

长间隙放电

马乃祥 编著



中国电力出版社

长 间 隙 放 电

马 乃 祥 编 著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书介绍长空气间隙(简称长间隙)的放电过程及击穿特性的预测。主要包括:放电的基本物理过程和基本理论,研究长间隙放电的测试技术,预测击穿电压的经验公式和数值计算方法,长间隙的沿面闪络,长间隙击穿特性的模拟,污层与气象条件对击穿的影响及有关工程领域中的防雷措施。

本书系高等学校“高电压技术及设备”专业学生的选修课教材及研究生的教学参考书。也可作其他专业学生选修“气体放电”和“高电压工程”的教学参考书,还可供电力系统、高压设备制造、技术物理、高层建筑及航天工程等领域从事高电压工作的技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

长间隙放电/马乃祥编著.-北京:中国电力出版社, 1998

ISBN 7-80125-566-6

I. 长… II. 马… III. 长空气间隙-放电 IV. TM86

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第27382号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

三河市实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

1998年3月第一版 1998年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 32开本 8.5印张 186千字

印数0001-3090册 定价10.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前 言

本书是根据 1987 年全国高等院校“高电压技术及设备”专业教材编审会议通过的大纲编写的。作为高等院校专业选修课教材，也可供本专业研究生及有关电力、电气和防雷工程技术人员参考。

随着我国超高压、特高压输电系统的发展、高层建筑和空中飞行器雷击事故的增多、各种高电压物理装置的研制，长空气间隙的放电问题越来越受到人们的重视，迫切希望能预测长空气间隙的放电电压值。在工程实际中，要防止击穿的发生应了解击穿过程各阶段的放电特性，针对可能出现的破坏，提前采取预防措施。近二十年内已有大量实测数据及由此提出的经验公式，同时，在放电物理过程方面也出现了大量文献。然而，把两者结合起来，从统一的物理过程来阐述各种经验公式的书籍不多。编写本书的目的即希望在这一结合点上作出努力，以放电基本理论为基础，参考经验公式，预测各种工程长间隙的放电电压值。

本书是在总结作者多年来在西安交通大学讲授“高压绝缘”、“高电压气体放电理论及其应用”等课程和从事长空气间隙模拟等科研工作的基础上编写的。

本书由三大部分组成，分别叙述长空气间隙放电的物理过程及实验方法，预测放电电压的各种方法和工程实用中的预防措施。全部内容共分十章。第一章将带电粒子的产生与

EAD 12/67

消失结合起来叙述，把放电发展看作是两种作用的动态平衡过程；第二章概述汤生理论、流注理论和先导形成的机制，重点说明流注的形成条件和先导通道的动态特性及末跃对击穿的影响；第三章扼要介绍闪电光谱学，目的是了解放电通道中空气分子的作用机制，通过光现象把实验室长间隙放电的研究与闪电联系起来；第四章从实用角度综述长间隙的放电现象；第五章介绍由实验总结出的几种预测击穿特性的方法；第六章介绍长间隙击穿过程的数值分析方法；第七章叙述长间隙的沿面击穿；第八章介绍长间隙击穿模拟的主要成果；第九章叙述大气条件对长间隙耐电强度的影响；第十章介绍长间隙击穿的预防。

本书由电力工业部电力科学研究院王遵高级工程师（教授级）审阅，在此表示衷心的感谢。

限于本人水平，恳切希望读者对书中的错误和不当之处给予批评指正。

作 者

1990年6月

责任编辑：王 晶

封面设计：赵景伟

封面照片：

云南省电力试验研究所
高海拔户外高电压试验场

目 录

前 言

第一章 气体放电基本过程概述	1
第一节 气体分子的激发和电离	1
第二节 复合 光辐射	8
第三节 负离子 电子附着	13
第四节 电荷的转移	18
第五节 电场中的粒子行为	20
参考文献	31
第二章 气体放电的基本理论	32
第一节 汤生理论	32
第二节 流注理论	39
第三节 先导与未跃	45
参考文献	53
第三章 研究长间隙放电的方法和测试技术	54
第一节 引言	54
第二节 闪电光谱学	55
第三节 截波录图法	64
第四节 机械摄影法	69
第五节 光电增强法	71
第六节 图像调制法	75
第七节 纹影法	80
第八节 声波法	82
第九节 结束语	83
参考文献	84

