



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

# 高电压工程

厉 伟 滕 云 编著  
庚振新 林 莘



科学出版社

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

# 高电压工程

厉伟 滕云 编著  
庚振新 林莘

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书是一本针对电气工程及其自动化专业,非高电压与绝缘技术专业方向的少学时“高电压工程”课程而编写的教材。在编写过程中,充分考虑了各高等院校的教学计划和专业特色以及“高电压工程”课程理论性、实践性较强的特点,既突出了课程体系和理论体系的系统性与完整性,又注重了课程的工程性和实用性。

本书包括气体、液体、固体电介质的击穿过程和理论、绝缘特性及应用,大气状态对外绝缘的影响;高压试验电压的产生与测量,绝缘试验;过电压与防护,绝缘配合等内容。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业的本科生教材,也可供电力、电工领域工程技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

高电压工程/厉伟等编著. —北京:科学出版社, 2011. 7

(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)

ISBN 978-7-03-032011-7

I. ①高… II. ①厉… III. ①高电压-高等学校-教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 161034 号

责任编辑:余江 张丽花 / 责任校对:包志虹

责任印制:张克忠 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京市安泰印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2011年7月第一版 开本:720×1000 1/16

2011年7月第一次印刷 印张:13 3/4

印数:1—3 500 字数:292 000

定价:29.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

## 前 言

高电压工程是电气工程及其自动化专业的一门专业基础课，其内容涉及数学、物理、化学、材料、电工等基础学科。从事电力系统与电气设备设计、安装、调试、试验和运行的工程技术人员，需要具备电介质的电气绝缘特性、电力系统过电压及其防护、绝缘试验等诸多高电压工程领域的技术知识。本书是一本针对电气工程及其自动化本科专业，非高电压与绝缘技术专业方向的少学时“高电压工程”课程而编写的教材，也可供电力、电工领域的工程技术人员参考。

全书共 10 章，主要包括气体、液体、固体电介质的击穿过程和理论、绝缘特性及应用；高压试验电压的产生与测量，绝缘试验；电力系统过电压及其防护，绝缘配合等内容。在编写过程中，力求内容全面，涵盖高电压工程中的所有问题；同时考虑到少学时的教学特点，对传统的“高电压工程”进行了一定的凝练和删减，深入浅出，既注重基本概念和基本原理，也注重课程的工程性和实用性，注重与生产实际相结合，帮助学生开拓视野。

本书由沈阳工业大学四位老师共同编写。其中，厉伟编写第 1~4 章，滕云编写第 7~10 章，庚振新编写第 6 章，并为本书做了很多图表方面的工作，林莘编写第 5 章。

本书在编写过程中参考和借鉴了一些已经出版的相关书籍的内容，在此对这些书的作者表示感谢！

由于编者水平有限，书中难免存在不妥之处，恳请读者批评指正。

编 者

2011 年 5 月

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 高电压输电的必要性	1
1.2 输电电压发展概况	2
1.3 高电压工程的主要研究内容	2
第 2 章 气体放电过程分析及空气间隙绝缘强度	4
2.1 气体放电及主要放电形式	4
2.2 带电质点的产生	5
2.3 带电质点的消失	9
2.4 均匀电场中气体击穿过程	10
2.5 不均匀电场中气体击穿过程	21
2.6 持续作用电压下空气间隙的绝缘强度	28
2.7 冲击电压下气体的击穿	34
2.8 提高空气击穿电压的主要措施	41
2.9 六氟化硫气体绝缘	45
第 3 章 沿面放电及气体状态对外绝缘的影响	51
3.1 高压绝缘子	51
3.2 气体中沿固体介质表面放电	53
3.3 大气状态对外绝缘的影响	67
3.4 海拔高度对外绝缘的影响	70
第 4 章 液体、固体电介质的电气性能	72
4.1 电介质的极化、电导与损耗	72
4.2 液体电介质的击穿	81
4.3 固体电介质的击穿	86
第 5 章 试验电压的产生	98
5.1 交流试验电压的产生	98
5.2 直流试验电压的产生	106
5.3 冲击试验电压的产生	110
第 6 章 试验电压的测量	114
6.1 测量球隙	114
6.2 高压静电电压表	118

