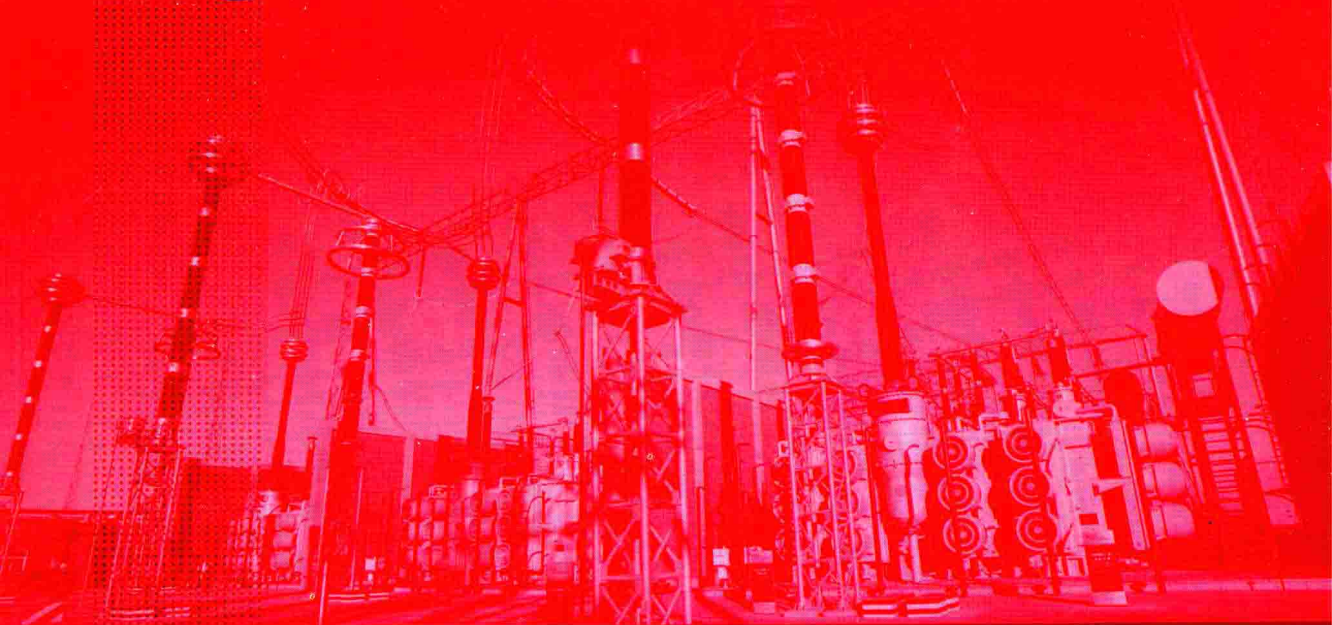




“十三五”普通高等教育本科重点规划教材
普通高等教育“九五”国家级重点教材



High Voltage Insulation Technology

高电压绝缘技术

(第三版)

西安交通大学 严璋
清华大学 朱德恒



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科重点
普通高等教育“九五”国家级重点教材

高电压绝缘技术

(第三版)

西安交通大学 严 璋 主编
清华大学 朱德恒



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科重点规划教材，普通高等教育“九五”国家级重点教材。

全书共分十章，主要内容包括高电压绝缘技术中的电场分析与测量，气体击穿的理论分析和空气间隙绝缘，气体中的沿面放电和高压绝缘子，绝缘配合，六氟化硫气体绝缘，液体、固体电介质的电气性能，电力电容器和电力电缆绝缘，高压套管和高压电流互感器绝缘，电力变压器和高压电机绝缘，绝缘试验。本书全面、系统地分析了高电压下的绝缘问题及当代的进展，为进行各类高压电气设备的开发及应用奠定基础。

本书可作为普通高等学校电气信息类专业的教学用书，也可作为从事各类高压电气设备研究、设计、运行、检测等的工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高电压绝缘技术/严璋，朱德恒主编.—3版.—北京：中国电力出版社，2015.8

“十三五”普通高等教育本科重点规划教材 普通高等教育“九五”国家级重点教材

ISBN 978-7-5123-7564-2

I. ①高… II. ①严… ②朱… III. ①高电压绝缘技术-高等学校-教材 IV. ①TM85

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 072864 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2002 年 3 月第一版

2015 年 8 月第三版 2015 年 8 月北京第八次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 23.25 印张 566 千字

定价 45.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

为适应电网安全可靠、绿色低碳和灵活高效的要求,基于“科技要创新、多培养具有创新能力人才”的思路,本次重编《高电压绝缘技术》教材时,更注意反映有关高电压绝缘技术的最新成就及发展动向,并努力遵循认识规律进行科学分析和表达,以使大学生、研究生及有关技术人员易于掌握本学科的基本概念、发展规律及分析研究方法,为进行科技创新创造条件。

