



电气化铁路高电压工程

DIANQIHUA TIELU GAODIANYA GONGCHENG

陈明忠 主编

中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

电气化铁路高电压工程

陈明忠 主编

中国铁道出版社

2016年·北京

内 容 简 介

本书内容立足于电气化铁道牵引供电系统高压电气设备的运行与分析,涉及该系统的高电压工程技术应用和电气试验。全书共七章,主要内容包括绝缘介质的电气性能、绝缘评估及其试验方法、高压供电设备的绝缘、供电系统的雷闪过电压及其防护、供电系统内部过电压及其限制措施、高压供电系统的绝缘配合、高电压产生设备与测量技术等,书的附录部分有“高压供电基础试验”的操作与方法。

本书可作为职业院校电气化铁道供电技术等专业的基础教材,也可供强电类工程技术人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

电气化铁路高电压工程/陈明忠主编. —北京:
中国铁道出版社, 2016. 2
ISBN 978-7-113-20952-0

I. ①电… II. ①陈… III. ①电气化铁道—高压电力
系统—高等职业教育—教材 IV. ①U223

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 217415 号

书 名: 电气化铁路高电压工程
作 者: 陈明忠 主编

责任编辑: 李嘉懿 编辑部电话: 010-51873147 电子信箱: dianwu@vip.sina.com
封面设计: 王镜夷
责任校对: 胡明锋
责任印制: 陆 宁 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社(100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)
网 址: <http://www.tdpress.com>
印 刷: 三河市兴达印务有限公司
版 次: 2016 年 2 月第 1 版 2016 年 2 月第 1 次印刷
开 本: 787 mm×960 mm 1/16 印张: 11.5 字数: 220 千
书 号: ISBN 978-7-113-20952-0
定 价: 32.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书, 如有印制质量问题, 请与本社读者服务部联系调换。电话: (010) 51873174 (发行部)
打击盗版举报电话: 市电 (010) 51873659, 路电 (021) 73659, 传真 (010) 63549480

前 言

本书是根据我国电气化铁路的发展及现状，由铁道供电专业高技能专门人才培养的实际需要而组织编写。本书针对电气化铁路高压供电设备运行、检修和试验的特点，结合当前高等职业教育和铁路运输企业供电专业对人才培养目标、知识和技能总体要求，突出基本知识、基本概念、基本理论与实践技能的培养，有利于培养学生的职业发展能力和专业实践能力。在本书的编写中充分吸收当前本领域内的新方法、新技术，教材中涉及的试验方法和装置，包括试验技术和设备成熟稳定，能够适应同类院校和企业对该课程的教学。

全书分为七章，第一章主要讲绝缘介质的电气性能，第二章主要讲绝缘评估及其试验方法，第三章主要讲高压供电设备的绝缘，第四章主要讲供电系统的雷闪过电压及其防护，第五章主要讲供电系统内部过电压及其限制措施，第六章主要讲高压供电系统的绝缘配合，第七章主要讲高电压产生设备与测量技术，附录部分主要是供电系统的电气试验操作与方法。

本书由南京铁道职业技术学院副教授陈明忠主编，戴丽君、童岩峰为副主编。陈明忠编写了绪论、第一章、第四章、第七章，戴丽君和童岩峰编写了第三章、第五章，上海铁路局南京供电段高级工程师成明华编写了第二章与试验部分，扬州工业职业技术学院副教授范丛山编写了第六章。本教材在编写过程中得到了南京地下铁道有限公司，上海铁路局南京供电段，兰州铁路局供电处等单位的支持与帮助，南京工程学院的孙玉坤教授对本书进行了审阅并提出了建议。南京铁道职业技术学院林瑜筠担任主审。

由于编者水平有限，书中出现错误与疏漏在所难免，敬请读者批评指正。电子邮箱地址：cmz50223@163.com。

编者

2015年5月7日于南京

目 录

绪 论	1
第一章 绝缘介质的电气性能	3
第一节 绝缘介质的特性	3
第二节 气体的绝缘性能	6
第三节 液体的绝缘性能	10
第四节 固体的绝缘性能	12
第五节 复合绝缘体的绝缘性能	14
第二章 绝缘评估及其试验方法	26
第一节 绝缘评估	26
第二节 绝缘劣化	28
第三节 绝缘评估的试验方法	30
第四节 电气设备状态的在线监测	43
第三章 高压供电设备的绝缘	47
第一节 旋转电机的绝缘	47
第二节 供电变压器的绝缘	51
第三节 供电电容器的绝缘	56
第四节 供电电缆的绝缘	59
第五节 避雷器	64
第六节 断路器	69
第七节 电瓷绝缘子	77
第四章 供电系统的雷闪过电压及其防护	84
第一节 雷闪过电压	84
第二节 输电线路的雷闪过电压及其保护	93
第三节 牵引变电所雷闪过电压及其保护	101

