

第五屆世界动力會議 報告選集

(水电部分)

第三輯



水利电力出版社

第五屆世界动力會議報告選集

(水 电 部 分)

第 三 輯

H. 沙馬有等著

郭 可 詮等譯

(全書共六冊) 第五冊為水力發電與抽水機

水利部

水利部

水利電力出版社

內 容 提 要

关于世界动力會議水力工程方面的报告共分三輯編譯出版。本輯的主要內容包括兩方面：一是关于世界各国水电站設備方面的論述，其中包括水电站各种設備在設計和制造技术上的新成就和新趋向、水輪机制造上的改进和發展趋势、水輪机的运轉与汽蝕問題等；另一是关于抽水蓄能式水电站的研究和經驗方面的論述，其中包括抽水机的实际应用及其經濟性問題、抽水蓄能式水电站及其有关的設計問題、大系統中的抽水蓄能式水电站等。

本輯的內容比較集中，材料極為丰富、新穎，对于目前正在大躍進中的我国水工技術人員、科学研究人員、电机制造人員以及高等院校与中等專業学校的有关师生，均有很大的參考价值。

第五屆世界动力會議报告选集（水电部分）

第 三 輯

郭 可 詮等譯

*

845S121

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里溝）

北京市書刊出版業營業許可証出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印 新华書店發行

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本 * 4 書印張 * 93千字 * 定价(第10类)0.65元

1958年7月北京第1版

1958年7月北京第1次印刷(0001—2,050册)

21H/7目前日本水輪机和发电机 制造技術的发展情况

日本电机工业协会技术部主任 竹田新

1. 序 言

执行自1951年开始的发展电力资源的5年计划的結果，日本的水輪机和发电机制造业已經將它們的制造厂和设备重新調整与扩充，因而目前能够生产的产品如表1所示。同时，早先已在进行的重大研究工作仍在繼續进行，並且已經使制造技术达到現代化。由于这些坚定不移的努力，得到了极有价值的結果：例如，已制造了10万瓩佛兰西斯水輪机、55公尺有效水头的卡普兰水輪机、93 000 千伏安的伞式发电机及最高抽水水头为226公尺的（抽水蓄能站用的）23 000 瓩抽水机，但战前最高纪录为105 000 瓩的抽水机仍未超过。

茲將有关这些的主要产品及其特点介紹如下。

表1 水輪发电机（1000 瓩及其以上），已經交貨及已接受訂貨者
单位（瓩）

	1950	1951	1952	1953	① 1954	① 1955	① 1956	① 1957	1954年10月1日已接受訂貨者
国内使用	160570	185870	438330	879100	655600	558900	—	—	828900
出口	2000	29000	45600	27300	—	38900	—	—	38900
共 計	162570	214870	483870	906400	655600	694700	—	—	867800
預計尚能超額制造的数量	—	—	—	—	—	560000	1 400 000	1 400 000	—

① 估計数字。

表2 水輪机（1000 瓩及其以上），已經交貨及已接受訂貨者
单位（瓩）

	1950	1951	1952	1953	① 1954	① 1955	① 1956	① 1957	1954年10月1日已接受訂貨者
国内使用	144350	233710	502680	893100	764100	750100	—	—	972900
出口	—	34480	53000	12500	23100	16000	—	—	16000
共 計	144350	271190	555680	905600	787200	766100	—	—	988900
預計尚能超額制造的数量	—	—	—	—	—	560000	1 500 000	1 500 000	—

