

弱磁材料磁测线圈的设计

秦 都

(西北轻工业学院)

一、引 言

测量磁化率的仪器和装置是多种多样的^[1,2]。提高测量灵敏度,尤其对弱磁性材料,是一个十分重要的问题。提高冲击法测磁灵敏度的主要途径有:选用灵敏的积分器,增加磁场以及合理地制作测量线圈。本文仅就后者进行讨论。

二、测量线圈

在一般冲击法测量弱磁材料磁性的装置中,测量线圈大多为串联反接的两组线圈,可以固定在一个骨架上,也可以分别绕制。分析表明,单一的测量线圈与一个低内阻的互感线圈达到补偿,有益于灵敏度的提高和零点的稳定。

设想一个中空的圆柱状测量线圈,其长度为 L ,内外半径分别为 r_1 和 r_2 。若用外直径为 d 、铜芯直径为 d_0 ,且两者之比 $K = d/d_0$ 在 d_0 范围内近似为常数的漆包铜线来绕制^[3],则总圈数 $n = n_1 \cdot n_2$,其中 $n_1 = L/(dK_y)$, $n_2 = (r_2 - r_1)/(dK_B)$, K_y 和 K_B 分别称为排绕和叠绕系数^[3]。把此线圈置于螺线管内,当磁场的变化用一互感 M 来补偿时,其基本方程为

$$\pi n_1 \sum_n [r_1 + (n_2 - 1)dK_B]^2 m = M \cdot 10^8, \quad (1)$$

$$R_n = \frac{8\rho n_1}{d_0^2} \sum_n \left[r_1 + \frac{1}{2} dK_B + (n_2 - 1)dK_B \right] = R_K - R_M, \quad (2)$$

$$S_l = \frac{4\pi^2(r_1 - D)^2 n_1 n_2}{C_{\phi 0} + C_{\phi}(R_n + R_M)}, \quad (3)$$

式中 m 为螺线管常数, M 为互感器的互感量,

物理

R_n 为线圈电阻, ρ 为漆包线铜芯的电阻率, R_K 为冲击检流计外接临界电阻, R_M 为互感器次级线圈电阻, S_l 为磁化灵敏度, D 为绕线骨架的径向厚度, $C_{\phi 0}$ 为检流计的外接电阻为零时的磁通常数, C_{ϕ} 为电量常数。

可以证明,检流计工作状态不同,则 C_{ϕ} 取值不同,其改变为 $C_{\phi}^{(2)} > C_{\phi}^{(K)} > C_{\phi}^{(1)}$ 。具体公式为

$$\begin{aligned} C_{\phi}^{(1)} &= \frac{T_0}{2\pi S_l} \exp\left(\frac{\beta}{\sqrt{1-\beta^2}} \cdot \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\sqrt{1-\beta^2}}{\beta}\right)\right) \\ &= \frac{T_0}{2\pi S_l} \exp\left(\frac{4}{3} - \frac{1}{3\beta^2} + \dots\right) \\ &\quad \left(\frac{\sqrt{2}}{2} \leq \beta < 1\right), \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} C_{\phi}^{(2)} &= \frac{T_0}{2\pi S_l} \exp\left(\frac{\beta}{\sqrt{\beta^2-1}} \cdot \operatorname{tg} h^{-1}\left(\frac{\sqrt{\beta^2-1}}{\beta}\right)\right) \\ &= \frac{T_0}{2\pi S_l} \exp\left(\frac{4}{3} - \frac{1}{3\beta^2} + \dots\right) \quad (\beta > 1), \end{aligned} \quad (5)$$

$$C_{\phi}^{(K)} = \frac{T_0 c}{2\pi S_l} \quad (\beta = 1), \quad (6)$$

式中 T_0 和 S_l 分别表示检流计的周期和电流灵敏度, β 为阻尼度。

由于存在关系式

$$R = (R_K + R_g) \cdot \frac{1 - \beta_0}{\beta - \beta_0}, \quad (7)$$

式中 R_g 为检流计内阻, R 为检流计回路的总电阻, β_0 表示空气阻尼所对应的阻尼度。可以看出,当 $\beta = 1$ 或 $R = R_K + R_g$ 时,在一级近似中,可认为 C_{ϕ} 为一常数。

在 $\beta = 1$ 的临界状态,当 $n_2 \gg 1$ 且 $D = 0$ 时,由(1),(2)和(3)式可解得

$$r_1 = Pr_2 \quad (0 < P < 1), \quad (8)$$

$$d^4 = \frac{4\rho L K^2 (1 - P^2) r_2^2}{K_Y K_B (R_K - R_M)} \quad (9)$$

$$S_I = \frac{2\pi^2 P^2 r_2^2}{K C_Q (R_{g0} + R_K)} \sqrt{\frac{L (R_K - R_M) (1 - P)}{K_Y K_B \rho (1 + P)}} \quad (10)$$

