

〔加〕E·库弗尔 〔德〕W·S·岑格尔 著

高电压工程基础

机械工业出版社



高电压工程基础

〔加〕 E.库弗尔 〔德〕 W.S.岑格尔 著
邱毓昌 戚庆成 译



机械工业出版社

(京) 新登字054号

本书系统地论述了高电压产生和测量技术的基本原理和方法；气体、液体和固体等介质中击穿放电现象和机制；高电压设备绝缘结构设计的原则；电场计算分析的实用方法；绝缘检测的新技术及过电压绝缘配合的基本概念等。这些都是高电压工程技术领域中最主要的基础知识和应用技术。书中全面总结了有关的经典理论和最新的技术发展，并有作者独到的见解和深入的分析。

本书可作为大专院校高电压技术等专业高年级学生和研究生
的专业教材，也可作为电力系统、电工设备、技术物理等有关方
面的科技人员学习和参考。

HIGH-VOLTAGE ENGINEERING

Fundamentals

E. KUFFEL W. S. ZAENGL

Pergamon Press

1984

* * *
高电压工程基础

[加] E. 库弗尔 [德] W. S. 岑格尔 著

邱毓昌 戚庆成 译

*
责任编辑：李振标 版式设计：胡金球

封面设计：姚毅 责任校对：肖新民

责任印制：卢子祥

*
机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码：100037

(北京市书刊出版业营业许可证出字第117号)

北京交通印务实业公司印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*
开本 850×1168 1/32·印张 13 7/8·字数 365 千字

1993年9月北京第1版·1993年9月北京第1次印刷

印数 0 001—2 400·定价 17.00 元

*
ISBN 7-111-03580-1/TM·453

译者序

高电压技术是一门实用性很强的工程技术，主要应用于电力系统和电工设备制造等工业部门。一个世纪以来，随着电能需求量的不断增长，高电压技术已有突飞猛进的发展。电力系统的运行电压现已高达500~750kV，1100~1500kV特高压输电线路和设备也正在研究和试运行。这些都与高电压技术广泛深入的研究分不开的，同时也代表了它的发展水平。此外，高电压技术还广泛应用于机械加工、探伤、静电纺织、印刷、喷涂、除尘、地质勘探等工业领域，以及医用透视，起搏、体外碎石等器械设备。近代的尖端技术，如激光、超导、高能粒子、热核聚变等技术物理和军工技术领域也都需要应用高电压技术。

在各种各样的应用中，对高电压技术的要求也有所不同。因此很需要从根本上阐明高电压技术的基本原理，才能适应各种领域提出的需要。E.库弗尔 (E.Kuffel) 和W.S.岑格尔 (W.S. Zaengl) 两位教授所著的这本《高电压工程基础》，系统地阐述了高电压测试技术、放电机理、绝缘设计等基本原理和方法，同时也介绍了电场计算分析的实用方法、绝缘检测的新技术及过电压绝缘配合的基本概念等内容。这些都是高电压工程领域中最主要的基础知识和应用技术。书中内容全面、充实、新颖、深入，作者引用了大量的参考资料（每章都有几十篇或上百篇资料），总结了经典理论和最新的技术发展。因此，这本书是高电压技术方面理论水平高、实用价值大的专著，很适合于大专院校高电压专业等师生和电力系统、电工设备、高能物理等有关方面的科技人员学习和参考。

此书作者，E.库弗尔教授是加拿大曼尼托巴大学工学院院长，W.S.岑格尔教授是瑞士苏黎世联邦科技大学高电压技术研

研究所所长，也是国际高电压技术学术会议的创始人之一。两位教授长年从事高电压测试和绝缘气体放电机理等研究，都有突出的技术成就和贡献，是国际高电压界造诣很深的著名学者，享有很高的声誉和学术地位。在本书中有不少内容就反映了两位作者独到的见解和许多技术成就。因此，译者很乐于给读者介绍他们所著的这本书，以满足我国高电压工程技术发展的需要。

