

高等学校教材

电气绝缘测试技术

(第2版)

西安交通大学 刘耀南 主编
邱昌容

机械工业出版社

高等学校教材

电气绝缘测试技术

(第 2 版)

西安交通大学 刘耀南 邱昌容 主编



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书在第1版的基础上,综合了国内外近10年来绝缘测试技术发展的资料,使全书内容更为充实、新颖和实用。

本书内容除介绍绝缘电阻和电阻率、介电常数和损耗角正切以及绝缘强度等基本介电参数的测量技术外,还介绍了近年来发展较快的局部放电、介电谱和空间电荷的测量技术以及绝缘寿命试验和试验数据处理。

本书着重论述各种测量原理,同时阐述各种测试设备装置和具体的测试技术,对各种影响测量结果的因素和测量误差也都进行了仔细分析,并介绍提高测量灵敏度和准确度的方法。

本书为绝缘技术专业大学本科的教材,也可作为与电气绝缘有关的专业,如高电压、无线电元件、电瓷、电机和电器以及高分子等专业的参考教材,同时还可作为从事绝缘试验研究人员和绝缘测试工作人员的参考书。

电气绝缘测试技术

(第2版)

西安交通大学 刘耀南 主编
邱昌容

责任编辑:赵爱宁 责任校对:丁丽丽

封面设计:郭景云 版式设计:霍永明

责任印制:卢子祥

机械工业出版社 (北京东长安门大街62号)

邮政编码:100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第17号)

人民交通出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1092¹/₁₆·印张16³/₄·字数412千字

1981年8月重庆第1版

1994年6月北京第2版·1994年6月北京第8次印刷

印数 20 951—24 660 定价:17.00元

ISBN 7-111-03749-9/TM·473

再 版 前 言

《电气绝缘测试技术》一书自1981年8月第1版出书迄今已有8年了，其间重印7次，共印刷出版21000余册，其中除供教学用书外，部分作为科技图书供从事绝缘测试和研究工作者使用。在这8年中，随着科学技术和生产的发展，绝缘测试技术也取得不少进展。我们在研究生培养和科学研究过程中，在绝缘测试方法与测试技术方面也做了一些工作，并开辟了一些新的测试领域。例如，在有机薄膜电性能测量方面，根据薄膜的特点，开展了薄膜的体积电阻率、介电常数和损耗角正切的测试技术的研究，并设计制造了适用于在低频下测量相对介电常数和损耗角正切的固定式不接触三电极，为制订薄膜的介电性能的测试标准奠定了基础。在局部放电测量方面，研制了多功能局部放电测试系统，可以测量多种参数和谱图，并能满足瞬时过电压、直流等特殊条件下的测试要求。在不同试验条件下，对于试品老化过程中局部放电特性的变化规律也进行了研究，并开始研究局部放电的声测法。此外，为了满足研究工作的需要，结合研究生的培养，研制了一套时域法超低频介电频谱仪，一套应用压力脉冲法测量空间电荷的装置。这两套设备已在研究电介质的结构与性能中使用，并将继续发挥其作用。

为了适应当前的需要，反映近年来测试技术的新发展，结合我们在绝缘测试中取得的成果，现将《电气绝缘测试技术》第1版作适当修改作为第2版。修改的主要部分有：

1)取消第1版中的第一章绝缘材料的电气性能和第八章的极大部分，即用统计法处理数据与试验设计。原因是电气绝缘试验方法的学时不多，教材字数受到限制。

2)将原书第三、四章，即低频下的相对介电常数与损耗角正切的测量与高频下的相对介电常数与损耗角正切的测量合并为一章，部分内容纳入新增加的“介电谱测量技术”一章，如超低频相对介电常数和介质损耗角正切的测量。

3)对局部放电一章作了较大的修改，在电测法中详细地描述了各种抗干扰的方法，并增加了声测法和光测法。

4)把热老化与电老化合并为一章“老化试验”，删掉了短时耐热性试验方法。

5)增加两章新内容，即介电谱的测量技术和总电荷量和电荷密度分布的测量。因各校电气绝缘试验方法一课的教学时数不同，这两章可以选择部分内容讲授。同时，如果对硕士研究生开设“电气绝缘测试专题”课程，则这两章也可用作该课程的参考资料。

全书内容仍为八章。第二章相对介电常数和损耗角正切的测量、第七章老化试验、第八章试验结果的整理与数据的取舍由刘耀南教授修改；第一章绝缘电阻率和微电流的测量、第三章介电强度试验、第六章局部放电的测量由邱昌容教授修改；第四章介电谱的测量技术由曹晓珑副教授执笔；第五章总电荷量和电荷密度分布的测量由张冶文博士执笔。全书由刘耀南、邱昌容统稿，由上海交通大学李静一教授主审。

