

中华人民共和国国家标准

电工钢片（带）中频磁性能 测量方法

UDC 669.14-41
:621.317.4
:621.3
GB 10129—88

Methods of measurement of magnetic
properties of magnetic steel sheet and
strip at medium frequencies

本标准参照采用IEC 68（中央）89《电工钢片（带）中频磁性能测量方法》。

1 主题内容与适用范围

本标准规定了用功率表、电压表、电流表和电桥测量电工钢片（带）的比总损耗、比视在功率、磁感应强度、电感磁导率和振幅磁导率。

本标准适用于在400~10 000 Hz、感应电压波形正弦、环境温度为 23 ± 5 °C、相对湿度小于80%时电工钢片（带）交流磁性能测试。

2 一般要求

2.1 考虑到本标准中采用了若干约定，如等效磁路长度、有效质量系数等，同时测量总的误差与构成装置的仪器设备、环境条件、材料和测量点等多种因素有关，要得到一个综合误差分析结果是困难的。因此，本标准采用一个经验值“重复性”来表示符合本标准规定各独立装置测量结果的一致程度。

2.2 可以采用其他类型的试验装置和试验方法来测量上述磁参数，如有争议以本标准规定的方法为准。

第一篇

用功率表、电压表、电流表和25 cm爱泼斯坦方圈测量电工钢比总损耗、
比视在功率、磁感应强度和振幅磁导率

3 测量原理

具有初级绕组和次级绕组的25 cm爱泼斯坦方圈（以下简称25 cm方圈）和作为试样的铁芯构成一个无载变压器。用功率表测量比总损耗，用电压表和电流表测量比视在功率、磁感应强度和振幅磁导率。图1为测量原理示意图。

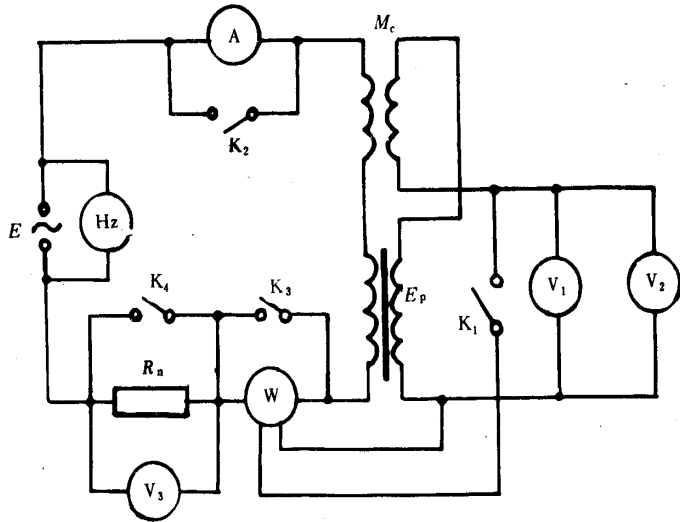


图 1 测量原理示意图

E —磁化电源； M_c —空气磁通补偿互感； A —有效值电流表；
 Hz —频率计； W —功率表； V_1 —平均值电压表； V_2 —有效值电压表； V_3 —峰值电压表； E_p —25 cm方圈； K_1, K_2, K_3, K_4 —开关； R_n —精密电阻

4 试样

4.1 试样按有关技术标准规定取样。

4.2 试样剪切规格：宽 30 ± 0.2 mm，长 $(280 \sim 305) \pm 0.5$ mm，要求试样平坦，整齐，四角直角性好，边缘无明显毛刺。

试样条片应按有关技术标准要求平行或垂直轧制方向剪切。以钢带（片）长边为准，其允许角度偏差为：

取向钢片（带）， $\pm 1^\circ$

无取向钢片（带）， $\pm 5^\circ$

4.3 试样总片数应是4的整数倍，其总质量不少于200 g，对于热轧和冷轧无取向电工钢片（带），半数条片垂直于轧向，另半数条片平行于轧向，并各自分为两组分别放入方圈相对的两个螺线管中，冷轧取向电工钢片（带）所有条片均取平行于轧制方向，每个螺线管中放入总数的1/4条片，方圈中的试样以双搭接形式互相搭接，见图2，紧靠方圈螺线管内侧构成一正方形闭合磁路。在磁路四角搭接处可施加大约1 N的压力。