6.3	交流峰值电压表 .....	119
6.4	高电压示波器 .....	120
6.5	高压分压器 .....	121
<b>第7章</b>	<b>绝缘试验</b> .....	<b>132</b>
7.1	绝缘试验概述 .....	132
7.2	绝缘电阻和泄漏电流的测量 .....	133
7.3	介质损耗角正切值的测量 .....	137
7.4	局部放电的测量 .....	140
7.5	绝缘油的气相色谱分析 .....	142
7.6	绝缘的在线监测 .....	145
7.7	耐压试验 .....	147
7.8	高压断路器绝缘试验 .....	150
7.9	绝缘试验方法总结 .....	151
<b>第8章</b>	<b>输电线路和绕组中的波过程</b> .....	<b>153</b>
8.1	均匀无损单导线中的波过程 .....	153
8.2	波的折射、反射 .....	156
8.3	行波通过串联电感和并联电容时的波过程 .....	162
8.4	冲击电晕对线路上波过程的影响 .....	166
8.5	变压器和电机绕组中的波过程 .....	167
8.6	封闭式组合电器中的过渡过程 .....	174
<b>第9章</b>	<b>雷电过电压及其防护</b> .....	<b>180</b>
9.1	雷电放电的发展过程 .....	180
9.2	雷电的电气参数和雷电活动强度 .....	181
9.3	直击雷过电压 .....	182
9.4	感应雷过电压 .....	184
9.5	雷击塔顶过电压 .....	185
9.6	防雷保护基本措施 .....	186
<b>第10章</b>	<b>操作过电压及其防护</b> .....	<b>193</b>
10.1	电力系统操作过电压的一般特性 .....	193
10.2	电容效应引起的过电压 .....	195
10.3	铁磁谐振引起的过电压 .....	197
10.4	合闸引起的过电压 .....	200
10.5	切断引起的过电压 .....	203
10.6	操作过电压的限制措施 .....	205
10.7	电力系统的绝缘配合 .....	207
<b>参考文献</b>	.....	<b>213</b>

# 第 1 章 绪 论

高电压工程是 20 世纪初为了解决高电压输电中的绝缘问题而发展起来的。现阶段，伴随着电力系统输电电压等级的提高，其技术内涵已经得到了很大的发展。

## 1.1 高电压输电的必要性

我国的输电线路按电压高低划分成不同的等级。对于交流系统：高压 (HV)，1~220kV；超高压 (EHV)，330~750kV；特高压 (UHV)，1000kV 及以上。对于直流系统±800kV 及以上为特高压。从经济技术等方面考虑，高压输电具有优势。

### 1.1.1 满足远距离输电的需要

出于保护环境、防止污染等考虑，一些大型发电厂需要远离重负荷中心区建设；另一方面，受地理位置的限制，大容量水力、火力发电厂多建设在远离重负荷中心的水利、煤炭资源比较集中的地区。这样，输电距离比较远。例如，我国可用于发电的水利资源主要集中在西南（川东、云西、藏西）地区，煤炭资源主要集中在三西（山西、陕西、蒙西）地区。这些地区经济欠发达，需要输出能量，最经济、最合理的方式，对于火力发电将是建设坑口电厂，而水力发电只能就地建电厂。这样，就需要采用超高压、特高压远距离大容量输电。国外（如加拿大、瑞典、前苏联等）都是由于大容量水力发电厂的开发与远距离输送电力才出现 380kV、500kV、750kV 和 1000kV 输电线路的，我国也要走这条路，西电东送，北电南用。

理论和实践都证明，输电线路的输电能力与输电电压的平方成正比。因此，为了经济、合理地输送电力，应该采用高压输电。

### 1.1.2 满足大容量输电的需要

如果传输大容量的电力，即使输电距离不是太远，也应该采用高压输电。例如，正在广泛开发和应用的核电，虽然输电距离不是很远，但是容量特别大，若采用低的输电电压，不仅能量损耗增加，还影响电网质量。

### 1.1.3 满足联网输电的需要

对于容量不是太大、输电距离不是太远的系统，本身不一定需要采用高压输电。但是在电力系统充分发展的今天，各发电厂需要联网运行以满足供电的可靠性和电力的相互补充。因此，为了满足联网运行的需要，应采用高压输电。

