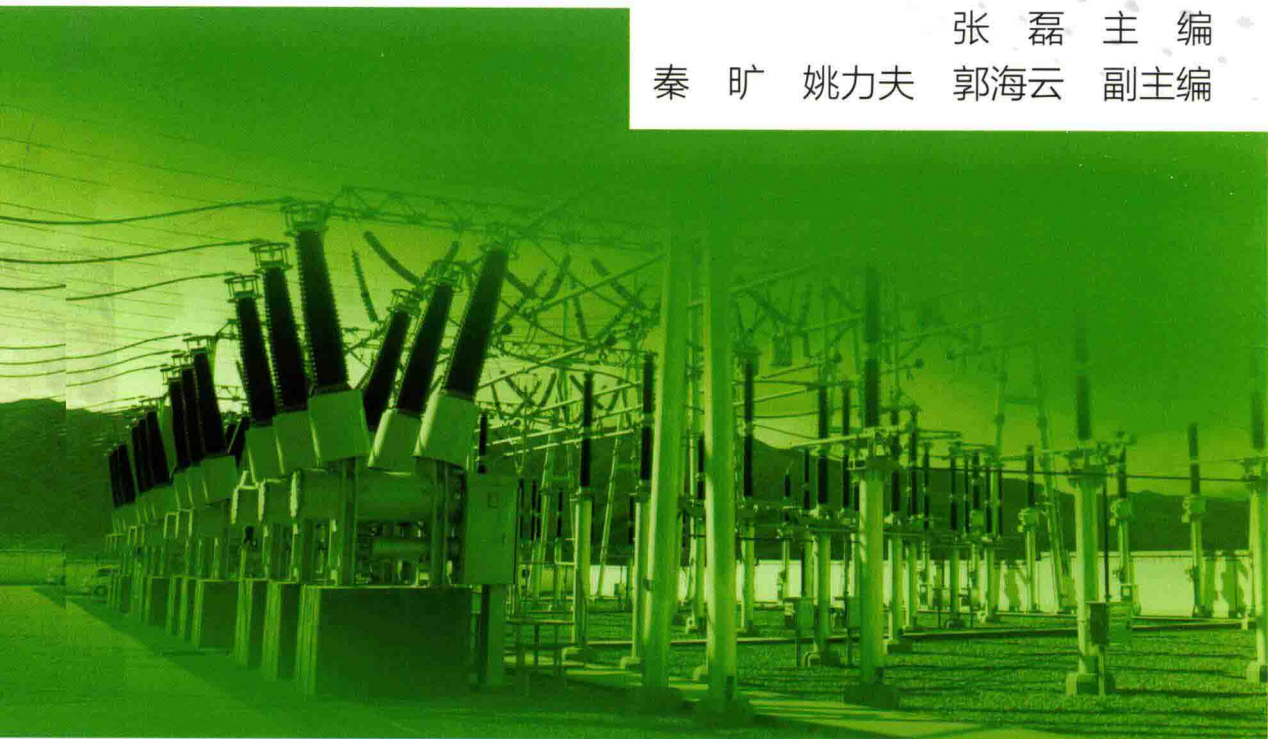




DIANQI SHEBEI  
YUFANGXING SHIYAN JISHU WENDA

# 电气设备 预防性试验技术 问答

张磊 主编  
秦旷 姚力夫 郭海云 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANQI SHEBEI  
YUFANGXING SHIYAN JISHU WENDA

# 电气设备 预防性试验技术 问答

张 磊 主 编  
秦 旷 姚力夫 郭海云 副主编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书共分十二章，主要内容包括电气设备绝缘和试验基础知识，电力变压器试验，断路器试验，电力电缆试验，电力电容器试验，电力互感器试验，避雷器试验，接地装置试验，套管、绝缘子试验，GIS 常规电气试验、油中溶解气体分析和红外热成像检测试验等。

本书可供电气试验专业人员作为工具书使用，也可供检修运行相关专业的技术人员参考使用。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电气设备预防性试验技术问答/张磊主编. —北京: 中国电力出版社, 2017.7

ISBN 978-7-5198-0850-1

I. ①电… II. ①张… III. ①电气设备—试验—问题解答 IV. ①TM64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 143609 号

---

出版发行: 中国电力出版社

地 址: 北京市东城区北京站西街 19 号 (邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑: 莫冰莹 (010-63412526) 盛兆亮

责任校对: 李 楠

装帧设计: 王英磊 赵姗姗

责任印制: 蔺义舟

---

印 刷: 北京九天众诚印刷有限公司

版 次: 2017 年 7 月第一版

印 次: 2017 年 7 月北京第一次印刷

开 本: 787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张: 17.5

字 数: 428 千字

印 数: 0001—2000 册

定 价: 69.00 元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题, 我社发行部负责退换

# 前 言

随着社会经济的进步，我国电力生产发展迅速。针对目前电力生产中新设备、新技术应用较快，一线工作人员更新较快，同时电气绝缘基础理论较难理解等实际的问题，国网河南省电力公司技能培训中心组织编写了本书。希望读者从书中学到经验与技巧，学到指导实际工作的方式方法，学到针对现场出现问题的理论分析，达到举一反三的效果，为今后的工作起到指引作用。本书在编写过程中以 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》、GB 50150—2016《电气装置安装工程 电气设备交接试验标准》、DL/T 393—2013《输变电设备状态检修试验规程》等为依据，密切结合生产实践，尽量做到严谨准确，能为一线工作人员提供帮助。

