



普通高等教育“十二五”国家规划教材
电气工程及其自动化专业系列教材



HIGH VOLTAGE TECHNIQUE

高电压技术

(第三版)

浙江大学 赵智大 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

013048498

TM8-43

14-3



普通高等教育“十二五”

电气工程及其自动化专业系列教材

高电压技术

(第三版)

浙江大学 赵智大 主编

清华大学 吴维韩 主审



北航

C1656540



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

TM 8-43

14-3

804810010

内 容 提 要

本书第一版为普通高等学校电力工程专业教学指导委员会推荐使用教材，第二版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，第三版为普通高等教育“十二五”国家级规划教材。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、新输电系统所推进的高电压技术等四篇共十二章，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，并适度反映现代高电压技术领域的新进展。从第二版开始，本书首创将“特高压交流输电”和“直流输电中的高电压技术问题”纳入课程和教材内容。

本书为高等学校“电气工程”一级学科各专业学生在学习高电压技术课程时的教材，也可供电力、电工领域的科技人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

高电压技术/赵智大主编. —3版. —北京: 中国电力出版社, 2013. 4

普通高等教育“十二五”国家级规划教材 电气工程及其自动化专业系列教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 4229 - 3

I. ①高... II. ①赵... III. ①高电压—技术—高等学校—教材 IV. ①TM8

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 060556 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

1999 年 5 月第一版

2013 年 5 月第三版 2013 年 5 月北京第二十二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 511 千字

定价 36.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

前 言

由于始终深信我国是世界上为数不多的亟须发展特高压交、直流输电技术的国家之一,本书主编从20世纪80年代开始在浙江大学开设的“高电压技术专题”课程中单独设立“特高压交流输电”一章介绍此项技术;又为相关专业的研究生开设了“直流输电中的高电压技术”一课。正是由于有了这两项教学实践作为基础,本书主编才能在我国于2005年开始大规模启动“特高压交、直流输电”的工程实践后,及时地在2006年问世的本书第二版中就新增了第四篇(新输电方式所推进的高电压技术)来专门介绍这两方面内容,使本书成为在国内外已出版的同类教材中首先全面涵盖高压/超高压/特高压交、直流输电中的高电压技术问题的教材。这一创新性尝试既适应了近年来特高压交、直流输电技术在我国飞跃发展的新局面,也得到众多高校和电力行业的高压同行们的肯定和欢迎。许多高校选用本书作为指定教材,不少电力企业也使用本书作为有关科技人员进修补课的培训教材,在不长的期间内,已累计重印21次。

在多次重印的过程中,主编曾陆续进行了一些修改和增补。为了进一步改善和充实教材内容,在编撰本书第三版时又作了下列改动和修订:

(1) 有鉴于电晕放电在超/特高压输电领域所具有的重要性,在第三版中改写和充实了相关章节的内容,更详细地介绍和探讨电晕放电及其各种派生效应以及它们对环境的影响问题。

(2) 对“潜供电弧及其熄灭问题”有长期深入研究的武汉大学陈维贤教授为第三版教材改写了第十一章第六节中的相关内容。

(3) 自从2005年我国大规模开始特高压交、直流输电技术的工程实践以来,已取得了长足的进展和积累了一批宝贵的实践经验,其中比较成熟和稳定的新成果被及时和适度地充实到教材内容中。

(4) 再增列一些对学习本课程富有启发性和深化作用的习题和思考题。

本书第三版仍由清华大学吴维韩教授担任主审,对于他为了提高书稿质量所花费的精力和所作出的重要贡献,对于武汉大学陈维贤教授的参编和所提供的精彩书稿,对于电力规划设计总院李勇伟教授级高工在特高压交、直流输电线路设计方面所提供的新信息和宝贵经验,主编一并在此致以诚挚的感谢。

赵智大

2013年2月浙大求是园

第三版前言

本书自1999年问世以来，为国内许多高校所选用，2002年获全国普通高校优秀教材二等奖。截止到2005年的6年中，已重印9次。现应有关院校师生和出版社的要求，重新修订增补后再版。

