

灵敏电流计

灵敏电流计也叫直流检流计或检流计，是磁电式仪表，它和其他磁电式仪表一样都是根据载流线圈在磁场中受力矩而偏转的原理制成的，只是结构上有些不同。普通电表中的线圈安装在轴承上，用弹簧游丝来维持平衡，用指针来指示偏转。由于轴承有摩擦，被测电流不能太弱。电流计中则是用极细的金属悬丝（或张丝）代替轴承将线圈悬挂在磁场中，由于悬丝细而长，反抗力矩很小，所以有极弱的电流通过线圈就足以使它产生显著的偏转。因而电流计比一般电流表要灵敏得多，可以测量小至 $10^{-8} \sim 10^{-10} \text{A}$ 的微弱电流。电流计的另一种用途是平衡指零，即根据流过电流计的电流是否为零而判断电路是否平衡，它被广泛用于直流电桥和电位差计中。

1. 实验目的

- (1) 了解电流计的工作原理及其线圈的阻尼运动规律；
- (2) 测量电流计分度值及内阻，并学习分析误差的方法；
- (3) 学习正确使用和保护电流计。

2. 实验原理

- (1) 电流计工作原理及其线圈的阻尼运动特性

电流计的基本结构如图 1 所示。(a) 是正视图，(b) 是俯视图。线圈处在水平的、径向局部均匀的磁场 B 中。如果线圈中通以电流 I_g ，在磁场作用下它就会产生转动。要深入了解电流计线圈的运动特性，可写出它的运动方程，并求出其解。设线圈的转动惯量为 J ，它在转动时受到三种力矩的作用：

- ① 通有被测电流 I_g 的线圈在磁场 B 中所受的力矩 M_1 ，设线圈匝数为 N ，面积为 S ，则

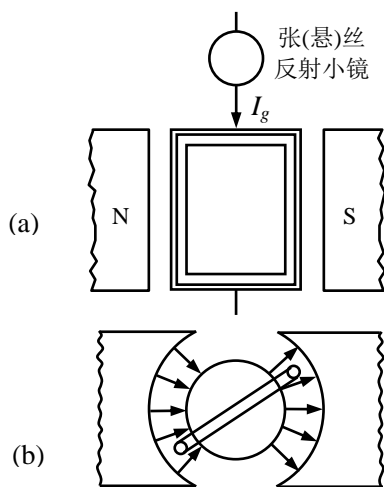


图 1 灵敏电流计结构简图

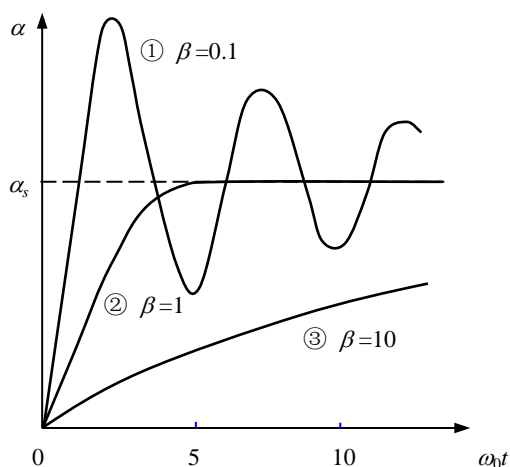


图 2 电流计的三种阻尼运动

$$M_1 = BNSI_g \quad (1)$$

- ② 跟悬丝的扭转系数 W 和线圈偏转角 α 成正比的悬丝的反抗力矩

$$M_2 = -W\alpha \quad (2)$$

- ③ 跟线圈角速度 $d\alpha/dt$ 成正比的阻尼力矩

$$M_3 = -(\rho_1 + \rho_2) \frac{d\alpha}{dt} \quad (3)$$

式中 ρ_1 为线圈的空气阻尼系数； ρ_2 为线圈的电磁阻尼系数，起因于转动线圈中产生的感应电动势所引起的感应电流，使线圈受到制动作用。在一般情况下 ρ_1 比 ρ_2 小很多。电磁阻尼系数 ρ_2 可按以下的计算求出。当处于沿径向均匀的磁场中的线圈具有角速度 $d\alpha/dt$ 时，线圈中的感应电动势为 $-BNS \, d\alpha/dt$ 。如果内阻为 R_g 的线圈与外电路电阻 R_2 组成闭合回路 (R_2 是外电路的总等效电阻)，则感应电流 i' 为 $-BNS \, (d\alpha/dt)/(R_g + R_2)$ 。