本书以实例形式讲解复杂的理论知识、技术要求、工艺标准，有针对性、深入浅出。同时，本书在编写过程中邀请一线工作的技术专家参与，尽量介绍现场使用、有效果的新技术，如红外热成像检测诊断技术、油中气体色谱分析技术等。按照实用够用的原则，满足一线技术人员的使用需求。

本书共分十二章，主要内容包括电气设备绝缘和试验基础知识，以及电力变压器、高压断路器、电力电缆、电力电容器、电力互感器、避雷器、接地装置、绝缘子、套管试验等。本书可供电气试验专业人员作为工具书使用，也可供检修运行相关专业的技术人员参考使用。

本书由国网河南省电力公司技能培训中心组织编写，国网河南省电力公司技能培训中心张磊任主编，国网郑州供电公司秦旷、姚力夫、国网河南省电力公司技能培训中心郭海云任副主编。第一、二、四、十二章由张磊编写，第三章由国网河南省电力公司技能培训中心赵秀娜编写，第五章由国网河南省电力公司技能培训中心岳婷编写，第六章由国网河南省电力公司技能培训中心徐幻南编写，第七章由国网河南省电力公司检修公司赵胜男编写，第八章由国网河南省电力公司技能培训中心罗东君编写，第九章由国网河南省电力公司技能培训中心王海霞编写，第十章由国网河南省电力公司检修公司王敏编写，第十一章由国网河南省电力公司技能培训中心马晓娟编写。另外，国网郑州供电公司姜伟、国网厦门供电公司熊军、国网河南省电力公司电力科学研究院郑含博、王栋、蒲兵舰、邵颖彪、王伟、国网新乡供电公司王新宇、国网河南省电力公司技能培训中心陈邓伟、符贵、彭理燕、孟昊、国网河南省电力公司检修公司鲁永、牛田野等参与了本书的编辑整理和视频拍摄。本书第一、二、六、八、九章由陈邓伟审稿，第三、四、五、七、十、十一、十二章由符贵审稿。本书由张磊负责统稿和定稿。

限于编写人员水平，书中难免有疏漏或不当之处，恳请广大读者批评指正。

编 者

2017年2月

# 目 录

## 前言

<b>第一章 电气设备绝缘和试验基础知识</b> .....	1
第一节 电介质基础知识.....	1
第二节 气体电介质放电基础知识.....	3
第三节 大气条件对气体电介质放电的影响.....	5
第四节 电场分布状况对气体电介质放电的影响.....	7
第五节 沿面放电.....	10
第六节 液体、固体电介质的放电.....	12
第七节 高压电气设备绝缘基础知识.....	14
第八节 过电压基础知识.....	17
第九节 电气设备绝缘试验的基础知识.....	20
第十节 绝缘电阻和吸收比试验基础知识.....	28
第十一节 常规介质损耗因数试验基础知识.....	33
第十二节 常规泄漏电流试验的基础知识.....	42
第十三节 交流耐压试验基础知识.....	45
<b>第二章 电力变压器试验</b> .....	49
第一节 电力变压器基础知识.....	49
第二节 电力变压器试验基础知识.....	52
第三节 变压器绝缘电阻、吸收比（极化指数）试验.....	55
第四节 变压器直流电阻测试.....	59
第五节 变压器介质损耗因数的测试.....	63
第六节 变压器的变比、极性及联结组别试验.....	66
第七节 变压器的外施工频耐压试验.....	68
第八节 变压器的串联谐振耐压试验.....	72
第九节 变压器感应耐压试验.....	73
第十节 变压器局部放电试验.....	81
第十一节 变压器空载试验.....	85
第十二节 变压器短路试验.....	92
第十三节 变压器绕组变形试验.....	95
第十四节 其他常见电力变压器试验知识.....	100
第十五节 电力变压器常见故障及典型案例.....	102

<b>第三章 断路器试验</b> .....	107
第一节 断路器基本知识.....	107
第二节 断路器电气试验基本知识.....	110
第三节 隔离开关基本知识.....	114
第四节 SF <sub>6</sub> 断路器回路电阻试验.....	116
第五节 SF <sub>6</sub> 断路器交流耐压试验.....	119
第六节 SF <sub>6</sub> 断路器机械特性测试.....	121
第七节 SF <sub>6</sub> 断路器低电压动作特性试验.....	124
第八节 真空断路器试验.....	125
<b>第四章 电力电缆试验</b> .....	130
第一节 电缆线路绝缘电阻测试和核对相位.....	130
第二节 电力电缆直流耐压和泄漏电流测试.....	134
第三节 橡塑绝缘电力电缆变频谐振耐压试验.....	141
第四节 电力电缆线路参数测试.....	144
第五节 国内外新的电缆试验方法简介.....	149
<b>第五章 电力电容器试验</b> .....	151
第一节 电力电容器基础知识.....	151
第二节 电容器绝缘电阻测试.....	153
第三节 电容器介质损耗因数的测试.....	156
第四节 电容器交流耐压试验.....	158
第五节 电容器极间电容量测试.....	159
<b>第六章 电力互感器试验</b> .....	162
第一节 互感器基础知识.....	162
第二节 电流互感器绝缘电阻试验.....	166
第三节 电流互感器介质损耗因数的测试.....	168
第四节 电压互感器绝缘电阻试验.....	176
第五节 电压互感器的介质损耗因数测试.....	177
第六节 互感器交流耐压试验与局部放电测试试验.....	186
第七节 各种互感器试验的综合分析判断.....	190
<b>第七章 避雷器试验</b> .....	194
第一节 避雷器基础知识.....	194
第二节 避雷器绝缘电阻测试.....	196
第三节 带间隙的氧化锌避雷器工频放电电压测试.....	198
第四节 避雷器放电计数器试验.....	199
第五节 氧化锌避雷器 $U_{1mA}$ 及 $0.75U_{1mA}$ 下, 泄漏电流的测试.....	200
第六节 无间隙金属氧化物避雷器 (MOA) 运行电压下, 交流泄漏电流的测试.....	203
第七节 避雷器工频参考电流下的工频参考电压测试.....	205
<b>第八章 接地装置试验</b> .....	207
第一节 架空线路杆塔接地电阻测试.....	207



