

供用电工人技师培训教材

电 气 试 验

孙成宝 主编

孙方汉 陈绍英 韩芳 张亮 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



供用电工人技师培训教材

孙成宝 主编

电 气 试 验

孙方汉 陈绍英 韩 芳 张 亮 编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

《供用电工人技师培训教材》是根据国家标准、电力行业标准、国家职业技能鉴定规范(电力行业)等标准规范中对职业技师(高级技师)人员的要求而编制的岗位技能培训、职业技能鉴定的成套教材,是严格紧扣和结合国家职业技师人员应具备的必备知识、技能要求和鉴定内容进行编写的,同时与《全国供用电工人技能培训教材(初、中、高)》相衔接的,强调以技能为核心,知识为技能服务、满足技能需要的原则,叙述技能要求时多采用范例说明的形式,宗旨在为全国供用电企业生产人员提供一套技师岗位技能培训和职业技能鉴定的教材。

本分册是《供用电工人技师培训教材》之一,共七章,主要内容有电气绝缘基础理论知识、液体、固体和组合绝缘的耐电特性、电气设备交流耐压试验有关的几个问题、内外过电压及其常见事故分析、电力变压器和电压互感器的特性要求与检测试验、并联电容器和高次谐波及其测试、变压器油中溶解气体的分析与判断等知识。

本套教材是全国供用电企业生产技师人员岗位技能培训和职业技能鉴定的指定教材,本分册是电气试验技师人员培训教材,也可作为电气试验高级工、高级技师、技术人员和管理干部等参考教材。



图书在版编目(CIP)数据

电气试验/孙成宝主编;孙方汉等编. —北京:中国电力出版社, 2005

供用电工人技师培训教材

ISBN 7-5083-3212-1

I. 电… II. ①孙…②孙… III. 电气设备-试验-技术培训-教材 IV. TM64-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第064304号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2005年10月第一版 2005年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9.5印张 228千字

印数 0001—3000册 定价 16.00元

版权专有 翻印必究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



大力开展职工岗位技能培训和职业技能鉴定,提高供用电人员的岗位能力和生产技能,是当前电力企业教育培训的重点,也是提高劳动生产率和工作效率的重要手段。而岗位培训和技能考核的教材建设,是搞好培训、做好鉴定、提高素质、直接为生产人员服务的一项重要基础工作。

随着电力事业的发展,电力系统容量的增加,高压甚至超高压供电不断增多,新型供用电技术和设备不断涌现,对供用电人员提出更高要求。为了适应电力生产安全经济运行,提高供用电人员的技术素质和管理水平,由中国电力出版社组织、孙成宝主编的《供用电工人技师培训教材》,是供用电人员培训工作中的一件大事。

《供用电工人技师培训教材》具有的特点是:首先,本套教材的编写依据,是部颁《国家职业技能鉴定规范》、《电力工人技术等级标准》、《关于电力工人培训教材建设意见》以及有关电力生产岗位规范和新颁国家标准、电力行业标准。其二,严格与《全国供用电工人技能培训教材》(初级工、中级工、高级工)相衔接,内容两相呼应。其三,强调以技能为核心,知识为技能服务、满足技能需要的原则,叙述技能要求时多采用范例说明的形式,因此不仅适用于具有高中及以上文化程度的供用电工人高级工、技师或高级技师人员的培训,而且对现场工程技术人员也有参考价值。其四,本套教材编写、出版力量强,组织全国供电企业30多位专家和技术人员,他们有相当丰富的工作经验和专业理论水平。另外,作为全国首批认定的15家全国优秀出版社之一的中国电力出版社,领导亲自挂帅,组织20位编辑班子,精心策划,统一指导,精雕细刻,质量一流。

本套教材突出电力行业岗位培训和职业技能考核特点,针对性、适应性强,是全国供用电人员岗位技能培训和职业技能鉴定的理想教材。它的出版发行,必将对我国供用电人员培训与鉴定工作的有效开展和素质提高,产生积极的影响。

由于编写时间紧迫,编写人员水平有限,对本套教材疏误之处,恳请广大读者批评指正。

主 编
2005年5月



《供用电工人技师培训教材》

编者的话

《全国供用电工人技师培训教材》(电气试验)是根据《中华人民共和国职业技能鉴定规范·电气试验》电气试验技师鉴定内容的要求编写的。考虑到电气试验技师应知应会中的许多知识,在《全国供用电工人技能培训教材·电气试验》(初、中、高级工)中已有介绍,因此不再一一重复。读者如有需要这些内容可从上述书籍中查找。

电气试验工作是对电力系统中运行的各种主要电气设备进行测试,通过测试来判断其是否符合技术标准规定的技术条件,投入运行是否安全可靠,以及是否存在潜在缺陷,甚至要找出缺陷所在的部位,因此要求试验人员不仅会操作仪器设备,而且要具备一定的绝缘理论知识,并熟悉现行的电力技术标准、技术规程的相关内容。特别是作为电气试验技师,必须具备一定的专业技师理论知识,并掌握技术标准中的有关内容。因此在编写本教材时,结合《职业技能鉴定规范》的要求,对电气绝缘基础理论知识和主要电气设备技术标准方面的专业知识作了较为系统的阐述。

