



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

高电压技术应用

主 编 黄志先

主 审 谭社平 吴永明



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

高电压技术应用

主 编 黄志先

副主编 马华远 石 帅 陈润莲

主 审 谭社平 吴永明



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要内容包括：电介质的极化、电导和损耗，气体放电机理，电介质的沿面放电和污闪，雷电放电、冲击电压下气隙的击穿特性，固体电介质和液体电介质的击穿原理，固体电介质击穿电压的影响因素，提高固体电介质击穿电压的方法，影响液体电介质击穿电压的因素，提高液体电介质击穿电压的方法，电气试验，雷电过电压及防雷，避雷针和避雷线的保护范围，避雷器和接地装置及输电线路防雷保护，发电厂和变电站的防雷保护，电力系统绝缘配合等。

本书可作为高职院校电力技术、电气工程相关专业学习高电压技术的教材，也可作为电力工程技术人员的参考书。

图书在版编目（C I P）数据

高电压技术应用 / 黄志先主编. -- 北京：中国水利水电出版社，2015. 6
国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材
ISBN 978-7-5170-3186-4

I. ①高… II. ①黄… III. ①高电压—技术—高等职业教育—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第109037号

书 名	国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材 高电压技术应用
作 者	主编 黄志先 主审 谭社平 吴永明
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址：www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话：(010) 68367658 (发行部)
经 售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：(010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 10.75 印张 255 千字
版 次	2015 年 6 月第 1 版 2015 年 6 月第 1 次印刷
印 数	0001—2000 册
定 价	38.00 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

国家骨干高职院校工学结合创新成果系列教材

编 委 会

主 任：刘延明

副主任：黄伟军 黄 波 皮至明 汪卫星

委 员：张忠海 吴汉生 凌卫宁 陆克芬

邓海鹰 梁建和 宁爱民 黄晓东

陈炳森 方 崇 陈光会 方渝黔

况照祥 叶继新 许 昕 欧少冠

梁喜红 刘振权 陈治坤 包才华

秘 书：饶亚娟



前言

为贯彻落实《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神，加强教材建设，确保教材质量，满足学科发展和人才培养的需求，编写了本书。

“高电压技术”是一门实践性很强的课程，本书总结了广西水利电力职业技术学院及其他相关院校的教学经验，以专业应用为目的，以工作任务为导向，为高职教学服务选择了和高电压技术高职教学层次相关的内容，去除了传统教材中和高职教学层次关系不强的内容，并对课程内容进行了项目化分析整理，使教材的内容更接近工程实际，更适合高职教学使用。本书体现了理论知识、实际操作指导书、规程规范三者合一的特点，其中更注重体现高电压技术在电力工程中的应用。

本书共分为6个项目，分别是：认识介质电气强度、避雷器试验、互感器试验、断路器试验、电力电缆试验、过电压及防护。其中项目1和项目6由黄志先编写，项目2和项目5由马华远编写，项目3和项目4由石帅编写，黄志先负责全书统稿；由广西水利电力职业技术学院谭社平高级工程师、广西电力工业勘察设计研究院吴永明高级工程师任主审，黔西南民族职业技术学院陈润莲副教授提出了许多宝贵意见，在此致以诚挚的感谢！

由于编者水平有限，经验不足，不妥与错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2014年9月

目 录

前言

项目 1 认识介质电气强度	1
任务 1.1 测定绝缘油击穿电压	1
任务 1.2 气体冲击电压放电	6
项目小结	14
项目 2 避雷器试验	15
任务 2.1 测量避雷器绝缘电阻	15
任务 2.2 测量避雷器电导电流和直流 1mA 下的电压 U_{1mA} 及 75% 该电压下的泄漏电流	37
项目小结	51
习题	52
项目 3 互感器试验	53
任务 3.1 测量电压互感器介质损失角正切值	53
任务 3.2 电压互感器工频交流耐压试验	60
任务 3.3 测量电压互感器直流电阻	66
任务 3.4 检查电流互感器极性	68
任务 3.5 互感器的励磁特性试验	71
习题	74
项目 4 断路器试验	75
任务 4.1 测量导电回路直流电阻	75
任务 4.2 测定分、合闸时间与同期性	81
项目小结	86
习题	86
项目 5 电力电缆试验	87
任务 5.1 电力电缆绝缘电阻的测量	87
任务 5.2 电力电缆直流耐压和泄漏电流试验	105
任务 5.3 串联谐振装置交流耐压试验	112
项目小结	124
习题	125
项目 6 过电压及防护	126
任务 6.1 测量接地装置阻抗	126

