

高压兆欧表

刘志万 郭守贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

高压兆欧表

刘志万 郭守贤 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书以高压兆欧表的原理、组成、性能、分类和使用为中心议题,扼要介绍了电力设备绝缘介质的基本特性,建立了绝缘电阻试验数学模型,全面阐述了高压兆欧表的主要技术指标、发展现状,组构原则和制式,现场干扰的机理和提高仪表抗干扰能力的方法,电力设备绝缘特征参数的测算方法及其应用前景,兆欧表品质的总体评价和选购原则,以及与现场绝缘电阻试验有关的技术操作要点等。

本书论点新颖,概念清晰,内容翔实,分析缜密,详略得体,指导明确。本书对规范绝缘电阻试验方法、评价兆欧表的品质有指导意义,对制订相关技术标准和规程有重要参考价值。

本书可供从事高压绝缘试验的工程技术人员阅读,也可供高压兆欧表研制设计者和大专院校有关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压兆欧表/刘志万,郭守贤著. —北京:中国水利水电出版社,2002
ISBN 7-5084-1031-9

I. 高… I. ①刘…②郭… III. 高电压-兆欧表-基本知识
IV. TM934.17

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第023728号

书 名	高压兆欧表
作 者	刘志万 郭守贤 著
出版、发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sale@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (发行部)
经 售	全国各地新华书店
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京密云红光印刷厂
规 格	787×1092 毫米 16 开本 9 印张 213 千字
版 次	2002 年 6 月第一版 2002 年 6 月北京第一次印刷
印 数	0001—4100 册
定 价	28.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着现代化技术的不断更新和拓展,对电力系统及其高电压设备的可靠性也提出更高的要求。电气设备出现事故或损坏,通常与其绝缘的缺陷密切相关。电气设备的大容量化、高电压化、结构多样化及密封化,对电气绝缘材料也相应提出更新的、更高的要求。

绝缘诊断是检测电气设备绝缘缺陷或故障的重要方法,预防性试验仍然是目前绝缘监督的重要内容。有鉴于此,有必要对作为绝缘电阻试验重要手段的高压兆欧表的原理和现状、基本性能、鉴定检测指标、组构方式、使用方法和发展前景等给予系统和全面的介绍。

本书第一章简要介绍高压直流绝缘电阻试验的目的和意义。

第二章以绝缘介质的基本特性为先导,介绍兆欧表的规范化参量,导出绝缘电阻试验时的试品电流表达式,建立了两种绝缘电阻试验数学模型,为定量研究绝缘试验物理过程与分析试品绝缘特征提供了基本方法。阐明吸收电流以幂函数律表达时,其变化规律为双曲线型,对应的绝缘电阻变化规律为抛物线型,分布规律与吸收电流衰减指数有关;而以指数律表达时,吸收电流变化规律为指数衰减型,对应的绝缘电阻变化规律为指数增长型。最后综合分析吸收比和极化指数指标,引出介质放电试验和步进电压试验方法,叙述了试品绝缘状况的判定原则。

第三章叙述兆欧表技术指标的定义、量值范围及检定方法。

第四章分类列出常见各型号兆欧表的主要技术性能、发展现状与适用范围。

第五章介绍兆欧表的组构原则和制式,实现比较测量的主要技术方法及兆欧表的分型。

第六章对以往各种容量指标作了评论性说明和比较,引出动态测量准确度的概念,分析了动态测量误差,得出绝缘试验等精度曲线族,提出兆欧表的动态准确度指标,为建立兆欧表新的绝缘试验容量技术指标开拓了全新的思路,并对该论点进行了模拟试验验证。

第七章分析了现场干扰类型、干扰对兆欧表测量回路的侵入途径、干扰的计量检测方法及抗干扰措施,指出来自测量引线的现场工频传导性干扰是绝缘

试验现场主要的干扰形式，介绍了兆欧表抗干扰模拟对比试验情况。

第八章综述兆欧表现场试验的有关技术问题。推导了表面泄漏电阻对测量准确度影响的条件式，得到泄漏电阻对仪表测量准确度的影响量，以及各种兆欧表允许泄漏电阻的下限值。导出容量不同的兆欧表测量容性试品时，达到绝缘稳态值所需时间表示式，指出大电容类试品完全可以用短路电流较小的兆欧表测量其绝缘。此外，比较全面地分析了不同兆欧表测量同一试品示值差异的原因，提出高压兆欧表的总体评价和选型的主要原则。

第九章讨论了高压兆欧表的主要技术参数及其设计原则。

第十章指出绝缘试验的电阻—时间特性中，以吸收比或极化指数来表征试品绝缘性能时的局限性和不完善之处，测量信息未被充分利用，应该以绝缘试验电流表达式的各项特征参数为指征。推出一种以有限测量时间所获取的数据为基础，算出试品绝缘特征参数的计算方法，并预示其重要意义。

本书是作者多年研究与实践的总结和积累，并参照了国内外新技术、新产品，提出了新的观点、思路和方法。作者期望本书能填补高压兆欧表的原理、性能、组构、评价和使用方面系统论著的国内缺项，期望本书能对绝缘试验工程技术人员开拓思路、提高理论水平和实践能力有所裨益。

实验和试验意指为了检验和查看客观事物而进行的操作或活动，测试、测量和检测则侧重于对客观事物的量值测度。以上词汇的寓意相近，在本书中通用。还需说明，兆欧表的某些指标因无厂家的法定资料，参比数据为作者随机抽检测试值，仅反映该型号兆欧表单台技术状况，且同一型号兆欧表的各批次也可能不尽相同，故不足为一成不变的依据，谨供参考，还应以厂家最新提供的产品说明资料为准。