参加本书编写的有孙方汉、陈绍英、韩芳和张亮。限于编者水平,难免存在错误和不妥之处,敬请使用单位和读者提出宝贵意见,以便再版时改正。

编者

2005年5月



前言
编者的话

第一章 电气绝缘基础理论知识	1
第一节 气体介质中的放电现象.....	1
第二节 电场是否均匀对空气间隙击穿电压的影响.....	3
第三节 影响气体间隙击穿电压的其他因素.....	5
第四节 持续作用电压下空气的击穿电压.....	6
第五节 冲击电压作用下空气的击穿电压及伏秒特性.....	9
复习题.....	15
第二章 液体、固体和组合绝缘耐电特性	16
第一节 变压器油击穿机理.....	16
第二节 固体介质击穿机理.....	20
第三节 组合绝缘的耐电特性.....	26
第四节 油纸绝缘允许电场强度.....	33
复习题.....	37
第三章 电气设备交流耐压试验有关问题	38
第一节 感应耐压试验及倍频试验电源.....	38
第二节 交流耐压试验时的容量补偿.....	40
第三节 耐压试验时对试验电压波形、电压测量和升压速度等的要求.....	43
第四节 感应耐压试验时的电位分布和容量补偿.....	55
第五节 耐压试验时调压方法不当引起的试验电压跳跃和波动.....	57
复习题.....	58
第四章 内、外过电压及其常见事故分析	60
第一节 过电压种类.....	60

第二节	过电压保护	62
第三节	内、外过电压典型事故分析	70
第四节	金属氧化物避雷器技术参数的选择和现场试验	75
复习题	85
第五章	电力变压器和电压互感器的特性要求与检测试验	86
第一节	电力变压器的电磁理论及绕组结构介绍	86
第二节	电力变压器的特性要求	96
第三节	电力变压器特性试验数据校正及接线误差规避	103
第四节	利用电力变压器特性数据指标采用简易测试方法判断变压器真实容量	111
第五节	电压互感器的技术特性及现场试验	112
复习题	122
第六章	并联电容器、高次谐波及其测试	124
第一节	并联电容器的浸渍剂及有机污染物斯德哥尔摩公约 (POPs 公约)	124
第二节	并联电容器串联电抗器	126
第三节	谐波测试	132
复习题	136
第七章	变压器油中溶解气体的分析与判断	137
第一节	变压器油中产生气体的原因	137
第二节	油中溶解气体色谱分析的检测与判断	137
复习题	144

电气绝缘基础理论知识

本章介绍高压绝缘的基本理论，主要包括气体介质中的放电现象、击穿机理、电场分布对介质击穿的影响、空气间隙的工频击穿电压和冲击击穿电压，以及伏秒特性与绝缘配合等。

在电气设备中，电气绝缘介质又称绝缘材料。随着电力系统运行电压的提高和大容量电气设备的出现，这就要求电气绝缘材料应具有优良的电气特性、物理特性和化学特性，而这些特性与绝缘材料的分子结构有关。根据绝缘材料的分子结构，又可以分为中性分子结构、弱极性分子结构和极性分子结构。有关这方面的内容，已在《全国供用电工人技能培训教材 电气试验 中级工》中有详细介绍，这里不再重复。根据绝缘材料的化学组成成分，又可以分为有机绝缘材料和无机绝缘材料；根据其聚集状态，又可以分成气态、液态和固态。

下面首先介绍空气间隙的电气绝缘性能。

第一节 气体介质中的放电现象

电力系统架空线路和电气设备的外绝缘通常采用空气间隙作为绝缘隔离。气体在正常状态下是良好的绝缘介质，但当电极间电压超过某一数值时，气体会突然失去绝缘能力而发生放电，这种现象称为击穿。为了解释气体击穿放电的发展过程，科学家提出了“电子崩”理论，为气体放电的研究提供了理论根据。下面主要讨论气体间隙的绝缘特性、如何选择绝缘距离，以及有关提高气体间隙击穿电压等问题。有关气体介质的击穿过程，在高级工技能培训教材中已有介绍，本节只对常见的气体介质中的放电现象作一简要补充。

一、概述

气体处于正常状态，隔绝各种外界影响时，是不导电的。实际上，空气不可能完全隔绝各种外界影响。来自高空中的紫外线、太空中的宇宙射线，以及来自地球内部的放射性辐射等作用，无不对大气产生一定的影响。由于宇宙射线和地层放射性物质的放射线作用，在空气中会产生少量带电粒子（电子和正负离子）。一般情况下，大气中的正负离子数约为每立方厘米 1000 对，所以空气不是最好的绝缘体。

当空气间隙上加上电压时，这些带电粒子就开始在电场力的作用下运动，产生微弱的电流。如果增高空气间隙上的电压，由于极间电场加强，电子运动速度加快，积累很大的动能，碰撞气体中的中性分子，使其失去电子变为带电的离子（称为游离）。这种碰撞游离一旦发生，越来越剧烈，被碰撞出来的新电子在强电场的作用下又将产生新的碰撞游离。这种现象就如同山顶滚下来的雪球引起雪崩现象一样，因此称为电子崩。当空气间隙中出现电子崩后，由于存在正的空间电荷，使电场发生畸变。如果外电场足够强，形成许多电子崩汇合在一起，称为“流注”现象。当流注贯穿整个空气间隙时，游离非常强烈，电子在流注通道



中高速流动，出现发光发热，产生热游离，使空气间隙击穿放电。根据气体压力、电源功率、电极形状、电场强度的不同，气体放电可以具有多种不同形式。

二、气体放电的不同形式

(一) 辉光放电

在一密闭的放电管中，对其进行抽真空，以降低气体压力，然后对放电管施加某一可调电压，并在回路中串入一个较大的电阻，以控制电源功率。调节电源电压，当外施电压增加到某一数值时，回路中的电流突然出现明显的增加，管内阴极和阳极间忽然出现发光现象，这种放电形式称为辉光放电。辉光放电的特点是放电电流密度较小，放电区域通常占据整个电极间的空间。霓虹管中的放电就是辉光放电的例子，管中所充气体不同，发光颜色也不同。

