

- [3] T. S. Green, *Rep. Prog. Phys.*, 37, 1257 (1974).
- [4] F-3 电磁分离器磁场改进组, 原子能科学技术, 4, 360 (1976)
- [5] M. V. Nezlin, *Plasma Phys.*, 10, 337 (1968).

(编辑部收到日期: 1980年7月21日)

用霍尔片测量等时性回旋加速器磁场时 平面霍尔效应的计算和消除

王 春 和

(关键词 等时性回旋加速器、磁场、平面霍尔效应、精准性、误差、测量)

一、平面霍尔效应

利用霍尔片测量多维磁场时, 必须考虑平面霍尔效应的影响。平面霍尔效应与霍尔效应、磁阻效应一样是半导体的一种电流磁效应。用霍尔片测量磁场时, 控制电流 \vec{I} 、被测磁场 \vec{B} 和霍尔电压 \vec{V}_H 三者的方向互相垂直, 其定量关系为:

$$V_H = \frac{R_H I B_z}{d} = K_H I B_z \quad (1)$$

式中, R_H 为霍尔系数; d 为霍尔片厚度; K_H 为霍尔灵敏度; I 为控制电流; B_z 为被测磁场强度; V_H 为霍尔电压。这个电压叫垂直霍尔电压。若把电压测量点取霍尔片上控制电流方向的任意两点, 则可以测出霍尔片的磁阻效应, 磁阻率随磁场的平方增加^[1], 即

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha B_z^2) \quad (2)$$

平面霍尔效应是指磁场方向与霍尔片平面平行时, 在原来测量垂直霍尔电压的两端出现电势的现象。为了区别磁场垂直于霍尔片平面的霍尔效应, 称这种霍尔效应为平面霍尔效应。平面霍尔效应是纵向磁阻和横向磁阻之差造成的^[2], 如图 1 所示。

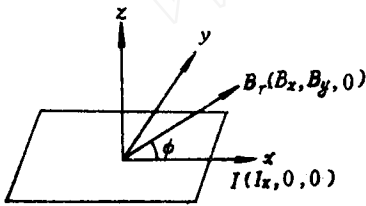


图 1 磁场 \vec{B}_T , 霍尔电流 I 与霍尔片的相对位置

图中 $B_T(B_x, B_y, 0)$ 应为 $B_T(B_x, B_y, 0)$
——校后注

平面霍尔电压:

$$V_{\parallel} = K_2 I B_T^2 \sin 2\phi \quad (3)$$

$$K_2 = -\rho_0 \left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2d} \right) \quad (4)$$

公式(3)、(4)中, K_2 为平面霍尔效应灵敏度; α_1 为纵向磁阻系数; α_2 为横向磁阻系数; I 为霍尔电流; B_T 为与霍尔片平面平行的磁场强度; ϕ 为在霍尔片平面内 B_T 与 I 的夹角。

等时性回旋加速器磁场是三维场, 用霍尔片测量等时性回旋加速器磁场时, 平面霍尔效应会影响磁场测量的精确度。等时性回旋加速器磁场的三个分量为:

$$B_z(R, \theta, Z) = B_z(R) [1 + \epsilon f(R, \theta)], \quad (5)$$

$$B_R(R, \theta, Z) = B_z(R) \left\{ [1 + \epsilon f(R, \theta)] \cdot \frac{n}{R} \cdot Z \right\} + B_z(R) \epsilon \frac{\partial f(R, \theta)}{\partial R} \frac{Z}{R} \cdot R$$

$$= B_z(R) \left\{ [1 + \varepsilon f(R, \theta)] \cdot \frac{n}{R} \cdot Z \right\} + B_z(R) \varepsilon \frac{Z}{R} \operatorname{tg} \gamma, \quad (6)$$

$$B_\theta(R, \theta, Z) = B_z(R) \left[\varepsilon \frac{\partial f(R, \theta)}{\partial \theta} \cdot \frac{Z}{R} \right]. \quad (7)$$

上述各式中, $B_z(R)$ 为平均磁感应强度, 它的分布满足等时性要求; $f(R, \theta)$ 为 θ 的周期函数, 对方位角求平均值为零; ε 为磁场沿方位角的调变度; n 为磁场的梯度指数; γ 为磁场叶片的弯角。

磁场分量 B_r 、 B_θ 在粒子运动平面内, B_T 是 B_r 和 B_θ 的向量和。在三维磁场中, 平面霍尔效应引起一个附加的电场叠加到垂直霍尔电压上, 附加项的大小随磁场在霍尔片平面上的分量的增加而加大。这样, 用霍尔片测磁时总的霍尔电压应为:

$$V = K_1 B_z I - K_2 B_T^2 I \sin 2\phi. \quad (8)$$

上式由垂直霍尔电压和平面霍尔电压两部份所组成。当 $\phi = 45^\circ$ 时, 平面霍尔效应最大, $\phi = 0^\circ$ 或 90° 时, 则平面霍尔效应理论上等于零。

