

中等专业学校交流讲义

高电压工程

哈尔滨电工学院高压教研室 合編
湘潭电机学院电器教研室



中国工业出版社

前 言

本書是根据 1959 年制訂的中等专业学校电机、电器专业电工材料与高电压工程教学大纲編写的。

本書分为四篇：即电介質的击穿、高压实验室的基本设备及高压下的測量，高压设备的絕緣結構和預防性試驗，过电压及其保护。

本書主要供中等专业学校电机、电器专业同学作为講义，也可供从事上述工作的技术人員参考。

本書是由哈尔滨电工学院和湘潭电机学院合編的。由于編者水平有限，時間很匆促，难免有錯漏之处，希望讀者指正，以便再版时修改，使之更为完善。

目 录

前言

緒論 1

第一篇 电介质的击穿

第一章 气体电介质的放电 4

1-1 气体电介质的游离、激发、扩散和
复合 5

1-2 游离的方式 7

1-3 气体质点的自由行程长度和迁移率 9

1-4 汤逊的气体放电理论 11

1-5 在均匀电场中的放电电压及巴申定
律 16

1-6 在稍不均匀电场中的放电和相似定
律 19

1-7 流注理论 21

1-8 不均匀电场中的放电及试验数据 23

1-9 在冲击电压作用下的放电 25

1-10 提高气体放电电压的方法 29

1-11 电晕放电 31

1-12 电弧放电 34

1-13 在气体中沿固体电介质表面的放电 36

第二章 液体电介质的击穿 41

2-1 一般認識 41

2-2 液体电介质的击穿理论 42

2-3 影响液体电介质击穿的因素 42

第三章 固体电介质的击穿 46

3-1 概述 46

3-2 固体电介质的热击穿 47

3-3 固体电介质的电击穿 51

3-4 电击穿与热击穿的区别 53

第二篇 高压实验室的基本设备

及在高压下的测量

第四章 高压实验室的基本设备 54

4-1 工频高压试验设备 54

4-2 直流高压试验设备 60

4-3 冲击电压试验设备 65

4-4 冲击电流试验设备 71

4-5 高频高压试验设备 73

4-6 A·A 高列夫振荡回路 75

第五章 高电压下的测量 79

5-1 高压静电伏特计 79

5-2 分压器 82

5-3 球形火花放电器 83

5-4 高压电子示波器 86

5-5 西林电桥 95

5-6 电花仪 97

5-7 铁磁记录器 98

第三篇 高压设备的绝缘结构 及预防试验

第六章 高压绝缘子 102

6-1 对绝缘子的要求 102

6-2 綫路绝缘子 103

6-3 电站——电器用绝缘子 105

第七章 高压电力电缆 108

7-1 高压电力电缆的分类及对其要求 108

7-2 油浸纸绝缘电力电缆 109

7-3 充油电缆 110

7-4 充气电缆 111

第八章 高压电容器 112

8-1 油纸电容器的结构 112

8-2 油纸电容器击穿的原因 113

8-3 在油纸电容器应用时应注意的几个
問題 113

第九章 高压变压器的绝缘结构 114

9-1 变压器油绝缘抗电强度的一般問題 114

9-2 油间隙中使用固体绝缘的作用 115

9-3 在油中沿固体电介质表面的放电 117

9-4 电力变压器绝缘的基本特点 117

9-5 变压器绝缘的选择和计算要点 118

9-6 变压器绝缘的检查试验 122

第十章 高压旋转电机的绝缘 123

10-1 概述 123

10-2 高压旋转电机定子绕组的绝缘机构
..... 124

10-3 电机绝缘的试验 129

第十一章 绝缘的预防性试验 130

11-1 概述 130

11-2 非破坏性试验方法 131

11-3 破坏性试验——耐压试验及耐压标

准	134
11-4 試驗周期和預防試驗所用儀器	126
第四篇 过电压及其保护	
第十二章 流动波理論基础	138
12-1 过电压及輸电綫路的絕緣水平	138
12-2 具有分布参数綫路中的瞬变現象	139
12-3 波的折射和反射	144
12-4 彼德遜規則	147
12-5 波在繞組中的分布	148
第十三章 操作过电压	154
13-1 中性点不接地系統一相发生間歇电 弧接地时的过电压	154
13-2 空載綫路拉開出現电弧重燃时的过 电压	156
13-3 空載变压器的拉開	157

13-4 共振过电压	157
13-5 消弧綫圈	159
第十四章 大气过电压	163
14-1 雷云的产生	163
14-2 雷云的起电	165
14-3 雷电放电	166
14-4 雷电参数	167
14-5 感应过电压	168
第十五章 电气设备的防雷保护	169
15-1 防雷保护器具	169
15-2 接地	177
15-3 輸电綫路的防雷保护	179
15-4 变电所防雷保护	182
15-5 旋轉电机的保护	184
附 录	187

緒 論

为了进行生产，要求有廉价而方便的大量动力供应，电能便是具有这种优点的动力来源。因此，随着工农业的发展，电力工业也相应的发展起来。因为火力与水力资源往往远离工业区，而火力与水力是电能的能源，因此又要把电能输送到工业区去就必须进行远距离输电。我們知道，为了减少能量在输送过程中的损耗，减小线路压降，提高输送的功率，就必须大大的提高输送电压。