第二节	接地网接地电阻测试	209
<b>第九章</b>	<b>套管、绝缘子试验</b>	<b>213</b>
第一节	套管、绝缘子的绝缘电阻试验	213
第二节	套管介质损耗因数和电容量测试	215
第三节	绝缘子、套管的交流耐压试验	218
<b>第十章</b>	<b>GIS 常规电气试验</b>	<b>220</b>
第一节	GIS 基础知识	220
第二节	GIS 主回路电阻测试	224
第三节	GIS 现场交流耐压试验	226
<b>第十一章</b>	<b>油中溶解气体分析</b>	<b>230</b>
第一节	绝缘油的电气试验	230
第二节	绝缘油的介质损耗因数试验	233
第三节	绝缘油体积电阻率试验	235
第四节	油中溶解气体分析及变压器故障诊断	237
第五节	油中溶解气体分析方法在气体继电器中的应用	242
第六节	色谱综合分析判断	246
<b>第十二章</b>	<b>红外热成像检测试验</b>	<b>249</b>
第一节	红外热成像检测基础知识	249
第二节	红外热成像检测实际操作常见问题	255
第三节	红外热成像检测结果分析常见问题	261
<b>附录</b>	<b>常用材料发射率的参考值</b>	<b>271</b>

# 第一章 电气设备绝缘和试验基础知识

## 第一节 电介质基础知识

### 1-1 高电压技术研究的内容有哪几个方面？

答：高电压技术研究的内容相当广泛，主要有下列四个方面：

(1) 绝缘问题的研究。绝缘的作用就是只让电荷沿导线方向移动，而不让它往其他任何方向移动，这是高电压技术中最关键的问题，涉及绝缘的问题有：各种绝缘的特性；各种绝缘在高电压下的放电原理和耐电强度；各种绝缘的结构、生产和老化规律；各种绝缘和大自然的关系，如气候环境；怎样才能延长各种绝缘的寿命等。

(2) 过电压问题的研究。电力设备除了承受交流或直流工作电压的作用外，还会遇到雷电过电压和内部过电压的作用，过电压对电力设备的绝缘会带来严重的危害。因此就需要研究过电压的发生和变化规律，以及防止过电压引起事故的技术措施。

(3) 高电压试验与测量技术的研究。为了研究绝缘和过电压问题，就必须进行各种高电压试验，因而就必须研究试验的方法、测量技术以及研制各种高电压测试设备。

(4) 绝缘表面防污闪问题的研究。随着人类社会的发展，环境问题逐渐凸显，环境污染在影响人类生存的同时，也影响着电气设备外绝缘。目前输电线路和变电站污闪问题已经成为引起电网故障的主要问题，因此研究污闪的机理及其预防措施具有重要现实意义。

### 1-2 什么是电介质，什么是导体？常见的电介质有哪些类型？

答：一般来说电介质即绝缘材料。绝缘材料是指用于防止导电元件之间导电的材料。

常见的电介质分为三类：

(1) 气体电介质：空气、SF<sub>6</sub>、真空等。

(2) 液体电介质：变压器油、纯净的油等。

(3) 固体电介质：瓷、橡胶、玻璃、塑料、绝缘纸、纸板等。

导体即能导电的物体，包括金属、有杂质的水、人体的血液、肌肉组织等。

### 1-3 固体绝缘材料有什么作用？常用的有哪几种？

答：固体绝缘材料一般在电气设备中起隔离、支撑等作用。常用的有漆膜和橡胶、塑料类、复合材料、天然纤维和纺织品、浸渍织物、云母、陶瓷，以及各类绝缘纸、各类木质绝缘件等。

### 1-4 液体绝缘材料有什么作用？常用的有哪几种？

答：液体绝缘材料用以隔绝不同电位导体，填充固体材料内部或极间的空隙，以提高



其介电性能，并改善设备的散热能力。例如，在油浸纸绝缘电力电缆中，不仅显著地提高绝缘性能，还增强散热作用；在电容器中提高介电性能，增大单位体积的储能量；在断路器中除起绝缘作用外，主要起灭弧作用。常用的液体绝缘材料包括矿物绝缘油、合成绝缘油（硅油、十二烷基苯、聚异丁烯、异丙基联苯、二芳基乙烷等）、植物绝缘油等。

### 1-5 电介质在电场作用下的电气性能用哪些参数来表征？

答：可用四个参数来表征，即极化性能用介电常数 $\epsilon$ 表征；导电性能用电阻率 $\rho$ 表征；介质损耗性能用介质损耗因数 $\tan\delta$ 表征；击穿性能用击穿强度 $E$ 表征。对气体电介质而言，由于极化、电导和损耗较弱，所以只研究其击穿性能，而对固体、液体电介质四个性能均要研究。目前的电气设备例行试验为了适应状态检修的需要，主要是检测表征电介质电气性能的四个参数的变化。

