

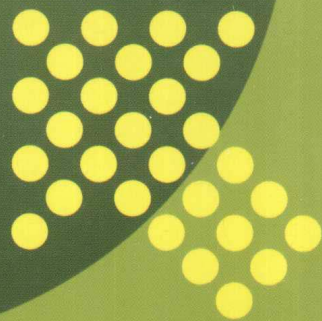
21世纪高等学校规划教材



DIANQI SHEBEI JUEYUAN YU SHIYAN

# 电气设备 绝缘与试验

淡淑恒 赵子玉 编 著



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

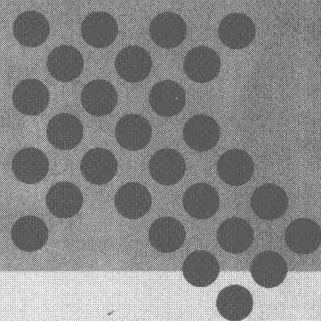
21世纪高等学校规划教材



DIANQI SHEBEI JUEYUAN YU SHIYAN

# 电气设备 绝缘与试验

编 著 淡淑恒 赵子玉  
主 审 邹积岩 王季梅



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书是 21 世纪高等学校规划教材。

全书分为六章，主要内容包括电气设备的绝缘结构及对绝缘材料的要求、电气设备中常用的绝缘材料及电气性能、电气设备试验的基本方法、电气设备绝缘结构、电气设备试验、智能仪器的原理及设计。书后附有思考练习题供读者检查学习效果。

本书可以作为 52 学时或者 34 学时的课程的教材。也可以作为培训教材使用。

本书可作为整个强电类学生的教学参考书或教材，也可供从事电力工程的设计、施工人员学习、参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备绝缘与试验/淡淑恒, 赵子玉编著. —北京: 中国电力出版社, 2010.1

21 世纪高等学校规划教材

ISBN 978-7-5083-9931-7

I. ①电… II. ①淡… ②赵… III. ①电气设备—绝缘—高等学校—教材 ②电气设备—绝缘试验(电)—高等学校—教材  
IV. ①TM210.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 238898 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://jc.cepp.com.cn)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 11.75 印张 282 千字

定价 19.00 元

## 敬告读者

本书封面贴有防伪标签, 加热后中心图案消失  
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

本书以我们长期以来一直使用的自编的《电气设备绝缘与试验》讲义为基础改写,是为工科院校电力工程(一类专业)的所有本科学生及电力系统及自动化专业(二类学科)、高电压及绝缘、电机及其控制专业的硕士研究生编写的教材。本书第一章系统地阐述了电气设备在运行中所经受的各种系统中的电压,描述了各种电压之间的关系,介绍了电气设备在整个寿命期间所应该进行的各种试验,尤其是绝缘试验。另外还介绍了电气设备为了耐受系统的各种电压而应该设计的绝缘结构,提出了设备及系统对绝缘结构的要求。第二章介绍了常用的绝缘材料及其性能,为设备绝缘结构的设计打下基础。第三章介绍了常见的各种电气设备的试验,主要是绝缘试验,另外还介绍了会影响设备绝缘性能的设备直流电阻的试验及接地装置的接地电阻试验、绝缘油的试验。第四章主要介绍了各种主要电气设备的绝缘结构。第五章介绍了各种电气设备的主要电气绝缘试验。第六章对目前所用的各种数字式仪器的设计原理进行了总结和概括。最后在附录中给出了设备在各种不同类型的试验中所应进行的试验项目及应达到的要求,并且还系统地收录了一些与绝缘相关的数据和表格,便于读者查找。而且本书后还附有思考练习题,供读者检查学习的效果。

全书由上海电力学院电力系淡淑恒教授主编。本书第一章、第二章、第三章、第四章、第五章是淡淑恒教授所写。第六章由上海交通大学电气工程学院赵子玉教授编写。大连理工大学邹积岩教授、西安交通大学王季梅教授主审。

在本书的编写及长期的教学中,得到很多电力公司的专业技术人员的大量帮助,华东电网公司的蒋跃强主任、张启平高工、唐新龙、蔡电宝,华东电网培训中心的倪伟等给予了很多帮助。电力学院的高亮、杨秀、赵璐、陈炯等老师也给予了大力支持及鼓励。硕士研究生李卫伟、张超,本科生濮文波、梅荣文等同学为本书的输入、校对做了大量的工作,在此表示衷心感谢。

编 者

2009 年 10 月

## 目 录

## 前言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 电气设备的绝缘结构及对绝缘材料的要求  | 1   |
| 第一节 绝缘结构及其试验            | 1   |
| 第二节 绝缘结构设计              | 4   |
| 第三节 高压电气设备的绝缘配合及试验电压的确定 | 5   |
| 第四节 内绝缘和外绝缘及其试验         | 12  |
| 第五节 电气设备对绝缘材料的要求        | 14  |
| 第六节 绝缘材料的老化             | 16  |
| 第二章 电气设备中常用的绝缘材料及电气性能   | 19  |
| 第一节 气体绝缘材料              | 19  |
| 第二节 液体绝缘材料              | 28  |
| 第三节 固体绝缘材料              | 32  |
| 第四节 绝缘用漆、胶及熔敷粉末         | 36  |
| 第三章 电气设备试验的基本方法         | 38  |
| 第一节 绝缘电阻试验              | 38  |
| 第二节 泄漏电流测量              | 44  |
| 第三节 介质损耗测量              | 47  |
| 第四节 耐压试验                | 58  |
| 第五节 直流电阻的测量             | 65  |
| 第六节 接地装置试验              | 72  |
| 第七节 绝缘油的电气性能试验          | 75  |
| 第四章 电气设备绝缘结构            | 80  |
| 第一节 变压器绝缘结构             | 80  |
| 第二节 互感器绝缘结构             | 86  |
| 第三节 断路器绝缘结构             | 91  |
| 第四节 电力电容器绝缘             | 98  |
| 第五节 电力电缆的绝缘             | 102 |
| 第六节 绝缘子及套管              | 106 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第五章 电气设备试验</b> .....     | 109 |
| 第一节 电气设备试验前的相关工作.....       | 109 |
| 第二节 变压器试验.....              | 116 |
| 第三节 电力电缆绝缘试验.....           | 137 |
| 第四节 真空断路器绝缘试验.....          | 138 |
| 第五节 高压开关柜试验.....            | 142 |
| 第六节 互感器绝缘试验.....            | 143 |
| 第七节 避雷器绝缘试验.....            | 150 |
| <b>第六章 智能仪器的原理及设计</b> ..... | 151 |
| 第一节 电子仪器的发展历史.....          | 151 |
| 第二节 智能仪器的特点.....            | 151 |
| 第三节 智能仪器的结构.....            | 152 |
| 第四节 智能仪器的基本设计思想.....        | 153 |
| 第五节 智能仪器的研制过程.....          | 154 |
| 第六节 智能型介损测量仪.....           | 157 |
| 第七节 断路器运动特性测试仪.....         | 158 |
| <b>思考题</b> .....            | 160 |
| <b>练习题</b> .....            | 162 |
| <b>附录 绝缘相关数据表格</b> .....    | 164 |
| <b>参考文献</b> .....           | 180 |

