



高等学校教材

发电机冷却介质

东北电力学院 张警声 主编



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，还必须采用冷却措施，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和水作为冷却介质外，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 Φ ——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， m^2 ；

δ ——平壁厚度，m；

λ ——材料的热导率（导热系数）， $W/(m \cdot K)$ ；

ΔT ——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 Φ ——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 ；

α ——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 ΔT ，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 Φ 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；

σ ——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 Φ 也是物体自身向外辐射的热量。

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. ΔT_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. ΔT_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. ΔT_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 Φ 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)；

ρ ——流体的密度，kg/m³；

q_v ——流体的体积流量，m³/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 ΔT 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 ΔT_1 是最大的，随着单机容量和电压等级的提高，热损耗 Φ 和绝缘层的厚度 δ 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 ΔT_2 和 ΔT_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 CO_2 或者 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 λ		1	6.69	0.638	1.08	在标准状况下纯净的气体
密度 ρ		1	0.0696	1.52	0.966	
从散热表面到气体的传热系数 α		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 α 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 ΔT_2 ，提高了冷却效果。

热导率 λ 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 ΔT_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 (MW)	转子电流 (A)	入口风温 (°C)	出口风温 (°C)	冷却介质的温度差 (°C)	静子铜铁的温度 (°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,而且还有较高的强制对流作用,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
($W/(m^2 \cdot K)$)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 (J/(kg·K))	密度 ρ (g/cm ³)
	温度 (°C)	绝对大气压 (MPa)		
水	15	0.1	4.2×10^3	0.9987
氢气	15	0.1	14×10^3	0.076×10^{-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 (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 ΔT_2 与冷却介质的表面传热系数 α 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 ΔT_2 , 水内冷的效果更优越。

从式 (1-6) 可知, 在热损耗 Φ 和冷却介质的流量 q_v 一定的情况下, 介质本身的温升 ΔT_3 与冷却介质的定压比热 c_p 、密度 ρ 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 (按体积计)	相对导热能力	单位表面的相对 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 30mm²/s 左右, 50℃ 时为 9.6mm²/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 O₃, 而臭氧和空气中的氮化合, 生成一氧化二氮 N₂O。N₂O 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 型号 项目	哈尔滨电机厂			东方电 机厂	上海电机厂				北京重 型电机 厂	意大利	法国	日本	原苏联
	TQN- 100-2	QFSS- 200-2	QFQS- 200-2	QFQS- 200-2	QFS- 50-2	QFS- 60-2	QFS- 125-2	QFS- 300-2	SQF- 100-2				
额定容量 (MW)	100	200	200	200	50	60	125	300	100	320	300	250	210
额定电压 (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 (A)	6475	8625	8625	8625	3440	4125	6150	11320	6470	10868	14170	11321	9650
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 (cm)	240	227.5	227.5	227.5	—	—	235	240	214	246.5	264	—	—

续表

生产厂及型号	哈尔滨电机厂			东方电机厂	上海电机厂				北京重型电机厂	意大利	法国	日本	原苏联
	TQN 100-2	QFSS- 200-2	QFQS- 200-2	QFQS- 200-2	QFS- 50-2	QFS- 60-2	QFS- 125-2	QFS- 300-2	厂 SQF- 100-2				
定子内径 (cm)	112.8	115	115	115	--	--	114	126	104	120.4	132	121.9	127.5
转子外径 (cm)	100	100	100	101	--	--	100	110	91	104	115	104.1	107.5
满载励磁 电压 (V)	271	384	445	453	196	225	265	483	245	379	304	440	420
满载励磁 电流 (A)	1514	1605	1763	1749	1140	1310	1635	1844	1398	3005	3790	2420	1930
氢压 (MPa)	0.2	--	--	0.3	--	--	--	--	--	0.3	0.3	0.2~ 0.3	--
定子水压 (MPa)	--	--	0.15~ 0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.25	0.15	0.13	--	--	--
转子水压 (MPa)	--	--	--	--	0.2	0.2	0.2	0.2	0.15	--	--	--	--
定子水流 量 (m ³ /h)	--	--	35	--	15	15	28	46	--	--	--	--	--
转子水流 量 (m ³ /h)	--	--	--	--	14	13.7	27	31	--	--	--	--	--

* 国产汽轮发电机组型号中第三、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,它的第一个字母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。

