

高等学校教学用书

高压工程

第一卷

苏联 Л. И. 西洛琴斯基著

电力工业出版社

高 等 学 校 教 学 用 书

高 压 工 程

第 一 卷

苏联 Л. И. 西洛琴斯基著

蔣德福 李家訓翻譯 解廣潤 蔣德福校訂

苏联高等教育部批准作为动力和电工院系的教材

电 力 工 業 出 版 社

內 容 提 要

本卷共分三篇：气体放电及其击穿，高压测量，高压实验室的基本设备。

在气体放电一篇中讨论：游离过程；迁移率；游子的扩散与复合；自激放电的条件；高强度气体及真空的击穿；放电通道的发展；在大气压及高气压下的放电电压，放电的特殊形式（雷电、电量、沿面放电、弧光放电）。

在高压测量一篇中叙述：在稳定状态下测量电压的仪器、线路和方法；测量冲击电压和冲击电流的方法；测量电压分布的方法；测量电量损失的方法和线路；冷阴极和热阴极示波器中的物理过程及射线的控制线路。

第三篇讲述试验用变压器、直流电压发生器和冲击电压发生器等。

本书可用作高压工程专业学生的教学参考书，也可供在高压工程方面工作的工程师参考。

Л. И. СИРОТИНСКИЙ

ТЕХНИКА ВЫСОКИХ НАПРЯЖЕНИЙ

根据苏联国立动力出版社1951年莫斯科版翻译

高 压 工 程 第一卷

蒋德福 李家训翻译 解广润 蒋德福校订

349D134

电力工业出版社出版（北京府右街26号）

北京市书刊出版业营业登记证出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华书店发行

编辑：杜全恩 校对：唐宝珊 陈湘苑

787×1092 $\frac{1}{8}$ 开本·20 $\frac{3}{4}$ 印张·439千字·定价（第10类）3.00元

1955年7月北京第1版

1956年7月北京第1次印刷（1—5,600册）

作者原序

由於在各个工程领域中，特別在电力系統中，高压及超高压的廣泛应用，在教学計劃中有必要对高压的过程与結構給予足够的重視。

許多年來从修訂电力系教学計劃的經驗中得出一个結論：要把与高压工程有关的教学材料分配到电工原理、电机、电器及电力網絡等課程里去是不成功的。高压工程一課不僅在教学計劃中被列为一門普通課程，而且在电力及电机兩系里得到進一步的發展而成了專業。

自从高压工程第一、二卷出版以來已經十多年了，因此需要按照高压工程領域中的新成就及高等教育部所採用的电力系的新教学大綱來完全重新改編它們。根据新的大綱，高压工程的新版里沒有电場一章（屬於电工原理一課），而由三卷組成。第一卷包括三篇：气体放电及其击穿、高压測量、高压實驗室的基本設備。第二卷教研室准备在 1952 年出版，講述：介質損失及固体介質的击穿；綫路、电器、电机、电容器及電纜的絕緣；絕緣的預防試驗。第三卷講过电压及过电压防护。

讓我們來簡略地說明一下第一卷內容的要点。

“在气体中的放电”一篇主要研究与高压工程有关的各种放电。教研室从教学經驗中得出結論：必須补充物理及电工原理兩門課程以碰撞游离、光游离及热游离过程的簡明特性的講述，並且比这些先修課程更詳細一些地講解游子的迁移率、擴散及复合等現象的本質。

湯遜學說的原理（第三章）講得非常扼要。在这样講述基礎上，已能指出湯遜的自激放电条件和类似定律的局限性，並能指出以后研究在高气压及長距离下的气体击穿时，必須詳細熟識火花通道随時間及空間的發展。有兩小節專講高强度气体的击穿和真空的击穿。

在第四章中詳細地說明在高气压及長距离下放电通道的形成过程。也寫有在游离室中及借光电閉鎖仪用實驗方法研究放电發展的簡短內容。並扼要地說明用理論方法建立流注通道發展条件的各种嘗試。

第五章講在大气压及高气压下各种放电电压与電極形狀及距离的實驗关系。

在这几章之后詳細地研究与高压工程有关的各种特殊放电形式——雷电、电量、沿面放电和弧光放电。

雷电放电一章的引言是烏云形成过程的簡明描述。在主要是講雷电放电的物理学的一章的末尾，叙述有关於雷电流的波形及大小的簡略知識，以及从过电压及其防护的观点來看雷电問題的意义的簡略知識。

