

高电压绝缘

清华大学
西安交通大学 合编

电力工业出版社

高 电 压 绝 缘

清 华 大 学
西 安 交 通 大 学 合 编

电 力 工 业 出 版 社

内 容 提 要

本书研究高电压下的电气绝缘问题。主要叙述：气体击穿过程的基本理论、气体间隙绝缘和气体中的沿面绝缘（高压绝缘子）；液态及固态电介质的绝缘性能和主要高压电力设备（如电容器、电缆、套管、互感器、变压器、高压电机等）的绝缘结构；高压电力设备的预防性试验。还介绍了高电压绝缘中的静电场。

本书系高等学校“高电压技术及设备”专业的教材，并可供电力系统、电气设备制造工业及技术物理等部门的高电压工作者参考，也可作为高等学校其它专业学习“高电压工程”课时的参考书。

高 电 压 绝 缘

清 华 大 学 合 编
西 安 交 通 大 学

*

电 力 工 业 出 版 社 出 版

（北京德胜门外六铺炕）

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经营

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 25印张 573千字

1980年12月第一版 1980年12月北京第一次印刷

印数 00001—12200册 定价 2.70元

书号 15036·4133

前 言

本书是根据1978年5月在杭州召开的全国“高电压技术及设备”专业教学计划及教材编审规划会议通过的教材大纲编写的。

全书共十一章。第一章叙述高电压绝缘中的静电场；第二章至第五章叙述气体击穿过程的基本理论，气体间隙绝缘和气体中的沿面绝缘（高压绝缘子）；第六章至第十章叙述液态及固态电介质的电气性能和主要高压电力设备（如电容器、电缆、套管、互感器、变压器、高压电机等）的绝缘结构；第十一章叙述高压电力设备的预防性试验。

本书由清华大学、西安交通大学合编，是在总结两校高电压技术教研室多年来讲授“高电压技术物理基础”、“高电压绝缘”、“电工材料学”等课程的教学经验的基础上编写的。编写中重视加强理论基础，也注意联系生产实际，以适应超高压技术发展的需要。

本书编写分工如下：清华大学朱德恒、谈克雄编写绪论；谈克雄编写第一章（除第四节外）；朱德恒编写第二章；薛家麒、谈克雄编写第三章；朱德恒、谈克雄编写第四章；王昌长编写第五章及第一章的第四节。西安交通大学冯允平编写第六章；严璋编写第七章至第十章；蒋国雄编写第十一章。本书由朱德恒及严璋主编。

本书由上海交通大学雷新陶、李福寿、张嘉祥等同志主审，后经1979年12月在上海召开的审稿会议讨论通过。参加会议的有上海交通大学、武汉水利电力学院、华中工学院、重庆大学、华东电管局试验研究所、上海电机厂、上海变压器厂和上海电缆厂的代表。主审单位（上海交通大学）和与会代表对书稿提出了很多宝贵意见。在收集资料、编写及审稿过程中，还得到电力科学研究院、东北电管局技术改进局、北京电力设计院、北京电力试验研究所、陕西电管局中心试验所、西安高压电器研究所等单位的大力支持。在此一并致以深切的谢意。

限于我们的水平，书中不妥和错误之处可能不少，恳切希望读者批评指正。

编 者

1980年6月

目 录

| | |
|------------------------------|-----|
| 前 言 | |
| 绪 论 | 1 |
| 第一章 高电压绝缘技术中的静电场 | 6 |
| 第一节 工程上常见的静电场 | 6 |
| 第二节 静电场的分析计算法 | 8 |
| 第三节 静电场的数值计算法 | 27 |
| 第四节 静电场的实测和模拟 | 40 |
| 第五节 电场的调整 | 48 |
| 第二章 气体击穿的理论分析和试验数据 | 51 |
| 第一节 气体放电主要形式简介 | 51 |
| 第二节 带电质点的产生——气体分子的电离和金属的表面电离 | 52 |
| 第三节 带电质点的消失 | 60 |
| 第四节 均匀电场中气体击穿的发展过程 | 62 |
| 第五节 不均匀电场中气体击穿的发展过程 | 78 |
| 第六节 持续作用电压下空气的击穿电压 | 94 |
| 第七节 雷电冲击电压下空气的击穿电压及伏秒特性 | 103 |
| 第八节 操作冲击电压下空气的击穿电压 | 110 |
| 第九节 提高气体间隙击穿电压的措施 | 114 |
| 第三章 气体中的沿面放电及高压绝缘子 | 124 |
| 第一节 绝缘子的性能要求和材料 | 124 |
| 第二节 气体中沿固体介质表面的放电 | 127 |
| 第三节 支柱绝缘子 | 135 |
| 第四节 棒形绝缘子的计算 | 138 |
| 第五节 瓷套管 | 143 |
| 第六节 线路绝缘子 | 145 |
| 第七节 介质表面脏污时的沿面放电和污秽地区绝缘 | 149 |
| 第四章 输电线路和变电所的外绝缘 | 158 |
| 第一节 大气状态对外绝缘放电电压的影响 | 158 |
| 第二节 海拔高度对外绝缘放电电压的影响 | 163 |
| 第三节 工频电压下输电线路和变电所外绝缘的放电电压 | 164 |
| 第四节 操作冲击电压下输电线路和变电所外绝缘的放电电压 | 173 |
| 第五节 雷电冲击电压下输电线路和变电所外绝缘的放电电压 | 186 |
| 第六节 输电线路外绝缘的选择 | 189 |
| 第七节 变电所外绝缘的选择 | 194 |
| 第八节 绝缘配合统计法简介 | 195 |
| 第五章 六氟化硫气体绝缘 | 197 |