不同工作岗位的读者在初读本书时，可以根据需要先选读各自感兴趣的章节，然后逐步拓展和深入，以期指导实践。通读全书后，能对高压兆欧表当前发展水平和绝缘电阻试验相关技术问题有深切的认识和评价，定会受益匪浅。

衷心感谢在文稿的撰写和出版过程中给作者以关心、鼓励和支持的从事兆欧表研发事业的同道和朋友们。

限于作者个人的学识与实践经验，难免隐伏欠妥以至谬误之处，敬祈批评指正，并谨申谢忱。

中国科学技术大学 刘志万
安徽省电力试验研究所 郭守贤

2002年3月28日

目 录

前言

第一章 绝缘电阻测量	1
§ 1.1 直流高压绝缘试验	1
§ 1.2 绝缘电阻测量	4
§ 1.3 绝缘性能试验方法展望	9
第二章 绝缘介质特性	12
§ 2.1 绝缘介质的基本特性	12
§ 2.2 绝缘试验的数学模型	17
§ 2.3 绝缘性能的判定	23
§ 2.4 影响绝缘电阻测量的因素	29
第三章 兆欧表的技术指标、量值和检定	32
§ 3.1 高压兆欧表主要技术指标	32
§ 3.2 技术指标的量值和检定方法	40
第四章 兆欧表概要	44
§ 4.1 兆欧表的分类	44
§ 4.2 各类兆欧表简评	46
§ 4.3 综合评价	64
第五章 高压兆欧表的组构和分型	67
§ 5.1 组构制式	67
§ 5.2 比较测量方式	68
§ 5.3 A/D 转换器的除法运算	69
§ 5.4 电阻—频率转换电路	71
§ 5.5 干扰强度与组构制式	73
§ 5.6 高压兆欧表适用范围、量程及其分型	74
第六章 绝缘电阻测量动态准确度分析	77
§ 6.1 绝缘电阻测量的电流描述	77
§ 6.2 高压兆欧表的测试能力与动态测量误差	79
§ 6.3 模拟试验	84
§ 6.4 结论	86

第七章 高压兆欧表的现场干扰	90
§ 7.1 绝缘试验中的干扰	90
§ 7.2 抗干扰能力的模拟试验与现场测试	92
§ 7.3 高压兆欧表的抗干扰措施	94
第八章 高压兆欧表的现场测试	96
§ 8.1 兆欧表的组构制式和 L、E 端钮的接法	96
§ 8.2 高压兆欧表的容量指标	99
§ 8.3 测试电源负荷特性	100
§ 8.4 现场干扰	102
§ 8.5 抗反冲能力	103
§ 8.6 兆欧表与试品的连线	104
§ 8.7 屏蔽环的位置	104
§ 8.8 大电容类试品绝缘稳态值的读测	108
§ 8.9 测量起始时间的认定	110
§ 8.10 短路放电时间	111
§ 8.11 不同兆欧表示值的差异	112
§ 8.12 高压兆欧表的选型	114
第九章 高压兆欧表某些参数的设计	116
§ 9.1 动态测试容量指标	116
§ 9.2 量程下限值	117
§ 9.3 量程上限值	118
§ 9.4 延迟短路保护	119
§ 9.5 测试电源	121
第十章 试品绝缘特征参数的计算	123
§ 10.1 引言	123
§ 10.2 绝缘性能的表征	125
§ 10.3 吸收电流特性	126
§ 10.4 绝缘性能特征参数计算	127
§ 10.5 实测数据的统计检验	132
§ 10.6 误差分析	133
§ 10.7 结论	133
参考文献	136

第一章 绝缘电阻测量

§ 1.1 直流高压绝缘试验

经常用绝缘材料（电介质）将电气设备中电位不等的导体分隔开，以改善电气设备的电气性能和减小体积。高电压设备的事故往往源于绝缘材料的老化、受潮或击穿，电气设备的使用寿命主要决定于其内部绝缘材料的性能，因而密切关注绝缘材料性能的下降和劣化至关重要。

对高压电气设备绝缘基本性能的衡量指标是电气性能、机械性能、温度和热稳定性以及化学稳定性等。绝缘材料的电气性能主要是指电场作用下的导电性能、介电性能和绝缘强度，经常用电导率、相对介电常数、介质损耗角正切以及击穿强度等参量来描述。在电气设备的长期运行过程中，需要用各种技术手段进行电气性能的定期监测，并结合局部放电测量、老化试验等其他项目，对电气设备的绝缘性能作客观的综合评价。

广义而言，试验、测试、测量或检测，就是对客观事物的某些特性获取数字表征。

电气设备在生产、运输和检修过程中，可能因设计不当、各种意外或操作失误而存在潜伏性缺陷；在长期工作中，由于电场、机械力、发热、污秽、潮气侵蚀和化学腐蚀等作用，电气设备的性能逐渐变坏，导致使用寿命下降。造成绝缘损坏或性能下降的原因主要是绝缘结构设计不合理、材料选用不当、制造工艺不良、老化、保养不善及雨雪雷电自然事故等。

绝缘的缺陷大致可分为集中性和分布性缺陷。局部受潮、动力负荷等原因引起的局部机械损伤、绝缘内部气隙、瓷介质裂纹等，发生于绝缘的某个或某几个部位，发展速度较快，危险性较大，属集中性缺陷。由于受潮、过热、机械力以及长时间过电压等原因使电气设备整体老化、变质，导致设备整体绝缘性能逐渐缓慢下降，为分布性或称整体性缺陷。绝缘内部存在上述两类缺陷后，电气性能参数和绝缘特性就会发生一定的变化。