感应电流 i' 在磁场 B 中受到电磁阻尼力矩的作用，其值为

$$BNSi' = -\frac{B^2 N^2 S^2}{R_g + R_2} \frac{d\alpha}{dt} = -\rho_2 \frac{d\alpha}{dt}$$

其中

$$\rho_2 = \frac{B^2 N^2 S^2}{R_g + R_2} \quad (4)$$

式 (4) 表明：电磁阻尼系数 ρ_2 与线圈回路中的总电阻 ($R_g + R_2$) 成反比。

线圈在三种力矩的共同作用下的运动方程为

$$J \frac{d^2\alpha}{dt^2} + (\rho_1 + \rho_2) \frac{d\alpha}{dt} + W\alpha = BNSI_g \quad (5)$$

当电流计的线圈中通以电流 I_g 且偏转到 α_s 而达稳定状态时， $d\alpha/dt=0$ 且 $d^2\alpha/dt^2=0$ ，因此

$$\alpha_s = \frac{BNS}{W} I_g \quad (6)$$

将式 (5) 的右侧改写为 $W\alpha_s$ ，并引入参量 β 和 ω_0 ，分别定义如下

$$\beta = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2\sqrt{JW}} = \frac{1}{2\sqrt{JW}} \left(\rho_1 + \frac{B^2 N^2 S^2}{R_g + R_2} \right), \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{W}{J}}$$

则方程 (5) 化为

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} + 2\beta\omega_0 \frac{d\alpha}{dt} + \omega_0^2\alpha = \omega_0^2\alpha_s \quad (7)$$

方程 (7) 是典型的二阶常微分方程，利用 $t=0$ 时偏转角为零的初始条件，可得到三种不同的解：

① 当 $\beta < 1$ 即外电路电阻 R_2 很大时，方程的解为

$$\alpha = \alpha_s \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{1-\beta^2}} \sin(\sqrt{1-\beta^2}\omega_0 t + \phi) \right] \quad (8)$$

式中

$$\phi = \arctan(\sqrt{1-\beta^2}/\beta)$$

式 (8) 表明，线圈作振荡运动，其振幅随着时间 t 的增大而衰减。最后线圈达到稳定偏转 α_s 。 $\beta < 1$ 时电流计外电路电阻 R_2 很大，线圈的运动叫欠阻尼运动。其运动特性曲线同图 2 中的曲线①类似。振幅衰减很慢（即 β 值很小时）的欠阻尼运动对测量是不利的，因为它达到平衡的时间太长。

② 当 $\beta = 1$ 时，解为

$$\alpha = \alpha_s [1 - e^{-\omega_0 t} (1 + \omega_0 t)] \quad (9)$$

式 (9) 表明线圈作单方向偏转运动，刚好不振荡，可用图 2 中的曲线②来描绘。它较快达到稳定偏转 α_s 。 $\beta = 1$ 时的运动叫临界阻尼运动。此时外电路电阻 R_2 用 R_c 表示， R_c 称为外临界电阻。这种临界阻尼运动对测量较为有利，因为它达到平衡的时间较短。

③ 当 $\beta > 1$ 时，即外电路电阻 R_2 很小，解为

$$\alpha = \alpha_s \left[1 - \frac{e^{-\beta\omega_0 t}}{\sqrt{\beta^2 - 1}} \sinh(\sqrt{\beta^2 - 1}\omega_0 t + \theta) \right] \quad (10)$$

式中的 $\theta = \arctan\left(\frac{\sqrt{\beta^2 - 1}}{\beta}\right)$ 。式 (10) 表明这时的线圈也是作单向偏转，曲线类似图 2 中的曲线③。这时外电路电阻 $R_2 < R_c$ ，线圈的运动叫过阻尼运动。过阻尼运动对测量不利，因为它达到平衡的时间长，且不易判断线圈是否已达到平衡位置。

