

美国西屋公司

汽轮机技术文集

上海汽轮机厂

《 美国西屋公司汽轮机技术文集 》

编辑出版：上海汽轮机厂设计科

地 址：上 海 闵 行

电 话：3 5 8 3 3 1—3 6 7

印 刷：丁 山 人 民 印 刷 厂

宣 兴：丁 山

1982年4月第一次印刷 印数3000本

每册收成本费 3.00

内 部 发 行

前 言

当前，水电部、一机部正在引进《美国西屋电气公司》汽轮机制造技术，以提高我国发电设备制造水平，加速电力工业建设，适应四化需要。

为了对西屋技术，有较全面的了解，以便在消化、吸收、以至熟练运用新引进技术时有所帮助，我们从近年来该公司发表的重要文献中选编一些，翻译出版成册。书名：《美国西屋公司汽轮机技术文集》供我国汽轮机制造厂家、发电厂、电力建设单位、科研及教学部门参考。

本书所收录的文章，内容包括：汽轮机总体和部件的设计、调节控制、试验研究、安全可靠性提高、主要件材料、工艺、操作运行经验、机组停机故障的诊断及预防、噪音的消除、以及该公司技术发展进程、今后的研究规划。

日本三菱公司与美国西屋公司技术协作，三菱引进西屋技术后，取得的成就和经验，也值得我们参考和借鉴。因此，本书也收录了三菱制造大功率汽轮机和长叶片经验的两篇文章。

本书文章主要选自《美国动力会议文集》和西屋公司出版的《公用电工程会议文集》。本书的编辑是谭道同志，校订是王家榕同志。

设计科

篇 目

西屋公司大型汽轮机的设计和发展.....	01	(1)
西屋公司汽轮机数字电液控制系统	02	(17)
汽轮机安全可靠性的提高	03	(39)
电力系统故障使汽轮发电机组转子寿命损耗的概念.....	04	(55)
汽轮发电机组的扭振频率可靠性和试验	05	(63)
蒸汽轮机实验室的试验装置	06	(69)
考虑汽轮发电机组轴系瞬时扭矩的一些主要参数.....	07	(79)
汽轮机的可靠性与今后的新技术	08	(89)
高冷凝器压力对汽轮机设计的影响.....	09	(101)
两台并列汽轮发电机组的控制系统在核动力中应用.....	10	(109)
汽轮机中压调节汽门的快速启闭.....	11	(115)
汽轮发电机组的非正常周波运行.....	12	(123)
钛合金汽轮机叶片的运行经验	13	(131)
化石燃料蒸汽透平发电机组节流滑压运行	14	(139)
原子能汽轮机的运行经验	15	(149)

汽轮发电机组噪音的分析和控制	16 (155)
制造汽轮机叶片的先进技术	17 (171)
西屋公司制造大功率汽轮机用金属材料概况	18 (177)
透平发电机组在各种基座上的动力响应	19 (187)
汽轮发电机组的控制调节和停机故障的诊断预防	20 (197)
西屋公司制造发电设备的研究、发展规划	21 (227)
日本三菱一百万千瓦汽轮机组的设计和运行	22 (237)
(东京电力袖ヶ浦火力发电厂 4 号机)	
3000转/分 汽轮机40英寸长叶片的研制	23 (255)
补 白	(270)

西屋公司大型汽轮机的设计和发展

原作者 P·J·墨菲
W·G·斯泰尔兹
D·D·罗莎尔特等

伍能 编译

西屋公司大型汽轮机的设计和发展

西屋公司生产的、用于化石燃料的大型汽轮机，主要发展概况是：

1959年投运了第一台超临界、两次再热325MW大型汽轮机，其汽轮机的主要参数、型式是：350 ata 650℃/566℃/566℃；双轴并列（3600转/分 1800转/分）。1961年投运了首台325MW单轴串列（3600转/分）汽轮机，其进汽参数是140 ata 538℃/538℃。1965年投运了首台600MW汽轮机。到1980年已生产的单轴串列3600转/分最大容量汽轮机已达900MW；250MW以上机组投运台数已超过170台。

西屋公司核能利用发展较早，1954年即建造了第一台潜艇用核反应堆。1957年建成了美国第一座商用核能发电厂，1977年安装了第一台轻水增殖反应堆。目前已生产的单轴最大容量是1800转/分1375MW机组。已生产和接受订货的有109座电站，其中已投运的超过40%；与世界上各有关公司相比占第一位。

近年来西屋公司生产的大型汽轮机的容量、参数等的组成和发展，从其发表的文章中的介绍，大致如下：

到1972年，西屋公司已生产和接受订货的大型汽轮机有128台，

其中 { 非再热机组——12台。
再热机组（一次再热）——83台
核电站机组——33台

以容量分如下：

101到200MW——28台
201到300MW——5台
301到400MW——13台
401到500MW——10台
501到600MW——28台
601到800MW——16台
801到1000MW——15台
1001到1220MW——13台

上述机组的平均容量为850MW（火电站汽轮机平均容量是370MW，核电站汽轮机平均容量是985MW）。汽轮机进汽压力的组成是：

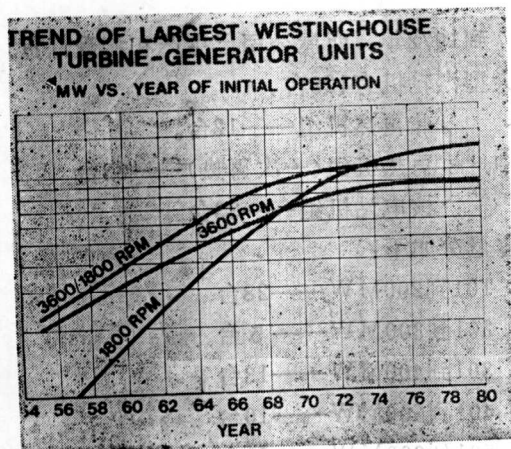
1250 Psig——41台（包括核电）
1800 Psig——22台
2000 Psig——4台
2285 Psig——11台
2400 Psig——36台
3334 Psig——1台
3500 Psig——13台

