

中华人民共和国国家标准

钢材直流磁性能测量方法

GB/T 13012—91

Solid steels—Methods of measurement of
the d. c. magnetic properties

本标准参照采用国际电工委员会 IEC 404-4—1982《整体钢的直流磁特性的测量方法》中的第Ⅱ章“用磁导计法测定磁特性”和 IEC 404-7—1982《在开磁路中测量磁性材料矫顽力的方法》，分别制订了直流磁特性测量方法和内禀矫顽力测量方法。

1 主题内容与适用范围

本标准规定了开路磁通测残磁方法、直流磁特性测量方法和内禀矫顽力测量方法的术语定义及符号、测量原理、试样、测量装置、测量步骤、计算、重复性和试验报告。

本标准适用于矫顽力为 0.5 kA/m 至 100 kA/m 范围内的钢材，包括板材和棒材的磁性参数的测量。

使用者可以根据需要对本标准中规定的三种方法之一进行选择使用。

2 术语定义及符号

2.1 残磁

残磁是指钢材在生产过程中受到外界机械力、热处理和外界杂散磁场等作用后，残留下的磁化强度。用符号 M_r 表示，单位 A/m。

2.2 退磁因子

对于一个均匀磁化的物体，其内部因磁化强度而产生的自退磁磁场强度与磁化强度成正比，比例系数为退磁因子。

$$H = N \cdot M \quad \dots\dots\dots(1)$$

式中： H ——磁场强度，A/m；

N ——退磁因子，它与物体几何形状有关，此量无量纲；

M ——磁化强度，A/m。

2.3 长径比

长径比(λ)是物体的长度(L)与其有效直径(D)的比，即：

$$\lambda = L/D \quad \dots\dots\dots(2)$$

2.4 探测线圈常数、有效截面积及有效半径

探测线圈常数定义为：

$$K = \sum A_i, i = 1, 2, 3 \dots\dots n \quad \dots\dots\dots(3)$$

式中： K ——探测线圈常数， m^2 ；

国家技术监督局 1991-06-22 批准

1992-03-01 实施

A_i ——第*i*匝线圈所围面积, m^2 ;

n ——探测线圈总绕线匝数。

有效截面积 A_{eff} 定义为:

$$A_{eff} = K/N \quad \dots\dots\dots (4)$$

有效半径 R_{eff} 定义为:

$$R_{eff} = \sqrt{A_{eff}/\pi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

3 残磁的测量

3.1 测量原理

利用磁通探测线圈和积分器在开路状态下测量样品的残磁。其原理如图 1 所示。

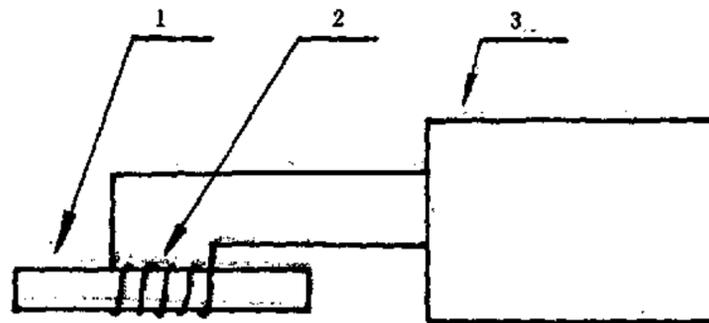


图 1 残磁测量原理图

1—被测样品; 2—探测线圈; 3—磁通积分器

当样品从线圈中抽出时, 穿过线圈的磁通改变量, 根据电磁感应定律有:

$$\phi = \int u dt \quad \dots\dots\dots (6)$$

式中: $\int u dt$ ——对探测线圈感应电压的积分。

利用(6)式得到的磁通可以计算出样品内部的磁化强度, 即:

$$\begin{aligned} M &= B/\mu_0 \\ &= \phi/\mu_0 \cdot K \quad \dots\dots\dots (7) \\ &= \int u dt / \mu_0 \cdot K \end{aligned}$$

式中: B ——磁通密度, T;

μ_0 ——磁常数, H/m;

