings of the XIII International Conference on High Energy Accelerators[C], Novosibirsk: 1986, 1: 341—344
- [7] 毛振珑, 杨成林, 何有余, 等. 磁场测量[M]. 北京: 原子能出版社, 1985. (Mao Z L, Yang C L, He Y Y. *Magnetic Field Measurement* Beijing: Atomic Energy Press, 1985)
- [8] 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. (He Y. Improvement of Magnetic Field measurement System of HIRFL and Measurement Scheme for CSR. Lanzhou: Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, 1999)

## Manufacture and magnetic field measurement of high precision solenoid coils for HIRFL-CSR electron cooling device

YANG Xiao-dong<sup>1</sup>, HE Yuan<sup>1</sup>, ZHAO Hong-wei<sup>1</sup>, YUAN Ping<sup>1</sup>, WANG Zhi-xue<sup>1</sup>,  
HAN Shao-fei<sup>1</sup>, WANG Bao-cheng<sup>2</sup>, KANG Ming-tao<sup>2</sup>, ZHAO Ji-zu<sup>2</sup>

(1. Institute of Modern Physics, the Chinese Academy of Sciences, P. O. Box 31, Lanzhou 730000, China;

2. Institute of Electromotor, Lanzhou Electric Corporation, Lanzhou 730050, China)

**Abstract** The prototypes of high precision solenoid coils in electron cooling device of HIRFL-CSR were fabricated by special techniques. Two coils were placed in two parallel, concentric planes, the lower coil was fixed, and the upper coil can rotate concentrically. The transverse component of magnetic field of each coil was measured with the high resolution Hall sensor. The deviation between magnetic axis of coils and geometric axis of reference plane was less than  $1 \times 10^{-3}$  after adjustment. The device meets the requirement of a magnetic field with a depth of parallelism better than  $1 \times 10^{-4}$ .

**Key words** coil; magnetic field parallelism; magnetic field measurement; high precision solenoid

### 《强》刊编辑部参加科技期刊研讨会

2001年8月20日,由陕西省和湖北省科技期刊编辑学会发起的科技期刊研讨会在银川召开,《强》刊编辑部派代表参加了此次研讨会并畅谈了《强》刊办刊经验。本次会议以中国加入WTO后科技期刊面临的挑战为主要议题,强调WTO的市场化和产业化规则对我国科技界、文化界的冲击和影响同样是深刻的。通过参加本次会议我们意识到:《强》刊的编辑们既要有危机意识,努力拓展编辑个人思路与刊物的生存空间,“因刊制宜”找准自己的位置,加快培育刊物的“造血机能”;更应努力抓住新的发展机遇,认真学习、借鉴国内外期刊先进的经营理念与出版印刷技术,使《强》刊做到内容好与形式美的结合,在期刊界和学术界创出自己的品牌。《强》刊的广大作者们、编委们要立足本领域,努力专研,写出高质量的文章,积极宣传《强》刊,为进一步提高刊物的知名度和影响力出一份力。(《强》刊编辑部 郝晋)