

超 高 电 压

苏联 A. A. 伏罗比耶夫著

水 利 电 力 出 版 社

超 高 电 压

苏联 A. A. 伏罗比耶夫著

赵 智 大译

水利电力出版社

內 容 提 要

本書探討在电工和物理實驗室中获取超高电压的各种方法和綫路，并介紹已經拟制出来的各种設備的結構，以及它們的特性和可能应用范围、

本書可作为高等动力和电工院系学生學習高电压工程或类似課程时的教学参考書，也可供在高电压工程方面工作的工程技术人員参考。

А. А. ВОРОБЬЕВ

СВЕРХВЫСОКИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА

1955

超 高 电 压

根据苏联国立动力出版社1955年莫斯科版翻譯

赵 智 夫譯

1227D348

水利电力出版社出版(北京西便門外大街二里半)

北京市書刊出版業營業許可證出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店發行

850×1168 $\frac{1}{2}$ 开本 262千字 定价(第10类)1.70元

1959年2月北京第1版

1959年2月北京第1次印刷(0001—3,100册)

統一書号：15143·1975

定价1.70元

原 序

本書介紹獲取超高電壓的各種方法的發展和現狀，及其各種設備。

要敘述高壓設備的構造就不能不提到它們的電場形式，它的調整方法以及所用的絕緣。但是為了避免和高等工業學校高電壓工程這一門課程的內容發生重複，在這些方面僅作簡要的介紹。氣體與真空電氣強度方面的材料在我國書刊文獻中尚無充分的論述，因此本書要比較詳細地加以說明。

獲取超高電壓的某些方法已有適當的結構解決與廣泛應用（高壓變壓器，有移動帶的發電機，串級發電機等等）。對於其他一些尚未進行充分研究的電壓獲取方法的意見，在本書中將不多談，或者僅僅提一下。

本書企圖闡明在這一領域內科學技術思想的發展以及它們如何在各種超高壓設備結構中得到工程上的實現。

作者要表彰技術科學博士 **A.A. 高列夫** 教授的巨大勞績，他審閱了原稿並提了許多寶貴的意見。對於 K.C. 斯捷凡諾夫副教授審閱原稿並提出寶貴的批評意見，技術科學博士 И.С. 斯捷柯里尼科夫評閱原稿，技術科學博士 Г.Е. 普霍夫、И.И. 卡略茨基工程師、B.C. 梅列霍夫工程師及 A.M. 特魯比欽工程師審閱原稿的個別章節並提出意見，此外，K.H. 諾維科娃工程師曾幫同定稿，作者均表示深切的感謝。

目 录

緒言	4
第一章 电場的調整与击穿电压的提高	11
1-1. 实际結構的电場計算方法	11
1-2. 各种因素对电場强度数值的影响。电場的調整	22
1-3. 長火花間隙时空气中的放电电压	26
1-4. 气体与汽体放电电压和压力、化学成分及頻率的关系	40
1-5. 真空的电气强度及其在絕緣上的应用	48
1-6. 利用大气电所得到的高电压	53
第二章 高压变压器	57
2-1. 高压变压器	57
2-2. 变压器的串級（鏈式）联接	62
2-3. 整流器及几种交流电压的整流綫路	67
2-4. 高頻諧振变压器	81
2-5. 高頻諧振变压器的結構	83
2-6. 感应器	92
第三章 靜电与电容發电机	95
3-1. 最簡單靜电發电机的作用与裝置	95
3-2. 某些已制成的在大气中工作的移动帶靜电發电机	112
3-3. 在压縮气体中工作的移动帶靜电發电机	122
3-4. 移动帶靜电發电机帶負荷工作的研究	145
3-5. 移动帶發电机所發生的超高压的測量	152
3-6. 移动帶發电机电压的控制与調节方法	160
3-7. 帶电質点电流的測量	174
3-8. 离子对流發电机和粉末靜电發电机	176
3-9. 电容轉子發电机的作用原理	188
3-10. 某些电容轉子發电机的裝置概述	198
第四章 电压倍加綫路和获取巨大电流的綫路。原子核 發电机	210

