

高压设备绝缘

黄齐嵩 邓伟霖 王幼耕 编

哈尔滨工业大学

1961.8

前 言

本教材系根据1959年所制定的“高压设备絕緣”全国統一教学大綱及1961年五月在北京清华大学召开的四門高压专业課教材討論会中所确定的提綱編写的。全书共分七章，分別介紹空气中沿固体介質表面放电現象、以及絕緣子、电容器、电纜、变压器、电机等设备的絕緣結構形式及所使用的材料、絕緣性能、結構选定的設計計算方法和絕緣质量检查的試驗方法，最后詳細的介紹了保証设备絕緣在运行中的安全可靠所采用的預防試驗方法及其簡單原理和使用的设备。

在編写教材中由于時間仓率沒有能很好的与各方面进行較詳細的討論和征求意见，因此在內容取材上及安排的系統性上都值得討論。同时由于我国許多标准和規格都在进行修改和重新制定，而我們手头又缺乏这方面的資料，故在联系我国生产实际方面較差，特別是如何貫徹以辯証唯物主义观点来分析課程的发展規律，掌握其主要矛盾和矛盾的主要方面，从而提出今后的方向这一点上由于編写人的水平所限几乎沒有反映到教材內容中去。因此希望各兄弟学校能广泛提出意見以便今后进一步改进和提高，达到逐步成为一本較完善的教材，而为国家培养高质量的干部作一份貢獻。

本教材系由哈尔滨工大高压教研室組織編写的，其中緒論及第一章，第二章，第五章和第六章由黃齐嵩同志編写，第三章及第六章中之絕緣材料部份由王幼耕同志編写，第四章及第七章由邓伟霖同志編写。在編写中承清华大学、西安交大及华中工学院等兄弟学校提出很多宝贵意見，謹此对他們表示感謝。

7M8/3 10516

目 录

緒 論

- 一、本課程的研究对象及在高压技术中的地位..... (1)
- 二、高压設備絕緣的工作条件及絕緣选定的根据..... (3)

第一章 在空气中沿固体介質表面放电現象..... (7)

- § 1—1 均匀电场中之沿面放电現象..... (8)
- § 1—2 不均匀电场中之沿面放电現象..... (9)
- § 1—3 提高沿面放电电压的方法..... (18)
- § 1—4 介質表面被淋湿时的沿面放电現象..... (21)
- § 1—5 固体介質表面脏污时的沿面放电..... (26)
- § 1—6 大气条件对沿面放电的影响..... (30)

第二章 高压絕緣子..... (36)

- § 2—1 絕緣子所使用的材料和性能..... (36)
- § 2—2 綫路絕緣子..... (37)
- § 2—3 悬式絕緣子串..... (41)
- § 2—4 支持絕緣子..... (56)
- § 2—5 高压套管..... (68)
- § 2—6 絕緣子的电和机械性能..... (94)
- § 2—7 玻璃絕緣子..... (99)
- § 2—8 大气脏污地区之絕緣問題..... (103)
- § 2—9 絕緣子的試驗..... (110)

第三章 高压电容器..... (117)

- § 3—1 电力电容器的分类..... (119)
- § 3—2 电力电容器所用的材料..... (120)
- § 3—3 油紙絕緣的电气特性..... (124)
- § 3—4 电力电容器的結構与設計..... (133)
- § 3—5 合成油浸紙电容器..... (147)
- § 3—6 实验室用高压电容器..... (149)
- § 3—7 油紙电容器的制造工艺..... (153)
- § 3—8 金属化紙电容器..... (154)
- § 3—9 电力电容器的試驗及其在运行中的维护..... (158)

第四章 高压电纜..... (165)

- § 4—1 浸胶电纜的結構、材料和工艺..... (166)

§ 4—2	电力电缆的电性能	(174)
§ 4—3	电力电缆的热性能	(190)
§ 4—4	35千伏以上的高压电缆	(197)
§ 4—5	电缆线路的结构	(207)
§ 4—6	电缆的试验	(213)
第五章	变压器绝缘	(218)
§ 5—1	变压器所使用的主要绝缘材料	(218)
§ 5—2	变压器油的老化及击穿	(219)
§ 5—3	提高变压器油抗电强度的方法	(221)
§ 5—4	变压器油中的沿固体介质表面放电	(226)
§ 5—5	变压器油击穿电压的实验数据	(228)
§ 5—6	变压器绝缘结构	(232)
§ 5—7	变压器绝缘的计算	(254)
§ 5—8	变压器绝缘结构的几种其他形式	(263)
§ 5—9	干式变压器的绝缘	(269)
§ 5—10	电压互感器绝缘	(273)
§ 5—11	变压器绝缘的试验	(276)
第六章	电机绝缘	(283)
§ 6—1	电机绝缘结构中所应用的材料	(284)
§ 6—2	电机绝缘结构的基本形式	(297)
§ 6—3	电机中的电晕现象及其消除办法	(306)
§ 6—4	30千伏及更高电压之电机的静子绝缘	(318)
§ 6—5	电机绝缘的电性能	(320)
§ 6—6	电机绝缘之使用寿命及加速热老化试验	(324)
§ 6—7	电机绝缘的试验	(332)
第七章	高压绝缘的预防性试验	(340)
§ 7—1	常用预防性试验方法及原理	(341)
§ 7—2	预防性试验用设备及测量	(353)
§ 7—3	各种设备所采用的预防性试验方法的特点	(369)
附录：“高压变压器、电器及绝缘子的试验电压”国家标准草案。		

緒 論

一、本課程的研究對象及在高压技術中的地位

電力工作者的首要任務是保證電氣設備經濟可靠的運行，使國民經濟建設得到不間斷的電力供應。

高壓電氣設備在電力系統中是否可靠的運行很主要的是決定於作用在絕緣上的電壓及絕緣本身的抗電能力，當絕緣的抗電能力達到或超過作用於其上的電壓的破壞作用時，則設備可以安全運行，反之設備的絕緣就會被破壞，而引起電力供應中斷。

