

125

国外大型水輪发电机制造 工业概况

第一机械工业部第八局 哈尔滨电机厂 合編
大电机研究所

1960. 3

522.31
811
389078



国外大型水轮发电机制造工业概况

編輯者：哈尔滨电机厂編委会
大电机研究所

出版及发行：总工程师室、技术报导組

印刷者：哈尔滨新生印刷厂

份数：1000份

0.2.0

国外大型水輪发电机制造业概况

(一) 緒 言

水力发电的动力来源是取之不尽用之不竭的河流水力，而且利用水力发电的电力成本一般只有火力发电的几分之一，水力发电的同时往往又能收到防洪、灌溉，航运等水利的综合效益，因此近卅年来世界许多国家对水力发电建设有了不同程度的注意，从而也推动了水輪发电机制造业的发展。

苏联是世界上水力资源最丰富的国家之一，其水力蕴藏量达5亿瓩，技术上可能利用的水力资源大于3亿瓩，与我国水力资源数量相近，列世界之第二位。苏联已经建设完成的古比雪夫水电站容量达210万瓩，接近建设完成已经开始发电的新大林格勒水电站容量达230万瓩，其规模和发电能力都佔世界的第一位，超过了美国的太古里水电站（容量为198万瓩），在近年来15年左右的时间里苏联的水电容量已经发展到1000多万瓩，发展速度越来越快。苏联正在进行宏伟的共产主义建设，水电站建设的规模也空前巨大，建造于西伯利亚安加拉河上的布拉茨克水电站容量将达450万瓩，目前已经开工兴建，建造于西伯利亚叶尼塞河上的克拉斯诺雅尔斯克水电站容量将达600万瓩之多，这将是世界各资本主义国家所望塵莫及的。随着水电站建设的蓬勃开展，苏联水輪发电机制造业在最近15年以来（第二次世界大战结束之后），有了迅速的发展，已经由一个需要进口水輪发电机的国家，一跃而为具有世界最先进技术水平的水輪发电机制造业国家。在1926年苏联制造了第一台水輪发电机，规格为7000瓩，75轉/分、立式悬垂型结构，当时焊接技术还不发达，主要结构部件（如机座、轉子支架）还用鑄造方法，在第二次世界大战结束之后，1946年苏联制造了雷宾斯克电站55,000瓩62.5轉/分的水輪发电机，紧接着又为恢复德涅泊水电站而制成了72000瓩83.3轉/分的水輪发电机，其技术水平赶上并超过了美国的同类型产品。1953年为古比雪夫水电站制造的105,000瓩68.2轉/分水輪发电机是世界上尺寸最大的水輪发电机，在设计制造方面采用了许多先进技术。苏联目前正在制造布拉茨克水电站用的单台容量为22.5万瓩的巨型水輪发电机和准备制造克拉斯诺雅尔斯克单台容量为30万瓩（有消息已提高为50万瓩，甚至100万瓩）的更大水輪发电机。

资本主义国家的水輪发电机制造业发展情况，和以苏联为首的社会主义国家的水輪发电机制造业发展情况，成了鲜明的对照。美国虽然也有不少水力资源，但由于社会制度的束缚，建造水电站要淹没田地影响了农业资本家的利益。由于资本家之间的相互牵制，虽然美国经过几十年的长期建设已有大约3000万瓩的水电容量，但发展速度缓慢，在水輪发电机制造业的发展方面亦复如是，现在已经显然落后于苏联了。英国水力资源缺乏，水电在整个电力工业中比重很小，水輪发电机产品多系出口商品，是靠国外订货维持的，因此发展速度自然越来越慢，发展前景自然黯淡无光。

(二) 国外大型水輪发电机制造的成就

目前国外已经制造并投入运行的最大水輪发电机是苏联制造的古比雪夫水电站105000瓩、

632轉/分的水輪發電機，不但尺寸最大，電磁轉矩最大而且設計製造的技術水平很高，它的定子機座外徑達到17米，電磁轉矩達1760噸—米，推力軸承負荷為3400噸，採用新式的高子勵磁系統，這些獨特的成就都超過了發達的資本主義國家。

目前已投入運轉的單台容量最大的水輪發電機是瑞典製造的13萬瓩，125轉/分的水輪發電機，安裝在斯托諾福(Stornorrors)水電站中。由於它的單台容量比蘇聯古比雪夫水輪發電機大得不多，而轉速高了接近一倍，因此它的結構尺寸顯著地比古比雪夫水輪發電機小，電磁轉矩(1170噸—米)比古比雪夫電機的小50%推力軸承負荷也低，設計製造的技術複雜性也就比較低。

目前國外正在製造的最大容量水輪發電機是蘇聯為我國三門峽電站製造的15萬瓩，98.6轉/分的水輪發電機和蘇聯布拉茨克水電站所用23.5萬瓩，125轉/分的水輪發電機。這些單台容量最大、技術先進的水輪發電機，將有可能在年內試制完成。更大容量的蘇聯克拉斯諾雅爾斯克水電站用30萬瓩以上的水輪發電機也正在蘇聯進行着製造的準備工作。