进汽和再热温度，绝大部分是1000°F。少

量400MW及以下调峰机组,采用1800Psig, 950°F。

1976年西屋公司接受订货的大型汽轮机(包括国内、外)有14台,总容量为975万千瓦;其中核电站汽轮机4台;总容量382万千瓦,火电站汽轮机10台;总容量593万千瓦。

图一是西屋公司1977年统计的最大容量机组的发展预测。从图可见,到1980年,3600转/分的机组容量可达900MW;1800转/分机组容量可达1300MW。与1980年实际情况,基本一致。

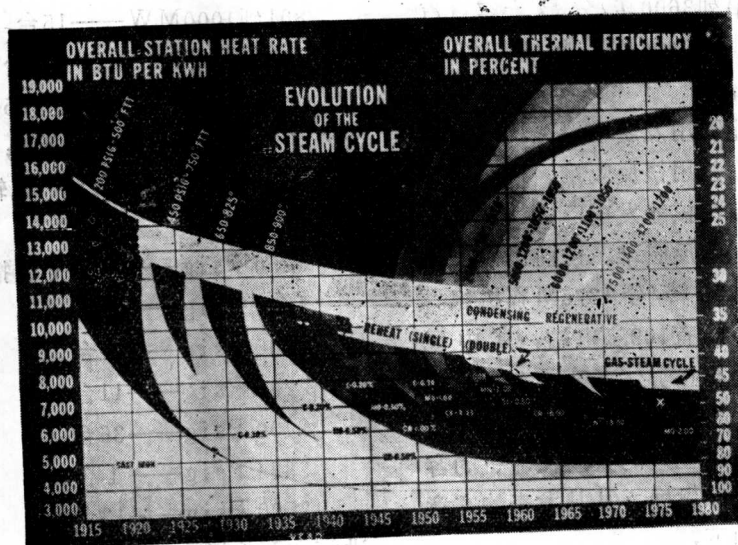


图一 最大容量汽轮发电机组发展趋势

对核电站,1976年间,美原子能管理委员会(NRC)规定,反应堆热功率不能大于380万千瓦(相当电功率约135万千瓦),并估计450~480万千瓦热功率的机组在1990年以前不会投运。

化石燃料电站汽轮机的蒸汽温度,近年来绝大多数均采用1000°F。西屋公司前几年新接受的汽轮机订货,没有一台超过1000°F。西屋认为蒸汽温度从1000°F提高到1050°F,所得到的机组热耗率的改善,仅约为50BTU/千瓦。它不足以抵偿采用高温使材料费用的增加。采用两次再热,热耗率可进一步改善约2%。这些在燃料价格很高的地区,可能会发展。

由于自然界冷却水源的利用愈来愈受到限制,因此,冷却塔采用得到大大发展。这就又影响了汽轮机的排汽压力。增高排汽压力的趋势在继续发展,因而造成透平末叶片高度选择的复杂性。确定透平结构和末级叶片高度的经济评价,主要在于每千瓦设备的造价。对某一给定的排汽面积,机组在设计最大允许流量下,产生最大的出力。即对一给定结构,每千瓦的造价愈低,出力愈大愈好。西屋公司设计机组的特点是最大限度的加大排汽量。



图二 热耗与热效率

西屋公司近些年来对汽轮机的改进,反映在机组热耗率方面的改善。对化石燃料电站,总热耗率从平均11000BTU/千瓦时,降低到9100BTU/千瓦时。这主要是提高蒸汽参数(从200 Psig、500°F到3500 Psig、1000°F);采用回热、再热循环所致。其中给水回热改善约占10%,一次再热改善约占5%。

西屋公司的研究机构和 试验电站

西屋公司采用多级科研体制,一般结合产品的近期课题,由基层的试验室进行,有关大型汽轮机的这类试验室,在费城的Lester设有空气动力试验室;强度振动试验室。对于材料方面的试验研究工作,汽轮机和燃气轮机共用一材料试验室,也设在Lester。

对于技术和试验设备要求较高而基层试验室解决不了的某些课题,可由基层单位提出,由西屋公司最高一层的科研机构,研究发展中心来组织研究。

另外,西屋公司为保证大型汽轮机设备的可靠性及经济性,于1975年四季度在Chester电站建立了一个大型试验室(投资约为800万美元),对新设计的积木块和首台应用的主要另部件进行大尺寸强度、振动及效率试验。有关试验研究部门分述如下:

研究发展中心

如前所述,研究发展中心是西屋公司最高一级的科研机构。共有2000名雇员,其中科技研究人员850名。有博士学位的325人;硕士学位的225人。研究专业有化学、化工、电气、机械、物理、冶金、数学等。

研究发展中心下设六个分部(应用科学,通用科学;化学;材料;固态技术;能源技术等)。另外还有一工程技术部,主要研究

如何将研究成果推广到工程设计中去。目前,研究发展中心研究的与汽轮机设计有关的课题有:

(1) 部分进汽对叶片激动力的研究

采用理论分析及试验相结合,研究部分进汽级中,气流对叶片激动力和动应力的影响。

(2) 长叶片颤振(Flutter)的研究。

研究叶片颤振的机理,研究叶片截面型线对颤振的影响。

(3) 断裂力学的研究

研究金属、非金属等有关材料在各种介质(空气、氢气、硫化氢气或几种介质混合)中,裂纹的产生、发展、断裂的全过程。这种试验研究可以在常温或高温(约到650℃)下进行。也研究有缺口或裂纹材料对蠕变的影响。

上述试验均用计算机控制和测量。

其他有:摩擦润滑、煤的气化、太阳能及增殖反应堆用的液态金属锂和钠的研究等。

空气动力试验室

主要是利用空气、水等工质对叶栅及流道进行试验研究,以提高汽轮机的热经济性。

所利用的空气气源有高压和低压两种:

高压, 190 Psi 2.5 lbs/s.

低压, 16 Psi 150 lbs/s.

