

高等院校精品课程系列教材·校级

# 高电压技术

王伟 屠幼萍 ©编著



High Voltage Technology

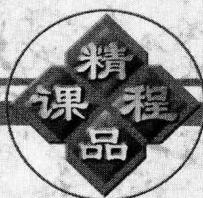


机械工业出版社  
China Machine Press

高等院校精品课程系列教材·校级

# 高电压技术

王 伟 屠幼萍 ©编著



*High Voltage Technology*



机械工业出版社  
China Machine Press

本书的主要内容包括气体放电的基本物理过程, 气体介质的电气强度, 高电压绝缘中气体、固体、液体和组合绝缘的电气特性, 电气设备绝缘预防性试验, 电气设备绝缘在线监测, 输电线路和绕组中的波过程, 雷电及防雷保护装置, 输电线路的防雷保护, 发电厂和变电站的防雷保护, 电力系统内部过电压, 以及电力系统的绝缘配合原则等。

本书可作为普通高等学校电气工程及其自动化专业或相关专业的本科教材, 也可作为高职高专教材和工程技术人员的参考用书。

封底无防伪标均为盗版

版权所有, 侵权必究

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

## 图书在版编目 (CIP) 数据

高电压技术 / 王伟, 屠幼萍编著. —北京: 机械工业出版社, 2011.1  
(高等院校精品课程系列教材)

ISBN 978-7-111-33081-3

I. 高… II. ①王… ②屠… III. 高电压—高等学校—教材 IV. TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 007057 号

机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 张少波

三河市明辉印装有限公司印刷

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

185mm×260mm·15 印张

标准书号: ISBN 978-7-111-33081-3

定价: 28.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991; 88361066

购书热线: (010) 68326294; 88379649; 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: [hzjsj@hzbook.com](mailto:hzjsj@hzbook.com)

# 前言

本书为普通高等教育“十一五”第二批规划教材。为了适应现代电子信息与电气学科的教学改革，满足学科发展和人才培养的要求，坚持“因材施教，注重理论联系实际”的教学原则，依据教育部高等学校电子信息与电气学科教学指导委员会制定的“专业规范 and 基本要求”，本书把高电压技术的内容重新做了整合、精简和补充，着重介绍高电压技术最基本的概念、理论和实用方法。

本书的主要内容包括气体放电的基本物理过程，气体介质的电气强度，高电压绝缘中气体、固体、液体和组合绝缘的电气特性，电气设备绝缘预防性试验，电气设备绝缘在线监测，输电线路和绕组中的波过程，雷电及防雷保护装置，输电线路的防雷保护，发电厂和变电站的防雷保护，电力系统内部过电压，以及电力系统的绝缘配合原则等。

本书分为“高电压绝缘及试验”和“电力系统过电压及保护”两篇，第一篇由王伟教授编写，第二篇由屠幼萍教授编写。

本书为高等学校电气类专业的教科书或参考书，也可作为其他专业选修课程的参考教材，并可作为有关专业工程技术人员的参考书。在使用过程中可参考教学建议，根据自身的要求和情况选择相关的教学内容和学时。

由于编者的水平有限，不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

# 教学建议

| 教学内容                  | 学习要点及教学要求                                                                                                                                                                                                                      | 课时安排 |      |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|------|
|                       |                                                                                                                                                                                                                                | 全部讲授 | 部分选讲 |
| 第 1 章<br>气体放电的基本物理过程  | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清气体中带电粒子的产生与消失</li> <li>弄清气体放电过程的一般描述</li> <li>掌握均匀电场间隙的击穿特性</li> <li>掌握不均匀电场间隙的击穿特性</li> <li>了解雷电放电特性</li> <li>了解沿面放电特性</li> </ul>                                                    | 4~6  | 4    |
| 第 2 章<br>气体介质的电气强度    | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清放电时间和冲击电压下间隙的伏秒特性及击穿电压的概率分布</li> <li>弄清大气条件对间隙击穿特性的影响及其校正</li> <li>掌握均匀与稍不均匀电场间隙的击穿特性</li> <li>掌握极不均匀电场间隙的击穿特性</li> <li>掌握提高气体介质电气强度的方法</li> <li>了解影响气体沿面闪络电压的因素和提高闪络电压的方法</li> </ul> | 4~6  | 4    |
| 第 3 章<br>电介质的电气特性     | <ul style="list-style-type: none"> <li>掌握电介质的极化、电导和损耗特性</li> <li>弄清固体电介质的电气强度特性</li> <li>弄清液体电介质的电气强度特性</li> <li>了解电介质的其他性能</li> </ul>                                                                                         | 6~8  | 6    |
| 第 4 章<br>电气设备绝缘预防性试验  | <ul style="list-style-type: none"> <li>掌握绝缘电阻、吸收比和泄漏电流的测量方法</li> <li>掌握介质损耗角正切的测量方法</li> <li>了解局部放电的测量</li> <li>了解绝缘油中溶解气体的色谱分析</li> <li>了解绝缘耐压试验</li> </ul>                                                                   | 4~8  | 4    |
| 第 5 章<br>电气设备绝缘在线监测   | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解介损的在线监测</li> <li>了解局部放电在线监测</li> <li>了解油中气体含量在线监测</li> </ul>                                                                                                                          | 2~4  | 2    |
| 第 6 章<br>输电线路和绕组中的波过程 | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清波沿均匀无损单导线的传播特性</li> <li>掌握行波的折射和反射规律</li> <li>掌握行波的多次折、反射规律</li> <li>弄清波在多导线系统中的传播特性</li> <li>了解波在有损线路中的传播特性</li> <li>了解变压器绕组中的波过程特性</li> </ul>                                       | 4~8  | 4    |
| 第 7 章<br>雷电及防雷保护装置    | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清雷电参数</li> <li>弄清避雷针、避雷线的保护范围</li> <li>掌握避雷器原理及特性</li> <li>弄清接地装置原理</li> </ul>                                                                                                         | 2~4  | 2    |