日本也是水輪發電機製造工業比較發達的國家之一。已經製造出子午式發電所105,000仟伏安(約9萬瓩)167轉/分的水輪發電機，正在製造容量在10萬瓩以上，轉速在200轉/分/以上的水輪發電機。由於日本的地理條件河道坡降較大，水頭較高，因而水輪發電機的轉速一般較高。日本水輪發電機設計製造的主要特點是在轉速較高而容量較大的情況下採用傘型結構，以節約結構材料，降低電機高度，節約電站建設投資，在水輪發電機的結構中採取了必要的措施以保證運轉穩定性。

美國的水輪發電機製造工業發達的比較早，但近十幾年來發展極為遲緩，已經由一個在水輪發電機製造工業方面的先進國家被蘇聯趕上超過而在設計製造水平上遠遠落後於蘇聯。在第二次世界大戰剛結束時，蘇聯為了恢復被德國法西斯徹底破壞的德涅泊水電站，曾向美國訂製了三台水輪發電機組，單台容量99000仟伏安(72,000瓩)。美國機組的效率沒有達到保證數值，1946年起蘇聯的列寧格勒“電力”工廠(Электросила)和列寧格勒金屬工廠(ГМЗ)為德涅泊水電站續製了其餘六台水輪發電機和水輪機，發電機的額定容量為103,500仟伏安(33000瓩)，轉速83.3轉/分，六台機組的最大發電能力比美國機組提高了近73000瓩，等於多了一台機組或者多了一個中等容量的水電站，而且蘇聯自制機組最高的效率要比美國機組的最高效率高約2.8%。在水輪發電機的結構設計方面(如推力軸承結構)，蘇聯的水平在當時就超過了美國。

英國在水輪發電機製造工業方面也體現了老牌資本主義國家的特色——發達早而發展慢，先先進而後落後，英國本土上水力資源很少，水輪發電機產品多數都是向國外出口銷售。1954年英國為加拿大季馬諾水電站製造了單台容量105,000仟伏安(35000瓩)327轉/分的水輪發電機，其容量大而轉速較高，在機子結構方面主要克服於由離心力產生的較大機械應力，這也是設計製造水平較高的水輪發電機之一。在這以後英國沒有製造過容量更大的水輪發電機。

捷克斯洛伐克和匈牙利是在第二次世界大戰以後新興的製造水輪發電機的國家，這兩個國家，比較擅長製造與沖擊式水輪機相配的高速水輪發電機(這類水輪發電機多屬臥式)，尤其是捷克斯洛伐克的产品具有使用材料少，重量輕，利用優質材料較多，加工精度較高等特點。

西德在製造水輪發電機方面也有較長歷史。在我國抗日戰爭勝利前夕，曾為當時日本帝國主義盤踞下的丰满水電站製造了單台容量60000瓩125轉/分的水輪發電機，結構材料耗用量很大，總重達750噸。在解放後蘇聯幫助我國修復丰满水電站，蘇聯製造的每台75500瓩125轉/分水輪發電機重量約為650噸，和西德發電機相比重量減輕近15%。而容量還提高15%以上，這體現了社會主義國家和資本主義國家在設計原則上的根本區別，社會主義國家提倡實用和節約，而資本主義

国家以取悅主和營利為主。美国为丰满电站制造的机組也有类似情况。

现将国外已經制成和正在制造的部分大型水輪发电机列如下表：

制造国名	水电站名称	容量(万千瓦/万瓩)	轉速(轉/分)	結構型式
苏联	布拉茨克	26.5/22.5	125	悬 型
苏联	中国三門峽	17.7/15	93.6	悬 型
苏联	吉比雪夫	12.35/10.5	63.2	伞 型
瑞典	斯托諾福	15/13	125	伞 型
瑞典	哈斯普蘭格	10.5/N	167	伞 型
日本	御 母 衣	12.5/N	225	伞 型
日本	奥 只 見	13.3/N	200	伞 型
日本	田 子 倉	10/9	167	伞 型
美国	大 古 里	N/11	120	悬 式
美国	罗 斯	13/8	150	悬 式
英国	加拿大季馬諾	10.5/3.5	327	悬 式

(N表示数据不詳)

(三) 国外大型水輪发电机的結構及其主要研究內容

1、結構总布置

大型立式水輪发电机的基本結構型式分悬型和伞型两种。悬型是指推力軸承布置在发电机轉子上方，而伞型是指推力軸承布置在轉子下方。

悬型的主要优点是运转稳定可靠，由于推力軸承在轉子上方，因而便于按装、检修和维护。推力軸承直径比伞型的小，因而推力軸承損耗也比較小。

伞型的主要优点是由于轉子的总推力不由直径較大的上机架来承受，可以减少发电机結構材料的重量，一般可以比悬型减少重量10~15%左右，例如苏联布拉茨克22.5万瓩125轉/分悬型水輪发电机重約1450吨，其伞型比較性方案重量減輕約200吨，佔总重的14%；伞型发电机的高度减少，相应地降低了电站厂房的高度，因而节约了建筑投資，一般对机内式厂房更为有利。

