

高压放电的原理 与演示

肖如泉 王黎明 倪梅娟 王秀宜 邵杰 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

高压放电的原理 与演示

肖如泉 王黎明 倪梅娟 王秀宜 邵 杰 编著



中国水利水电出版社

www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共4章,内容包括:高压放电的理论简介,高压放电的演示,产生高压放电的电源装置,高电压技术中的安全等。在附录中还收入了球隙放电电压表。

本书图文并茂,趣味性和可读性强,可供科普知识爱好者和科普工作者阅读,也可供电气技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压放电的原理与演示/肖如泉等编著. —北京:中国水利水电出版社, 2003

ISBN 7-5084-1765-8

I. 高… II. 肖… III. 高电压-放电 IV. TM8

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第095213号

书 名	高压放电的原理与演示
作 者	肖如泉 王黎明 倪梅娟 王秀宜 邵 杰 编著
出版 发行	中国水利水电出版社(北京市三里河路6号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京市兴怀印刷厂
规 格	787mm×1092mm 16开本 7印张 166千字
版 次	2004年1月第1版 2004年1月第1次印刷
印 数	0001—3300册
定 价	18.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究



前言

自改革开放以来，科教兴国已成为我国的国策，只有把科学、技术、教育搞上去，中国才能成为强盛的国家，才能真正做到国富民强。

在科教兴国思想的指导下，我国的教育事业发展得很快。人们已经认识到，将来世界的发展和竞争，实际上就是人才的竞争，所以必须大力发展教育事业。这些年来，不仅在义务教育方面，而且在高等教育方面也有了很大的发展。目前，我国许多大学都在争取成为世界一流的高等学校，如北京大学、清华大学等都在创造条件，争取在不太长的时间内，把学校办成世界一流的大学，为国家培养世界一流的人才。

在科学普及的教育方面，我国也有很大的进步。在北京，建立了“中国科学技术馆”，并且相继在许多城市也建立了科技馆，科技馆事业也有了大力发展。自1988年9月中国科学技术馆建立以来，各省、自治区、直辖市也都陆续建立起了科技馆，对科普教育的推广起了非常大的作用。

早在20世纪50年代，我国领导人周恩来、聂荣臻等就规划过筹建科技馆的事宜。但由于当时我国国力较弱，科技馆没有建立起来。直到70年代，在邓小平同志的关怀下，中国科学技术馆才开始筹建，他老人家还亲自为中国科学技术馆题写了馆名，并于1988年9月开馆。开馆后，参观的人络绎不绝，十几年来参观的人数达到数百万人次。后来，中国科技馆又建了第二期工程，于2000年4月开馆。江泽民同志还为中国科技馆书写了“弘扬科学精神，普及科学知识，传播科学思想和科学方法”的题词。开馆三年以来，参观的人数更是数不胜数。中国科技馆第二期工程所展示的内容更加丰富，很多展品都是世界一流的，使参观者真正受到了科学的熏陶。科技馆事业正在为我国的科普教育作出贡献。

高电压技术在能源、电力、医疗器械、环境保护等国民经济中起着非常重要的作用，尤其在国民经济迅速发展的今天，高电压技术的重要性就更加显得突出。

在电力工业中，可以说没有高电压技术就谈不上电力工业，因为，当今电力的传输，必须靠高电压方能将电能传输到不同的用户，否则，电能只能输送给容量很小、距离很近的地方。大部分的电能将消耗在输电的线路上，这是绝对不行的。为了将强大的电能输送给距离很远的用户，必须将传输电压提高，这样可以大大减小线路上的损耗。这可以从下面的例题中看得很清楚，该例题如图0-1所示。

该图中有一发电机，其容量为100kVA，当输电电压为500V时，线路电流将达到200A，而线路上有大约 2Ω 的电阻（导线电阻），很显然，线路上将会降掉约400V的电压，而用户的电压只有100V的电压了，这样，大部分电压降在了线路上，用户就不能得到多少能量了。为了要把电能正常地输送给用户，必须减小线路的压降，其方法之一就是提高输电电压。假若将电压提高到10000V（10kV）的话，那情况就不一样了，同样输送100kVA的容量，

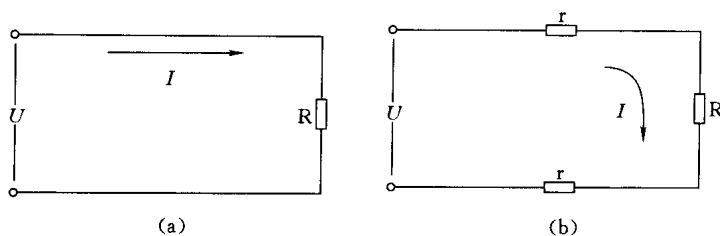


图 0-1 输电线路示意图
(a) 输电线路; (b) 等值电路
R—负载电阻; r—导线电阻

线路电流就会大大减小, 约 10A, 而线路的压降却只有 20V, 大部分的电压将加在用户上, 这样用户也就会得到大部分的能量。这个例题说明了: 若要将电能正常地输送给用户, 输送的能量越大, 距离越远, 输电的电压将越高。

从表 0-1 中也可看到, 额定电压、输电距离与传输功率的关系, 当额定电压为 6~10kV 时, 输电功率约为 100~2000kW, 输电距离约为 4~20km; 当输电距离达到 100~600km、输电的功率为 100~1000MW 时, 其输电电压将达到 220~330kV 了, 否则, 电能将传不到用户, 而要损失在线路上。我国目前的输电电压还不止 330kV, 运行的最高电压已达 500kV, 根据我国国民经济的发展, 输电电压还会有升高。

由于我国的水力资源、煤、石油以及核能等大部分都储藏在西部, 要想将西部的这些能源用于我国的建设事业, 必须将它们转换成电能方能被人们利用; 又由于我国地域辽阔, 要将转换的电能传出去, 就一定要将电压提高, 所以高电压技术是必不可少的。另外, 强大电能的传输大都是利用空气作为绝缘介质, 也就是绝大部分都是用架空线作为输电线的。在架空线作为传输线时, 空气中的放电现象是电力工作者必须要研究的课题, 而且还正在不断地进行着研究。

