



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材



HIGH VOLTAGE ENGINEERING

高电压工程

(第三版)

林福昌 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

高电压工程

(第三版)

主编 林福昌
编写 刘 浔 陈俊武 尹小根
李 化 戴 玲
主审 喻剑辉



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。

本书共分为3篇12章，主要内容有气体电介质的绝缘特性，液体、固体电介质的绝缘特性，常用电气设备的绝缘，绝缘性能试验，绝缘耐压试验，高电压和大电流的测量，线路与绕组中的波过程，雷电及防雷保护装置，电力系统防雷保护，电力系统内部过电压，电力系统绝缘配合，高电压技术在不同领域中的应用。

本书为高等院校电气工程及其自动化专业的本科教材，也可用作相关专业专升本及函授教材，同时可作为电气工程技术人员参考书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压工程 / 林福昌主编. —3版. —北京: 中国电力出版社, 2016.2

“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

ISBN 978-7-5123-8782-9

I. ①高… II. ①林… III. ①高电压—高等学校—教材
IV. ①TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第006679号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006年2月第一版

2016年2月第三版 2016年2月北京第九次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19印张 458千字

定价 38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

随着高电压技术的快速发展，对一些现象和规律的认识正在深入，本书为上一版的修订本，以期更好地反映本学科的发展，并增强可读性。

本次修订主要表现在下述几点：

（1）反映了最新的标准和规范，如引入了高电压试验、输电线路防雷保护、接地技术等方面的最新标准。

（2）反映了最新的技术和工程进展，如增加了与特高压有关的绝缘结构和绝缘配合方面的内容。

（3）更加贴近工程应用实际，如增加了电气设备参数、绝缘结构与尺寸、常用绝缘材料等内容，并改进了绝缘在线监测方面的描述。

此外，通过考证相关文献，对一些描述进行了更改，如气体放电特性、绝缘子、避雷器等方面的内容。

本书由林福昌负责修订。中南电力设计院李健和马亮、广东东莞供电局张登、中国电力科学研究院南敬等为本书的修订提供了宝贵的资料和建议，刘云龙提供了电场计算结果，在此一并表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编 者

2015年10月

第一版前言

高电压技术是电气工程及其自动化专业的一门技术基础课。从事强电工作的工程技术人员，需要具备高电压技术的基本素养，并需要经常运用高电压知识解决工程实际问题。本书的主要读者对象是电气工程类本科生和从事高电压工作的工程技术人员。

全书共分为3篇12章，内容力求全面，基本涵盖了高电压工程中的所有问题。在着重于基本概念和基本原理的同时，也注意和生产实际相结合，内容深入浅出，以便于自学和教学。本书在编写过程中，基本沿袭了传统的体系，同时参考了国内外不少的教材和资料，并引用了当前的相关国际标准和国家标准，力求做到概念清楚、数据正确，反映高电压技术的发展。同时，本书又介绍了高电压工程在非电力领域的一些应用，借以开阔视野，因此，书名定为《高电压工程》。

本书编写分工如下：刘浔编写第1、2、3章，陈俊武编写第4、7章，尹小根编写第5、6章，其余部分由林福昌编写。刘春参与了第1章的编写工作，王清玲、严飞等人参加了绘图工作。全书由林福昌统稿。

西安交通大学李彦明教授、武汉大学鲁铁成教授、华中科技大学王晓瑜教授、姚宗干教授、张国胜副教授等审阅了本书的初稿，提出了许多宝贵意见，在此向他们表示衷心的感谢。

由于编者的水平有限，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2005年3月

第三版前言

本书是应中国电力出版社要求，在2006年出版的《高电压工程》（第一版）的基础上修订的。全书共分12章，涵盖了高电压绝缘、高电压试验以及过电压与绝缘配合三方面的内容，并对高电压技术在非电力系统的一些应用进行了介绍。

高电压技术本质上反映了强电场中的电介质现象。近十年来，高电压技术在电力和非电力领域均得到了广泛的应用。在电力领域，我国相继建设了特高压交流和直流输电线路，与高电压技术相关的电力电缆和开关技术发展迅速；在非电力领域，高电压技术在材料、环保、医疗和新能源等方面也发挥了越来越多的作用。同时，随着高电压技术研究的进展，人们对一些高电压现象和规律有了新的认识，形成了新的相应的标准。本书在编写过程中，参考了国内外最新的研究成果，力求做到概念清楚、数据准确，能反映近年来高电压技术的发展，内容更全面。

