



全国高等教育自学考试

高电压技术 自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会 组编
周浩 编著

浙江大学出版社

Q · G · G · J · Y · Z · X · K · S

全国高等教育自学考试

高电压技术自学辅导

全国高等教育自学考试指导委员会组编

周 浩 编著

浙江大學出版社

内 容 提 要

本书是根据高等教育自学考试电力系统及其自动化专业高电压技术自学考试大纲(独立本科段)而编写的自学与辅导相结合的一本教材。为帮助学生尽快地把握高电压技术课程中的关键内容,本教材在编写中,突出了教材的可自学性。本书内容包括电介质的电气强度、电气设备绝缘试验、电力系统过电压与绝缘配合等3篇共12章,着重介绍高电压技术最基本的理论概念和工程应用中的关键问题,并对近年来高电压技术领域中的新进展作适当反映。书中文字力求简练、通俗、易读,并在每章后面配有习题,供自学者练习之用。

本书为高等学校电力系统及其自动化专业(独立本科段)自学考试的自学和辅导教材,也适用于高等学校成人教育、电力职工大学等作为电气类各专业的高电压技术教学用书,同时也可用作从事电力系统的设计、安装、调试和运行的工程技术人员的工作参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压技术自学辅导/周浩编著. —杭州:浙江大学出版社,2001.8
ISBN 7-308-02760-0

I. 高... II. 周... III. 高电压—技术—高等教育—自学考试—自学参考资料 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 058685 号

出版发行 浙江大学出版社

(杭州浙大路 38 号 邮政编码 310027)

(E-mail: zupress@mail. hz. zj. cn)

(网址: <http://www.zjupress.com>)

责任编辑 王 镨

排 版 浙江大学出版社电脑排版中心

印 刷 浙江广育报业印务有限公司

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 16

字 数 430 千字

版 印 次 2001 年 8 月第 1 版 2001 年 8 月第 1 次印刷

印 数 0001—3070

书 号 ISBN 7-308-02760-0/TM·008

定 价 24.00 元

出版前言

为了完善高等教育自学考试教育形式,促进高等教育自学考试的发展,我们组织编写了全国高等教育自学考试自学辅导书。

自学辅导书以全国考委公布的课程自学考试大纲为依据,以全国统编自考教材为蓝本,旨在帮助自学者达到学习目标,顺利通过国家考试。

自学辅导书是高等教育自学考试教育媒体的重要组成部分,我们将根据专业的开考情况和考生的实际需要,陆续组织编写、出版文字、音像等多种自学媒体,由此构成与大纲、教材相配套的、完整的自学媒体系统。

全国高等教育自学考试指导委员会

1999年10月

绪 论

高电压技术的发展始于 20 世纪初,它是电工学科的一个重要分支,主要研究高电压(强电场)下的各种电气物理问题。

电力工业的发展促使了高压远距离输电电压等级的不断提高,它对于高电压技术的发展产生了很大的促进作用。目前世界上已出现了 1150kV 的交流输电线路,直流输电电压已达到了 $\pm 600\text{kV}$ 。我国也已建成相当规模的 500kV 交流输电系统, $\pm 500\text{kV}$ 直流输电线路也已投入运行。这些超高压、特高压电压等级的不断发展,对高电压技术这门学科不断提出了新的研究课题,促使高电压技术继续在高电压远距离输电这个传统领域不断向纵深发展。与此同时,高电压技术也正在迅速地向其他横向领域不断扩展。目前,高电压技术不仅早已在传统的电力和电工部门,而且还在很多领域得到十分广泛的应用,例如在大功率脉冲技术、激光技术、核物理、生态与环境保护、生物医学、静电技术、等离子体放电和液体中放电等领域的应用等。