随着科学技术的发展,第三版中一方面增加了对高电压下的放电过程、介电特性及其规律性的新认识,增加了对高电压电气设备及系统的开发、设计及调试方面的新技术;另一方面又增补了近年来在研发到建成更高电压等级的交、直流系统及设备中的新经验。但为了简洁,对书中出现的交流高压系统及设备一般不冠以“交流”,而对直流输电系统及设备则冠以“直流”二字。

本书第三版由严璋、朱德恒任主编,各章的编写分工为:清华大学谈克雄编写第一、三、五章及附录 B、C 等,朱德恒编写第二、四章,西安交通大学冯允平编写第六、十章,严璋编写绪论和第七、八、九章及附录 A 等,严璋和谈克雄作最后的统稿。此外,张冠军(西安交大)和高胜友(清华)参与了重编过程,搜集了新的资料;第二、四章中的部分内容由高胜友增补。

本书编写过程中得到了王建生(西高院)、万启发(国网电科院)、谢毓城(保变)、王绍禹(黑龙江省局)、邬伟民(甘肃省局)、彭宗仁(西安交大)、董旭柱(南网公司)、王晓宁(中国电科院)等许多专家的支持与帮助,他们提供了超、特高压电力设备的基础研究、开发设计、试验检测、运行维护等方面的许多新思路、新成果、新设计、新标准及新经验,对此编者表示衷心感谢。

恳切希望读者对书中不妥之处予以指正。

本书配套课件可从中国电力出版社教材服务网 <http://jc.cepp.sgcc.com.cn> 自行下载使用。

编 者

2015 年 6 月

第一版前言

为适应改革开放、国民经济迅猛发展、教育改革逐步深入的新形势，我们重编了本书。

此书由西安交通大学和清华大学的有关教师合作编写，总结了两校几十年来讲授高电压绝缘方面有关课程的经验及教训，也认真听取了兄弟院校的建议。早在1980年，两校教师已按当时的教学计划及教学大纲共同编写出版了《高电压绝缘》（由电力工业出版社出版），曾获水利电力部优秀教材二等奖等嘉奖。1990年，又根据当时修订的教学大纲重编了《高电压绝缘》，由清华大学出版社出版，至今又有十年了。我国的工农业生产及科学技术都有了新的发展，教育改革的步伐也大步向前，对教材也提出了更高的要求，面向新世纪重编新教材是顺理成章的事。

编写中，不仅力图吸取过去的经验教训，又能适应当前科技发展及教育的需要。在以高电压绝缘技术的基本内容为主线的同时，拓宽专业面、充实新内容；并注意启发读者的思路，为今后创新奠定基础。例如增加了设计任何绝缘结构时都会遇到的绝缘配合、绝缘结构的电场分析及优化调整，加强了绝缘结构从设计、试验到运行的全过程的联系。还增加或充实了不少很有发展前景的新技术，例如有机绝缘子及其防污特性、电负性气体及全封闭组合电器绝缘、交链聚乙烯挤塑电缆及其防树枝化、绝缘在线检测及状态维修、新型液体、固体和复合绝缘材料等。因为高电压绝缘技术既可用于电力工业，也可用于其他部门。

全书分十章。第一章为电场分析；第四章为绝缘配合；第二、三章及第五章阐述气体和沿面放电的基本原理以及SF₆绝缘；第六章分析液体、固体电介质的电气性能；第七章到第九章介绍几种高压电气设备（电容器、电缆、套管、互感器、变压器及高压电机）的绝缘结构；第十章叙述高压电气设备的绝缘试验。

本书的编写分工为：谈克雄编写第一章、第五章及第三章第一至第七节，朱德恒编写第二章、第四章及第三章第八、九节，冯允平编写第六章及第十章，严璋编写绪论及第七章至第九章。全书由严璋、朱德恒任主编。叶蜚誉教授仔细审阅了本书并提出不少宝贵意见，作者谨致以深切感谢。

但限于水平，书中不妥之处可能不少，恳切希望读者予以批评指正。

编者

2000年12月

第三版前言

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力教育协会组织制订了普通高等教育“十一五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为修订教材。

本书自2002年由电力出版社出版以来,已为国内许多高校所选用。

这些年以来,我国电力工业的发展空前迅速,已经或正在开发或引进更多的先进技术。为此,本书内容也亟需相应予以反映和充实。例如:不仅要分析交流高压,而且要分析直流高压下的电场分布、介电性能及绝缘结构;要让读者了解当电压等级更高时,内、外绝缘的绝缘特性、结构设计及试验方面的特点等。为此,由原作者认真对原书进行了补充及修订。

