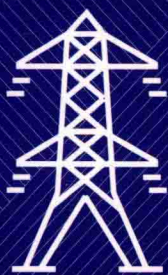




“十三五”应用型人才培养规划教材

高电压技术

◎ 高长伟 韩刚 姚颖 编著



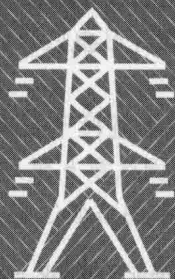
清华大学出版社



“十三五”应用型人才培养规划教材

高电压技术

◎ 高长伟 韩刚 姚颖 编著



清华大学出版社
北 京

内 容 简 介

本书介绍了各种电介质的放电过程、发展机理与绝缘特性；交、直流高电压以及冲击高电压的产生原理、基本装置及其测量方法，相关绝缘的试验技术；电力系统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。本书内容是经过精选的，既突出基本概念，适当反映高电压技术的新成就，又兼顾不同水平读者的需求，易于阅读，具有实用性。

本书既可以作为普通高等院校电气类专业课教材，也可以作为大专、成人教育和电力部门职工培训教学用书，还可以作为从事电力系统设计、安装、调试及运行的工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术/高长伟,韩刚,姚颖编著. —北京:清华大学出版社,2018

(“十三五”应用型人才培养规划教材)

ISBN 978-7-302-50250-0

I. ①高… II. ①高… ②韩… ③姚… III. ①高电压—技术—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 114723 号

责任编辑:王剑乔

封面设计:刘 键

责任校对:刘 静

责任印制:刘海龙

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课件下载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62770175-4278

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm

印 张:14

字 数:320 千字

版 次:2018 年 6 月第 1 版

印 次:2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价:49.00 元

产品编号:079698-01

前言

FOREWORD

高电压技术是电气技术领域通用性较强的学科,主要研究在高电压作用下各种绝缘介质的性能和不同类型的放电现象,高电压设备的绝缘结构设计,高电压试验和测量的设备及方法,电力系统的过电压、高电压或大电流产生的强电场、强磁场或电磁波对环境的影响和防护措施,以及高电压、大电流的应用等。展望高电压技术的发展,它和其他学科之间的相互融合、相互渗透将会使其自身发展的同时不断吸收其他学科的新成果、新技术。另外,高电压技术将会在材料、环保、新能源、电力工程等诸多领域发挥重要的作用。

作为从事电力系统设计、安装、调试及运行与维护的工程技术人员,在实际工作中都会遇到高电压技术领域的相关问题。本书针对电气工程及其自动化专业、农业电气化与自动化专业应用型人才培养方案编写,全书从基本物理概念及物理过程入手,介绍电力系统中实用高电压技术的内容,使读者对高电压技术有更加全面的认识,有利于其实践能力的提高。

全书共 10 章,第 1~3 章介绍各类电介质在电场作用下的基本电气特性;第 4~5 章介绍电气设备绝缘试验及状态检测;第 6 章介绍波过程;第 7~8 章介绍雷电过电压及其防护;第 9 章介绍电力系统内部过电压;第 10 章介绍电力系统绝缘配合。本书文字简练、通俗易懂,每章后均附有习题。

参加本书编写工作的有辽宁科技学院高长伟(第 1~5 章)、沈阳工程学院韩刚(第 7~10 章)及辽宁科技学院姚颖(第 6 章及附录)。全书由高长伟统稿。

由于编者水平有限,疏漏之处在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2018 年 3 月

目 录

CONTENTS

第 1 章 气体放电的基本物理过程	1
1.1 带电质点的产生与消失	1
1.1.1 带电质点的产生	1
1.1.2 带电质点的消失	3
1.2 均匀电场小气隙的放电过程	4
1.2.1 汤逊理论	4
1.2.2 巴申定律	8
1.3 均匀电场大气隙的放电过程	8
1.3.1 空间电荷对气隙电场的畸变	8
1.3.2 流注的形成	9
1.4 不均匀电场的放电过程	10
1.4.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的特点与划分	10
1.4.2 极不均匀电场的电晕放电	11
1.4.3 极不均匀电场的放电过程	12
1.5 放电时间和冲击电压下的气隙击穿	13
1.5.1 放电时间	13
1.5.2 冲击电压波形的标准化	14
1.5.3 冲击电压下气隙的击穿特性	15
1.6 沿面放电与污秽放电	17
1.6.1 沿面放电的一般过程	17
1.6.2 绝缘子的干闪与湿闪	20
1.6.3 绝缘子的污闪	21
习题	23
第 2 章 气体介质的电气强度	24
2.1 不同电压形式下气隙的击穿电压	24
2.1.1 均匀电场气隙的击穿电压	24
2.1.2 稍不均匀电场气隙的击穿电压	24
2.1.3 极不均匀电场气隙的击穿电压	25
2.2 大气条件对空气间隙击穿电压的影响	28