在本书再版之际，主编愿再次强调指出：远距离大功率输电的需求始终是提高输电电压和推动高电压技术不断进展的首要动力。在我国电力工业以世界上史无前例的速度迅猛发展的过程中，出现了采用某些新的输电方式和技术的必要性，其中最重要的是高压直流输电和特高压交流输电，它们已经或即将在我国出现和发展，并提出了一系列新的高电压技术问题，有待我们去掌握和解决，从而大大扩展和充实了传统的高电压技术（严格说来，它只能称之为“交流高电压技术”）的范畴和内涵。在高校教材中对此作适度的反映和充实，显然是完全必要和合适的。正因为如此，在本书新版中增加了相应的两章（第十一、十二章），尽可能精练扼要地介绍这方面的内容。

本书第二版由清华大学吴维韩教授担任主审，他为了提高书稿质量付出了宝贵精力和劳动，清华大学陈水明教授也对本书的修订增补提出了宝贵意见和帮助，特在此一并表示衷心的感谢。

赵智大

2006年5月浙大求是园

第一版前言

本书系根据全国高等学校电力工程专业教学指导委员会制订的《高电压技术课程教学基本要求》和该委员会高压组讨论通过的教材编写大纲编写的，为电力类各专业学生在学习本课程时的教科书。

限于篇幅，本书对电介质击穿的过程、电气设备的具体绝缘结构、高电压试验的实际操作等方面的内容作了较多的压缩，其目的是为了腾出篇幅着重阐述有关的基础理论和基本物理概念，并适当顾及工程应用中的关键问题。

在编写过程中，除了以主编多年来在浙江大学讲授本课程时的讲稿和讲义作为基础外，也参考了国内外不少有关教材和资料，其中主要者列于参考文献中。

本书第一版的参编者有清华大学张仁豫教授（第一章第八节）、西安交通大学邱毓昌教授（第二章第五节）、湖南大学刘炳尧教授（第三章、第四章）。

本书第一版由上海交通大学李福寿教授担任主审，他为了提高书稿质量付出了大量精力和劳动，提出了不少宝贵意见；西安交通大学严璋教授、浙江大学叶蜚誉教授、张守义教授、周浩教授、徐瑞德副教授亦对本书的编写和出版提供了宝贵的支持和帮助。在此向他们表示衷心的感谢。

书中难免有不妥和错误之处，恳请读者给予批评指正。

主 编 者

1998年12月

目 录

| | |
|-------|---|
| 前言 | |
| 第二版前言 | |
| 第一版前言 | |
| 绪论 | 1 |

第一篇 电介质的电气强度

| | |
|------------------------|----|
| 第一章 气体放电的基本物理过程 | 3 |
| 第一节 带电粒子的产生和消失 | 3 |
| 第二节 电子崩 | 8 |
| 第三节 自持放电条件 | 10 |
| 第四节 起始电压与气压的关系 | 11 |
| 第五节 气体放电的流注理论 | 12 |
| 第六节 不均匀电场中的放电过程 | 14 |
| 第七节 放电时间和冲击电压下的气隙击穿 | 20 |
| 第八节 沿面放电和污闪事故 | 24 |
| 第二章 气体介质的电气强度 | 33 |
| 第一节 均匀和稍不均匀电场气隙的击穿特性 | 33 |
| 第二节 极不均匀电场气隙的击穿特性 | 35 |
| 第三节 大气条件对气隙击穿特性的影响及其校正 | 40 |
| 第四节 提高气体介质电气强度的方法 | 41 |
| 第五节 六氟化硫和气体绝缘电气设备 | 45 |
| 第三章 液体和固体介质的电气特性 | 50 |
| 第一节 液体和固体介质的极化、电导和损耗 | 50 |
| 第二节 液体介质的击穿 | 59 |
| 第三节 固体介质的击穿 | 64 |
| 第四节 组合绝缘的电气强度 | 68 |

第二篇 电气设备绝缘试验

| | |
|----------------------|----|
| 第四章 电气设备绝缘预防性试验 | 73 |
| 第一节 绝缘的老化 | 74 |
| 第二节 绝缘电阻、吸收比和泄漏电流的测量 | 76 |
| 第三节 介质损耗角正切的测量 | 81 |

| | | |
|------------|-----------------------|-----------|
| 第四节 | 局部放电的测量 | 85 |
| 第五节 | 电压分布的测量 | 90 |
| 第六节 | 绝缘状态的综合判断 | 91 |
| 第五章 | 绝缘的高电压试验 | 93 |
| 第一节 | 工频高电压试验 | 93 |
| 第二节 | 直流高电压试验 | 97 |
| 第三节 | 冲击高电压试验 | 101 |
| 第四节 | 高电压测量技术 | 109 |