| | | |
|-------------|--|------------|
| 第一节 | 六氟化硫气体的物理化学特性 | 198 |
| 第二节 | 六氟化硫气体的绝缘特性 | 201 |
| 第三节 | 六氟化硫气体中沿固体介质表面的放电 | 209 |
| 第四节 | 充六氟化硫气体的电力设备的绝缘结构 | 211 |
| 第五节 | 六氟化硫气体使用中的安全问题 | 213 |
| 第六节 | 六氟化硫混合气体 | 214 |
| 第六章 | 液体、固体电介质的电气性能 | 215 |
| 第一节 | 液体、固体电介质的极化、电导与损耗 | 215 |
| 第二节 | 液体电介质的击穿 | 232 |
| 第三节 | 固体电介质的击穿 | 239 |
| 第四节 | 组合绝缘的击穿 | 253 |
| 第五节 | 电介质的其它性能 | 257 |
| 第七章 | 电力电容器及电力电缆绝缘 | 261 |
| 第一节 | 电力电容器 | 261 |
| 第二节 | 电力电缆 | 278 |
| 第八章 | 高压套管及高压电流互感器绝缘 | 297 |
| 第一节 | 高压套管 | 297 |
| 第二节 | 高压电流互感器绝缘 | 313 |
| 第九章 | 变压器绝缘 | 319 |
| 第一节 | 概述 | 319 |
| 第二节 | 变压器绝缘的工作条件 | 320 |
| 第三节 | 高压绕组绝缘结构的基本特性 | 322 |
| 第四节 | 油浸变压器中常用的绝缘材料及其性能 | 323 |
| 第五节 | 变压器的主绝缘 | 328 |
| 第六节 | 变压器的内部保护 | 338 |
| 第七节 | 变压器的纵绝缘 | 344 |
| 第十章 | 高压电机绝缘 | 347 |
| 第一节 | 电机绝缘的工作条件 | 347 |
| 第二节 | 常用的高压电机绝缘结构 | 349 |
| 第三节 | 高压电机的匝间绝缘 | 356 |
| 第四节 | 高压电机的防晕问题 | 357 |
| 第十一章 | 绝缘预防性试验 | 362 |
| 第一节 | 绝缘电阻测量 | 363 |
| 第二节 | 介质损失角正切值 ($\text{tg}\delta$) 的测量 | 368 |
| 第三节 | 电压分布的测量 | 380 |
| 第四节 | 局部放电测量 | 382 |
| 第五节 | 绝缘油的电气试验和气相色谱分析 | 384 |
| 第六节 | 耐压试验 | 386 |
| 第七节 | 各种预防性试验方法的特点 | 395 |
| 参考书 | | 396 |

绪 论

一、高电压绝缘的研究对象

《高电压绝缘》课程是研究高电压下的电气绝缘问题。绝缘的作用是将电位不等的导体分隔开，使导体没有电气连接^①，从而能保持不同的电位，所以绝缘是电气设备结构中的重要组成部分。具有绝缘作用的材料称为绝缘材料（电介质），电气设备的绝缘就是由各种绝缘材料构成的。

随着国民经济的发展，用电量不断上升，输电距离不断增加，因而电力系统工作电压不断提高。由于电力系统工作电压的提高，有关电气设备绝缘的问题就越来越突出。因为作用于绝缘上的电压超过某临界值时，绝缘将破坏而失去绝缘作用。随着工作电压提高，电气设备中绝缘材料越用越多，绝缘的费用在设备成本中所占比例越来越高，设备的体积和重量也越来越大。如果不采用新的措施，设备的绝缘甚至无法构成。绝缘通常还是电气设备中的薄弱环节，电力系统的事故中很大一部分就是由于设备绝缘破坏所造成的。因此，如何采用先进技术，既经济合理、而又安全可靠地解决电力系统中的绝缘问题就变得十分重要了（在其它一些科学部门中，也采用着极高电压的设备，同样也存在着绝缘问题）。

电力系统正常运行时，电气设备绝缘是长期处在工作电压作用之下的。但是，由于各种原因，电力系统中的电压有时会出现短时升高的现象，即产生过电压。过电压可分为两大类：一类是由于设备遭受雷击造成的或在设备附近发生雷击而感应产生的过电压，称为大气过电压；另一类是由于电力系统中的操作及发生事故或发生谐振而引起的过电压，称为内过电压。过电压的作用时间虽然很短，但过电压的数值却大大超过正常工作电压，因而易造成绝缘的破坏。所以，设备绝缘除应能耐受工作电压的持续作用外，还必须能耐受过电压的作用。为了电气设备安全可靠地运行，除应搞清楚过电压的数值、波形等参数并设法降低或限制作用于设备上的过电压的数值外，还要保证及提高绝缘本身的耐受电压，这两个方面就构成了高电压技术的主要内容。关于降低及限制过电压的问题将在《电力系统过电压》课程中讲授，如何保证及提高设备绝缘的耐受电压、设计出先进的绝缘结构则是本课程所讨论的内容。

