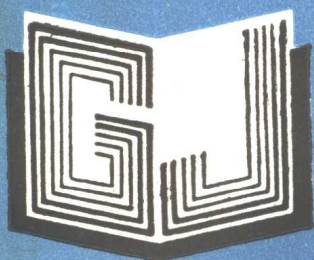


974534

TW3  
15066



高等学校教材



# 高电压技术

## 电力系统绝缘与过电压

[苏]B.И.拉里昂诺夫 主编

浙江大学 赵智大 东南大学 周泽存 北京农业工程大学 郭喜庆 合译



高等学校教材

高电压技术

[苏]B.B.巴祖特金 B.П.拉里昂诺夫 Ю.С.宾塔 编著

[苏]B.П.拉里昂诺夫 主编

浙江大学 赵智大 东南大学 周泽存 北京农业工程大学 郭喜庆 合译

水利电力出版社

(京)新登字115号

**内 容 提 要**

本书介绍、探讨了电介质中的基本电气物理过程,电气装置内、外绝缘的基本电气特性,雷电过电压及其防护,内部过电压及其限制,输电线路和主要电气设备的绝缘结构与绝缘试验等内容。原书经苏联高等与中等专业教育部批准为高等学校电力类专业学生的教科书。

**В. В. Базуткин, В. П. Ларионов, Ю. С. Пингал**

(Под общей редакцией В. П. Ларионова)

**ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ**

**Изоляция и перенапряжения в**

**электрических системах**

**Москва Энергоатомиздат 1986**

**高等学校教材**

**高 电 压 技 术**

**电力系统绝缘与过电压**

**〔苏〕В. П. 拉里昂诺夫 主编**

**浙江大学 赵智大 东南大学 周泽存 北京农业工程大学 郭喜庆 合译**

**水利电力出版社出版**

(北京三里河路6号)

**新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售**

**北京樱花印刷厂印刷**

**787×1092毫米 16开本 16.75印张 374千字**

**1994年6月第一版 1994年6月北京第一次印刷**

**印数0001—1980册**

**ISBN 7-120-00807-2/TM·511**

**定价7.75元**

## 译者序

我国在50年代和60年代初期曾先后翻译出版了苏联莫斯科动力学院Л. И. 西洛琴斯基教授主编的一套高压教材(《高压工程》第一卷: 气体放电、高压测量、高压试验设备, 电力工业出版社; 第二卷: 高压绝缘, 水利电力出版社; 第三卷第一册: 电力系统波过程和内部过电压, 中国工业出版社)。这一套教材篇幅巨大、内容丰富, 尽管有些部分作为教材使用不尽合适, 但是应该承认, 它对高电压技术在我国的发展和我国高压工作者的培养与成长都曾起过一定的作用。

1963年苏联又出版了莫斯科动力学院Л. В. 拉泽维格教授主编的新一轮教材, 它在许多方面作了改进, 更适合作为高校教材使用。1976年, 这一轮教材曾修订再版了一次。到1986年, 改由该学院В. П. 拉里昂诺夫教授主编的第三版问世, 和前两版相比, 这本教材取材更加精练, 篇幅进一步压缩, 内容更新较多, 注意反映这一领域的新要求、新成就, 特别是它更加适应电力类专业的教学要求, 这一点在本书的副题——电力系统绝缘与过电压中也得到明确的反映。原书经苏联高等与中等专业教育部审定作为高等学校电力类专业本科生的教科书。

对近年来各国出版的高压教材进行综合比较后, 我国高校电力类专业教学委员会高电压技术教学组决定将本书译成中文, 作为引进教材出版。它可供电力系统及其自动化、高电压技术及设备、电气绝缘及电缆技术、电机、电器等专业的学生作为参考教材使用, 也可供有关的科技人员参考。

本书由浙江大学赵智大(前言、绪论、第一~九章、第十五~十七章、第三十三~三十四章)、东南大学周泽存(第二十~三十章)、北京农业工程大学郭喜庆(第十~十四章、第十八~十九章、第三十一~三十二章)分工译出, 由赵智大负责统稿。全部译稿承上海交通大学李福寿教授审校, 对于他为此而付出的巨大精力与劳动, 译者谨致衷心的感谢。