① 估計数字。

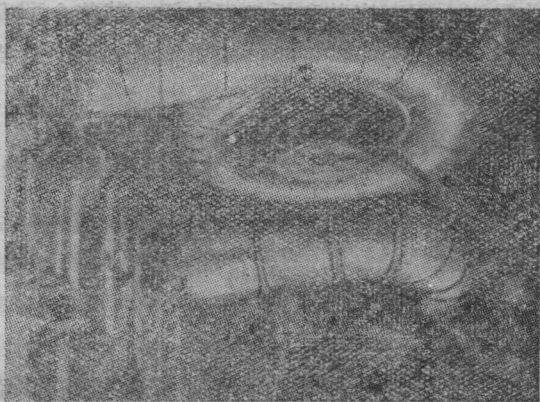
摘自日本电力第5次半年綜覽报告。

2. 扩大水輪机和发电机的單組容量及普遍使用傘式

发电机的趨勢

由于近来大型水輪机和发电机的可靠性不断提高，大型机組日益采用。大型机組可以减少制造費用，增加效率及节省工資和維護費用。为了簡化起見，这里只以3万瓩及其以上的水輪机来作說明。在1945年以前的10年中，制造的总容量为323 000瓩，平均单組容量为40 000瓩；而在1945年以后的10年中，总容量已增至925 000瓩，平均单組容量为63 000瓩。如果将过去装在中国东北及朝鮮的水輪机算在內，則在1945年以前10年中的总容量为1 833 000瓩，平均单組容量为54 000瓩。其中包括水丰水电站的7台10.5万瓩世界紀錄的水輪发电机組及丰满水电站的两台85 000瓩的水輪发电机組。1945年以后10年的容量中包括丸山水电站的两台7万瓩及佐久間水电站的4台10万瓩的大型机組(图1)。

以1945年作为分界的一年，則在这一年的前后可以清楚地看出机組有着不同的特点，特别是：发电机的結構是簡化了，由于采用了傘型使发电机重量較1945年以前的构造減輕了。1945年以前只为清托富湖(chirntofu，疑是鏡



泊湖之誤——譯者) 图1 佐久間水电站的10万瓩水輪机
水电站制造过2台20 000千伏安的傘型发电机，但在以后的10年中，10 000千伏安及其以上的立式发电机总容量298万瓩中，有40%的发电机是傘型的。其中轉速低于200轉/分的发电机按总容量計約有一半，而这些轉速低于200轉/分的发电机中70%是傘型的。尤其是1952年

以后几乎所有轉速低于200轉/分的发电机都是伞型的，並且还出現了一台轉速为300轉/分的伞型发电机。所有这些伞型发电机在运行中証明很可靠，而且震动很小。

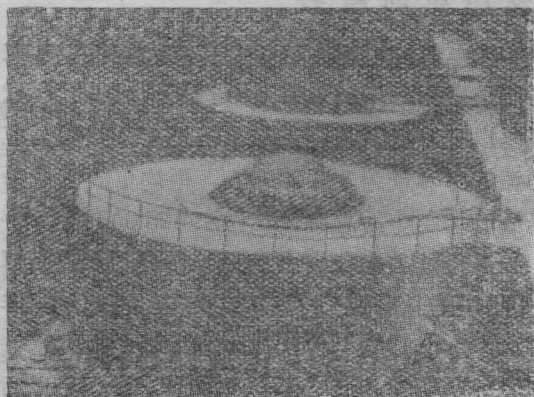


图 2 佐久間水电站的93 000千伏安发电机

此外，此种发电机尚有一些其他的优点，例如：不需要很高及容量很大的吊車，因而安装和拆卸很方便。某些伞型发电机，在上部架上有一导軸承，而另一些則設計成由推力軸承来支持其重量，經由水輪机的頂盖传到座环上。

丸山水电站的72500 千伏安、164 轉/分的发电机及佐久間水电站的93 000千伏安、167/200 轉/分的发电机，可以說是轉速比較高的、容量最大的伞型发电机(見图 2)。

