

專題綜合評述

近代大型水輪发电机結構

中国科学技术情报研究所

1959年5月

緒 言

我国的水力資源极为丰富，居世界的第一位，同时开发的条件也特别优越，有利于我們多快好省的来发展祖国的水电事业。我国水力資源的优越条件表现在：

水力資源丰富的河流相当均匀的分布于全国各地（除江苏，山东，安徽等省没有大的水力資源外），因此，它生产出来电力便于向工业城市和矿区輸送。另一方面，我国的許多河流穿行于高原与山谷之間，坡降很大，因此容易集中落差，峡谷众多，可以用較小的土建工程等得到較大的发电能力。由于上述的两个原因就使得我国水电站造价极为便宜，建設速度也很快。在第一个五年計劃建設的一批水电站中，已得到了事实的証明（水电与火电造价之比是 1.1 : 1）。

为了滿足防洪，灌溉等的要求，也需要修建綜合利用的水电站，三門峡工程的修建和未来世界无比的长江三峡綜合枢纽工程正好說明了这一問題。

現在世界发电量約为 18000 亿度，其中三分之一是水电 [Л 23]*，由于資源条件等关系，世界上水电比重超过火电的国家很多，例如水电占 90% 的有加拿大，瑞典，瑞士，挪威，朝鮮等国；占 70—80% 的有意大利，日本，奥地利等国；占 50% 左右的有法国，印度；而美国水电比重长期在 25% 左右（一方面是由于水力資源不太好，更重要的是煤矿，石油及农場主等反对水电站的建造）；在苏联，1957 年才开发了水能資源的 2.3%（苏联在技术上可能开发的水能資源約为 17000 亿度）。

为了全力支援国家电力事业的飞跃发展，配合长江三峡的国家重大工程和配合本专业工程技术人員的生产和研究工作，提供必要的論文資料，研究綫索，特在搜集有关国外杂志，論文和报告，彙編成本专题綜述。

根于編者的水平，加之收集的資料尚欠完善，难免有不妥之处，只供讀者参考，同时希望能提出指导性的意見改进今后的工作。

編 者

1959. 4.

* Л 是俄文字 Литература 的第一个母，在此表示参考文献的意义，Л 23 是指参考文献 23。

目 录

大型水輪发电机发展趋势.....	(1)
大型水輪发电机的結構型式.....	(5)
A. 悬式的水輪发电机	(7)
B. 伞式的水輪发电机	(11)
C. 橫軸高速大容量水輪发电机	(15)
推力軸承.....	(15)
参考資料.....	(21)

大型水輪发电机发展的趋势

随着工业的飞跃，动力系统的日益扩大，从大型水电站的投入运行可以看出，无论汽轮发电机和水轮发电机组的单个机组容量是日益增加的，对汽轮发电机而言，世界的一些工业先进的国家都在着手解决和设计 50—55 万千瓦的汽轮发电机，例如瑞士布朗保弗尔公司将 26 万千瓦的汽轮发电机作为设计 50 万千瓦的汽轮发电机的参考蓝本。

由表 1 我们也可以看出近来大型水轮发电机的发展趋势 (JI18)

表 1 近来的巨型水轮发电机 (其中包括正在制造之电机)

国 名	水 电 站 名 称	容 量 千瓦安	轉 速 轉/分	結 构 型 式	合 数
苏 联	Красноярск	300000(瓩)	—	立軸傘式	—
瑞 典	Stornorrfors	150000	125	立軸傘式	3
日 本	奥只見	133000	200	立軸傘式	3
日 本	御母衣	125000(瓩)	225	立軸懸式	2
联 苏	Куйбышев	125000	83	立軸傘式	—
加 拿 大	Bersimis Lac Cassé	120000	277	立軸懸式	8
意 大 利	Cimago	110000	300	臥 軸 式	2
加 拿 大	Kemano	106000	327	立軸懸式	16
瑞 典	Harsprånget	105000	167	立軸傘式	4
日 本	田子仓	105000	167	立軸傘式	4
美 国	Noxon	101660	100	立軸傘式	4
美 国	Brownlee	101000	129	立軸傘式	4
法 国	Bort Les Orgues	100000	188	立軸懸式	2
美 国	Ross	100000	150	立軸懸式	4
印 度	Bhakra	100000	167	立軸懸式	5
日 本	黑部第四	95000/88000	360/300	立軸懸式	3
美 国	Ice Harbor	94737	90	立軸傘式	3
日 本	佐久間	93000	167/200	立軸傘式	4
美 国	Waneta	90000	120	立軸傘式	2
法 国	Chastang	90000	150	立軸懸式	2

由表 1 可以看出，近来水轮发电机的容量和转速都在逐渐的增加，但还没有到极限值，由制造的角度和经济的角度来看，提高水轮发电机单个机组的容量是合适的，对水电站土建工程的投资和简化水电站的自动控制都有好处。

图 1 是由近代大型水轮发电机制造实践中容量和转速间关系之曲线，水轮发电机的转速和容

140公尺/秒；对于环状鍛制輪緣的轉子， U_r 增高至150—160公尺/秒。

当然轉子磁极和轉子輪緣可用特种鋼来制造，但除了高速水輪发电机外，很少用特种鋼材，因为由經濟的角度来看并不一定合适，因此在設計水輪发电机时应进行綜合的技术經濟比較。

ii) 通风和冷却：提高巨型水輪发电机的容量和技术經濟指标方面基本措施之一，是就改善現有水輪发电机的通风系統，也正是各工厂和科学研究机关急于解决的問題。巨型水輪发电机通风的型式都采用封閉冷却系統。图4和图5是现代大型水輪发电机封閉冷却系統的示意图。