(续)

| 教学内容                  | 学习要点及教学要求                                                                                                                                                                              | 课时安排  |      |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------|
|                       |                                                                                                                                                                                        | 全部讲授  | 部分选讲 |
| 第 8 章<br>输电线路的防雷保护    | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清输电线路的感应雷过电压计算方法</li> <li>掌握输电线路的直击雷过电压和耐雷水平计算方法</li> <li>了解输电线路的雷击跳闸率的计算方法</li> <li>掌握输电线路的防雷措施</li> </ul>                                    | 2~4   | 2    |
| 第 9 章<br>发电厂和变电所的防雷保护 | <ul style="list-style-type: none"> <li>弄清发电厂、变电所的直击雷保护</li> <li>掌握变电所内避雷器的保护作用</li> <li>掌握变电所的进线段保护方法</li> <li>了解三绕组变压器和自耦变压器的防雷保护</li> <li>了解变压器中性点保护</li> <li>了解旋转电机的防雷保护</li> </ul> | 2~6   | 2    |
| 第 10 章<br>电力系统内部过电压   | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解工频过电压</li> <li>了解操作过电压</li> <li>了解谐振过电压</li> </ul>                                                                                            | 2~6   | 2    |
| 第 11 章<br>电力系统的绝缘配合   | <ul style="list-style-type: none"> <li>了解绝缘配合的原则</li> <li>了解绝缘配合的方法</li> <li>了解架空线路绝缘水平的确定</li> </ul>                                                                                  | 2~4   | 2    |
|                       | 教学总学时建议                                                                                                                                                                                | 34~64 | 34   |

说明：本教材为电气工程学科本科专业“高电压技术”课程教材，理论授课学时数为 34~64 学时（相关配套实验另行单独安排学时），不同专业根据不同的教学要求和计划教学学时数可酌情对教材内容进行适当取舍。