为了设计出技术先进、经济合理而又安全可靠的绝缘结构，首先必须掌握各类绝缘材料在电场作用下的电气物理性能，绝缘材料在强电场中的击穿特性及其规律尤为重要。只有知道了绝缘材料本身耐受电压的规律之后，才能进行绝缘的设计（考虑绝缘结构、选择绝缘距离或绝缘厚度等）。其次，绝缘的破坏决定于作用在其上的电场强度，在满足电气设备基本要求的前提下，应设法改善绝缘结构，使其电场分布尽可能地均匀，以减小电场强

^① 绝对不导电的绝缘材料是没有的。但绝缘材料的电阻率十分高($10^9 \sim 10^{22}$ 欧·厘米)，在一般电场作用下，通过其中的泄漏电流极小，通常可以忽略不计，从而能起到绝缘作用。

度。此外，还可采用新型绝缘材料，改进制造工艺以提高绝缘的电气强度。采用新型绝缘材料常会导致绝缘结构的重大变革，带来巨大的经济、技术效益。电气设备绝缘就是随着工作电压提高，通过不断改善绝缘结构，采用更好的绝缘材料和更先进的制造工艺而得到发展的。

为了保证设备绝缘能安全可靠运行，还应该定期地对绝缘进行预防性检查，防患于未然。

因此，本课程的研究对象是：

- (1) 电介质的电气物理特性，特别是电介质的击穿过程及其基本规律；
- (2) 一些主要的高压电力设备的典型绝缘结构，它们的构成原则及设计计算方法；
- (3) 判断及监视绝缘质量的主要试验方法。

二、对高压电气设备绝缘的基本要求

如上所述，电气设备的造价和运行的可靠性在很大程度上取决于电气设备的绝缘，当设备电压等级增高时，则更是如此。高压设备能否安全运行是由矛盾的两个方面——作用在设备绝缘上的电压和绝缘本身耐受电压的能力——决定的。作用在绝缘上的电压的破坏作用小于绝缘耐受电压的能力时，设备能安全运行；反之，设备绝缘就会受到破坏。但是在研究设备绝缘时，除了考虑电压的作用外，还应分析机械力、温度和大气环境长期侵蚀等因素对绝缘耐受电压的能力的影响。如果忽视这些因素，那末在一定条件下，它们会转化为破坏绝缘的主要因素。因此，在考虑设备的绝缘时，必须了解设备在运行中的全面情况，这样才能对绝缘提出合理的要求。要求过高会使设备造价增加，要求过低则使设备运行不可靠。下面将从机械力、温度和化学稳定性等方面简述高压设备绝缘的工作条件和对绝缘的基本要求(对电气性能的要求在以下“高压设备的绝缘水平和试验电压”中讨论)。

1. 机械性能的要求 高压设备的绝缘在承受电场作用的同时，还可能受到外界的机械负荷和电动力或机械振动等的作用。例如悬式线路绝缘子需经常承受导线拉力的作用；隔离开关的支柱绝缘子在分合闸时，需承受扭转力矩的作用；变压器线圈在电力系统发生短路时，需承受很大的电动力的作用等。机械力的作用可能造成绝缘局部损坏(如产生裂纹)，使绝缘的电气强度大大降低，最终导致绝缘击穿。有些绝缘体在设备中同时起着机械支持作用(如线路绝缘子、支持绝缘子等)，如果绝缘体破碎，电气设备也就解体而损坏，这可能在电力系统中造成巨大事故。因此，在选择绝缘时必须考虑机械负荷的作用。

2. 温度和热稳定性的要求 绝缘材料都有确定的耐热能力，温度过高会引起热击穿，导致绝缘能力丧失。例如电力电容器运行通风不好，而绝缘的介质损耗较大时，就有可能发生热击穿。

通常有机绝缘材料(如变压器油、油纸绝缘等)在高温下很容易氧化和分解，绝缘性能劣化。因此，给绝缘规定了一定的工作温度，在工作温度下绝缘材料中的老化过程不应发展太快，以便保证有足够的寿命。

绝缘结构中的绝缘材料常常是和金属材料紧密结合在一起的，由于两者的热膨胀系数往往相差很大，当温度变化时，绝缘材料内部就会产生很大的应力。例如因气候的变化，运行中绝缘子的温度可能发生剧变，从而产生很大的内应力，使瓷件开裂，而引起绝缘子

击穿。为此，要求绝缘应能承受温度的变化。

3. 化学稳定性 在户外工作的绝缘应能长期耐受日照、风砂、雨雾冰雪等大气因素的侵蚀。在高原工作的设备，必须考虑气压、温度、湿度的改变对绝缘产生的影响。在特殊条件下工作的设备，例如在含有化学腐蚀气体的环境、或在湿热带环境工作的设备，则应根据具体情况，保证绝缘对各种有害因素有足够的耐受能力。总之，对绝缘应要求有足够的化学稳定性。

