

北京谱仪磁铁磁轴测量分析

张 戈 朱善根 周永参 赵 萌
赵棣新 李 佳 韩世温 付正善

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

本文着重论述了用移动线圈法测量北京谱仪磁铁磁轴的基本原理、测量方法和测量结果, 为北京谱仪的正常运行提供了基本数据。

一、引 言

北京谱仪 (BES) 磁铁由螺线管线圈和轭铁两部分组成(图 1), 线圈内径 3.45 米, 外径 4.22 米, 长 3.6 米。桶部轭铁以正八边形围绕螺线管线圈。两端以门、端块、环等联接。在螺线管腔体内放置中心漂移室、主漂移室、飞行时间计数器、簇射计数器等, 在线圈外部和轭铁之间安装 μ 子鉴别器^[1]。

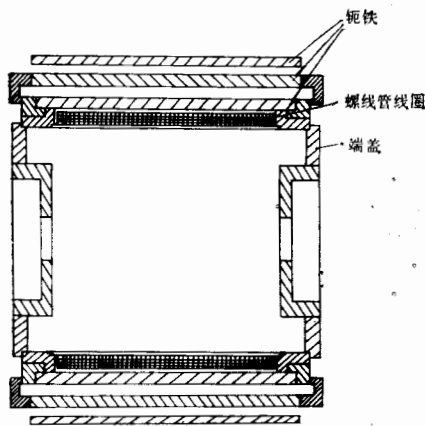


图 1 BES 磁铁示意图

北京谱仪的磁场空间是一轴对称场, 磁轴即磁场的中心轴线。由于线圈的绕制和安装不可避免地存在着误差, BES 磁场的磁轴必然与谱仪磁铁的几何中心轴不相重合。按几何中心轴安装的漂移室等探测器, 是利用带电粒子在磁场中的轨迹来获取粒子动量等信息的, 如果磁轴与几何轴相差很大, 就必须对获取的数据作某些修正, 这样就会增加数据在线获取和离

线分析的难度。磁轴测量的目的就是为是否增加修正量提供依据, 同时也对 BES 磁铁的加工和安装质量提供一个有效的检验方式。

二、磁轴测量原理

磁轴测量实际上是对一个大磁场常量上的小变化量的测量, 要求测量系统具有较高的灵敏度, 为此建立了移动线圈测量系统。它的基本原理是法拉第电磁感应定律^[2,3]。

图 2 表示在圆柱体线圈腔体内建立的坐标系, 以后的讨论除另加说明外, 均以这个坐标系为基础。\$z\$ 轴建立在圆柱体空间的中心轴线上, 原点在中央。\$r\$ 为半径方向, \$\phi\$ 为横截面上以圆心为支点的转动方向。在这三个方向上的磁场分量分别称作 \$B_z\$、\$B_r\$、\$B_\phi\$。

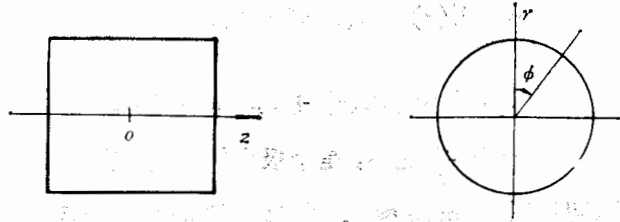


图 2 坐标系

磁轴 \$z'\$ 与移动线圈测量轴 (即几何中心轴) \$z\$ 的偏差分两种情况: 一种是 \$z\$ 与 \$z'\$ 有一平行位移 \$d\$; 另一种是有一夹角 \$\theta\$。通常这两种情况同时存在于同一磁场中。为了讨论方便, 用 \$B_{mn}\$ 标记 \$m\$ 向移动探头线圈测量到的 \$n\$ 向磁场分量, 用柱坐标表示, \$m\$ 和 \$n\$ 都有 \$z\$、\$r\$、\$\phi\$ 三个坐标。按以上规则, \$B_{zr}\$ 表示 \$z\$ 向探头测到的 \$r\$ 向磁场分量。其余类推。

