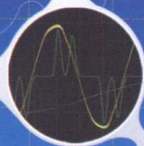


现场运行人员专业基础培训适用

# 电气试验 基础

周武仲 编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

现场运行人员专业基础培训适用

# 电气试验 基础

周武仲 编



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

## 内 容 提 要

本书依据 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》，在综合了各区域电网制定的《预防性试验规程》的基础上，对电力设备的预防性试验的基础知识、试验方法、试验要求及相应的操作技能要求作了较详细的说明，对近年来一些新知识、新技术也作了简要的介绍。全书分为 15 章，主要内容包括高压电气设备绝缘、绝缘的预防性试验、电力变压器试验、同步发电机试验、直流电机试验、中频发电机试验、交流电动机试验、互感器试验、开关设备试验、套管和绝缘子试验、电力电缆线路试验、电容器试验、避雷器试验、接地电阻试验和电力红外线诊断技术。

本书可供电力系统发电、供电、电力建设企业和工矿企业中从事各种电气设备的绝缘性能、电气特性及参数测量的电气试验工作人员阅读使用，也可供大中专学校相关专业的师生参考。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

电气试验基础/周武仲编. —北京：中国电力出版社，2010.8  
ISBN 978-7-5123-0474-1

I. ①电… II. ①周… III. ①电气设备-试验 IV. ①TM64-33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 098184 号

中国电力出版社出版、发行

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

印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2010 年 月第一版 2010 年 月北京第一次印刷

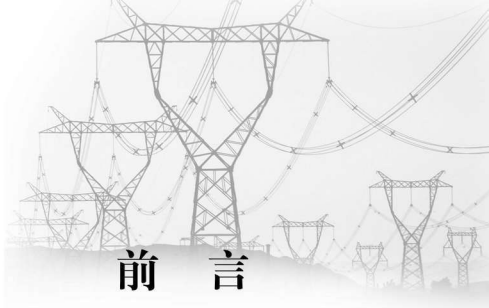
850 毫米×1168 毫米 32 开本 印张 千字

印数 0001—0000 册 定价 0.00 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

*DL/T 596—1996*《电力设备预防性试验规程》颁布至今已有 10 多年了。在这段时期，我国的电力工业有了飞速的发展，随着电力容量的不断增加，以及超高压输电和大容量发电机组的普遍采用，对电力系统安全可靠运行的要求变得越来越严格和重要。特别是计算机技术在电力系统的运用，使许多测试仪器和测试技术都发生了较大的变化。这期间，一些区域性电力系统相继颁布了区域内的《预防性试验规程》（本书将上述的区域性《预防性试验规程》统称为《预规》），对 *DL/T 596—1996*《电力设备预防性试验规程》进行了补充，使得《预规》更加适应我国电力系统的发展和安全要求。本书在综合了各区域电网制定的《预规》的基础上，对电力设备预防性试验的基础知识、试验方法和要求以及相应的操作技能要求作了较详细的说明，对近年来出现的一些新知识、新技术也作了简要的介绍。

电气试验一般可分为出厂试验、交接验收试验、预防性试验等。为了便于编写，本书以预防性试验的试验项目和要求为基础，对各试验项目的内容及要求进行说明。其他类型的试验可以参照本书的说明进行。同时，电气试验又可分为绝缘试验和特性试验两大类，本书以