本书在修订过程中，主要体现如下原则。

(1) 在高电压绝缘、高电压试验等内容描述中，弱化在电力系统中的应用这一背景，而从电介质特性方面入手来介绍。

(2) 体现了高电压技术新进展，如加强了复合绝缘子、金属氧化物避雷器、气体绝缘变电站、在线监测的常用方法等内容的介绍。

(3) 根据现行的相关国际和国内标准进行了修订和补充，如建筑物防雷中采用的滚球法、接地网中电位差的计算、操作过电压的保护方式等内容，对经验公式和曲线均尽可能依据标准和原始出处进行了核对。

本书由李化和戴玲负责第3章的修订，其余部分由林福昌负责修订。

武汉大学喻剑辉教授对本修订稿进行了详细的审阅，提出了许多宝贵意见和建议，在此谨表示衷心的感谢。

由于编者的水平所限，书中难免存在不妥和疏漏之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年8月

目 录

前言

第一版前言

第二版前言

第1篇 电介质的电气特性

1 气体电介质的绝缘特性	1
1.1 气体中带电粒子的产生和消失	1
1.2 均匀电场中气体的击穿	4
1.3 不均匀电场中气体的击穿	12
1.4 气体间隙的稳态击穿电压	18
1.5 雷电冲击作用下气体间隙的击穿	21
1.6 操作冲击作用下气体间隙的击穿	25
1.7 大气条件对间隙击穿电压的影响	26
1.8 提高气体间隙击穿电压的措施	28
1.9 沿面放电	32
习题	38
2 液体、固体电介质的绝缘特性	39
2.1 电介质的极化、电导与损耗	39
2.2 液体电介质的击穿	48
2.3 固体电介质的击穿	52
2.4 组合绝缘的电气强度	55
2.5 电介质的老化	57
习题	60
3 常用电气设备的绝缘	61
3.1 绝缘子的绝缘	61
3.2 高压套管的绝缘	69
3.3 电容器及电缆的绝缘	74
3.4 变压器的绝缘	80
3.5 高压电机的绝缘	86
3.6 GIS 设备的绝缘	89
习题	91

第2篇 电气设备绝缘试验

4 绝缘性能试验	93
4.1 绝缘电阻和泄漏电流测量	93
4.2 介质损耗角正切的测量	97
4.3 局部放电测量	100
4.4 绝缘油的电气试验和气相色谱分析	105
4.5 绝缘的在线监测	106
习题	109
5 绝缘耐压试验	111
5.1 工频耐压试验	111
5.2 直流耐压试验	117
5.3 冲击耐压试验	121
5.4 冲击电流试验	126
习题	129
6 高电压和大电流的测量	131
6.1 交流高压的测量	131
6.2 直流高压的测量	136
6.3 冲击高压的测量	138
6.4 冲击电流的测量	145
习题	148

第3篇 电力系统过电压与绝缘配合

7 线路与绕组中的波过程	149
7.1 波沿均匀无损单导线的传播	149
7.2 波的折射和反射	153
7.3 波通过串联电感和并联电容	159
7.4 波的多次折、反射, 网格法	162
7.5 贝杰龙法计算过电压	164
7.6 平行多导线系统中的波过程	170
7.7 波的衰减与变形	174
7.8 变压器绕组中的波过程	177
7.9 旋转电机绕组中的波过程	186
习题	188
8 雷电及防雷保护装置	189
8.1 雷云放电及雷电过电压	189
8.2 雷电参数及雷电活动特性	191

8.3	避雷针和避雷线	192
8.4	避雷器	197
8.5	接地技术与接地装置	205
	习题	209
9	电力系统防雷保护	210
9.1	输电线路的防雷保护	210
9.2	发电厂和变电站的防雷保护	220
9.3	旋转电机的防雷保护	231
	习题	233
10	电力系统内部过电压	234
10.1	工频过电压(工频电压升高)	234
10.2	谐振过电压	239
10.3	间歇性电弧接地过电压	247
10.4	切除空载线路过电压	252
10.5	空载线路合闸过电压	254
10.6	切除空载变压器过电压	257
	习题	259
11	电力系统绝缘配合	261
11.1	概述	261
11.2	中性点接地方式对绝缘水平的影响	262
11.3	绝缘配合的惯用法和电气设备绝缘水平的确定	263
11.4	绝缘配合的统计法	265
11.5	架空输电线路的绝缘配合	267
	习题	271
12	高电压技术在不同领域中的应用	272
12.1	带电粒子束的产生及其作用	272
12.2	静电应用	275
12.3	放电等离子体的应用	276
12.4	高电压技术的其他应用	280
附录 A	一球接地时,标准球隙放电电压表	281
附录 B	国家标准规定的有关设备参数	285
附录 C	外绝缘破坏性放电电压的大气校正因数	287
	参考文献	290