一、绝缘试验

试品，泛指绝缘试验的测量对象。电介质绝缘能力的下降和劣化，必然在其电气性能的各种参数上表现出来。绝缘试验的目的是用多种试验方法，检测出试品各种缺陷引起电气性能参数的改变，从而判断试品的绝缘状况和缺陷的性质，安排消除缺陷性维修、预防性维修和预知性维修等，预防设备在工作电压或过电压下损坏，保证电力系统安全运行。

试品的绝缘试验分为两类：

第一类是非破坏性试验，或称绝缘特性试验。使用较低的试验电压或用不会损伤试品绝缘的方法，根据绝缘介质中发生的各种物理过程（极化、吸收、电导和损耗等），测量绝缘的各种参数（例如绝缘电阻和吸收比或极化指数、泄漏电流、介质损耗角正切等），以及与极化、吸收过程有关的特性（主要表现为电阻—时间的变化规律）和绝缘冷却媒质的一系列其他特性（化学组分、油中水分及特征气体含量等），从而判断绝缘性能，及时发现可

能的劣化现象。实践证明，这类方法对检出和判别绝缘内部缺陷是有效的，但比较间接。

绝缘特性试验除可以测定各绝缘特征参数的数值外，还可以通过历次试验积累的数据，综合分析绝缘特性随时间的变化趋势，从而能显著提高对绝缘状况判断的准确性。

第二类是破坏性试验，或称绝缘强度试验或耐压试验，在试品上施加的试验电压远高于其工作电压和可能出现的各种过电压，以求揭示危险性较大的集中性缺陷的存在，并直接检验绝缘的耐压水平或裕度。耐压试验时，对试品绝缘可靠性的考验比较直接和严格，缺点是试验所产生的累积效应可能给绝缘造成一定的损伤，并会导致绝缘能力下降，使可能恢复的缺陷（例如受潮）在试验过程中发展为不可逆转的击穿。因此，耐压试验通常是在非破坏性试验之后安排进行。如果非破坏性试验表明绝缘存在不正常情况，则必须在查明原因并予以排除后再做耐压试验^[9]。

二、绝缘诊断

设备绝缘强度的下降取决于各种因素的综合作用，其过程是随机多变的。因此，有计划地进行预防性监测，目的就是通过对试品绝缘参数的测试，及时、正确地对各种异常状态或故障状态做出诊断，评定其绝缘状况，并对试品是否能继续可靠工作进行预测和评价，最终完成对试品绝缘的诊断决策过程，预防或消除故障，提高试品的可靠性、安全性和有效性，延长使用寿命，降低设备使用周期的费用，充分发挥试品的潜能。

1. 绝缘诊断的基本环节^[29]

(1) 正确选择传感器及测量手段，检测各种绝缘特性，采集各种绝缘性能参数。

(2) 分析和处理数据，剔除干扰，提取有效特征参数。

(3) 根据各特征参数的量值、介质绝缘老化机理的知识以及设备运行经验，参照有关标准和规程，对绝缘运行状态进行识别和判断。

(4) 对绝缘状态的发展趋势做出预测，从而预警故障发生的可能性，并为设备的维修决策提供技术依据。

上述绝缘诊断过程中，绝缘性能参数的提取是为了得到试品绝缘性能状况的信息。绝缘状态的评价意见是对试验结果所获取的信息进行归纳和综合后，再与试验标准和规程规定值及以往试验结果做比较得到的。判定试品可否继续运行或需作恢复性检修及何时检修，则是根据对绝缘的可靠性进行预测做出的。预防性试验规程是电力系统绝缘监督工作主要依据的标准性文件。

2. 绝缘诊断的类型

(1) 逻辑诊断。沿用非此即彼的认知方法，诊断结果为“好”、“坏”两类。诊断模式简明，但诊断精确度和可靠程度较低。

(2) 模糊诊断。考虑到被试品特征和状态评价之间的主观不确定性，即模糊性，诊断结果常用多值逻辑的特征函数来描述，然后按特征或状态参数的取值量确定归入某一类别，常归纳为“危险”、“不良”、“可疑”、“较好”、“良好”等状态。

(3) 统计诊断。绝缘状态相同的同类型试品，其特征参数按一定的统计规律分布，可以根据试品绝缘性能的优劣分别描绘出特征参数的概率密度曲线，进行判别诊断。统计诊断要在尽可能既防止虚警又避免漏判的前提下，参照累积的特征参数与绝缘状态相关性的模式，确定合适的诊断规则，以提高绝缘预测的准确性。

目前常用逻辑诊断。模糊诊断和统计诊断的预测准确性和可信度高，但方法复杂，尚处在研究、验证、发展与完善之中。

三、绝缘电阻试验

加强针对绝缘体的损伤、受潮、有无气隙、电晕放电、局部缺陷等绝缘状况和绝缘老化程度的判定等非破坏性预防试验，可以防止或减少事故的发生。直流试验法是在绝缘材料上施加一定的直流电压，材料本身就会呈现出各种绝缘特性，例如电流—时间特性、泄漏电流—电压特性等。根据绝缘介质所表现出来的特征，就可以判别其绝缘能力。

通过绝缘性能试验，可以定期检测由油渍、污秽、腐蚀、受潮及其他损伤引起电气设备绝缘性能的劣化进程，以便预测绝缘状况，推断固体绝缘老化、绝缘油劣化等内部薄弱环节，发现设备的隐患，安排消除缺陷性维护计划等，保证设备的安全运行；还可在设备去湿干燥处理过程中，用于监测绝缘性能的改善和恢复过程等。

