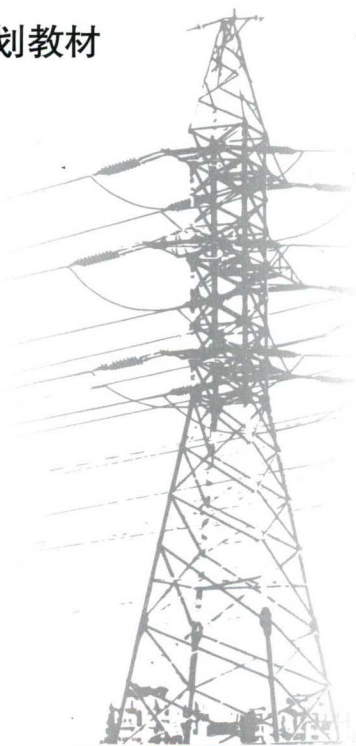




普通高等教育创新型人才培养规划教材



高电压技术

GAODIANYA JISHU

于永进 陈尔奎 赵 彤 编著
公茂法 主审



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育创新型人才培养规划

高电压技术

于永进 陈尔奎 赵彤 编著
公茂法 主审

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

高电压技术是电气技术领域通用性较强的学科,是电气工程及其自动化专业必修的专业课。本书重点介绍高电压技术基本的概念、理论和方法,主要内容包括:电介质的电气强度、电气绝缘与高压试验、电力系统过电压与绝缘配合、电力设备的在线监测与故障诊断。

本书可以作为普通高等学校电气工程及其自动化专业和其他电类专业的教学用书,也可以作为职业技术学院电气类专业教材,还可供电力系统相关技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术 / 于永进,陈尔奎,赵彤编著. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2016. 4
ISBN 978-7-5124-2107-3

I. ①高… II. ①于… ②陈… ③赵… III. ①高电压
—技术 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 079441 号

版权所有,侵权必究。

高电压技术

于永进 陈尔奎 赵 彤 编著

公茂法 主审

责任编辑 董瑞 胡绥霞

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

涿州新华印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:15.25 字数:325 千字

2016 年 5 月第 1 版 2016 年 5 月第 1 次印刷 印数:3 000 册

ISBN 978-7-5124-2107-3 定价:30.00 元

若本书有倒页、脱页、缺页等印装质量问题,请与本社发行部联系调换。联系电话:(010)82317024

前 言

“高电压技术”是电工学科的一个重要分支,也是电气工程及其自动化专业重要的专业课。该课程是由过去高电压技术专业的三门必修课“高电压绝缘”“高电压试验技术”“电力系统过电压与绝缘配合”演变而来,其主要任务在于研究高电压、高场强下的各种电气物理问题。对于电气专业的学生来说,学习本课程的目的是学会正确认识和处理电力系统中绝缘与电压这一对矛盾。

在编写过程中,编者力求做到通俗易懂、精选够用、适当拓宽,编写时兼顾传统内容,将基本物理概念及物理过程解释清楚,并融进国内外新技术与发展,便于学生阅读和自学。为扩大适用面,按照教学总学时为40~50学时编写,编写时注重深入浅出,说理清楚。本书是编者多年教学经验的总结,精选内容,删繁就简,既加强基础教学,又使其具有广泛适用性,兼顾不同读者需求,满足作为教材及教学参考书两方面的要求,教师可按照不同教学学时选择教学内容。

全书围绕绝缘、试验、防护、监测等问题逐步展开阐述,分为4大部分共10章。其中,第1章至第3章介绍气体、液体、固体的放电过程、发展机理及绝缘特性,并分析影响这些特性的因素;第4章介绍交流、直流高电压和冲击高电压的产生方法、原理、基本装置以及测量手段和相关的绝缘试验技术;第5章至第9章介绍电磁暂态分析的理论基础、电力系统雷电过电压与内部过电压产生的物理过程及其防护措施,电力系统绝缘配合的基本概念和方法;第10章介绍电力设备在线监测与故障诊断技术的基本原理及其在电力设备(变压器、断路器、GIS等)中的具体应用,该技术是当前电力行业最具活力的技术领域之一,也是对传统的离线预防性试验的重大补充和拓展。

本教材由山东科技大学于永进、陈尔奎和山东大学赵彤编著,公茂法教授主审。参与本书编写工作的还有赵兴民、李清泉、冯知海、苗全堂等,本教材在编写过程中,得到了本单位领导和老师的大力支持,在此一并表示感谢!