本书第一、二、三、六章由戚庆成翻译，第四、五、七章由邱毓昌翻译。译者对西安交通大学严璋教授为本书第四、五、七章，电力科学研究院曾昭华教授级高工为本书第一、二、三、六章所作的校对和修改工作深表感谢，并欢迎读者对译文中的不足和错误提出批评和意见。

译者 邱毓昌 戚庆成

1992年4月

原 序

近年来，很需要有一本新的基础性的高电压工程技术教材。较早的一本是E.库弗尔（E.Kuffel）和M.M.阿伯杜拉（M.M.Abdullah）于1970年出版的，它流传很广，然涉及的领域稍嫌不足，且部分内容在目前已有些过时。

本书拟包括高电压实验室技术、高电压现象以及指导高电压绝缘设计的原理等基础性内容。

在介绍一些历史性知识之后，第二、三章综合地、严格地论述实验室、高电压的产生和测量技术，并广泛地引用了各种国际标准。

第四章评述控制场强的各种方法，并向读者介绍现代的数字技术及其在计算简单的实际绝缘中场强方面的应用。

第五章广泛地介绍有关气体放电以及气体、液体和固体绝缘电气击穿的基本机制。

第六章涉及现代的放电检测技术。最后一章则是对系统的过电压及绝缘配合的概述。

作者希望本书能满足高等院校高电压技术专业高年级学生和研究生的要求，也能供研究气体放电的青年科技人员参考。本书中有关高电压技术的深入论述对高电压设备的设计、运行人员以及电力企业的工程师们尤其有益。

作者阿伯杜拉博士同意复制《高电压工程》〔珀格蒙（Pergamon）出版社1970〕一书中的一些资料深表感谢。

作者 E.库弗尔 W.S.岑格尔

1984年3月

目 录

译者序

原序

第一章 绪论	1
第一节 电能的生产与传输	1
第二节 电压作用状况	3
第三节 试验电压	4
一、工频电压试验	4
二、雷电冲击电压试验	4
三、操作冲击电压试验	5
四、直流电压	5
第二章 高电压的产生	6
第一节 直流电压	7
一、交流转换为直流	8
二、静电发生器	22
第二节 交流电压	28
一、试验变压器	30
二、串联谐振回路	38
第三节 冲击电压	46
一、冲击电压发生器回路	49
二、冲击电压发生器的运行、设计和制作	63
参考文献	75
第三章 高电压测量	77
第一节 用火花间隙测量峰值电压	78
一、球间隙	79
二、均匀电场间隙	96
三、棒间隙	97
第二节 静电电压表	98
第三节 串有高阻抗的电流表和高阻分压器	101
第四节 旋转电压表	111

第五节 峰值电压测量	176
一、整流电流法	117
二、无源整流回路和分压器	119
三、有源或放大回路	123
四、测量回路的高压电容器	125
第六节 分压系统和冲击电压测量	132
一、电压产生和测量的一般回路	133
二、对测量系统转换特性的要求	136
三、测量系统计算的基本原理	144
四、分压器	150
五、分压器与测量回路间的相互作用	166
六、测量系统的低压臂	174
参考文献	178
第四章 静电场与场强控制	181
第一节 电场分布和绝缘材料的击穿强度	181
第二节 各向同性的均匀材料中的电场	185
第三节 各向同性的多种介质中的电场	206
一、简单的结构	206
二、介质中的折射	210
三、用浮电位屏控制场强	214
第四节 电场分析的实验方法	220
一、电导模拟	221
二、阻抗网络	223
第五节 数字计算法	226
一、有限差分法 (FDM)	226
二、有限元法 (FEM)	232
三、模拟电荷法 (CSM)	241
参考文献	259
第五章 气体、液体和固体中的电击穿	262
第一节 经典气体定律	262
第二节 电离和衰变过程	275
第三节 阴极过程——二次效应	298
第四节 从非自持放电到击穿的跃迁	305