不妥之处,恳切希望予以指正。

编者

2007年9月

目 录

前言	
第一版前言	
第二版前言	
绪论	1
第一章 高电压绝缘技术中的电场分析与测量	5
第一节 工程上常见的高压电场问题.....	5
第二节 静电场的解析计算	12
第三节 静电场的数值计算	23
第四节 电场和电介质表面电荷测量	32
第五节 电场的调整	39
习题	41
本章参考文献	42
第二章 气体击穿的理论分析和空气间隙绝缘	43
第一节 气体放电主要形式简介	43
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	45
第三节 带电质点的消失	51
第四节 均匀电场中气体击穿的发展过程	53
第五节 不均匀电场中气体击穿的发展过程	69
第六节 持续作用电压下空气的击穿电压	85
第七节 雷电冲击电压下空气间隙的击穿电压及伏秒特性	92
第八节 操作冲击电压下空气间隙的击穿电压	99
第九节 提高气体间隙击穿电压的措施.....	105
习题.....	114
本章参考文献.....	116
第三章 气体中的沿面放电和高压绝缘子	117
第一节 绝缘子分类.....	117
第二节 绝缘子性能要求.....	120
第三节 气体中沿固体电介质表面的放电.....	123
第四节 支柱绝缘子.....	130
第五节 瓷套管.....	138
第六节 线路绝缘子.....	139
第七节 电介质表面脏污时的沿面放电和污秽地区绝缘.....	149
第八节 大气条件对外绝缘放电电压的影响.....	161

第九节 海拔高度对外绝缘放电电压的影响	164
习题	165
本章参考文献	166
第四章 绝缘配合	167
第一节 概述	167
第二节 过电压	168
第三节 绝缘配合的原则	173
第四节 绝缘配合方法	174
第五节 交流架空输电线路绝缘水平的确定	177
第六节 直流架空输电线路绝缘水平的确定	184
本章参考文献	185
第五章 六氟化硫气体绝缘	187
第一节 引言	187
第二节 均匀及稍不均匀电场中六氟化硫的击穿	190
第三节 极不均匀电场中六氟化硫的击穿	201
第四节 六氟化硫气体的伏秒特性	204
第五节 六氟化硫气体中沿固体电介质表面的放电	207
第六节 含六氟化硫的混合气体	213
习题	218
本章参考文献	219
第六章 液体、固体电介质的电气性能	220
第一节 液体、固体电介质的极化、电导与损耗	220
第二节 液体电介质的击穿	234
第三节 固体电介质的击穿	240
第四节 电介质的其他性能	249
习题	252
本章参考文献	253
第七章 电力电容器和电力电缆绝缘	254
第一节 电力电容器	254
第二节 电力电缆	260
习题	268
本章参考文献	269
第八章 高压套管和高压互感器绝缘	270
第一节 高压套管	270
第二节 高压电流互感器绝缘	279
习题	283
本章参考文献	284
第九章 电力变压器和高压电机绝缘	285
第一节 电力变压器绝缘	285

第二节 高压电机绝缘·····	303
习题·····	310
本章参考文献·····	311
第十章 绝缘试验·····	312
第一节 绝缘试验分类·····	312
第二节 绝缘电阻测量·····	313
第三节 介质损耗角正切 $\tan\delta$ 的测量 ·····	318
第四节 电压分布的测量·····	326
第五节 局部放电测量·····	328
第六节 绝缘油的电气试验和气相色谱分析·····	329
第七节 耐电压试验·····	331
第八节 绝缘在线监测·····	337
习题·····	342
本章参考文献·····	343
附录 A 高压输变电设备的绝缘水平及耐受电压·····	344
附录 B 交、直流高电压变电站、线路和设备图片·····	348
附录 C 高电压绝缘技术中一些常用英文缩略词·····	357
参考文献·····	360

绪 论

一、高电压绝缘的研究对象

高电压绝缘技术是关于高电压电气设备绝缘结构的开发、选型、设计、制造、运行和维护的技术。

高电压电气设备中,需要用绝缘结构来分隔电位不等的导体,使之都能保持各自不同的电位。绝缘结构形式各异,取决于各种电气设备的功能、构造特点和运行条件,由一种或几种绝缘材料组成。因此绝缘结构是电气设备中的一个重要组成部分。

高电压绝缘应用于国民经济的许多部门,其中最大量的是用于电力工业。新中国成立以来的几十年里,我国电力工业有了飞速发展,如表 0-1 所示;以 2012 年与 1949 年相对比,全国的发电设备装机总容量及全年发电量的平均年增长率分别约为 10.75% 及 11.85%,远高于发达国家同时期的发展速度。但我国人口约占世界人口的 1/5,以人均而言,还略低于世界平均水平的 1/2。因此随着改革开放、工农业的发展及人民生活水平的提高,我国电力工业的发展仍将保持很高的速度。

表 0-1 我国电力工业近 63 年的发展

年份	全国装机容量及其增长			全国全年发电量及其增长	
	$\times 10^6$ kW	增长倍数	年平均增长率	$\times 10^{10}$ kWh	年平均增长率
1949	1.85	620	10.75%	0.43	11.85%
2012	1147			499	