第五章 供电系统内部过电压及其限制措施·····	113
第一节 供电系统工频过电压·····	113
第二节 供电系统操作过电压·····	120
第三节 供电系统谐振过电压·····	135
第六章 高压供电系统的绝缘配合·····	141
第一节 供电系统的绝缘配合·····	141
第二节 供变电设备绝缘水平的确定·····	143
第三节 输电线路绝缘水平的确定·····	146
第七章 高电压产生设备与测量技术·····	151
第一节 冲击电压发生器·····	151
第二节 试验变压器·····	154
第三节 直流高电压的产生·····	156
第四节 冲击电流发生器·····	157
第五节 高压电气测量·····	158
附录 高压供电基础试验·····	161
试验 1 绝缘电阻和吸收比的测量·····	161
试验 2 泄漏电流及直流耐压试验·····	162
试验 3 介质损失角正切 $\tan\delta$ 测量·····	166
试验 4 局部放电试验·····	168
试验 5 交流耐压试验·····	169
试验 6 冲击电压试验·····	172
试验 7 接地电阻和土壤电阻率的测量·····	174
试验 8 绝缘子链的电压分布测量·····	176
参考文献·····	178

绪 论

自从 20 世纪 50 年代我国第一条电气化铁路开通运营以来,我国的电气化铁路的建设获得极大的发展。截止 2012 年,我国拥有电气化铁路 48 000 km,跃居世界第一,每年建设速度达到 4 000 km,先后建成京津、京沪、沪宁、武广和宁杭、沪昆、兰新高速电气化铁路。2012 年 11 月,京广高速铁路的开通运行,标志着我国的高速电气化铁路技术日臻完善,自主知识产权体系已经形成。不仅如此,我国城市化的进程步伐加快,贯穿中心城市、连接城市群、支撑区域经济圈发展的城市轨道交通获得巨大发展。以长三角地区为例,上海、南京、杭州,无锡、苏州、宁波已先后建成不同规模的地铁系统,常州、南通正在建设。“十二五”期间,我国投资 1 000 亿元用于轨道交通行业,标志着以电能为牵引动力,以电气化铁路技术为特征的绿色低碳的城市轨道交通行业将进一步获得发展。

电气化铁路供电系统需要从外部供电系统(国家电网)获取电能,经过变换调整输送至接触网,由供电机车取用完成牵引任务。目前,供电系统所使用的电压等级较高,已属于高压的范围。因此有必要了解和认识供电系统在高电压、强电场、大电流、复杂外部环境下绝缘结构(绝缘部件)和绝缘材料(介质)电学物理特征与绝缘强度逐步降低的演变规律,从而为供电系统的设计、运行、检修和管理服务。

一般来说,铁路牵引供电系统都由高压配电设备和供电元件组成,这些设备和元件中的绝缘故障往往是导致系统不能正常工作的主要原因。因此绝缘问题自然成为高压配电装置设计、制造与运行和检修的主要问题,这就要求对绝缘材料的绝缘性能、绝缘劣化的评估及试验方法不断地进行研究。

除高压配电装置外,高压供电系统还存在许多复杂的技术问题,如供电系统的损耗与无功补偿问题,谐波治理问题,绝缘配合问题,高压试验方法与技术问题,过电压问题等。其中供电系统过电压是危害供电系统安全运行的主要因素之一,系统过电压来自两个方面:一是由于供电系统遭受雷击所形成的大气过电压;二是由于供电系统中因开关操作或系统参数发生变化而引起谐振等所形成的内部过电压。系统过电压时间虽然很短,但它会造成设备绝缘损坏,危害供电系统的安全运行。因此,研究绝缘介质在高电压和强电场下作用下的物理特性与电气特性,设计制造出耐受高压的绝缘介质与绝缘结构,提高电气设备的绝缘水平。另一方面需要研究解决供电系统过电压产生的原因及限制措施,提高设备绝缘耐受过电压的

能力。随着计算机技术、微电子技术及材料科学等新兴技术的发展,传感技术、信号处理技术、计算机控制技术与通信技术等各种综合技术在供电系统中的不断应用,高压供电技术得到了快速发展,电气设备运行状态监测和设备绝缘状况的检测、诊断正在由过去以定期检修为主的预防性维护制度向预防且预知事故为主的自动化、信息化、智能化预测维修方向发展,以保证供电系统更加安全、可靠地运行,从而提高供电供应的质量和可靠性,满足轨道交通供电系统的技术进步和社会生活质量的提高以及经济社会的发展需要。