第三篇 电力系统过电压与绝缘配合

| | | |
|------------|---------------------------|------------|
| 第六章 | 输电线路和绕组中的波过程 | 118 |
| 第一节 | 波沿均匀无损单导线的传播 | 119 |
| 第二节 | 行波的折射和反射 | 124 |
| 第三节 | 行波的多次折、反射 | 133 |
| 第四节 | 波在多导线系统中的传播 | 135 |
| 第五节 | 波在有损耗线路上的传播 | 139 |
| 第六节 | 变压器绕组中的波过程 | 141 |
| 第七节 | 旋转电机绕组中的波过程 | 150 |
| 第七章 | 雷电放电及防雷保护装置 | 153 |
| 第一节 | 雷电放电和雷电过电压 | 153 |
| 第二节 | 防雷保护装置 | 162 |
| 第八章 | 电力系统防雷保护 | 182 |
| 第一节 | 架空输电线路防雷保护 | 182 |
| 第二节 | 变电所的防雷保护 | 191 |
| 第三节 | 旋转电机的防雷保护 | 200 |
| 第九章 | 内部过电压 | 205 |
| 第一节 | 切断空载线路过电压 | 206 |
| 第二节 | 空载线路合闸过电压 | 209 |
| 第三节 | 切除空载变压器过电压 | 212 |
| 第四节 | 断续电弧接地过电压 | 214 |
| 第五节 | 有关操作过电压若干总的概念与结论 | 218 |
| 第六节 | 工频电压升高 | 220 |
| 第七节 | 谐振过电压 | 222 |
| 第十章 | 电力系统绝缘配合 | 226 |
| 第一节 | 绝缘配合基本概念 | 226 |
| 第二节 | 中性点接地方式对绝缘水平的影响 | 228 |
| 第三节 | 绝缘配合惯用法 | 229 |
| 第四节 | 架空输电线路的绝缘配合 | 233 |

| | |
|------------------|-----|
| 第五节 绝缘配合统计法····· | 237 |
|------------------|-----|

第四篇 新输电系统所推进的高电压技术

| | |
|------------------------------|-----|
| 第十一章 特高压交流输电····· | 239 |
| 第一节 超高压和特高压的特征····· | 240 |
| 第二节 特高压交流输电的功能与优点····· | 241 |
| 第三节 国外特高压交流输电发展概况····· | 243 |
| 第四节 我国发展特高压交流输电的必要性与可行性····· | 245 |
| 第五节 特高压交流架空线路和输变电设备的特点····· | 247 |
| 第六节 特高压交流输电中的若干高电压技术问题····· | 253 |
| 第十二章 直流输电中的高电压技术····· | 263 |
| 第一节 直流输电系统概述····· | 265 |
| 第二节 直流输电中的高电压技术问题示例····· | 271 |
| 第三节 直流电晕与直流电场效应····· | 271 |
| 第四节 高压直流架空线路的绝缘····· | 275 |
| 第五节 高压直流电缆线路的绝缘····· | 279 |
| 第六节 直流输电系统中的过电压及其防护····· | 283 |
| 第七节 直流输电线路和换流站的绝缘配合····· | 292 |
| 第八节 回流电路和直流接地极····· | 299 |
| 第九节 特高压直流输电的发展现状和前景····· | 305 |
| 附录····· | 308 |
| 附录一 标准球隙放电电压表····· | 308 |
| 附录二 阀式避雷器电气特性····· | 311 |
| 习题····· | 314 |
| 参考文献····· | 325 |

绪 论

高电压技术的发展始于 20 世纪初期，至今已成为电工学科的一个重要分支，它主要研讨高电压（强电场）下的各种电气物理问题。

高电压技术的进展始终与大功率远距离输电的需求密切相关，现代交流电力系统的输电电压早已由高压（HV）提高到超过 220kV 的超高压（EHV），发展到 20 世纪 90 年代，世界上最高的交、直流输电电压已分别达到 750kV（735kV 和 765kV 亦属同一等级）和 ± 600 kV。我国作为装机容量和年发电量均居世界第二位的电力大国，也已建成规模巨大的 500kV 交流输电系统，更于 2005 年在西北地区（其原有交流输电系统的电压为 330kV）建成我国第一条 750kV 输电线路；而在直流输电方面，我国原来就以建成投运多条 ± 500 kV 直流输电线路而领先世界。但是，由于国土辽阔、经济规模巨大、动力资源与用电中心相距遥远，我国还是世界上少数几个有必要发展 1000kV 或更高的特高压交流（UHVAC）和 ± 800 kV 或更高的特高压直流（UHVDC）输电技术的国家之一。2005 年，我国开始了规模宏大的特高压交、直流输电技术的研发和工程实践，至今已建成投运两座世界一流的特高压试验研究基地，一项 1000kV 特高压交流输电试验工程，三条 ± 800 kV 特高压直流输电线路，并且还有若干特高压交、直流输电工程正在建设中。我国已成为世界上交、直流输电电压最高、输送容量最大、送电距离最远的输电大国。