由于编者的水平有限,书中的疏漏或不当之处恳请广大读者批评指正。

编 者

2015年12月

目 录

第 1 章 气体放电的基本物理过程	1
1.1 气体中带电质点的产生和消失	1
1.1.1 气体中带电质点的产生	1
1.1.2 负离子的形成	4
1.1.3 气体中带电质点的消失	4
1.2 气体放电机理	5
1.2.1 汤逊气体放电理论	5
1.2.2 巴申定律	9
1.2.3 汤逊放电理论的适用范围	11
1.2.4 气体放电的流注理论	11
1.3 不均匀电场的放电过程	14
1.3.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的放电特征	14
1.3.2 极不均匀电场中的电晕放电	14
1.3.3 极不均匀电场气隙的击穿和极性效应	16
1.3.4 长气隙的击穿	17
第 2 章 气体介质的电气强度	18
2.1 气隙的击穿时间和伏秒特性	18
2.1.1 气隙的击穿时间	18
2.1.2 气隙的伏秒特性	19
2.2 均匀和极不均匀电场气隙的击穿特性	24
2.2.1 均匀电场气隙的击穿特性	24
2.2.2 极不均匀电场气隙的击穿电压	25
2.3 大气条件对气隙击穿电压的影响	26
2.3.1 对空气密度的校正	26
2.3.2 对空气湿度的校正	27
2.3.3 对海拔高度的校正	28
2.4 提高气隙击穿电压的方法	28
2.4.1 改善电场分布	28
2.4.2 采用高度真空	30



2.4.3	增高气压	31
2.4.4	采用高耐电强度气体	31
2.5	气隙的沿面放电	32
2.5.1	均匀和稍不均匀电场中的沿面放电	32
2.5.2	极不均匀电场且具有强垂直分量时的沿面放电	33
2.5.3	极不均匀电场中垂直分量很弱时的沿面放电	34
2.5.4	固体介质表面有水膜时的沿面放电	34
2.5.5	绝缘子染污状态下的沿面放电	35
2.5.6	提高气隙沿面放电电压的方法	38
第3章	液体和固体介质的电气强度	39
3.1	液体和固体介质的极化、电导和损耗	39
3.1.1	相对介电常数	39
3.1.2	电介质的极化	40
3.1.3	电介质的电导	43
3.1.4	电介质的损耗	44
3.2	液体介质的击穿	50
3.2.1	纯净液体介质的击穿理论	50
3.2.2	工程用液体介质的击穿	51
3.2.3	影响液体介质击穿电压的因素及其提高方法	51
3.3	固体介质的击穿	54
3.3.1	固体介质的击穿机理	54
3.3.2	影响固体介质击穿电压的主要因素	56
3.4	组合绝缘的电气强度	58
3.4.1	组合绝缘中的电场强度配合	58
3.4.2	“油-屏障”式绝缘	59
3.4.3	油纸绝缘	60
第4章	电气设备绝缘试验	61
4.1	绝缘电阻及吸收比的测量	61
4.2	泄漏电流的测量	64
4.3	介质损失角正切的测量	66
4.3.1	测量电路	67
4.3.2	测试功效	69
4.3.3	测试时应注意的事项	70
4.4	局部放电的测量	71