一般說来，在通常情況下，悬型水輪发电机的經濟性不如伞型，但在水輪发电机設計制造的技术方面，悬型是可以应用在任何規格的机組上的。伞型水輪发电机的經濟性比悬型好，但从技术方面看不是所有水輪发电机都可以采用的，要受到一些条件的限制，这些限制性的条件在各國也各有不尽相同的看法和不同的实践經驗。

在苏联一般經驗認為最好要滿足以下几个条件才采用伞型：

1) 額定轉速 $n \leq 100$ 轉/分

2) 发电机定子內徑 D 与鉄心長度 l 之比 $D/l \geq 7$ ，

3) 发电机轉子磁扼中心面到下導軸承支持中心面的高度 H 要小于或等于轉軸直径的2

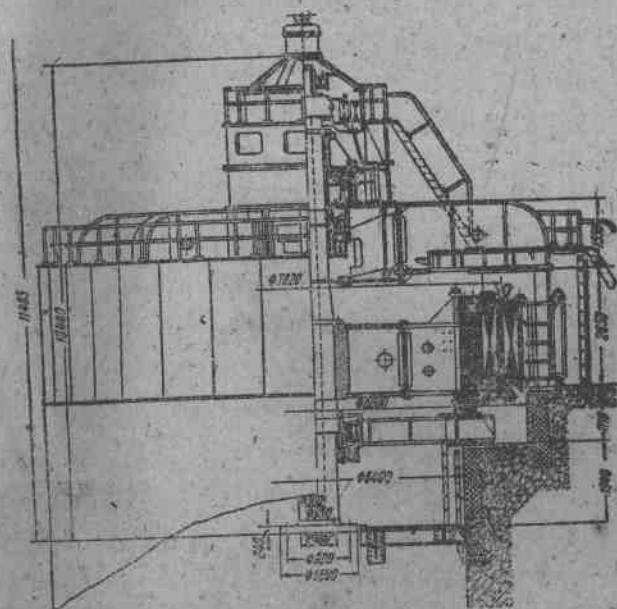
倍；

(第3个条件往往从属于第2个条件，因此一般以前2个条件为主)

下表列出苏联已經制造的一些伞型和悬型水輪发电机：

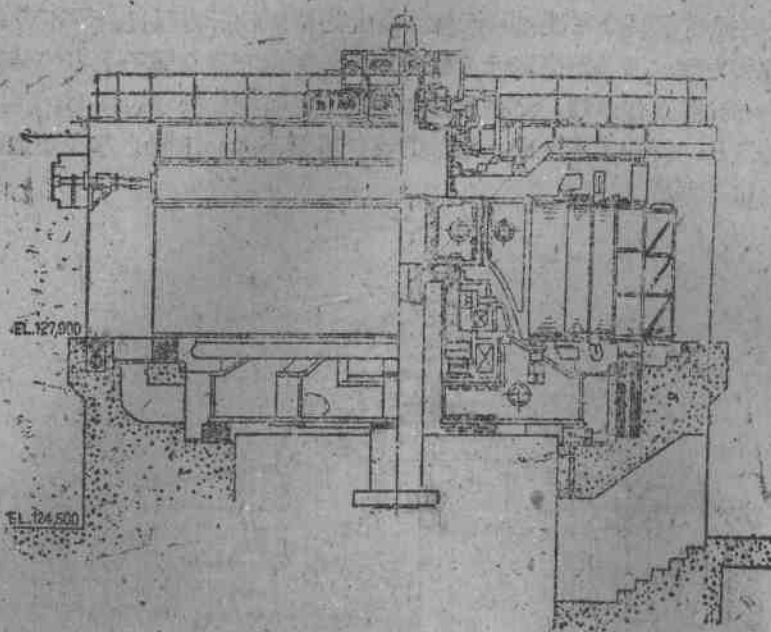
序号	容量(瓩)	轉速 (轉/分)	D(毫米)	l(毫米)	D/l	結構型式
1	24,000	100	7520	1050	7.12	傘型
2	40,000	88.2	9720	1200	8.12	〃 〃
3	57,200	62.5	12,920	1500	8.6	〃 〃
4	105,000	68.2	14,500	2000	7.15	〃 〃
5	72,500	125	7820	1900	4.12	懸型
6	21,600	150	6900	750	9.2	〃 〃
7	32,000	100	7970	1200	6.64	〃 〃
8	72,000	83.3	11,000	1800	6.1	〃 〃

从上表可以看出苏联制造的傘型水輪发电机是符合条件的，序号5~8的发电机不符合或不完全符合条件，因此采用懸型結構。

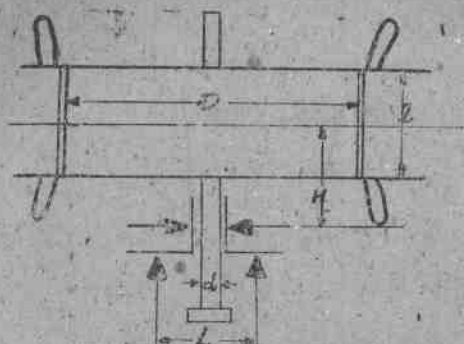


(此图取自苏联 Сборник Электриков на 第14期第8頁图1)