由于时间紧迫，此次修订难免有不当之处，希望广大读者指正。

作 者

1990年10月

目 录

再版前言

绪 论 1

第一章 电阻率与微电流的测量 3

§1-1 绝缘电阻与电阻率 3

§1-2 试样与电极 5

§1-3 直接法测量绝缘电阻 11

§1-4 比较法测量绝缘电阻 15

§1-5 充放电法测量绝缘电阻 16

§1-6 测量误差来源及消除方法 18

§1-7 泄漏电流的测量 21

第二章 工频、音频和高频下相对介电常数与损耗角正切的测量

..... 23

§2-1 基本概念 23

§2-2 试样与电极 26

§2-3 测量方法概述 35

§2-4 工频下相对介电常数和损耗角正切的测量 38

§2-5 音频下相对介电常数和损耗角正切的测量 51

§2-6 高频下相对介电常数和损耗角正切的测量 55

§2-7 测量方法的选择 60

§2-8 测量技术 63

第三章 介电强度试验 72

§3-1 概述 72

§3-2 试样与电极 74

§3-3 工频电压下的介电强度试验 76

§3-4 直流电压下的介电强度试验 85

§3-5 冲击电压下的介电强度试验 89

§3-6 叠加电压下的介电强度试验 101

§3-7 高电压试验室 102

第四章 介电谱测量技术 105

§4-1 自动平衡电桥和直接记录式介电谱仪 105

§4-2 不平衡电桥法 110

§4-3 直流法 113

§4-4 电荷法 119

§4-5 伪随机噪声法 125

§4-6 热刺激去极化电流的测量技术 129

第五章 总电荷量和电荷密度分布的测量 137

§5-1 基本概念 137

§5-2 总电荷量的测量 137

§5-3 表面电荷的测量方法 138

§5-4 空间电荷分布的测量方法 143

第六章 局部放电的测量 161

§6-1 基本概念 161

§6-2 局部放电的表征参数及其影响因素 169

§6-3 电测量法 173

§6-4 非电测量法 189

§6-5 定位及抗干扰技术 202

第七章 老化试验 210

§7-1 热老化试验 210

§7-2 电老化试验 228

第八章 试验数据的处理 241

§8-1 测量误差 241

§8-2 数据的整理与取舍 241

§8-3 间接测量的误差分析 245

§8-4 最小二乘法配线 249

附录 A ZC-36 型高阻计的测量原理 251

附录 B 两电极边缘电容的校正 252

附录 C 各类材料用的特殊电极 253

附录 D 球隙放电电压 254

附录 E 统计参数表 256

附录 F 对试样进行处理的条件 261

参考文献 263

绪 论

迄今电介质理论尚不完善，绝缘材料的性能与结构的关系仍处于研究阶段，因此必须依靠试验来了解绝缘材料的性能。工程绝缘材料往往含有杂质，而杂质对绝缘材料的电性能有极大影响，因此必须通过电性能测量来控制材料的质量。绝缘的电性能测量是相当复杂的，被测参数有的高到难于测准，有的则小到检测不出来。例如，高压绝缘的绝缘强度试验需要测量几十万到几百万 V 的高电压；又如绝缘电阻的测量，实际上是微电流的测量，被测电流可以小到 10^{-10} A；聚苯乙烯、聚四氟乙烯等低损耗介质的损耗角正切约为 $1 \times 10^{-4} \sim 2 \times 10^{-4}$ ，所以，必须研究测量方法和测量技术才能获得准确的测量结果。此外，外界条件，例如温度、湿度、电压、频率等因素对绝缘材料的电性能有极大影响，故进行电性测试时应选定或规定试样的处理条件和试验条件。为此，国际电工委员会以及美、英、德、日、法、前苏联等国都制订绝缘材料试验方法标准，我国也已制订固体电工绝缘材料电性能试验方法国家标准和部分绝缘材料试验方法标准。除了测定绝缘材料的短时性能外，考核绝缘材料绝缘系统长期运行的可靠性也十分重要。因为电气设备的使用寿命一般是由绝缘的耐久性决定的，所以研究并制订绝缘材料的老化试验方法，包括热老化和电老化，是一项极为重要的工作。

本书内容主要是绝缘材料的电性测量和老化试验，也包括部分绝缘系统的测试。其主要内容包括下列几方面：

1) 电介质的四个参数，即电导率、相对介电常数、介质损耗角正切以及击穿强度的基本概念，它们在温度、湿度、场强和频率等外界因素影响下的变化规律。

2) 绝缘材料的电性能，即四个参数的测量方法和测量技术。绝缘电阻的测量，除了叙述直接法和比较法两类测量方法外，还分析影响绝缘电阻测量的因素，如漏电、外加电压和残余电荷等，并提出消除的措施。相对介电常数和介质损耗角正切测量分低频测量和高频测量两章。前者主要叙述工频下相对介电常数和介质损耗角正切的测量方法，包括各种高压西林电桥和流比器型高压电容电桥，并作了测量灵敏度和误差分析；阐述了工频损耗测试技术，包括平衡技术、故障排除、负误差来源和电桥校正等；最后叙述三种超低频下相对介电常数和介质损耗角正切的测量方法。后一章包括两种测量方法：电桥法和谐振法。电桥法有低压西林电桥和低压变压器比例臂电桥；谐振法主要描述变 Q 值法和变电纳法和高频测量技术；此外，介绍了不接触电极测量技术以及介电特性测量新技术——时间域测量。绝缘强度试验包括工频、直流、脉冲击穿和耐压试验。除了高压设备和试验方法，书中还对高压测量技术作了较详细的描述。

3) 局部放电的测量，介绍各种测量方法的基本原理，分析它们的测量灵敏度和分辨能力，并阐述防止干扰、定位以及各种试品的测量等技术。

4) 老化试验，除了叙述常规或惯用老化试验应遵循的原则外，在热老化试验方面，介绍几种把分析技术和常规热老化试验方法相结合的快速评定法；在电老化方面介绍了两种新方法：绝缘强度法和等效老化法。

5) 试验的统计分析和设计, 着重于数理统计在绝缘测试中的应用。其中, 统计推断结合试验结果的分析, 方差分析、回归分析以及相关分析结合热老化试验结果的处理, 惠勃尔分布结合击穿试验和电老化试验的数据处理, 最后阐述了试验设计的原则、方法和程序。

