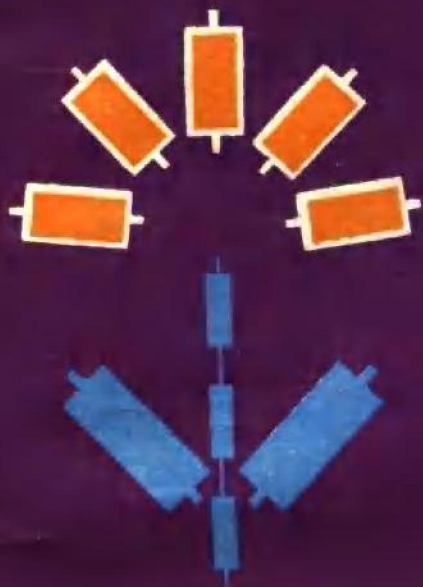


陕西科学技术出版社



DIANZUDECELIANGYU
FEIDIANLIANGCE

电阻的测量与非电量测

电阻的测量与非电量测

徐 启 华

陕西科学技术出版社出版

(西安北大街 131 号)

陕西省新华书店发行 空军工程学院印刷所印刷

开本 787×1092 1/32 印张 16.5 字数 350,000

1981 年 2 月第 1 版 1981 年 2 月第 1 次印刷

印数 1—4,500

统一书号: 15202 · 19 定价: 1.30 元

序

在电测技术范围内，电阻是一个很重要的基本参量。它既可能是被测对象、也可能是测量电路的组成部分。

作为被测对象、事实上不仅包括由电阻材料制成的元件，还包括在电和磁的作用下产生的不可逆能量损耗的所谓之等效电阻。

不论实际电阻还是等效电阻，它们都与几何尺寸、形状，所处环境的温度、压力以及材料的物理、化学性质有关。人们正是利用这些关系，通过测电阻间接测量各种非电参量。

近廿余年，电阻测量技术不论在扩大测量范围，提高准确度，改进或寻求新的测量方法等方面都有较大发展。这主要是由于引入了新技术例如半导体技术、脉冲技术等和采用了新测量仪器如变压器电桥和电流比较仪等，这些新发展也反映在非电量的电测技术中。如能根据颇为分散的文献资料编写出一本反映近年成就和发展的书籍将是一件很有意义的工作，也是从事这方面工作的同志所迫切希望的。

徐启华同志收集了多年来国内外发表的有关电阻测量及其在非电量测中应用方面的文献资料，经分析整理编写成本书。其前五章主要系统介绍中阻、低阻、高阻、电阻率等的测量原理和方法，后四章介绍电阻测量在非电测量中的应用，详细阐述如何通过测电阻来测量诸如位移、机械力、温度、

浓度、湿度等一些物理量和化学量。编者尽力将近期成就充实到所有章节中去。为扩大读者的眼界，最后一章介绍电阻测量在更广泛范围中的应用。

相信作者的辛勤劳动必将对读者起到积极的作用。

唐 统 一

1979年8月于北京

目 录

第一部分 电阻的测量

第一章 检测器、测量放大器和测量整流器·····	(2)
第一节 检测器·····	(2)
第二节 测量放大器·····	(23)
第三节 测量整流器·····	(56)
第二章 中阻的测量·····	(69)
第一节 直流指示测量法·····	(70)
第二节 电桥测量法·····	(87)
第三节 补偿测量法·····	(164)
第三章 低阻的测量·····	(179)
第一节 直流指示测量法·····	(179)
第二节 电桥测量法·····	(182)
第三节 补偿测量法·····	(201)
第四章 高阻的测量·····	(208)
第一节 直流指示测量法·····	(208)
第二节 电桥测量法·····	(216)
第三节 电容器的充电、放电法·····	(229)
第五章 电阻率的测量·····	(241)
第一节 接触法·····	(242)
第二节 非接触法·····	(256)