4-1. 电压倍加綫路	210
4-2. 帶負荷串級發生器的工作原理	216
4-3. 各級由独立的充电裝置并聯供电的串級發生器綫路	232
4-4. 某些已制成的串級發生器裝置	238
4-5. 利用高頻获取直流电压。振盪管	252
4-6. 冲击电压發生器的理論与計算	256
4-7. 冲击电压發生器綫路的發展	269
4-8. 冲击电压發生器的結構	274
4-9. 冲击电压發生器的比較	288
4-10. 冲击 X 射綫攝影术	294
4-11. 电容大电流發生器	300
4-12. 同步获取直流与冲击电压与电流的綫路和裝置	304
4-13. 高压靜电变压器	311
4-14. 將核能直接变换为电能的靜电發电机和电流电源	315

緒 言

高电压工程是由于有必要作大功率远距离輸电而产生的。1880年，彼得堡林業学院教授 Д.А. 拉契諾夫曾經研究与闡述利用电流傳輸能量的理論。他确定了輸电工程的基本發展方向：随着距离与輸送功率的增加，必須提高电压与減少电流。

高电压工程的科学課題是根据輸电的要求而改变的。起初，这种課題是：电量現象及电量能量損耗的計算，制造高压綫路及电机与电器的絕緣以及断路設備。在第一阶段的巨大困难是切断大电流的技术以及和它有关的消弧問題。

此后，由于在电力系统中的雷电事故率很高，所以就有必要对雷电的性能以及气体、液体与固体絕緣中的冲击放电进行研究。在这个問題上所作的研究工作很有成效，这就使我們能够拟訂出适宜的綫路与設備进行雷电过电压的防护并几乎完全消灭了电力系統中由于大气过电压所引起的事故。

按照高电压工程与其所遇到的关键問題的每一發展阶段，試驗技术与高压測量方法也跟着發展起来，而它們在現代已达到高度完善与精密。

高电压工程是从本世紀初开始發展的，多半偏重于交流电工。但近年来，由于發展苏联国民經济的任务而提出了直流高压电工的問題。

对于获取高压与超高压方面的問題进行有效的科学研究决定了电工發展的高度水平。在这方面，我国的学者与工程师有巨大的功績。1876年，П.Н. 雅勃罗契科夫在他所倡議与制成的交流变压器上获得專利权。此后，М.О. 多里伏-多勃罗伏里斯基研究了三相变压器的構造，在現代基本上仍在采用。

1914年，莫斯科物理学家 В.К. 阿尔卡捷夫教授提出了冲击电压發生器的想法，它是利用火花放电器將这一設備中的电容器

从并联自动转换为串联。莫斯科市立沙涅夫斯基大学的物理实验室在1914年按这一原理制成了第一只实用的设备。1940年，A.K. 波杜日纳依与 C.M. 费尔契克副教授在哈尔科夫电工学院中制成8400千伏的發生器。在世界上已制成的一切發生器中，这一装置具有最大的放电功率与最高的电压。美国在1950年所發表的装置数据仅达5000~7500千伏。

1922年，Л.В. 梅索夫斯基与 B.H. 魯卡維士尼柯夫提議采用高频諧振变压器的原理来得到超高压。他們曾对諧振变压器的理論作了重要的發揮与补充，对这个問題的技术解决作了建議与研究。

1925年，B.H. 烏格里莫夫教授發表了自己对具有帶型电荷傳送器的靜电發電机所做的工作。在移动帶表面上携帶电荷的思想在1929年由万-底-格拉夫在結構形式上加以实现。在現代，有移动帶的靜电發電机的电压制到12000千伏，并广泛应用于研究性試驗室內。

按照 A.A. 高列夫教授的倡議，制成了各級独立供电的串級發電机，超高压設備的同步綫路，高压电容器等等。

如此看来，俄国与苏維埃学者在高压的获取方法，电器，測量技术与仪器等方面的發明与研究上有过巨大的貢獻。

工業設備电压的增高及其运用可靠性的提高就要求采用不断增高的試驗电压与拟出特殊的試驗綫路。对于試驗設備提出了特殊的技术要求，例如：这些設備應該产生按一定規律随時間而变化的电压。