#### 1.1.4 满足节省土地的需要

输送同样容量的电力，总的输电线路所占用的土地宽度将随着电压等级的提高而显著减少，即高压输电节约输电走廊宽度。

例如输送 7500MW 的电能，采用 500kV 的超高压，需要 7 条线路，走廊宽度 285m；若采用 1200kV 的特高压，只需要 1 条线路，走廊宽度 76m，可节省大量土地资源。

### 1.2 输电电压发展概况

随着电力负荷的不断快速增长，出现了对大容量和远距离输电的需求，从 20 世纪六七十年代开始，苏联、美国、日本、意大利等国开始了特高压输电技术的研究工作。其中，苏联是国际上最早开展特高压输电技术研究的国家之一。

20 世纪 80 年代开始，随着大型能源基地的建设，苏联着手建设联接西伯利亚、哈萨克斯坦和乌拉尔联合电网的 1150kV 输电工程，已经建成的线路长度为 2344km，包括库斯坦奈、科克契塔夫、埃基巴斯图兹、巴尔瑙尔等特高压变电站。1985 年，世界上第一条 1150kV 特高压输电线路埃基巴斯图兹—科克契塔夫段在额定工作电压下带负荷成功运行。

新中国成立后，我国电力工业发展很快。交流系统，1956 年在东北建成了 220kV 系统；1972 年在西北建成了 330kV 系统；1981 年在华中建成了 500kV 系统（河南平顶山到湖北武汉）；2005 年，750kV 从青海官亭到甘肃兰州东的系统投入运行；2009 年，1000kV 的晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程投入运行。直流系统，1989 年，±500kV 的葛洲坝—上海直流输电系统成功运行；2010 年，±800kV 的向家坝—上海特高压直流输电示范工程投入运行。这些系统的投入运行标志着我国全面进入超、特高压，交直流混合电网时代。

### 1.3 高电压工程的主要研究内容

高电压工程的研究内容，用一句话概括就是“努力保证电力系统中的输电线路和各种高压电气设备的绝缘在现场安全可靠地运行”。为了实现这个目标，主要包括 3 个方面的研究内容。

#### 1.3.1 电介质的击穿理论及绝缘结构设计

这部分内容主要研究各种电介质，包括气体、液体和固体在高电压作用下是如何从绝缘状态变成导电状态的，即电介质击穿过程、击穿机理、实验数据、影响因素等，目的是在设计绝缘结构时，能正确地选择电介质，设计出既经济合理又安全可靠



的输电线路和高压电气设备的绝缘结构，满足实际运行和试验标准要求。

### 1.3.2 高电压试验

由于现有绝缘设计理论的局限和电介质绝缘能力的分散性，因此，开发设计的绝缘结构能否满足设计要求、安全可靠地运行需要用试验进行检验。现阶段，高电压试验是确定绝缘结构绝缘能力的唯一手段。在这部分内容中，主要研究试验方法、测量手段、控制策略和保护措施，以确保高电压试验安全、有效。

### 1.3.3 电力系统过电压及防护

输电线路和电气设备的绝缘结构不仅要承受工作电压的长期作用，有时还要承受电力系统中可能出现的冲击电压（过电压）的短时作用。无论何种过电压，它们的共同特点是：电压作用时间短，电压幅值高，电压变化率快。在这部分内容中，主要研究过电压产生、发展、消失的整个过程对绝缘的破坏作用和相应的防护手段，以及电压、绝缘、保护三者之间的绝缘配合问题。

此外，高电压工程还应用在保护环境、治理污染、果蔬保鲜、爆炸、熔炼等领域。

## 第 2 章 气体放电过程分析及空气间隙绝缘强度

气体特别是空气作为绝缘介质应用广泛。但是，当做用在气体上的电压高到一定程度时，气体将失去绝缘能力而被击穿。为了合理地设计气体绝缘结构，确保其安全可靠地运行，需要了解气体放电过程及绝缘能力。本章将着重介绍气体放电理论，分析不同电场分布时气体被击穿的物理过程，分析冲击电压作用下气体的击穿。然而，由于气体放电理论至今还不是很完善，实际应用时还无法对击穿电压进行准确的理论计算，所以工程设计问题常常借助于各种实验规律和结果来分析解决或直接由试验决定。因此，本章还将介绍各种典型电场分布的空气间隙击穿电压实验数据。