2.2.1	气压、温度对击穿电压的影响	29
2.2.2	湿度对击穿电压的影响	29
2.2.3	海拔高度对击穿电压的影响	30
2.3	提高气隙击穿电压的措施	30
2.3.1	改善电场分布使之尽量均匀	30
2.3.2	削弱气体的游离过程	32
2.4	六氟化硫(SF ₆)气体的理化特性和绝缘特性	33
2.4.1	SF ₆ 气体的理化特性	33
2.4.2	SF ₆ 气体的绝缘特性	34
	习题	35
第3章	液体、固体电介质的电气性能	36
3.1	电介质的极化、电导和损耗	36
3.1.1	电介质的极化	36
3.1.2	电介质的电导	41
3.1.3	电介质的损耗	44
3.2	液体电介质的击穿	47
3.2.1	液体电介质的击穿机理	48
3.2.2	影响液体电介质击穿电压的因素	49
3.2.3	提高液体电介质击穿电压的方法	51
3.3	固体电介质的击穿	52
3.3.1	固体电介质的击穿理论	52
3.3.2	影响固体电介质的击穿电压的因素	54
3.3.3	提高固体电介质的击穿电压的措施	56
3.4	电介质的老化	56
3.4.1	电老化	56
3.4.2	热老化	58
3.4.3	受潮老化	59
3.5	组合绝缘的介电常数、介质损耗和击穿特性	60
3.5.1	组合绝缘的介电常数与介质损耗	60
3.5.2	组合绝缘的击穿特性	61
	习题	61
第4章	绝缘的预防性试验	63
4.1	绝缘电阻和吸收比的测量	63
4.1.1	兆欧表的工作原理	64
4.1.2	绝缘电阻和吸收比的测量	65
4.1.3	测量时的注意事项	65
4.2	直流泄漏电流的测量	66
4.2.1	直流高电压的产生	67
4.2.2	试验接线	67

4.2.3	微安表的保护	68
4.2.4	影响测量结果的主要因素	68
4.3	介质损失角正切值的测量	68
4.3.1	西林电桥的基本原理	69
4.3.2	影响测量结果的主要因素	70
4.4	局部放电的测量	73
4.4.1	测量的基本原理	73
4.4.2	局部放电的检测方法	74
4.4.3	测量时的注意事项	76
	习题	77
第5章	高压试验设备及高电压的测量	78
5.1	工频高压试验设备及其测量	78
5.1.1	交流高压试验设备	78
5.1.2	工频高电压的测量	84
5.2	直流高压试验设备及其测量	89
5.2.1	直流高压试验设备	90
5.2.2	直流高压的测量	91
5.3	冲击高压试验设备及其测量	93
5.3.1	雷电冲击电压的产生	93
5.3.2	操作冲击电压的产生	97
5.3.3	冲击高电压的测量	97
	习题	100
第6章	线路和绕组中的波过程	101
6.1	均匀无损单导线线路中的波过程	101
6.1.1	波过程的基本概念	101
6.1.2	波过程的基本规律	103
6.2	波的折射与反射	105
6.2.1	行波的折射与反射	105
6.2.2	彼德逊法则	107
6.3	波的多次折射与反射	110
6.4	无损平行多导线系统中的波过程	111
6.5	波的衰减与畸变	113
6.5.1	导线电阻和泄漏电导的影响	113
6.5.2	冲击电晕的影响	114
6.6	绕组中的波过程	115
6.6.1	变压器绕组中的波过程	116
6.6.2	旋转电机绕组中的波过程	123
	习题	124