对于电力工程类的学生来说,学习本课程的主要目的是学会正确处理电力系统中过电压与绝缘这一对矛盾。在运行条件下,电气设备和输电线路的绝缘不但长期处于工作电压之下,而且会受到各种短时过电压的作用,如雷电过电压和操作过电压等,所以,绝缘不仅要能够耐受工作电压的长期作用,而且还必须能够耐受可能出现的各种过电压。要做到这一点,必须从两方面入手,即:一方面要保证和提高绝缘的耐受电压,另一方面要设法降低和限制过电压,这两个方面就构成了“高电压技术”课程的主要内容;与此同时,为了检验绝缘是否具有应有的耐受电压水平,还必须按试验标准对绝缘进行试验,因此,高电压试验设备、高电压试验的方法和标准又构成了“高电压技术”课程的另一个重要内容。传统的高电压技术通常是指上述内容。

几十年来,随着各种新材料的不断研制成功,高电压技术这门学科的内容也不断发生新的变化。例如 60 年代中期采用了强电负性气体 SF_6 作为气体绝缘的新材料,从而成功地开发了性能优越的 SF_6 断路器和全封闭气体绝缘组合电器(GIS);又如 70 年代开始发展的有机合成绝缘子,正在得到迅速的发展,由于其十分优越的防污闪性能,在污秽严重的地区,它已在逐渐取代传统的瓷质悬式绝缘子;再如氧化锌避雷器问世 20 余年来,已使大气过电压的防护得到了明显的改善,目前,它已经基本替代了传统的碳化硅避雷器。

与此同时,迅猛发展的计算机、微电子等新兴学科也正在对高电压这一传统学科产生深刻的影响,如采用大型通用电磁暂态计算程序(EMTP)计算电力系统内部的各种过电压;采用有限元法和模拟电荷法等电磁场数值计算的方法,对电气设备的绝缘结构进行电场分析和优化设计;又如利用传感器、光纤、计算机的新技术,对设备绝缘进行不停电的在线监测与诊断,并利用在线监测的有关数据,采用计算机专家系统对绝缘的状态进行自动分析判断等。

当前,在高电压技术学科的各个领域内仍有相当一部分的理论研究还不很成熟,需要依靠实践结果的不断积累、总结和提高,因此需要大家共同努力,以进一步推进高电压技术学科的不断向前发展。

最后应该指出的是,本课程是一门概念性、实践性很强的专业课程,因此要重视对各种基本概念的深刻理解,并注重提高实践技能;在学习时,必须要注意到这个特点。

目 录

绪论	(1)
----------	-----

第 1 部分 电介质的电气强度

第 1 章 气体的绝缘特性	(3)
1.0 概述	(3)
1.1 气体介质中带电质点的产生与消失	(4)
1.2 气体绝缘的有关放电理论	(7)
1.3 不均匀电场中气隙的放电特性	(13)
1.4 稳态电压下气隙的击穿特性	(18)
1.5 雷电冲击电压下气隙的击穿特性	(21)
1.6 操作冲击电压下气隙的击穿特性	(25)
1.7 大气条件对气体间隙击穿电压的影响	(27)
1.8 提高气体间隙电气强度的方法	(29)
1.9 沿面放电和绝缘子污闪	(31)
1.10 六氟化硫气体绝缘和封闭式气体绝缘组合电器(GIS)	(38)
习题	(39)
第 2 章 液体和固体电介质的绝缘特性	(41)
2.1 电介质的极化	(41)
2.2 电介质的电导	(44)
2.3 电介质的损耗	(47)
2.4 液体电介质的击穿特性	(51)
2.5 固体电介质的击穿特性	(53)
2.6 电介质的老化	(56)
习题	(57)

第 2 部分 电气设备的绝缘试验

第 3 章 电气设备绝缘的非破坏性试验	(61)
3.1 绝缘电阻、吸收比和泄漏电流的测量	(61)
3.2 介质损耗角正切的测量	(65)
3.3 局部放电的测量	(68)
习题	(71)

第4章 电气设备绝缘的耐压试验	(72)
4.1 工频高压试验	(72)
4.2 直流高压试验	(77)
4.3 冲击高压试验	(80)
习题	(89)