### 2.1 气体放电及主要放电形式

#### 2.1.1 气体放电

气体中流通电流的各种形式统称为气体放电。气体放电时发光、发声。应该指出的是，由于来自宇宙中的各种射线的辐射作用，空气中总会存在少量的带电质点。这样，在电场作用下，这些带电质点将沿电场方向运动形成很小的电导电流（该电流密度在  $10^{-19}$  A/cm<sup>2</sup> 数量级），这个电流不是放电电流。

当做用在气体上的电压达一定程度时，气体中流过的电流突然剧增，这时气体失去绝缘能力，这个过程称为击穿，击穿是气体放电的一种特殊形式。气体发生击穿的最低临界电压称为击穿电压，用  $U_b$  表示；击穿电压与间隙距离之比称为平均击穿场强，用  $E_b$  表示。

#### 2.1.2 气体放电的主要形式

由于气体压强、电源功率、电极形状等不同，气体放电具有多种形式，下面介绍几种常见的气体放电形式。

##### 1) 辉光放电

发生在气体压强较低，电源功率较小，电场分布比较均匀的条件下。放电区域占据整个电极空间，电流密度较小，放电时间隙发光。

##### 2) 电晕放电

在电场分布极不均匀的条件下发生。放电时，在紧贴曲率半径小的电极表面出现发光层，电流密度很小。

##### 3) 刷状放电

刷状放电一般出现在电晕放电之后，发生电晕放电后，如果继续升高电压，从电

晕电极伸展出许多明亮的刷状放电通道。

#### 4) 火花放电

发生在气体压强较高（例如大气压力下），电场强度高，电源功率受到一定限制的情况下。放电区域呈一条贯通两电极之间的断续而明亮的电火花，极间电导大。

#### 5) 弧光放电

发生在高电压，电源功率足够大的条件下。放电区域呈一条很细且明亮的弧道，极间电导很大，极间电压极低，此时气体处于击穿状态。

#### 6) 沿面放电

在两种电介质的交界面上发生放电的现象称为沿面放电，在这里特指气体与固体电介质交界面上的沿面放电。

## 2.2 带电质点的产生

气体放电无论是何种方式，其共同的特点是气体中有电流流过，说明气体放电过程中产生了大量的带电质点，下面就讲述气体放电过程中带电质点的产生。

### 2.2.1 气体中质点的运动规律

气体中有很多质点，包括分子、原子、离子和电子，这些质点之间的距离很大。例如，空气在标准大气状态下，密度是  $3 \times 10^{19}$  个/ $(\text{cm})^3$ ，分子的直径是  $2 \times 10^{-8}$  cm，可见质点间的距离还是比较远的。这些质点不停地做热运动，其运动轨迹是不规则的折线，质点每发生一次碰撞就改变一次运动方向，如图 2-1 所示。

质点运动过程中相邻两次碰撞间通过的距离叫自由行程，用  $x$  表示，从图 2-1 可以看出，自由行程  $x$  有长有短，但是其特点是参与热运动的大量质点的自由行程具有统计性。这样，为了分析计算方便，引入平均自由行程，用  $\lambda$  表示。

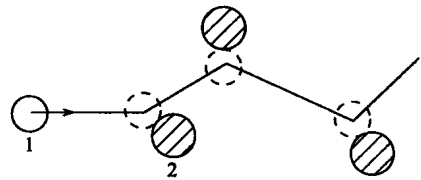


图 2-1 质点运动轨迹  
1-运动质点；2-被撞质点

#### 1) 平均自由行程

设运动质点运行单位行程（1cm），共发生了  $Z$  次碰撞（ $Z$  也是一个平均值，具有统计性），那么该质点的平均自由行程就是  $\lambda = 1/Z$  cm。

#### 2) 影响平均自由行程的主要因素

##### (1) 平均自由行程与运动质点体积有关。

运动质点的体积不同，它们的平均自由行程也不同。例如，电子与离子相比，电子的直径只有  $3 \times 10^{-13}$  cm。而离子是分子失去或获得电子形成的，其直径与分子差不多，在  $3 \times 10^{-8}$  cm 数量级，显然它们的平均自由行程不同。这样，某一质点在气体中运动其平均自由行程将不同。