(二) 电弧放电

如果在上述例子中，减小回路中的电阻，则电源功率增加，电流随之增加。当电流增加到一定数值时，放电通道收细，放电电流密度增大，放电管越来越亮，管端的电压则反而降低。这说明管中放电通道的电导越来越大。这种放电形式称为电弧放电。电弧放电具有短路的特征，电流密度极大，温度极高。

在上例中，如果逐渐恢复放电管中的大气压力，亦即逐渐取消抽真空，则当放电管中的压力逐渐恢复到大气压时，放电管中的放电通道也逐渐收细，放电不再占满整个空间，形成电弧放电。实际上，在普通大气压下，气体击穿后总是形成收细的发光放电通道，而不是辉光放电。

(三) 火花放电

如果放电回路的阻抗很大，限制了放电电流，则电极间的放电电流时断时续，即出现断续的明亮火花，这种现象称为火花放电。所以出现火花放电，是因为间隙击穿后，形成火花，电流突增，这就使外电路中阻抗上的压降也突增，使放电间隙上的电压降低，以致火花不能维持而熄灭。火花熄灭后，回路中的电流骤然降低，外电路阻抗上的压降随之减小，放电间隙上的端电压重又增加，使间隙再次击穿。如此周而复始，形成断续的火花放电。

(四) 电晕放电

如果空气间隙电极的曲率半径与电极间距离之比的比值较大，亦即电场比较均匀，则当电极间电压升高到一定数值时，间隙突然击穿，放电立即形成。反之，如果电极曲率半径很小，而电极间距离又很远，则整个间隙电场极不均匀，电极附近的电场强度最强，这时随着电压的升高，紧靠电极的电场最强处首先出现发光层，电路中出现微小放电电流，随着电压升高，发光层逐渐扩大，放电电流也随之增大，这种现象称为电晕放电。发生电晕放电时，气体间隙的大部分尚未丧失绝缘性能，放电电流很小，间隙仍能耐受住电压的作用，亦即尚未击穿。

(五) 刷状放电

当空气间隙发生电晕放电时，如果电压继续升高，会从电晕电极伸展出许多较明亮的细小放电通道，这种现象称为刷状放电。如果电压再继续升高，则整个间隙会出现击穿放电，形成电弧放电或火花放电，具体形成哪种放电要由回路参数和电源功率来决定。

电力系统的架空线路和电气设备外绝缘较多采用大气作为绝缘间隙。空气的压力一般为

1个大气压，因此可能发生的间隙放电只能是上面列举的火花放电、电晕放电、刷状放电和电弧放电。

三、气体状态对间隙击穿电压的影响

气体压力增高时，间隙的放电电压也增高。这个结论早在1889年由巴申提出，称为巴申定理。当气体和电极材料一定时，间隙击穿电压是气压和间隙距离乘积的函数，即当间隙距离不变时，如果气压增加一倍，放电电压也增高一倍。但是当气体压力过小时，由于电子在运动中很少遇到气体分子，不容易出现碰撞游离，因此击穿电压反而升高。因此在高压断路器中有时采用压缩空气以提高间隙的绝缘强度，有时采用真空来提高间隙的绝缘强度。采用压缩空气时，在高压下如果放电，空气中的氧容易引起绝缘物燃烧，因此常用氢、氮、二氧化碳代替空气。

四、气体种类对间隙击穿电压的影响

对于高压架空线路、其他不采取密封措施并且也没有填充液体或包绕固体绝缘物的电气设备，导体的相间和对地绝缘主要依靠空气间隙。但是有些电气设备采取密封措施，并充以某种电气性能优良的气体，以获得良好的电气性能和其他优良的技术性能，这种状况已十分常见。

有些含卤族元素的气体，如六氟化硫（安利瓦斯）、二氯二氟化碳（弗雷翁）、四氯化碳等，其击穿电压要比空气高许多倍，称为高强度气体。

六氟化硫气体近几年来已逐渐得到广泛使用。六氟化硫的抗电强度是空气的2.5倍；无味、无毒、不燃烧；化学性能稳定，水、酸、碱等都不能使它分解，铜、氧气、磷及卤族元素即使在热的情况下也不会与之起反应；液化温度很低（ -62°C ），可压缩到 $20 \times 0.1\text{MPa}$ ，有优良的灭弧性能，比空气强100倍；在均匀电场中仅在 $3 \times 0.1\text{MPa}$ 下就大约与变压器油的抗电强度相等。

六氟化硫的缺点是要求严格密封，控制水分渗入，否则在击穿放电时，电弧的高温可使其分解产生有毒、有腐蚀性的气体。六氟化硫气体的另一个缺点是绝缘性能受电场均匀程度的影响很大，如果电场不均匀，其击穿强度大大下降。

六氟化硫和氮气混合使用时，如果六氟化硫的含量达到30%以上，混合气体的绝缘强度与全充六氟化硫气体时的绝缘强度接近相同，而且对减小腐蚀有重要意义。

第二节 电场是否均匀对空气间隙击穿电压的影响

前面已经说到，气体间隙的击穿过程是先形成电子崩，然后电子崩转化为流注的过程。因此，影响气体间隙放电电压的因素主要是电场的分布形式、外加电压的波形和气体介质的状态、周围环境等因素。下面重点介绍电场是否均匀对气体间隙击穿的影响。