電力系統正常運行時，所有電氣設備的絕緣是處於工作電壓作用下，但由於各種原因常會引起電力系統中的電壓升高，即產生過電壓，這種過電壓的數值大大超過正常工作電壓，很容易使絕緣設備內部產生游離放電，造成絕緣的破壞。只有絕緣的抗電強度足夠大時，即絕緣的抗電能力和過電壓的破壞作用之間達到平衡時，才能保證電氣設備不致損壞。因此要保證高壓設備安全可靠的運行，需要從兩方面着手，即設法降低和限制作用於設備上的過電壓數值，使絕緣不需要很高的抗電強度就可以與過電壓的破壞作用相平衡。另一方面就是提高絕緣本身的抗電能力（即改善絕緣結構，採用新的絕緣材料和新的製造工藝），使在較高的過電壓作用之下也不會引起絕緣的破壞，這兩個方面也就是高壓技術當前最主要的問題。

關於降低和限制過電壓的數值問題將在過電壓課程中詳細論述，而提高設備絕緣的抗電能力是本門課程的研究任務。

電壓作用在設備的絕緣上，它將根據設備結構的不同而產生不同大小的電場強度，雖然電壓幅值不是很高，但有時所形成的電場強度卻會很大，當此電場強度達到一定的數值時也同樣會使絕緣遭到破壞，因此本課程所要解決的問題，就是研究如何使電場強度（結構合理）的破壞作用與絕緣本身（材料及工藝的）抵抗這種破壞作用的能力之間達到平衡，以保證電氣設備的絕緣能既經濟又安全的運行。所以高壓設備絕緣這門科學就是隨著電力系統之工作電壓的提高為了介決這種矛盾，而不斷發展的。

要解決這一矛盾，同樣也是從矛盾的兩方面着手，一方面就是改造設備的絕緣結構使作用在絕緣上的電壓所形成的電場強度尽可能的小，不超過絕緣的破壞電場強度，這是本課程的主要內容。另一方面是採用新的絕緣材料和製造工藝以提高絕緣抵抗電場強度破壞作用的能力。在介決高壓設備絕緣的問題中，到底是從矛盾的這一方面，即減小電場強度（改善絕緣結構）着手，還是從矛盾的另一方面，提高絕緣的抗電能力（採用新材料新工藝）着手，是根據生產發展需要而決定的。當電力系統工作電壓提高，作用在設備上的電壓高，所形成的電場強度大，而使得矛盾的統一被破壞，此時電場強度的破

坏作用就成为矛盾的主要方面。我們也就必須从改善結構减弱电场强度来使得矛盾得到統一，反之当电场已足够均匀或无法再减弱时，电压提高后所形成的电场强度仍然超过絕緣的抵抗能力，此时提高絕緣的抵抗能力（采用新材料及新工艺）就成为支配絕緣发展的主要方面。

例如电容套管的发展就充分說明了这一过程。在电压不高时套管的结构很简单仅为一个絕緣材料做成的圆柱体中間放置导体，当电压升高后，由于电场不均匀，电场强度很大，使矛盾的平衡統一被破坏，为了介决矛盾而提出了采用电容式結構的套管，这样电场分布可以变得很均匀。但由于最初制成电容套管所用的胶木紙之抗电强度不高，散热系数不好，同时制造时在絕緣中残留有空气隙，故当电压升高后，所形成的电场强度又会使絕緣損坏，即矛盾統一被破坏。这就要求从改善工艺和采用新的材料着手使矛盾能够平衡統一，所以現在 330 千伏以上电容式套管采用了油紙絕緣材料和真空处理工艺。

其他电气设备的絕緣也同以上所談的电容套管一样由改善結構及采用新的材料和工艺交替发展来使矛盾达到平衡統一的，在目前來說大部分电气设备的結構均能够使电场分布达到比較均匀，絕緣材料的抗电能力及制造工艺在現在的技术水平下也达到比較充分的發揮和較高的水平，但是所制造出的絕緣设备是否达到很理想的地步呢？不是的，为使絕緣的抗电能力与电场引起的破坏能力这一矛盾达到平衡統一，在运行中能够安全可靠，現在所制造出的设备就很笨重，又不經濟，例如 400 千伏之套管其高度达 6 米，重达 4.5 吨。随着电力系统不断的发展，要求把系統的工作电压进一步提高，这样制造出的絕緣设备将不只是笨重或不經濟的問題了，而是能不能制造出所需要的设备問題。因此就出現了生产上要求改变设备絕緣現狀的革命形势，即設法采用新的既經濟又安全的絕緣措施来满足电力事业飞速发展的需要，以保証国民經济建設得到充分的电力供应。如何完成这一任务是摆在我們高压工作者面前的光荣而艰巨的任务。

高压设备絕緣問題这門科学是随着电力系统的工作电压不断提高而迅速的发展，目前世界各国已广泛的采用 330—400 千伏的輸电綫路，相应的制出了这种电压等級的各种电气设备，并且运行良好。苏联所建造的举世有名的古比雪夫至莫斯科的 400 千伏綫路已运行数年。最后由于对降低絕緣水平措施的研究取得了很大的成就，已將 400 千伏电压綫路改为 500 千伏电压运行，这充分說明了在高压絕緣工程方面所取得的巨大成績。

对我国來說，正如其他所有科学技术和工业生产一样，高压设备絕緣这門科学与制造工业在党的关怀及国民經济建設飞速发展的需要下，完全由无到有，从落后赶上或接近世界先进水平。同样以套管为例，解放前我国仅能制造电压不超过 10 千伏简单的小的瓷套管。而解放后在党的领导下和苏联无私的帮助下从仿制到完全自行設計，現在已能大量生产 220 千伏以下各級电压各类型套管。和套管一样其他设备的絕緣制造問題解放后也都是从无到有得到巨大的发展，如在所修建的許多 220 千伏电力系統中采用了我国自己制造的各种电气设备，这些设备，都能安全可靠的运行。不仅如此，我国在把輸电綫路升高电压运行上也取得很大的成就和經驗，过去几年已將大部分 154 千伏电压綫路升压至 220 千伏运行，現在正进行將 220 千伏升至更高电压等級运行問題的研究。特別应该提到的是在 58 年大跃进以后我国在高压设备絕緣这門科学上所取得的成就更是史无前例的，它不仅反映在科学研究，生产技术水平上，同时也反映在运行維護上，如