第五节	火花的流注或“通道”机理	307
第六节	火花放电电压——巴申定律	314
第七节	彭宁效应	321
第八节	击穿场强 (E_b)	321
第九节	不均匀电场中的击穿	323
第十节	电子附着对击穿判据的影响	326
第十一节	局部击穿, 电晕放电	329
第十二节	极性效应——空间电荷的影响	335
第十三节	冲击击穿电压——时延	340
第十四节	固体和液体介质中的击穿	347
	一、固体中的击穿	347
	二、液体中的击穿	365
	参考文献	372
第六章	非破坏性绝缘试验技术	375
第一节	高电压下介质损耗和电容的测量	375
	一、西林电桥	375
	二、变压器比例臂电桥	379
	三、整体设备损耗的测量	381
	四、指零仪	381
第二节	局部放电测量	384
	一、局部放电的等值电路	385
	二、局部放电电流	388
	三、局部放电视在电荷测量回路	390
	四、干扰的抑制; 特殊方法	404
	五、其它局部放电参量	405
	六、整套试验装置中局部放电检测仪的校准	407
	参考文献	408
第七章	过电压和绝缘配合	410
第一节	雷电机制	410
第二节	试验用的模拟雷电波	416
第三节	操作冲击试验电压特性	419
第四节	绝缘配合	422
	参考文献	432

第一章 绪 论

第一节 电能的生产与传输

通称为发电机的“直流发电机”研制成后不久，人们就认识到，由公用的发电系统给许多用户供电能有不少效益。

第一座公用的发电厂于1882年在伦敦荷本 (Holborn) 投入运行。其他一些公用电厂也很快在别的发达国家相继投产。早期的系统生产低电压的直流电，它们限于供给非常狭小的范围，并主要用于电气照明。低电压直流输电的这些局限性显而易见。截至1890年，交流发电机和变压器的研制技术已经完善到这种程度，使交流供电日益通用起来，并取代了早期的直流系统。第一座较大的交流发电厂于1890年在德普福特 (Deptford) 交付使用，它以10000V电压通过28 mile (英里) 距离向伦敦市中心供电。从那最初的“电气”时期起，人们就体会到，为了充分发挥电能生产的经济效益，必须使输电网络增加相互的连接，使电能生产组合在整体的系统中。此外，还认识到要开发水电资源，并需将此电力远距离输送到用电中心。

大系统的电能输送，不管是大系统之间的互相联系或者是很大容量的输电，必然使工程师们考虑用较高的系统电压。图1-1按建造年代为序列出了某些较大的交流输电系统以及本世纪末(图中虚线部分)的初步预测。

架空的交流输电线路可传输的功率 P 大致随自然功率或系统运行电压的平方成正比增加。因而对于波阻抗为 $Z_L(\approx 500\Omega)$ 、运行电压为 V 的输电线路，其输送功率约为 $P=V^2/Z_L$ 。由此，对架空的交流系统可导出如下结果：

V (kV)	400	700	1000	1200	1500
----------	-----	-----	------	------	------

P (MW) 640 2000 4000 5800 9000

近几十年来, 电能需求量的不断增长, 远离工业生产中心的大型水电站的开发, 和需要远距离输送电能到这些中心等, 使输电电压水平迅速上升。

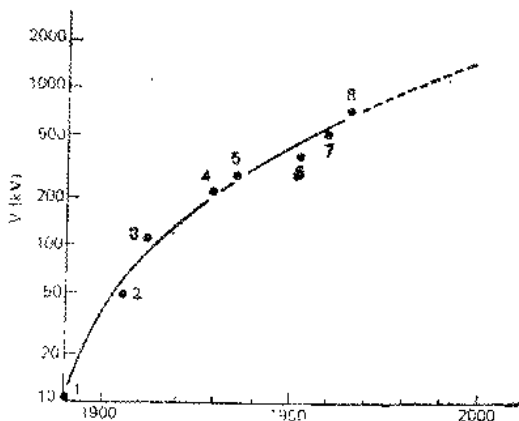


图 1-1 高压交流输电系统的发展

- | | | |
|---------|-------|------------------------------------|
| 1--1890 | 16kV | 德普福特 (Deptford) |
| 2--1907 | 50kV | 慕尼黑市电厂 (Stadtwerke München) |
| 3--1912 | 110kV | 洛哈姆—里萨 (Lauchhammer—Riesa) |
| 4--1926 | 220kV | N. 赛夕法尼亚 (N. Pennsylvania) |
| 5--1936 | 287kV | 波尔德水坝 (Boulder Dam) |
| 6--1952 | 380kV | 哈斯普雷盖特—哈斯贝 (Harspranget—Hallsberg) |
| 7--1959 | 526kV | 苏联 (USSR) |
| 8--1965 | 735kV | 曼尼夸干—蒙特利尔 (Manicougan—Montreal) |