为了上述目的，高电压工程就成为世界各国非常重视的科学了。

对高电压工程来说，它是一门年青的科学，在近二、三十年来才得到迅速发展；并从电气工程中分支出来成为一门独立的科学。它的发展过程可以从输电电压等级的提高过程来看出：1881年法国采用了1500~2000伏的直流输电；1891年出现了15200伏的交流三相输电，这是电气化事业中的重大创举。1900~1910年间，电压提高到100千伏；1923年有220千伏电压出现；到1955年，苏联建成了世界上电压最高、线路最长（1000公里）由古比雪夫到莫斯科的400千伏输电线路。近年来，世界各国都在研究用600千伏或更高电压进行送电。

要建立高压线路，从设计，运行到设备的制造各方面都将广泛的牵涉到高压工程问题。

高压输电电压等级的提高，将遇到绝缘子的使用和线路上的电量问题。要找出电量现象的规律，这就要求解决气体放电的问题。在与其相对应的高压电气设备——主要是电机与电器中，须广泛的使用液体电介质和固体电介质绝缘，这就必须深入探讨液体和固体电介质在高电压作用下的物理过程以及在设备中的应用，从而促进电机与电器设备的迅速发展，来相应的满足输电电压不断提高的需要。因此，就出现了电介质击穿理论。

高压输电电压的提高，相应的使高压电气设备的额定电压提高了，这就要采用各式各样的绝缘材料。但仅仅从绝缘材料考虑还远远不够。因此，必须采取其它措施，如设计合理的绝缘型式，采用适当的绝缘方法等。由此，就出现了高压电气设备的绝缘问题。

从第一批的输电线路的经验证明：雷电在很大程度上影响输电的可靠性。因此，促进了对雷电本身和输电线路的保护设备的研究。在近代，由于输电电压等级的提高和电力系统的日益扩大，操作过电压就成为绝缘的主要威胁了。因而必须采取一切措施解决操作过电压问题，使之不致损坏电气设备，由此出现了过电压的理论和保护问题。

因为高电压方面的问题，往往受到许多错综复杂的因素影响，故很难用理论分析总结出一一般精确的规律来，而要求通过试验的方法研究有关高电压的问题。在目前超高电压输电领域内，在高电压技术的关键问题的发展阶段中，高电压试验设备及测量技术也随之发展起来。故出现了高压实验室的基本设备与高压下的测量问题。

综上所述，高电压工程主要解决以下几个问题：

1. 绝缘问题：工作电压的提高，特别是大气过电压和操作过电压对绝缘提出更严格的要求，保证有一定的绝缘水平，才能保证供电的可靠性。同时，更要求按照经济的原

則來選擇絕緣。因此，如何選擇絕緣型式和對絕緣預防性試驗，以便防止事故的发生是
高电压工程中的主要問題。

2. 过电压問題：電力系統的分布范围很广，經常遭到大气过电压的侵襲。严重的威胁供电的可靠性及人身和设备的安全。因此，必須对过电压波在電力系統中的傳播过程及其对絕緣的危害进行研究，找出适当的保护方法。对于 220 千伏及其以上的超高压輸电綫路，操作过电压的威胁大于大气过电压。故必須研究其規律和限制这种过电压。这些問題的妥善解决，将大大降低对電力系統的投资。

3. 为了正确的認識电介質在外電場作用下发生击穿的现象的規律，并且用試驗方法証实这些規律是否正确，就必须进行电介質击穿理論方面的研究工作。但是这些問題的研究必須从生产实际出发，为上述的絕緣和过电压問題服务，从而指导实践，得到有益的结果。

总之，高电压工程在电气化事业中具有很重要的作用。

旧中国根本談不到这方面的研究，由于工业的落后，電力系統容量很小，电压很低，所有的高压电气设备都依靠进口。就是具有很重要意义的防雷保护器具制造工作都沒进行，故发生雷害事故非常多。絕緣預防性試驗也不能进行，故造成设备的經常损坏，停电事故不断发生。

解放后在党的领导下，由于全国人民創造性的劳动，我国各項事业都获得了巨大的成就，電力工业也得到了迅速的发展。我們建成了 220 千伏超高压輸电綫路等一系列工程，基本上改变了旧中国的落后面貌。大大的提高了輸电的安全性。在高压设备制造方面也取得了很大成就。正規高压實驗室及研究机构也成批地建立起来。

本門課程的任务是：

1. 了解电介質在高电压下的击穿規律，从而選擇不同的提高击穿电压的方法。
2. 掌握各种試驗设备的原理及操作方法；并能对高压设备的絕緣及絕緣材料进行試驗。
3. 了解电气设备的絕緣結構及預防性試驗方法。
4. 了解过电压的产生和保护方法，并能選擇防雷保护器具。

課程內容共分四篇：

第一篇 电介質的击穿，主要是叙述气体、液体、固体在外電場作用下的击穿物理过程。

第二篇 高压實驗室的基本设备及在高压下的測量，主要叙述工頻、冲击、直流、高频高压等设备，和高压下測量时所用的測量仪器（如高压靜电伏特計、火花放电器、高压示波器等）。