4.4.1	局部放电基本概念	71
4.4.2	局部放电检测方法综述	74
4.4.3	脉冲电流法的测量原理	75
4.5	工频交流耐压试验	76
4.5.1	工频高电压的产生	76
4.5.2	绝缘的工频耐压试验	79
4.6	直流耐压试验	81
4.6.1	直流高电压的产生	81
4.6.2	直流高压试验的特点和应用范围	83
4.7	冲击高压试验	85
4.7.1	冲击电压发生器的原理	85
4.7.2	冲击高电压的测量	91
4.7.3	绝缘的冲击耐压试验	93
第5章	线路和绕组中的波过程	95
5.1	无损耗单导线中的波过程	95
5.1.1	波传播的物理概念	95
5.1.2	波动方程及其解	95
5.1.3	波速及波阻抗	97
5.2	行波的折射与反射	98
5.2.1	行波的折射、反射规律	98
5.2.2	彼德逊法则	102
5.3	行波通过串联电感和并联电容	103
5.3.1	无限长直角波通过串联电感	103
5.3.2	无限长直角波通过并联电容	104
5.4	行波的多次折、反射	105
5.5	无损耗平行多导线中的波过程	107
5.6	冲击电晕对线路波过程的影响	111
5.6.1	对导线耦合系数的影响	111
5.6.2	对波阻抗和波速的影响	111
5.6.3	对波形的影响	112
5.7	变压器绕组中的波过程	112
5.7.1	单相绕组中的波过程	113
5.7.2	三相绕组中的波过程	116
5.7.3	变压器绕组之间的波过程	118



第 6 章 雷电及防雷装置	119
6.1 雷电放电和雷电过电压	119
6.1.1 雷云的形成	119
6.1.2 雷电放电过程	120
6.1.3 雷电参数	121
6.1.4 雷电过电压的形成	125
6.2 避雷针和避雷线的保护范围	128
6.2.1 概 述	128
6.2.2 避雷针	129
6.2.3 避雷线	132
6.3 避雷器	133
6.3.1 保护间隙	133
6.3.2 管式避雷器	134
6.3.3 普通阀式避雷器	135
6.3.4 磁吹避雷器	138
6.3.5 金属氧化物避雷器(MOA)	140
6.4 防雷接地装置	144
6.4.1 接地装置一般概念	144
6.4.2 防雷接地及有关计算	147
第 7 章 电力系统雷电过电压及其防护	149
7.1 输电线路的感应雷过电压	149
7.1.1 无避雷线时的感应过电压	149
7.1.2 有避雷线时的感应过电压	150
7.1.3 雷击线路杆塔时线路上的感应电压	150
7.2 架空输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	151
7.2.1 雷击塔顶时的过电压和耐雷水平	151
7.2.2 雷击避雷线档距中央时的过电压	154
7.2.3 绕击时的过电压和耐雷水平	155
7.3 架空输电线路的雷击跳闸率及防雷措施	156
7.3.1 建弧率	156
7.3.2 有避雷线输电线路雷击跳闸率的计算	157
7.3.3 输电线路防雷的具体措施	157
7.4 发电厂和变电所的直击雷保护	159
7.4.1 发电厂和变电所装设避雷针的原则	160



7.4.2	避雷针与电气设备之间防雷的最小距离的确定	160
7.4.3	装设避雷针(线)的有关规定	161
7.5	变电所雷电侵入波过电压保护	162
7.6	变电所进线段保护	165
7.6.1	未沿全线架设避雷线的 35 kV 以上变电所的进线段保护	166
7.6.2	35 kV 小容量变电所的进线段保护	168
7.6.3	土壤高电阻率地区变电所的进线段保护	168
7.6.4	全线有避雷线的变电所的进线段保护接线	169
第 8 章	内部过电压	170
8.1	工频过电压	171
8.1.1	空载长线路的电容效应	171
8.1.2	不对称短路引起的工频电压升高	173
8.1.3	甩负荷引起的工频电压升高	174
8.2	谐振过电压	175
8.2.1	线性谐振过电压	175
8.2.2	铁磁谐振过电压	175
8.2.3	参数谐振过电压	177
8.3	切除空载线路过电压	178
8.3.1	物理过程	178
8.3.2	影响因素和降压措施	180
8.4	合空载线路过电压	181
8.4.1	发展过程	181
8.4.2	影响因素和限制措施	184
8.5	切除空载变压器过电压	185
8.5.1	发展过程	185
8.5.2	影响因素与限制措施	187
8.6	断续电弧接地过电压	188
8.6.1	发展过程	188
8.6.2	防护措施	191
第 9 章	电力系统绝缘配合	194
9.1	绝缘配合的概念和原则	194
9.1.1	绝缘配合的概念	194
9.1.2	绝缘配合的原则	194
9.2	中性点接地方式对绝缘水平的影响	196