伞型发电机流行的原因是：构造简单、重量轻而价格便宜。此

3. 水輪机特性的改进

日本的水輪机制造厂均备有大規模的模型試驗設備，經常在研究和試驗轉輪輪叶的形状、汽蝕現象、材料的磨損和冲蝕情况等。制造厂並基于业主的要求事先来进行模型試驗，直到水輪机的特性被確認符合要求后才开始实际的制造。由于日本制造厂的丰富經驗，不但新建水电站里的水輪机效率有了显著的改进，而且改建的老式水电站里的水輪机效率也有显著的改进。例如，有些佛兰西斯水輪机的最大效率达94%，卡普兰水輪机达93%，倍尔頓水輪机达91%。

关于水輪机的效率問題，日本机械工程师协会水輪机委员会曾作过研究，並曾于1947年在根覺水电站的21 000 瓩低水头佛兰西斯水輪机上用8种方法来測量其流量。此8种方法为：盐流速法、吉卜逊法

(水銀管法、波登管法、晶体振盪法)、毕托管法(可动单管法、多管法)、阿曼管法以及鐘嘴法。

这些研究結果对測量流量的方法上有很大的影响，並且随着測量仪器的改进而使測量結果的准确度大大增加，例如吉卜逊法，將靜电电容的变化用一自差振盪器放大，或利用抗变表來測量。也用过流速仪測量。指度法也已应用，但近来有些水輪机还装有能直接讀出流量的指示仪。

对某已知的有效水头儘可能提高其比轉速的限度，可以得到較高的速度並減輕水輪机的重量，从而降低造价；然而，这将使效率降低，使輪叶及其他部分被冲蝕，同时还由于汽蝕現象而发生振动，而空蝕現象往往是在此情况下发展成的。考慮到从模型轉輪的汽蝕試驗及实际經驗中所得的結果，普遍的趨勢是宁願采取比 *JEC-117* 所規定的数字較高的比轉速。这对螺旋式或卡普兰水輪机尤其是如此。

4. 水輪机構造上的改进

在提高水輪机可靠性、減輕其重量和降低造价方面已經作了很大的努力。在鋼的鑄造、鍛冶及銲接技术方面有很大的进步，特別是13鉻鋼的鑄造和在鑄鋼上复一层經過良好退火的18-8鉻鎳鋼的技术方面的进步，以及应用磁檢波器、超声檢波器、 x -光綫或鈷60法來檢查鋼的缺陷方面的进步。

a) 由于采用特殊鋼而增加了耐久性。

某电力公司所作的調查指出，水輪机在安装后的第一年內，效率平均降低約2%。如果水輪机轉輪及导水叶系用13鉻鋼整体鑄造，或在鑄鋼上銲复一层18-8鉻鎳鋼衬或13鉻鋼衬，則其耐久性即可提高，这在今天已实际应用了。

①日本电工协会(JEC)建議的数字如下：

对佛兰西斯水輪机，

$$ns = \frac{13\,000}{H+20} + 50,$$

对螺旋式水輪机，

$$ns = \frac{20\,000}{H+20}.$$

式中 ns = 比轉速，轉/分；

H —— 有效水头，公尺。

在很多情况下，培尔頓水輪机的水扉往往是采用抗磨性很高的低錳鑄鋼制的，但对立式培尔頓水輪机的水扉由于其重复载荷加倍之故有的采用13鉻鋼。

b) 銲接結構的应用。

近来蝸壳、座环及主閥都采用鋼板銲接結構，重量比用鑄造的減輕了20—30%，使造价降低，並日漸用于較高的水头。此种有代表性的机组是佐久間水电站的有效水头为135公尺的10万瓩水輪机、谷桑惠水电站的有效水头为289公尺的35 800 瓩水輪机以及其他等等(見图3)。

由于运输上受运貨車大小的限制，故有时候要将座环和蝸壳分成几部分运到現場装配。前者为螺栓結合，后者为螺栓或鉚釘結合。

椿原水电站的64.2公尺水头、42 000 瓩水輪机，其蝸壳系在現場銲接，然后全部加以退火，用50週或60週的磁感应綫圈加热 $\frac{\text{鋼板厚度(公厘)}}{25}$ 小时，使溫度保持在 600°C 。这样銲接縫的質量可以改善，並且可使蝸壳重量比用鉚釘減輕15%。蝸壳用鈷60进行放射性試驗並用水压試驗以証明其无內伤(見图4)。