三、高压设备的绝缘水平和试验电压

高压设备绝缘能否安全可靠的运行，起主要作用的是其耐受电压的能力。各种额定电压等级的设备的绝缘都需要具有相应的耐受电压的能力。设备绝缘耐受电压能力的大小称为绝缘水平。电气设备的绝缘水平应保证绝缘在最大工作电压的持续作用下和过电压的短时作用下都能安全运行。

为了检验绝缘在大气过电压作用下能否安全运行，目前采用雷电冲击电压模拟大气过电压进行试验，以判断绝缘的冲击绝缘水平。电力系统中都装有限制过电压的保护设备如阀型避雷器等，因此，电气设备绝缘的冲击绝缘水平以及其相应的冲击试验电压是和阀型避雷器的保护特性紧密联系的，改进避雷器的性能可以降低冲击绝缘水平。为了检验绝缘在内过电压作用下运行的可靠性，通常用工频电压等效地来进行试验，判断其绝缘水平的高低。各种设备的工频试验电压及其外部绝缘的淋雨试验电压，就是根据电力系统允许的内过电压的大小制定的。决定设备绝缘水平时，还必须考虑到工作电压的持续作用。在工作电压的持续作用下，绝缘会产生老化（性能逐渐劣化）过程，最终导致绝缘破坏。所以工作电压常常是决定绝缘使用寿命的主要条件。国家标准中规定了高压电气设备的最大工作电压，长期作用在高压设备上的电压不得高于其最大工作电压。

国家标准GB311-64《高压电气设备绝缘试验电压和试验方法》规定了各种电气设备的最大工作电压和试验电压。应当说明，试验电压标准是和电力系统一定的运行情况联系在一起。当改变了电网结构或采用了新型的避雷器及断路器，限制了过电压的数值时，试验电压就可相应减小。本书将要讨论的一些电气设备的试验电压见“正常绝缘电气设备的试验电压一览表”。表中所列外部绝缘适用于标准大气条件（气压为760毫米汞柱，温度为20℃，绝对湿度为11克/米³），如果试验时大气条件和标准大气条件不符，应对试验电压进行校准。额定电压330千伏及以上电气设备，国内已经生产，但其试验电压由于国家标准尚未统一规定，故表中没有列入。

影响绝缘的电气强度的因素是很复杂的，绝缘在内过电压作用下的电气强度和工频电气强度之间，难以得到准确的折合关系。因此，用工频试验电压来反映内过电压绝缘水平便不可能很准确，对于超高压和特高压电压等级，这个矛盾尤其突出。引起内过电压的原因很多，由电力系统谐振造成的谐振过电压振荡频率低，作用时间长，对绝缘的危害性大，所以应采取措施予以防止或将过电压倍数（过电压和最大工作相电压的比值）限制在一定的范围之内，从设备绝缘设计上可不考虑这种过电压。由电力系统中的操作过程或事故过程引起的过电压称为操作过电压。操作过电压振荡频率较高，作用时间较短，但出现比较频繁，在设备设计上应保证其绝缘能耐受操作过电压的作用（当然也应设法限制其过

正常绝缘电气设备的试验电压一览表

| 额定电压 | 最高工作电压 | 冲击试验电压 (千伏, 幅值) | | | | | | | | | | 工频试验电压 (千伏, 有效值) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|--------|-----------------------------|-----------|----|----|----|-----------|-------------|----|----|----|------------------|-------|-----|-------------|-----------|-------------------|-----|-------------|-----------|-------|-----|-------------|------|------|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|-----|------|-----|------|-----|----------|-----|-----|-----|-----|
| | | 内部绝缘试验电压 | | | | | 外部绝缘试验电压 | | | | | 内部绝缘一分钟试验电压 | | | | | 外部绝缘耐受试验电压 (均匀升压) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | 电流互感器, 试验中不带激磁的电力变压器, 电压互感器 | 电力变压器和互感器 | 全波 | 截波 | 截波 | 电力变压器和互感器 | 单独试验的套管和绝缘子 | 全波 | 截波 | 截波 | 电力变压器 | 电压互感器 | 电 流 | 单独试验的套管和绝缘子 | 电力变压器和互感器 | 电压互感器 | 电 流 | 单独试验的套管和绝缘子 | 电力变压器和互感器 | 电压互感器 | 电 流 | 单独试验的套管和绝缘子 | 干燥状态 | 淋雨状态 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 3 | 3.5 | 42 | 43.5 | 50 | 42 | 50 | 44 | 52 | 18 | 24 | 24 | 24 | 24 | 25 | 26 | 27 | 20 | 6 | 6.9 | 57 | 60 | 70 | 57 | 60 | 73 | 25 | 32 | 32 | 32 | 34 | 36 | 26 | 10 | 11.5 | 75 | 80 | 90 | 75 | 80 | 100 | 35 | 42 | 42 | 42 | 45 | 47 | 34 | 35 | 40.5 | 180 | 200 | 225 | 185 | 230 | 195 | 240 | 85 | 95 | 95 | 100 | 105 | 110 | 85 | 60 | 69 | 300 | 330 | 390 | 320 | 400 | 335 | 420 | 140 | 155 | 170 | 180 | 180 | 140 | 110 | 126 | 425 | 480 | 550 | 460 | 570 | 480 | 600 | 200 | 250/*200 | 265 | 280 | 215 | 154 | 177 | 585 | 660 | 760 | 630 | 785 | 660 | 825 | 275 | 320/*275 | 340 | 355 | 375 | 290 | 220 | 252 | 835 | 945 | 1090 | 900 | 1130 | 950 | 1190 | 400 | 470/*400 | 490 | 520 | 550 | 425 |