設備絕緣在运行条件下往往同时受到各种类型电压的作用。当雷电过电压时，它同时受到工頻高压与冲击电压的作用。当操作过电压时，高频衰減振盪与工作电压的作用互相叠加。

工作电压为400千伏的工業設備絕緣的試驗需要采用很高的电压。按現行标准，絕緣应能耐受1000千伏左右工頻交流电压的作用而不致放电。因为在这种試驗时还必须确定放电电压，所以試驗設備就必须具有1600~1800千伏的額定电压。

冲击电压装置应能进行波幅約 4000 千伏的試驗。根据瑞典 380 千伏系統可能的动态过电压的統計，在建筑变电所时所采用的絕緣水平达 1775 千伏。

閘型避雷器的击穿电压达 900 千伏有效值，而在波形为 1000 千伏/微秒时的冲击击穿电压等于 1250 千伏最大值。

对于戶外的变压器与操作设备选择 1500 千伏的絕緣水平在經濟上是正确的。此时絕緣的干放电电压为 825 千伏，而湿放电电压为 660 千伏。断路器，电流与电压互感器的絕緣水平等于 1775 千伏。对上述设备的內絕緣选择 50 週波一分鐘試驗电压为 781 千伏。

为了研究雷云的静电場、随之而来的雷电形式的高压冲击放电以及流过巨大雷电流的作用，必須有按所需次序模拟这些現象的设备。这种試驗对于研究被雷电击中时电气设备中所生的雷电过电压以及对于飞机与其设备在雷电情况下的性能，飞机上的無線电通訊等都具有很大的价值。

能够使直流高压与冲击电压同时作用于被試品的设备也已制成。

最近 20~25 年来原子核物理的發展引起对获取高电压的新技术进行研究。在現代原子核物理中，高电压最主要的用途是使帶电質点加速。这一目的可以采用在較低电压下使帶电質点逐次加速的方法来达到。这种加速方法称为間接法，而达到这一目的所用的相应设备(迴旋加速器、电子迴旋加速器、同步加速器等)称为加速器。將質子加速到 29 亿电子伏能量的设备已經制成，并正在設計將質子加速到 150~300 亿电子伏能量的设备。借助于加速器而获得極大速度的高速質点可用来得到高电压。

近年来有关获取超高压的方法与說明其设备的論文在杂志中佔有巨大的篇幅。而在原子核技术、X 射綫技术、高电压工程等方面的書籍中对于获取高压的方法与设备也給予很大的注意。在本書中拟將散見于文献中的获取数十万乃至数百万伏电压并在电工与物理實驗室中应用的方法与綫路加以系統整理与分类。

叙述高压设备的構造，它們的計算特性，尺寸及其他具有科学价值的技术数据。工作状态时的單位能量(即儲存在設備單位体积內的能量)及電場强度(平均的与最大的)是高压設備質量的总特性。

在目前，已提出了將原子核能量直接轉变为电能的問題。已經提出了高压原子核發电机、原子核电动机及所需变压器的圖样。

高压与超高压設備仅在絕緣良好的情况下才能可靠地工作。而良好的絕緣要靠建立有利的設備電場形狀及具有高度絕緣性能的材料来保証。

真空与受压力混合气体的高度絕緣性能在近代获得愈来愈多的应用。利用这种絕緣型式的各种高压設備已有适当的結構解决。

現代真空技术的發展水平已能在大容积中得到并維持所需的高度真空。

冶金技术已可为这种装置制造很大的鋼鉄容器。由于現代技术普遍地达到高度水平，成功地制成了有移动帶的靜电發电机，它在壓縮空气中工作并發展到电压超过 12000 千伏。为了工業上的应用，制造了具有气体絕緣的电纜、电容器及測量仪器。利用真空的高度介質性能作为絕緣的靜电發电机、电纜、电容器、空心無綫电波导体等亦已制就。建成了电压达 8300 千伏的冲击电压發生器。建造电压更高的冲击电压發生器在技术上是可能的。設計并制成了巨大的冲击电流發生器，它放电时在高压下产生 500000 安电流。放电时电流达 1000000 安的發生器也正在制造中。