计算和经验都证明， $\beta = 0.8 \sim 0.9$ 时是电流计的理想工作状态，这时它处于稍欠阻尼的状态，线圈达到测量所需的平衡位置所用时间最短。一般情况下取 $R_2 = R_c$ 使电流计工作在临界阻尼状态也是一种较简单的处理方法。上文提及的电流计内阻 R_g 和外临界电阻 R_c 是电流计的两项重要技术指标，一般 R_c 总比 R_g 大得多。

(2) 测电流计的电流分度值

不论属于何种阻尼运动，线圈最后都要达到平衡状态，从 (6) 式可以看出，平衡位置的偏转角 α_s 总与电流 I_g 成正比。为了测量 α_s ，常用一套如图 3 所示的光学读数装置。从射光筒发出的光经线圈上方的小镜反射后形成带标记线的光斑投射到标尺上，偏转角 α_s 可用光斑标记线在标尺上的位置读数 d 来表示，这相当于给电流计装上了一个长度为 $2L$ 的指针。光点复射式检流计中光的反射次数更多。从图 3 可以看出， $d = 2L\alpha_s$ ，因此可得

$$C_I = \frac{I_g}{d} = \frac{W}{2LBNS} \quad (11)$$

C_I 称作电流计的电流分度值，也有称之为电流常数的； C_I 的倒数叫电流灵敏度 S_I 。 C_I 的单位是 A / div (或安 / 分度)。如果同时测出 d 并求得 I_g ，就能用 (11) 式算出电流分度值 C_I 来。

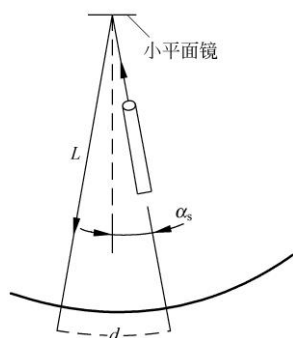


图 3 光点反射式读数装置示意图

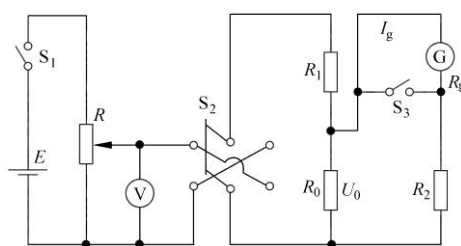


图 4 实验线路图

测定电流分度值的线路如图 4 所示。因电流计非常灵敏，只能通过极小的电流，所以一般用两级分压线路，从第二级分压的小电阻 R_0 上分出一极小的电压 U_0 加在电流计 G 和电阻 R_2 上，经计算可得

$$I_g = \frac{U_0}{R_2 + R_g} = \frac{U}{(R_1 + R_2 + R_g) + (R_2 + R_g)R_1/R_0} \quad (12)$$

式中 U 为电压表 V 的读数。电流计是可以双向偏转的，所以线路中有一换向开关 S_2 可改变 U_0 的极性，以便测出任一边的偏转读数。

(3) 测电流计的内阻

方法一采用半偏法。利用公式 (11) 和 (12) 计算电流分度值时尚需测定其内阻 R_g 。最常见的方法是“半偏法”测内阻，所用线路完全同图 4 一样。先令 $R_2 = 0$ ，调节电流 I_g ，使电流计偏转为 d ，然后加大 R_2 直至电流计的偏转为原来的一半即 $d/2$ ，此时即认为 R_2 近似等于 R_g 。实验条件是两次测量中的 U_0 不变。但 U_0 很小，不便监视，实际测量时是监视电压表示值不变（这里存在系统误差），并使它尽量用到满量程。

方法二简称全偏法。这是一种和半偏法类似的测内阻方法。仍用图 4 所示的线路。实验时仍先令 $R_2 = 0$ ，调 R_1 使电流计满偏。然后预置 R_2 为较大值（如 $5k\Omega$ ），再减小 R_1 到原来值的一半，此时逐渐减小 R_2 到电流计再次满偏。这时 R_2 的值即可认为是电流计内阻 R_g 的值。测量时仍保持电压表的读数不变。

