



高等学校教材

# 发电机冷却介质

东北电力学院 张警声 主编

0.14



## 前 言

本书是根据能源部制定的应用化学专业 1993~1995 年高校教材编审出版计划编写的，作为电厂应用化学专业“发电机冷却介质”课程的教材。

全书共分为六章。第一、三章由东北电力学院张警声编写；第二章由上海电力学院丁桓如编写；第四、五、六章由东北电力学院田明原编写。张警声担任主编。

本书承武汉水利电力大学李培元主审，他提出了许多宝贵意见，对此，深表感谢。限于水平和时间仓促，书中错误和不妥之处在所难免，恳切希望读者批评指正。

编 者

1994 年 7 月

# 目 录

## 前 言

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 第一章 汽轮发电机的冷却介质概述 .....       | 1  |
| 第一节 汽轮发电机的冷却方式 .....         | 1  |
| 第二节 冷却介质对温升的影响 .....         | 2  |
| 第三节 冷却介质的性能比较及对冷却过程的作用 ..... | 4  |
| 第四节 氢气的防电晕性能 .....           | 8  |
| 第二章 水内冷发电机的冷却水及其控制 .....     | 10 |
| 第一节 水内冷发电机结构简介 .....         | 10 |
| 第二节 发电机冷却水水质控制原理 .....       | 18 |
| 第三节 发电机冷却水水质控制 .....         | 30 |
| 第三章 发电机的氢控系统 .....           | 39 |
| 第一节 气体冷却器 .....              | 39 |
| 第二节 气体系统 .....               | 41 |
| 第三节 氢气参数的控制 .....            | 44 |
| 第四节 氢气泄漏的有关计算 .....          | 53 |
| 第四章 氢气的制取 .....              | 57 |
| 第一节 电解水制氢的原理 .....           | 57 |
| 第二节 制氢装置 .....               | 61 |
| 第三节 制氢设备的运行与维护 .....         | 68 |
| 第四节 制氢站的安全管理 .....           | 71 |
| 第五章 氢冷发电机的气体置换 .....         | 73 |
| 第一节 氢冷发电机的置换系统 .....         | 73 |
| 第二节 氢冷发电机的气体置换 .....         | 73 |
| 第六章 气体分析 .....               | 76 |
| 第一节 气体纯度的分析 .....            | 76 |
| 第二节 氢气湿度的分析 .....            | 80 |
| 主要参考文献 .....                 | 82 |

# 第一章 汽轮发电机的冷却介质概述

## 第一节 汽轮发电机的冷却方式

### 一、汽轮发电机的损耗

发电机运转时要发生能量损耗，这是由机械能转变为电能时不可避免的。这些损耗了的能量最后都变成了热量，致使发电机的转子、定子等各部件温度升高。因为发电机的部件都是由铜质和铁质材料制成的，所以把这种能量损耗叫做铜损和铁损。为了保证发电机能在绕组绝缘材料允许的温度下长期运行，必须及时地把铜损和铁损所产生的热量导出，使发电机各主要部位的温升经常保持在允许的范围内。否则，发电机的温度会继续升高，使绕组绝缘老化，出力下降，甚至烧毁，影响发电机的正常运行。因此，除了采用耐热性能好的绝缘材料外，还必须采取冷却措施，连续不断地将发电机产生的热量导出，这就需要强制冷却。由气体冷却系统排出的汽轮发电机的热量损耗，可分为电气损耗（铜损和铁损）和通风损耗（风扇和气体系统的损耗及转子和气体相互摩擦的损耗）两部分。

### 二、发电机常用的冷却介质

随着电网容量的不断增长，要求发电机单机容量相应增大，这就促进了发电机冷却技术的发展，只有采用优良的冷却介质和先进的冷却技术，才能制造出材料少、外形尺寸小、投资低及运行经济的大型发电机。

目前，发电机所用的冷却介质主要有以下几种：

#### 1. 空气

当前容量小（25MW 及以下）的发电机多采用空气冷却，使空气由发电机内部通过，将热量导出。这种方式冷却能力小，摩擦损耗大，当机组容量增大时，各种损耗产生的热量增多，需要冷却的空气量相应增大。因此，空冷发电机的尺寸需要设计得很大。目前，随着发电机容量的增大，空冷发电机已经逐渐被淘汰。

#### 2. 氢气

氢气的热导率是空气的 6 倍以上，而且它是最轻的气体，对发电机转子的阻力最小，所以大型发电机广泛采用氢气冷却方式，即将氢气密封在发电机内部进行循环，循环的氢气再由另设的冷却器通水冷却。氢气冷却又可分为氢气与铜导线直接接触的内冷式（直接冷却）和氢气不直接与铜导线接触的外冷式两种。定子、转子都采用氢气直接冷却的汽轮发电机的单机容量可达到 1000MW 左右。

当然，采用氢气冷却也会带来一些新的问题。因为氢冷需要有严密的发电机外壳、气体系统及不漏氢的轴密封，需增设油系统和制氢设备，在运行技术和保安上都要求很高，这些都给制造、安装和运行带来一定的困难。

### 3. 水

把发电机转子和定子绕组线圈的铜线做成空心的,运行中高纯水通过铜线内部,带出热量,使发电机冷却,这种冷却方式较空冷效果好,但增加了水路系统,设备比空冷的复杂,还需要经常地监视水质。用水作为冷却介质还有两个缺点:容易腐蚀铜线和可能漏水;运行可靠性降低。