注 1. 表中数据未包括台湾和港澳地区。

2. 2012 年数据取自《中国电力百科全书》(第三版),北京:中国电力出版社,2014。

随着用电量的上升、输电距离的增长,电力系统的最高电压等级必将进一步提高,有关高压电气设备的绝缘问题的解决也将愈加困难。当作用电压超过临界值时,绝缘将被破坏而失去绝缘作用。而且工作电压越高,绝缘的费用在设备成本中所占比例将越大、设备的体积及重量也越大;如不采取新技术,甚至有时将无法构成设备绝缘。绝缘又常是电气设备中的薄弱环节,是运行中不少设备事故的发源地。研究绝缘、改善绝缘,不仅是经济问题,更是安全问题。因而努力采用先进技术,既经济合理又安全可靠地解决各种高压电气设备的绝缘问题就显得十分重要了。例如在我国,为适应电力工业的发展,远距离输电以及全国联网等需要,基于科研、开发、生产、运行人员等的齐心努力创新,近年来交流 1000kV、直流 800kV 等世界最高电压等级的超、特高压输电设备及输电系统已开发成功并投入运行,这也是在研究解决了一系列的绝缘问题后才实现的(参见附录 B 中的图)。

要确保电气设备安全可靠地长期运行,就要科学、妥善地解决外施电压(包括工作电压及各种过电压)与电气设备的电气强度(包括长期及短期的)之间的矛盾。正常运行时,电气设备绝缘是长期处于工作电压作用之下的;但电力系统中的电压有时会出现短时的有害于绝缘的电压升高现象,即过电压。常将过电压分成两大类:一类为雷电过电压,指设备遭受

雷击,或设备附近发生雷击而感应产生的过电压;另一类为内部过电压,指电力系统中由于操作、事故、改变接线等引起的过电压。虽然过电压的作用时间一般很短,但幅值比工作电压高得多,可能造成绝缘破坏。因而设备绝缘除应能承受正常工作电压的长期作用以外,还必须能耐受过电压的作用。为确保电气设备能安全可靠地运行,一方面应分析过电压的幅值、波形等参数,采取有效措施降低或限制作用于设备的过电压;另一方面应设法保证及提高绝缘结构的耐受电压,确保它在短暂过电压及长期工作电压下都具有所期望的电气强度,这两方面构成了高电压技术的主要内容。上述的后一方面,包括如何提高设备绝缘的耐受电压、设计制造出先进的绝缘结构、努力提高运行可靠性,这就是本书要讨论的主要内容。

为了设计出技术先进、经济合理而又安全可靠的绝缘结构,首先必须掌握各类电介质在电场作用下的电气物理性能,尤其在强电场中的击穿特性及其规律;依此规律进行绝缘结构的设计:如选择结构型式、确定绝缘尺寸等。其次,绝缘的破坏取决于在外施电压下分配在该处的电场强度,因此在满足电气设备基本要求的前提下,应设法改善绝缘结构,使电场尽可能分布均匀。此外,还可引用新型绝缘材料、改进制造工艺等以提高绝缘的电气强度。

为了保证设备绝缘能安全可靠运行,无论在制造厂或运行现场,必须保证一定的工艺条件,最后还应对绝缘进行各种检查及试验。

为此,本书分析研究高电压下的电气绝缘问题,阐述的主要对象是:

- (1) 电介质的电气物理性能,特别是其击穿过程与规律性;
- (2) 各种高压电气设备的典型绝缘结构、基本型式及分析计算方法;
- (3) 检测及判断设备绝缘质量的试验方法。

二、对高压电气设备绝缘电气性能的基本要求

电气设备的造价及运行的可靠性在很大程度上取决于其绝缘,当设备电压等级增高时更是如此。因为高压设备能否可靠运行主要是由下述两方面决定的:一是外施电压下设备绝缘结构中的电场分布情况;二是绝缘本身耐受电压的能力。当作用于绝缘上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。各种标称电压等级的设备绝缘所承受的长时电压或短时电压是不同的,亦即要有不同的“绝缘水平”,设计设备绝缘时,必须先选择合理的绝缘水平。

在工作电压的持续作用下,即使电压不超过规定值,但由于绝缘逐渐劣化(老化),最终也能导致绝缘破坏。因此长期工作电压是决定绝缘使用寿命的主要条件,参见国家标准 GB 311.1—2012《绝缘配合 第一部分:定义、原则和规则》的规定值(见附录表 A1、表 A2)。