第1篇 电介质的电气特性

绝缘的作用是将电位不相同的带电导体隔离，使它们不存在电气上的连接，从而保持不同的电位。具有绝缘作用的材料称为电介质。电介质有气体电介质、液体电介质和固体电介质三种类型。在各种电气设备中的绝缘都是由这些电介质构成的，所以电介质是电气设备的重要组成部分。

用作绝缘的电介质在通常情况下是不导电的，是良好的绝缘体。但它的绝缘性能不是绝对的，当作用于绝缘上的电压超过某一临界值后，绝缘就将受到破坏而部分或全部丧失绝缘性能，直至变成导体。绝缘通常是电气设备中的薄弱环节，一旦设备的绝缘受到破坏，设备就将出现事故，造成损失。所以必须了解、研究和掌握电介质在高电压作用下的电气特性，发展性能更好的绝缘材料，优化绝缘结构，改进绝缘的制造工艺，从而提高电气设备绝缘的可靠性。

本篇的主要内容有气体电介质的电气物理特性及在电压作用下的击穿过程与规律，液体、固体电介质的基本特性和放电发展规律，主要高压电气设备的典型绝缘结构和特点。

1 气体电介质的绝缘特性

气体绝缘介质在电力系统中应用非常广泛。空气是架空输电线路和电气设备的主要外部绝缘介质；在电气设备中也常用到具有一定压力的气体作为绝缘介质，如气体绝缘变电站（GIS）和用六氟化硫（ SF_6 ）气体、压缩空气或真空作为绝缘的开关等。在一定的电压作用下，气体中会出现放电现象，甚至完全丧失其绝缘特性。气体放电理论是迄今解释其他类型的电介质放电的基础。

1.1 气体中带电粒子的产生和消失

1.1.1 带电粒子的产生

气体放电就是气体中的带电粒子在电场作用下作定向运动形成导通电流的现象，此时气体介质导电性增强、电阻下降。通常情况下，由于紫外线、宇宙射线和放射性物质产生的高能辐射线的作用，气体中总是存在少量带电粒子。但由于这些带电粒子数量极少，如大气中每立方厘米的体积内约有 1000 对正、负带电粒子，所以电流极小，气体仍然为良好的绝缘介质。只有当带电粒子数目急剧膨胀，电流突增的情况下，气体才会失去绝缘特性。

原子在外界因素（强电场、高温等）的作用下，吸收外界能量使其内部能量增加，其电子可由低能级跃迁到能级较高的轨道运行，这个过程称为原子激励。此时原子的状态称为激发态，电子还未摆脱原子核的束缚。激励过程所需的能量称为激励能。

气体中的分子通常处于正常状态。如果中性分子在外界因素作用下，获得足够大的能量，可使分子中的一个或几个电子完全摆脱原子核的束缚，形成自由电子和正离子，这个过程就称为分子的电离。电离是激发的极限状态，电离后形成的正离子就是分子失去一个或几个电子后形成的带正电的粒子。电离过程所需要的能量称为电离能 W_i ，一般为 $10\sim 15\text{eV}$ ($1\text{eV}=1.6\times 10^{-19}\text{J}$)。显然，发生电离的条件就是分子从外界获取的能量大于或等于原子的电离能。

气体分子的电离可由下列因素引起：

- (1) 电子或正离子与气体分子的碰撞。
- (2) 各种光辐射。
- (3) 高温下气体中的热能。

根据不同的电离因素，强电场作用下的电离有碰撞电离、光电离等多种形式。

一、碰撞电离

气体中的分子、电子、离子等粒子都处于热运动之中。气体中的粒子在运动过程与其他粒子不断发生碰撞，每碰撞一次运动方向就发生转折，因此其轨迹为一条不规则的折线。一个粒子在连续两次碰撞之间行进的距离称为自由行程。由于气体中粒子运动的特点使参与的粒子数目多，碰撞频繁，各个质点的运动速率和方向均不一样，因此自由行程具有统计性，通常用平均自由行程来表示。