当前,功率超过 50MW 的汽轮发电机都广泛地采用氢气冷却及氢、水混用冷却方式。

### 4. 油

直接冷却除了采用氢气和作为冷却介质外,粘度低、导热性高的绝缘油也可以作为冷却介质对发热体进行直接冷却。原苏联新西伯利亚厂曾经把定子油冷、转子水冷、定子铁芯油冷的“油-水-油”冷却方式作为重点发展方向。定子铁芯油冷却方式简便,油的绝缘性能好,这比水冷优越,但在运行中有可能发生火灾,因此,油冷的普及性受到一定限制。

## 第二节 冷却介质对温升的影响

提高汽轮发电机单机容量的最好的途径就是改善冷却。自从用冷却性能好的氢和水代替了空气,用先进的直接冷却取代了表面冷却以后,汽轮发电机的单机容量有了显著的提高。

### 一、热传递的三种基本方式

#### 1. 热传导

热传导简称导热。其机理是物体各部分之间不发生相对位移,依靠分子、原子及自由电子等微观粒子的热运动进行热量传递。

固体的热传递方式是导热;液体和气体因具有流动的特性,它们的热传递方式,除了导热,主要是热对流。

法国数学家傅立叶总结固体导热的实践经验,提出了平壁中的导热公式:

$$\Phi = \lambda A \frac{\Delta T}{\delta} \quad (1-1)$$

式中  $\Phi$ ——热流量,单位时间的导热热量, W;

$A$ ——垂直于导热方向的截面积,  $\text{m}^2$ ;

$\delta$ ——平壁厚度, m;

$\lambda$ ——材料的热导率(导热系数),  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;

$\Delta T$ ——平壁两边的温度差, K。

由式(1-1)可知,单位时间内的导热热量(热流量)与热导率、截面积和温度差成正比。热导率是表征材料导热性能优劣的参数。不同材料的热导率值不同,即使是同一材料,热导率值还与温度等因素有关。这里仅指出,金属材料的热导率最高;液体次之;气体最小。

#### 2. 热对流

随着流体不同部分的相对位移,热量从一处被带到另一处的现象,称为热对流。热对流仅能发生在流体中,而且必然伴随有导热现象。工程上常遇到的不是单纯的热对流方式,

而是流体流过另一物体表面时，热对流和导热现象同时发生，称为对流传热。对流传热可区分为自然对流与强制对流两大类。自然对流是由流体冷、热各部分密度不同引起的。如果流体的流动是由水泵、风机或其他压差作用引起的，则称为强制对流。

对流传热的基本计算公式是牛顿冷却定律公式：

$$\Phi = \alpha A(T_w - T_f)$$

式中  $\Phi$ ——热流量，单位时间内的对流传热量，W；

$A$ ——与流体接触的壁面面积， $m^2$ ；

$\alpha$ ——对流传热系数， $W/(m^2 \cdot K)$ ；

$T_w$ ——壁面温度，K；

$T_f$ ——流体平均温度，K。

如果把温差（亦称温压）记为  $\Delta T$ ，并约定取正值，则牛顿冷却定律公式可表示为：

$$\Phi = \alpha A \Delta T \quad (1-2)$$

对流传热系数简称为传热系数。传热系数不仅取决于流体的物性以及传热表面的形状与布置，而且还与流速有密切的关系。

### 3. 热辐射

物体通过电磁波来传递能量的方式称为辐射。物体因各种原因发出辐射能，其中传递热量的辐射现象称为热辐射。

实验表明，物体的温度愈高，辐射能力愈强。温度相同而物体性质和表面情况不同，辐射能力也不同。

理想的辐射体，或称黑体，在单位时间内所发射的辐射能通量  $\Phi$  为：

$$\Phi = \sigma A T^4 \quad W \quad (1-3)$$

式中  $A$ ——物体的辐射表面积， $m^2$ ；

$T$ ——黑体的热力学温度，K；

$\sigma$ ——斯成藩-玻尔兹曼常数，其值为  $5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$ 。

一切实际物体的辐射能力都小于同温度下黑体的值。应指出式（1-3）中的  $\Phi$  也是物体自身向外辐射的热流量。

## 二、表面冷却对温升的影响

从发热体到入口冷却介质的热量传递过程中，各个环节所包含的传热方式可作如下分析：

发热体(铜导体)  $\xrightarrow{\text{导热}}$  绝缘材料  $\xrightarrow{\text{导热}}$  绝缘材料外表面  $\xrightarrow{\text{对流传热}}$  冷却气流。根据散热方式的不同，可分为三个温差段。

### 1. $\Delta T_1$

根据式（1-1），在绝缘材料上的温差为：

$$\Delta T_1 = \frac{\Phi \delta}{A \lambda} \quad (1-4)$$

### 2. $\Delta T_2$

根据式（1-2），冷却介质的平均温度相对绝缘表面温差为：

$$\Delta T_2 = \frac{\Phi}{A\alpha} \quad (1-5)$$

### 3. $\Delta T_3$

从入口到出口的整个风道上，冷却介质要吸热。冷却介质吸收热量  $\Phi$  后，它能升高的温度是：

$$\Delta T_3 = \frac{\Phi}{c\rho q_v} \quad (1-6)$$

式中  $c$ ——流体的比热容，J/(kg·K)；

$\rho$ ——流体的密度，kg/m<sup>3</sup>；

$q_v$ ——流体的体积流量，m<sup>3</sup>/s。

在表面冷却方式下，出口处的发热体相对入口冷却介质的温差  $\Delta T$  为上述三段温差之和，即

$$\Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2 + \Delta T_3 \quad (1-7)$$

一般来讲， $\Delta T_1 = 30\text{K}$ ； $\Delta T_2 = 15\text{K}$ ； $\Delta T_3 = 20\text{K}$ 。由上述数据可知，绝缘材料上的温差  $\Delta T_1$  是最大的，随着单机容量和电压等级的提高，热损耗  $\Phi$  和绝缘层的厚度  $\delta$  都要增大，而机组的尺寸，也就是散热的表面积  $A$  增大很小，故该项温差将会明显上升，其值可能达到总温差的 60%~70%。这就给大容量机组的制造带来了困难。为此，产生了先进的直接冷却方式。