任务 6.2 设计避雷针布置方案	130
任务 6.3 评价输电线路防雷性能	140
任务 6.4 设计变电所避雷器保护方案	150
任务 6.5 确定输电线路绝缘水平	156
项目小结	164
习题	165
参考文献	166

项目1 认识介质电气强度

【学习目标】

(1) 基本电现象：绝缘、游离、电晕、极化、电导、损耗、击穿、老化。

(2) 基本电理论：电子崩，流注放电，自持放电，先导放电，滑闪放电，沿面放电，介质电击穿理论，液体小桥击穿理论，热击穿、化学击穿。

【项目导航】

该项目设置了绝缘油、空气介质的击穿试验两项任务，旨在发现液体介质、气体介质在高电压、强电场下的现象。

任务1.1 测定绝缘油击穿电压

【任务导航】

该任务的目的在于观察绝缘油在高电压下放电击穿的现象，进而了解液体介质的电气强度规律。要求使用升压设备获得足够高电压用以击穿绝缘油。

1.1.1 准备相关技术资料

(1) 相关知识。按照导电能力的强弱将自然界的物质分为三类：导体、半导体、绝缘体。其中绝缘体是不导电的物质，在高压研究领域通常将绝缘体称为电介质；电介质在高电压、强电场下会出现如极化、电导、损耗、击穿等现象。认识电介质在电场中的特性，在高电压绝缘应用方面具有重要意义。

1) 击穿。绝缘介质在电场作用下形成贯穿性通道，发生放电，使电极之间的电压降至零或接近零的现象。

2) 击穿电压。在规定试验条件下绝缘试样发生击穿时所对应的电压称为击穿电压。

该项任务一般针对 20℃ 时黏度不大于 50mm²/s 的各种绝缘油，例如变压器油、电容器油、电缆油等新油或使用过的油，但主要用于新油。

(2) 测定方法。将一个按一定速率连续升压的交变电压施加于存放在试验用油杯里的绝缘油试品，直至油击穿。

(3) 规程有关条目。有关的规程有：GB 50150—2006《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》、DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》、GB/T 507—2002《绝缘油 击穿电压测定法》、DL/T 429.9—1991《绝缘油介电强度测定法》等。

其中《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》规定绝缘油击穿电压的标准：500kV 电压等级， $\geq 60\text{kV}$ ；330kV 电压等级， $\geq 50\text{kV}$ ；60～220kV 电压等级， $\geq 40\text{kV}$ 。



DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》规定绝缘油击穿电压的标准：500kV 电压等级， $\geq 50\text{kV}$ ；66~220kV 电压等级， $\geq 35\text{kV}$ ；330kV 电压等级， $\geq 45\text{kV}$ ；35kV 及以下电压等级， $\geq 35\text{kV}$ 。

(4) 准备出厂、历史数据。

(5) 分解任务，编制任务操作单。

1.1.2 成立工作班组

根据班级具体人数分成若干个工作班组，每班组人数在 3~6 人为宜。

(1) 选定 1 名负责人。负责组织开展工作。

(2) 选定 1~2 名安全监督员。负责监督工作期间的安全措施是否到位，防止发生违反安全生产的行为，保证工作班组成员和仪器设备的安全。

(3) 选定操作员。工作班组其余人员为操作员，轮流或协助操作，完成工作任务。

工作班组各岗位可轮流担任，尝试不同岗位责任和任务技能。

1.1.3 准备设备器具

(1) 绝缘油电气强度测试仪。用于产生符合试验要求的电压。试验电压值是电压的有效值，电压调节可采用自动升压方法，易于得到匀速升压效果。

(2) 试验油杯。试验油杯由杯体与电极两部分组成。油杯杯体是由电瓷、玻璃、塑料材料制成的容器，最小容积应为 300mL，杯体可密闭。电极则由铜、黄铜、青铜、不锈钢材料制成，呈平板形，水平安装，板间距 2.5mm。电极间隙用块规校准，要求精确至 0.1mm。电极轴浸入试油的深度应为 40mm 左右。