第三篇 高压设备的絕緣結構及預防性試驗方法，重点叙述各种高压电气设备——高压絕緣子、電力電纜、高压电容器、变压器、高压电机等的絕緣結構，并着重地介紹了絕緣型式对提高工作电压的作用；对絕緣的預防性試驗也作了适当的介紹。

第四篇 过电压及其保护，說明大气过电压及操作过电压的产生和危害性，以及各种防护措施的原理及方法。

本課程是在学习过物理学、高等数学、电工基础、电机学的情况下講授的。本課程涉及的知識范围較广，故在学习的过程中，必須注意学习方法，使知識系統化，运用毛

主席的思想来指导学习。

本門科学完全是从生产实践中发展起来的，因此与实践有着密切的联系，即本課程不但理性强，而且实用性也很强，在学习过程中必須使理論与实际联系起来。只有这样才能学好这門課程。

第一篇 电介质的击穿

电介质在电场中，当外加电压达某一定值时，则丧失绝缘能力，此时称为“击穿”。击穿时的外加电压，称为击穿电压，以 V_{br} 表示，单位用千伏。而击穿电场强度以 E_{br} 表示，单位为千伏/厘米或千伏/毫米。

击穿电压(在气体中又叫“放电电压”)受到各种因素的影响，所以显得很复杂。除电介质本身结构外还受试验方法(如电极形状、电压作用时间、电压种类)及环境(如温度、压力)的影响。

由于不同的电极形状，可以得到均匀的和不均匀的电场。二平面间的电场(不考虑边缘部分)及当电极距离甚近时的二圆球电极间的电场均可认为是均匀的。在均匀的电场下电介质的击穿电压可达理想的最大值，此时如不考虑热击穿(当电介质厚度甚小或电压作用时间很短时)，击穿电压随着厚度成正比增加。但在不均匀的电场中无此关系。最不均匀的电场是针尖对平板。

根据电压作用时间的不同可分为瞬时击穿，即将电压从零起迅速而平滑的升到击穿电压，其升压时间约 10~20 秒。持续击穿为从零起将电压逐级升高，每一级停顿一分钟(在实际做实验时并无这样长的停顿时间)。

用在不同情况下的设备或绝缘材料，需要以相应的电压来试验。一般工业上用的材料均用工频(50 赫芝电压)试验。此外还有直流试验，高频试验及冲击波试验。冲击波电压一般甚高，而电压作用时间甚短(通常是几微秒到几十个微秒)。

下面我们要分别对气体、液体、固体电介质在外加电压下的击穿理论进行讨论。

第一章 气体电介质的放电

气体电介质在高压工程中的实际价值

对于气体电介质的研究在高压工程中有重大的实际意义。在作为绝缘的电介质中最广泛被应用的是空气。它的抗电强度虽然比液体和固体电介质的抗电强度小得多，但是因为在各种绝缘结构中总是或多或少地存在着空气和别的气体，因此，在任何一个电气设备中，都不能避免空气电介质的应用。例如：我们经常见到的架空线与导线之间，架空线对地之间，都是由空气电介质相隔开。此外，比如还有瓷瓶的表面，电气设备的带电体周围都是被空气环绕着。我们用来防护过电压的保护间隙和避雷器中的空气间隙都是利用气体的击穿现象来保护其重要的电气设备。而且即使在固体、液体电介质中，也往往含有空气，使之容易发生击穿，从而将引起整个设备的绝缘的破坏。这种情况，是我们所不希望的。

从上面所列举的一些例子可以看出：气体电介质不单是在高压工程中占着优势地位，而且有实际的价值。因此对气体电介质放电的物理过程进行较全面的了解，是完全必要的。

1-1 气体电介质的游离、激发、扩散和复合

因为气体的击穿或放电是由于气体中含有大量的带电质点的结果。故我们要研究气体中的放电问题，须首先研究带电质点的产生和消失。

(一) 气体质点的游离和激发

在高压工程中，为了技术上的方便，通常把原子结构了解为带有正电荷的原子核和在它周围沿着不同半径的圆周轨道旋转着的电子所组成。用这样的原子模型来解释气体游离与激发的现象。

原子中电子顺着一定轨道环绕原子核旋转，在每个轨道上的电子各具有一定的位能。同一层上的电子具有同一位能。通常把具有一定能量的电子轨道层称之为能级，故同一层上的电子有同一能级，越靠近原子核的电子轨道，它的能级越低，反之越高。当离原子核较近的轨道上的电子，跑到较远的轨道上时，必须吸收能量，当电子由较远轨道回到较近轨道时，则放出能量。要想让电子由较近轨道跳到较远轨道上去，一定要由外面加入能量。这种能量可以是各种形式，如撞击、热、光等。电子由外层轨道转到里层轨道，则可自动进行。(非稳定状态)在进行过程中，放出多余的能量(辐射能)，这辐射能与频率有关，频率越大，量子所含能量也越大。其关系为：

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

式中 W ——表示量子能(辐射能)；

$h = 6.543 \times 10^{-27}$ 尔格/秒(量子常数)；

ν ——辐射能频率(辐射能频率与电子跳动前后原子所含能量有关)。

图 1-1 是氢原子 H 的能级图。从图上可得到关于原子的可能的能量状态清晰的概念。用所谓“电子伏”的特殊单位来表示电子的能量是方便的。1 电子伏(简写 1eV)的能量等于在电位差为 1 伏的两点间移动时电场所做的功。则 1 电子伏的能量等于：

$$\begin{aligned} 1 \text{ 电子伏} &= 1 \text{ 伏} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库伦} \\ &= 1.6 \times 10^{-19} \text{ 瓦秒} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 尔格。} \end{aligned}$$