### 三、直接冷却对温升的影响

在直接冷却中，冷却介质是在发热体内部与发热体直接接触的，发热体的热损耗基本上不再通过绕组的绝缘层消失，而是通过对流表面散掉，再由冷却介质带走。这样，占比例很大的绝缘温差就消失了。在式 (1-7) 中只剩下  $\Delta T_2$  和  $\Delta T_3$  两项。

在氢内冷的情况下，冷却介质进入冷却沟时的温度与一般所测量的发电机入口风温（即经过冷却器后的冷风温度）有一定之差。如果把这部分温差用  $\Delta T'_3$  表示，则发热体终端处与冷却介质的入口风温之间的温升为：

$$\Delta T = \Delta T'_3 + \Delta T_3 + \Delta T_2 \quad (1-8)$$

对于水内冷发电机， $\Delta T'_3 = 0\text{K}$ ；对于气隙取气的氢内冷发电机， $\Delta T'_3$  为气隙中冷风区的气体的温升， $\Delta T'_3 = 8 \sim 15\text{K}$ ；对于端部取气的氢内冷发电机， $\Delta T'_3$  为护环下的气体温升， $\Delta T'_3 = 5 \sim 10\text{K}$ 。

必须指出，由于绕组的散热情况比较复杂，往往同时从几个途径散出，所以定量的计算公式还是比较复杂的，公式 (1-7)、(1-8) 只是定性的、供分析用的式子。

## 第三节 冷却介质的性能比较及对冷却过程的作用

### 一、气体冷却介质的主要特性及其冷却效果

#### (一) 几种气体的主要特性

氢冷发电机在正常运行时，使用氢气作为冷却介质。在发电机发生事故及停机检修时，

则用空气作为冷却介质，而  $\text{CO}_2$  或者  $\text{N}_2$  则是用作气体置换时的中间介质。

下面把氢气、二氧化碳和氮气的特性参数对空气的相对值列成表 1-1，表中所列的传热系数是指冷却气体处在层流情况下的数值，如系紊流情况，数值要大一些。

表 1-1 氢气、二氧化碳和氮的特性参数对空气的相对值

| 气体的特性                  |             | 空气 | 氢气     | 二氧化碳  | 氮气    | 备 注         |
|------------------------|-------------|----|--------|-------|-------|-------------|
| 热导率 $\lambda$          |             | 1  | 6.69   | 0.638 | 1.08  | 在标准状况下纯净的气体 |
| 密度 $\rho$              |             | 1  | 0.0696 | 1.52  | 0.966 |             |
| 从散热表面到气体的传热系数 $\alpha$ |             | 1  | 1.51   | 1.132 | 1.03  |             |
| 比热容 $c$                | 比定容热容 $c_v$ | 1  | 0.996  | 1.29  | 1.02  | 根据摩尔比热容计算   |
|                        | 比定压热容 $c_p$ | 1  | 14.3   |       |       |             |

## (二) 气体冷却介质的冷却效果

### 1. 氢气和空气比较

(1) 冷却介质对提高效率的作用。通风损耗的大小决定于冷却介质的密度。冷却介质越轻，损耗也越小。从表 1-1 可知，氢气的密度是空气的 6.96%，因此，如果使用纯氢气作为冷却介质，通风损耗可以减少到用空气时的损耗的 6.96%。然而，通常在使用时，氢气中常混杂有其他气体。在这种情况下，通风损耗一般只能减少到用空气时的 8.9%~10.7%。通风损耗减少的结果是，式 (1-7) 中的各项温差大为降低。如果维持容量不变，根据计算，氢冷发电机的效率可以提高 0.8%~1.15%。

(2) 冷却介质对于改善冷却效果的作用。从表 1-1 可知，纯氢气的表面传热系数是空气的 1.51 倍（发电机机壳内的混合气体表面传热系数大约是空气的 1.35 倍）。传热系数  $\alpha$  越大，在相同的温差下所交换的热量越多。使用氢气作为冷却介质在绝缘表面上的对流传热较用空气的强烈，因此降低了式 (1-7) 中的温升  $\Delta T_2$ ，提高了冷却效果。

热导率  $\lambda$  是衡量物质导热能力的重要指标。从表 1-1 中可知，氢的热导率分别为空气、二氧化碳、氮气的 6.69 倍、10.5 倍、6.2 倍。在气体中，氢气的导热能力最好。须指出的是，冷却介质热导率的大小对式 (1-7) 中的  $\Delta T_1$  没有影响。具有内热源的导热，发热体的热导率随着外表面的传热系数增大而增大。所以，用氢气代替空气作为冷却介质后，一方面提高了绝缘材料本身的导热能力（据资料介绍，定子的云母绝缘材料在氢气中的热导率要比在空气中的热导率提高 1.1 倍，转子的绝缘材料的导热系数要提高 1.25 倍），另一方面还使绝缘层间的间隙导热能力提高，从而有利于提高发电机的冷却效果。表 1-2 是发电机用空气和氢气冷却的温度数据。

从表 1-2 看出，发电机从空冷改用氢冷以后，冷却介质的温度差从 30K 降到 19K（一般降低 10~15K），而静子铁和线圈铜导线的温差则从 90~95K 降到 70K（一般降低 15K~20K）。由于氢气的传热系数大，导热能力强，可以散出更多的热量，因此若维持设备同样尺寸和额定温升不变，同是表面冷却氢冷发电机的出力可以提高 25% 左右。

