

1-3

技术参考文献

JISHU

CANKAO

WENXIAN

电机冷却资料

DIANJI

LENGQUE ZILIAO

2

1958

内 容

1. 氢冷汽轮发电机 (1)
2. 日本最近制造的氢气冷却汽轮发电机 (27)
3. 提高汽轮发电机功率的冷却方法
苏联日·日·齐边夫 (54)
4. H_2 冷汽轮发电机 (55)

哈尔滨电机厂技术报导室编

PDG

哈尔滨电机厂
技术报导室

第一篇

氢冷汽轮发电机

应书麟

王光国

朱炳洋 等译

当额定容量超过8~10万千瓦时，空气冷却汽轮发电机就遇到困难，为此采用了氢气冷却。本文中作者分析了几台实际的氢冷发电机中采用氢冷的一些问题及其解决方法的经验，也叙述了发电机的绝缘和结构设计，它们的损耗和效率、通风和辅助设备。

（原稿由作者提供）

B. B. C. 在前便已对氢冷发电机的氢气冷却进行了研究，试验装置——特别是研究密封管——已经制成，但是氢冷发电机的结构未被采用。直到1947年才有2台12.5万千瓦发电机，由于不能应用空气冷却，而开始采用了氢气。此后，即有20台以上的容量自4万到18.75万千瓦——其中约有一半，其容量在12万千瓦以上——的电机已经运行，大部分制成氢气冷却（参见表2）。同时8万千瓦和一台14.3万千瓦已经在实际中不间断地运行一段时期，因此从广泛的初步试验结果中，B. B. C. 在氢冷发电机方面已积累了一些经验。

电机设计和通风

氢冷发电机的电机设计最主要的是受到转于差和温升的限制，而它又必须使转于磁密安匝及转于冷却有关，公便的转于磁密安匝为产生磁通磁密电机所需要的安匝的几何和（图6）。转于磁密安匝及磁密的范围——根据磁密、寻找截面、选择面

孔和厚度——以反冷却介质的冷却表面和冷却表面的相对速度。按照电机的容量，B、B、C 采用了三种不同的槽型（图 1）为了研究一定槽型的冷却效果，首先考虑了一个假想转子圆柱形表面上冷却的最简单情况（图 1a）。

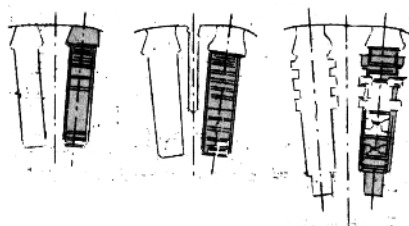


图 1: B、B、C 型电机的转子槽型

(a) 小容量所用的直接表面冷却

(b) 中容量所用的齿部冷却

(c) 大容量所用的直接铜的冷却。

使转子铜对于冷却介质表面而进入电机的冷却介质的平均容升温升为 Δt （根据国家标准 $80^\circ \sim 90^\circ \text{C}$ ），以及从冷却剂到转子的各部分温降（正常用铜制冷却器以冷却冷却剂对 Δt 电机）如下：