对于电力类专业的学生来说，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。电力系统的设计、建设和运行都要求工程技术人员在各种电介质和绝缘结构的电气特性、电力系统中的过电压及其防护措施、绝缘的高电压试验等方面具有必要的知识，这些问题彼此密切相关，一起构成了高电压技术的主体内容。为了说明电力系统与高电压技术的密切关系，不妨以高压架空输电线路的设计为例，在图 0-1 中列出种种与高电压技术直接相关的工程问题。

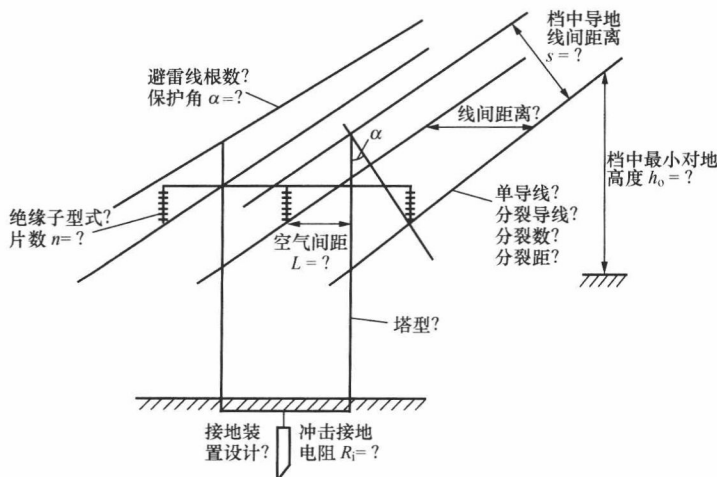


图 0-1 高压架空输电线路设计中的高电压技术问题

事实上,在目前电气类专业的教学计划中,《高电压技术》是唯一研讨电力系统过电压和绝缘问题的一门课程,而且本课程的有些部分(例如电介质的电气特性、分布参数电路中的行波理论等)还具有专业基础知识的性质,实属强电方面各个专业学生知识结构中不可或缺的组成部分。

另一方面,也应指出:从20世纪60年代开始,高电压技术加强了与其他学科的相互渗透和联系,在这个过程中,高电压技术一方面不断汲取其他科技领域的新成果,促进了自身的更新和发展;另一方面也使高电压技术方面的新进展、新方法更广泛地应用到诸如大功率脉冲技术、激光技术、核物理、等离子体物理、生态与环境保护、生物学、医学、高压静电工业应用等科技领域,显示出强大的活力和潜力。

第一篇 电介质的电气强度

电介质在电气设备中是作为绝缘材料使用的，按其物质形态，可分为气体介质、液体介质和固体介质。不过在实际绝缘结构中所采用的往往是由几种电介质联合构成的组合绝缘，例如电气设备的外绝缘往往由气体介质（空气）和固体介质（绝缘子）联合组成，而内绝缘则较多地由固体介质和液体介质联合组成。

一切电介质的电气强度都是有限的，超过某种限度，电介质就会逐步丧失其原有的绝缘性能，甚至演变成导体。

在电场的作用下，电介质中出现的电气现象可分为两大类：

- (1) 在弱电场下（当电场强度比击穿场强小得多时），主要是极化、电导、介质损耗等；
- (2) 在强电场下（当电场强度等于或大于放电起始场强或击穿场强时），主要有放电、闪络、击穿等。

第一章 气体放电的基本物理过程

绝大多数电气设备都在不同程度上以不同的形式利用气体介质作为绝缘材料。大自然为我们免费提供了一种相当理想的气体介质——空气。架空输电线路各相导线之间、导线与地线之间、导线与杆塔之间的绝缘都利用了空气；高压电气设备的外绝缘也利用着空气。