* 适用于外部绝缘能分别试验的油浸式电气设备的内部绝缘。

电压倍数)。因此,当前对于电压等级高的电气设备,希望直接以操作冲击试验电压来反映其操作冲击绝缘水平。关于绝缘在操作冲击电压下的放电特性,本书将作适当介绍。

四、高压设备绝缘的设计步骤

1.选择绝缘结构类型和材料 绝缘是整个电气设备的一部分。选择绝缘结构时,应了解设备的整体要求和设备的工作条件,全面分析电、磁、机械、热以及其它有关方面的要求。分析生产实践的经验,是很重要的一个环节。经过调查研究,比较各种结构的优缺点,才能合理地安排绝缘结构。

选择绝缘结构时,还应该考虑材料来源、加工工艺和设备的造价。应该尽量采用来源丰富的材料和先进的工艺,以提高生产率、降低造价。

选择绝缘结构时,还应该考虑工人的劳动条件。

2.确定各部分绝缘承受电压的波形及幅值 按照试验电压标准及设备结构,通过计算或根据同类型结构的实测结果来确定各个有损坏可能的绝缘部位,以及它们可能受到的电压。在此基础上才能合理安排结构尺寸,保证设备不致因绝缘击穿而损坏。

3.决定结构尺寸 确定了各个有损坏可能的绝缘部位以及它们可能受到的电压以后,根据相应条件(电压种类、电场分布和材料工艺等)下的电气强度数据,考虑一定的裕度,就可决定绝缘结构的尺寸。

电气强度的数据,可从已有的各种试验结果和手册选取。这时必须注意到材料规格和质量的不同,加工工艺的不同,电场情况的不同都将引起电气强度的变化,有些情况下这种变化将是很大的。由于产品品种的不同,工厂制造工艺的变化,从设计手册上有时可能找不到现成的数据,则可以根据生产实践,安排适当的试验,总结规律,取得所需要的设计数据。

4.机械性能和热性能的校核 设备的绝缘在满足电性能要求的同时,还必须校核其机械性能及热性能。如果这些方面的要求不能满足,就必须改变尺寸或结构。

上面所述步骤不是一成不变的,可因具体情况而异。

5.试制、试验、修改、定型 产品的初步设计是否正确,必须通过实践来检验。通常是先试制出少量样件,对样件进行各种试验,根据试验结果修改设计。这种过程,有时可能需要反复多次,才能使产品性能全面满足要求,然后就可定型生产了。

第一章 高电压绝缘技术中的静电场

第一节 工程上常见的静电场

常用电气设备中的电场，因为电极间电压随时间的变化相对比较缓慢，极间距离远小于相应电磁场的波长，所以任一瞬间这种电场都可近似作为静电场考虑。在处理实际问题时，还可根据具体情况忽略某些次要因素简化计算（例如计算起始放电电压时，常不考虑空间电荷的影响等）。

一、静电场中的一些物理现象

（一）电介质中的局部放电及击穿

电气设备的绝缘必须安全可靠，经济合理。引起绝缘损坏的主要原因是作用在电介质（绝缘材料）上的电场强度过高，当超过一定限值时，电介质就会失去绝缘性能而损坏。若强电场区只局限于电极附近很小区域内，则电介质可能只是局部损坏，即发生局部放电；若强电场区范围很大，则电介质将全部失去绝缘性能，造成电极间短路，即电介质击穿（详见第二章及第六章）。电介质的这个耐受限度称为临界电场强度 E_0 。（简称临界场强）。电介质的临界场强除与介质材料、工艺有关外，还与电极形状、极间距离、电场均匀程度、散热条件等等因素有关，在一定范围内变动。表 1-1 列出了一些常用电介质的临界场强（表中同时列出了这些介质的相对介电常数 ϵ_r ）。

表 1-1 常用电介质的临界场强及相对介电常数

| 材 料 名 称 | 临界场强 ^① E_0 (千伏/厘米) | 相对介电常数 ϵ_r | 说 明 |
|-------------|---------------------------------------|------------------------|----------------|
| 气 体 (标准状态下) | 空 气 | 25~30 | 1.00058 |
| | 六 氟 化 硫 | ≈80 | 1.002 |
| | 氮 气 | 25~30 | 1.0006 |
| | 二 氧 化 碳 | 22~27 | 1.00098 |
| 液 体 | 变 压 器 油 | 50~250 | 2.2~2.5 |
| | 硅 油 | 100~200 | 2.6 |
| | 四 氯 化 碳 | ≈600 | 2.2 |
| 固 体 | 石 蜡 | 100~150 | 2.0~2.5 |
| | 瓷 | 100~200 | 5.5~6.5 |
| | 聚 乙 烯 | 200~300 | 2.2~2.4 |
| | 聚 苯 乙 烯 | 200~300 | 2.5~2.6 |
| | 聚 四 氟 乙 烯 | 200~300 | 2.0~2.2 |
| | 聚 氯 乙 烯 | 100~200 | 3.0~3.5 |
| | 有 机 玻 璃 环氧树脂浇注品 | 200~300 | 3.0~3.6 3.8 |

