

函授大学教材



高电压技术

东北电力学院 刘玄毅 陈化钢 合编



函授大学教材

高 电 压 技 术

东北电力学院 刘玄毅 陈化钢 合编

水利电力出版社

(京)新登字115号

内 容 提 要

本书内容分为高电压绝缘及试验、过电压及其保护两篇。书中着重阐明电介质的性能及其放电机理,绝缘预防性试验主要项目的理论依据、基本测试设备及试验结果的分析与判断;放电过程的物理概念及各种过电压的发生与发展机理、影响过电压倍数的因素;过电压保护装置的原理及其应用,限制过电压的措施;电力系统绝缘配合的基本概念和具体方法;对防雷接地问题也作了简要介绍。

本书系高等院校电力系统及其自动化专业高电压技术课函授教材,也可供电力类全日制本科、专科、中专师生及电力工程技术人员参考。

函授大学教材

高 电 压 技 术

东北电力学院 刘玄毅 陈化钢 合编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行,各地新华书店经售

北京市京东印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 18.5印张 417千字

1993年6月第一版 1997年6月北京第二次印刷

印数00001—3100册

ISBN 7-129-01687-3/TM·455

定价 18.00元

前 言

本书是根据原水利电力部教育司(86)教职字第66号文附件《水利电力部1986年高等函授教育工作会议纪要》的要求和部属高校函授电力专业校际协作组于1986年9月在南京召开会议制订的本协作组专业课教材编写出版规划编写的,作为高等院校“电力系统及其自动化”专业“高电压技术”课程函授教材。

本书是在多年从事全日制和函授本、专科“高电压技术”课教学经验的基础上,参考了我们编写的《高电压技术》讲义及函授用《高电压技术自学指导书》编写的。1987年完成初稿后,经我院本科84级、85级及农电85级专科班前后几次试用,学生及几个省市电业局职工大学的高电压技术课进修教师的反映是良好的。本书各章均有基本要求、小结、复习题、思考题,有些章还附有习题,每篇后有自测题,适于函授学习的需要。

本书遵循由感性到理性的认识规律,特别是前三章,在讲解某一问题时,首先给出了试验现象和结果,然后进行分析、解释,最后总结出理论。这符合科学理论的发展规律和现场事故分析的需要,有利于培养学生分析、思考和解决实际问题的能力,故本书不但适用于函授教学,而且也是电力系统及其自动化专业、高电压技术专业本科、专科、中专师生及有关工程技术人员的参考书。

本书共分十章,其中第五、七、八、九、十章由陈化钢编写,刘玄毅编写其余各章并进行全书的统稿工作。全书承武汉水利电力学院方瑜、程启武审阅。

在本书编写过程中,参考了兄弟院校有关教材、讲义及有关单位的技术资料,还得到了一些同志对本书初稿提出的宝贵意见,在此表示衷心感谢。

由于编者的理论水平和实践经验有限,书中难免有不当和错误之处,敬希使用本书的师生和读者批评指正。

编 者

1991年11月

目 录

前 言	
绪 论	1
第一篇 高电压绝缘及试验	3
第一章 气体的绝缘强度	4
基本要求	4
第一节 气体放电的基本物理过程	4
第二节 影响气体放电电压的因素	26
第三节 提高气体间隙击穿电压的措施	33
第四节 气体电介质的沿面放电	38
小结	45
复习题	47
思考题	49
习题	50
第二章 液体和固体电介质的电气性能	51
基本要求	51
第一节 电介质的极化	51
第二节 电介质的电导	54
第三节 电介质的损耗	56
第四节 变压器油的击穿	58
第五节 固体电介质的击穿	62
小结	65
复习题	67
思考题	67
第三章 电气设备绝缘的非破坏性试验	69
基本要求	69
第一节 绝缘电阻和吸收比测量	70
第二节 泄漏电流试验	72
第三节 介质损失角正切 $\tan\delta$ 值的测量	75
第四节 局部放电的测量	79
第五节 对非破坏性试验结果的分析	82
小结	83
复习题	84
思考题	84
第四章 电气设备绝缘的耐压试验	86