高电压工程的成就使电量与火花放电、介質的电击穿、大气中的雷电現象等科学研究工作开展起来，同时在高压設備(变压器、断路器、避雷器、电容器、絕緣子、电纜等)的設計与生产方面广泛地取得了經驗。由于科学研究的結果，提高了电气設備的工作可靠性，改善与簡化了它們的运用，并降低了价格。

得到巨大能量密度的可能性給物理、化学、天文物理及其他科学部門提出新的研究任务。

將重元素原子核分裂時所得到的核能利用於工業的設計中所遇到的巨大技術困難之一是隨即消除分裂物的問題。目前，原子能應用於工業方面已經走了第一步。在1954年，世界上第一個用原子能工作的功率為5000瓩的發電站在蘇聯開始發電。

在氣體放電時，當流過的電流達數百萬安時，所得到的溫度將達數千萬度。在這種條件下就可能發生有原子核參加的過程。在這過程中，原子核的變化能夠放出大量核能。

如所周知，產生電壓的方法是很多的，其中有一些被應用在高電壓工程中。在這裡，我們指出下列幾類方法：

1. 以電磁感應現象為基礎的方法（電機、變壓器、感應器、諧振迴路）。

2. 靜電的（電容的）方法。在靜電裝置中，當電荷依靠機械力反抗電場力的作用而運動時，電荷的電位獲得提高。

3. 大氣電；曾經企圖將它應用於實驗室中。

4. 熱能直接轉變為電能。

5. 核能直接轉變為電能。

6. 其他方法。

利用第一類與第二類方法可將機械能轉變為電能。這種轉變是當導體割切磁力綫而運動時，或者當電荷在電場中運動時完成的。

這兩種方法在電磁的與靜電的（電容的）機器中採用。在現代，對於工程而言，第一種方法所起作用要大得多。靜電的方法到目前為止還只在為實驗目的而產生高壓與超高壓時加以採用。電磁的方法是工業用電機的基础。

轉動發電機轉子的原動機所產生的機械能轉變為交流電能。利用整流裝置可從交流得到直流。在變壓器中，利用隨時間而變化的磁場割切固定導體，可得到交流電壓。

我們要指出：利用集中電容與電感所組成的迴路中的諧振現象，可以得到高電壓。一方面，由於電磁感應，變化着的磁通在電感中引起電動勢；另一方面，接在迴路中的電容在引入電荷時

得到充电。电容上电压升高是靠静电的方法达到，而电感则靠电磁的方法。

由于原子核物理的成就，已经提出了把原子核在放射性分裂时所放出来的能量直接转变为电能的装置。这种装置的可能情况有如下述：带电质点能够使绝缘的电容充电到和这些质点的速度相应的电压，它由下面条件决定： $\frac{1}{2}mv^2 = eU$ ，其中 m 与 e ——质点的質量与电荷； v ——质点的运动速度，而 U ——和这一速度相应的电位差。

如果阻碍电位差很大，那么质点将不能到达被充电的表面。当质点的速度超过阻碍电位差时，全部质点就可以到达被充电的导体。

在輸帶表面及許多其他場合中，能得到很多的电荷与高电位。例如：以 20 米/秒的速度运动着的皮帶能充电到 80 千伏的电位，而从皮帶上流出的电流可达 2 毫安。

摩擦所發生的高电位及由此而引起的火花往往是造成廢品（例如在造紙業中）的原因、造成糖与面粉發生爆炸的原因以及某些企業中發生火災的原因。

当液体与固体介質接触时，特别是接触得很好时，可以观察到高电位。当絕緣液或膠体溶液經纖維物質（如毛織品、棉絮、絲等）进行過濾时可發現有电位差，可达 335 千伏。到目前为止，在实用上尚未利用这些現象来获取电压。

在現代制造着功率相当大的静电發电机，并为工業应用設計功率很大的装置。这些發电机可不再称为静电的，而称为电容的。因为通常是以前者着重說明不能用它得到任何显著的电流；而后者則意味着可以用这种机器將机械能轉变为电能或反之，其方法是利用充电导体系統中的静电相互作用。

