

用霍尔差值法 作磁场分布的快速测量

孙亲仁 林樹棧 李增譜

用两只同型号的霍尔探头, 将其霍尔电压端作差值连接。一只探头固定在场中的某一参考点上; 另一只在测量支架上作扫描运动。差值输出用 X-Y 记录仪作记录, 直接绘制出场分布的图形。可以在几分钟内扫描 3 米左右的行程。用这样的方法测量变化范围从 -25% 到 15% 的小梯度磁场的分布, 测量的相对误差为 ±0.21%。

一、引言

在磁场设计中, 常要求快速、直观而又比较准确地测出既定磁铁极面的场强分布, 以便迅速判断其是否合乎要求, 并及时采取垫补措施。

这种测量牵涉到四项要求: 第一、因为被测磁场是分布的, 因而显然是非均匀的, 所以应该尽量采用点测量的办法。这就要求探头元件的尺寸要尽量地小;

第二、测量要求快速, 所以探头元件和记录仪器的响应要快;

第三、要求直观, 故希望选用能直接画出场分布图形的仪器;

第四、要在一定灵敏度的记录仪器上获得精确度尽可能高的场分布图, 就应该把场的整量测量变为相对于某一参考点的差值测量。

霍尔元件兼有尺寸小、响应快和使用方便等特点, 因此用两只霍尔元件作探头, 并配用一台 X-Y 记录仪就能比较理想地满足上述四项要求。

我们知道, 霍尔元件受温度的影响比较显著, 为了提高测量的准确度通常应将霍尔元件装入恒温室中, 并用一套电子线路进行恒温控制。这不仅使探头的体积显著地加大, 而且探头的外部连接线路也大为复杂起来。这对于在磁场中作扫描运动的探头来说是不利的。差值法在一定程度上可以克服这个不利之点。因为两只相同型号的霍尔元件, 其霍尔灵敏度的温度系数大致相同, 故使它们作差值连接后, 温度的影响大致可以相互抵消。此外差值法还可以补偿磁场的不稳定性带来的影响。因此使用差值法是可取的。

二、原理^[1,2]

将平行六面体的霍尔片置于被测场 B 中 (见图 1)。 B 与 Z 轴平行, 控制电流 I 沿 X 轴从片的中心流过, 于是在 Y 方向产生一个正比于 B 和 I 的霍尔电势

$$V = V_0 + KIB, \quad (1)$$

其中 K 为霍尔灵敏度, 伏/特斯拉·安; V_0 为不等位势, 伏。

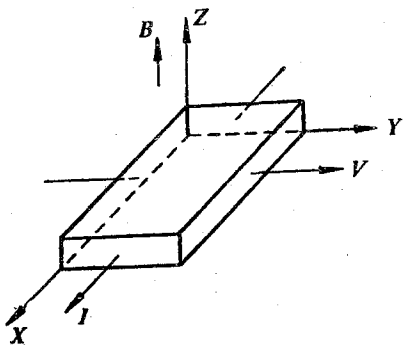


图 1 霍尔效应原理

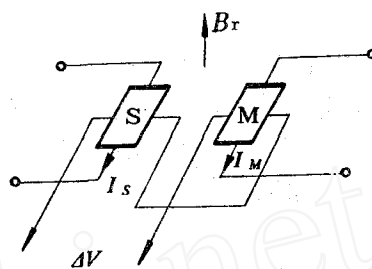


图 2 霍尔差值法接线图

差值法是将两只同型号的霍尔片作如图 2 的连接。其中一只固定在被测场的某一参考点上(参考点一般选择在场分布的平区),叫做监测探头,标以 M;另一只沿测量支架作扫描运动,叫做扫描探头,标以 S。M 探头与 S 探头的控制电流各由一台稳流电源提供。两个探头的一对霍尔电压的同名端连接在一起,从另外一对同名端输出差值电压 ΔV ,送到 X-Y 记录仪的 Y 输入端。