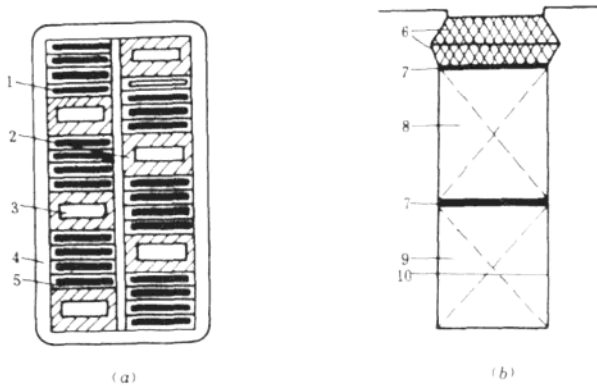


图 2-1 水内冷汽轮发电机定子线棒截面

(a) 线棒断面; (b) 线棒在槽内固定方式

1—实心扁铜线; 2—排间绝缘; 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[#]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。

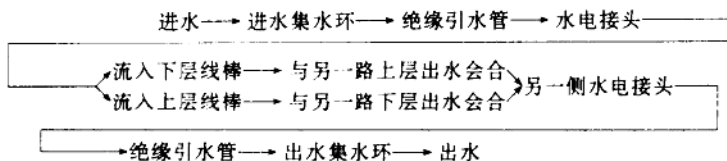
表 2-2 部分国产及国外机组定子导线规格

机组	冷却方式	空心导线			实心导线		组数
		根数	截面积 (mm ²)	内孔面积 (mm ²)	根数	截面积 (mm ²)	
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	2×5.7	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 机组	水-氢-氢	25	$\frac{3.99 \times 7.24}{4.32 \times 7.57}$	1.55×4.8	—	—	—
法国 300MW 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。

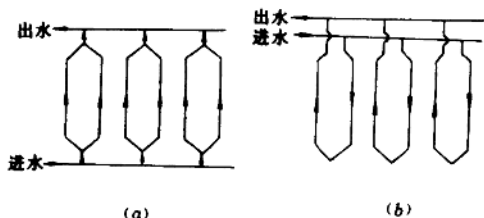


图 2-2 定子绕组水路示意图
(a) 半匝水路；(b) 一匝水路

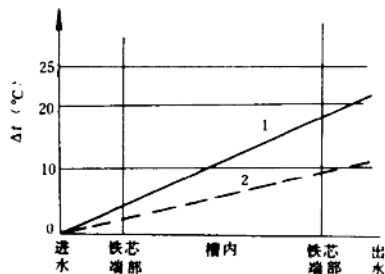
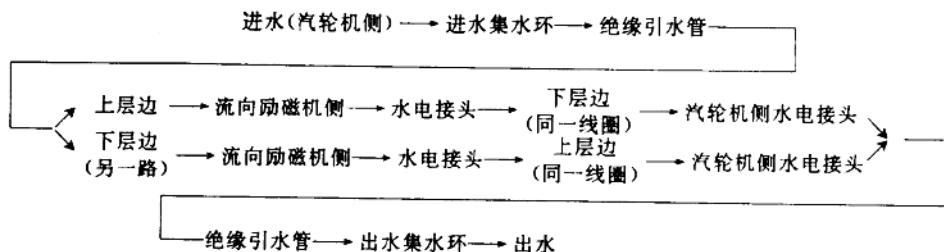


图 2-3 QFQS-200-2 型汽轮发电机
(定子绕组为半匝水路) 温升曲线
1—上层边；2—下层边

(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)。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）。

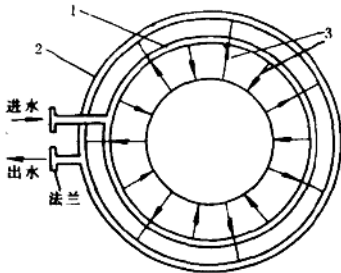


图 2-4 集水环连接示意图

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，耐高温等）外，还要求其绝缘性能好，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），所以要求其有一定的严密性，耐一定压力而不漏水（见表 2-3）。

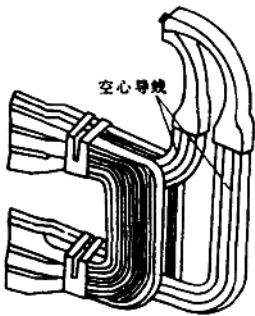


图 2-5 QFQS-200-2 型汽轮发电机水电接头

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。

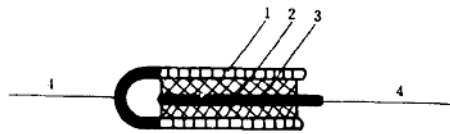


图 2-6 检漏计结构示意图

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 (MPa)	时间 (h)	压力 (MPa)	时间 (h)	压力 (MPa)	时间 (h)	压力 (MPa)	时间 (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