电力系统中还可能出现多种过电压,为检验绝缘在雷电过电压下能否安全运行,常采用冲击电压发生器对制成的设备进行雷电冲击电压试验,以检验绝缘的雷电冲击绝缘水平(见附录表 A3)。由于电力系统中都装有避雷器等限制过电压的保护设备或保护措施,因此设备绝缘的雷电冲击绝缘水平要求以及相应的雷电冲击耐受电压要求都是与避雷器等的保护特性紧密联系的,避雷器等性能的改进可以降低所需的冲击绝缘水平。而为检验绝缘在内部过电压下的可靠性,传统的做法往往以短时工频电压近似地等效来进行试验,以检验其绝缘水平,各种设备的 1min 工频耐受电压主要是根据内部过电压的大小制定的(见附录表 A4)。实际上影响绝缘的电气强度的因素很复杂,特别是对于超高压和特高压系统,绝缘在内部过电压下的电气强度和工频电气强度之间难以获得较准确的折合关系,因此对于 330kV 及以

上的设备，在工频运行电压、暂时过电压（持续时间较长、频率较低的内部过电压）下的绝缘性能以及在操作过电压（由于操作过程引起的内部过电压）下的性能需用模拟不同类型的内过电压的操作冲击试验来检验（见附录表 A2）。而在工频运行电压及暂时过电压下设备绝缘对老化或污秽的适应性则宜用长时间的工频电压试验来检验。

国家标准等所规定的设备试验电压是各制造厂设计其绝缘时考虑电气性能要求的重要依据。至于在现场对设备进行交接试验或者在大修后进行试验时，也要按有关规程进行耐压等试验，但这时的试验电压一般低于相应的制造厂的试验电压。

至于对各类设备的其他电气特性试验也有相应的标准或规程等规定，例如：不少高压电气设备要进行局部放电试验、对高压电力变压器还要在感应耐压试验时测其局部放电量、对电力电容器等要进行耐久性试验等。

三、对高压电气设备绝缘其他性能的要求

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、大气环境等因素对绝缘耐受电压性能的影响，不能忽视这些因素。在一定情况下它们可能成为破坏绝缘的主要因素。

(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常受到机械负荷、电动力或机械振动等的作用。例如悬式绝缘子承受导线拉力，隔离开关的支柱绝缘子在分合闸时承受扭转力矩，突发短路时变压器绕组承受很大电动力等。这些机械力的作用可能导致绝缘局部损坏（如产生裂纹、变形），使绝缘的电气强度下降，最终导致绝缘击穿。由于绝缘子在设备中同时起机械支持和电绝缘的作用，无论机械损坏或电气击穿，都会使电气设备解体。因此，在选择绝缘时必须同时考虑机械和电气的双重作用。

(2) 温度和热稳定性的要求：每种绝缘材料都有一定的耐热能力。如果温度过高，会使其丧失绝缘能力或寿命缩短，特别是有机绝缘材料，如变压器油、油纸绝缘、塑料等在高温下更容易分解及氧化，引起绝缘性能迅速劣化。又如早期的油纸电力电容器及胶纸套管，因材料的介质损耗大，如设计不妥、运行中散热不好，就更易出现热击穿。因此应对不同耐热等级的绝缘材料分别规定一定的工作温度，当在此温度以下工作时绝缘材料的热老化较慢，从而保证所要求的寿命。

(3) 化学作用和不利环境条件下稳定性的要求：在户外工作的绝缘应能长期耐受日照、风沙、脏污、雨雾、冰雪等的侵蚀。在高海拔区运行的设备，还需考虑由于气压、温度、湿度改变的影响。在特殊环境下，例如在含有化学腐蚀性气体或在湿热带地区工作，还应考虑绝缘对各种有害因素的耐受能力。总之，绝缘应具有足够的化学稳定性。

四、高压电气设备绝缘的设计过程

(1) 选择绝缘结构类型及材料：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布置及工作条件，全面分析电、磁、机械、热以及其他方面的要求。而以往的制造、试验及运行经验也有重要的参考价值。经过调查研究、分析对比后，才能合理地安排绝缘结构。

选择绝缘结构时，还应考虑材料来源、加工工艺和设备：如尽量采用来源丰富又不产生污染的材料、采用先进的工艺过程等，既可确保质量，又可提高生产率、降低造价，而且不影响制造者及使用者的健康等。

(2) 分析确定各部分绝缘的电场分布和所承受电压的幅值及波形：按照试验电压标准及

设备结构,通过分析计算或根据同类型结构的实测,了解其电场分布情况,特别是那些场强集中部位或其他易损坏部位的绝缘材料上可能分配到的场强的方向、数值及波形;在设计时采取有效措施以改善其电场强度的分布状况。

(3) 决定结构尺寸:确定了那些有损坏可能的绝缘部位以及可能分到的场强以后,根据相应条件(如不同的电压类型、电场分布、材料工艺等)下的电气强度数据,并考虑一定的裕度后,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、手册等选取,但要注意到材质的不同、加工工艺的不同、电场分布的不同等都将引起其电气强度的变化,有时这种变化是很大的。对很重要的而从手册、书刊上找不到的数据,宜根据条件尽可能进行适当的试验,从而取得较为可靠的设计数据。