蘇聯懸型水輪發電機圖



蘇聯傘型水輪發電機圖



傘型水輪發電機尺寸代號示意圖

捷克斯洛伐克的技术資料从 D 、 l 、 n 三个因素相联的关系 $\frac{D}{ln}$ 来分析采用傘型的范围，

从曲线所示的范围来看采用傘型結構时一般

$$\frac{D}{ln} \geq 0.04$$

日本采用傘型結構的考虑条件，主要是推力軸承支持直徑 L 和轉子中心平面到下导軸承支持中心平面的高度 H 之比 L/H 。它代表发电机运转的稳定度， L/H 越大則稳定度越大，軸的摆度和电机的振动也就越小。

日本大型水輪发电机傘型結構一般不受轉速 n 以及 D/l 关系的限制，其主要的措施是采用下垂型的轉子支架，使轉子中心平面尽可能降低，减小 H 而加大了 L/H 值以提高发电机运转的稳定度。

例如日本田子仓发电所10万千瓦安167轉/分的水輪发电机系傘型結構， D 为7.29米、 l 为2.5米、 $D/l=2.92$ 、 d 約0.96米、 H 仅約为0.6米、 L 約1.2米、 $L/H=2$ ， $\frac{D}{ln}=0.0175$ ，

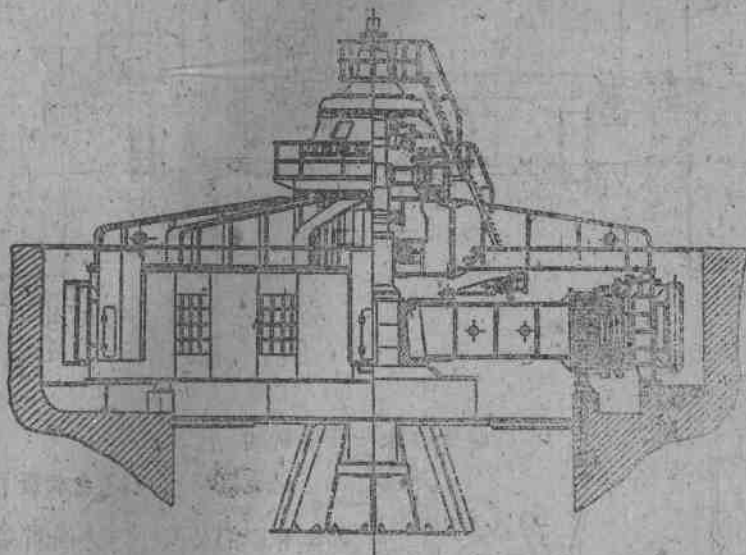
$H < 2d$ ，实践証明采取一定措施后在轉速較高、 D/l 較小的情况下，也是能够采用傘型結構的，但这种結構的轉子支架常用鑄鋼件、制造比較复杂，且推力軸承部分的按装、检修和维护工作比較困难。



日本傘型水輪发电机剖面圖

近几年来苏联在提高伞型稳定性和降低悬型高度的結構設計方面进行了不少创造性的工作。

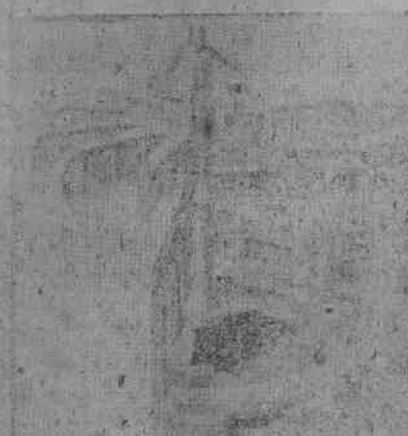
为了提高伞型水輪发电机運轉稳定性苏联采用把导軸承布置在轉子上方的結構，这样在運轉稳定性上已經和悬型結構沒有差別，而在重量和高度上仍可減少很多，同时，將推力軸承部分用支架构在水輪机頂盖上，省去了下机架，增加的支架重量不大。下圖是苏联制造采用这种結構的古比雪夫水輪发电机剖面圖。



(此圖取自苏联“Электросила”杂志第11期第7頁圖3)

蘇聯古比雪夫105,000瓩63.2轉/分水輪發電機剖面圖

为了降低悬型水輪发电机的高度苏联采用沒有下机架、下导軸承的結構，在滿足临界轉速条件和加强水輪机軸承結構的情况下，采用这种結構既滿足運轉稳定性的要求，又能够縮短发电机与水輪机的距离，降低机组高度、并且省去了下机架部分的材料。下圖所示苏联正在制造的布拉茨克22.5万瓩125轉/分，水輪发电机采用了这种結構。



(此圖取自苏联“电工公报”(Электротехника)1957年第11期第31頁圖7)