創造了絕緣的帶電檢修及在帶電時對絕緣的工作狀況進行監視和試驗等。當然要滿足祖國經濟建設需要，我們還必須作更大的努力，為高壓設備絕緣這門科學開辟新的途徑，創造出優異的成績來，以不辜負黨和人民對我們殷切的希望。

二、高壓設備絕緣的工作條件及絕緣選定的根據

以上我們談到要保證電氣設備在運行中安全可靠必須要解決過電壓的破壞作用與絕緣的抵抗能力之間所存在的矛盾使它達到平衡統一。本課程的目的就是從提高絕緣的抵抗能力這一方面來解決矛盾，使矛盾達到統一的，但是要解決矛盾我們必須知道矛盾的兩個方面，因此在本課程開始時我們將簡易的介紹一下有關過電壓的作用情況。另外一些其他的因素（如溫度及機械力等）也會影響到絕緣的抵抗能力，故也必須了介這方面的情況，只有如此，我們才能正確的去解決提高絕緣抵抗能力問題。下面將介紹有關電的、機械的及溫升等方面對絕緣的作用情況和要求。

1. 電的要求

任何高壓電器設備的絕緣都必須保證在下列電壓作用下安全可靠的運行。

- a). 長期最大工作電壓；
- b). 內部過電壓（操作過電壓）；
- b). 外部過電壓（大氣過電壓）。

長時間在最大工作電壓作用下可能導致絕緣的熱击穿及化學變化等，許多絕緣介質，如油紙絕緣等之抗電強度將隨電壓作用時間增長而迅速降低，所以最大工作電壓是決定絕緣使用壽命的基本因素，必須要求絕緣的抗電強度在最大工作電壓長期作用下不改變。

運行中長時間最大工作電壓決定於設備的工作電壓和電力系統的中性點接地方式，為了系統的調壓需要，設備的運行電壓較工作電壓高出一百分數，此數值在工作電壓3—220千伏時為15%，330千伏—10%，400千伏以上—5%。

當電力系統中性點直接接地時，最大工作相電壓為 $U_{\phi n} = \frac{(1+k)U_n}{\sqrt{3}}$ ，（ U_n ：額定工作電壓）；當中性點絕緣時，最大工作綫電壓為 $U_{xn} = (1+k)U_n$ 。

內部及外部過電壓的幅值均很高，但作用時間則較短。由於它們的幅值高，所以大部設備的絕緣主要是根據這兩種電壓來選定的，下面我們將簡略的介紹這兩種電壓的情形，以及如何根據它來選定絕緣尺寸的。

內部過電壓的幅值及持續時間是與電力系統的工作電壓，接地方式，系統參數，電器設備性能和產生的條件有關。從持續時間來說一般可分為兩大類。

a). 過電壓作用時間不超過1—2周波，為很快的高頻振蕩波迭加在50周波的基波上，屬於這一類的過電壓有切斷無載變壓器，及切斷無載電路，但在斷路器產生次數不多的電弧重燃時所形成之過電壓。

b). 高頻或頻率接近于工頻，而在十分之幾秒鐘內重複着，當切斷無載綫路時斷路器中產生多次重燃形成之過電壓，及共振過電壓和系統中點絕緣時所產生之過電壓等均屬於這一類。

在内部过电压中以切断空载变压器时所产生的过电压之幅值最高可达6倍以至7倍的工作电压(相电压)。不过这种过电压的持续时间很短,一般不超过几分之一工频半周波,它接近于冲击波之作用时间。另一种幅值较高的过电压为切断无载长线路时所产生的过电压,这种过电压是与开关中的电弧重燃之次数有关,电弧重燃之次数愈多过电压的倍数愈大:苏联电工研究所以M KII型油断路器进行切断无载线路试验所得出的电弧

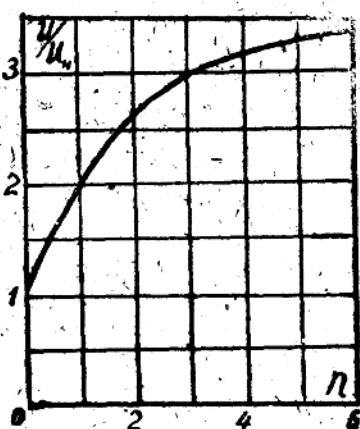


图0—1 内部过电压倍数与电弧重燃次数之关系

重燃次数与过电压倍数之关系如图0—1所示,由图中可以看出,过电压的倍数是随电弧重燃次数增多而增高,最初增高的速度很快,但至一定次数后过电压倍数增加较慢,不过在现代之断路器中大都接有并联电阻,因此其过电倍数将降低,根据一些国家的研究和测量结果,此种过电压最大数值将不超过2.5倍工作相电压。

所有内部过电压的幅值均是一种统计数值,根据实测和试验研究的结果。各种过电压之倍数出现的忽然率是与倍数大小有关,过电压倍数愈高,其出现的忽然率愈小,图0—2给出了这种关系。由图中可以看出超过4倍工作相电压之过电压的忽然率不大于1%。根据研究分析和试验结果指出,过电压的倍数还随工作电压的升高而减小,同时当系统中性点直接接地时,过电压之倍数将降低。系统中性点绝缘或经消弧线圈接地时,其过电压较高,因此现有电力设备计算内部过电压之倍数一般按下表选定。