1.1.4 安全工作要求

(1) 执行任务过程中要严格遵守 DL 409—1991《电业安全工作规程》。

(2) 分析危险因素、提出防控措施。

1) 高压的电极造成触电伤害。保持安全距离，严禁触碰电极，仪器接地点可靠接地。

2) 高温的试样造成烧烫伤。保持安全距离，佩戴防护手套和防护眼镜，加压过程严禁打开高压舱保护罩。

(3) 采取组织措施保证安全。执行工作许可、工作监护的规定。

(4) 高压设备带电时的安全距离见表 1.1。

表 1.1 高压设备带电时的安全距离

电压等级/kV	安全距离/m	电压等级/kV	安全距离/m
10 及以下	0.70	60~110	1.50
20~35	1.00	154	2.00
44	1.20	220	3.00



1.1.5 执行任务

(1) 取油样。准备取样瓶，取样瓶要用清洁、干燥的专用取样器，并贴好标签。

(2) 准备样品。准备油杯，操作应在清洁干燥的场所进行，以免污染试样。处理油样，使油中杂质均匀分布但又不形成气泡。静置油样，油杯注油并静止 15min。油样试验时应和室温接近。

(3) 检查电极表面，并调整间距电极距离为 (2.50 ± 0.05) mm，电极轴浸入试油的深度应为 40mm 左右。

(4) 设定测试仪有关参数，主要是升压速率，启动仪器测量。

(5) 观察现象。电极间发生瞬间火花（听得见的或可见的）、恒定的电弧。人工断开电路，或要求测试仪能在击穿发生 0.02s 内自动断开电路，切断电压。记录数据。

(6) 用清洁干燥的玻璃棒轻轻搅拌电极间试样，搅拌时尽可能地避免空气泡的产生。静置 1~5min，进行下一次加压，重复进行 6 次试验，取其平均值。

(7) 关闭仪器电源。

1.1.6 结束任务

(1) 小组总结会。检查反馈学生任务完成情况，学生汇报自评、教师评价。

(2) 编制任务报告表。要求编制工作任务流程图、任务操作表、报告表。

1.1.7 知识链接

1.1.7.1 变压器油电气性能

(1) 击穿电压。变压器油的击穿电压是其耐受极限电压的能力，是保证变压器油安全运行的重要因素。运行中变压器油的击穿可直接导致设备的损坏。

(2) 介质损耗因数。该参数反映油中泄漏电流引起的功率损失的大小。它敏感地反映油的老化及污染程度，对反映油的绝缘水平有重要意义。

1.1.7.2 变压器油中的杂质

(1) 水分。变压器油中水分杂质的来源有由外侵入和油自身产生两种途径。外部途径主要有如变压器呼吸器吸潮、少油设备（互感器、套管）油取样时破坏真空使潮气进入油中。

变压器油中的水分杂质对油本身以及用油设备的绝缘有较大危害，运行的变压器油含有微量的水分就会急剧降低油的击穿电压，使油的介质损耗因数增加，使绝缘纤维老化，并使其介质损耗升高。

(2) 其他杂质。油品中的其他杂质是指存在于油品中所有不溶于油的沉淀或悬浮状态的物质，这些杂质主要为沙粒、硅胶颗粒、金属屑等，一般是因为油在高温电弧的作用下，因氧化分解而产生的。变压器油中的这些杂质对油的电气性能影响也很大，影响电气设备的安全经济运行。

1.1.7.3 变压器油物理性能

(1) 凝点（倾点）。凝点（倾点）是表征油品低温流动性的指标。凝点是指液体油品



在一定条件下,失去流动性的最高温度。而倾点则是油品在一定条件下,能够流动的最低温度。

(2) 黏度。油品的黏度对油的冷却效果的发挥有着密切的关系,黏度越低,油品的流动性越好,冷却效果也越好。因为低黏度有助于变压器油流经油道,浸渍绝缘,充分循环。

变压器油的低凝点与倾点对变压器油的应用具有非常重要的意义。如变压器凝点(倾点)低,则可在较低的环境温度下保持低黏度,从而保证运行变压器内部的正常循环,确保绝缘和冷却效果。其黏度随温度的下降而上升,直到成为半固体,此时油的冷却效果几乎为零,因此,对于在寒带运行的变压器来说,油品必须有较低的倾点。