第3部分 过电压与绝缘配合

第5章 线路和绕组中的波过程	(93)
5.0 概述	(93)
5.1 均匀无损单导线线路中的波过程	(95)
5.2 行波的折射和反射	(98)
5.3 行波通过串联电感和并联电容	(104)
5.4 行波的多次折、反射	(107)
5.5 行波在平行多导线系统中的传播	(111)
5.6 冲击电晕对线路上波过程的影响	(116)
5.7 变压器绕组中的波过程	(117)
5.8 旋转电机绕组中的波过程	(127)
习题	(128)
第6章 雷电及防雷装置	(130)
6.1 雷电的电气参数	(130)
6.2 避雷针和避雷线	(136)
6.3 避雷器	(139)
6.4 防雷接地	(150)
习题	(153)
第7章 输电线路的防雷保护	(154)
7.0 概述	(154)
7.1 输电线路的感应雷过电压	(155)
7.2 输电线路的直击雷过电压和耐雷水平	(157)
7.3 输电线路的雷击跳闸率	(162)
7.4 输电线路的防雷措施	(169)
习题	(171)
第8章 发电厂和变电所的防雷保护	(173)
8.0 概述	(173)
8.1 发电厂、变电所的直击雷保护	(174)
8.2 变电所内阀型避雷器的保护作用	(175)
8.3 变电所的进线段保护	(179)
8.4 变压器防雷保护的几个具体问题	(183)
8.5 旋转电机的防雷保护	(186)
8.6 气体绝缘变电所的防雷保护	(189)

习题	(190)
第 9 章 电力系统的工频过电压	(192)
9.1 内部过电压和工频过电压概述	(192)
9.2 空载线路电容效应引起的工频电压升高	(195)
9.3 不对称短路引起的工频电压升高	(197)
9.4 甩负荷引起的工频电压升高	(200)
习题	(200)
第 10 章 操作过电压	(201)
10.1 操作过电压的一般特性	(201)
10.2 间歇电弧接地过电压	(202)
10.3 空载线路分闸过电压	(208)
10.4 空载线路合闸过电压	(211)
10.5 切除空载变压器过电压	(213)
习题	(216)
第 11 章 铁磁谐振过电压	(218)
11.1 电力系统的谐振过电压	(218)
11.2 铁磁谐振过电压的一般性质	(219)
11.3 消除和限制铁磁谐振过电压的措施	(222)
习题	(224)
第 12 章 电力系统的绝缘配合	(225)
12.1 绝缘配合的基本概念	(225)
12.2 绝缘配合的方法	(227)
12.3 输变电设备绝缘水平的确定	(229)
12.4 架空输电线路绝缘水平的确定	(234)
习题	(238)
附录	(239)
附录一 标准球隙放电电压表	(239)
附录二 阀式避雷器电气特性	(243)
参考文献	(245)
后记	(246)

电介质的电气强度

需要掌握的要点

1. 电介质及其绝缘的概念

内容提要

电介质在高电压技术这一学科中指的是就是绝缘材料,它们主要是在各种电气设备中起到绝缘的作用。

电介质一般可以分为气体介质、液体介质和固体介质 3 大类。在实际的绝缘结构中还会经常采用由几种电介质构成的组合绝缘,如变压器绕组的油纸绝缘等。

一切电介质的电气强度都是有限的,当作用于电介质上的电场强度超过某一限度时,电介质就会丧失其原有的绝缘性能,由电介质转变为导体,这就是电介质的击穿。在第 1 部分中,我们重点要研究和讨论的问题就是各种电介质的绝缘和击穿问题。