在电力系统中，对旋转电机、电力变压器及电抗器、互感器、开关设备、套管、绝缘子、电力电缆、电力电容器、避雷器、电除尘器等项设备进行现场调试、交接试验和运行维护的直流绝缘试验时，绝缘电阻的检测是最基本的试验项目，高压兆欧表（高阻表、高绝缘电阻测量仪）为其重要的检测仪器。

绝缘电阻试验属于非破坏性的绝缘性能试验范畴，是基本和常规的试验内容，试验方法简便，试验结果直观，所用设备价格低廉。试验采用的试验电压与试品的额定工作电压有关，又远低于工作电压，用以及早发现试品绝缘的局部或整体受潮和污秽、绝缘油严重劣化、绝缘表面留有放电或击穿痕迹、严重热老化等整体性或贯通性缺陷。只有绝缘电阻试验合格的试品，才应安排诸如泄漏、介质损耗、局部放电等绝缘性能试验和交、直流耐压试验、雷电和操作冲击电压试验等绝缘耐压试验，以避免不应有的击穿，从而兼为后续试验项目提供安全性预检测。

预防性试验规程是电力系统绝缘监督工作主要依据的标准性文件。有关人员应主动参与关键设备的出厂和鉴定试验，严格进行设备的交接验收试验和预防性试验，加强对试验结果的综合分析，掌握设备绝缘性能变化的规律和趋势，认真进行设备绝缘事故的调查分析，制定与完善相应的管理方法和制度等。在以上各个关键环节上严格把关，绝缘监督工作的实施会对系统设备的安全运行起到重要的保障作用。

20 世纪 70 年代，国外对电力试品已由事后维修、定期预防维修逐步进化为预知（视情）维修制。预知维修的核心是掌握设备使用初期出现异常征兆的异常预知诊断和着眼于设备性能逐年变化的老化诊断，把检测事故波及范围、排除事故和自动恢复操作结合在一起，对电力设备实施跟踪、在线检测与控制，对检测出异常状况的设备或停止其工作，或替换备用设备继续工作，及时处理异常事件，提高供电质量。国内某电业局试行实施后，停电次数减少 36.8%，维护费用减少 15%，系统供电可靠性每年提高约 0.01%，有较大的经济效益和社会效益。因而，传统的单一参数绝缘测量方式已逐渐不适应时代需要。结合电容量、介质损耗角正切、局部放电视在电荷量、油中微量水及油气分析，并参照历次试验对比资料，对所测参数进行全面科学的综合分析和判断，可以更客观和更准确地界定试品的绝缘性能，提高针对性和科学性，为实现由定期维修到预知维修创造良好的前提条件。为此，必须充分重视状态监测与故障诊断技术的开发和应用^[46]。

§ 1.2 绝缘电阻测量

介质绝缘电阻值是评价绝缘材料电气性能的重要参数。试品绝缘介质的绝缘能力，常常通过介质绝缘电阻值的高低表现出来。反之可以说，若测量出试品的绝缘电阻值或其绝缘电阻—时间特性，则介质的绝缘性能状况基本被揭示。

一、检测方法

试品绝缘电阻的测量是绝缘试验的重要内容。测量绝缘电阻最基本的方法是在试品两端施加一个恒定的直流试验电压，该电压产生一个通过试品的电流，借助仪表测量出试品的电流—时间特性，就可以换算出试品的绝缘电阻—时间变化特性或某一特定时间下的绝缘电阻值。

在试品上施加直流电压时，在闭合测量回路中派生出的电流与介质绝缘性能密切相关，电流的量级为 μA 、 nA ，甚至低到 10^{-19}A 级。该电流包含了电导电流、吸收电流和电容充电电流等三种电流分量。在不对三者分别独立研究时，上述电流可以统称为泄漏电流。试品对应呈现出的绝缘电阻值的量级较高，为 $\text{M}\Omega$ 、甚至 $\text{G}\Omega$ 以上。绝缘电阻测量时，使用的测量仪表所标示的示值单位为 $\text{M}\Omega$ ，故常称为兆欧表或绝缘电阻表。兆欧表测量出试品在较高直流电压下产生的电流量值，然后通过各种方法换算为绝缘电阻值。

用兆欧表测量试品绝缘电阻的示意图见图 1-1。试品的一端常接大地，兆欧表线路端钮 L 通过外表屏蔽的测试芯线与试品被测端相连，地端钮 E 接大地。为了排除试品表面不清洁引起泄漏导致的测量误差，常将兆欧表的屏蔽端钮 G 通过测量线的外包金属屏蔽编织层与在试品表面上安放的护环相连。

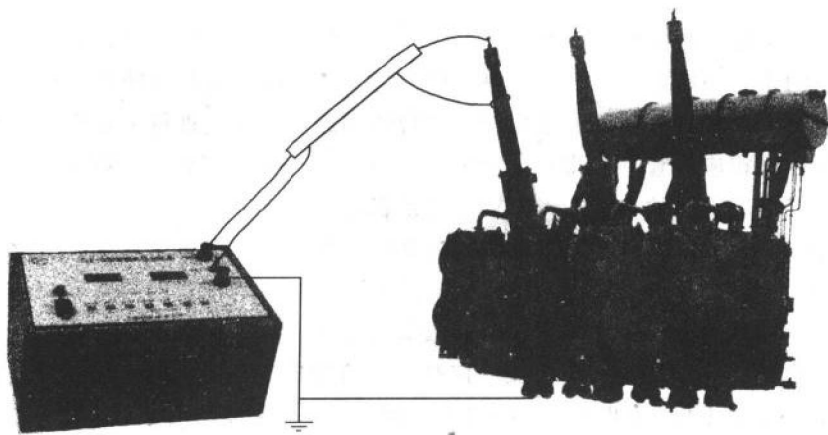


图 1-1 试品绝缘电阻测量示意图

用于现场绝缘电阻测量的兆欧表属于便携式仪表。

绝缘电阻测量时，试品电流和电阻的典型变化曲线见图 1-2，其中 $R_x(t)$ 为试品绝缘电阻变化曲线， $i(t)$ 为试品电流变化曲线。可见，绝缘电阻缓慢上升到稳定值，这一过程可能需要较长的时间。在绝缘电阻逐渐上升过程某一时刻下的绝缘电阻值，称为试品的视