第四章 长间隙放电现象的综述	87
第一节 各种影响因素	87
第二节 正极性放电过程	91
第三节 负极性放电过程	100
第四节 实用说明	103
参考文献	106
第五章 长间隙击穿特性的预测	107
第一节 流注—先导压降叠加法	107
第二节 临界半径法	110
第三节 面积规则	115
第四节 体积—时间规律	119
参考文献	125
第六章 长间隙击穿过程的数值计算	127
第一节 流注预放电的计算模型	128
第二节 先导预放电的计算模型	140
第三节 先导—流注的计算模型	147
第四节 实用的新模型	155
第五节 沿面放电过程的计算模型	160
参考文献	166
第七章 长间隙的沿面击穿	169
第一节 两种放电结构	169
第二节 沿面放电的发展机制	171
第三节 雨中的沿面放电(湿闪)	174
第四节 染污表面的放电(污闪)	180
参考文献	189
第八章 长间隙击穿的模拟	192
第一节 雷击与长火花放电的模拟	192
第二节 长火花放电的滑闪模型	202
第三节 滑闪放电模拟雷击	210

第四节	模拟方法的比较	212
参考文献		213
第九章	大气条件对长间隙耐电强度的影响	215
第一节	相似定律的应用	215
第二节	湿度的影响	220
第三节	空气密度的影响	225
第四节	修正系数	227
参考文献		231
第十章	长间隙击穿的预防	232
第一节	雷电特性及其主要参数	232
第二节	输电线路的防雷保护	236
第三节	高层建筑的防雷保护	246
第四节	飞行器的防雷	252
参考文献		261

第一章 气体放电基本 过程概述

第一节 气体分子的激发和电离

一、粒子碰撞和平均自由行程

粒子间的碰撞是指它们在各种力场的作用下的相互作用。粒子受其他粒子的影响后，它的物理状态发生了变化，就可以认为这些粒子间发生了碰撞。也可以认为碰撞使气体放电中粒子体系的状态发生了变化。例如，原子被激发和电离；电子的捕获和复合都属于粒子碰撞。

在理想气体的简单模型中，分子被看作弹性小球。如图 1-1 所示，当一束 A 类带电粒子（半径为 r_A ）以速度 v 穿过具有 B 类分子（半径为 r_B ）的气体时，其轨迹为一不规则的折线，每发生一次碰撞就会出现一次转折，相继两次碰撞间的距离称为平均自由程 $\bar{\lambda}$ ，在大气压力和常温下，空气中的平均自由程为 10^{-5}cm 数量级。

两类质点的碰撞只有在图 1-1 所示的阴影线的遮截面 σ 中才有可能。在穿过气体 x 到 $x+dx$ 的距离内，单位时间内单位面积上受到碰撞的粒子数可表述为：

$$\frac{dn}{dt} = -N[\pi(r_A + r_B)^2]n \frac{dx}{dt} = -N[\pi(r_A + r_B)^2]nv \quad (1-1)$$

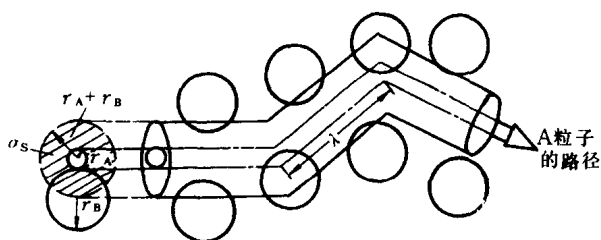


图 1-1 碰撞路径示意图

式中 n ——粒子的密度；
 N ——气体分子密度；
 r_A ——粒子的半径；
 r_B ——气体分子的半径。

积分得：

$$n = n_0 e^{-\pi N (r_A + r_B)^2 x} \quad (1-2)$$

n_0 为 $x=0$ 处的粒子密度。 $\sigma_s = \pi (r_A + r_B)^2$ 为这一过程的有效碰撞面积。气体中电子碰撞有效面积的计算值见表 1-1，表中数值是在大气压为 0.1032kPa， 0°C ， $N = 3.56 \times 10^{16}$ 个/ cm^3 的条件下计算所得的。

表 1-1 电子碰撞有效面积的计算值

气体	He	O ₂	N ₂	H ₂	H ₂ O
σ_s ($\times 10^{-16} \text{cm}^2$)	2.83	6.9	7.8	3.7	5.8

这里，有效碰撞面积只是一个分子的靶面积，它与分子的密度无关，即与气压、温度等都没有关系。有时为使截面与状态条件联系起来，可取气体的总的碰撞面积 $N\sigma_s$ 。总截面也表示粒子在单位路径中发生碰撞的次数（H₂ 和 N₂ 的总截面参见图 1-3），因而