尽管世界上大部分输电都用交流系统进行, 然而直流高电压技术近期的进展已能用架空线路和海底电缆实现大规模的直流输电, 它在远距离大容量输电方面已很有经济上的吸引力。高电压直流输电在给定的线路走廊内允许传输的功率密度比交流输电高, 因而有助于电力公司适应输电的环境条件。

表1-1概括了高压直流架空输电估算的最佳电压。某些已运行或正在建设的较大的高压直流输电线路以其交付使用的年代为序列于图1-2中。目前普遍的看法认为, 高压直流输电可能不需

要超过 $\pm 800\text{kV}$ 的电压。

表1-1 高压直流输电估算的最佳电压与电流

双板线路输送容量 (MW)	线路电压 (kV)	直流电流 (A)
500~1000	± 400	600~1250
1000~2500	± 500	1000~2500
2500~4000	± 600	2100~3300
4000~6000	± 700	2150~4300
6000~9000	± 800	2800~5600

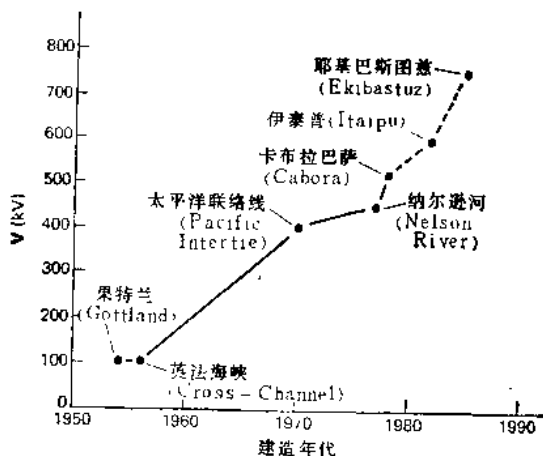


图 1-2 高压直流输电系统的发展

第二节 电压作用状况

正常运行电压并不会使电力系统绝缘遭受危险的作用，只是在特殊情况如污染状态下运行电压才可能造成外绝缘问题。尽管如此，运行电压仍然决定了发电、输电和配电设备绝缘的尺寸。电力系统的电压作用状况将因各种各样的过电压而加强。这些过

电压可能来自外部或内部的原因。外部过电压与雷闪放电有关而不取决于系统运行电压。因此，雷电过电压作用的重要性将随运行电压的升高而下降。内部过电压产生的原因是系统运行状态发生变动，例如开关操作、系统故障、负载或电源的波动等。

内部过电压的幅度与额定电压、状态变动发生的瞬时和系统的组成等等有关。鉴于系统状态的变动往往与开关操作相关，因而这些过电压就统称为操作过电压。

在系统的绝缘设计中，特别重要的两方面内容为：

(1) 确定电压作用状况，绝缘应耐受此作用；

(2) 确定绝缘在承受这些电压作用时的特性。绝缘上的电压作用状况和该绝缘的介质强度之间的协调平衡属于绝缘配合的范畴，这将在第七章中进行讨论。

第三节 试验电压

电力系统的设备不仅必须耐受额定电压 V_n ，它相当于特定系统的最高电压，而且还应耐受各种过电压。因此，在研制期间或在交付使用之前必须对高压设备进行试验。试验电压的幅值和类型随各个装置的额定电压而有所不同。所有各类装置施加交流电压、直流电压、操作冲击电压和雷电冲击电压的基本技术和高压测量的标准方法已订入有关的国家标准和国际标准。

一、工频电压试验

为鉴定设备绝缘在系统的工频电压下的耐受能力，设备要经受1min的工频电压试验。工频用50Hz或60Hz取决于不同国家。为了能模拟多年运行期间可能遇到的电压作用状况，试验电压设定在高于预期工作电压的水平。对于户内装置，试验仅在干燥状况下进行。对于户外设备，可能要求按相应的规定在标准淋雨状况下进行试验。