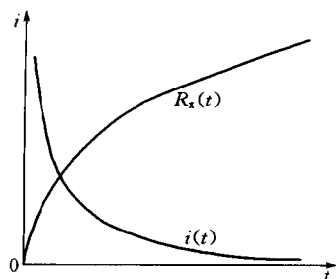


图 1-2 试品电流及绝缘电阻变化曲线

在(表观、名义)绝缘电阻值,意即形式上的绝缘电阻值,而其最终稳定值就是试品的真实绝缘电阻值。对于绝缘介质单一的中小容量试品,绝缘电阻上升到稳定值的暂态过程比较短暂,常以测量 1min 时的示值 R_{60s} 作为试品的较量标志值,以此对试品的绝缘能力进行判别和比较。而依据试品的绝缘电阻—时间特性,将有可能更准确地推断试品的绝缘性能。

试品的绝缘电阻值因绝缘材料的种类、结构、形状、尺寸等而不同,只用电阻绝对值的大小来判断绝缘的性能是十分困难的,界定绝缘是否良好的标准因设备的类型、绝缘介质的种类和结构、额定电压和容量等而异,一般在试验规程和产品

技术条件中有相应的规定。

在实际使用中,应注意选择兆欧表的试验电压,并密切关注测量条件。电压太低可能揭示不出绝缘的某些缺陷或弱点,电压太高又可能发生绝缘损伤和击穿。绝缘介质呈现的绝缘电阻随介质所处的环境及测量条件而不同,故同一试品在不同试验条件下测得的电阻值往往是不可比的。由于介质中电流动态变化的量值随施加电压后经历的时间长短而不同,呈现的绝缘电阻值也不相同,故对试品作绝缘优劣判别的前提是同一试验电压、某一特定条件和时间下的绝缘电阻历次测量值。

试品或测量回路中的热电势、电解电势、接触电势以及由于杂散耦合或静电感应产生的电势,均会影响介质绝缘电阻的准确测量,应该予以消除或补偿。也应拆除与被试品并联的连线和设备,并保证被试品表面的清洁和干燥,以免形成旁路,影响测量结果。

试品泄漏电流的测量是在试品两端施加直流试验电压,测量某一时间下试品的泄漏(电导)电流值。根据泄漏电流测量值,可以换算出试品在该试验电压下呈现的绝缘电阻值,与绝缘电阻测量的基本原理完全相同,因而也可以说泄漏电流的测量本质上就是绝缘电阻的测量,不同的是施加的直流试验电压比绝缘电阻测量时更高,常用几千到几万伏,试验电压可以调节,以便测量电流—电压特性;泄漏电流可以直接用微安表测量出来,不需加接测量放大器。由于绝缘电阻和泄漏电流二者的测量条件有差异,反映出的是试品不同层面的绝缘特征。

泄漏电流试验电压按试验规程规定选用,试品的实际泄漏电流应低于规定值。试验电压常与试品的额定工作电压有关。一般情况下,当额定工作电压较低时,选择试验电压高于额定电压;而当额定电压较高时,试验电压为额定电压的几分之一^[33]。

根据泄漏电流—电压特性,可以用来判定试品的绝缘性能,见图 1-3。绝缘良好时,绝缘电阻值基本不变,泄漏电流随电压而直线上升,服从欧姆定律,如曲线 1;当绝缘受潮或已经老化时,泄漏电流明显增大,如曲线 2;电压升高到一定值以后泄漏电流激增,说明绝缘中有集中性缺陷存在,如曲线 3 所示;若集中性缺陷严重,泄漏电流激增点的电压向前移,可能会出现现在试验电压的 1/2 附

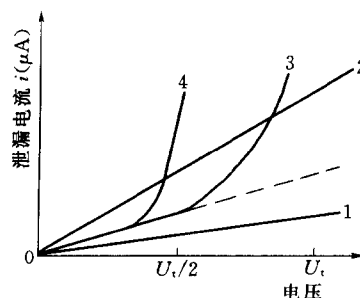


图 1-3 某发电机的典型泄漏电流曲线

近，如曲线 4，则试品存在击穿危险。

泄漏电流测量时，试验电压高，并可以从零电压连续调节。泄漏电流—电压特性在揭示试品的局部缺陷、尤其是尚未完全贯通的集中性缺陷和套管裂纹等方面，更有特别敏感性，比绝缘电阻测量方法更为有效。

将泄漏电流换算为绝缘电阻的电阻—电压特性曲线如图 1-4 所示。曲线 1 为合格的电机绕组；曲线 2 为绝缘材料受潮或老化等有严重缺陷时的测量结果，随着试验电压增高，电阻值下降明显。

本书将主要讨论绝缘电阻的测量。

二、兆欧表

一般说来，用兆欧表测量绝缘电阻十分简便，仪表结构简单，便于携带，读数稳定。兆欧表常由直流测试电源和测量组件（或测量机构）两部分组成。一般要求直流测试电源电压稳定，负荷特性好，接近于理想电压源，电压纹波小；测量电路或测量机构则应能准确地测量和指示试品的绝缘电阻值。

