

高等学校教材

电子材料与元器件测试技术

李能贵 编



上海科学技术出版社

内 容 提 要

本书比较全面、系统地介绍了电子元件和电介质材料基本电气参数的各种测量方法、测试工作原理、测试技术以及提高测量准确度的途径,对常用实验数据处理、统计分析方法、试验设计以及元器件可靠性理论和实验作了必要的阐述。本书部分章节还配有习题,不仅紧密配合理论教育,而且很有实用价值。

本书可作为大学电子材料与元器件、电子陶瓷、无机材料和高分子等专业的必修教材,也可作为从事电子材料与元器件测试工作的技术人员和工作人员的参考书。

高等学校教材

电子材料与元器件测试技术

李能贵 编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 16.5 字数 391,000

1987 年 6 月第 1 版 1987 年 6 月第 1 次印刷

印数: 1—1,600

统一书号: 15119·2557 定价: 2.75 元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定,我部承担了全国高等学校工科电子类专业课教材的编审、出版的组织工作。从一九七七年底到一九八二年初,由于各有关院校,特别是参与编审工作的广大教师的努力和有关出版社的紧密配合,共编审出版了教材 159 种。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应社会主义现代化建设培养人才的需要,反映国内外电子科学技术水平,达到“打好基础、精选内容、逐步更新、利于教学”的要求,在总结第一轮教材编审出版工作经验的基础上,电子工业部于一九八二年先后成立了高等学校《无线电技术与信息系统》、《电磁场与微波技术》、《电子材料与固体器件》、《电子物理与器件》、《电子机械》、《计算机与自动控制》,中等专业学校《电子类专业》、《电子机械类专业》共八个教材编审委员会,作为教材工作方面的一个经常性的业务指导机构,并制定了一九八二年到一九八五年教材编审出版规划,列入规划的教材、教学参考书、实验指导书等共 217 种选题。在努力提高教材质量,适当增加教材品种的思想指导下,这一批教材的编审工作由编审委员会直接组织进行。

这一批教材的书稿,主要是从通过教学实践、师生反映较好讲义中评选择优和从第一轮较好的教材中修编产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社都为保证和提高教材质量作出了努力。

这一批教材,分别由电子工业出版社、国防工业出版社、上海科学技术出版社、西北电讯工程学院出版社、湖南科学技术出版社、江苏科学技术出版社、黑龙江科学技术出版社和天津科学技术出版社承担出版工作。

限于水平和经验,这一批教材的编审出版工作肯定还会有许多缺点和不足之处,希望使用教材的单位、广大教师和同学积极提出批评、建议,共同为提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

测量是人们认识和改造自然的重要手段,生产过程离不开测量,否则无法正常生产,生产出来的产品也无法保证质量。测量可以使人们对客观事物获得定量的概念,便于对事物分析、比较和研究。新现象、新规律的发现,多数是通过大量、反复地测量和观察加以确认,因此,测量是从事科学研究的基础。

测量必须研究两个基本问题:如何才能测量出来(测试方法、测量设备);如何才能测得准确(测试技术)。

随着科学技术向纵横发展,各学科相互渗透,使得所研究的对象更加广泛、更加综合,因而对测量提出了更高的要求。测量学本身也在科学技术的发展中形成了一门独立的完整学科,并且对科学技术的发展起着重大的推动作用。从某种意义上来说,科学技术水平是由测量水平来保证和体现的,而测试技术的高低也是衡量一个国家科学技术水平的重要标志之一。

电子工业是发展极为迅速的新兴工业,电子材料与元器件是各种电子设备或装置的基础,又是现代科学技术的一个先行领域,它决定了整机和系统的性能。电子材料与元器件的发展,必须相应地发展测试技术、测试仪器和测试水平。几年来,材料与元器件参数的测量技术有了一定的发展,已经从单一参数测量发展到综合多参数测量;从手工测试进展到自动测试。电子计算机的广泛应用,改变了许多传统的测量方法,出现了计算机与测量仪器相结合的新一代测量系统,因此,我们不仅要学会和掌握传统的测量方法及测试技术,还要研究新的测量方法和测试技术,以适应科学技术的发展。

本教材根据电子工业部电子材料与固体器件教材编审委员会审定的编写大纲进行编写,参考教学时数为60学时。全书共分八章,第一章至第四章阐述测量电子材料与元器件基本参数的试验方法、测试原理和测试技术;第五章介绍铁电和压电材料主要参数的测量方法;第六章论述电子元器件的可靠性理论和可靠性试验方法;第七、八章介绍误差理论和实验数据处理的基本方法以及试验设计的初步基础。另外,本书还对电子材料与元器件测试技术的发展方向作了简单的介绍。

本书可作为大学电子材料与元器件、电子陶瓷、无机材料和高分子材料等专业的教材或教学参考书,也可作为从事电子元件和电子材料工作的技术人员、研究人员和例行试验工作人员的有益读本。

本书由西安交通大学李能贵主编,成都电讯工程学院金锡葛主审,天津大学谢道华任责任编辑。此外,在编写过程中还得到了西安交通大学电子材料与元器件教研组有关同志的有力帮助,并提供了宝贵的资料,在此一并表示衷心感谢。