译者

1992年10月

EAB09/10

## 原主编为中文版写的序

这本高电压技术教科书被译成中文出版，体现了苏中两国学者、专家之间的传统友谊与合作。

中国在五、六十年代曾翻译出版过我的老师Л. И. 西洛琴斯基教授主编的教科书，而本书则反映了为苏联高等学校电力类与电工类专业学生讲授高电压技术的现代水平。

本书的特点是赋予电力系统中雷电过电压与内部过电压发生与发展的条件、限制方法及其对绝缘的电气作用的量值以重大的意义，因为电气设备绝缘结构的电气特性必须和受到保护装置限制的过电压相适应，以保证它们的可靠运行。

这种处理方法和许多西方国家的高电压技术教材有所不同，后者对电气设备绝缘在运行中受到的电气作用的本质往往注意不够。

本书偏重于介绍现象的物理本质、解决实际问题的基本思路与方法，而把电气设备的具体结构特点及其运行条件的介绍压缩到最低限度。

十分感谢赵智大教授及其他中国同行们将本书译成中文并在中国出版。我衷心地希望它将对中国的大学生、教师和工程技术人员有所裨益。

技术科学博士、教授

В. П. 拉里昂诺夫

1990年6月12日于莫斯科

# 前 言

现代的高电压技术是一门研究在极强的电磁作用（高电压与大电流）下的物质特性和其中的各种过程及其工业应用的科学。高电压技术的主要部分之一是高压电气设备绝缘结构的性质与特性，以及它们在工作电压、雷电过电压和内部过电压作用下可靠运行的条件。

《高电压技术》是教学计划中综合研讨电力系统中绝缘结构运行问题的唯一课程，因而它是全部电力类与电工类专业的基础课程之一。

第三版教科书的材料是在考虑高电压技术最新成就的情况下重新编写的，其内容完全符合1984年批准的本课程教学大纲。

本书的编写分工如下：B. П. 拉里昂诺夫编写了绪论、第一、四~九、十一、十五~十七、十九、二十、二十五、三十、三十一章；Ю. С. 宾塔编写了第二、三、十、十四、十八、三十二、三十三章；B. B. 巴祖特金编写了第二十六~二十九章；此外，第二十一~二十四章由B. П. 拉里昂诺夫与B. B. 巴祖特金合写；第十二与十三章由B. П. 拉里昂诺夫与Ю. С. 宾塔合写；第三十四章由Ю. С. 宾塔和Ю. Г. 谢尔盖耶夫合写。

作者感谢本书的评审者——列宁格勒工业大学高电压技术教研室主任、苏联科学院通讯院士M. B. 柯斯坚科及其同事Г. С. 库钦斯基教授，B. E. 基泽维捷尔副教授和Ф. X. 哈利洛夫副教授，他们仔细地审阅了书稿，并提出了很有益的建议与意见。对于在本书的编辑加工中付出巨大劳动的M. B. 索科洛夫副博士也谨致谢意。

一切为改进本书而提出的意见与要求均请寄给动力原子能出版社：113114，莫斯科，M-114，什柳佐夫堤岸街10号。

作 者

# 目 录

译者序	
原主编为中文版写的序	
前 言	
绪 论(摘译).....	1

## 第一篇 电介质中电气物理过程的基本知识

第一章 气体中的电气物理过程 .....	3
第一节 带电粒子在气体中的运动 .....	3
第二节 气体中带电粒子的产生与消失 .....	6
第三节 电子崩与放电自持条件 .....	11
第二章 电介质的电导 .....	15
第一节 概述 .....	15
第二节 液体介质的电导 .....	15
第三节 固体介质的电导 .....	17
第三章 电介质的极化·介质损耗.....	19
第一节 概述 .....	19
第二节 弛豫极化 .....	20
第三节 介质损耗 .....	22