图 3 所示为磁轴 \$z'\$ 与 \$z = z_0\$ 平面的交点 \$o'\$ 与测量轴和该平面的交点 \$o\$ 的关系。\$d\$ 为 \$o-o'\$ 距离, \$P\$ 为测量点, \$r\$ 为测量距离, \$r'\$ 为 \$P\$ 距磁轴 \$o'\$ 的距离, \$\phi\$ 为测量臂与 \$o-o'\$ 夹角, 有

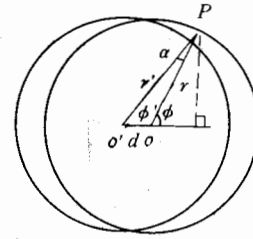


图 3 \$z\$ 与 \$z'\$ 平移关系

$$r' = \sqrt{(r \sin \phi)^2 + (r \cos \phi + d)^2} = \sqrt{r^2 + 2rd \cos \phi + d^2}. \quad (1)$$

在 \$d\$ 很小时, 将(1)式作泰勒展开, 有

$$r' \approx r + d \cos \phi. \quad (2)$$

假设 \$P\$ 点的三维磁场分量 \$B'_z\$、\$B'_r\$、\$B'_\phi\$ 在 \$(r' + \Delta r')\$ 的小范围内与 \$r'\$ 成线性关系, 比例系数分别为 \$k_{zr}\$、\$k_{rr}\$、\$k_{\phi r}\$。即

$$\begin{aligned} B'_z(r' + \Delta r') &\approx k_{zr} \cdot \Delta r' + B'_z(r'); \\ B'_r(r' + \Delta r') &\approx k_{rr} \cdot \Delta r' + B'_r(r'); \\ B'_\phi(r' + \Delta r') &\approx k_{\phi r} \cdot \Delta r' + B'_\phi(r'). \end{aligned} \quad (3)$$

同时考虑对螺线管线圈磁铁有 \$B'_\phi = 0\$, 所以 \$B_{z\phi} = 0\$。从投影关系还可以得到 \$B_{zr} = 0\$, 则 \$P\$ 点的 \$z\$ 向磁场 \$B'_z\$ 实际测量值为

$$\begin{aligned} B_z(r) &= B_{zz} + B_{zr} + B_{z\phi} = B_{zz} = B'_z(r') \approx B'_z(r + d \cos \phi) \\ &\approx B'_z(r) + k_{zr} \cdot d \cos \phi. \end{aligned} \quad (4)$$

\$r\$、\$\phi\$ 两方向的探头与 \$z\$ 向探头不同, 它们与 \$P\$ 点磁场在 \$r'\$、\$\phi'\$ 向的分量 \$B'_r\$、\$B'_\phi\$ 有夹角 (图 3), 其关系为

$$\alpha = \arcsin \frac{d \sin \phi'}{r}, \quad (5)$$

而
$$\phi' = \arctg \frac{r \sin \phi}{d + r \cos \phi}, \quad (6)$$

且 $B_{rz} = 0$, $B_{r\phi} = 0$, 所以在 P 点

$$\begin{aligned} B_r(r) &= B_{rr} + B_{r\phi} + B_{rz} = B_{rr} = B'_r(r') \cos \alpha \\ &\approx [B'_r(r) + k_{rr} \cdot d \cos \phi] \cos \alpha. \end{aligned} \quad (7)$$

同样对 B_ϕ 有

$$B_\phi(r) \approx [B'_r(r) + k_{rr} \cdot d \cos \phi] \sin \alpha. \quad (8)$$

由于 α 变化范围在 0 与 $\arcsin \frac{d}{r}$ 之间, 是个极小的角度, 在实际 BES 磁铁磁场测量所要求的精度范围内, 可以认为 $\cos \alpha \approx 1$. 由 (5)、(7)、(8) 式得到由于测量轴平行位移差所引起的测量结果为

$$\begin{aligned} B_z(r) &\approx B'_z(r) + k_{zz} \cdot d \cos \phi; \\ B_r(r) &\approx B'_r(r) + k_{rr} \cdot d \cos \phi; \\ B_\phi(r) &\approx [B'_r(r) + k_{rr} \cdot d \cos \phi] \sin \alpha. \end{aligned} \quad (9)$$