由于编者水平有限,书中定有不少欠妥、疏漏和谬误之处,恳请读者不吝指正。

编 者

目 录

出版说明

前 言

第一章 电阻值与电阻率的测量	1
§ 1-1 电阻与电阻率的概念	1
§ 1-2 电阻与电阻率的测量	3
§ 1-3 测量技术的考虑和提高测量准确度的途径	20
§ 1-4 电阻器等效参数的测量	27
§ 1-5 电阻器噪声的测量	32
§ 1-6 电阻器非线性和电压效应的测试	37
参考资料	39
习题	40
第二章 电容与介质损耗角正切的测量	41
§ 2-1 测量电容与介质损耗角正切的意义及方法	41
§ 2-2 影响测量结果因素及测试条件的考虑与选择	43
§ 2-3 低频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量	54
§ 2-4 高频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量	74
§ 2-5 极低频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量	84
§ 2-6 超高频下相对介电系数和介质损耗角正切的测量	88
§ 2-7 电容器高频参数及频率特性的测量	97
参考资料	108
习题	108
第三章 电子材料与元件温度系数的测量	110
§ 3-1 温度特性的概念	110
§ 3-2 试验温度的获得和测量准确度的分析	113
§ 3-3 电阻温度系数的测量	115
§ 3-4 电容温度系数的测量	115
参考资料	118
第四章 电子材料及元器件耐压与击穿试验	119
§ 4-1 概述	119
§ 4-2 影响耐压及击穿场强的因素	120
§ 4-3 电极、试样和媒质的选择	123
§ 4-4 耐压和击穿试验的设备和装置	125
§ 4-5 局部放电的观测	128
§ 4-6 用非破坏性试验推断抗电强度	131
参考资料	132
第五章 铁电和压电材料参数的测量	133
§ 5-1 铁电材料参数的测量	133
§ 5-2 压电材料主要参数的测量	139

§ 5-3 热释电系数的测量	150
参考资料	153
第六章 电子材料与元器件可靠性试验	154
§ 6-1 可靠性的基本概念	154
§ 6-2 电子材料与元器件失效规律及概率纸的用法	157
§ 6-3 可靠性试验的目的和分类	168
§ 6-4 指数分布情况的寿命试验	170
§ 6-5 恒定应力加速寿命试验	177
§ 6-6 可靠性筛选试验	185
§ 6-7 电子元器件失效率鉴定试验	189
参考资料	194
习题	194
第七章 误差理论和实验数据处理基础	196
§ 7-1 误差的基本概念	196
§ 7-2 随机误差的基本理论和处理方法	200
§ 7-3 系统误差的发现和消除方法	207
§ 7-4 误差的合成与分配	210
§ 7-5 实验数据处理的一些基本原则	214
§ 7-6 统计检验	222
参考资料	226
习题	226
第八章 试验设计基础	228
§ 8-1 抽样理论及抽样方法	228
§ 8-2 因子试验设计	236
§ 8-3 试验的程序设计	242
§ 8-4 仪器或设备的选择原则	244
参考资料	244
习题	245
附录 I $\Gamma\left(1+\frac{1}{m}\right)$ 数值表	246
附录 II $\chi^2(f)$ 分布的下侧分位点 $\chi^2_\alpha(f)$ 表	247
附录 III 标准正态分布表(一)	250
附录 IV 标准正态分布表(二)	252
附录 V t 值表	254
附录 VI F 分布表	255

第一章

电阻值与电阻率的测量

§ 1-1 电阻与电阻率的概念

电阻和电阻率是重要的电学基本量,也是电子材料和元器件的主要电气参数之一。准确的测量对于制造和使用以及性能研究都有极其重要的意义。

电阻按其阻值的大小,可分为超低阻、低阻、中阻、高阻和超高阻,其划分界限大致如下,即

$10^{-12} \sim 10^{-7} \Omega$ ——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

$10^{13} \sim 10^{19} \Omega$ ——超高阻

通常,我们所说的电阻值是指直流电阻值,即在电子元器件或材料两端施加一直流电压 U 与其通过的稳态电流 I 之比值,即

$$R = \frac{U}{I} \quad (1-1)$$

式中 U ——施加于元器件或材料两端的直流电压(V);

I ——通过元器件或材料的稳态电流(A);

R ——电阻值(Ω)。

作为绝缘材料的电阻,称为绝缘电阻。

仔细分析和观察可以发现:该电流由两部分构成,即表面电流 I_s 和体积电流 I_v 。相应地有表面电阻 R_s 和体积电阻 R_v , 即

$$R_s = \frac{U}{I_s} \quad (1-2)$$

$$R_v = \frac{U}{I_v} \quad (1-3)$$

对于电子元器件,所测得的电阻是总电阻。

对于材料,可以分别测得表面电阻和体积电阻,这对研究材料的性能是极为重要的。

有的材料,如云母等层状结构或层压制品,其垂直于层的方向与沿层方向的电阻是不同的,为表征其沿层的电阻性能,引入内电阻概念。

从物理和电工理论可知:无论电阻器的电阻或绝缘材料的电阻均与材料的性能、尺寸大小和形状有密切关系,阻值大小并不能反映出材料本身的特性,因而不能作为材料的电性能参数,故引入电阻率概念。电阻率可以表征材料本身的特性,而与其尺寸、形状无关。

电阻率,就是单位长度上所承受的直流电压(即直流电场强度 E)与单位面积所通过的

稳态电流(即电流密度 J)之比,即

$$\rho = \frac{E}{J} \quad (1-4)$$

因此,体积电阻率 ρ_v 就是沿着体积电流方向的直流电场强度与稳态电流密度之比,即

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} \quad (1-5)$$

式中 E_v ——直流电场强度(V/m);

J_v ——稳态电流密度(A/m²);

ρ_v ——体积电阻率($\Omega \cdot m$)。

如果试样是平板试样(图 1-1),则

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} = \frac{U/l}{I_v/A} = \frac{UA}{I_v l} = R_v \frac{A}{l} \quad (1-6)$$