第三节	微波法	(277)
-----	-----	-------

第二部分 非电量的电阻法测量

第六章	几何量的测量	(284)
-----	--------	-------

第一节	线性电位差计	(285)
-----	--------	-------

第二节	非线性电位差计	(290)
-----	---------	-------

第三节	测量线路	(301)
-----	------	-------

第四节	光电法和场板法	(305)
-----	---------	-------

第五节	物位的测量	(309)
-----	-------	-------

第七章	力学量的测量	(315)
-----	--------	-------

第一节	金属电阻应变片	(316)
-----	---------	-------

第二节	半导体应变片	(322)
-----	--------	-------

第三节	金属电阻应变片在构件上的布置和在电桥中的接法	(327)
-----	------------------------	-------

第四节	半导体应变片在构件上的布置和在电桥中的接法	(332)
-----	-----------------------	-------

第五节	金属电阻应变片电桥的线路补偿	(337)
-----	----------------	-------

第六节	半导体应变片电桥的温度补偿	(350)
-----	---------------	-------

第七节	应变片电桥输出电压的计算	(356)
-----	--------------	-------

第八节	压力的测量	(360)
-----	-------	-------

第九节	速度的测量	(378)
-----	-------	-------

第八章	温度的测量	(386)
-----	-------	-------

第一节	铂电阻温度计	(388)
-----	--------	-------

第二节	热敏电阻温度计	(401)
-----	---------	-------

第三节	电阻温度计特性曲线的线性化	(418)
-----	---------------	-------

第四节	晶体管温度计	(433)
-----	--------	-------

第五节	多谐振荡器测温电桥·····	(439)
第六节	单稳触发线路测温电桥·····	(451)
第七节	多谐振荡器温度——频率转换器·····	(456)
第八节	电阻温度计用的直流电流比较仪电桥·	(461)
第九节	测低温用的电阻温度计·····	(464)
第十节	瞬时温度的测量·····	(468)
第十一节	电阻温度计的发展动向·····	(476)
第九章	物理化学量的测量·····	(480)
第一节	浓度的测量·····	(480)
第二节	湿度的测量·····	(497)
第三节	化学反应速率的测量·····	(502)
第十章	其它量的测量·····	(504)
第一节	寻找地下水·····	(504)
第二节	粮食含水率的测量·····	(509)
第三节	在医疗卫生方面的应用·····	(512)
第四节	预报地震·····	(515)
主要参考文献		
后 记		

第一部分

电阻的测量

电阻是一个很重要的电学基本量。按照阻值的大小，电阻可以分为高阻、中阻、低阻，它们的划分界限是：

$10^{-12} \sim 10^{-7} \Omega$ ——超低阻；

$10^{-6} \sim 10 \Omega$ ——低阻；

$10 \sim 10^6 \Omega$ ——中阻；

$10^7 \sim 10^{12} \Omega$ ——高阻；

$10^{13} \sim 10^{18} \Omega$ ——超高阻。

电阻的测量方法，基本上有三种：直流指示测量法、电桥测量法、补偿测量法，其中以电桥测量法最为常用。

第一章 检测器、测量放大器 和测量整流器

在精密的电磁测量技术中，经常采用电桥测量法和补偿测量法，这些方法必须有检测微小电流或电压的灵敏仪表，这样的仪表统称为检测器，在完全平衡法中也称为平衡指示器或指零仪。

常见的检测器有灵敏检流计、冲击检流计、振动检流计、光电放大式检流计、示波式检测器等。

微弱的电流或电压不能带动测量仪表，必须经过测量放大器进行放大。测量放大器对测量电路的干扰应该尽可能地小，所以测量放大器的输入阻抗应该高，它输出电压或者电流。工业上往往需要输出电流与负载无关的测量放大器；输出电压与输入电压相等的测量放大器也是经常使用的，它能带动较大的负载。另外，测量放大器与测量仪表配合后能使测量时间缩短。