另一种情况是测量轴 z' 在同一平面内, 但有夹角 θ , 如图 4 所示. 在这两个轴上建立两套坐标系, 一是测量坐标系 (z, r, ϕ) , 另一是磁场坐标系 (z', r', ϕ') . 从图中可见, ω 为 r 和 r' 的夹角, 它在 rz 平面内, 随 ϕ 的变化在 $[-\theta, \theta]$ 区间内变化. 可以证明

$$\sin \omega = \sin \theta \cos \phi. \quad (10)$$

由于测量系统与磁场系统的夹角关系, 使得测量的三维分量值实际是磁场三维分量投影合成的结果. B'_ϕ 忽略不计, 得到实际的三维分量测量值是

$$\begin{aligned} B_z(z, r, \phi) &= B'_z(z + r \sin \omega, r \cos \omega, \phi) \cos \theta \\ &\quad + B'_r(z + r \sin \omega, r \cos \omega, \phi) \sin \omega; \\ B_r(z, r, \phi) &= B'_r(z + r \sin \omega, r \cos \omega, \phi) \cos \omega \\ &\quad + B'_z(z + r \sin \omega, r \cos \omega, \phi) \sin \omega; \\ B_\phi(z, r, \phi) &= B'_z(z + r \sin \omega, r \cos \omega, \phi) \sin \theta \sin \phi. \end{aligned} \quad (11)$$

考虑 BES 磁铁径迹区中磁场梯度较小, 另外对一些小量作近似计算, (11) 式可以简化为

$$\begin{aligned} B_z(z, r, \phi) &\approx B'_z(z, r, \phi) \cos \theta + B'_r(z, r, \phi) \sin \omega; \\ B_r(z, r, \phi) &\approx B'_r(z, r, \phi) \cos \omega + B'_z(z, r, \phi) \sin \omega; \\ B_\phi(z, r, \phi) &\approx B'_z(z, r, \phi) \sin \theta \sin \phi. \end{aligned} \quad (12)$$

从 (10)、(12) 式可以看出, B_z - ϕ 、 B_ϕ - ϕ 曲线是余弦函数, B_r - ϕ 则相对复杂一些, 其中第一项为两个周期的余弦函数, 但幅度很小. 如果不忽略磁场的 z 向梯度, 假设在小范围内磁场的 z 向梯度 (k_{zz} , k_{rz}) 为常数, 同时忽略由于坐标转换所带来的 $\sin^2 \omega$ 及 $\sin^2 \theta$ 等小项, 去掉不被探测到的常数项, 并取 $\cos \theta \approx 1$, (12) 式成为

$$\begin{aligned} B_z(z, r, \phi) &\approx [B'_r(z, r, \phi) + k_{zz} \cdot r] \sin \theta \cos \phi; \\ B_r(z, r, \phi) &\approx B'_r(z, r, \phi) \cos \omega + [B'_z(z, r, \phi) \end{aligned}$$

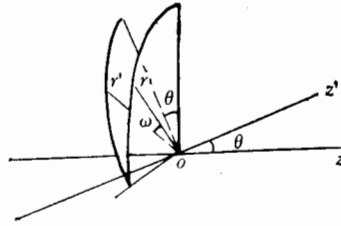


图 4 z 与 z' 夹角关系

$$+ k_{rz} \cdot r \cos \omega] \sin \theta \sin \phi;$$

$$B_{\phi}(z, r, \phi) \approx B'_z(z, r, \phi) \sin \theta \sin \phi. \quad (13)$$