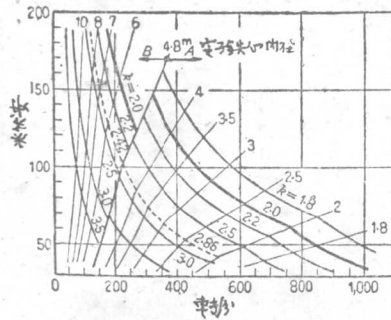


图3水輪发电机制造极限

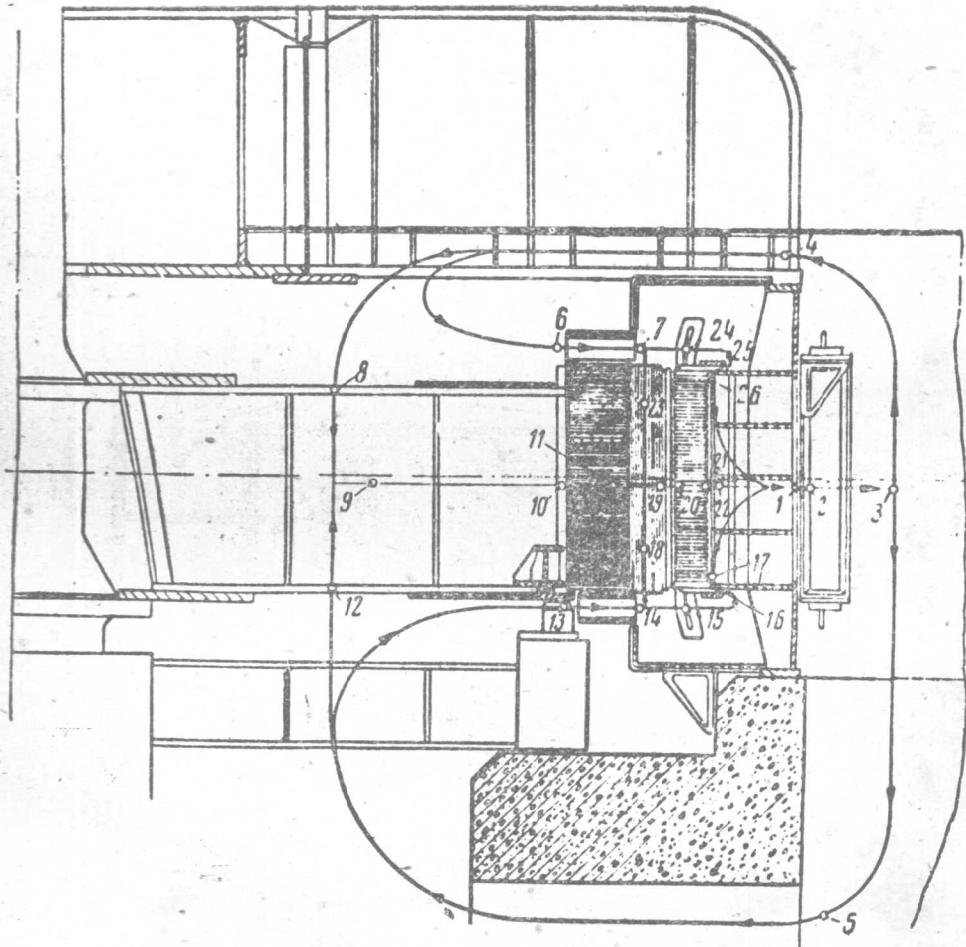


图4 现代大型水輪发电机封閉冷却系統示意图

SWT/564/11

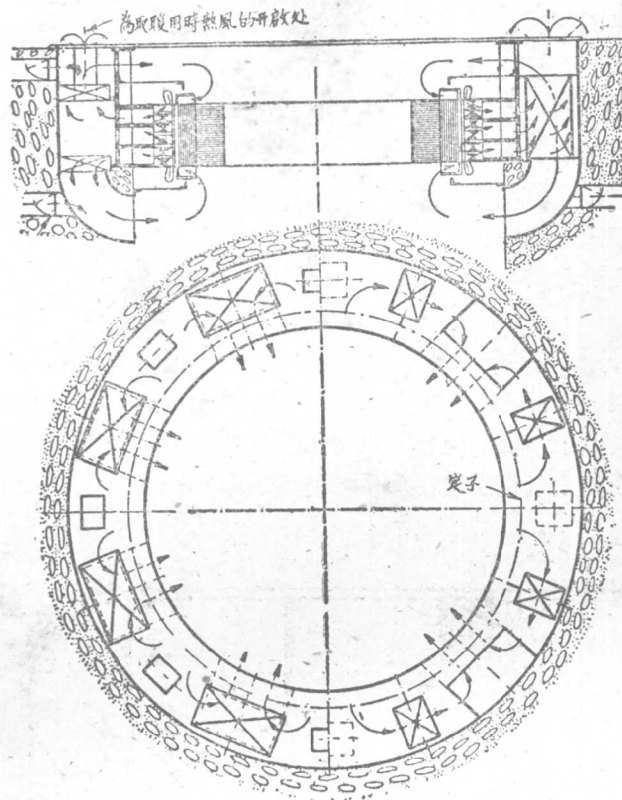


图5 水轮发电机封闭循环冷却系统

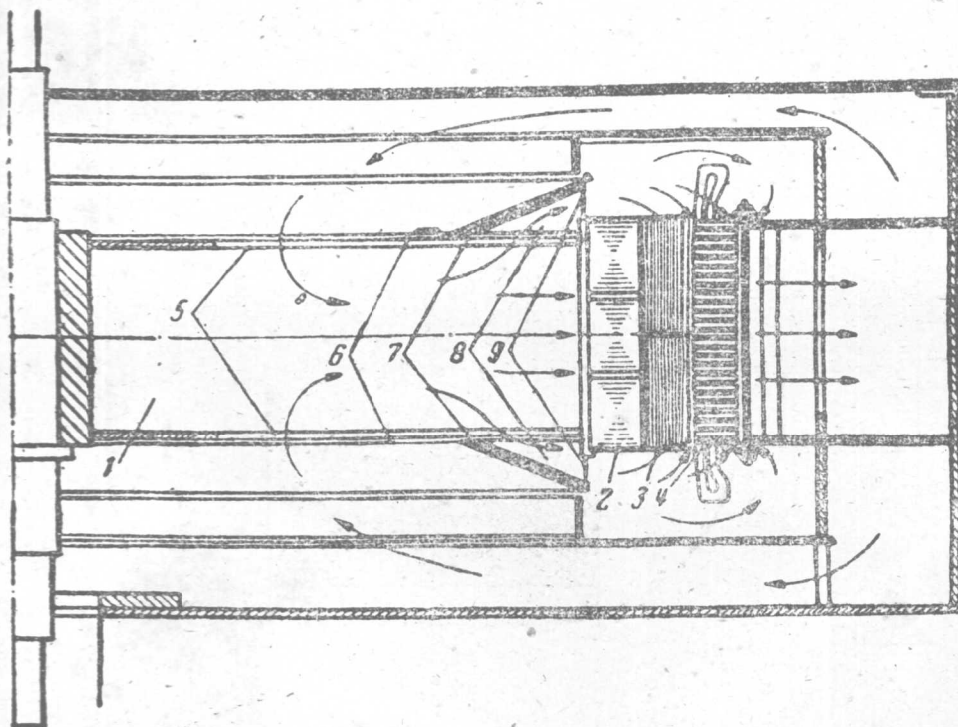


图6 带风量附加出口的转子结构

- 1-转子支架;
- 2-转子轮;
- 3-转子磁极;
- 4-定子绕组;
- 5-转子支架风量进口;
- 6-挡风板;
- 7-附加出口板;
- 8, 9-风量附加出口