基本要求	86
第一节 工频耐压试验	86
第二节 感应高压试验	93
第三节 直流耐压试验	94
第四节 雷电和操作冲击耐压试验	95
小结	104
复习题	106
思考题	107
习题	107
第一篇自测题	108
第二篇 过电压及其保护	110
第五章 线路和绕组的波过程	113
基本要求	113
第一节 行波在均匀无损单导线中传播的基本规律	114
第二节 行波在均匀无损平行多导线系统中传播的基本规律	131
第三节 冲击电晕对线路上波过程的影响	135
第四节 单相变压器绕组中的波过程	137
第五节 三相变压器绕组中的波过程	144
第六节 变压器绕组间波的传递	146
小结	148
复习题	149
思考题	149
习题	150
第六章 雷电及防雷设备	152
基本要求	152
第一节 雷电的有关参数	152
第二节 避雷针和避雷线	157
第三节 避雷器	160
第四节 防雷接地	168
小结	170
复习题	171
思考题	172
习题	172
第七章 输电线路的防雷保护	173
基本要求	173
第一节 概述	173
第二节 输电线路上的大气过电压	176
第三节 雷击跳闸率的确定	184
第四节 输电线路的防雷保护措施	190
小结	192

复习题	193
思考题	193
第八章 发电厂和变电所的防雷保护	194
基本要求	194
第一节 发电厂、变电所中可能出现的大气过电压	194
第二节 发电厂、变电所的直击雷保护	195
第三节 发电厂、变电所的行波保护	197
第四节 变电所的防雷保护接线	205
第五节 配电变压器的防雷保护	206
第六节 旋转电机的防雷保护	209
小结	215
复习题	216
思考题	217
第九章 内部过电压	218
基本要求	218
第一节 工频过电压	219
第二节 切断空载线路过电压	227
第三节 合闸空载线路过电压	233
第四节 切断空载变压器过电压	240
第五节 弧光接地过电压	245
第六节 传递过电压	252
第七节 中性点绝缘系统中电磁式电压互感器引起的铁磁谐振过电压	256
小结	263
复习题	264
思考题	265
第十章 电力系统绝缘配合	266
基本要求	266
第一节 绝缘配合的定义及方法	266
第二节 输电线路的绝缘配合	268
第三节 变电所的绝缘配合	273
小结	279
复习题	280
思考题	280
第二篇自测题	281
附录 球隙放电电压标准表	284
参考文献	248

绪 论

动能的输送以输电为最迅速、最方便和最经济。特别是水能的利用，只有将其变为电能，才能送到大工业区。

因为电力输送的功率与输送距离成反比，与输送电压的平方成正比，因此，要大功率、远距离输电，唯一可行的办法就是采用高电压。

提高电压等级，首先要解决的关键技术问题是在高电压下的绝缘问题，这也是高电压技术在电力工程中的任务。

高电压下绝缘问题的解决途径分两方面：一是寻求研制新型的绝缘材料，设计合理的绝缘结构；二是限制作用于绝缘上的过电压，以保证绝缘的安全运行。例如采用青壳纸和电缆纸作绝缘的电压为10.5kV、容量为10MW的发电机，只改用粉云母纸作绝缘，其它条件均不变，容量即增大到12.5MW。又如1959年苏联研制成功了磁吹阀式避雷器，将作用在绝缘上的过电压明显降低，就使原设计额定电压为400kV的输变电系统，升压为500kV的输变电系统。

高压输变电设备的制造和运行，必须经过高压试验进行考核和检查，故高电压试验和测量是高电压技术中一个重要的组成部分。通过预防性试验可及时了解绝缘性能的变化和绝缘中存在的缺陷。运行经验表明，绝缘的预防性试验是行之有效的反事故措施之一。