一般情况为平移和夹角两种情况的迭加。对一般情况, 由式(4)、(7)、(8)、(9)、(11)及(13), 去掉常数项, 有

$$B_z \approx k_{zz} \cdot d \cos \phi + (B'_z + k_{zz} \cdot r) \sin \theta \cos(\phi + \phi_0);$$

$$B_r \approx k_{rz} \cdot d \cos \phi + B'_r \cos \omega + (B'_z + k_{zz} \cdot r \cos \omega) \sin \theta \cos(\phi + \phi_0); \quad (14)$$

$$B_{\phi} \approx k_{rz} \cdot d \cos \phi \sin \alpha + B'_z \sin \theta \sin(\phi + \phi_0).$$

式中 ϕ_0 为夹角平面与测量起始平面的相位差。此时, 对 ω 有

$$\sin \omega = \sin \theta \cos(\phi + \phi_0). \quad (15)$$

$\sin \alpha$ 很小, 约 10^{-2} — 10^{-3} 量级, 在式(14)中, B_{ϕ} 含 d 的项与 B_z 、 B_r 相比要小 2 或 3 个数量级, 而夹角项的大小与 B_r 的量级相同, 所以 B_{ϕ} 对测量轴与磁轴的位移 d 是不敏感量, 故可用它作夹角测量。忽略含 $\sin \alpha$ 的项,

$$B_{\phi} \approx B'_z \sin \theta \sin(\phi + \phi_0). \quad (16)$$

由上式中 B_{ϕ} 与 θ 之间的函数关系, 可以得到所需的 θ 值。

三、磁轴测量方法及结果

测量系统简介

移动线圈法磁场测量装置主要由探头部分(即移动线圈)、积分电路(如果需要, 还可加入线性放大电路)、位置控制系统及移动装置(包括磁测机的滑臂和光学定位等部分)、计算机数据采集和处理系统等四部分组成^[3,4]。简单框图如图 5 所示。其中探测线圈和光学测位装置一起固定在滑臂上, 在计算机控制下由步进电机驱动, 在磁场中作三维运动, 积分器对探测线圈的感生电动势作积分, 然后将输出电压值送入模数转换器, 由计算机控制采集。

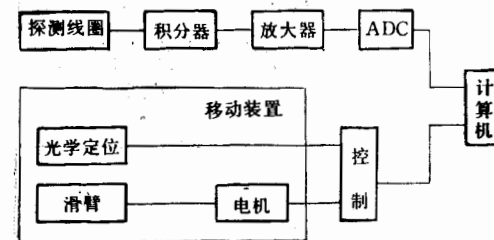


图 5 磁轴测量系统框图

从 BES 实际磁场测量要求考虑, 探头部分设计成二维同心线圈装置, 两个线圈轴向互相垂直。根据不同要求, 探头在滑臂上变换方向, 可测量三维磁场分量。测量系统的灵敏度对二维探头分别为 21.00mV/mT 和 105.2mV/mT 。