1.1.7.4 认识液体介质的击穿机理

在高电场下发生击穿的机理,主要分为电击穿理论和气泡击穿理论两种。

(1) 电击穿理论以液体分子由电子碰撞而发生游离为前提条件,主要用于解释纯净液体电介质的击穿,其击穿场强很高。

(2) 气泡击穿理论认为液体分子由电子碰撞而产生气泡,或在电场作用下因其他原因产生气泡,由气泡内气体放电而引起液体介质的热击穿。液体绝缘常因受潮而含有水分,并有从固体材料中脱落的纤维,由于水和纤维的介电常数非常大,在电场作用下,它们易极化,沿电场方向排列成杂质“小桥”。当“小桥”贯穿两极时,则由于水分及纤维等的电导大,引起流过杂质“小桥”的泄漏电流增大,发热增多,促使水分汽化,形成气泡;即使是杂质“小桥”未连通两极,由于纤维的存在,可使纤维端部油中场强显著增高,高场强下油发生游离分解出气体形成气泡,而气体的介电常数最小,分担的电压最高,其击穿场强比油低得多,所以气泡首先发生游离放电,游离出的带电质点再撞击油分子,使油又分解出气体,气体体积膨胀,游离进一步发展;游离的气泡不断增大,在电场作用下容易排列成连通两极的气体小桥时,就可能在气泡通道中形成击穿。“小桥”理论可以解释含有杂质液体的许多击穿现象。

1.1.7.5 认识影响液体介质击穿的因素

1. 油品质的影响

从“小桥”理论可知,由于液体中含有杂质,使液体介质击穿电压显著下降。杂质的存在将极大地降低液体的击穿电压;电场越均匀、电压作用时间越短,杂质的影响越大。含微量水分的变压器油的击穿电压大幅下降,当油中含水量达十万分之几时,对击穿电压就有明显影响。但是如果水分溶解于液体介质中,对击穿电压的影响却不明显。而如果水分在液体中呈现悬浮状态,则易形成杂质“小桥”使击穿电压显著下降。

2. 温度的影响

一般认为液体介质的击穿电压与温度的关系较复杂。受潮的油的击穿电压随温度升高而上升。其原因是油中悬浮状态的水分随温度升高而转入溶解状态,以致受潮的变压器油在温度较高时,击穿电压可能出现最大值。而当温度更高时,油中所含水分汽化增多,在油中产生大量气泡,击穿电压反而降低。干燥的油受温度影响较小。均匀电场油间隙的工频击穿电压随温度的升高而降低;在极不均匀的电场中,随温度上升,工频击穿电压也是下降;不论在均匀电场中还是在非均匀电场中,随温度上升,冲击击穿电压均单调地稍有



下降。

3. 电压作用时间的影响

油的击穿电压与电压作用时间有关。由于给绝缘油加压后杂质“小桥”形成所需的时间，所以油的击穿现象也就需要一定的时间。当电压作用时间较长时，油中杂质有足够的时间在间隙中形成杂质“小桥”，击穿电压下降。电压作用时间较短时，杂质来不及形成“小桥”，击穿电压就显得比较高。所以作用时间越短，击穿电压也就越高。可得知，1min 以后的击穿电压和长时间作用下的击穿电压已经相差不大。在电压作用时间短至几微秒时击穿电压很高，击穿有时延特性，属电击穿；电压作用时间为数十到数百微秒时，杂质的影响还不能显示出来，仍为电击穿，这时影响油隙击穿电压的主要因素是电场的均匀程度；电压作用时间更长时，杂质开始聚集，油隙的击穿开始出现热过程，于是击穿电压再度下降，为热击穿。

4. 压力的影响

不论电场均匀度如何，液压的大小决定了液体气泡中的气压，随液压的增加液体中气泡的电离电压增高和气体在油中的溶解度增大，因此液体介质的击穿电压随压力的增加而增大。

5. 电场均匀程度的影响

液体电介质击穿电压的分散性与电场的均匀程度有关，电场不均匀程度增加，击穿电压的分散性减小。

1.1.7.6 提高液体电介质击穿电压的方法

1. 提高以及保持油的品质

采用过滤等手段消除液体中的杂质，并且防止液体与空气接触从空气中吸收水分，该方法能够消除杂质“小桥”的成因，从而提高击穿电压，特别对均匀电场和持续时间较长的电压作用时间有效。