处在电场中的带电粒子，除了经常地做不规则的热运动、不断与其他粒子发生碰撞外，还受电场力的作用，沿电场方向不断加速并积累动能。显然，这种动能与其自由行程有关。当具有足够能量的带电粒子与中性气体分子碰撞时，就可能使气体分子产生电离。这种由碰撞而引起的电离称为碰撞电离。

气体中的电子、离子及其他粒子与中性分子的碰撞都可能产生电离，但因为电子的体积及质量比离子小得多，其平均自由行程远大于离子的自由行程，因此容易被电场所加速，并积累起电离所需的能量。而离子或其他粒子因其本身的体积和质量较大，难以在碰撞前积累足够的能量，且碰撞时能量交换效率较低，因而产生碰撞电离的可能性很小。电子在强电场中运动引起的碰撞电离，是气体中带电粒子的主要来源，在气体放电中起着重要的作用。

电子从电场中获得的能量为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = Eqx \quad (1-1)$$

式中： m 为电子的质量； v 为电子的速度； E 为电场强度； q 为电子的电量； x 为电子在电场作用下的移动距离。

当电子的动能大于或等于气体分子的电离能时，就有可能因碰撞引起电离，因此产生电离的条件为

$$Eqx \geq W_i \quad (1-2)$$

式中： W_i 为气体分子的电离能。

二、光电离

由光辐射引起的气体分子电离称为光电离。光辐射的能量与光子的波长有关，波长越短的光能量越大。光子的能量为

$$W = h\nu \quad (1-3)$$

式中： h 为普朗克常数， $h=6.63\times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$ ； ν 为光子频率。

当气体分子受到光辐射作用时，如果光子的能量大于或等于气体分子的电离能，就有可能引起光电离。因此产生光电离的条件为

$$h\nu \geq W_i \quad (1-4)$$

光电离在气体电离中起着重要的作用。对所有气体，在可见光作用下，由于光子能量低，一般不能直接发生光电离。各种短波长的高能辐射线，例如宇宙射线、X射线、 γ 射线以及紫外线等，都有较强的电离能力。在放电过程中处于较高能级的激发态原子回到正常状态，以及异号离子复合成中性原子或分子时，都以光子的形式放出多余的能量，也成为导致电离的因素。

三、热电离

因气体热状态引起的电离过程，称为热电离。在常温（20℃）下，气体分子因热运动所具有的平均动能（约 $3 \times 10^{-2} \text{eV}$ ）远低于气体分子的电离能，因此产生热电离的概率很小。但是在高温下，气体分子具有的平均动能很大，容易导致气体分子间的碰撞，产生碰撞电离。此外高温气体的热辐射光子的能量也很大，也能导致光电离，因此热电离是碰撞电离与光电离的综合。

气体分子的平均动能 \bar{W} 和气体温度有如下关系

$$\bar{W} = \frac{3}{2}KT \quad (1-5)$$

式中： K 为波尔茨曼常数， $K=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ ； T 为绝对温度，K。

随着温度升高，气体分子动能增加，当气体分子的动能大于气体分子电离能时，就可能引起热电离。一般气体开始有较明显热电离的起始温度为 10^3K 数量级。

四、表面电离

在外界电离因素的作用下，电子可能从金属电极的表面释放，称为表面电离或表面发射。电极发射电子所需要的能量叫逸出功。逸出功的大小与电极材料及气体表面的状态有关，一般在 $1 \sim 5 \text{eV}$ 之间，它小于气体在空间的电离能。这也说明从阴极发射电子比在空间使气体分子电离更为容易。

表面电离与其他电离形式的区别在于，发生其他形式的电离时，电子和正离子同时出现，而表面电离只产生电子，没有正离子出现。

表面电离有多种方式，即可以用各种不同的方式供给电子能量使其逸出金属。表面电离的主要形式有以下几种。

(1) 正离子碰撞阴极。正离子在电场中向阴极运动，碰撞阴极时将动能传递给电子使其逸出金属。

(2) 光电效应。金属表面受到光的照射时，放射出电子。

(3) 强场发射。在阴极附近加以很强的外电场使阴极放射出电子。由于强场发射所需外电场极强，约为 10^7V/cm 量级，所以在一般气体间隙的击穿过程中不会发生。

(4) 热电子发射。将阴极加热到很高温度，使其中的电子获得巨大动能，逸出金属。

1.1.2 带电粒子的运动与消失

气体中发生放电时，除了有不形成带电粒子的电离过程外，还存在着相反的过程，即带电粒子的消失过程。这个过程有导致带电粒子从电离区域消失，或者削弱其产生电离的作用，故通常叫做去电离过程。带电粒子的运动、扩散、复合以及电子的附着效应都属于这样