图3 谷桑惠水电站水輪机的銲接結構

对如此大容量的机组，座环和蝸壳采用鉚接可以避免銲接时可能发生变形。

c) 其他結構上的改进。

有效水头为80公尺及其以下的水輪机，主閥往往可以省去以降低造价。此时，导水叶必須能补偿主閥的作用。即如果調速器作用筒的操作油压发生事故性下降或油压全部消失时，导水叶应能借水压的不平衡力矩平穩而自动地关闭，必要时，可借助于彈簧或荷重以防止水压異常上升，保持水輪机不致达到飞逸轉速。

导軸承用油潤滑时，广泛采用油浸自潤潤滑系統，以代替油泵或

压油箱，这样不但结构简单而且工作可靠。这种润滑系统即使对于轴承金属内径为 1350 公厘，及轴径为 880 公厘时证明在实际操作中是能够满足要求的。

圆筒型机坑应用最广；有时候在机坑内装有起重机或吊车，以便在拆卸、装配和调换水轮机的部件时不必拆卸发电机。

大容量水轮机有时候用一调速器柜，柜内装有调速器的节速器，辅助控制阀，指示器及操作手柄等。

5. 水电站的自动控制

а) 水轮机的高效率运转。

日本的河流在雨季和枯水季的流量变化很大，而且，能调节季节性差额的大水库是很少的，因此日本很多水电站都是按天然逕流运行的，其中少数有仅能满足日尖峰负荷所需的小型调节水库。由于这种情况，故宜装设在低负荷时有较高效率的水轮机，而且此效率应不致因水头的变化而降低太多。为了提高水电站的总效率，宜采用一台或几台水轮机的高效率运转方式。

以松尾川第1及第2水电站为例，每个水电站装有一台卧式双转轮 4 喷嘴两端悬伸的培尔顿水轮机组，其容量为 22 000 瓩，有效水头 390 公尺。第一水电站在河流的上游，其流量借尾水池的水位调整器来自自动控制的。当发电机的负荷上升或下降一半时，能自动自 2 喷嘴改为 4 喷嘴运行或由 4 喷嘴改为 2 喷嘴，以便保持高效率的运行方式。第 2 水电站为单人控制，利用一电气功率调整器代替第 1 水电站的水位调整器来达到高效率的运行。如下面将提到的，这两个水电站都采用频率自动控制的方式。

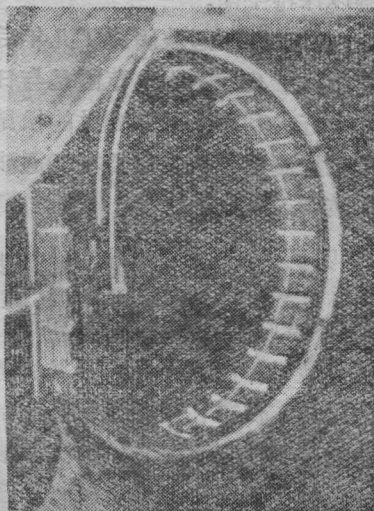


图 4 梶原水电站的蜗壳的电气退火

同样的运行方式也已在一立式4喷嘴培尔顿水轮机中采用。用一水位调整器随负荷的变化自动换为1、2或4喷嘴运行以获得高效率运行。

这种运行方式也可应用于佛兰西斯水轮机，如果装有2台或2台以上的佛兰西斯水轮机时，佛兰西斯水轮机的最大效率比培尔顿水轮机要高。佛兰西斯水轮机的水头变化时，随水头变化的高效率运转方式有时候采用下面的方法，即利用一偏心轮使水头的变化与导水叶角度的相对位置以机械的方法或电气的方法相联系，来改变调速器的支点位置以达到最高的效率。