二、雷电冲击电压试验

雷击输电线路将会在线路上引起急剧上升的电压，并产生沿线路传播的流动波。它有可能损害系统的绝缘。这种过电压的幅

度取决于绝缘水平而可达几百万伏。大量的测量和长期的经验表明，雷电过电压的特征是波前上升时间短，约从几分之一到几十微秒，而后缓慢下降到零。标准冲击电压已确定为一种非周期性的脉冲，它在 $1.2\mu\text{s}$ 内达到峰值，而后约在 $50\mu\text{s}$ 内缓慢下降到半峰值。标准冲击电压波形及其允许偏差等详细情况将在第二章中介绍，而规定的试验程序将在第七章中讨论。

除了用于设备试验外，冲击电压还广泛用于研究试验室中进行放电机理的基础研究，特别是注意击穿时间的试验研究。

三、操作冲击电压试验

因电力系统状态突然变动，如开关操作或故障而产生的暂态过电压通称为操作过电压。一般认为，额定电压约为 300kV 及以上的高压电力系统中，操作冲击电压往往是影响绝缘设计的主要因素。因此，各种国际标准都推荐 300kV 及以上电压的设备应作操作冲击电压试验。虽然在系统中发生的操作过电压波形可能很不一样，但经验表明，对于实用的闪络距离，其耐受电压在波前时间为 $100\sim 300\mu\text{s}$ 的冲击波作用下最低。所以，推荐的操作冲击电压已规定：波前时间约 $250\mu\text{s}$ ，半峰值时间为 $2500\mu\text{s}$ 。有关操作冲击电压试验的电源、测量和试验程序的详细情况可在第二、三、七等章中查找。

四、直流电压

以往直流电压多半用于纯科学研究工作。工业应用主要限于试验电缆，这是因为它的电容量相当大，在交流电压试验时就需取用很大的电流，此外还要受到这样的限制，即绝缘试验时的内部放电可能导致绝缘性能的劣化。近年来，随着高压直流输电的重要性很快增长，越来越多的工业试验室正在配置直流高压电源。直流高电压在基本物理试验和工业应用中有多多种多样的用途，因而对输出电压的要求也就相应地各不相同。各种型式的直流高压电压发生器将在第二章中详细叙述。

第二章 高电压的产生

有关产生高电压的发生器和电路的基本知识是高电压技术的基础。

商用的高电压发生器通常装在做例行试验的实验室中，用来试验变压器、套管、电缆、电容器、开关等设备。试验要确认这些产品的性能和可靠性，所以需要高压试验装置来研究这些电器在运行中可能遇到的各种条件下的绝缘状态。试验所用的电压总是高于试品的额定电压或运行电压，其幅值和类型一般由本国或国际标准规定，所以对高压试验装置的选择余地不大。不过，做例行试验的实验室也常用于开发新产品。为了确定预计条件下的安全系数，并保证获得适当的裕度，所需的电压会高一些。只要设计得合适，大多数高压发生器的回路都可以改动，以增加输出电压的水平。由此可见，即使做例行试验的装置也应考虑以后扩展试验的能力。

研究用实验室的工作各有不同，差别很大，试验装置的类型也相应不同。因为高电压发生器回路对试验结果之间常常互有影响，所以必须仔细设计这些回路。这些试验的等级可能与例行试验不同，这类实验室的回路常需要特殊设计。本章介绍的某些基本回路的知识将有助于研制新的试验回路。

最后要指出，自然科学和应用技术的很多部门都要用高电压。其发生装置的回路与本章以下各节所论述的往往大同小异。受篇幅所限，本书不能介绍所有可能的各种电路，也不涉及高压交直流电力的产生和传输问题或单纯的高电压设备试验技术。近来有很多书籍论述发电和输电的问题，其中有一些已列入最新的书刊目录⁽¹⁾。