高电压技术的水平决定输变电电压等级的提高和基建投资，影响电力系统的发展速度，关系电力系统的安全运行，故高电压技术在电力系统中起着特别重要的作用。

另外，高电压技术近年来在核能技术、X光技术、激光技术、高电压除尘、静电喷漆、电视技术等许多部门中，都起着重要的作用，其应用范围还在日益扩展中。

高电压技术是电力技术中比较年轻的一个学科。由于高电压技术研究的核心课题是高电压下的绝缘问题，而绝缘的电气性能不仅取决于其分子结构、制造工艺，还受电、热、机械、化学、光及大气条件等多种因素的影响。研究高电压问题需要高参数的高电压试验设备，大的试验用空间，此外，所加过电压多为变化率高、短暂的冲击过程，需要灵敏度高的快速测试设备，这都给高电压技术的研究带来了较大的困难，故高电压技术的研究还很不够，很多问题还没有解决和定论，理论还很不完整。解决高电压技术的问题，现在主要是靠试验和运行经验，故对高电压的测试技术以及运行经验，应予以足够的重视。

高电压技术课程的内容分为三部分。

第一部分：电介质的基本概念，从电介质的基本理论去解释绝缘材料电气性能、影响绝缘性能的因素和提高其放电电压的方法。

第二部分：绝缘预防性试验，主要是试验项目的理论依据、试验设备的工作原理、试验结果的分析判断。

第三部分：过电压及其防护，主要是过电压产生原因的理论分析、过电压值的简单推

算、影响过电压的因素、限制过电压的措施(包括过电压防护器具的工作原理、性能等)。

过电压和绝缘是矛盾的两个方面，需要用技术和经济的综合观点来处理好这个矛盾，这就是电力设备绝缘水平的确定及电力系统的绝缘配合问题，它关系着电力设备和电力系统的投资及运行的安全可靠，故是电力系统的重要课题。

第一篇 高电压绝缘及试验

高电压技术的主要任务，就是要解决高电压作用下的绝缘问题。电力系统中的事故，除了断线、误操作等外，绝大多数都是由于绝缘的损坏而引起。在电力设备所用的导电、导磁和绝缘三大材料中，允许工作温度最低的是绝缘材料，性能老化速度最快的也是绝缘材料。所以，限制电力设备容量、决定电力设备寿命、影响电力系统安全可靠运行的都是绝缘材料。由绝缘材料组成的电力设备的绝缘整体称为绝缘结构。为了设计出技术先进、经济合理、在运行中又安全可靠的绝缘结构，为了采用经济有效的技术措施，保护电力设备绝缘的安全运行，必须了解各类绝缘材料在电场作用下的电气性能。

从理论上讨论绝缘材料在电场作用下的电气性能时，将介于不同电位之间、起绝缘作用的物质，称为电介质，在工程应用中，将电介质称为绝缘材料。为了解、判断绝缘材料和绝缘结构的电气性能，需要进行绝缘试验。

讨论电介质的电气性能，特别是绝缘性能时，经常用到下列几个名词。

电介质放电：在电场作用下，因电离使通过电介质的电流增大的现象。

电介质击穿：电介质在电场作用下，突然失去其绝缘性能，发生沟通两极的放电。

击穿电压：使电介质丧失其绝缘性能而导电时，作用于其上的最低临界电压。

击穿电场强度：使电介质击穿的外加最低临界电场强度。

绝缘强度：在均匀电场中，电介质保持其绝缘性能所能耐受的最高临界电场强度，其数值在均匀电场中等于击穿电场强度。

绝缘水平：电气设备的绝缘结构出厂时保证承受的试验电压。

第一章 气体的绝缘强度

空气在一般电场强度作用下是良好的绝缘材料，且在放电时除去外加电压或降低外加电场强度后，还能自动恢复其绝缘性能。例如，在架空输电线之间和高压电器套管之间的空气间隙，都是用空气作绝缘材料的。