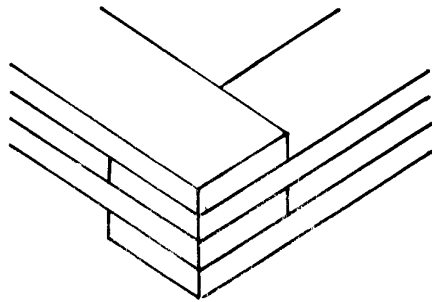


图 2 试样条片的相互联接——双搭接示意图

5 测量设备和仪器

5.1 25 cm方圈

5.1.1 25 cm方圈由 4 个结构完全相同的内框架截面为矩形的螺线管构成。螺线管的线圈框架用厚度为 1.6 mm 坚硬的无磁性绝缘材料制作。它的内侧矩形截面尺寸为宽 32 mm，高 5 mm。

螺线管安装在一个无磁性的绝缘材料制作的基平面上。安装时保证 4 个螺线管处于同一水平面内，两相邻螺线管相互垂直，交角为 $90^\circ \pm 0.5^\circ$ ，当试样紧靠螺线管框架内侧时构成内边长为 220^{+1}_0 mm 的正方形磁路。见图 3。

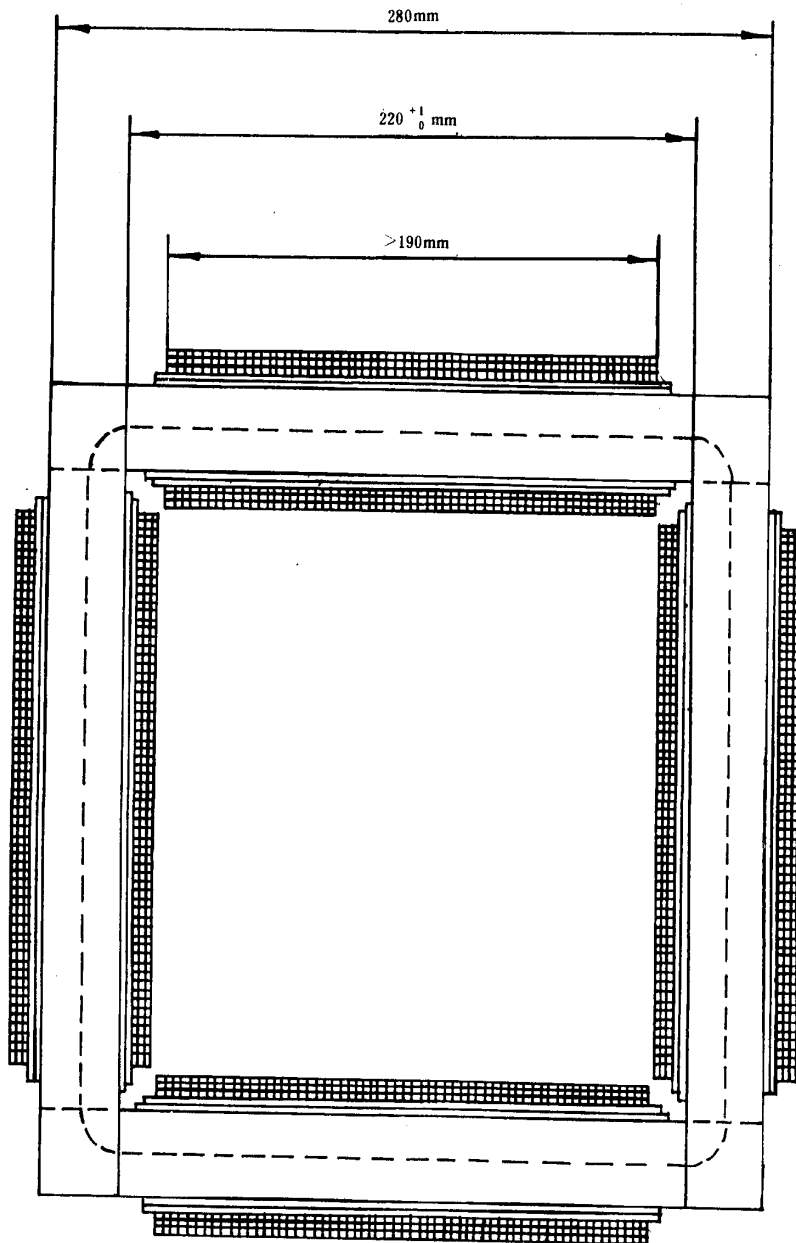


图 3 25 cm 爱泼斯坦方圈结构示意图

5.1.2 每个螺线管有二个绕组，即初级绕组（外层，磁化绕组）和次级绕组（内层，申压绕组）。本方法规定初级绕组 N_1 和次级绕组 N_2 总匝数各为200匝，其直流电阻小于0.5 Ω 。

为使试样尽可能均匀磁化，每个螺线管绕组长为191 mm，绕组线圈应均匀分布，其匝数各为50匝。每个螺线管的初级和次级绕组在同一个角开始分别依次串联。

为尽可能地减少感应电压波形失真和绕组内部电压降，绕组阻抗应尽量小。在高频下，初级绕组 N_1 和次级绕组 N_2 间的电容和次级绕组的分布电容将产生损耗。二绕组应隔离，以减少这种损耗。

5.1.3 满足6.1.1和6.1.2规定时，25 cm方圈的等效磁路长度 l_m 的约定值为0.94 m。其试样的有效质量按（1）式计算。

$$m_a = \frac{l_m}{4l} \cdot m \quad \dots\dots\dots (1)$$

式中： m ——试样总质量，kg；
 m_a ——试样有效质量，kg；
 l ——试样条片长度，m；
 l_m ——25 cm方圈等效磁路长度，m。