的过程。当导致气体电离的因素消失后，这些去电离过程将使气体迅速从导电状态恢复到绝缘状态。

一、带电粒子的定向运动

在没有外施电场时，带电粒子做热运动，具有各向均匀性。在有外施电场时，带电粒子在电场的作用下做定向运动，消失于电极，在外回路中形成电流。

二、带电粒子的扩散

气体中的带电粒子经常处于不规则的热运动之中。如果不同区域中的带电粒子存在浓度差，则它们的总趋势是不断从高浓度区域移向低浓度区域，趋向于使各种带电粒子浓度变得均匀，这种现象称为带电粒子的扩散。当空气间隙发生放电，并去掉电源后，放电通道中高浓度的带电粒子就迅速向周围扩散，使间隙恢复原来的绝缘状态。

三、带电粒子的复合

带有异号电荷的正离子与负离子或电子相遇，发生电荷的传递而互相中和，还原为中性分子的过程称为复合过程。复合可在气体空间进行，也可以在容器壁上发生。若放电空间离容器壁较远，则带电粒子之间的复合是主要的。复合的粒子之间的相对运动速度越大，复合的概率就越小，因此电子与正离子复合的概率比正、负离子之间复合的概率要小得多。参加复合的电子中绝大多数是先形成负离子再与正离子复合的。

在带电粒子复合过程中，分子原先在电离时所吸收的电离能将会以光辐射的形式释放。如前所述，这种光辐射在一定条件下又可能成为导致电离的因素。

四、附着效应

某些气体中的中性分子具有较大的电子亲和力，当电子与其碰撞时，便被其吸附而成为负离子，同时放出能量，这个过程称为气体的附着效应。容易附着电子形成负离子的气体称为电负性气体，如氧气、氯气、水蒸气、六氟化硫等都属于电负性气体。

如前所述，由于离子的电离能力远不及电子，电子被分子俘获而形成质量大、速度慢的负离子后，不容易被电场加速，电离能力大为降低。因此，在气体放电中，附着效应起着阻碍放电的作用，电负性气体具有较高的绝缘强度。

1.2 均匀电场中气体的击穿

1.2.1 非自持放电和自持放电

气体放电可分为非自持放电和自持放电两大类。必须借助外加电离因素才能维持的放电称为非自持放电；反之，不需其他任何外加电离因素而仅由电场的作用就能维持的放电称为自持放电。

如图 1-1 所示，在空气中放置两块平行板电极，用外部光源对极板间隙进行照射。在两极间加上直流电压，间隙中形成较均匀的电场，当极间电压逐渐升高时，得到电流和电压的关系如图 1-2 所示。