Q_1 — 气隙内的冷却剂由于风扇和压缩机的摩擦所引起的平均温升。

Q_2 — 转子表面与气隙内冷却剂之间的温降。

Q_3 — 由于热阻在转子齿到转子表面之间的温降。

Q_4 — 转子铜和铁之间的温降，这是由于绝缘和充油在铜与绝缘及绝缘与齿之间空隙中的冷却剂的热阻所引起。

不计通过转子导线与转子表面绝缘的热传导则：

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 = \Delta t$$

因为气隙和齿与铁热阻相同，所以 Q_1 与冷却剂之性质有关，但其压力成反比。因为氢冷发电机在任何情况下总是制成气密

闭式的，所以氢气压力可提高到2~3倍大气压力，而不致在气体中产生过大的转于表百摩擦损耗，或需要一个不经济的大风扇驱动功率。氢冷却发电机风扇总是要设计得较空气冷却的风扇为小，以相应地减少总损耗。而结果当氢气压力约为大气压力时，氢气的温升与空气冷却发电机的冷却介质的温升相同，即大约为 25°C 。因此气隙中冷却剂的平均预热 Q_1 对在近似大气压力下的空气和氢气冷却而言是相同的。当氢气压力增加到2或3公斤/平方公分时，则 Q_1 则减小到大气压下 Q_1 数值的0.5或0.33。（如果提高氢压长期运行于很高压力时，其风扇和风扇驱动做得较小，以改善效率，然而在此情况下，始知氢压而降低 Q_1 的作用将失去，并且当用低氢压或空气运行时，发电机压力将大为降低，为此在始知冷却泵之前，对这种可能进一步提高效率的优点迄今未被采纳）。

转于表百与气隙内冷却剂之间的温降为：

$$Q_2 = \frac{P_r}{2h \cdot S}$$

这里 P_r = 转于铜耗 (瓦, W)

S = 转于表百积 (平方公分, CM^2)

$2h$ = 散热系数 (瓦/平方公分度, $\text{W}/\text{CM}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$)

图3表示90~100%负荷程度和不同压力下的氢与大气压力下的空气在紊流状态时的散热系数 $2h$ 之间的关係，即是

$$\frac{2h(\text{H}_2)}{2h(\text{AIR})} = \left(\frac{\mu(\text{H}_2)}{\mu(\text{AIR})} \right)^{0.214} \left(\frac{\gamma(\text{H}_2)}{\gamma(\text{AIR})} \cdot \frac{C_p(\text{H}_2)}{C_p(\text{AIR})} \right)^{0.786}$$

此外假定为同样温度（即 0°C ）冷却表面和速度。实际上由于氢和空气的动粘度不同，其流速度有些不同。但当氢气纯度为97~98%时，这种影响很小而可略去不计（参见文献1）。氢气和空气的导热系数与压力无关。粘度 γ 与氢气压力成正比。除去粘度的差异，同一风扇所需要的功率与密度成正比。

在高压下，比热 c_p 与氢压有关，因此当绝度降低时，比热亦很快下降才由 1.55 降至 1.55 。

氢在 50 公厘水柱，即 1.035 公斤/平方公分绝对压力和有 5% 绝度时，其散热系数为空气的 1.55 倍（图 3），它在很大程度决定于氢的压力，而在 2 公斤/平方公分绝对压力时大约为 2.6 倍， 3 公斤/平方公分绝对压力时大约为 3.57 倍，故称用氢冷却，温降 Q_2 即降低到 0.616 、 0.385 和 0.282 倍。

关于齿部的温降 Q_3 ，另冷却剂的性质无关，但随着齿宽和槽深的减少而增加，所以它不受氢冷的影响。对总温降值很大一部分的 Q_3 ，在关于直接表面冷却时亦用氢冷是没有什么好处的。

根据符合於欧姆定律的散热定律：

$$Q_4 = \frac{P_V}{A} \left(\frac{S_1}{\lambda_1} + \frac{S_2}{\lambda_2} \right) \quad \text{图 3-10 图 3-11}$$

$$P_V = \text{转子损耗 (瓦)}$$

$$A = \text{铜-铁间的散热面积 (平方公分, CM}^2\text{)}$$

$$S_1, S_2 = \text{绝缘厚度和间隙 (公分, CM)}$$

$$\lambda_1, \lambda_2 = \text{绝缘和冷却剂的散热系数 (瓦/公分度, W/CM}^\circ\text{C)}$$

$$\text{对于近代玻璃基的转子绝缘而言, } \lambda_1 = 4 \times 10^{-3} \text{ W/CM}^\circ\text{C}$$

$$\lambda_2 = 0.3 \times 10^{-3} \text{ W/CM}^\circ\text{C (空气)} \text{ 和 } 2 \times 10^{-3} \text{ W/CM}^\circ\text{C (氢)}$$