以后就是有关电量放电的三章。教研室認為：更詳細地討論电量放电是必要

的，因为 400 仟伏交流綫路的建設及超高压直流綫路的建設都对这个问题有很大的关心。其中头一章叙述电量放电的一般特性，它是自激放电，但是不完全的放电形式，並由高压工程的观点來說明电量问题的意义。简短地提一下电气滤波器，並有該項裝置的綫路圖及略圖。下一章講長綫上的电量，解釋空間电荷的作用、中性点接地及導綫分裂对損失的影响等等。后一章的内容接近於問題的实用方面，並介紹 220 仟伏及 400 仟伏的輸电綫中的損失的計算。

在講沿面放电的第十章中討論沿着清潔的、被雨淋湿了的和沉塵弄髒了的介質表面的放电电压。这一章是研究絕緣子構造的引言，並且主要是講均匀電場中和不均匀電場中沿面放电过程的特征。

第一篇最后一章研究弧光放电，主要是从当沒有人工加速去游离的措施时电弧通道去游离的情况的这一观点出發的。断路器中的熄弧問題根本沒有討論，因为在發電厂及高压电器等課的相应章節里，对这一問題已予極大的注意。在几經考慮后决定也不講有关一相接地短路时的电弧过程的問題，將它列入过电压一課中去。

講高压測量的一篇是由兩部分組成的：在一部分里講高压工程中应用的測量儀器的知識，有时亦說明它們的应用方法，同时也叙述測量冲击电压用的分压器。另一相当丰富的部分是講电子射綫示波器的。在編寫电子射綫示波器的兩章时，給有对射綫的傾偏、聚焦及其对螢光屏的作用等基本物理过程的足够完整的概念，講清示波器綫路圖中各主要部分的作用，引用在一次攝波或重复攝波中应用的最高有代表性的綫路。这一内容結合通常作的兩、三个实验使学生对电子射綫示波器在高压工程中的应用有足够完全的概念。

“高压實驗室的基本設備”一篇講解用來獲得工頻及高频高压、直流高压以及冲击高压的裝置的綫路及構造。

第一卷主要是由高压工程教研室的同人來寫的，其中沿面放电(Г. А. 列別傑夫)及电子射綫示波器(А. А. 亞可平)兩章除外。所有各章(包括全苏电工研究所同人所寫的各章)都在高压工程教研室經過教学討論；並且大家認為，各章都滿足教本的現代要求，無論在正确估計苏联学者在研究所論各問題中的作用方面，或在高压工程現代成就方面。同时考慮到高压工程是在四年級講授的，以学完物理、电工原理及电工絕緣材料等課為基礎的。

括弧中的各章系下述作者所寫的：Л. И. 西洛京斯基(7, 8, 9, 12—17)，他同Л. Ф. 德莫霍夫斯卡婭(5)，Д. В. 拉塞維格(1, 2, 6)，Л. Ф. 德莫霍夫斯卡婭同А. С. 謝尔盖耶夫、Д. В. 拉塞維格(3)，Е. С. 庫哈尔金同Д. В. 拉塞維格(4)，Г. А. 列別傑夫(10)，Г. В. 布特凱維奇(11)，А. А. 亞可平(18 及 19)。

作者們对評閱者 А. А. 高列夫教授及 С. М. 費尔季克副教授表示深深的感謝，他們極其注意地看完手稿，作了許多寶貴的指示；並感謝 Д. В. 拉塞維格副教授及 Г. М. 龔卡連柯工程師，他們担任各章節間的統一工作，並編輯手稿。

目 錄

作者原序

緒論	1
----------	---

第一篇 在气体中的放电

第 一 章 游离与游离因子。自由行程長度	6
1-1. 气体原子的游离和激發	6
1-2. 游离因子	9
1-3. 气体質点的自由行程長度	18
第 二 章 迁移率, 擴散, 复合	20
2-1. 游子和电子的迁移率	20
2-2. 游子和电子的擴散	27
2-3. 复合	31
第 三 章 在均匀的和稍不均匀的电場中的放电	36
3-1. 电子空間游离系数 α	36
3-2. 电子崩	40
3-3. 斯多列多夫現象	40
3-4. 自激(自持)放电的条件	42
3-5. 均匀电場中的放电电压	44
3-6. 稍不均匀电場中的放电电压。相似定律	48
3-7. 高絕緣强度的气体	52
3-8. 真空的絕緣强度	55
第 四 章 通道形放电的發展。放电時間	58
4-1. 均匀电場中放电發展的实验研究	59
4-2. 均匀电場中放电發展的一般圖案	62
4-3. 电極間距离很大时不均匀电場中放电的形成	65
4-4. 長火花的实验研究	68
4-5. 放电時間	72
4-6. 根据流注学說估計放电电压	78
4-7. 流注击穿的热力学說	80
第 五 章 气体中的放电电压的实验数据	82
5-1. 在直流电压及工頻电压下的放电电压	83
5-2. 在冲击电压作用下的放电电压	85
5-3. 大空气隙的放电电压的实验曲綫	89