9.3 绝缘配合惯用法	197
9.4 架空输电线路的绝缘配合	201
9.4.1 绝缘子串的选择	201
9.4.2 空气间距的选择	204
第10章 电力设备的在线监测与故障诊断	207
10.1 概 述	207
10.1.1 电力设备的绝缘故障及其危害	207
10.1.2 在线监测与状态维修的必要性及意义	208
10.1.3 在线监测技术的发展概况及基本技术要求	210
10.2 在线监测系统的组成和分类	212
10.2.1 系统的组成	212
10.2.2 系统的分类	216
10.2.3 专家系统在故障诊断中的应用	216
10.3 GIS和高压断路器的在线监测与故障诊断	218
10.3.1 概 述	218
10.3.2 高压断路器的监测内容	220
10.3.3 GIS绝缘故障的监测与诊断	222
10.3.4 SF ₆ 气体泄漏的检测	223
10.4 变压器油中溶解气体的监测与诊断	223
10.4.1 油中气体的产生	223
10.4.2 油中溶解气体的在线监测	225
10.4.3 油中气体分析与故障诊断	225
10.5 变压器局部放电的在线监测	227
10.5.1 局部放电对绝缘劣化的影响	227
10.5.2 局部放电信号的监测	228
10.5.3 局部放电在线监测系统	229
参考文献	230

第 1 章 气体放电的基本物理过程

绝大多数电气设备利用气体作为绝缘介质,其中利用最多的气体是空气和 SF_6 气体。空气是一种相当理想的气体介质,架空输电线路各相导线之间、相与地之间、变压器输出端之间的绝缘都利用了空气。在 SF_6 断路器和气体绝缘组合电器(GIS)中,则以 SF_6 气体作为绝缘介质。

纯净的气体(这里指空气)是不导电的,但实际上,由于外界电离因子(宇宙射线和地下放射性物质的高能辐射线等)的作用,地面大气层的空气中不可避免地存在一些带电质点(电子、离子等),每立方厘米体积内约有 500~1 000 对正、负带电质点,这些带电质点作定向运动形成电导电流。不过由于电流极小,空气仍是良好的绝缘介质。

当气体中的电场强度逐渐增大,气体中带电质点逐渐增多,发展成各种形式的气体放电现象。解释气体放电的理论主要有汤逊理论、流注理论、电晕理论、沿面放电理论、雷电放电理论等。

1.1 气体中带电质点的产生和消失

1.1.1 气体中带电质点的产生

电离是指电子脱离原子核的束缚而形成自由电子和正离子的过程。电离所需的能量称为电离能 W_i , 单位 eV。电离方式可分为碰撞电离、光电离、热电离和表面电离。电离过程可以是一次完成,也可以是先激励再电离的分级电离方式。

1. 碰撞电离

处在电场中的带电质点,除了由于热运动不断地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。当带电质点积累的能量足够大时,与中性气体分子碰撞,就可能使气体分子发生电离。这种由碰撞引起的电离称为碰撞电离。