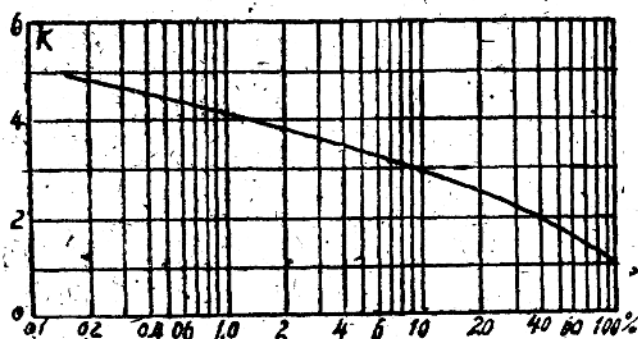


图0—2 内部过电压倍数出现的或然率

表0—1 计算时所用操作过电压倍数的极限值〔文献〕

工作电压千伏	< 35	35	110	154	220	400
倍数 K	4.5	4	3.5	3.35	3.2	3.0

种各电气设备之工頻試驗电压及其外部絕緣之湿放电电压均由内部过电压倍数来确定，特别是330千伏以上电压等級内部过电压对决定絕緣将起主要作用。内部过电压出現的倍数如降低，則設備絕緣尺寸可以大大减小。如内部过电压倍数由3.0降至2.5，400千伏变压器的絕緣的造价可以降低15%，500千伏輸电綫路建筑費用可减低3~5%，运行費降低4~9%。由于这一原因，所以各国都在积极研究降低内部过电压措施。当前因磁吹避雷器被利用及断路器采用了并联电阻，使得330千伏以上电力系统之内过电压可降低到 $2.5U_\phi$ ，所以这样电压等級之电力系統的絕緣水平就可以按照 $2.5U_\phi$ 来考虑。例如苏联400千伏綫路即改为500千伏电压运行。又如我国拟定的330千伏电压等級变压器之工頻試驗电压也由520千伏改为460千伏。

电器設備絕緣的工頻試驗电压是选定設備絕緣尺寸根据之一，这种試驗电压的制定就是根据設備絕緣在运行中会遭受的内过电压大小出发的，以内过电压倍数为基础。但因为絕緣的抗电强度还与一系列的外界条件有关。同时内过电压与工頻电压之間在持續時間及波形上都有差别，故制定此試驗电压时應該把这些因素考虑在內。

例如，330千伏变压器內絕緣的試驗电压即按下列方法定出：

$$U_{\text{вн}} = \frac{K \times 330 \times 1.1}{\sqrt{3} \times 0.90 \times 1.3} = 455 \text{ 千伏}$$

实际取460千伏。

式中 K ——为内过电压倍数=2.5；

1.1——考虑工作电压的升高（最大工作电压）；

0.90——裕度，

1.3——油絕緣在內过电压时的冲击系数。

因系内部絕緣故大气条件沒有影响。

外部过电压作用于設備上由于其幅值高，故对設備絕緣造成严重的威胁，220千伏电压等級以下的电气设备其絕緣尺寸的选定即主要由外部过电压大小出发的。外部过电压的大小是与各种具体条件有关，但所有变电所的电气设备都由避雷器保护，因此这些設備所遭受的外部过电压即为避雷器的残压，因此避雷器的残压就是制定电气设备冲击試驗电压的根据。但因被保护設備与避雷器間有一定的距离，其間連接的导綫有电感，而設備本身有电容存在，在冲击波作用时会引起振蕩，这样作用在电器設備上的电压将較残压高。另外还考虑到一定的安全裕度，故变压器之冲击試驗电压一般是由下列公式来确定的。

$$U_{1.5/40} = (1.1U_{\text{cm}} + 15) \times 1.25$$

式中： U_{cm} ——为避雷器在5千安时之残压；

1.1——为絕緣的保証在残压下不击穿系数；

15千伏——为考虑振蕩时之电压升高；

1.25——裕度。因为試驗时只是三次冲击而实际設備的絕緣是遭多次的冲击，故乘一系数。

以上所举的計算例题都是变压器的内部絕緣，如确定設備外部絕緣的試驗电压时，还需要考虑由于大气条件的影响所乘的系数，各种电器設備絕緣的工頻，冲击全波

和截冲的試驗电压可見附录表 1 和表 2，由表中可以看出所有电器設備中變壓器的試驗电压較低，这是因为其他电器距离避雷器較远，因此有較大的电压升高之故。

近年来世界各国对限制过电压的措施进行了巨大的研究工作，并取得了很大的成績，例如利用开关并联电阻及磁吹避雷器等办法可以将内部过电压的幅值降低，特别是用于限制大气过电压的磁吹避雷器有較低的残压，这样就使设备的冲击試驗电压可以大大减小，因而也就可能使考虑设备絕緣这一矛盾中的主要方面轉向內过电压。当然在內过电压的幅值被降低至一定数值后，考虑絕緣的所依据的电压又会轉变为正常工作电压，事实上这一情况已开始出現，象我国某些升压綫路，因絕緣水平降低后，就有在正常工作电压下发生事故的現象。

从以上有关内部及外部过电压对絕緣的作用情况得知：解决减小设备絕緣尺寸的最主要問題是减小作用在设备上的电压，在当前來說就是进一步降低内部过电压及外部过电压。当过电压降低后就使得在絕緣中所形成的电场之破坏作用减弱，如再合理选择设备的絕緣结构及所用的絕緣材料与制造工艺，則设备的絕緣尺寸就可选得更小，使设备能达到“輕装上阵”。从而可大大的降低制造成本。

2. 机械性能要求

設備中絕緣介质不仅受到电的作用，而且还会受到电力及震动等机械力的作用。如絕緣还会受到压力，弯曲力以及拉力等作用。有时它往往还会成为絕緣设备损坏的主要原因，如輸电綫路的悬式絕緣子串虽然靠近导綫的絕緣子所受的电场作用最大，但运行中损坏的却往往是受机械力最大的靠近杆塔的絕緣子。机械力的作用不仅会使絕緣介质损坏，而有时会因为受到一些损伤而造成其抗电强度的降低，最后会在电场的作用下完全损坏而不能起絕緣的作用。因此在选定絕緣时必须考虑这一因素的作用。必要时我們应根据所能承受的机械力来决定絕緣的性能。如悬式絕緣子即按能承受的机械力分类。为了保证在运行中不因受机械力的作用而损坏，設計制造时必须給于一定的机械强度的安全系数，按苏联电气设备安装規程中規定，戶外变电所用絕緣子机械强度的安全系数不应小于 3。对戶內变电所用絕緣子虽未規定，但一般不应小于 2。