测量开始前,将两只探头同置于参考点 r ;分别调节 I_M 和 I_S ,使

$$V_{Sr} = V_{Mr} \tag{2}$$

V_{Sr} 和 V_{Mr} 分别为 S 和 M 探头在 r 点的霍尔电势。因而有

$$V_{0S} + K_S I_S B_r = V_{0M} + K_M I_M B_r \tag{3}$$

故参考点场强

$$B_r = \frac{V_{Mr} - V_{0M}}{K_M I_M} = \frac{V_{Sr} - V_{0S}}{K_S I_S} \tag{4}$$

然后,启动扫描探头的运动机构,使该探头沿测量支架运动;与此同时,启动一只与 S 探头同步的精密螺旋电位器。电位器固定端加恒定电压,则活动端的电压反映 S 探头的位置,这个电信号送给 X-Y 记录仪的 X 输入端,于是扫描探头所到之处,记录仪就画出一条场分布曲线。

按定义,场的相对变化

$$h = \frac{B_j - B_r}{B_r} \tag{5}$$

其中, B_r 为参考点 r 的场强, B_j 为其他点 j 的场强。因而

$$h = \frac{V_{Sj} - V_{Sr}}{V_{Sr} - V_{0S}} = \frac{V_{Sj} - V_{Mr}}{V_{Mr} - V_{0S}} = \frac{\Delta V}{V_{Mr} - V_{0S}} \tag{6}$$

在 S 探头的不等位势很小或采取补偿线路消去不等位势 V_{0S} 时, h 可表示为

$$h = \frac{\Delta V}{V_{Mr}} \tag{7}$$

这个公式就是霍尔差值法的依据。

三、设备和仪器

我们用霍尔差值法对一台大型电磁同位素分离器（图 3）进行了场的实际测量。该装置的磁极面为 4500×2526 毫米²，极间间隙为 400 毫米。极面用平行于长边的条形垫片垫补，垫片上下镜象对称。设长边为直角坐标 X 方向，短边为 Y 方向，间隙高度为 Z 方向。我们沿 Y 方向放置测量支架，在不同的 X 位置和不同的 Z 高度测量场随 Y 方向的分布曲线。

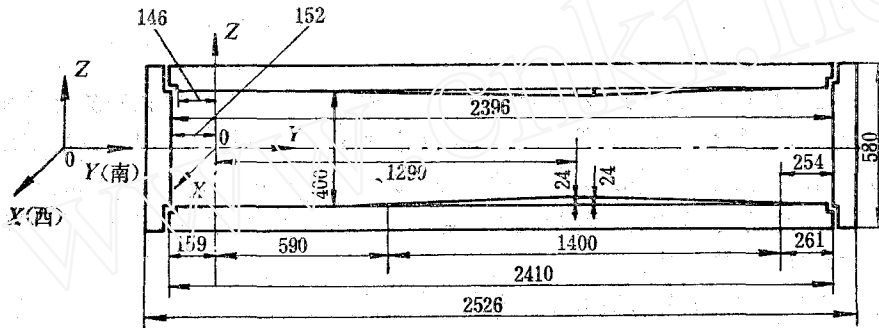
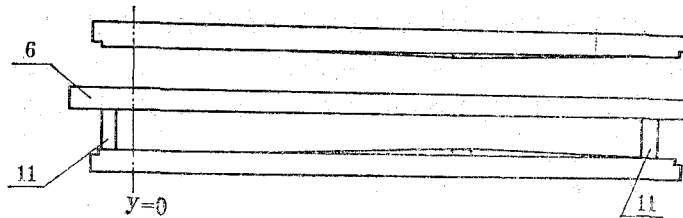
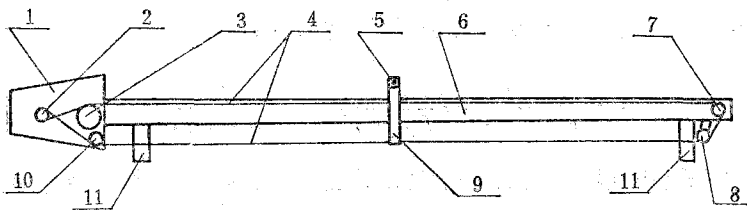