表 1-2

发电机用空气和氢气冷却时的温度数据

| 冷却介质 | 发电机出力<br>(MW) | 转子电流<br>(A) | 入口风温<br>(°C) | 出口风温<br>(°C) | 冷却介质的温度差<br>(°C) | 静子铜铁的温度<br>(°C) |
|------|---------------|-------------|--------------|--------------|------------------|-----------------|
| 空气   | 77            | 500         | 36.0         | 66.0         | 30.0             | 90~95           |
| 氢气   | 85            | 575         | 32.0         | 51.0         | 19               | 70              |

## 2. 二氧化碳和空气比较

二氧化碳的密度是空气的 1.52 倍,因而通风损耗也成比例增加;二氧化碳的表面传热系数是空气的 1.132 倍,而且还有较高的强行对流作用,二氧化碳的这两种特性有利于散热。但二氧化碳的热导率仅是空气的 0.638 倍,导热能力弱。综合之,空气冷却和二氧化碳冷却对发电机的温升影响基本是一样的。

二氧化碳能与机壳内部的水分进行化合,其反应的生成物在机壳内各部分结成绿垢,从而使通风恶化和机件脏污,对绝缘材料有腐蚀作用。所以,不允许使用二氧化碳作为冷却介质长时间运行,但可以利用二氧化碳与氢气或空气混合时不会发生爆炸的特点,把它作为气体置换的中间介质。

## 3. 氮气和空气比较

氮气的密度、热导率以及表面传热系数都和空气的接近,所以氮气作为冷却介质使用时,允许的最大负荷值与空气冷却时的相同。另外,氮气比空气轻,并且有不助燃的特点,一般都是用来代替二氧化碳作为中间介质使用。氮气用作发电机的冷却介质是不恰当的,原因是作为化工副产品的氮气中含有腐蚀性的杂质,对发电机的绝缘材料起腐蚀作用。

表 1-3 对流传热系数  
[W/(m<sup>2</sup>·K)]范围

|        |            |
|--------|------------|
| 空气自然对流 | 3~10       |
| 水自然对流  | 200~1000   |
| 水强制对流  | 1000~15000 |

## 二、水和空气冷却性能的比较

表 1-3 中给出了水和空气的对流传热系数范围。

从表 1-3 中数据可以看出,水比空气有更好的冷却性能。再者,水的漏电损耗是极小的,例如,在容量 300MW、24kV 汽轮发电机中,凝结水内热损耗小于定子铜热损耗的 0.1%。用凝结水冷却时,汽轮发电机热损耗

的 90%可以通过凝结水回至锅炉,从而使整个机组效率提高。因此,用水直接冷却发电机的绕组可以提高发电机绕组的电流密度,从而缩小发电机的尺寸,降低材料消耗和减轻发电机重量。

## 三、水和氢气的主要特性及冷却效果

### 1. 水和氢气的主要特性参数

汽轮发电机在采用直接冷却方式时,普遍用氢气和水作为冷却介质。水和氢气的主要特性参数列于表 1-4 中。

表 1-4

水和氢气的主要特性参数

| 名 称 | 状 态       |                | 定压比热容 $c_p$<br>[J/(kg · K)] | 密度 $\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) |
|-----|-----------|----------------|-----------------------------|-----------------------------------|
|     | 温度<br>(℃) | 绝对大气压<br>(MPa) |                             |                                   |
| 水   | 15        | 0.1            | $4.2 \times 10^3$           | 0.9987                            |
| 氢气  | 15        | 0.1            | $14 \times 10^3$            | $0.076 \times 10^{-3}$            |

## 2. 水和氢气的冷却效果比较

水的导热能力对氢气的相对值列于表 1-5 中。

表 1-5

水的导热能力对氢气的相对值

| 冷却介质 | 绝对压力<br>(MPa) | 吸热能力   |       | 散热能力     |        |
|------|---------------|--------|-------|----------|--------|
|      |               | 相对体积流量 | 相对吸热量 | 流速 (m/s) | 相对传热系数 |
| 氢气   | 0.3           | 1      | 1     | 40       | 1      |
| 水    | —             | 0.05   | 69.3  | 2        | 16.8   |

公式 (1-8) 表明, 表面温升  $\Delta T_2$  与冷却介质的表面传热系数  $\alpha$  有关。从表 1-5 中可知, 水的表面传热系数约为氢气的 17 倍, 因此对于降低表面温差  $\Delta T_2$ , 水内冷的效果更优越。

从式 (1-6) 可知, 在热损耗  $\Phi$  和冷却介质的流量  $q_v$  一定的情况下, 介质本身的温升  $\Delta T_3$  与冷却介质的定压比热  $c_p$ 、密度  $\rho$  成反比。从表 1-4 算出, 氢气的  $\rho \cdot c_p = 1.064$ ; 水的  $\rho \cdot c_p = 4.19$ 。可见, 氢内冷并不比水优越。但要考虑冷却介质的流速, 例如在转子线圈中, 氢气的流量是水的流量的 6 倍左右, 这样,  $\frac{\Delta T_3 (\text{氢})}{\Delta T_3 (\text{水})} = \frac{4.19 \times 1}{1.064 \times 6} = 0.65$ , 显而易见, 氢气在降低介质本身的温差上比水优越。

## 四、绝缘油和其他冷却介质导热性能的比较

用绝缘油 (变压器油) 作为发电机冷却介质时, 发电机的定子线圈、铁芯及其他构件均浸在变压器油中, 转子冷却用蒸馏水。表 1-6 列出变压器油和其他冷却介质导热性能的 (以相对值表示) 比较。表中所取的氢气和空气的流量是相同的, 变压器油的流量为气体流量的 1/85, 而水的流量是气体流量的 1/30, 这些数据均符合于导体内部冷却时的实际数值。