磁轴测量结果

将某一 z 平面上的 B_{ϕ} - ϕ 曲线按方程

$$B_{\phi i} = A \sin(\phi_i + \phi_0) \quad (17)$$

拟合, 其中 $B_{\phi i}$ 为测量数据, A 、 ϕ_0 为需拟合的数据。由式(16)得到

$$A = B'_z \sin \theta, \quad (18)$$

这样, 测量轴与磁轴的夹角为

$$\theta = \arcsin \frac{A}{B_s}, \quad (19)$$

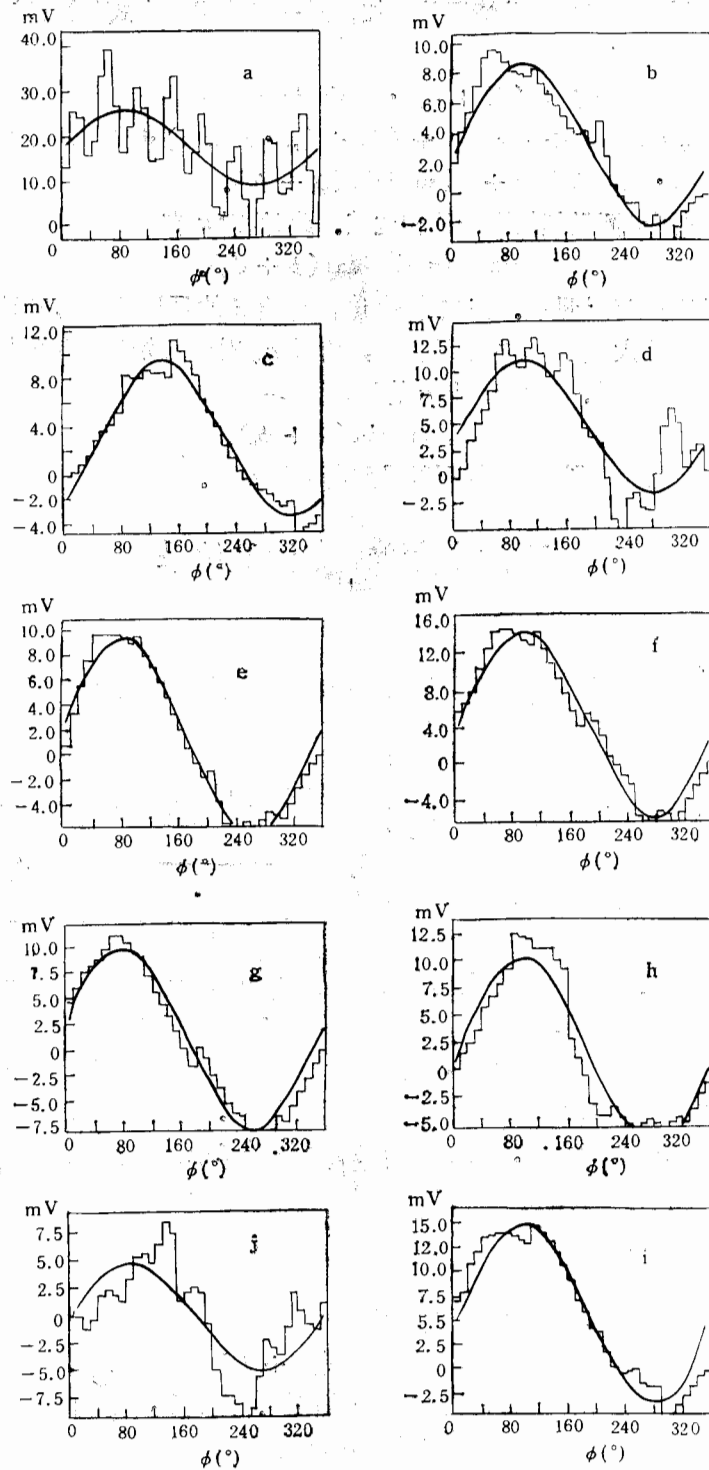


图6 测量和拟合结果

式中 B'_z 为磁场的 z 向分量, 可由磁场分布拟合数据得到。

图 6 为测量所得的 B_ϕ - ϕ 曲线及其拟合结果, 其中光滑曲线为拟合结果。从图 6 (a)、(j) 上可以看到 8 个等间距排列的峰, 这些峰是因为测量位置靠近 BES 磁铁两端, 受端盖上的 8 个均匀分布的电缆槽影响所致。表 1 列出不同测量平面上的拟合结果。

表 1 夹角拟合结果

平 面	B'_z (mT)	A (mT)	ϕ	θ	图号
$z = -1000, r = 1402$	437.52	0.402	25'	3'10''	a
$z = -1000, r = 602$	443.47	0.266	-10°22'	2'4''	b
$z = -1000, r = 172$	441.41	0.313	-47°55'	2'26''	c
$z = -600, r = 1202$	450.24	0.307	-11°35'	2'21''	d
$z = -600, r = 502$	447.93	0.377	5°49'	2'54''	e
$z = 0, r = 302$	451.32	0.487	-6°51'	3'43''	f
$z = 0, r = 182$	451.18	0.422	9°15'	3'13''	g
$z = 0, r = 182$	451.18	0.415	-8°37'	3'10''	h
$z = 600, r = 502$	449.60	0.437	-9°45'	3'20''	i
$z = 600, r = 1202$	452.05	0.236	7'	1'48''	j