电气化铁路高压工程是一门理论性、实践性、专业性都很强的学科,这门学科是从生产实践中发展起来的,因此在研究和学习理论知识的同时,更应强调实践的重要性,并通过实践经验的积累、总结和提高,促进电气化铁路高压供电技术的发展。

第一章 绝缘介质的电气性能

自然界的物质根据其物理导电性能可分为三类,即容易导电的导体(电阻率为 $10^{-6} \sim 10^{-2} \Omega \cdot \text{cm}$)、不导电的绝缘体(电阻率为 $10^9 \sim 10^{22} \Omega \cdot \text{cm}$)以及处于导体和绝缘体之间的半导体。在供电系统中,用气体、液体、固体绝缘材料或它们的组合把各种电气设备的导电部分与接地的外壳或支架隔离开,以保证这些电气设备的正常运行。而这些绝缘物质在外电场的作用下会产生许多物理现象,如极化、电导、电离、损耗和击穿放电等,正确理解和认识这些现象,进行绝缘结构的合理设计、绝缘材料的合理利用以及对绝缘性能的准确评估有着非常重要的意义。

第一节 绝缘介质的特性

一、绝缘介质的极化

从绝缘体的绝缘介质性质来看,可以把气体、液体、固体绝缘体称作绝缘介质。一切物质内部都有正电荷和负电荷,通常情况下正、负电荷处于相对平衡状态,物质呈现电中性,当外加电压后,正、负电荷受电场力的作用,其相对位置发生变化,尽管内部正、负电荷仍相互抵消,但随着正、负电荷相对位置的变化,绝缘介质表面出现电荷,这种现象称为绝缘介质的极化,出现的电荷称为极化电荷。一般用相对介电常数 ϵ_r 来表示绝缘介质极化的程度和强度。对于相对介电常数 ϵ_r 也可这样来解释:设真空中的平行板电容器的电容量为 C_0 ,当极板间充入某种绝缘介质后电容量为 C_r , $C_r / C_0 = \epsilon_r$,一般 C_r 总比 C_0 大,因此 ϵ_r 大于1,这是绝缘材料极化造成的。绝缘材料极化的结果,使靠近其表面出现束缚电荷,相当于电容器极板的电荷量得到增加,造成电容量增大。一些常用绝缘介质的相对介电常数和电导率见表1-1。

根据绝缘介质极化程度的大小,绝缘介质可分为中性绝缘介质和极性绝缘介质。讨论介质极化现象在工程中是有实际意义的。如相对介电常数 ϵ_r 小的绝缘物质,由于其介质热损耗小,常用作高压电气设备的绝缘结构、电缆绝缘等;而制作电容器时,在相同的耐电强度下,要选择 ϵ_r 大的绝缘材料作为极板间的绝缘物质,以使单位电容器的体积和重量减小。

根据绝缘介质的物质结构,绝缘介质极化具有电子极化、离子极化、偶极子极化和夹层极化四种基本极化形式,中性绝缘介质一般为电子极化、离子极化;极性

绝缘介质一般为偶极子极化、夹层极化。

表 1-1 常用绝缘介质的介电常数和电导率

介质类别		名称	相对介电常数 ϵ_r (20 °C, 50 Hz)	电导率 γ (20 °C $\Omega^{-1}\text{cm}^{-1}$)
气体介质	中性	空气	1.00585	
		SF ₆	1.00207	$10^{-17} \sim 10^{-18}$
液体介质	中性	绝缘油	2.2	$10^{-12} \sim 10^{-15}$
		硅油类	2.2~2.8	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
	极性	蓖麻油	4.5	$10^{-10} \sim 10^{-12}$
固体介质	离子结构	电工瓷	6~7	$10^{-14} \sim 10^{-15}$
		云母	5~7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
	极性	聚氯乙烯	6~9	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		沥青	2.6~2.7	$10^{-15} \sim 10^{-16}$
		胶木	4.5	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
		纤维素	6.5	$10^{-12} \sim 10^{-15}$
	中性	橡胶	2.7	$10^{-13} \sim 10^{-14}$
		聚苯乙烯	2.4~2.6	$10^{-17} \sim 10^{-18}$