## 第一章 电气设备的绝缘结构及对绝缘材料的要求

电气设备是构成电力系统的主要元件。电气设备的可靠性直接关系电力系统的可靠性及安全性。电力系统对电气设备的各种要求及电气设备相应的各种性能都是由电气设备的结构决定的。电气设备中总有通电的或者带电的部分,同时也有接地或者其他电位的部分,这样,电气设备中必然地存在如何保持电压的问题,即绝缘的问题。而且电气设备中的绝缘结构不仅要承受电压的作用,同时还要有支撑、固定、散热甚至灭弧的功能,具体的功能要根据具体的电气设备来决定。

本章介绍电气设备的主要绝缘结构及绝缘结构应起到的作用,分析了绝缘结构应该耐受的各种电压,并给出了各耐受电压大小的决定因素和大小等。

### 第一节 绝缘结构及其试验

#### 一、绝缘结构对电气设备及电力系统的作用

电力系统中各电气设备的配合尤其是在系统中决定全系统绝缘基准的避雷器的残压大小决定了其他电气设备的绝缘水平。系统对设备的其他性能要求决定了设备的技术条件,技术条件与绝缘水平共同决定设备的绝缘结构。绝缘结构涉及有关电气设备和产品的设计、制造、试验和使用,相应的决定了所用的绝缘材料的性能、工艺要求。反过来,绝缘材料在外界因素作用下的各种表现、老化及其对电场分布和调整的作用又对绝缘结构产生影响,绝缘材料的耐热性能、散热性能甚至形变等方面的性能也决定着绝缘结构的经济性、可靠性及寿命等性能,这种复杂的相互决定、影响、要求的关系如图 1-1 所示。

电气设备一般包括导体、磁路、绝缘、机械结构和其他组成部分,其中绝缘部分常属于最

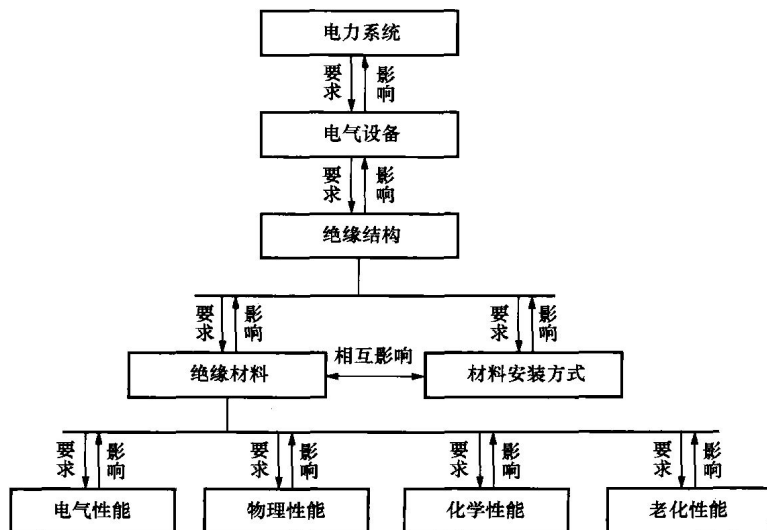


图 1-1 电气设备与材料之间的相互关系

薄弱环节。据统计表明,电力系统的停电事故 50%~80%是由绝缘故障引起的。发电机线圈槽绝缘和匝间绝缘的老化和击穿、变压器线圈匝间绝缘在雷电过电压袭击下的击穿、线路绝缘子在污秽情况下的闪络等,都是电力系统中最常出现停电事故的原因。停电不仅给电力部门带来损失,使电力部门电费收入减少,更重要的是给国民经济各部门如工农业生产、科教文卫、社会服务以及国防等都带来严重的损失。如果从全寿命周期成本来选择设备,那么因设备导致的停电损失也要考虑在设备的成本中,因此设备的故障率越高,设备的成本越高,它在市场中的竞争力就会下降。提高电气绝缘的可靠性是电气设备制造和使用两方面共同的重要任务。

电气设备中的绝缘材料即电介质的根本作用,除了在电容器中储藏能量这一特殊要求外,在其他绝大多数场合中只是防止电流向不希望的方向流动以及对不同电位的导体起机械固定或隔离作用。绝缘问题在电压低的情况下容易解决,但是由于特高压、大容量、高海拔、湿热带和核电站、小型化等电力系统的发展以及高温、高频、航天、激光等新技术领域的开拓,对电气设备提出了多种多样的严格要求,绝缘问题越来越受到重视。

## 二、绝缘结构的定义及决定因素

电气设备中的绝缘部分必须有一定的结构型式,称为绝缘结构或称绝缘系统,它要求正确地选用材料和结构计算设计,进行严格的制造工艺和试验,这样才有可能满足设备在使用中的电气、机械、温度和环境等方面的性能要求。电气设备的技术经济指标和电力系统的安全用电,几乎无一不依赖于绝缘结构的可靠性。

在电力系统中常见的绝缘结构有电力电容器、电力电缆、绝缘子和套管、变压器绝缘、电机绝缘以及电器绝缘等。

绝缘结构设计和绝缘材料的选用必须结合起来考虑,认为绝缘结构的性能只取决于绝缘材料的性能是一种错误的概念。只有充分利用材料的优点,避免或限制它们的缺点,综合平衡地考虑才能达到材料应用的最大效果,才能达到绝缘结构的性能要求以及制造和运行的经济合理。