式中 A ——电极面积(m²);

l ——电极间的距离,即试样厚度(m)。

所以,体积电阻率的实用单位为($\Omega \cdot m$),它在数值上等于每边为一米的正方体材料两对面间的体积电阻。

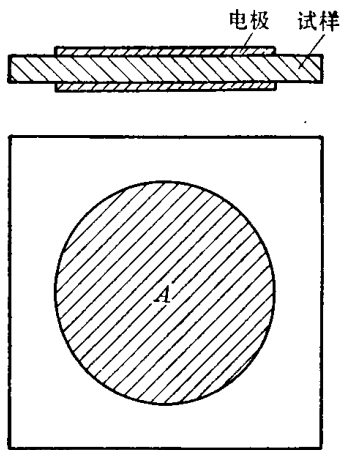


图 1-1

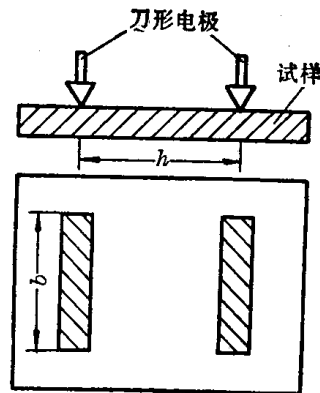


图 1-2

同样,表面电阻率 ρ_s 是沿材料表面电流方向的直流电场强度 E_s 与单位宽度通过的表面电流 a 之比,即

$$\rho_s = \frac{E_s}{a} \quad (1-7)$$

显然,表面电阻率的实用单位为欧(Ω)。

如果平板试样采用刀形电极测量表面电阻率时(如图 1-2 所示),当电极宽度为 b , 电极间距离为 h , 若不考虑体积电流的影响,则表面电阻率为

$$\rho_s = \frac{E_s}{a} = \frac{U/h}{I_s/b} = \frac{U}{I_s} \frac{b}{h} = R_s \frac{b}{h} \quad (1-8)$$

它在数值上等于一正方形两对边间的表面电阻。

需要特别指出:表面电阻率在很大程度上取决于材料的表面状态。当表面吸附着半导体杂质和水份时,将明显地影响表面电阻率的大小,而且测量表面电阻很难完全避免体积电流的影响,因此,通常都以体积电阻率作为衡量材料电性能的参数之一。

因为电阻的倒数称为电导,所以电阻率的倒数称为电导率,记作 γ (S/m)。

§ 1-2 电阻与电阻率的测量

作为电阻器的电阻值一般不会很大,从几欧到几十兆欧,而作为绝缘介质材料的绝缘电阻却很大。因此,仅用一种方法或一台仪器同时满足上述要求,显然是不可能的。还有些地方,如电阻器的引线帽与电阻基体间的接触电阻,或者电位器电刷与基体触点的接触电阻却很小,小到百分之几欧或千分之几欧,要能准确地测量必须采用一些特殊的测量方法。

测量电阻方法很多,目前最常采用的有:电流电压法(又称伏安法)、电桥法、比较法、探针法、充电法、自放电法、电子静电计法、交流放大法等。这些方法所依据的测量原理归纳起来主要有:直接偏转原理、电桥平衡原理、充放电原理和电子放大原理。其具体测量方法原理将结合具体测量对象予以介绍。

一、中阻的测量

中阻的测量是电阻测量的基础,其测量方法主要有:电流电压测量法、电桥测量法、补偿测量法,其中以电桥测量法为主。这是因为电流电压法,借助于伏特表、安培表测量,虽然使用方便、测量简单、成本低廉,但测量准确度不高,故只在要求不高的场合中使用。

电桥法测量最突出的优点是精度较高。目前使用的电桥种类很多,如箱式电桥、滑线式电桥;平衡电桥、不平衡电桥;直流电桥、交流电桥;手动电桥、自动电桥、计算机控制的电桥,以及电阻或电流比较仪电桥等。

1. 电流电压法测量

电流电压法测量是借助于电压表和电流表测量施加在样品上的直流电压 U 和通过样品的稳态电流 I_x , 从而确定样品的电阻 R_x , 即

$$R_x = \frac{U}{I_x}$$

电流电压法测量中最突出的问题是电流表和电压表如何正确地连接。图 1-3 表示了两种常用的连接方式。

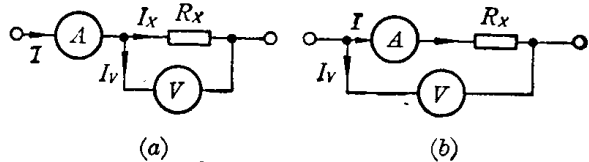


图 1-3

两种测量方法测得结果都是近似的,但具体采用哪一种连接方式,主要决定于测量准确度高低。到底哪一种测量的准确度高呢?这与被测电阻 R_x 的大小有关。

对于图 1-3(a) 的连接方式:

$$\text{因为} \quad (I - I_V) R_x = I_V R_V = V$$

$$\text{所以} \quad R_x = \frac{I_V R_V}{I - I_V} = \frac{V}{I - I_V}$$

$$\text{令} \quad \frac{V}{I} = R_{\text{测}}$$

则由此连接方式造成的误差为

$$\Delta R_x = \frac{V}{I} - \frac{V}{I - I_V} = \frac{-V I_V}{I(I - I_V)} = -\frac{V I_V}{I \frac{V}{R_x}} = -\frac{V I_V R_x}{I V} = -\frac{V R_x}{I R_V}$$

$$\gamma_{R_x} = \frac{\Delta R_x}{R_{\text{测}}} = -\frac{R_x}{R_V} \approx -\frac{R_{\text{测}}}{R_V} \quad (1-9)$$

显然, R_V 比 R_x 越大, 方法本身造成的误差就越小, 因此采用此种连接方式时, 希望选 R_V 大的电压表。同时还可以看出, 用此种电路测得值比真实值总是偏小的。

对于图 1-3(b) 的连接方式:

$$\begin{aligned} R_{\text{测}} &= \frac{V}{I} = R_x + R_A \\ R_x &= \frac{V}{I} - R_A \\ \Delta R_x &= R_{\text{测}} - R_x = R_A \\ r_{R_x} &= \frac{\Delta R_x}{R_{\text{测}}} = \frac{R_A}{R_x + R_A} = \frac{R_A}{R_{\text{测}}} \end{aligned} \quad (1-10)$$