直流绝缘电阻试验是施加直流高压于试品，探讨所产生的电流—时间特性，该电流—时间特性与介质绝缘性能密切相关。在电子测量技术领域，电压测量方法成熟，准确度高，易于变换和处理，对被测对象工作状态的影响较小，仅在个别情况下才直接测量电流。由此派生出各种绝缘测量方法。

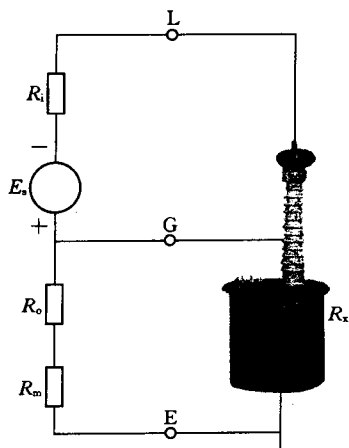


图 1-5 绝缘电阻测量原理电路图

用作绝缘测量的兆欧表常采用电流电压法测量原理。兆欧表自身产生一个试验电压，并施加于试品，该电压与仪表内部测量电路和外部被试品组成闭合测量回路，回路电流与试品的绝缘状态密切相关，并由测量电路采样电阻以电压的形式检出该电流。在一定条件下，即可根据该采样电压换算出试品的绝缘电阻值，这种方法的称谓突出了测量信息加工程式的特色。电流电压法测量原理电路见图 1-5。

图 1-5 所示的兆欧表为低电位屏蔽组构制式，测试电源二输出端分别接 L、G 端钮，测量组件接在 G、E 端钮间，其组构特点将在第五章详述。今后如不特别说明，将以低电位屏蔽组构制式的兆欧表为主要研究对象。

图 1-5 中，兆欧表测试电源的电势为 E_s ， R_i 为测试电源的等效内阻。 R_o 为兆欧表的测量采样电阻， R_m 为兆欧表的附加电阻， R_x 表示试品的待测绝缘电阻。由图 1-5 可见，闭合测量回路中的采样电压为

$$U_o = \frac{R_o}{R_i + R_x + R_o + R_m} E_s \quad (1-1)$$

下列条件式一般常能满足

$$R_x \gg R_i + R_o + R_m \quad (1-2)$$

定义测量回路的串联总电阻为

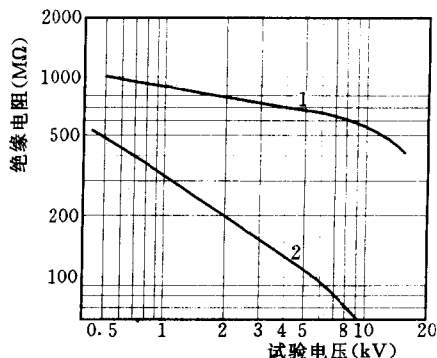


图 1-4 某试品绝缘电阻—电压特性曲线
1—绝缘合格；2—绝缘受潮或老化

$$R_s = R_i + R_o + R_m \quad (1-3)$$

由式(1-1)、(1-2),经典的采用电流电压法测量原理的直读测量法有以下简化式

$$R_x = \frac{R_o}{U} E_s \quad (1-4)$$

当试验电压恒定,且仪表测量电路电阻较小,满足条件式(1-2)时,则回路电流的时间特性和大小完全取决于试品的绝缘性能,回路电流大小(即采样电压 U_s 的大小)与试品的绝缘电阻呈反比关系。而当条件式(1-2)不能满足时,则式(1-4)中的采样电压 U_s 与被测电阻的反比关系不能严格成立,出现方法误差。

采样电路在采样电阻上以电压的形式检出该回路电流,并按欧姆定律做除法运算后,即可获得试品的绝缘电阻值。按外加测试电压,产生流经试品并与试品绝缘状况密切有关的回路电流,该电流再在采样电阻上形成电压降的因果顺序,上述方法实际可以表述为电压—电流—电压法。而如果以检流计作为指示器直接检出该回路电流,指示器的刻度标示为电阻值,则实应称为电压—电流法。

回路电流换算为试品绝缘电阻值的方法有多种。检出的回路电流或采样电压经放大处理后,用作终端指示的电流表或电压表的指针偏转角与电流或电压值成正比,将刻度按反比规律标示为电阻值,即可实现采样电流或电压对被测电阻的换算。如果终端为数字显示,则电流或电压信号变换为数字的过程中,应该增设具有除法运算功能的电路,例如除法运算放大器或特殊接法的A/D转换器等,以使采样电流或电压信号与终端显示电阻值的数字呈反比关系,完成除法换算功能。

按试验电压等级,兆欧表可以分为两类。试验电压等于或低于1000V的为普通兆欧表,包括万用电表的电阻档,仅用来测量试品的绝缘电阻。为了检验试品在施加工作电压后的安全性,选用的试验电压等级常高于工作电压。试验电压高于1000V的为高压兆欧表,是电力设备绝缘电阻试验的必备仪表。由于电力设备工作电压较高,试验电压的等级常低于试品工作电压,并由试验规程规定,用于测量电气设备的绝缘电阻、吸收比或极化指数,以此判断试品绝缘的局部或整体受潮和污秽、绝缘油严重劣化、绝缘击穿和严重热老化等缺陷,并定期监测被试品绝缘性能的劣化进程,再结合其他项目试验结果,综合分析和判断绝缘状况,保证电力设备安全运行。