讨论气体的绝缘强度，主要是明确气体绝缘放电的机理、影响气体绝缘放电的因素、提高气体放电电压的措施，确定气体间隙恰当的绝缘距离。

基 本 要 求

(1) 明确气体为什么会放电，放电的基本物理过程，在各种不同条件下的放电现象和实验结果。

(2) 明确汤森德理论中讨论气体放电问题的假定条件，汤森德第一电离系数 α ，汤森德自持放电条件式是怎样得出来的及式中各符号和参数的物理概念，由汤森德自持放电条件式导出气体放电电压与气体压力和极间距离乘积的函数表达式及该式的适用范围，汤森德理论与大气压下气体间隙放电的差异及流注理论对气体间隙放电的解释。

(3) 体会流注理论是按怎样的研究思路得出的。

(4) 了解长间隙气体放电的先导放电、主放电过程。

(5) 能够解释各种因素对气体放电的影响，说明所采用的提高气体间隙放电电压的措施为什么能提高气体间隙的放电电压。

(6) 了解沿面放电的基本物理过程，沿面放电电压低于气体间隙击穿电压的原因，对一般情况下所采用的提高沿面放电电压的措施为什么能提高沿面放电电压作出解释。

(7) 明确绝缘子串的实际电压分布，电压分布不均匀的主要原因，均压环能改善绝缘子串电压分布的原因。

第一节 气体放电的基本物理过程

一、短间隙均匀电场中气体放电的实验结果

在19世纪末，通过如图1-1(a)所示的实验接线，得出了如图1-1(b)所示的气体放电的伏安特性曲线。用灯光照射阴极，在两极距离为1cm时，作用于极间的直流电压 U 由零逐渐增加（毫伏级），经检流计 G 中的电流随之增加，如曲线的 oa 段。当电压达 U_0 时，电压即使再增加达约千伏级，电流也几乎不随电压的增加而加大，呈现电流的饱和状态，如曲线的 ab 段。饱和电流值极小，约为 10^{-11} A/cm^2 ，故这时空气的电阻率 ρ 值达 $10^{11} \Omega \cdot \text{cm}$ ，间隙中的空气仍处于良好的绝缘状态。通过空气间隙的电流是泄漏电流。

当电压增高到 U_0 后, 随电压的增加, 又出现电流的增长, 如曲线的bc段, 但电流密度仍有限, 通常为微安数量级。

当电压增至 U_c 时, 电流突然加大, 如曲线中c点以后。这时电流猛增, 但因回路中有电阻 R , 在电阻 R 上的压降使两极板间的电压 U 反而

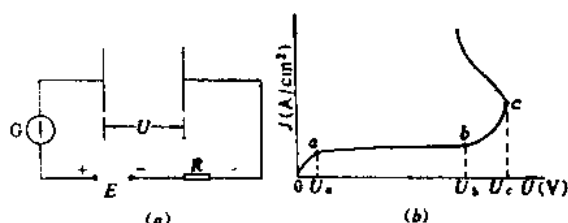


图 1-1 气体放电的伏安特性

(a) 气体放电伏安特性实验接线; (b) 气体放电伏安特性曲线

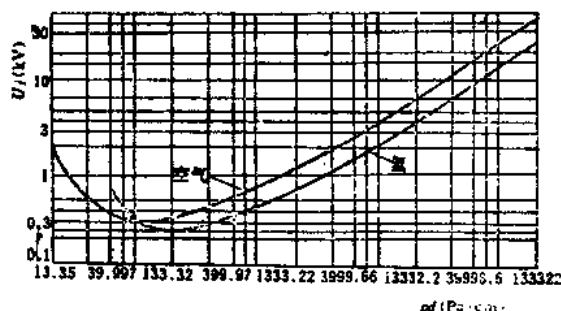


图 1-2 气体击穿电压 U_0 与气压 p 和极距 d 乘积的关系
和气体压力(简称气压)乘积的实验曲线, 如图1-2所示。

气体击穿电压与气压和极距乘积的关系曲线, 称为巴申曲线。该曲线表明: 气体的击穿电压 U_0 随气压 p 和极距 d 的乘积而变, 且在 pd 乘积为某一值时, 气体击穿电压 U_0 具有一个最小值。