大气中通常存在着少量的带正、负电荷的粒子，这是大气在空间的宇宙射线等高能射线作用下不断产生的电离与同时进行的

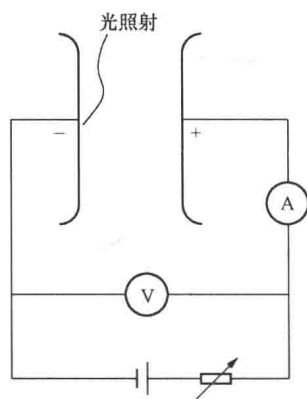


图 1-1 平行板电极实验装置

复合过程相互平衡的结果。此外，当阴极受到照射时也能发射电子。在极间加上电压后，这些带异号的带电粒子分别向两极移动，形成电流。起初，随着电压的升高，带电粒子的运动速度加快，电流也随之增大（见图 1-2 中 0~1 段曲线）。当电压到达 U_1 后，电流不再随电压而增大，因为这时在单位时间内由外界电离因素在极间产生的带电粒子已全部参与了导电，所以电流趋于饱和（见图 1-2 中 1~2 段曲线）。这个饱和电流的密度是极小的，一般只有 10^{-19} A/cm^2 的数量级。因此，这时气体间隙仍处于良好的绝缘状态。当电压到达 U_2 后，电流又随着电压的升高而增大（见图 1-2 中 2~3 段曲线），这时间隙中出现了新的电离因素——碰撞电离，电流越来越大，最后到达图 1-2 中 3 点。此时电流急剧增大，间隙转入良好的导电状态。在外施电压到达 U_0 以前，间隙中的电流很小，且要依靠外界的电离因素来维持，如果消除外界电离因素，电流将消失，这种放电属于非自持放电。当外施电压到达 U_0 之后，气体间隙中发生了强烈的电离，带电粒子的数量急剧增多，电流急速增大，气体间隙呈现良好的导电状态，并伴有发光、发声等现象，此时间隙中的放电依靠电场的作用就可以维持，因此图 1-2 中 3 点以后的放电属于自持放电。因此， U_0 被称为自持放电起始电压。在均匀电场间隙中， U_0 等于间隙的击穿电压 U_b ，根据气压、外回路阻抗等条件形成辉光放电、火花放电或电弧放电。

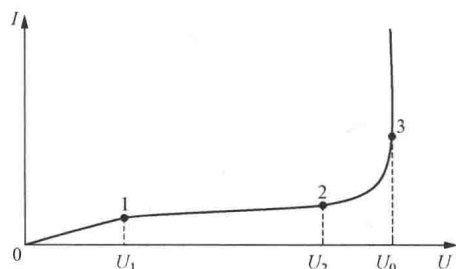


图 1-2 放电电流与电压的关系

1.2.2 汤逊放电理论

20 世纪初，汤逊（J. S. Townsend）根据在均匀电场、低气压、短间隙的条件下的大量实验结果，提出了比较系统的放电理论和电流、电压的计算公式，解释了整个间隙的放电过程和击穿条件。

一、电子崩的形成

在外界电离因素光辐射的作用下，电子主要由阴极发射产生，间隙中出现自由电子，这些电子就是放电的起始电子。起始电子在电场的作用下，由阴极奔向阳极。在这个过程中，电子不断被加速，动能不断积累，同时与中性粒子发生碰撞。当 $U > U_2$ （见图 1-2）时，电场很强，电子的动能达到足够大，有可能产生碰撞电离，电流迅速增大。新电离产生的电子和原有电子一起又从电场中获得动能，继续被加速，从而发生新的碰撞电离。这样就出现了一个连锁反应的局面：一个起始电子从电场获得一定的动能后，与中性粒子碰撞电离出一个第二代电子；这两个电子作为新的起始电子从电场获得动能，又电离出两个新的第二代电子，这时间隙中已存在四个自由电子；这四个自由电子又作为新的起始电子继续与中性粒子发生碰撞电离；……，这样一代一代不断地发展下去。间隙中的电子数目由 1 变为 2，2 变为 4，……，电子的数目迅速增加。这种电子数目迅速增加的过程，犹如高山的雪崩过程，因此被形象地称为电子崩，如图 1-3 所示。由于电子的运动速度要比离子大两个数量级，故崩头电子数目最多，其后直到尾部则是正离子。同时由于粒子的扩散作用，电子崩在发展过程中其半径逐渐增大。电子崩过程的出现使间隙中的电流急剧增大。图 1-2 中 2 点后电流随电压的迅速增长就是碰撞电离引起电子崩的结果。

二、 α 过程及 γ 过程

碰撞电离在产生电子的同时，也产生正离子。电子向阳极运动，正离子向阴极运动。在

正离子向阴极运动的过程中,一方面可能与中性粒子发生碰撞产生碰撞电离,另一方面正离子可能撞击阴极表面使其产生表面电离,逸出电子。从阴极表面逸出的电子作为新的起始电子又重复上述的电子崩过程。这样一直发展下去,使间隙中维持放电状态。

为了定量分析间隙中气体放电过程,引入三个系数。

(1) α 系数。它代表一个电子沿着电场方向行经单位长度后平均发生的碰撞电离次数。设每次碰撞电离产生一个电子和一个正离子,所以 α 就是一个电子在单位长度行程内新电离出的自由电子数或正离子数。 α 系数对应于起始电子形成电子崩的过程,亦称 α 过程。

