

LEI

高精度多探头磁场测量系统

龙 敖 焦天枢 常 力 常更福 党建荣 郭克钧
张长栓 吴贵恒 于文杰 张国斌 王文玲

(中国科学院近代物理研究所)

摘 要

兰州重离子研究装置的磁场测量系统已于1983年10月建立。多探头长臂上装有94个霍尔片。测磁支架采用由长臂、动环和定环组成的以加速器几何中心为原点的极坐标系结构。由小型计算机承担自动控制和数据的获取与处理工作。对16KG磁场,本系统的测量重复性好于 $\pm 5 \times 10^{-5}$,测量精确度估计为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。测量速度约为每分钟188个数据。

一、概 论

兰州重离子加速器是一台以等时性分离扇迴旋加速器为主加速器的组合系统。为了在调束前建立不同荷质比、不同能量离子的等时场数据库,必须建造一台测量精确度接近

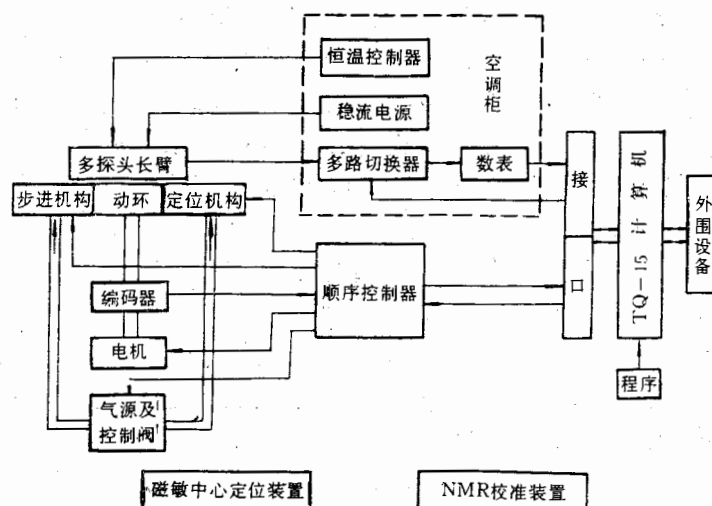


图1 测量系统方框图

1×10^{-4} 的磁场测量系统。在加速器领域内, 磁场测量精确度的国际先进水平 70 年代已达 1×10^{-4} ^[1]。80 年代仍停留在这个水平, 但在自动化和小型化方面得到了进一步改善。为适应分离扇迴旋加速器磁极气隙小(可用气隙约 6.6cm) 而面积大(束运面积约 34.5m²) 这一情况, 我们采用霍尔效应法进行测量, 其测磁支架结构比线圈法的简单得多。由于待测数据很多, 为缩短测量时间, 测量系统采用多探头。整个系统由三部分组成: 探头及其校准装置; 测磁支架及其控制器; 数据获得取与处理装置。系统方框图示于图 1。

系统于 1983 年 10 月建成并已用于第一扇原型磁铁测试工作。实验表明, 系统的测量重复性对 15kG 磁场约为 $\pm 2.5 \times 10^{-5}$, 好于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。估计测量精确度为 ± 1.6 高斯, 即对 16kG 磁场约为 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。测量速度约为每分钟测量 188 个几何点的磁场值。

二、探头及其校准

探头是整个系统的核心。测量精确度主要取决于探头及其附属电子仪器, 其次取决于测磁支架。

在 1/4 模型磁铁上, 我们采用单探头^[2]。单探头在按极坐标系设计的测磁支架上作 r, θ 二维步进运动。原型磁铁应测量的数据比模型增加了许多倍, 故我们选用多探头方案^[3]。这样, 不但可以缩短测量时间, 而且进一步简化了测磁支架的结构, 使之成为一维运动机构。与线圈法相比, 霍尔元件尺寸小、无运动部件; 但存在着灵敏度对环境温度依赖性较大、霍尔电压与磁场之间的非线性比较显著这两个缺点。下面我们将会看到, 只要采取适当措施克服这些缺点, 霍尔效应法也可以达到或接近线圈法的测量精确度。