电子在电场中获得加速,移过距离 x 后,其动能为

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

式中, m ——电子的质量; q_e ——电子的电荷量。

如果 W 等于或大于气体分子的电离能 W_i , 该电子和气体分子碰撞时,可以把自



己的动能转给后者而引起碰撞电离,使气体分子分裂成正离子和电子。由此可以得到电子引起碰撞电离的必要条件应为

$$q_e E x \geq W_i \quad (1-2)$$

质点为造成碰撞电离而必须飞越的最小距离为

$$x_i = \frac{W_i}{q_e E} = \frac{U_i}{E} \quad (1-3)$$

x_i 的大小取决于场强 E , 增大气体中的场强将使 x_i 值减小, 可见提高外加电压将使碰撞电离的概率和强度增大。

碰撞电离是气体中产生带电质点的最重要的方式。主要的碰撞电离均由电子完成, 离子碰撞中性分子并使之电离的概率要比电子小得多。所以在电场中, 造成碰撞电离的主要因素是电子。在分析气体放电发展过程时, 往往只考虑电子所引起的碰撞电离。

2. 光电离

光辐射引起的气体分子的电离过程称为光电离。频率为 ν 的光子能量为

$$W = h\nu \quad (1-4)$$

式中, h ——普朗克常数, $h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{S}$ 。

发生光电离的条件为

$$h\nu \geq W_i \quad \text{或} \quad \lambda \leq \frac{hc}{W_i} \quad (1-5)$$

式中, λ ——波长, m ; c ——光速, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$; W_i ——气体的电离能, eV 。

3. 热电离

由气体分子的热运动状态造成的电离称为热电离。热电离实质上并不是一种独立的电离形式, 而是包含着碰撞电离与光电离, 只是其能量来源于气体分子本身的热能。

在常温下, 气体分子热运动所具有的动能远低于气体的电离能, 不足以引起电离。如室温 20°C 时, 气体分子的平均动能仅约 0.038 eV , 这比任何气体的电离能都要小得多。在高温下, 气体分子的平均动能增到很大, 在互相碰撞时, 就可能产生碰撞电离。高温气体热辐射的光子能量大、数量多, 与气体分子相遇时就可能产生光电离。一般气体开始有较明显热电离的起始温度为 10^3 K 数量级。

4. 分级电离

电子在外界因素的作用下可跃迁到能级较高的外层轨道, 称之为激励, 其所需能量称为激励能 W_e 。由于激励能比电离能小, 因此原子或分子有可能在外界给予的能量小于 W_i 但大于 W_e 时发生激励。表 1-1 给出了几种气体和水蒸气的电离能和激励能的比较, 可见激励能通常比电离能小很多。



表 1-1 几种气体和水蒸气的电离能和激励能

气 体	电离能/eV	激励能/eV	气 体	电离能/eV	激励能/eV
N ₂	15.5	6.1	CO ₂	13.7	10
O ₂	12.5	7.9	SF ₆	15.6	6.8
H ₂	11.2	15.4	H ₂ O	12.7	7.6

原子或分子在激励态再获得能量而发生电离称为分级电离,此时所需能量为 $W_i - W_e$ 。通常分级电离的概率很小,因为激励态是不稳定的,一般经过约 10^{-8} s 就会回复到基态(正常状态)。某些原子具有亚稳激励态,这种激励态很难回复到基态,通常需要从外界获得能量跃迁到更高能级后才能回到基态,因此其平均寿命较长,可达 $10^{-8} \sim 10^{-4}$ s,使分级电离的概率增加。

5. 表面电离

在外界电离因素的作用下,电子可能从电极的表面释放,该过程称为表面电离。从金属电极表面逸出电子需要一定的能量,该能量通常称为逸出功。各种金属有各自不同的逸出功,且其表面状况对于逸出功的数值影响很大。表 1-2 列出了部分金属的逸出功。

表 1-2 某些金属的逸出功

eV

金属名称	铯	锌	铝	铬	铁	镍	铜	银	钨	金	铂
逸出功	1.88	3.3	4.08	4.37	4.48	5.24	4.70	4.73	4.54	4.82	6.3