ϕ ——磁通, Wb。

注: 按照定义, B 等于 $\mu_0(H+M)$ 。在忽略了外部杂散磁场和样品内部退磁场的情况下, B 近似等于 $\mu_0 M$ 。

3.2 试样

3.2.1 试样长径比为 2:1。

3.2.2 试样两端面应垂直于轴线; 试样横截面沿整个长度方向应保持一致, 其偏差不得超过它的最小截面的 1%。试样尺寸的测量误差不得超过 0.2%。

3.2.3 试样不应有明显宏观缺陷, 例如缺口、毛刺、掉边、裂纹、砂眼和气孔等。

GB/T 13012—91

3.2.4 试样应放置在远离强磁场源处,以不使其磁化状态受到影响。

3.3 测量装置

测量装置由探测线圈和感应电压时间积分器组成。

3.3.1 感应电压时间积分器采用电子积分器,其工作原理见附录 A,技术指标为:

零点漂移: $10^{-6} \text{Wb}/10 \text{s}$;

不确定度: $\pm 0.5\%, \text{F} \cdot \text{S}$ 。

3.3.2 探测线圈的有效半径与试样半径之比为 1.2:1;探测线圈厚度小于 5 mm,其常数校准在 $\pm 1\%$ 以内。

3.3.3 测量装置应定期送计量部门检定。

3.4 测量步骤

3.4.1 探测线圈轴向与地磁场方向垂直放置,线圈输出端与积分器输入端相连接。

3.4.2 调整积分器零点到测量结果不受零点漂移的影响,并使其处于积分态。

3.4.3 将被测试样从距离探测线圈较远处移近并穿过线圈到远离探测线圈处。穿过线圈时,被测试样轴向应与探测线圈轴向平行。试样抽拉前后距离探测线圈的距离,以不影响测量结果为原则。

3.5 残磁的确定

3.5.1 探测线圈测量到的最大磁通变化量与磁常数的比表示该材料的残磁。

3.5.2 计算公式

$$M_c = \phi_{\max} / \mu_0 K \dots\dots\dots (8)$$

式中: ϕ_{\max} ——试样穿过线圈时,积分器记录到的最大磁通值。

3.5.3 地磁场影响的修正

当探测线圈轴向不与地磁场方向垂直时,应在样品的正反两个方向上测量,取它们的算术平均值为残磁值。

当地磁场对测量结果的影响小于 1% 时,可以不做此项修正。

3.5.4 残磁的最终结果按有关国家标准进行修约,保留三位有效数字。

3.6 重复性

严格按照本方法中的技术规定进行试验,残磁测量结果的重复性,对于残磁小于 40 A/m 的材料为 $\pm 5\%$;对于残磁大于 40 A/m 的材料为 $\pm 2\%$ 。

3.7 试验报告

试验报告一般应包括:

- a. 材料的牌号和炉号;
- b. 产品规格;
- c. 试样状态;
- d. 试样几何尺寸;
- e. 所用仪器类型;
- f. 残磁计算值;
- g. 环境温度;
- h. 测量不确定度。