2. 覆盖层

在金属电极表面紧贴一层固体绝缘薄层，使“小桥”不能直接接触电极，从而很大程度上减小了泄漏电流，阻断了“小桥”热击穿过程的发展，适用于油本身品质较差、电场较均匀、电压作用时间较长的情况。在变压器中常利用较薄的绝缘纸包裹高压引线和绕组导线。

3. 绝缘层

在金属电极上紧贴较厚的固体绝缘层。因该固体介质的介电常数大于液体介质，而减小了电极附近的电场强度，防止了电极附近局部放电的发生，适用于不均匀电场。在变压器中常在高压引线和屏蔽环包裹较厚的绝缘层。

4. 屏障

在电极间油隙中放置固体绝缘板。它能机械地阻隔杂质“小桥”成串，而且能够在不均匀电场中起到聚集空间电荷、改善电场分布的作用，适用于均匀电场和不均匀电场中电压作用时间较长的情况。对于作用时间很短的冲击电压，则通过阻挡光子传播来阻碍流注的发展，提高冲击击穿电压。在变压器中常利用绝缘板做成圆筒、圆环等形状，放置在铁芯与绕组、低压绕组与高压绕组之间，并且常放置多个，将油隙分成几个小油隙。



任务 1.2 气体冲击电压放电

【任务导航】

了解冲击电压发生器的结构、产生冲击电压的原理和操作方法；了解用分压器与示波器测量冲击电压的方法；观察气体间隙放电、击穿现象；观察在均匀电场和不均匀电场下的气体间隙击穿电压以及不同幅值冲击电压作用下击穿电压波形中放电时延的变化。

1.2.1 准备相关技术资料

(1) 相关知识。气体介质在高电压、强电场作用下会出现亮光、响声导电等现象，它是因为气体微粒子发生电离而导致电极间贯穿性放电的引发现象。气体介质击穿与很多因素有关，其中主要的因素是电压、电极形状等；气体介质可在冲击电压下被击穿。

冲击电压试验是电力设备高压试验的基本项目之一，既可用于研究电力设备绝缘在遭受大气过电压（雷击）时的绝缘性能，又可用于研究电力设备遭受操作过电压时的绝缘性能。

(2) 规程有关条目。

1.2.2 成立工作班组

根据各自掌握技术资料的程度组合成立工作班组，每班组人数在 3~6 人为宜。

(1) 选定 1 名负责人。负责组织开展工作。

(2) 选定 1~2 名安全监督员。负责监督工作期间的安全措施是否到位，防止发生违反安全生产的行为，保证工作班组成员和仪器设备的安全。

(3) 选定操作员。工作班组其余人员为操作员，轮流或协助操作，完成工作任务。

工作班组各岗位可轮流担任，尝试不同岗位责任和任务技能。

1.2.3 准备设备器具

1. 冲击电压发生器

(1) 对冲击电压发生器的基本要求：

1) 可输出几十万甚至几百万伏的高电压，电压足够高才足以模拟雷电或操作过程产生的高压，用来试验电气设备的绝缘才有意义。

2) 电压具有一定波形，可模拟雷电或操作过电压的实际波形。

(2) 冲击电压发生器原理。目前的冲击电压发生器原理基本上是依据马克思（Marx）发明的冲击电压发生器原理。

冲击电压发生器原理接线图如图 1.1 所示。

冲击电压发生器产生高压的基本原理是“并联充电，串联放电”。

并联充电：通过硅堆 VD，使 $C_1 \sim C_4$ 均充电到 U ； $g_1 \sim g_4$ 球隙上电位差也为 U ， g_0 上无电压；调节 $g_1 \sim g_4$ 球隙距离，使其放电电压大于 U 。这是一个稳定的并联充电状态。