# 目 录

## 前言

## 教学建议

## 第一篇 高电压绝缘及试验

### 第1章 气体放电的基本物理过程 ..... 2

#### 1.1 气体中带电粒子的产生与消失 ... 2

##### 1.1.1 带电粒子的产生 ..... 2

##### 1.1.2 带电粒子在气体中的运动 ... 5

##### 1.1.3 带电粒子的消失 ..... 6

#### 1.2 气体放电机理 ..... 7

##### 1.2.1 非自持放电与自持放电 ..... 7

##### 1.2.2 汤逊理论 ..... 8

##### 1.2.3 流注理论 ..... 11

#### 1.3 不均匀电场中的放电过程 ..... 14

##### 1.3.1 稍不均匀电场和极不均匀电场的放电特征 ..... 14

##### 1.3.2 电晕放电 ..... 14

##### 1.3.3 极不均匀电场气隙中的击穿、极性效应 ..... 16

#### 1.4 雷电放电 ..... 19

#### 1.5 沿面放电 ..... 20

##### 1.5.1 均匀电场中的沿面放电 ... 21

##### 1.5.2 极不均匀电场具有强垂直分量时的沿面放电 ..... 22

#### 习题 ..... 23

### 第2章 气体介质的电气强度 ..... 25

#### 2.1 放电时间和冲击电压下空气间隙的伏秒特性及击穿电压的概率分布 ... 25

#### 2.2 均匀与稍不均匀电场间隙的击穿特性 ..... 30

#### 2.3 极不均匀电场间隙的击穿特性 ... 31

##### 2.3.1 直流电压下的击穿电压 ... 32

##### 2.3.2 工频电压下的击穿电压 ... 32

##### 2.3.3 冲击电压下的击穿电压 ... 32

#### 2.4 大气条件对间隙击穿特性的影响及其校正 ..... 35

##### 2.4.1 对空气密度的校正 ..... 35

##### 2.4.2 对湿度的校正 ..... 36

##### 2.4.3 对海拔高度的校正 ..... 36

#### 2.5 提高气体介质电气强度的方法 ... 36

##### 2.5.1 改进电极形状以改善电场分布 ..... 36

##### 2.5.2 利用空间电荷畸变电场的作用 ..... 37

##### 2.5.3 极不均匀电场中屏障的作用 ..... 38

##### 2.5.4 高气压的作用 ..... 40

##### 2.5.5 高真空的作用 ..... 42

##### 2.5.6 高电气强度气体的作用 ... 43

#### 2.6 影响气体沿面闪络电压的因素和提高闪络电压的方法 ..... 46

##### 2.6.1 影响气体沿面闪络电压的因素 ..... 46

##### 2.6.2 提高间隙沿面闪络电压的方法 ..... 52

#### 习题 ..... 59

### 第3章 电介质的电气特性 ..... 60

#### 3.1 电介质的极化、电导和损耗 ... 60

##### 3.1.1 电介质的极化 ..... 60

##### 3.1.2 电介质的介电常数 ..... 62

##### 3.1.3 电介质的电导 ..... 66

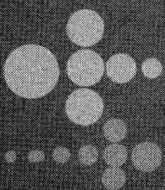
##### 3.1.4 电介质的损耗 ..... 69

|                                   |            |                                      |            |
|-----------------------------------|------------|--------------------------------------|------------|
| 3.2 液体电介质的电气强度 .....              | 73         | 5.2 局部放电在线监测 .....                   | 109        |
| 3.2.1 液体电介质的击穿过程 ...              | 73         | 5.3 油中气体含量在线监测 .....                 | 110        |
| 3.2.2 影响液体电介质击穿电压<br>的因素 .....    | 74         | 习题 .....                             | 110        |
| 3.2.3 提高液体电介质击穿电压<br>的方法 .....    | 76         | <b>第二篇 电力系统过电压及保护</b>                |            |
| 3.3 固体电介质的电气强度 .....              | 77         | <b>第6章 输电线路和绕组中的波过程 ...</b>          | <b>112</b> |
| 3.3.1 固体介质的击穿过程 .....             | 77         | 6.1 波沿均匀无损单导线的传播 ...                 | 112        |
| 3.3.2 影响固体电介质击穿电压<br>的主要因素 .....  | 79         | 6.1.1 波过程的物理概念 .....                 | 113        |
| 3.3.3 提高固体电介质击穿电压<br>的方法 .....    | 81         | 6.1.2 波过程计算的基本方程 ...                 | 115        |
| 3.4 电介质的其他性能 .....                | 81         | 6.2 行波的折射和反射 .....                   | 117        |
| 3.4.1 热性能 .....                   | 81         | 6.2.1 折射波和反射波的计算 ...                 | 118        |
| 3.4.2 机械性能 .....                  | 83         | 6.2.2 等值集中参数定理<br>(彼得逊法则) .....      | 120        |
| 3.4.3 吸潮性能 .....                  | 83         | 6.2.3 行波通过串联电感与旁过<br>并联电容 .....      | 122        |
| 3.4.4 化学性能及抗生物特性 ...              | 83         | 6.3 行波的多次折、反射 .....                  | 125        |
| 习题 .....                          | 83         | 6.3.1 用网格法计算波的<br>多次折、反射 .....       | 125        |
| <b>第4章 电气设备绝缘预防性试验 .....</b>      | <b>85</b>  | 6.3.2 多次折、反射波过程<br>的特点 .....         | 126        |
| 4.1 绝缘电阻、吸收比和泄漏电流<br>的测量 .....    | 86         | 6.4 波在多导线系统中的传播 .....                | 128        |
| 4.1.1 泄漏电流和绝缘电阻 .....             | 86         | 6.4.1 波在平行多导线系统中的<br>传播(大地为理想导体) ... | 128        |
| 4.1.2 绝缘电阻的测量 .....               | 88         | 6.4.2 平行多导线的等值<br>波阻抗 .....          | 129        |
| 4.1.3 泄漏电流测量 .....                | 90         | 6.4.3 平行多导线的耦合系数 .....               | 130        |
| 4.2 介质损耗角正切的测量 .....              | 91         | 6.5 波在有损线路中的传播 .....                 | 131        |
| 4.2.1 测 $\tan\delta$ 用的西林电桥 ..... | 92         | 6.5.1 线路电阻和线路对地电导<br>的损耗 .....       | 132        |
| 4.2.2 测 $\tan\delta$ 的功效 .....    | 94         | 6.5.2 冲击电晕对波过程<br>的影响 .....          | 132        |
| 4.2.3 测 $\tan\delta$ 时应注意的事项 ...  | 94         | 6.6 变压器绕组中的波过程 .....                 | 134        |
| 4.3 局部放电的测量 .....                 | 95         | 6.6.1 单绕组中的波过程 .....                 | 134        |
| 4.4 绝缘油中溶解气体的色谱分析 ...             | 97         | 6.6.2 绕组间波的传递 .....                  | 138        |
| 4.5 绝缘耐压试验 .....                  | 98         | 6.6.3 变压器的内部保护 .....                 | 139        |
| 4.5.1 工频交流耐压试验 .....              | 98         | 习题 .....                             | 139        |
| 4.5.2 直流耐压试验 .....                | 99         | <b>第7章 雷电及防雷保护装置 .....</b>           | <b>141</b> |
| 4.5.3 冲击耐压试验 .....                | 101        | 7.1 雷电参数 .....                       | 141        |
| 习题 .....                          | 106        |                                      |            |
| <b>第5章 电气设备绝缘在线监测 .....</b>       | <b>107</b> |                                      |            |
| 5.1 介损的在线监测 .....                 | 107        |                                      |            |