本书内容主要取材于国内外书刊有关资料及国内科学研究的成果和试验工作积累的经验。几年来, 我们作过一些绝缘测试仪器、测试方法和测试技术的研究, 试制过多种形式的局部放电测试仪, 研究过残余电荷对绝缘电阻测量的影响, 分析了工频损耗中出现负值的原因, 并做过高压西林电桥和 Q 表的校正工作等, 所有这些工作都使我们在测试技术上有所提高。但是我们现有的测试设备、测试方法和测试技术与科学技术的发展还不相适应。随着电子技术的飞速发展和计算机的广泛应用, 绝缘测量技术正在发生巨大变化, 全自动高压电容和介质损耗角正切测量电桥和数字式高阻计在国外都已试制成功, 并在实际中使用。计算机已用于测量电介质的介电谱和绝缘中的局部放电。这就要求我们不仅要掌握已有的测试技术, 而且必须研究新设备、新方法和新技术。展望未来, 有许多工作等待我们去做, 让我们携起手来, 共同努力, 为发展绝缘测试新技术作出贡献。

第一章 电阻率与微电流的测量

§1-1 绝缘电阻与电阻率

一、定义

在电工设备中和电力传输线上，要把不同电位的导体隔离开，就要靠绝缘体。绝缘体的基本功能，就是阻止电流流通，使得电能按设计的途径传输，保证设备能正常工作。但绝缘体也不是绝对不导电的，只是通过它的泄漏电流很小而已。绝缘电阻就是表征绝缘体阻止电流流通的能力。绝缘电阻太低，泄漏电流很大，不但造成电能的浪费，而且还会引起发热而损坏绝缘体。因此绝缘电阻是表征绝缘特性的基本参数之一，必须经常测定。

一个绝缘体在施加直流电压之后，通过的电流是随着时间由大到小地变化，如图 1-1 所示。这是由于在开始时含有的电流成分很多，除了泄漏电流之外，还有充电电流、极化电流以及净化电流等等，这些电流都是随时间而减小的，最后达到一个稳定的电流，这个稳定的电流，才是表征电介质本征电导的泄漏电流。

绝缘电阻是施加于绝缘体上两个导体之间的直流电压与流过绝缘体的泄漏电流之比，即

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

式中 R ——绝缘电阻 (Ω) ;
 U ——直流电压 (V) ;
 I ——泄漏电流 (A) 。

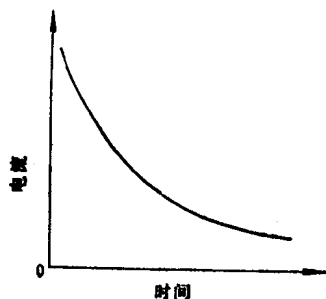
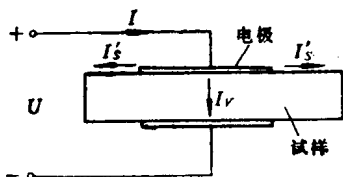


图1-1 在直流电压下电流的变化曲线

一个绝缘体的绝缘电阻由两部分组成，即体积电阻与表面电阻。体积电阻 R_v 是施加的直流电压 U 与通过绝缘体内部的电流 I_v 之比；表面电阻 R_s 是施加的直流电压 U 与通过绝缘体表面电流 I_s 之比，即



$$R_v = \frac{U}{I_v}$$

$$R_s = \frac{U}{I_s}$$

绝缘电阻是体积电阻与表面电阻并联组成的，见图1-2。

图1-2 体积电流 I_v 与表面电流 I_s 的途径 即

$$R = \frac{R_v R_s}{R_v + R_s} \quad (1-2)$$

绝缘体的体积电阻与导体间绝缘体的厚度成正比，与导体和绝缘体接触的面积成反比。以图1-2所示的平板形绝缘体为例，假定导体（或电极）也是平板形，导体间绝缘体内电场是均匀的，则

$$R_v = \rho_v \frac{h}{A} = \frac{U}{I_v}$$

$$\rho_v = \frac{U/h}{I_v/A} = \frac{E_v}{J_v} \quad (1-3)$$

式中 h ——绝缘体的厚度 (m) ;
 A ——电极的面积 (m²) ;
 E_v ——绝缘体内的电场强度 (V/m) ;
 J_v ——绝缘体内的电流密度 (A/m²) ;
 ρ_v ——体积电阻率 ($\Omega \cdot m$) 。

体积电阻率是绝缘体内的直流电场强度与体积内部泄漏电流密度之比。实际上它等于单位立方体的绝缘电阻值。

表面电阻与绝缘体表面上放置的导体的长度成反比, 与导体间绝缘体表面上的距离成正比, 以图1-3所示的简单的平板形绝缘体为例

$$R_s = \rho_s \frac{d}{l} = \frac{U}{I_s}$$

$$\rho_s = \frac{U/d}{I_s/l} = \frac{E_s}{a} \quad (1-4)$$

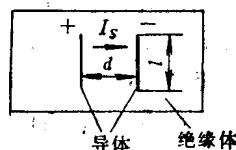


图1-3 计算表面电阻率的示意图

式中 d ——导体间的距离 (m) ;
 l ——导体的长度 (m) ;
 E_s ——表面电场强度 (V/m) ;
 a ——电流线密度 (A/m) ;
 ρ_s ——表面电阻率 (Ω) 。

表面电阻率是绝缘体表面层的直流电场强度与通过表面层的电流线密度之比。实际上它等于正方形面积内的表面电阻值。

由此可见, 绝缘电阻不仅与绝缘材料的性能有关, 而且还决定于绝缘系统的形状和尺寸; 而电阻率则完全决定于绝缘材料的性能。由于表面电阻率对外界的影响很敏感, 所以绝缘材料的电阻率一般指的是体积电阻率。电导率为电阻率的倒数, 单位为 S/m (S——西门子)。

二、影响绝缘电阻的诸因素

为了理解试验标准中有关规定的必要性, 分析测量结果的合理性和准确性, 必须了解试验条件和环境条件对试样的电阻的影响, 这些影响因素主要有:

(1) 温度 在绝缘材料中, 导电的载流子主要是靠离子迁移, 温度升高时离子容易摆脱周围分子的束缚而产生位移, 从而使体积电阻率呈指数式下降

$$\rho_v = \frac{6KT}{nfq^2a^2} e^{\frac{A}{KT}} \quad (1-5)$$

式中 n ——离子浓度 (离子数/m³) ;
 f ——离子振动频率 (Hz) ;
 q ——离子所带电荷量 (C) ;

α ——离子每次迁移的距离 (m) ;

A ——离子迁移活化能 (J) ;

T ——绝对温度 (K) ;

K ——波耳兹曼常数 (J/K) 。

(2)湿度 水的电导比绝缘材料的电导大得多,特别是水中含有杂质时。同时水的介电常数大,它能降低离子的电离能,因此绝缘材料在吸湿后,电阻率要明显下降。电气设备在潮湿的环境中停放后,在重新投入运行之前,必须先测其电阻,若下降很多,就要烘干后再投入运行。

(3)电场强度 在电场强度不高时,电阻率几乎与电场强度无关。但当电场强度很高时,电子电导起明显作用,这时电导随电场强度增高而明显增加。如电场强度 E 所增加的位能 $\frac{1}{2} a q E$ 大于 $K T$ 时,绝缘材料的电导 G 将随 E^2 而增大

$$G = \frac{n f q^2 \alpha^2}{6 K T} e^{-\frac{A}{K T}} \left(1 + \frac{\alpha^2 q^2 E^2}{24 K^2 T^2} \right) \quad (1-6)$$

式(1-6)中物理量与式(1-5)同。

另外,当电压升高时,绝缘体中的某些缺陷,如含有裂纹或气泡,则可能产生放电,这时绝缘电阻也会有所下降。

(4)辐照的影响 许多有机材料在强光或 X 射线、 γ 射线等辐照下,会产生各种光电流,而使绝缘电阻率明显下降,如聚乙烯在 $8 \text{ R}^\ominus/\text{min}$ 辐射剂量的照射下,温度在 20°C 时,电阻率会下降 3 ~ 4 个数量级。在辐射停止后相当长的时间内,这种效应仍然存在。

为了消除由于试样在试验之前所经历的环境条件不同而造成的试验结果的偏差,试样在试验之前要做预处理,即将试样置于规定的大气条件下处理一定时间。现行标准中推荐采用在温度为 $23 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $50\% \pm 5\%$ 条件下处理 24h。

若要测定试样在某一特定条件下的性能,在预处理之后,还要进行条件处理。预处理和条件处理采用的温度、湿度以及温度和湿度建立的方法,都可参考附录 F。

§1-2 试样与电极

测量电气设备的绝缘电阻,只要把直流电压施加在导体的端头,就可进行测量;而测量绝缘材料的体积电阻率和表面电阻率,则必须制作适当的试样,并选取适当的电极系统和电极材料。

一、试样

根据使用的要求,绝缘材料要制成各种不同的形状与尺寸,如板状、薄膜、带状、管状、棒状等等,在测量材料的体积和表面电阻率时,试样的形状决定于材料的形状。试样的厚度,一般也决定于材料的厚度。但在测量表面电阻率时,规定试样的厚度不超过 4mm,有时试样太厚会使电阻值超过测量仪器的量程,因此对太厚的材料,可以单面切削成较薄的试样,此时测量表面电阻率应在未加工的材料原表面上进行。试样的大小应比电极的最大尺寸

\ominus 仑琴 R 是照射量的专用单位, $1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{ C/kg}$ 。

至少每边要大7mm,同时也要尽量节省材料。目前我国国家标准 GB1410—78规定,方形板材采用边长为50或100mm,圆形板材采用直径为50或100mm,管状试样长度为50或100mm。

试样要经过预处理或条件处理,并置放于规定的环境条件中进行测量。试样表面应无外来的污染,没有损伤,并要清除试样上的残余电荷。后者对于测量薄膜材料特别重要。用酒精清洗试样,或将试样置放在湿度很大的环境中片刻,可将试样表面上的电荷基本清除。

二、电极系统

电极系统分为两电极和三电极两种。

三电极系统可以将体积电流和表面电流分开,以便分别测量体积电阻率和表面电阻率。同时用三电极系统测量体积电阻率时,可以使测量电极下的电场比较均匀,从而可以用等效面积来计算体积电阻率。

平板型试样的三电极系统如图1-4所示。在测量体积电阻率时,电极1为被保护电极(或称测量电极),电极2为保护电极,电极3为不保护电极(或称高压电极)。在测量表面电阻率时,电极2为不保护电极、电极3为保护电极。

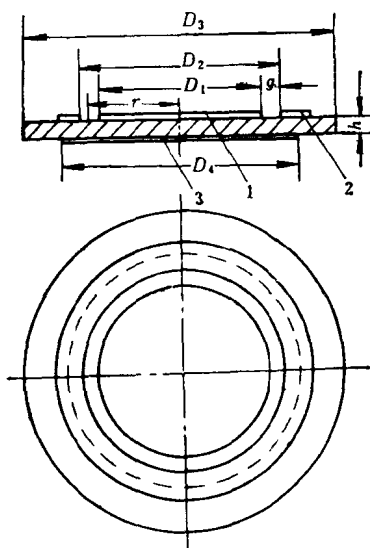


图1-4 平板试样三电极系统

1—被保护电极 2—保护电极 3—不保护电极

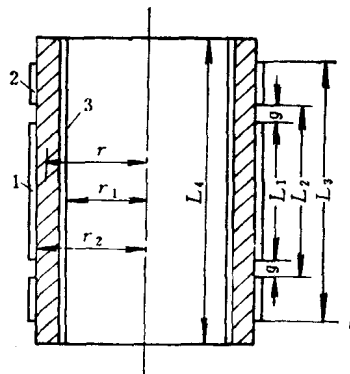


图1-5 管状试样三电极系统

1—被保护电极 2—保护电极 3—不保护电极

管状试样的三电极系统装置见图1-5,各电极的作用与平板型相同。

我国 GB1410—78标准规定的各电极的尺寸列于表1-1。

表1-1 电极尺寸

平 板 (mm)			管 (mm)		
D_1	50 ± 0.1	25 ± 0.1	L_1	50	25
D_2	54 ± 0.1	29 ± 0.1	L_2	54	29
D_3	74	39	L_3	74	39
D_c	≥ 74	≥ 39	L_c	≥ 74	≥ 39