在空气断路器中，压缩空气被用作绝缘媒质和灭弧媒质。在某些类型的高压电缆（充气电缆）和高压电容器中，特别是在现代的气体绝缘组合电器（GIS）中，更采用压缩的高电气强度气体（例如 SF_6 ）作为绝缘。

假如气体中不存在带电粒子，气体是不导电的。但实际上，由于外界电离因子（宇宙线和地下放射性物质的高能辐射线等）的作用，地面大气层的空气中不可避免地存在一些带电粒子（每立方厘米体积内约有 500~1000 对正、负带电粒子），但即使如此，空气仍不失为相当理想的电介质（电导很小、介质损耗很小、且仍有足够的电气强度）。

在一定条件下，气体中也会出现放电现象，甚至完全丧失其作为电介质而具有的绝缘特性。在本课程中，研究气体放电的主要目的为：①了解气体在高电压（强电场）的作用下逐步由电介质演变成导体的物理过程；②掌握气体介质的电气强度及其提高的方法。

第一节 带电粒子的产生和消失

为了说明气体放电过程，首先必须了解气体中带电粒子产生、运动、消失的过程和条件。

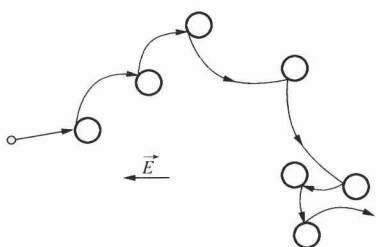


图 1-1 电子在有电场的
气体中的运动轨迹

一、带电粒子在气体中的运动

(一) 自由行程长度

当气体中存在电场时, 其中的带电粒子将具有复杂的运动轨迹, 它们一方面与中性的气体粒子(原子或分子)一样, 进行着混乱热运动, 另一方面又将沿着电场作定向漂移(见图 1-1)。

各种粒子在气体中运动时都会不断地互相碰撞, 任一粒子在 1cm 的行程中所遭遇的碰撞次数与气体分子的半径和密度有关。单位行程中的碰撞次数 Z 的倒数 λ 即

为该粒子的平均自由行程长度。

实际的自由行程长度是一个随机量, 并具有很大的分散性。粒子的自由行程长度等于或大于某一距离 x 的概率为

$$P(x) = e^{-x/\lambda} \quad (1-1)$$

可见, 实际自由行程长度等于或大于平均自由行程长度 λ 的概率为 36.8%。

由于电子的半径或体积要比离子或气体分子小得多, 所以电子的平均自由行程长度要比离子或气体分子大得多。由气体动力学可知, 电子的平均自由行程长度为

$$\lambda_e = \frac{1}{\pi r^2 N} \quad (1-2)$$

式中 r ——气体分子的半径;

N ——气体分子的密度。

由于 $N = \frac{p}{kT}$, 代入式 (1-2) 即得

$$\lambda_e = \frac{kT}{\pi r^2 p} \quad (1-3)$$

式中 p ——气压, Pa;

T ——气温, K;

k ——波尔茨曼常数, $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 。

在大气压和常温下, 电子在空气中的平均自由行程长度的数量级为 10^{-5} cm 。

(二) 带电粒子的迁移率

带电粒子虽然不可避免地要与气体分子不断地发生碰撞, 但在电场力的驱动下, 仍将沿着电场方向漂移, 其速度 v 与场强 E 成正比, 其比例系数 $k = v/E$ 称为迁移率, 它表示该带电粒子在单位场强 (1V/m) 下沿电场方向的漂移速度。

由于电子的平均自由行程长度比离子大得多, 而电子的质量比离子小得多, 更易加速, 所以电子的迁移率远大于离子。

(三) 扩散

气体中带电粒子和中性粒子的运动还与粒子的浓度有关。在热运动的过程中, 粒子会从浓度较大的区域运动到浓度较小的区域, 从而使每种粒子的浓度分布均匀化, 这种物理过程称为扩散。气压越低或温度越高, 则扩散进行得越快。电子的热运动速度大、自由行程长度大, 所以其扩散速度也要比离子快得多。