一、均匀电场中气体的击穿过程

实验证明：在均匀电场中，空气的击穿场强约为 $30\text{kV}(\text{幅值})/\text{cm}$ 。为了分析均匀电场中气体的击穿过程，可以用图1-1的曲线来说明。

在正常情况下，气体间隙的区域内由于受紫外线、宇宙射线等诸多外部因素的作用，产生少量的带电质点。与此同时，正负带电质点又不断发生复合。在这两种过程作用下，气体空间出现了一定浓度的自由带电质点。电极间施加电压后，带电质点沿电场运动，回路中出



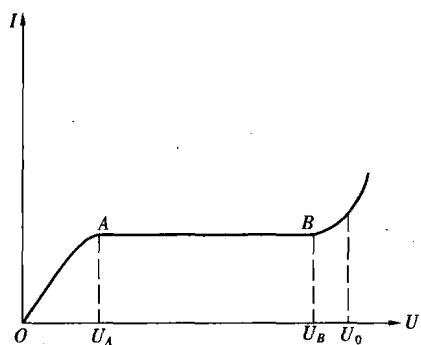


图 1-1 气体击穿前电流随电压的变化

现电流。外施电压 U 逐渐升高，电流 I 也发生变化，如图 1-1 所示。起初，电流 I 随电压 U 的升高而升高，这是由于带电质点在电场作用下运动速度加大，由于复合而导致带电质点消失的数目减少，因此带电质点到达电极的数目相应增多。

当电压 U 升高到 U_A 附近之后，电流就趋于饱和，这是由于间隙中游离产生的带电质点已全部落入电极。故电流大小仅取决于外部游离因素，与电压数值变化无关。饱和电流数值一般极为微小，在 10^{-19}A/cm^2 数量级。所以这时气体仍处于良好的绝缘状态。

当电压继续升高超过 U_B 时，由于间隙中的电子在强电场作用下，快速奔向阳极的途中，积累起足够大的功能，从而出现碰撞游离，产生新的带电质点，于是出现电流升高。如外施电压小于 U_0 ，间隙内虽有电流升高，但数值仍然极为微小，空气间隙尚未被击穿。而且，这时的电流要依靠外部因素游离产生带电质点来维持，一旦取消外游离因素，那么电流随即消失。因此这类放电称为非自持放电。

当外施电压达到 U_0 以上时，情况有了变化，气体中发生强烈的碰撞游离，电流剧增。这时，气体中的游离过程可只靠电场作用自行维持下去，即使取消外游离因素，电流也不会消失。因此， U_0 以后的放电形式也称为自持放电。如电场比较均匀，空气间隙一旦出现自持放电，则间隙将被击穿，形成火花放电或电弧放电。

空气间隙击穿的发展过程，就是前面已提到过的首先形成电子崩，电子崩再转化为流注的过程。

二、稍不均匀电场中气体的击穿过程

从放电的观点来看，电场的均匀程度，可以用能否维持电晕放电来划分。如果不均匀电场达到可以维持电晕放电的程度，一般可称为极不均匀电场。虽然电场不均匀，但还不能维持稳定的电晕放电，一旦放电达到自持，必然会导致整个间隙立即击穿，就称为稍不均匀电场。

在稍不均匀电场空气间隙中，当大曲率电极附近由于电场不均匀而首先出现足够强烈的碰撞游离时，实际上整个间隙中很大一部分碰撞游离也都已达到相当程度。这时，在大曲率电极强电场区出现的初始电子崩发展起来，经过间隙中的相当一部分后，形成流注。而流注一经产生，加强了前方电场，随即发展成贯通整个间隙，导致间隙完全击穿。对于稍不均匀电场，和均匀电场一样，击穿电压就是其自持放电电压。

三、极不均匀电场中气体的击穿过程

如果电极间距离与电极曲率半径之比非常大，则电场极不均匀。当大曲率电极附近很小范围内电子碰撞游离已达到相当程度时，间隙中大部分区域内游离程度仍然极小，实际上可以忽略不计。这时，初始电子崩只在大曲率电极很小的范围内发展起来，即使出现自持放电后，如果电压不是够高，游离区只局限于大曲率电极附近的很小范围内，开始出现薄薄的紫色莹光层。这时电流虽较前增加，但仍然极小，间隙没有击穿。这种放电现象，就是电晕放电。

随着电压增加，电晕层扩大，电晕电流增大。当电压增加到足够高时，在间隙中突然出



现贯通两电极的放电通道，出现击穿。由此可见，在极不均匀电场中，间隙击穿电压远高于自持放电电压，这时的自持放电电压只是开始发生电晕的电压，称为电晕起始电压。电场越不均匀，击穿电压与开始发生电晕的电晕起始电压间差别也越大。

由上述分析可见，从放电的观点来看，电场的均匀程度，可以用能否维持电晕放电来划分。如果虽然电场不均匀，但却不能维持稳定的电晕放电，一旦出现自持放电，立即导致整个间隙击穿，这种电场，只能算作稍不均匀电场，不能算作极不均匀电场。反之，如果是不均匀电场，则应能维持电晕放电，亦即，当电极附近很小的区域内出现自持放电时，整个间隙并不立即击穿，甚至长时间不击穿，电极附近的自持放电以电晕形式出现。这样的电场称为极不均匀电场。