表 0-1 额定电压、输电距离与传输功率的关系

额定线电压 (kV)	传 输 功 率 (kW)	输 电 距 离 (km)
6	100~1200	4~15
10	200~2000	6~20
35	2000~10000	20~50
110	10000~50000	50~150
220	100000~500000	100~300
330	200000~1000000	200~600

因此, 本书将介绍空气中放电的原理和放电的演示试验。另外, 高电压技术对其他的科学领域也是非常重要的, 因为那些领域也需要应用高电压技术, 如医疗器械、环境保护, 以及各种高新技术都离不开高电压技术。所以, 高电压的演示对搞科学技术的科技工作者来说, 也是非常重要的。

由于我国科学普及事业的发展, 中国科学技术馆和各地方科技馆大都设立了高压放电的演示项目。如中国科学技术馆就有高压放电的演示。高压放电的演示对一般的观众来说, 是很难见到的。高电压非常危险, 且产生高电压的设备又很昂贵, 所以当中国科学技术馆的高压放电的展览项目展出以后, 深受广大观众的欢迎。该展品以强大的声、光、电效应吸引着广大观众。当沿固体介质表面放电的火花沿着透明的玻璃板表面放电时, 当灼热的电弧沿着羊角型电极向上运动时, 当强烈的雷电向建筑物击来时, 在场参观的人们都会爆

发出热烈的掌声，甚至欢呼起来。还有，观众可以直接参与的法拉第笼和静电发生器的演示，则更是深受广大观众欢迎的项目。

高压是很危险的，但它是可以被人们征服的。当你站在静电发生器的绝缘台上时，由于几十万伏的高电位，将使你的头发竖立在你的头顶上；当你钻进法拉第笼里时，无论笼外的电火花如何强烈，即使你的手挨着笼壁，对着放电火花时，也可以使你安然无恙。

不仅在中国科学技术馆有高压放电的演示项目，而且在各地方的科技馆，如天津市科技馆、山西省科技馆、福建省科技馆、湖北省科技馆等，也都设立了高压放电的展项，自然也是很深受广大观众欢迎的。

由于高电压技术在我国国民经济中有着举足轻重的作用，又因为高电压技术的应用中，很多设计的依据和放电中的现象大都是从高压试验中得来的，所以人们普遍认为，高压试验是高电压技术的基础和关键。

高压放电演示非常吸引人，在参观时大家的精力都放在看表演上，而对高压放电的原理、高电压的产生以及高电压在国民经济中的作用等思考得不是很多。在观察高压放电现象时，人们往往记不住播放的放电原理的录音，而参观后又很想对高压放电的原理、高压放电在电力工程中的作用有所了解。另外，在当今由于高电压技术在电力工业、医疗器械、环境工程等领域中的应用越来越广泛，人们很想了解高压放电的原理以及诸多高电压的产生、测量、控制等技术，如工频高压、直流高压、人工雷电以及高频高压等。有鉴于此，我们特编写了本书，一方面想通过它宣讲高压放电的科学普及知识，另一方面也想为从事高电压的科技工作者提供有用的资料。

在编写中，我们不仅搜集了自己曾参与过的高压放电表演项目的资料，而且也搜集了与表演有关的其他高压放电的素材，同时还参考了大量的高电压技术图书。本书内容比较丰富翔实，融知识性、趣味性和可读性于一体。我们希望本书能引起读者对高压放电的兴趣。

由于作者水平有限，书中可能会有许多不足之处，敬请专家和读者批评指正。

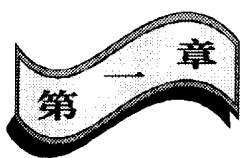
作 者

2003 年 10 月

目 录

前 言

第一章 高压放电的理论简介	1
第一节 均匀电场中的放电	1
第二节 不均匀电场中的放电	7
第二章 高压放电的演示	28
第一节 交流高压放电的演示	30
第二节 直流高压放电的演示	42
第三节 雷电放电的演示	49
第四节 法拉第笼的演示	58
第五节 高频高压的放电 (特斯拉放电) 演示	61
第六节 高压静电除尘的演示	66
第三章 产生高压放电的电源装置	69
第一节 交流高压的获得	69
第二节 直流高压的获得	73
第三节 雷电高压的产生	76
第四节 高频高压的产生 (特斯拉发电机)	82
第五节 接地系统的设计	84
第四章 高电压技术中的安全	88
第一节 人身安全和安全电压	88
第二节 安全距离和接地	90
第三节 高电压演示与高电压试验的安全	91
附录 球隙放电电压表	98
参考文献	102



高压放电的理论简介

随着科学技术的发展,高电压技术的发展也是经过了很长的时间。在 19 世纪末、20 世纪初,当时才刚刚发明了发电机,根本就谈不到如何输电的问题。随着科学技术的发展,输电的容量越来越大,输电的距离越来越远,所以,高电压技术就慢慢地发展起来了。目前,高电压技术的应用越来越广泛,尤其在电力工业,可以说没有高电压技术就谈不上电力工业。而且,高电压技术在其他领域也得到了广泛的应用。由于高电压技术的发展,高电压技术的理论也越来越趋完善,对于各种电介质的击穿理论,人们作了很多的研究。所谓击穿,对气体而言就是放电现象,当然还有液体的击穿、固体的击穿等。所以,形成了许多的放电的理论,如气体中的放电理论,液体中的放电理论,固体中的放电理论等。由于组成电气绝缘不可能由单一的一种气体、液体、固体的绝缘材料组成,所以,在考虑多种绝缘材料组合体时,应综合考虑各种材料的特点。