3. 实验内容

(1) 观察电流计阻尼运动特性

① 按图 4 接线，注意各级分压电路的安全位置。经教师检查后方可接通电源。

② 通过改变 R_2 ，观察图 2 所示的三种阻尼运动并记录现象。在逐步改变 R_2 的过程中找出该电流计外临界电阻 R_c （方法自拟）。

(2) 用半偏法和全偏法测定电流计的内阻 R_g 。

用半偏法测 R_g 时，要求在相同的实验条件下（ U, d 不变），对同一量 R_2 进行六次测量；分析和估计用半偏法测量 R_g 时的 Δ_{R_g} 。

(3) 测定电流分度值 C_I

取 $R_2=R_c$ ，使电流计工作在临界阻尼状态，分别测出左右两侧光标指在 20, 40, 60 分度处的电流分度值，并求出平均电流分度值 C_I 及 Δ_{C_I} 。

(4)（选做内容）用电流计测一未知高阻，其阻值约为 $10^6\Omega$ 。

提示及要求如下：

① 利用已测定了电流分度值、内阻和外临界电阻的电流计，设计合适的线路。

② 要求实验时能使电流计处于临界阻尼状态，光标偏转较快地达到稳定位置。

4. 使用电流计的注意事项

(1) 注意保护电流计悬丝（或张丝），因剧烈振动或严重过载都会损坏悬（张）丝。

① 使用电流计时光标偏转一般不得超出标尺，多分度值档的电流计可从灵敏度最低（即分度值最大）的档用起，逐步提高灵敏度。

② 不用时，电流计输入端必须短路。

③ 少搬动电流计，必须搬动时应先检查是否已短路，再轻拿轻放。

(2) 经常注意电流计零点有无变化，如有变动，应及时调整。调节电流计的机械零点，应在断路时调节。

(3) 注意选取适当的外电阻，一般使电流计工作在稍欠阻尼状态或临界阻尼状态。

5. 不确定度分析

(1) 半偏法测电流计内阻时的不确定度分析讨论

① 半偏法实验条件要求保持 U_0 不变，实际上，“半偏”与“满偏”时 R_2 不同， U_0 也不同。可以证明 $R_g \approx R_2 - R_0$ （读者可自己推演）。这里 R_0 为 1.00Ω ，如果把 R_2 当作 R_g （一些电流计出厂说明书中都这样简化处理），则有一个固定的系统误差，因此最后确定测量结果时应对这项系统误差进行修正。

② 由电流计灵敏阈所决定的 Δ_1

所谓灵敏阈指引起仪表的示值发生一可察觉变化的被测量的最小变化值。检流计的灵敏阈可取为 0.2 分度所对应的电流值。在检流计中当电流的改变小于灵敏阈时，我们一般很难察觉出光标（或指针）读数的变化。这就给内阻的测量带来误差。测灵敏阈的方法是在调好半偏后，可以人为地增大 R_2 到 $(R_2 + \Delta R')$ ，使光标偏转减小 2 个分度，从而推算出 0.2 分度所对应的电阻的改变值为 $0.1\Delta R'$ 。故灵敏阈对内阻测量的影响约导致 $\Delta_1 = 0.1\Delta R'$ 的不确定度。

③ 由于电压 U 波动所引起的 Δ_2

实验要求电压表 V 的示值不变，而实际上电压可能有波动，而我们却察觉不出电压表指针的变化。这项误差限可按电压表灵敏阈为 0.2 分度来考虑，即 U 的相对不确定度约为 0.2 分度的电压值除以电压表的示值，可得

$$\Delta_2 = \sqrt{2} R_g \times (0.2 \text{ 分度的电压值}) / \text{电压表示值}$$

上式中的 $\sqrt{2}$ 是由于两个步骤中都要用电压表监视其示值不变。上式是粗略的算法。

④ 电阻箱引起的 Δ_3

实验中作 R_2 使用的电阻箱为 0.1 级，其不确定度直接影响测量结果（参阅《II-2 电磁学实验基本仪器》），则

$$\Delta_3 = 0.1\% R_2 + 0.005(N+1)$$

⑤ 非线性误差及其他误差造成的不确定度

由于电流计某些结构上的原因，电流值与偏转读数不成严格的线性关系，偏转为一半时电流值未必是一半；此外还有 R_0 值的不准确、环境条件的波动等都会引起误差。本实验中这些误差的影响都不要求实验者考虑。