绝缘试验为主进行说明，对有关的特性试验也给予必要的介绍。

本书的读者对象为电力系统发电、供电、电力建设企业和工矿企业中从事各种电气设备的绝缘性能、电气特性及参数测量的电气试验工作人员、有关管理人员。

本书的内容力求具有先进性、实用性和可操作性。由于时间和条件所限，书中不足之处在所难免，敬请广大读者批评指正。

**编 者**

2010 年 7 月



# 目 录

## 前言

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 第一章 高压电气设备绝缘                     | 1   |
| 第一节 高压电气设备绝缘基础知识                 | 1   |
| 第二节 电力变压器绝缘                      | 5   |
| 第三节 旋转电机绝缘                       | 7   |
| 第四节 高压开关设备绝缘                     | 11  |
| 第五节 互感器和电力电容器绝缘                  | 18  |
| 第六节 高压套管和绝缘子绝缘                   | 25  |
| 第七节 避雷器绝缘                        | 29  |
| 第八节 电力电缆线路绝缘                     | 32  |
| 第二章 绝缘的预防性试验                     | 35  |
| 第一节 绝缘电阻和直流电阻试验                  | 35  |
| 第二节 直流耐压和泄漏电流试验                  | 44  |
| 第三节 介质损失角正切值 ( $\tan\delta$ ) 试验 | 46  |
| 第四节 交流耐压试验                       | 50  |
| 第五节 局部放电测试                       | 55  |
| 第六节 绝缘油中溶解气体的色谱分析                | 58  |
| 第七节 绝缘油电气性能试验                    | 66  |
| 第八节 六氟化硫气体试验                     | 72  |
| 第三章 电力变压器试验                      | 79  |
| 第一节 油浸式电力变压器试验                   | 79  |
| 第二节 SF <sub>6</sub> 气体绝缘变压器试验    | 109 |
| 第三节 干式变压器试验                      | 110 |

|                             |     |
|-----------------------------|-----|
| <b>第四章 同步发电机试验</b>          | 112 |
| 第一节 定子和转子绕组绝缘电阻、吸收比和极化指数的测量 | 112 |
| 第二节 定、转子绕组直流电阻测量            | 116 |
| 第三节 定子绕组泄漏电流和直流耐压试验         | 117 |
| 第四节 定、转子绕组交流耐压试验            | 120 |
| 第五节 定子铁芯试验                  | 126 |
| 第六节 转子绕组静态匝间短路监测            | 130 |
| 第七节 转子绕组动态匝间短路监测            | 134 |
| 第八节 转子绕组一点接地故障测试            | 136 |
| 第九节 定子槽部线圈防晕层对地电位测量         | 140 |
| 第十节 定子绕组端部手包绝缘施加直流电压测量      | 141 |
| 第十一节 发电机组和励磁机轴承的绝缘电阻和轴电压的测量 | 142 |
| 第十二节 汽轮发电机定子绕组端部固有振动频率测试    | 144 |
| 第十三节 发电机空载和短路特性试验           | 146 |
| 第十四节 发电机温升试验                | 150 |
| 第十五节 相序检查和定相                | 155 |
| <b>第五章 直流电机试验</b>           | 158 |
| 第一节 绕组绝缘电阻的测量               | 158 |
| 第二节 绕组直流电阻的测量               | 159 |
| 第三节 电枢绕组片间直流电阻的测量           | 159 |
| 第四节 绕组的交流耐压试验               | 161 |
| 第五节 磁场可变电阻器直流电阻和绝缘电阻的测量     | 161 |
| 第六节 调整电刷的中心位置               | 162 |
| 第七节 检查绕组极性及其连接的正确性          | 163 |
| 第八节 直流电机的无火花换向试验            | 166 |

|            |                                  |            |
|------------|----------------------------------|------------|
| 第九节        | 直流发电机的特性试验·····                  | 170        |
| 第十节        | 直流电动机的空转检查·····                  | 175        |
| <b>第六章</b> | <b>中频发电机试验·····</b>              | <b>176</b> |
| 第一节        | 中频发电机的绝缘试验·····                  | 176        |
| 第二节        | 中频发电机的特性试验·····                  | 178        |
| 第三节        | 中频发电机的温升试验·····                  | 180        |
| <b>第七章</b> | <b>交流电动机试验·····</b>              | <b>182</b> |
| 第一节        | 绕组绝缘电阻和吸收比的测试·····               | 182        |
| 第二节        | 绕组直流电阻的测试·····                   | 183        |
| 第三节        | 定子绕组泄漏电流和直流耐压试验·····             | 184        |
| 第四节        | 定子绕组交流耐压试验·····                  | 185        |
| 第五节        | 绕线式电动机和同步电动机转子绕组的<br>交流耐压试验····· | 186        |
| 第六节        | 可变电阻器、起动电阻器和灭磁电阻器<br>的试验·····    | 187        |
| 第七节        | 检查定子绕组的极性·····                   | 188        |
| 第八节        | 电动机空转并测空载电流和空载损耗·····            | 190        |
| 第九节        | 双电动机拖动时测量转矩—转速特性试验·····          | 192        |
| <b>第八章</b> | <b>互感器试验·····</b>                | <b>194</b> |
| 第一节        | 电流互感器的试验·····                    | 194        |
| 第二节        | 电压互感器的试验·····                    | 204        |
| <b>第九章</b> | <b>开关设备试验·····</b>               | <b>218</b> |
| 第一节        | SF <sub>6</sub> 断路器和 GIS 试验····· | 218        |
| 第二节        | 多油和少油断路器的试验·····                 | 226        |
| 第三节        | 真空断路器、重合器和分段器试验·····             | 231        |
| 第四节        | 隔离开关试验·····                      | 235        |
| 第五节        | 高压开关柜的试验·····                    | 237        |