蘇聯布拉茨克水輪發電機圖

3、推力軸承

大型水輪发电机之推力軸承結構主要有以下三種：

- 1) 彈簧式推力軸承
- 2) 剛性支柱式推力軸承
- 3) 液壓支柱式推力軸承

彈簧式推力軸承是比較陳旧的結構，在美国等資本主义国家比較常用。这种結構的軸瓦下面布滿小彈簧，对小彈簧的尺寸性能要求高、不易制造，按裝时不便于調整，軸瓦在发

电机启动及运转时自动调节倾斜度的能力较差，运转的经验也证明这种结构的推力轴承是有缺点的。例如在苏联德涅泊水电站安装的美国奇异公司制造的水轮发电机上本来是弹簧式推力轴承，运转中曾连续发生事故，烧毁推力轴承瓦，经换用苏联“电力工厂自制的刚性支柱式推力轴承后在同样的条件下安全运转。而未发生任何事故。又如水丰电站的水轮发电机上原用弹簧式推力轴承，运转温度最高达90°C，超过一般规定限度，据说在换用刚性支柱式推力轴承后运转温度降低了10°C。

刚性支柱式推力轴承结构采用比较广泛，制造比较方便，而且运转可靠，苏联对这种结构的推力轴承已经积累了相当丰富的设计制造和运转经验，西德和日本过去采用弹簧式结构，近年也采用刚性支柱式推力轴承。世界上最大的推力轴承是苏联古比雪夫水轮发电机上负荷能力为2400吨的推力轴承，平均单位压力为60.4公斤/平方厘米，运转情况良好。根据试验结果说明平均单位压力有可能提高，在平均单位压力达70公斤/平方厘米时温度并不上升（这是因为平均单位压力虽然升高，但受压面积减少，摩擦损耗不增加，且轴瓦减少后有利于油的循环流通。）

液压支柱式推力轴承是苏联“乌拉尔电机”工厂在1952年创制成功的，钢制的弹性支柱装在空心的圆形底座上，内部充满油，各支柱借底座形成内部通道之整体，弹性支柱随负荷不同而变形，各支柱相互起调节作用，以使各支柱负荷尽量均匀，因此可以大大地减小因安装误差或轴承座不对称变形产生的不良影响，使各轴瓦间的温度差缩小。已制成的液压弹性支柱式推力轴承总负荷能力为1500吨，平均单位压力提高到61公斤/平方厘米，供五个支柱每支柱承担300吨。液压支柱式推力轴承与同一发电机上装用刚性支柱式推力轴承的试验结果比较如下：

轴承型式	平均单位压力 公斤/平方厘米	轴瓦最高 温度 °C	轴瓦最低 温度 °C
液压支柱式	60	50	45
刚性支柱式	35	59	33

从上表可以看出液压支柱式推力轴承运转的优越性，平均单位压力可以提高，而最高温度及温度差可以降低。这种结构在制造工艺及制造质量上要求较高，运转经验有待积累，目前尚未广泛采用，但确是值得研究，有发展前途的一种推力轴承新型结构。

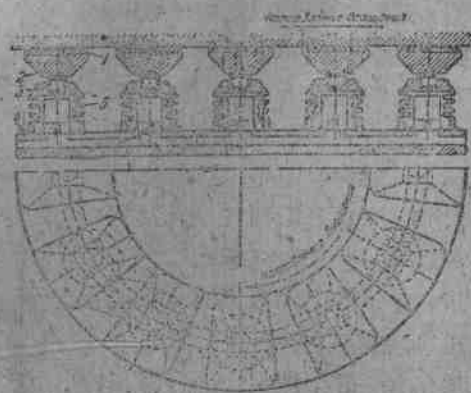
国外推力轴承的研究内容除结构形式外，主要有以下几方面：

1) 减少轴瓦的热变形和压力变形，以提高平均单位压力，降低运转温度，提高运转可靠性。苏联正在进行试验研究工作，改进轴瓦



(此图取自苏联“Электроник”第14期第28页图1)

刚性支柱式推力轴承图



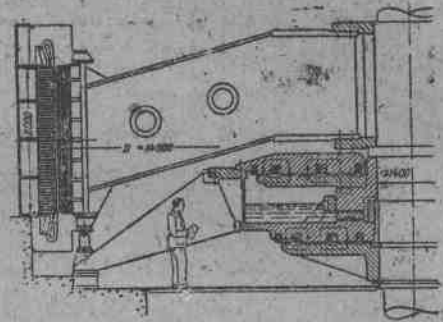
液压弹性支柱式推力轴承

此图取自苏联“电工公报”(Вестник Электропромышленности) 1955年第4期中，К.Ф.Костин等著 Подшипник на Гидравлической Опоре для Мошвы-Гидрогенератора。文中附图，形块大致如七

支持部分的尺寸配合，試用銅底烏金軸瓦。

2) 推力軸承适合于各种特殊運轉条件的研究，如不制動停車，長時間停車后不頂轉子起動、長時間運轉停車后立即又投入運轉的热性起動等，在這方面蘇聯已經積累了一些試驗研究資料和經驗。

3) 減輕推力軸承負荷的電磁鐵裝置。利用電磁鐵將發電機轉子向上提，以減少推力軸承負荷、尺寸和損耗。電磁鐵的功率消耗遠小于推力軸承減少之摩擦損耗，因此還可以提高水輪發電機之效率，日本和西德正從事于這項研究工作。例如西德對一台22.5萬仟伏安、68.2轉/分的水輪發電機設計方案，推力軸承負荷原為3500噸，採用減輕負荷的電磁鐵裝置后推力軸承負荷減小到500噸，只有原負荷的七分之一，電磁鐵消耗的功率僅為90瓩，總計使推力軸承損耗減少337瓩，因而使發電機效率由97.6%增加到97.8%。