为了解决这些問題并不一定要求基本改变大型水輪发电机中現用的冷却系統，因为这种冷却系統在提高电机冷却效能方面尚有很大的潜力，例如带有叶片状筋条的轉子支架可認為是能够供給巨大的风量离心式风扇，但在現有的通风系統中沒有加以充分的利用；冷却系統中的动压力很大的程度上沒有被利用等。这些都可通过在轉子中加附加出风口(图6)，改变定子槽楔的形状和在空气冷却器后带有附加风扇(图7)(这种方法有一定的缺点，因为增加了功率的附加損耗，但这缺点沒有决定性的意义)等方法得到改善。

随着电机的容量增加，定子鉄芯的叠片长度可能达2~3公尺，因此防止局部的过热应很好注意，这方面对高速电机尤为重。随着容量的再增加，空气冷却的方式已显得不很够了，看来，用普通通风冷却的方式，容量到40~50万瓩已經是极限了，还必须解决适当选择发电机的飞逸轉速問題，这时就应考虑定子液体冷却或者是定轉子同时进行液体冷却的方式，这样可以大大提高电机的容量，有可能制造50万瓩以上及更大的水輪发电机。在这里有很多問題可以进行研究，例如水冷时参数变坏，如何选择适当的参数是一个很重要的問題。这些問題的解决对解决我国长江三峡水电站机组有很大的意义。

由苏联41年水輪发电机制造事业的发展来看，单个机组容量是在飞跃发展，由其典型的两个工厂(电力厂和烏拉尔电器厂)的发展可以很明显的看出这一問題。图8是苏联“烏拉尔电器”厂在不同时期生产的水輪发电机容量递增情况。

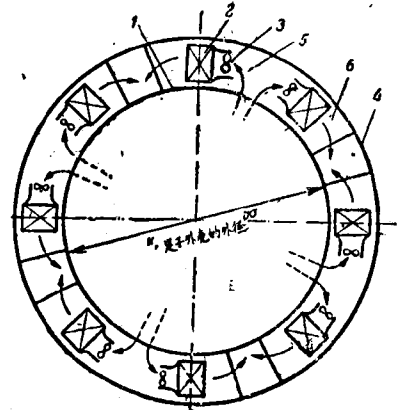


图7 带附加风扇的水輪发电机冷却系統

- 1—定子； 2—空气冷却器；
3—风扇； 4—风罩； 5—
热风出口； 6—由空气冷却器
出来的冷风。

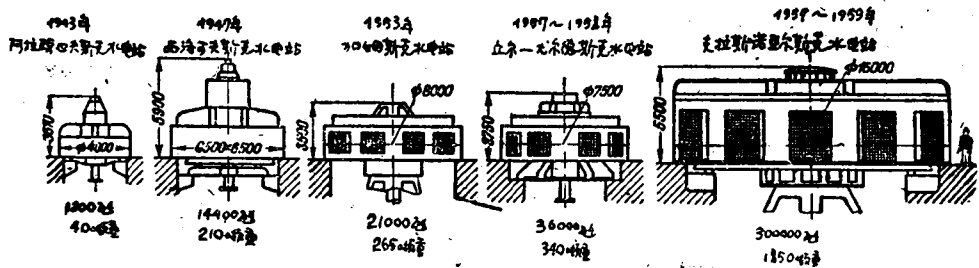


图8 “烏拉尔电器”厂不同时期生产的水輪发电机容量递增情况。

水輪发电机的发展是趋向于其单个机组容量日益增大。但在評論一个电机的大小尺寸时，很有代表性的参数之一是其电磁轉矩 ($M = 0.975 \frac{P}{n}$ 吨·米；式中 P —瓩， n —轉分，有时为了简单起见，也可用一比例量仟伏安/轉/分来表示) 值的大小，这一点也可由表1中看出，苏联的克拉斯诺亚尔斯克水电站的发电机电磁轉矩磁达2780吨米。

大型水輪发电机的結構型式

水輪发电机的結構特点在很大程度上与河流的性质有关，例如平原性质的河流流量大而落差小，因此就导致采用低速大尺寸的机组。而对落差很大，流速高的山区性质河流就采用高速的水

輪发电机。而两者之間在結構上就有很大的区别，前者有可能用伞式的水輪发电机，后者就用悬式的或其他形式的。

水輪机有橫軸与竖軸两种，如用橫軸时发电机与正常的同步电机沒有很大的差别，其飞逸轉速倍数高些。但典型的大容量水輪机装置由水电站总装配条件来看都做成竖軸的。因此在此只考虑立式水輪发电机组。

要严格区分低速与高速水輪发电机是困难的，在其中并没有什么明显的界限，一般來說 (Л19)：

$$n_N > 187 \text{ 轉/分} \text{——属于高速的。}$$

$$n_N < 80 \text{ 轉/分} \text{——属于低速的。}$$

$$187 > n_N > 80 \text{ 轉/分} \text{——看其容量的大小再来区分。}$$

因为当容量增加时，轉子直径的增加受到极限机械应力的限制，因此在充分利用轉子材料机械应力情况下，只有适当的增加电机的长度 L ，有可能使 $\frac{D}{L}$ 之值在高速电机范围之内。例如 90000 仟伏安，83.3 轉/分的水輪发电机， $\frac{D}{L} = \frac{11600}{1800} = 6.5$ ，可属于中高速类型的。

选择水輪发电机的結構型式——伞式还是悬式——是設計过程中很重要的时刻。由运行的方便和可靠性来看悬式是好的，但降低机组的高度，节约设备造价这方面优点来看应属于伞式的。所以在选择发电机的結構时应在計算电站所有设备的基础进行比较。

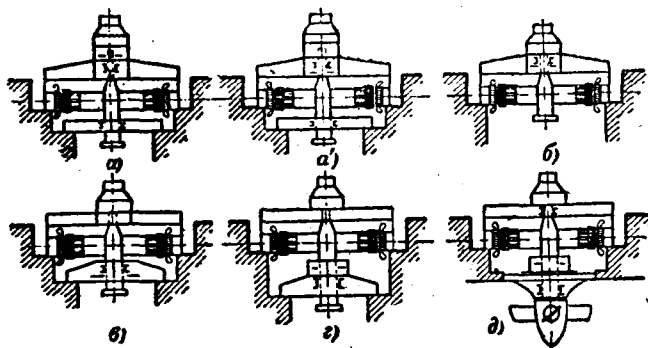


图9 水輪发电机主要部件的配置

a——带有两个导轴承的悬式水輪发电机；b——将一个导轴承放在轉子下部的悬式水輪发电机，不用下机架；в, г, д, e——伞式水輪发电机；в——将一个导轴承安装在轉子下部，推力轴承上部；г——将一个导轴承安装在轉子和推力轴承下部；д——一个导轴承安装在轉子上部，推力轴承安于水輪机頂部；e——一个导轴承安于轉子下部，推力轴承安于水輪机頂盖上 (图中没示出)