## 三、绝缘结构试验

绝缘结构制造工艺是保证结构设计性能要求和产品质量的基本条件。只有严格的工艺过程,才能保证产品最终的性能和质量;只有先进的工艺,才能制造出性能优越的产品。例如,现代电力电容器采用聚苯乙烯薄膜介质、聚丙烯薄膜介质代替电容器纸这一重大革新就必须采用相应的超净化卷制工艺和更高真空度干燥、浸渍工艺才能保证质量。

绝缘结构试验无论对于制造部门和使用部门都具有十分重要的意义。它反映电气设备整体的绝缘性能是否良好,因此不同于单纯绝缘材料的性能试验。绝缘结构试验在制造部门是考核产品绝缘质量以及评定是否能进行正常生产的必要措施,可分为型式试验、出厂试验(逐个试验和抽查试验等)以及研究性试验等。型式试验或称产品定型试验,是用以考核产品设计和材料工艺的全面试验。对于新产品或当设计、材料、工艺有重大改变时都要进行型式试验。出厂试验是产品出厂前全部或抽样进行的若干个基本试验,其项目一般只包括型式试验的一部分。型式试验和出厂试验项目以及试验方法通常由产品标准所规定。研究性试验不列入标准,主要是为了研制新产品以及结构设计、材料工艺等有重大改变而进行,有时则是为了研究新的试验方法以补充型式试验的不足。研究性试验项目可根据具体情况而定。

绝缘结构试验在使用部门是电气设备安全运行的重要保证,它包括新的电气设备验收时的交接试验以及电气设备在运行或检修后的预防性试验。另外随着技术的发展,也容许绝缘不停下来然后再试验、查看检修的效果,而是处于运行状态,由监测系统一直监控绝缘的状



况，即在线监测系统。该系统可以自动判定设备准确的检修、运行时间，甚至判定设备的寿命或设备的可靠性，这就是基于设备状态的状态检修。状态检修中也涉及试验，但是它所采用的方法及原理与常规的试验是不同的。在电气设备的整个寿命期间，它所经历的全部各种类型的广义的试验如图 1-2 所示。这些试验所要求的技术指标由使用部门标准所规定。一般应较制造部门所列数值适当降低，这样设备在运行中具有一定的安全裕度。

绝缘结构试验项目很多，一般可分为：破坏性试验，如击穿试验、机械破坏试验等；可能破坏性试验，如耐压试验；非破坏性试验，如绝缘电阻、电容量和  $\tan\delta$  测量、局部放电测试、吸收比测量、泄漏电流试验等，如图 1-3 所示。在试验过程中应先进行非破坏性试验，然后进行其他试验。

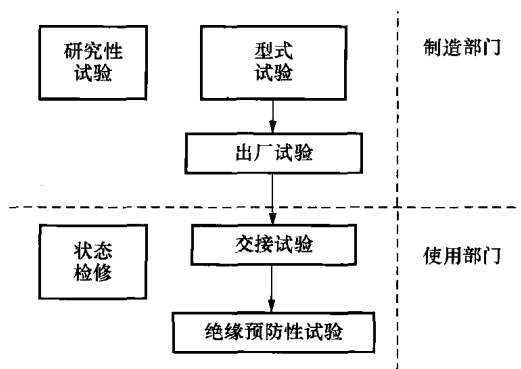


图 1-2 在不同阶段绝缘结构所经受的试验

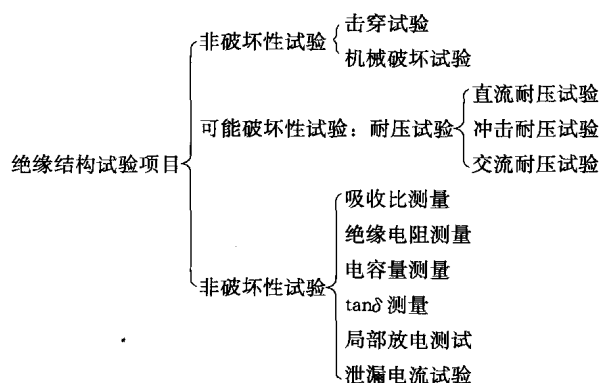


图 1-3 绝缘结构的试验项目分类图

绝缘结构的设计和制造质量，必须通过试验来考验。但是长期运行中绝缘结构的损坏是多种因素的长期联合作用，短时性能的试验并不能完全保证长期运行的足够可靠性。只有在各种不同条件下的长期运行才是最根本的考验。绝缘的故障率与运行时间的关系曲线像浴盆的形状，因此称作浴盆曲线，如图 1-4 所示。因此，充分调查研究绝缘结构在各种条件下的运行经验，对制造部门是十分必要的。

绝缘结构的发展也与计算机技术及软件技术密不可分。由于有了一些大型的软件如 ANSYS，绝缘结构的设计更加方便而高效。

绝缘结构设计原理、绝缘材料性能、绝缘结构制造工艺以及产品绝缘试验，这些因素共同作用决定了绝缘结构的性能。此外，制造者必须对产品使用有一定的了解，使用人员也必须对制造有一定的了解，这样双方才能共同为提高设备的制造质量和运行质量作出贡献，如图 1-5 所示。

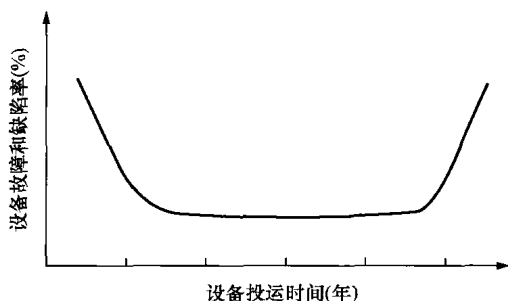


图 1-4 绝缘损坏率与运行时间的关系

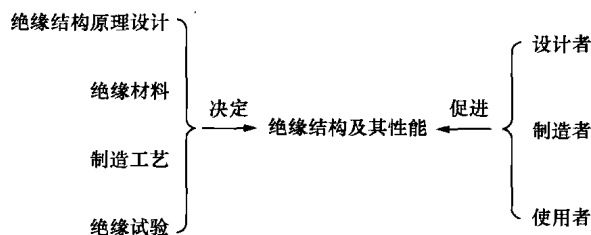


图 1-5 绝缘结构性能的决定因素

## 第二节 绝缘结构设计

### 一、绝缘结构设计的方法

绝缘结构设计的目的和任务是根据产品技术条件或使用要求来确定结构和型式, 选用绝缘材料, 采用合适的绝缘工艺, 从而使产品达到技术上先进和经济上合理。只有通过合理的机构设计、合理的选用材料和制造工艺才能达到最好的效果。例如超高压套管, 在高电压作用下极易发生滑闪放电, 最后发展成沿面放电, 导致套管中的导体对地短路, 这对绝缘本身及电力系统危害都很大。只有经过严格的结构设计和计算, 采用电容式结构以及严格的卷制和真空干燥浸渍工艺, 才能有效地消除套管滑闪放电。再如高压电机绝缘就必须采用防晕结构。