## 第二篇 电气装置外绝缘的基本性质与电气特性

第四章 外绝缘的一般特性.....	24
第一节 作为电介质的大气 .....	24
第二节 绝缘子的用途与类型 .....	24
第三节 外绝缘试验的种类与条件 .....	28
第五章 直流和交流电压下空气间隙中的放电 .....	31
第一节 均匀电场间隙中放电的发展与击穿电压 .....	31
第二节 不均匀电场间隙放电发展过程与起始电压 .....	33
第六章 雷电与操作冲击波下空气间隙的放电 .....	39
第一节 放电时间和空气间隙的伏秒特性 .....	39
第二节 长空气间隙中的放电 .....	41
第七章 沿绝缘子表面的空气放电 .....	45
第一节 绝缘子结构特点对闪络电压的影响 .....	45
第二节 在不利的大气条件下绝缘子放电的发展与闪络电压 .....	47
第八章 大气特性对电气装置外绝缘放电电压的影响 .....	51
第一节 在确定放电电压和试验电压时对大气条件的考虑 .....	51
第二节 外绝缘电气强度在运行条件下的降低 .....	52

第九章 电气装置外绝缘中的电场调整 .....	54
第一节 屏蔽的应用 .....	54
第二节 绝缘结构中电压的强制分布 .....	57
第三节 屏障的应用 .....	58

### 第三篇 电气设备内绝缘的基本类型与电气特性

第十章 内绝缘的一般性质 .....	59
第一节 内绝缘的定义 .....	59
第二节 内绝缘电气强度与电压作用时间的关系 .....	60
第三节 自恢复绝缘与非自恢复绝缘 .....	62
第四节 热、机械及其他作用因素对内绝缘的影响 .....	62
第十一章 液体和固体介质在电压短时作用下的击穿 .....	64
第一节 液体介质的击穿 .....	64
第二节 油中沿固体介质表面的放电 .....	65
第三节 固体介质的击穿 .....	66
第十二章 内绝缘的基本类型 .....	68
第一节 内绝缘中介质材料的组合 .....	68
第二节 油—屏障绝缘 .....	69
第三节 固体绝缘 .....	70
第四节 油纸绝缘 .....	73
第五节 气体和真空绝缘 .....	74
第十三章 内绝缘中的电场调整 .....	79
第一节 绝缘的分阶 .....	79
第二节 电容极板的应用 .....	80
第三节 半导体覆盖层的应用 .....	81
第十四章 内绝缘的短时电气强度 .....	83
第一节 内绝缘的容许电压 .....	83
第二节 影响内绝缘短时电气强度的因素 .....	84

### 第四篇 绝缘结构在工作电压下的运行

第十五章 电力系统的工作电压 .....	87
第十六章 架空输电线路导线上的电晕放电 .....	89
第一节 电晕放电及其特性 .....	89
第二节 输电线路导线上的电晕放电 .....	91
第三节 局部电晕的能量损耗 .....	94
第四节 电晕放电的生态影响 .....	95
第十七章 绝缘子在表面污染受潮情况下的运行 .....	98
第一节 大气的污秽程度 .....	98
第二节 按大气污秽程度选择绝缘子 .....	98
第三节 提高绝缘子工作可靠性的运行措施 .....	100
第十八章 内绝缘的长期电气强度 .....	102
第一节 内绝缘老化的类型 .....	102



第二节	内绝缘电老化的一般规律 .....	102
第三节	内绝缘气泡中的局部放电 .....	103
第四节	局部放电强度的测量 .....	106
第五节	油—纸绝缘和油—屏障绝缘中的局部放电 .....	108
第六节	内绝缘的热老化 .....	109
第七节	绝缘在机械荷载下的老化 .....	110
第八节	作为内绝缘老化形式的受潮 .....	111
第九节	内绝缘的容许工作荷载 .....	111
<b>第十九章</b>	<b>内绝缘预防性检验方法 .....</b>	<b>114</b>
第一节	运行中绝缘预防性试验的意义 .....	114
第二节	利用吸收现象检验绝缘 .....	114
第三节	按介质损耗角正切检验绝缘质量 .....	116
第四节	按局部放电强度检验绝缘 .....	117
第五节	用高电压检验绝缘 .....	118