普通兆欧表有两只外引线端钮,即线路端钮L和接地端钮E,被试品跨接在LE端钮两端,试验电压通常以负电压的形式由线路端钮施加于试品;高压兆欧表常有三只外引线端钮,即线路端钮L、接地端钮E和试品表面泄漏电流屏蔽通路端钮G。测量绝缘电阻高于500MΩ的试品时,因为试品套管等由引线端子至外壳表面漏电流的量级与试品绝缘介质电流相比可能不可忽略,为了防止表面漏电流影响绝缘测量的试品电流读测值,常在试品表面设置护环,并与G端钮相连,以作为表面漏电流的旁路通道,使表面漏电流直接流回测试电源,不经过高压兆欧表的测量组件,将表面漏电流从绝缘读测值中剔除出去,避免漏电流引起的测量误差。

普通兆欧表的试验电压低,使用条件比较宽松,仅测量试品的绝缘电阻值。而高压兆欧表则需根据被试品的特点和试验规程要求选择适用的兆欧表,兆欧表选型的原则主要是兆欧表试验电压等级和量程范围符合规程要求,较高的动态测量准确度和抗现场干扰能力,

使用安全方便，较好的性能—价格比等。

本书将主要研讨用于电力设备绝缘电阻测量的高压兆欧表。当然，由于对普通兆欧表的技术性能要求相对较低，所有对高压兆欧表的性能和技术指标等各方面的讨论结果，对普通兆欧表也极具参考价值。

还需说明，用兆欧表做绝缘电阻试验所得到的试品测量数据，并不等同于试品在工作状态下所呈现的绝缘电阻值，因为测量条件与工作条件有差别，例如绝缘试验电压与工作电压值不相等、绝缘试验时常在试品套管处加接表面泄漏电流屏蔽环与试品的实际工作状态不同、直流负极性试验电压与工作状态下试品所承受的交流（或直流）高压不同等。绝缘电阻试验的目的是借试验的测量结果来判断试品的绝缘性能，而不是探求试品在工作状态下的绝缘电阻值。

三、兆欧表分类

兆欧表种类繁多。按其结构类型可以分为指针式、电子指针式、数字式、智能式等。

经典的兆欧表由手摇发电机和流比计式测量机构组成，通称摇表。20 世纪 50 年代或更早期的手摇发电机，多为直流高压发电机。发电机的三组转子线圈在永久磁铁组成的定子内高速转动时，切割固定磁场的磁力线，产生的交流电势通过换向整流，形成直流高压。机械换向不可避免产生火花、噪声和较重的手感，而且在直流高压中有较强的纹波。采用流比计使摇表的抗震性能较差，指示器刻度的规律性也比较复杂，使仪表的测量准确度较低。20 世纪 60 年代硅整流二极管的应用，使动圈式结构手摇发电机演化为绕组固定、磁钢旋转的动磁式结构提供了可能性，绕组中的交流电势经硅管的倍压整流，形成直流试验高压。动磁式手摇发电机摩擦力小，噪声较低。

机械调速机构可以保持手摇发电机的转速基本不变，以使直流试验高压保持为额定值。由于摇表采用电流比较测量原理，在直流试验高压有小范围波动时，电流线圈和电压线圈中的电流对应改变，仍然能保证其示值不受电压波动的影响。

创新和进一步改型后的摇表，省去机械调速机构，使用低压交流发电机，交流电压经电子电路整流和直流变换形成较稳定的测试高压，并以非均匀磁场的张丝电流表头取代流比计，使测量准确度、抗震性、仪表刻度特性等性能均有较大的提高。

摇表用人力旋转机械能作为一次能源，不需备用任何电源，结构精巧，维护方便，价格低廉，抗现场干扰能力较强，对试验电压波动的敏感度小，试验电压 100V、250V、500V、1000V 和 2500V，量程上限最高达 10000M Ω ，应用广泛。但操作费力费时，自动化程度低，测量准确度低，部分型号摇表可供输出电流不大，试验高压随转速由静止增加到额定值而缓慢地上升，测量的起始时间比较难以判定，故不适合于大型设备的绝缘电阻、吸收比、尤其是极化指数的测量。

20 世纪 60 年代中后期半导体技术迅猛发展，高效、低耗、输出电压稳定的晶体管直流变换器代替手摇发电机，对试品的采样信号经电子电路放大，并以简单的电流表取代流比计作指示表头，构成了以普通电池为能源的电子指针式兆欧表，试验电压 1000V、2500V、5000V，量程范围可达 100000M Ω 以上，某些兆欧表试验电压 0~15000V 连续可调，量程上限可达 300000M Ω ，各项性能指标均有较大的改善。

上述两类指针式兆欧表的共同缺点是准确度偏低，表盘中部量程扇形区段的基本准确

度(或测量误差)约 $\pm 10\%$,表盘扇形区段两边的扩展误差可能高达 $\pm 50\%$;刻度非线性,低阻值处刻度稀疏,高阻值端刻度致密,分辨力差,判读误差较大;抗试品残余电荷反冲击能力较弱等。

20世纪60年代至70年代,测量电路中的采样电压经A/D转换,电子指针式兆欧表进化为数字式兆欧表。低压表试验电压100V、250V、500V和1000V,高压表为2500V、5000V,一机多电压等级,功能较强,量程上限值200000M Ω ,基本准确度约 $\pm 3\%$,准确度和分辨力等性能指标有进一步提高。

在数字式兆欧表基础上使用单片机为核心组件的智能兆欧表,测量数据采集、计时、计算、打印自动化,试验电压500~5000V或以上,灵敏度高,量程上限可达500000M Ω ,测量方式多样化,数据处理软件功能强,获取的性能参数多,可以直接读取吸收比或极化指数,甚至具备推算真实绝缘电阻值等绝缘特征参数的功能,测量过程自动化程度高,便于作绝缘性能分析。