当绝缘厚度为 1 公厘、间隙为 0.1 公厘时：

$$Q_{4(\text{air})} = \frac{P_V}{A} (25 + 33) = 58 \frac{P_V}{A} \text{ (空气)}$$

$$Q_{4(\text{H}_2)} = \frac{P_V}{A} (25 + 5) = 30 \frac{P_V}{A} \text{ (氢)}$$

同时注意到实际接近，氢冷却的温降 Q_4 为空气冷却的 0.517 倍，绝缘愈厚和间隙愈大时， $\frac{Q_{4(\text{air})}}{Q_{4(\text{H}_2)}}$ 定比将愈大，即氢冷的效果亦愈大，因为气体的散热系数与气体的压力无关，故当加氢压

1. 计算: $15^{\circ}\text{C} = 17^{\circ}\text{C}$ 的差值

... ..

附一 大野田製鐵所

$$\Delta T = 90^\circ \text{C} = 100\% \Delta T$$

● 中国书画函授大学肇庆分校

(43) 漢書卷一百一十五

假定全为99%纯度时， Q_2 它变化为：

Q3 另页却割无关，所以无变化。

当奥特工艺匠刀的生产冷却，其各部份的速率与理想分布时所用速率在减低感温率4次。即总热阻的界限是：奥特工艺匠刀

五、是國由來。美乎。王陸。將。三。年。餘。數。地。有。五。百。四。十。二。大。萬。而。已。

$$\left. \begin{array}{l} 19.4\% \\ 33.6\% \\ 38.8\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

此图以而能散发的转于损耗将随氢阻的减小此反比例增加为、

$$\left. \begin{array}{l} 24\% \\ 50\% \\ 64\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

当转于齿具有冷却槽时(图1b)齿铁中的温降 Q_3 从总温降 Δt 的37%左右减小到约为25%，结果在一个理想表面上的温降 Q_2 从22%左右变化到约为24%以及从铜到铁的温降 Q_4 从24%变化到30%，平均预热 Q_1 大约为21%。

按此假设的各部分温降的分配比例，它与实际情况很相似，在採用氢冷位，能散发的转于损耗，用上述同样的计算方法可能的增加为、

$$\left. \begin{array}{l} 31\% \\ 55\% \\ 82\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

当採用直接压铜内进行氢冷冷却时(图1c)则情况更为满意，并且在极端情况下， Q_3 和 Q_4 变为0，即铜模的预热完全散发的冷却介质中。(实际上一定的预热是经过齿铁的)冷却剂的平均预热 Q_1 约为50°C相当于 Δt 的56%，而从铜到冷却介质的温降 Q_2 可假定为40°C或 Δt 的44%。当以1.035公斤/平方公分氢压的氢冷代替空气冷却时，全部热阻 Δt 减少16%，而当2公斤/平方公分氢压时减少55%，以及3公斤/平方公分氢压时减少69%，则採用氢冷能散发的转于损耗的增加为、

$$\left. \begin{array}{l} 19\% \\ 122\% \\ 220\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

转于电流（它随损耗的平方根而变）的可能当知数为
对直接表面冷却而言、

$$\left. \begin{array}{l} 11\% \\ 22.5\% \\ 27.5\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

对齿部冷却而言、

$$\left. \begin{array}{l} 11\% \\ 27\% \\ 33\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

对直接铜内冷却而言、

$$\left. \begin{array}{l} 49\% \\ 80\% \end{array} \right\} \text{当具有} \left\{ \begin{array}{l} 1.035 \\ 2 \\ 3 \end{array} \right\} \text{公斤/平方公分氢压时}$$