5 4. 提高空气放电电压的屏障	92
5 5. 在高气压下气体放电的異常現象	96
第 六 章 雷电放电	100
6 1. 云的起电	102
6 2. 雷电的光学研究	104
6 3. 雷电的特点	106
6 4. 雷电底电的参数	112
6 5. 雷电的作用	113
6 6. 球形雷电	114
第 七 章 电量放电問題的一般特性	115
7 1. “电量”一詞的定义	115
7 2. 高压工程中的电量放电	116
7 3. 电量的空間电荷	119
7 4. 三相电流下的电量	121
7 5. 每相導綫的分裂	123
7 6. 电量放电的起始階段	126
第 八 章 直流及交流电压下的电量損失	129
8 1. 在直流电压下同軸电極的电量电流	129
8 2. 伏安特性曲綫	131
8 3. 电量外圍区域內的电位与 kp 的决定	134
8 4. 在工頻交流下的电量損失	136
第 九 章 220 到 400 仟伏輸电綫上的电量	147
9 1. 概論	147
9 2. 導綫表面狀況对电量損失的影响	149
9 3. 長綫段上損失的决定	152
9 4. 直流高压導綫上的电量損失	153
9 5. 电量与無綫电干擾	155
第 十 章 沿着固体介質表面的气体放电	156
10 1. 在均匀电場中的沿面放电	157
10 2. 不均匀电場中的沿面放电	153
10 3. 被半導电塵層盖着的固体介質的沿面放电	163
10 4. 沿着雨淋着的絕緣子表面的放电	164
第 十 一 章 高压設備中的交流电弧	167
11 1. 弧柱中的电場强度及电弧的伏安特性曲綫	163
11 2. 电流經過零点时交流电弧的性質	171
11 3. 开放性电弧, 它的特点与性質	178
11 4. 交流开放性电弧的自熄	181
11 5. 去掉电压后开放性电弧通道的絕緣强度的恢复	185

11-6. 單相重合閘	190
11-7. 高压設備中產生开放性电弧的条件	192
第二篇 高压測量	
第十二章 測量穩定狀態下的电压的仪表和綫路	193
12-1. 靜电伏特計	193
12-2. 旋轉伏特計	204
12-3. 利用被整流的电容电流測量电压的波幅	207
12-4. 利用电容經整流器充电的方法測量电压的波幅	211
12-5. 利用霓虹灯泡測量电压的波幅	213
第十三章 利用球形火花間隙測量电压的波幅	214
13-1. 通論	214
13-2. 放电电压与直徑及距离的关系曲綫	217
13-3. 冲击电压的測量	219
13-4. 用球形間隙測量非衰减高频振荡的电压	222
第十四章 利用电花仪和鉄磁子測量电压和电流	223
14-1. 电花仪	223
14-2. 电花仪的应用范围	225
14-3. 电花仪的構造形式及其联接綫路	227
14-4. 利用鉄磁子測量雷电流的幅值	229
第十五章 电場分佈的測量	232
15-1. 測量电压分佈的綫路	233
15-2. 电解液池中的測量	235
第十六章 电量损失的測量	238
第十七章 冲击电压分压器	244
17-1. 通論	244
17-2. 电阻分压器	245
17-3. 电容分压器	251
第十八章 电子示波器中的物理过程	253
18-1. 現代高压电子示波器的工作原理	253
18-2. 电子在电場內的加速和傾偏	253
18-3. 电子束的聚焦	264
18-4. 电子示波器的最大記錄速度	273
18-5. 萤光屏	275
第十九章 示波器的構造和綫路	277
19-1. 高压示波管	277
19-2. 冷陰極示波器	281
19-3. 顯微示波器	233
19-4. 帶机械扫波的电子示波器	285

19-5. 某些控制元件和同步元件	287
19-6. 時間扫描波發生器的綫路	290
19-7. 記錄一次快速現象用的冷陰極示波器的綫路	293
19-8. 記錄一次快速現象用的熱陰極示波器的綫路	294
19-9. 重复过渡現象分析器	300

第三篇 高压实验室的基本設備

緒論	303
第二十章 工頻高压試驗变压器	305
20-1. 通論	305
20-2. 一些已經制成的变压器的說明	307
第二十一章 直流高压發生器	314
21-1. 整流器	314
21-2. 串級發生器	316
21-3. 靜电發生器	324
第二十二章 冲击电压和冲击电流發生器	330
22-1. 冲击高电压發生器	330
22-2. 大电流冲击波的發生和电流电压的联合試驗	350
22-3. A. A. 高列夫教授的迴路	355
第二十三章 高頻和提高的頻率的試驗裝置	357
23-1. 高頻試驗裝置	357
23-2. 供高压 x 光管电源用的共振变压器	360
补充参考資料目錄	363
附 錄	363