5.1.4 空气磁通补偿：

5.1.4.1 当磁化磁场大于1 000 A/m时，应对空气磁通进行修正。方圈次级感应电压平均值按（2）式计算。

$$\begin{aligned} \bar{U}'_2 &= 4 N_2 f A \hat{B}_i + 4 N_2 f A_t \hat{H} \mu_0 \\ &= 4 N_2 f A (\hat{B}_i + \mu_0 \hat{H} \frac{A_t}{A}) \\ &= 4 N_2 f A (\hat{B}_i + \mu_0 \hat{H} \frac{A_t - A}{A}) \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

式中： \hat{B}_i ——磁极化强度峰值，T；
 μ_0 ——真空磁导率， $\mu_0 = 4 \pi \times 10^{-7}$ H/m；
 \hat{B} ——磁感应强度峰值，T；
 \hat{H} ——磁场强度峰值，A/m；
 N_2 ——方圈次级绕组匝数；
 A ——试样横截面积，m²；
 A_t ——方圈次级绕组横截面积，m²；
 \bar{U}'_2 ——方圈次级（未接互感器）感应电压平均值，V；
 f ——频率，Hz。

式中第二项是由空气磁通产生的感应电压。在测试中应给予修正。在低频（ $f \leq 10\,000$ Hz）可用互感补偿空气磁通。

5.1.4.2 空气磁通补偿互感绕在一个无磁性材料制作的圆柱形骨架上，先绕初级绕组，后绕次级绕组。其结构参数设计，应保证尽可能小的初、次级绕组的电阻和电感。

5.1.4.3 该互感安装在方圈中心，其轴线垂直于4个螺线管构成的平面。互感的初级和方圈初级绕组串联，次级和方圈次级绕组反向串联。调整时方圈中不放入试样，初级绕组中通以交流电流，调节互感的次级绕组匝数，使方圈和补偿互感次级绕组同各端之间的感应电压小于方圈（或互感）次级绕组上感应电压的0.1%。