按以上分析，实验者可逐项计算或测定，将结果与 A 类不确定度一起按方和根合成得 R_g 的总不确定度。

$$\Delta_{R_g} = \left[\left(\frac{t}{\sqrt{n}} S_{R_2} \right)^2 + \Delta_1^2 + \Delta_2^2 + \Delta_3^2 \right]^{1/2}$$

上式中 S_{R_2} 是在相同条件下对 R_2 作多次测量的标准偏差，虽然该项可能算重复了，但若考虑电流计漂移等，结果仍较合理， t 因子为 $t_{0.95}(n-1)$ ，可以查表求出。最后将结果表示为 $R_g \pm \Delta_{R_g}$ 的形式。

对全偏法不要求作误差估算和分析。全偏法中，不存在电流计的非线性误差，电流计灵敏阈所决定的误差也比半偏法要小。全偏法的测量结果仍按 $R_g = \overline{R_2} - R_0$ 求之。

(2) 电流分度值的不确定度估算

本实验仅要求用某一次测量的数值对 C_I 值作估算。估算时可用下式

$$\left(\frac{\Delta_{C_I}}{C_I} \right)^2 = \left(\frac{\Delta_U}{U} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_g}}{R_g + R_2} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_d}{d} \right)^2 + \left(\frac{\Delta_{R_0}}{R_0} \right)^2$$

式中略去了 Δ_{R_1} 和 Δ_{R_2} 的影响，因为它们和式中各项比起来要小得多。式中的 Δ_U 为电压表的示值误差限， Δ_d 可取为 0.5 分度， Δ_{R_g} 为电流计内阻的不确定度， $\frac{\Delta_{R_0}}{R_0} = 1\%$ ，最后将结果写成 $C_I \pm \Delta_{C_I}$ 的形式。

6. 数据表格

电流计型号_____，编号_____。

(1) 观察电流计的阻尼运动特性

电流计外临界电阻 $R_c =$ _____ Ω (自测值)

R_2 (Ω)	阻尼运动的特点	光标自最大偏转处至最后停在零点位置处所需的时间 (s)
约 $10R_c$		
约 R_c		
约 $0.1R_c$		

(2) 测电流计的内阻 R_g

电压表量程_____V，准确度等级_____，分度值_____V，

电阻箱准确度等级_____， $R_0 =$ _____ Ω 。

① 方法一，半偏法

测次	U (V)	R_1 (Ω)	$R_2 = 0$ 时 d (分度)	偏 $d/2$ 时 R_2 (Ω)	调偏 2 分度时对应的 $\Delta R'$ (Ω)
1					
2					
3					
4					
5					
6					

② 方法二，全偏法

测次	U (V)	R_1 (Ω)	$R_2 = 0$ 时 d (分度)	$R_1/2$ (Ω)	R_2 (Ω)	调偏 2 分度时对应的 $\Delta R'$ (Ω)
----	------------	-----------------------	----------------------	-------------------------	-----------------------	---

1						
2						
3						

(3) 测电流分度值 C_I

测次	U (V)	R_1 (Ω)	R_2 (Ω)	d (分度)		I_g (A)	C_I (A/分度)	
				左	右		左	右
1								
2								
3								

7. 思考题

(1) 在图 4 中, 设电流计已有某一偏转, 如果断开 R_2 的连线, 光标将作何运动? 当光标正好通过零点时合上电流计短路开关 S_3 , 光标的运动状态有何变化? 为什么?

(2) 试想出一种测电流计内阻 R_g 的其他方法。

(3) 在测定电流分度值的线路图 4 中用了两次分压。如果不用两次分压行不行? 试详细说明理由。

(4) 计算 Δ_{R_g} 时, 试分析式中各项的哪一项对 Δ_{R_g} 影响最大, 哪些项可以忽略不计? 全偏法虽不要求估算测量结果的不确定度, 但可与半偏法相比较, 试找出全偏法的优点来。