注:表中符号见图1-4或图1-5。

IEC 规定, 电极 1 的直径或长度至少应比试样的厚度大 10 倍, 实际采用的一般均不小于 25mm; 电极 3 的直径或长度及电极 2 的外径应大于电极 2 的内径再加上试样厚度的 2 倍。在测量表面电阻率时, 还规定电极 1 与 2 之间的宽度 g 至少应为试样厚度的 2 倍, 实际采用的 g 不小于 1mm。

电极尺寸的规定和选择, 除了考虑使测得的结果有代表性并能满足测量设备灵敏度的要求之外, 在测体积电阻率时, 要使测量电极下的电场尽可能地均匀, 减小电极边缘效应, 从而近似按均匀电场来计算电阻率。在测量表面电阻时, 间隙 g 不能太小, 这一方面是为了使沿电极周长间隙 g 的相对误差不致太大; 另一方面也是为了尽量减少体积电流的影响, 这种影响可用下式表示

$$\frac{I'_V}{I_S} = \frac{\rho_s}{\rho_V} h f\left(-\frac{g}{h}\right) \quad (1-7)$$

式中 I'_V 、 I_S ——分别为体积电流和表面电流;
 ρ_V 、 ρ_s ——分别为体积电阻率和表面电阻率;
 g 、 h ——见图 1-4、1-5。

从图 1-6a $f\left(-\frac{g}{h}\right)$ 曲线中可以看出, 在两电极系统中, 随着 $-\frac{g}{h}$ 的增大, I_S 、 I'_V 都减小, 而且 I_S 比 I'_V 减小得更多, 因此 $f\left(-\frac{g}{h}\right)$ 是上升的。但当电极为三电极系统时, g/h 增大引起更多的体积电流流向保护电极, 如图 1-6b 所示, 流到测量电极的 I'_V 比 I_S 减小更多, 因此 $f(g/h)$ 是下降的。

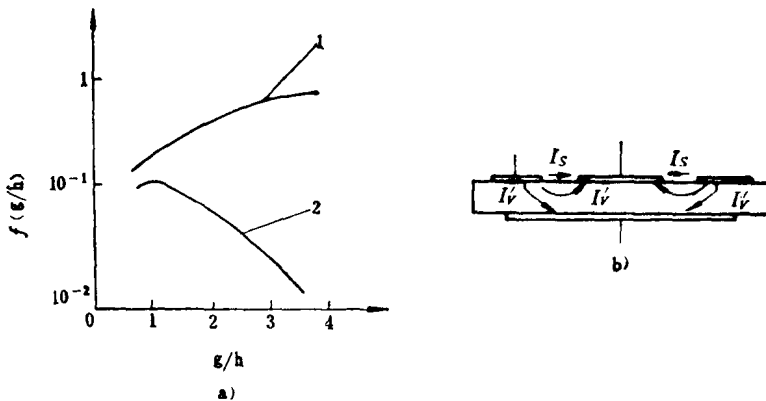


图 1-6 测量 ρ_s 时 I_V 的影响
 a) $f(g/h)$ 曲线 b) I_S 与 I_V 的分布
 1—二电极 2—三电极

根据上述分析, 在测量表面电阻率时, 为了减少体积电流的影响, 应采用三电极系统, 而且 g/h 应满足 $g/h \geq 2$ 。

二电极系统 (即不用保护电极) 一般只适用于某些特殊情况, 例如当试样很薄时, $I_V \gg I_S$, 测量 ρ_V 就可以用二电极系统。但要注意用二电极系统测 ρ_s 时, g 不能太大, 否则会增大体积电流的影响, 见图 1-6。

对于某些特定材料，也可以使用专门电极来测定其绝缘电阻。例如层压制品，为了综合测定其表面、体积以及沿层的电阻，可采用图1-7所示的锥形电极。又如薄膜带状材料，可采用图1-8所示的条形电极。图1-9是用于测量表面电阻率的同轴型电极：高压电极1是金属管，接直流高压；测量电极2是金属圆柱体，接测量仪器；接地电极3对1、2电极间都用绝缘电阻比较高的绝缘材料4隔离。试样夹在两个同轴电极之间，只要试样不是很厚，则试样 \$S\$ 承受的基本上是径向电场，因此测得的基本上是表面电流，通过体积的电流影响很小。显然，这些特殊的电极系统所测得的绝缘电阻，只能在用同一电极系统时进行比较，不同电极系统测得的结果是不能相比的。