## 第五篇 雷电过电压和电气设备的防雷保护

<b>第二十章</b>	<b>雷电——雷电过电压的根源 .....</b>	<b>120</b>
第一节	雷电的发展 .....	120
第二节	雷电的电气特性 .....	121
第三节	雷电活动特性 .....	124
第四节	球形雷 .....	125
<b>第二十一章</b>	<b>避雷装置 .....</b>	<b>126</b>
第一节	避雷装置的作用原理 .....	126
第二节	避雷装置的保护范围 .....	127
第三节	避雷装置的接地 .....	128
第四节	雷电流安全通过避雷装置的条件 .....	131
第五节	避雷装置的实际结构 .....	132
<b>第二十二章</b>	<b>保护电器和保护装置 .....</b>	<b>133</b>
第一节	概述 .....	133
第二节	保护间隙 .....	133
第三节	管式避雷器 .....	134
第四节	阀式避雷器 .....	136
第五节	非线性过电压限制器 .....	142
<b>第二十三章</b>	<b>架空输电线路的防雷保护 .....</b>	<b>144</b>
第一节	架空线路防雷保护的一般原则 .....	144
第二节	无避雷线线路的耐雷性能 .....	145
第三节	有避雷线线路的耐雷性能 .....	148
第四节	管式避雷器用于架空线路防雷 .....	153
<b>第二十四章</b>	<b>变电站的防雷保护 .....</b>	<b>155</b>
第一节	变电站的直击雷防护 .....	155
第二节	入侵变电站的雷电过电压波的参数 .....	156
第三节	变电站电气设备对于入侵雷电过电压的保护原则 .....	157

第四节	被保护电气设备绝缘的容许电压 .....	159
第五节	变电站进线保护段长度的决定 .....	160
第六节	变电站电气设备保护的有效性 .....	161
第七节	不同电压等级变电站的防雷特点 .....	162
第八节	电机的防雷保护 .....	163
第二十五章	按雷电过电压水平进行电气设备的绝缘配合与绝缘试验 .....	166
第一节	雷电冲击试验电压 .....	166
第二节	冲击电压发生器和绝缘的雷电冲击试验方法 .....	167

## 第六篇 电力系统内部过电压及其限制

第二十六章	操作过电压的一般特性 .....	170
第一节	概述 .....	170
第二节	作为随机事件的过电压 .....	170
第二十七章	操作时的过渡过程过电压 .....	173
第一节	空载线路合闸过电压 .....	173
第二节	自动重合闸过电压 .....	176
第三节	开断电容器组和空载线路时的过电压 .....	179
第四节	开断大电流时的过电压 .....	182
第五节	开断小电感电流时的过电压 .....	184
第六节	断续接地过电压 .....	187
第二十八章	操作过电压的限制 .....	194
第一节	操作过电压防护的基本原则 .....	194
第二节	用阀式避雷器和断路器中的电阻器来限制过电压 .....	195
第二十九章	输电系统中的稳态过电压 .....	200
第一节	开路线路末端的电压升高 .....	200
第二节	短路时的稳态过电压 .....	207
第三节	非全相状态下的工频过电压 .....	210
第四节	铁磁谐振过电压 .....	213
第五节	铁磁谐振过电压的实例 .....	215
第六节	变压器饱和对中性点接地系统中电压升高的影响 .....	217
第七节	输电系统中的高次和低次谐波 .....	218
第三十章	按内部过电压水平进行电气设备的绝缘试验与绝缘配合 .....	221
第一节	操作冲击试验电压 .....	221
第二节	工频试验电压 .....	221
第三节	试验变压器和绝缘的工频电压试验方法 .....	223
第四节	操作冲击波的产生和绝缘试验 .....	225

## 第七篇 输电线路和主要电气设备的绝缘

第三十一章	架空输电线路和户外配电装置的绝缘 .....	226
第一节	架空输电线路杆塔上的绝缘 .....	226
第二节	木杆线路绝缘的特点 .....	228

第三节	架空线路在档距中的绝缘距离 .....	229
第四节	配电装置中的绝缘距离 .....	230
第五节	超高压线路和变电站的空气间隙在操作冲击波下的电气强度 .....	231
第六节	架空线路和配电装置的生态影响 .....	232
<b>第三十二章</b>	<b>高压电缆线路</b> .....	<b>234</b>
第一节	概述 .....	234
第二节	高压电缆的基本结构 .....	234
第三节	电缆绝缘试验 .....	238
<b>第三十三章</b>	<b>变压器的绝缘</b> .....	<b>239</b>
第一节	变压器绝缘的分类与特点 .....	239
第二节	变压器的绝缘结构 .....	240
第三节	变压器的绝缘试验 .....	240
第四节	变压器绝缘的运行 .....	242
<b>第三十四章</b>	<b>配电装置电气设备的绝缘</b> .....	<b>244</b>
第一节	电流互感器的绝缘 .....	244
第二节	油断路器的绝缘 .....	245
第三节	空气断路器的绝缘 .....	246
第四节	封闭配电装置的绝缘 .....	246
第五节	高压套管的绝缘 .....	248
第六节	电力电容器的绝缘 .....	251
第七节	高压电机的绝缘 .....	254
参考文献(略)	.....	256