|             |                                   |     |
|-------------|-----------------------------------|-----|
| <b>第十章</b>  | <b>套管和绝缘子试验</b> .....             | 239 |
| 第一节         | 套管的试验.....                        | 239 |
| 第二节         | 绝缘子的试验.....                       | 244 |
| <b>第十一章</b> | <b>电力电缆线路试验</b> .....             | 251 |
| 第一节         | 纸绝缘电力电缆线路的试验.....                 | 251 |
| 第二节         | 橡塑绝缘电力电缆线路的试验.....                | 253 |
| 第三节         | 自容式充油电缆线路的试验.....                 | 256 |
| 第四节         | 交叉互联系统的试验.....                    | 258 |
| 第五节         | 电力电缆故障探测.....                     | 259 |
| <b>第十二章</b> | <b>电容器试验</b> .....                | 263 |
| 第一节         | 高压并联电容器、串联电容器和交流滤波<br>电容器的试验..... | 263 |
| 第二节         | 耦合电容器和电容式电压互感器的电容分<br>压器的试验.....  | 267 |
| 第三节         | 断路器电容器的试验.....                    | 268 |
| 第四节         | 集合式电容器的试验.....                    | 269 |
| <b>第十三章</b> | <b>避雷器试验</b> .....                | 271 |
| 第一节         | 阀式避雷器的试验.....                     | 271 |
| 第二节         | 金属氧化物避雷器的试验.....                  | 274 |
| <b>第十四章</b> | <b>接地电阻试验</b> .....               | 279 |
| 第一节         | 接地电阻的测量.....                      | 279 |
| 第二节         | 土壤电阻率的测量.....                     | 283 |
| <b>第十五章</b> | <b>电力红外线诊断技术</b> .....            | 287 |
| 第一节         | 电力红外线诊断技术基础.....                  | 287 |
| 第二节         | 电气设备红外诊断实例.....                   | 296 |

# 高压电气设备绝缘

## 第一节 高压电气设备绝缘基础知识

高压电气设备的绝缘是设备中的关键部位，也是其薄弱环节。绝缘的作用是将带电的导体和其他导体及大地在电气上的连接隔开，从而能保持不同的电位。由于电力系统的电压不断地提高，电气设备绝缘的破坏将导致设备和系统的重大事故，给国民经济带来重大损失，为此，安全可靠地解决电力系统中的绝缘问题是十分必要和刻不容缓的任务之一。

电气试验工作人员必须对电气设备的绝缘结构有一个较深入的了解，这也是一种不可缺少的基础知识。

### 一、有关绝缘的基本知识

绝缘材料又称电介质，它是电工中应用最广泛的一种材料。在实际工作中，一般所说的绝缘就是指绝缘材料。

绝缘在电场作用下会发生极化、电导、损耗、击穿等物理现象，在长期使用的条件下还会发生老化。

#### 1. 绝缘的极化现象

绝缘的极化有以下 4 种基本形式：

(1) 电子式极化：是在电场作用下，电子的位移形成的极化。

(2) 离子式极化：是在电场作用下，正负离子发生位移形成的极化。

(3) 偶极式极化：是在电场作用下，偶极子发生转向，顺电场方向作有规则的排列形成的极化。

(4) 夹层式极化：是在电场作用下，不同的“绝缘”交界面

处将发生电荷的移动形成的极化。

## 2. 绝缘的电导现象

绝缘的电导,是由于其存在的带电质点在电场作用下沿电场方向发生移动而形成的。它可分为电子电导、离子电导和胶粒电导三种。

## 3. 绝缘的损耗现象

在外加电压作用下,绝缘中的一部分电能被转换为热能,这种现象称为介质损耗。它可以分为电导损耗、极化损耗和电离损耗三类。在交流电压作用下,绝缘可视为由一个电阻和一个无损电容并联组成的等值电路,如图 1-1 所示。由图 1-1 (c) 的相量图可见

$$\tan\delta = I_R / I_C = 1 / \omega CR$$

$$I_C = U / X_C = \omega CU$$

$$P = UI_R = UI_R / I_C \times I_C = U \tan\delta \omega CU = \omega CU^2 \tan\delta \quad (1-1)$$