测量整流器往往是测量放大器和测量仪表之间的桥梁，它要给测量机构提供一个电压，该电压应该尽可能与输入交变电压的峰值或平均值成正比。

第一节 检 测 器

一、灵敏检流计

灵敏检流计是一种灵敏度很高的直流磁电式检流计。在

电磁测量技术中，它被广泛地用作指零仪，或者用来直接测量微小的电流与电压。

灵敏检流计的构造如图1-1所示：用细悬丝（镀铂的石英丝或磷铜带等材料）把线圈悬挂在磁场中，悬丝上固定一面小镜M作为光学指示器。当电流通过线圈时，线圈受磁场的作用发生偏转。通过测量线圈偏转的角度即可测量电流的大小。这种检流计，最小可测到 $10^{-11} A/mm$ 的数量级。

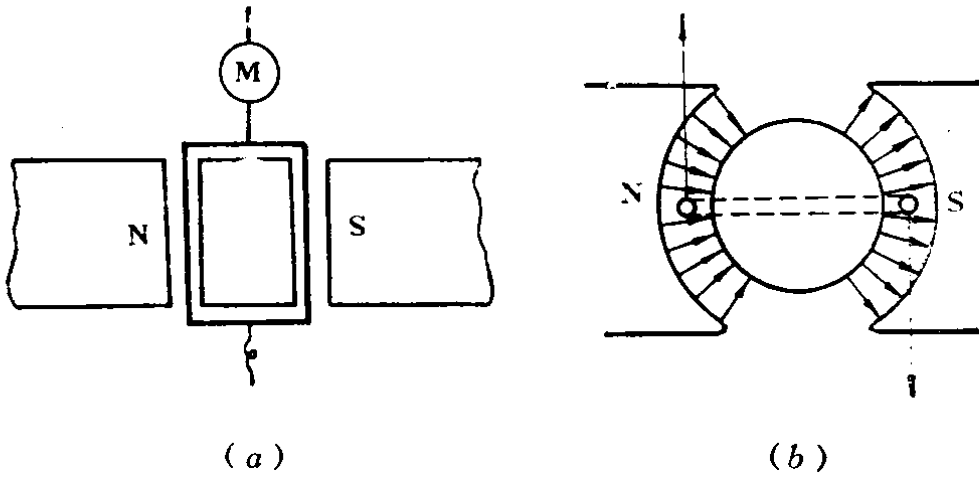


图 1—1 灵敏检流计

运用检流计时，活动部分的运动特性和它的灵敏度一样重要。运动特性与能否迅速、准确地读取检流计的示数密切相关。为了研究各种使用条件下的运动情况，必须分析阻尼，建立检流计运动的微分方程。设未通电流时，线圈平面和磁场平行。通入电流 I 时，可动线圈将受到一力矩 $BSnI$ 的作用。其中， B 为线圈所在处的磁感应强度， n 、 S 分别为线圈的匝数和面积。线圈在此力矩的作用下将发生转动。线圈的转动使悬丝发生形变，因此产生一反力矩 $-K\alpha$ ，其中 K 是线圈的反扭矩常数， α 是线圈转过的角度。同时，还受到阻尼

力矩 $-\rho \frac{d\alpha}{dt}$ ，其中 ρ 是阻尼系数，即线圈的角速度为 1 个单位时的阻尼力矩。这阻尼力矩一般由两部分组成——空气的阻尼作用与电磁阻尼作用，其中主要是电磁阻尼。用 ρ_1 表示空气的阻尼系数， ρ_2 表示电磁阻尼系数，它可由法拉第电磁感应定律求得。

如未通电流时，线圈转角 $\alpha = 0$ ，穿过线圈的磁通量为零。当线圈转过 α 角时，穿过线圈的磁通量为 $\Phi = nBS \sin \alpha$ ，按照法拉第电磁感应定律，这时感应电动势 $\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -nBS$

$\cos \alpha \frac{d\alpha}{dt}$ ，当 α 角很小或磁场是辐射式时，如图 1-1 所示，

$\cos \alpha \approx 1$ ，所以 $\varepsilon_i = -nBS \frac{d\alpha}{dt}$ 。如果与线圈连接的外电路闭合，且设外电阻为 R ，则这闭合回路的感应电流 I_i 为：

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R_g + R} = -\frac{nBS}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt},$$