修推力轴承时不需吊出轉子，而且两个导轴承使軸不能偏心 (图 9a)。将一个导轴承放于轉子下部，不用下机架可降低机组的高度 (图 9б)。

低速悬式电机因为定子直径增加，上負荷机架的跨度也增长，同时軸向負荷也增加，則負荷机架变得很庞大。由減輕机架的重量和縮减机组的高度来看，此时有必要采用伞式的水輪发电机，这时負荷机架必小于定子內径，这就減小了其尺寸和重量 (图 9в, г)，但这种結構有两个缺点：1) 推力轴承的工作困难些，2) 推力轴承的直径增加了 (因为要使主軸的法兰盘能通过) 推力轴承的损失增加了約 20—25%。图 9 的 г 比 в 所示的結構型式有优点，因为这时推力轴承的油箱只作为一容器用，而不受徑向力的作用。这一点也很重要，因为大大的減輕了推力轴承另件的结构等。

当机组很高时，在伞式的发电机轉子上部再加一个导轴承。伞式的結構近来有很大的发展，已将下机架除去而将推力轴承直接安装在水輪机頂盖上部，这样可以大大的减低电机的高

除水輪发电机主要的两种結構形式外还有一些变形。如图 9 所示。

在选择机组的結構型式时要考虑：

1) 当旋轉时轉子的机械稳定性，2) 运行的可靠，修理和维护时的方便性，3) 结构的造价，重量和制造之工时，4) 与机组尺寸有关的厂房建筑費用等。

按轉子的稳定性而言，悬式結構对不同轉速与容量的发电机都适合。由维护的观点来看也有其优越性，因为在拆

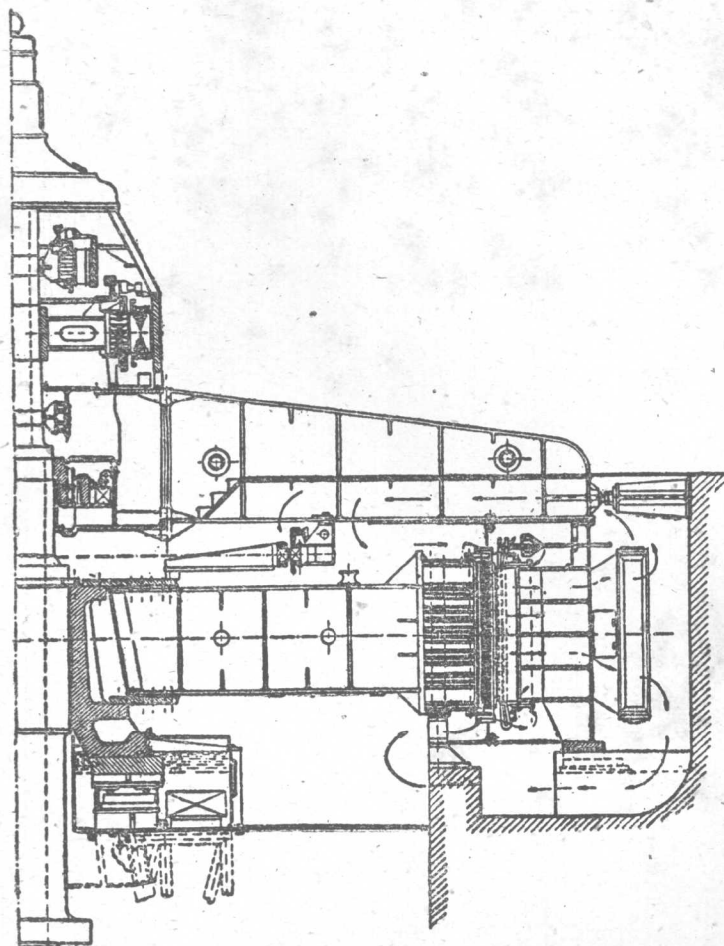


图 10 古比雪夫水电站水輪发电机断面图

度，机組的成本改变并不多，因为导轴承及水輪机的頂盖結構复杂了，最主要的是大大縮減了电站建設之投資。图 10 是将推力軸承安装在水輪机頂盖上伞式結構断面图。

如果在选择电机的結構型式时，無論是用伞式的或是悬式的发电机，电站建筑部分的投資实际是一样的話，則有必要选取悬式的发电机。

A. 悬式的水輪发电机

其推力軸承安装在轉子的上部，在轉子上下各安装有导軸承。悬式的水輪发电机虽可用于不同轉速和容量范围，但对低速而言，一般是很少采用的，因为这时上負荷机架跨度很大，軸向負荷很大，为了减少上負荷机架的重量和降低机組的高度，所以在低速时采用伞式的水輪发电机。

图 11 是中速的悬式水輪发电机結構。是为埃及尼罗河上阿旺水庫发电站用的水輪发电机 [JI18]，容量为 49500 仟伏安， $n_N=100$ 轉/分， $n_y=365$ 轉/分。 $GD^2=15000$ 吨米²，推力軸承最大負荷为 16000 吨，其結構特点是：轉子支架用双层的結構；推力軸承的油是外部循环冷却，上导軸承为自潤滑；下导軸承本身单独潤滑的，其冷却是靠徑間的空气冷却；主付激磁机采用防尘密封式的結構，冷却空气經上下风扇压入轉子极間区域后經定子空气冷却器又分上下两部而完成一个循环，上部的冷却空气經上风扇后，一部分經空气导管上升去冷却主付激磁机，后經上部