(4) 其他性能的校核:设备绝缘在满足电气性能要求的同时,还必须校核其机械性能及热性能等,以确保该设备的可靠性及使用寿命。如果这些性能不能满足要求,必须改变绝缘尺寸甚至结构型式。

总之,应设计、制造出满足运行及环保等要求且性能价格比高的绝缘结构,然后进行相应的质量检验。

五、高压电气设备的绝缘试验

1. 工厂试验

产品的初步设计是否正确必须用试验来检验。通常是先试制样品,再根据试验结果修改设计。这种过程有时要多次反复才能使产品性能全面满足要求,然后才可正式投产。

关于产品试验,常用型式试验以全面检查该产品的设计、材料、工艺等是否满足技术条件;而对于已定型的产品,以出厂(或例行)试验对每台产品在出厂前进行质量检查。

2. 现场试验

对新安装的设备要在安装方与运行方之间进行交接试验,对已运行设备进行预防性试验。无论是定期或不定期的、离线或在线的检测,其目的都在于力争及早发现缺陷或损伤,从而确保设备安全可靠运行。

在现场对绝缘状况的检测及分析,不仅为电力系统安全运行提供了保障,也为制造部门提供了产品在投运后的老化、损坏规律,为进一步改进产品设计、开发新产品等创造了条件。

第一章 高电压绝缘技术中的电场分析与测量

静电场是存在于静止电荷周围、不随时间变化的电场。工频交流电气设备中,不同电位导体间的电位差随时间的变化比较缓慢,导体间距离远小于相应电磁场的波长,所以在任一瞬间工频交流电气设备中的电场可近似视为静电场。

变压器、电机、高压开关设备、电容器、电缆、绝缘子等电气设备的绝缘结构的性能与绝缘内部、外部的电场分布有关,在绝缘结构设计时需要控制在作用电压下的电场强度,避免发生击穿、闪络等放电现象,达到减小电气设备尺寸和重量的目的。

绝缘结构的设计需要计算、分析或测量复杂结构中电场及电位分布的知识。

本章讨论高电压设备和输电线绝缘中的电场分析与实测,研究求解静电场的各类计算方法和电场调整方法。叙述次序大致是:说明常见的高压工程电场问题;讨论静电场的解析计算,包括单一电介质和多层电介质中简单电场的计算,最大场强近似计算,电场不均匀系数,用许瓦兹变换求解静电场;讨论静电场的数值计算方法,包括有限单元法和模拟电荷法;介绍电场、离子流、电晕特性和表面电荷的测量原理;说明电场的调整方法,包括改变电极形状、改善电极间电容分布及其他调整电场的措施。

第一节 工程上常见的高压电场问题

一、电介质的局部放电及击穿

20世纪30年代以前,发现了电介质的绝缘特性,电介质仅作为电气绝缘材料使用。随着科学技术的发展,发现在特定条件下某些非绝缘体也具有电介质的一些特性,也属电介质;而某些固体电介质具有与极化有关的特殊功能特性(如电致伸缩、压电性、热释电性、铁电性),它们被作为功能材料使用。

在高电压绝缘技术中,电介质狭义地用于指称绝缘材料。

当作为绝缘材料的电介质承受的电场强度超过一定限值时就会失去绝缘能力而损坏。若强场区局限于较小范围,则电介质可能只是局部损坏,发生局部放电。若强场区范围很大,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、五、六章)。电介质耐受电场的限度称为临界电场强度 E_0 ,它除与材料、工艺有关外,还与电极形状、极间距离、电场不均匀程度、散热条件等因素有关。表1-1列出了一些常用电介质的临界场强。工程上分析高压设备中电场的主要目的是,在规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确定的数值。

表 1-1 常用电介质的临界场强及相对介电常数

电 介 质		临界场强 ^① E_0 (kV/cm)	相对介电常数	备 注
气体 (标准状态下)	空气	25~30	1.00058	E_0 均指幅值
	六氟化硫	80~89	1.002	
	氮气	25~30	1.0006	
	二氧化碳	22~27	1.00098	

续表

电 介 质		临界场强 ^① E_0 (kV/cm)	相对介电常数	备 注
液体	变压器油 硅油 四氯化碳	50~250 100~200 ≈600	2.2~2.5 2.6 2.2	E_0 值受所含杂质影响很大
固体	石蜡 瓷 聚乙烯 聚苯乙烯 聚四氟乙烯 聚氯乙烯 有机玻璃 环氧树脂浇注品	100~150 100~200 200~300 200~300 200~300 100~200 200~300 200~300	2.0~2.5 5.5~6.5 2.2~2.4 2.5~2.6 2.0~2.2 3.0~3.5 3.0~3.6 3.8	E_0 值因材料制造工艺不同而有较大差别