图4表示当采用图1a、b、和c的转子槽型时，以氢压为函数的可能散发的转子损耗对在大气压下进行冷却所能散发的损耗之间的关系。（参见文献2）实线曲线表示的关系没有考虑到不同的转子槽型在用空气冷却时也有不同效果的这一事实，它们的效果受一些设计数据的影响（槽的宽度和尺寸，楔高，冷却沟的形状和大小等等）图1a、b、和c的转子槽型的可能散发的损耗，能够从假定的 Q_1 和上述 Q_2 与 Q_4 的计算方法，同时用散热系数很快的得出 Q_3 。（参见文献3），或更快地在直流铜箔片析雷上得出 Q_3 来决定之。此外由理论和实验研究结果，可以假定用空气冷却时损耗也同样属于用直接表面冷却时能够散发20%的转子损耗，而用直接铜内冷却时约能够散发55%，在图4中槽型1b和c的虚线曲线给出一个对空与直接表面冷却的比较：

$$\frac{P_v(H_2)}{P_v(L)}$$

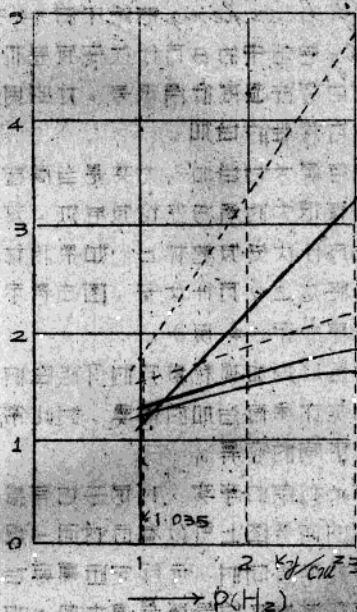


图4. 在不同氢压 $P(H_2)$ 下，氢冷却能散发的转子损耗 $P_v(H_2)$ 。

在大氢压下空氢冷却所能散发的转子损耗 $P_v(L)$ 之比的关系。

曲线 a、b、c 相当于图 1a、1b 和 1c 的槽型。虚线 b'、c' 像 b 和 c 槽型用氢冷却另 a 槽型用空氢冷却的比较。

应用加强冷却在大型汽轮机电机上很早就进行制造了 B、B、C 型有将材料利用至极限，而是希望得到较高的效率。因它转子绕

粗温度像德国 *Golden-heng* 电站中的 14.3 万仟伏安发电机和丹麦 *Kyndby* 电站中的 8 万仟伏安发电机所测得到的满意负荷于调升那样较之容许温度低得很多。这些用氢冷所得到的较低的转子温度促使可靠性的增加。

氢冷还可使容量大为增加，尤其是当高压直接铜内冷却的条件下，更便于制造很大的氢冷汽轮发电机，这种冷却方法，现在已应用于 18.75 万仟伏安发电机上，如果将这一电机的氢压再提高一些，则容量能达 20 万仟伏安，图 5 表示这一发电机的开槽的转子（参见原文第 84 页）。

随时提高氢压以增加损耗散发的可能性的优点，常常用来满足某一段时间内先动负荷增加的需要，为此常常对氢冷发电机在不同氢压下定出不同的容量。

由于转子更大利用的事实，对定子也有着一定的效果（参见文献 4）从图 6 的何恩图上可以看出对同一短路特性而言，气隙或者气隙饱和度或两者同时，亦即安匝需要增加，以产生磁通。所以大型氢冷汽轮发电机的气隙是很大的，如在 18.75 万仟伏安的电机中气隙为 65 公厘。电机反应率上按磁势电流正比增加，而它的效应随漏抗电压增加而减少，较大的电机反应要求有较大的安匝数，这就需要对于端部附加损耗加以特别注意，（其值近似地按安匝的平方成正比例地增加），而以通过端部和压板的通风来减小损耗散发它们，一系列的有效测量已经进行过，所测得到的发电机的压板温度已经是很低了。