利用通电流导体磁場相互作用的方法將机械能轉变为电能或相反过程的机器可称为感应机。

除了上述各种获取电压的方法外，还有一些其他方法，不过尚未在高电压工程中的应用。其中值得指出的有：电鍍元件，蓄电

池，压电、热电与光电现象，动物电等等。

选择获取高压的方法与装置的形式时，应该考虑技术经济要求，例如：工作电压与短时容许过电压之值；电压波形；装置的功率；使用的安全性与运行的便利；效率；装置的价格；安装所需的场所等等。

现代实验室实际上是用变压器来得到工频高压的。直流电压则利用整流装置与静电(电容)发电机获得。高频高压用谐振变压器与电子管线路得到。而冲击电压发生器用来获取一定波形的瞬时冲击电压。

在文献中常常提到超高压。在超高压下，当电极间距离和电场强度很大时，就发生了新的现象与设备工作的新特点。

在超高压范围内，当电极间距离很大时，就会发生一些在电压较低时所没有考虑或根本不存在的物理现象。在直流高压下的不正常放电现象大大限制了在大气中获取高电压的可能性。在真空中，当增加电极距离时可发现“全电压现象”，其情况如下：在电场中积累了巨大能量的电子冲撞阳极时可使正离子解放出来。这一现象还伴随着光子的发生。光子与二次离子引起阴极上的游离，结果发现真空中间隙放电电压的降低。超高压是利用与现代工业方法不同的方法来获得的。在高压装置中，沿绝缘电压降分佈的调整采用得不多，并以最简单的结构来实现(均压环，有时为均压屏等)。而在超高压电器与装置的结构中，为了得到一般的工作电位梯度，其特色为采用复杂的电场调整装置。提高工作电位梯度与缩减装置的体积可采用有高度绝缘性能的物质(例如高压下的气体)来达到。

获取超高压的方法在电工中用来试验绝缘与电器，在物理中用来使带电质点加速。

如此看来，划分出超高压是有充分理由的。它们是：在超高压下可以看到绝缘性能中的特点；新的规律与新的物理现象。获取超高压的方法，它们的实际应用以及设备的构造也有它自己的特点。

在苏联伏尔加河、安加拉河、德涅泊尔河、额尔齐斯河、鄂畢河等河流上所建設的新水电站在世界上是空前的，給苏維埃动力工作者提出了重大的任务。古比雪夫与斯大林格勒水电站將不仅是最大的伏尔加电力系统中心并將它和其他系統联系起来，而且在事实上还决定了苏联欧洲部分統一高压电網的大部分。新的强大的自动化电站是利用自然法則及保証最高劳动生产率的高級形式之一。建設世界上史無先例的新电力系统給苏联科学提出了許多有趣而重大的問題。輸电 1000 公里以上距离和掌握工作电压达 400 千伏及更高的技术是有关的，并要求制造出可靠的工作設備、各种类型的絕緣、导綫及電纜等。

第一章 电場的調整与击穿电压的提高

1-1. 实际結構的电場計算方法

在高压結構中采用的絕緣材料到目前为止还不够均匀。同一种材料各个部分的特性并不相同。因此，在計算电場时規定的准确度可限于百分之几。几何形状簡單的电極所造成的电場型式不大复杂，往往可以用分析的方法进行准确的計算。但用分析法来准确計算复杂型式电場則是困难的。在概略計算中，采用近似法是比较方便的，可以很快得到电場的近似形状。近似計算法的实质是：用几何形状簡單的电極的电場来代替形状复杂电極所造成的电場进行計算。作这种替換时，必須使計算电場的形状尽可能地接近被替換的电場形状。在近似計算中所容許的誤差用引入特殊的校正系数的办法加以考虑，它的数值应接近于 1。通常力求把計算归結为平面的，球形的和圆柱形的电容器的电場計算。

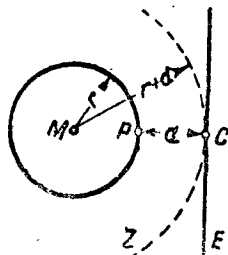


圖 1-1 軸綫和平面平行的圆柱体表面最大电場强度的近似計算

在圖 1-1 上表示圓柱體表面 P 点的最大電場強度的近似計算圖解，圓柱體的軸 M 是和平面 E 平行的。為了計算 P 点的電場，我們用和平面 E 相切于 C 点的圓柱形表面來代替等位面 E 。這種替換是可以的，因為 P 点附近的電力綫在這兩種情況下具有相同的性質。從公式 $E = \frac{U}{r \ln \frac{r_2}{r_1}}$ 可以看出：最大電場強度和第二個