在高压放电的理论中,气体放电的理论是其他理论的基础,因为,气体对于电力工业来说应用非常广泛,如应用最广的是高压输电。目前,几乎所有的输电线都是利用空气绝缘,不管是电压不高的 10kV 的电压(当然在城市里常用电力电缆),还是电压很高的 500kV 的电压,都是用空气绝缘。在用空气作绝缘时,绝缘距离应该取多少比较合适?若距离取得比较小,容易引起空气的放电,这是很不安全的,不但会引起高压线路之间放电,而且还可能引起高压对人体的放电。若绝缘距离取得比较大,输电线路将占很大的面积,要占用很多的良田,并且,建立一条线路所需的费用将会增加很多,这样投资将会增加,这也是需要认真考虑的。另外,在高压输电时电压高了,高电压将会有什么放电现象?这些现象对人、对输电有什么好处或不利之处?这些放电现象将会遵循什么规律?这些问题可能都是人们感兴趣的问题。所以,本书将对气体放电的理论作较多的叙述。

气体放电理论的研究,首先就是从均匀电场开始的。在 20 世纪初,人们对气体放电没有什么认识,并且,当时人们所用到的电压也比较低,所以研究的对象就是间隙距离较小的均匀电场。由于没有形成气体放电的完整理论,所以,还有人认为气体放电好像圣火一样。直到后来,英国的科学家汤逊用碰撞电离的理论,才基本上解决了气体放电的基本规律,形成了汤逊理论。下面就对气体放电理论的形成作一简单的介绍。

第一节 均匀电场中的放电

1. 巴申(Paschen)定律

早在 19 世纪末,科学家巴申就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放电距离和气体相对密度的乘积的关系曲线,即: $U=f(\delta \times$

d), 如图 1-1 所示。

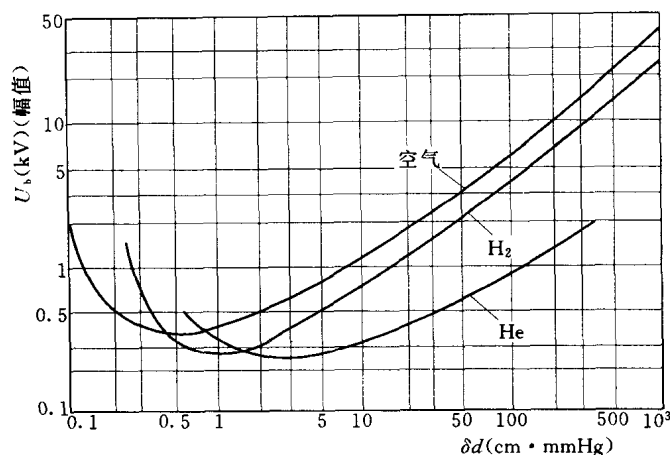


图 1-1 放电电压与放电距离、气体相对密度乘积的关系曲线

下面对公式中的符号和含义作一说明：所谓均匀电场，就是在电场中，各处电场强度均相等的电场，如：两个平行板电极的电场（当然还要考虑边缘效应）、球—球电极的电场（当两球之间的距离小于球径的四分之一时）、两同轴圆柱（在间隙距离小于圆柱的直径时）的电场等，电极形状如图 1-2 所示。巴申是用两平行板的电极进行实验的。

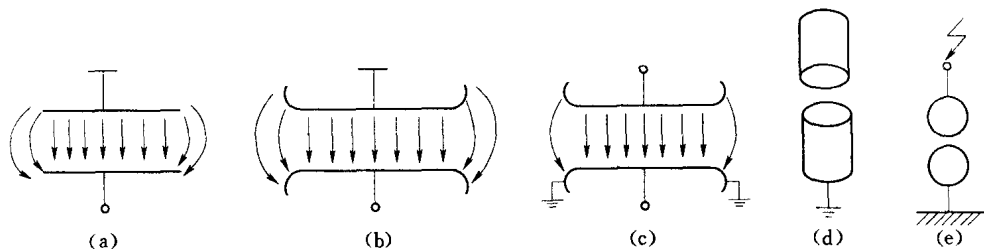


图 1-2 平行板电极、球—球电极、两同轴圆柱电极示意图

(a) 一般平行板电极；(b) 改善边缘平行板电极；(c) 带屏蔽平行板电极；
(d) 两同轴圆柱电极；(e) 球—球电极

所谓放电电压，就是在电场作用下，使空气间隙击穿的电压 (U , kV)；放电距离 (d , cm)，即两个极板之间的距离；所谓气体相对密度 (δ)，就是实验时空气的大气压力 (P)、环境温度（就是实验时的大气压力 P 与实验时空气的绝对温度 K 的比值）和其在标准大气条件（标准大气压力 $P_0=0.1013\text{MPa}$ ，与标准绝对温度 $T_0=293\text{K}$ 的比值）之比，称之为气体相对密度，即： $\delta = (P/T) \times (T_0/P_0)$ ，又可写成 $\delta = (T_0/P_0) \times (P/T)$ 。

由于大气压力的单位有多种表示方式，有用 Pa 表示的，有用 mmHg 表示的，也有用 mba 表示的，又由于 $K=T_0/P_0$ 是一常数，当用不同的方式表示时， $K=T_0/P_0$ 值也是不一样的，即： $\delta=KP/T$ 。

当大气压力的单位为 Pa 时， $K=0.0029$ ，即 $\delta=0.0029P/T$

当大气压力的单位为 mmHg 时， $K=0.386$ ，即 $\delta=0.386P/T$

当大气压力的单位为 mba 时， $K=0.289$ ，即 $\delta=0.289P/T$

d 为间隙距离。从巴申所作的实验曲线可看出, 当间隙距离 d 与相对密度 (δ) 的乘积 (δd) 较大时, 气体的击穿电压随 (δd) 的增大而增加, 当间隙距离 (d) 与相对密度 (δ) 的乘积 (δd) 减小到一定时, 气体的击穿电压将随 (δd) 的减小也增加, 很显然, 科学家巴申在进行试验时, 当间隙距离小到一定程度时, 就将试品的环境条件 (δ) 改变一下, 将其抽成真空, 这样, 击穿电压就增加了。