第1章 气体的绝缘特性

一、课程内容和学时安排

- | | |
|---|----------|
| 1. 气体介质中带电质点的产生与消失 | (1 小时) |
| 2. 气体绝缘的有关放电理论 | (2.5 小时) |
| 3. 不均匀电场中气隙的放电特性 | (1 小时) |
| 4. 稳态电压下气隙的击穿特性 | (0.5 小时) |
| 5. 雷电冲击电压下气隙的击穿特性 | (1 小时) |
| 6. 操作冲击电压下气隙的击穿特性 | (0.5 小时) |
| 7. 大气条件对气体间隙击穿电压的影响 | (0.5 小时) |
| 8. 提高气体间隙电气强度的方法 | (2 小时) |
| 9. 沿面放电和绝缘子污闪 | (2 小时) |
| 10. 六氟化硫(SF ₆)气体绝缘和封闭式气体绝缘组合电器(GIS) | (1 小时) |

二、学习目的和要求

本章主要介绍了气体(尤其是空气)绝缘介质在各种不同的高电压作用下,绝缘发生击穿的规律。要求很好理解和掌握气体放电的基本规律、汤逊理论和巴申定理。不均匀电场中的放电、沿面放电和绝缘子污闪是本章的重点,流注理论是本章的难点。

1.0 概 述

1.0.1 需要掌握的要点

1. 研究气体电介质绝缘特性的意义
2. 击穿、击穿电压、击穿场强或电气强度等概念

1.0.2 内容提要

1. 研究气体电介质绝缘特性的意义

气体电介质,特别是空气,是电力系统中应用最广泛、最重要的绝缘介质,例如,输电线路的相间绝缘、相对地绝缘,电气设备的外绝缘都是以空气作为绝缘介质的。另外,目前正在得到越来越广泛使用的金属全封闭式气体绝缘组合电器(GIS),则是以 SF₆ 气体作为绝缘介质的。因此,研究气体电介质的绝缘特性具有十分重要的意义。

2. 击穿、击穿电压、击穿场强或电气强度的概念

当施加在气体间隙上的电场强度达到某一临界值后,间隙中的电流会突然剧增,气体介质会失去绝缘性能而被击穿,这种现象称为气体介质的击穿,也称气体放电。

击穿时施加在气体两端的电压,称为该气隙的击穿电压或放电电压;相应的电场强度就是该气体介质的击穿场强,也称为该气体的电气强度或绝缘强度。

1.1 气体介质中带电质点的产生与消失

1.1.1 需要掌握的要点

1. 激发、游离、游离能和分级游离的概念
2. 带电质点的产生方式
3. 游离的主要形式、游离的原因及其产生条件
4. 自由行程和平均自由行程的概念
5. 异号带电质点复合成中性原子(或分子)时,光电子的产生过程
6. 表面游离比空间游离更容易产生的原因
7. 带电质点消失的各种方式及其特点
8. 电子的亲合能和电负性对气体分子附着效应的影响
9. SF_6 气体的强电负性

1.1.2 内容提要

1.1.2.1 气体原子的激发与游离

1. 激发、游离、游离能和分级游离的概念

从原子物理学知道,原子结构可用星系模型来描述,如图 1-1 所示,其中心是带正电的原子核,外面是位于不同能级轨道的电子。当外界以某种方式给处于某一能级轨道上的电子施加一定的能量,该电子就有可能摆脱原子核的束缚成为自由电子。这就是原子的游离(或称电离)。产生游离所需要的能量称为游离能,用 W_i 来表示。显然,一旦原子产生游离,原来中性的原子就变成了一对带电质点(一个带负电的自由电子和一个正离子)。这样,就产生了带电质点。

当外界所施加的能量还不足以使原子核外的电子彻底摆脱原子核的束缚成为自由电子并形成游离时,它也有可能使某一轨道的电子跃向更高的能级,这就是原子的激发。电子处于这种激发状态是不稳定的,一般经过 10^{-8}s ,它又会返回原来的能级;同时,多余的能量将以短波光的形式释放出来。

当一个电子受到激发跃迁到较高的能级时,如果外界马上再一次向该电子施加能量,该电子就比较容易摆脱原子核的束缚而成为自由电子,形成游离。这种先经过激发再产生游离的过程,称为分级游离。