显然, 当电流表内阻相对于被测电阻很小时, 误差很小, 而且这种连接方式所造成误差使测得的结果总是偏大的。上述两种连接方式可以作出其相对误差与被测电阻 R_x 的关系曲线, 如图 1-4 所示。从图上可以看出: 当 R_x 很小时, 采用 (a) 连接方式; 当 R_x 很大时, 采用 (b) 连接方式; 但当 R_x 不是很大也不是很小时, 可按下面关系进行确定。

由图 1-4 可知, 当

$$\frac{R_{\text{测}}}{R_V} = \frac{R_A}{R_{\text{测}}}$$

即 $R_{\text{测}} = \sqrt{R_V R_A}$ 时, 两种方式所造成误差相等, 可以任意选择测量形式。

当 $R_{\text{测}} < \sqrt{R_V R_A}$ 时, (a) 线路相对误差小;

当 $R_{\text{测}} > \sqrt{R_V R_A}$ 时, (b) 线路相对误差小。

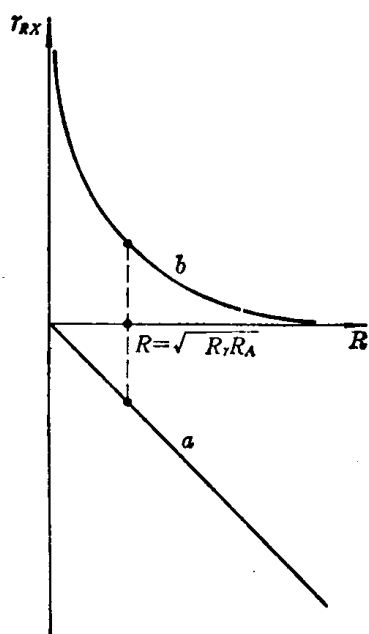


图 1-4

采用一般电工仪表测量, 要使测量结果精度很高是困难的。因此, 现在常采用运算放大器来构成内阻很高的伏特表和内阻很低的安培表。

图 1-5 就是用运算放大器构成内阻很高的伏特表的原理图。它是将运算放大器用作阻抗变换器。因为反馈作用, 因而阻抗很高, 对输入稳定电流影响很小。

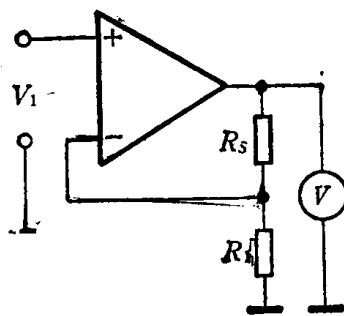


图 1-5

伏特计的读数

$$V = \left(\frac{R_s}{R_1} + 1 \right) V_1 \quad (1-11)$$

同样也可以利用运算放大器构成内阻很低的安培表, 如图 1-6 所示。它是利用倒向放大器的相加点是“虚地点”, 这样可以认为电流全部流过 R_s , 而没有流入放大器中, 可直接读取电流的大小。

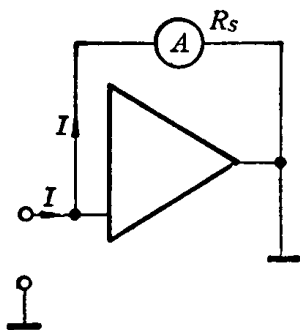


图 1-6

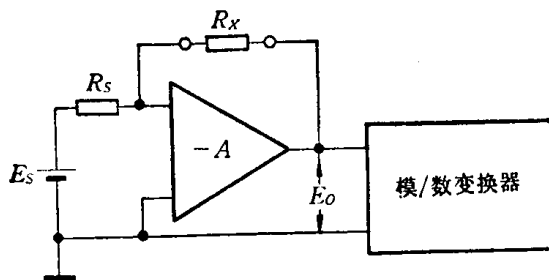


图 1-7

根据这种想法,可利用运算放大器加模/数变换器直接测量电阻值,图1-7、图1-8就是典型的测量电路原理图。

图1-7中,运算放大器A作为线性比例器,当改变 R_s 可变换量程。若运算放大器A的开环增益与输入阻抗足够大,则当电压源 E_s 接入时,放大器本身的输入电压将为无穷小,电路输入电流几乎全部流入反馈元件 R_x ,而 R_x 两端的电压(即输出电压) E_o 为

$$E_o = -\frac{E_s}{R_s} R_x$$

故

$$R_x = -\frac{E_o}{E_s} R_s \quad (1-12)$$

当 E_s 、 R_s 一定时,知道 E_o 就知道 R_x 的大小, E_o 的大小通过模/数变换器可直接读出 R_x 的数值。这电路相当于图1-3(b)电路,可用于测量较高阻值的场合。

图1-8中,运算放大器A作为电压跟随器,当 $R_s \gg R_x$,即 R_x 流过恒定电流时,则

$$\frac{E_s}{R_s + R_x} R_x A = E_o \approx \frac{E_s}{R_s} R_x A$$

所以

$$R_x = \frac{R_s}{E_s A} E_o \quad (1-13)$$

式中 A——运算放大器的增益。

显然,被测电阻 R_x 与放大器输出电压 E_o 成正比,经模/数变换后,接一个直流数字电压表,测量结果的读数可直接刻成被测电阻 R_x 的数值。这电路相当于图1-3(a)电路,可用于测量较低阻值的场合。