### 1-6 电介质中各种极化的性质和特点是什么？

答：电介质极化种类及比较见表 1-1。

表 1-1 常见电介质极化种类及特点

极化种类	产生场合	所需时间	能量损耗	产生原因
电子式极化	任何电介质	$10^{-15}\text{s}$	无	束缚电子运动轨道偏移
离子式极化	离子式电介质	$10^{-13}\text{s}$	几乎没有	离子的相对偏移
偶极式极化	极性电介质	$10^{-10}\sim 10^{-2}\text{s}$	有	偶极子的定向排列
夹层式极化	多层介质交界面	$10^{-2}\text{s}\sim$ 数分钟	有	自由电荷的移动

在外电场的作用下，介质原子中的电子运动轨道将相对于原子核发生弹性位移，此为电子式极化或电子位移极化。

离子式结构化合物，出现外电场后，正负离子将发生方向相反的偏移，使平均偶极距不再为零，电介质对外呈现出极性，这种由离子的位移造成的极化称为离子式极化。

极性化合物的每个极性分子都是一个偶极子，在电场作用下，原先排列杂乱的偶极子将沿电场方向转动，整个电介质的偶极矩不再为零，对外呈现出极性，这种由偶极子转向造成的极化称为偶极式极化。

在电场作用下，带电质点在电介质中移动时，可能被晶格缺陷捕获或在两层介质的界面上堆积，造成电荷在介质空间中新的分布，从而产生电偶极矩，这就是夹层式极化。

### 1-7 什么是绝缘的吸收现象？

答：在电介质上加直流电压时，初始瞬间电流很大，以后在一定时间内逐渐衰减，最后稳定下来。电流变化的这三个阶段表现了不同的物理现象。初始瞬间电流是由电介质的弹性极化所决定，弹性极化建立的时间很快，电荷移动迅速，所以电流就很大，持续的时间也很短，这一电流称为电容电流（ $I_C$ ）。接着随时间缓慢衰减的电流，是由电介质的夹层极化和松弛极化所引起的，它们建立的时间越长，则这一电流衰减也越慢，直至松弛极化完成，这一过程称为吸收现象，这个电流称为吸收电流（ $I_e$ ）。最后不随时间变化的稳定电流，是由电介

质的电导所决定的，称为电导电流 ( $I_g$ )，它就是电介质直流试验时的泄漏电流。

图 1-1 所示为电介质的吸收电流曲线。吸收现象在夹层极化中表现得特别明显。如发电机和油纸电缆都是多层绝缘，属于夹层极化，吸收电流衰减的时间均很长。中小型变压器的吸收现象要弱些。绝缘子是单一的绝缘结构，松弛极化很弱，故基本上不呈现吸收现象。由于夹层绝缘的吸收电流随时间变化比较显著，故在实际试验中可以利用这一特点来判断绝缘的状态。由于吸收电流随时间变化，所以在测试绝缘电阻和泄漏电流时都要规定时间。例如在现行电气设备交接和例行试验的有关标准中，利用 60s 及 15s 时的绝缘电阻比值（即吸收比  $R_{60s}/R_{15s}$ ），加压 10min 时的绝缘电阻值与加压 1min 时的绝缘电阻值之比（极化指数），作为判断绝缘受潮程度或脏污状况的一个指标。绝缘受潮或脏污后，泄漏电流增加，吸收现象就不明显了。

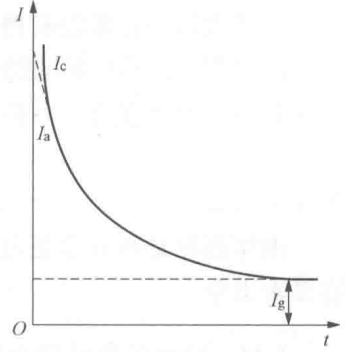


图 1-1 电介质吸收电流曲线

**1-8 某些容量较大的电气设备经直流高电压试验后，其接地放电时间要求长达 5~10min，为什么？**

**答：**由于介质夹层极化，电气设备通常含多层介质，直流充电时由于空间电荷极化作用，电荷在介质夹层界面上堆积，初始状态时电容电荷与最终状态时不一致；接地放电时由于设备电容较大且设备的绝缘电阻也较大，则放电时间常数较大（电容放电时间常数与电容值和放电电阻值的乘积成正比，电容较大导致不同介质所带电荷量差别大，绝缘电阻大导致流过的电流小，界面上电荷的释放靠电流完成），放电速度较慢，故放电时间要长达 5~10min。

**1-9 为什么介质的绝缘电阻随温度升高而减小，金属材料的电阻却随温度升高而增大？**

**答：**绝缘材料电阻率很大，其导电性质是离子性的，而金属导体的导电性质是自由电子性的，在离子性导电中，作为电流流动的电荷是附在分子上的，它不能脱离分子移动。当绝缘材料中存在一部分从结晶晶体中分离出来的离子后，则材料具有一定的导电能力，当温度升高时，材料中原子、分子的活动增加，产生离子的数目也增加，因而导电能力增加，绝缘电阻减小。绝缘物内的水分及其中含有的杂质、盐分等物质也呈扩散趋势，使电导增加，绝缘电阻降低。

而在自由电子性导电的金属中，其所具有的自由电子数目是固定不变的，而且不受温度影响，当温度升高时，材料中原子、分子的运动增加，自由电子移动时与分子碰撞的可能性增加，因此，所受的阻力增大，即金属导体随温度升高电阻也增大了。