对卡普兰水轮机用同样的调节方法也很容易实现，因为，导水叶角度与转轮叶角度间的关系可以随意改变，则随水头变化的效率不会下降太多。

有好几处都是用调整导水叶与转轮叶角度间的关系来保持其高效率运行的，即使是对使用于二种週波(50週或60週)的机组也是如此。

b) 自动控制週波(AFC)

在开发电力资源的五年计划的过程中，日本某些地区的电力供求得以保持平衡。

自动控制週波研究了几年后，已于1954年3月由四国电力公司实际使用，该公司的供电范围是与日本本岛隔开的。此公司的最大出力为30万瓩，利用上面谈到过的松尾川第1及第2水电站的4万瓩容量来自自动控制週波使之保持在60週波上，在第2水电站装有自动控制週波的装置。

检查下面4个因素：即週波的变化 ΔF ，週波变化的速度 $\frac{df}{dt}$ ，第1水电站的尾水位及第1和第2水电站之间的不平衡电力，然后发出脉冲並动作调速马达使系统的週波保持在 60 ± 0.1 週/秒上。在另一些地区，不仅正在研究平週波控制法，而且在研究中繼綫控制法、负荷曲綫控制法与平週波控制法相结合的控制法以及其他等方法。

为了研究自动控制週波，已经发明一种对此很有用的类似计算机的装置。同时，改善一些旧水电站调速器的工作已在积极考虑了。

c) 采用自动操作的一般趋势

由于近来在机器和设备技术方面进步的结果，用于水电站的保护装置的可靠性提高了，也更完善了，几乎所有新电站都是自动控制的，以减少运转人员，保证更可靠而敏捷地操作和得到最高的效率。并将在现有的电站中采用自动操作，目前日本已有40%的电站是自动控制的。

简单的自动操作系统主要用于2000瓩及其以下的机组；用手动或电气远距离操作起动，并借水位调节器加负载，遇有事故时可借保护继电器自动停机。

在单人控制系统中，由一个运转员监视着配电盘。他转动顺序开关后，即可依次操作起动压油泵、开启进水阀、起动机组、加励磁、投入并列运行，加负载及停机等。如果他转动几转，则按单独控制系统即可完成相应的操作顺序。自动同期装置大都利用一小功率的电子管。目前仍广泛地采用着变阻器式的自动电压调整器，但在主要的电站中普遍的趋势是采用一静止式磁性放大器或用转动式磁性放大器而不用梯勒式电压调整器，因为这种调整器其接触部分常常发生故障。

某些坝的和进水口的闸门系用一遙测装置进行远距离操作，或用工业用的电视机来监视的。在很多地方，这种监视的控制系统系由主电站以控制电缆借直流或脉冲来操作。虽然如此，但在坂胜电站所用的载波系统，其结果也很令人满意。

6. 中水头的卡普兰水轮机

卡普兰水轮机一直是广泛用于有效水头为25公尺及其以下的场合，但在过去几年中，很多水头较高的卡普兰水轮机迅速地相继出现，并已投入运行。例如，神通第2水电站的21 500瓩、30.2公尺水头、200转/分的卡普兰水轮机；本名水电站的30 000瓩、36.1公尺、167转/分的水轮

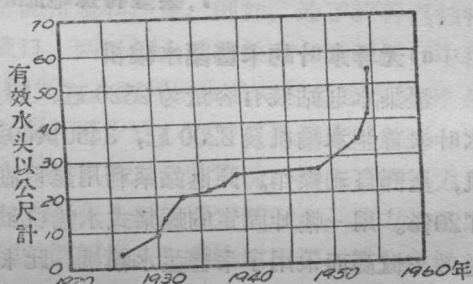


图5 卡普兰水轮机有效水头增长情况

机；津浓川水电站的13 000瓩、36.5公尺、300轉/分的水輪机；丰漁水电站的7200瓩、34.8公尺、333轉/分的水輪机；竹田水电站的7500瓩、49.7公尺、360轉/分的水輪机；以及姬川第3水电站的13 000瓩、55公尺、333/400轉/分的水輪机（见图5）。