二、激励、电离、反激励及复合

为了解释气体放电的发展过程和实验现象, 首先要讨论气体间隙中带电粒子的形成和消失。

正常状态下的原子, 其原子核外的电子分别沿着各自的轨道绕原子核运动, 这时其内部储能最小。当原子核外电子受到外界能量的作用, 电子的动能加大, 电子就跳到离原子核较远的轨道上去, 称该原子被激励了。

若原子核外的电子受到外界能量的作用, 电子的动能加大到足以克服原子核的引力时, 电子就超出原子的所有轨道跑到空间成为自由电子, 原子失去一个或几个电子就成为带正电的离子, 这种现象称为电离。

原子的激励和电离都需要外界能量的作用, 激励和电离所需要的能量分别称之为激励能和电离能。激励能和电离能取决于原子、分子的结构, 显然激励能小于电离能。

激励能和电离能的值是很小的, 其单位通常用电子伏特(eV)表示。1eV是一个电子在电场中经1V电位差距离所获得的能量。

如果用电子的电荷量除以用电子伏特表示的激励能或电离能, 则相应地得到用伏表示的激励电位和电离电位。在表1-1中列出了几种气体和金属蒸汽的第一激励电位和第一电离电位。

原子被激励后再受到外界能量的作用而发生的电离, 称为“分级”电离。分级电离所

减小。

电压升高到 U_0 点, 电流突然增大, 表示间隙中的空气已失去其绝缘性能而击穿, 故 U_0 即为该间隙的击穿电压值。

1889年, 巴申得出了在气体温度保持不变条件下, 气体短间隙的击穿电压 U_0 (幅值)与极间距离(简称极距)

表 1-1 几种气体和蒸汽的电离
电位和激励电位

气体和金属蒸汽	第一激励电位 (V)	第一电离电位 (V)
氢 (H)	10.15	13.53
空 气	—	16.3
氖 蒸 汽 (Ne)	1.38	3.88
钠 蒸 汽 (Na)	2.09	5.12
水银蒸汽 (Hg)	4.89	10.39

需外界作用的总能量，不小于原子的电离能。

原子的激励状态只能在很短的时间内 ($10^{-8} \sim 10^{-9}$ s) 存在。在这短暂的时间内，若又受到外界能量的作用，则可能产生分级电离：激励状态的原子若没有再受到外界能量的作用，则激励时跳到较高能级的电子，就要放出激励时所吸收的能量，自动跳回到原来较低的能级处。与激励相反的这个过程，称之为反激励。

正离子与带负电荷的质点（负离子或电子）结合为中性的分子或原子，称之为复合。

反激励和复合所放出的能量，是以光的形式辐射出来的。放电时所发出的光，便是由于反激励和复合以光的形式放出能量的结果。

三、空间气体的电离

气体分子的电离可分三种。

（一）碰撞电离

碰撞电离主要是由电子与气体质点相碰撞而发生的。在电场的作用下，电子在运动中得到了电场给予的能量，若电子的动能等于或大于被撞气体质点的电离能，则被碰撞的气体质点就可能被电离。

在相邻两次碰撞之间，带电质点所经过的路程，称为自由行程。但由于离子的体积、质量比电子大得多，离子的自由行程比电子小得多，因此在一般情况下，离子要积聚足够产生碰撞电离的电离能的概率，是不能与电子相比的，故离子在空间产生的碰撞电离，对气体放电所起的作用是很小的。

（二）光电离

光电离包括两种情况：一种是反激励和复合时放出的光能，连续作用于气体中性质点而产生的电离；另一种是由于外界电离因素，例如宇宙射线、紫外线及地球上放射性元素的辐射线等的作用，使大气中不断的产生电离。由射线作用产生的电离，使空气中带电质点数增加。在电离的同时也伴随着复合，随着空气中带电质点浓度的加大，复合数也加多。电离与复合的动平衡，使一般状况下每立方厘米空气中约有 $500 \sim 1000$ 对正、负带电质点。而一般状况下每立方厘米空气中约有 3×10^{18} 个分子。二者相比，空气中的带电质点数是很小的，故在一般情况下空气的电导率是很小的，可谓良好的绝缘材料。但空气中存在的这少量电荷，在电场作用下，对引起空气间隙的放电却起着重要的作用。