若外界加到原子上的能量相当大，使一个电子跳出原子核的作用范围(离核 0.1×10^{-8} 毫米)，叫做跳过电位障。这个电子则变为自由电子。原来的原子就变为成为一个电子和一个带正电的游子，这种现象称之为游离。游离所需要的能量称游离能。

若外界所加之能量不足以使原子游离，而只能使电子由里层轨道(亦即正常

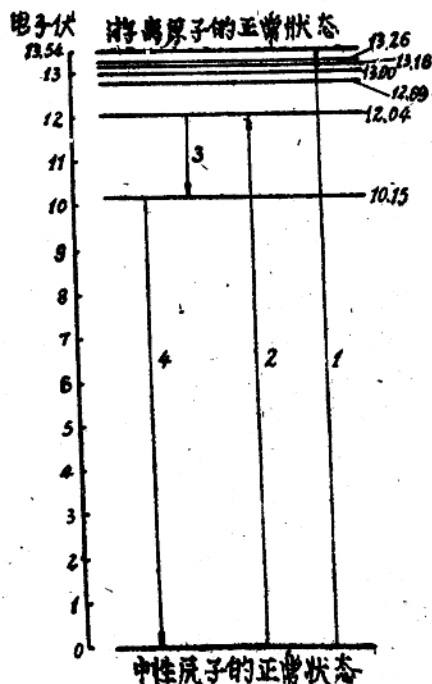


图 1-1 氢原子的激发水平

图中箭头指示：

1—耗能 13.54 电子伏而游离； 2—耗能 10.24 电子伏而激发； 3—由高轨道转到低轨道放出能量 1.9 电子伏(波长 656.3 毫微米)； 4—激发原子恢复至正常状态，放出能 10.15 电子伏(波长 121.6 毫微米)。

状态电子所在轨道)跑到外层轨道,这时就使原子所含能量增加了。我们把这种现象称为原子激发。激发所需之能量称激发能。显然电子跑到的那个轨道离原子核愈远,其激发能愈大。一个原子可以同时有几个电子由里层跳到外层,所以激发状态可以有一重,二重,甚至更多重现象。

已经激发的原子比较容易游离。激发原子所需之游离能少于正常原子所需游离能,所少的数值即等于该原子的激发能。激发状态是一种不稳定的状态,激发原子大多是能自动的回到正常状态。激发存在的时间很短,一般低于 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ 秒。这时原子将放出在激发时所吸收的能量,此能量以辐射的形式放出。其能量大小为“起始”和“终止”轨道两能级能量之差。

通常能量是以具有一定的频率放射出来的。其频率由下式决定:

$$W_1 - W_0 = h\nu \quad (1-2)$$

式中 W_1 和 W_0 ——电子在激发轨道和正常轨道上所具有的能量;

h ——量子常数;

ν ——射线的频率。

如果用电子的电荷去除以尔格表示的激发能和游离能量,则相应得到用伏表示的激发和游离的电位。表 1-1 列出某几种气体和金属蒸气的游离电位和激发电位。

几种气体的游离电位与激发电位

表 1-1

气体或蒸气	第一游离电位 (U_w)	第二游离电位 (U_w)	第三游离电位 (U_w)	介稳状态电位 (U_w)
氦 (He)	24.5	54.2	19.8	19.7
汞 (Hg)	10.4	18.6	4.86	4.67
氢 (H ₂)	15.9	—	10.6	—
CO ₂	14.4	—	10.	—

有一种特殊的激发状态,在该状态下,已经跑到较外层轨道上去的电子,不能自动地跳回到原来的轨道,必须先由外面加入能量,使已经跑到较外层轨道上的电子跳到更高一层轨道上去,然后它们才能自动地回到原来轨道,同时放出激发能,象这样的能级称为介稳能级。相应的激发状态叫做介稳状态。

(二) 气体质点的扩散和复合

在带电质点增多的游离过程的同时,永远要发生使电极的空间中的带电质点减少的过程。这些过程即是质点的扩散和复合。

所谓游子和电子的扩散就是指这些质点从较大浓度的区域转移到较小浓度的区域,这样游子或电子力图在整个容积内趋于均匀分布。应该指出的是:这时游子的扩散,绝不是带电质点之间电场的作用而彼此排斥,而是由于热运动的结果。因为在很大浓度下,游子间的距离也嫌太大,静电力不能起显著的作用。事实上在大多数情形下,气体中的游子浓度,每一立方厘米中亦不超过 10^{13} 个游子,这就是说:它们之间的平均距离为 10^{-4} 厘米,在这样大的距离下,已经不是游子电场范围所能及的了。