氢冷汽轮发电机的端部冷却

其目的即在于空冷

氢冷汽轮发电机的端部冷却

其目的即在于空冷

$$E_s = \text{漏磁电压}$$

$$\varphi = \text{相角}$$

$$OA \cdot AB = OA' \cdot A'B'$$
 近似地相当于短路特性

一方面要有较高的端部损耗，另一方面要有较佳的转于表面摩擦损耗——它们的比例对氢冷和空气冷却而言，可以假定为正比于电压的比例（图3）。而在空气压下，氢冷的转于表面摩擦损耗仅为空气冷却时的 $\frac{1}{10}$ ——故得着全解决电机的端部通风问题。

从向量图上也可看到，增加氢冷氢化发电机的利用率，即使短路期间的冲击电流相应的减少。故对现代的大型氢冷氢化电机很少需要采取其它措施来增加内圆漏磁或排解化带大角定于冲忙的大漏磁槽，这样就可能经济地利用定于开口槽，在另一方面，这种与电机的定于槽没有像氢冷对转于槽那样的同样程度的好处，故定于槽彼此的成很殊，为了减少阿尔德损耗上层导线较下层导线应由铜得更多的股数组成，这一特点已为 B、B、C 样用于大型水轮发电机。

效率和损耗

图7为以 12.5 万千瓦氢发电机为例，当采用氢冷以代替空气冷却时，在不同负荷情况下，效率与损耗性的改善。空气冷却的空载损耗几乎等于氢冷冷却时漏磁损耗。氢冷效率的提高是由于氢气密度较低的缘故。事实上氢气的密度仅为空气的 $\frac{1}{14}$ ，而粘度为 96% 的氢气的密度约为空气的 $\frac{1}{14}$ ，因而对于同样流速，比流速实际上按冷却剂的密度成正比例地变化，某时所算的风扇功率亦将按比例地减少。因为在氢冷发电机负荷下，由于总损耗的降低，风扇的风量也可减少，则风扇损耗可更大程度地降低了。

此外，虽然氢气的动粘度较空气为高，但气体的摩擦仍较空气为少。

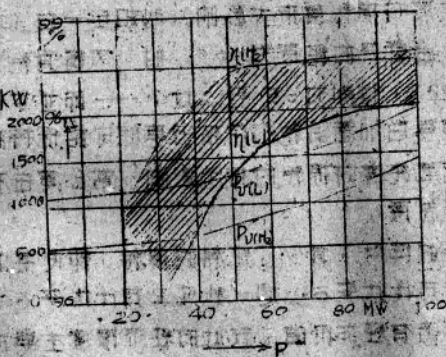


图7. 12.5 万伏安发电机所用空气 (L) 和氢气 (H₂)

冷却时的损失和效率

图3的曲线表示在氢气和空气中表面摩擦之间的关係 (曲线 γ)，物体在充满气体的空间中运动的摩擦——由于运动所产生的——与在气体中的距离成正比，当紊流时，其压降为：

$$\gamma = k \cdot \sqrt{\eta / \rho}$$

η = 绝对粘度

ρ = 密度

g = 重力加速度

在这公式中，空气在 50°C 时的绝对粘度 η 假定为 $2.01 \times 10^{-6} \text{ g/cm-s}$ ，重量为 $0.984 \times 10^{-3} \text{ g/cm-s}$ 密度根据图3曲线、

因而可以看到表百摩察在稀氧中减少为 0.115 倍，在 96% 耗度的氧气中减少为 0.159 倍。

氢气的耗度对损耗有极大影响，例如在一台 12.5 万伏安的发电机中，当氢气的耗度为 96% 时，风扇消耗功率为 42 瓦，但当耗度为 90% 时则为 65 瓦。这个——而并不是怕爆炸——就是为何即使要增加氢消耗的价格也要尽可能保持高耗度氢气的原因。鉴于氢气耗度对损耗的极大影响，常必须表示效率时指出一定的氢气耗度。