蒸汽源:

600 Psi, 750°F, 600000 lbs/hr.

水源: 20000加仑/分。

尚有一台精确度可达1%的凝结水流量秤量装置。

试验设备有叶栅及排汽通道风洞试验装置四台,可旋式汽水比拟试验装置一台,试验透平四台。

风洞是:

大型跨音速叶栅风洞：风量达40 lbs/s。

M数可达1.6；

小型跨音速叶栅风洞：M数可达2；

亚音速叶栅试验风洞；

扩压管及流道风洞。

所有风洞试验均用沿线自动数据纪录、测量、计算；并可通过流动观察装置，用光学流动观察系统，全息摄影（激光光学干涉原理）技术，利用流体的密度不同，反映在照片上，由此得出压力和速度的分布来研究流场。而普通采用的压力、速度探针，由于尺寸影响、干扰气流会影响精确性。

可旋式汽水比拟试验装置：

利用浅层水液流动，模拟二元超音速气流。台面旋转很慢，由此可以清楚观察到两排叶片间的相互影响。

该装置可用来研究调节级、大焓降级、末级叶栅；可以测动、静叶栅间隙对叶栅不均匀力的影响。测量所得的精确性已被理论计算及叶栅风洞试验证实。

试验透平四台：

高压级多级湿汽透平一台，主要用来研究两相流，湿汽去湿，腐蚀等。

亚音速空气透平一台，4000马力，可试验低M数的单级和多级。

四级蒸汽透平一台，可试3600转/分的

31吋叶片（缩小2.5倍）。

两级悬臂透平一台，两臂各带一25000马力水力测功器，可精确分别测得两侧级的效率。

强度振动试验室

广泛采用激光、全息摄影办法来测振型、频率和应力。激振是用静止的磁性激发，也用喷气激振。拾振用滑环或发报机。

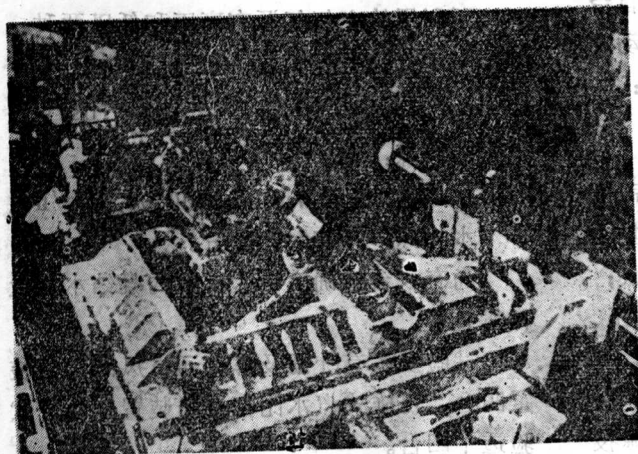
材料试验室

材料的主要试验研究工作有：化学成分分析，高温蠕变、持久，高、低周疲劳，断裂力学，应力腐蚀，材料内应力，表面应力的测定等。试验室中有200台蠕变机，七台应力松弛机，疲劳试验机多台。可做高速回转，轴向加载，高应力低周疲劳等试验。

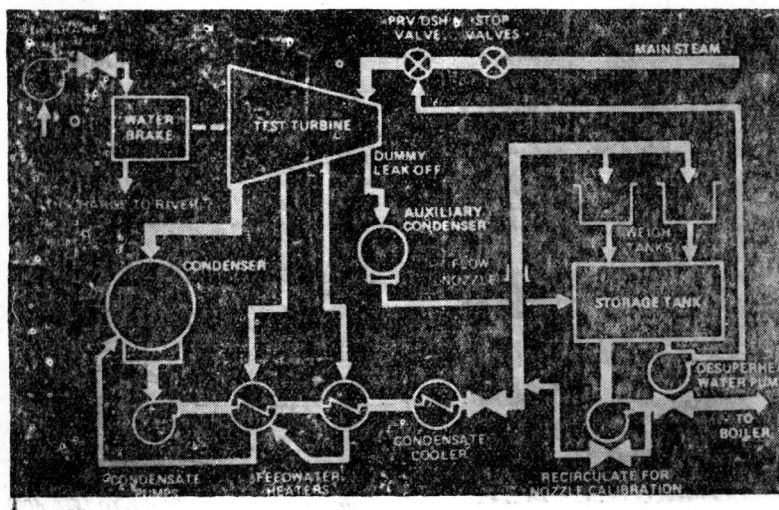
彻斯特大型试验电站

这是一个大型的低压蒸汽透平试验室，对3600转/分透平，可作全尺寸试验（1800转/分大型低压透平可做半尺寸试验）。对西屋公司新设计的低压透平积木块可做详细的效率及叶片强度振动的全尺寸考核，以保证机组的可靠性和经济性。试验装置参见图三，其基本热力系统图参见图四。

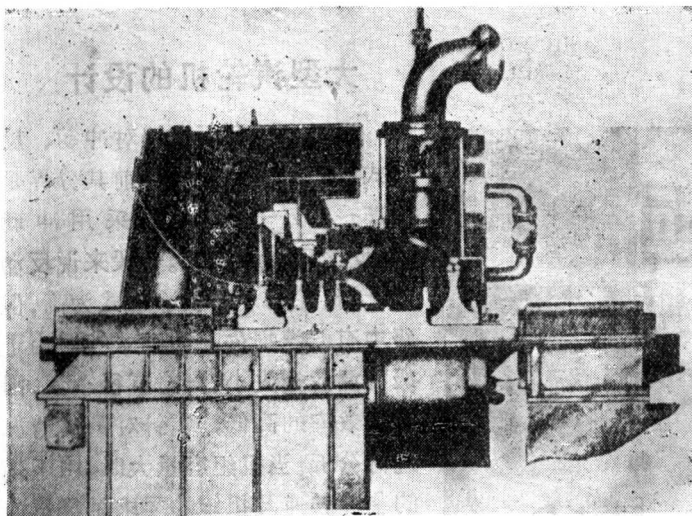
该试验透平可试40吋叶片到4320转/分，汽源最大可达340T/hr。新汽来自彻斯特电站的低压汽源（265Psia, 575°F）。试验透平的进汽压力和温度由主汽控制减温阀控制到所需条件。图五为试验透平的纵剖面图。凝汽器面积62370平方呎。循环水温35°F时，额定负荷的排汽压力为0.75吋Hg。可用控制空气漏入来改变试验时需要的背压改变。透平带动的水力测功器，可吸收68500匹马力。