緒 論

在本世紀初已出現了几万伏电压的电气設備，不久就有用 110 仟伏电压的。这样高的电压、發电厂容量的增大，以及對於高压設備的可靠性和無事故性方面要求的提高，曾在电机工程师面前擺着在那时的各电工学科中找不到足够解釋的一系列的新問題。

絕緣的問題具有重大的意义：由於高的工作电压特别是大气的和操作的过电压对絕緣的作用，所以为了選擇絕緣材料和估計各种結構的絕緣性能，需要深入研究材料本身的电气特性和計算絕緣强度的方法。

關於在运行中所發生的过电压以及如何才能將过电压限制在適當数值上底明确概念已是迫切需要的了。由於在綫卷中波的过程進行得复雜，电机和变压器的絕緣問題是特別困难的。已經弄清楚了，解决新產生的問題不僅需要新的理論，而且需要廣泛地進行实际的实验工作。需要有可以研究極短時間的瞬变过程的新的电压測量技術。除了按照可能的过电压來計算和試驗絕緣設備的問題，以及目前仍是高压工程的基本問題的对保护电器的有效性的估計的問題以外，又產生了与大量容量的电力網絡的發展有关的一系列的其他問題。

關於消除事故和很快地有選擇性地將絕緣已經損坏的一段網路断开並使網路恢复正常工作的問題的重要性，並不比將絕緣維持在必須的水平上的問題的重要性小，也不比它容易。

發电厂容量的增大和利用長距离的高压輸电綫建立各發电厂之間的联系的合理性又提出了有关同步机並联运用以及在短路时保持其穩定性的新問題。需要研究計算短路电流的新理論及短路电流對於电器的穩定性、机械强度和热力强度 (термическая прочность) 的影响。

电訊網路的發展和高压电力網絡的發展引出了新的問題：關於高压綫路对通訊綫的干擾和危險作用的問題，關於容許接近距离和电訊設備的防护方法的問題。接地和地中故障电流的傳播过程等問題都具有重要的意义。

需要可以獲得各式各样高压的实验設備，需要設計仿制大气过电压的設備及相应的測量仪器，需要裝設長綫及有發电厂的复雜網路的模型以及其他的模型。

总合上述各种新的問題就形成了一門新的学科，叫作“高压工程”。

苏联在 30 年代里出版了 A. A. 斯姆洛夫教授的“高压工程与电力輸送”三卷巨著，被批准作为动力学院的教本。該書对高压技術干部的培養起了很大的作用，其特征是在一門課程中廣泛地包括了各种問題。第一册由兩部分組成。一部

分講電場和材料的電阻(場的幾何學和電場中的物理過程, 設備的絕緣); 另一部分講輸電綫(輸電綫的穩定狀況、經濟核算、調節、直流輸電), 對電訊綫的影響, 高壓電流的危險性及保護方法, 短路電流, 並聯運用的穩定性, 綫路中的瞬變波動過程, 防止過電壓的裝置, 在綫卷中的波動過程和輸電綫的機械計算。

第二冊講測量, 試驗變壓器, 絕緣材料, 高壓電纜, 電力變壓器(結構、特性、綫卷、冷卻、保護)。第三冊整本講高壓電器(電動力、正常情況和短路時的發熱、接觸點、絕緣、熄弧、開關的型式、構造與計算、高壓熔斷器、隔離開關、電抗器和測量用互感器)。

在一門課程中這樣廣泛地包括各種問題是難望適應現代電工技術情況的。高壓設備在國民經濟及技術上的重大意義, 自然迫使普通電工課程(電工原理, 電機課和變壓器課)擴充內容, 包括從前列入高壓工程的某些問題。另一方面, 電器製造、繼電器保護和自動控制、輸電綫和絕緣材料等方面的技術迅速發展, 又迫使對這些問題開設個別的专业課程, 包括本身的理論內容與實際內容。

高壓工程一課既在普通課方面受到攻擊, 又在專業課方面受到攻擊, 很多人以為這門課程的必要性已經沒有了。很顯然地, 兩種極端(即把課程內容過分擴充或過分縮小, 例如縮減成“過壓及防護”課)都是不會得到廣大的工程界和教育界的同情的。