（三）热电离

在很高的气体温度下，高速分子相互碰撞而产生的电离，称为热电离。

四、表面电离

金属表面发生电子放射的现象，称为表面电离或表面放射。

使电子能够克服金属表面的约束而逸出到空间去，需要供给其一定的能量，即逸出功，其单位用电子伏特表示（也可以用逸出电位表示）。

逸出功与金属微观结构有关，不同金属的逸出功不相等。金属表面状态（如氧化等），对逸出功也有影响。表1-2列出了一些金属和金属氧化物的逸出功。

表 1-2

金属和金属氧化物的逸出功

金 属	逸 出 功 (eV)	金 属	逸 出 功 (eV)
氧化钨	1.0 ₀	钨	3.95
铯	1.88	水 银	4.52
钠	2.12	氧化钨	5.34

金属的逸出功比气体的电离能小得多，故表面放射在气体放电中有重要作用。

一般用下述四种方式把外部能量给予金属中的电子，并使其逸出金属表面。

1. 热电子放射 将金属加热到一定温度，使某些电子逸出金属，称为热电子放射。电子管和日光灯等都利用加热灯丝来发射电子。

2. 光电放射 波长较短的光照射在阴极上，使某些电子逸出金属，称为光电放射。

3. 强场放射 阴极附近有很强外电场作用时，使金属中某些电子逸出金属，称为强场放射或冷放射。

4. 表面放射 在电场中，向阴极运动具有一定动能的正离子撞击阴极时，正离子的动能给予金属中的电子，并且在正离子对金属中电子的引力作用下，某些电子逸出金属，形成表面放射。

五、电极间带电质点的消失

电极间电介质的漏电、放电及其绝缘性能的恢复，都取决于电极间带电质点的数量。放在电介质放电时和放电后除去外加电场时，电极间带电质点的消失速度越快，极间电荷数就越少，放电就会减弱甚至中止，电介质的绝缘性能就会很快恢复。这对放电后电弧的熄灭起着重要的作用。极间带电粒子的消失，在断路器和避雷器灭弧中是特别重要的问题。

极间带电粒子的消失可分为扩散、复合及带电质点在电极处的消失。

（一）扩散

带电质点的扩散是指带电质点从浓度较大的区域转移到浓度较小的区域的过程。例如，断路器中的油吹弧、气吹弧，避雷器中的气吹弧和磁吹弧，都是使带电质点加速扩散的措施。

（二）复合

两异号带电质点结合成一个中性质点，称为复合。复合需要在一定的时间内进行，且

两质点相互间须处在很近的范围内。所以，它们的相对速度越大，复合的概率也就越小。电子的运动速度比离子快得多，因此离子间的复合比正离子和电子的复合较容易发生。正、负离子的浓度越大，则其复合数也越多。

(三) 极间带电质点在电极处的消失

极间带电质点在电极处的消失，分为两种情况：一为电子进入阳极；另一为正离子运动到阴极时，由于对阴极的作用，使阴极放出电子与其结合成中性质点。

六、气体放电伏安特性的解释

图1-1(b)所示曲线的 ab 段，当电压大于 U_0 后，由于在单位时间内，外界射线在间隙中产生的带电质点已全部定向运动至电极处，所以电压虽再加大，定向运动的带电质点数目也不再增加，故电流呈现饱和。

在曲线 bc 段，电压加大，电场增强，电流又随之明显增加。这表明在电压大于 U_0 后，间隙中定向运动的电荷数目又增加了，显然这是由于电场增强的作用而引起的。电场增强使外界电离因素提供的电荷（主要是电子）动能加大，产生了碰撞电离，使气体产生了放电。这时若停止外界电离因素的继续作用，则放电电流就要逐渐减弱直至为零。对停止外界电离因素的继续作用，只由极间电压不能维持的放电，称之为非自持放电。