二、带电粒子的产生

产生带电粒子的物理过程称为电离，它是气体放电的首要前提。

气体原子中的电子沿着原子核周围的圆形或椭圆形轨道围绕带正电的原子核旋转。在常态下，电子处于离核最近的轨道上，因为这样势能最小。当原子获得外加能量时，一个或若干个电子有可能转移到离核较远的轨道上去，这个现象称为激励，产生激励所需的能量（激励能）等于该轨道和常态轨道的能级差。激励状态存在的时间很短（例如 10^{-8} s），电子将自动返回常态轨道上去，这时产生激励时所吸收的外加能量将以辐射能（光子）的形式放出。如果原子获得的外加能量足够大，电子还可跃迁至离核更远的轨道上去，甚至摆脱原子核的约束而成为自由电子，这时原来中性的原子发生了电离，分解成两种带电粒子——电子和正离子，使基态原子或分子中结合最松弛的那个电子电离出来所需的最小能量称为电离能。

表 1-1 列出了某些常见气体的激励能和电离能之值，它们通常以电子伏（eV）表示。由于电子的电荷 q_e 恒等于 1.6×10^{-19} C，所以有时亦可采用激励电位 U_e (V) 和电离电位 U_i (V) 来代替激励能和电离能，以便在计算中排除 q_e 值。

表 1-1 某些气体的激励能和电离能

| 气体 | 激励能 W_e (eV) | 电离能 W_i (eV) | 气体 | 激励能 W_e (eV) | 电离能 W_i (eV) |
|----------------|----------------|----------------|------------------|----------------|----------------|
| N ₂ | 6.1 | 15.6 | CO ₂ | 10.0 | 13.7 |
| O ₂ | 7.9 | 12.5 | H ₂ O | 7.6 | 12.8 |
| H ₂ | 11.2 | 15.4 | SF ₆ | 6.8 | 15.6 |

引起电离所需的能量可通过不同的形式传递给气体分子，诸如光能、热能、机械（动）能等，对应的电离过程称为光电离、热电离、碰撞电离等。

（一）光电离

频率为 ν 的光子能量为

$$W = h\nu \quad (1-4)$$

式中 h ——普朗克常数， $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J·s = 4.13×10^{-15} eV·s。

发生空间光电离的条件应为

$$h\nu \geq W_i$$

或者

$$\lambda \leq \frac{hc}{W_i} \quad (1-5)$$

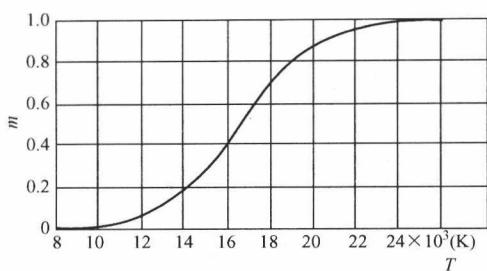
式中 λ ——光的波长，m；

c ——光速 = 3×10^8 m/s；

W_i ——气体的电离能，eV。

通过式（1-5）的计算可知，各种可见光都不能使气体直接发生光电离，紫外线也只能使少数几种电离能特别小的金属蒸汽发生光电离，只有那些波长更短的高能辐射线（例如 X 射线、 γ 射线等）才能使气体发生光电离。

应该指出：在气体放电中，能导致气体光电离的光源不仅有外界的高能辐射线，而且还可能是气体放电本身，例如在后面将要介绍的带电粒子复合的过程中，就会放出辐射能而引起新的光电离。

图 1-2 空气的电离度 m 与温度 T 的关系曲线

(二) 热电离

在常温下, 气体分子发生热电离的概率极小。

气体中已发生电离的分子数与总分子数的比值 m 称为该气体的电离度。图 1-2 是空气的电离度与温度的关系曲线, 可以看出: 只有在温度超过 $10\ 000\text{K}$ 时 (例如电弧放电的情况), 才需要考虑热电离; 而在温度达到 $20\ 000\text{K}$ 左右时, 几乎全部空气分子都已处于热电离状态。

(三) 碰撞电离

在电场中获得加速的电子在和气体分子碰撞时, 可以把自己的动能转给后者而引起碰撞电离。

电子在电场强度为 E 的电场中移过 x 的距离时所获得的动能为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = q_e Ex$$

式中 m ——电子的质量;

q_e ——电子的电荷量。

如果 W 等于或大于气体分子的电离能 W_i , 该电子就有足够的能量去完成碰撞电离。由此可以得出电子引起碰撞电离的条件应为

$$q_e Ex \geq W_i \quad (1-6)$$

电子为造成碰撞电离而必须飞越的最小距离 $x_i = \frac{W_i}{q_e E} = \frac{U_i}{E}$ (式中 U_i 为气体的电离电位, 在数值上与以 eV 为单位的 W_i 相等), x_i 的大小取决于场强 E , 增大气体中的场强将使 x_i 值减小, 可见提高外加电压将使碰撞电离的概率和强度增大。