巴申进行的科学实验对当时的高电压技术有很大的意义, 所以人们称之为巴申定律, 但巴申并没有从理论上解释气体放电的本质, 所以后来, 由英国科学家汤逊很好解释了气体放电的本质问题, 即汤逊理论。

2. 汤逊 (J. S. Townsend) 理论

科学家巴申做出了气体放电的实验曲线, 对高电压技术的发展起了很大的作用, 但如何从理论上解释气体放电的本质? 英国物理学家汤逊 (Townsend) 在实验的基础上, 从理论上解释了气体放电现象的本质, 并用公式表达了放电电压与放电距离 (d) 和气体相对密度 (δ) 的乘积 (δd) 的关系曲线, 即 $U=f(\delta, d)$ 。具体的公式为:

$$U = \frac{BPd}{\ln \left[\frac{APd}{\ln \left(1 + \frac{1}{\gamma} \right)} \right]}, \quad \text{即 } U = f(P, d)$$

式中: P 为间隙所处的大气压力; d 为间隙距离; γ 为一个正离子撞击阴极表面逸出的电子数; A 为取决于气体分子体积的比例系数; B 为与气体分子结构有关, 与气体体积有关的常数。

又由于在进行试验时, 气体的温度可认为不变, 所以, 击穿电压的公式可写成:

$$U = f(\delta d)$$

式中 $\delta = K \frac{P}{T}$, K 为常数。

汤逊理论从本质上解释了气体放电的原理: 气体为什么能放电? 气体放电与什么因素有关?

在很早以前, 有人认为气体放电是一种圣火, 带有迷信的色彩。很显然, 这是很不科学的。

而实际上, 是因为电极间有许多电荷存在。在正常的状态下, 电极间的气体分子或原子基本上是呈中性的, 即算有一些少数的电子, 但由于电子数很少, 另外也没有电场的作用, 所以, 气体不会放电。

在足够强的电场作用下, 电极间的中性分子将被电离, 所谓电离, 就是中性分子的外层电子将脱离分子的束缚, 沿电场的相反方向运动, 这样在电场中就有带电粒子存在, 也就是说, 脱离了中性分子束缚的电子将带负电, 而失去了电子的原中性分子也将变成带有正电的正离子, 也有获得了电子的中性分子, 则变成了带负电的负离子。

要使气体分子电离一般可以有以下几种情况。

(1) 碰撞电离。带有负电的电子在电场作用下, 将以很快的速度去撞击另外的中性分子, 从而又可以得到很多的电子和正、负离子, 并且电子数将越来越多, 就如山崩地裂一般, 人们称之为电子崩, 当电子的密度达到一定时, 电场中的电离将达到自持的状态, 这

时气体间隙就击穿了。产生电子崩的示意图如图 1-3 所示。

一般人们把由于电子崩产生的电离称之为碰撞电离。汤逊理论认为：碰撞电离是产生电离的主要因素。

所谓自持放电的状态，就是当电场中不需要继续升高电压而能保持气体间隙的放电的状态，这种状态可从气体放电的伏安特性的图中可看出，当气体间隙刚加上电压时，气体间隙将有很小的电流流过，大约为微安级的电流，继续升高电压时，通过气体间隙的电流将基本是常数，若再继续升高电压，一直达到图 1-4 曲线上的“3”点时，通过气体间隙的电流会突然增加，这时气体间隙将完全丧失绝缘能力，而成为了自持放电的状态了。

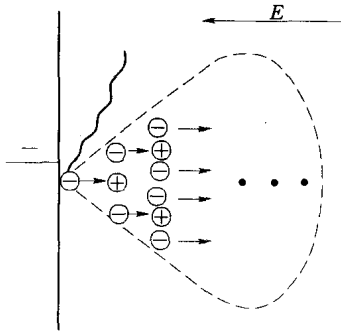


图 1-3 产生电子崩的示意图

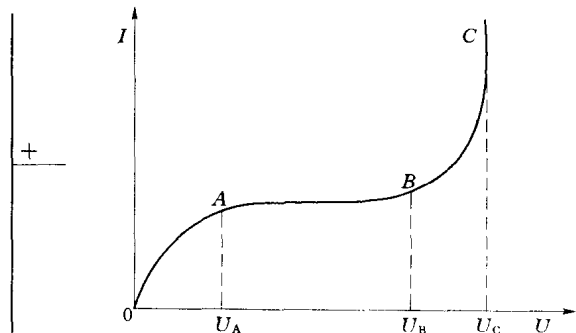


图 1-4 气体间隙放电时的伏安特性曲线

(2) 光电离。所谓光电离，就是由于光的照射而产生电子和正、负离子，尤其是波长非常短的短波的照射，更容易产生光电离。

(3) 热电离。热电离就是由于分子的热运动而产生的电离，这种电离实际也就是碰撞电离和光电离共同作用的结果，因为当气体温度上升时，气体分子运动加剧，所以碰撞电离也会加剧；另外，温度升高了，热辐射能量增大，因此也产生光电离这是很好理解的。

(4) 表面电离。电场中电离的产生还与电极材料有关，也就是说，在电场作用下，正离子也将撞击阴极表面，从而使阴极表面逸出电子，当然不同的电极材料，其逸出的电子数是不一样的，此种电离称之为表面电离，表面电离在实际中应用得很广泛，如：在电子工业中，常常利用金属表面的电子发射来达到整流放大的目的，这就是电子管的基本原理。