在非自持放电阶段，极间电场虽已达千伏级，但通过间隙的电流通常远小于微安级，故气体仍起着绝缘的作用。

c 点以后，电流将急剧加大，极间电压反而下降，间隙中的气体已失去其绝缘性能而导电， c 点是间隙的击穿点， U_c 值即为该间隙的击穿电压。

七、巴申曲线的解释——汤森德理论

(一) 巴申曲线的定性解释

解释气体放电电压与气压和极距的关系，目的是要说明碰撞电离数与气压和极距的关系。

电子碰撞气体的分子或原子使其产生电离，电子就需要具有一定的能量。不是所有电子碰撞气体的分子或原子都能产生电离。故

$$\text{碰撞电离数} = \text{碰撞次数} \times \text{碰撞电离概率}$$

在巴申曲线击穿电压最低值的右侧，对应的是气压较高的区域，正常的大气压力 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ （1个大气压）就在这一区域内，若气压 p 保持不变，则气体的密度 δ （在温度不变的条件下）不变，电子的自由行程不变，则电子在单位距离内发生的碰撞次数不变。若极距 d 加大（假定外加电压值未变），则极间电场强度 E 降低，作用在电子上的力减小，电子在一个自由行程中所获得的电场能量减小。虽然极距 d 加大，电子自阴极至阳极总的运动距离加大，总的碰撞次数增加，但因碰撞电离概率减小的更多，使总的碰撞电离数减少，故击穿电压随 pd 值加大而增加。

若极距 d 保持不变，电场强度也不变，而气压 p 加大，则密度 δ 加大，自由行程减小，电子在单位距离内发生的碰撞次数虽然增加，但因电子积累的动能减小，碰撞电离概率大为降低，使碰撞电离数减少，故击穿电压增加。

可见在巴申曲线击穿电压最低值右侧，因碰撞电离概率起主导作用，而碰撞次数起次

要作用，故随 pd 值加大，击穿电压提高。

巴申曲线击穿电压最低值的左侧一般对应的是在密闭的容器中，抽成不同真空度的状态。在此区域内，若极距 d 不变，而气压 p 减小，虽然碰撞电离概率加大，但碰撞次数大为减少，使碰撞电离数减少，故击穿电压提高。若气压 p 不变，极距 d 减小（假定外加电压未变），虽然碰撞电离概率加大，但总的碰撞次数大为减少，使碰撞的电离数减少，故击穿电压提高。

在巴申曲线击穿电压最低值左侧，因碰撞次数起主导作用，而碰撞电离概率起次要作用，故随 pd 值减小，击穿电压提高。

（二）汤森德理论

巴申得出气体击穿电压与气压、极距关系的实验曲线后，经20来年，于本世纪初，英国物理学家汤森德（Townsend）才提出了比较系统的气体放电理论，阐述了短间隙气体的放电过程，并在一系列假设的前提下，得出了在均匀电场短间隙中，气体击穿电压与极距乘积的计算公式，即巴申曲线的数学表达式。

1. 电子崩的形成 外界电离因素（如图1-3中的箭头）使阴极逸出的电子，若在场作用下，积累了足够的能量，将成为碰撞电离导致间隙放电的起始电子。起始电子在场作用下，获得电场能量，动能加大，产生碰撞电离。被撞分子电离，产生出的电子与原有电子都又将场获得动能，各自去碰撞中性质点（分子或原子），又发生碰撞电离。这样一代一代不断增加的过程，会使电子数目成指数规律增加，如同发生山崩一样。故将由起始电子在场作用下发生碰撞电离，使带电质点迅速增加的现象称为电子崩。出现电子崩的过程中，由于电子逆电场方向的运动速度比正离子顺电场方向的运动速度约大两个数量级，所以电子总是积聚在前而，而正离子则大体上停留在产生它的地方，较缓慢地向阴极移动，故在极间形成如图1-3所示的正、负电荷的分布区域，称之为电子崩区域。一般所说的电子崩，往往是指电子崩区域，电子崩崩头的电荷密度远远大于崩的中部和崩的尾部，且负电荷集中在崩头，崩的中部和崩的尾部则多是正离子。电子崩中虽有更多的带电质点，但其数量级相对中性质点来说，还是很小的，其电导仍是有限的，故在电子崩内，还具有较大的电场强度。