假定磁轴是条直线, 对上面的测量和拟合结果作统计分析, 得到磁轴的偏差角度和方位为

$$\theta = 2'56'' \pm 12'';$$

$$\phi_0 = -7^\circ 57' \pm 4^\circ 58'. \quad (20)$$

这个结果与机械标定结果是吻合的。机械标定给出了夹角的偏差方向。

由(14)式可以看出, 只要有了 θ 值, 便可通过曲线拟合得到磁轴位移 d 值。实际上在均匀区中, k_{zz} 、 k_{zz} 、 k_{rr} 、 k_{rz} 都很小, 从磁场分布拟合数据看, 它们均不过 10^{-5} T/mm, 从 BES 磁铁的机械安装及磁测机的安装情况看, d 小于 5mm, B'_r 要比 B'_z 小两个数量级, 这样, (14)式中 B_z 式右边为三个小数值相加, 在我们的测量精度条件下, 很难精确测量 d 值大小。对于 B_r 式, 存在同样的问题, $k_{zz} \cdot d$ 项比 $B'_z \sin \theta$ 项要小一个数量级, 被测量误差所淹没。在测量过程中, 探头固定在磁测机的小滑套上, 小滑套在小臂上作 r 向移动, 小臂又固定在大滑套上, 大滑套在磁测机轴上作 ϕ 向转动及 z 向移动。尽管磁测机的设计和安装都十分精密, 但在这样的大范围内运动, 免不了会有振动。假定在角度方面有 $1'$ 的振动, 则 B_z 的 0.45T 磁场分量进入 r 向探头的量达 1.3×10^{-4} T。这个量足以淹没位移量 d 对 B_r 测量的贡献。在 ϕ 方向上, 它引起夹角 θ 和相位 ϕ_0 的测量误差。

测量系统的误差主要来源于积分器的漂移、磁铁电源的不稳定、放大器的精度、数据采集系统的数据转换误差及磁测机的机械摆动, 其中磁测机的机械摆动是较为重要的误差来源。积分器的漂移对误差的贡献约为 1%, 磁铁电源的不稳定为 0.01%, 放大器的精度约 0.4%, 数据转换误差对满量程为 0.06%。

由于磁轴测量是一个小磁场变化量的测量, 受各种误差的影响较大, 使测量具有较大的难度。但由于磁轴测量对于谱仪的安装等具有较重要的意义, 因此, 我们对磁轴测量作了初步的探讨。测量结果表明, 磁轴与磁铁的几何中心轴基本是吻合的。谱仪按几何轴安装, 由于磁轴的偏离所造成的磁场不对称对束流及物理结果的影响是可以忽略的。BES 一年多的正常运行及取得的物理结果也说明了这一点。

在磁轴测量过程中,得到了郑志鹏、郁忠强等同志的热情关心与支持。在此谨向他们表示衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] 叶铭汉、席德明、郑志鹏,北京谱仪,第四届全国核电子学与核探测技术和第三届全国高能实验物理学术会议,1988.
- [2] 毛振珑,磁场测量,原子能出版社,1985.
- [3] 张戈,用于北京谱仪磁铁磁轴测量的移动线圈法,第四届全国核电子学与核探测技术和第三届全国高能物理学术会议,1988.
- [4] 周永参等,计算机控制的磁场测量系统,第四届全国核电子学与核探测技术和第三届全国高能物理学术会议,1988.

Magnetic Axis Measurement in the Solenoid of Beijing Spectrometer

ZHANG GE ZHU SHANGEN ZHOU YONGSHEN ZHAO MENG

ZHAO DIXIN LI JIA HAN SHIWEN FU ZHENGSHAN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

This paper discusses the basic principle of the magnetic axis measurement on the magnetic field of the solenoid magnet for BES, the measuring method as well as the result.