式中  $\omega$ ——电源角频率。

由式 (1-1) 可见,对于一定尺寸结构的设备 (这时  $C$  为一定值),当所加电压的频率和大小一定时,介质损耗  $P$  的大小与介质损失角的正切值  $\tan\delta$  成正比,即  $\tan\delta$  的大小反映了介质损耗的大小。

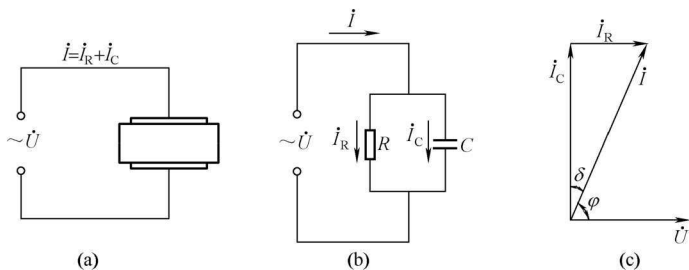


图 1-1 绝缘在交流电压作用下的等值电路和相量图

## 4. 绝缘的老化现象

绝缘在使用过程中,由于受各种因素的作用,其性能会逐渐变坏,直至最后丧失使用价值,这一现象称为老化,这种变化过

程叫老化过程。

### 5. 绝缘的击穿

对绝缘施加的电压达到某临界值时，就会导致绝缘被击穿，导致绝缘击穿的最低电压称为击穿电压。

## 二、对高压电气设备绝缘的要求

为了保证高压电气设备能安全可靠地运行，其绝缘必须满足下列要求：

(1) 要有良好的电气性能。绝缘能否安全可靠运行，主要视其耐受电压的能力而定。设备绝缘耐受电压的能力的大小称为其绝缘水平。电气设备的绝缘水平应能保证在最大工作电压的持续作用下和超过最大工作电压一定值的过电压短时作用下，都能安全可靠地运行。

为保证设备绝缘能达到上述要求，就要对绝缘进行在规定试验电压下的耐压试验和其他考核绝缘材料性能的有关电气试验，从而对电气设备的绝缘性能作出客观的评价，并根据试验结果采取必要的预防措施。

(2) 要有相应的机械性能。高压电气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作用。由于机械力或电动力的作用，将会使绝缘产生损伤，使其电气强度大大降低，最后导致绝缘击穿而造成重大事故。因此，绝缘应具有能承受相应的机械负荷的性能。

(3) 要有较高的热稳定性能。高压电气设备的绝缘都有一定的耐热能力，温度太高会使绝缘发生劣化而丧失绝缘能力。在设备中，绝缘材料往往和金属材料相结合，由于两者的热膨胀系数不同而使绝缘材料内部产生很大的应力，从而使绝缘材料发生应力破坏现象。因此，要求绝缘要有较高的热稳定性能。

(4) 要有较好的化学稳定性能。高压电气设备工作条件变化较大：在户外工作的绝缘应能长期耐受日照、风沙、雨雾和冰雪等外界因素的侵蚀；在高原地区工作的绝缘应考虑气压、气温和湿度变化的影响；在有化学腐蚀性气体的环境下工作的绝缘应考

虑防止各种有害因素的侵蚀。因此，要求绝缘要有较好的化学稳定性能。

### 三、高压电气设备绝缘的耐热等级

按高压电气设备的耐热性能的不同，可分为 Y、A、E、B、F、H、C 等七个耐热等级。在表 1-1 中列出了各耐热等级绝缘材料的极限温度及相当于该耐热等级的绝缘材料。当绝缘材料的使用温度超过表 1-1 中所规定的相应极限温度时，绝缘材料将迅速劣化，寿命将大大缩短。例如 A 级绝缘如超过  $8^{\circ}\text{C}$ ，则寿命将缩短一半左右。

表 1-1 绝缘材料的耐热等级和极限温度

| 耐热等级 | 极限温度<br>( $^{\circ}\text{C}$ ) | 相当于该耐热等级的绝缘材料                                                                           |
|------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|
| Y    | 90                             | 用未浸渍过的棉纱、丝及纸等材料或其组合物组成的绝缘                                                               |
| A    | 105                            | 用浸渍过的或者浸在液体介质中的棉纱、丝及纸等材料或其组合物所组成的绝缘                                                     |
| E    | 120                            | 用合成有机薄膜、合成有机瓷漆等材料或其组合物所组成的绝缘                                                            |
| B    | 130                            | 用合适的树脂粘合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料、合适的有机材料所组成的绝缘                                      |
| F    | 155                            | 用合适的树脂粘合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等，以及其他无机材料、合适的有机材料或其组合物所组成的绝缘                                 |
| H    | 180                            | 用合适的树脂（如硅有机树脂）粘合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维、石棉等材料或其组合物所组成的绝缘                                        |
| C    | $>180$                         | 用合适的树脂粘合或浸渍、涂覆后的云母、玻璃纤维等，以及未经浸渍处理的云母、陶瓷、石英等材料或其组合物所组成的绝缘，C 级绝缘的极限温度应根据不同物理、机械、化学和电气性能确定 |