综上所述,我们可以发现,带电质点就是通过游离产生的。

2. 游离的形式

游离主要有碰撞游离、光游离、热游离和表面游离等几种形式。

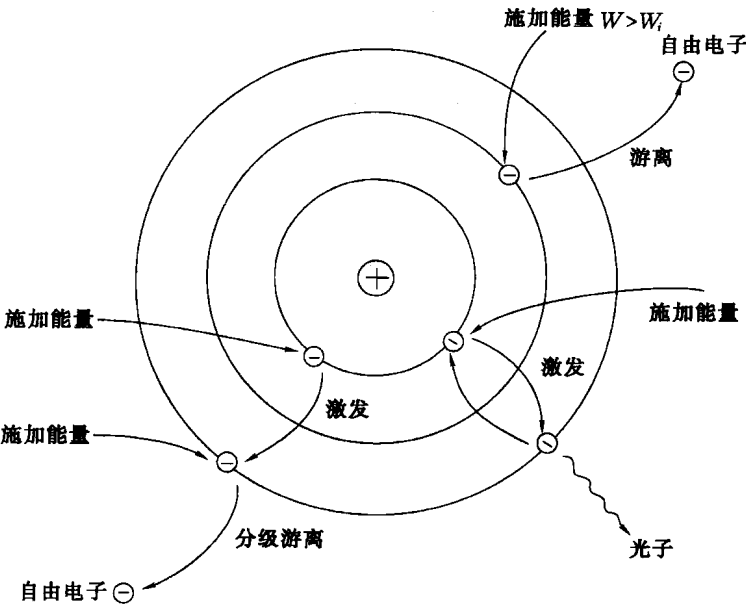


图 1-1 游离、激发和分级游离

(1)碰撞游离

在电场中获得加速的电子与气体原子(或分子)相互碰撞时产生的游离,称为碰撞游离。显然,它是由电子的动能所产生的,碰撞游离条件是电子从电场中获得的动能应该大于或等于气体原子(或分子)的游离能,即:

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \tag{1-1}$$

式中: m ——电子的质量;
 v ——电子的运动速度;
 W_i ——气体原子(或分子)的游离能。

质点在两次碰撞之间所行走的距离,称为自由行程;而质点在许多次碰撞之间所行走距离(即自由行程)的平均值,则称为平均自由行程。

平均自由行程与气体的绝对温度成正比,与压力成反比。气体的温度越高,压力越小,则平均自由行程越大。在通常的情况下,电子的平均自由行程越大,两次碰撞之间电子能够积累起的动能就越大,电子在行走过程中发生碰撞时产生碰撞游离的概率也越大。

(2) 光游离

光游离是由光辐射所导致的气体原子(或分子)的游离。产生光游离的条件是光子的能量应该大于或等于气体原子(或分子)的游离能,即:

$$h\nu \geq W_i \tag{1-2}$$

或:

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_i} \tag{1-3}$$

式中: h ——普朗克常数,其值为 $6.63 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$;
 ν ——光的频率(Hz);
 c ——光速,其值为 $3 \times 10^8 \text{m/s}$;
 λ ——光的波长(m), $\lambda = \frac{c}{\nu}$;

W_i ——气体原子(或分子)的游离能。

显然,波长越短,光子的能量越大,游离能力就越强。通常,只有各种短波长的高能辐射线,如宇宙线、 γ 线、 X 线以及部分短波长的紫外线,才能使气体产生光游离;而各种可见光一般都不能使气体产生光游离。

在气体放电过程中,当处于激发状态的原子回到正常状态,或者异号带电质点复合成中性原子(或分子)时,多余的能量将以光子的形式(短波光)释放出来;光子的能量可以使周围气体分子(或原子)再产生“光游离”(这种光游离将在以后讨论的气体放电发展中具有很重要的作用)。通常,把由这种光游离所产生的自由电子又特称为“光电子”。