绝缘结构设计必须考虑产品在运行中受到的电、热、机械、环境等作用因素的影响。通常, 高压绝缘结构首先要考虑电压的作用。在实际中所有作用因素都应予以考虑, 过分强调某一因素而忽视其他因素就可能导致设计上的过大偏差。例如高压大型电机定子线圈绝缘老化主要是因为局部放电而引起的电老化, 但是电老化可以因机械振动以及机械和温度的联合作用而加剧; 低压中小型电机线圈绝缘老化主要是由于温度而引起的热老化, 但是热老化可以因机械振动和环境的侵蚀作用加剧。虽然绝缘破坏的最终形式是在电压作用下的击穿, 即使低压绝缘结构也是如此, 但其实际原因常是电、热、机械、环境等多因素联合作用导致了绝缘老化和最后的击穿。由此可见, 绝缘结构的老化性能要比单纯材料的老化性能复杂得多。

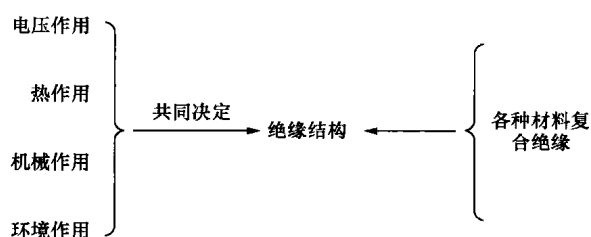


图 1-6 绝缘结构所受作用及绝缘结构特性的影响因素

因此, 在实际设计中, 往往采用复合的绝缘材料, 例如电力电容器、电缆和变压器中所采用的油纸绝缘, 高压电机绝缘所采用的云母带和低压电机槽绝缘所采用的聚酯薄膜纤维纸复合绝缘材料等。采用复合材料, 可以使各组分取长补短, 以发挥绝缘的最大效果, 如图 1-6 所示。

### 二、设计绝缘结构时应考虑的因素

#### 1. 寿命和可靠性的因素

绝缘结构设计要求产品性能可靠且具有一定的寿命。可靠性和寿命长是两种既有联系又不相同的要求。例如, 航空用电机、电器的工作寿命不长, 但在工作期限内可靠性要求很高; 普通工业用电机、电器、寿命要求达 20 年, 在运行中如有损坏可以随时修理而不致影响全局, 因此对可靠性的要求相对就低一些。为使绝缘结构在运行中不因电、热、机械、环境等因素作用而过早地劣化, 除采用优质材料外, 还必须采用结构上的某些措施。例如高压电机定子线圈的半导体防晕层结构以及电容套管的电容极板结构, 其作用都是为了改善电场分布来减少电场对绝缘材料的应力; 电机线圈和变压器线圈的固定是为了减少电动力和机械振动对绝缘材料的应力; 电机、电器的通风散热结构是为了降低绝缘材料的工作温度; 电气设备的密封结构或防护措施是为了减少环境因素对绝缘材料的侵蚀等。对于那些发生故障后要进行维修的设备和产品, 在设计中还要考虑到维修的方便。

#### 2. 运行中各种因素的影响

绝缘结构设计人员必须充分了解绝缘结构在运行中受到的各种因素作用的影响。电气设

备在运行中发生故障的原因主要为绝缘破坏。低压电机高达 70%~80% 的事故是在运行中出现的。绝缘破坏的标志一般是击穿，这是电、机、热、环境等因素以及它们的联合作用的表现。一般在高压设备中，电的因素是主要的；在低压设备中，热的因素是主要的。但是，在很多情况下，机械和环境因素也可以上升为主要因素。因此在绝缘结构设计中必须全面考虑各种因素的影响。导致绝缘破坏的主要原因有下列几方面：

- (1) 电力设备的外部过电压或内部过电压。
- (2) 长期工作电压下局部放电和电老化，绝缘的电晕腐蚀和树枝状劣化等。
- (3) 长期工作电压下的热击穿。
- (4) 长期负荷下的热老化，这是低压电机、电器绝缘中最常见的一种形式。
- (5) 机械负荷或电磁力的作用，离心力、振动和冲击力作用所导致的绝缘机械损伤或松散裂开。
- (6) 绝缘与其他材料间热胀冷缩不同而造成绝缘蠕动或开裂。
- (7) 绝缘在长期工作电压下的电化学作用，例如在直流和低频电压下的电解作用。
- (8) 绝缘在环境因素作用下的变化，如大气条件及气压的作用，化学物如臭氧、氟、氯、氧化氮、氧化硫、硫化氢、酸、碱和溶剂的侵蚀，生物如霉菌、微生物、昆虫、鼠和鸟的侵袭，太阳的辐射作用等。
- (9) 绝缘受到导电性污染、工业污秽、化学物、海水或盐雾的作用，可造成表面爬电、漏电起痕、污秽闪络以及绝缘内部水树枝或化学树枝状劣化。
- (10) 其他原因还很多，内因如制造上存在着未检查出的缺陷、材料原始性能不良、装配中的机械损伤、固定不牢等，外因如不正常运行、外力破坏如撞击、地震等。

### 三、绝缘材料的等级

一般工业用低压电机的统计寿命约 15 年，根据这一使用寿命，多年来电机绝缘结构耐热性能分类为 A、E、B、F、H 五级，极限温度分别为 105、120、130、155、180℃，如表 1-1 所示。虽然，热因素是使低压电机绝缘老化的一个主要因素，但并不是唯一的因素。在不同的使用条件下，单纯以一个热因素来分类并不能满足各类电机绝缘的实际要求。

表 1-1 绝缘材料耐热等级及其编号

| 项 目 \ 名 称 | Y  | A   | E   | B   | F   | H   | C    |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 对应温度 (℃)  | 90 | 105 | 120 | 130 | 155 | 180 | >180 |
| 编号        | 1  | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7    |