第7章 雷电及防雷保护装置	125
7.1 雷电放电	125
7.1.1 先导放电阶段	126
7.1.2 主放电阶段	126
7.1.3 余辉放电阶段	126
7.2 雷电参数及计算模型	127
7.2.1 雷电参数	127
7.2.2 雷电放电的计算模型	129
7.2.3 感应雷击过电压	130
7.3 避雷针和避雷线的保护范围	132
7.3.1 避雷针的保护范围	132
7.3.2 避雷线的保护范围	134
7.4 避雷器	136
7.4.1 保护间隙和排气式避雷器	136
7.4.2 阀式避雷器	137
7.4.3 金属氧化物避雷器	141
7.5 接地装置	143
7.5.1 接地和接地电阻的基本概念	144
7.5.2 工作接地、保护接地与防雷接地	144
7.5.3 工程实用的接地装置	145
7.5.4 降低接地电阻的措施	147
7.5.5 土壤电阻率测试	148
7.5.6 接地电阻的测量	150
习题	153
第8章 电力系统的防雷保护	154
8.1 输电线路的防雷保护	154
8.1.1 输电线路的耐雷性能指标	154
8.1.2 输电线路耐雷性能的分析	155
8.1.3 输电线路的雷击跳闸率	160
8.1.4 输电线路的防雷保护措施	161
8.2 发电厂、变电站的防雷保护概述	163
8.2.1 直击雷过电压的防护	163
8.2.2 侵入波过电压的防护	165
8.2.3 变电站的进线段保护	168
8.3 发电厂、变电站主要设备防雷保护	172
8.3.1 变压器的防雷保护	172
8.3.2 气体绝缘变电站(GIS)的过电压保护	174
8.3.3 旋转电机的防雷保护	176
习题	179

第 9 章 电力系统内部过电压	180
9.1 切除空载线路过电压	180
9.1.1 发展过程	181
9.1.2 影响因素和限制措施	182
9.2 空载线路合闸过电压	183
9.2.1 发展过程	183
9.2.2 影响因素和限制措施	185
9.3 切除空载变压器过电压	186
9.3.1 发展过程	186
9.3.2 影响因素和限制措施	188
9.4 间歇电弧接地过电压	188
9.4.1 发展过程	189
9.4.2 影响因素和限制措施	190
9.5 工频电压升高引起过电压	191
9.5.1 空载长线路电容效应引起的工频过电压	191
9.5.2 不对称接地引起的工频过电压	193
9.5.3 甩负荷引起的工频过电压	195
9.6 电力系统中的谐振过电压	196
9.6.1 谐振过电压的种类	196
9.6.2 非线性(铁磁)谐振的特点	197
习题	199
第 10 章 电力系统绝缘配合	200
10.1 绝缘配合的基本概念	200
10.2 绝缘配合的基本方法	202
10.2.1 多级配合	202
10.2.2 两级配合(惯用法)	202
10.2.3 统计法	203
10.2.4 简化统计法	204
10.3 电气设备绝缘水平的确定	204
10.4 架空输电线路绝缘水平的确定	206
10.4.1 绝缘子片数的确定	206
10.4.2 空气间隙的确定	207
习题	209
参考文献	210
附录	211

第1章

气体放电的基本物理过程

电气设备通常由导体和绝缘体共同组成,设备的导电回路由各种金属材料构成,而设备不同电位的导电体之间及与大地可靠地隔离则由各种绝缘材料来实现。事实表明,绝缘体是各类电气设备中的关键部分,也是比较薄弱的部分,其性能的优劣直接决定着设备及系统能否安全可靠地运行。大多数电力系统故障都是由于绝缘遭到破坏而引起的,因此研究各类电介质在高电压作用下的电气特性具有重大的现实意义。

电介质在电气设备中是作为绝缘材料使用的,就其形态而言可分为气体电介质、液体电介质和固体电介质。在实际的电气设备绝缘结构中采用的通常是由多种电介质构成的组合绝缘。比如电气设备的外绝缘通常由气体介质和固体介质共同构成,内绝缘往往由固体介质和液体介质共同组成。所有电介质的电气强度都是有一定限度的,超过这个限度,电介质就会逐渐失去其原有的绝缘性能,甚至会成为导体。在电场的作用下,电介质中出现的电气现象主要有以下两类。

- (1) 弱电场下(当电场强度比击穿场强小得多时),主要是极化、电导、介质损耗等。
- (2) 强电场下(当电场强度等于或大于放电起始场强或击穿场强时),主要是放电、闪络、击穿等。