在各种因素产生电子、离子时，同时也在进行着复合的过程，也就是说，同时也在进行着消电离。消电离的形式有以下几种。

1) 复合。所谓复合，就是异号电荷质点相遇，发生电荷的传递、中和而还原成中性质点的过程，一般说来，正、负离子复合较为容易，浓度越大，复合数也越多。

2) 扩散。带电质点从浓度较大的区域转移到浓度较小的区域，从而使带电质点在空间各点的浓度趋于均匀。

3) 电极间带电粒子在不断的消失。带电质点在电极处的消失，一方面是电子进入阴极；另一方面是正离子运动到阴极附近，与阴极逸出的电子结合而成为中性质点。

以上所述就是，使已经电离了的电子、离子又恢复到原来中性的状态的几种形式。

汤逊理论经过对电场中带电质点的分析，并进而用数学的形式对气体放电作了细致的描述，并用公式表示了击穿电压与间隙距离和气体相对密度的乘积的关系。综上所述，汤

逊理论的要点有以下三点。

a. 气体放电主要是由碰撞电离所引起的。在电场作用下, 电极间带电质点(电子)将沿着电场方向去撞击不带电的分子, 当气体分子被撞击以后, 将放出电子, 又去撞击不带电的分子, 撞击的结果, 电子数将按指数增加, 像山崩一样, 称为电子崩, 称之为 α 过程。

b. 在气体放电的过程中, 还会产生正离子, 但正离子产生碰撞电离的可能性很小, 因为正离子质量比电子大得多, 可以认为, 正离子碰撞电离可以忽略, 人们称之为 β 过程。

但正离子将撞击阴极, 而从阴极极板释放出电子, 人们称之为 γ 过程。

c. 关于发生气体放电, 必须是在自持放电的情况, 所谓自持放电, 可以从气体放电的电流与电压的关系曲线中看出, 见图 1-4, 当施加电压在 C 点以前, 通过电路的电流很小, 这时的电流要靠外电离的因素(天然辐射或人工光源, 例紫外线)来维持, 这种放电称之为非自持放电; 当施加电压达到 C 点时, 气体中发生了强烈的电离, 电流剧增, 放电的过程只靠电场可以自行维持, 不需外界电离因素了, 因此, C 点以后的放电称之为自持放电。

汤逊理论从理论上解释气体放电的基本过程, 但只适用于 (δd) 较小的情况, 对 (δd) 较大的情况, 就不适用了。具体的实用范围, 对空气来说, 一般认为, 在 $(\delta d) < 0.26\text{cm}$ 范围内, 汤逊理论比较符合实际。

20 世纪初, 英国科学家汤逊根据大量的实验数据, 提出了比较系统的气体放电的理论, 阐述了放电中的过程, 并在一系列假设的前提下, 提出了放电电压与气体间隙距离和相对密度的乘积 $\{U=f(\delta d)\}$ 的计算公式。实验表明, 汤逊虽然只是对 (δd) 较小时的放电比较实用, 但其中描述的基本过程具有普遍意义。

随着科学技术的发展, 工作电压也在不断的提高, 空气放电的距离也加大了, 汤逊理论的适用性就显得有些局限了。所以, 从实际出发, 科学家又对气体放电的情况做了进一步的研究, 因此, 就产生了流柱理论。

3. 流柱理论

前面对汤逊理论作了较为细致的叙述, 但汤逊理论有一些局限性, 他只能适用较小的 $(\delta \cdot d)$ 的范围, 另外, 汤逊理论中的一些假设也与实际情况有很大的差别, 有一些现象不能用汤逊理论来解释, 因此科学家们又对气体放电作了许多的研究, 发现在均匀电场的气体放电中, 不仅仅产生电子崩, 而且有与均匀电场放电不同的情况。首先, 当间隙距离大了以后, 间隙中将存在许多空间电荷, 使间隙中的电场不均匀了, 另外, 在间隙中, 强烈的碰撞电离的同时, 还存在不断的复合, 还会产生新的二次电子崩, 产生光电子, 并形成了许多离子流。间隙中这些复杂的过程, 在汤逊理论中是没有考虑到的, 由于这样的复杂过程, 因而就有了流柱理论。下面就对流柱理论作一简单介绍。

在均匀电场中, 对于 (δd) 较大的情况, 在电场作用下, 由于碰撞电离, 形成电子崩(像山崩地裂一样), 又由于空间电荷的影响, 气隙中电荷分布如图 1-5 所示。

从图 1-5 可以看出, 在电场中各部分的电荷密度是不均匀的, 而且, 正电荷与负电荷的密度都有差别, 很显然, 各部的电场强度也是不一样的。由于电子崩的崩头电荷密度很大, 电离过程非常强烈, 将发射出大量的光子。同样在强烈复合的中部, 也将产生光子, 新形成的光电子在空间电荷的作用下, 又造成了新的二次电子崩, 故产生火花四射的放电现象, 且形成正、负离子混合的流柱。当电场不是很强时, 将形成从阳极指向阴极的正流柱, 当