卡普兰水輪机逐渐扩大其应用范围于中水头的原因是：由于对模型轉輪汽蝕現象的研究結果而改进了卡普兰水輪机的制造技术，以及特种鑄鋼技巧上的进步；由于卡普兰水輪机在低負荷及水头变化时的效率比佛兰西斯水輪机高，因而可以少装水輪机组的台数，从而使建筑費用减少。卡普兰水輪机将在有季調节水庫的水电站中得到广泛的应用（代替添建火电站），同时也可用于有調节水庫的水电站，作为担负基荷的高温高压火电站的輔助机组，供給每天的尖峰負荷之用。

水头愈高，則水流的速度也愈快，因而造成汽蝕的机会也愈多。同时，由于水輪机輪叶抵抗弯曲力矩的强度的限制，即令牺牲一些效率，輪叶的数目也必須增加。在上述的那些例子中，30公尺級的采用6片輪叶，35公尺級的7片輪叶，40至55公尺級的8片輪叶。为了减少开挖費用，則使吸出高度愈小愈好，但是我們一般認為，为了比較安全，一般取大一些使汽蝕系数 σ 得以比汽蝕破坏系数大得多。高水头試驗不但在模型轉輪上进行过，而且在实际水輪机上也直接进行过，其試驗方法系利用一断續光測頻器（stroboscope）。空蝕系数 σ 与飞逸轉速之間的关系曾在模型轉輪上做汽蝕試驗时进行了研究。現在所制造的这种水輪机已在运行中証明很滿意，震動很小。

7. 某些特殊电站的例子

а) 无导水叶的卡普蘭水輪机

墨染水电站装有容量为2320瓩、13.3公尺水头、225轉/分的无导水叶卡普兰水輪机及2200瓩、3450伏60週/秒的立式鼠籠型感应发电机，全部自动操作。此电站系利用琵琶湖中的逕流，它的流量只降低了20%。用一輪叶固定的螺旋式水輪机虽可降低造价，但因一年中的总效率較高而采用了卡普兰水輪机。此卡普兰水輪机除无导水叶外，並且沒有进水閥和調速器，因而使其造价降低20%。將轉輪叶調整到

适当的角度，調整的方向与运转时的相反，則水輪机可在2分鐘內停机，並且把剩余的水截留在上游水槽內。利用一自动起动器及一轉差檢定器，即可平稳地起动和投入並列运行，此时其冲击电流为額定电流的3或4倍。

水輪机的最高效率为91%，飞逸轉速沒有达到过250%。由于采用了感应发电机，其造价比用同期电机减少了20%；此外还装有900千伏安的靜电电容器以改善其功率因数。

b) 立式倍尔頓水輪机的发展

过去日本的倍尔頓水輪机都是臥式的，1954年第一次出現立式、单轉輪、4喷嘴的倍尔頓水輪机；其中一台是白根水电站的12 000瓩，203.7公尺水头，300轉/分的水輪机，另一台是石井水电站的28 000瓩、161.5公尺水头、450轉/分的水輪机。这一变化的原因是很多的。立式水輪机在平面上所佔的地位比臥式要小，因而相应的开挖費用就降低20%到40%。此外，在进口弯管中的水头損失以及轉子中的風阻損失較小，因此增加了一些效率。尤其是低負荷时的效率較好，故即使制造成本与臥式者相等，立式倍尔頓水輪机仍是比較經濟的。

c) 抽水蓄能电站的发展

1952年建成的沼澤沼水电站每年能发出調节电能12 100万度，它是借結合枯水期由下游电站增加的电力供应和用东北地区所多余的10 300万度的电能来抽水的。抽水及发电每天要变換几次。