气体放电理论也是液体介质、固体介质放电理论的基础。所以,本书首先介绍气体电介质的放电理论。

1.1 带电质点的产生与消失

1.1.1 带电质点的产生

纯净的、中性状态的气体是不导电的,只有气体中出现带电质点(电子、负离子或者正离子)以后才有可能导电,并在电场力作用下发展成各种形式的气体放电现象。带电质点的来源主要有两个:一是气体中性质点(原子)本身发生游离;二是位于气体中的金属表面发生游离。气体质点的游离所需要的能量称为游离能,随着气体种类的不同,游离能一般为 $10\sim 15\text{eV}$ ($1\text{eV}=1.6021892\times 10^{-19}\text{J}$)。金属表面游离所需要的能量称为逸出功,因金属不同,游离能一般为 $1\sim 5\text{eV}$ 。按照外界能量来源的不同,通常把游离分为以下几种形式。

1. 碰撞游离

带电质点在电场力的作用下沿电场方向不断加速并积累动能,当动能积累到一定数值后,该带电质点与气体中的原子或分子发生碰撞并将自己的动能传递给后者使其产生游离,这种由碰撞而引起的游离称为碰撞游离。在气体放电过程中,碰撞游离主要由自由电子与气体原子或分子碰撞而引起(离子体积和质量较大,在碰撞前难以积累起足够的能量,产生碰撞游离的可能性很小),电子在碰撞游离中起主导作用。电子在电场力作用下加速所获得的动能与电子电荷量、电场强度以及碰撞前的行程有关,即:

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

式中: m 为电子的质量; v 为电子的运动速度; e 为电子电荷量; E 为电场强度; x 为碰撞前电子的自由行程。

高速运动的质点与中性原子或分子碰撞时,若原子或分子获得的能量大于或等于其游离能,则会发生游离。因此产生碰撞游离的条件如下:

$$eEx \geq W_i \quad \text{或} \quad x \geq \frac{U_i}{E} \quad (1-2)$$

式中: W_i 为气体分子或原子的游离能。

质点两次碰撞之间的距离称为自由行程,每两次碰撞间的自由行程长度不同,具有统计性,我们将单位行程中碰撞次数的倒数称为该质点的平均自由行程长度。显然,质点的平均自由行程长度与气压成反比,与绝对温度成正比。一般情况下,平均自由行程长度越长,则越容易发生碰撞游离。

2. 光游离

由光辐射引起的气体原子或分子的游离过程称为光游离。短波射线的光子具有很大的能量,与电子碰撞一样,如果光子的能量大于或等于原子或分子的游离能,碰撞后则会产生光游离。光子在碰撞后把能量传给原子或分子,而其自身不再存在。产生光游离的条件如下:

$$hf \geq W_i \quad \text{或} \quad \lambda \leq \frac{hc}{W_i} \quad (1-3)$$

式中: h 为普朗克常数($h=6.63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$); f 为光的频率; λ 为光的波长; c 为光速($c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$)。

由式(1-3)可知,光的波长越短,光子的能量越大,游离能力就越强。因此,通常情况下可见光是不能直接产生光游离的,只有各种短波长的高能辐射线(例如 γ 射线、X 射线以及短波长的紫外线等)才能使气体产生光游离。在气体放电过程中,异号带电质点复合时会以光子的形式放出多余的能量,这甚至会使气体间隙中电离区以外的空间发生光游离,促使电离区进一步拓展。因此光游离是气体放电过程中一种重要的游离方式。

3. 热游离

常温下气体原子或分子的热运动所具有的平均动能远低于其游离能,不具备产生热游离的条件。当温度升高时,气体质点的热运动也会有所增强。在高温下(例如发生电弧放电时,弧柱的温度高达数千摄氏度以上),质点热运动时相互碰撞而产生的游离称为热游离。热游离往往并不是一种独立的游离形式,通常是在热状态下所发生的碰撞游离和光游离的综合。产生热游离的条件如下:

$$\frac{3}{2}KT \geq W_i \quad (1-4)$$

式中: K 为玻尔兹曼常数; T 为热力学温度。

热游离有以下三种形式。

(1) 高温时, 高速运动的气体分子相互碰撞而产生的游离。

(2) 气体分子因碰撞失去动能而释放出光子, 温度升高导致光子的频率及能量增加, 因而在高温时光子与气体分子相遇而产生游离。

(3) 上述两种游离产生的电子与中性质点碰撞而产生的游离。

4. 电极表面游离

以上讨论的是气体在气隙空间里带电质点的产生过程, 实际上, 在气体放电中还存在着金属电极阴极表面发射电子的过程, 称为金属电极表面游离。使阴极表面发射电子所需要的能, 称为逸出功, 逸出功与电极的微观结构及其表面状态有关, 而与金属的温度基本无关。一般电极表面发射电子要比在空间使气体分子游离容易得多。