## 第二节 气体电介质放电基础知识

**1-10 什么是气体放电、气体击穿、击穿电压、击穿强度？**

**答：**气体放电：在外加电压作用下，气体间隙导通电流的现象叫气体放电。

气体击穿：气体绝缘在外加电压的作用下，由绝缘状态变为导电状态的过程叫气体击穿，

一般伴随有发光、发热、发声等现象。气体击穿一定是气体放电，但是气体放电不一定是气体击穿。比如电晕放电是一种气体放电现象，但是这时候高压金属电极和其他导体之间并没有发生气体击穿。

**击穿电压：**让绝缘材料击穿的最低电压叫击穿电压。单位是 V 或者 kV。

**击穿强度：**单位长度的绝缘材料击穿所需的电压叫击穿强度。也叫击穿场强、绝缘强度、电气强度、耐电强度。单位是 kV/cm 或 V/m。

$$\text{击穿强度} = \frac{\text{击穿电压}}{\text{绝缘距离}}$$

击穿强度是衡量常见电介质绝缘性能的指标。相同厚度的电介质的击穿强度越大，越不容易被击穿。

### 1-11 常见的气体放电形式有哪些？

**答：**常见的气体放电形式有：

(1) 电晕放电：例如夜晚高压线上淡蓝紫色的荧光，并伴有“滋滋”声。



(2) 电弧放电：电极之间狭窄明亮的放电通道，有爆鸣声，放电过程可以持续。如电焊机。扫描二维码观看电弧放电视频。仔细观察可见，试验中在第一次电弧上漂，拉长熄灭之前，电极中心第二次电弧已经燃烧，所以整体上是连续的，没有间断。

(3) 火花放电：电极之间狭窄明亮的放电通道，有爆鸣声，放电过程不能持续。如闪电、衣物之间的静电火花等。

(4) 辉光放电：在密闭空间、稀薄气体、高电压下气体整体发光放电现象。如霓虹灯。

(5) 沿面放电：沿着绝缘子、套管表面的空气击穿形成的放电。

### 1-12 什么是游离，常见的游离有哪些类型？

**答：**中性的气体分子或原子在外界能量的作用下，分解成带负电的自由电子和带正电的正离子的过程叫游离。常见的游离有以下四种类型：

(1) 碰撞游离：自由电子在强电场的作用下高速运动，撞击中性的气体分子，撞出来新的自由电子，叫碰撞游离。自由电子越来越多，形成“电子崩”，微观上电子崩，在宏观上就是见到的电弧。

(2) 热游离：电弧的温度有 5000~13 000℃，在高温下，空气分解成电子和正离子，叫热游离。由于热游离大部分电弧可以持续燃烧。瓷可以耐受电弧的高温，而金属等会被气化。



(3) 光游离：紫外线， $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 射线，宇宙射线等高能射线可以使中性的气体分解出来自由电子。在平时， $1\text{cm}^3$  的空气中大约有 1000 对正负电荷。扫描二维码观看光游离的三维动画演示。

(4) 表面游离：在高能射线照射下，或者强电场作用下，金属电极中的电子会逃脱金属的束缚，形成自由电子。如光电效应。

### 1-13 汤逊理论是如何描述均匀电场中火花放电的基本物理过程的？

**答：**汤逊理论是分析低气压、短距离的均匀电场气隙的火花放电过程的理论。汤逊理论

认为自由电子的碰撞游离和正离子撞击阴极表面的电离是放电产生和发展的原因。特点是强调表面游离加碰撞游离，即认为引发电子崩的第一个有效自由电子由金属电极表面发出。描述火花放电的基本物理过程的要点如下：

从加压到第一个有效电子出现的阶段：只有在气隙中出现这个有效电子后，才开始产生碰撞游离，并不断发展，使自由电荷不断增长。由于外界游离因素具有偶然性，所以有效电子的出现也具有偶然性。

电子崩阶段：这个阶段是从出现第一个有效电子到第一个电子崩发展成熟。气隙中出现这个有效电子后，开始产生碰撞游离，撞击中性气体分子形成新的有效电子，再撞击出更多的自由电子。到达某一程度自由电子大量爆发形成电子崩。

自持放电阶段：在这个阶段中 $\gamma$ 过程（正离子碰撞阴极，从阴极打出一个电子）起重要作用。 $\gamma$ 过程出现使气隙由绝缘状态变为导电状态。因此发生了质变。 $\gamma$ 过程出现是质变的标志。

### 1-14 流注理论描述气体放电的特点是什么？适用范围是什么？

答：汤逊理论无法解释许多实验现象，比如大气中的闪电推进的速度远远高于汤逊理论计算的结果。流注理论在描述气体放电时考虑空间电荷畸变电场的作用和光游离的概念，认为光游离引起各个子崩的同时发展，从而促进导电等离子体通道形成。汤逊理论适用于低气压、短间隙。流注理论适用于高电压、长间隙。

### 1-15 什么是空气的电气间隙？

答：空气的电气间隙是指两个带电部件之间，或带电部件与地（或接地物体）之间的空气距离。

### 1-16 什么是电弧？电弧的熄灭方法有哪些？

答：宏观上见到的电弧，在微观上就是电子崩。电弧熄灭的方法有以下几类：

(1) 阻止带电质点的定向运动。

1) 切断电源。

2) 增加电极间距离。

3) 在电弧形成路径中设置固体绝缘障碍。比如高压熔断器中利用石英砂灭弧。

4) 用金属栅极灭弧。吸收电弧热量，降低温度。

5) 用强电负性的高耐电强度气体，如  $\text{SF}_6$  等吸附自由电子。

(2) 使带电质点扩散。如在断路器的灭弧室中用油流或者高压  $\text{SF}_6$  气体吹弧。

## 第三节 大气条件对气体电介质放电的影响

### 1-17 简述在工程实践中巴申定律的意义。

答：巴申定律指在均匀的电场中，击穿电压  $U$  是气体的大气压力  $p$ 、极间距离  $d$  乘积的函数。

$$U=f(pd)$$

式中： $p$  是气隙的压力； $d$  是气隙距离。

在工程实践中可认为：当气体成分、电极材料不变，电极间距离一定时，气体间隙的气压由零（即接近真空）开始升高，气体的击穿电压经历一个先减小再增大的过程，中间有一个最小值。高压和高真空都可以提高气体间隙击穿电压。如图 1-2 所示，空气中电极距离  $d=10\text{cm}$ ，大约  $p=0.01$  大气压时，空气最容易击穿。气压上升或者下降，击穿电压都会升高。