第三节 影响气体间隙击穿电压的其他因素

一、极性效应

在工程实践中碰到的空气间隙大都属于不均匀电场。不均匀电场的击穿放电电压要比均匀电场小得多，而且还和电极的极性有关。对于棒—板间隙，当棒为正极时击穿电压最低，10cm以下的间隙平均击穿场强约为7.5kV/cm。当棒为负极时约达20kV/cm。如间隙在米以上，棒为正极时的击穿强度更低，只有4.47kV/cm。因此可以得出结论：电场越不均匀、愈不对称，则正极性击穿电压就愈低。这种极性效应是由于棒电极附近正的空间电荷所起的电场作用引起的。

棒—棒间隙和棒—板间隙都是极不均匀电场的典型例子。它们的击穿电压具有代表性。工程上遇到很不均匀的电场时，一般根据这些典型电极的击穿电压数据来估算绝缘距离。如果电场分布不对称，可参照棒—板电极的数据；如果电场分布对称，则参照棒—棒电极的数据。

对于棒—板间隙，游离过程总是先从棒电极附近开始。棒的极性不同时，空间电荷的作用也是不同的，因此棒的极性对间隙击穿电压有影响。根据实验数据证明，棒为正极性时的击穿电压要比棒为负极性时的击穿电压低得多。这称为极性效应。图1-2所示为直流电压下，棒—板空气间隙的击穿电压、棒的极性和电极间距离之间的关系。

对于棒—棒间隙，极性效应极为微弱，这在后面还有介绍。

二、击穿电压和电压种类的关系

气体间隙的击穿电压和电压种类有关。直流电压、工频交流电压是一类，称为持续作用电压。这类电压的变化速度是极为缓慢的，相比之下，放电发展所需时间可以忽略不计。而雷闪造成的电压则持续时间极短，以微秒(10^{-6} s)计，秒为冲击电压。在冲击电压作用时，放电发

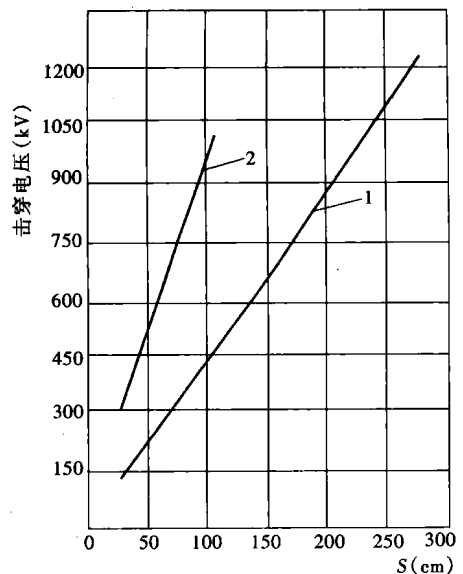


图 1-2 直流电压下棒—板空气间隙的击穿电压和电极间距离的关系
1—正极性；2—负极性



展速度就不能忽略不计。这时的击穿特性就具有新的特点。

三、击穿电压、气体种类和气体状态之间的关系

气体的击穿电压和气体的种类有关，这是因为不同气体中由电子形成负离子的概率不同，电子的平均自由行程也不同，因而电子从电场积聚动能的本领也各异。

气体的击穿电压还和气体的状态有关。因为气体击穿过程中电子碰撞游离是关键的因素，而电子碰撞游离除决定于电场强度外，还和电子在气体中的自由行程长度有关。电子的自由行程大，它在电场中获得的能量也大，才有可能引起碰撞游离。因此气体的击穿电压和气体状态有关。

第四节 持续作用电压下空气的击穿电压

下面列举持续作用电压下空气间隙的击穿电压数值。所谓持续作用电压是指工频交流电压或直流电压。这些击穿电压数据是在将试验电压（工频电压或直流电压）从较小数值缓慢升高到击穿而获得的。试验一般是在标准大气压状态下进行的。

一、均匀电场中空气的击穿电压

在工程上，要想获得电极间距离很大的均匀电场有较大困难，这是因为电极间距离很大时，要消除电极的边缘效应而保持电场均匀，就需采用很大尺寸的电极。因此，比较容易获得的是空气间隙距离不太大的均匀电场的击穿电压数据。

均匀电场中空气间隙的击穿电压实验数据如图 1-3 所示。从图 1-3 可知，当间隙距离 $S > 1\text{cm}$ 时，均匀电场中空气的耐电强度最大值大致等于 30kV/cm 。