碰撞电离是气体中产生带电粒子的最重要的方式。应该强调的是, 主要的碰撞电离均由电子完成, 离子碰撞中性分子并使之电离的概率要比电子小得多, 所以在分析气体放电发展过程时, 往往只考虑电子所引起的碰撞电离。

(四) 电极表面的电离

除了前面所说的发生在气体中的空间电离外, 气体中的带电粒子还可能来自电极表面上的电离。

电子从金属表面逸出需要一定的能量, 称为逸出功。各种金属的逸出功是不同的, 如表 1-2 所示。

表 1-2

某些金属的逸出功

| 金属 | 逸出功 (eV) | 金属 | 逸出功 (eV) | 金属 | 逸出功 (eV) |
|--------|----------|--------|----------|-----------|----------|
| 铝 (Al) | 1.8 | 铁 (Fe) | 3.9 | 氧化铜 (CuO) | 5.3 |
| 银 (Ag) | 3.1 | 铜 (Cu) | 3.9 | 铯 (Cs) | 0.7 |

将表 1-2 与表 1-1 作比较, 就可看出: 金属的逸出功要比气体分子的电离能小得多, 这表明金属表面电离比气体空间电离更易发生。在不少场合, 阴极表面电离 (亦可称电子发射) 在气体放电过程中起着相当重要的作用。随着外加能量形式的不同, 阴极的表面电离可

在下列情况下发生：

(1) 正离子撞击阴极表面：正离子所具有的能量为其动能与势能之和，其势能等于气体的电离能 W_i 。通常正离子的动能不大，如忽略不计，那么只有在它的势能等于或大于阴极材料的逸出功的两倍时，才能引起阴极表面的电子发射，因为首先要从金属表面拉出一个电子使之和正离子结合成一个中性分子，正离子才能释放出全部势能而引起更多的电子从金属表面逸出。比较一下表 1-1 与表 1-2 中的数据，不难看出，这个条件是可能满足的。

(2) 光电子发射：高能辐射线照射阴极时，会引起光电子发射，其条件是光子的能量应大于金属的逸出功。由于金属的逸出功要比气体的电离能小得多，所以紫外线已能引起阴极的表面电离。

(3) 热电子发射：金属中的电子在高温下也能获得足够的动能而从金属表面逸出，称为热电子发射。在许多电子和离子器件中常利用加热阴极来实现电子发射。

(4) 强场发射（冷发射）：当阴极表面附近空间存在很强的电场时（ 10^6 V/cm 数量级），也能使阴极发射电子。一般常态气隙的击穿场强远小于此值，所以在常态气隙的击穿过程中完全不受强场发射的影响；但在高压下、特别是在压缩的高电气强度气体的击穿过程中，强场发射也可能会起一定的作用；而在真空的击穿过程中，它更起着决定性作用。

三、负离子的形成

当电子与气体分子碰撞时，不但有可能引起碰撞电离而产生出正离子和新电子，而且也可能发生电子与中性分子相结合而形成负离子的情况，这种过程称为附着。

某些气体分子对电子有亲合性，因而在它们与电子结合成负离子时会放出能量（电子亲合能），而另一些气体分子要与电子结成负离子时必须吸收能量。前者的亲合能为正值，这些易于产生负离子的气体称为电负性气体。亲合性愈强的气体分子愈易俘获电子而变成负离子。

应该指出：负离子的形成并没有使气体中的带电粒子数改变，但却能使自由电子数减少，因而对气体放电的发展起抑制作用。空气中的氧气和水汽分子对电子都有一定的亲合性，但还不是太强；而后面将要介绍的某些特殊的电负性气体（例如 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，因而被称为高电气强度气体。

四、带电粒子的消失

气体中带电粒子的消失可有下列几种情况：

(1) 带电粒子在电场的驱动下作定向运动，在到达电极时，消失于电极上而形成外电路中的电流；

(2) 带电粒子因扩散现象而逸出气体放电空间；

(3) 带电粒子的复合。

当气体中带异号电荷的粒子相遇时，有可能发生电荷的传递与中和，这种现象称为复合，它是与电离相反的一种物理过程。复合可能发生在电子和正离子之间，称为电子复合，其结果是产生了一个中性分子；复合也可能发生在正离子和负离子之间，称为离子复合，其结果是产生了两个中性分子。上述两种复合都会以光子的形式放出多余的能量，这种光辐射在一定条件下能导致其他气体分子的电离，使气体放电出现跳跃式的发展。