# 绪 论

(摘 译)<sup>①</sup>

在苏联的电力事业发展过程中,采用高电压来远距离输送电能占有重要的地位。到1986年,苏联高压电网(额定电压35~330kV)的总长度已超过70万km,而超高压(500kV与750kV)输电线路的总长度约为3万km,第一段1150kV特高压输电线路也已投入运行。发电站内安装的汽轮发电机单机容量已增大到1000~1200MW,而水轮发电机为500~640MW。单座火力发电站的装机容量已达3800MW,原子能发电站为3000MW,水力发电站为6000MW。

在电力这样高度集中的情况下,输电线路和所有成套设备(发电机、变压器、操作电器、补偿装置等)的运行可靠性具有很重要的意义。电力系统和电气设备的绝缘在一切长期作用和短时出现的电压下的可靠运动将能在很大的程度上保证上述问题的解决。

电气装置的绝缘可分为外绝缘与内绝缘两大类。属于外绝缘的有空气间隙(例如输电线各相导线之间)、固体绝缘(绝缘子)的外表面、隔离开关触头间的气隙等等,属于内绝缘的有变压器与电机绕组的绝缘、电缆的绝缘、套管封闭部分的绝缘、断路器断开状态下触头间的绝缘等等。内绝缘往往是固体和液体介质的组合绝缘(例如在变压器中)或固体和气体介质的组合绝缘(例如在SF<sub>6</sub>绝缘封闭配电装置中)。

外(空气)绝缘的主要特点是它的电气强度和大气条件(空气的压力、温度和湿度)有关。户外安装的绝缘子的电气强度还会受到表面污染和大气沉降物(雨、雪等)的显著影响。

电气设备内绝缘的电气强度实际上不受大气条件的影响,它的特点是老化现象比较明显,即其电气特性在运行过程中会劣化。很难避免在绝缘中发生局部放电,由于负荷电流波动所引起的温度变化,电缆的油纸绝缘中会形成气泡而出现局部放电。在电极的尖锐边缘和电器的支撑件上会发生电晕放电,在它的作用下,绝缘将损坏或被分解物所污染。

介质损耗使绝缘发热,在散热困难的情况下(这是厚度大的绝缘的特点),过度的发热将导致绝缘的热击穿。

如果电压被切除或者击穿点的电弧熄灭了,空气(外)绝缘被击穿后将能彻底地自恢复;而固体和组合绝缘一旦被击穿,就不再可逆,电气设备将退出运行;液体绝缘和气体内绝缘虽能自恢复,但击穿仍将导致它们的特性有所劣化。因此,内绝缘的状态要在运行过程中进行监控,以便及时发现正在发展的缺陷和预防电气设备事故停运。

电气设备的绝缘长期处于工作电压的作用之下。在运行过程中,电压还可能升高而超过工作电压——内部过电压,其电源是系统中发电机的电动势,其原因是正常或事故操作会在系统中引起振荡过程或谐振现象。除了内部过电压外,电气装置的绝缘还有可能受到雷电过电压的作用,其产生原因是雷击于电气装置。

① 略去高电压技术在苏联的发展简史。

——译者注

架空电网由于长度大，会经常遭受雷电的闪击，这时在线路绝缘上会出现无法耐受的极高电压，沿绝缘子串发生的空气击穿可转变成电源所维持的电弧放电。在3~35kV线路上，消除单相接地的有效方法是用接在电源中性点和大地之间的消弧线圈来补偿接地点的电流，由于电流得到补偿和能量停止输入，接地点的电弧将不能维持下去而迅速熄灭。在110kV及以上的电气装置中，采用中性点直接接地在经济上是比较合适的。在这种场合，可采用自动重合闸（AIIIB）来消除线路上的短路，但是也不一定能成功，所以仍有必要采用避雷线作为显著减少线路事故跳闸次数的重要措施。同时采用避雷线和自动重合闸可使架空线路在遭受雷击时的事故跳闸次数减至最少。