|                                       |     |                                     |     |
|---------------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| 7.1.1 雷电放电过程 .....                    | 141 | 8.3 输电线路的雷击跳闸率 .....                | 171 |
| 7.1.2 雷电放电的计算模型 .....                 | 142 | 8.3.1 建弧率 .....                     | 171 |
| 7.1.3 雷电流的等值波形 .....                  | 143 | 8.3.2 有避雷线线路雷击跳闸率<br>的计算 .....      | 171 |
| 7.1.4 雷电参数的统计数据 .....                 | 144 | 8.4 输电线路的防雷措施 .....                 | 172 |
| 7.2 避雷针、避雷线的保护范围 .....                | 145 | 习题 .....                            | 174 |
| 7.2.1 避雷针(线)的保护<br>原理 .....           | 145 | <b>第9章 发电厂和变电所的防雷保护</b> ..          | 175 |
| 7.2.2 避雷针(线)的保护<br>范围 .....           | 146 | 9.1 发电厂、变电所的直击雷<br>保护 .....         | 175 |
| 7.3 避雷器 .....                         | 149 | 9.1.1 独立避雷针 .....                   | 176 |
| 7.3.1 避雷器保护原理和<br>基本类型 .....          | 149 | 9.1.2 构架避雷针 .....                   | 176 |
| 7.3.2 保护间隙和管式避雷器 ..                   | 150 | 9.2 变电所内避雷器的保护作用 ..                 | 177 |
| 7.3.3 阀式避雷器 .....                     | 151 | 9.2.1 避雷器安装在设备旁 .....               | 177 |
| 7.3.4 氧化锌避雷器 .....                    | 156 | 9.2.2 避雷器安装在距设备一定<br>距离处 .....      | 178 |
| 7.4 接地装置 .....                        | 159 | 9.3 变电所的进线段保护 .....                 | 183 |
| 7.4.1 接地装置及其功能 .....                  | 159 | 9.3.1 35 kV 及以上变电所的<br>进线段保护 .....  | 183 |
| 7.4.2 接地分类 .....                      | 160 | 9.3.2 35 kV 小容量变电所的简化<br>进线保护 ..... | 185 |
| 7.4.3 接地电阻的定义及其<br>特性 .....           | 160 | 9.4 三绕组变压器和自耦变压器的<br>防雷保护 .....     | 185 |
| 7.4.4 输电线路杆塔接地 .....                  | 162 | 9.4.1 三绕组变压器的防雷<br>保护 .....         | 185 |
| 7.4.5 发电厂和变电所的接地 .....                | 163 | 9.4.2 自耦变压器的防雷保护 .....              | 186 |
| 习题 .....                              | 163 | 9.5 变压器中性点保护 .....                  | 187 |
| <b>第8章 输电线路的防雷保护</b> .....            | 164 | 9.6 旋转电机的防雷保护 .....                 | 188 |
| 8.1 输电线路的感应雷过电压 .....                 | 164 | 9.6.1 直配电机防雷 .....                  | 188 |
| 8.1.1 雷击线路附近大地时, 线<br>路上的感应雷过电压 ..... | 164 | 9.6.2 非直配电机防雷 .....                 | 191 |
| 8.1.2 雷击线路杆塔时, 导线上<br>的感应过电压 .....    | 166 | 习题 .....                            | 191 |
| 8.2 输电线路的直击雷过电压和<br>耐雷水平 .....        | 166 | <b>第10章 电力系统内部过电压</b> .....         | 192 |
| 8.2.1 雷击杆塔塔顶时的过电压<br>和耐雷水平 .....      | 166 | 10.1 工频过电压 .....                    | 192 |
| 8.2.2 雷击导线时的过电压和<br>耐雷水平 .....        | 169 | 10.1.1 空载长线路电容效应引起<br>的工频过电压 .....  | 193 |
| 8.2.3 雷击避雷线档距中央时的<br>过电压 .....        | 170 | 10.1.2 不对称接地引起的工频过<br>电压 .....      | 196 |

|                          |     |
|--------------------------|-----|
| 10.1.3 甩负荷引起的工频过电压 ..... | 197 |
| 10.2 操作过电压 .....         | 198 |
| 10.2.1 空载线路合闸过电压 ...     | 199 |
| 10.2.2 切除空载线路过电压 ...     | 201 |
| 10.2.3 切除空载变压器过电压 ...    | 202 |
| 10.2.4 间歇电弧接地过电压 ...     | 204 |
| 10.2.5 操作过电压的限制措施 ...    | 205 |
| 10.3 谐振过电压 .....         | 208 |
| 10.3.1 谐振的类型 .....       | 208 |
| 10.3.2 铁磁谐振过电压 .....     | 209 |
| 习题 .....                 | 211 |

|                               |     |
|-------------------------------|-----|
| <b>第 11 章 电力系统的绝缘配合</b> ..... | 212 |
| 11.1 绝缘配合的原则 .....            | 212 |
| 11.2 绝缘配合的方法 .....            | 215 |
| 11.3 架空线路绝缘水平的确定 ...          | 218 |
| 11.4 变电站电气设备绝缘水平的确定 .....     | 220 |
| 习题 .....                      | 222 |
| <b>附录</b> .....               | 223 |
| <b>参考文献</b> .....             | 227 |