(2) β 系数。表示一个正离子沿着电场方向行经单位长度后平均发生的碰撞电离次数。 β 系数对应于离子崩的过程,亦称 β 过程。

(3) γ 系数。表示一个正离子碰撞阴极表面时,从阴极表面逸出的自由电子数(平均值)。 γ 系数描述了正离子到达阴极后,引起阴极发射电子的过程,亦称 γ 过程。

与电子崩过程类似,由于离子的体积和质量较大,平均自由行程短,离子在电场中运动获取动能产生碰撞电离的可能性比电子小得多,因此 β 过程基本可以忽略。

如图 1-4 所示,假设气体间隙的距离为 d ,由于某种外界电离因素,从阴极发出一个电子。这个电子在向阳极运动过程中不断引起碰撞电离,电子数目越来越多,经过距离阴极 x 后数目达到 n ,这 n 个电子再经过距离 dx ,产生了新的电子数目为 dn ,则有

$$dn = n\alpha dx \text{ 或 } \frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (1-6)$$

对式 (1-6) 从 0 到 d 积分,可得到达阳极时的电子数为

$$n = e^{\int_0^d \alpha dx} \quad (1-7)$$

若 α 为一常数,则有

$$n = e^{\alpha d} \quad (1-8)$$

这就是电子崩的发展规律。如果 $\alpha d = 10$,则 $n = e^{10} = 2.2 \times 10^4$,远大于 1。

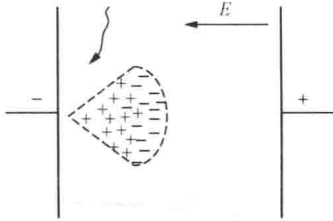


图 1-3 电子崩形成示意图

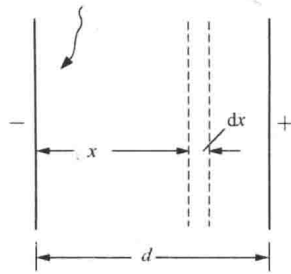


图 1-4 自持放电发展过程计算示意图

三、自持放电条件

n 是 α 过程中包括起始电子在内的电子数。一个电子从阴极出发向阳极运动时,由于碰撞电离形成电子崩,到达阳极并进入阳极的共有 $e^{\alpha d}$ 个电子。除去起始电子外,电子崩发展过程中分别新产生了 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个电子和正离子。这 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子在电场作用下向阴极运动,撞击阴极表面,产生表面电离;一个正离子可电离出 γ 个电子,则 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子就可电离出 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 个电子,即 $\gamma(e^{\alpha d} - 1)$ 表示了这些正离子消失于阴极之前,由 γ 过程又在阴极上释放出的二次电子数。如果 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子在撞击阴极表面时至少能从阴极释放出一个有

效电子，来替代原来那个引起电子崩并已进入阳极的初始电子，那么这个有效电子就成为新的初始电子，将在电场的作用下向阳极运动，产生碰撞电离，发展新的电子崩。这样，即使没有外界电离因素存在，放电也能继续下去，使放电达到自持。所以，自持放电的条件为

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) \geq 1 \quad (1-9)$$

设电子在均匀电场 E 中行进 x 的距离后，与中性粒子发生碰撞，要产生碰撞电离，若忽略其初始动能，则满足

$$\begin{aligned} Eqx &\geq W_i \text{ 或 } Ex \geq V_i \\ E &= U_0/d \end{aligned} \quad (1-10)$$

式中： q 为电子所带电荷； W_i 、 V_i 分别为气体分子的电离能和电离电位； U_0 为间隙两端的电压。

式 (1-10) 的物理意义是：使电子在与气体分子碰撞时产生电离的必要条件为电子在运动中所积聚的动能至少应等于气体分子的电离能。在场强为 E 的电场中运动时，只有那些自由行程超过 $x_i = V_i/E$ 距离的电子，才能与分子发生碰撞电离。如果电子在与气体分子发生两次碰撞之间的平均自由行程为 λ ，则电子沿电场方向运动单位距离与气体分子发生碰撞的平均次数为 $\frac{1}{\lambda}$ 。由气体运动理论可知，相邻两次碰撞之间电子运动距离（自由行程）大于 x_i 的概率为 $e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$ ，因此其中只有 $\frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}}$ 次是电子的自由行程超过 x_i 的碰撞。当气体温度不变时，平均自由行程 λ 和气压 P 成反比。根据电离系数 α 的定义，有如下关系式