① 在说明栏中未特别注明者均指有效值。

在工程上，分析高压设备中电场的主要目的就是如何在指定的电压和一定的绝缘条件下，使最大电场强度不超过允许值（参照临界场强并考虑一定裕度而规定的数值）。

(二) 静电感应

导体因受附近带电体的影响而在其表面不同部分出现正负电荷的现象称为静电感应。如图1-1所示，将一对地绝缘的导体2放入超高压线路或其它高压导线1附近时，由于静电感应，对地绝缘的导体将具有一定的电位。若导体2的对地电容为 C_{22} ，而导体1、2之间的电容为 C_{12} ，则对地绝缘的导体2与地间的感应电压为

$$U_2 = \frac{C_{12}}{C_{12} + C_{22}} U_1$$

当接地的导体或人与之接触时就会产生电流，这时会有火花或使人有麻电的感觉。如果对地绝缘的人处于高压导体下时，也将因感应电压而会有不舒服的感觉。当人的对地电容大于275微微法、感应电压为2000伏时，人与接地导体接触会有疼痛和不安的感觉。为减少静电感应电压 U_2 ，需减小 C_{12} 或增大 C_{22} ，所以在超高压电网中，有时也为了减弱静电感应而加大导线对地距离。

静电感应除了会引起人身、设备安全问题外，还会影响测量准确度，产生干扰讯号等等。利用屏蔽、接地等方法可以减小静电感应的影响。

二、均匀电场与不均匀电场

在均匀电场中，各点电场强度的大小、方向都相同，如图1-2(a)所示平板电容器

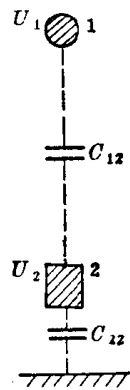


图 1-1 对地绝缘导体在电场中的静电感应
1—导线；2—对地绝缘导体

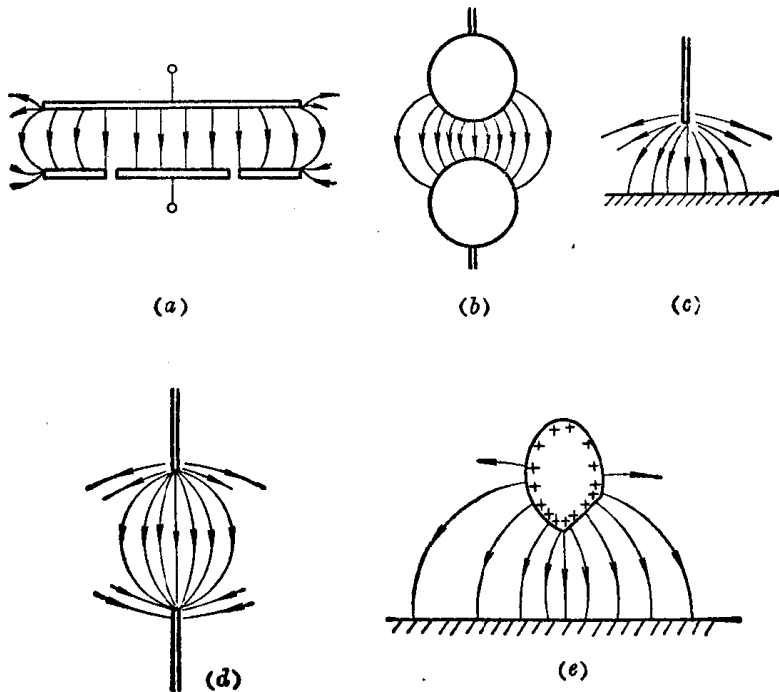


图 1-2 均匀电场与不均匀电场示意图
(a)均匀电场(中间部分)；(b)、(c)、(d)、(e)不均匀电场

中间部分的电场即为均匀电场。上述情况以外的电场都是不均匀电场；按不均匀程度的差别，又可分为稍不均匀电场和极不均匀电场。前者如球距不大于球径的球间隙电场（图 1-2, *b*），后者如棒-板间隙电场（图 1-2, *c*）及棒-棒间隙电场（图 1-2, *d*）。棒-棒间隙电场属于对称的不均匀电场，棒-板间隙电场则属于不对称的不均匀电场，前者比后者稍均匀一些。

分析绝缘结构的击穿电压时，不仅要考虑绝缘距离，而且还要考虑电场不均匀程度的影响。对于同样距离的间隙，电场愈不均匀，通常击穿电压愈低。电气设备中的电场大多为不均匀电场，为了提高绝缘结构的击穿电压，必须设法减小电场的不均匀程度。