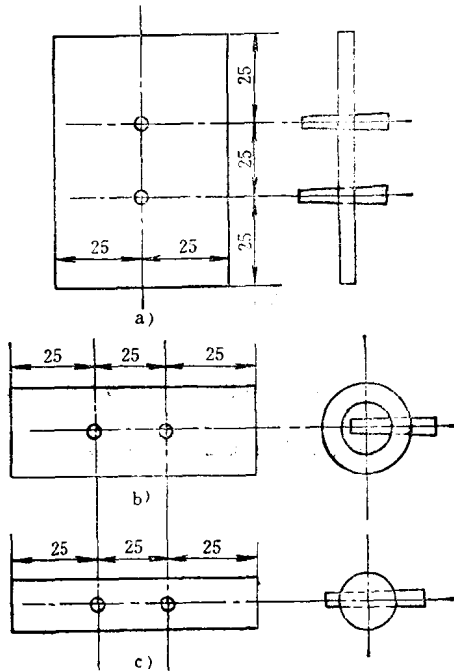


图1-7 锥形电极
a) 板状材料 b) 管状材料 c) 棒状材料

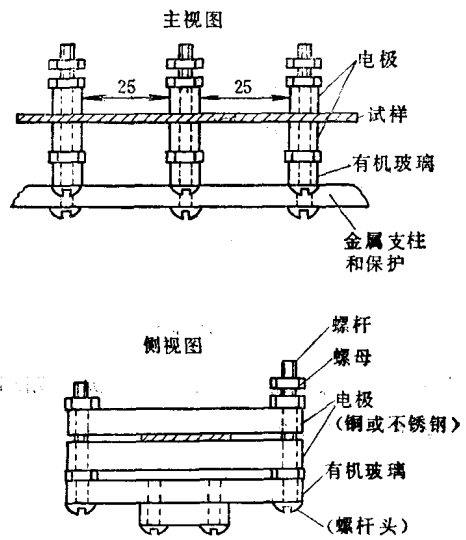


图1-8 条形电极

应用三电极系统时，体积电阻率和表面电阻率可以按下列公式进行计算。对于平板型试样

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} = \frac{U}{I_v} \frac{\pi(D_1 + g)^2}{4h} \quad (1-8)$$

$$\rho_s = \frac{E_s}{a} = \frac{U}{r \ln \frac{D_2}{D_1}} \frac{2\pi r}{I_s} = \frac{U}{I_s} \frac{2\pi}{\ln \frac{D_2}{D_1}} \quad (1-9)$$

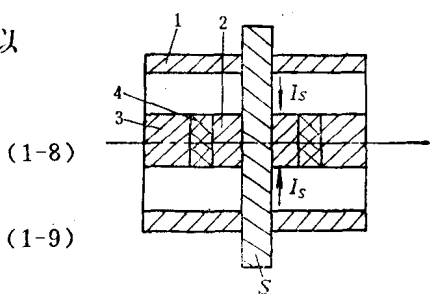


图1-9 测量表面电阻率的电极
1—高压电极 2—测量电极 3—接地电极
4—绝缘材料 S—试样

式中符号见图1-4。
对于管状试样

$$\rho_v = \frac{E_v}{J_v} = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}} \frac{2\pi r(L_1 + g)}{I_v} = \frac{U}{I_v} \frac{2\pi(L_1 + g)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad (1-10)$$

$$\rho_s = \frac{E_s}{J_s} = \frac{U}{g} \frac{2\pi r_2}{I_s} = \frac{U}{I_s} \frac{2\pi r_2}{g} \quad (1-11)$$

式中符号见图1-5。

从上述计算式中可以看出，测量电阻率时，直接测量的量是电压、电流以及电极与试样的一些几何尺寸。由于绝缘电阻很高，所以准确地测量微小的直流电流是测量技术上要解决的主要问题。

式(1-8)和(1-10)都是用有效直径($D_1 + g$)和有效长度($L_1 + g$)来计算测量电极的面积，这是由于在三电极系统中，测量电极边缘的电力线仍然向外弯曲，这相当于电极的有效面积增大。在应用标准电极尺寸时，这样算得的电阻率，应用在工程上已足够准确。但如果间隙 g 比试样厚度 h 大得多时，对于各向同性且均匀的板材，等效直径应按下式计算更为准确

$$D = D_1 + g - 2\delta = D_1 + g \left(1 - \frac{2\delta}{g} \right) = D_1 + Bg \quad (1-12)$$

$$\text{式中 } \delta = h \left[\frac{2}{\pi} \operatorname{arccos} h \left(\frac{\pi}{4} - \frac{g}{h} \right) \right];$$

D_1 、 g 、 h ——见图1-4；

$$B = 1 - \frac{2\delta}{g}。$$

其中， B 称为间隙宽度系数，不同间隙厚度比的 B 值见表1-2。

表1-2 不同间隙厚度比的 B 值

$\frac{g}{h}$	0.1	0.5	0.8	1.0	1.2	1.5	2.0	2.5	3.0
B	0.96	0.81	0.71	0.64	0.59	0.51	0.41	0.34	0.29

同样，对于各向同性且均匀的管状试样的等效长度，可按下列下式计算

$$L = L_1 + g - 2\delta = L_1 + Bg \quad (1-13)$$

式中 L_1 、 g ——见图1-5；

B ——间隙宽度系数。

三、电极材料与装置

电极材料与装置必须满足以下要求：首先，电极本身是良好的导体，而且能够和试样紧密接触；其次，电极与试样不能有相互作用，电极应能耐腐蚀，在试验过程特别是在高温下，不能因有电极存在而引起试样的性能发生变化；此外，还要求电极制做方便、使用安全。

由于各种绝缘材料的特性不同，而且试验条件也有很大差别，因此推荐作为电极的材料很多，其中主要有以下几种。

(1) 银漆和银膏 高导电的银漆在大气中干燥或在低温下烘干，银膏在高温下还原，都能在试样表面形成电极。这种电极由不连续的银粒沉积在试样表面形成，它能让试样内部的潮气扩散出去，因此试样可先做好电极，而后再进行预处理。这种电极特别适用于研究不同温度下电阻率随温度变化的规律。使用这种电极时，必须注意银漆的溶剂对试样的性能有无