比较表 1-1 和表 1-2,金属的逸出功一般要比气体的电离能小得多,这表明金属表面电离比气体空间电离更易发生。金属电极表面电离所需的能量可以通过下列途径获得。

(1) 热电子发射

加热金属电极,使金属中的电子的动能超过逸出功时,电子即能克服金属表面的势能壁垒而逸出,该过程称为热电子发射。热电子发射对某些电弧放电的过程有重要意义。

(2) 强场发射

在电极附近加上很强的外电场,从金属电极中直接拉出电子,称为强场发射或冷发射。这种发射所需的外电场极强在 10^6 V/cm 数量级。一般常态气隙的击穿场强远低于此值,所以在常态气隙的击穿过程中不会出现强场发射。强场发射对高气压下,特别是在压缩的高电气强度气体的击穿过程中起一定作用,对高真空下的气隙击穿更是起决定作用。

(3) 正离子撞击金属阴极表面

用某些具有足够能量的正离子撞击金属电极表面,也可能产生表面电离,称为二次发射。正离子的总能量由动能和势能两部分组成,其势能就是其电离能 W_i 。在



一般情况下,正离子的动能是比较小的,如忽略不计,则只有当正离子的势能不小于电极材料逸出功的两倍时,才能产生表面电离。因为正离子的势能只有在与电子结合时才能释放出来,欲从金属表面电离出一个自由电子,正离子必须从金属表面逸出两个电子,其中的一个与自身结合成中性质点,另一个才可能成为自由电子。

(4) 光电子发射

用高能射线照射金属表面也能产生表面电离,该过程称为光电子发射。当然,此时光子的能量必须大于金属的逸出功。

1.1.2 负离子的形成

当电子与气体分子碰撞时,不但有可能引起碰撞电离而产生出正离子和电子,而且也可能会发生电子与中性分子相结合而形成负离子的情况,这种过程称为附着。一个中性分子或原子与一个电子结合形成一价负离子时所放出的能量,称为分子或原子对电子的亲能和。亲和能值愈大,就愈容易与电子结合形成负离子。卤族元素的亲和能值比其他元素大得多,所以,它们是很容易俘获一个电子而形成负离子的;其他如 O_2 , H_2O , SF_6 等气体分子也易于形成负离子,而惰性气体和氮气则不会形成负离子。易于产生负离子的气体称为电负性气体。

负离子的形成并没有使气体中的带电质点数改变,但却能使自由电子数减少,因而对气体放电的发展起抑制作用。后面将要介绍的某些特殊的电负性气体(例如 SF_6)对电子具有很强的亲和性,其电气强度远大于一般气体,因而被称为高电气强度气体。

1.1.3 气体中带电质点的消失

气体中带电质点的消失有下述几种情况:

- ① 带电质点在电场的驱动下作定向运动,流入电极,中和电荷;
- ② 带电质点因扩散现象而逸出气体放电空间;
- ③ 带电质点的复合。

当气体中带异号电荷的质点相遇时,有可能发生电荷的传递与中和,这种现象称为复合,它是与电离相反的一种物理过程。复合可能发生在电子和正离子之间,称为电子复合,其结果是产生了一个中性分子;复合也可能发生在正离子和负离子之间,称为离子复合,其结果是产生了两个中性分子。上述两种复合都会以光子的形式放出多余的能量,这种光辐射在一定条件下能导致其他气体分子的电离,使气体放电出现跳跃式的发展。带电质点的复合强度与正、负带电质点的浓度有关,浓度越大,则复合也进行得越激烈。



1.2 气体放电机理

1.2.1 汤逊气体放电理论

20 世纪初,英国物理学家汤逊(J. S. Townsend)根据大量的实验结果,阐述了气体放电的过程,并在一系列假设的条件下,提出了气隙放电电流和击穿电压的计算公式,虽然实验表明,汤逊理论只是对较均匀电场和 δd 较小的情况下比较适用(此处 δ 为气体的相对密度,指气体密度与标准大气条件下($p_0 = 101.3 \text{ kPa}$, $T_0 = 293 \text{ K}$)的密度之比; d 为气隙距离),但它所考虑和讨论的气体放电物理过程还是很基本的,具有普遍意义。下面就扼要地叙述这个理论。