所谓游子和电子的复合就是正游子和负游子或正游子与电子结合而成中性分子或原子的现象。在复合的过程中会放出一定的能量,其正游子和电子复合时,能量的放出多半是以光的形式放射出来,在一般情况下,放射能的频率决定于等式:

$$h\nu = W_{\infty} + \frac{mv^2}{2} \quad (1-3)$$

式中 $\frac{mv^2}{2}$ — 为在复合前电子所具有的动能；

W_{∞} — 该种气体的游离能。

但其复合而解放出来的能，不一定要以射能的形式放出来，也可能用作复合后所形成的中性分子或原子的动能用。

不要以为：异号质点相撞时，总是会发生复合的。因为带电质点的复合是由于正游子与电子间电磁场相互作用而需要一定的时间，当参加复合的两质点的相对速度愈大，则复合的可能性就愈小，根据这个理由，我们可知：由于电子在电场中运动速度很大，所以电子和游子复合的或然率小得多，约小到 1000 倍左右，故一般说来，电子都先附在中性分子或原子上构成负游子，然后这负游子再和正游子复合。

1-2 游离的方式

游离的方式总起来说，分成空间的和表面的两大类。在前一种情形中，是在外部力量的影响下，气体的中性质点分裂成电子和正游子；它又包含有碰撞游离、光游离、热游离。在后一种情形中，是依靠和气体间隙相接触的固体或液体产生电子放射。下面分别加以叙述。

(一) 碰撞游离

如果以任一个以速度 v 运动着的质点为 m 的质点(电子、游子、或中性分子。)与中性分子或原子相碰撞，那么，其结果可能使中性分子或原子游离，即是说，把原子分裂成电子和带正电的残核。由此看来，要使得碰撞游离发生，其运动质点的动能必须大于该气体质点的游离能。

$$\text{即} \quad \frac{mv^2}{2} \geq W_{\infty} \quad (1-4)$$

但实验证明：撞击质点的动能虽然未达到被撞击质点的游离能，仍可发生游离。例如汞气游离能为 10.4 电子伏，但在 4.67 电子伏时则可使之游离。对于这种现象可由分级游离来解释。因为这时电子所含动能虽不能使中性质点游离，但可使之激发，如果紧跟着第二个电子的再次碰撞已被激发的质点(如原子)则可使已激发的原子发生游离。由上述不难看出：撞击游离应分为两类：由于飞动质点的动能而产生游离的碰撞称为第一类碰撞。参加碰撞的激发原子的位能也起作用的碰撞称为第二类碰撞。

应该指出的是并非每次碰撞都能发生游离，每次碰撞时发生游离的或然率是很低的。

电子、游子和光子在一定的条件下和中性分子或原子撞击，都可能产生游离现象，但它们所起作用的大小有所不同。

1. 电子：电子的质量小，比其他质点更容易在电场作用下获得较大速度，当它积累足够的动能($\frac{mv^2}{2} \geq W_{\infty}$)时，就有可能发生撞击游离。它是撞击游离中的主要形式。

2. 游子：游子的质量大，同时有效直径大，平均自由行程较小，故不容易积累足够

动能使中性原子发生撞击游离，因此它的作用比电子小得多。

3. 光子：象 x 光和光谱中紫外线部分的光子都具有很大能量，能产生强烈的游离，并使因游离而逸出的电子具有较大速度（这种电子称为光电子），而再使其他中性原子游离。能量不足的光子不能使原子直接游离时，亦可以通过中间的激发状态，使原子或分子游离。光子不一定从外界来，在气体内部的激发和游子复合的过程中也会放出光子。

（二）光游离

所谓光游离即是在短波放射作用下的游离。它是在气体中造成带电质点的第二个源泉。为了使被频率为 ν （波长 $\lambda = \frac{c}{\nu}$ ）的光照射的气体达成游离，必须满足下列条件：

$$h\nu \geq W_u \text{ 或 } \lambda \leq \frac{Ch}{W_u} \quad (1-5)$$

式中 $C = 3 \times 10^{10}$ 厘米/秒，（光速）。

如果游离能用电子伏计算，那么能产生游离的波长的极限数值是：

$$\lambda = \frac{3 \times 10^{10} \times 6.55 \times 10^{-27}}{1.6 \times 10^{-19} \times W_u} = \frac{1.23 \times 10^{-6}}{W_u} \text{ [厘米]}$$

实验证明：钠蒸气的游离能最小（ $W_u = 3.88$ 电子伏），能产生游离的放射线的波长都应小于：

$$\lambda = \frac{1.23 \times 10^{-6}}{3.88} \text{ [厘米]} = 3.18 \times 10^{-7} \text{ 厘米} = 318.4 \text{ 毫微米}$$

象这样的波长是在光谱的紫外线部分中，所以可见光（紫外线）看来是不起游离作用的。

但是实际上，几乎各种气体都可借紫外线游离，这种情况，也可借分级游离来解释。

伦琴(x)射线、 α 、 β 和 γ 射线、宇宙射线，就是说；一切波长很短的具有运动很快的质点的射线，都比紫外线能产生更强烈的游离。

（三）热游离

在室温下由于分子热运动而产生游离的可能性是极小的，热游离只有在温度为 5000 ~ 10000°K 以上时才起显著的作用，当温度更高时热游离的可能性亦增高，在高温时的热游离现象可能有下列三种形式：

1. 在高温时，气体分子有高速度的热运动，相互碰撞时有可能发生游离。
2. 高温气体的高速度分子和容器壁撞击，失去本身动能并以辐射形式放射能量而产生光子，温度增高时，光子的频率和强度随之增大，这种光子可使其某些分子或原子游离。
3. 由于以上两种原因而产生的自由电子，当它有足够动能时，和别的分子或原子发生碰撞游离。