图 3 电磁同位素分离器盖板垫片位置坐标图

测量支架 图 4 为测量支架示意图。支架的主体为一根长 3160 毫米的带燕尾的方铝导杆 6。ND-09 型伺服马达 2 通过牵引绳索 4 带动滑块 9，扫描探头 5 固定在滑块上。滑块在每隔 40 毫米的不同高度上都可以安装探头。马达在牵引滑块的同时还通过绳索带动精密螺旋电位计 3 旋转。牵引绳索通过换向轮 7, 8, 10 改变方向。电位计装在马达座 1



(a) 安装位置示意图



(b) 部件示意图

图 4 测量支架

1—马达座；2—伺服马达；3—螺旋电位计；4—牵引绳索；5—扫描探头；6—导杆；7, 8, 10—换向轮；9—滑块；11—支架。

上，座与导杆连成一体。整个测量支架通过两块支板 11 固定在测量位置上。

牵引绳索 细钢丝绳显然是不能用的，因为它是磁性材料。弦线和尼龙绳也不理想，因为它们都有一定的延伸性，会造成 S 探头和螺旋电位器之间的不同步，结果产生位置误差。我们用 $\phi=0.1$ 毫米的康铜丝 60 股绞合成牵引绳索，结果比较满意。为防止绳索在滑轮中打滑，绞合好的康铜绳应涂松香，可将松香溶化在酒精中，用滴管滴到绳上。

螺旋电位器 螺旋电位器的阻值应大大低于与之并联的 X-Y 记录仪的输入阻抗，这样电位计的分压比才不受记录仪的影响。由于条件的限制，我们使用上海无线电十二厂生产的 WXD-10 型 10 圈精密螺旋电位计，阻值为 10 千欧（偏大，应越小越好），功率 5 瓦。

电位计轴上装有直径 $D_R=103$ 毫米的滑轮（见图 4 中 3），故 10 圈电位计对应的总长度为 3236 毫米。伺服马达上的滑轮（见图 4 中 2）直径 $D_m=33$ 毫米，故该滑轮转一周拖动滑块所走的行程为 103.7 毫米。实际测量时的扫描行程为 2340 毫米，相当螺旋电位计转了约 7.2 圈，马达转了约 23 圈。

霍尔探头 我们选用 FC-32 型霍尔片，其主要使用性能见表 1。两霍尔片分别装在两只 $60 \times 39 \times 32$ 毫米的有机玻璃盒中。监测探头固定在场分布平缓区某一特定位置的一根铜柱上。扫描探头装在沿支架运动的滑块上。每个片各有一对控制电流线和一对霍尔电压线分别引至盒外，然后通过相应的长导线（10~20 米）接到远离磁场的稳流源和 X-Y 记录仪。为避免长导线在磁场中运动时切割磁力线产生感应电压而干扰被测电压，每对长导线应各自绞合，各对线间还绞合成股，前者绞合得越紧越好。

表 1 FC-32 型霍尔片主要性能

霍尔控制电流额定值 I , 毫安	空载灵敏度 K , 伏/特斯拉·安	线性终端匹配电阻 R_L , 欧	终端匹配时的线性偏差, %	霍尔灵敏度的温度系数 β , %/°K
100	≥ 1.30	~ 13	0.2	~ -0.06

霍尔片的敏感中心必须在有机玻璃盒的外壁上标出。我们采用如下的办法（图 5）：从永久磁铁上引出一根长钢针，探头座对准钢针的尖端，作上下前后移动。在霍尔电压出现最大值之处便是霍尔片的敏感中心，对准后可在盒壁刻下记号。用图中所示的永久磁铁漏磁小，中心可以定得准确。