值得注意的是,对于一般工程上应用的绝缘材料与绝缘零件来说,以上极化的方式都可能同时存在,极化的强度也随外部电场条件与内部结构特征的改变而不同。

二、绝缘介质的电导

从绝缘体的电气绝缘性质来看,理想的绝缘体是完全不导电的,但实际中的绝缘体在外加电压后仍有很微小的电流导通,这种性质称为导电性,用电导率(或电阻率)来表示。在低电压下,绝缘体的导电电流与电压成线性欧姆特性,但所加电压较高时,导电电流将随电压的升高发生非线性的增加,到达一定电压时电流会急剧增大,此时绝缘体失去其绝缘性质变为导体,这种现象称为绝缘击穿,一般用绝缘击穿强度(发生击穿时的电场强度或电压)来描述。

绝缘介质的导电性与金属导体有本质区别,绝缘介质的导电性除了与所加电压有关外,还与温度、电压频率及所含杂质浓度有关。这是由于绝缘介质的导电电流除了由离子移动形成的电阻性电流(又称泄漏电流)外,还有由电子极化、离子极化等无损极化形成的纯电容性电流(又称几何电流),以及由偶极子极化、夹层极化等有损极化形成的电流(又称吸收电流)。

当把直流电压加在绝缘介质上时,泄漏电流不随时间变化,几何电流(电容充

电电流)存在的时间很短,很快衰减到零,吸收电流存在的时间较长,衰减较慢。因此,可根据随时间而衰减的直流分量,来判断绝缘材料的受潮与否。具体方法是用兆欧表(绝缘电阻表)测量 60 s 和 15 s 时绝缘介质的绝缘电阻值 R_{60} 和 R_{15} , R_{60}/R_{15} 称为吸收比。一般来说吸收比值愈大,则表征绝缘结构愈干燥。在工程应用中,要求吸收比大于 1.3。

三、绝缘介质的损耗

任何绝缘介质在电压作用下都有功率损耗。功率损耗包括由偶极子极化、夹层极化等引起的极化损耗,以及由绝缘介质的电导引起的电导损耗。绝缘介质的功率损耗 P 为:

$$P = U^2 \omega C \tan \delta \quad (1-1)$$

由上式可见,在外加电压一定的情况下,绝缘介质的功率损耗仅取决于 $\tan \delta$, 而 $\tan \delta$ 如同介电常数和电导率一样,是仅取决于绝缘介质本身的特性参数。因此, $\tan \delta$ 就成为衡量绝缘介质功率损耗大小的物理量,称之为介质损耗角正切, δ 称为介质损耗角。

由于绝缘材料在受潮或有缺陷时,电导电流会增加;在绝缘材料中有气泡、杂质和受潮的情况下,夹层极化加剧,极化损耗增加。介质损耗角正切 $\tan \delta$ 的大小直接反映了绝缘整体状况的好坏,在电气设备绝缘预防性试验中,通过测量 $\tan \delta$ 值可以有效地判断绝缘材料是否整体受潮、老化或劣化。但对于绝缘介质的局部小范围缺陷(气泡、杂质、老化、受潮、洞孔等)不能有效反映。

在工程实际中,设计绝缘结构时,必须注意到绝缘材料的 $\tan \delta$ 值,若 $\tan \delta$ 值过大则会引起严重发热,使材料加速劣化变质,甚至可能导致热击穿。

值得注意, $\tan \delta$ 对环境温度比较敏感,在实践中应考虑环境温度对其影响并做出修正。电压(电场)的频率,也会对 $\tan \delta$ 造成影响,应设法予以消除。

如表 1-2 所示为几种绝缘材料的特性。

表 1-2 几种绝缘材料的特征

电气性能	聚氯乙烯 PVC	交联聚乙烯 ELPE	黏性油纸 PILC	乙丙橡胶 EPR
介电常数 ϵ_r	6~9	2.3	3.5	2.5~4.0
介质损耗角正切 $\tan \delta$ (%)	6~10	0.04~0.07	0.2~1.4	0.8~1.0
击穿场强(kV/mm)	25~35	40~50	40~45	25~40
允许温度(°C)	70(160)	90(250)	80(130)	60(130)
绝缘电阻系数 $\rho(\Omega \cdot m)$	$10^{11} \sim 10^{13}$	$10^{15} \sim 10^{16}$	$10^{12} \sim 10^{13}$	$10^{12} \sim 10^{13}$