串联放电：当给点火球隙的针级送去脉冲电压，引起点火球隙放电，于是 C_1 的上极

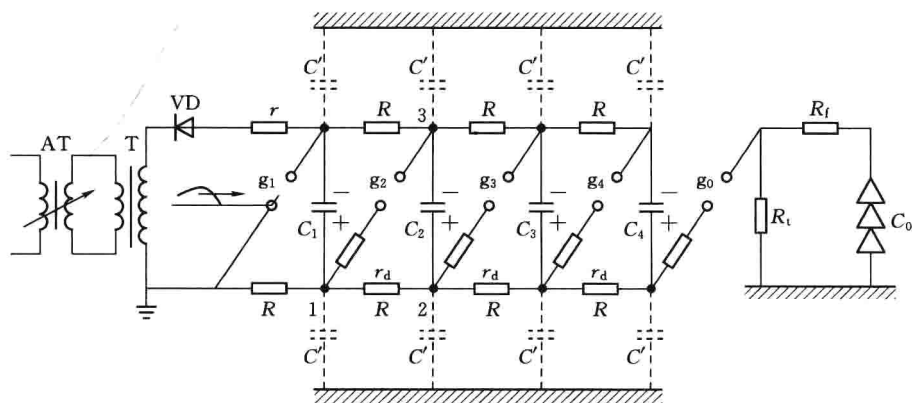


图 1.1 冲击电压发生器原理接线图

R —充电电阻； r —硅堆保护电阻， $r=(10\sim 20)R$ ； $C_1\sim C_4$ —主电容； r_d —阻尼电阻（阻尼波形振），

几欧至几十欧； g_1 —点火球隙； $g_2\sim g_4$ —中间球隙； g_0 —隔离球隙； R_t —波头电阻；

R_f —波尾电阻； C_0 —被试及测量设备的电容

板经 g_1 接地；点 1 电位由 0 变为 $-U$ ； C_1 、 C_2 有电阻 R 隔离， R 较大，在 g_1 放电瞬间，点 2、点 3 电位不可能突然改变，点 3 电位仍为 $+U$ 。 g_2 上的电位差上升为 $2U$ ， g_2 放电，点 2 电位为 $-2U$ 。同理， g_3 、 g_4 也跟着放电；隔离球隙 g_0 也放电，这时输出电压为 $C_1\sim C_4$ 上电压的总和，即 $-4U$ 。通过一组球隙逐次顺利完成串联放电过程。

可见冲击电压发生器靠一组球隙击穿来达到放电输出高压的目的，所以原理可概述为：电容并联充电，串联放电。

而波形则与两个电阻有关： R_t 与波头时间有关，称波头电阻； R_f 与波尾时间有关，称波尾电阻。输出电压波形大致如图 1.2 所示。

2. 放电棒

放电棒是利用绝缘材料加工而成。放电棒便于在室内外各项高电压试验中使用，特别在做直流耐压试验后，试品上有累积的电荷，进行对地放电，保证人身安全。

使用方法：将地线的另一端与大地连接，接地要可靠，把配制好的接地线插头插入放电棒的头端部位的插孔内。放电时应在试验完毕后，试验装置切断电源。放电时应先用放电棒前端的金属尖头，慢慢靠近已断开试验电源的试品。此为经过一放电电阻进行对地放电；然后再用放电棒上接地线上的钩子去钩住试品，进行第二次直接对地放电。

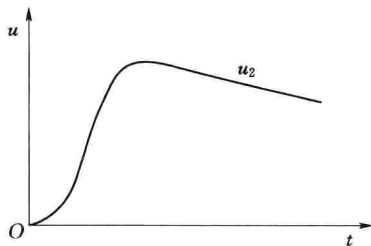


图 1.2 冲击电压输出波形

1.2.4 安全工作要求

- (1) 执行任务过程中要严格遵守 DL 409—1991《电业安全工作规程》。
- (2) 分析危险因素、提出防控措施。



- 1) 冲击高压易造成触电伤害。保持安全距离, 严禁触碰电极, 仪器接地点可靠接地。
- 2) 冲击高压易在接地装置上产生残压升高接地点电位, 要求试验场所有装置独立接地且接地电阻小于 4Ω 。
- 3) 电容储存电荷造成触电伤害, 测量之前要进行 2~3 次的预放电; 每次测试完毕切断电源, 都要将接地棒挂在充电电容器的高压端。
- (3) 采取组织措施保证安全。执行工作许可、工作监护的规定。