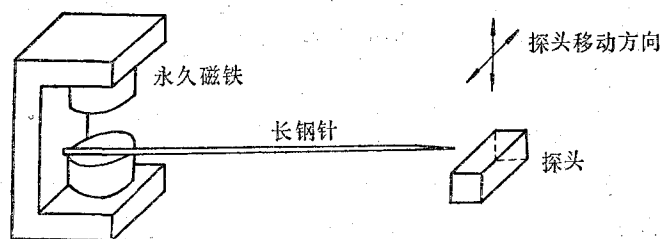


图 5 探头盒敏感中心的确定方法

X-Y 记录仪 我们采用上海自动化仪表二厂生产的 LZ 3-200 型双笔 X-Y 函数记录仪。

被测场具有如下数据:

$$B_r \approx 2500 \text{ 高斯};$$

$$V_{Mr} \approx 25 \text{ 毫伏};$$

$$\frac{\Delta V}{V_{Mr}} \text{ 的测量范围约为 } -25\% \sim 15\%;$$

ΔV 的测量范围约为 $-6.25 \text{ 毫伏} \sim 3.75 \text{ 毫伏}$ 。

因此,对记录仪 Y 轴的量程选用 0.5 毫伏/厘米, X 轴量程我们选用 100 毫伏/厘米。为了使记录纸 X 轴上 1 厘米距离正好表示实测坐标 10 厘米的距离 (缩小为 1/10), 则螺旋电位计固定端应加的电压为

$$V_R = \frac{n\pi D_R}{10} \cdot 100 \text{ 毫伏/厘米}. \quad (8)$$

其中, n 为螺旋电位计的圈数, $n=10$; D_R 为螺旋电位计滑轮的直径, $D_R=10.3 \text{ 厘米}$ 。代入 (8) 式得

$$V_R = 3.236 \text{ 伏}.$$

记录仪有关量程的主要技术参数见表 2。

表 2 记录仪有关量程的主要技术参数

输入	记录纸幅面, 厘米	选用灵敏度, 毫伏/厘米	满量程范围	输入阻抗	指示精度
X	30	100	3 伏	1 兆欧	直接输入 (0.5 毫伏/厘米) 时为 0.5%, 有衰减器时附加误差 0.3%。
Y	25	0.5	12.5 毫伏	∞	

稳流电源 用两台北京电表厂生产的 YJ-10 A 型直流稳流器, 漂移 0.01%/分, 稳定度 0.01%。

四、测量结果与误差分析

图 6 为 $X=1580 \text{ 毫米}$ (磁极面长边的中心处), $Z=0$ 实测场分布。关于测量的误差, 我们分析如下。

1. 由于引用公式的近似性带来的误差 δh_1 。我们是按 (7) 式进行测量和记录的, 而且没有采取补偿线路消去不等位势 V_{0S} , 故由此产生的误差为

$$\delta h_1 = \frac{\Delta V}{V_{Mr}} - \frac{\Delta V}{V_{Mr} - V_{0S}} \approx \frac{\Delta V}{V_{Mr}} - \frac{\Delta V}{V_{Mr}} \left(1 + \frac{V_{0S}}{V_{Mr}} \right) = -\frac{\Delta V}{V_{Mr}} \cdot \frac{V_{0S}}{V_{Mr}}. \quad (9)$$

我们使用的 S 探头, 实测其 $V_{0S} = -21 \text{ 微伏}$, V_{Mr} 调到 $25.000 \pm 0.001 \text{ 毫伏}$, 并且使 $V_{Sr} = V_{Mr}$, 而 $\Delta V/V_{Mr}$ 为 $-25\% \sim 15\%$, 故此项误差为 $0.02\% \sim -0.01\%$ 。

2. 扫描探头的位置误差 δh_2 。由于 S 探头的 Y 向位置是通过螺旋电位计的动臂电压 V_x 在记录仪 X 轴上反应出来的。这种定位方法有两种来源的误差, 一是由记录仪 X 放大器的输入电阻 R_i 与螺旋电位计并联造成的, 二是螺旋电位计本身的非线性造成的。图 7 是电位计和 X-Y 记录仪的连接图。