由于损耗的降低，减少了燃料的损耗，即使其它费用的增加，制造费高达 5 万伏安 50 週/秒或 2 万伏安 60 週/秒的发电机用氢受仍有经济价值。较低的经济限度主要决定于燃料的价格和发电机年运转小时数。在迄今采用的空气冷却发电机中，采用氢受已经达到了节约煤炭的目的；假定提高效率 0.7~1%，按照燃料和运转周期的价格每年可以节约 1 加仑到 100.00 瑞士法郎，这样氢受发电机的附加费用 1~4 年内即能全部收回。

氢冷发电机机械结构

从机械角度来看，氢冷发电机与空气冷却发电机不同的地方如下：

1. 氢冷发电机制成为经受 10 个大气压试验的防爆箱。

2. 大型空气冷却发电机正常总是强力通风，所以在发电机外部装有风扇以循环冷却空气，而氢冷发电机常常在转子上装有风扇，以免必须采用防爆冷却管和防止漏气的附加的氢密封。

3. 大型空气冷却发电机的冷却器总是装置在机壳外部的空气间隙中，而氢冷发电机的冷却器是防爆的安装在电

机的机壳内。B、B、C、设计时考虑能够垂直地向上移动。

4. 氢冷汽轮发电机的面密封或气密封套管式(图8)。
 5. 通过机壳的转轴处采用特殊的密封(图9)以防止
 氢气从发电机中逸出和空气进入发电机内。



图8 氢冷汽轮发电机的面密封套管式

所有面密封在一特殊装置中处于氢气压下並具有过电
 压情况下不受损害。

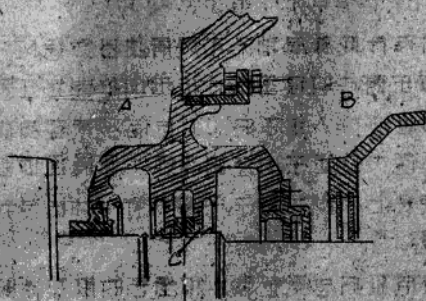


图9 氢冷发电机轴密封

A—气体端 B—氢气端 C—油

用这种密封，发电机能够在具有脱油或脱氢的油并且内压力4公斤/平方公分绝对压力情况下运转。

氢冷发电机的爆炸危险是很小的，发电机单独爆炸的情况尚未听说过，只有当氢中混有空气 $\geq 5\%$ 时才成为爆炸气体，混合气体当氢中大约混有空气 70% 时才会产生最大的燃烧温度，即最高的爆炸压力，但由于气体周围物质的冷却效应，所产生的爆炸压力将减小到10个大气压。机壳是按两倍最大爆炸压力设计的，并经过10个大气压强度和变形试验，其结果必须没有永久变形。

B、B、C制造的容量至15万伏安的发电机，总是在机壳的圆筒内凹处放置两个冷却器，（参见原文第80页图10）而18.75万伏安的发电机为了同样的缘故，它的机壳制成水管具有小的凸出的圆筒，水管道的形式，四个冷却器则放在端部的端盖内。（参见原文第88页图11及第89页图12）

供给机壳内部的氢气产生连续地变换通过发电机轴端的冷却气体的主要部分，如此即使当一个冷却器停止工作时——如进行清理——亦不会在发电机两端之间发生过大的温差。这种变换冷却的剖示见图10（参见原文第87页）

电机被全新设计成采用轴流式风扇的自然通风——保持氢气冷却——这些脱氢情况经氢泵叶片轴向地固定在环中，当转子从定子内取出或放入定子时，叶片能够很容易的拆卸，这样可以不管风叶外径大于定子内径的等事实，风扇座保留在轴上。可旋转的叶片能使装上风扇的转子获得平衡，叶片转到此一位置时风扇的轴颈为零。

由于氢冷发电机的总损耗较小和氢气的散热系数较高，所以