5.2 平均值电压表

由于次级感应电压平均值测量在比总损耗测量中的重要性，所用平均值电压表在试验频率范围内精度等级尽可能地高，至少是0.5级，并引入更正值。

注：一般情况下平均值电压表刻度乘以系数1.111。

5.3 有效值电压表

准确度等级等于或优于0.5级。

5.4 峰值电压表

准确度等级等于或优于0.5级。

以上电压表的输入阻抗应大于1 000 Ω/V 。可以用符合精确度和输入阻抗要求的数字电压表或作为测量装置输入级的运算放大器。

5.5 有效值电流表

内阻小于0.1 Ω ，准确度等级等于或优于0.5级。

5.6 频率表

准确度等级等于或优于0.2级。

5.7 功率表

功率用高灵敏度的低功率因数的功率表测量。在测量频率范围内准确度等级等于或优于0.5级。其电压支路电阻应大于100 Ω/V 。此支路的电阻值大于电抗5 000倍。

5.8 磁化电源

磁化电源应具有低内阻，电压和频率稳定性良好，频率和输出电压应连续可调。频率范围至少为400~10 000 Hz，容量不低于200 VA，输出电压最大为230 V。在测量期间电压和频率波动不超过预定值的 $\pm 0.2\%$ 。次级感应电压波形因素应保持在 $1.111 \pm 1\%$ 以内。

5.9 精密电阻

无感电阻，准确度等级0.5级，阻值小于或等于1 Ω 。

6 测量和数据处理

6.1 测量前的准备

6.1.1 用天平称量试样的质量，称量误差小于0.1%。随后按4.3要求将试样装入方圈。

6.1.2 退磁：当测量是在低于1.0 T磁感应强度下进行，测量前试样必须经过退磁。退磁频率为50 Hz。退磁磁场强度峰值应足够大（接近1 000 A/m），然后以很小递减量，约在20 s内将磁化磁场缓慢地减少到零。退磁后需搁置3 min。

6.2 测量步骤

测量应从退磁状态开始，由低磁感应强度测到高磁感应强度，由低频测到高频。当所选测量点对应的磁感应强度低于前一测量点或者更换磁化频率时，则应重新退磁。

6.3 比总损耗的测量

6.3.1 测量点的设定

调节电源频率使之等于测量点所对应的频率，允许最大偏差 $\pm 0.2\%$ 。断开图1中开关 K_2 、 K_3 ，接通开关 K_1 、 K_4 ，增大电源输出电压，使得方圈次级绕组感应电压平均值为 \bar{U}_2 按(3)式计算。

$$\bar{U}_2 = 4 N_2 A f \hat{B}_i \left(\frac{R_i}{R_i + R_t} \right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

式中： \bar{U}_2 ——次级绕组感应电压平均值，V；

f ——磁化电源频率，Hz；

\hat{B}_i ——预定磁极化强度峰值，T；

R_i ——功率表电压支路直流电阻，有效值电压表内阻和平均值电压表内阻的并联电阻， Ω ；

R_t ——次级绕组的直流电阻， Ω ；

A ——试样横截面积， m^2 。按(4)式计算：

$$A = \frac{m}{4 l \rho} \quad \dots\dots\dots (4)$$

式中： ρ ——试样材料密度， kg/m^3 。 ρ 的数值根据试样牌号从有关标准中选取。

6.3.2 测量

观察电流表 (A) 的示值, 确保功率表电流支路不过载, 然后合上开关 K_2 将电流表短路。重调次级感应电压。按 6.8 要求检查次级感应电压波形因数, 读取功率表和有效值电压表的示值。

注: 为避免试样过热和提高重复性, 测量应尽可能地快, 并采取冷却措施。

6.3.3 数据处理

从功率表读取的功率值包括次级回路的仪表功率损耗, 计算试样损耗时应对此按 (5) 式进行修正。

$$P_c = \frac{N_1}{N_2} \cdot P_w - \frac{U_2^2}{R_i} \quad \dots\dots\dots (5)$$

式中: P_w ——从功率表读取的功率值, W;
 U_2 ——次级感应电压有效值, V;
 P_c ——试样铁芯总功率损耗, W;
 N_1 ——初级绕组匝数。

比总损耗按 (6) 式计算。

$$P_s = \frac{P_c}{m_a} \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中: P_s ——试样比总损耗, W/kg。