（四）表面游离

当金属内的电子由于某种原因，得到比逸出功更大的能量时，就可能发生表面游离。金属内的电子得到逸出时所需的能量有如下几种方法：

1. 电极加热：使电子由于高温获得足够能量，形成热电子放射。
2. 用具有足够能量的任何质点（如正游子）对金属表面撞击使产生二次电子放射。
3. 短波光线照射：由于光能为金属内电子吸收而使电子获得足够能量有可能逸出金属表面。
4. 加上强力的外电场：即是在高电场作用下，由于电场力从金属表面拿出电子（冷放

射)。表 1-2 列出了某些金属的逸出功。

1-3 气体质点的自由行程长度和迁移率

(一)自由行程长度

在上面所叙述的各种游离方式中,碰撞游离在放电的形式中占主要地位。电场是促使游离的质点以高速的能源,因此在低温下实际上可说是没有热游离。碰撞游离只能借带电质点——电子或游子来实现。这些质点在电场的作用下运动时,渐渐地积蓄的动能,但在这种具有沿电场方向的定向运动的同时,这些质点还和气体分子经常碰撞,在碰撞时失去全部(或几乎全部)积蓄的能量。能量的积蓄是在连续两次碰撞之间的行程上进行的,这段行程通常称为自由行程长度。所以质点的速度和动能,亦即其游离能力,不仅决定于电场强度,同时还决定于自由行程长度。质点在每次碰撞前所经过的行程是不相同的。所以我们所指的自由行程长度仅仅只是统计学中的一个概念而已。

如果质点走过等于一单位长度的行程,而且遭受了 Z 次碰撞的话,那么自由行程长度就等于:

$$\lambda = \frac{1}{Z} \quad (1-6)$$

由 λ 的定义可知: Z 表示单位长度内质点所遭遇的碰撞数。

设气体分子密度为 N , 从气体动力学中知道, 密度与气体压力成正比, 与气体温度成反比:

$$N = \frac{P}{KT} \quad (1-7)$$

式中 P ——气体压力; 达因/厘米² ($P=760$ 毫米水银柱 $=10.14 \times 10^6$ 达因/厘米²);

T ——绝对温度;

K ——波尔兹曼常数, 它等于 1.38×10^{-16} 尔格/度。

根据气体动力学推导, 可以得出电子自由行程长度为:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\pi r^2 N} = \frac{KT}{\pi r^2 P} \quad (1-8)$$

式中 r ——气体分子的有效半径;

λ_0 ——电子自由行程长度。

根据(1-8)式, 当气体的温度为常数时, 自由行程平均长度的倒数, 即单位长度上的碰撞数为:

$$\frac{1}{\lambda} = AP$$

式中 $A = \frac{\pi r^2}{KT}$, 它与电子所碰撞的质点的尺寸和速度(温度)有关的系数。

表 1-3 列出了在 20°C 和 1 毫米水銀柱的压力下，在某些气体中电子的自由行程的平均长度 λ_e 。

在 $t=20^\circ\text{C}$ 和压力 $p=1$ 毫米水銀柱时，表 1-3
电子自由行程平均长度

气 体	空 气	氢 气	氧 气	二氧化碳
λ (厘米)	0.0433	0.0803	0.0448	0.0278

因为气体质点在热运动时是乱杂无章的，所以实际的自由行程长度相差得很多。为了决定分子間自由行程长度分布的规律，我們假定：自 $x=0$ 沿着 x 軸飞出去 n_0 个质点，随着沿 x

軸的前进，一次也沒有碰撞过的质点的数目 n_0 漸漸减少，沒经过 x 距离后减少到 n 个，那么 n 个质点在行程 dx 上的碰撞总数，則等于未經碰撞的质点数目(n)的减少 ($-dn$)。

即
$$-dn = n \frac{dx}{\lambda}$$

式中 $\frac{dx}{\lambda}$ —— 每个质点走过 dx 行程后所遭遇的碰撞数。

分离变数并分别按 x 由 0 到 x ， n 由 n_0 到 n 积分后，得到：

$$n = n_0 e^{-\frac{x}{\lambda}} \quad (1-9)$$

由上式可知： $\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{x}{\lambda}}$ 是已經飞过 x 或更远的行程而未經碰撞的质点百分数。从

另一方面来看，因为所有的质点都是处在完全相同的情况下，所以可以証明： $\frac{n}{n_0} = e^{-\frac{x}{\lambda}}$

同时也代表着每个质点飞过等于或者大于 x 的行程，而未經碰撞的或然率。換句話說，

$e^{-\frac{x}{\lambda}}$ 是表示着实际自由行程长度它等于或者大于 x 的或然率。由这个关系可知：所有的质点的自由行程长度都大于零。

(二) 游子和电子的迁移率

在外电场作用下，质点除有热运动外，还受到电場的加速作用，但是由于不断地遭到碰撞的结果，使得质点的运动，是按非常不規則的曲綫而向电場方向前进的。如图 1-2。

游子或电子受电場力作用，因此在相邻两次碰撞間的行程上是以加速度前进的。如果带电质点的質量愈小，它在电場方向的加速度也就愈大，电場增加，质点运动的速度也就增加，因此，在电場中电子运动的速度比周圍气体分子的速度大得多。如果电場强度不太高，則較重的游子受电場的作用的程度較小，于是游子的速度和分子的速度相差甚微。