图三 低压试验透平



图四 低压试验透平热力系统



图五 试验透平纵剖面

图六为可精确测量凝结水量的秤重水箱系统（每个秤重水箱可容70000lbs水支托在天秤上）。附属装置包括转换阀，用它可按次序交替充水到每个水箱。水箱的水可以全部放入大贮水箱中（170000lbs）。

该系统可人工手动或自动控制（计算机控制）秤重过程，全部自动记录，测量精度为 $\pm 0.05\%$ 。另外还有两个可即读流量的测量装置。进汽流量用校准过的流量喷嘴测量，凝

结水流量用校准过的流量孔板测量。

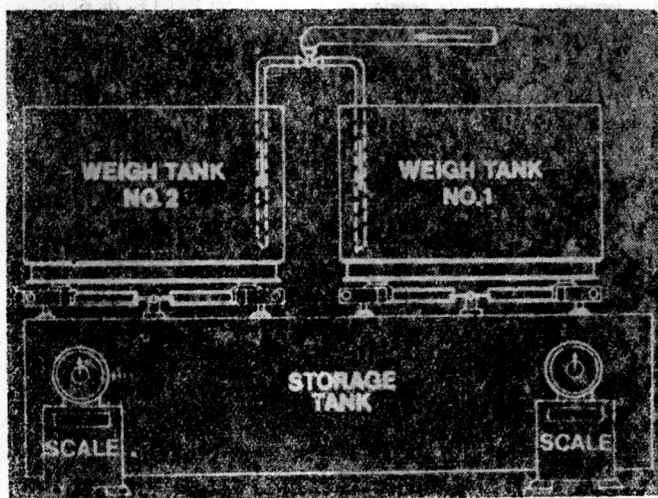
图七为现代化的控制室，右下侧为数据处理装置。它是试验透平中工程测量数据的控制中心。有600点以上的热力学数据，以此处理分析透平效率。所有热力数据均用磁带记录下来拿到CDC 7600计算机进行分析计算。

所有机械应变片的输入数据，也记录在磁带上，

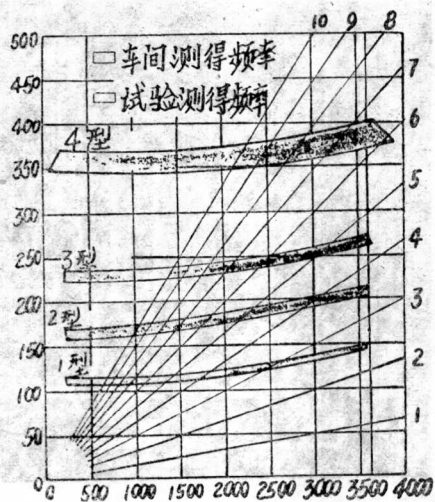
以当场测得的叶片振动数据，可直接绘出坎布图。快速富氏数据分析系统，可提供叶片振动的详细数据，并自动将这些数据绘成图表。图八为某一典型低压末级叶片测试所得数据。应变片来的信号通过滑环或发报机，送至数据处理装置，叶片激振采用专用的每转一次的蒸汽喷嘴，利用转速改变可测得共振频率。

图九是用激光全息摄影方法获得的长叶片高频振型与计算的比较。

有关计算透平总效率的模拟信号，包括进汽压力、温度、转矩、排汽压力、转速、流量、热井水位等均能连续自动记录下来，绘制出所测得数据与时间的关系曲线，由此可判定热力运行的稳定性，以求测得更精确的数据。图十为低压试验透平中测试得到的流场，可用来与设计进行比较，作改进的参考依据。有关数据和图形是用特制的探针，在图上所标明的四个部位，测得压力、速度、流量、角度的径向分布并绘制出来。



图六 秤重水箱



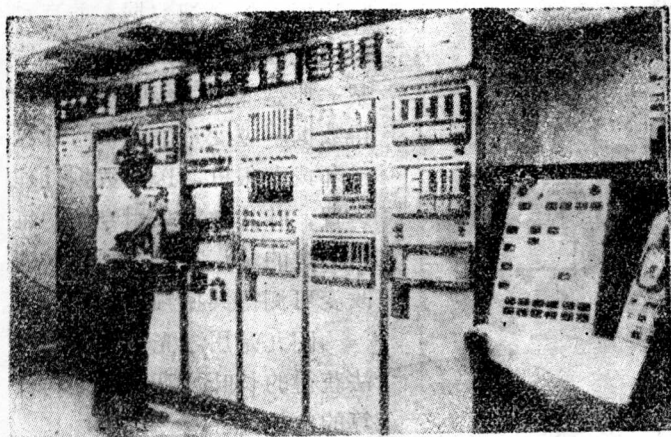
图八

大型汽轮机的设计

西屋公司多年来，对冲动、反动式汽轮机均生产。目前其分界是 $\leq 15 \sim 20$ 万千瓦汽轮机采用冲动式，反之采用反动式。一般来说反动式叶栅，轮周效率较冲动式为高，但级中有漏汽损失，冲动式叶栅由于级内漏泄损失小（汽封直径小），因此级效率的高低，需针对具体情况进行分析。当机组容量大时，由于轴的临界转速及扭矩的要求轴径迅速增大，冲动、反动两种型式的级内漏汽损失差别减少。因此反动式叶栅的优点上升。特别是近年来西屋发展采用侧装枞树形叶根，轮缘窄，两级动叶高，留有槽子，给静叶端

部加装汽封创造条件，减少了级间漏泄损失。

西屋公司认为，按当前经济状况，透平机组制造完成后，可能要储存一年或更多的时间，才会按装投运。这种趋势虽不直接影响透平的设计，但对机组的储存、保藏提出了要求，要有有力的措施，储存可以有部件储存和整机储存，主要防止腐蚀。因为任