3. 热稳定性要求

絕緣介质是与金属导电材料紧密結合的，但两者的膨胀系数往往相差很大，因此当温度变化时，在絕緣内部会产生很大的应力，某些絕緣设备如絕緣子可受到突然的温度变化，这样使絕緣子內外的应力相差很大，有时会使絕緣子开裂，因此絕緣子必須能承受这种温度变化的作用。否則将不能保证电能的正常供应。

除以上所介紹的有关絕緣性能外，对一些有机絕緣介质（如变压器油，油浸紙等）还需要有一定的化学稳定性，以及較慢的老化，絕緣的老化有各种各样，其产生的原因当然也就不同，一般主要的还是由于高温及电场作用使絕緣介质的内部结构发生化学变化的結果，关于这一点以后在有关章节中再詳細介紹。

第一章 在空气中沿固体介质表面放电现象

几乎所有高电压的带电部分都要用固体介质来支持的，而这些绝缘介质又常是被空气包围着，因此我们研究设备绝缘时，首先必须了解沿固体介质表面的空气放电现象。沿空气中之固体介质表面放电是典型的空气放电，不过由于有介质存在而其介质系数与空气的介质系数不同，及由于空间电荷的影响，使得电场发生畸变，故沿介质表面的放电电压较纯空气的放电电压低，特别在均匀电场中，这种差别显得更大。图1-1给出了这种关系。

固体介质存在空气中与空气的分界面有如图1-2中所给出的几种形式。图1-2a中绝缘介质和空气的交接面是与电力线一致的，具有均匀电场或稍不均匀电场的各种设备都属于这一种情况。在图1-2b中，空气与绝缘介质交接面是与电力线相切割，此时介质是处在极不均匀电场中，电极边缘附近有较大的电场强度，而且垂直于介质表面之电场强度的分量较沿介质表面的分量强。电极在固体介质表面之位置如图1-2c所示时，则在电极附近形成了极不均匀的电场，电力线在电极附近将穿过介质表面，不过在离电极较远的地方电力线又逐渐与介质表面相吻合，在电极附近空气中电场强度的切线分量大小是与固体介质之介质系数及厚度有关。b, c两种情况是属于不均匀电场情况，下面我们将分别研究在均匀电场和不均匀电场中之沿固体介质之表面放电现象。

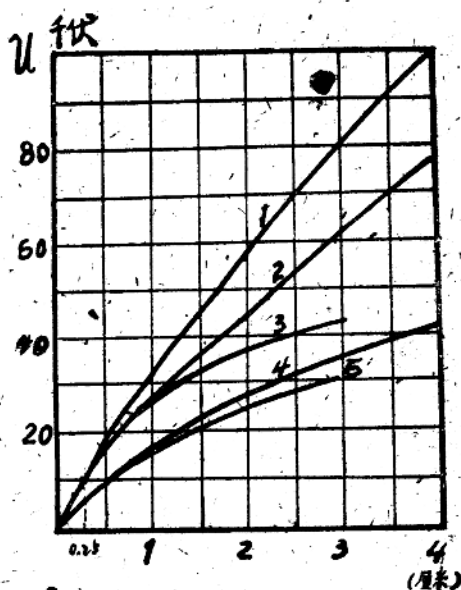


图1-1 在各种电压下均匀电场中沿着玻璃表面的闪络电压。

- 1—空气击穿； 2— 10^5 赫的交流；
- 3—冲击波； 4—直流；
- 5—50周波交流。



图1-2 固体介质在电场中之典型布置图

§1-1 均匀电场中之沿面放电现象

当固体介质处于均匀电场中,而且介质表面完全与电力线相吻合,即如图1-2a,这时电场不论在气体中或在介质中都是均匀的,没有任何电力线作用于介质表面,同时也没有根据认为电场是被畸变,但即使在这样的条件下,沿介质表面的放电电压也较固体介质不存在时之空气放电电压低得多,只有空气放电电压的 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 。

产生上述原因首先是由于电极与固体介质表面接触不紧密,使夹有一层空气层,因为空气的介质系数小于固体介质的介质系数,因此在空气层之电场强度很大,使得空气容易游离,所游离出之电子或离子即沿着介质表面跑出,因游离因子增多,故容易使沿表面发生游离放电。这是1932年日茨研究了这一现象时所提出的,当他用很仔细磨光的电极及介质表面使两者接触很紧密来进行实验时,发现在这种情况下沿固体介质表面放电电压较纯空气之击穿电压只低3~5%。而用很理想之电极(罗哥夫斯基电极)及电极与介质接触很紧密时,发现放电并不一定沿着介质表面而是可在两电极间的任何点发生。并且当在电路中接入较大的电阻时,两极间任何点的放电可重复100余次。从上面这些实验中可以看出:电极与介质接触面处存在有薄空气层是使沿介质表面放电电压降低的主要原因。

此外许多学者还进行其他因素影响的实验研究,实验结果发现:容易吸潮的介质(如玻璃及瓷等)之沿面放电电压较纯空气低得多,反之不容易吸潮的介质(如石蜡等)之放电电压降低较少如图1-3所示。为了进一步证明这种现象,还进行了下列实验,即在玻璃上涂以石蜡求其放电电压与湿度之关系,如图1-4所示,由图中得知当玻璃

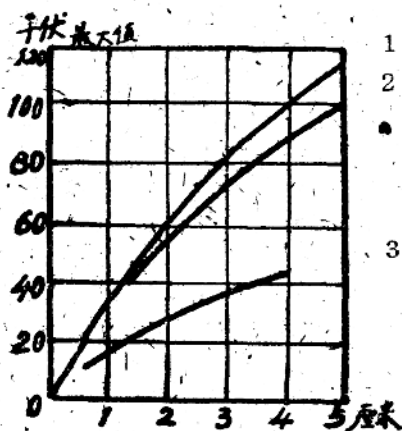


图1-3 均匀电场中不同介质之沿面放电电压与距离之关系(英盖和瓦里捷尔数据)