表 1-6

变压器油和其他冷却介质导热性能的比较

| 冷却介质        | 相对热容  | 相对密度 | 相对实际流量<br>(按体积计) | 相对导热能力 | 单位表面的相对<br>传热系数 |
|-------------|-------|------|------------------|--------|-----------------|
| 空气 (0.1MPa) | 1.0   | 1.0  | 1.0              | 1.0    | 1.0             |
| 氢气 (0.1MPa) | 14.35 | 0.07 | 1.0              | 1.0    | 1.5             |
| 氢气 (0.3MPa) | 14.35 | 0.21 | 1.0              | 3.0    | 3.6             |
| 变压器油        | 1.65  | 848  | 0.0118           | 16.5   | 2.0             |
| 水           | 3.75  | 1000 | 0.0333           | 125.0  | 60.0            |

从表 1-6 可知,变压器油具有较高的导热性。变压器油还有很高的绝缘性,适用于冷却高压定子绕组。但变压器油有很大的粘度(变压器油在 20℃时的运动粘度为 30mm<sup>2</sup>/s 左右,50℃时为 9.6mm<sup>2</sup>/s),这个性能对冷却是不利的,因为在实际采用的流速下,油的运动为层流,造成表面传热比较困难,在铜体和油之间产生较高的温度降。为此,必须采取必要的措施降低变压器油的粘度(例如,在油中加降粘剂等)。还应该指出,在冷却系统压力一定的条件下,粘度大会使油的流速降低,影响冷却效果。

水和油相比,纯水有较高的绝缘性,它的最大优点是有较大的热容量。此外,在实际允许的流速下,水的粘度小,其流动是紊流,这使表面易于传热,从而保证铜丝与水之间的温度降很小。

## 第四节 氢气的防电晕性能

### 一、电晕的概念

在带电导体的尖角处,由于电力线密集,电场不均匀,局部过强,使附近的空气发生游离,这时中性的原子变成带负电的电子和带正电的原子核,围绕该尖角处,形成蓝色的光圈,这种现象叫电晕。

### 二、发电机中容易产生电晕的部位

(1) 线棒的出槽处。线棒导体与边端铁芯间有集中的电力线,它们好象一个电容器,线棒导体和边端铁芯相当于电容器的两个极板,线棒绝缘和空气相当于电容器极板间的介质,两极间有很强的电场。

(2) 定子铁芯的通风沟处。该处电力线密集于硅钢片的边角上。

(3) 绝缘内部的气隙中。由于制作工艺的影响,云母层间可能留有气隙。因为两种绝缘物串联,在电场作用下,介电系数大的绝缘物,其电场强度较弱;介电系数小的绝缘物,其电场强度较强。空气的介电系数比云母和其他绝缘物的介电系数小,故空气部分所加的电场强度比其他部分的强,在强电场的作用下,气隙中的空气易产生电晕。

(4) 线棒绝缘表面和定子铁芯之间的气隙内。

(5) 线棒端部与端箍包扎处,以及不相同的线棒之间。

### 三、电晕对电机的危害

(1) 电晕易产生酸性物质。电晕使空气游离产生臭氧 O<sub>3</sub>,而臭氧和空气中的氮化合,生成一氧化二氮 N<sub>2</sub>O。N<sub>2</sub>O 和空气中的水化合生成硝酸或亚硝酸。酸性物质会腐蚀金属和绝缘材料,并使其表面产生绿色化合物,影响散热;还会使绝缘材料变成白色物附着于线棒的表面;酸性物长期作用还会使云母变脆。

(2) 电晕消耗电能。

(3) 电晕使其周围产生带电的离子。当电机过电压时,绝缘材料易被击穿。

电晕的产生是人们所不希望的,根据运行经验,对于 6.3kV 的电机应采取防电晕措施。

### 四、氢气的防电晕性能

氢气具有防电晕性能,并不是因为它的起晕电压高,而是因为它的纯度高,其中的氧

气和氮气含量很少，即使在起晕后，也不容易产生臭氧和氮的氧化物。因此，在氢冷发电机中，绝缘材料的电腐蚀和受损程度都比较小。值得一提的是，由于氢冷发电机的绝缘耐压试验都是在不充氢的情况下进行的，故对其防电晕结构，一般仍按空冷发电机来考虑。

氢气电离时，不仅不会产生对绝缘材料有害的气体，而且在较高的氢压下运行的电机，其内部的起晕电压也将随着氢压而升高。

## 第二章 水内冷发电机的冷却水及其控制

### 第一节 水内冷发电机结构简介

#### 一、水内冷发电机组概况

1958年我国生产了世界上第一台双水内冷汽轮发电机，目前已形成50MW、100MW、125MW、200MW、300MW的水内冷汽轮发电机组系列，水内冷汽轮发电机组已成为我国电力工业的主要机型。

采用水作为冷却介质的汽轮发电机组一般有如下三类冷却方式：

- (1) 定子绕组水内冷，转子绕组氢内冷，铁芯氢冷的水-氢-氢类；
- (2) 定子绕组水内冷，转子绕组水内冷，铁芯氢冷的水-水-氢类；
- (3) 定子绕组水内冷，转子绕组水内冷，铁芯空冷的水-水-空类。

目前国内外的200~1000MW大型机组，较为广泛地采用第(1)类冷却方式，这种冷却方式可避免转子绕组采用水冷却而引起的结构复杂性。国内部分机组也有采用第(3)类冷却方式的，这主要是因为国内转子水冷技术比较成熟。目前常见的国产机组及部分国外机组的冷却方式列于表2-1。