6.4 磁感应强度、比视在功率和振幅磁导率的测量

6.4.1 测量点的设定

接通开关 K_3 , 断开开关 K_1 、 K_2 、 K_4 。调节磁化电源的输出, 使得在精密电阻 R_n 两端的峰值电压为 \hat{U}_3 , 按 (7) 式计算。

$$\hat{U}_3 = \frac{0.94 R_n \hat{H}_0}{N_1} \quad \dots\dots\dots (7)$$

式中: R_n ——精密电阻阻值, Ω ;
 \hat{U}_3 ——峰值电压表示值, V;
 \hat{H}_0 ——预定磁场强度峰值, A/m。

当测量是在预定某一磁场强度有效值下进行, 调节磁化电源输出, 使得电流表的示值为 I_1 , 按 (8) 式计算。

$$I_1 = \frac{0.94 H_0}{N_1} \quad \dots\dots\dots (8)$$

式中: I_1 ——流过初级绕组电流有效值, A;
 H_0 ——预定磁场强度有效值, A/m。

6.4.2 测量

读取平均值电压表, 有效值电流表, 有效值电压表的示值。

6.4.3 计算

6.4.3.1 磁感应强度峰值按 (9) 式计算。

$$\hat{B} = \frac{\bar{U}_2}{4 N_2 A f} \cdot \frac{R_v + R_t}{R_v} + \mu_0 \hat{H} \quad \dots\dots\dots (9)$$

式中: \hat{B} ——磁感应强度峰值, T;
 R_v ——平均值电压表和有效值电压表并联电阻, Ω 。

6.4.3.2 比视在功率按 (10) 式计算。

$$S_s = \frac{N_1}{N_2} \cdot \frac{I_1 U_2}{m_a} \dots\dots\dots (10)$$

式中： S_s ——比视在功率，VA/kg。

6.4.3.3 振幅磁导率按(11)式计算。

$$\mu_a = \frac{\hat{B}}{\hat{H}} \dots\dots\dots (11)$$

式中： μ_a ——振幅磁导率，H/m。

6.5 重复性

符合本方法规定时，比总损耗、比视在功率、磁感应强度和振幅磁导率测量结果以标准偏差表示为2%~5%，标准偏差值与所采用频率和磁感应强度峰值有关。

第二篇

用电桥法、电压表测量圆环试样比总损耗、电感磁导率和磁感应强度峰值

7 适用范围

本方法适用于厚度小于0.2mm电工钢的比总损耗、电感磁导率和磁感应强度峰值的测试。

8 测量原理

含有铁芯的线圈，可以等效地看成与铁芯磁性有关电感 L_p 和电阻 R_p 并联电路。将此电路作为电桥的一臂，见图4。用电桥测量等效并联电感 L_p 和电阻 R_p ，再计算试样比总损耗和电感磁导率。

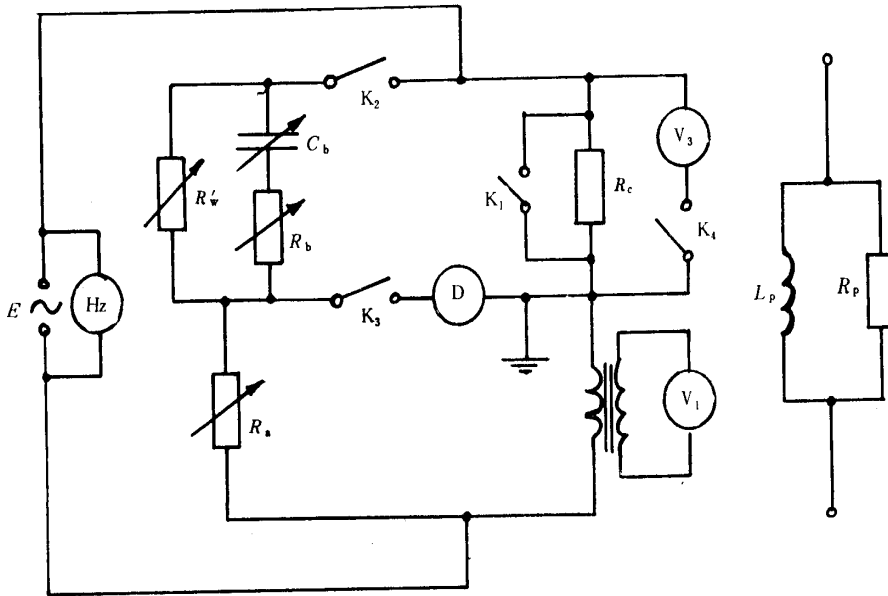


图4 电桥原理示意图

E —交流电源；(Hz)—频率表； R_a 、 R_b 、 R_c 、 R_w —分别为电桥的比例电阻、平衡电阻、串联电阻、补偿电阻； V_3 —峰值电压表； V_1 —平均值电压表； D —指零仪； K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 —开关