(2) 平均自由行程与气体状态有关。

气体压强越大，质点运行单位行程的碰撞次数就越多，平均自由行程就小；气体温度越高，质点运行单位行程的碰撞次数就越少，平均自由行程就大。

这样，平均自由行程与气体压强  $p$ 、气体温度  $T$  之间的关系可以表示为

$$\lambda \propto T/p \quad (2-1)$$

在常温常压下，空气中电子的平均自由行程在  $10^{-5}$  cm 数量级。

### 3) 自由行程的分布规律

如前所述，运动质点的每个自由行程可能都不一样，但是具有统计规律。设运动质点自由行程超过  $x$  的概率为  $f(x)$ ，那么自由行程的分布规律是

$$f(x) = e^{-x/\lambda} \quad (2-2)$$

## 2.2.2 带电质点的产生方式

气体放电过程中的带电质点是由激励和电离这两个物理过程产生的，这两个物理过程发生时均需要能量。那么，根据能量的来源不同，带电质点的产生有多种方式。

### 1. 气体中带电质点的产生方式

#### 1) 电子的碰撞电离

电子在电场中受力作用，将沿电场方向运动，可能与气体分子发生碰撞。设相邻两次碰撞电子运动的距离是  $x$ ，则电子从电场中获得的能量是  $qEx$ ，该能量全部转变为电子的运动动能，即

$$\frac{1}{2}mv^2 = qEx \quad (2-3)$$

式中， $m$  为电子质量， $v$  为电子运动速度， $q$  为电子的电荷量， $E$  为电场强度。

若

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_i \quad (2-4)$$

则被撞分子吸收该能量，发生碰撞电离。其结果是产生一个电子和一个正离子。式中， $W_i$  为被撞气体分子电离能。

应该指出，即使满足式 (2-4) 的条件，也不一定每次碰撞都能引起电离，实际上碰撞电离的几率是很小的；若式 (2-4) 的条件不能满足，也不一定不能发生碰撞电离，若

$$\frac{1}{2}mv^2 \geq W_e \quad (2-5)$$

则被撞分子吸收该能量，发生激励。处于激励状态的分子其电离能变小，这时如果被一个达到或超过这个变小的电离能的运动电子碰撞，可能发生碰撞电离，这种电离方式被称作分级电离。式中， $W_e$  为被撞气体分子激励能。

在气体中，除了电子以外，离子同样也能从电场中获得能量，产生碰撞电离。但是，离子比电子的体积大得多，其自由行程较短，在相邻两次碰撞间，积累起足够的发生碰撞电离能量的可能性很小；另一方面，电子质量小，在和气体分子发生弹性碰撞（未发生电离）时，几乎不损失其动能，从而在电场中继续积累动能，离子则不同，一旦和分子发生碰撞，不管电离与否均将损失其动能。因此，碰撞电离主要是电子运动产生的，离子碰撞几乎不可能发生电离。

### 2) 光电离

由光辐射引起的气体分子电离称光电离。光波的能量  $W$  决定于其频率  $\nu$ 。

$$W = h\nu = hc/\lambda \quad (2-6)$$

式中， $h$  为普朗克常数 ( $h=6.62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{s}$ )， $c$ 、 $\nu$ 、 $\lambda$  分别为光速 ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ )、光波频率 (Hz)、光波波长 (m)， $W$  为光波能量 (J)。

当气体分子受到光照射时，若

$$W \geq W_i \quad (2-7)$$

将发生光电离。

能够引起光电离的临界波长为  $\lambda_0 = hc/W_i$ 。

表 2-1 是几种气体的电离能及光电离临界波长。

表 2-1 几种气体的电离能及光电离临界波长

气体	O <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	空气	He
电离能/eV	12.2	12.7	3.7	15.4	15.5	16.3	24.6
光电离临界波长/nm	102	97.7	90.6	80.6	80.1	76.2	50.4

导致气体分子光电离的高频高能光子可能由自然界（如空中的紫外线、宇宙射线等）提供，或人为照射，也可以来自气体放电过程（复合、吸附等）本身。

### 3) 热电离

一切由气体的热状态而引起的电离称为热电离。其具体形式是气体分子间的碰撞电离和光电离。碰撞电离的能量来源于气体分子本身的热能引起的高速热运动；光电离的能源来源于高温气体的热辐射和带电质点间复合释放的光子。