用高壓工程一詞代表極其廣泛的內容的企圖還繼續着, 但現在這些企圖難得持久。

另一方面在蘇聯在最近的五年計劃中的交流 400 仟伏左右的強力的特長綫路和超高壓的直流輸電綫路的廣泛發展, 使一系列無疑是屬於高壓工程的那些內容具有更大的意義。絕緣的問題大大地複雜化了。由於極長綫路以及變壓器底和電抗器底過飽和等所引起的內部過電壓的某些形式具有很大的意義。無論是從損耗的觀點或是從下述因素的觀點出發, 關於電量的問題都需重新提出, 這些因素不僅對瞬變狀態的過電壓的限制, 而且對增加長綫的電容和在電訊綫路中和信號綫路中所引的干擾都是重要的。超高壓實驗室底需要迅速地增長着, 高壓測量的問題也很快地複雜化。用來研究複雜的波動過程和雷電放電的模型法開始起更大的作用。也許像 A. A. 高列夫教授所提議的那樣, 利用修訂“高壓工程與長距離輸電綫路”专业的教學計劃的方法, 在新的技術基礎上, 使高壓工程和長距離輸電綫路恢復更密切的關係可能是正確的。在修訂電力 and 電機兩專業組的教學計劃時, 應擴充普通高壓課程的講授, 因為高壓工程課不但是培養未來電機工程師的必要的專課, 而且由教學方法的觀點看也具有很多的優點, 可以極其廣泛地利用在物理、數學及電工原理等領域中的先修基礎, 並能巩固這些知識。

讓我們簡短地提一下在蘇聯高壓工程發展的重要階段。在革命前, 俄羅斯高壓工程的發展是 1911 年由 M. A. 夏且林 (M. A. Шателен) 發起在列寧格勒工業大

學建立高壓實驗室而奠定基礎的。從1912年到1916年在M. A. 夏且林的領導下，他的天才學生A. A. 高列夫和A. A. 契爾尼雪夫在絕緣子、測量技術、長綫理論、高壓對電訊綫路的影响等領域中完成了重要的科學研究工作。在1914年建設了莫斯科和名為“輸電”發電廠之間(60公里)的70仟伏的綫路。

但只有偉大的十月社會主義革命和列寧電氣化計劃才給電氣工業這一新的領域开辟了廣大的遠景。

列寧格勒工業大學的高壓實驗室開始迅速發展。利用這個實驗室研究出了“高壓絕緣子的技術條件”並且運用到35仟伏以下的國產絕緣子的生產中去了。這些研究是和陶業學院及“無產者”工廠聯合進行的，保證了蘇聯電瓷的高度絕緣強度、抗熱強度和抗潮性。後來在A. B. 叶菲莫夫(A. B. Ефимов)的領導下，在全蘇電工研究所的絕緣子實驗室內，開展了大規模的研究，這些研究使祖國的陶瓷絕緣子工業完全脫離了對外國的依賴。

在十月革命後的初期與列寧格勒工業大學同時，物理工程學院的A. Ф. 越飛(A. Ф. Иоффе)對高壓工程起過重要的作用，他的同事[Н. Н. 西蒙諾夫(Н. Н. Семенов), В. А. 福克(В. А. Фок)等]創立了介質击穿的新穎的先進理論，對這項知識的發展，無論在蘇聯國內或是在外國，都起過重大的影响。在物理工程學院的基礎上而成立的電氣物理學院(A. A. 契爾納雪夫)的主要方向是研究高壓工程的問題。在這裡開始變壓器綫卷中的瞬變過程的研究，後來同莫斯科變壓器製造廠(МТЗ)和全蘇電工研究所的變壓器實驗室共同繼續研究，並在絕緣材料特性的科學的理論原則和大規模的實驗室研究工作的基礎上，用國產材料製造了各種電壓和容量的變壓器。

由於設計建設古比雪夫到莫斯科的400仟伏的輸電綫(1939年)，高壓研究獲得了特別廣泛的發展。在列寧格勒建設了第一個電壓為450—500仟伏的試驗綫路，並建設了一些具有相應的設備的實驗室。

今年全蘇電工研究所滿30週年，它是在1921年依照列寧親自的指示建立的。現在該院高壓科是聯合各工廠保證生產各種電壓(包括400仟伏的設備)的高壓電器、絕緣子、變壓器、隔離開關和避雷器的主要科學機關。