第二节 气体的绝缘性能

气体特别是空气是供电系统中最常见的应用最广泛的绝缘材料。如架空线路相与相之间、导线与铁塔之间等,都是以空气作为绝缘介质的。气体分子间距离比液体和固体大得多,室温和一个大气压条件下,气体分子通常约以 500 m/s 的速度运动。虽然分子本身以这样快的速度运动,但因为分子大体是电中性的,基本上没电流,所以空气有非常好的电绝缘性。在通常情况下,由于宇宙射线及地层放射物质等天然辐射的作用,能使大气中少量气体分子被电离,同时被电离的分子由于扩散和复合而消失,所以一般保持平衡状态。给这样条件的气体施加电压时,电流将如图 1-1 所示分三个区段。在开始区段 A,随着电压的升高,离子的运动速度加大,电流与电压成正比地增加。电压上升时,电流不再随电压的升高而增加,因为这时所有电极间产生的离子已全部参与导电,所以电流趋于饱和,即区段 B。区段 B 的电流取决于离子生成速度,大气中的饱和电流密度约为 10^{-19} A/cm^2 ,此时饱和电流密度是极小的,因此气体仍处于良好的绝缘状态。进一步升高电压时,将出现电流骤增的区段 C。在这一区段 C,被电场加速的电子将碰撞中性分子,产生电子的碰撞电离,引起电荷骤增。在这以后再升电压将导致气体绝缘击穿。下面将重点讨论在区段 C 发生的现象。

一、汤逊放电理论

英国人汤逊对区段 C 的电荷骤增作了如下说明:自然界存在的宇宙射线等的天然辐射能使气体分子电离,生成正离子和电子。在低电场时,电子将附着于中性分子成为负离子,但在高电场时,电子将被加速并获得能够使其他气体分子电离的足够能量,去碰撞气体分子,并使其引起碰撞电离生成新的电子和正离子对。若在单位长度上这种碰撞电离重复发生 α 次,则最初的 n_0 个电子前进 x 距离时将变为 $n_0 e^{\alpha x}$ 一个,即按指数函数急剧增加,这种现象称为电子雪崩过程。如图 1-2 是电子雪崩中的电荷分布的示意图,由于电子的移动速度快,所以集中于电子雪崩的头部,而同时产生的正离子移动慢,留在电子雪崩的中后部。另外,在电离过程中电子因向侧面扩散,故电子雪崩呈圆锥状。

电流随电子雪崩发展而增大,但电子雪崩起始电子的生成只是靠宇宙射线等天然辐射能引起的偶发现象,电子雪崩只是单次的。为了使放电持续发生,必须有使电子雪崩的必备条件:电子持续产生。电子雪崩过程中生成的正离子碰撞阴极时,使阴极至少释放出一个电子,从而抵消补偿产生电子雪崩后进入阳极的那个失去的电子,这个电子仍将会在电场的作用下,向阳极移动,再次使气体分子引起碰撞电离形成新的电子崩。这样,即使不从外界供给起始电子,放电也能维持下去,

这种放电现象称为自持放电。汤逊放电理论描述了气体在均匀电场中连续的、单纯的、均匀的放电过程。

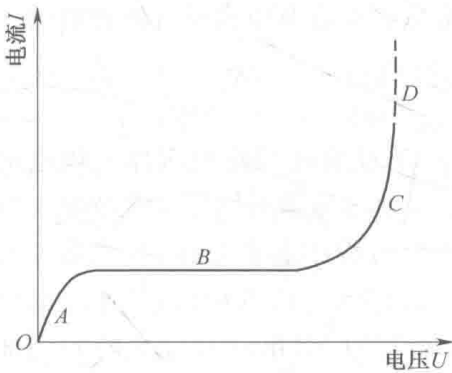


图 1-1 均匀电场中气体的导电性

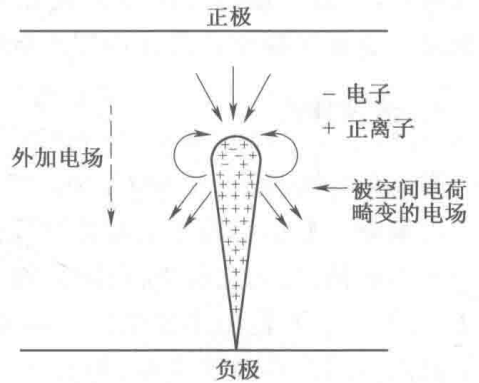


图 1-2 电子雪崩中的电荷分布

二、巴森定律

因为气体分子的密度与压力成正比，所以汤逊放电条件下的碰撞电离次数是气压 p 和电极间隙 d 的乘积的函数，可从理论上导出均匀电场中气体绝缘击穿电压(也叫火花电压)为 pd 的函数。巴森用实验整理了气体击穿电压与 pd 的关系，弄清了各种气体都有同样的关系曲线(巴森曲线)，如图 1-3 为气温为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时三种气体的巴森曲线，这个关系称为巴森定律。巴森曲线在 $pd = 10^{-2} \text{ bar} \cdot \text{mm}$ 附近有极小值。在极小值点的右侧， p 由大变小时，电子碰撞的平均距离(平均自由程)大，电子容易获得碰撞电离所需的能量，因而击穿电压低。另一方面，在极小值左