气体温度是气体分子热运动剧烈程度的标态，气体分子平均动能  $W$  与气体温度  $T$  的关系为

$$W = \frac{3}{2} kT \quad (2-8)$$

式中， $k$  为波尔兹曼常数 ( $k=1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$ )， $T$  为热力学温度 (单位为 K)。

例如，空气电离能  $W_i=16.3 \text{eV}$ ，在常温 ( $T=293 \text{K}$ ) 下

$$W = \frac{3}{2} \times 1.38 \times 10^{-23} \times 293 = 6.07 \times 10^{-19} \text{J} = 3.79 \times 10^{-2} \text{eV} \ll W_i$$

可见常温下远不足以引起空气的热电离。

#### 4) 负离子的形成

前面的各种电离方式均产生电子和正离子。但是，在气体放电过程中，除电子和正离子外，还存在负离子。这是因为有些电子在和电负性比较大的气体分子发生碰撞时，被该分子吸附，而该分子变成负离子。吸附发生时有能量以光子的形式释放。

由于离子几乎不能产生碰撞电离。因此，在气体放电过程中，相对电子而言，负离子起着阻碍电离的作用。六氟化硫气体之所以比空气的绝缘能力强，其主要原因是六氟化硫气体分子具有很强的电负性，能使一些电子被吸附成为负离子。

### 2. 阴极表面电离

在气体放电过程中，除了气体中产生带电质点以外，还存在着阴极发射电子的过程，称为阴极表面电离。使阴极释放出电子也需要一定的能量，这个能量称为逸出功。金属表面逸出功一般比气体电离能小得多，所以在气体放电中，电极表面电离是带电质点产生的重要方式。逸出功和金属的微观结构及表面状态有关。表 2-2 给出了几种金属和金属氧化物的逸出功。

表 2-2 几种金属及金属氧化物的逸出功

金属名称	铯	锌	铝	铬	铁	镍	铜	银	钨	金	铂	氧化铜
逸出功/eV	1.88	3.30	4.08	4.37	4.48	5.24	4.70	4.73	4.54	4.82	6.30	5.34

#### 1) 正离子碰撞阴极

正离子在电场中将向阴极方向运动，当它与阴极发生碰撞时，可将其能量传递给阴极中的电子。当正离子能量大于阴极材料表面逸出功两倍以上时，将有电子从阴极表面逸出，逸出的电子中有一个和正离子中和，其余的成为自由电子，进入气体中。实际上，平均 100 个左右具有电离条件的正离子才能使阴极逸出一个有效的能够进入气体中的自由电子。

#### 2) 光电效应

金属表面受到光的照射，当光子具有的能量大于金属表面的逸出功时，将有电子从金属表面逸出，这个现象称为光电效应。实际上，当光照射到阴极表面时，将有一部分光子发生反射，还有一部分光能转化为金属的热能，只有一小部分光能使金属表面逸出电子，平均入射 100 个左右具有光电离条件的光子才能放射出一个电子。

#### 3) 强场放射

在阴极附近具有很高的场强时（约  $10^3$  kV/cm 数量级），将使阴极释放电子，称为强场放射，也叫冷放射。一般的气体间隙很难达到如此高的场强，而高真空间隙击穿时，强场放射是最主要的电离因素。加热阴极时，阴极表面的电子将获得能量使其运动动能增加，在相对低的电场强度下，将发生强电场放射，又称热电子放射。

## 2.3 带电质点的消失

在电场作用下，由于电离过程，气体中不断地产生带电质点，同时还存在着带电质点的消失过程。那么，气体是发生放电击穿，还是保持其绝缘状态，取决于上述两种过程的发展。带电质点的消失主要有三种方式：一是部分带电质点在电场作用下作定向运动，消失于电极（形成电流）；二是带电质点从浓度高的区域向浓度低的区域扩散；三是正负带电质点复合形成中性质点。