其原因可解释如下：假设  $d$  保持不变，当气压增加，气体密度增大时，电子的平均自由行程缩短了，相邻两次碰撞之间，电子积聚到足够动能的概率减小了，故必然增大击穿电压。反之当气压降低，气体密度减小时，电子在碰撞前积聚到足够动能的概率虽然增大了，但气体很稀薄，电子在走完全程中与气体分子相撞的总次数却减到很小，欲使击穿也须增大击穿电压。故在这两者之间，总有一个值对造成撞击游离最有利，此时最小。

另外当气体压力一定时，电极间距离  $d$  越大，击穿电压越高。

还有一种极端情况，如果电极间距离  $d$  小于相邻的气体分子的平均距离（大约几个纳米）的时候，电子在走完全程中所遇到的撞击次数已减到很小，故要求外加电压增大，才能击穿，但是这种极端情况在工程实践中不常遇到，一般可以不用考虑。

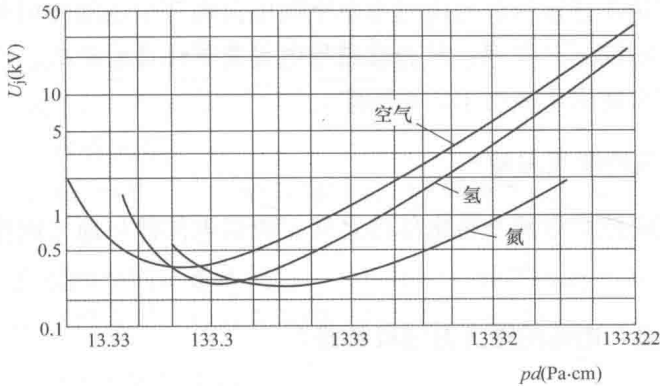


图 1-2 均匀电场中击穿电压与  $pd$  关系图

$U_j$ —击穿电压； $pd$ —气体压力与两极间距离的乘积

### 1-18 为什么随着海拔增加，空气介质的放电电压会下降？

答：随着海拔增加，空气密度下降，电场中电子平均自由行程增大，电子在两次碰撞间能够聚集起更大的动能（与正常密度相比），更易引起电离，从而使空气介质的放电电压下降。

### 1-19 在平原地区试验的高压断路器用于高原时应考虑哪些因素？

答：在平原地区试验的高压断路器，若使用于高原时，由于随着海拔的增加，空气逐渐稀薄，空气密度下降，空气的击穿电压也随之下降，结果导致高压断路器的外绝缘耐压强度下降。为此必须对用于高原地区而又在平原地区进行试验的高压断路器进行绝缘补偿，即乘以海拔修正系数  $x$ ，来提高试验电压，修正系数按下式计算

$$x = \frac{1}{k - \frac{h}{10000}}$$

式中： $k$ 为系数，取 1.1； $h$ 为安装点海拔，m。

这个公式适用于海拔 1000~3500m 的设备。

随着海拔增加，对温升也会带来不利影响。高压断路器散热通过辐射和对流来完成。在高原地区，空气密度小，断路器散热差，会使温升增高。但高原地区气温比平原低，海拔每升高 1000m，气温大约降低 0.6℃，这就和海拔升高散热不利相抵消，因而高原地区对温升不予校正。

### 1-20 真空间隙的绝缘性能如何？

答：真空间隙气体稀薄，气体分子少，分子的平均自由行程大（平均自由行程是指粒子在气体或液体中无碰撞运动距离的平均值），发生碰撞的概率很小。例如真空度为  $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$  时，气体分子的密度约为  $3.4 \times 10^{12} \text{cm}^{-3}$ 。此时，自由电子的平均自由行程约为 282cm，远大于真空灭弧室的几何尺寸（常温下一个大气压的空气中，气体分子的密度为  $2.68 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ ，电子的平均自由行程约为  $3.7 \times 10^{-5} \text{cm}$ ）。可见，即使在真空间隙中存在自由电子，在其从一个电极运动到另一个电极，也很少有机会与气体分子碰撞。所以，碰撞游离不是真空间隙击穿的主要原因。由此可见，真空间隙的绝缘强度远比空气的高。理论上，真空间隙的击穿强度可达 100kV/mm，实际试验结果为 30~40kV/mm。不同介质的绝缘间隙击穿电压比较，如图 1-3 所示。