数字表与传统摇表和电子指针式兆欧表相比,具有较优越的性能。

四、兆欧表的分型

根据试验对象和要求不同,兆欧表大致可以划分为普及型、主导型和专用型三种。根据电力设备预防和交接试验规程,仅用来测量试品绝缘电阻值的普及型兆欧表测试电压等级较低,为500V、1000V,民用家电等设备的绝缘测量还使用电压等级为3V、9V、50V、100V、250V等的兆欧表。对这类兆欧表的输出电流能力(兆欧表测试容量)没有明确的要求,只是希望仪表测量回路电阻值 R_s 较低,避免在测量的闭合回路中施加在试品上的试验电压因 R_s 上压降过大而比额定电压降低太多。代表性型号有ZC7、ZC11D、ZC25B、IT—501、JX8901、JX9002、PC—16、PC—20、DMG2671A、3121等。

主导型兆欧表主要测量试品的绝缘电阻、吸收比或极化指数,电压等级为2500V、5000V,代表性型号有GZ—5A、GZ—8、ZC48、KD2677、HV5、HV10、210400、AVO1—5000、218701等。

专用型兆欧表专用于同步发电机、直流电机、交流电动机等绕组绝缘电阻、吸收比或极化指数的测量,有时还要求测量真实绝缘电阻值,常用电压等级为1000V、2500V和5000V,代表性型号有ZC37、KD2678等。电力变压器或电机绕组直流电阻的测量仪表也属专用仪表,但已与兆欧表在实施测量的原则和组成方式上有较大的差别。

当然,仪表以试验电压多档为宜,而绝大部分摇表和ZC48、3121等均为单机单一电压等级。

§ 1.3 绝缘性能试验方法展望

除绝缘电阻试验和泄漏电流试验外,非破坏性绝缘特性试验大致还包括:

一、局部放电测量

气泡、空隙、裂纹、杂质和污秽等缺陷在绝缘结构中难以避免。由于空气、矿物油等的介电常数比固体介质低,按电场场强的分布规律,常需承受比固体介质更高的场强;更何况前者的击穿强度又低于固体介质,故外加电压升高到一定量值时,气隙、气泡或沿固

体绝缘表面及其边缘处,就会发生局部区域性短路放电现象。一般说来,局部放电不至于立即形成贯通性通道,而仅限于局部小范围,但长期的局部放电会使绝缘的劣化损伤逐步扩展,导致整体绝缘在工作电压下发生击穿或沿面闪络。

绝缘的击穿常由局部缺陷处的放电开始。对耐潮湿性较好的高分子绝缘材料而言,内部气泡、裂纹、杂质等的局部放电是导致绝缘击穿的主要原因^[14]。

对试品施加交流高电压,通过测量局部放电时的放电脉冲峰值、重复率、放电量、功率、平均电流值或波形等要素,即可判断绝缘结构中的缺陷状况。试验电压接近或稍高于最大工作相电压或额定电压,由相关标准规定。

二、交流电流试验

对试品施加正弦交流电压,测量试品电流随外加电压增加的变化情况,常用于鉴定电机绕组绝缘的老化程度。图 1-6 为试品典型的电流—电压变化关系。

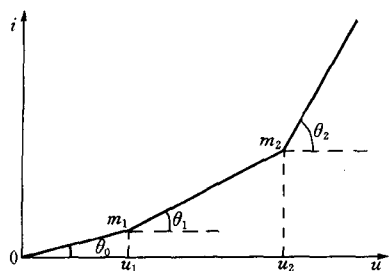


图 1-6 交流电流试验的
电流—电压变化关系

电压逐渐增大,绝缘内部的气隙尚未发生放电或游离时,绝缘介质内的电流随之线性增长。当高于某一电压时,绝缘内部的气隙开始放电或游离,电流激增。继续升高电压,绝缘内部会有更多的气隙参与放电或游离,将出现第二个电流激增点。若再升高电压,则可能发生绝缘的击穿^[15]。

可以通过测量第二个电流激增点处电压的办法来判定绝缘的老化程度,并大致推算出绝缘的击穿电压。

此法对检出局部气隙性缺陷特别有效。

三、介质损耗角正切的测量

试品的绝缘材料总非无损耗的理想介质。对试品施加正弦交流电压时,由于存在介质损耗,有功电流比纯电容电流滞后 δ 角,该角的正切 $\text{tg}\delta$ 称为介质损耗角正切。 $\text{tg}\delta$ 与绝缘的尺寸、形状无关,与材料的种类、污秽、老化程度、温度、湿度等有关,可以反映介质的绝缘性质和状况^[3]。

$\text{tg}\delta$ 的测量多采用西林电桥。

介质损耗角正切的测量对检测绝缘受潮、劣化及绝缘油质不良等分布性缺陷比较灵敏有效,对发现集中性缺陷的灵敏度较差^[11]。

以上不同的绝缘性能试验方法各有其检出绝缘缺陷的有效性,表 1-1 列出了各方法的适应性^[15]。

很明显,综合运用上述各种非破坏性绝缘性能试验方法,对绝缘材料的绝缘性能进行多方面、历史的分析考察,就可以做出合乎客观实际的科学判断。目前,已由单一和孤立的绝缘性能试验向综合性“绝缘分析”方向发展,并有可喜的成果。

智能高压兆欧表是以单片机为核心组件,机内有不低于 1000V 的高压测试电源和测试用放大器,能直接测量 200~5000G Ω 高绝缘电阻,并有运算功能,可以直接显示试品的吸收比和极化指数的数字式高绝缘电阻测量仪表。绝缘分析仪(绝缘自动测试仪)是以单片机为核心组件,机内有不低于 1000V 的高压测试电源和测试用放大器,配置微型打印机或