表 2-1 部分国产及国外水冷却汽轮发电机概况

| 生产厂及<br>型号*  | 哈尔滨电机厂        |                |                | 东方电<br>机 厂<br>QFQS-<br>200-2 | 上海电机厂        |              |               |               | 北京重<br>型电机<br>厂<br>SQF-<br>100-2 | 意大利   | 法国    | 日本    | 原苏联   |
|--------------|---------------|----------------|----------------|------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|              | TQN-<br>100-2 | QFSS-<br>200-2 | QFQS-<br>200-2 |                              | QFS-<br>50-2 | QFS-<br>60-2 | QFS-<br>125-2 | QFS-<br>300-2 |                                  |       |       |       |       |
| 项目           | 100-2         | 200-2          | 200-2          | 200-2                        | 50-2         | 60-2         | 125-2         | 300-2         | 100-2                            | 320   | 300   | 250   | 210   |
| 额定容量<br>(MW) | 100           | 200            | 200            | 200                          | 50           | 60           | 125           | 300           | 100                              | 320   | 300   | 250   | 210   |
| 额定电压<br>(kV) | 10.5          | 15.75          | 15.75          | 15.75                        | 10.5         | 10.5         | 13.8          | 18            | 10.5                             | 20    | 15    | 15    | 15.75 |
| 额定电流<br>(A)  | 6475          | 8625           | 8625           | 8625                         | 3440         | 4125         | 6150          | 11320         | 6470                             | 10868 | 14170 | 11321 | 9050  |
| 冷却方式         |               |                |                |                              |              |              |               |               |                                  |       |       |       |       |
| 定子           | 氢外            | 水内             | 水内             | 水内                           | 水内           | 水内           | 水内            | 水内            | 水内                               | 水内    | 水内    | 水内    | 水内    |
| 转子           | 氢内            | 水内             | 氢内             | 氢内                           | 水内           | 水内           | 水内            | 水内            | 水内                               | 氢内    | 氢内    | 氢内    | 氢内    |
| 铁芯           | 氢             | 空              | 氢              | 氢                            | 空            | 空            | 空             | 空             | 空                                | 氢     | 氢     | 氢     | 氢     |
| 定子外径<br>(cm) | 240           | 227.5          | 227.5          | 227.5                        | —            | —            | 235           | 240           | 214                              | 246.5 | 264   | —     | —     |

续表

| 生产厂及<br>型号                    | 哈尔滨电机厂        |                |                | 东方电<br>机 厂<br>QFQS-<br>200-2 | 上海电机厂        |              |               |               | 北京重<br>型电机<br>厂<br>SQF-<br>100-2 | 意大利   | 法国   | 日本          | 原苏联   |
|-------------------------------|---------------|----------------|----------------|------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|----------------------------------|-------|------|-------------|-------|
|                               | TQN-<br>100-2 | QFSS-<br>200-2 | QFQS-<br>200-2 |                              | QFS-<br>50-2 | QFS-<br>60-2 | QFS-<br>125-2 | QFS-<br>300-2 |                                  |       |      |             |       |
| 定子内径<br>(cm)                  | 112.8         | 115            | 115            | 115                          | —            | —            | 114           | 126           | 104                              | 120.4 | 132  | 121.9       | 127.5 |
| 转子外径<br>(cm)                  | 100           | 100            | 100            | 101                          | —            | —            | 100           | 110           | 91                               | 104   | 115  | 104.1       | 107.5 |
| 满载励磁<br>电压 (V)                | 271           | 384            | 445            | 453                          | 196          | 225          | 265           | 483           | 245                              | 379   | 304  | 440         | 420   |
| 满载励磁<br>电流 (A)                | 1614          | 1605           | 1763           | 1749                         | 1140         | 1310         | 1635          | 1844          | 1398                             | 3005  | 3790 | 2420        | 1930  |
| 氢 压<br>(MPa)                  | 0.2           | —              | —              | 0.3                          | —            | —            | —             | —             | —                                | 0.3   | 0.3  | 0.2~<br>0.3 | —     |
| 定子水压<br>(MPa)                 | —             | —              | 0.15~<br>0.2   | 0.2                          | 0.2          | 0.2          | 0.2           | 0.25          | 0.15                             | 0.13  | —    | —           | —     |
| 转子水压<br>(MPa)                 | —             | —              | —              | —                            | 0.2          | 0.2          | 0.2           | 0.2           | 0.15                             | —     | —    | —           | —     |
| 定子水流<br>量 (m <sup>3</sup> /h) | —             | —              | 35             | —                            | 15           | 15           | 28            | 46            | —                                | —     | —    | —           | —     |
| 转子水流<br>量 (m <sup>3</sup> /h) | —             | —              | —              | —                            | 14           | 13.7         | 27            | 31            | —                                | —     | —    | —           | —     |

\* 国产汽轮发电机型号中第三、四个字母表示冷却方式, 其中, 第三个字母 N 表示氢冷, Q 表示转子氢内冷, S 表示转子水内冷; 第四个字母 S 表示定子水内冷。北京重型电机厂生产的汽轮发电机的型号例外, 它的一个字母 S 表示双水内冷。

## 二、水内冷汽轮发电机的定子绕组及其水冷却系统

### 1. 定子绕组结构形式

大容量汽轮发电机定子绕组大都采用三相双层短矩分布绕组, 每相绕组由若干线圈组成, 每相绕组的线圈在电路上可以是全部串联的, 也可以并联成两路或三路。

大型汽轮发电机定子绕组通常采用叠式绕组, 其端部为篮形。定子绕组内电流大 (比如 300MW 发电机定子电流可达 11320A), 导线内电流密度高, 为了减少导体中由于电流密度分布不均而产生的附加损耗, 常使用多股并联绝缘扁线, 而不采用单根大面积导体, 并且每股扁线在槽内及端部都进行换位。