## 第三节 高压电气设备的绝缘配合及试验电压的确定

### 一、高压绝缘结构在运行中所受到的电压作用

#### 1. 绝缘配合的概念

绝缘配合是综合考虑电力系统中可能出现的各种过电压、保护装置特性及设备的绝缘特性，确定设备的绝缘水平及其使用，从而使设备绝缘故障率或停电事故率降到经济上和运行

上可以接受的水平。简言之，是要求设备耐受电压的能力和系统中可能出现的过电压之间有合理的配合关系。

## 2. 高压电气设备在运行中所受到的电压

高压电气设备绝缘结构设计首先考虑的是电气性能。在电力系统中，主要电气设备有发电机、变压器、母线、电缆、断路器、隔离开关、避雷器、互感器、电抗器、电力电容器、熔断器、线路绝缘子等。高压电力设备的绝缘结构在其整个运行过程中要受到不同电压的作用，可以有下列四种电压的作用：

(1) 工作电压。绝缘结构在其整个运行过程中必须能够长期连续地承受该设备的最高系统工作电压，一般即为系统最高工作相电压。绝缘的老化过程基本上由此电压而引起，一般要求电力系统中的绝缘结构能安全工作 20 年以上。

(2) 暂时过电压。其发生的原因如系统一相故障接地、长线末端甩负荷、空载长线末端电压升高、参数谐振、铁磁谐振等，在现代快速继电保护情况下，其过电压值一般不超过最高工作相电压的 2 倍，作用时间约为  $0.1 \sim 1\text{s}$ ，波形为工频或接近工频。长距离传输线常采用并联电抗器以降低空载时末端电压的升高。整个系统的过电压情况如图 1-7 所示。

(3) 操作过电压。常发生于系统操作或者发生故障时，在断路器动作过程中改变了系统的本身接线结构或者使系统中的电感、电容上的电压、电流发生变化而使系统在振荡过程中出现过电压，在接入或者切除空载长线或者电容器时，这种接入或切断电容性负荷的情况下容易出现过电压，切断感性负荷如空载变压器或电抗器等也容易出现过电压。操作过电压的波形很不规则，随情况不同而异。可以是衰减振荡波或非周期性冲击波，作用时间约在  $100\text{ms}$  数量级，一般在几毫秒内电压达到最大值。现代超高压断路器均采用一定措施来限制操作过电压，如快速切断或采用合闸电阻或分闸电阻以吸引线路或设备中的残留能量，防止开关重燃等方法。

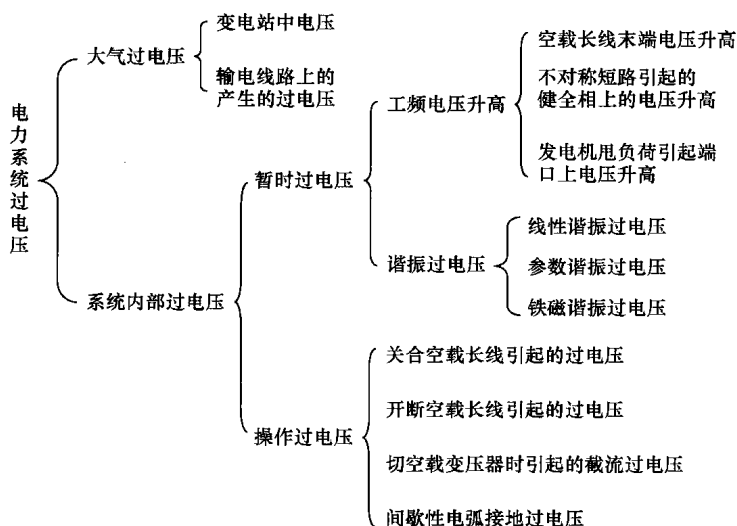


图 1-7 电力系统各种过电压

现代电力系统中操作过电压常以最高工作相电压幅值的倍数来表示：

35kV 系统约 4 倍；110~220kV 系统约 2.7~3 倍；330kV 系统约 2.5~2.7 倍；500kV 系统约 2~2.5 倍；750kV 系统约为 1.9~2.2 倍；1000kV 以上系统约为 1.6 倍。

在现代超高压电力系统中,操作过电压最大倍数常发生于接入带有电荷的空载长线时因电压叠加而产生的过电压。

暂时过电压和操作过电压均来源于电力系统内部,统称内部过电压,前者持续时间较长,而后者较短。内部过电压幅值与系统最高相电压幅值之比称为内部过电压的倍数,或称“标么值”(p. u.),常以  $K$  表示。

(4) 雷电过电压(大气过电压或外部过电压)。云层在大气流的作用下可以形成带大量电荷的雷云,其中 70%~90% 带负电荷。附近地面由于静电感应而带有异号电荷。雷云的带电量约为  $10\sim 270\text{C}$ , 电位达  $10^8\sim 10^9\text{V}$ 。雷云对地或云间放电就发生雷闪,雷电流可以从几十到几百千安,放电能量平均约  $10^8\sim 10^{10}\text{J}$ 。雷电波属于非周期性冲击波,其波前时间多数为  $1.5\sim 2\mu\text{s}$ , 平均半峰值时间为  $30\mu\text{s}$ , 大于  $50\mu\text{s}$  者很少,电流陡度大于  $7.5\text{kA}/\mu\text{s}$  者约占一半。标准雷电波为  $1.2/50\mu\text{s}$ 。

对于电气设备的雷电过电压,有雷闪直接击中的直击雷过电压和非直接击中的感应雷过电压两种。当天空有雷云时,地面的电气设备上和输电线上就带有异号的感应电荷。当雷云对地或云间放电时,此感应电荷被释放时即形成感应电压冲击波即感应雷。这种过电压多半为正极性,幅值一般较直击雷为小,可能达几百千伏,波前时间约  $10\mu\text{s}$ ,对电压等级较高(尤其是大于  $35\text{kV}$ )的线路或设备危险性较小。对于雷电过电压,电力系统一般采用避雷针和架空地线即避雷线来防止雷直击电气设备。

当输电线或电气设备上的雷电过电压在幅值附近突然放电时(例如绝缘子闪络或保护间隙击穿),电压波形从幅值附近迅速降至零值附近,即形成冲击截波。截波过电压的波形尾部陡度很大,对电气设备如电机、变压器绕组的匝间绝缘危害特别大。