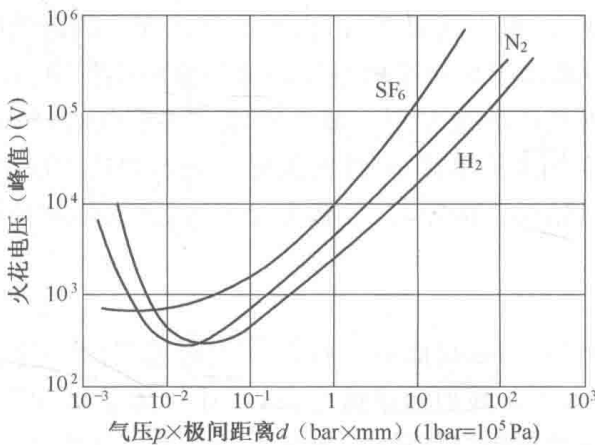


图 1-3 各种气体的巴森曲线

侧,由于 p 太小,致使碰撞电离所需的气体分子密度也太小,碰撞电离次数低,所以击穿电压高。另外,电极间隙距离 d 太小时,因电子雪崩不能充分发展,故击穿电压高。由曲线可知:当压力极端变大或变小,而 d 为数十厘米以下时,巴森定律都成立。这意味着在此范围内用汤逊放电理论来解说放电现象是可以理解的。

三、流注理论

当 $pd > 5000 \text{ bar} \cdot \text{cm}$ ($1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$) 时,汤逊放电理论与实际气体放电现象出现偏差。根据汤逊放电理论计算出来的击穿放电所需时间比实测的放电时间小 $10 \sim 100$ 倍;按汤逊放电理论,阴极性质在击穿过程中起重要作用,然而在大气压力下的空气中,间隙击穿电压与阴极材料无关;按汤逊放电理论,气体放电应在整个间隙中均匀连续地发展,但在大气中气体击穿时,会出现有分支的明亮细通道。这些现象用汤逊理论不能解释。为了解决这一问题,流注理论被提了出来。在这一理论中,考虑了汤逊放电理论中被忽视的正离子空间电荷作用。由于正离子运动速度相比电子小得多,电子雪崩的正离子密度在阳极附近很大, pd 越大,正离子密度也越大,由此产生的局部空间电荷使场强提高,并向重新引起电子雪崩所需的场强值发展。这样一来,初始电子雪崩周围存在的电子将作为起始电子产生新的二次电子雪崩,二次电子雪崩不断地向初始电子雪崩汇合,其头部的电子进入了初始电子雪崩的正离子区域,电子和正离子的高密度混合,成为电导性很高的等离子体状态,这就生成了流注,如图 1-4 所示。流注内部正负电荷密度和温度都较电子雪崩时高,伴随较强的发光。在发光的作用下,流注周围气体分子被光电离,这使得向流注发展的电子雪崩起始电子充分存在。如图 1-4 中的 a、b 所示,流注一边在其头部吸引电子雪崩一边从正极向负极伸展,等电极间被流注连通时如图 1-4 中的 c,整个间隙就被击穿。

如果极间距离更大,且电场极不均匀,那么将出现与汤逊放电和流注放电不同形式的放电。图 1-5 画出了棒对平板之间的长间隙施加正冲击电压时的放电示意图。在棒电极头部电场高的地方发生多个局部流注放电,这些流注汇集起来成为导电性较高的高密度等离子体状态,这叫先导。先导到达对面平板电极时,把两电极跨接起来。电源供给很大能量,先导转为主放电,即气体绝缘被击穿。

四、局部放电

在极不均匀的电场中,电极曲率半径较小处附近空间的局部场强很大,因此,在这局部强场区中,会产生强烈的碰撞电离,并在气体整体发生放电前,这部分放电持续进行。这种现象称为局部放电,也叫电晕放电。如图 1-6 所示,在针—平板电极的不均匀电场中,放电集中在针尖高场强部分。给针对板电极施加直流电压时,根据针电压极性的不同,放电表现出的外观也有差异。正极性时,随着电压的