4 直流磁特性的测量

4.1 测量原理

使用磁导计在闭磁路中测量钢材的正常磁化曲线和磁滞回线并给出回线上的特征值。测量原理如图 2 所示。

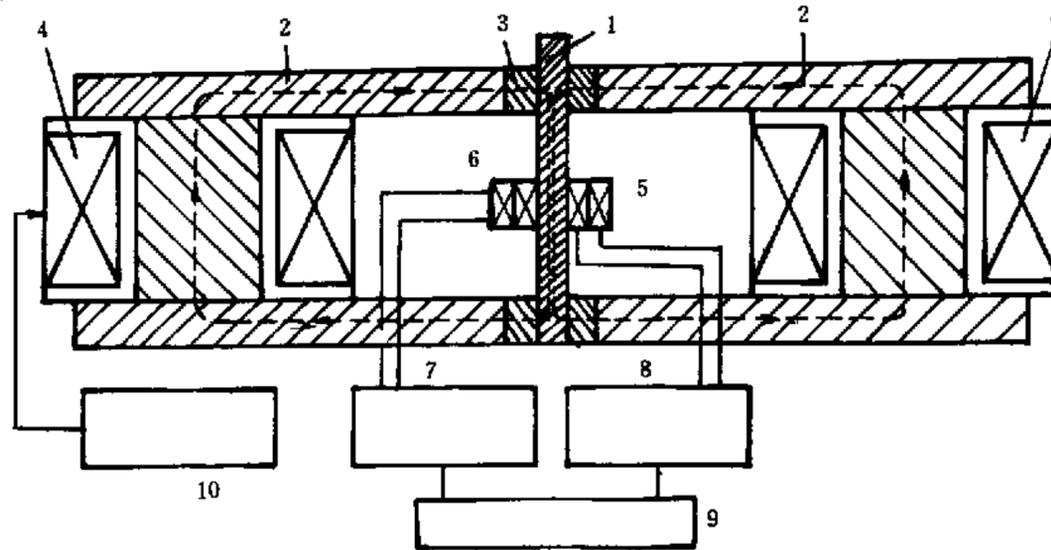


图 2 直流磁特性测量原理图

1—试样；2—磁轭；3—可换极头；4—磁化绕组；5—磁极化强度探测线圈；
6—磁场探测线圈；7—测量磁极化强度的磁通表；8—测量磁场强度的磁通表；
9—X/Y 记录仪；10—电源

4.2 试样

4.2.1 几何尺寸应满足下述要求：

圆柱体：长不小于 200 mm，直径 10 ± 0.02 mm。

矩形截面体：长不小于 200 mm，宽 8 mm，厚 4 ± 0.1 mm。

4.2.2 试样截面积沿轴向变化应在 $\pm 0.5\%$ 以内。其测量不确定度应在 $\pm 0.5\%$ 以内。

4.2.3 试样应无明显缺陷，侧表面粗糙度 R_a 值不大于 $1.6 \mu\text{m}$ 。

4.2.4 在加工试样过程中，应尽量避免对样品施加应力和高温。

4.3 装置

4.3.1 探测线圈

4.3.1.1 使用同轴空气补偿的 J 线圈测量试样的磁极化强度。J 线圈由两个串联反接的线圈组成，且满足下式：

$$N_1 \cdot A_1 = N_2 \cdot A_2 \quad \dots\dots\dots(9)$$

式中： N_1 ——线圈 1 的匝数；

N_2 ——线圈 2 的匝数；

A_1 ——线圈 1 的有效截面积， m^2 ；

A_2 ——线圈 2 的有效截面积， m^2 。

4.3.1.2 使用同轴磁极化强度补偿的 H 线圈测量磁场强度。H 线圈由两个串联反接的线圈组成，且满足下式：

$$N_3 = N_4 \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$A_4 > A_3 \quad \dots\dots\dots(11)$$

式中： N_3 ——线圈 3 的匝数；

- N_4 ——线圈 4 的匝数;
- A_4 ——线圈 4 的有效截面积, m^2 ;
- A_3 ——线圈 3 的有效截面积, m^2 。

线圈常数为:

$$K_n = N_3 \cdot (A_4 - A_3) \dots\dots\dots(12)$$

式中: K_n ——线圈常数。

线圈常数的测量不确定度应在 $\pm 0.5\%$ 以内。

4.3.2 磁通计

磁通计采用电子式积分器(也可以是具有相同不确定度的其他方式的积分器)。

零点漂移: 10^{-6}Wb/min ;

不确定度: $\pm 0.5\%$, $F \cdot S$ 。

4.3.3 电源

应具有足够的功率使试样磁化到饱和,在整个输出范围连续可调。每分钟输出稳定性在 $\pm 0.1\%$ 以内。

4.3.4 磁导计

磁导计由磁轭、极头、磁化绕组构成,且满足:

- 4.3.4.1 极头由矫顽力小于 100 A/m 的材料组成。它与试样及磁轭的接触面应具有很好的光洁面以减少漏磁通的影响。
- 4.3.4.2 极头间距在一定范围内连续可调,并且可以自由换取。
- 4.3.4.3 为减少涡流效应的影响,磁轭最好用叠层的方法制作。
- 4.3.4.4 磁化线圈绕组导线应具有一定的直径,以避免通电流时线圈过热。