式中， R_g 为检流计本身的电阻（内阻）。感应电流在磁场的作用下将产生磁力矩，阻碍线圈的偏转。这力矩的大小为：

$$nBSI_i = -\frac{(nBS)^2}{R_g + R} \frac{d\alpha}{dt},$$

所以 $\rho_2 = \frac{(nBS)^2}{R_g + R}$ ，

$$\rho = \rho_1 + \rho_2 = \rho_1 + \frac{(nBS)^2}{R_g + R}。$$

线圈的运动方程为:

$$J \frac{d^2 \alpha}{d^2 t} = BS_n I - K\alpha - \rho \frac{d\alpha}{dt}$$

或者 $J \frac{d^2 \alpha}{d^2 t} + \rho \frac{d\alpha}{dt} + K\alpha = BS_n I$ (1—1)

式中 J 是线圈的转动惯量, $\frac{d^2 \alpha}{d^2 t}$ 是线圈的角加速度。

式(1—1)有一个特解 $\alpha = BS_n I / K$, 它表示线圈的平衡偏转角。解的补函数可如下求得:

$$J \frac{d^2 \alpha}{d^2 t} + \rho \frac{d\alpha}{dt} + K\alpha = 0, \quad (1—2)$$

式(1—2)的特征方程为

$$JP^2 + \rho P + K\alpha = 0, \quad (1—3)$$

这个特征方程有两个根:

$$P_1 = -\frac{\rho}{2J} + \sqrt{\frac{\rho^2 - 4JK}{4J^2}} = -\frac{\rho}{2J} + \sqrt{\frac{\rho^2}{4J^2} - \frac{K}{J}},$$

$$P_2 = -\frac{\rho}{2J} - \sqrt{\frac{\rho^2}{4J^2} - \frac{K}{J}}.$$

令 $a_1 = \frac{\rho}{2J}, \quad a_2 = \sqrt{\frac{\rho}{4J^2} - \frac{K}{J}},$

则 $P_1 = -a_1 + a_2, \quad P_2 = -a_1 - a_2.$

下面分三种情况加以讨论:

1. 当 $\frac{\rho^2}{4J^2} < \frac{K}{J}$ 时,

$$\text{令 } \frac{\rho}{2J} = a_1, \quad \sqrt{\frac{\rho^2}{4J^2} - \frac{K}{J}} = a_2 \sqrt{-1}。$$

则特征方程的两个根为

$$\begin{aligned} P_1 &= -a_1 + a_2 \sqrt{-1} = -a_1 + ja_2, \\ P_2 &= -a_1 - ja_2。 \end{aligned}$$

根据初始条件 $t=0$ 时, $\alpha=0$, $\frac{d\alpha}{dt} = \omega_0$, 即得特征方程

的解为

$$\alpha = \frac{\omega_0}{a_2} \exp(-a_1 t) \sin a_2 t。 \quad (1-4)$$

式中 $\omega_0 = \sqrt{\frac{K}{J}}$ 为自由振荡频率。

由此可见, 线圈在运动中受到阻尼, 式中出现了 $\exp(-a_1 t)$ 这一因子, 所以线圈在来回摆动时, 振幅随着时间而不断衰减, 但是振荡周期保持不变: $T = 2\pi/a_2$, 周期的长短因阻尼系数 ρ 的不同而不同。如果线圈在运动中没有受到阻尼, 则因为 $\exp(-a_1 t) = \exp(0) = 1$, 线圈作等幅的正弦振荡, 周期 $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K}} = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 。这时的周期称为自由振荡周期。

2. 当 $\frac{\rho^2}{4J^2} > \frac{K}{J}$ 时,

特征方程有两个不等的实根, 根据初始条件可求得解

为:

$$\alpha = \alpha_m \exp(-a_1 + a_2)(t - t_m) \left\{ \frac{a_1 + a_2}{2a_2} + \frac{a_2 - a_1}{2a_2} \exp[-2a_2(t - t_m)] \right\} \quad (1-5)$$

$$\text{式中 } \alpha_m = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{-\frac{a_1}{2a_2}} \left(\sqrt{\frac{J}{K}} \right) (-\omega_0)。$$