(此圖取自蘇聯“電”雜誌“Электричество” 1956年第7期92頁第12圖)

具有減輕推力軸承負荷電磁鐵裝置的水輪發電機剖面圖

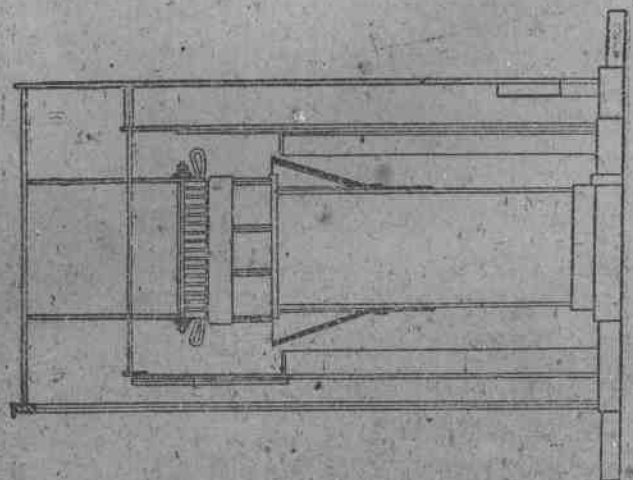
3、通風冷卻系統

通風系統和冷卻方式是現代大型水輪發電機設計製造上頭等重要的問題之一，它對提高水輪發電機極限容量和經濟性具有決定性影響，為此，世界各國正大力開展冷卻與通風的研究。

一般大型水輪發電機採用封閉式通風系統，從徑向通過轉子和定子的熱空氣由分布在定子周圍的空氣冷卻器通水冷卻，通過空氣冷卻器的冷風分上下兩路回到發電機內部循環流動。

蘇聯等國在通風系統方面通過模型和實際機組進行了一系列的試驗研究，和理論分析工作，研究的主要內容有：

1) 通風元件和風道的研究，改進風扇結構、合理安排轉子磁軛和定子鐵心的通風道、減少空氣通過磁軛、磁極、定子鐵心和冷卻器等處的阻力，總的目的是要提高風壓、減少風阻和通風損耗，以及合理分配風量。在1954年蘇聯工程師創造了轉子支架附加出口的通風結構，以利用轉子支架產生的風壓。這個風壓在一般結構中大部分沒有被利用的轉子支架附加出口在低速大直徑的水輪發電機中試用效果顯著。



(此圖取自蘇聯“電工公報”1956年第1期第10頁圖2)

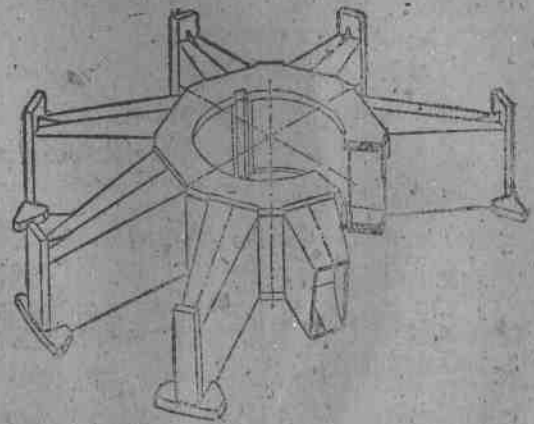
轉子支架附加出口風口圖

近年來電機冷卻方式有了新的發展方向，世界各製造電機的主要國家都在積極研究電機內部液體

冷却方法,由于水和油等液体的热容量和导热能力远远超过空气,特别是水的优点更加突出。因液体通入电机绕组的导线内吸出温度最高部分的热量,大大增加了冷却表面,而且消除了热量由导体经过绝缘和铁心传给空气的热阻,因此能够大大提高电机容量。由于汽轮发电机提高极限容量更加迫切,因而世界各国主要注意力都放在汽轮发电机的内部液体冷却上。苏联、英国和美国已经分别制造了3万千瓦,6万千瓦和26万千瓦伏安的定子内水冷汽轮发电机,并投入运行,瑞士制造了26万千瓦定子内油冷的汽轮发电机;转子内部也用液体冷却的电机在国外还没有制造出来,(匈牙利曾制造过转子铁心间接水冷的小容量电机)而且对转子能否采用内部液体冷却还各有不同的看法。在水轮发电机上要采用内部液体冷却问题在国外还没有引起注意。实际上水轮发电机如果采用定转子全部水内冷,在相同材料消耗情况下,其容量可提高到2倍以上,对巨型水轮发电机提高极限容量也有重要意义。近年来苏联进行的我国长江三峡特大容量水轮发电机的研究工作中,已将内部水冷却作为比较方案。