为了提高气体间隙的耐电强度，工程上常用的方法是抽高真空或者加大气压。如前所述：气体间隙的击穿过程是先形成电子崩，然后电子崩转化为流注的过程。而要形成流注，

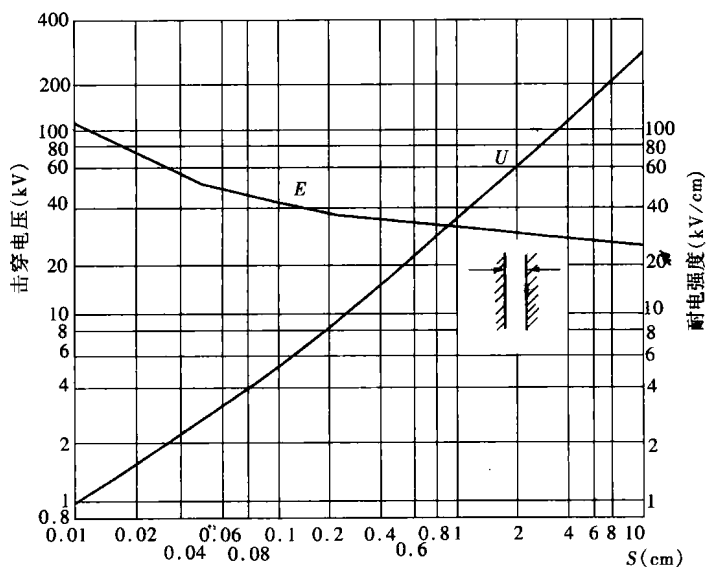


图 1-3 均匀电场中空气的击穿电压 U 及击穿场强 E 和电极间距离 S 的关系



并达到自持放电，每个电子在其从阴极到阳极的行程中需要出现足够多的游离碰撞次数，以造成足够强烈的游离。当气体间隙抽高真空时，气体极稀薄，虽然电子运动的平均自由行程很大，电子在两次碰撞后可积累起很大的动能，容易引起游离，但碰撞次数毕竟太少，难以形成电子崩和流注，因此真空度越高，击穿电压也越高。反之，如果加大空气间隙的气体压力，当气体压力很大时，气体密度很大，电子运动的平均自由行程极小，这时虽然碰撞次数大大增加，但电子不易积累足够的动能，引起游离的可能性反而大大降低，随着压力的进一步加大，击穿电压同样也增高。

二、不均匀电场中空气间隙的击穿电压

如图 1-4 所示为球—板电极空气间隙工频击穿电压与间隙距离的关系曲线。由图可见，在同一间隙距离下，球电极直径越大，电场均匀程度增加，击穿电压也越高。

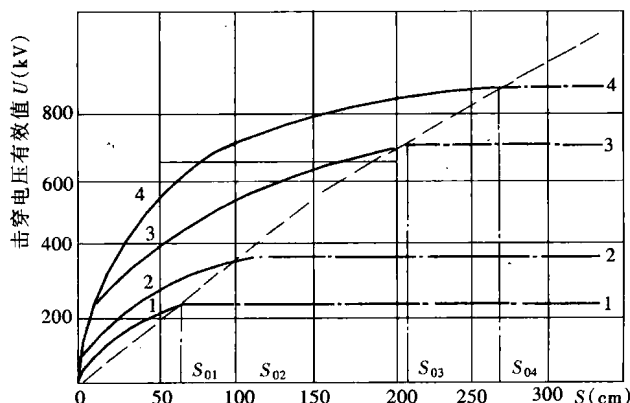


图 1-4 球—板电极间，不同球径时击穿电压与电极间距离的关系
1—球直径 $D = 12.5\text{cm}$ ；2— $D = 25\text{cm}$ ；3— $D = 50\text{cm}$ ；4— $D = 75\text{cm}$ ；虚线—棒—板
间隙击穿电压；点划线（1、2、3、4）—电晕起始电压

当相对于电极尺寸（球直径）来说，电极间距离 S 还不算很大时，电场分布还比较均匀，属于稍不均匀电场，从电压由低升高到间隙击穿为止，在间隙尚未击穿前，间隙中看不到电晕放电迹象。这和均匀电场中击穿时的情况相似。

当电极间距离 S 足够大时，电场极不均匀。这时，随着电压升高，达到还明显低于击穿电压的某个数值时，在电极附近强电场区域就出现电晕放电了。也就是说，当 $S < S_0$ 时，击穿电压和电晕起始电压重合，看不到明显的电晕出现，只看到击穿发生；而当 $S > S_0$ 时，电晕起始电压就明显地低于击穿电压了。出现电晕后，随着电压升高，电晕层逐渐扩大，然后在即将击穿之前出现刷状放电，最终才导致完全击穿。

由此可知，对于极不均匀电场，间隙击穿之前先出现电晕，而电晕的产生决定于紧贴电极表面处的最大电场强度。而间隙中的最大电场强度，当间隙距离较大时，主要决定于电极的曲率半径，而和间隙距离的关系很小。所以电晕起始电压和电极间距离的关系不大，主要决定于电极的形状（在图 1-4 中决定于球径的尺寸）。因此图 1-4 中代表电晕起始电压的点划线 1~4 几乎是水平的。

由上面分析可知，在极不均匀电场的间隙中，电晕起始电压主要决定于电极的曲率半径，增大电极曲率半径（如图 1-4 中增大球的直径）就能提高电晕起始电压。但是，对于

间隙距离很大的极不均匀电场，间隙的击穿电压则几乎与电极形状无关，只与间隙的距离有关。如图 1-4 所示，对于不同球径的电极，在电极间距离很大时，击穿电压差别不大，而且都接近于棒—板电极的击穿电压。这种情况下，影响间隙击穿电压的主要因素是间隙间的距离。因此，可以选择电场极不均匀的极端情况：棒（尖端）—板和棒（尖端）—棒（尖端）作为典型电极，它们的击穿电压数据就具有代表性。在工程上遇到极不均匀电场时，可以根据这些典型电极的击穿电压数据来估算绝缘距离。如果电场分布对称，可参照棒—棒电极的数据；如果电场分布不对称，则可参照棒—板电极的数据。