本章论述下列三类高电压的产生：直流电压，交流电压和冲

击电压。

第一节 直流电压

在高电压技术中，直流电压主要用于纯科学研究和试验高压直流输电系统中的设备。它也用于试验较长的高压交流电缆，因为这种电缆电容很大，用交流电压试验需要的电流太大（可参阅第二节串联谐振回路）。虽然用直流试验交流电缆比较经济、方便，但试验的有效性却受到试验时绝缘材料中电场强度分布的限制，因为这种电场强度分布与电缆在低频交流电压下输送电力时的正常工作条件差别很大。

直流高电压在物理学（加速器，电子显微镜等）、电子医疗设备（X射线）、工业应用（火电厂和水泥厂的废气沉淀和过滤；静电喷漆和粉末覆盖等）或电子通信（电视；广播站）方面也有广泛的应用。由此，对每一台直流高电压发生装置的电压波形、电压水平、额定电流、短时或长期稳定性的需求差别会很大。只有了解了直流高电压产生的基本原理才能针对应用的特点选择合适的回路。

在国际电工委员会（IEC）标准60—2⁽²⁾或美国电气与电子工程师协会（IEEE）标准4—1978⁽³⁾中，直流试验电压值由其算术平均值定义，以符号 \bar{V} 表示，该值由下式给出

$$\bar{V} = \frac{1}{T} \int_0^T V(t) dt \quad (2-1)$$

若 $V(t)$ 不是常数，而是含有频率 $f = 1/T$ 的周期性振荡， T 是时间周期，则加在试品上的试验电压周期性地偏离平均值。这表示有纹波。纹波的幅值 δV 定义为最大值和最小值之间的一半，即

$$\delta V = 0.5(V_{max} - V_{min}) \quad (2-2)$$

纹波系数是纹波幅值与算术平均值之比，即 $\delta V / \bar{V}$ 。除了有相应的电器标准规定或需要作基础性研究外，作为试验电压，纹波系数不能超过5%。

直流电压一般用接在交流电压上的整流回路产生，或用静电发生器产生。以下分别论述这两种产生的原理。

一、交流转换为直流

获得直流高电压的最有效方法就是将交流整流。虽然各种回路早就为人所知，但组合的固体整流器又便宜又适用，便于构成基本回路。现在的回路中已不再使用真空管、热阴极充气管、汞弧整流器甚至机械整流器了，因为这些回路中都要加入加热阴极的辅助系统，使用很不方便。这种回路的技术可在克雷格 (Craggs) 和米克 (Meek) ⁽⁴⁾ 1954年的著作中看到。现在整流二极管大多用硅管，虽然其反向电压限制在2500V左右，只要将它们串联，用适当的方法使各管子截止时电压分布均匀，就可构成数十和数百千伏单件的整流二极管。这样，可以用一个普通二极管的符号代替电路中的整流器（与电压水平无关）。

很多标准手册中对低电压大功率整流回路都有介绍。此处要讨论的是直流高电压，因而主要研究单相交流系统，它输出直流电压与输入交流电压的比值很高。因为功率或直流输出总受这个比值的限制，而且用的又都是极简单的整流回路，所以我们将只论述众多可用回路中选出的例子。

1. 简单整流回路

为了清楚地了解交流到直流的转换回路，可用单相带滤波的半波整流回路作为基础（图2-1）。如果忽略变压器的漏抗和二极管导通时很低的内阻抗——这点在下文中都适用，专门声明者除外——当D导通时，储能电容被充电至高压变压器h.t交流电压 $V_-(t)$ 的最大值 $+V_{max}$ ，根据D的极性，只要 $V < V_-(t)$ ，充电就继续进行。当 $I = 0$ ，输出端负载为零（ $R_L \approx \infty$ ），C上的直流电压恒定（ $+V_{max}$ ）而 $V_-(t)$ 则是在 $\pm V_{max}$ 之间振荡。二极管必须承受 $2V_{max}$ 的反向峰值电压。当变压器h.t不在a点接地而在b点接地时，情况也一样。这种电路称维尔卡特 (Vilcard) 倍压器，它的有效输出是从D上跨接出去的。此时输出电压在零到 $+2V_{max}$ 之间振荡，可用在串级电路中。