1. 空气击穿; 2. 石蜡; 3. 玻璃。

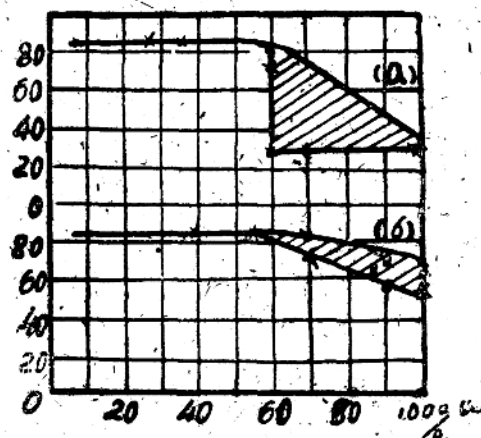


图1-4 经过不同处理后玻璃之沿面放电电压与湿度之关系,

a: 未处理之玻璃; b: 玻璃表面涂有石蜡。斜线为放电电压的分散性。

表面涂有石蜡后其沿面放电电压随湿度升高而降低得很少，同时分散性也很小。

为什么吸潮性较大的介质其沿面放电电压会降低而分散性较大呢？根据瓦里捷尔和英盖的实验研究结果认为是由于空气中的水气凝结于介质表面，使介质表面电荷重新分布（高压极化引起的），因此改变了原来的电场。他们测量了接近放电电压下沿玻璃表面的电压分布的结果（如图1—5所示）证明了这一解释，同时用烘干后的模型进行同一实验，发现此时电压分布现象为直线。

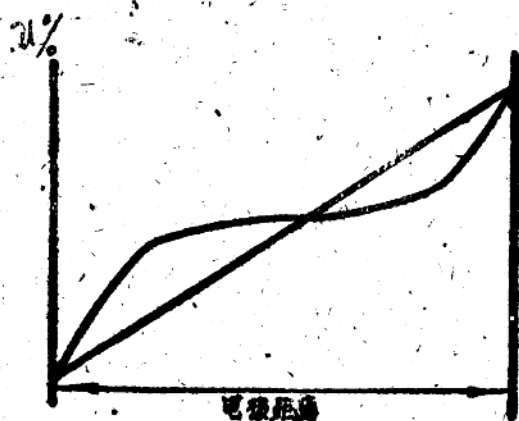


图1—5 沿未烘干的玻璃表面上的电压分布（接近放电电压时）。

由于介质表面凝结水份使电压分布改变，靠近电极处之电场加强，因而使空气容易产生游离，最后形成放电。

由图1—4我们还可以看出：当大气湿度小于50%时沿面放电电压与湿度大小无关，而湿度大于50%时沿玻璃表面之放电电压迅速降低，关于这种现象日茨进行了研究，他认为湿度小于50%时在介质表面只有个别细水珠，因此对放电电压影响不大。而相对湿度大于50%时，它对放电电压是否产生影响则要看潮气是否完全浸湿介质表面而形成薄膜而定，如果是产生了这种情况则会使放电电压大大降低，反之如只是在介质表面形成水珠，此时只有在强电场作用下使水珠被拉长组成导电通道而使放电容易，而和前者一样。如果不容易形成通道则放电电压不降低。所以我们若能设法使在介质表面上不容易形成水膜或连续的水珠，则放电电压与湿度无关。马克施塔德曾经在绝缘子表面上做成许多小沟，结果放电电压是与湿度无关。这充分证明了湿度对沿面放电电压所起的影响。

此外，由高频电压下沿面放电电压较高也可以来解释这种现象，因为湿度之所以影响放电电压是由水气凝结在介质表面使电荷重新分布而改变电场的结果。但电荷的重新分布是需要一个过程，而在高频下这一过程不容易完成，故湿度的影响也就减小。

§1—2 不均匀电场中之沿面放电现象

图1—2之b及c即属于这种情况。上面分析的有关在均匀电场中之放电现象，同样适用于不均匀电场中，不过由于电极的形状及电场本身已是不均匀，所以任何其他使电场不均匀性增大的过程对于放电电压的影响已不是那样显著。图1—6所得的结果充分证明了这一点。以此图与图1—1比较，可知在不均匀电场中放电电压较空气击穿电压的降低要比在均匀电场中小得多，这是因为介质的存在引起电极附近电场的畸变，已不再起作用。而由于在这种情况下起始放电容易，当产生电量放电后，电量电流使得电场变均匀，电场强度也就被降低，在高压设备中我们也常常用这现象来改变电场分布。

不过我们必须注意，上述情况只是适用于电力线沿着介质表面方向。如果电场具

有垂直于介质表面方向的分量，則情况就完全两样，它与不均匀电场中之空气放电一样，由于在电极附近介质表面上堆积有与电极同号之电荷，这些电荷象是电极延长了一样，因而使放电容易，故放电电压降低。

因为电气设备中电极形状大都属于不均匀电场，因此在确定设备绝缘距离时，迫切需要解决不均匀电场下沿表面放电现象及知道放电电压与距离之关系，因此引起人们对不均匀电场中沿面放电问题的重视和研究。

关于不均匀电场中沿介质表面放电问题，捷普列尔进行了较完善的研究，并得出了一些规律和经验公式。捷普列尔认为在不均匀电场中沿面放电发展的特点：除了带离子沿着介质表面电场的切线分量移动外，垂直于介质表面的电场分量对放电的发展也有很大的影响，带离子在垂直电场分量作用下紧压着介质表面移动，由于摩擦使得部分发热而产生热游离，由热游离产生的新的离子大大的超过撞击游离所产生的离子，此时沿面放电的伏安特性下降，即放电火花之电阻减小，相当于两电极间的电场强度加大，因此放电继续发展，最后火花由一电极达到另一电极。其放电之发展情况可以套管为例：加电压于套管。(图1-7)当电压升高至某一数值后，在法蓝盘处即形成具有微弱光层的电量放电，电压如继续升高，则在法蓝盘处出现许多平行细线条组成的光带向另一电极发展，其线条的长度随电压的升高而增长。如继续升高电压，则当电压超过某一临界值后放电的性质发生了变化，某些放电线条的长度开始特别迅速的增大，形状成树枝形，如图1-7所示，即形成滑闪放电(沿两电极间的介质表面的不完全放电)；最后发展成两电极间的完全放电(即閃絡)；如电源的容量足够大，则由火花转为电弧。