4、轻型结构部件和钢筋混凝土机座

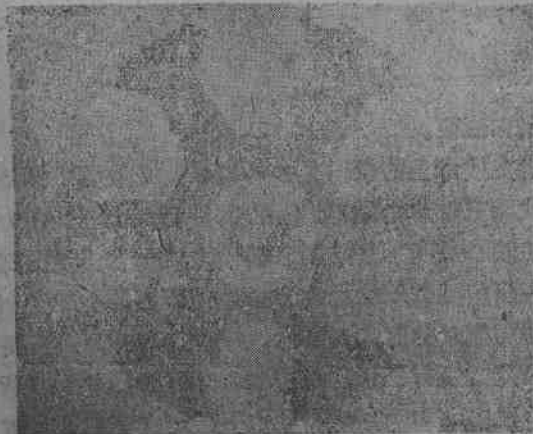
近几年西德的制造厂在采用盒形和薄壳轻型结构部件方面取得了一些经验。盒形结构比一般工字形结构具有更大的断面系数,因而可以减少材料厚度,减轻结构重量,薄壳结构是仿效飞机的构造,薄薄的外壳紧紧地包在轻的骨架结构上形成一个具有弹性而能承受较大负荷的结构部件。按西德资料报导试用的实例,说明在水发电机的转子支架,负重机架和机座上采用盒形结构的結果,可以减少这些部件的重量30~50%,而且有利于通风,一台伞型水轮发电机的上机架直径达14米,采用了薄壳结构,2毫米厚的薄壳钢板点焊在角钢构成骨架上,其重量只有12吨。



(此图取自“电工译丛”1957年第9期第9页图2)
盒形转子支架示意图

苏联在布拉茨克22.5万千瓦水轮发电机设计中采用了盒形结构的转子支架。

轻型结构具有显著的优点,将成为水轮发电机结构设计中的研究的重点之一。

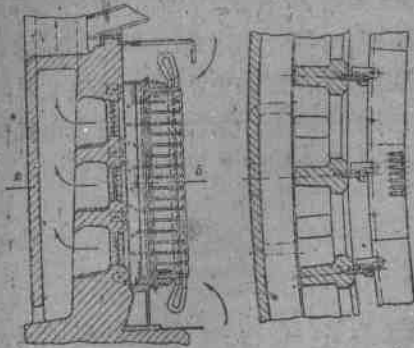


(此图取自“电工译丛”1957年第9期第10页图6)
盒形转子支架



(此图取自“电工译丛”1957年第9期第13页图19)
制造中的薄壳结构伞型上机架

近几年来有的国家开始研究采用钢筋混凝土机座的可能性，定子铁心装压和线卷下线都在安装时在工地进行。钢筋混凝土机座也就是厂房基础钢筋混凝土结构的一部分。采用这种结构一方面可以解决大容量水轮发电机大而笨重的定子运输中的困难，同时也节约了钢结构材料。但可能存在着安装以及运转时热胀冷缩等技术上的问题，直到现在还未见实现。下图是西德的一个钢筋混凝土机座方案草图。



(此图取自“苏联“电”“Электрическое”杂志1956年第7期92页图11)

钢筋混凝土机座草图

下，可以制造出匝数更多的机组。

4) 单台容量提高时，电站装机台数减少，有利于运转维护工作，简化电站自动控制系统、减少运转维护费用。

5) 单台容量提高，台数减少，缩短了电站厂房长度，(宽度加大)，在一般情况下，可节约大量电站土建投资。

限制水轮发电机单台容量提高的因素是由于发电机尺寸高大而产生的一系列设计、制造运输和运转上的问题。

$$\text{千瓦安} = \frac{D_i^2 l n}{C}$$

式中 C ——电机出力常数，决定于冷却方法及参数要求。

n ——额定转速，主要由水轮机运转特性决定。

l_i ——定子铁心长度。

D_i ——定子铁心内径。

由上式可以看出要提高容量首先要增加铁心长度和直径。

按苏联制造厂的分析，水轮发电机定子铁心长度在技术上的极限是3~3.5米。主要限制是铁路运输，在不受铁路运输条件限制的情况下(如我国三峡水电站发电机部件沿江运输的方案)，则定子铁心长度还有加大的可能性，因此定子铁心长度不是限制水轮发电机单台容量提高的决定性因素。由于容量与直径平方成正比，加大直径将更有效地提高容量。但直径的增加受到转子结构应力的限制，尤其是转子的磁轭受到在飞速转速时的巨大离心力，应力显著升高，需要采用强度比较高的钢材(如40号钢，其屈服点为32公斤/平方毫米，拉断强度为57公斤/平方毫米)，适当地加大磁轭径向宽度(例如加大到1米，过多地加大磁轭高度由于磁轭本身重量和离心力也随着增加，因而效果很少。例如磁轭宽度从1米加大到1.4米时，磁轭应力只减少12%，而材料消耗量和设计制造的复杂性却显著增加，因此是不适宜的)。