电极表面游离有以下四种形式。

(1) 光电子发射: 用短波长的光照射金属电极阴极表面, 当光子能量大于逸出功时, 阴极表面将释放出电子。

(2) 热电子发射: 金属电极表面受热, 电子热运动速度增大, 其能量超过逸出功, 电子逸出电极表面。

(3) 强电场发射: 当电极附近的电场特别强时, 金属表面的电子被强行拉出。这种发射所需外电场极高(一般在 10^6 V/cm 数量级)。通常情况下气隙的击穿场强远低于此值, 一般气隙的击穿过程中不会出现强电场发射。强场发射只在某些高压强或高真空下气隙的击穿时才有重要意义。

(4) 二次发射: 具有足够能量的质点(例如正离子)撞击金属电极阴极表面, 使其释放出电子。

5. 负离子的形成

电子与气体原子或分子碰撞时, 不但有可能发生碰撞电离产生正离子和电子, 也有可能发生电子附着过程而形成负离子。某些气体分子对电子具有亲和性, 当它们与电子结合成负离子时会释放出能量(电子亲和能), 也有一些气体分子在与电子结合成负离子时却要吸收能量。前者的亲和能为正值, 这些容易产生负离子的气体称为电负性气体。容易吸附电子形成负离子的电负性气体如氧、氮、氟、水蒸气和六氟化硫气体等。

负离子的形成并没有使气体中的带点粒子数量发生变化, 然而却能使自由电子的数量减少, 对气体放电的发展有一定抑制作用, 因此也将其看作是一种去游离的因素。

1.1.2 带电质点的消失

当气体中发生放电时, 除了有不断产生带电质点的游离过程外, 还存在一个相反的过程, 即带电质点的消失过程, 它将使带电质点从游离区消失。气体中的放电是不断发展以致击穿, 还是气体尚能保持其电气强度而起绝缘作用, 主要就取决于上述两种过程的发展情况。气体中带电质点的消失有如下几种基本形式。

1. 带电质点的漂移

带电质点在与气体原子或分子碰撞后会发生散射,但是从宏观角度看是向电极方向作定向运动的。带电质点在外电场驱动下作定向运动,最终消失于电极面形成回路电流,从而气体中的带电质点的数量有所减少,这种现象称为带电质点的漂移。电子的漂移速度远远大于离子,因此放电电流主要由电子的漂移运动产生。

2. 带电质点的扩散

带电质点的扩散是指带电质点从浓度较大的区域移动到浓度较小的区域,从而使带电质点在空间各处的浓度趋于均匀的过程。带电质点的扩散同气体分子的扩散一样,都是由热运动造成的,故它与气体的状态有关,气体的压力越高或温度越低,扩散过程也就越弱。电子的质量远小于离子,所以电子的热运动速度很高,它在热运动中受到的碰撞也较少,因此电子的扩散过程比离子要强得多。

3. 带电质点的复合

带异号电荷的质点相遇时,发生电荷的传递和中和而还原为中性质点的过程称为带电质点的复合。复合的速度与异号电荷浓度、相对速度等因素有关。异号电荷的浓度越大,复合过程也越快、越强烈,因此,强烈的游离区同时也是强烈的复合区。异号电荷之间的相对速度越小,相互作用的时间就越长,复合的可能性也越大。电子的运动速度比离子要大得多,所以正、负离子之间的复合远比正离子、电子之间的复合容易得多。需要注意的是,带电粒子的复合并不一定意味着游离减弱。因为某些情况下,在带电质点的复合过程中因发光而引起的光电离会促进放电在整个间隙的发展。

1.2 均匀电场小气隙的放电过程

1.2.1 汤逊理论

20 世纪初,英国物理学家汤逊根据大量的实验提出了气体放电的理论,阐述了放电过程,并在一系列假设的前提下,提出了放电电流和击穿电压的计算公式,计算公式在一定范围内与实验吻合较好。尽管汤逊理论有很多不足,并且适用范围也有很大的局限性,但它所描述的放电过程是很基本的,具有普遍意义。