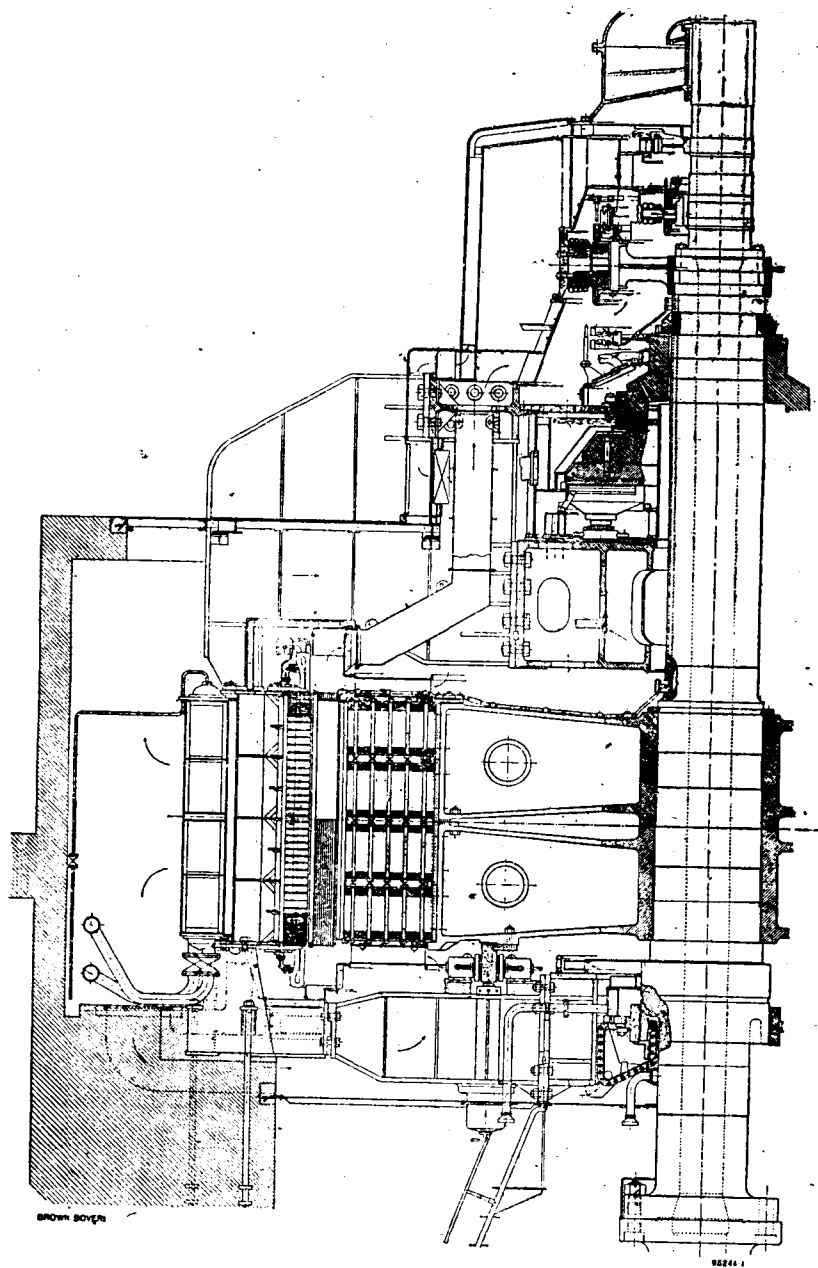


图11 49,500 仟伏安, 100 轉/分悬式水輪发电机断面图

的小型空气冷却器完成自己的循环(见图 11),制动器是采用垂直安置的制动环,由内外径方面进行制动,同时也可顶起轉子。

高速的竖軸水輪发电机应用很广,为了提高其机械稳定性起見,在結構上采用了一些基本的措施,这些措施是:上下机架对称的刚性;經向力作用于下机架上;上下导軸承有互换性;推力軸承套筒,下导軸承套筒和主軸在一起加工;激磁机轉子直接安装在水輪机軸上(不用套管);同时将定子机壳的支座移到与定子和轉子同一水平軸上 [Л10],采用了这些措施后轉速在 300—600 轉/分之間的竖軸水輪发电机工作是很稳定的(见图 12)。

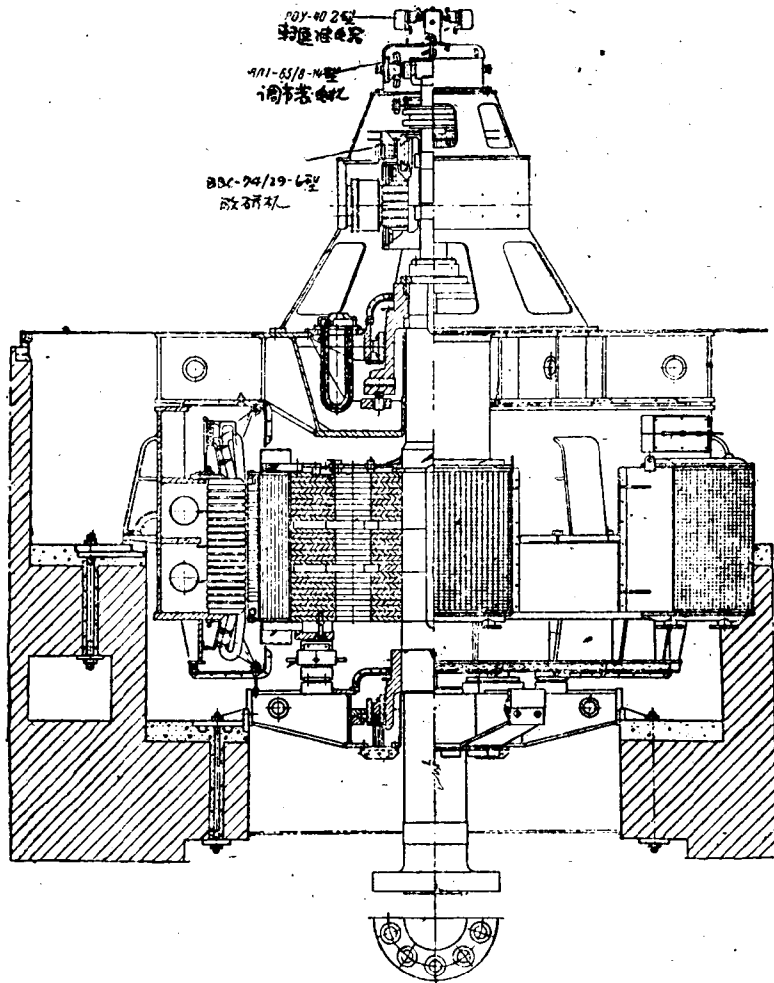


图 12 BFC325/89—4 型水輪发电机断面图

(說明上述特点用該电机作为一个例子)

图 13 是 50000 仟伏安, 500 轉/分, $16\frac{2}{3}$ 周 SGV620—580.4 型单相水輪发电机, 定子电压为 $18000 \pm 10\%$ 伏。該电机在容量方面是世界上最大的竖軸单相交流发电机, 轉子直径为 3030 公厘, 4 极, 轉子重 160 吨, 定子分为两瓣, 定子繞組用人造树脂絕緣, 其特点是在高温时有很大的机械强度。推力軸承, 导軸承, 主付激磁机和摆式发电机位于車間地面以上便于维护。其結構的特点是: 定子机座固定于底座上(中間环), 后与水輪机外壳相連, 最后将軸向力传给地基。发电