### 2.3.1 带电质点在电场作用下运动形成电流

带电质点在电场作用下将沿电场方向作定向运动，形成电流。电流的大小决定于电场强度、带电质点浓度、电量及其在电场方向的运动速度。

在电场作用下，真空中的带电质点沿电场方向作加速运动。若电场均匀，则带电质点作等加速运动。

气体中的带电质点，在运动过程中经常与其他质点发生碰撞改变其运动方向。故带电质点初速度具有任意方向，如图 2-2 所示。

图 2-2 中，相邻两次碰撞间所经过的路径是弯向电场方向的抛物线，逐渐由一个电极移向另一电极，形成定向运动，但是此定向运动速度不会不断增加。因为带电质点一方面受到电场加速而获得动能，另一方面又因为与其他质点碰撞而损失动能。在电场作用下，带电质点初速度较低，以后逐渐增加；但是随着其速度的增加，碰撞时损失掉的能量也在增加。因此，带电质点不像在真空中那样可以一直加速运动，在一定的电场强度下，其运动速度最终将达到某一稳定值。在此速度下，带电质点从电场中获得的动能恰好等于因不断碰撞而损失的动能。这是一个平均速度，被称为带电质点的驱引速度，驱引速度与电场强度  $E$  有关，即  $v_d = f(E)$ ，一般写为

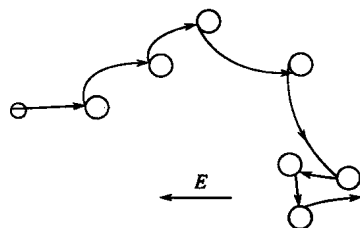


图 2-2 气体中带电质点的运动轨迹

能，另一方面又因为与其他质点碰撞而损失动能。在电场作用下，带电质点初速度较低，以后逐渐增加；但是随着其速度的增加，碰撞时损失掉的能量也在增加。因此，带电质点不像在真空中那样可以一直加速运动，在一定的电场强度下，其运动速度最终将达到某一稳定值。在此速度下，带电质点从电场中获得的动能恰好等于因不断碰撞而损失的动能。这是一个平均速度，被称为带电质点的驱引速度，驱引速度与电场强度  $E$  有关，即  $v_d = f(E)$ ，一般写为

$$v_d = bE \quad (2-9)$$

式中， $b$  为迁移率，表示单位电场强度下带电质点的驱引速度。

有些情况下  $b$  基本上和  $E$  无关，而在一般情况下  $b$  是  $E$  的函数。

实验表明，离子迁移率在很大范围内和电场强度无关，但在很强的电场中，和电场强度有关。迁移率还和气体状态及离子种类有关，气体压强越高或者离子质量越大，其值就越小。同一种气体，正、负离子的迁移率相差不大。在标准大气状态下，空气中正、负离子的迁移率分别为  $1.36 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} / (\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$  和  $1.87 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1} / (\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

电子迁移率比离子迁移率大得多。和离子不同，即使在很弱的电场中，电子迁移

率也随场强而变。实验表明，电子的驱引速度和  $E^n$  成正比，其中  $0.5 < n < 1$ 。

### 2.3.2 带电质点的扩散

带电质点从浓度高的区域向浓度低的区域迁移，使带电质点的浓度趋于平衡，这种现象称为带电质点的扩散。扩散的主要原因是质点的热运动，带电质点间的静电力对扩散的影响很小。因为大多数情形下气体中带电质点的浓度不超过  $10^{12}$  个/cm<sup>3</sup>，这相当于带电质点间的平均距离为  $10^{-4}$  cm，在这样的距离下，相互间的静电作用力是很小的。所以带电质点的扩散和气体分子的扩散几乎一样，是由于热运动造成。然而，在热运动过程中，气体中的质点不断发生碰撞而改变着运动方向，所以尽管它们的热运动速度极高，但其扩散速度却相对要小得多。

气体中带电质点的扩散和气体状态有关。气体压强越低或者温度越高，扩散过程越容易进行，反之越不容易进行。

质点的体积和质量对扩散有影响，电子的体积和质量远小于离子，所以电子的热运动速度很快，它在热运动中发生的碰撞也较少，因此电子的扩散过程比离子的要强得多。

### 2.3.3 带电质点间的复合

正、负离子，或正离子与电子相遇，发生电荷转移而还原成原子或分子的过程称为复合过程。

复合是电离的逆过程，电离需要能量，复合将释放能量，该能量通常以光子的形式释放，即复合过程伴随着光辐射。

并不是异性带电质点每次相遇都能引起复合。只有异性带电质点相遇并有一定的接近时间才能实现复合。和离子相比，电子的体积与质量小得多，其运动速度比离子大得多，复合的可能性比离子小得多。因此，正、负离子间的复合概率要比正离子和电子间的复合概率大得多，故放电过程中以离子间的复合为主。