2. 电桥法测量

这是中阻测量最常采用的方法,它不仅精度高,而且测量也比较简单。最简单的是普通四臂电桥,如惠斯顿电桥,其测量工作原理可用图1-9来说明。图中 R_1 、 R_2 是阻值已知的固定电阻器, R_x 是待测电阻, R_4 是标准可变电阻器。 G 为灵敏检流计, E 为直流电源电压。当电桥调节平衡时,检流计中没有电流通过,即C、D两点电位相等。此时

$$U_{AC} = U_{AD}$$

$$I_1 R_1 = I_x R_x$$

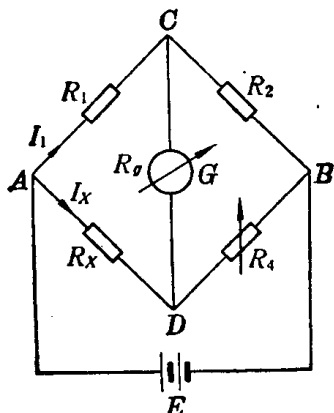


图 1-9

即

所以

$$\frac{I_1}{I_x} = \frac{R_x}{R_1}$$

同样

$$U_{CB} = U_{DB}$$

$$I_1 R_2 = I_x R_4$$

所以

$$\frac{I_1}{I_x} = \frac{R_4}{R_2}$$

因此

$$\frac{R_x}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$$

所以

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4 \quad (1-14)$$

若 $R_1 = R_2$ 时, R_x 的读数可直接按 R_4 读数刻度。若 $R_1 = 10R_2$ 时, R_x 即为读数的十倍; 若 $R_1 = 0.1R_2$ 时, R_x 即为 R_4 读数的 $1/10$ 倍。调节 R_1/R_2 的比值, 就可提高或降低测量阻值的范围, 也就是说可以扩大测量量程, 通常 R_1 臂和 R_2 臂称为比例臂。由于可调标准电阻和比例臂电阻都可以做得非常准确, 而且检流计的灵敏度又很高, 因此电桥测量精度比较高, 目前一般均可做到 $\pm 0.05\%$ 或 $\pm 0.01\%$ 的精度。

正确选择比例臂的比值是使测量结果取得精确的重要条件, 这是测量技术应考虑的问题。

例如, 要测量标称阻值为 $20\ \Omega$ 的电阻, 如选择比例臂为 0.01 , 电桥平衡时读得数据为 2045.82 , 则

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4 = 0.01 \times 2045.82 = 20.4582(\Omega)$$

如选择比例臂的比值为 100 , 读得的数据为 0.20 , 因此

$$R_x = \frac{R_1}{R_2} R_4 = 100 \times 0.20 = 20(\Omega)$$

其相对误差为

$$\tau_{R_x} = \frac{20.4582 - 20}{20.4582} \approx 2.2\%$$

所以, 正确选择比例臂的比值是在已选定一定精度的测量仪器上能测出最佳结果的关键。因此, 普通电桥均附有根据阻值测量范围建议选择比例臂比值的表格, 正是从这一思想出发的。

正确选择比例臂的基本思想是: 充分发挥电桥读数臂的所有旋钮的作用, 也就是说, 使所有旋钮都能读到有效数字。

电桥法测量中还应注意电源对角线和指示器对角线的正确连接。一般不应对换连接, 这是因为:

① 对换连接将改变电桥输入电阻和输出电阻, 影响电桥灵敏度。

电桥输入电阻 R_{AB} , 在平衡时, 可认为检流计支路的电阻无穷大, 即对角线开路, 因此

$$R_{AB} = \frac{(R_1 + R_2)(R_4 + R_x)}{(R_1 + R_2) + (R_4 + R_x)} \quad (1-15)$$

电桥输出电阻 R_{CD} , 在平衡时, 可认为对角线 AB 支路开路, 因此

$$R_{CD} = \frac{(R_1 + R_x)(R_2 + R_4)}{(R_1 + R_x) + (R_2 + R_4)} \quad (1-16)$$

它们互换后, 输入电阻与输出电阻也要互换。由于 R_1 、 R_2 是两个小电阻, R_x 、 R_4 是两

个大电阻,电源对角线和指示器对角线互换后,电桥的平衡状态不会改变,但电桥灵敏度却发生了变化。根据基尔霍夫法则,可推导出电桥不平衡时,指示器流过的电流为

$$I_{g_1} = \frac{E(R_2 R_x - R_1 R_4)}{R_1 R_2 (R_4 + R_x) + (R_1 + R_2) [R_4 R_x + R_g (R_4 + R_x)]} \quad (1-17)$$

如对角线互换后,电桥不平衡时,指示器流过的电流变为

$$I_{g_2} = \frac{E(R_2 R_x - R_1 R_4)}{R_1 R_x (R_2 + R_4) + (R_1 + R_2) [R_2 R_4 + R_g (R_2 + R_4)]} \quad (1-18)$$

所以

$$I_{g_1} > I_{g_2}$$

由于检流计的分辨率是一定的,实际调节过程中不可能绝对平衡,因此按后者连接灵敏度降低,误差增加。

② 电桥实际结构的限制。因为电桥为了防止操作不正确使电桥严重失衡(将导致检流计支路电流过大而烧毁),一般均附加检流计保护装置。互换后将起不到保护作用。当电桥电压一定时,一般电桥均是将两个较小的电阻接在电源对角线的一边,而两个较大的电阻接在电源对角线的另一边,这样连接灵敏度比较大。

怎样正确地选择检流计参数和确定合理的电源电压呢?一般规定由电桥的灵敏度引起的读数误差应是测量误差的 $1/3 \sim 1/5$ 以下。电桥灵敏度决定于指示器通过电流的大小,即决定于 U_{CD} 的开路电压的大小。从(1-17)式知, E 愈大,电桥灵敏度愈高。通常在各电阻元件允许功率范围内,使 E 尽可能选择大一些。关于检流计内阻的选择,主要考虑与线路阻抗匹配,即使检流计内阻接近于电桥的输出电阻,使电桥灵敏度达到最大。