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_i}{\lambda}} = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{W_i}{Eq\lambda}} = AP e^{-\frac{W_i}{Eq\lambda}} \quad (1-11)$$

式中： A 为常数； P 为气压； λ 是电子的平均自由行程。

因此

$$\frac{\alpha}{P} = A e^{-\frac{W_i}{Eq\lambda}} = A e^{-\frac{W_i AP}{Eq}} = A e^{-\frac{BP}{E}} \quad (1-12)$$

式中， $B = \frac{W_i A}{q}$ 。

由式 (1-9)，得到自持放电的临界条件为

$$\alpha d = \ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right) \quad (1-13)$$

将均匀电中间隙击穿时的电场强度与电压的关系式 $E = \frac{U_b}{d}$ 代入式 (1-12)，结合式 (1-13)，可以得到

$$\frac{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)}{APd} = e^{-\frac{BPd}{U_b}} \quad (1-14)$$

由此，得到自持放电条件下空气间隙击穿电压 U_b 的表达式为

$$U_b = \frac{BPd}{\ln \frac{APd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (1-15)$$

式中： A 、 B 是两个与气体种类有关的常数； U_b 为间隙的击穿电压，它等于均匀电场中气体自持放电的起始电压。

式(1-15)表明了击穿电压与气体状态等因素之间的关系。从式(1-15)中可以看出，由于 U_b 对 γ 取了两次对数， U_b 对 γ 的变化不敏感，因此 U_b 取决于 P 与 d 的乘积。

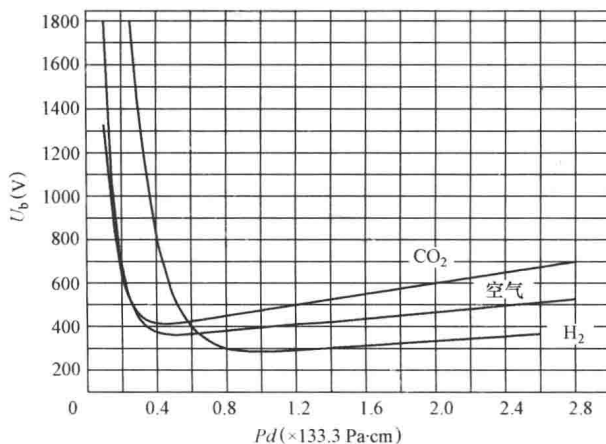
1.2.3 巴申定律

式(1-15)表明的规律在汤逊理论提出之前的1889年由巴申(F. Paschen)从实验中总结出来了，称为巴申定律。其内容是：当气体成分和电极材料一定时，气体间隙击穿电压(U_b)是气压(P)与间隙距离(d)乘积的函数，即

$$U_b = f(Pd) \quad (1-16)$$

巴申定律给汤逊理论以实验支持，而汤逊理论在理论上解释了巴申定律，两者相互印证。

图1-5所示为几种气体在均匀电场中的击穿电压 U_b 与 Pd 值关系的实验曲线。由曲线可见，随着 Pd 的变化，击穿电压 U_b 存在最小值。这一现象可用汤逊理论加以解释：因为形成自持放电需要达到一定的碰撞电离数 αd ，而这又取决于碰撞次数与电离概率的乘积。如果间隙距离 d 固定，则当 P 增大时，气体相对密度增大，电子很容易与气体分子相碰撞，碰撞次数增加，电子的平均自由行程缩短，不易积累动能，引起电离的可能性减小，击穿电压升高；而当 P 减小时，气体相对密度减小，虽然电子的平均自由行程增大，电子在两次碰撞间可积累很大的动能，但碰撞的概率减小，引起电离的次数减少，击穿电压也会升高。因此，在某个气压值 P 下 αd 有最大值，此时 U_b 最小。另一方面，如果气压值 P 固定，则当间隙距离 d 增大时，碰撞次数将增加，但由于距离增大后电场强度降低，电子获得的动能减小，击穿电压升高；而当间隙距离 d 减小时，电子从阴极到阳极的运动距离缩短，发生碰撞的次数减少，因此电离概率减小，击穿电压升高。因此在某个 d 值下 αd 有最大值，此时 U_b 最小。



(a)

图1-5 几种气体在均匀电场中的击穿电压 U_b 与 Pd 值关系的实验曲线(一)

(a) 低气压条件下