# 第一篇 高电压绝缘 及试验

- ◎ 第 1 章 气体放电的基本物理过程
- ◎ 第 2 章 气体介质的电气强度
- ◎ 第 3 章 电介质的电气特性
- ◎ 第 4 章 电气设备绝缘预防性试验
- ◎ 第 5 章 电气设备绝缘在线监测

# 第 1 章

## 气体放电的基本物理过程

气体可作为绝缘介质并起到绝缘作用，但当电场强度达到一定数值后，气体会失去绝缘能力而造成击穿。为了能正确理解和掌握气体绝缘，就需要了解气体的放电过程。本章将着重介绍气体击穿的理论分析，如带电粒子的产生、运动和消失的规律及气体击穿过程的发展等。对气体放电过程的研究也有助于阐明固体及液体电介质的放电过程。

### 1.1 气体中带电粒子的产生与消失

为了说明气体放电过程，首先需要了解气体中带电粒子的产生、运动和消失的过程及条件。

#### 1.1.1 带电粒子的产生

在电场作用下气体间隙中能发生放电现象，而在气体空间和从金属电极产生带电粒子是气体放电现象的首要前提。

##### 1. 原子的激励和电离

气体原子有若干个电子沿一定轨道绕原子核旋转，原子中绕核旋转的电子具有确定的能量（位能和动能），处于离核最近轨道上的电子位能最小。当原子获得外加能量时，一个或若干个电子可跃迁到离核较远的轨道上，处于能量较高的状态，这个过程称为激励，该原子称为激励状态的原子。产生激励所需的能量等于该轨道和常态轨道的能级差，称为激励能。原子处于激励状态的时间大致为  $10^{-7} \sim 10^{-8}$  s，经过这样一段时间后，电子将自动返回常态轨道，这时产生激励所吸收的外加能量将以辐射出相应能量的光子形式放出。

原子在外界因素作用下，使其一个或几个电子脱离原子核的束缚而形成自由电子和正离子的过程称为原子的电离，所谓正离子是指原子失去一个或几个电子而形成的带正电的质点。

表 1-1-1 列出了常见气体的激励能和电离能值，通常以电子伏（eV）表示。

表 1-1-1 常见气体的激励能和电离能

| 气体           | 激励能 $W_e/\text{eV}$ | 电离能 $W_i/\text{eV}$ | 气体                   | 激励能 $W_e/\text{eV}$ | 电离能 $W_i/\text{eV}$ |
|--------------|---------------------|---------------------|----------------------|---------------------|---------------------|
| $\text{N}_2$ | 6.1                 | 15.5                | $\text{CO}_2$        | 10.0                | 13.7                |
| $\text{O}_2$ | 7.9                 | 12.2                | $\text{H}_2\text{O}$ | 7.6                 | 12.7                |
| $\text{H}_2$ | 11.2                | 15.4                | $\text{SF}_6$        | 6.8                 | 15.6                |

原子先经过激励阶段，接着发生电离的情况称为分级电离，这时所需外来能量小于使原子直接电离所需的能量。

## 2. 气体中的电离形式

气体分子的电离有三种形式：1) 电子或正离子与气体分子的碰撞产生的碰撞电离；2) 各种光辐射产生的光电离；3) 高温下气体的热能产生的热电离。

### (1) 碰撞电离

气体放电中，碰撞电离主要是由电子和气体分子碰撞而引起的。当电子从电场获得的动能等于或大于气体分子的电离能时，就有可能因碰撞而使气体分子分裂为电子和正离子，即电子的能量满足下式是引起电离的必要条件：

$$\frac{1}{2}m_e v_e^2 \geq W_i \quad (1-1-1)$$

式中， $m_e$  为电子的质量； $v_e$  为电子的速度； $W_i$  为气体分子的电离能。

电子的碰撞电离与电场强度和电子的平均自由行程大小有关。与电子相比，离子碰撞中性分子并使之电离的可能性很小，因此在分析气体放电过程中，往往只考虑电子所引起的碰撞电离。

### (2) 光电离

当气体分子受到光辐射作用时，如光子能量满足下列条件即可能引起光电离：

$$h\gamma \geq W_i \quad (1-1-2)$$

式中， $h$  为普朗克常数， $h=6.62 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ ； $\gamma$  为光子的频率 ( $\text{s}^{-1}$ )。