我们的多探头长臂^[4]上装有 94 个 SBV601-S1 型十字形霍尔片, 材料为 InAsP, 霍尔常数的温度系数 $\beta \approx -(3-7) \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 。霍尔片按磁敏中心分布在以机器中心为零点的半径 $r = 840-3420\text{mm}$ 范围内。靠近长臂小半径 ($r = 840-1440\text{mm}$) 和大半径 ($r = 2880-3420\text{mm}$) 两端, 霍尔片磁敏中心间距为 20mm, 中间部分间距则为 40mm。94 个霍尔片分装在四个恒温盒中。在专门的磁敏中心定位装置上, 对每个恒温盒中的全部霍尔片按预定位置进行定位。定位后用 502 胶粘贴在紫铜均热板上, 使其具有良好的热接触。感温元件也作类似处理。均热板置于加热器上。加热器用双股锰铜电阻丝按无感式绕制。均热板和加热器固定在环氧玻璃钢制的盒内, 上面覆盖泡沫塑料板和有机玻璃板。对较长的恒温盒, 将均热板和加热器分为二、三段。四个恒温盒共有八段加热器及均热板。对霍尔片进行核磁共振 (NMR) 校准后, 将四个恒温盒固定在主要由环氧玻璃制成的框架中。这就构成了多探头长臂 (见图 2 照片)。长臂采用高强度非导体材料, 是为了避免因导体在梯度磁场中运动而产生的涡流阻滞力。

八个恒温控制器为 TDC-500A 型。恒温盒内温度控制在 35 $^{\circ}\text{C}$ 附近, 控温精度约为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。这样, 由于温度变化而引起的误差贡献减小到 $\pm 1 \times 10^{-5}$ 以下。因此霍尔效应法的最大缺点得到了克服。94 个霍尔片的激励电流用 382A 型稳流电源串联供电, 电流为 280mA。电流稳定度为 $\pm 5 \times 10^{-5}/\text{月}$ 。94 个霍尔片输出的霍尔电压和监测激励电流的分流器分压, 输入到 3 系列 (3300 型) 模拟量多路切换器。切换器有 100 路, 噪声

1 μV
7075
(须
来。
口输
好于
响。
针的
机构
精度
前。

代已
(善.
5m²)
于待
及其

的测
: 1.6
磁场

取决

上作
头方
一维
度依
只要

霍尔
零点
半径
mm.
的全
好的
按无
机玻
器及
玻璃
斗, 是

约为
尔效
1, 电
激励
噪声

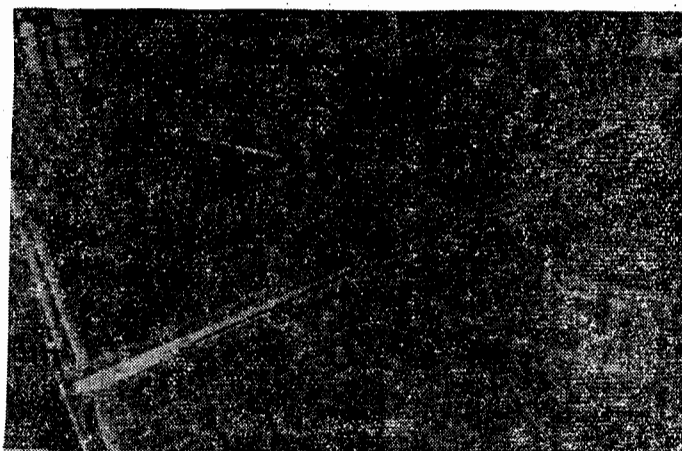


图 2 多探头长臂

1 μ V, 吸合稳定时间 6ms. 在计算机控制下, 这 95 路电压讯号按道地址顺次输入到 7075 型数字电压表. 多路切换器每接通一路, 由数表的 70754 型接口无条件延时 20ms (须断开接口上的 SP1 接点), 接着启动数表采样. 延时是为了让输入讯号完全稳定下来. 数表采样时间用 100ms 档. 采样结束后数表输出的 BCD 数字化量并行地通过接口输入计算机. 接着测量下一路, 7075 数表的电压测量精确度在空调 $\pm 5^\circ\text{C}$ 情况下, 可好于 $\pm 7 \times 10^{-5}$ /年.

以上几种电子学仪器今后将全部放在水冷柜中, 以降低一年四季环境温度变化的影响.

磁敏中心定位支架上, 与丝杆平行地装有 GZD-1 型直线感应同步器. 移动安装磁针的滑台时, SF1-10 型数显表以 $\pm 5\mu\text{m}$ 的精度显示磁针位置读数. 霍尔片位置微调机构是在显微镜移动尺基础上改装的. 永磁磁针产生约 200 高斯跃变场. 磁敏中心定位精度在互相垂直两方向上均为 $\pm 0.07\text{mm}$ 左右.