1.2.5 执行任务

- (1) 对冲击电压发生器进行接线并检查。调压器是否在零位, 示波器测量回路接线是否正确。
- (2) 检查接地棒是否接地良好, 置于冲击发生器电容器上。
- (3) 将球隙调节至适当位置。
- (4) 将接地棒从冲击电压发生器的电容器上取下, 作升压准备。
- (5) 开启数字示波器电源, 根据分压器分压后的电压幅值和被测冲击电压波形的时长参数调节示波器相应的测量参数。
- (6) 合闸。开始缓慢均匀升压, 启动点火装置, 使冲击电压发生器动作, 同时可在示波器上观察冲击电压波形。
- (7) 观察示波器上显示的冲击电压波形, 记录波形。
- (8) 改变输出电压幅值, 观察气隙的放电时延变化。
- (9) 试验完毕, 切断电源, 用接地棒将冲击电压发生器的充电电容放电, 并将接地棒挂在电容器高压端。

1.2.6 结束任务

- (1) 小组总结会。检查反馈学生任务完成情况, 学生汇报自评、教师评价。
- (2) 编制任务报告表。要求编制工作任务流程图、任务操作表、报告表。

1.2.7 知识链接

1.2.7.1 气体中带电质点的产生和消失

气体是电气设备中的常见的绝缘介质, 工程中使用得最多的是空气和 SF_6 气体。正常情况下, 气体是绝缘体, 但会存在少量的带电质点。在电场作用下, 这些带电的质点会作定向运动而形成微弱电流。但由于带电质点数量极少, 电流也就极弱小, 所以仍可认为气体是良好的绝缘体。

气体中带电质点的产生有两个途径: 一是气体本身发生游离; 二是气体中的金属电极发生表面游离。

物理上认为任何介质都是由原子组成的, 原子则由带正电的原子核和外层电子构成。由于原子核、电子所带正、负电荷相等, 故大多情况下原子显电中性。如果电子从外界吸收足够大的能量, 使原子中的一个或几个电子脱离原子核的束缚而形成自由电子, 而原子则因失去电子成为正离子, 则认为该原子发生了游离, 原子从中性质点成为游离状态, 气



体中就产生了带电质点。

游离的形式一般认为有以下几种方式：

(1) 碰撞游离。在电场作用下，电子被加速获得动能，如果它和气体原子发生碰撞，就可能使气体原子产生游离而分裂成正离子和电子。这种游离称为碰撞游离，这是气体中带电质点数目增加的重要原因。

(2) 光电离。由于光射线的原因所引起的游离过程称为光电离，同样在气体放电中起着重要作用。光其实是光子，光电离可看作光子与气体质点发生碰撞，产生正离子和自由电子，此时产生的电子称为光电子。可见光一般不能发生光电离，X射线、 γ 射线、剧烈反应过程中释放出的光子等可以引起光电离。

(3) 热游离。因气体分子热运动状态引起的游离称为热游离。一般认为其实质仍是碰撞游离和光游离，只是直接的能量来源不同而已。

(4) 表面游离。在气体中的金属电极表面游离出自由电子的现象称为表面游离。如离子在电场中向吸引其的电极运动，碰撞电极时使电极金属表面逸出电子，但一般是正离子碰撞阴极表面形成。金属表面受到射线的照射，也能发生表面游离。

在气体中产生带电质点的同时，也存在带电质点的消失过程。带电质点消失主要有扩散、中和、复合三种方式。

带电质点总是从高浓度区域流向低浓度区域，这个过程即为扩散，扩散的结果是使得原高带电质点浓度的区域浓度降低。

同时带电质点在电场中肯定受到电场力的作用作定向运动，最终汇入电极，此为中和，中和的结果也是使得带电质点数量减少。

电场中带正、负电荷的质点相遇，结合而还原成中性质点的过程，称为复合。复合的结果同样使得带电质点数量减少。

气体游离的过程中同时存在复合过程。在外加电场的作用下，气体介质最终是发展成击穿还是保持其绝缘能力，则取决于气体中带电质点的产生与消失的量的关系。

1.2.7.2 汤逊理论

20世纪初英国物理学家汤逊(J. S. Townsend)在大量实验的基础上总结出了均匀电场下窄气隙的击穿规律，如今命名为汤逊理论。

汤逊理论认为电子碰撞电离是气体放电的主要原因。如前述可知气体中总会有带电的质点，且多为电子，称为一次电子。该电子在外电场作用下发生运动，产生碰撞电离，形成更多的电子。二次电子则主要来源于正离子碰撞阴极，从阴极逸出电子，形成电流；电子数量越来越多，可由指数函数规律增多，此为电子崩。电子崩使气隙中带电质点数大增，故电流也大大增加。