电桥法测量电阻的误差由多方面因素引起的。通常,电阻采用直接法测量,即由电桥一次读数来直接得到被测电阻值。因而,造成误差的主要原因是:电桥接头的热电势和电桥泄漏电流、静电感应等寄生干扰的影响;线路灵敏度限制而引起误差;桥臂元件参数的误差。

普通电桥测量电阻值的范围有一定限制。高电阻不能采用此电桥。这是因为:

① 被测电阻增大,支撑材料电阻的分路作用影响增大,将会造成很大误差;

② 被测电阻很大,而电源电压不可能很高,因此流过电路电流减小,由于电桥灵敏度的限制,也将产生极大误差;

③ 因为流过电桥电流很小,外来干扰电势、热电势等影响显著,也带来大的测量误差。

因此,测量高电阻必须从测量仪器和测量方法上加以特殊考虑,并在测量技术上采取专门措施来解决。

低阻或极低阻也不能采用普通电桥进行测量。例如,要测量一个 0.01Ω 的电阻,将此电阻接入电桥必须有两个接线柱,利用压紧接触而接入。因此必然存在两端钮的接触电阻。一般地说,一个接触电阻大约 0.006Ω ,两个接触电阻大约为 0.012Ω ,此外还有连接导线的电阻。因此,测得结果至少是 0.022Ω ,测得数据已不可信。因此,低阻测量主要受限于接触电阻和接线电阻的影响,仅仅依赖于材料和结构上采取措施,已不可能,只有另外采取办法来加以解决。

二、低阻和超低阻的测量

低阻和超低阻测量的要害问题是如何消除或减弱接触电阻和接线电阻的影响。

1. 电流电压法测量

电流电压法用于测低阻最关键的措施是采用四端引线法。即被测电阻有一对电位端钮

aa' , 一对电流端钮 bb' , 其测量原理图如图 1-10 所示。

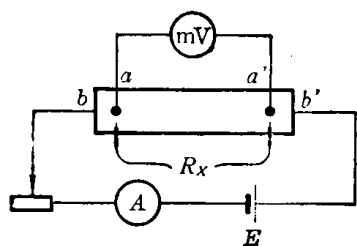


图 1-10

电流端钮是通电流用的, 电位端钮是测量电压用的。根据测得的电流、电压值可确定待测电阻值。

由于采用四端引线法, 电流端钮 bb' 的接线电阻和接触电阻不影响测量结果, 只影响回路电流。而电位端钮的接线电阻和接触电阻虽然影响测量结果, 但影响甚微。这是因为其电阻与毫伏表内阻串联, 毫伏表内阻很高, 故影响可以忽略不计, 测量结果还是比较准确的。

一般毫伏表对于通过 10 A 电流的电路内, 可以测量 10 mV 以上的电压, 所以此方法最小能测量 0.001Ω 的电阻值。

电流电压法可以用于接触电阻的低电阻值的测试。如连接元件(插头、插孔、连接器及插座)的接触电阻, 电流控制元件(如开关、继电器及断路器)的电接点所产生的电阻, 电位器元件动触点的接触电阻。在许多应用场合中, 要求接触电阻低且稳定, 使之接点上的电压降不致影响电路状况的精度。两个接触表面之间的接触电阻值受下列因素影响: 即表面材料的电阻率; 接点压力、面积、形状、表面条件(包括相对的清洁度、光滑度及硬度); 电流、断流时接点上的开路电压; 温度及导线的热导率。在测量接触电阻时, 试验夹具必须考虑上述因素的影响, 应选择测试电压不致使接触点发热或阻挡层击穿, 而且应保持样品不受振动, 不使正常接点压力受到变化。其测量原理图如图 1-11 所示。

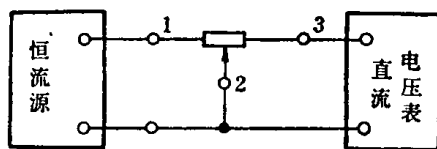


图 1-11

图中的接触电阻是电位器接触片与电阻体之间的接触电阻。因为是一恒流源, 加于电阻器 1、2 端的电流为 I_{12} , 用直流电压表测出 2、3 端的电压, 因此, 其动触点的接触电阻为

$$R_0 = \frac{U_{23}}{I_{12}} \quad (1-19)$$

也可以采用四端引线法的电桥测量, 其测量原理在电桥法中介绍。根据分别测得 R_{12} 、 R_{23} 、 R_{13} 两端的电阻值, 可按下式计算确定

$$R_0 = \frac{R_{12} + R_{23} - R_{13}}{2} \quad (1-20)$$

2. 双电桥测低阻

从上面介绍可知, 四端引线电阻结构可将引线电阻和接触电阻排除在测量结果之外, 因此将四端电阻结构引入普通四臂电桥, 从而形成双电桥, 其电桥结构原理图如图 1-12 所示。

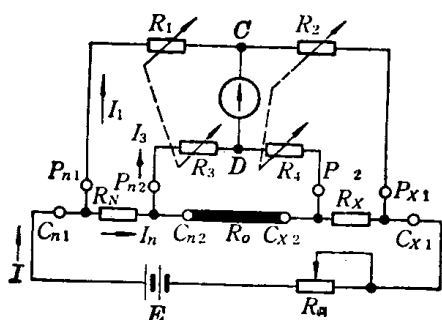


图 1-12

图中 R_2 、 R_4 为比例臂电阻箱; R_1 、 R_3 为测定臂电阻箱; R_N 为标准电阻; R_x 为被测电阻; R_0 为调节回路电流的调节电阻。G 为检流计; E 为直流电源; C_{n1} 、 C_{n2} 及 C_{x1} 、 C_{x2} 分别为标准电阻和被测电阻的电流接头。 P_{n1} 、 P_{n2} 及 P_{x1} 、 P_{x2} 为其电位接头。

双电桥能测低阻, 在电桥结构上和材料上采取了哪些措施呢?