(3) 热游离

气体分子(或原子)在高温状态下会产生较大的热运动动能,从而有可能使原子或分子产生游离。这种由分子或原子本身的热运动所引起的游离过程,称为热游离。

一般只有在温度超过10 000K(例如电弧放电的情况)时,才需要考虑热游离。

(4) 表面游离

除了前面所讨论的3种发生在气体空间中的空间游离方式外,气体中带电质点还可以通过电极表面游离的方式产生。

在外界能量的作用下,电子从金属电极(阴极)表面逸出成为自由电子的过程,称为表面游离;把电子从金属阴极表面释放出来所需要的能量,称为逸出功。

金属电极发生表面游离所需要的逸出功,通常比气体发生空间游离时所需要的游离能要小,因此,电极表面游离比空间游离更容易产生。

表面游离主要有热电子发射、二次发射、光电子发射和强电场发射4种形式。

●热电子发射:将金属表面加热,电子热运动速度增加,当其能量超过逸出功时,电子就会逸出金属表面。

●二次发射:具有足够能量的正离子撞击阴极表面,使其释放出电子。

●光电子发射:用短波光照射阴极金属表面时,当光子的能量大于逸出功时,金属表面会释放出电子。

●强电场发射:当阴极金属表面附近的电场很强时(达到 10^6V/cm 数量级),金属表面的电子有可能被强大的电场力从阴极强行拉出,成为自由电子。

在一般的常态下,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,一般不会出现强电场发射。但是,在真空的击穿过程中,强电场发射则起着决定性的作用,它对解释真空中的击穿现象具有十分重要的意义。另外,在高气压下,尤其是在压缩高电气强度气体的击穿过程中,强电场发射也有可能起到一定的作用。

1.1.2.2 气体中带电质点的消失

带电质点的消失主要是通过带电质点扩散、复合和附着3种方式进行的。它们是产生带电质点的游离过程的相反过程,故又称为“去游离”过程。

1. 带电质点的扩散

由于热运动,带电质点总是不断地从高浓度区域向低浓度区域扩散,使高浓度区域(该区域往往就是放电区域)带电质点的浓度减小,这将有利于该区域的空气恢复原来的绝缘状态。

2. 带电质点的复合

当正离子与负离子或电子相遇时,有可能发生电荷的传递而相互中和,还原为中性的原子

或分子,这种现象就称为带电质点的复合。

(1)带电质点的复合主要有正离子与负离子复合和正离子与电子复合两种方式。由于电子的运动速度太快,正离子与电子之间很难靠相互间的静电吸引力而碰在一起,故较难发生复合,因此在这两种复合方式中,正离子与负离子之间的复合往往起主导作用。

(2)复合进行的速度和激烈程度取决于带电质点的浓度;正、负带电质点的浓度越大,复合进行得越快、越激烈。

(3)在带电质点的复合过程中,多余的能量将以光子的形式(短波光)释放出来,形成光辐射。这种光辐射有可能会使周围气体原子(或分子)产生光游离。

(4)来自宇宙的高能射线使空气分子不断发生游离,产生带电质点,同时,这些正、负带电质点又会不断地复合,最终达到一种动态平衡。这样,就使得在平时我们周围每立方厘米的常态空气中,经常会存在着 500~1000 对正、负带电质点。

3. 附着效应

电子与气体原子(或分子)发生碰撞时,有可能会引起碰撞游离,产生正离子和新的自由电子,但也有可能会发生电子与中性原子相结合形成负离子的情况,后者一般称为“附着”。

电子被原子或分子俘获后,变成了质量大、运动速度慢的负离子,其游离能力大减,对气体放电的发展起到抑制作用,从而使气体绝缘强度得以提高。因此,附着效应也可以看成是一种去游离过程。

电子的亲合能越大、电负性越强,越容易形成附着。通常,卤族元素都具有很大的亲合能,很容易俘获 1 个电子而形成负离子。这种容易吸附电子形成负离子的气体,通常称为电负性气体。其中,六氟化硫(SF_6)气体是在高电压情况下用得最多、最典型的强电负性气体。 SF_6 对电子具有很强的亲合性,其电气强度远大于一般气体。目前,它已在高电压绝缘中得到了广泛应用。