未经老化的霍尔片存在着灵敏度漂移现象, 故霍尔探头在 NMR 校准前或投入使用前, 均须经过老化处理. 要使 SBV601-S1 型霍尔片灵敏度漂移降到 1×10^{-4} 以下, 须

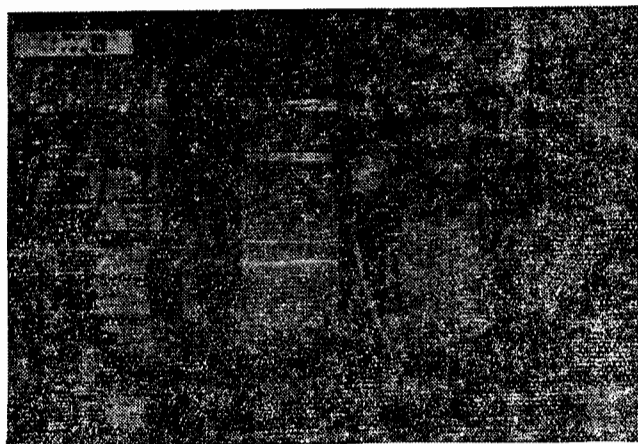


图 3 NMR 校准装置

在与使用时相同的恒温和激励电流条件下连续工作七天以上,最好一个月。

NMR 校准旨在克服霍尔电压对磁场的非线性关系这个缺点。校准是在标准磁铁的均匀磁场中进行的。这台校准装置示于图 3,包括一台装备了校准支架的 HP-1 型波谱仪磁铁,一台 3193 型或 B-NM-20 型 NMR 高斯计,一台能同时测量霍尔电压值与磁场值的联动控制器。HP-1 型磁铁磁极直径 $\phi 212\text{mm}$,气隙 38mm,在磁极中心约 $\phi 30\text{mm}$ 区域内场均匀度好于 5×10^{-5} ,最高磁场强度达 18KG,场稳定度约为 1.2×10^{-5} /半小时。B-NM-20 型高斯计的测量精确度为 5×10^{-6} 。联动控制器通过手动开关发一脉冲命令给数表和高斯计,令其同时采样测量,然后穿孔,以实现同时测量霍尔电压值及其对应磁场值的目的。这样,既提高了 NMR 校准精确度,又加快了校准速度。恒温盒厚度 20mm, NMR 探头厚度 14mm 以下,故气隙 38mm 刚好容纳。校准时,移动装有恒温盒的校准支架,逐个地使霍尔片中心与处于磁场均匀区的 NMR 探头中心重叠一次。并在 1—18kG 范围内以大约 1kG 的间隔改变磁场强度,逐片进行校准。校准后,对每个霍尔片获得的一组霍尔电压值 V_i 及其对应的磁场值 B_i ,用最小二乘法进行多项式

$$B_i = \sum_{j=0}^n a_j V_i^j$$

拟合,得到各项系数 a_i 。数据表明, NMR 校准精确度约为 ± 1.2 高斯,对 $B = 16\text{kG}$ 来说,约相当于 $\pm 7.6 \times 10^{-5}$ 。