三、空气间隙的工频击穿电压

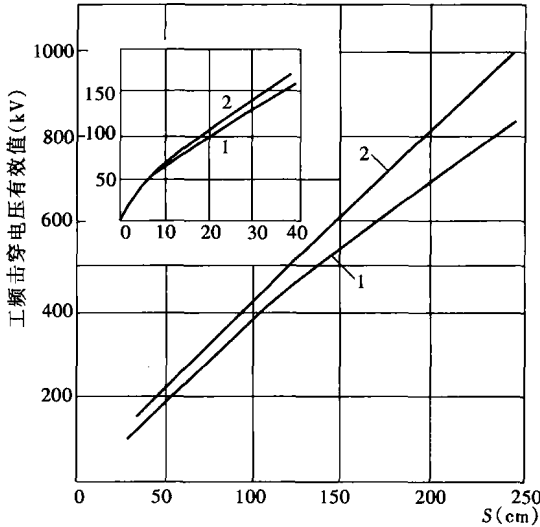


图 1-5 棒—板、棒—棒间隙的工频击穿电压（有效值）和电极间距离的关系曲线
1—棒—板（接地）；2—棒—棒（接地）

分别是较短和较长空气间隙直流电压下棒—板间隙及棒—棒间隙的击穿电压。

由前面图 1-2 可知，棒—板电极具有明显的极性效应：棒具有正极性时，平均击穿场强约为 4.5kV/cm；负极性时约为 10kV/cm。测量棒—棒间隙的击穿电压时，棒水平放置于离地 7.5m 的针式支持绝缘子柱上，棒长 4.5m。由图 1-7 可见，棒—棒的击穿电压在介于不同极性的棒—板的击穿电压之间。棒—棒电极仍具有微弱的极性效应。它之所以仍具有不大的极性效应是因为一极接地后，大地使电场分布稍有不对称，加强了高压电极处电场之故。所有两种情况下，在图 1-7 (b) 所列的范围内，击穿电压和距离都成直线关系。

前面已经说到，在直流电压下，正棒—负板的击穿电压与在交流工频电压下棒—板击穿电压的幅值相当接近。这是因为棒—板间隙的工频击穿点是在棒的极性为正，且电压达到幅值时发生的。

图 1-5 是工频电压下棒—板及棒—棒间隙的击穿电压（有效值）和电极间距离的关系曲线。在棒—棒电极间施加工频电压时，击穿点是在棒的极性为正、电压达到幅值时发生，并且其击穿电压幅值和直流电压下正棒—负板的击穿电压相当接近。从图中可知，除了起始部分外，击穿电压和距离近似成直线关系。

图 1-6 为长空气间隙棒—板和棒—棒、导线—杆塔支柱的工频放电电压（幅值）。

四、空气间隙直流击穿电压

均匀电场和稍不均匀电场中直流击穿电压和工频交流击穿电压幅值接近相等。对于较长间隙，电场极不均匀，由于直流电压的极性效应，空气间隙的直流击穿电压与交流击穿电压不尽相同。图 1-7 (a) 和 (b) 分

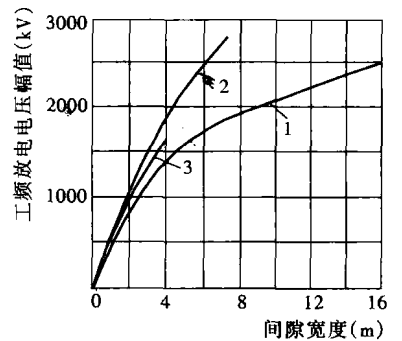


图 1-6 长空气间隙的工频放电电压（幅值）
1—棒—板；2—棒—棒和环—环；3—导线—杆塔支柱

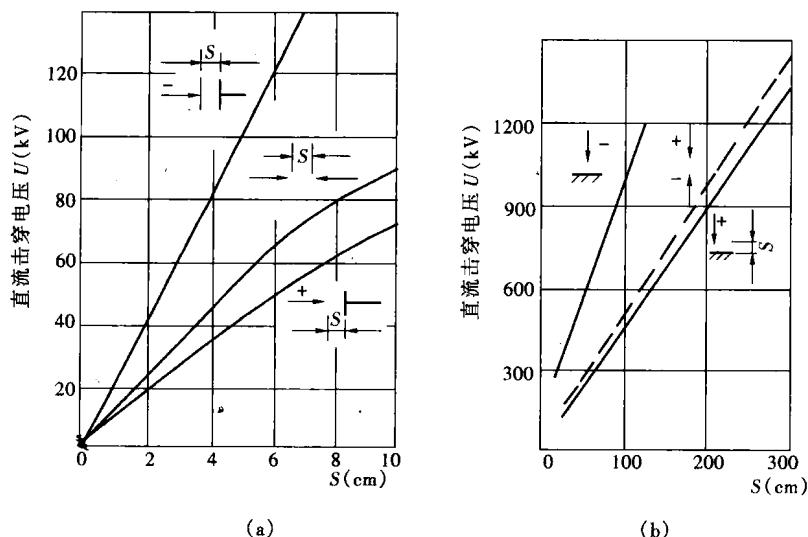


图 1-7 棒—板、棒—棒间隙的直流击穿电压

(a) 短间隙; (b) 长间隙

S—极间距离; U—击穿电压

第五节 冲击电压作用下空气的击穿电压及伏秒特性

一、电压波形对空气间隙击穿电压的影响

电力系统中作为绝缘使用的空气间隙会受到正常运行的工频电压、操作时引起的冲击波电压和雷电时引起的雷电冲击波电压三种形式的电压作用。这三种电压的波形都不一样。

对于工频电压，如空气间隙长度在 2m 以下，其放电特性可以近似按直线考虑。对于各种电极，一般击穿电压可按 $380 \sim 400 \text{ kV/m}$ (有效值) 考虑。如空气间隙长度在 2m 以上，击穿电压随电极的形状变化很大。在空气间隙为 4m 时，棒—棒间隙的击穿电压约为 1300kV，而棒—板间隙的击穿电压只有 900kV。间隙距离越长，这种差别越突出。