式中 $R_{g0} = C_{\phi 0} / C_Q$, 称为检流计等效内阻; P 满足于

$$\frac{(1 - P^3)^2}{1 - P^2} = \frac{36 M^2 K^2 \rho K_Y K_B \cdot 10^{16}}{\pi^2 m^2 r_2^4 L (R_K - R_M)} \cdot [1 + \delta]^2 \quad (11)$$

式中 δ 为修正量, 当 $n_2 \rightarrow \infty$ 时, $\delta = 0$. 若略去 $P^6 (P^6 \approx 0)$, 从上式易求出 P 值. 不难证明,

若能够改变 M 使 $P = (\sqrt{17} - 1)/4$, 且存在 $R_K = R_{g0} + 2R_M$, 则有最佳磁化灵敏度

$$S_{I_{max}} = 2.1110186 \cdot \frac{r_2^2}{K C_Q} \left[\frac{L}{K_Y K_B \rho (R_{g0} + R_M)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

由于近期各国生产的检流计(如表 1 所示)大多为 $R_{g0} > R_K$, 且中场下补偿用的可变互感器不易得到, 这样, 实现最佳灵敏度的装置有一定的困难. 设想临界状态下, 可适度改变检流计的结构常数, 达到仅使工作常数中临界电阻满足 $R_K = R_{g0} + 2R_M$. 同时还需制作一个合适的互感器. 如此, 可得到表 1 中所示的 $S_{I_{max}}$.

表 1 冲击检流计常数和最佳磁化灵敏度

类别 型号	$R_g(\Omega)$	$R_K(\Omega)$	$T_0(s)$	$C_{\phi 0}(Mx/mm)$	$C_Q(Mx/mm \cdot \Omega)$	$R_{g0}(\Omega)$	$S_{I_{max}}(m/Gs)$
M17/12	22	250	15	30	0.097	309	20.63
AC4/4-1	7.3	36	22	40	0.69	58.0	6.435
AC4/3	86	1000	18	255	0.13	1962	6.160
4789	16	300	20	80	0.22	364	8.394

* 计算中取: $L = 7.5\text{cm}$, $\rho = 1.75\mu\Omega \cdot \text{cm}$, $R_M = 6\Omega$, $r_2 = 3\text{cm}$, $K_Y = 1.17$, $K_B = \sqrt{3}/2$, $K = 1.1$, $m = 97.5(\text{Oe}/\text{A})$.

表 2 测量线圈*

类别 编号	r_2 (cm)	M (mH)	R_M (Ω)	检流计 类型	K_Y	r_1 (cm)	d (cm)	d_0 (cm)	δ	总圈数 n		$R_n(\Omega)$		$S_I(m/Gs)$		
										实验	计算	实验	计算	实验	计算	误差 (%)
5-3	1.875	50.0	18.3	M17/ 12	1.157	0.740	0.030	0.027	0.021	9067	9291	232	231.7	3.624	3.775	4.0
5-7	2.707	38.32	5.79	AC4/ 4-1	1.176	0.700	0.061	0.056	0.028	4000	3973	27.0	30.21	1.193	1.185	0.7

* 表中未列数据见表 1 注(K 除外).

有了上述的基本关系, 可进行线圈的制作. 首先根据所选用元件的有关数据, 如螺线管的磁场均匀区为 $\phi 2r_2 \times L$ 和螺线管常数为 m ; 互感器之 M 和 R_M ; 检流计之 C_Q 、 R_K 和 R_{g0} 以及有关常数. 按式(11)计算出 P 的近似值. 其次求得 d 和 r_1 , 代入式(1)和式(2)进行验算. 若不合适, 可进行修正, 直到合适为止. 若引入 δ , 则便于计算, 否则需多次修正. 表 2 给出了制作的两个测量线圈的有关数据. 可见, 实验值与计算值基本是一致的.

在自制的冲击法弱磁测量装置上, 用 5-3 号线圈测量了用 4RC9 (FeMn30Ni6Cu5) 材料制成的 $\phi 10 \times 150\text{mm}$ 试样, 对应 500Oe 磁场, 检流计偏转 205mm. 这样磁导率

$$\mu_{500} = 1.00156\text{Gs}/\text{Oe}.$$

参 考 文 献

- [1] K. Dwight, *J. Appl. Phys.*, **38** (1967), 1505.
- [2] S. Foner, *J. Appl. Phys.*, **38** (1967), 1510.
- [3] 吴大正, 电路基础, 国防工业出版社, (1979), 244, 287.