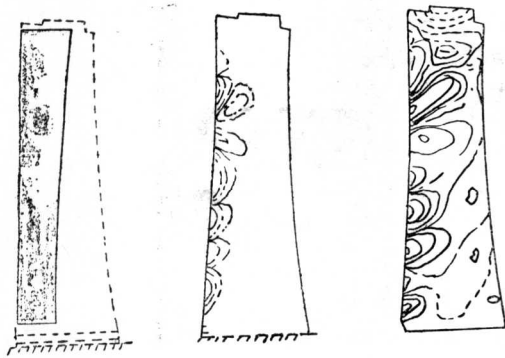


图七 控制室

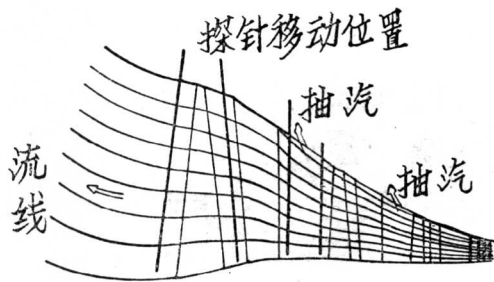
图十一为某典型低压透平总效率与排汽容积流量的关系试验曲线。

图十二为试验时测得的蒸汽温度沿叶高分布的曲线，测量采用激光方法。

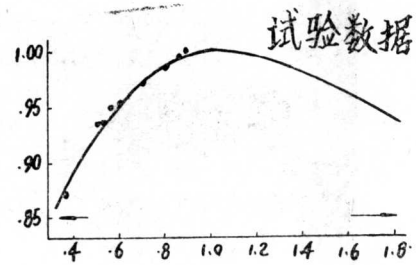
所有上述低压透平的试验，绘出了大量数据和运行特性，为进一步改进其性能及可靠性，提供了坚实基础。



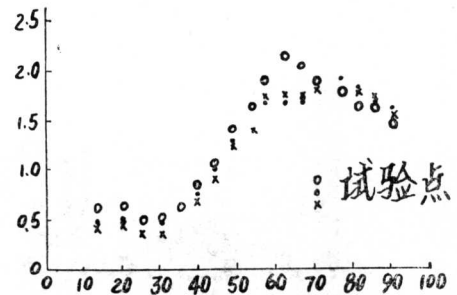
图九 叶片高频振型



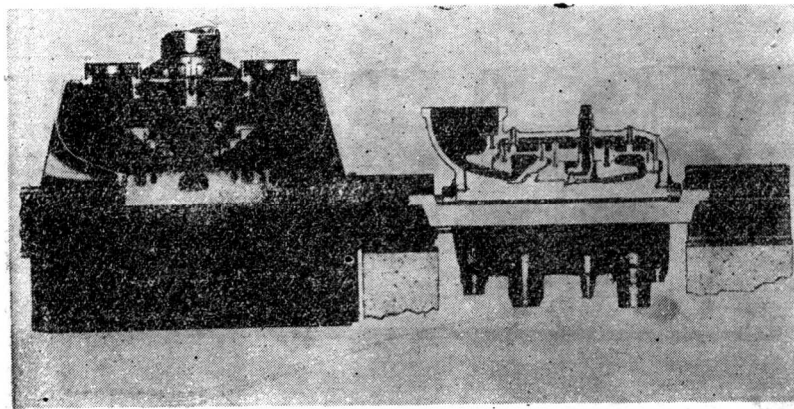
图十 低压透平流场和探针布点



图十一 低压透平效率与排汽容积流量曲线



图十二 末级进汽处温度沿叶高分布



图十三

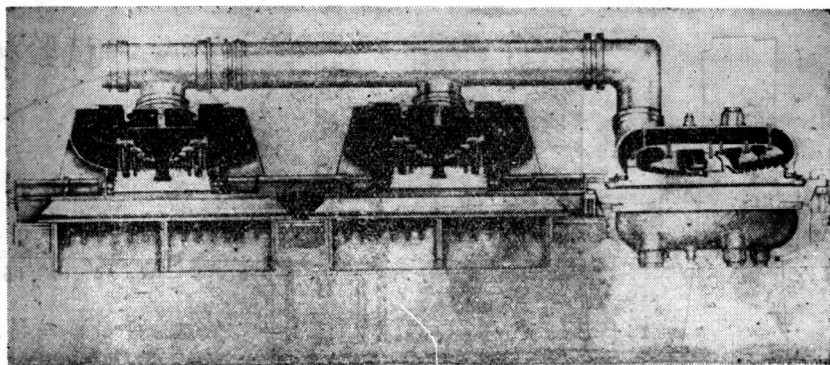
何部件腐蚀, 要进行整修、掉换, 这就会影响机组的费用及建设周期。西屋公司研究了新的防腐蚀措施和保藏方法; 并制定有测试程序, 用以验证更好更长期的保护方法。