① 在说明栏中未特别注明者均指有效值。

二、均匀电场与不均匀电场

若空间某区域内各处电场强度的量值和方向都相同,则称该区域中电场为均匀电场,否则为不均匀电场。均匀电场中电场强度的大小、方向处处相同,如图 1-1 (a) 所示平板电容器中间部分的电场,除此以外的电场都是不均匀电场。按电场不均匀程度又分为稍不均匀和极不均匀电场。前者如球距不大于球径的球间隙电场,如图 1-1 (b) 所示,后者如棒-板间隙(不对称)电场,如图 1-1 (c) 所示,及棒-棒间隙(对称)电场,如图 1-1 (d) 所示。

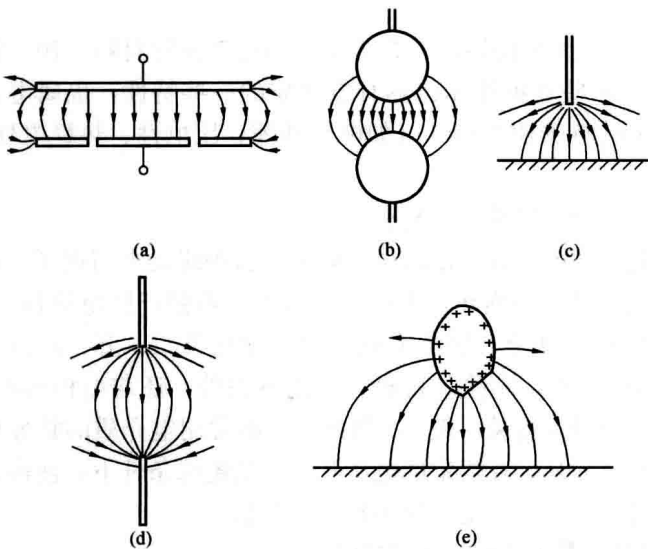


图 1-1 均匀电场与不均匀电场示意图

(a) 均匀电场(中间部分); (b)、(c)、(d)、(e) 不均匀电场

高,容易发生局部放电,如图 1-1 (a) 与 (e) 所示。这种现象称为尖端效应或边缘效应,是极不均匀电场的重要标志。工程上常需改善电极形状,避免电极表面曲率过大或出现尖锐

棒-板间隙(不对称)电场,如图 1-1 (c) 所示,及棒-棒间隙(对称)电场,如图 1-1 (d) 所示。

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。为了充分利用绝缘材料,提高绝缘结构的击穿电压,必须设法减小电场的均匀程度。

电极表面的电场强度与其表面电荷密度成正比。在电极尖端或边缘的曲率半径小,表面电荷密度大,电场线密集,电场强度高,

边缘。

三、静电感应

不带电导体受邻近带电体的影响，在其表面不同部位出现正、负电荷的现象称为静电感应。在邻近带电体电场的作用下，不带电导体内的自由电子将发生宏观位移，当达到新的静电平衡后，在靠近带电体一侧的表面出现与带电体极性相反的电荷分布，远离带电体的另一侧表面出现与带电体上电荷极性相同的电荷分布，整个导体表面的总电荷量仍维持原来的数值。

在高电压设备附近的导体，虽然它们与高电压设备之间没有直接的电连接，但导体受高电压设备静电场的影响，会产生静电感应现象。在图 1-2 中，对地绝缘的导体 2 处于高压导体 1 周围的电场内，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} ，则导体 2 与地之间会出现感应电压

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

当接地的导体或人与之接触时就会产生电流。在工频电场中，处于地电位的人接触对地绝缘的导体，或对地绝缘的人接触接地物体时，都可能产生电击。按严重程度不同，电击可分为三种：可感觉的电击、引起疼痛并使肌肉不自觉反应的电击（第二类电击）和能造成直接伤亡的电击（第一类电击）。输电线路和变电站的设计，要考虑当人们接触输电线路下方或高压设备附近的车辆或物体时，不允许发生第一类电击，并尽可能地减轻第二类电击的程度。

静电感应除会引起人身、设备安全问题外，还会影响测量准确度，产生干扰信号等。可采用屏蔽、接地等方法减小静电感应的影

四、交流架空输电线路的工频电场

交流架空输电线路（参见附录图 B2、B3）的工频电场是指运行状态下三相输电线路在周围产生的电场。随输电电压的不断提高，交流架空输电线路的工频电场强度亦相应增强。应该控制输电线路下方地面附近的电场强度值，使其处于规定限值以内。

三相输电线路周围空间任一点的工频电场是一随时间变化的旋转场（除导线表面和地表面外），这是由于该点与各相导线的距离不等，且三相导线上按正弦变化的电荷相互间有 120° 的“相位差”，分别在该点产生的三个大小和方向不同、时间上又有 120° 相位差的电场分量合成的结果。