1. 气隙的伏安特性曲线

采用如图 1-1 所示的平行板电极装置,对均匀电场空间气隙的伏安特性进行测试。在外界光源(天然辐射或人工紫外线)的照射下,对极间介质为空气的两平行平板电极施加电压,当电压从零逐渐升高时,得到气隙间电流与所加电压之间的变化关系如图 1-2 所示,即气隙放电的伏安特性曲线。

由图 1-2 可以看出,当电压很低时也有电流流过气隙,即气隙中有电荷的定向移动。那么这些移动的电荷是如何产生的呢?汤逊理论认为,空气中由于宇宙射线和地球放射性物质射线的作用,总是存在中性质点光游离和带电质点复合的过程。同时,阴极受电极表面游离的作用,也要向气隙发射电子。因此通常情况下空气中总是存在少量带电质点,这些带电质点在外电场作用下作定向移动形成了电流。具体过程如下。

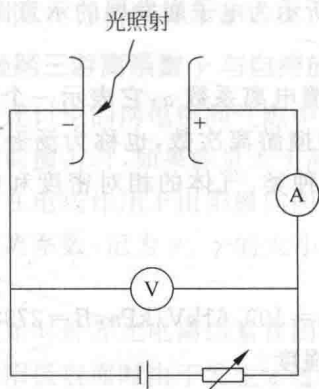


图 1-1 实验原理

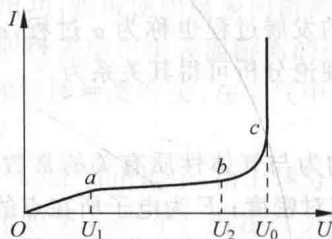


图 1-2 气隙伏安特性曲线

(1) 线性段: 初始时,随着外加电压的升高,越来越多的带电质点参与了定向移动,并且运动速度也逐渐加大,这导致了间隙中的电流也随之近似成比例增大,如图中的 Oa 段所示。

(2) 饱和段: 到达 a 点后,电流几乎不再随电压的增大而增大,因为这时在单位时间内所有由外界游离因素产生的有限带电质点已经全部参与了导电,故电流趋于饱和,如图中 ab 段所示。饱和段 ab 的电流密度很小(一般只有 10^{-19} A/cm^2 的数量级),因此气隙的绝缘状态仍然良好。

(3) 碰撞游离段: 当到达 b 点以后,间隙中的电流又继续随外加电压的升高而增大。因为此时电子在足够强的电场作用下积累起足以引起碰撞游离的动能,使间隙中带电质点的数量骤增,如图中 bc 段所示。

(4) 自持放电段: 当电压继续升高至某临界值 U_0 以后,电流急剧突增,同时伴随着产生明显的外部特征,如发光、发声等现象,此时气体间隙突然变为良好的导电状态,即气体发生了击穿。

实验表明,当外加电压小于 U_0 时,气体间隙中电流极小,气体本身的绝缘性能尚未被破坏。此时若去掉外界游离因素,电流也将消失,我们把这类放电称为非自持放电。当外加电压达到 U_0 以后,即使去掉外界游离因素,气体中的游离过程仅仅依靠外电场的作用也可以自行维持,我们把这类放电称为自持放电。气隙伏安特性曲线上的 c 点就是非自持放电和自持放电的临界点,由非自持放电转变为自持放电的临界电压 U_0 被称为起始放电电压,其对应的电场强度为起始放电场强。在均匀电场中,由于各处的场强相等,只要任意一处开始出现自持放电,就意味着整个间隙将被完全击穿,故均匀电场中的起始放电电压就等于间隙的击穿电压。在标准大气条件下,均匀电场中空气间隙的击穿场强(也称为气体的电气强度)约为 30 kV/cm (峰值)。

2. 电子崩与汤逊第一游离系数 α

如图 1-3 所示,假设由于外电离因素的作用,在阴极附近出现一个初始电子,这一电子在向阳极运动时,如果电场强度足够大,则会发生碰撞游离,产生一个新电子。新电子与初始电子在向阳极的行进过程中还会发生碰撞游离,产生两个新电子,电子总数增加到 4 个。第 3 次碰撞游离后电子数将增加至 8 个,即按几何级数不断增加。由于电子数如雪崩式地