由 $d\alpha/dt = 0$, 即可求得线圈摆到 α_m 的时间 t_m 为

$$t_m = \frac{1}{2a_2} \log \frac{P_2}{P_1}。$$

因为 $\frac{\rho^2}{4J^2} > \frac{K}{J}$, $a_2 > 0$, $-2a_2(t - t_m) < 0$; 而且 $a_1 = \frac{\rho}{2J}$

远大于 a_2 , 所以线圈偏转到 α_m 以后就开始衰减。从理论上说, 线圈是永远也回不到零点的。因此, 这是一种非周期运动。

3. 当 $\frac{\rho^2}{2J^2} = \frac{K}{J}$ 时,

$a_1 = \frac{\rho}{2J}$ 是特征方程的重根, 根据初始条件可得其解为:

$$\alpha = \alpha_m [1 + a_1(t - t_m)] \exp[-a_1(t - t_m)] \quad (1-6)$$

$$\text{式中 } \alpha_m = \frac{\omega_0}{e} \sqrt{\frac{J}{K}}。$$

由 $d\alpha/dt = 0$, 可得线圈摆到 α_m 的时间为 $t_m = \frac{1}{a_1}$, 这是一

种比第二种情况衰减更快的非周期振荡。

特征方程解的三种情况示于图1-2。

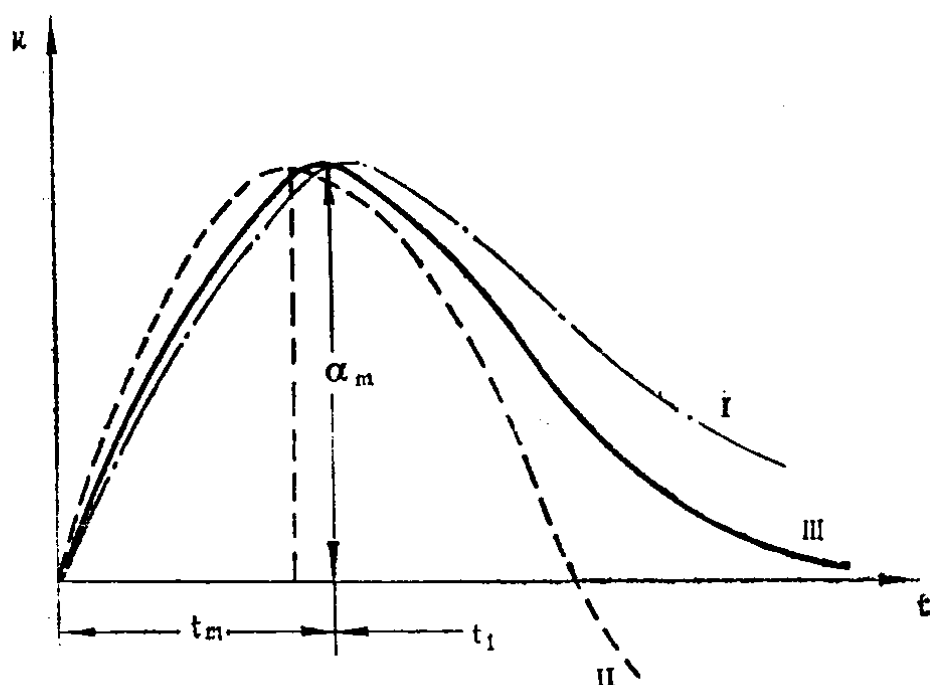


图 1-2 特征方程的解

曲线 I —— $\rho > 2\sqrt{JK}$;