① 双电桥的标准电阻 R_N 和被测电阻 R_x 均采用四端引线法, 即各有两对接头: 一对是

“电位接头”(如 R_N 的 P_{n1} 、 P_{n2} , R_x 的 P_{x1} 、 P_{x2}), 一对是“电流接头”(如 R_N 的 C_{n1} 、 C_{n2} , R_x 的 C_{x1} 、 C_{x2}), 而且“电流接头”在“电位接头”的外侧。也就是说, 使电位的引出线之间只包含被测电阻 R_x 。

② 连接标准电阻和被测电阻的导线采用短而宽的铜带线, 其电阻 R_0 可做到 0.001Ω 以下, 而导线两端有可以夹紧的接头, 其接触面清洁, 使之与被测电阻和标准电阻的接触电阻尽可能减小, 可作到 0.002Ω 以下, 小于测定臂电阻的 0.005% 。标准电阻 R_N 很小, 且精度很高(即万分之一精度), 采用粗锰铜线制成。

③ 电桥增加一支路 R_3 、 R_4 , 平衡指示器 G 不是接在 R_x 、 R_N 之间, 而是接在 R_3 、 R_4 的接点 D 上。

调节 R_1 、 R_3 或 R_2 、 R_4 (此采用联动调节机构, 同步调节), 使电桥平衡, 即使检流计电流 $I_0 = 0$, O 、 D 等电位。利用基尔霍夫第二定律, 可得下方程组

$$\begin{aligned} I_1 R_1 &= I_N R_N + I_3 R_3 \\ I_1 R_2 &= I_3 R_4 + I_N R_x \\ (I_N - I_3) R_0 &= I_3 (R_3 + R_4) \end{aligned}$$

解此联立方程组, 可得

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_N + \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_3 + R_4} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right) \quad (1-21)$$

在实际电桥设计、制作和调节过程中, 总是保持 $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$, 因此, 被测电阻

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_N \quad (1-22)$$

为什么采取上述三条措施后, 就能测量低电阻呢? 这是因为:

① 采用四端引线法, 被测电阻 R_x 和标准电阻 R_N 之间的接线电阻及接头 C_{n2} 、 C_{x2} 的接触电阻, 均可认为包含在 R_0 内, 只要保证 $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$, 那么不论 R_0 的数值如何, 均不影响测量结果。但是要说明的, 由于指示器灵敏度的限制, 电阻元件调整偏差的存在, 以及四端电阻的引线电阻的影响, 不可能真正做到 $\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2}$, 因而还是存在误差的, 为了减弱此影响, 希望 R_0 尽可能小, 上述第二条措施正是从这一思想出发的。

② R_x 、 R_N 与电源的接线电阻和接触电阻, 只对总的工作电流 I 有影响, 而对电桥的平衡无影响。所以, 这部分接线电阻和接触电阻对测量结果的影响也被排除掉。

③ 电位接头 P_{n1} 、 P_{n2} 、 P_{x1} 、 P_{x2} 的接触电阻和接线电阻均与各比例臂电阻串联, 分别包括在相应的桥臂支路里, 所流经 R_1 、 R_3 支路的电流均比流经 R_N 、 R_x 的电流小得多, 加之桥臂电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 都选择在 10Ω 以上, 接触电阻和接线电阻相对于桥臂电阻值是微不足道的, 所以对测量结果的影响也是极小的, 这样也减小了这部分接触电阻和接线电阻对测量结果的影响。

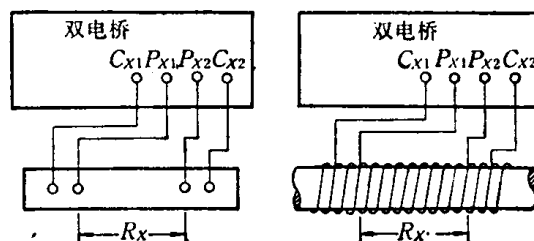


图 1-13

由上面的分析可以说明, 利用双电桥测量低电阻有较高的精确度。必须指出: 只有正确地 R_x 、 R_N 接到“电流接头”和“电位接头”上, 才能得到正确的结果。若被测电阻本身

具有电位接头和电流接头,则只要将对应点相接即可,如图 1-13 所示。

3. 三次平衡双电桥测超低阻

当测量超低阻($10^{-12} \sim 10^{-7} \Omega$)时,上述(1-21)公式

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_N + \frac{R_0 R_2}{R_0 + R_3 + R_4} \left(\frac{R_3}{R_1} - \frac{R_4}{R_2} \right)$$

的第二项影响不可忽视。为消除这一项的影响,它不是采用直接排除的方式,而是把接线电阻视为可调比例臂的一部分,通过三次平衡调节,使这种影响对电桥平衡和测量结果不起作用。

解决这问题的方法是:在普通双电桥的各连接导线 l_1 、 l_2 、 l_3 、 l_4 中串联一可调电阻 $r_1 \sim r_4$, 如图 1-14 所示。

首先,将 K_1 、 K_2 两个开关都断开,调节 R_3 或 R_4 , 使电桥平衡,则

$$\frac{R_N}{R_x} = \frac{R_3 + r_3 + R_{l_3}}{R_4 + r_4 + R_{l_4}} = \frac{R_1 + r_1 + R_{l_1}}{R_2 + r_2 + R_{l_2}} \quad (1-23)$$

其次,将开关 K_1 合上,使 R_3 、 R_4 短路,调节 r_3 、 r_4 , 使电桥平衡,则

$$\frac{R_N}{R_x} = \frac{r_3 + R_{l_3}}{r_4 + R_{l_4}} = \frac{R_1 + r_1 + R_{l_1}}{R_2 + r_2 + R_{l_2}} \quad (1-24)$$