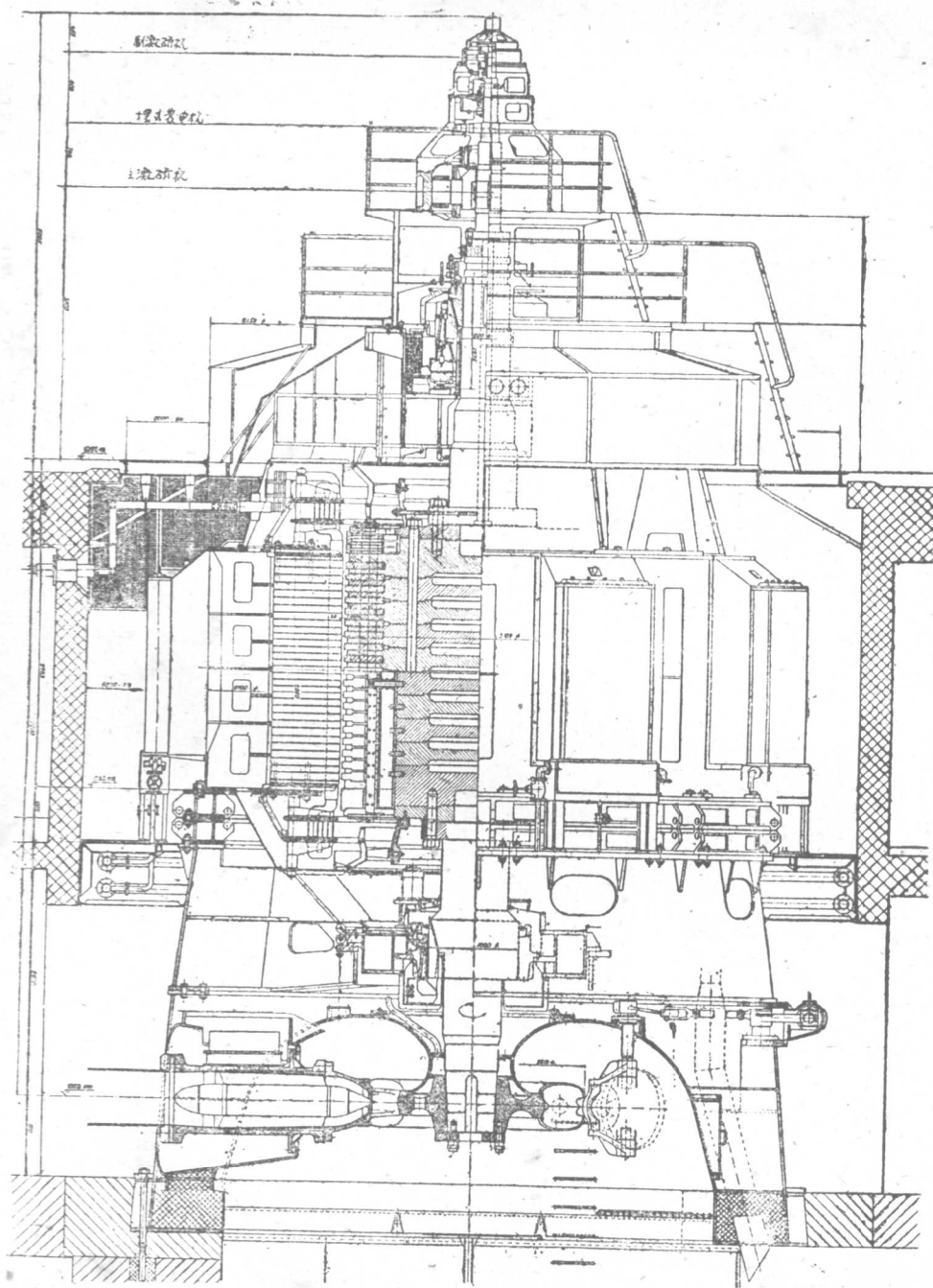


图 13 50000 仟伏安, $16\frac{2}{3}$ 周单相悬式水轮发电机断面图

机的定子与水輪机外壳紧联接(如以后换用弹性联接时也有其可能性), 发电机采用封閉或循环通风冷却系統, 主軸由三段組成。

悬式水輪发电机的主要缺点是机組的高度較大, 近年来在降低悬式水輪发电机的高度方面各工厂設計单位都进行了很多工作, 現在我們介紹一种降低悬式水輪发电机高度的結構型式(见图 14) [Л21]: 法兰盘 11 和 14 固定于轉子輪殼 10 上, 法兰盘 14 和輪殼 10 是同一个鑄件, 推力轴承 15 用螺栓固定于法兰盘 14 上, 經下法兰盘 11 和伺服馬达外壳 12, 轉子与水輪机主軸 13 相連, 激磁机的滑环安于发电机下部, 上机架 19 內安有推力轴承油槽 20, 采用上述結構悬式水輪发电机的高度可大大的降低。

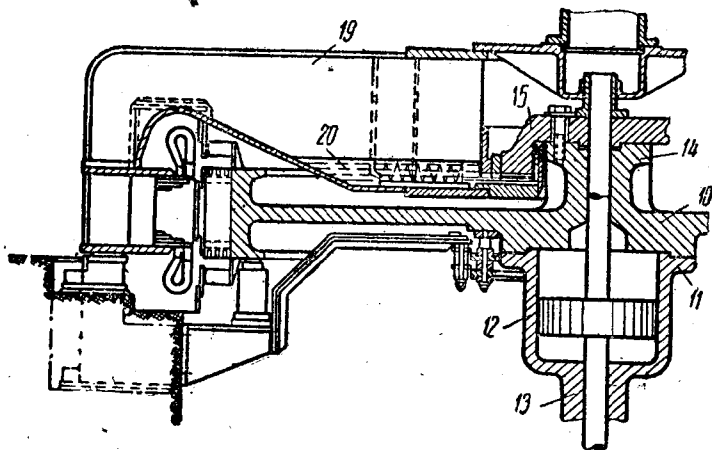


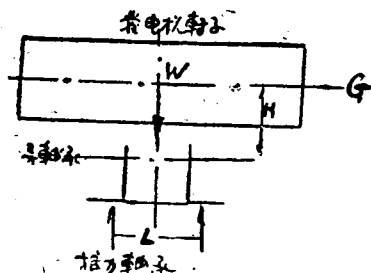
图 14 悬式水輪发电机断面图

B. 伞式的水輪发电机

伞式結構的水輪发电机有很多优点, 主要表现在:

- i) 在制造同一規格的发电机情况下, 伞型的結構可使电机的重量輕 10—15%。
- ii) 伞式发电机的主軸短些, 降低了电机的高度, 厂房高度可縮短, 节约投資, 同时吊車吊起的高度也低些。
- iii) 主軸可很方便由轉子抽出, 起重設備的容量可以小些。
- iv) 在安装过程中可通过主軸来观察是否有偏心等, 同时定子, 轉子, 下机架和主軸可同时进行安装, 施工期間可縮短。