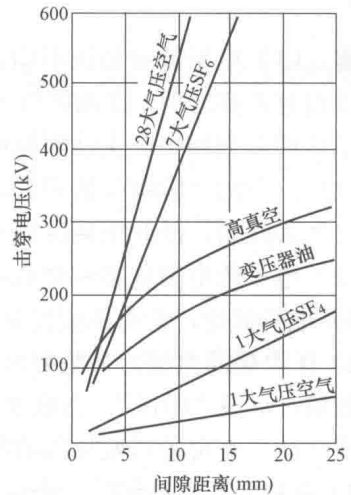


图 1-3 不同介质的绝缘间隙击穿电压比较

## 第四节 电场分布状况对气体电介质放电的影响

### 1-21 常见的电场类型有哪些？对气体的放电击穿现象有什么影响？

答：常见的电场类型有均匀电场和不均匀电场。不均匀电场又分为极不均匀电场和稍不均匀电场。

(1) 均匀电场：两个无限大的电极平行放置，中间的电场就是均匀电场。在均匀电场中，所有电力线平行且疏密均匀，电场强度到处大小相等，方向相同。电场强度决定了电荷受电场力的大小和方向。

(2) 不均匀电场：除了均匀电场以外的所有电场都是不均匀电场。

1) 稍不均匀电场：指不能维持电晕放电的电场。

2) 极不均匀电场：指可以维持电晕放电的电场。常见的有棒-棒电极、棒-板电极电场。

棒-棒电极：比如两根高压线之间的电场。棒-板电极：比如高压线和地面，墙面之间的电场。

均匀电场中空气的击穿场强  $E=30\text{kV/cm}$ （最大值）

棒-棒电极中空气的击穿场强  $E=3.8\text{kV/cm}$ （有效值） $=5.37\text{kV/cm}$ （最大值）



棒-板电极中空气的击穿场强  $E=3.35\text{kV/cm}$  (有效值)  $=4.74\text{kV/cm}$  (最大值)  
可见电场越均匀, 气体间隙的击穿电压越高, 气体间隙越不容易击穿。

### 1-22 常见的电气设备里, 属于改善电场分布的措施有哪些?

答: 属于改善电场分布的措施有: 变压器绕组上端增加静电屏; 设备高压端装均压环; 电缆主绝缘外加屏蔽层。另外电缆外屏蔽层的作用也有使绝缘层和金属护套有良好的接触。

### 1-23 电晕产生的机理是什么? 它有哪些有害影响? 试列举工程上各种防晕措施的实例。

答: (1) 电晕放电是极不均匀电场中的一种自持放电现象, 在极不均匀电场中, 在气体间隙还没有击穿之前, 在曲率较大(曲率半径较小)的电极附近空间局部的场强已经很大了, 从而在这局部强场中产生强烈的电离, 伴随着游离、复合、激励、反激励等过程而有声、光、热等效应, 发出“滋滋”的声音, 蓝色的晕光以及使周围气体温度升高等。但离电极稍远处场强已大为减弱, 故此电离区域不能扩展到很大, 只能在电极的表面产生放电的现象。

(2) 电晕放电的危害主要表现在以下几个方面:

1) 电晕放电, 会有能量损耗。

2) 在尖端或电极的某些突出处, 电子和离子在局部强场的驱动下高速运动, 与气体分子交换能量, 形成“电风”。当电极固定得刚性不够时, 气体对“电风”的反作用力会使电晕极振动或转动。有可能诱发导线的舞动。

3) 电晕会产生高频脉冲电流, 其中还包含着许多高次谐波, 这会造成对无线电通信、精密电子仪器测量的干扰。

4) 电晕产生的化学反应产物  $\text{O}_3$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{NO}_2$  等强腐蚀性气体具有强烈的氧化和腐蚀作用, 所以, 电晕是促使有机绝缘老化的重要因素。

5) 电晕还可能产生噪声污染。

(3) 减少电晕放电的根本措施在于降低电极表面的场强, 具体的措施有: 改进电极形状、增大电极的曲率半径, 采用分裂导线等。需要强调指出的是, 电晕放电的强弱只和高压金属电极表面的场强成正比, 和电压高低无关。如我国  $1000\text{kV}$  特高压线路的电晕放电强度就低于  $500\text{kV}$  超高压线路。原因是特高压导线的直径比较大, 分裂导线的数目多, 使得导线表面的场强较低。

### 1-24 什么是极性效应? 在空气中和 GIS 设备中, 极性效应有什么特点?

答: 无论是长气隙还是短气隙, 击穿的发展过程都随着电压极性的不同而有所不同, 即存在极性效应。不对称电场才有极性效应, 对称的电场如均匀电场和棒-棒电极电场没有极性效应。

在不对称的极不均匀电场中, 如棒-板电极电场, 极性效应的特点是:

(1) 棒极带负电, 容易电晕, 不容易击穿。如验电笔验直流电, 只有一极发光, 发光极带负电, 因为验电笔内的电极属于不对称电场。

(2) 棒极带正电, 容易击穿, 不容易维持电晕。如在棒-板电极电场中加交流电, 在正半周容易击穿, 放电都在正半周最大值发生。

在不对称的稍不均匀电场中，气体的极性效应是在负极性时先击穿。因为稍不均匀电场同样在棒极带负电的时候先产生电晕，但是电晕不能维持所以马上击穿。所以在不对称的稍不均匀电场中加交流电，在负半周容易击穿，放电都在负半周最大值发生。

因为在极不均匀电场中， $\text{SF}_6$  气体的放电特性不稳定，所以 GIS 设备中，一般都采用稍不均匀电场，所以在 GIS 设备中，极性效应一般是在负半周容易击穿，放电都在负半周最大值发生。

同样  $\text{SF}_6$  气体在不对称电场才有极性效应，对称的棒-棒电极没有极性效应，例如在 GIS 设备中悬浮放电的电极属于对称电场，放电不存在极性效应；电晕放电的电极属于不对称电场，放电存在极性效应。