西屋公司大型汽轮机的典型结构

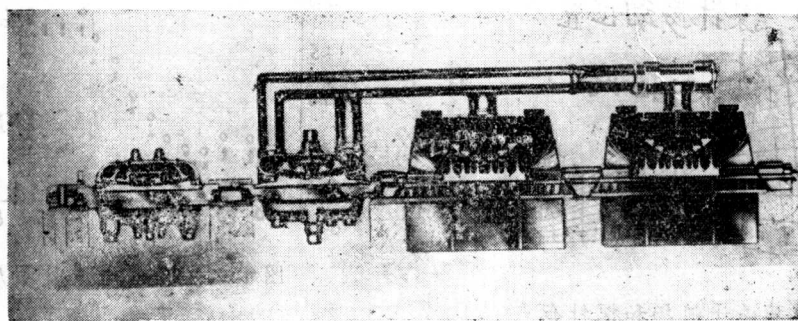
(1) 串列双缸双排汽, 高、中压合

缸。目前已可做到 $\leq 400\text{MW}$; 典型机组参见图十三。设计特点是: 返流, 内缸和喷嘴室均为分离结构。

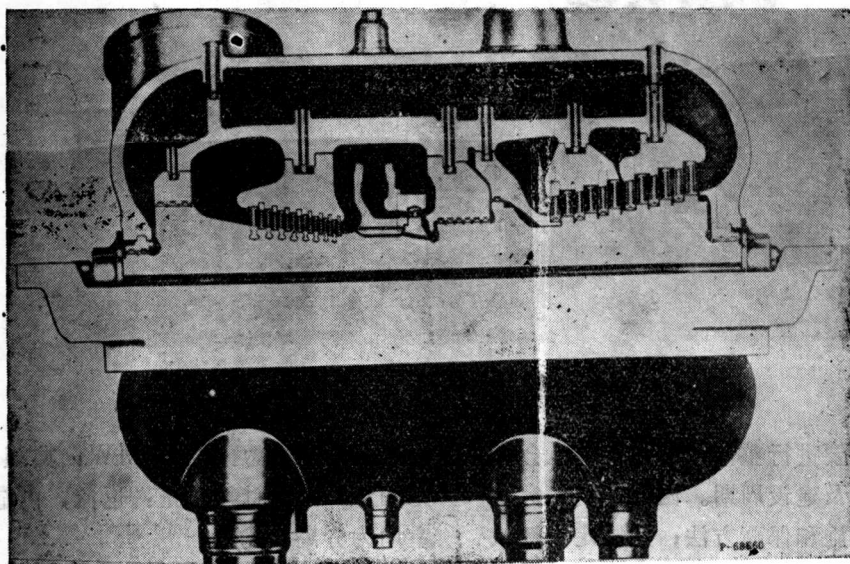
(2) 三缸四排汽串列机组, 参见图十四。功率可达 550MW ; 进汽参数一般为 3500Psig , 1000°F —— 1000°F 。高、中压合缸



图十四



图十五



图十六

及两个双流低压缸。3600转/分的末叶高度有25吋, 28.5吋, 31吋。

(3) 四缸四排汽串列机组, 参见图十五, 功率可达850MW~900MW; 进汽参数可以采用2400 Psig或3500 Psig, 温度 1000°F —— 1000°F 。这种机组, 高压, 中压缸分开采用双流; 末叶高度3600转/分机组用28.5吋或31吋。

600MW的单流高压缸结构正在发展。

西屋公司大型汽轮机的主要另部件结构特点分别介绍如下:

图十六为大容量汽轮机高、中压合缸的典型结构。新蒸汽通过8根进汽管(四根在上缸, 四根在下缸)进入汽缸。进入汽缸后的蒸汽先通过单流调节级, 然后返向流经高压反动级, 排向再热器。蒸汽再热后, 通过四根进汽管(二根在上缸, 二根在下缸)进入中压反动级组。然后排向内, 外缸空间, 通向外缸另一端排出。

西屋公司对透平支托采用的设计原则是要有最大的运动自由度, 以适应热胀需要:

a、各个喷嘴室采用分开的结构, 与内缸采用弹性联接。

b、内缸装在外缸上, 径向可以无约束地自由膨胀, 其相互的同心性, 靠水平接合面的支托及垂直中心线上的键来保证;

c、静叶持环、汽封体等均分别装在内缸上, 同心性靠水平面的支托及垂直中心线上的定位销来保证。

采用静叶持环结构, 使内缸结构大大简化, 减少了径向温度梯度, 减少了内缸的变形, 减少了螺栓的漏泄。

这种设计, 所有叶片及叶片持环均装在内缸中, 外缸仅承受较低的排汽压力。由于外缸有许多进、排汽口, 结构很复杂, 但内压减少, 好处很大。

调节级采用单列冲击式, 其余高、中压级组均为反动式。轴向平衡靠相对应的平衡活塞平衡。

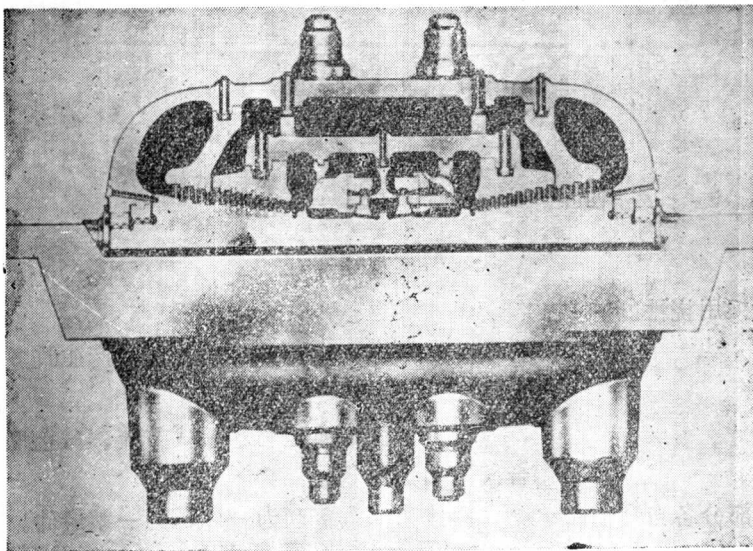
高压级均为直叶片, 采用T形叶根(近年新设计也改用侧装枞树形叶根), 中压级所有动叶片, 均采用3吋宽锻制、锥形及扭曲叶片, 轴向插入枞树形叶根。

图十七为典型双流高压透平的纵剖面图, 在此设计中, 蒸汽通过8个控制阀及8个进汽管进入双流的调节级。每个调节级均

有四个 90° 的喷嘴室。调节阀采用上、下成对开启程序, 使两个调节级轮盘上的力相互平衡。

除调节级外, 流动均完全对称, 这样使转子上轴向推力得到很好平衡而无需另加平衡活塞、平衡通汽管, 从而减少了漏汽。

图十八为典型双流中压缸的纵剖面图。蒸汽通过四根进汽管进入一个公用的进汽室。为防止再热后的热蒸汽与转子直接接触, 采用了一个进汽导流



图十七

器，它在双流流道的第一级静叶间，建立一过渡容室。将高压透平的排汽送到进汽导流器与转子区间，冷却这一进汽部分。与双流高压透平一样，流动完全对称、轴向平衡良好。

图十九是典型低压透平的纵剖面图。低压透平设计的主要注意点是，应尽力设法减少由于进汽和排汽间巨大温差的有害影响。进汽部份的温度约为 675°F ，而排汽处温度仅 100°F 。低压缸进汽部分的叶片持环，装在1号内缸上，以保证合适的径向对中及叶片顶端的密封间隙。由于采用了分开的几个低压内缸1号，2号等，因此温度的总梯度分解成了几段，减少了每个部件上的温差。