通常杆式线棒由双排 (或四排) 多股绝缘扁线组成。水内冷发电机线棒采用玻璃丝包扁线和空心裸线组成, 一般由一根空心导线和 2~4 根实心绝缘扁导线组成一组。一根线棒由若干组组成, 空心导线内又通水又导电, 通水用于对线棒进行冷却。

水内冷汽轮发电机定子线棒截面示于图 2-1。

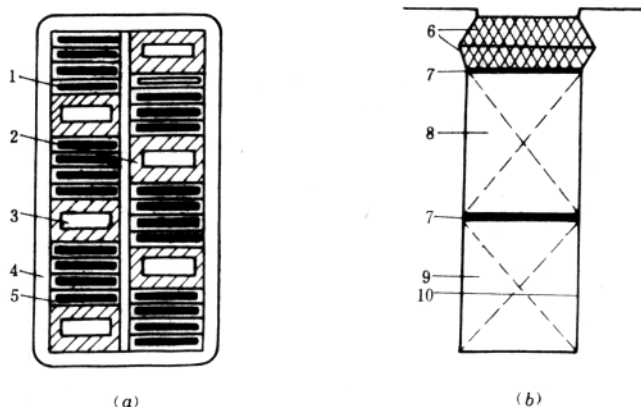


图 2-1 水内冷汽轮发电机定子线棒截面

(a) 线棒断面；(b) 线棒在槽内固定方式

1—实心扁铜线；2—相间绝缘；3—空心铜管；4—主（槽）绝缘；5—股间绝缘；6—槽楔；  
7—半导体垫条；8—上层线棒；9—下层线棒；10—半导体槽衬

水内冷汽轮发电机定子绕组常用的空心铜导线规格尺寸列于表 2-2，空心铜导线材料一般为 2<sup>#</sup>工业纯铜（紫铜），但国外的发电机也有采用不锈钢的，即用薄壁不锈钢管代替空心铜导线，只起通水冷却作用，不导电。

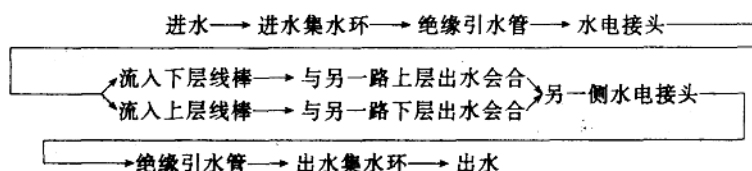
表 2-2 部分国产及国外机组定子导线规格

| 机组              | 冷却方式  | 空心导线 |                                             |                            | 实心导线 |                                           | 组数 |
|-----------------|-------|------|---------------------------------------------|----------------------------|------|-------------------------------------------|----|
|                 |       | 根 数  | 截面积<br>(mm <sup>2</sup> )                   | 内孔面积<br>(mm <sup>2</sup> ) | 根 数  | 截面积<br>(mm <sup>2</sup> )                 |    |
| QFSS-200-2      | 水-水-空 | 6    | 5×9.7                                       | 2×6.3                      | 24   | $\frac{2.26 \times 9.3}{2.66 \times 9.7}$ | 6  |
| QFQS-200-2      | 水-氢-氢 | 6    | 5×9.7                                       | 2×6.7                      | 24   | $\frac{2.26 \times 9.3}{2.76 \times 9.8}$ | 6  |
| QFS-125-2       | 水-水-空 | 6    | 5.6×6.8                                     | 2.6×3.8                    | 24   | $\frac{1.95 \times 6.4}{2.35 \times 6.8}$ | 6  |
| QFS-300-2       | 水-水-空 | 6    | 5×9.7                                       | 2×6.7                      | 24   | $\frac{2.1 \times 9.3}{2.5 \times 9.7}$   | 6  |
| SQF-100-2       | 水-水-空 | 8    | 5.6×6.8                                     | 2.6×3.8                    | 16   | $\frac{1.95 \times 6.4}{2.35 \times 6.8}$ | 8  |
| 意大利 320MW<br>机组 | 水-氢-氢 | 26   | $\frac{3.99 \times 7.24}{4.32 \times 7.57}$ | 1.55×4.8                   | —    | —                                         | —  |
| 法国 300MW<br>机组  | 水-氢-氢 | 6    | 4.5×13                                      | 2.5×11                     | 36   | $\frac{2.2 \times 13}{2.4 \times 13.2}$   | 6  |

## 2. 定子绕组水冷却系统

水内冷汽轮发电机定子绕组内的水冷却系统中的水路连接方式，通常有两种。

(1) 半匝水路连接。半匝水路（并联单流水路）连接方式是：



国产 200 及 300MW 汽轮发电机都是采用这种连接方式的（图 2-2, a）。国产 200MW 汽轮发电机的进水集水环在汽轮机一侧，出水集水环在励磁机一侧；国产 300MW 汽轮发电机的进水集水环在励磁机一侧，出水集水环在汽轮机一侧。

这种连接方式由于水路短，水流阻力小，因此要求水压较低（0.2~0.3MPa 即可），导线内水流速一般为 1~2m/s，由于上下层线棒内冷却水水流方向相同，发电机运行中出水侧温升较高，以 QFQS-200-2 型汽轮发电机为例，它的运行温升状况如图 2-3 所示。