除了破坏架空线路的绝缘，雷击还会在导线上产生高压冲击波，它们可沿着导线传播到变电站并作用在站内的电气设备上。

雷电过电压的数值取决于雷击强度和遭击物体的特性，因而是统计值；而内部过电压取决于操作种类、电网与操作电器的工况与特性，所以在系统中多次重复同一种操作时，每次产生的过电压都是不同的。由此可知，内部过电压和雷电过电压一样，也具有统计的性质。

为了把电气装置中的过电压限制到经济上可以接受的数值，采用了各种保护电器：管式避雷器、阀式避雷器、非线性过电压限制器（ОГН）等。

使作用电压的数值、保护电器的特性和绝缘的电气特性之间相互协调以保证电气装置的可靠运行与高度经济性，是电气装置设计中的一个基本的技术—经济课题，称为绝缘配合。

由上述可知：在高电压技术课程中将探讨电气装置的内、外绝缘的电气特性，绝缘在工作电压、雷电过电压和内部过电压下的运行及过电压的限制措施，绝缘配合和绝缘试验方法，输电线路和主要电气设备的绝缘结构等内容。

# 第一篇 电介质中电气物理过程的基本知识

## 第一章 气体中的电气物理过程

### 第一节 带电粒子在气体中的运动

气体粒子（原子或分子）的密度可由下式求得

$$N = \frac{p}{kT} \quad (1.1)$$

式中  $p$ ——气压；

$T$ ——气温；

$k$ ——波尔茨曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23} \text{J/K} = 8.62 \times 10^{-5} \text{eV/K}$ 。

气体粒子总是处于热（混乱）运动状态中，经常地彼此相互作用（碰撞）着。任何粒子在1cm的行程中所遭遇到的碰撞次数 $Z$ 和密度 $N$ 成正比。碰撞次数的倒数 $\lambda \left( = \frac{1}{Z} \right)$ 即为粒子的平均自由行程长度。实际的自由行程长度和 $\lambda$ 不同，并具有很大的分散性。粒子自由行程长度等于或大于 $x$ 的概率为

$$P(x) = \exp\left(-\frac{x}{\lambda}\right) \quad (1.2)$$

#### 一、带电粒子的迁移率

在电场中，作用在带电粒子（离子和电子）上的力为

$$F = eE \quad (1.3)$$

式中  $e$ ——粒子的电荷；

$E$ ——电场强度。

带电粒子在电场方向的动量为 $mu$ （ $m$ ——粒子的质量， $u$ ——离子或电子在电场中的漂流速度），如令 $\nu$ 表示粒子受到碰撞的频率，那么它所引起的动量损失的速率就等于 $m\nu u$ 。按牛顿第二定律，它将被作用在粒子上的力所补偿，因而

$$m\nu u = eE \quad (1.4)$$

粒子相邻两次碰撞之间的平均时间为

$$\tau = \lambda/\nu \quad (1.5)$$

式中  $\nu$ ——粒子热运动速度的算术平均值。

计及式（1.5），由式（1.4）可得

$$u = \frac{e}{m\nu} E = \frac{e\tau}{m} E = \frac{e\lambda}{m\nu} E = KE \quad (1.6)$$

粒子的平均漂流速度和电场强度成正比，其比例系数  $K = \frac{u}{E}$ ，称为迁移率，表示该

粒子在场强  $E = 1\text{V/cm}$  的电场中的漂流速度。

由于粒子的平均自由行程长度  $\lambda$  和气压  $p$  成反比，因而在温度  $T = \text{常数}$  的情况下，由  $K = \frac{e\lambda}{mv}$  可得

$$Kp = \text{常数} \quad (1.7)$$

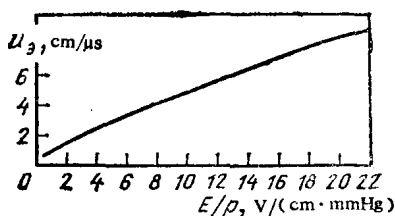


图 1.1 电子在空气中的漂流速度  $u_e$  和  $E/P$  的关系表示 (图 1.1)。

对于离子来说，只要漂流速度还小于热运动速度，则漂流速度和场强之间仍然保持着线性关系 [见式 (1.6)]，即  $K_u$  仍为常数。电子的迁移率  $K_e$  则与此不同，它不是一个常数，而是取决于电场强度的某个数值。为此，通常应指出：该迁移率  $K_e$  值对应于何种场强，或者以电子漂流速度和  $E/P$  的关系来表示 (图 1.1)。