高压电气绝缘结构在运行中必须耐受上述工频工作电压、暂时过电压、操作过电压和大气过电压这四种电压的作用,一般对于  $110\text{kV}$  以下的电力系统,绝缘结构的绝缘水平主要取决于对雷电过电压的耐受能力;对  $110\text{kV}$  及以上的电力系统,操作过电压起主要作用。

## 二、高压电气设备的试验电压

为了考验绝缘结构是否能够耐受上述四种电压的作用,形成了各种耐压试验。工频耐压试验和冲击耐压试验已应用多年。表 1-2、表 1-3 分别列出了我国国家标准所规定的电气设备各试验电压数值。高压电气设备的雷电冲击耐压试验电压数值称为基准冲击水平(Basic Impulse Level, BIL),操作冲击耐压试验电压数值称为操作冲击水平(Switching Impulse Level, SIL)。雷电冲击波和操作波试验电压值均以  $U_{50\%}$  临界电压值表示。

1min 工频耐压试验是现行标准中  $220\text{kV}$  以下电压等级保证电气设备绝缘水平的一项基本试验。例如对于变压器,出厂耐压试验通常只做 1min 工频耐压试验即可得一定程度的保证。目前国际上认为现行 1min 工频耐压值对  $330\text{kV}$  以上超高压设备偏高,应该进行操作波耐压试验。

冲击波试验电压为非周期性冲击波,用于模拟雷电过电压。图 1-8 和图 1-9 所示为 GB/T 16927.1—1997《高电压试验技术 第一部分:一般试验要求》和国际电工委员会(IEC)所规定的  $1.2/50\mu\text{s}$  标准雷电冲击全波和标准雷电截波两种电压波形。代表全波的第一数字称为波前时间,  $T_1$  为电压上升到峰值  $U_m$  的时间;后一数字称为半峰值时间,  $T_2$  为电压下降到 50% 最大值的时间,均以  $\mu\text{s}$  计,其容许偏差分别为  $\pm 30\%$  和  $\pm 20\%$ 。电压峰值  $U_m$  的容许偏差为  $\pm 3\%$ 。



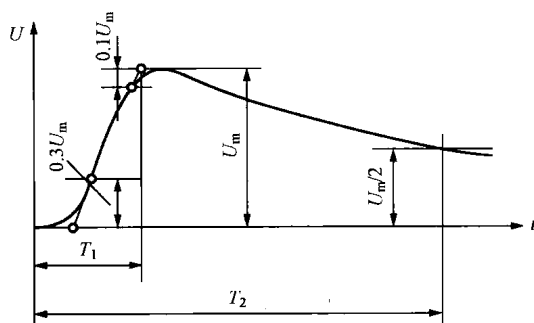


图 1-8 标准冲击全波的波形图

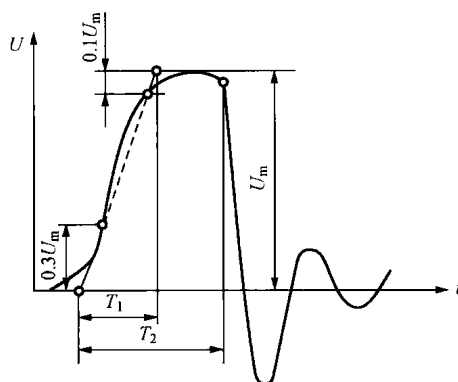


图 1-9 标准冲击截波波形

操作波试验电压用以模拟操作过电压，一般也采用非周期性冲击波，波的形状如图 1-8 所示，但时间长得多。标准操作冲击波为  $250/2500\mu\text{s}$ ，容许偏差同上。

表 1-2 所列为 3~500kV 输变电设备的基准冲击水平。表 1-3 给出了 3~500kV 输变电设备的雷电冲击耐受电压。

表 1-2 3~500kV 输变电设备的基准冲击水平

| 额定电压<br>(kV <sub>eff</sub> ) | 最高工作电压<br>(kV <sub>eff</sub> ) | 额定操作耐受电压              |               | 额定雷电冲击耐受电压<br>(kV <sub>peak</sub> ) |           | 额定短时工频耐受电压<br>(kV <sub>eff</sub> ) |       |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|---------------|-------------------------------------|-----------|------------------------------------|-------|
|                              |                                | (kV <sub>peak</sub> ) | 相对地过电压<br>标么值 |                                     |           | I                                  | II    |
|                              |                                |                       |               | (1)                                 | (2)       |                                    |       |
| 3                            | 3.5                            | —                     | —             | 20                                  | 40        | 10                                 | 18    |
| 6                            | 6.9                            | —                     | —             | 40                                  | 60        | 20                                 | 23    |
| 10                           | 11.5                           | —                     | —             | 60                                  | 75        | 28                                 | 30    |
| 15                           | 17.5                           | —                     | —             | 75                                  | 105       | 38                                 | 40    |
| 20                           | 23.0                           | —                     | —             | —                                   | 125       | —                                  | 50    |
| 35                           | 40.5                           | —                     | —             | —                                   | 185/200 * | —                                  | 80    |
| 63                           | 69.0                           | —                     | —             | —                                   | 325       | —                                  | 140   |
| 110                          | 126.0                          | —                     | —             | —                                   | 450/480 * | —                                  | 185   |
| 220                          | 252.0                          | —                     | —             | —                                   | 850       | —                                  | 360   |
|                              |                                | —                     | —             | —                                   | 950       | —                                  | 395   |
| 330                          | 363.0                          | 850                   | 2.85          | —                                   | 1050      | —                                  | (460) |
|                              |                                | 950                   | 3.19          | —                                   | 1175      | —                                  | (510) |
| 500                          | 550.3                          | 1050/1175 **          | 2.34          | —                                   | 1425      | —                                  | (630) |
|                              |                                | 1175/1240 **          | 2.62          | —                                   | 1550      | —                                  | (680) |