1.2 气体绝缘的有关放电理论

1.2.1 需要掌握的要点

1. 汤逊放电理论和流注理论各自的适用范围
2. 汤逊理论所描述的整个电子崩放电发展过程
3. 电子碰撞游离系数 α
4. 汤逊理论的自持放电条件及其物理解释
5. 巴申定律及其在实际中的应用
6. 流注理论与汤逊理论在考虑放电发展因素上的不同
7. 流注及其放电的发展过程
8. 流注及其自持放电的形成条件

1.2.2 内容提要

1. 解释气体放电现象主要有汤逊理论、流注理论和巴申定律等 3 个重要的理论和定律
2. 汤逊放电理论和流注理论各自的适用范围

汤逊放电理论适用于解释均匀电场中低气压、短间隙条件下的气体放电现象,流注理论适用于解释高气压、长间隙条件下的气体击穿现象(均匀、不均匀电场均可)。采用这两个理论,就可以解释气体压力 p 和极间距离 d 的乘积 pd 在很大范围内变化时的各种气体放电现象。对于空气来说,一般当 pd 值小于 $26\text{kPa} \cdot \text{cm}$ 时,可用汤逊理论来说明; pd 值大于 $26\text{kPa} \cdot \text{cm}$ 时,则要用流注理论来解释。巴申定律适用于解释均匀电场中,气体放电电压随气体压力 p 和极间距离 d 的乘积 pd 的变化情况。

1.2.2.1 汤逊气体放电理论

汤逊气体放电理论是以电子崩作为基础的,故又称为“电子崩”理论。下面我们将直接从电子崩开始讨论。

1. 电子崩放电发展过程

电子崩放电发展过程如图 1-2(a)所示:

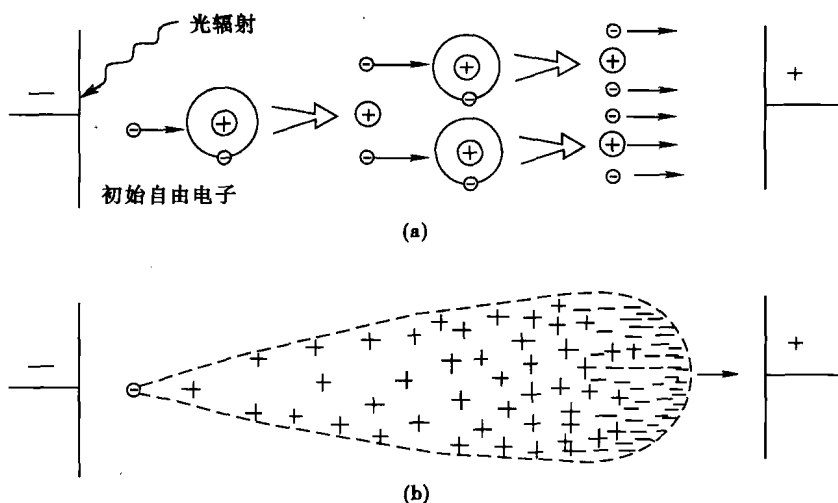


图 1-2 电子崩示意图

(a)电子崩的形成 (b)带电粒子在电子崩中的分布

(1)假定外界游离因素(光辐射)的作用使阴极表面产生游离,从而在阴极附近产生 1 个光电子,该光电子就成为间隙中的初始自由电子。

(2)该初始自由电子在电场作用下向阳极运动并得到加速,动能不断增加。如果电场强度足够大,该电子就会与气体分子(或原子)发生碰撞游离,产生 1 个新电子,使自由电子数增加到 2 个。

(3)该新电子与原有的电子一起,又将在电场中得到加速并获得动能,继续引起新的碰撞游离,再产生 2 个新电子,使电子的总数增加到 4 个。这 4 个电子继续向前运动,并可以再一次发生碰撞游离,使电子数进一步增加至 8 个。这个过程不断地迅速重复和扩展,就形成了一个迅猛发展的碰撞游离过程,使间隙中的带电质点数像雪崩似地迅速增多。因此,通常将上述过程称为“电子崩”。