9 圆环试样

9.1 钢片厚度小于0.2 mm钢带推荐用圆环试样。无取向材料用冲环，取向材料用卷环。为使试样尽可能地均匀磁化，试样的平均直径与径宽之比不小于10:1。本标准推荐试样内直径为33 mm，外直径为40 mm，高为10 mm。

9.2 试样应无毛刺、无裂纹，制备好的试样首先用分辨率为0.02 mm的卡尺测量内直径和外直径；用天平称量试样的质量，其称量误差小于0.1%。然后将试样进行消除应力退火。退火后的试样不应再受到应力作用。

9.3 将退过火的试样装入由无磁性绝缘材料制成的试样盒中，为了尽可能减少感应电压波形失真和初级绕组直流电阻，根据磁化频率和测量点选用合适线径的高强度漆包线均匀地绕制次级绕组 N_2 ，然后再绕制初级绕组 N_1 。本方法推荐 N_1 为100匝，导线直径为0.6 mm， N_2 为20匝，导线直径为0.3 mm。

10 测量装置和仪表

10.1 修正海氏电桥

本方法推荐用修正海氏电桥测量电工钢薄带磁性。图4是修正海氏电桥原理图。

10.1.1 串联电阻

R_c 可分为1 Ω (20 W)，10 Ω (10 W)，100 Ω (1 W) 四端无感电阻。

10.1.2 比例电阻

R_a 为十进位无感交流电阻箱，阻值范围0~111 111 Ω ，最小步进值0.1 Ω 。

10.1.3 平衡电阻

平衡电阻 R_b 要求同 R_a 。

R_c 、 R_a 、 R_b 是无感精密电阻，其阻值应校准到 $\pm 0.1\%$ 或更好。

10.1.4 补偿电阻

电阻 R_w 是用来补偿初级绕组 N_1 的直流电阻。它是十进位交流电阻箱，阻值范围为10~1 111 110 Ω ，最小步进值为10 Ω 。准确度为1%。

10.1.5 平衡电容

C_b 是十进位电容箱，电容容量为0~10 μF 。最小步进值为0.000 1 μF 。在测量频率范围内电容箱准确度为1级。

10.1.6 指零仪

频率范围：100~15 000 Hz

电压测量范围：100 μV ~10 V (满度)

输入阻抗： $\geq 100\text{ k}\Omega$

频率选择性： $\pm 4\text{ Hz}$ 带宽不大于-3 dB

$\pm 20\text{ Hz}$ 带宽不大于-42 dB

$\pm 40\text{ Hz}$ 带宽不大于-60 dB

10.2 平均值电压表

同5.2。

10.3 峰值电压表

同5.4。

10.4 频率表

同5.6。

10.5 磁化电源

磁化电源具有低内阻、电压和频率稳定性良好。频率和输出电压应连续可调。频率范围至少是400~10 000 Hz，容量不低于75 VA，输出电压最大为50 V。在测量期间电压和频率波动不超过预定值的

±0.2%。输出电压波形失真度不大于3%。

11 测量和数据处理

11.1 测量前的准备

11.1.1 测量初级绕组 N_1 的铜线直流电阻 R_w ，按公式 (12) 选取补偿电阻 R'_w 。

$$R'_w = \frac{R_a R_c}{R_w} \quad \dots\dots\dots (12)$$

式中： R_a ——电桥比例电阻阻值， Ω ；
 R_c ——电桥串联电阻阻值， Ω ；
 R_w ——初级绕组铜线直流电阻阻值， Ω ；
 R'_w ——补偿电阻阻值， Ω 。