图二十为透平高温部分，阀门、管道等的配置方法。其设计特点是：

将外界的高温部份与透平汽缸的牵制分离，如：

将蒸汽进汽阀与汽缸分开装在此基础上，其间用挠性良好的管系相连；

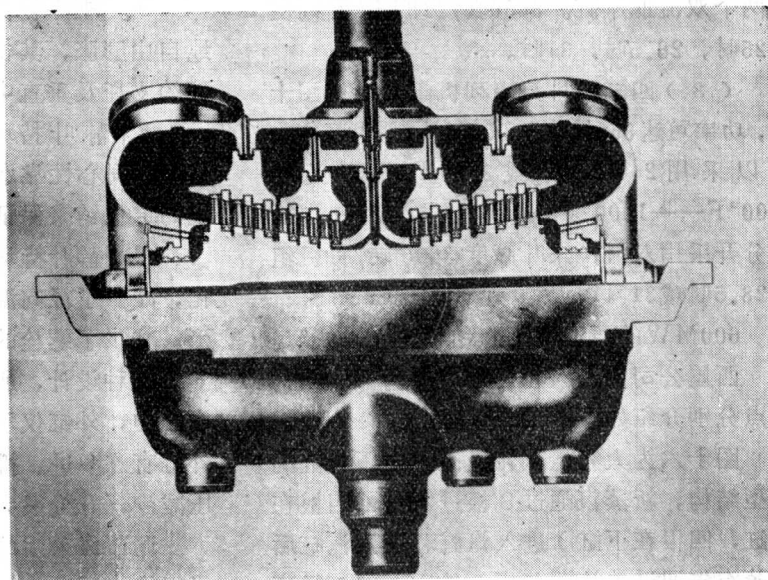
蒸汽室与汽缸间的联接，采用挠性好的连接方式；

双层缸结构；

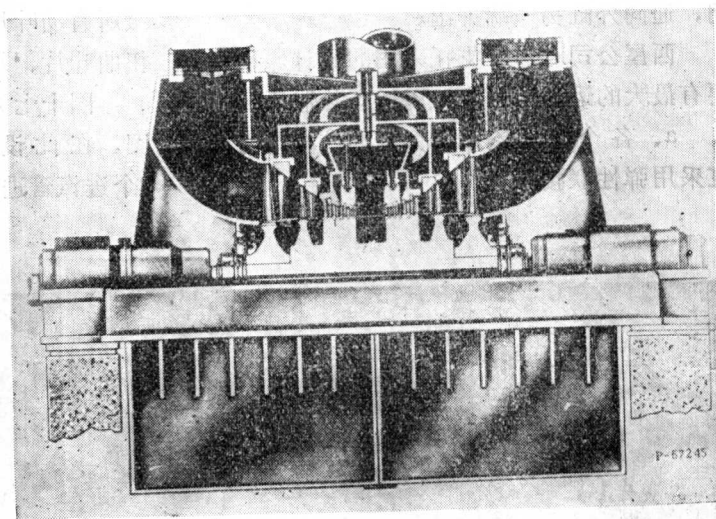
挠性联接的喷咀室；

分开的叶片与叶片环等。

所有上述结构可允许高温部分各自自由热膨胀，而不致在材料中产生高的热应力。



图十八



图十九

在实际运行中，也免除了静止部分产生许多麻烦。

图二十一为典型的水平式节流、截止联合阀门和蒸汽室。

阀体和蒸汽室联为一体，为一整锻件。外界尺寸简化。所有操作部份均放在透平运

行平台上面，使运行维护方便。

截止、节流阀不论在其开启或是关闭方面，结构上均有反座密封，使漏泄减至最小程度，並能在短期停机时易保持锅炉的压力。

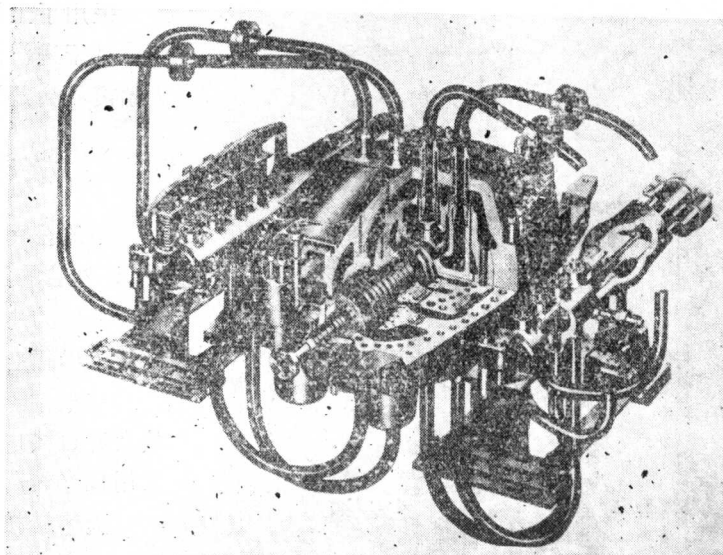
为便于运输和工地按装，蒸汽室和它的支座共同装在一块底板上，可在工厂中预先按装好。底板弹性支托可在制造厂发运前冷紧。支座的设计，可允许承受汽缸进汽管的反作用力以及主蒸汽管系附加的、不超过 ASME 管系标准的反作用力。

图二十二为联合再热阀门，它包括一个再热截止阀及两个中间调节阀。每台机组有两个这样的联合阀，它如同主汽联合调节阀一样，每侧按装一座。操作部位也是按装在透平平台上面。操作、维护简易。