磁导计整体结构要紧,可与试样一起构成闭合磁路。

4.4 测量

4.4.1 磁极化强度的测量

穿过 J 线圈的磁通可由下式表示:

$$\phi = (N_1 - N_2) A_s \cdot J \dots\dots\dots(13)$$

式中: A_s ——试样截面积, m^2 ;

J ——磁极化强度, T 。

线圈内磁通的变化为:

$$\phi = \int u dt \dots\dots\dots(14)$$

式中: $\int u dt$ ——积分器的输出, $V \cdot s$ 。

由(13)和(14)两式可得相应的磁极化强度为:

$$J = \int u dt / (N_1 - N_2) \cdot A_s \dots\dots\dots(15)$$

4.4.2 磁场强度的测量

穿过 H 线圈的磁通由下式给出:

$$\phi = N_3 \cdot (A_4 - A_3) \cdot H_{ex} \dots\dots\dots(16)$$

式中： H_{ex} ——外加磁化场强度，A/m。

外加磁化场强度的改变量为：

$$H_{ex} = \int u dt / N_3 \cdot (A_4 - A_3) \cdot \mu_0 \quad \dots\dots\dots (17)$$

4.4.3 正常磁化曲线的测量

4.4.3.1 用交流 50 Hz 的频率对试样进行退磁。

4.4.3.2 将试样放入磁导计中，使之构成一个闭合磁路，同时将 H 线圈和 J 线圈套在试样上。将两线圈的输出端分别接到两个积分器的输入端。

4.4.3.3 调节磁场零点和两积分器零点，并使之处于积分态。调节磁场强度到某一值 H_1 ，改变磁场方向可得 ΔJ_1 。

4.4.3.4 重复 4.4.3.3 过程，直到得到一条完整的磁化曲线。

在测量过程中，磁场强度应从零开始单调上升，如果磁场强度减小，则试样要重新退磁。

4.4.4 磁滞回线的测量

4.4.4.1 在试样放入磁导计内的同时，将 J 线圈和 H 线圈套在试样上，试样和磁导计构成闭合回路，线圈的输出端和积分器的输入端相连接。

4.4.4.2 将试样饱和磁化两周以上。调整磁场零点，调整两积分器零点，并使其处于积分态。

4.4.4.3 施加一个周期的饱和磁化场，同时记录下两积分器的输出信号，从而得到磁极化强度与磁场强度相关的磁滞回线（J-H 曲线）。

磁化周期不宜过快，一般在 1 min 左右。当试样内涡流效应对测量影响显著时，应采取措施，在磁通密度变化很陡的地方使磁场的变化尽可能地慢。

4.5 磁参数的确定

4.5.1 剩磁的确定

在“J-H 曲线”上，当磁场强度为零时所对应的磁极化强度值为剩余磁极化强度（ J_r ），在数值上等于剩磁（ B_r ）。

4.5.2 内禀矫顽力和矫顽力的确定

在“J-H 曲线”上，磁极化强度为零时所对应的磁场强度值为内禀矫顽力（ H_{ci} ）。

做磁极化强度等于负的磁常数与磁场强度乘积的曲线与“J-H 曲线”的交点所对应的磁场强度值为矫顽力（ H_{cb} ）。

4.5.3 饱和磁极化强度值和饱和磁通密度值的确定

外加饱和磁场强度的最大值（ H_s ）处所对应的磁极化强度值为饱和磁极化强度（ J_s ）。

饱和磁通密度值由下式给出：

$$B_s = \mu_0 \cdot H_s + J_s \quad \dots\dots\dots (18)$$

式中： B_s ——饱和磁通密度值。

4.5.4 矩形比的确定

剩磁与饱和磁化强度的比为矩形比（ S_r ）：

$$S_r = B_r / B_s \quad \dots\dots\dots (19)$$

4.5.5 最大磁能积的确定

退磁曲线上磁感应强度与磁场强度的乘积为磁能积，用（BH）表示：

$$(BH) = (J + \mu_0 H) \cdot H \quad \dots\dots\dots (20)$$

式中的最大值为最大磁能积,用 $(BH)_{\max}$ 表示。

4.5.6 满度比的确定

满度比(γ)为最大磁能积与“剩磁和矫顽力之积”的比:

$$\gamma = (BH)_{\max} / B_r \cdot H_{cb} \dots\dots\dots (21)$$

4.5.7 磁感应强度与磁场强度的相关曲线的确定

利用关系式:

$$B = \mu_0 \cdot H + J \dots\dots\dots (22)$$

从已测得的“ $J-H$ 曲线”中算出磁感应强度(B)与磁场强度(H)的相关曲线:“ $B-H$ 曲线”。

4.6 数据处理

最终结果按四舍五入的原则化简,保留数据的有效位数由测量结果的不确定度决定。

4.7 重复性

试验设备的最终不确定度是一个依赖于测量仪器、测量条件、设备及其他一些特性的复杂函数。经验表明,重复性或测量误差的大小是可以预计的。这个误差取决于测量仪器的估计误差。当所用的测量仪器的估计误差小于 $\pm 1\%$ 时,磁通密度或磁场强度的总测量误差,对于各种试验方法,一般预计小于或等于 $\pm 2\%$ 。

4.8 试验报告

试验报告一般应包括:

- a. 试样材料的类型和状态;
- b. 试样的形状和尺寸;
- c. 测量方法和装置;
- d. 饱和磁场强度值;
- e. 剩磁计算值;
- f. 正常磁化曲线和饱和磁滞回线;
- g. 测量结果的不确定度;
- h. 环境温度。

5 内禀矫顽力的测量

5.1 方法和原理

一个磁性物体,当它具有磁化强度时,将在空间产生一磁场。该磁场强度与磁化强度成正比。用磁通探测器可以探测到这一空间分布的场。当物体在空间产生的磁场强度为零时,可知磁化强度为零。此时测得的物体所在空间的磁场强度就是该物体的内禀矫顽力。其测量原理如图3所示。

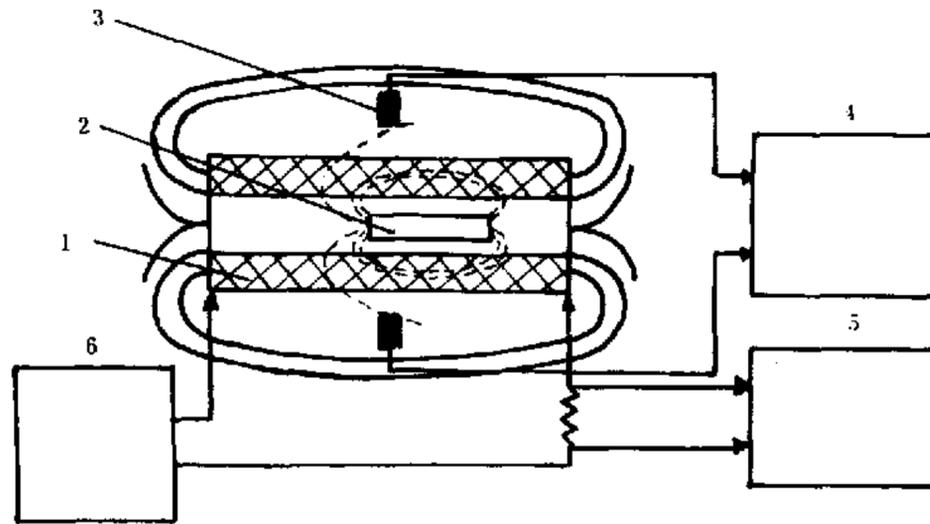


图3 内禀矫顽力的测量原理图

1—螺线管；2—试样；3—磁通探测器；4—磁通门指零仪；
5—电压表；6—电源

首先将试样磁化到饱和，然后将其放入一个螺线管中，在试样磁化的反方向加一磁化场。由于螺线管在其两端面对称的中间附近产生的磁场主要是轴向分量，而试样产生的场有径向分量。因此，用磁通探测器测量空间的径向磁场强度，同时测量螺线管导线中的电流，就能实现开路下试样内禀矫顽力的测量。

5.2 试样

5.2.1 试样放在螺线管内，使其长轴与螺线管的轴相一致。

5.2.2 试样通常应具有细长形状，以使它的自退磁因子能够使试样饱和，并且形状效应不致产生显著的矫顽力误差。为了使测量残磁的试样有一定的通用性，推荐圆柱体试样的长径比为 2 : 1。