如果近似地取离子和电子在电场中定向运动的动能相等，那么它们的漂流速度和迁移率的比值如下

$$\frac{u_e}{u_u} = \frac{K_e}{K_u} = \sqrt{\frac{m_u}{m_e}} \quad (1.8)$$

因为电子的质量  $m_e = 9.1 \times 10^{-28}\text{g}$ ，而质子的质量近似地等于中子的质量—— $1.67 \times 10^{-24}\text{g}$ ，约等于  $1840m_e$ 。空气的主要成分为氮分子 (其原子量为 14)，因此

$$\frac{K_e}{K_u} = \sqrt{\frac{1840 \times 2 \times 14 m_e}{m_e}} = 227$$

即电子的迁移率要比离子的迁移率大两个数量级。按标准大气条件 ( $p = 101.3\text{kPa} = 760\text{mmHg}$ ,  $T = 293\text{K}$ ) 下的实验数据，空气中离子的迁移率  $K_u = 2\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ，而电子在场强可引起电离过程的电场中的迁移率  $K_e = 400\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 。

## 二、扩散

气体中带电与不带电粒子的运动也可能受到粒子浓度梯度的制约。在热运动的过程中，粒子从浓度较大的区域迁移到浓度较小的区域，这种过程称为扩散。

当粒子沿  $x$  轴的浓度梯度  $\frac{dN}{dx}$  为恒值时，可以用扩散通量方程来表示扩散过程

$$J = -D \frac{dN}{dx} \quad (1.9)$$

上式表明：1s 内穿过垂直于  $x$  轴的单位面积的粒子数  $J$  和浓度梯度成正比，负号则表示扩散的方向和浓度增大的方向相反，而比例常数  $D$  称为扩散系数。

从气体中划出一个  $1\text{cm}^3$  的立方体。粒子沿各个方向的运动是机会均等的，因而只要看该立方体一个界面上的情况就可以了。如果在该界面处的浓度为  $N_0$ ，那么在界面两侧距离  $\lambda$  处的浓度将分别为  $N_0 + \frac{dN}{dx} \lambda$  与  $N_0 - \frac{dN}{dx} \lambda$ 。粒子通量的  $\frac{1}{6}$  将穿过该界面，每

1. 穿过界面进入一侧的粒子数为  $\frac{1}{6} \left( N_0 + \frac{dN}{dx} \lambda \right) v$ ，进入另一侧的粒子数为  $\frac{1}{6}$

$\times \left( N_0 - \frac{dN}{dx} \lambda \right) v$ 。由此可知，穿过立方体界面的粒子扩散合成通量为

$$\begin{aligned} J &= \frac{1}{6} \left[ \left( N_0 - \frac{dN}{dx} \lambda \right) v - \left( N_0 + \frac{dN}{dx} \lambda \right) v \right] \\ &= -\frac{\lambda v}{3} \cdot \frac{dN}{dx} \end{aligned} \quad (1.10)$$

这样一来，可得出

$$D = \frac{\lambda v}{3} \quad (1.11)$$

因为粒子的平均自由行程长度和气压成反比，所以在温度  $T = \text{常数}$  的情况下

$$D \rho = \text{常数} \quad (1.12)$$

扩散系数和扩散粒子的质量有关：电子在正常大气条件下的空气中的扩散系数约为  $12.7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，而离子约为  $0.05 \text{ cm}^2/\text{s}$ 。