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，则复合也进行得越激烈。每立方厘米的常态空气中经常存在着 500~1000 对正、负带电粒子，它们是外界电离因

子（高能辐射线）使空气分子发生电离和产生出来的正、负带电粒子又不断地复合所达到的一种动态平衡。

第二节 电子崩

气体放电的现象和发展规律与气体的种类、气压的大小、气隙中的电场型式、电源容量等一系列因素有关。无论何种气体放电都一定有一个电子碰撞电离导致电子崩的阶段，它在所加电压（电场强度）达到某一数值（例如图 1-3 中的 U_b ）时开始出现。

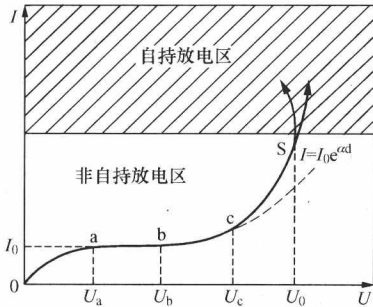


图 1-3 气体放电的伏安特性曲线

前面已经提到，各种高能辐射线（外界电离因子）会引起阴极的表面光电离和气体中的空间光电离，从而使空气中存在一定浓度的带电粒子。因而在气隙的两端电极上施加电压时，即可检测到微小的电流。图 1-3 表示实验所得的平板电极间（均匀电场）气体中的电流 I 与所加电压 U 的关系（伏安特性）曲线。在曲线的 $0a$ 段， I 随 U 的提高而增大，这是由于电极空间的带电粒

子向电极运动的速度加快而导致复合数的减少所致。当电压接近 U_a 时，电流趋于饱和值 I_0 ，因为这时由外界电离因子所产生的带电粒子几乎能全部抵达电极，所以电流值仅取决于电离因子的强弱而与所加电压的大小无关。饱和电流 I_0 之值很小，在没有人工照射的情况下，电流密度的数量级仅为 10^{-19} A/cm^2 ，即使采用石英灯照射阴极，其数量级也不会超过 10^{-12} A/cm^2 ，可见这时气体仍处于良好的绝缘状态。但当电压提高到 U_b 时，电流又开始随电压的升高而增大，这是由于气隙中开始出现碰撞电离和电子崩。电子崩的形成和带电粒子在电子崩中的分布如图 1-4 所示，设外界电离因子在阴极附近产生了一个初始电子，如果空间的电场强度足够大，该电子在向阳极运动时就会引起碰撞电离，产生出一个新电子，初始电子和新电子继续向阳极运动，又会引起新的碰撞电离，产生出更多的电子。依此类推，电子数将按几何级数不断增多，像雪崩似地发展，因而这种急剧增大的空间电子流被称为电子崩。

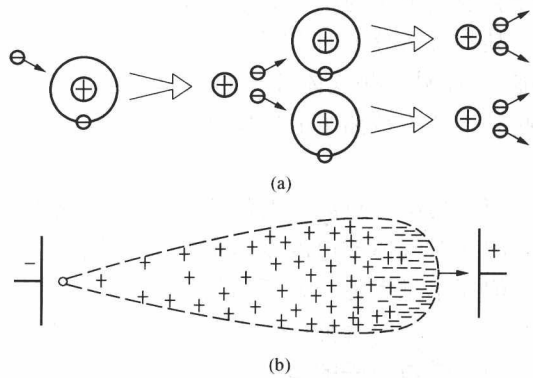


图 1-4 电子崩示意图

(a) 电子崩的形成；(b) 带电粒子在电子崩中的分布

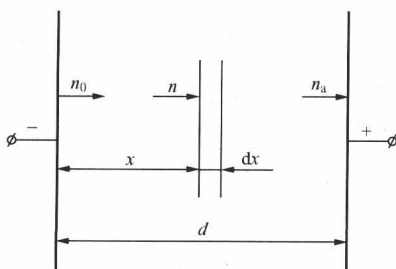


图 1-5 均匀电场中的电子崩计算

为了分析碰撞电离和电子崩所引起的电流，需要引入一个系数——电子碰撞电离系数 α ，它表示一个电子沿电场方向运动 1cm 的行程中所完成的碰撞电离次数平均值。在图 1-5 所示的平板电极（均匀电场）气隙中，设外界电离因子每秒钟使阴极表面发射出来