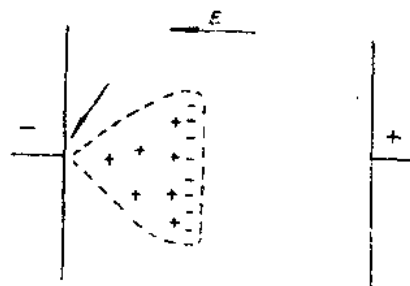


图 1-3 电子崩形成示意图

2. 汤森德电离系数 为了得出气体击穿电压的汤森德计算公式，汤森德主要考虑了两个电离系数（即第一和第二电离系数）。

第一电离系数 α ：一个电子在电场作用下逆电场方向运动1cm距离，平均发生的碰撞电离数，即碰撞次数与碰撞电离概率之积。

碰撞次数：一个电子逆电场运动1cm距离的平均碰撞次数，即平均自由行程 λ （自由行程的平均值）的倒数 $1/\lambda$ 。

当气体温度不变时，平均自由行程 λ 和气压 p 成反比

$$1/\lambda_p = AP \quad (1-1)$$

式中 A ——比例系数，取决于气体分子的体积，是气体的一个常数。

碰撞电离概率：一个电子在电场中运动，发生一次碰撞引起电离的概率。

一个电子受电场 E 的作用，在一个自由行程 λ 中，获得的电场能量为 W ，则 $W = eE\lambda$ ，其中 e 是电子的电量。

汤森德假定：要发生碰撞电离，电子的能量应不少于被撞质点的电离能（不计分级电离），即

$$eE\lambda \geq W_d = eV_d$$

式中 V_d ——电离电位；

W_d ——气体分子的电离能。

通过图1-4来计算电子自由行程 λ 等于或大于 λ_d 的概率，即电子的碰撞电离概率。设在 $x=0$ 处有 N_0 个电子逆电场方向运动，经 x 距离时，还剩下 N 个电子未发生碰撞，再经 dx 距离， N 个电子中发生碰撞的电子数为 dN ，则

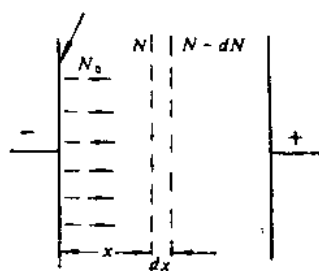


图 1-4 推导碰撞电离概率示意图

$$dN = -N \frac{1}{\lambda} dx$$

式中负号表示未发生碰撞的电子数减少了，故增量 dN 是负的。将上式分离并积分，得

$$\frac{N}{N_0} = e^{-x/\lambda} \quad \text{或} \quad N = N_0 e^{-x/\lambda} \quad (1-2)$$

式(1-2)表示在 N_0 个电子中有 N 个的自由行程 λ 大于 x 的概率。

若令 $x = \lambda_d$ ， λ 用 λ_d 代替，并取 $N_0 = 1$ ，则

$$N = e^{-\lambda_d/\lambda_d} \quad (1-3)$$

式(1-3)表示一个电子逆电场运动 λ_d 距离，在所发生的碰撞次数中，引起碰撞电离的概率。

将式(1-1)代入式(1-3)，得

$$N = e^{-\frac{V_d AP}{E}}$$

由于 A 是气体的一个常数， V_d 是气体分子的电离电位，是取决于分子结构的一个常数，故可用气体的另一个常数 B 来代替 $V_d A$ ，即

$$B = V_d A$$

则

$$N = e^{-BP/E} \quad (1-4)$$

由第一电离系数 α 的定义可知

$$\alpha = AP e^{-BP/E} \quad (1-5)$$

第三电离系数 γ ：一个正离子对阴极的作用使阴极放射出的“有效电子”数。所谓有效电子是指正离子使阴极放出的总电子中，除去与正离子结合的以外，剩余的向阳极运动，这些电子对间隙放电起有效作用，称有效电子。