操作时的冲击波过电压和雷击引起的冲击波过电压，其放电电压与波形有很大关系。即使波形相同，对不均匀电场其击穿电压的分散性也很大，所以通常用 50% 冲击放电电压来表征绝缘耐受冲击的能力。所谓 50% 冲击放电电压就是指在该冲击电压作用下放电的概率为 50%，实际上它和绝缘的最低冲击放电电压已相差不远。

二、冲击电压标准波形

雷击能造成极高的电压。这是因为雷闪放电时有巨大的冲击电流，在物体对大地的阻抗上产生了甚高的电位降落所引起的。当输电线路附近落雷时，由于雷电流引起附近电场及磁场发生强烈突变，线路上也可感应出很高的电压。

雷闪电流具有冲击波形，其典型示波图如图 1-8 所示。电流由零迅速上升，达到幅值(波头)，然后较平缓地下降至零(波尾)。冲击电流波形可用波头长度 τ_1 (电流由零上升至幅值所需时间) 及波长 τ_2 (从开始到电流波尾降到幅值一半所经过的时间) 作为标志。雷闪电流的参数(幅值、波头长度、波长等)具有统计性。根据实测结果，其波头长度约为 $0.5 \sim 10 \mu\text{s}$ ，波长约为 $20 \sim 90 \mu\text{s}$ ，电流幅值最大可达 200kA 以上，大多数低于 100kA。

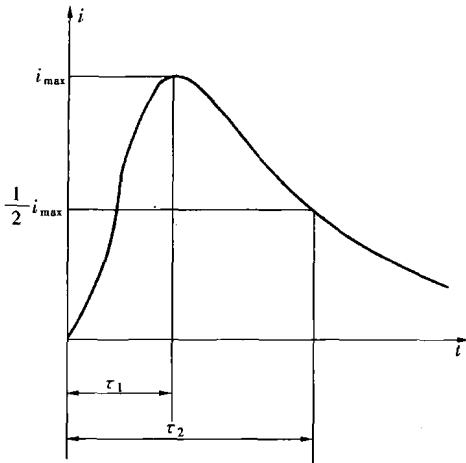


图 1-8 雷电流典型示波图
 τ_1 —波头长度； τ_2 —波长

雷闪电流是冲击波形的，故由雷闪放电引起的高电压也具有冲击波形。所以需要研究冲击电压下空气间隙的击穿特性。

实验室中利用冲击电压发生器产生冲击电压，以模拟雷闪放电引起的过电压。冲击波的放电电压不仅与空气间隙的长度和环境条件有关，而且和冲击波的波长有关。为了所得结果可以互相比对，需规定标准的波形。标准波形是根据大量实测得的雷闪造成的电压波形制定的。我国规定的标准波形如图 1-9 所示，是非周期性指数衰减波。冲击波波形由波头长度 T_1 及波长 T_2 ，加以确定。由于实验室中获得的冲击波头起始部分及幅值部分比较平坦，在示波图上不易确定原点及幅值的位置，因此波头的决定采用了等值的

斜角波头，如图 1-9 所示。我国 20 世纪 80 年代以前采用的冲击电压标准波形的参数为： $T_1 = 1.5 \pm 0.2 \mu\text{s}$ ， $T_2 = 40 \pm 4 \mu\text{s}$ 。冲击电压除了 T_1 及 T_2 外，还应指出其极性（不接地电极的极性）。因此标准波形通常可以用符号 $\pm 1.5/40 \mu\text{s}$ 来表示。

各国规定的标准波形不尽相同，为了统一起见，国际电工委员会推荐采用如下的参数： $T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ ，允许偏差 $\pm 30\%$ ； $T_2 = 50 \mu\text{s}$ ，允许偏差 $\pm 20\%$ 。记为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 。我国从 20 世纪 80 年代起，也开始采用国际电工委员会推荐的标准波形。例如国家标准《交流系统用碳化硅阀式避雷器》（GB 7327—1987）就规定避雷器的冲击放电电压波形为 $1.2/50 \mu\text{s}$ 。

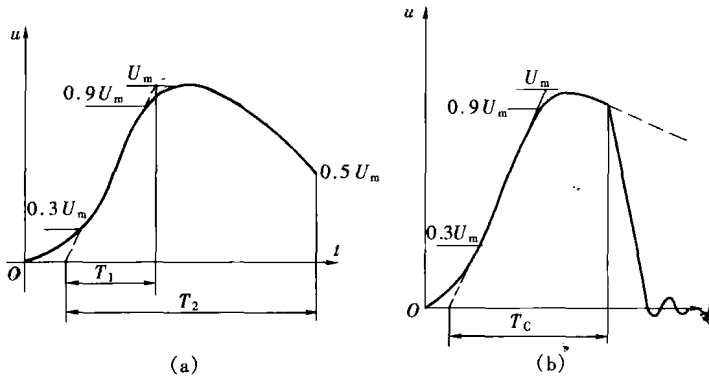


图 1-9 冲击全波和截波标准波形
 (a) 全波；(b) 截波

为了模仿线路上出现放电时把波形截断的情况，还规定了 $T_c = 2 \sim 5 \mu\text{s}$ 的截波，见图 1-9(b)。

对于操作过电压引起的冲击波，由于波形本身的多样性，标准波形不太好确定。国际电工委员会推荐的标准操作冲击波形为 $250/2500 \mu\text{s}$ 。

三、50% 冲击击穿电压

(一) 放电时延

如対气体间隙施加冲击电压，电压由零上升至极大值后，又逐渐衰减（或保持不变），如