$$\lambda = \frac{1}{\pi N(r_A + r_B)^2} = \frac{1}{N\sigma_s} \quad (1-3)$$

式中 σ_s ——微观定量，一个分子的特征；

λ ——宏观定量，与状态条件有关。

所以粒子的自由行程的分配情况为：

$$n = n_0 e^{-(\lambda/\bar{\lambda})} \quad (1-4)$$

如图 1-2，呈一指数式下降的曲线。由图可见，自由行程大于一个平均自由行程的粒子数只占总数的 37%。

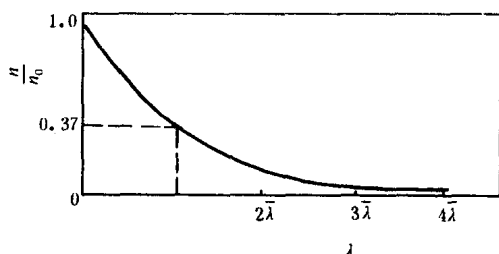


图 1-2 自由行程的分配情况

不同的过程有不同的碰撞截面，如：弹性碰撞截面、激发碰撞截面和电离碰撞截面等。

也可以用碰撞几率来描述各种碰撞过程。发生某一种碰撞的次数在总的碰撞次数中所占比例，即发生该种碰撞的几率，如电离几率：

$$P_i = \frac{\sigma_i N}{\sigma N} = \frac{\sigma_i}{\sigma}$$

发生碰撞的总的几率为各种碰撞几率之和。

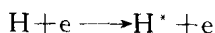
二、激发和电离

处于正常状态并隔绝各种外来电离因素作用的气体是完全不导电的。由于来自空中的紫外线、宇宙射线及来自地球

内部辐射线的作用，通常气体中总存在少量带电粒子。例如大气中就总是存在约 1000 对/cm^3 的正、负离子。在电场的作用下，这些带电粒子做定向运动，在其行程中，不断与原子、分子等发生碰撞，产生一系列离子、电子或受激的原子、分子，决定了气体中的放电现象。下面概述其中一些主要过程。

1. 激发

原子在外界因素的作用下，其电子可以跃迁到能量较高的状态，此过程称为激发，该原子称为激发态原子。如：



H^* 表示激发态氢原子。

图 1-3 分别示出了 H_2 和 N_2 的激发截面数值，它与电子

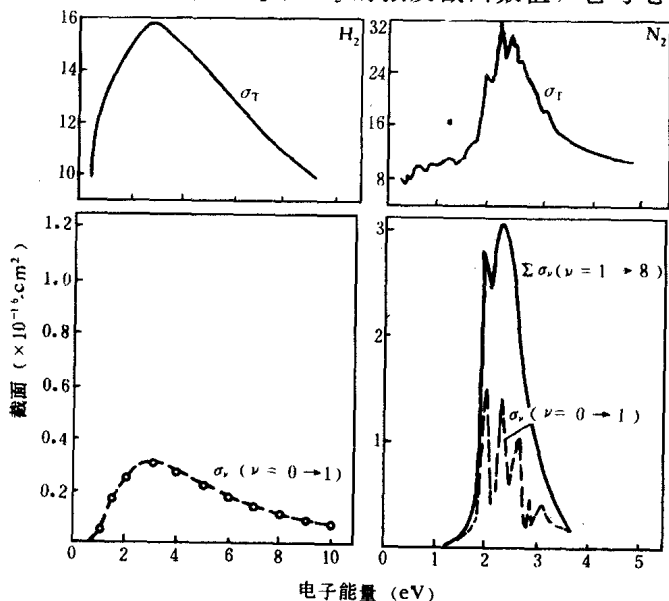


图 1-3 H_2 和 N_2 的激发截面

σ_T —总截面； σ_v —对应 $0 \rightarrow \nu$ 的激发截面

能量有关。

激发过程所需的能量称为激发能 W_e ，为简便起见，常以激发电位 U_e 来反映激发能，其数值等于以电子伏表示的激发能：

$$U_e = W_e/e \quad (\text{伏})$$

式中 W_e ——激发能， $\text{W} \cdot \text{s}$ ；

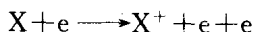
e ——电子电荷， C 。

高于正常状态的能级均称为激发能级，最低的激发电位称为第一激发电位（部分气体的第一激发电位参见第二节）。

由能量守恒定律及量子理论可知，原子被激发到某一能级的几率是电子能量的函数（参见图 1-3）。激发截面的典型值为 10^{-17}cm^2 。

2. 电离

电离，即从中性原子或分子中释放出自由电子的现象，是具有一定能量的电子碰撞的结果：



X^+ 表示带正电性的 X 原子。

碰撞导致了三体系统，放出的余能被第三者接受。此过程的最小能量由电离电位给定。图 1-4 绘出了气体放电工程中常用的 N_2 、 O_2 、 H_2 在电子能量为 $10 \sim 10^3 \text{eV}$ 时的电离截面曲线。由图可见，电离开始时，曲线迅速上升，当电子能量在 $80 \sim 200 \text{eV}$ 之间时，电离截面有极大值，当电子能量超过该区域后，电离截面很快下降。电离截面的典型值大于 10^{-16}cm^2 ，即大于激发截面，且其起始值也高。