平面霍尔效应的灵敏度系数 K_2 可以用实验方法测定^[4,5]。我们用 InAs 霍尔片, 霍尔电流 75 mA, 磁场强度 0.8583 T (特斯拉); 在 $\phi = 45^\circ$ 时, 测得平面霍尔效应的灵敏度系数 $K_2 = 6.2 \text{ mV/AT}^2$ 。

二、测量等时性回旋加速器磁场时平面霍尔效应计算

由于磁铁材料和各类电流线圈的不对称, 使等时性回旋加速器的磁中心面不在一个平面上。若以加速器几何中心面为参考平面, 则磁场内各点的磁中心离几何中心面的距离不等。从回旋加速器磁中心面的测量数据来看, 磁中心面上的点大多数离参考平面 2 至 5 mm, 个别点可达 10 至 20 mm, 在参考平面上各点的磁场是三维场。

由公式(6), (7)可知, 磁中心偏离参考平面越远, 磁场的径向分量和方位角分量越大。若平均磁感应强度 $B_z(R) = 1.4 \text{ T}$, 磁场沿方位角调变度 $\varepsilon = 0.2$, $f(R, \theta)_{\max} = 1$, 磁场梯度指数 $n \approx 0.2$, $\left. \frac{\partial f(R, \theta)}{\partial \theta} \right|_{\max} = 3$, 磁场叶片弯角 $\gamma_{\max} = 45^\circ$, 在半径 $R = 300 \text{ mm}$ 处, 从最不利的情况取 $Z = 20 \text{ mm}$, 由 B_r, B_θ 的近似计算得:

$$B_r = 411 \text{ Gs} = 0.0411 \text{ T},$$

$$B_\theta = 560 \text{ Gs} = 0.056 \text{ T}.$$

B_r 和 B_θ 互相垂直, 由公式(3)可见, ϕ 等于任何角度时, B_r 和 B_θ 所产生的平面霍尔电压都是相减的, 两者所产生的总电压与 B_r 和 B_θ 的平方差成正比。当 ϕ 为 45° 和 135° 时, 磁场径向分量和方位角分量所产生的平面霍尔效应最大。

$$V_{\parallel} = K_2 \left[(B_r^2 I \sin 2\phi + B_\theta^2 I \sin 2\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right)) \right],$$

取 $I = 0.2 \text{ A}$, $2\phi = 90^\circ$, $2\left(\frac{\pi}{2} + \phi\right) = 270^\circ$, 则

$$V_{\parallel} = K_2 I |(B_r^2 - B_\theta^2)| = 1.79 \times 10^{-3} \text{ mV}.$$

当 $B_r = 0$ 时,

$$V_{\parallel \max} = 3.889 \times 10^{-3} \text{ mV}.$$

为了消除平面霍尔效应的影响, 我们使霍尔探头的电流方向与磁场的径向分量一致,

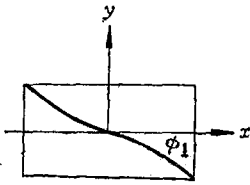


图 2 在电场和磁场影响下使霍尔电流弯曲

此时, 磁场径向分量所产生的平面霍尔效应等于零; 而磁场的方位角方向分量与霍尔电流成 90° 角, 因此磁场方位角分量的平面霍尔效应也是零。实际上, 霍尔片并非是无量长的, 通常使用的霍尔片的长宽比为 2, 在电场和磁场作用下, 使电流沿霍尔片的长度方向弯曲, 如图 2 所示。其最大弯曲度与霍尔片的中心线成 30° 左右。霍尔片愈长, 弯曲角度愈小, 平面霍尔效应也愈小。在 $\phi_1=30^\circ$, $I=0.2\text{ A}$ 及 $B_r=0$ 时的平面霍尔电压为 $V_{\parallel}'=3.37 \times 10^{-3}\text{ mV}$ 。若磁场

垂直分量 $B_z(B)=1.4\text{ T}$ 所产生的垂直霍尔电压 $V_H=100\text{ mV}$, 则平面霍尔效应与垂直霍尔效应之比为:

$$\frac{V_{\parallel}}{V_H} = \frac{3.37 \times 10^{-3}}{100} = 3.37 \times 10^{-5}.$$

由上式计算可知, 平面霍尔效应所引起的测量误差小于 0.5 Gs 。在磁场测量精度为 5×10^{-4} 情形下, 这个误差可以忽略^[7]。

三、磁场测量中不容忽视平面霍尔效应的三种情形

测量等时性迴旋加速器磁场时, 除测量垂直方向的磁场外, 有时需要测量另外两个方向的磁场, 此时必须重视平面霍尔效应并计算由此引起的误差。在实测工作中注意下面几种情况:

1. 利用霍尔效应测量磁场中心面时, 要测定磁场的径向分量 B_r 。这时, 霍尔片与 B^a 垂直, 与 B_z 平行。靠近磁中心面时, B_r 的量甚小, 其所产生的霍尔电压也很小; 而由 B^z 产生的平面霍尔效应则相当可观, 不容忽略。例如, 当迴旋加速器的磁场强度为 $B_z=1.4\text{ T}$ 、 $B_r=0.02\text{ T}$, 使用的霍尔片灵敏度 $K_1=350\text{ mV/AT}$ 、 $K_2=6.2\text{ mV/AT}^2$ 时, 在霍尔片上通以 0.2 A 电流, 在 $\phi=45^\circ$ 的情况下, 其垂直和平面霍尔电压分别为:

$$\begin{aligned} V_H &= K_1 I B_r = 1.4\text{ mV}, \\ V_{\parallel} &= K_2 I B_z^2 \sin 2\phi = 2.43\text{ mV}, \\ V_{\parallel}/V_H &= 2.43/1.4 = 1.7. \end{aligned}$$

从上述计算可见, 在测量磁中心面时, 平面霍尔效应所引起的误差, 远远超过了测量值。过去我们用霍尔片测量迴旋加速器磁中心面时, 没有考虑到平面霍尔效应, 从而不能全面地分析测量误差。实际上, 在测量磁中心面时, B_z 也并非绝对平行于霍尔片, 其在霍尔片的垂直方向尚有分量存在, 此分量亦将使测量结果产生误差。

2. 当需要校核磁场的轴向聚焦力或用网格法计算镜面不对称场所需的一定空间边界条件时, 需要测量 B_r 和 B_θ 的值。与第一种情况一样, B_r , B_θ 的值比 B_z 小得多, 由 B_z 引起的平面霍尔电压相当可观, 所以必须消除平面霍尔效应的影响。

3. 用磁场模拟方法研究等时性迴旋加速器中心区工作时, 中心区的电场可以表示为^[8]:

$$\begin{aligned} E_x &= N B_x(x, y, 0) \cos \omega(t - t_0), \\ E_y &= N B_y(x, y, 0) \cos \omega(t - t_0), \\ E_z &= N B_z(x, y, z) \cos \omega(t - t_0). \end{aligned}$$

式中, N 为由磁场模拟转换成电场的常数因子; ω 为加速电压的频率; ωt_0 为初相; t 为时

间; E_x, E_y, E_z 为三个电场分量; B_x, B_y, B_z 为待测磁场分量。在测量上述三个磁场分量时, 都会引起平面霍尔效应。

消除以上三种情况中平面霍尔效应的影响, 可把已测得一个霍尔电压值的霍尔片旋转 180° 以后再测一个霍尔电压值, 二次测得的霍尔电压相减, 就可以把平面霍尔效应抵消。以测量磁中心面为例, 当霍尔片在某一位置时, 测得霍尔电压为:

$$V_0 = K_1 I B_R - K_2 I B_z \sin 2\phi, \quad (9)$$

把此霍尔片旋转 180° 后, 再测其霍尔电压为:

$$V_{180} = -K_1 I B_R - K_2 I B_z \sin 2\phi, \quad (10)$$

$$(V_0 - V_{180})/2 = 2 K_1 I B_R / 2 = K_1 I B_R.$$

由于每次测量时, 误差值往往比待测值大得多, 因此必须提高指示仪表的精确度。

四、结 论

在多维磁场中, 用霍尔片测量某一个磁场分量时, 总会产生平面霍尔效应, 给测量结果带来误差。测量等时性回旋加速器磁场的垂直分量时, 平面霍尔效应所引起的误差可以忽略。当测量磁场径向分量和方位角分量时, 平面霍尔效应将会引起显著误差, 故不容忽略。

参 考 文 献

- [1] S. Stricker, *Advances in Electronics and Electron Physics*, Vol. 25, p. 98, Academic Press, 1968.
- [2] C. Goldbery & R. E. Davis, *Phys. Rev.*, 94, 1121 (1954).
- [3] M. Turin, *Nucl. Instrum. Methods*, 91, 621 (1971).
- [4] J. Billan et al., *Proceedings of the fourth International Conference on Magnet Technology*, Brookhaven, 1972, p. 779.
- [5] 林树梭、孙亲仁, *原子能科学技术*, 1, 91 (1976).
- [6] B. Turck, *Nucl. Instrum. Methods*, 95, 205 (1971).
- [7] 中国科学院原子能研究所回旋加速器测磁仪器研制组, 可变量回旋加速器磁场测量装置, 1979年全国加速器技术交流会论文选集, 1980年, 338页。
- [8] N. Hazewindus et al., *Nucl. Instrum. Methods*, 118, 125 (1974).

(编辑部收到日期: 1981年8月21日)

脉 冲 时 间 幌 动 的 测 量

翁 国 灵

(关键词 脉冲时间幌动, 窄脉冲电子直线加速器, 时间-幅度变换)

电子直线加速器对于脉冲电子束与脉冲微波包络同步的精确性要求是极其严格的。二者之间的任何过大的相对幌动都可能引起电子束能散度的增大, 甚至于不能加速电子束。

本测量的目的即是对加速器各仪器、各环节的脉冲间隔的相对时间幌动进行测量, 以便了解每个环节对总的幌动起多大影响, 并为改善该环节的幌动提供必要的测量手段。本