(4)随着电子崩的不断发展,崩内的电子及正离子数将随电子崩发展的距离,按指数规律迅速增长。

由于电子的运动速度远大于正离子的运动速度,故电子总是位于整个电子崩的头部,而正离子可近似地看作滞留在原来的位置上,并很缓慢地向阴极方向移动。相对于电子来说,可以认为它是静止的。由于电子的扩散作用,电子崩在其发展过程中,半径逐渐增大,其中出现大量的空间电荷,如图1-2(b)所示。电子崩头部集中着几乎所有的电子;其后直至电子崩尾部是大量的正离子;电子崩整体外形如一个头部为球状的圆锥体。

(5)带电质点数的大大增加,会导致间隙中的电流迅速增大,并可以导致整个间隙最终发生击穿。

2. 带电质点在电子崩发展过程中的增长规律

为寻求电子崩发展的规律,需要引入一个系数——电子碰撞游离系数 α ,它表示1个电子在沿电场方向运动1cm的行程中,所完成的碰撞游离次数。在图1-3所示的均匀电场中,设在外界游离因素光辐射的作用下,阴极表面每秒钟由于光电子发射产生 n_0 个初始电子,这些电子在电场作用下,将向阳极运动并不断产生碰撞游离。假设在它们到达 x 处时,电子数已增加到 n 个,这 n 个电子再行经 dx 距离后,又会产生 dn 个新电子,即:

$$\begin{aligned} dn &= n\alpha dx \\ \text{或: } \frac{dn}{n} &= \alpha dx \end{aligned} \quad (1-4)$$

将上式积分可求得:

$$n = n_0 e^{\int_0^x \alpha dx}$$

对于均匀电场,电场强度处处相等,故 α 为常数,所以有:

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (1-5)$$

因此到达阳极的电子数为:

$$n_a = n_0 e^{\alpha d} \quad (1-6)$$

整个电子崩发展过程中新增加的电子数或正离子数为:

$$\Delta n = n_a - n_0 = n_0 (e^{\alpha d} - 1) \quad (1-7)$$

将式(1-6)的等号两侧乘以电子的电荷 q_e ,即得电流关系式:

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (1-8)$$

式中: $I_0 = n_0 q_e$,为外界游离因素所引起的初始光电流。

式(1-8)表明,虽然电子崩的电流随极间距离 d 按指数规律增大,但此时的放电还不能自持(即自行维持下去),因为一旦去掉了外界游离因素(即 $n_0 = 0, I_0 = 0$),间隙中的电流 I 即变为零,这意味着放电也就立即停止了。

3. 汤逊自持放电判据

由公式(1-7)可知,当一个初始电子到达阳极时,会产生 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子。这些正离子在电场的作用下向阴极运动,并撞击阴极表面,会形成表面游离,产生二次发射。如果这 $(e^{\alpha d} - 1)$ 个正离子在撞击阴极表面时,至少能从阴极表面释放出一个有效电子,该电子就可以替代原先需要依靠外光源照射(光辐射)通过光游离方式在阴极表面产生的初始自由电子。这个有效电子又将在电场作用下向阳极运动,产生碰撞游离,形成新的电子崩。依此循环,即使没有外界游离因素存在,放电也能自行维持下去,即放电达到了自持。

如果定义 γ 为正离子的表面游离系数,它表示一个正离子撞击阴极表面所能够从阴极表面释放出的二次电子数,则汤逊理论的自持放电条件可表达为:

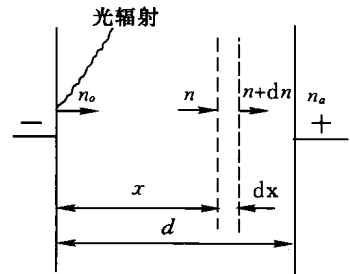


图 1-3 计算间隙电子数增长的示意图