水輪发电机采用伞式的一般条件可認為是:



$$i) \quad D_i/L_i > 4.$$

式中 D_i ——定子內径。

L_i ——鉄芯长度。

$$ii) \quad \text{一般來說轉速低于 } 150 \sim 100 \text{ 轉/分。}$$

$$iii) \quad \frac{1}{2} WL \gg GH \text{ (見左图)。}$$

式中 W ——軸向力

G ——徑向力 (短路磁拉力, 偏心和气隙不均匀时产生的磁拉力等)

H ——轉子重心到導軸承中心的距离。

L ——推力軸承的平均直径,

iv) 轉子重心到推力軸承的平均距离应大于主軸二倍的直径, 或是 L/H 值越大越好——也就是轉子的重心靠近推力軸承。

大容量水輪发电机采用伞式的結構时应很慎重的考虑, 主要是其稳定性問題, 随着 L/H 比值的减小发电机的稳定性下降。

图 15 是伞式水轮发电机改变转子重心到导轴承中心距离 H 时测得主轴上端振动的关系曲线与运行的伞式水轮发电机比较 (J116) (图 15 的曲线与其他结构的因素还有关)。由曲线可以很清楚的看出, 当 L/H 值减小时, 轴的振动逐烈增加。因此在设计大型伞式水轮发电机时稳定问题要很慎重的考虑。但也得具体考虑之, 例如日本佐久间水电站 93000 仟伏安的伞式水轮发电机在主轴上端测得的振动为 30/100 公厘也没有危险, 而正常的运行。

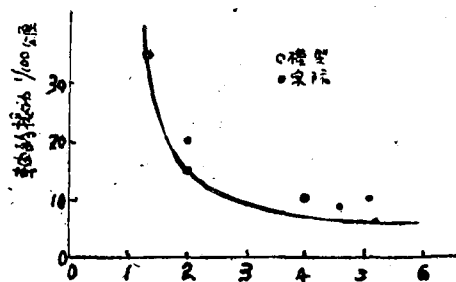


图 15 伞式发电机的稳定度

伞型水轮发电机的推力轴承和导轴承安于转子下端, 而转子上部只有当速度高时才附加一导轴承, 图 16 是日本佐久间水电站 93000 仟伏安, 50/60 周, 167/200 转分的伞式水轮发电机断面图, 该结构的特点是: 主轴推力头和下法兰盘是整块锻件, 转子支架用螺栓固定于推力头上

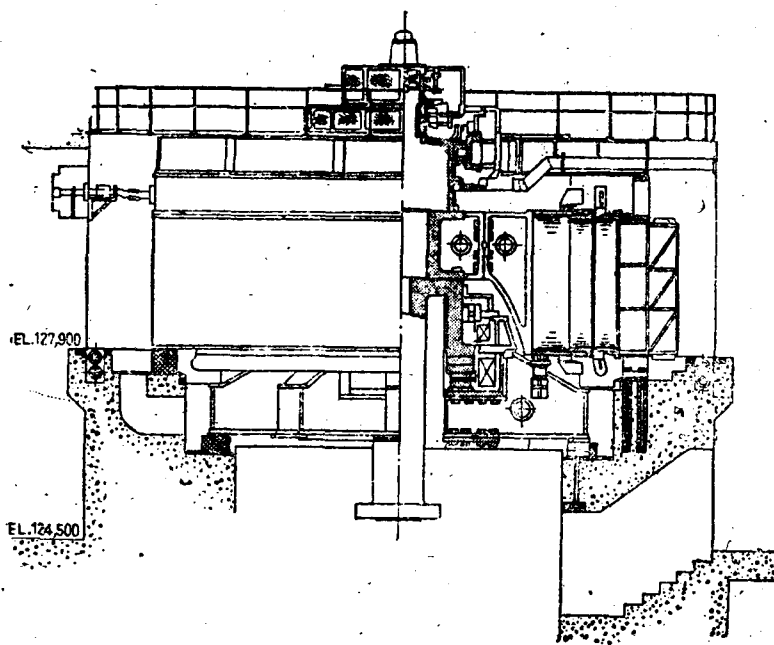


图 16 93000 仟伏安, 167/200 转分伞式水轮发电机。

端, 因此在吊起转子时, 按螺栓的外侧, 来拆解转轴下面的推力轴承部份, 转子铁心叠片轴向厚度较大, 轴子支架是可折式的, 或梭子形, 因此整个转子的重心下降, 使 H 值很小, 同时导轴承靠近转子中心部份, 虽然该电机的转速较高, 采用上述结构后便有可能采用伞式的结构, 与图 17 的伞型水轮发电机容量和转速的关系曲线来看, 该电机有一定的技术进步性。

随着伞型水轮发电机的发展, 为了更进一步的降低发电机的高度, 已将推力轴承直接安装在水轮机的顶盖上, 如图 10 和 18 所示, 图 18 所示结构之特点是该电机带有复合推力轴承装置。水轮机与发电机同用一大轴的情况也渐渐增多, 如图 19 所示, 该电机与水轮机共用一主轴, 这样可省去下机架, 将推力轴承直接安放在水轮机顶盖上。苏联加姆斯克水电站 (Камская ГЭС) 发电机就是这种结构型式, 即将建成的苏联克拉斯诺亚尔斯克水电站的 80 万瓩抗阻采用伞式的结构,