再次,将开关 K_1 打开,把开关 K_2 闭合,使电阻 R_1 、 R_2 短路,调节 r_1 、 r_2 , 使电桥再次平衡,则

$$\frac{R_N}{R_x} = \frac{R_3 + r_3 + R_{l_3}}{R_4 + r_4 + R_{l_4}} = \frac{r_1 + R_{l_1}}{r_2 + R_{l_2}} \quad (1-25)$$

反复调节,直到三次平衡过程中电阻 $r_1 \sim r_4$ 没有改变, R_3 、 R_4 也不再调节而电桥均达平衡时为止,则

$$\begin{aligned} \frac{R_3 + r_3 + R_{l_3}}{R_4 + r_4 + R_{l_4}} &= \frac{R_1 + r_1 + R_{l_1}}{R_2 + r_2 + R_{l_2}} \\ \frac{r_3 + R_{l_3}}{r_4 + R_{l_4}} &= \frac{r_1 + R_{l_1}}{r_2 + R_{l_2}} \end{aligned}$$

所以

$$\frac{R_N}{R_x} = \frac{R_1}{R_2}$$

即

$$R_x = \frac{R_2}{R_1} R_N \quad (1-26)$$

由此可见,用三次平衡双电桥测量低电阻时,导线电阻 $R_{l_1} \sim R_{l_4}$ 没有出现在计算公式中,因此引线电阻和端钮接触电阻对测量结果不产生影响。

三、高阻和超高阻的测量

高阻和超高阻的测量实质上是微小电流的测试问题,解决了微小电流的测试技术,就可以解决绝缘介质材料的电阻率、高阻半导体元器件电阻率和精密高电阻元件的测试。高阻和超高阻测量除了阻值不十分高场合下仍可采用电桥法测量外,目前主要采用下述几种测量方法:

1. 检流计法

检流计法根据测量所依据的原理又可分为:直接偏转法、比较法和充电法。

(1) 直接偏转法

顾名思义是利用直接偏转原理来测量,即直接测试通过绝缘介质材料或电容器介质材料的电流来实现其绝缘电阻测量。其实质是依据电流电压法的测量原理。为了能测量高阻,即能测试出微小电流,必须使用高灵敏度的电流表。目前最常采用的有高灵敏度检流计(灵敏度可达 10^{-10} A/mm),它是直流磁电式表头,其结构原理如图 1-15 所示。

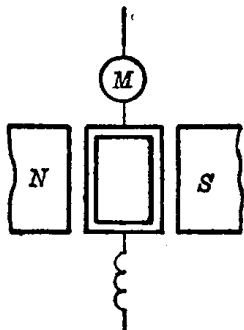


图 1-15

高灵敏检流计是用细悬丝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,悬挂在磁场中的线圈受磁场的作用而发生偏转,通过测量线圈偏转的角度(利用小镜反射光指示),即可测量电流的大小。

直接偏转法测量介质材料绝缘电阻的线路原理图如图 1-16 所示。

① 直流电源电压 U , 根据 GB1410-78 标准规定的试验电压为 100~1000 V 稳压电源,要求电压稳定,大小可调,其波动不大于 $\pm 5\%$ 。如电压波动分量较大,将会使电路中有电容电流通过检流计,导致大的测量误差。为了能改变施加于试样的电压极性,配制倒向开关 K_1 。

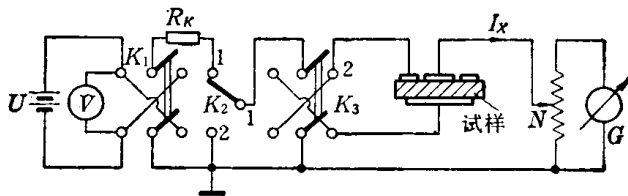


图 1-16

② $R_K \leq 10^6 \Omega$ 的保护电阻,在电路中起保护作用。当某种原因致使材料试样的绝缘电阻意外地低时,或者材料试样被击穿而造成短路时,不致有过大的电流通过检流计而烧毁。因此,可根据材料被击穿短路时,检流计允许通过的最大电流来确定保护电阻的最低值。而最大值受限于被测材料绝缘电阻的数值,它应低于被测电阻值二个数量级。这样可使 R_K 上造成的电压降忽略不计。当 R_K 采用标准电阻时,还可用来测定检流计灵敏常数 C_a 。

③ 电压表可采用静电式电压表或磁电式电压表。静电式电压表由于内阻很高,可直接跨接试样两端;磁电式电压表由于内阻较低,一般接在保护电阻 R_K 之前,加之它只能单向偏转,实际上按图 1-16 所示位置连接。为了使测量结果正确,必须使电压读数比较准确,因此可采用 0.5 级电压表。

④ 分流器 N 主要用以保护检流计和扩大电阻值测量范围。通过试样的电流 I_x 经分流器分流后,只有其中一部分电流 I_g 流过检流计。显然,分流比 n 是 I_g 与 I_x 的比值,即

$$n = \frac{I_g}{I_x}$$

测量时 n 由小到大地调节。为保证调节的精确,通常按十进制等级从 $1/10000 \sim 1/1$ 。由于分流计的总电阻跨接于检流计两端,应使总电阻与检流计的阻尼相配合,使检流计处于临界阻尼状态。通常可使分流计的总电阻等于检流计的外临界电阻,这样,检流计的偏转最快达到稳定值而又不产生振荡。

⑤ K_1 、 K_2 、 K_3 是具有优良绝缘的转换开关。

⑥ 高灵敏度的检流计 G , 为提高其灵敏度可采用光学多次反射的原理来实现。

在进行测量之前,必须先检查线路有无漏电流。此时先不放入试样,闭合开关 K_1 , 加