以A. A. 斯姆洛夫教授命名的實驗室通過它在絕緣、測量技術等領域中以及高頻通信和繼電保護等領域中的研究在蘇聯高壓工程的發展中，起過很大的作用。哈爾科夫電氣工程學院[ХЭТИ(現改ХПИ哈爾科夫工業大學)]對於當電壓在2兆伏以下時的輸電綫上電磁波傳播方面的研究，和從接地器流出大量沖擊電流時橫伸接地裝置(протяженный заземлитель)的工作的研究具有重大意義。這個實驗室建造了唯一的電壓為8兆伏的沖擊發生器，其沖擊電容很大，又建造了3兆伏的攜帶型發生器作為野外研究用。這個實驗室已開始研究決定變電所高壓設備保護的要求的波動過程。

在战后的时期里，在列寧格勒建立了巨大的研究所，研究直流高压輸电的問題，最近其任务中又包括 400 仟伏交流綫路的瞬变过程和电量現象的研究。我們还要提出电纜工業科学研究所，它的任务包括保証供給偉大建設以交流电压为 110—220 和 400 仟伏，和直流对地电压为 400 仟伏的电纜。苏联科学院的各實驗室，以 Г. М. 克尔瑞冉諾夫斯基命名的动力研究所为首，在解决现代高压工程的問題中起着重大的作用。

苏联高压網路的發展史在 А. Я. 利亞布可夫著的“电力網路的电气計算”和 А. М. 查列斯基的“电力輸送”兩本教科書的緒論中都有介紹。

偉大的共產主义建設計劃的實現給高压工程提出了一系列的新問題：關於电压为 400 仟伏，長度达 1000 公里的綫路的設計和建筑的問題，有关適當的新的电气設備（發電机，變压器，調節用电抗器，电容器，开关，避雷器及隔离开关）的生產上的問題。在輸电綫的功率、电压和長度各方面說來，这样大的規模的建筑在全世界的技術上是从未有过的。苏联工業和工程干部成功地解决着所提出來的問題。綫路和一切高压設備的絕緣問題是高压工程师的最重要的問題。正确估計內部过电压和外部过电压对絕緣的要求和選擇適當保护措施的問題是具有重大意义的。輸送 1 500 000 仟伏安上下的功率到 1000 公里的距离以外的綫路的設計，需要对下列各方面的問題進行新的研究，如：电量損失，在長綫中当變压器和电抗器的鉄心过度飽和並考慮到电量过程时的內部过电压，用避雷器保护 400 仟伏設備來防止大气过电压，以及作 400 仟伏綫路的电抗串联的补偿用电容器的保护，这种补偿是用來在並列运行的可靠的穩定性下提高輸送的功率的。

第一篇 在气体中的放电

各种气体的絕緣强度在高压工程中具有重要的意义，因为在各絕緣結構中总是或多或少地存在着空气和別的气体。輸电綫路的導綫和配电設備的母綫就是由空气隙互相隔开，並且和地分开的，空气隙击穿就要引起短路，並可能引起設備的跳閘事故。配电設備中的支柱絕緣子和套管設備以及輸电綫路中的針或絕緣子和懸式絕緣子都是处在空气介質中的。在大多数情形下，这些絕緣子的絕緣强度的损坏都是由沿着表面發展开來的空气中的放电而引起的。在許多液体和固体的絕緣材料中都有气体雜質，介質损坏的过程可能是先由雜質中的放电來决定的。

在中性状态下而且和外界影响隔絕的气体，和真空一样，是絕對不傳導电流的。經過气体流过的傳導电流只有在下述情形下才可能，就是說在气体內要有帶电荷的电子或游子。在大气中总是有少数正負游子(在每立方公分的空气中約有500对游子)，因此空气不是理想的絕緣体。在空气隙兩端接上不大的电位差，在空气中就出現很小的电流。如果外加电压漸漸增加，那么电压达到一定的数值时，就要引起电流的驟然增加，空气隙就突然地失掉它的絕緣性能。空气隙这种从本質上到另一新状态的变化，叫做“气隙击穿”或“气体放电着火”。依气体压力和电源容量的不同，气体放电的特性可能是各种各样的。如果气体的压力不大，而电源的容量也不大(在放电电路中接有很大的电阻)时，放电就成“輝光放电”的形式。例如在充气管和日光灯中就發生輝光放电，輝光放电的特征是电流密度比較小，而且通常是佈滿空气隙的整个横断面的。

在較高的气压下就產生放电的“抽絲”現象，就是說：放电不再佈滿於整个横断面內，而僅局限在一条狭窄的通道內。如果这时电源的容量不大的話，那么放电就成“火花放电”的形式。在电極中間穿过一串断断續續的火花，成为弯曲的和分叉的發光的綫。在火花放电时的电流比在輝光放电时的电流大。

在放电間隙兩端接上大容量的电源，就可以促成放电的新的形式——“弧光放电”的出現。在弧光放电中放电电流最大，电弧和电極的温度顯著地增高，这个現象帶有电路短路的特性。