导致气体光电离的光子可以由自然界（如空中的紫外线、宇宙射线等）或人为照射（如紫外线、X射线等）提供，也可以由气体放电过程本身引起。在气体放电过程中，异号带电质点会不断复合为中性质点，这时电离能将以光子形式释放出来（见 1.2 节）。激励状态的分子回复到正常状态，也将以光子形式释放出激励能。虽然分子由激励状态回复到正常状态时释放出的光子不能直接电离同类分子，但有可能引起分级电离。此外气体中还可能存在多重电离的分子或者激励状态的离子，它们具有很大的位能，可释放出能量很大的光子。

由此可知，频率很高的光辐射也可来自气体放电本身，由气体放电过程引起光电离后又可促成放电的进一步发展。所以，气体放电中光电离是很重要的电离方式。

### (3) 热电离

一切因气体热状态引起的电离称为热电离。

由于气体分子热运动的统计性，分子瞬间运动速度大小不一，其动能也大小不一，气体温度是其分子热运动剧烈程度的标志，气体分子的平均动能和气体温度的关系为

$$W_m = \frac{3}{2}KT \quad (1-1-3)$$

式中， $K$  为波尔兹曼常数， $K=1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ ； $T$  为绝对温度。

随着温度的升高，气体分子动能增加，它们相互碰撞时就可能引起激励或电离；气体空间里交织着热辐射，热辐射光子的平均能量随温度升高而加大，这样，高温下热辐射光子也

能造成气体的电离。

由一切热电离过程所产生的电子也处于热运动中，因此，高温下电子也能由热运动靠碰撞作用而造成分子的电离。

由此可见，从本质上说，热电离和前述碰撞电离及光电离是一致的，都是能量超过临界数值的粒子或光子碰撞分子，使之发生电离，只是直接的能量来源不同而已。热电离由热能决定（在气体放电中热能由电能转化而来），这时粒子做无规则热运动；而电场中造成碰撞电离的电子由电场获得能量，在电场方向做定向运动，这时与无规则的热运动完全不同。

3. 金属电极的表面电离

除了发生在气体中的空间电离外，气体放电中还存在着金属电极发射电子的过程，称为金属电极表面电离。

能使金属表面释放出电子的能量，称为逸出功。逸出功和金属的微观结构有关，不同金属的逸出功也各异。逸出功和金属表面状态（氧化层、吸附层等）也有很大关系。逸出功和金属的温度基本上没有关系。表 1-1-2 中列出了一些金属和金属氧化物的电子逸出功。

表 1-1-2 一些金属和金属氧化物的电子逸出功

| 金属和金属氧化物 | 逸出功/eV |
|----------|--------|
| 铝        | 1.8    |
| 银        | 3.1    |
| 铂        | 3.6    |
| 铜        | 3.9    |
| 铁        | 3.9    |
| 氧化钡      | 1.0    |
| 氧化铜      | 5.34   |

比较表 1-1-1 和表 1-1-2 可看出，金属表面的逸出功要比气体分子的电离功小很多，这表明金属电极表面电离比气体空间电离更易发生。在不少场合，阴极发射电子的过程在气体放电过程中起很重要的作用。随着供给电子逸出金属所需能量的形式不同，金属电极表面电离的方式也不同。

(1) 正离子碰撞阴极

正离子碰撞阴极时将动能传递给电子而使其逸出金属。逸出的电子中有一个和正离子结合成为原子，其余的成为自由电子。所以正离子必须撞击出一个以上电子时才能出现自由电子。

同时正离子的位能对电子的逸出也起作用，当正离子和电子中和时，所放出的电离能必须至少等于两倍的逸出功，才有可能引起阴极表面电离。比较表 1-1-1 和表 1-1-2 可知，大多数情况下是可以满足这个条件的。

在气体放电中，平均每个正离子从金属表面释放出的自由电子的概率数量级为  $10^{-2}$ 。

(2) 光电效应

金属表面受到光的照射时会产生光电效应，当光子的能量大于逸出功时，金属表面就会放射出电子。

光照射到金属表面时，有相当一部分光子被反射而并不引起光电效应。金属所吸收的光能中也有一大部分转为金属的热能，只有一小部分可使电子逸出。所以释放出来的电子数比相应的人射光子数少很多，其比值不超过  $10^{-2}$  数量级。

(3) 强场发射（冷发射）

当阴极表面附近空间存在很强的电场（ $10^7$  V/cm 数量级）时，能使阴极放射出电子。

强场发射在一般气体间隙的击穿过程中不会发生，但对高气压、高真空及其某些电弧放电有重要意义。

#### (4) 热电子放射

当阴极被加热到很高温度时，其中的电子获得巨大动能而逸出金属。

热电子放射对某些电弧放电有重要意义。电子、离子器件中常用热电子放射来驱动电子逸出。

#### 4. 负离子的产生

在气体放电过程中，除电子和正离子外，还存在带负电的离子（负离子）。这是因为，有时电子和气体分子碰撞非但没有电离出新电子，反而电子附着于分子上形成负离子。

有些气体形成负离子时可释放出能量，这些易于产生负离子的气体称为电负性气体（如氧、氟、氯等）。已发现的负离子有  $O^-$ 、 $O_2^-$ 、 $OH^-$ 、 $H_2^-$ 、 $F^-$ 、 $Cl^-$ 、 $Br^-$ 、 $I^-$ 、 $SF_6^-$  等。