电极表面的电场强度与其表面电荷密度成正比。在电极的尖端或边缘，如图 1-2(*e*) 及 (*a*) 所示，由于曲率半径小，表面电荷密度大，电力线密集，电场强度高，容易发生局部放电。这种现象称为尖端效应或边缘效应。电极的尖端或边缘是造成极不均匀电场的重要原因，所以工程上常需要改善电极形状，避免电极表面曲率半径过小或出现尖角。

第二节 静电场的分析计算法

静电场的计算方法可分为分析计算法和数值计算法两大类。分析计算法适用于电极和介质形状比较简单的电场，而对某些形状稍为复杂的结构，也可用分析计算法进行近似计算。数值计算法则可解决边界条件复杂的电场问题，且准确度较高，但计算工作量大，通常需要用电子计算机来计算。由于电子计算机的普遍使用，数值计算法的应用日益广泛。

静电场与所有其它场一样，总是存在于三维空间内。但若电场内所有等位面都是柱形的，表征电场特性的各个量只与两个坐标 x 和 y 有关，而在与等位面相垂直的各个平面内，电场情况是一样的，这样的场称为二维场或平行平面场。例如，两个无限长平行圆柱导体间的电场就是一个平行平面场。

绕一公共轴旋转的带电体的电场是一个三维场，但在任何一个通过公共轴的平面内，电场的分布是相同的，这样的场称为轴对称电场。例如，支柱绝缘子周围的电场就是一个轴对称电场。

二维场或轴对称场的计算比三维场简单，因而在工程技术应用中，人们常将各类实际问题理想化为轴对称场或二维场，以此来简化计算。

静电场的分析计算法内容很多，本节仅对常见的一些情况进行讨论。

一、单一电介质中简单电场的计算

(一) 平行平板电极间的电场

电力电容器元件中的电场就是平行平板电极间电场的实例。平行平板电极除边缘处电场分布不均匀外（边缘效应），电极中间部分电场处处相等，是均匀电场（图 1-3）。电极中间部分的电场强度为

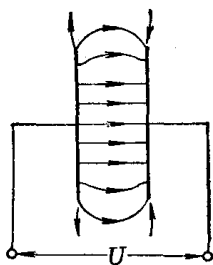


图 1-3 平行平板电极间的电场

$$E = \frac{U}{d} \quad (1-1)$$

极间电容为

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{A}{d} \quad (1-2)$$

上两式中 E —— 电场强度, 千伏/厘米;

U —— 外施电压, 千伏;

d —— 极间距离, 厘米;

C —— 极间电容, 法;

A —— 极板面积, 厘米²;

ε_0 —— 真空的介电常数, $\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi \times 9 \times 10^{11}}$, 法/厘米;

ε_r —— 电介质的相对介电常数。

(二) 同轴圆柱电极间的电场

电缆、电容套管和标准电容器等中就有同轴圆柱电极间的电场, 变压器同一铁芯柱上高、低压线圈间的电场也近于这种情况。如图1-4所示, 这种电场是不均匀的, 内电极表面电力线最密, 场强最大; 离内电极越远, 场强越小; 在外电极内表面处, 场强最小。

在离圆柱轴线距离为 x 处的电场强度为

$$E_x = \frac{Q}{\varepsilon_0 \varepsilon_r A} = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r x l} \quad (1-3)$$

式中 E_x —— 离圆柱轴线距离为 x 处的电场强度;

Q —— 在长度为 l 的电极上的电荷;

A —— 半径为 x 、长度为 l 的圆柱形等位面的面积;

ε_0 —— 真空的介电常数;

ε_r —— 电介质的相对介电常数。

因内、外电极间电压为

$$U = \int_r^R E_x dx = \frac{Q}{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l} \ln \frac{R}{r}$$

所以长度为 l 的电极间电容为

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\ln \frac{R}{r}} \quad (1-4)$$

上两式中 U —— 内、外电极间电压;

C —— 长度为 l 的电极间电容;

R —— 外电极半径;

r —— 内电极半径;

其它符号的代表意义与公式(1-3)同。

将(1-4)式代入(1-3)式, 可得

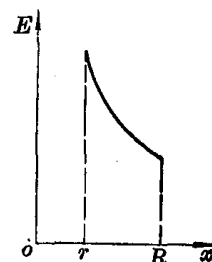
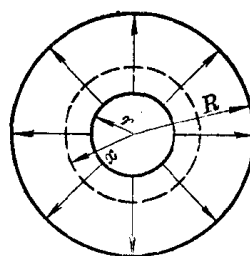


图 1-4 同轴圆柱电极间的电场

$$E_x = \frac{U}{x \ln \frac{R}{r}} \quad (1-5)$$

最大场强出现在内圆柱表面，其值为

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} \quad (1-6)$$

例 1-1 有一个250千伏充压缩气体的标准电容器，其外电极直径220毫米，内电极直径140毫米。外电极为高压电极。内电极的测量部分共分两段，其长度分别为 $l_1=320$ 及 $l_2=240$ 毫米（见图1-5）。求最大工作场强和两个测量部分的电容量。