如法蓝盘的边缘做成圆弧形，则第一阶段的无声放电及细线条组成光带的放电形式不明显，而是很快的发展成为滑闪放电。放电时所产生的火花长度与两电极间介质所形成的电容大小有关，电容愈大，火花

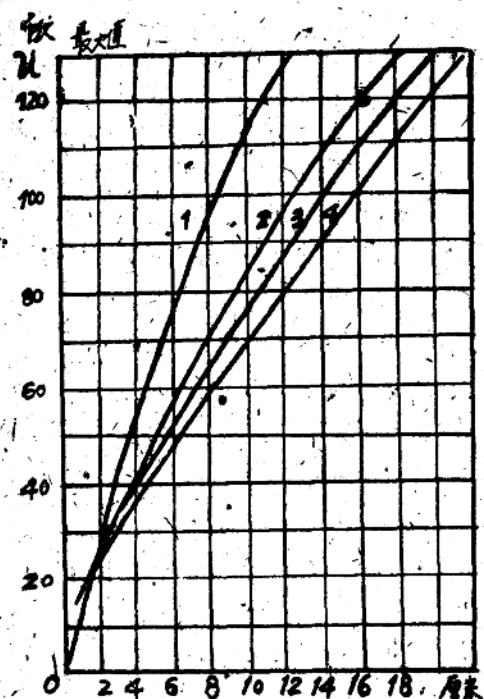


图1-6 在很不均匀电场中沿各种材料的放电电压与距离之关系。

- 1—空气；2—石蜡；3—酚醛纸；4—玻璃和瓷。

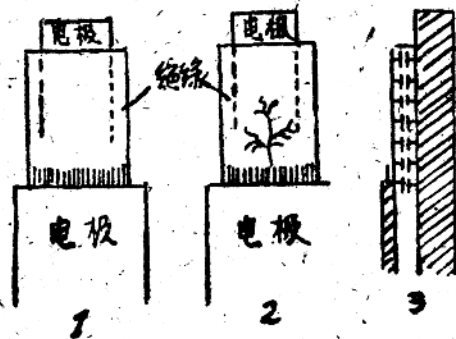


图1-7 沿套管表面放电的发展情况

- 1—电量放电；2—滑闪放电；3—套管表面电容等值图。

愈长,这是因为电容大,电容电流增加,使沿介质表面的电压分布不均匀程度增加之故。此外它还与电压正负极性有关,由于空间电荷的影响,在正极性时放电的火花较负极性长。

开始第一阶段放电时的细线条组成光带之长度,罗特给出了下列经验公式即:

$$l = \frac{u - u_0}{k} \quad \text{厘米,}$$

式中 u ——为外加电压,千伏有效值;

u_0 ——为出现光带的起始电压,千伏有效值;

k ——为系数,与介质的介质系数及法蓝盘上电压的极性有关。下表给出了当法蓝盘为正极性时 k 与介质系数之关系。由表中可以看出 k 是随 ϵ 值之减小而减小,在 $\epsilon=5$ 时即达到极限数值(当法蓝盘之电压为负极性时为7.1)。在交流电压作用下, k 可以按正极性时之数值选定。

表 1-1

ϵ	k
1	15
2	10
3	7.7
4	6.5
5	5.05
6	5.0
7	5.0

u_0 的数值一般是按法蓝盘处空气层之电场强度达到11千伏/厘米即产生起始放电来计算的,对圆柱形电极时 u_0 可按式求出,即:

$$u_0 = \frac{11}{\epsilon} r_0 \ln \frac{r_a}{r_i} \quad \text{千伏有效值。}$$

式中 r_a ——法蓝盘圆柱体之内半径,厘米;

r_i ——圆柱体金属导体之外半径,厘米;

ϵ ——为电极间介质的介质系数。

平板电极可由式求出,

$$u_0 = \frac{11}{\epsilon} d \quad \text{千伏有效值,}$$

d ——介质的厚度,厘米。

计算滑闪放电之起始电压捷普利尔给出了下列经验公式:

$$u_{c.k} = \frac{1.26}{c^{0.44}} \cdot 10^{-4} \quad \text{千伏,有效值。}$$

式中 c ——为介质表面电容系数,法拉/平方厘米。

当 $c > 0.25 \cdot 10^{-12}$ 法拉/平方厘米时这一公式是完全与实际相吻合,而 c 较小时这一公式只是近似的。图 1-8 为沿面滑闪放电与表面电容系数之关系,图中曲线为计算所得,“+”系实验所得。