影响。制做这种电极的方法是，先用圆规沾上银漆，画好各电极的外缘，然后再用毛笔将整个电极涂满。或者将不应涂电极的试样表面用面板覆盖，再涂上银漆或银膏。

(2) 喷涂或真空蒸发金属电极 采用能很好粘附于试样表面的低熔点金属材料，如锡、铝或其他合金等，直接喷涂在按电极模型覆盖好的试样上，或把上述试样放在真空蒸发器内，让气化的金属沉积在试样表面上。这种电极与导电银漆电极有相同的特点，但要注意离子轰击或真空处理对材料的影响。

(3) 金属箔电极 用柔软的金属箔如铝箔、锡箔等，涂以微量的粘合剂粘贴在试样表面。用干净的绢绸抹平以便把金属箔下的空气赶走，并将多余的粘合剂挤出去。粘合剂一般采用凡士林或硅脂，其厚度应小于 $2.5\mu\text{m}$ ，特别在测量薄膜材料和电阻值不大的材料时，这层粘合剂越厚，测得电阻值的正误差就越大。

采用这种电极时，试样体积内的潮气不能通过电极逸出，因此试样必须先经过预处理而后贴电极。另外在测表面电阻率时，要特别小心，不要把粘合剂涂到被保护极和保护极之间的间隙上，以免改变了试样表面的状态。在高温下测量时，还应注意粘合剂流动造成的电极移动，或粘合剂渗入试样而改变试样的性能。

(4) 导电橡皮电极 将电阻率不大于 $3 \times 10^4 \Omega \cdot \text{m}$ ，邵氏硬度不大于60的导电橡皮，剪切成规定的电极，并在电极上施加一定的压力，一般采用 $9.8 \times 10^3 \text{N/m}^2$ ，使电极与试样表面接触良好。这种电极使用方便，但导电性能差一些。

(5) 胶体石墨电极 与制做银漆的方法相同，将胶体石墨涂刷到试品的表面，干燥后形成一层石墨电极，这是片状石墨堆积形成的，因此必须有一定的厚度，才能保证整个电极面积是连续的导电层。石墨电极比较便宜，但导电性能不如银漆，而且当受潮或浸在变压器油中试验时，石墨容易脱落。

(6) 导电液体电极 水银电极是导电液体电极的一种，如图1-10所示，将试样放在水银面上，并用几个按电极尺寸做成的不锈钢环放在试样上面，再将水银注入环内形成保护电极和被保护电极。这种电极与试样接触很好，但倾注水银时，应注意避免气泡或表面氧化层夹在试样与水银之间。水银对人体是有害的，因此不能长时间连续使用，特别不能在高温下使用。

测量电线的绝缘电阻时，可用水为电极。把电线浸于水中，两端离开水面一定高度，线芯导体与水组成一对电极，这样就可以很方便地测得整卷电线的电阻。

以上各种电极材料与装置，都是用于固体材料的；对于液体材料用的电极应满足以下要求：除了导电性能好、电极与试样不会有相互作用之外，还要求便于拆洗，电极容积一般不小于 40mL ，承受的试验电压不低于 2kV 。

目前采用的液体电极有平板型和圆锥形两种基本结构，如图1-11a和b所示。平板型便于拆洗安装，但测量电极下的气泡往往不易逸出而造成测量误差；圆锥型电极克服了平板型的缺点，但结构比较复杂，而且热惯性大，要在较长时间内试样的温度才能达到平衡。绝缘支架一般都装在电极的上部，使之不浸入被测液体之中，以免与被测液体相互作用，同时也避免通过绝缘支架的电流影响测量结果。安装电极时，要十分注意电极间隙的均匀性，电极

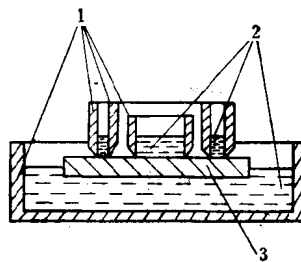


图1-10 水银电极。

1—不锈钢环 2—水银 3—试样

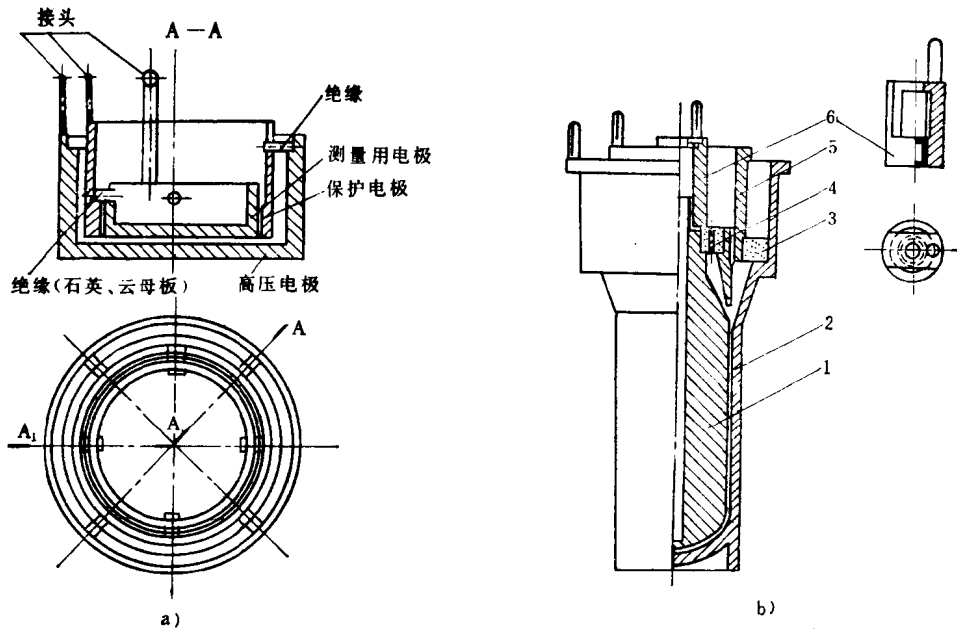


图1-11 液体电极

a)平板型 b)圆锥型

1—内电极 2—外电极 3、4—石英 5—保护环 6—提升柄

间的间隙大小难以测定，计算体积电阻率时可用电极系数 k

$$k = 0.036\pi C = 0.113C$$

$$\rho_v = kR_v$$

(1-14)