如果我們認為游子沿电場方向运动的平均速度为 v ，則按气体动力学推論可知， v 正比于电場强度 E 。

即
$$v = bE \quad (1-10)$$

系数 b 則称为游子或电子的迁移率，其物理意义則表示：气体中的游子或电子在单

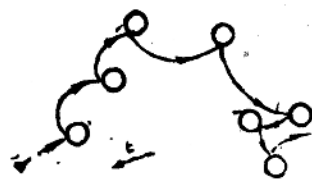


图 1-2 有电場时，游子在气体中运动的軌迹

位电场作用下，在电场方向的运动的平均速度。游子的迁移率和温度、气压有关，电子迁移率近于和电场强度的平方根值成反比，其电子的迁移率比游子的迁移率大得多。

1-4 湯遜的气体放电理論

空气不是绝对的绝缘体。这是因为在大气领域中，含有各种射线：如宇宙射线、红外线等，空气中的中性质点在这些射线的作用下，将随时有新的电子和游子产生。与此同时，也在相互复合。根据实验结果得知：通常在一立方厘米的空气中存在着 $500 \sim 1000$ 对不同符号的游子，因此如在图 1-3， α 空气间隙间加上电压，就可在电路中出现不大的电流，随着电压的变化，电流也随之变化。下面我们来看看这时电压与电流的关系，并分成几个区域来讨论

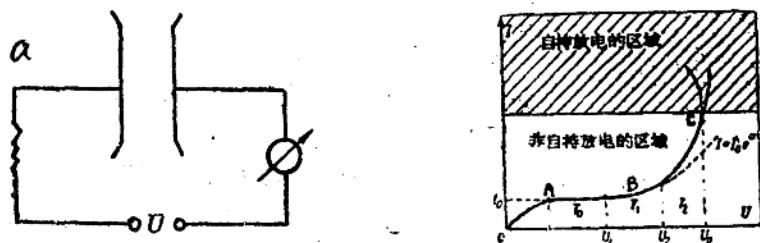


图 1-3 气体伏安特性曲线

1. 电压从零上升后，电流也渐渐增加，这时电流甚小，相当于曲线的 OA 段。
2. 电压继续上升经过 A 点以后电流逐渐饱和，这饱和的电流密度一般为 10^{-10} 安/厘米²，在曲线的 AB 段。
3. 增加电压，电流又上升，而且上升的速度非常显著，相当于曲线的 BC 段。
4. 在 C 点以后，电压即使不再增加也会引起电流继续上升，结果使电流增至极大，在电极间将有火花或电弧的出现，因而需要维持的电压也随电流的增加而降低。

以上所得电压与电流关系曲线谓之气体的伏安特性曲线。在曲线上的 C 点以后，间隙放电从不能自持过渡到自持。湯遜的放电理論可以直接导来这种放电的条件以及解释这种放电的特性。

所谓气体之放电即为在某一定条件下电极旁或电极间的气体导电率，大大提高的现象，此时气体丧失其绝缘性能，而有较大电流通过。影响气体发生击穿现象的因素有：电极间之电位差、电极间距离、电极大小及形状、气体性质、温度、压力等。

由于条件的不同，气体的放电可分为完全与不完全两种。当电源功率很小，而气压甚低时放电形式为辉光放电（如日常用之日光灯），这种放电电流不大，但占据全部电极间的空间，属于完全放电。在电源容量很大时，放电可变为电弧放电。

当电极表面有曲率半径甚小的地方，且两电极间距离相当大，放电只能限于电极旁一圈之范围形成一环状光辉，是为电量放电，它属于不完全放电一类。

在均匀电场中只能有完全放电，而不会有不完全放电。

湯遜根实验观察，在均匀电场间隙中的游离现象及电流随外加电压变化的情况，得出其气体放电理論。該理論的实质是认为气体的放电是由于电子和游子与气体分子或原子间的碰撞游离和正游子撞击阴极表面而产生表面游离所致。

湯遜首先引出關於撞擊游離的三個系數：

α ——撞擊游離第一系數（又稱電子空間游離系數）。它表示一個電子在電場方向走過單位行程，由於具有足夠動能發生撞擊而產生的游離對數。

β ——撞擊游離第二系數。它表示一個正游離子在電場方向走過單位行程，由於具有足夠動能發生撞擊而產生的游離對數。

γ ——撞擊游離第三系數。即一個正游離子撞擊陰極表面時，所產生的電子數。在考慮此過程時，不考慮光游離作用以及由於電子撞擊陽極所引起的二次放射作用。

為了決定電子空間游離系數 α 起見，湯遜作出如下三個假定：

第一，假定電子的動能小於氣體的游離能時，電子與分子或原子碰撞則絕對不會產生游離。當電子的動能大於氣體的游離能時，那麼當它與分子或原子碰撞時，一定能引起游離。

第二，假定電子在每次碰撞時，電子都失去自己的全部動能，並將以零速開始其新的行程（當然實際上電子不能在任何撞擊時都失去自己的全部能量）。

第三，假定認為電子沿電場方向運動而不考慮它實際的曲折運動。

如果假定電子在電場強度為 E 的電場中，行經距離 x_u 而不碰撞，那麼電子到達這段行程終點，電子所積聚的能量等於 Eqx_u （ q 為電子的電荷量），此時為了使電子與分子或原子碰撞能促使游離，就必須滿足下列不等式：