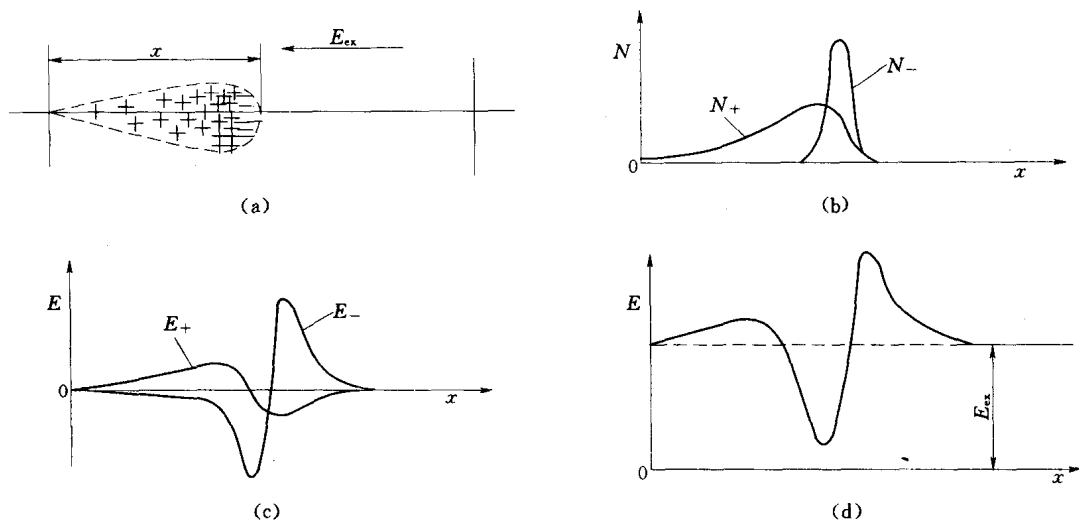


图 1-5 气隙中空间电荷分布图

(a) 电子崩示意图；(b) 电子崩中空间电荷的浓度分布；(c) 空间电荷的电场；(d) 合成电场

电场很强时，将直接从阴极指向阳极而使间隙形成正和负离子的通道，而使间隙击穿。

根据以上的分析，流柱理论的要点如下。

(1) 撞电离亦是放电的主要因素，由于碰撞电离形成了电子崩。

(2) 空间电荷的形成，使气隙间的电场畸变。空间电荷形成的电子崩头，由于强烈的电离与复合过程，产生大量的光子，光子又去碰撞形成了二次电子崩。

(3) 二次电子崩产生大量的正、负离子，在电场作用下而形成流柱，当流柱从一个电极与另一个电极连通时，气隙就击穿了。

(4) 流柱理论适用于大气条件下，范围较大的均匀电场，且与电极材料无关。

流柱理论虽然还不很完善，有时还不能精确计算间隙的放电电压，工程上关于绝缘结构的设计常用实验数据来作为设计依据，但对于 (δd) 较大间隙的放电理论的解释是很重要的。

4. 均匀电场与稍不均匀电场的击穿电压

前面对气体放电的理论作了一些介绍，到底气体的放电电压如何计算？根据科学家大量的试验研究，对于均匀电场，因为均匀电场的特点就是：电场中各处的电场强度都是相等的，所以只要知道了电极间的距离就可以计算出间隙的击穿电压了。

如：两平板形电极，可以根据两电极间的间隙距离来计算，一般说来，空气的击穿电场强度约为 30kV/cm ，若知道了两电极间的距离，很显然，击穿电压就可以算出来了。另外也可以用以下的公式进行计算：

$$U_i = 24.4(\delta d + 6.53 \sqrt{\delta d}) \quad (\text{kV})$$

式中： U_i 为击穿电压； δ 为气体相对密度； d 为间隙距离。

由于在日常的情况下，均匀电场的情况比较少，大部分都是稍不均匀电场，如：球—球间隙、球—板间隙、同轴圆柱间隙等，由于这些间隙的电场比均匀电场的均匀性差，所

以它们的击穿电场强度要小一些，略小于 30kV/cm ，但也可以用 30kV/cm 进行估算，很显然是有一些误差的。

根据稍不均匀电场的特点，一是容易实现；二是比较均匀的电场，人们可以用它放电电压的试验数据来测量各种电压，如：用球—球电极的放电电压作为测量电压的标准，这已经是我国和国际上公认的标准，球—球放电电压的大小可从附表 1、附表 2 中查到。

只是该表中的数值是在标准状态下的数值，即：大气压力为 101324.7Pa (760mmHg , 1013mbar)，环境温度为 20°C 时的值，当环境条件不在标准状态时，应该进行校正，校正的方法为：

$$U_j = \delta U_0$$

式中： U_j 为试验条件下间隙击穿电压； U_0 为标准状态下的击穿电压； δ 为气体的相对密度。

气体的相对密度在前面已经作了介绍，此处就不再介绍了。

第二节 不均匀电场中的放电

前面叙述了均匀电场放电的情况，所谓均匀电场就是电场内各处的电场强度均相等。顾名思义，不均匀电场就是电场内各处的电场强度不相等，如：棒—棒间隙、棒—板间隙等，如图 1-6 所示。

从图 1-6 中的棒—板间隙可以看出，在电场作用下，电力线的排列是自棒到板的，在棒的头部，电力线很集中，而到板上的电力线却很少，说明了电场是很不均匀的，每一点的电场强度是不一样的。

由于不均匀电场的均匀性，对于空气间隙来说，其放电的情况与均匀电场的放电完全不一样，下面将介绍不均匀电场放电的情况。

1. 均匀电场放电的几种形式

由于不均匀电场中各点的电场强度基本都不相等，所以它的放电与均匀电场相比，有着它的独特性。

在均匀电场中，各点的电场强度都相等，当电场强度达到空气的击穿强度时，空气间隙就击穿了。而不均匀电场中各点的电场强度是不一样的，当外施电压加到一定时，在电力线集中处，电场强度早已达到空气的击穿强度，所以，该处的空气就要电离；但此时，间隙其他地方并未达到空气的击穿场强，当外施电压继续上升时，空气的电离将随棒电极头部向前继续延伸，形成像刷状似的放电；若继续升高电压，空气间隙就要击穿了。所谓击穿，就是，空气间隙形成了电弧，间隙丧失了绝缘。不均匀电场的放电大约有以下几个阶段。

(1) 电晕放电。在极不均匀电场中，当施加的电压低于间隙击穿电压时，曲率半径小的电极附近，如棒—板间隙中的棒的头部，将会出现薄薄的蓝紫色的发光区，像“月晕”一样，人们称为电晕放电，电晕放电时，可听到丝丝的声音，嗅到臭氧的气味。

电晕放电时，电路中的电流有明显的增加，但电流不取决于电路中的阻抗，而由电极

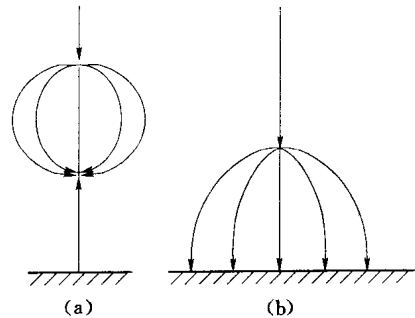


图 1-6 不均匀电场的几种典型的形式
(a) 棒—棒间隙；(b) 棒—板间隙

间气体的导电性能、外加电压、极性、电极形状、极间距离和大气条件等来决定。产生电晕的主要原因是：曲率半径小的电极附近的电场强度超过了气体的耐电强度的缘故，因而产生了电极间局部的电晕放电。