5.3 测量装置

5.3.1 充磁装置

充磁装置可以是矫顽力测量装置的螺线管、电磁铁或脉冲磁化线圈。

要求充磁装置能使试样磁化到饱和。由于试样可能有较高的磁导率和电导率，对脉冲场一般要求持续时间为 2~20 s。

当磁化强度增加 50%，内禀矫顽力的增加小于 1%时，则认为试样达到了饱和。

5.3.1.1 试样在开路下的充磁磁场强度应满足：

$$H_s = \mu_0 \cdot K_1 \cdot H_{CJ} + J_s/2 \quad \dots\dots\dots(23)$$

式中：K₁——比例系数，通常为 5~10。

5.3.1.2 试样在闭路下的充磁磁场强度应满足：

$$H_s = K_2 \cdot H_{CJ} \quad \dots\dots\dots(24)$$

式中：K₂——比例系数，通常为 20~50。

5.3.2 螺线管

螺线管中试样内部的磁场强度的变化应在±0.5%以内，螺线管常数校准在±0.5%以内。两端面对称处附近的磁场径向分量在整个测量过程中应对测量结果不产生附加影响。

5.3.3 直流电源

在整个输出范围内，电源应连续可调。输出稳定性，每分钟应在±0.1%以内，避免对其他测量仪器

产生明显干扰。

5.3.4 磁通门指零仪

磁通门指零仪应具有足够的灵敏度,因灵敏度引入的测量不确定度应在±0.5%以内。

5.3.5 电流测量装置

电流表准确度优于±0.5%,F·S;标准电阻准确度优于±0.5%;电压表准确度优于±0.1%,F·S。

5.4 测量

5.4.1 用放在螺线管外面的双磁通门探头测量试样产生的垂直于螺线管轴向的磁场强度分量。用双探头可利用差分的方法补偿外部杂散磁场对磁通门探头的影响。用测量串联在磁化绕组上电阻两端的电压降的方法计算电流,也可以用电流表直接测量电流。

5.4.2 测量步骤

5.4.2.1 将试样放入充磁装置中磁化到饱和,然后将试样放在螺线管磁场均匀区内,试样端头在磁通门探头附近。

5.4.2.2 在试样充磁的反方向上缓慢加一退磁场。该磁场强度不宜变化过快,以免使试样内部产生涡流效应影响测量结果。

5.4.2.3 增加退磁场强度到磁通门指零仪指零时,记录下螺线管内流过的电流值。

5.5 内禀矫顽力的确定

内禀矫顽力(H_C)为:

$$H_C = K_1 \cdot I = K_1 \cdot V/R \quad \dots\dots\dots(25)$$

式中: K_1 ——螺线管常数, I/m;

I ——电流, A;

V ——电压, V;

R ——电阻, Ω 。

为了克服空间杂散恒定磁场的影响,有时需要在正反两个方向上测量,并取两次测量结果的平均值为内禀矫顽力值。

5.6 重复性

重复性可能受到材料不均匀性和试样形状的影响。对于具有均匀的磁极化强度的材料,只要执行上述程序,则其内禀矫顽力测量的重复性用标准偏差表示为:2%。

5.7 试验报告

试验报告一般应包括:

- a. 试样材料的类型和状态;
- b. 试样的形状和几何尺寸;
- c. 磁化到饱和的方法;
- d. 测量方法和使用装置;
- e. 内禀矫顽力的计算值和不确定度;
- f. 环境温度。

附录 A
电子积分器工作原理
(补充件)

A1 电子积分器工作原理

电子积分器又称电阻电容式积分器,即 RC 式积分器,其工作原理如图 A1 所示:

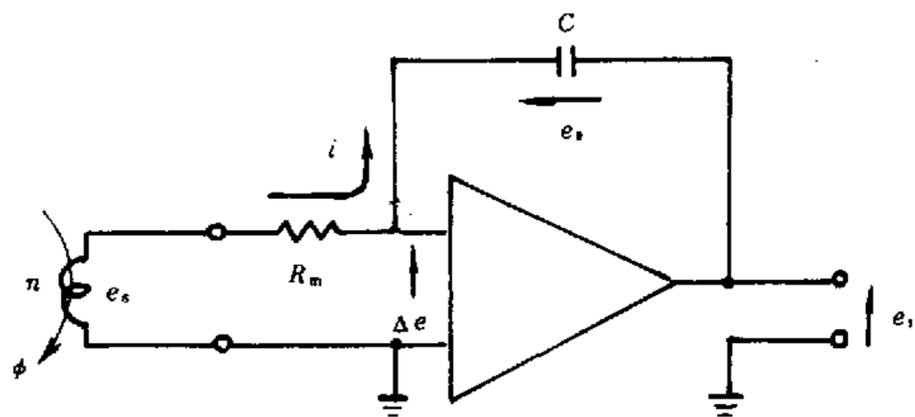


图 A1 电子积分器工作原理图

n 探测线圈匝数; R_m —积分器电阻; e_s —感应电动势; Δe —放大器两端电压; e_o —积分器输出电压;
 C —积分电容; i —对积分电容充电电流; ϕ —穿过探测线圈的磁通

设 e_s 是穿过探测线圈内磁通变化引起的感应电动势, n 为线圈匝数。根据法拉第电磁感应定律:

$$e_s = -n \cdot d\phi/dt \quad \dots\dots\dots (A1)$$

当放大器的增益和输入阻抗足够大时,可近似认为放大器两端电压(Δe)为零,从而有:

$$i = e_s/R_m \quad \dots\dots\dots (A2)$$

该电流(i)全部对电容(C)充电,则有放大器的输出电压:

$$\begin{aligned} e_o &= -Q/C \\ &= -\int i dt/C \quad \dots\dots\dots (A3) \\ &= -n\phi/R_m C \end{aligned}$$

附录 B
磁通积分器的校准方法
(补充件)

B1 磁通积分器的校准方法

校准磁通积分器通常有两种方法:互感器法和电容放电法。
用互感器法校准积分器的原理如图 B1 所示:

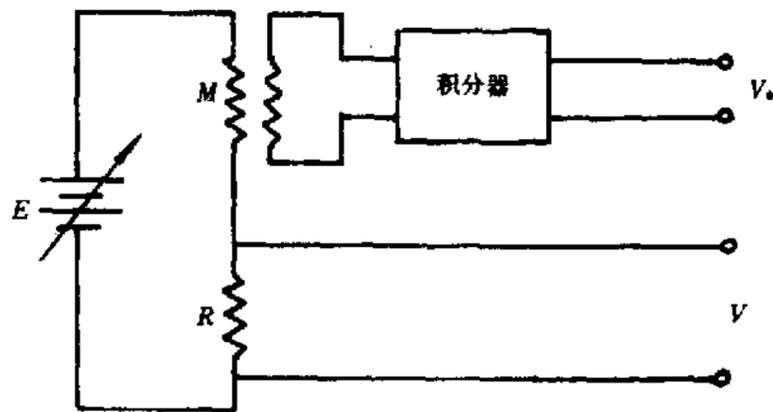


图 B1 互感器法校准积分器原理图

E —可变直流电压； M —互感系数； R —标准电阻；

V —电阻两端电压； V_0 —积分器输出电压

当互感器初级回路电流发生 ΔI 变化时，次级线圈将产生一相应的磁通变化量($\Delta\phi$)：

$$\begin{aligned} \Delta\phi &= \Delta I \cdot M \\ &= \Delta V \cdot M/R \end{aligned} \quad \dots\dots\dots (B1)$$

式中： ΔV ——电阻两端电压的改变量。

将积分器的读数值与磁通的变化量进行比较，就可以实现对磁通积分器的校准。标准互感器的准确度为 $\pm 0.2\%$ ，标准电阻的准确度为 $\pm 0.1\%$ ，电压表的准确度为 $\pm 0.05\%$ ， $F \cdot S$ 。故此法校准的不确定度在 $\pm 0.5\%$ 范围内。

附加说明：

本标准由中华人民共和国冶金工业部提出。

本标准由上海第五钢铁厂、东北工学院和中国计量科学研究院负责起草。

本标准主要起草人刘荣华、刘庆国、高原、瞿清昌、汪家龙、吴德孚。