增长,所以将这一剧增的电子流称作电子崩。图 1-3 所示为电子崩发展的示意图,但此时的放电仍属非自持放电。

为了分析电子碰撞电离产生的电流,引入电子碰撞电离系数 α ,它表示一个电子沿着电场方向行进的过程中,在 1cm 的距离内平均发生的碰撞游离次数,也称为汤逊第一游离系数。电子崩的发展过程也称为 α 过程, α 值与气体的种类、气体的相对密度和电场强度有关。实验和理论分析可得其关系为

$$\alpha = A\delta e^{\frac{-B}{E}} \quad (1-5)$$

式中: A, B 均为与气体性质有关的常数,对于空气, $A = 109.61 \text{ kV/kPa}$, $B = 2738.4 \text{ kV/kPa}$; δ 为气体的相对密度; E 为电子所在点的气体的电场强度。

假设在外界游离因素的作用下,阴极表面释放出 n_0 个电子,如图 1-4 所示。在外电场作用下,这 n_0 个电子向阳极运动,并不断产生碰撞游离,行经距离 x 时电子数量增加到 n 个。这 n 个电子再行经距离 dx ,电子的增量为 dn ,则:

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

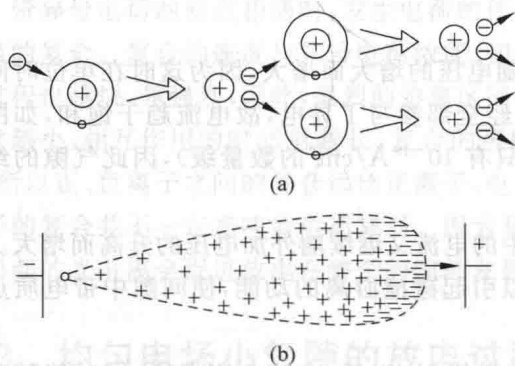


图 1-3 电子崩发展的示意图

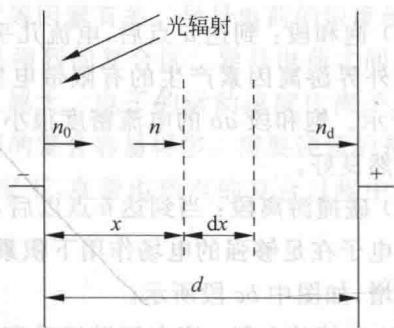


图 1-4 均匀电场中电子崩电子数的计算

对上式两端进行积分有:

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

因此可得:

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx} \quad (1-8)$$

对于均匀电场, α 不随 x 变化,所以可以写出:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-9)$$

n_0 个电子在电场作用下不断产生碰撞游离,发展电子崩,经距离 d 后的所产生的电子数为

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

式(1-10)反映的是气隙中电子数量的变化规律。

3. 汤逊第二游离系数 β

一个正离子沿电场方向行进的过程中,在单位距离内平均发生碰撞游离的次数称为正离子碰撞游离系数,记为 β ,也称为汤逊第二游离系数。由于正离子质量大,在外电场作用下不易加速,并且体积大,平均自由行程短,所以在运动中不易积累起引起碰撞游离的能量,

所以 β 值极小, 在分析时可不予考虑。

4. 汤逊第三游离系数 γ 与自持放电的条件

除了上述讨论的两电极间气隙中的碰撞游离之外, 正离子在外电场作用下向阴极移动, 当与阴极表面撞击时, 如果能量大于阴极材料的逸出功, 则可使阴极表面游离而发射电子。一个正离子在电场作用下由阳极向阴极运动, 撞击阴极表面产生表面游离的电子数被称为汤逊第三游离系数, 记为 γ 。 γ 的大小与阴极材料和气体种类有关, 在空气中, $\gamma_{\text{铜}} = 0.025$, $\gamma_{\text{铝}} = 0.035$ 。

假设初始时外界光电离因素在阴极表面产生了 n_0 个自由电子, 由上述分析可知, 此 n_0 个电子到达阳极表面时由于发生 α 过程, 电子总数增长至 $n_0 e^{\alpha d}$ 个。因在对 α 过程进行讨论时已假设每次碰撞电离撞出一个正离子, 故电极空间中共有 $n_0(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子。按照系数 γ 的定义, 此 $n_0(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子在到达阴极表面时可以撞出 $\gamma n_0(e^{\alpha d} - 1)$ 个新电子, 如果这 $\gamma n_0(e^{\alpha d} - 1)$ 个新电子与初始时外界光电离因素在阴极表面产生的 n_0 个自由电子个数相等, 那么即使去掉外界的光电离因素放电也能维持下去。由此可见自持放电的条件为