三、测磁支架及其控制器

测磁支架^[5]按极坐标系结构设计,这是对比多种结构方案的优缺点后确定的。在我

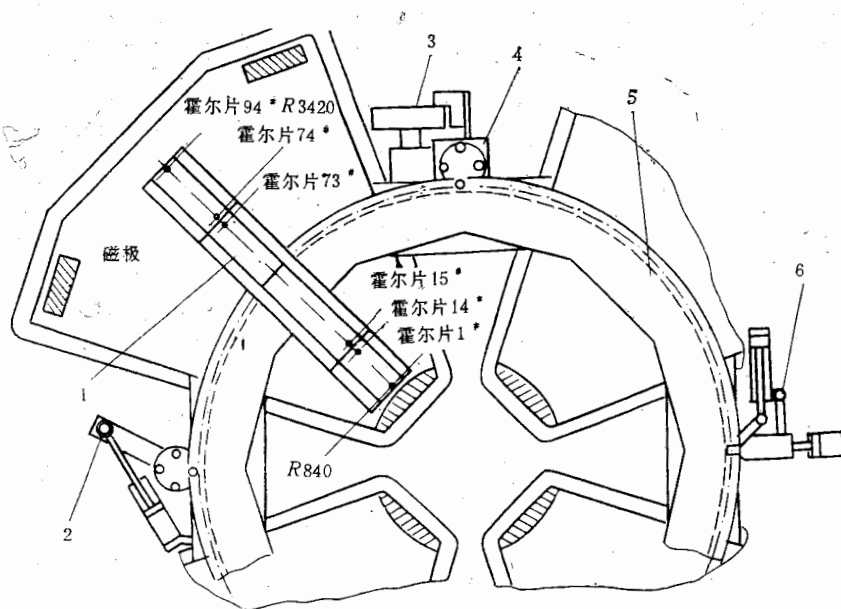


图 4 测磁支架

1 测磁长臂, 2 气功步进装置, 3 光电编码筒, 4 电机, 5 动环, 6 气动定位装置

们由臂 36 中电位将支

这

要引

运动器可预达设计

磁铁的
型波谱
与磁场
30mm
1/半小
一脉冲
及其对
盒厚度
有恒温
欠。并
付每个
式

kG 来

在我

们的测磁支架及其控制器的设计过程中, GANIL 的经验^[6]起了有益的借鉴作用。支架由定环、动环和多探头长臂组成(图 4)。定环支撑在下磁极面上;动环安放在定环上;长臂固定在动环上。动环可在 0° 至 359° 方位角范围内灵活转动。动环实际上是一个有 360 个齿槽的铝质大齿环,由 12 段组成(各段之间用塑料薄膜绝缘),以便在整体真空室中测磁时安装与拆卸支架。动环外沿在三个谷区处装有气动步进机构、气动定位机构和电动快速运动机构。动环转动时,附在快动机构转轴上的光电编码器同步地转动,给出方位角读数。气动步进机构作周期性动作时,每个周期使动环转动 1° ,并由气动定位机构将动环准确定位。驱动装置由空气压缩机和先导电磁控制阀组成。经检测,组装后测磁支架各项指标均达到或超过设计要求:

- 长臂迴转 360° 最大径向跳动 $\Delta r = 0.1\text{mm}$,
- 长臂迴转 360° 最大垂直跳动 $\Delta Z = 0.11\text{mm}$,
- 步进时方位角定位精度 $\Delta\theta \leq \pm 15''$,
- 动环快速迴转角速度 $\omega = 1^\circ/3.89\text{s}$ 。

这给整个测量系统达到高精度创造了重要的条件。

每次在磁隙中安装测磁支架时,要求径向安装误差 $\Delta r \leq \pm 0.2\text{mm}$,使之严格同心;要求霍尔片平面以 $\pm 1\text{mm}$ 的精确度重合于磁中平面。因霍尔片偏离磁中平面过大时将引起平面霍尔效应这一新误差,而平面霍尔效应是不能通过 NMR 校准消除的。

测磁支架的运行必须在顺序控制器(图 5)的控制下进行。控制器使测磁支架有三种运动方式可供选择:自动步进、手动步进和快速运动。选择某一种运动方式后,另两种运动方式即被闭锁。快速运动时只转动动环,不测量磁场。步进顺序控制线路是整个控制器的核心,它要保证动环转动时三个气缸(六个气缸状态)按顺序动作。手动步进方式下,可正转可反转,正转时可测可不测,比较灵活。自动步进方式下,只能正转;其中设置一个预选电路,预选开始测量方位角和终止测量方位角。到达开始测量方位角时启动测磁;到达终止方位角时停止测磁及动环的转动。方位角信息来自光电编码器。此外,控制器还设有必要的显示电路,故障处理与报警电路。

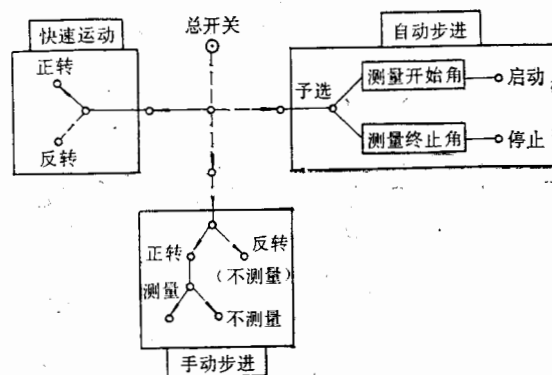


图 5 测磁支架控制示意图

四、数据的获取与处理

需要获取的数据有长臂所在方位角、94 个霍尔片输出的霍尔电压值以及霍尔片激励电流值。数据处理的任务是每完成一个方位角的测量后按预先存放在计算机中的 NMR 校准曲线(94 组多项式系数)依次将 94 个霍尔电压值转换成磁场值。由于测量系统的稳定度很高,对转换前的霍尔电压值未作任何修正。