## 第二节 电力变压器绝缘

变压器的绝缘质量以及运行中对绝缘的维护,对变压器的安全可靠运行的影响十分巨大。在变压器发生的事故中,相当大的部分是由于绝缘问题而造成的。因此,认真而正确地解决变压器的绝缘问题,是保证电力系统安全可靠运行的重要课题。

### 一、电力变压器绝缘的分类

电力变压器的绝缘可以分为外绝缘和内绝缘两大类,一般将变压器油箱(对油浸式变压器而言)以外的绝缘称为外绝缘,对油箱以内的绝缘称为内绝缘(包括绝缘油和浸在油里的纸和纸板等)。外绝缘包括套管本身和同相或异相套管间及套管对地绝缘。内绝缘包括绕组绝缘和分接开关绝缘。其中绕组绝缘又分为主绝缘(对地和高低压绕组间和相间绝缘)和纵绝缘(层间和匝间绝缘)。

### 二、电力变压器主绝缘的结构型式

电力变压器按冷却介质不同可分为油浸式变压器(用变压器油冷却)、干式变压器(用空气冷却)和 $\text{SF}_6$ 变压器(用 $\text{SF}_6$ 气体冷却)。目前,电力系统中大部分是油浸式变压器,而干式变压器和 $\text{SF}_6$ 变压器仅占一小部分。为此,本节以油浸式变压器为代表,对变压器的绝缘作一说明,对干式和 $\text{SF}_6$ 变压器仅作简要的介绍。

从上述可知,变压器绕组间及绕组对铁芯柱间的绝缘、绕组对铁轭的绝缘、高低压绕组相间绝缘都属于变压器的主绝缘,其结构示意图如图 1-2 所示。

#### 1. 绕组间及绕组对铁芯柱间的绝缘

油浸式变压器的主绝缘用的是油和屏障合成的绝缘,采用的是绝缘纸板压制的垫、筒、角环等(用绝缘漆粘合);纵绝缘是由电缆纸外包在导线上而成,也经过浸渍处理;引线绝缘往往用

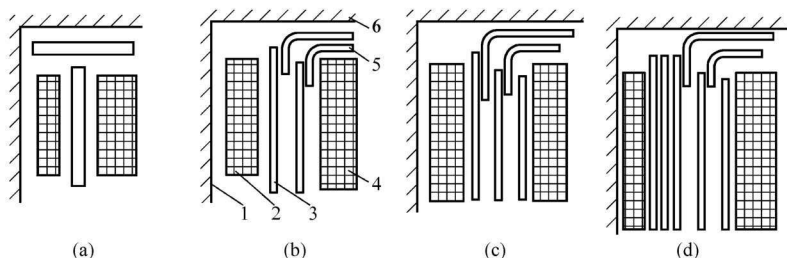


图 1-2 油浸式电力变压器主绝缘结构示意图

(a) 35/85kV; (b) 110/220kV; (c) 220/400kV; (d) 500/700kV

1—铁芯；2—低压绕组；3—纸筒；4—高压绕组；5—角环；6—铁轭

黄蜡布带组成。由图 1-2 可见，电压等级越高，纸筒数目就越多，油隙分得就越细，其电气强度就越高。

## 2. 绕组对铁轭的绝缘

这部分绝缘是主绝缘的薄弱环节，由于绕组的端部电场对绝缘表面同时存在垂直分量和切向分量，容易发生电晕和滑闪放电，这将造成绕组对铁轭的击穿。因此，这部分的绝缘距离要大得多，并用纸角环将油道分隔开（见图 1-2）。

## 三、全绝缘变压器和分级绝缘变压器

《预规》规定电力变压器分为全绝缘变压器和分级绝缘变压器两类，它们的交流耐压试验的方法是不同的。所谓全绝缘变压器（如 10、35kV 配电变压器），是指变压器从绕组的首到尾的绝缘水平是一样的；而 110kV 及以上的电力变压器，由于采用了中性点直接接地的方式，对中性点的绝缘水平要求就降低了，从绕组的首到尾的绝缘水平也不一样了，这种变压器称为分级绝缘变压器。