注 1. 用于 15kV 和 20kV 电压等级的发电机回路的设备，其额定短时工频耐受电压一般提高 1~2 级。

2. 对于额定短时工频耐受电压，干试和湿试选用同一数值，括号内数值为 330~500kV 设备额定短时工频耐受电压，供参考。

\* 仅用于变压器类设备的内绝缘。

\*\* 仅用于母线支柱绝缘子。

表 1-3 3~500kV 输变电设备的雷电冲击耐受电压

| 额定电压<br>(kV <sub>eff</sub> ) | 最高工作电压<br>(kV <sub>eff</sub> ) | 标准雷电冲击全波电压 (内、外绝缘, kV <sub>peak</sub> ) |          |             |            |      |              | 标准雷电冲击截波电压<br>(kV <sub>peak</sub> ) |
|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|----------|-------------|------------|------|--------------|-------------------------------------|
|                              |                                | 变压器                                     | 并联电抗器    | 耦合电容器、电压互感器 | 高压电力电缆     | 高压电器 | 母线支柱绝缘子、穿墙套管 | 变压器类设备的内绝缘                          |
| (1)                          | (2)                            | (3)                                     | (4)      | (5)         | (6)        | (7)  | (8)          | (9)                                 |
| 3                            | 3.5                            | 40                                      | 40       | 40          | —          | 40   | 40           | 45                                  |
| 6                            | 6.9                            | 60                                      | 60       | 60          | —          | 60   | 60           | 65                                  |
| 10                           | 11.5                           | 75                                      | 75       | 75          | —          | 75   | 75           | 85                                  |
| 15                           | 17.5                           | 105                                     | 105      | 105         | 105        | 105  | 105          | 115                                 |
| 20                           | 23.0                           | 125                                     | 125      | 125         | 125        | 125  | 125          | 140                                 |
| 35                           | 40.5                           | 185/200*                                | 185/200* | 185/200*    | 200        | 185  | 185          | 220                                 |
| 63                           | 69.0                           | 325                                     | 325      | 325         | 325        | 325  | 325          | 360                                 |
| 110                          | 126.0                          | 450/480*                                | 450/480* | 450/480*    | 450<br>550 | 450  | 450          | 530                                 |
| 220                          | 252.0                          | 850                                     |          | 850         | 850        | 850  | 850          | 935                                 |
|                              |                                | 950                                     | 950      | 950         | 950        | 950  | 950          | 1050                                |
| 330                          | 363.0                          | 1050                                    |          | 1175        | 1050       | 1050 | 1050         | 1175                                |
|                              |                                | 1175                                    | 1175     | 1300        | 1175       | 1175 | 1175         | 1300                                |
| 500                          | 550.0                          | 1425                                    | 1550     | 1550        | 1425       | 1425 | 1425         | 1550                                |
|                              |                                |                                         | 1610     |             | 1550       | 1550 | 1550         |                                     |
|                              |                                | 1550                                    | 1675     | 1675        | 1675       | 1675 | 1675         | 1675                                |

注 1. 对高压电缆,是指在热状态下的耐受电压值。其雷电冲击耐受电压值不超过相应电压等级中所列最高值,如需要更高的绝缘水平,可用更高电压等级的电缆。

2. 对应于 220kV 变压器耐受电压为 950kV 的高压电器的冲击耐压值,对老型号产品可取 850kV,当对标准颁发后的产品,必须取 950kV。

\* 仅用于变压器类设备的内绝缘。

三、绝缘配合和试验电压的确定

我国目前对于 220kV 及以下电压等级电气设备的试验电压主要包括冲击试验电压和工频试验电压两项。330kV 及以上电压等级则增加操作波试验电压,但工频耐压试验仍暂予保留。冲击试验电压保证耐受雷电过电压的绝缘水平,操作试验电压保证耐受操作过电压的绝缘水平,而工频试验电压则对于耐受工频电压和操作过电压均有一定保证作用,如图 1-10 所示。绝缘配合在于合理地确定电力系统

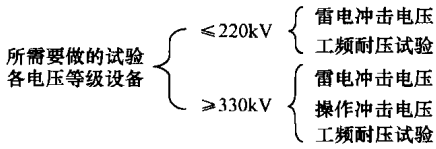


图 1-10 各电压等级电气设备所需要做的试验

中各种电气设备的这些试验电压。

1. 工频试验电压的确定

工频试验电压的确定对于未列操作波试验的电气设备必须同时兼顾三个方面的绝缘水平：长期工频工作电压、工频暂时过电压和操作过电压。

对于长期工频工作电压，研究表明，电力变压器用油浸纸绝缘结构的 1min 工频电压耐受强度与长期连续工频电压耐受强度之比约为 1.75，因此，1min 工频试验电压  $U_P \geq 1.75U_{pn}$  ( $U_{pn}$  为最高工作相电压)。由于绝缘在长期运行中的劣化或破坏与多种因素有关，和短时耐压的击穿机理并不相同，因此不能认为 1min 耐压试验可以完全确保使用寿命，而只是在一定程度内对绝缘水平作出评价。

对于工频暂时过电压，设可能出现最大为 2 倍最高工作相电压，因作用时间较短，与 1min 耐压相比，其修正系数约为 1.2，则  $U_P \geq 2U_{pn}/1.2 = 1.67U_{pn}$ 。

对于操作过电压，不少研究者认为油浸纸绝缘结构的耐受强度约为 1.3 倍的 1min 工频耐压，当然此一冲击系数只适用于绝缘层的击穿关系而不适用于局部放电、爬电和绕组振荡等情况。此时， $U_P \geq KU_{pn}/1.3$ ，其中  $K$  为操作过电压的倍数。1min 工频耐压试验电压应为以上三者中的最高值。例如 330kV 油浸纸绝缘电力变压器，设系统中最大操作过电压的倍数  $K=2.7$ ，则按上面三种计算，分别为  $U_P \geq 1.75 \times 363/\sqrt{3} = 366\text{kV}$ ， $U_P \geq 1.67 \times 363/\sqrt{3} = 350\text{kV}$ ， $U_P \geq 2.7 \times 363/\sqrt{3}/1.3 = 435\text{kV}$ 。考虑到其他安全系数后，目前我国暂定值如表 1-2 所列为 510kV。工频 1min 耐压试验电压的大小确定关系如图 1-11 所示。