最后，如間隙的一个或两个电極的曲率半徑很小或是电極間的距离很大，那么就还可能產生一种放电的形式——“电暈放电”。电暈放电或簡称电暈，是僅僅散佈在电極間的部分間隙中的气体放电。在接近曲率半徑小的一个电極的空气層

里充滿了微微的發光的綫或刷。如果在發生了電暈後的電極間的電壓漸漸增加，那麼電暈放電的區域就要擴大，最後達到間隙全部击穿，並視電源容量的大小，成為火花放電或弧光放電的形式。

除外表的特征和電流的大小而外，上述各種放電的形式還具有不同的伏安特性。電暈放電的伏安特性是上升的（就是說：隨着電流的增加間隙上的電壓也增加），而弧光和火花放電的伏安特性却是下降的。輝光放電既有下降伏安特性，也有上升伏安特性。

因為高壓電器通常是在大氣壓力或近乎大氣壓力下工作，使我們感興趣的是後三種放電形式，本篇的主要注意力將集中在這幾種放電上。

對於大氣壓力或更高的氣壓來說，其特征是放電是在狹窄通道中發展的，所以在這些條件下，氣體的击穿可以用下法決定：氣體的击穿就是在電極間突然發生電導很高的通道。

氣體击穿時所具有的很大的電導證明在氣體中出現了大量的游子和電子，這些游子和電子由氣體的中性分子或原子形成。击穿的原因可能只是由於電場的作用所引起的气體的強烈的游離。

氣體放電的特性視由於游離的結果而產生的、大量的電子和游子的狀態而定。在以後各章中，除了游離過程外，我們感興趣的還有這些質點在電場作用下的運動速度和反游離的過程，就是說：使電極間的空間里的電子和游子的數目減少的過程。這樣的過程就是游子由放電通道向周圍介質中去的擴散和游子的復合，就是說異号游子的額外電荷的互相中和。

第一章 游離與游離因子。自由行程長度

1-1. 氣體原子的游離和激發

通常是用下列具體形式表示原子：帶正電荷的核，在其四周不同半徑的軌道上旋轉着電子。這樣的原子模型不能說明現代原子物理中所有的數據，特別是不能滿足光譜分析的要求，但是對我們來說，這樣的模型差不多總是適當的，為解釋簡明起見，我們將採用這種模型。

根據量子學說，原子可以停留在各穩定狀態中的某一個狀態上，而且在每一狀態上原子的內能都有完全一定的數值。在原子模型中，原子的能量狀態的變化通常是和外層電子軌道的大小的變化有關的，軌道的半徑只能具有一定的不連續的値。原子的位能視原子核和電子的相互位置而定，當各電子停留在離原子核最

近的各軌道上时，原子具有最小的位能。原子在正常状态时，所有的电子都在相当於能量的最小容許值的各軌道上。一个电子由內層軌道跳到任意一較远的軌道上时，原子的能量增加，所增加的数量相当於电子在“起始”軌道上和在“終止”軌道上的位能的差。为簡便起见，我們假定：中性原子的正常状态的能为零，而且所有其他状态的能都由这个假定的“零点”算起。

圖 1-1 和圖 1-2 是氫原子 H 和汞蒸汽 Hg 的能級圖，从圖上可得到關於原子的可能的能量状态的清晰的概念。用所謂“电子伏”的特殊單位來表示电子的能量是方便的。1 电子伏(簡寫 1 eV)的能量等於电子在电位差为 1 伏的兩点間移动时电場所作的功。例如：如果电子在电場內經過一定的路程，而且其起点和終点的电位差等於 10 伏的話，那么这个电子就具有了 10 电子伏的能量。因为电子的电荷等於 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ 庫倫，所以 1 电子伏的能量等於：

$$1 \text{ 电子伏} = 1 \text{ 伏} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ 庫倫} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 瓦秒} = 1.6 \times 10^{-12} \text{ 尔格}$$