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

上述过程可用图 1-5 加以概括, 当自持放电条件得到满足时, 就会形成图中闭环部分所示的循环不息的状态, 放电就能自己维持下去, 而不再依赖外界电离因素的作用。



图 1-5 低气压、短气隙情况下的气体放电过程

5. 击穿电压 U_b 的计算

根据自持放电条件, 即式(1-11)可以推导出自持放电时的放电电压。对于均匀电场, 自持放电电压就是气隙的击穿电压, 即:

$$U_b = E_b d \quad (1-12)$$

式中: E_b 为空气的击穿场强, $E_b = 30 \text{ kV/cm}$; d 为极板之间的距离, cm 。

由自持放电条件可得:

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

因为 $\alpha = A \delta e^{-\frac{B \delta d}{U_b}} = A \delta e^{-\frac{B \delta d}{U_b}}$, 所以可得

$$A \delta d e^{-\frac{B \delta d}{U_b}} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)$$

经整理可得气隙击穿电压为

$$U_b = \frac{B \delta d}{\ln \frac{A \delta d}{\ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right)}} \quad (1-13)$$

由式(1-13)可以得出以下两个结论。

(1) 气隙击穿电压与阴极材料和气体性质有关。

(2) 均匀电场气隙的击穿电压不仅与气隙宽度有关,还与气体分子相对密度有关,是二者乘积的函数,只要二者乘积不变, U_b 也不变。

1.2.2 巴申定律

其实早在汤逊理论出现之前,科学家巴申就于19世纪末对气体放电进行了大量的实验研究,并对均匀电场中的气体放电做出了放电电压与气压 p 和放电距离 d 的乘积的关系曲线,即 $U_b=f(pd)$,如图1-6所示。从图中可以看出,曲线呈U形,分为左右两半支,并在某 pd 值时曲线有极小值。

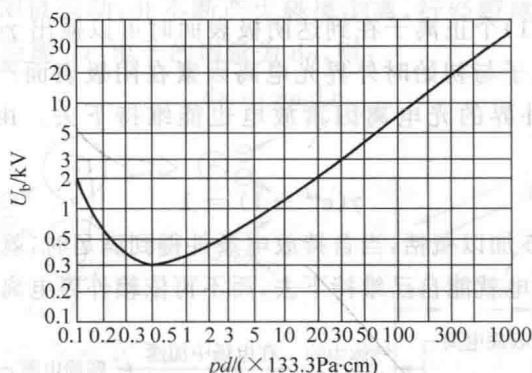


图1-6 均匀电场中空气击穿电压 U_b 与 pd 关系曲线

根据汤逊理论,也可得出上述的函数关系 $U_b=f(\delta d)$ 。因此,巴申定律可从理论上由汤逊理论得到佐证,同时也给汤逊理论以实验结果的支持。以上分析是在假定气体温度不变的情况下做出的。为了考虑温度变化的影响,巴申定律更普遍的形式是以气体的密度代替压力。对空气而言,可用 $U_b=f(\delta d)$ 表示,其中 δ 为空气的相对密度,即实际的空气密度与标准大气条件下的密度之比。

1.3 均匀电场大气隙的放电过程

汤逊放电理论可较好地解释低气压、短间隙、均匀电场中的放电现象, δd 过大或过小时,放电机理将出现变化,汤逊理论就不适用了。通常认为 $\delta d > 0.26 \text{ cm}$ ($pd > 200 \text{ mmHg} \cdot \text{cm}$)时,击穿过程将发生变化,汤逊理论的计算结果不再适用。于是在汤逊理论的基础上,由洛伊布(Leob)和米克(Meek)等通过大量的实验研究及对雷电的观测,提出了流注放电理论。流注理论认为电子的碰撞游离和空间光游离是形成自持放电的主要因素,并且考虑了空间电荷畸变电场的作用。但流注理论还很粗糙,目前只能做定性描述。

1.3.1 空间电荷对气隙电场的畸变

当外电场足够强时,一个由外界游离因素产生的初始电子,在从阴极向阳极运动的过程中产生碰撞游离而发展成为电子崩,这种电子崩称为初始电子崩,简称为初崩或主崩。由于电子的质量小,因此在外电场的作用下很容易获得加速,以很高的速度移动在电子崩的头