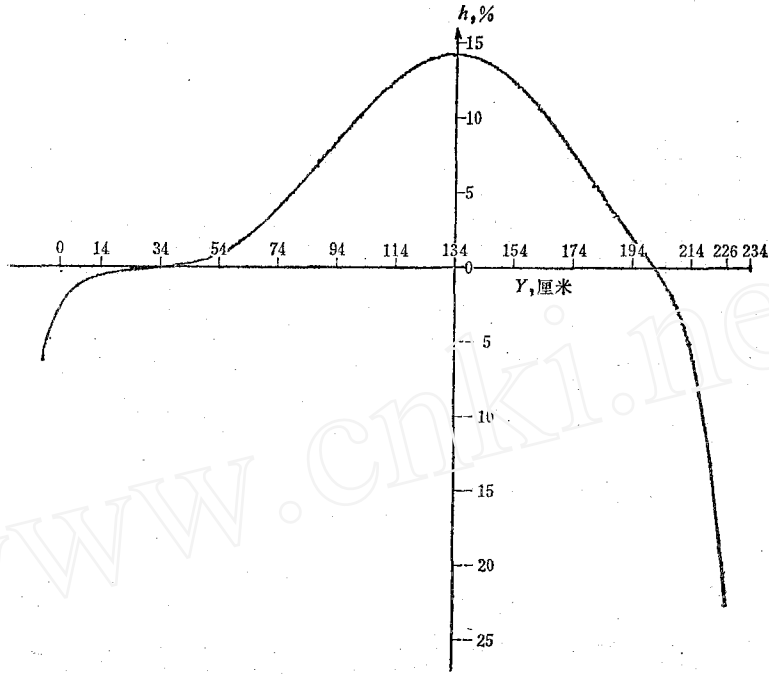


图 6 实测场分布

螺旋电位计的阻值 $R = R_1 + R_2$ 。动臂位置变化, R_1, R_2 也变化。

我们希望 $V_x = \lambda R_2$ (λ 为常数)。显然, 只有 $R_1 = \infty$ 才能实现。现用 $V_{x,\infty}$ 表示 $R_1 = \infty$ 时的 V_x 值, 则

$$V_{x,\infty} = \frac{V_R}{R} R_2 = \lambda R_2. \quad (10)$$

一般情况下, 即 $R_1 \neq \infty$ 的情况下,

$$V_x = \frac{\frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1}}{R_1 + \frac{R_2 R_1}{R_2 + R_1}} \cdot V_R = \frac{1}{\left(\frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2^2}{R R_1} + 1\right)} \cdot \frac{V_R}{R} \cdot R_2. \quad (11)$$

令 $\psi = \frac{R_2}{R_1} - \frac{R_2^2}{R R_1}$, 可见当 $\psi = 0$ 时, 即 $R_2 = 0$ 及 $R_2 = R$ 时, $V_x = V_{x,\infty} = \lambda R_2$, 动臂在其他位置时 V_x 对线性值都有偏差。

定义相对偏差

$$\delta_x = \frac{V_x - V_{x,\infty}}{V_{x,\infty}} = \frac{\Delta V_x}{V_{x,\infty}}. \quad (12)$$

则

$$\delta_x = \frac{-\psi}{1 + \psi}. \quad (13)$$

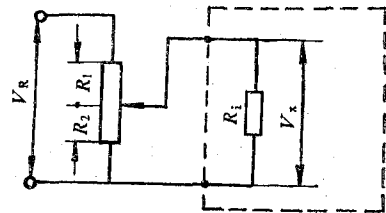


图 7 电位计和 X-Y 记录仪的连接图

求 $\frac{d\delta_x}{dR_2} = 0$ 时的 R_2 值, 得 $R_2 = \frac{R}{2}$ 。令 $R_1 = 1$ 兆欧, $R_2 = \frac{R}{2} = 5$ 千欧。故最大相对偏差为

$$(\delta_x)_{\max} \approx -0.25\%$$

故整个测量行程中将有 4.0 毫米的最大位置误差。因为对应的场的梯度为 0.02%/毫米, 故由于此种位置误差所引起的场误差可达 $\pm 0.08\%$ 。

显然, 选用低阻值的螺旋电位计, 或者选用记录仪的更灵敏的“X 输入档”使输入阻抗 R_i 提高, 都可以有效地使上述误差减小, 因此本工作的测量条件, 并不是很理想的。