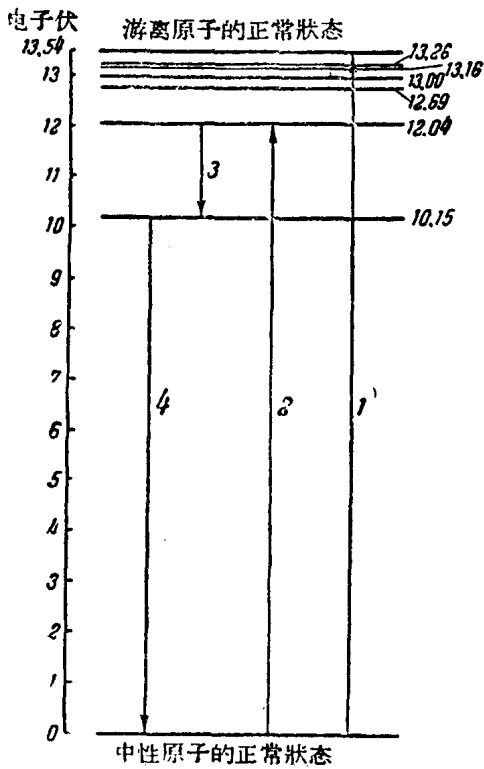


圖 1-1 氫原子的能級
各箭头指示：1—耗能 13.54 电子伏而游离；2—耗能 12.04 电子伏而激發；3—由高軌道轉到低軌道，放出能 1.9 电子伏(波長 656.3 毫微米)；4—激發原子恢复正常状态，放出能 10.15 电子伏(波長 121.6 毫微米)。

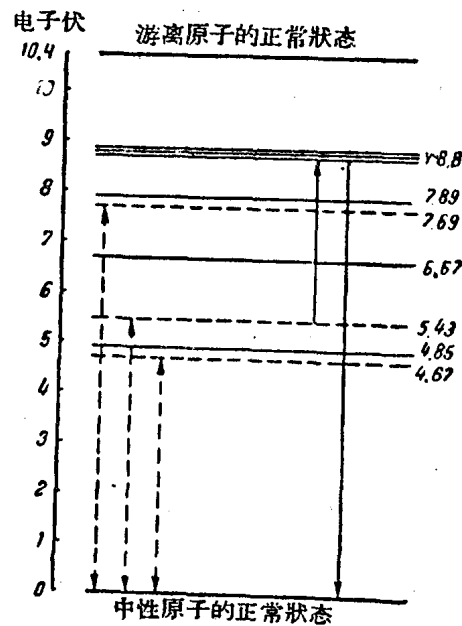


圖 1-2 汞原子的低級能級
虛綫表示介穩能級，虛箭头表示被禁止的轉变，实箭头表示某些可容許的轉变。

电子跳到任一离原子核較远的軌道上去时，原子的能量就增加到 W_1 ，只有在外部能源的作用下，而且能給原子以必須的能量时，电子才能跳到較远的軌道

上。一个原子的外層电子跳到一个較远的軌道上去时，这个原子就称为激發原子。这时所費的能量称为激發能。很顯然，电子轉到的那个軌道离原子核愈远，激發能就愈大。在表 1-1 中列出各种气体的最小激發能的数值，所謂最小激發能就是电子由中性原子的正常軌道轉变到离正常軌道最近的次一軌道上去时所必需的能量。

表 1-1

各种气体和蒸汽的原子和分子的游离电位（能）和激發电位（能）

气 体 或 蒸 汽	第一游离电位, 伏	第二游离电位, 伏	第一激發电位, 伏	介穩能級的电位, 伏
H	13.5	—	10.15	—
H ₂	15.9	—	10.8	—
He	24.5	54.2	19.8	19.7 20.55
N	14.5	29.4	—	—
N ₂	15.8	—	6	—
O	13.6	34.8	—	—
O ₂	12.5	—	7.9	—
Ne	21.5	40.7	16.6	—
Cs	3.88	23.4	1.38	—
Hg	10.4	18.6	4.86	4.67 5.43 7.69
CO ₂	14.4	—	10.0	—
H ₂ O	12.7	—	7.6	—

当一个电子离开原子核这样远，以致它与原子核之間沒有相互作用时，电子就变成自由的，就是說，原子分离成两个互不相干的質点——电子和正游子，發生了原子的游离。为了游离中性原子，必須由外面給这原子以完全一定的能量，这能量通常称为游离能 W_u 。

为了方便起见，通常不講游离能，而講游离电位 U_u ，游离电位的数值是等於用电子伏表示的游离能，因为在这种情形下电子的电荷是假定为 1，

$$W_u = qU_u. \quad (1-1)$$

各种气体的游离能在 3 到 25 电子伏的范围中，照例惰性气体的游离能为最大，鹼金屬蒸汽的游离能为最小。最常用的各种气体的游离电位的数值見表 1-1。

如果除最外層电子以外，还由原子中出來一个和原子核联系得較緊的电子，那末这样的原子就称为二重游离原子，相应的游离电位称为第二游离电位。很顯然，第二游离电位比第一游离电位大，第三游离电位比第二游离电位大，依此类推。某些气体的第二游离电位的数值列在表 1-1 中。

与中性原子一样，游离后的原子也有激發状态，游离后的原子的激發能比中