1. 汤逊放电实验

各种高能辐射线(外界电离因子)会引起阴极的表面光电离和气体中的空间光电离,从而使空气中存在一定浓度的带电质点。因而在气隙的两端电极上施加电压时即可检测到微小的电流。图 1-1 表示实验所得的平板电极间(均匀电场)气体中的电流 I 和所加电压 U 的关系(伏安特性)曲线。在曲线的 O_a 段, I 随 U 的提高而增大,这是由于电极空间的带电质点向电极运动的速度加快而导致复合数的减少所致。当电压接近 U_a 时,电流趋于饱和值 I_0 , 因为这时由外界电离因子所产生的带电质点几乎能全部抵达电极,所以电流值仅取决于电离因子的强弱而与所加电压的大小无关。饱和电流 I_0 之值很小,电流密度的数量级仅为 10^{-19} A/cm^2 , 即使采用紫外线光照射阴极,其数量级也不会超过 10^{-12} A/cm^2 , 可见这时气体仍处于良好的绝缘状态。但当电压提高到 U_b 时,电流又开始随电压的升高而增大,这是由于气隙中出现了新的电离因素——碰撞电离,碰撞电离形成了电子崩,电流越来越大,最后到达 c 点,电压达到 U_c , 此时电流急剧增大,气体间隙转入良好的导电状态。外加电压达到 U_0 以前,气体间隙中的电流很小,且要依靠外界的电离因素来维持,这种性质的放电属于非自持放电;外加电压达到 U_0 以后,气体间隙中发生了强烈的电离,带电粒子的数量激增,此时气体间隙中的放电依靠电场的作用就可维持,这种性质的放电称为自持放电, U_0 称为放电的起始电压。气体放电一旦进入自持放电,即意味着气隙已被击穿。

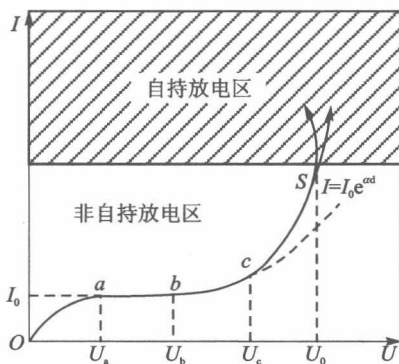


图 1-1 气隙放电的伏安特性曲线

当电压达到 U_0 以后,气体间隙中发生了强烈的电离,带电粒子的数量激增,此时气体间隙中的放电依靠电场的作用就可维持,这种性质的放电称为自持放电, U_0 称为放电的起始电压。气体放电一旦进入自持放电,即意味着气隙已被击穿。

2. 电子崩

所谓电子崩是指电子在电场的作用下从阴极奔向阳极的过程中,当空间的电场强度足够大时,与中性分子碰撞发生电离,电离的结果产生出新的电子,初始电子和



新生电子继续向阳极运动,又会引起新的碰撞电离,产生出更多的电子。依此类推,电子数将按几何级数不断增多,像雪崩似地发展,称为电子崩。电子崩的形成和带电质点在电子崩中的分布如图 1-2 所示。

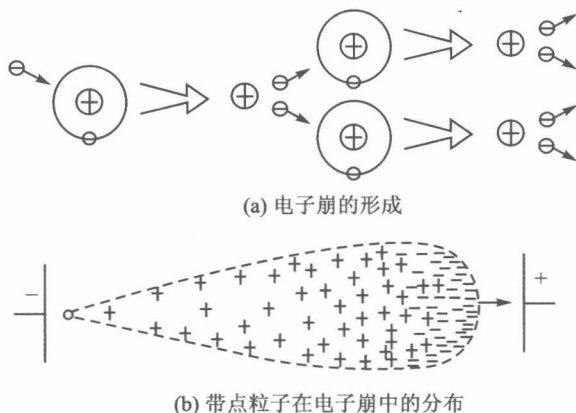


图 1-2 电子崩示意图

电子崩的出现使气体间隙中的电流迅速增大,图 1-1 中 b 点后电流随电压迅速增长就是由于出现电子崩的缘故。但在电压小于某临界值 U_0 时,这种电子崩还必须有赖于外界电离因素所造成的原始电离才能持续和发展。如外界电离因素消失,则这种电子崩也随之逐渐衰减以至消亡,这种放电为非自持放电。当电压高于某临界值 U_0 时,这种电子崩已可仅由电场的作用而自行维持和发展,不必再有赖于外界电离因素了,此时的放电为自持放电。