式中 C ——空电极电容量(pF)；

R_v ——体积电阻(Ω)；

ρ_v ——体积电阻率($\Omega \cdot m$)。

杂质对液体的电阻率是非常敏感的，在测量前电极应仔细拆洗。先用清洗溶液清洗两次以上，再用磷酸钠盐蒸馏水溶液煮沸，而后再用蒸馏水漂洗煮沸，最后放在恒温箱内，在 $105 \sim 110^\circ\text{C}$ 温度下烘 $60 \sim 90\text{min}$ 。在取样时还应特别注意避免各种杂质如水分、灰尘等混入。为了避免潮气凝结到试样中，在注入试样时，电极的温度要比试样的温度高，试样的温度又应比周围空气的温度高。

试样注入电极 10min 后，就可以进行测量，测量第一试样后，换一个试样再测一次，如果二次测量之差大于两个测量值中较大一个的 35% ，则应取更多的试样进行测量，直到相邻两次测量值之差不超过 35% 为止。若多次测量都达不到要求，则应重新清洗电极。

§1-3 直接法测量绝缘电阻

直接测量法即直接测量施加于试样的直流电压 U 和流过试样的电流 I ，通过欧姆定律计算出电阻 $R = U/I$ 。或者使流过试样的电流通过一个已知的标准电阻 R_s ，测量 R_s 两端的电压而求得通过的电流 I 。根据采用的测量仪器类型，可分为以下几种。

一、欧姆表

旧式欧姆表是由一个手摇直流发电机和一个流比式电流表组成。发电机的电压基本上稳定的。流比式电流计的指针偏转读数 α 是与流过表内两个线圈的电流成比例的，外加电压变化对于 α 没有影响。试样串联在电流表的一个支路内，见图1-12。电流表的读数为

$$\alpha = F \left(\frac{I_1}{I_2} \right) = F \left(\frac{R_2 + R_x}{R_1} \right) \quad (1-15)$$

式中符号见图1-12。 R_1 、 R_2 都是固定的，因此可以把 α 读数直接分度为试样的电阻 R_x 值。

新型欧姆表已不用手摇发电机，而是用高频升压后再整流，以获得直流高压，这比用手摇发电机更为轻便。

用欧姆表测量绝缘电阻是最方便的方法，仪器简单、便于携带、读数稳定，常用于检测电工产品的绝缘电阻。特别是在户外现场使用。

但它的灵敏度不高，只能测到100M Ω ，电压等级有500V、1000V、2500V三种。在使用中要选择适当的电压，电压太低可能暴露不出绝缘的弱点，太高可能发生绝缘击穿。用不同电压测得的绝缘电阻，有时是不可比的。

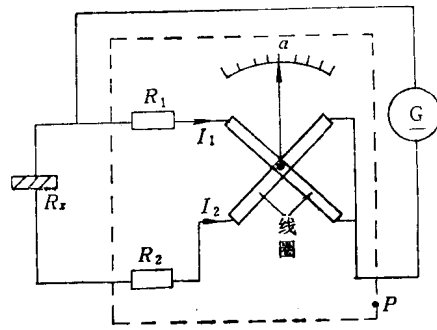


图1-12 欧姆表电路

G—手摇发电机 P—流比式电流计 R_x —试样电阻

二、检流计

检流计是一种灵敏度很高的直流电流表，目前国产的 AC15-1型复射光标式检流计，可检测最小电流为 10^{-10} A/mm。如果试样施加电压为1000V，光标偏转为10mm，则测得电阻可达 10^{12} Ω 。

图1-13是用检流计测量绝缘电阻的线路图。图中直流电源提供施加于试样的直流电压，通常用整流稳压电源，要求电压稳定，电压脉动系数不超过5%，电压大小可调，一般调节范围为100~1000V，提高电压可以增大电阻的量程，但电压太高电阻值会下降，甚至会发生击穿。在做对比试验时，电压最好维持不变。为了能改变施加于试样的电压极性，采用换向开关 S_1 ，这时要求电源的输出端都不接地。测量施加于试样的电压，最好用静电电压表直接接在试样两端测量，这时要求静电电压表的电阻要比试样的电阻最少高100倍；如果采用磁电式电压表测量直流电源的输出电压，则要求试样的电阻要比保护电阻 R 大100倍以上，这样才能保证测量的电压与试样两端电压的差别不超过1%。

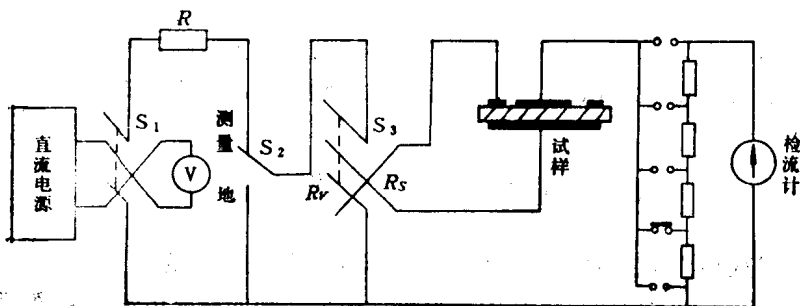


图1-13 用检流计测量绝缘电阻的线路图