输电线路下方离地高度 2m 以内的空间，最大电场强度的方向接近于垂直地面，工程上一般就以最大场强的垂直分量作为某点的电场强度。在离地 2m 以内的范围内，输电线路下方地面某点垂线上的场强变化很小，可近似认为相同，一般以离地 1.5m 处的场强来表征该点电场水平。

导线的对地高度、相间距离和排列方式对输电线路下方地面附近的场强高低都有明显的影响。增大导线对地高度，地面附近场强显著降低，但当导线对地高度超过 20m 后则场强降低的幅度很小。缩小相间导线水平距离对减小地面附近场强也有一些效果。导线呈三角形排列比水平排列对减小地面附近场强较为有利。图 1-3 所示为 500kV 输电线路导线按水平、正三角和倒三角排列时，线下离地面 1m 高处的场强分布情况^[1-1]。由图 1-3 可见，在导线对

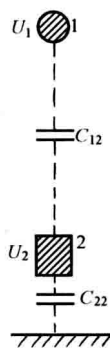


图 1-2 对地绝缘的导体在电场中的静电感应
1—导体；2—对地绝缘导体

地高度相同的条件下, 线下最大场强及高场强范围以导线倒三角排列最小, 正三角排列次之, 水平排列最大。最大场强除倒三角排列时出现在中相导线下方外, 其他排列一般出现在离边相导线线下外侧 1~2m 处。

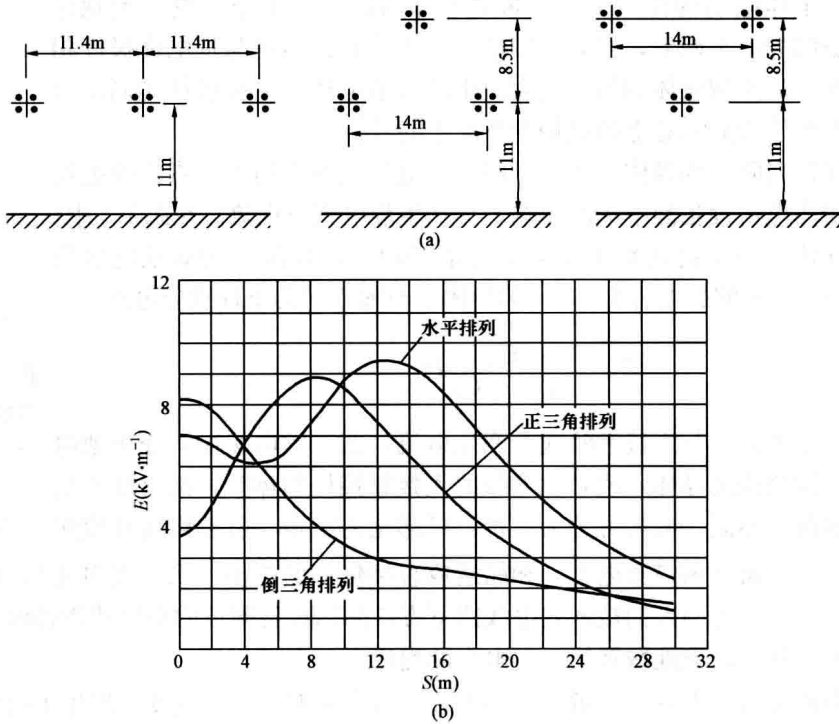


图 1-3 500kV 输电线路下方的工频电场

(a) 导线的三种排列方式; (b) 电场强度 E 与距线路中心横向距离 S 的关系

输电线路下方的工频电场可以准确计算。计算时, 分裂导线可用等效的单根导线代替, 并假设电荷集中在该等效导线的中心位置, 而大地则用一系列位于地面以下的镜像电荷代替。根据线路电压和导线位置, 先计算出以复数表示的单位长度导线的电荷量, 再由此算出空间各点场强的垂直分量和水平分量。求合成场强时, 除了考虑场强垂直分量和水平分量是空间相互垂直的两个矢量外, 还应考虑它们之间在时间上的相位差。

五、直流架空输电线路的合成电场

(一) 线路电晕形成的空间电荷

运行状态下架空输电线路的导线可能产生电晕。

交流电压下, 上半周期内因电晕放电产生的离子, 在下半周期因电压极性改变又几乎全被拉回导线, 因此离子只在导线周围很小区域内往返运动, 在相导线之间和相导线与大地之间的大部分空间不存在带电离子。

直流电压下, 线路电晕产生的离子分布与交流电压下差别很大。在直流架空输电线路(参见附录图 B16) 两极导线电晕产生的离子中, 与导线极性相反的离子被拉向导线, 而与导线极性相同的离子将被推离导线, 沿电场线方向运动, 这样在极导线之间和它们与大地之间的空间将存在很多离子。图 1-4 为双极直流输电线路的电场线和离子分布示意图^[1-2], 正