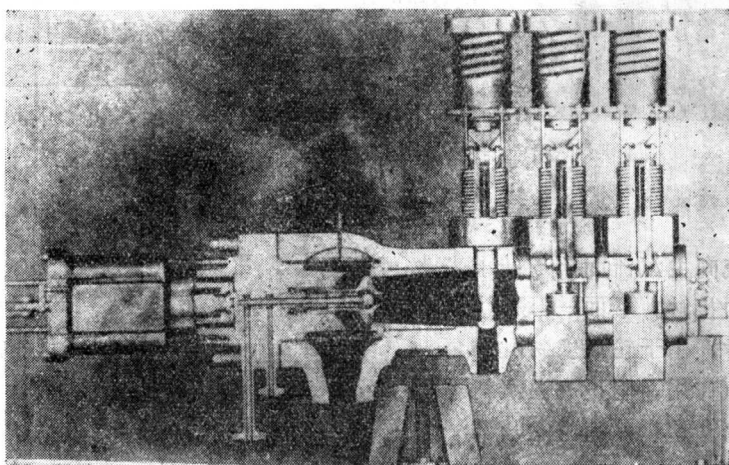
再热截止阀在快关时，同样要承受冲击载荷，已在设计时给予特别注意。

新型中间调节阀采用部分平衡式设计，如同主调节阀一样，采用球形阀座。中间调节阀采用了一种新型滤网和扩散器，因而流动特性较好。为便于按装和运输，阀门与其伺服机构、开关、支座等装在一公共底板上，它有一弹性支架，在制造厂出厂发运前，可以预先冷紧安装。

因为在给定一定的应力时，转子的寿命

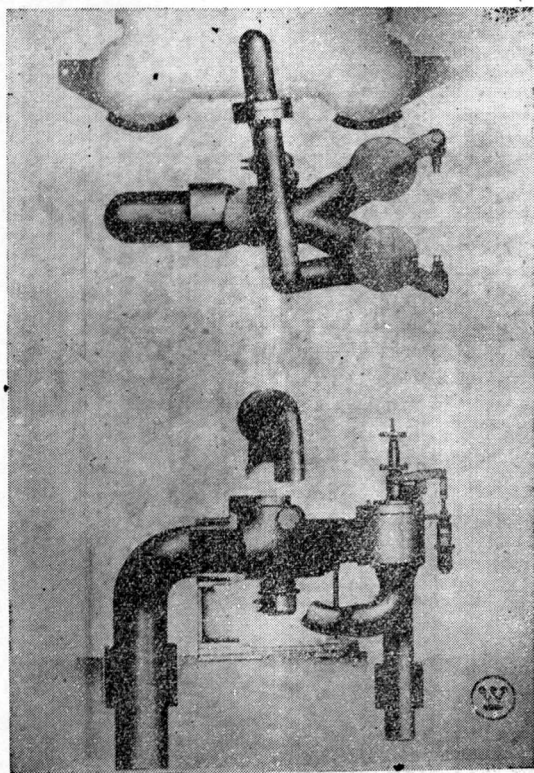


图二十



二十一

是转子外表温度的函数，所以高温转子设计的主要任务之一，是如何设法降低转子表面温度。图二十三给出西屋公司采用的一种典型结构。它表示出主汽进入调节级处，转子表面的冷却方法。它主要是防止从喷咀泄漏出来的高温蒸汽与调节级处的转子表面接触。喷咀上装有两段阻汽片，在这两段阻汽片间的喷咀室上，钻有许多纵向孔，高温蒸汽漏过上面的阻汽片后，通过这些纵向孔，



图二十二

流向主汽流而不与转子表面接触。下面一段阻汽片，由于轮盘上斜孔的泵汽作用，阻止高温汽流下来，这样使喷嘴室与转子段隔离开来，于是转子表面接触的蒸汽温度，乃是冲动式调节级后的温度。它比从喷嘴漏来的汽温低不少。

图二十四表示出了转子再热进汽段的冷却方法。转子的冷却蒸汽，取自调节级的排汽，它经中间部分的平衡活塞流过来。这些冷却蒸汽，部分流入中压透平第一排动、静叶间的流道，其余蒸汽则流入转子第一排动叶侧装的枞树形叶根槽道。

采用了上述的高压及中压进汽区的冷却后，对于进汽为 1000°F 的透平，转子上最大温度不会超过 920°F 。

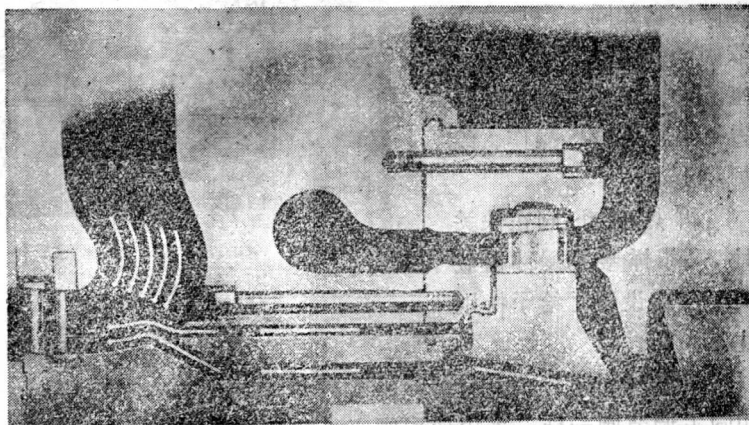
核电站透平的设计

西屋公司核电站透平，进汽可达 1000 Psia 左右的压力；温度接近或等于饱和状态。其压力水平相当于火电站中压部份，但设计上毋需有高温的要求。

核电站蒸汽容积流量比火电站大得多，故大容量核电站透平，为能通过这些流量常采用 1800 转/分。

大容量核电站透平设计的主要问题：

- 1、由于每磅蒸汽能量较低，故进、排汽量均很大；
- 2、由于进汽无过热度，故需采用水分离器或再热器，或两者并用。以减少排汽处的湿度，否则，叶片将会严重磨蚀，影响安全，也影响热效率。



图二十三

例如一个典型的压水堆核电站透平，设计进汽压力为 1000 Psia，电功率为 1000 MW，进汽量约为 12500000 lbs/hr。其进汽容积流量约 3500 Psia 为火电站同容量透平容积