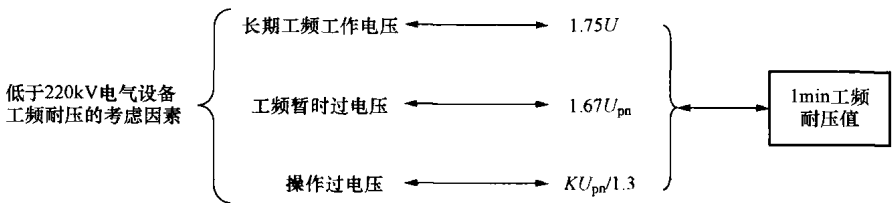


图 1-11 低于 220kV 的电气设备工频电压的确定因素

表 1-4 给出了电力变压器中性点绝缘水平。

表 1-4 电力变压器中性点绝缘水平

| 额定电压                 | 最高工作电压               | 中性点接地方式 | 标准雷电冲击全波和截波电压<br>(kV <sub>peak</sub> ) | 1min 工频耐受电压 (内、外绝缘、干试和湿试)<br>(kV <sub>peak</sub> ) |
|----------------------|----------------------|---------|----------------------------------------|----------------------------------------------------|
| (kV <sub>eff</sub> ) | (kV <sub>eff</sub> ) |         |                                        |                                                    |
| 110                  | 126                  | —       | 250                                    | 95                                                 |
| 220                  | 252                  | 死接地     | 185                                    | 85                                                 |
|                      |                      | 不死接地    | 400                                    | 200                                                |
| 330                  | 363                  | 死接地     | 180                                    | 85                                                 |
|                      |                      | 不死接地    | 550                                    | 230                                                |
| 500                  | 550                  | 死接地     | 180                                    | 85                                                 |
|                      |                      | 不死接地    | 325                                    | 140                                                |

注 特殊中性点的绝缘水平，由用户和制造厂协商确定。

## 2. 冲击试验电压和操作试验电压的确定

(1) 避雷器的特性。全波冲击试验电压的确定以避雷器的保护水平为基础, 再加以一定的安全裕度。常用的阀型避雷器由火花间隙和碳化硅 SiC 阀片串联组成。避雷器的放电电压取决于火花间隙的距离和形状, 而灭弧则决定于阀片的非线性电阻特性和火花间隙的灭弧作用, 内部要产生电弧的任何一种避雷器的功能都必须限制过电压与熄灭电弧同时具备。阀片在雷电过电压下电阻很小而在工作电压下电阻很大。图 1-12 所示为雷电波袭击避雷器时的电压与时间关系。雷电波属于非周期性冲击波, 当雷电波上升到避雷器冲击放电电压  $U_i$  时, 避雷器的火花间隙击穿, 雷电流通过阀片, 避雷器上的电压下降, 然后随着雷电流的增大而增大。雷电流通过避雷器的间隙和阀片在避雷器的两端产生的电压降称为残压  $U_r$ 。避雷器与电气设备在系统中并联安装运行, 因此冲击放电电压过高或残压过高都对被保护设备不利。一般阀型避雷器的残压大于冲击放电电压。残压的测定, 对于 220kV 及以上的避雷器, 常在幅值为 5kA 的冲击电流下测定; 对于 330kV 及以上的避雷器, 常在 10kA 或更大的冲击电流下测定。目前常用的氧化锌 (ZnO) 避雷器, 非线性电阻特性十分优越, 在工作电压作用下电阻很大, 漏电流很小, 因此可以不用火花间隙串联, 从而无冲击放电电压  $U_i$  值。另外由于在雷电流下电阻很小, 残压值  $U_r$  比较低。这种避雷器对电气设备具有很好的保护特性, 性能稳定。

(2) 冲击试验电压的计算。对电力变压器而言, 常取全波冲击试验电压  $U_{1.2/50} = (1.2 \sim 1.4) U_0$ , 其中  $U_0$  为避雷器的冲击保护水平, 取冲击放电电压  $U_i$  和冲击残压  $U_r$  中之较高者 (一般为残压  $U_r$ )。系统电压等级高时系数取低者。我国变压器研究部门认为 500~750kV 级变压器可取  $U_{1.2/50} = 1.25U_r$ , 其中 1.25 为考虑各种因素后的综合系数。

因截波冲击试验电压的波形在截断处陡度很大, 在电机、变压器绕组中可能引起电压不均匀分布和振荡, 对于绕组的匝间绝缘和沿绝缘表面的放电是一个严峻的考验, 一般可取  $U_{2\mu s} = (1.0 \sim 1.3) U_{1.2/50}$ 。对于 500kV 以上系统, 可取系数为 1.0。

虽然绝缘结构在冲击过电压、操作过电压和工频电压作用下因电压分布不同和作用时间不同, 绝缘破坏的机理不同, 击穿电压值与作用时间并无直接的依赖关系, 但是, 人们为了比较电压, 根据多年的经验制定出了一些相互换算的系数。国际电工委员会推荐下列系数

$$U_{\text{冲试}}(\text{kV}_{\text{max}})/U_{\text{工试}}(\text{kV}_{\text{eff}}) = 2.3 \quad (1-1)$$

$$U_{\text{操试}}(\text{kV}_{\text{max}})/U_{\text{冲试}}(\text{kV}_{\text{max}}) = 0.83 \quad (1-2)$$

由此可得比值  $U_{\text{冲试}}(\text{kV}_{\text{max}})/U_{\text{工试}}(\text{kV}_{\text{max}}) \approx 1.62$ , 比值  $U_{\text{操试}}(\text{kV}_{\text{max}})/U_{\text{工试}}(\text{kV}_{\text{max}}) \approx 1.35$ 。通常把 1.62 和 1.35 分别称为全波冲击波试验电压和操作试验电压的冲击系数。以上这些系数在确定各项试验电压时可以参考, 目前我国和世界各国试验电压的标准均大致符合这些数值。

我国变压器研究部门曾提出 750kV 变压器的试验电压计算如下

$$U_r = 1565\text{kV}, U_{1.2/50} = 1.25 U_r = 1.25 \times 1565 = 1960\text{kV}, U_{1.2/50}(\text{kV}_{\text{peak}}) = 2100\text{kV}$$

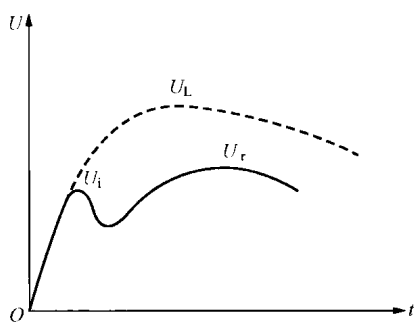


图 1-12 在雷电波作用下阀型避雷器动作时的过电压与时间的关系

$U_L$ —外施雷电波;  $U_i$ —避雷器冲击放电电压;  
 $U_r$ —避雷器残压