(2) 刷状放电。产生电晕放电以后，继续升高电极间的电压，紧贴曲率半径小的地方，放电将会更加强烈，将形成流柱形的放电，然后继续向前发展，电晕层逐渐扩大，滋滋的声音也增大，将出现刷子一样的放电火花，滋滋声中不断伴随有撕裂声，此种形式的放电称为刷状放电。但这种形式的放电并未形成间隙的击穿。

(3) 电弧放电。刷状放电以后，间隙放电更加强烈，若继续升高电极间的电压，间隙就要击穿了。若电源容量足够的话，间隙将被击穿，形成电弧。此时间隙完全丧失了绝缘性能，形成了短路的通道，并产生很大电流的电弧放电，温度可达几千度，并有强光辐射。这种放电现象在日常生活中经常可以见到，但在电力系统中，一般是不希望见到的。

由于不均匀电场的独特性，所以在间隙上施加不很高的电压时，电场强度大的地方将会很早电离，继续提高电压，间隙就很快击穿了，也就是说，间隙击穿的平均击穿电场强度比较低；对于均匀和稍不均匀电场来说，由于该电场各个部位的电场强度基本相等，所以要击穿该间隙所需加的电压就要高许多。从大量的试验结果表明，对均匀电场和稍不均匀电场来说，其平均击穿电场强度在 30kV/cm 左右；而不均匀电场（如棒—板间隙），其平均击穿电场强度约为 $10\sim 20\text{kV/cm}$ （间隙距离较小时），当间隙距离较大时，平均电场强度约为 $5\sim 10\text{kV/cm}$ ，很显然，差别是很大的，所以在考虑间隙的击穿电压时，一定要注意该间隙电场的均匀程度。假若要提高不均匀电场的气体间隙的击穿电压，可考虑改进间隙电场的均匀程度，这是提高击穿电压的一个很重要的理念。

对于不均匀电场，施加不同的电压时，其击穿电压是不一样的，一般说来，在电力系统中，大约有以下几种电压：一为直流电压；二为交流电压（大部分是工频 50Hz 的电压）；三是冲击电压（有雷电冲击和操作冲击之分）。根据不同性质的电压，其击穿特性是有差别的，下面将对不同情况的击穿特性作一简单的介绍。

2. 直流电压下的放电与极性效应

在不均匀电场中，由于电场的不均匀，如棒—板间隙，当棒电极为正或负时，其起始电晕电压、间隙的击穿电压都是不一样的。大量的试验表明，在数值上有很大的差别。分析其原因，主要是空间电荷的影响。下面分别介绍电晕起始电压、间隙击穿电压的情况。

(1) 电晕起始电压。在极不均匀电场棒—板间隙的情况下，当棒为负电极时（负棒对正板），比棒为正电极时（正棒对负板）的起始电晕电压低。这是因为在棒电极附近堆集了许多正离子的缘故，使负棒电极附近的电场强度加强了，所以其起始电晕电压在不很高时就开始产生电晕了。当棒电极为正电极时，由于正空间电荷不但不能加强棒电极的电场，反而使棒电极的电场强度更加减弱了。所以，若要使棒电极附近产生电晕放电，必须提高外加电压方能产生。其起始电晕放电的情况如图 1-7 所示。

从图 1-7 可以看出，由于间隙中空间电荷的影响，正棒—负板的起始电晕电压与负棒—正板的起始电晕电压是有一些差别的，正棒—负板的起始电晕电压低，负棒—正板的起始电晕电压高。

(2) 不均匀电场的击穿。以棒—板间隙为例，在直流电压作用下，电压的极性对间隙

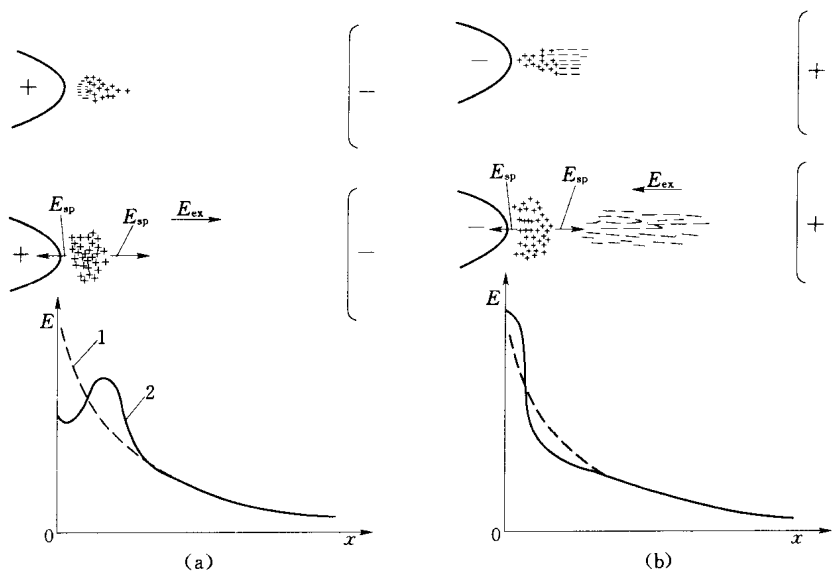


图 1-7 棒板间隙起始放电示意图
(a) “+”棒“-”板；(b) “-”棒“+”板；
 E_{ex} —外电场； E_{sp} —外电场

的放电电压影响很大，也就是说，从大量试验表明，棒—板间隙的击穿，极性效应是很明显的，所谓极性效应就是：在不同的极性作用下，间隙的击穿电压是不一样的，如图 1-8 所示。

图 1-8 绘制了各种电极形式下的击穿电压与极间距离的关系曲线，其中有板—板间隙、棒—板间隙（包括正棒负板和负棒正板）、棒—棒间隙等。当棒电极为正电极时（正棒对负板），间隙的击穿电压比棒电极为负电极时（负棒对正板）低许多。其原因也是空间电荷的影响。下面作一简单的叙述。