## 四、干式变压器和 SF<sub>6</sub> 变压器的绝缘

《预规》提到了干式变压器和 SF<sub>6</sub> 变压器的试验问题，由于这两种变压器和油浸式变压器在结构和冷却介质上的不同，其试验项目也不相同。

现代的干式变压器是采用较先进的结构和工艺制成的。其高

压绕组通常用绝缘铜线绕制，在真空下用环氧树脂进行浇注，绕组具有高的介电性能和低的局部放电水平。低压绕组以优质铜箔绕制而成，在短路时实现零轴向短路应力，绕组层间和端部用F级热固性环氧预浸布绝缘。由于冷却介质的原因，干式变压器一般最大容量到15 000 kVA，最高电压到35kV。

SF<sub>6</sub>变压器是一种新型变压器，其特点是绕组采用各种饼式和箔式绕组。高低压绕组之间，绕组对地间的主绝缘的绝缘强度主要取决于SF<sub>6</sub>气体的绝缘强度，用高机械强度和绝缘能力的高密闭性塑料薄膜作为铜线的绝缘包布。

### 第三节 旋转电机绝缘

《预规》中提到的旋转电机有同步发电机、直流电机、交流电动机和中频发电机，这些电机都属于旋转电机的一部分，在绝缘结构上有共同点。由于旋转电机有高速旋转部分，不可能像变压器那样全浸在绝缘油中，其电气强度就因受到了气体的影响而降低。在运行中，绕组长期受到交流工作电压的作用，容易发生局部放电。同时，绕组还受到电动力的作用和机械振动，其绝缘就容易发生松动、变形、老化，直至损坏。

#### 一、旋转电机的绝缘

旋转电机的绝缘一般可分为主绝缘、匝间绝缘、股间绝缘和层间绝缘。主绝缘是指绕组对机身和其他绕组间的绝缘，也称对地绝缘；匝间绝缘是指同一绕组的各线匝之间的绝缘；股间绝缘是指并联导线各股导线间的绝缘；层间绝缘是指绕组上下层之间的绝缘。

#### 二、旋转电机绕组绝缘结构型式

##### 1. 定、转子绕组绝缘

旋转电机的结构主要分为定子和转子两部分，定、转子分别由铁芯和绕组所组成。定子绕组是由许多线圈（或线棒）连接而成，每个线圈由铜线绕制并包以绝缘。其直线段放在铁芯

槽内，端部由绕组支架固定。转子绕组则用宽导线外包绝缘后绕在转子铁芯槽内。图 1-3 和图 1-4 分别为气外冷电机和水内冷电机的定子绕组的槽部绝缘结构，图 1-5 为转子绕组的槽部绝缘结构。

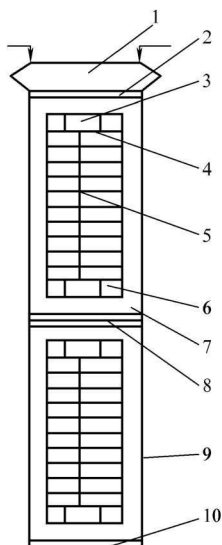


图 1-3 气外冷电机定子绕组槽部绝缘结构

1—槽楔（环氧玻璃布板，压塑料）；2、8、10—垫条（半导体环氧布板）；3—导线；4—换位垫条；5—排间绝缘；6—填充物；7—对地绝缘；9—防晕层

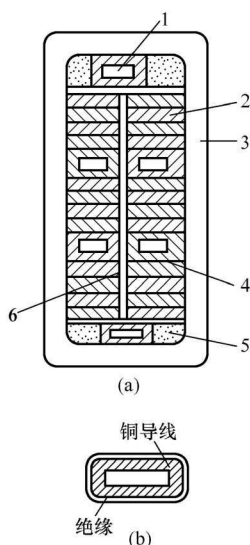


图 1-4 水内冷电机定子绕组槽部绝缘结构

1—空心导线；2—实心导线；3—对地绝缘；4—绝缘垫条；5—填充物；6—排间垫条

图 1-6 和图 1-7 分别为旋转电机定、转子绕组的端部绝缘结构。

对于水轮发电机，其定子绕组绝缘与气外冷电机的定子绕组绝缘相似。但其转子绕组与汽轮发电机的转子绕组不同，是属于凸极式转子，由磁极、励磁绕组、阻尼绕组、磁轭、转子支架、轴等部件组成，如图 1-8 所示。