## 2.4 均匀电场中气体击穿过程

均匀电场气体间隙在高电压工程中应用很少。因为实际上不可能做出均匀电场，采用平板电极只是局部存在均匀电场，边缘处电场分布仍不均匀。但是，研究均匀电场气体击穿过程是研究气体击穿的基础，因此本节讨论均匀电场这种理想情况下的气体击穿过程。

### 2.4.1 汤森气体放电理论

20 世纪初，英国学者汤森提出了比较系统的均匀电场气体放电理论。该理论阐述了均匀电场气体放电的发展过程，并在一系列假设的前提下，给出了放电电流和击



穿电压的计算公式。

汤森气体放电理论的中心思想有两点：①电离方式主要有两种，一是电子的碰撞电离，二是正离子的阴极表面电离；②气体击穿的必要条件是自持放电。由于汤森气体放电理论给出了放电电流和击穿电压的计算公式，因此该理论针对上述两个电离过程定义了两个系数，其中 $\alpha$ 为电子碰撞电离系数； $\gamma$ 为正离子阴极表面电离系数。

汤森气体放电理论还多次提到电子崩，下面首先解释自持放电和电子崩的概念。

### 1) 非自持放电和自持放电

按照气体放电过程是否需要电源以外的电离能量（外电离因素）作用来区分，气体放电分为非自持放电和自持放电两类。如果维持放电继续进行的能量仅由电源提供，这种放电称为自持放电；反之，称为非自持放电。

### 2) 电子崩及其形成过程

由于某种外电离因素（如光电效应）使阴极表面产生电子，该电子在电场作用下加速向阳极方向运动，运动过程中不断与气体分子发生碰撞，碰撞前电子从电场中获得的能量若大于被撞分子的电离能时，可能引起碰撞电离。分子电离后新产生的电子和原有电子一起又将从电场中获得动能，继续引起碰撞电离。这样，一个起始电子从电场获得一定动能后，会由于碰撞电离生成第二代电子；第二代电子作为新的第一代电子，又将电离生成新的第二代电子。理想情况下，这样一代一代不断增加的过程，会使气体中的电子数目迅速增加，如同冰山上发生雪崩一样，汤森将这一过程形象地称作是电子崩的形成过程，如图 2-3 所示。其实，电子崩的形成过程也就是电子的碰撞电离过程，也称作 $\alpha$ 过程。

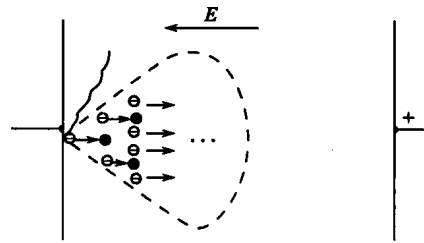


图 2-3 电子崩形成过程示意图

### 3) 电子碰撞电离过程（ $\alpha$ 过程或电子崩形成过程）产生的电流

$\alpha$  代表一个电子沿着电场方向运行单位长度（1cm）由于碰撞电离产生的电子个数，也就是平均发生的碰撞电离次数。汤森理论认为每次发生碰撞电离只产生一个电子和一个正离子，因此， $\alpha$  也就是一个电子在单位长度行程内由于碰撞电离新产生的电子数或正离子数。

为了推导电子碰撞电离过程产生的电流。假设在某种外电离因素（如光电效应）作用下，单位时间内阴极表面产生  $n_0$  个电子。在电场作用下，这  $n_0$  个电子在向阳极（ $x$  方向）运动的过程中不断发生碰撞电离，产生电子和正离子。设放电过程稳定后，在距离阴极为  $x$  的横截面上，单位时间内有  $n$  个电子通过。这  $n$  个电子继续沿电场方向运动，又运行了  $dx$  长度，在  $dx$  长度中又产生了  $dn$  个电子，如图 2-4 所示。那么