1) 正棒对负板。当电极为正棒对负板时，在直流电压的作用下，由于空间电荷的影响，空间电荷形成的电场与加在电极上的外电场的方向正好一样，加强了外电场，所以，当外加电压不是很高时，间隙就击穿了。根据大量的实验表明，正棒—负板的情况下，其平均击穿电场强度相对比较小，当间隙距离较小时（小于 10cm），平均击穿场强约 7.5kV/cm；当间隙距离较大时（50~300cm），平均击穿场强约 4.5kV/cm。

2) 负棒对正板。当电极为正棒对负板时，也是在直流电压的作用下，由于空间电荷的影响，空间电荷形成的电场与加在电极上的外电场的方向正好相反，抵消了一部分电场，所以，只有加高外加电压，方能使间隙击穿。同样根据大量实验数据表明，负棒—正板的平均击穿场强比正棒—负板的高，当间隙距离较小时

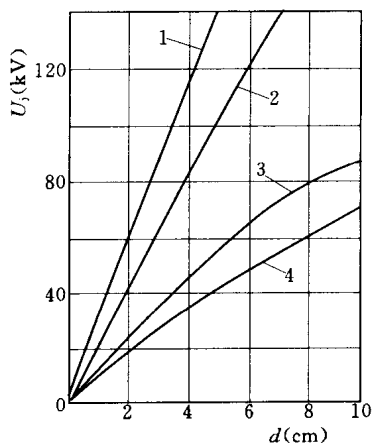


图 1-8 直流电压下间隙放电电压与间隙距离的关系曲线
1—板—板间隙；2—负棒对正板间隙；
3—棒—棒间隙；4—正棒对负板间隙

(小于 10cm), 其平均击穿场强约 20kV/cm, 当间隙距离较大时, 其平均击穿电场强度约 10kV/cm。

(3) 提高不均匀电场间隙的击穿电压的措施。从前面的分析可看出, 不均匀电场的平均击穿电场强度是很低的, 这样不能充分的利用空间, 为此, 人们研究了很多提高不均匀电场击穿电压的方法。

1) 最简易而有效的方法。在间隙中加一屏障, 所谓屏障, 就是在间隙的最佳位置上放置一层绝缘纸, 就能提高间隙的击穿电压。具体的放置方法如图 1-9 所示。

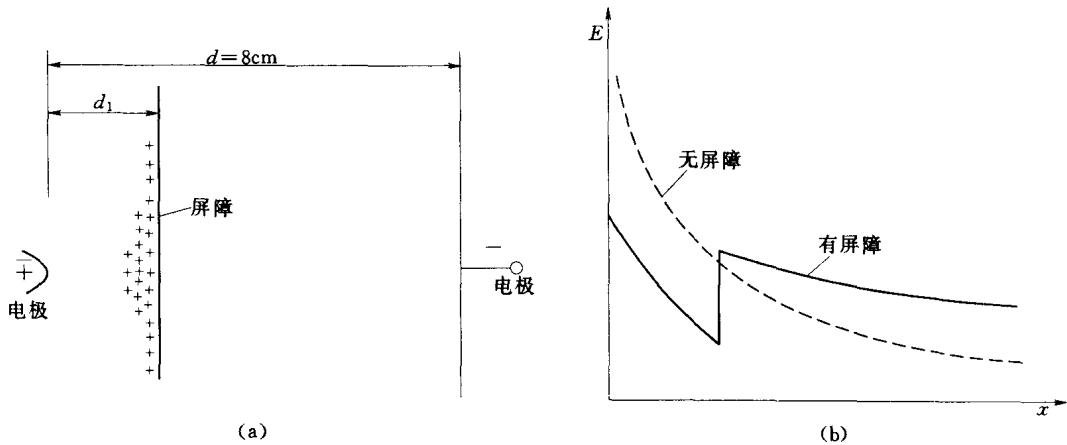


图 1-9 屏障的布置图

在不均匀电场中加上屏障以后, 原来的空间电荷形成的电场有了明显的变化。以正棒负板间隙为例, 在没有加屏障时, 空间电荷形成的电场与外加电场的方向是一致的, 也就是说, 加强了外电场, 所以, 间隙的击穿电压较低; 当加上屏障以后, 在棒端的空间电荷基本上都聚集在屏障的绝缘纸上, 这样, 在绝缘纸与另一板电极构成一较均匀的电场, 由于均匀电场的平均击穿电场强度比不均匀电场的高得多, 所以, 击穿电压就提高了。

到底加了屏障以后击穿电压提高了多少? 这可以从图 1-10 中看得很清楚。

当屏障的位置放置在靠棒电极附近, 离棒电极的距离在整个间隙距离的 10% 左右时, 间隙的击穿电压最高, 但当屏障离棒电极的距离大于此距离, 或甚至比此距离大得更多时, 击穿电压不但不能提高击穿电压, 还会降低击穿电压。

采用屏障提高击穿电压的方法, 不仅仅适用于直流电压, 对交流电压和冲击电压也有提高击穿电压的作用, 具体情况可以参看图 1-11 和图 1-12 所示。

2) 改进电极的形状以提高间隙的击穿电压。由于不均匀电场的均匀性, 空间电荷使间隙击穿电压明显降低, 即平均击穿电场强度低, 为了提高间隙的击穿电压, 可以改进电极的形状, 也就是说, 使原来不均匀的电场变成为比较均匀的电场。从前面介绍的情况可以知道, 均匀电场的平均击穿电场强度比不均匀电场的平均击穿电场强度大好几倍 (均匀电场的平均击穿电场强度约 30kV/cm, 不均匀电场的平均击穿电场强度约 5~10kV/cm), 假若能改进电极的形状, 使电场尽量均匀一些, 提高间隙的击穿电压是不成问题的。这可以从很多的情况看到, 当电压较高时, 一般高压设备带电体的顶端, 都要做一个曲率半径