然而, 即使上述位置误差可减小到可忽略的程度, 螺旋电位计本身的非线性也将造成位置误差, 我们所用的电位计的线性为 $\pm 0.1\%$, 由此引起的位置误差可达 3.2 毫米, 导致的场误差可达 $\pm 0.065\%$ 。我们将上述两项误差之和作为整个测量范围的位置误差 δh_2 。

3. 仪器误差 δh_3 。对(7)式取全微分得

$$\delta h_3 = \delta \left(\frac{\Delta V}{V_{Mr}} \right) = \frac{\Delta V}{V_{Mr}} \left(\frac{\delta \Delta V}{\Delta V} + \frac{\delta V_{Mr}}{V_{Mr}} \right). \quad (14)$$

我们是用 X-Y 记录仪测 ΔV 的, 从厂家给出的性能指标已知 $\frac{\delta \Delta V}{\Delta V} = \pm 0.5\%$ 。 V_{Mr} 是用 LM-1490 数字电压表测量的, 该表的测量准确度优于 $\pm 0.015\%$, 故 $\left| \frac{\delta V_{Mr}}{V_{Mr}} \right| < 0.015\%$ 。

现 $\frac{\Delta V}{V_{Mr}}$ 从 $-25\% \sim 15\%$, 故

$$\delta h_3 = \pm 0.125\% \sim \pm 0.075\%$$

4. 漂移误差 δh_4 。控制电流和主磁场的漂移, 环境温度的变化, 都可能影响霍尔电压, 造成误差。

我们对霍尔探头未加温控, 但快速测量历时很短, 温度变化也很小。我们估计时即以此为依据。

首先考虑漂移对不等位势的影响。环境温度的变化和控制电流的漂移引起不等位势的变化为

$$\delta V_{0S} = V_{0S} \left(\alpha \Delta T + \frac{\delta I_S}{I_S} \right). \quad (15)$$

其中, α 为霍尔片的电阻温度系数, 对 FG-32 为 $0.2\%/^{\circ}\text{K}$; ΔT 为环境温差, 以 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 计; $\frac{\delta I_S}{I_S}$ 为稳流源的漂移率, YJ-10 A 为 $0.01\%/分$; 以 3 分钟计为 0.03% ; V_{0S} 是 S 片不等位势, 为 -21 微伏。

显然, $\delta V_{0S} \ll V_{0S}$, 不等位势本身对测量误差的影响已经很小, 而 δV_{0S} 就更不必考虑了。

从(7)式可知, V_{Mr} 是测量开始前在参考点校准 S 和 M 两探头时的实测值, 并得 $V_{Mr} = V_{Sr}$ 。测量开始后就不再复测。测量行程中不断输出 ΔV 值, 送记录仪。记录纸上画出的分布图则恒以初测 V_{Mr} 为基准的, 实际上, 由于上述诸漂移因素, M 和 S 探头的特性都可能变化。为此, 我们把测量行程中两探头的霍尔电压分别标为 $V_{S'j}$ 和 $V_{M'r}$ 。这样, 我们实际测得的是

$$h^* = \frac{V_{S'j} - V_{M'r}}{V_{Mr}} \quad (16)$$

但按原定义应为

$$h = \frac{B_j - B_r}{B_r} \sim \frac{V_{S'j} - V_{S'r}}{V_{S'r}} \quad (17)$$

因此, 漂移误差为

$$\delta h_4 = h^* - h \quad (18)$$

设

$$V_{S'r} = V_{Sr}(1 + \Delta_S) = V_{Sr} + \delta V_{Sr} \quad (19)$$

$$V_{M'r} = V_{Mr}(1 + \Delta_M) = V_{Mr} + \delta V_{Mr} \quad (20)$$

并且已知 $V_{Sr} = V_{Mr}$, 于是

$$\begin{aligned} \delta h_4 &= \frac{V_{S'j} - V_{M'r}}{V_{Mr}} - \frac{V_{S'j} - V_{S'r}}{V_{S'r}} \\ &\approx \left(\frac{V_{S'j} - V_{M'r}}{V_{Mr}} \right) \Delta_S + (\Delta_S - \Delta_M)(1 - \Delta_S) \\ &\approx \frac{\Delta V}{V_{Mr}} \Delta_S + (\Delta_S - \Delta_M) \end{aligned} \quad (21)$$