负离子的形成可使自由电子数减少，对气体放电起抑制作用。后面章节介绍的某些特殊的电负性气体（如  $SF_6$ ）对电子具有很强的亲和性，其电气强度远远大于一般气体，因而被称为高电气强度气体。

### 1.1.2 带电粒子在气体中的运动

#### 1. 带电粒子的平均自由行程

通常情况下气体中的分子和带电粒子都处于热运动之中，相互之间会发生碰撞，当有外加电场时，其中的带电粒子将沿着电场做定向移动，如图 1-1-1 所示。带电粒子在相继两次碰撞之间自由地通过的距离称为自由行程，由于气体单位体积中带电粒子数较分子数少很多，带电粒子自身相互间的碰撞可以忽略不计，因此气体中电子和离子的自由行程是指它们和气体分子发生碰撞时的行程。而两次碰撞间的自由行程也长短不一，具有统计特性，引入平均自由行程  $\lambda$  的概念，将  $\lambda$  定义为带电粒子自由行程的平均值。

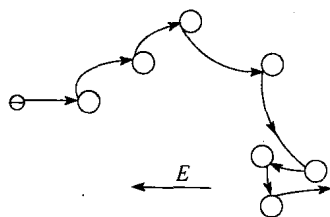


图 1-1-1 在电场作用下气体中电子的运动轨迹

在气体放电时碰撞过程产生带电粒子。电子在其自由行程内从外电场获得动能，当外电场足够强时，电子的动能可达很大数值，以致在和分子碰撞时能使分子分解出自由电子，这样能不断引起带电粒子增多，从而导致气体间隙击穿。显然，电子从电场中获得的能量除由电场强度决定外，还和其自由行程的大小有关。

电子的尺寸及质量比分子的小很多，离子是分子失去电子或获得电子而形成的带电粒子，所以其尺寸及质量都和分子的差不多。由于电子的尺寸小，运动中不易发生碰撞，所以电子的平均自由行程要比分子和离子的大很多。

气体分子的密度  $n$  越大，其中的带电粒子就越容易发生碰撞，它们的自由行程也就越小，对于同一种气体：

$$\lambda \propto \frac{T}{p} \quad (1-1-4)$$

即带电粒子的平均自由行程  $\lambda$  与气体的压力  $p$  成反比，与气体的绝对温度  $T$  成正比，这是一个很重要的关系。

在标准大气压和常温下，空气中电子的平均自由行程在  $10^{-3}$  cm 数量级。

#### 2. 带电粒子的迁移率

在外加电场作用下带电粒子将沿着电场做定向移动，逐渐由一个电极移向另一个电极。

但此定向运动的速度不会持续增加。因为带电粒子一方面受电场加速而获得动能, 另一方面又因和气体分子碰撞而损失动能。在电场作用下, 带电粒子初始速度较低, 以后逐渐增加。但随着其速度的增加, 碰撞时损失掉的能量也在增加。因此, 在一定电场强度下带电粒子的运动将达到一种稳定状态, 其平均速度也将保持不变, 这一平均速度称为带电粒子的驱引速度  $v_d$ , 它决定了通过该气体间隙的传导电流。

驱引速度  $v_d$  与外加电场强度  $E$  成正比, 一般写为

$$v_d = bE \quad (1-1-5)$$

式中的比例系数  $b$  称为迁移率, 表示单位电场强度下带电粒子的驱引速度。

由于电子的平均自由行程比离子的大很多, 而电子的质量比离子的小很多, 更易加速, 所以电子的迁移率远大于离子的。电子的驱引速度与  $E^n$  成正比, 其中  $0.5 < n < 1$ 。

离子的迁移率在很大范围内与电场强度无关, 但在很强的电场中与电场强度有关, 迁移率和气体状态及离子种类有关, 气体压力越大或者离子质量越大, 离子的迁移率就越小。同一种气体的正、负离子的迁移率相差不大。在标准状态下, 干燥空气中正、负离子的迁移率分别为  $1.36(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})/(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$  及  $1.87(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})/(\text{V} \cdot \text{cm}^{-1})$ 。

### 3. 带电粒子的扩散

如果气体中带电粒子分布不均匀, 会出现带电粒子的扩散, 带电粒子会从浓度较高的地方向浓度较低的地方移动, 趋向是使带电粒子的分布变得均匀。带电粒子的扩散通常不是静电斥力造成的, 因为大多数情形下气体中带电粒子的浓度不超过  $10^{12}$  个/ $\text{cm}^3$ , 这相当于带电粒子间的平均距离为  $10^{-4}$  cm, 在这样的距离下, 相互间的静电斥力很小。所以, 带电粒子的扩散规律与气体的扩散规律相似, 都是由热运动造成的。

气体中带电粒子的扩散与气体状态有关, 气体压力越大或者温度越低, 扩散过程也就越弱。由于电子的质量远小于离子的质量, 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的要强。