电子崩的出现形成了二次电子，二次电子的出现是气体自持放电的必要条件。如果当外界游离因素消失就不能维持放电发展的，必须依靠外界因素支持的放电称为非自持放电。而即使外界游离因素不复存在，气隙中游离过程也能继续下去的放电称为自持放电。放电进入自持阶段，并最终导致击穿。

由非自持放电转入自持放电的电压称为起始放电电压。对均匀电场，气隙被击穿，此后可形成辉光放电、火花放电或电弧放电，起始放电电压就是气隙的击穿电压。对于不均



匀电场,则在大曲率电极周围电场集中的区域发生电晕放电,击穿电压比起始放电电压可能高很多。

以上描述均匀电场气隙的击穿放电理论称为汤逊理论。可见,汤逊理论的核心是:

- (1) 电离的主要因素是电子的空间碰撞电离和正离子碰撞阴极产生表面电离。
- (2) 自持放电是气体间隙击穿的必要条件。

汤逊理论是在低气压、 Pd 值较小的条件下进行的放电实验的基础上建立起来的,这一放电理论能较好地解释低气压短间隙中的放电现象。因此,汤逊理论的适用范围是低气压短间隙 ($Pd < 26.66 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$)。

1.2.7.3 帕邢定律

当气体和电极材料一定时,气隙的击穿电压是气压 p 与间隙距离 x 乘积的函数。这个关系在汤逊理论提出之前就已为帕邢 (Paschen) 从实验中总结出来,故称为帕邢定律。帕邢定律为汤逊理论奠定了实验基础,而汤逊理论为帕邢定律提供了理论依据。帕邢定律最明显的表述则为各气体介质当电极材料一定时存在击穿电压最小值。击穿电压存在最小值是因为当极间距离一定时,改变气体气压,电子在运动过程中两次碰撞之间走过的路径 (自由行径) 很小,电子积累的能量不足以引起气体分子发生游离,因而击穿电压升高;反之,击穿电压也升高。而当压力一定时,改变极间距离,也将改变击穿电压。增大极间距离,必然要升高电压才能维持足够的电场强度,使间隙击穿;反之,减小极间距离,而极间距离太短时,则电子有阴极运动到阳极时,碰撞次数太少,击穿电压也会升高。

由帕邢定律可知,当极间距离 d 不变时,提高气压或降低气压到真空,都可以提高气隙的击穿电压,这一概念具有十分重要的实用意义。

1.2.7.4 流注理论

汤逊理论是在低气压、极小间隙的条件下进行放电实验基础上总结出来的,对低气压下小间隙放电现象能作出很好的解释,但在高压、长气隙中的放电现象则无法用汤逊理论加以解释,两者间的主要差异表现在以下几个方面:

(1) 放电外形。根据汤逊理论,气体放电应在整个间隙中均匀连续地发展。低气压下气体放电发光区确实占据了整个间隙空间,如辉光放电。但在大气压下,气体击穿时出现的却是带有分支的明亮细通道。

(2) 放电时间。根据汤逊理论,间隙完成击穿,需要好几次循环:形成电子崩,正离子到达阴极产生二次电子,又形成更多的电子崩。完成击穿需要一定的时间,但实测到的在大气压下气体的放电时间要短得多。

(3) 击穿电压。当 Pd 值较小时,根据汤逊自持放电条件计算的击穿电压与实测值比较一致;但当 Pd 值很大时,击穿电压计算值与实测值有很大出入。

(4) 阴极材料的影响。根据汤逊理论,阴极材料的性质在击穿过程中应起一定作用。实验表明,低气压下阴极材料对击穿电压有一定影响,但大气压下空气中实测到的击穿电压却与阴极材料无关。

由此可见,汤逊理论只适用于一定的 Pd 范围,当 $Pd > 26.66 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$ 后,击穿过程就将发生改变,不能用汤逊理论来解释了,而流注理论则能够弥补汤逊理论的不足,较好地解释长气隙的大气放电现象。