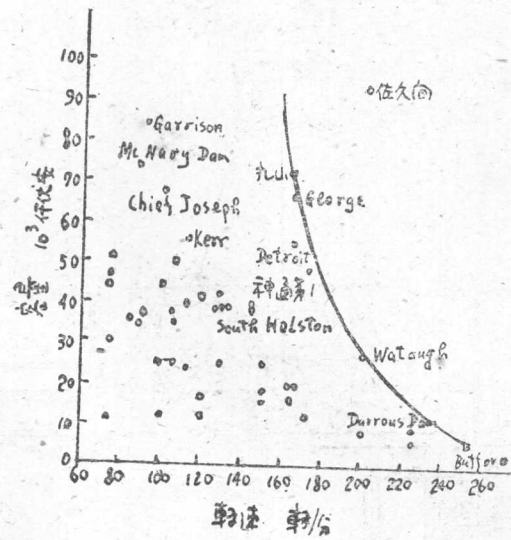


图 17 伞式水輪发电机制造的实例

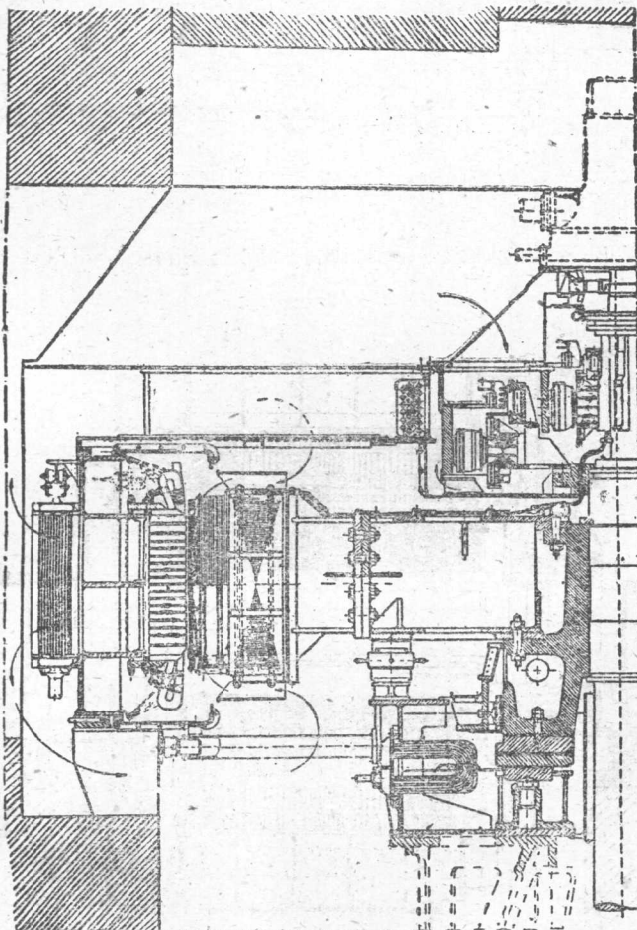


图 18 复合推力轴承装在水輪机頂盖上的水輪发电机。

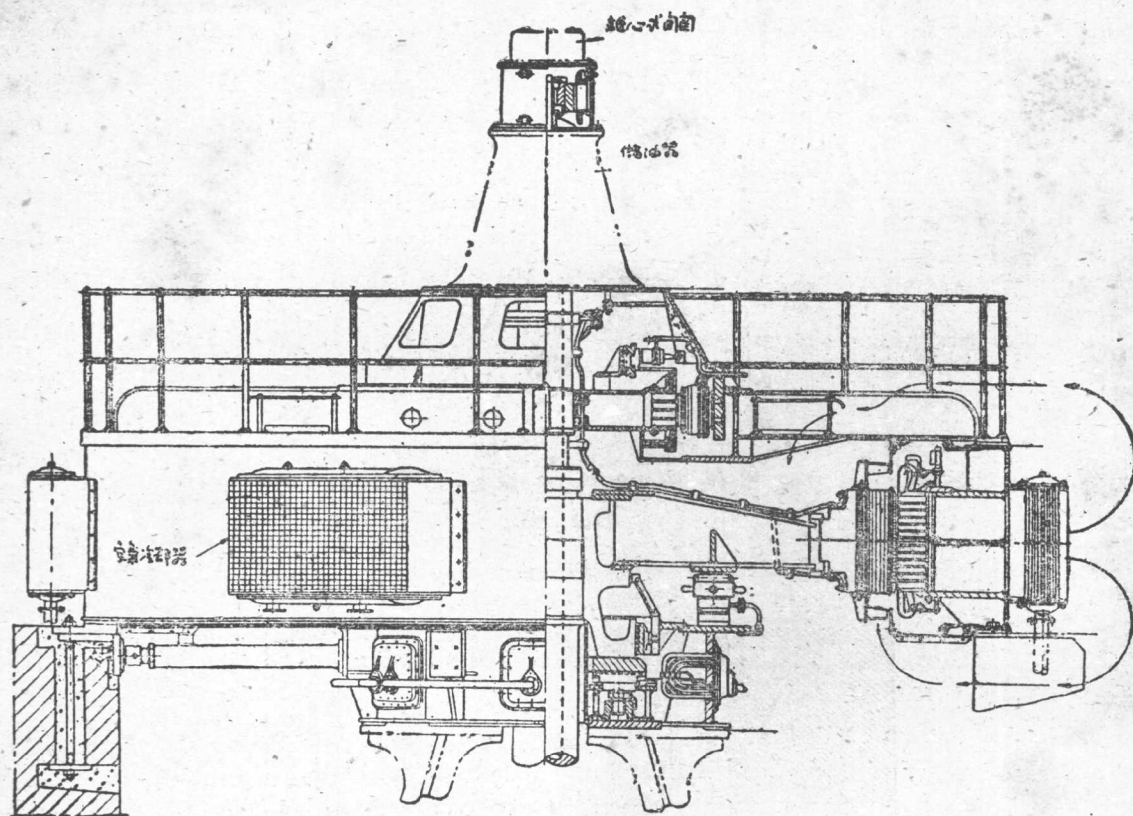


图 19 发电机与水轮机共用同一主軸的水輪发电机結構图(为了說明上述結構特点,用 BFC-525 水輪发电机作实例)

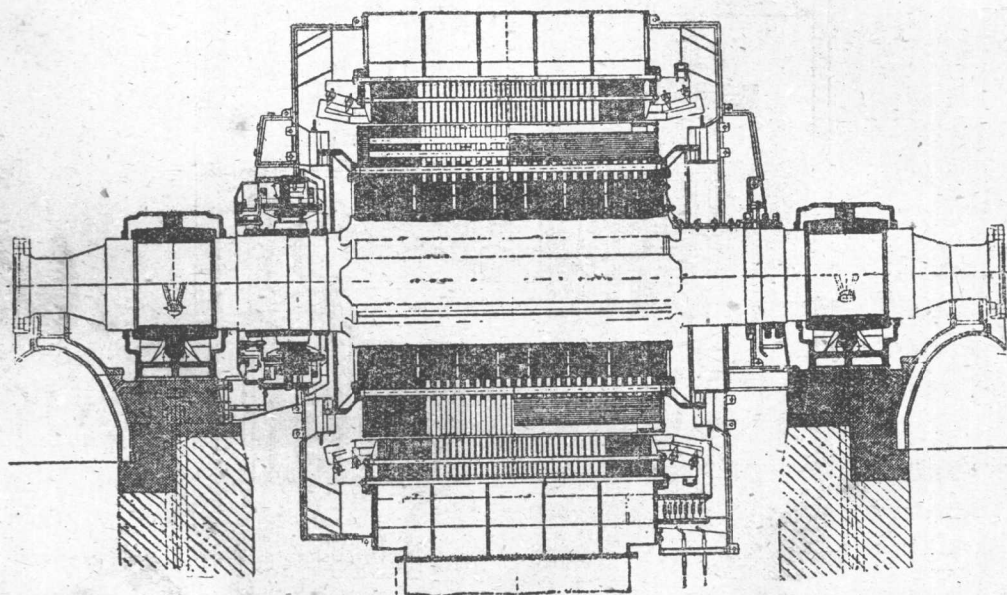


图 20 Kaprun 水电站 70000 仟伏安, 500 轉/分高速橫軸发电机断面图