## 1.1.3 带电粒子的消失

带电粒子的消失主要有三种方式:

- 1) 带电粒子在电场作用下作定向运动, 到达电极时, 消失于形成的外电路的电流中。
- 2) 带电粒子因扩散现象而逸出气体放电空间。
- 3) 当气体中异号的带电粒子相遇时, 发生电荷的传递与中和, 还原为原子或分子的过程称为复合, 它是与形成带电粒子的电离过程相反的物理过程。

带电粒子的复合过程会发生光辐射, 在一定条件下这种光辐射又可能成为导致电离的因素。正、负离子复合后形成两个原子, 以光子形式释放出来的能量为电离能与从负离子剥夺电子所耗能量之差, 离子的动能则变为复合后原子的动能。电子与正离子复合时形成一个原子, 这时的电离能和电子的动能将一起以光子的形式释放出来, 正离子的动能则将变为复合后原子的动能。

并不是异号的带电粒子每次相遇时都能引起复合。只有在参加复合的异号带电粒子相互接近一定时间后, 复合过程才能实现。粒子间的相对速度越大, 其相互作用的时间越短, 复合的可能性也越小。气体中电子的速度比离子的要大很多, 所以正、负离子间的复合概率比离子与电子间的复合概率大很多, 因此放电过程中离子间的复合更为重要。

带电粒子的复合强度与正、负带电粒子的浓度有关，浓度越大，复合进行得越激烈。复合与电离过程可以同时发生。

## 1.2 气体放电机理

汤逊理论和流注理论是气体放电的重要理论，这两种理论互相补充，可以说明广阔的  $pd$ （气体压力和间隙距离的乘积）范围内的气体放电现象。

### 1.2.1 非自持放电与自持放电

气体放电通常可分为非自持放电和自持放电两类。如去掉外电离因素的作用后放电随即停止，就称为非自持放电；反之，能仅由电场的作用而维持的放电称为自持放电。放电会随外施电压的增加由非自持放电转入自持放电。

图 1-2-1 所示为测定气体中电流的电路，两平行板电极间在施加电压前，电极间气体受外部光源（天然辐射或人工光源，如紫外线）照射会发生电离而不断产生正、负带电粒子，同时正、负带电粒子又不断复合，两种过程的作用使得气体间隙产生一定浓度的自由带电粒子并处于一种动态平衡状态。当电极间施加电压后，带电粒子沿电场运动，回路中出现电流，外施电压  $U$  逐渐升高时，电流  $I$  也发生变化，如图 1-2-2 所示。起初随着外施电压的升高，间隙中带电粒子的运动速度加大，因复合导致带电粒子消失的数目减少，而带电粒子消失于电极的数目加大，使回路中的电流增大。当电压升到  $U_A$  附近时，间隙中因电离产生的带电质点已全部落入电极，此时的电流趋于饱和，电流仅和外电离因素有关而与电压无关。如果取消外电离因素，电流会消失，这类放电称为非自持放电。饱和电流密度数值很小（在  $10^{-19}$  A/cm<sup>2</sup> 数量级），这时的气体间隙仍然处于良好的绝缘状态。

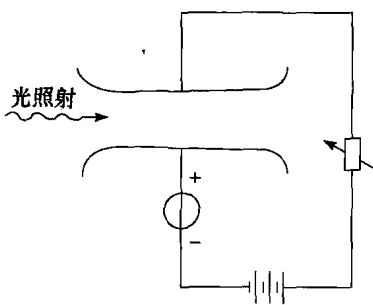


图 1-2-1 测定气体中电流的电路

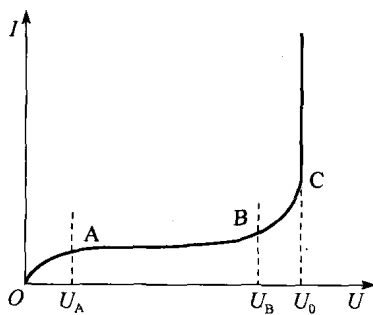


图 1-2-2 气体中电流和电压的关系

当电压增加到  $U_B$  附近时，又出现电流增长，这时间隙中出现新的电离因素，电子在足够强的电场作用下，已积累了足以引起碰撞电离的动能，即产生电子的碰撞电离。当电压达到  $U_0$  后，电流急剧增大，气体中发生强烈的电离，此时的电离过程只靠电场的作用已可自行维持，而不再继续需要外电离因素了，这种放电形式称为自持放电。非自持放电转入自持放电时的电压称为起始电压，如电场比较均匀，间隙将被击穿，起始电压  $U_0$ 。也就是击穿电压  $U_0$ 。如果间隙中的电场不均匀，则当放电由非自持转入自持时，在曲率半径小的电极表面电场集中的区域将发生电晕放电，即间隙中电场集中的局部区域的气体被击穿，而间隙中大部分区域的气体还处于绝缘状态，这时的起始电压是间隙的电晕起始电压，而间隙的击穿电压可能比电晕起始电压高很多。显然，电晕放电是一种自持放电。