上升,针尖附近从辉光电晕过渡到刷状电晕,再转为流注电晕,放电逐渐激烈,最后发展到击穿。负极性时,开始是称为托里切尔脉冲的脉冲电流,随着电压上升,脉冲周期逐渐缩短,然后过渡到辉光电晕和刷状电晕,最后整个间隙击穿。下面解释一下托里切尔脉冲的发生机理。电子雪崩的电子离开带负电的针电极时,使针尖附近场强减小,碰撞电离难于进行,气体分子附着电子后在针电极头部形成负离子的同性空间电荷层。这个负的电荷层削弱针头部电场,使放电停止。但因负离子在电场作用下从针电极散开移向正电极,故针头部场强重又升高,又开始放电,托里切尔脉冲就是上述过程的重复。

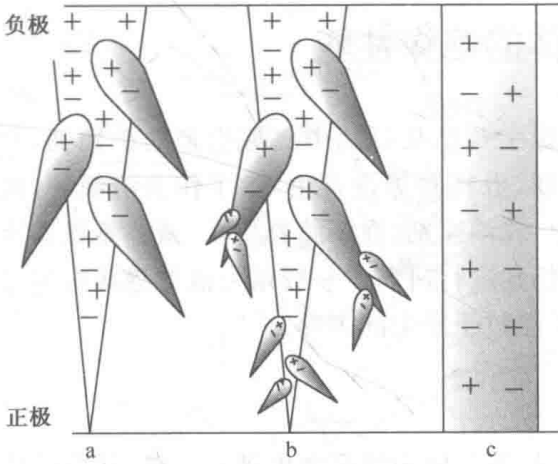


图 1-4 向正极发展的流注

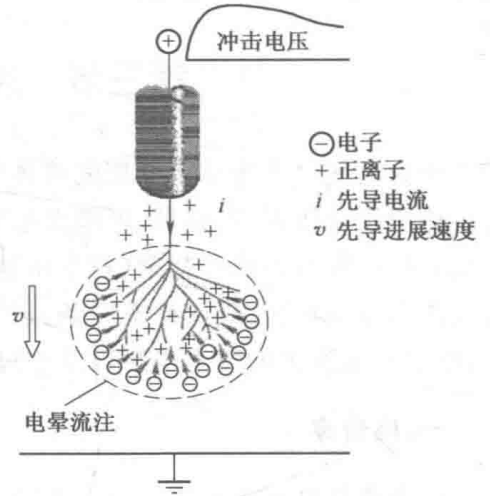


图 1-5 长间隙放电过程

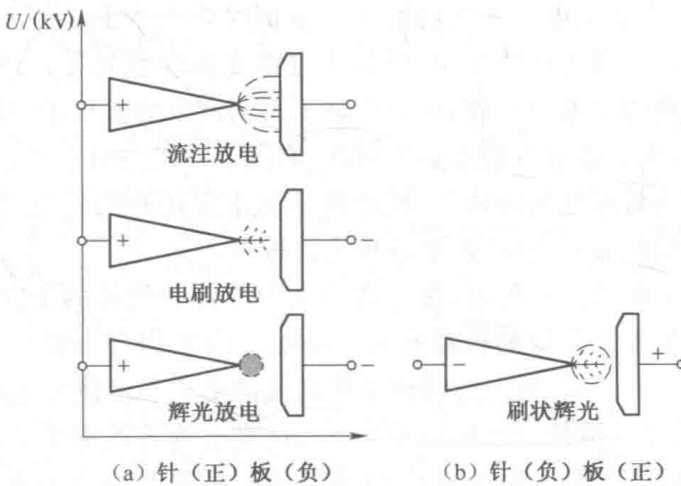


图 1-6 局部放电

电晕放电具有以下几种效应：

(1) 伴随着放电过程有声、光、热等效应，表现为发出“滋滋”的声音，蓝色的晕光以及使周围气体温度升高。

(2) 电晕会产生高频脉冲电磁场，其中还包含着许多高次谐波，会造成对无线通信的干扰。

(3) 电晕放电会产生许多化学反应，会在空气中形成 O_3 、 NO 、 NO_2 等对金属及绝缘结构有强烈的氧化作用， NO 、 NO_2 会与空气中的水分合成形成硝酸，是强烈的腐蚀剂。综合上述，电晕出现会促使电气设备绝缘结构和绝缘零件加速老化，因此要采取必要的措施。

第三节 液体的绝缘性能

作为电气设备绝缘所使用的液体绝缘主要是从石油中提炼出来的矿物油，它们广泛用于变压器、断路器、电缆及电容器、电抗器等设备中，除了作为绝缘外，液体电解质也同时用作冷却剂（在变压器中）或消弧剂（在断路器中）。液体绝缘击穿与气体和固体相比，理论尚不完备，至今仍在进行研究。一般认为液体绝缘有电击穿、通过气泡发生的气泡击穿以及通过悬浮粒子发生的击穿。