曲线 II —— $\rho < 2\sqrt{JK}$

曲线 III —— $\rho = 2\sqrt{JK}$

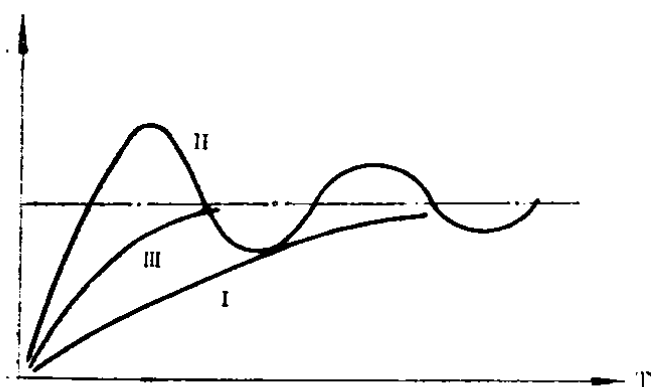


图 1-3 检流计线圈的运动特性

曲线 I —— $\rho > 2\sqrt{JK}$

曲线 II —— $\rho < 2\sqrt{JK}$

曲线 III —— $\rho = 2\sqrt{JK}$

线圈运动方程的通解即检流计线圈运动特性示于图1-3。

我们把 $\frac{\rho^2}{2J^2} = \frac{K}{J}$,

即 $\rho = 2\sqrt{JK}$ 时称为临

界阻尼, $\frac{\rho^2}{2J^2} < \frac{K}{J}$ 即 ρ

$< 2\sqrt{JK}$ 时称为欠阻

尼, $\frac{\rho^2}{2J^2} > \frac{K}{J}$ 即 $\rho >$

$2\sqrt{JK}$ 时, 称为过阻尼。

综上所述: 临界阻尼下工作的检流计能最快地趋向平衡, 但它永远也不能达到平衡位置。在欠阻尼状态下, 线圈围绕平衡位置作衰减的周期振荡, 周期振荡下的 α_m 比非周期运动的大。为了使线圈的 α_m 较大, 又能较快地到达平衡位置, 选择 $\rho/2\sqrt{JK} = 0.8 \sim 0.9$ (微欠阻尼) 对检流计的工作是比较理想的。

检流计的主要参数有临界电阻、对电流的灵敏度和对电压的灵敏度。

在临界阻尼下, $\rho = \rho_1 + \rho_2 = \rho_1 + \frac{(nBS)^2}{R_g + R} = 2JK$ 。当 $\rho_1 \ll \rho_2$ 时,

$$R_g + R = \frac{1}{2} (nBS)^2 / \sqrt{JK} \quad (1-7)$$

由此可见, 对于一定的检流计来说, 要使线圈处在临界阻尼状态下, 一般只有改变外电路的电阻 R 来达到。满足式(1-7)的外电阻, 称为临界电阻, 是检流计的一个特性常数, 以 R_c 表示。它表示检流计作非周期运动时, 外电路的最大可能电阻。

如把 $\frac{BnS}{K}$ 记作 S_I , 则平衡偏转的公式可以简写为:

$$\alpha_m = S_I I,$$

式中 S_I 就表示单位电流通过线圈时所引起的偏转, 称为检流计对电流的灵敏度。 S_I 的倒数称为电流常数, 以 C_I 表示, 其值等于单位偏转角所需的电流。

如果检流计线圈中通以电流 I ，线圈两端的电压降 $V = IR_g$ 。因此，

$$\alpha_m = S_I \left(\frac{V}{R_g} \right) = S_V V,$$

式中 S_V 称为检流计对电压的灵敏度。它表示检流计的活动部分在单位电压作用下所发生的偏转。 S_V 的倒数称为检流计的电压常数，以 C_V 表示，其值等于单位偏转角所需的电压。

有人常常把 S_V 误解为 S'_V ，它们的关系是：

$$S'_V = \frac{S_I}{R_g + R_c}。$$

S'_V 的定义是：当外电路的电阻为临界电阻时，单位电压加到检流计上所引起的线圈偏转。

二、冲击检流计

冲击检流计可测量微小的短暂电流的电量，常常用于磁学测量、电容和高阻的测量。

冲击检流计的周期比灵敏检流计长得多，约二、三十秒，

甚至更长。因此，由摆动的周期公式 $T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K}}$ 可知，悬丝

的反扭矩系数 K 必需小，而线圈的转动惯量 J 必需大，为此在动圈上安装负荷件以增大它的转动惯量。这样就可以在测量时，使脉冲电流通过转动线圈的持续时间比冲击检流计的周期短得多；在分析时，也就可以认为脉冲电流结束以后，检流计的转动线圈才开始以初角速度 ω_0 偏转。