**1-25 为什么 GIS 设备中的电极，一般都采用稍不均匀电场？并且 GIS 设备的气体压力一般都要求维持在 5~6 个大气压？**

答：因为  $\text{SF}_6$  气体在极不均匀电场中的放电不稳定，存在所谓的“驼峰曲线”现象，如图 1-4 所示，即随着气体压力的增加， $\text{SF}_6$  气体的工频交流击穿电压出现先增大、再减小、再增大的过程。大约在 3 个大气压的时候。其击穿电压反而低于 1 个大气压和 5 个大气压的时候。所以从放电稳定性和绝缘可靠性方面考虑，GIS 设备中的电极，一般都采用稍不均匀电场。另外当气压超过 6 个大气压的时候，设备的密封性能无法满足要求，所以 GIS 设备的气体压力一般都要求维持在 5~6 个大气压。

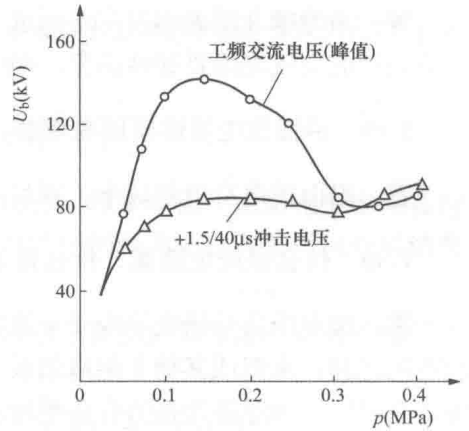


图 1-4 30mm 针-球间隙中  $\text{SF}_6$  气体在不同电压类型下的击穿电压与压力的关系

**1-26 提高气体间隙击穿电压的措施是什么？**

答：通常采取的措施有两个途径：

- (1) 让电场分布均匀。
- (2) 减少气体分子的游离。

具体措施有：

- (1) 让电极表面保持平整光滑，减少毛刺、棱角、锈斑，从而减小电晕。
- (2) 在电极间加屏障。如带电作业中覆盖在带电导线表面的绝缘垫。试验表明，在棒-板电极距棒极 1/4 的位置处加一张绝缘纸后，电极间击穿场强最高可以增大 5~6 倍，原因是正离子比较重，被屏障阻挡，均匀分布在屏障表面，让电场变均匀，从而提高击穿电压。另外，现场一般用环氧树脂板，橡胶垫作为屏障，它们本身击穿强度就很高，从而可以大大提高间隙的击穿电压。同时需指出，理论上均匀电场电力线分布已经很均匀，放一个击穿电压为 0 的屏障（如绝缘纸），不能提高间隙的击穿电压，但实际中放环氧树脂板绝缘垫也可以提高击穿电压。

- (3) 采用高压气。如 GIS 设备和  $\text{SF}_6$  断路器的灭弧室中， $\text{SF}_6$  气体一般有 5~6 个大气压。
- (4) 采用高真空。如真空断路器的灭弧室。
- (5) 采用高耐电强度气体。比如  $\text{SF}_6$ 。

## 第五节 沿面放电

1-27 何谓沿面放电？什么是闪络？沿面放电受哪些主要因素的影响？

答：当带电体电压超过一定限度时，常常在固体介质和空气的交界面上出现沿绝缘表面放电的现象，称为沿面放电。如果沿面放电发展到对面的电极，造成两电极之间介质表面的空气绝缘贯穿性击穿，叫闪络。沿面放电主要受电极形式和表面状态的影响。扫描二维码观看沿面放电的视频演示。



1-28 什么是闪络？

答：沿绝缘介质表面发生沿面放电，如果沿面放电发展到对面的电极，造成两电极之间介质表面的空气绝缘贯穿性击穿，叫闪络。

1-29 沿面放电发展阶段有哪些？

答：沿面放电有电晕放电、刷状放电、闪络三个发展阶段。

1-30 什么是爬电距离？什么是泄漏比距？什么是绝缘穿透距离？

答：爬电距离是指在绝缘子正常施加运行电压的导电部件之间沿其表面的最短距离或最短距离之和；水泥或其他非绝缘的胶合材料表面不能计入爬电距离；若在绝缘子的绝缘件上施有高阻层，该绝缘件视为有效绝缘表面，其表面距离计入爬电距离。

绝缘穿透距离是指绝缘的厚度。

泄漏比距指外绝缘“相-地”之间的爬电距离（cm）与系统最高工作（线）电压（kV，有效值）之比。

1-31 固体电介质表面潮湿的时候沿面闪络的击穿强度如何变化？怎么防止固体电介质表面脏污潮湿？

答：在均匀电场中，纯空气的击穿强度大约为 30kV/cm。

固体电介质表面清洁干燥的时候沿面闪络的击穿强度（干闪）大约为 10kV/cm；固体电介质表面清洁潮湿的时候沿面闪络的击穿强度（湿闪）会比干闪大幅下降；固体电介质表面脏污潮湿的时候沿面闪络的击穿强度（污闪）会比湿闪进一步大幅，甚至接近导通状态。

防护措施：烘干，用无水酒精或者丙酮擦拭表面。

例如：一次进行 10kV 遮蔽罩交流耐压试验时，当试验电压升至 1800V 时试品表面发生闪络，断开试验电源检查，发现试品表面有脏污，擦拭清洁后试验通过。

1-32 表征电气设备外绝缘污秽程度的参数主要有哪几个？

答：主要有以下三个：

（1）污层的等值附盐密度。它以绝缘子表面每平方厘米的面积上有多少毫克的氯化钠来等值表示绝缘子表面污秽层导电物质的含量。