计算机仍用 1/4 模型测磁时的 TQ-15 型(即 DJS-131 型)计算机。内存 32k 字,字长 16 位,存取速度 $2\mu\text{s}$ 。外围设备有电传打字机、光电纸带输入机、纸带穿孔机、80 行宽行打印机等。计算机接口也沿用以前在 TYJ 型通用接口板基础上改装的接口;但由于增加了光电编码器输出的象限值和方位角值,故增加了一块接口板,数据输入线由原来的 25 根增加到 48 根。接口除数据传输功能外,还具有实时中断功能。

测量系统的运行和数据的获取与处理是在“747* 多探头在线测磁管理程序”^[7]的管理下进行的。它是用汇编语言编写的。

五、系统的测量精度与速度

整个系统于 1983 年 10 月建成后,立即投入了第一扇原型磁铁基础场和边缘垫铁等测磁工作^[8]。系统工作正常,达到了设计指标^[9]。重复测量表明,系统的测量重复性对 $B = 1.5T$ 约为 $\pm 2.5 \times 10^{-3}$, 好于 $\pm 5 \times 10^{-5}$ 。估计系统的测量精确度为 ± 1.6 高斯,对 $B = 1.6T$ 即达 $\pm 1 \times 10^{-4}$ 。

测量速度是很高的。在步进方式下,动环转动 1° 并定位约需 12 秒。为了让长臂转动 1° 后产生的机械振动和各种电磁参量稳定下来,等待约 6 秒。接着测量 94 个霍尔电压值,约需 12 秒(测量一个霍尔电压值时先延时 20ms,然后数表采样 100ms)。数据的处理是在作下一步步进期间进行的,不另占时间。于是,测量一个方位角半径上的磁场分布共约 30 秒钟,亦即每分钟测 188 个数据。故测量 $0^\circ - 359^\circ$ 全方位角的磁场分布(共 33840 个数据),约需三小时。

参 考 文 献

- [1] O.Szavits et al., 7th Intern. Conf. on Cyclotrons and their Applications, 1975, p. 184.
- [2] 龙敖,焦天枢,李天佑等,1/4 模型磁铁的在线测磁系统. 近物所年报,1981 年, p. 202
- [3] 龙敖,高精度磁场测量系统研制方案. 近物所内部资料, 7611F3-58 之 15, 1979 年 7 月
- [4] 党建荣,郭克钧,赵国典和龙敖,用于 SSC 磁铁测量系统的霍尔多探头装置. 兰州重离子研究装置进展报告, 第三卷, 1984 年, p. 19
- [5] 常力,张国斌和郑金鸿, SSC 扇形磁铁多探头测磁支架. 同[4], p. 29
- [6] M. Ohayon et al., Description du banc de mesures magnétiques des aimants des CSS ainsi que de son dispositif de commande electro-pneumatique. GANIL 内部资料, GANIL 78N/032/AI/07, 1978. GANIL 78N/032/AI/07, 1978
- [7] 常更福, 747* 多探头在线测磁管理程序. 同[4], p.25
- [8] 王书昌等, SSC 的第一扇磁铁铁芯与一扇原型实验. 同[4], p. 1
- [9] 磁场测量组,一扇原型磁铁测磁系统. 近物所年报, 1983 年, p. 183

M

HI
probes
rotati
the mea
about d

MULTI-PROBE MAGNETIC FIELD MEASURING SYSTEM WITH HIGH PRECISION

LONG AO JIAO TIAN-SHU CHANG LI CHANG GENG-FU DANG JIAN-RONG

GUO KE-JUN ZHANG CHANG-SHUAN WU GUI-HENG

YU WEN-JIE ZHANG GUO-BIN WANG WEN-LING

(Institute of Modern Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

HIRFL magnetic field measuring system was built in October, 1983. There are 94 Hall probes on a detecting arm. The positioning device, which mainly consists of a detecting arm, a rotating ring and a fixed ring, is of a polar coordinate type. For 16 KG magnetic field, the measuring repeatability of the system is better than $\pm 5 \times 10^{-5}$, the measuring accuracy is about $\pm 1 \times 10^{-4}$. The measuring rate is about 188 data per minute.

激励
NMR
的稳

字,
0 行
由于
来的

的管

夫等
生对
斯,

等转
R电
話的
分分
(共

告

300