11.1.2 退磁

按6.1.2。

11.2 测量步骤

同6.2。

11.3 比总损耗测量

11.3.1 测量点的设定：将图4中开关 K_1 、 K_4 断开，接通 K_2 、 K_3 。调节电源频率使之等于测量点所对应的频率，允许最大偏差为 ±0.2%。增大电源输出电压，使得次级绕组感应电压平均值为 \bar{U}_2 ，按 (13) 式计算。

$$\bar{U}_2 = 4 N_2 A f \hat{B}_0 \frac{R_v}{R_v + R_t} \quad \dots\dots\dots (13)$$

式中： \bar{U}_2 ——次级绕组感应电压平均值，V；
 f ——频率，Hz；
 \hat{B}_0 ——预定磁感应强度峰值，T；
 R_v ——平均值电压表内阻， Ω ；
 R_t ——次级绕组铜线直流电阻， Ω ；
 A ——试样横截面积， m^2 。按 (14) 式计算：

$$A = \frac{m}{\pi \bar{d} \rho} \quad \dots\dots\dots (14)$$

式中： m ——试样质量，kg；
 ρ ——试样密度， kg/m^3 。 ρ 的数值根据试样牌号从有关标准中选取。
 \bar{d} ——试样平均直径，m。按 (15) 式计算：

$$\bar{d} = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad \dots\dots\dots (15)$$

式中： d_1 ——试样内直径，m；
 d_2 ——试样外直径，m。

11.3.2 平衡电桥：调节指零仪的选频频率与磁化频率一致，反复交替地调节电桥的平衡电阻 R_b 和平衡电容 C_b ，并配合提高指零仪的灵敏度，直到指零仪示值最小为止。此时认为电桥已平衡。记取平衡时的电阻 R_b 和电容 C_b 的值。

11.3.3 试样比总损耗按 (16) 式计算：

$$P_s = \frac{\left(\frac{N_1}{N_2} U_2\right)^2}{m} \cdot \frac{R_b}{R_a R_c} \quad \dots\dots\dots (16)$$

式中： U_2 ——次级感应电压有效值，V，在本方法规定的条件下， $U_2 = 1.111 \bar{U}_2$ ；

R_b ——电桥平衡电阻阻值, Ω ;

P_s ——试样比总损耗, W/kg 。

11.3.4 试样电感磁导率按 (17) 式计算:

$$\mu_L = \frac{\pi d R_a R_c C_b}{AN_1^2} \dots\dots\dots (17)$$

式中: μ_L ——试样电感磁导率, H/m ;

C_b ——电桥平衡时的电容值, F 。

11.4 磁感应强度的测量

11.4.1 测量点的设定: 将图 4 中开关 K_1 、 K_2 、 K_3 断开, K_4 接通。调节电源输出, 使得在串联电阻 R_c 两端电压峰值为 \hat{U}_3 , 按 (18) 式计算:

$$\hat{U}_3 = \frac{\pi d R_c \hat{H}_0}{N_1} \dots\dots\dots (18)$$

式中: \hat{U}_3 ——峰值电压表的指示值, V ;

\hat{H}_0 ——预定的磁场强度峰值, A/m 。

11.4.2 测量: 读取平均值电压表的指示值。

11.4.3 磁感应强度峰值按 (19) 式计算:

$$\hat{B} = \frac{\bar{U}_2}{4 N_2 f A} \cdot \frac{R_v + R_t}{R_v} \dots\dots\dots (19)$$

式中: \hat{B} ——磁感应强度峰值, T 。

11.5 重复性

符合本方法规定时, 磁感应强度峰值、比总损耗和电感磁导率测量结果重复性以标准偏差表示为 3%~5%。

12 标准样品和仪器设备检定

12.1 为保证测量量值的准确一致, 便于各有关单位对测量装置进行校准和相互比对, 由国家计量部门发放标准样品。各单位应定期将标准样品送往计量部门检定。

12.2 本标准中所用的仪器设备也应定期送往计量部门检定。

附加说明:

本标准由冶金工业部钢铁研究总院、中国计量科学研究院、上海钢铁研究所负责起草。

本标准主要起草人吕包苓、瞿清昌、郭彩娣。

自本标准实施之日起原 YB 902—78《冷轧硅钢薄带磁性试验方法》作废。

本标准水平等级标记 GB 10129—88 Y