根据1953年的纪录，这种經常变換的操作次数，一年內作为抽水的有140次，总共运行3429小时，作为发电的有161次，共2417小时。所以在运转时必须采取一切可能措施和注意。例如，为了改善汽蚀特性，使21 000瓩、臥式、双吸口、兩級抽水机的效率在实际运行中稍許降低了一些(用毕托管量为86%)；当利用水輪机起动抽水机时当速度达到某数值时先将針形閥打开少許，然后再使速度增加到与发电机同步的速度，这样可以大大減輕抽水机的震动。輸水管的压力上昇限制到20%，抽水机逆轉时控制在7%的額定轉速上，其方法是当电源丧失时，使針形閥的关闭時間縮短，先很快地关闭一部分，然后慢慢地关闭后一部分。

8. 发电机方面的技术进步

随着水輪机的改进，发电机效率也不断地改进。自从每公斤鉄損为0.9或0.95瓦或更少以及頻率為50週波、磁通密度可达10 000 高斯的高級矽鋼片用于发电机制造以后，这一趋势尤其值得注意了。

根据日本发电輸电电力公司对水电站的故障調查（1942至1949年期間——包括1949年——的調查結果）証明，1/5是属于发电机故障。其中的一半又是由于定子繞組被燒坏所引起的，而定子繞組的故障，属于因冲击波的浸入而引起的层間短路和接地短路，以及絕緣老化而引起的次数則又各佔一半。

当然，冲击波的峯值和波前的陡度已經被装在发电机端子上的冲击波吸收器所控制和限制，而且保护繼电器的灵敏度也有所提高了。加强相間絕緣后，由于采用了单匝綫圈並經换位而使所有可能发生层間短路的机会消除了，这尤其是对大容量发电机更为重要，例如佐久間、丸山、奥泉、上推叶及神通第2水电站的发电机都是如此。应經常对定子綫圈进行冲击电压試驗来确定其介質强度。

为求得檢查絕緣衰老的方法已进行了很多研究工作，但一直未得出最好的方法。現在仍考虑应用不溶劑絕緣漆和矽胶絕緣漆。

对低轉速的发电机，其轉子的軛由扇形鋼板制成，高速发电机則用鍛鋼或压軛鋼板制成。磁极在鵠尾槽內的結合或橢形結構的設計已考虑对飞逸轉速的安全系数采用了。在某些情况下，其安全性由过速試驗来証实。为了增加輸电系統的穩定性和防止不平衡短路时的異常过电压，通常在发电机轉子上加阻尼綫圈。

对容量較大的发电机，采用密閉空气循环的冷却方式，以防止灰尘、昆虫或飞蛾侵入，以及減輕噪音。

9. 結 語

随着“电力資源开发計劃”的胜利实行，技术上的进步已經获得显著的成就，其中一些特別值得提出的已如上述。无论如何，計劃內的尖峯負荷业已渡过，而日本的电机制造工业已面临着国内需要与其生

产能力之間不能平衡的新形势(見表1)。供佐久間水电站用的第一台10万瓩水輪机及93 000千伏安的发电机在短短的14个月時間內就制成了。

摘 要

近来日本的主要趋势是增加水輪机和发电机的单位机组容量, 下面的事实可以說明这一点: 丸山水电站的7万瓩和佐久間水电站的10万瓩佛蘭西斯水輪机, 以及容量各为72 500千伏安和93 000千伏安的伞型发电机。

卡普蘭水輪机制造方面所获得的技术上的进步可以下列事实来証明, 即已制造出的55公尺水头的卡普蘭水輪机, 使此型式的水輪机得以应用于中水头。值得提出的还有一台无导水叶的卡普蘭水輪机与一台感应发电机相联結, 以及一座抽水蓄能水电站。

本文还介紹了水輪机和发电机构造上和特性上的改进及其自动操作设备等。

(傅敬熙譯)