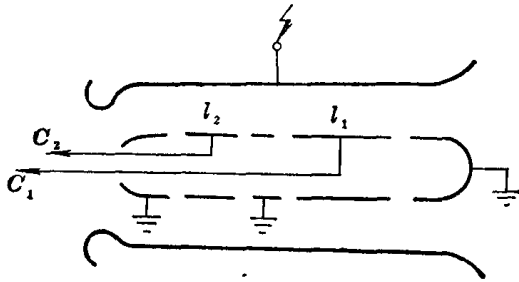


图 1-5 标准电容器示意图

解：最大工作场强在内电极表面，由(1-6)式，其值为

$$E_r = \frac{U}{r \ln \frac{R}{r}} = \frac{250}{7 \ln \frac{11}{7}}$$

$$= 79.0 \text{ 千伏 (有效值) / 厘米}$$

标准电容器的试验电压为额定工作电压的1.1倍，此时最大场强为

$$E_r = 1.1 \times 79.0 = 86.9 \text{ 千伏 (有效值) / 厘米}$$

各种气体的相对介电常数 $\epsilon_r \approx 1$ ，由(1-4)式，两个测量部分的电容量分别为

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r l_1}{\ln \frac{R}{r}} = \frac{2\pi l_1}{4\pi \times 9 \times 10^{11} \ln \frac{R}{r}} = \frac{l_1}{18 \times 10^{11} \ln \frac{R}{r}}$$

$$= \frac{32}{18 \times 10^{11} \ln \frac{11}{7}} = 39.3 \times 10^{-12} \text{ 法}$$

$$= 39.3 \text{ 微微法}$$

$$C_2 = \frac{24}{18 \times 10^{11} \ln \frac{11}{7}} = 29.5 \times 10^{-12} \text{ 法}$$

$$= 29.5 \text{ 微微法}$$

在同轴圆柱电极结构中，当外圆柱半径 R 为常数且外施电压 U 不变时，改变内圆柱半径 r ， E_r 将有一个极小值 $E_{r, \min}$ 。为了计算 $E_{r, \min}$ ，可由(1-6)式找出分母出现极大值的条件

$$\frac{d}{dr} \left(r \ln \frac{R}{r} \right) = 0 \quad \text{解此式}$$

得 $\ln \frac{R}{r} = 1$ 即 $r = \frac{R}{e}$ 代入(1-6)式

得

$$E_{r, \min} = \frac{Ue}{R} \quad (1-7)$$

图1-6是外圆柱半径 R 恒定,变化内圆柱半径 r 时,最大场强 E_r 的变化情况。如 E_r 超过临界场强,则内电极表面发生电晕(局部放电),可以认为这相当于内电极半径增大。当 $r > R/e$ 时,由图可知,这时电晕层表面场强更大,电晕层将不断扩大直至间隙击穿。因此 $r > R/e$ 时不会发生稳定的电晕。当 $r < R/e$ 时,如 E_r 超过临界场强产生电晕,由图可知,这时电晕层表面场强下降,所以电晕层可以稳定在某一半径处。也就是说 $r < R/e$ 时,击穿前会出现稳定的电晕。此后,随着电压升高,电晕层不断扩大,当电晕层半径达到 R/e 时,再升高电压就立即发生击穿了。由上述可知,同轴圆柱电极间电场的均匀程度与 r/R 有关, $r/R < 1/e$ 时为极不均匀电场, $r/R > 1/e$ 时为稍不均匀电场。

在实际绝缘结构中,并不总是使 $r = R/e$,常见的情况是 $r > R/e$ 。例如电缆的导电芯有载流量的要求, r 不能取得太小;标准电容器有电容量的要求,内电极稍大可增加电容量。由图1-6可知, r/R 略大于 $1/e$ 时 E_r 比 $E_{r, \min}$ 大得并不多,所以分析问题时不能单从电场出发,而应各方面综合考虑。

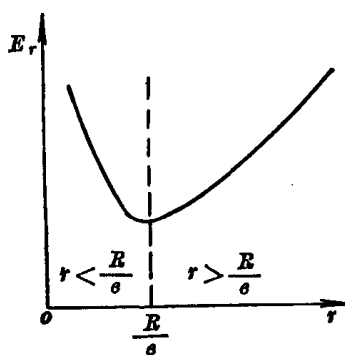


图 1-6 外圆柱半径 R 恒定,变化内圆柱半径 r 时,最大场强的变化情况

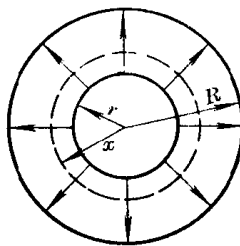


图 1-7 同心圆球间电场

(三) 同心圆球电极间的电场

高压设备的球形电极对离其很远的建筑物可近似当作两同心圆球电极;在某些充压缩气体的标准电容器中,端部用半球与同轴圆柱电极相接,端部的内外电极也是同心圆球电极。这种情况下电力线发散得比同轴圆柱时更加厉害,所以电场更不均匀。

如图1-7所示,离球心距离为 x 处的电场强度为

$$E_x = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r x^2} \quad (1-8)$$

式中 Q ——电极上电荷;

ϵ_0 ——真空的介电常数;

ϵ_r ——电介质的相对介电常数。

因内外电极间电压为

$$U = \int_r^R E_x dx = \frac{Q(R-r)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r Rr}$$