5、提高大型水轮发电机单台容量可能性的分析

对于大型水电站说来当前世界上水轮发电机制造发展的趋势是提高水轮发电机的单台容量。这是因为：

1) 水轮发电机单台容量越大，每瓦重量和价格就越低；在一定范围内水轮机和发电机整个机组的每瓦重量和价格，也随单台容量提高而减少。

2) 机组单台容量愈大，效率将愈高，同样的水力资源可以发出更多的电能，创造更多的财富。

3) 机组单台容量加大时，制造工时并不按比例增加，而增加较慢。换句话说，在同样的时间和劳动量条件下，

水輪发电机的最大容量可按下列式估算：

$$P_M = \frac{l_t}{C} \left(\frac{k_2 \cdot 10^3}{nk_y^2 \left(\frac{4.8}{b_0} + 2 \right)} + \frac{\sqrt{6} \sqrt{k_2} \cdot 2 (2b_0 + 4h_n)}{4y \sqrt{\frac{4.8}{b_0} + 2} \left(\frac{4.8}{b_0} + 2 \right)} \right)$$

式中 P_M ——水輪发电机最大容量（兆伏安）

l_t ——定子鉄心長度（公寸），极限長度取为36公寸

C ——出力常数（立方公寸/仟伏安/轉/分），一般情况取为160

σ ——磁軛应力（公斤/平方厘米），40号銅取为2300

k_2 ——磁軛減弱系数約为0.5

n ——額定轉速（轉/分）

b_0 ——磁軛徑向寬度（公寸），最大取为10公寸

h_n ——磁极徑向高度（公寸）約为3.2公寸

k_y ——飞逸轉速系数即飞逸轉速与額定轉速之比，

对于一般徑向軸流式水輪机約为2。

将以上数字代入上式可得简化公式：

$$P_M = \frac{26 \times 10^3}{n} + 60$$

最大容量与轉速的关系如下列曲线所示：

n	60	80	100	120	150
P_M	500	390	320	280	245

飞逸轉速系数 k_y 也是限制水輪发电机单台容量提高和影响經濟性的重要因素，目前苏联等国正在研究防止飞逸轉速产生的有效措施，主要是在水輪机結構和調速系統中設法消除产生飞逸轉速的可能性实际上产生飞逸轉速的机会是极少的，在苏联有人建議按目前采用的材料安全系数情况下，将飞逸轉速系数 k_y 取为1.6，由于轉子机械应力与轉速平方成正比的因此降低 k_y 将显著降低轉子应力和材料重量，以克拉斯諾雅尔斯克30万瓩水輪发电机为例，按 k_y 为1.6設計則每台将节约一百万盧布。 k_y 降低为1.6，則最大容量相应地提高，其关系如下列曲线：

n	60	80	100	120	150
P_M	760	600	500	430	360

以 n 为100轉/分为例，当 k_y 由2降为1.6时，則最大容量由32万仟伏安增加到50万仟伏安。

由于电机尺寸及实际可能获得的風量来分析，采用一般空气循环冷却系統水輪发电机的极限容量約为30~40万瓩。由于近年来开展了电机內部水冷却的研究工作，极限容量可以提高，采用內部水冷却系統，水輪发电机极限容量可以增加1倍以上。

主要参考文献

- 1、А.Е.Алексеев.Конструкция электрических машин (1958.Госэнергоиздат)
- 2、А.Е.Алексеев,А.С.Еремеев,Р.А.Лютер.Задачи отечественного гидрогенераторостроения."Электричество" 1955.№.7.
- 3、А.С.Еремеев.Достижения гидрогенераторостроения."Вестник электропромышленности" 1957.№.11.
- 4、Н.П.Иванов,А.С.Еремеев,Р.А.Лютер,М.Я.Каплан, П.М.Ипатов.Мощные.Гидрогенераторы.Сборник"Электросила"№.14
- 5、А.С.Еремеев.Анализ возможностей повышения мощностей гидрогенераторов.сборник "Электросила"№.14
- 6、М.Я.Каплан.Подпятники гидрогенераторов.сборник"Электросила"№.14.
- 7、В.И.Пониковский, Т.Г.Сергиевская, Т.И.Альпер,Г.Н.Мачехина.Некоторые Вопросы аэродинамики систем охлаждения крупных гидрогенераторов.В.Э.П.1956.№.1.
- 8、К.Ф.Костин,М.Н.Грузов.Подпятник на гидравлической опоре для мощных гидрогенераторов."В.Э.П."1955.№.4.
- 9、З.Б.Нейман.Вопросы проектирования мощных гидрогенераторов."Электро станция"
- 10、А.М.Берковский,А.Г.Крайз.Предельные мощности прибудущем развитии электроснабжения В.Ф.Р.Г."Электричество" 1956.№.7.
- 11、А.Б.Шапиро.Ожидкостном охлаждении турбогенераторов "ВЭП" 1959.№.3.
- 12、日立評論(日文)
- 13、电气計算(日文)
- 14、Brown Boveri Review (瑞士、英文)
- 15、G.巴比, R.西蒙著,艾維超譯自西德 "Schweissen Und Chneijden 1956.1.1.水輪发电機焊接結構部件的輕型構造" "电工譯叢" 1957.№.9.
- 16、国外电机冷却文献选編(一机部技术情报所, 1959)
- 17、郭中兴,長江三峡水輪发电機選擇設計問題(水利水电科学研究院 59技字第10号)
- 18、北京水利发电勘测設計局发表:中国水力资源的新估算。"水力发电" 1956.№.3.