如果在坐标原点集中着大量粒子，从某一瞬间开始向均匀地充满某一空间的气体中扩散，那么在许多情况下必须知道：经过时间  $t$  后，粒子能迁移多少距离？这个问题被爱因斯坦和汤逊所解决。在三维的情况下，粒子的均方根位移等于

$$r = \sqrt{6Dt} \quad (1.13)$$

而在二维的情况下

$$r = \sqrt{4Dt} \quad (1.14)$$

由式 (1.6) 可知，离子的迁移率等于 (郎之万方程式)

$$K_u = \frac{e\lambda}{m_u v} \quad (1.15)$$

所以离子的扩散系数和迁移率的比值为

$$\frac{D_u}{K_u} = \frac{\lambda v m_u v}{3e\lambda} = \frac{m_u v^2}{3e}$$

离子热运动的动能  $\frac{m_u v^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ ，因而

$$\frac{D_u}{K_u} = \frac{kT}{e} \quad (1.16)$$

式 (1.16) 就是著名的爱因斯坦比值。

电子与离子同时扩散的过程称为双极性扩散。由于它们的扩散系数不同，电子将较快地扩散到浓度较小的区域，但是它们的运动受到落在后面的正离子电场的牵制。正是这一电场使离子得到加速，因而它们将扩散得比没有电子时更快一些。结果是电子与正离子的扩散以同样的速度进行。



对于双极扩散系数，分析所得到的公式如下

$$D_{\pm} = \frac{D_n K_n + D_p K_p}{K_n + K_p} \quad (1.17)$$

双极扩散系数大于正离子的扩散系数，但要比电子的扩散系数小得多。

## 第二节 气体中带电粒子的产生与消失

### 一、气体粒子的激励与电离

原子的电子外壳可以简单地用若干圆形或椭圆形轨道的组合形式来表示。电子就沿着这些轨道围绕带正电的原子核运动。在正常状态下，电子处于离核最近的轨道上，这时原子的势能最小。当给原子传送某一附加能量时，一个或若干个电子能转移到离核较远的轨道上去，这个过程称为原子的电子激励。激励所需的能量等于电子处于较远轨道和正常轨道时的能级之差。

对于由两个或更多个原子构成的分子而言，在获得外加能量时，除了上述电子激励外，还可能发生振动能级或转动能级的激励，这种激励所需的能量通常是相当小的（小于1~2eV）。原子或分子处于激励状态的平均时间只有 $10^{-8}$ s。粒子回到正常状态时将伴随光子辐射，对于分子态气体而言，由于低能激励的存在，有可能辐射出低能光子。传送给原子的能量愈大，电子在激励时所跃迁的轨道离原子核愈远。一旦电子远离原子核，以致它和原子核之间的相互联系实际上已不存在时，电子即成为自由电子。这时原子发生了电离，其结果是产生两种粒子——正离子和电子。使原子或分子发生电离所需的能量称为电离能。表1.1列出了某些气体的激励能与电离能之值，以电子伏表示（ $1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19}\text{J}$ ）。由于电子的电荷 $e$ 恒等于 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ ，所以常常采用激励电位 $U_i$ 与电离电位 $U_e$ 来代替激励能与电离能，以便在计算中排除 $e$ 值。

正离子还可以被再度电离，其结果是产生二次电离离子与电子，但这时所需的能量要大得多（参阅表1.1）。还可能产生三次甚至更多次的电离离子。

表 1.1 某些气体的激励能与电离能

气 体	原子或分子的 激励能 (eV)	亚稳状态的 激励能 (eV)	电离能(eV)			
			原子或分子	正离子	二次电离离子	三次电离离子
N <sub>2</sub>	6.1	6.2	15.6	—	—	—
N	6.3	2.4; 3.6	14.5	29.5	47.0	77.0
O <sub>2</sub>	7.9	1.0; 1.8	12.5	34.7	54.8	77.5
O	9.1	2.0; 4.2	13.6	35.0	55.0	77.0
H <sub>2</sub>	11.2	—	15.4	—	—	—
H	10.2	—	13.6	—	—	—
He	21.2	19.8; 20.7	24.6	54.4	—	—
CO <sub>2</sub>	10.0	—	13.7	—	—	—
H <sub>2</sub> O (水汽)	7.6	—	12.8	—	—	—

在电离过程中，原子或分子的亚稳状态起着重要的作用。处于亚稳状态的激励粒子的寿命可达 $10^{-4}$ s或更长，在这一段时间内，粒子可能再得到附加能量而实现电离，这种过程