一、电击穿

电击穿是电子起主要作用的击穿过程，和气体中汤逊放电理论一样，认为液体绝缘在电场作用下，阴极上由于强电场发射或热电子发射出来的电子被加速后能量增大，引起电子雪崩。因为液体的分子密度高，所以不一定需要气体击穿时的自持放电条件，靠电子雪崩的电子密度增值到一定值时就发生击穿。另外有研究报告称用高速摄影装置观测击穿情况，在液体中也存在流注和先导。还有的学者提出取代气体放电中自持放电的机理，认为靠电子雪崩产生的正离子移向负电极，形成异性空间电荷层，负电极前方附近场强提高，有助于阴极发射电子。利用光电效应测量液体中空间电荷对电场的畸变，纯净液体的击穿还和阴极金属逸出功以及正离子的迁移率有依存关系，这些都是该理论的根据。

其次是液体分子振动击穿理论，这一理论认为液体和气体的击穿强度不同与被电场加速的电子失去其能量的机理有关。设电子的平均自由程为 λ ，则电子从电场 E 获得的能量为 $eE\lambda$ 。另一方面被电场加速的电子和液体分子碰撞时，电子失去能量，其能量变换为液体分子的振动能 $h\nu$ ，这里 h 为普朗克常数， ν 为分子振动频率，室温时约为 10^{13} Hz。电子从电场获得的能量因与液体分子碰撞失去能量，变换为分子振动能级的跃迁，进而发生击穿。这就是根据液体分子振动考虑的击穿理论。击穿场强为 $E_b = h\nu/e\lambda$ 。按这一理论，绝缘击穿场强与 λ 成反比，而

与液体的密度成正比。另外,同一分子结构的液体的击穿场强相等。

二、气泡击穿

给液体施加压力,它也不会被压缩,其分子间的距离几乎不变。这就意味着假如只按上述电击穿过程发生击穿,那么击穿将不受压力的影响。但如图 1-7 所示,许多液体的击穿场强与压力有依存关系,由此提出了通过气泡发生击穿的概念。

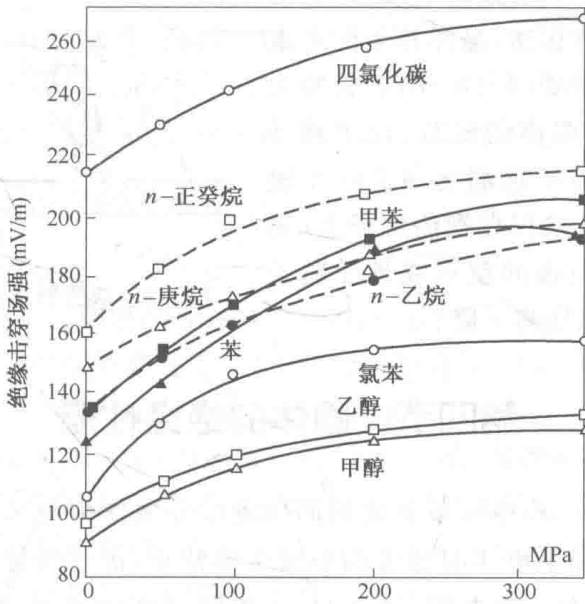


图 1-7 各种液体介质随压力的击穿特性

物质的击穿场强按固体、液体、气体顺次降低。因此,若液体中含有气泡时,则在交流电压作用下,由于气泡中的场强与液体中的场强按各自的介电常数成反比分配,使气泡承受较大的场强,从而使气泡放电,靠放电的能量,使气泡进一步增多,最后导致击穿,这就是通过气泡击穿的原因。气泡产生的原因可考虑有以下几种情况:①电极表面的微小突起使电流集中(电荷密度集中)而引起液体局部过热游离热;②液体中的电流加热作用,气体溶解度降低;③电极和注入电荷之间的或同极性注入电荷之间的排斥力抵消了液体的表面张力;④电子雪崩引起液体分子结构解体。

另外,还有按气泡机理考虑的击穿判据。即当气泡发生后,在静供电作用下气泡被拉长,对应其长度 d 和内部压力 p 的乘积 pd ,巴森曲线给出了最小放电电压,把气泡分担的电压超过此电压时作为液体绝缘击穿的判据。

以上通过气泡发生击穿的理论,是液体特有的击穿理论,因液体中容易产生气