3. 汤逊放电理论解释

汤逊放电理论主要考虑了三种因素,引用三个系数来定量地反映这三种因素的作用。

① 系数 α ,表示一个电子在走向阳极的 1 cm 路程中与气体质点相碰撞所产生的自由电子数(平均值)。设每次碰撞电离产生一个电子和正离子,所以 α 也就是一个电子在单位长度行程内新电离出的电子数和正离子数。

② 系数 β ,表示一个正离子在走向阴极的 1 cm 路程中与气体质点相碰撞所产生的自由电子数(平均值)。

③ 系数 γ ,表示一个正离子撞击到阴极表面时从阴极逸出的自由电子数(平均值)。

系数 α 和 β 与气体的性质、密度及该处的电场强度等因素有关。

在图 1-3 所示的平板电极(均匀电场)气隙中,设外界电离因子每秒钟使阴极表面

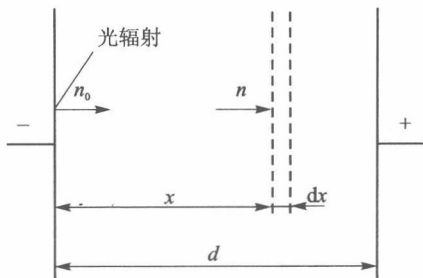


图 1-3 计算间隙中电子数增长示意图



发射出来的初始电子数为 n_0 ，由于碰撞电离和电子崩的结果，在它们经过距离 x 后，电子数已增加为 n ，这 n 个电子在 dx 中又会产生出 dn 个新电子。根据碰撞电离系数 α 的定义，可得

$$dn = \alpha n dx \quad (1-6)$$

分离变数并积分之，可得

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (1-7)$$

对于均匀电场来说，气隙中各点的电场强度相同， α 值不随 x 而变化，所以上式可写成

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-8)$$

抵达阳极的电子数应为

$$n_a = n_0 e^{\alpha d} \quad (1-9)$$

式中， d ——极间距离。

途中新增加的电子数或正离子数应为

$$\Delta n = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (1-10)$$

将式(1-9)的等号两侧乘以电子的电荷 q_e ，即成电流关系式

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (1-11)$$

式(1-11)表明，虽然电子崩电流按指数规律随极间距离 d 而增大，但这时放电还不能自持，因为一旦除去外界电离因子(令 $I_0 = 0$)， I 即变为零。

● 碰撞电离系数 α

根据 α 的定义可知， α 取决于两个因素的乘积：

① 电子在单位距离内的碰撞次数，如果电子的平均自由行程长度为 λ_e ，则在它运动过单位距离内将与气体分子发生 $1/\lambda_e$ 次碰撞。

② 每次碰撞产生电离的概率，这个概率与电子在电场强度 E 作用下走过自由行程 x 有关，不过并非每次碰撞都会引起电离，前面已指出，只有电子在碰撞前已在电场方运动了 $x_i = (U_i/E)$ 的距离时，才能积累到足以引起碰撞电离的动能(它等于气体分子的电离能 W_i)，实际自由行程长度等于或大于 λ_e 的概率为 $e^{-\frac{x_i}{\lambda_e}}$ ，所以它也就是碰撞时能引起电离的概率。

根据碰撞电离系数 α 的定义，即可得出

$$\alpha = \frac{1}{\lambda_e} e^{-\frac{U_i}{\lambda_e E}} \quad (1-12)$$

电子的平均自由行程长度 λ_e 与气温 T 成正比与气压 p 成反比，即

$$\lambda_e \propto \frac{T}{p} \quad (1-13)$$

气温 T 不变时，

$$\frac{1}{\lambda_e} = Ap, \quad \frac{U_i}{\lambda_e} = Bp \quad (1-14)$$