对于某些设备如平板电容器,电机之线圈之滑闪放电电压的计算罗特还提出了下面的简单公式,即

$$u_{c.k} = 91 \sqrt{\frac{d}{\epsilon}} \quad \text{千伏,有效值。}$$

不过这一公式也只适用于 $\frac{d}{\epsilon} = 0.01 \leq 0.40$ 间的情况。

上面我們介紹了確定放電發展第一階段由細綫組成之光帶的長度公式，這種長度的確定對設計絕緣結構時是很重要的，我們知道絕緣設備在工作電壓下是不允許產生電暈

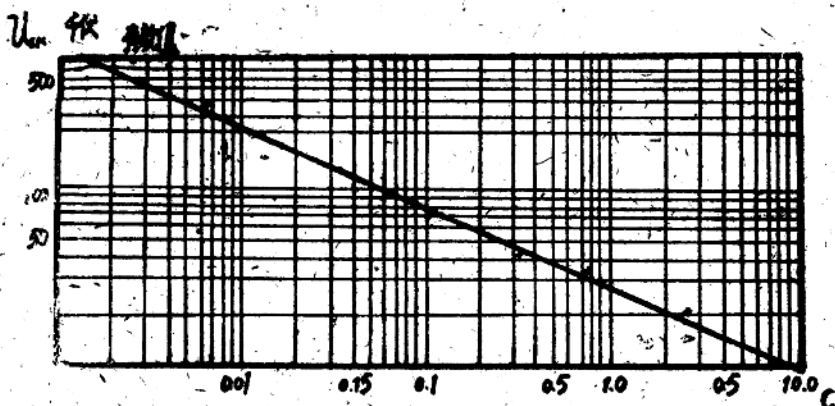


圖 1—8 滑閃放電電壓與介質表面電容系數之關係

放電的，但為了使絕緣結構的尺寸不致太大，一般在試驗電壓下是允許產生電暈的，不過它的火花長度不應超過絕緣距離，否則即造成短接。故選定絕緣距離時應該知道在試驗電壓下的火花長度。我們除了要知道第一階段由細綫組成之光帶的長度外，同時還應該知道沖擊電壓下滑閃放電的火花長度，因為許多外部絕緣不僅是允許在工頻試驗電壓下產生電暈，而且允許在沖擊電壓下滑閃放電之火花有一定長度，這一長度可按捷普列爾給出的公式計算：

$$l_{\text{нз}} = k \cdot c^2 \cdot u \sqrt{\frac{du}{dt}} \quad \text{厘米,}$$

式中 u ——所加的沖擊電壓，千伏最大值；

c ——介質表面電容系數，法拉/厘米；

$\frac{du}{dt}$ ——電壓變化的速度，千伏/微秒；

k ——系數，負沖擊波時 $= 33 \cdot 10^{15}$ ；

正沖擊波時 $= 39 \cdot 10^{15}$ 。

由上公式也可求出兩電極間的閃絡電壓，因為只要當滑閃放電的長度 $l_{\text{нз}}$ 達到兩電極間的距離 l 時，則兩電極間即發生完全閃絡。故當兩電極間的距離 l 一定時，則按上式可求閃絡電壓，即

$$u_{\text{нзр}} = \sqrt[5]{\frac{l}{kc^2}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\frac{du}{dt}}} \quad \text{千伏最大值}$$

由上式可以看出 $\frac{du}{dt}$ 對閃絡電壓的影響是很小的，而表面電容系數對放電電壓的影響較之 l 大， c 大 $u_{\text{нзр}}$ 即降低，這是實際中應考慮到的，有時還利用增大電容的辦法來降低放電電壓以達到設備的使用要求，例如防雷用的管形避雷器從間隙 aa 击穿後熄弧的角度來看，我們希望 aa 兩極間的距離 l 愈大愈好，但從保護作用來說我們要求其击穿電

压較低，也就是 l 应較小，为了解决这一矛盾，将空气間隙 l 尽可能增大 保证 容易熄
 弧，而在管壁間加入附加金属电极 c 以增大电容使放电容易。繆雷尔——赫列布兰德利
 用管形避雷器在各种不同距离 l 及附加电极之长度下进行試驗得出如图 1—9 之一組曲

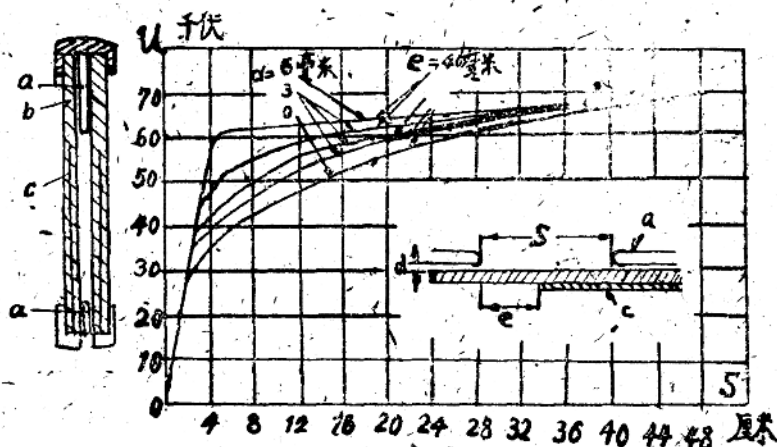


图 1—9 管形避雷器放电电压与电极距离之关系

綫。在这一試驗中放电是由純空气間隙的放电和沿面放电两者串联起来的，由图中可以看出当間隙距离 l 很小时基本是属于純空气放电性质，当距离較大时放电路径有偏向管壁的特性，因此平均放电电場强度降低很大，而且电容愈大（即 e 愈小）放电电压降低得愈多。当 $d=0$ 及 $e=0$ 时（相当电容最大）放电电压最低。这充分証明电容的大小对沿面放电电压的影响。

許多科学家曾在工频和冲击电压下用各种材料作成的圓柱形标本檢驗捷普列尔公式，結果証明：滑閃放电电压与表面电容系数及两电极間的长度的关系一般是不变的，但是有时对于某些材料这种关系遵守得很好，而对另一些材料来說又不是如此，产生这种情况的原因是否是由于对在电压变化很大时之 e 值估計得不正确，还是各种材料表面特点的影响現在还不是很清楚的，需要进一步研究。

为了进一步了解关于不均匀电場中沿面放电电压与介质的几何尺寸之关系。苏联曼特罗夫曾尝试以数学进行分析，在分析中曼特罗夫忽略了表面电荷及火花电阻影响的作用，而以由表面电容，表面与容积电阻所組成的鏈形等值迴路（图 1—10）进行的。

这种回路所代表的設備是我們在实际运用中常常遇見的。图 1—10b 是絕緣設備 D 的等值回路，寬一厘米长为 l 的等值綫路图，图中

$$C_s = k \frac{\epsilon_m}{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{11}} \quad \text{及} \quad C_v = \frac{\epsilon_v}{4\pi \cdot d \cdot 9 \cdot 10^{11}} \quad 1-1$$

k ——为由于高度及电場分布之影响所加的常数。

由图 1—10b 得下列方程式：