電極表面的曲率半徑關係不大。實驗證明：一個圓筒放在另一圓筒中，而它們之間的最小距離相同時，則兩平行圓筒間的击穿電壓和圓筒軸綫吻合與否無關。

帶電的圓筒與平面所形成的最大電場強度比圓柱形電容器中內筒表面上的電場強度略小。這一差別可用一校正係數 $m < 1$ 來加以考慮。帶電的“圓筒-平行平面”電極所形成的 P 点電場強度可用下式求得：

$$E = m \frac{U}{r \ln \frac{r+d}{r}}, \quad (1-1)$$

式中係數 $m \approx 0.9$ 。當 $\rho = \frac{r+d}{r}$ 之值減小到 2 以下時，校正係數 m 漸漸增大。對於 d 數值很小的情況 ($d < r$)，電場接近於均勻 ($m=1$)。

結構的利用係數是電場強度的平均值與最大值之比，在這種情況下，它等於

$$\eta = \frac{1}{m} \cdot \frac{r}{d} \cdot \ln \frac{r+d}{r}. \quad (1-2)$$

同樣可以算出兩條軸綫平行的相同圓柱體所形成的電場強度。平面必須處在圓柱體間的中部。因為在這樣組成的結構中，電極間的距離僅為原來的一半，所以電壓也應該減為一半。

如果圓柱體彼此間的距離為 d ，則在它們中任何一根表面上的最大電場強度可按下式求得：

$$E = m \frac{U}{2r \ln \frac{r+d/2}{r}}, \quad (1-3)$$

而

$$\eta = \frac{1}{m} \cdot \frac{2r}{d} \ln \frac{r+d/2}{r}. \quad (1-4)$$

用类似的方式可計算許多具有軸向对称的有实际意义的电场, 例如可能是要計算兩条軸綫彼此垂直的圆柱体所形成的最大电场。这时, 电场强度最大的一点是在半径較小的圆柱面 z_1 距另一圆柱面 z_2 最近的那一点(圖 1-2)。如果圆柱体間的距离 d 不大并滿足 $d \leq r$ 的条件(r ——截面較小的圆柱体半径), 則电场接近于均匀, 可根据 $E = \frac{U}{d}$ 的条件来加以决定, 式中 U ——圆柱体間所加的电压。

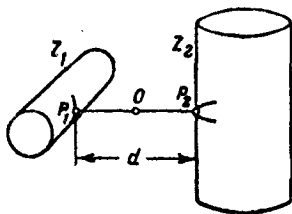


圖 1-2 两条軸綫彼此交叉的圆柱体間電場的近似計算

一般情况, 当 d 并不小的时候, P_1 点的最大电场强度可以近似地用兩軸綫平行的圆柱体間的电场强度来求得。假定軸綫轉动时每一圆柱体的半径以及所加电压是保持不变的。直綫 P_1P_2 是兩圆柱体表面的法綫。 O 点位于直綫 P_1P_2 的中点。假定圆柱

体 z_1 是固定的, 而圆柱体 z_2 以 P_1P_2 为軸綫旋轉。沿直綫 P_1P_2 分佈各点电位与电场强度和圆柱体 z_1 与 z_2 上的电荷数量有关。如果当圆柱体 z_2 旋轉时, 电荷数量保持不变, 那么直綫 P_1P_2 上各点的电位与电场强度也保持着自己的数值。实际上在圆柱体 z_2 旋轉时, 当原来平行的軸綫变成互相垂直时, 这一系統的电容是減小了的。当圆柱体間的电位差保持不变时, 它們的电荷也要減少。 P_1 与 P_2 点附近的电荷密度將比彼此距离較远的各点要大。考虑到在旋轉时圆柱体的电荷普遍減少, 應該認為 P_1 与 P_2 兩点的电场强度增加得并不多。因此, 为了近似地决定 P_1 点的电场