$$Eqx_u \geq W_u \text{ 或 } EX_u \geq U_u \text{ (} U_u \text{ 為游離電位)}$$

換句話說：要使電子與分子或原子間發生碰撞游離，必須使電子在碰撞前，自由地走過行程：

$$x_u \geq \frac{U_u}{E} \quad (1-11)$$

以便使該電子具有足夠的動能。

我們從以前的討論已經知道，當電子的平均自由行程長度為 λ 時，電子不碰撞地走過等於或大於 x_u （在我們這時情況 x 則為 x_u ）的距離而不發生碰撞的或然率為 $e^{-\frac{x_u}{\lambda}}$ 。

一個電子走過單位行程的碰撞次數是 $\frac{1}{\lambda}$ 次，其中僅有 $\frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_u}{\lambda}}$ 的一部分碰撞次數的自由行程等於或大於 x_u ，即是說：只有這一部分碰撞能達成游離，故我們所要求的電子空間游離系數 α 等於：

$$\alpha = \frac{1}{\lambda} e^{-\frac{x_u}{\lambda}} \quad (1-12)$$

如果當溫度不變，那麼根據

$$\frac{1}{\lambda} = AP, \quad x_u = \frac{U_u}{E}$$

關係

並令

$$AU_u = B$$

即得

$$\alpha = AP e^{-\frac{BP}{E}} \quad (1-13)$$

式中的 A 和 B 是與氣體的溫度有關的氣體常數。

各種氣體的 A 、 B 常數列於表 1-4。

公式(1-13)可写成更普遍的形式:

$$\frac{\alpha}{P} = Ae^{-\frac{B}{E/P}}$$

或

$$\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right) \quad (1-14)$$

在图 1-5 中繪出了空气的 $\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right)$ 的关系曲线。

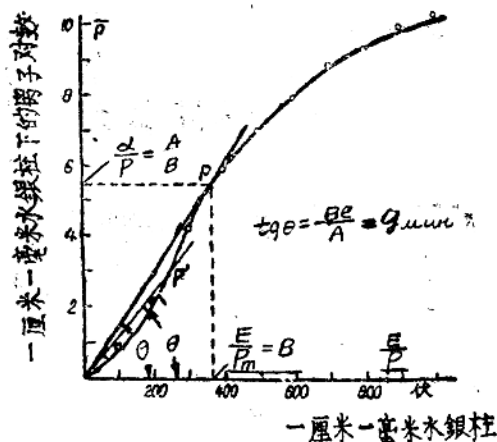


图 1-4 由实验所得的空气 $\frac{\alpha}{P} = f\left(\frac{E}{P}\right)$ 的关系点
与根据公式(1-14)当 $A=14.6$; $B=365$
时所计算得的关系曲线的比较

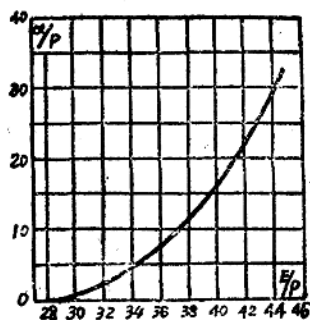


图 1-5 当 E 和 P 的数值相当于大气压
力下的放电情形时, 空气的 $\frac{\alpha}{P}$
 $= f\left(\frac{E}{P}\right)$ 的关系曲线

为方程式 $\frac{\alpha}{P} = Ae^{-\frac{BP}{E}}$ 中的常数

表 1-1

气 体	$A \left(\frac{1}{\text{厘米毫米水银柱}} \right)$	$B \left(\frac{1}{\text{厘米毫米水银柱}} \right)$	E/P 的范围 ($\frac{\text{伏}}{\text{厘米毫米水银柱}}$)
空 气	14.6	365	150~600
N_2	12.6	342	150~600
H_2	5.0	139	150~400
CO_2	20.0	466	500~1000
H_2O	12.9	289	150~1000

由于外界游离因子的作用使阴极放出电子, 该电子受电场作用高速奔向阳极, 在途中发生了撞击游离产生若干新电子, 这些新电子也要发生碰撞游离, 结果使电子总数不断增加而形成电子流, 象这种逐渐增加电子流, 称为“电子崩”。

如果空间电荷不改变原来电场的分布, 同时也不考虑时间的因素, 则可按汤逊理论来研究电子崩的过程。如图 1-6 所示, 我们来讨论两平板电极间的间隙中的碰撞游离过程。

假若在两极间加上电压, 在外界游离因子作用下, 电子由两极之一(阴极)挣脱出来, 假定在单位时间内, 在阴极的单位面积上挣脱出 n_0 个电子, 此 n_0 个电子在电场作用下将

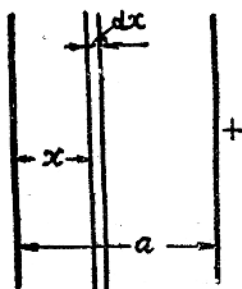


图 1-6 电子的碰撞游离过程示意图