处于激发态的原子的有效电离截面要比中性原子的大，如图 1-5 所示，激发态 H^* 原子的有效电离截面要比中性氢原子的大很多。

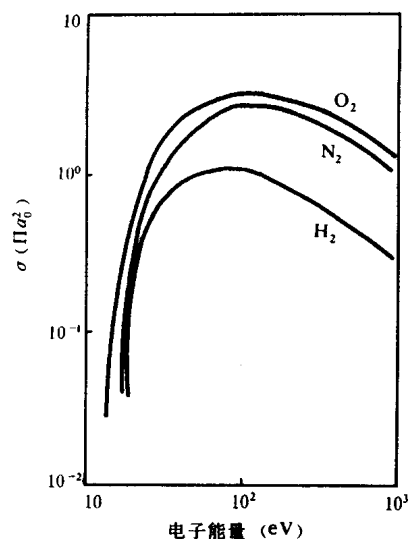


图 1-4 N_2 、 O_2 和 H_2 的电离截面曲线
 $(\pi a_0^2 = 8.8 \times 10^{-17} \text{cm}^2)$

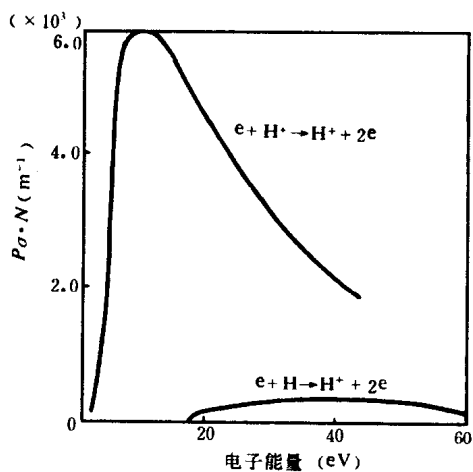


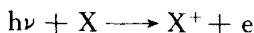
图 1-5 氢原子的总电离截面

3. 光致激发和电离

光电离在气体放电中有着很重要的作用，它是气体击穿过程中的一个基本环节。当原子中的电子从高能级返迁到低能级时，多余的能量以光子的形式释放出来，相反的过程是，原子也可以吸收光子的能量来提高它的位能。和电子碰撞一样，若光子的能量 $h\nu$ 大于或等于原子或分子的激发能或电离能，即

$$h\nu \geq W$$

则可使原子或分子激发或电离：



与前面讨论的过程所不同的是，在碰撞后，光子把能量传给原子或分子，而自身不再存在了。这种由于光辐射引起原子或分子激发和电离的现象称为光致激发和光致电离。

光致激发或光致电离的实质是原子或分子对光子的吸收。在气体中，这一吸收过程可以有以下几种情况：

- (1) 原子吸收光子后，被激发到某一较高能态；
- (2) 原子吸收光子后，被激发到离连续能级附近的一些较高的能级；
- (3) 原子吸收光子后，直接被激发到电离能级；
- (4) 原子吸收一个光子后，被激发到某激发态后，再继续吸收一个光子，使原子进一步激发或电离。

因为 $\nu\lambda=c$ ，故：

$$\lambda = hc/W$$

式中 W ——为相应原子的势能，eV；

h ——勃朗克常数， $h=4.15 \times 10^{-15} \text{eV} \cdot \text{s}$ 。

所以，对于激发能、电离能越高的原子，要求能产生光致激

发或光致电离的光波的波长越短（部分气体的光波波长值参见第二节表 1-2）。

光致激发或光致电离的截面可以从测量光的吸收系数来决定。图 1-6 为 H_2 和 N_2 的光电离截面曲线。

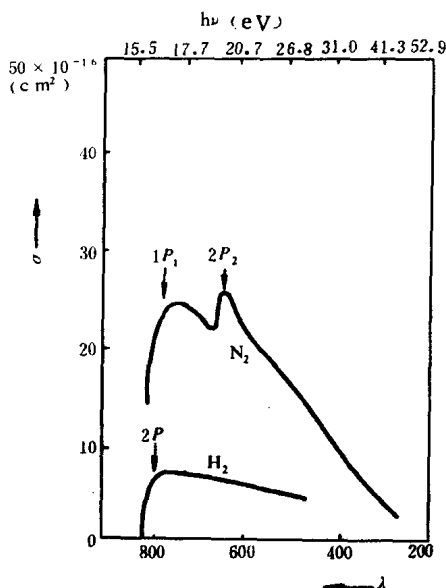


图 1-6 N_2 和 H_2 的光电离截面

第二节 复合 光辐射

气体放电过程中存在带电粒子的产生过程，也存在带电粒子的消失过程。复合即为带电粒子消失的一种方式。

复合即消电离，是与电离直接相反的过程，是两种异号带电粒子相互作用而形成中性粒子的过程。由于带电粒子性