因为

$$\Delta_S = \frac{\delta V_{Sr}}{V_{Sr}} = \left| \frac{\delta B_r}{B_r} \right| + \left| \frac{\delta I_S}{I_S} \right| + \left| \frac{\delta K_S}{K_S} \right|, \quad (22)$$

式中, $\frac{\delta B_r}{B_r}$ 为被测磁场的漂移, 0.01%; $\frac{\delta I_S}{I_S}$ 为 S 探头的稳流源的漂移, 0.01%/分, 我们以 3 分钟计, $\frac{\delta I_S}{I_S} = 0.03\%$; $\frac{\delta K_S}{K_S}$ 为 K_S 的变化率, 即 $\beta \Delta T$, 对于 FS-32, $\beta = -0.06\% / ^\circ\text{K}$, 我们以 $\pm 1^\circ\text{C}$ 计, $\frac{\delta K_S}{K_S} = \beta \Delta T = \pm 0.06\%$.

得

$$\Delta_S \approx \pm 0.1\%.$$

同样,

$$\Delta_M = \left| \frac{\delta B_r}{B_r} \right| + \left| \frac{\delta I_M}{I_M} \right| + \left| \frac{\delta K_M}{K_M} \right|, \quad (23)$$

得

$$\Delta_M \approx \pm 0.1\%.$$

注意到两探头是型号相同的霍尔片又处于同一磁场下, 所以对于(21)式中的 $(\Delta_S - \Delta_M)$ 来说, 其中 $\frac{\delta B_r}{B_r}$ 与 $\frac{\delta K}{K}$ 可以相互抵销。这一点的物理意义是很明显的, 已在引言中提过, 这里不再重复。但是两探头的控制电流是分别供给的, 故 $\frac{\delta I_S}{I_S}$ 与 $\frac{\delta I_M}{I_M}$ 则应将绝对值相加。于是(21)式变为

$$\delta h_4 = \frac{\Delta V}{V_{Mr}} \Delta_S + \left(\left| \frac{\delta I_S}{I_S} \right| + \left| \frac{\delta I_M}{I_M} \right| \right). \quad (24)$$

将具体数值代入(24)式, 得

$$\delta h_4 = \pm 0.085\% \sim \pm 0.075\%.$$

5. 总误差。根据以上分析,对于 $-25\% \sim 15\%$ 的测量范围,各单项误差的数值如下:

- 公式误差 $+0.02\% \sim -0.01\%$;
- 位置误差 $\pm 0.145\% \sim \pm 0.145\%$;
- 仪器误差 $\pm 0.125\% \sim \pm 0.075\%$;
- 漂移误差 $\pm 0.085\% \sim \pm 0.075\%$ 。

取各单项误差的均方根作为总误差 δh , 则

$$\delta h \approx \pm 0.21\% \sim \pm 0.18\%.$$

从以上讨论可见,除了位置误差外,其他的单项误差均与测量范围有关。测量范围内场的变化量越小,差值法的测量精度就越高。

五、结 语

霍尔差值法为我们在场的垫补试验提供了一种快速、直观而又相当简便的测磁工具。当使用这种方法作模型磁铁的场测量时^[2,3]可以降低对磁铁供电稳定度的要求。

霍尔差值法总的来说测量精度不很高,但在磁铁均匀区的均匀度的测量中仍然可以做相当精确,而且均匀度越高测量的相对精确度就越高。

本工作进行过程中得到了李公攀、胡金泉等同志的大力支援和帮助。

参 考 文 献

- [1] 上海电子专科学校编,霍尔元件及其应用,上海人民出版社,1974.
- [2] 逸见政武[日],计量技术快报,1964年8月号.
- [3] H. Breclma and H. S. Gordn (Ed.), Proceedings of the International Symposium on Magnet Technology, SLAC Colifornia, 1965.