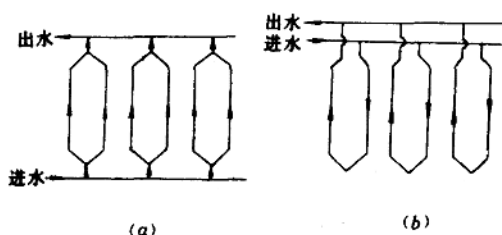


图 2-2 定子绕组水路示意图  
(a) 半匝水路；(b) 一匝水路

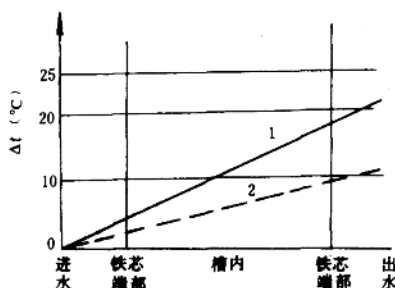
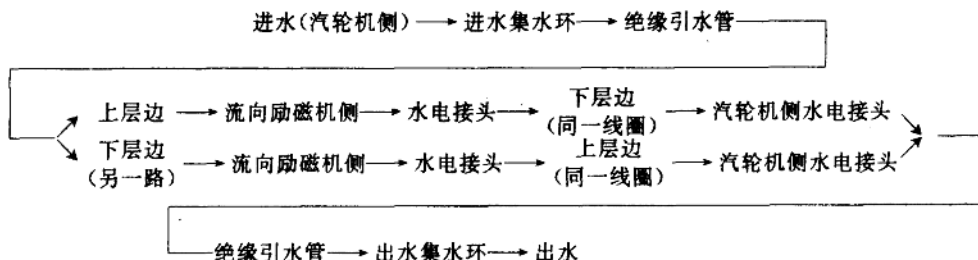


图 2-3 QFQS-200-2 型汽轮发电机  
(定子绕组为半匝水路) 温升曲线  
1—上层边；2—下层边

(2) 一匝水路连接。一匝水路（串联双流水路）连接方式是：



国产 100MW 汽轮发电机组及某些国外机组都是采用一匝水路连接方式（图 2-2, b）的。因为这种水路较长，阻力大，所以进水压力要适当高些，空心导线内水的流速一般为 2 m/s，比半匝水路的稍高。另外，由于同一线圈上下线棒中有不同方向的冷却水在流动，故运行温升较均匀。

上述两种水路中的集水环是一圆环形不锈钢管，起联箱作用，它的一侧与诸多绝缘引

水管相连，另一侧有短管及法兰，与机外水冷系统相连接（图 2-4）。

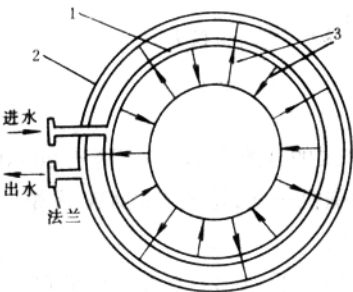


图 2-4 集水环连接示意图

1—进水集水环；2—出水集水环；  
3—绝缘引水管

绝缘引水管是一种聚四氟乙烯塑料管，它一方面可以将绕组空心铜导线内的冷却水引进或引出，起水流通道作用，另一方面又是很好的绝缘体，可以防止定子线圈电流经冷却水系统而接地。所以，对绝缘引水管的要求除一般的机械性能（如耐磨，有一定强度能耐压，有一定柔度便于安装，耐温等）外，还要求它的绝缘性能好，击穿电压高。

绝缘引水管的常见规格有两种： $\phi 14 \times 2\text{mm}$ ， $\phi 19 \times 2\text{mm}$ 。长度要依定子线圈电压而定，电压高时长度要长，目前一般是  $30 \sim 40\text{mm/kV}$ 。

所谓水电接头是将原来交错排列的实心导线和空心导线（通水）分别集中，它既作为线棒的连通点，又作为进水（或出水）的分路和会合点（图 2-5），所以要求它有一定的严密性，耐一定压力而不漏水（见表 2-3）。

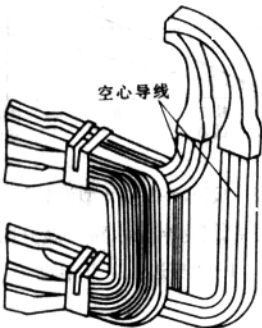


图 2-5 QFQS-200-2 型汽轮发电机水电接头

另外，汽轮发电机中还安装有检漏计，用它检查定子绕组水电接头附近是否漏水，其构造如图 2-6 所示。它放在定子绕组二端部的下方，当漏水时，检漏计中的滤油纸吸潮而绝缘程度下降，电路接通，漏水报警系统即发出报警信号。

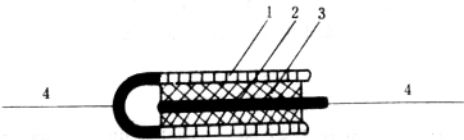


图 2-6 检漏计结构示意图

1—多孔金属（如铜丝网）；2—金属；  
3—滤油纸；4—导线

表 2-3 定子和转子绕组水压试验要求

| 汽轮发电机型号   | 定子绕组        |           |             |           | 转子绕组        |           |             |           |
|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|
|           | 出厂时         |           | 安装交接时       |           | 出厂时         |           | 安装交接时       |           |
|           | 压力<br>(MPa) | 时间<br>(h) | 压力<br>(MPa) | 时间<br>(h) | 压力<br>(MPa) | 时间<br>(h) | 压力<br>(MPa) | 时间<br>(h) |
| QFS-60-2  | 1           | 8         | 0.75        | 8         | 5           | 8         | 4           | 8         |
| QFS-125-2 | 1           | 8         | 0.75        | 8         | 8           | 8         | 7           | 8         |
| QFS-300-2 | 1           | 8         | 0.75        | 8         | 10          | 8         | 9           | 8         |