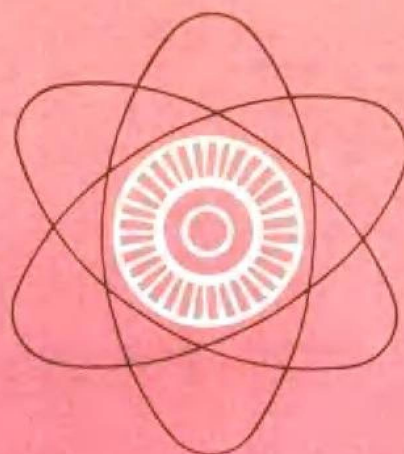




[苏] Б. М. 特罗扬诺夫斯基 著

原子能电站汽轮机

原子能出版社

内 容 简 介

本书综述了原子能电站汽轮机装置的设计和制造,讨论了原子能电站热力系统图和有关参数的选择。

书中阐述了汽轮机(包括用湿蒸汽工作的汽轮机)通流部分的热能气体动力学计算和设计,介绍了原子能电站汽轮机的结构及其特点,特别是对所采用的材料、防侵蚀措施、除湿等问题进行了研究。书中还分析了机组的转数选择、汽轮机的动态过程、调节问题和某些运行结果。

本书可供从事动力机器制造、热能工程、核动力工程方面的工作人员以及工科大学有关专业的师生参考。

Борис Михайлович Трояновский
ТУРБИНЫ ДЛЯ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ
«Энергия», 1973.

原子能电站汽轮机

[苏] Б. М. 特罗扬诺夫斯基著
韩 维 奋 等 译

☆

原子能出版社出版
北京印刷一厂印刷
新华书店北京发行所发行·新华书店经售
(限国内发行)

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ • 印张 15 • 字数 369 千字 • 插页 4
1976 年 12 月北京第一版 • 1976 年 12 月北京第一次印刷
印数 001—2750 • 定价: 1.60 元
统一书号: 15175·072

译 者 序

这是一本资料汇编性质的书。作者综合叙述了一些国家在原子能电站汽轮机设计和制造方面的情况。评述中有一些对苏修技术“成就”的吹嘘，也有些不严密处，请读者在阅读时予以注意。

本书由五位同志合译：高锦昌（第一章、第三章），李学德（第二章），安吉昌（第四章），韩维奋（第五章），张文治（第六章）。参加本书审校工作的有韩维奋、高锦昌，并请陈乃兴同志复校了第二章。

译文中不妥之处，深望读者批评指正。

目 录

第一章 原子能电站汽轮机装置的热力系统图	1
§ 1-1 原理热力系统图	1
§ 1-2 汽轮机装置的主要参数及其对经济性的影响	7
§ 1-3 热力系统图的计算特点	19
§ 1-4 热电联合生产	24
第二章 汽轮机通流部分的热能气体动力学计算与设计	26
§ 2-1 汽轮机级的主要特性	26
§ 2-2 高压级和中压级	35
§ 2-3 低压级	42
§ 2-4 级组和多级汽轮机	49
§ 2-5 汽轮机的变工况	56
第三章 湿蒸汽汽轮机的工作	62
§ 3-1 湿蒸汽的主要热能气体动力学特性	62
§ 3-2 湿蒸汽在汽轮机叶栅中的流动	66
§ 3-3 湿度对汽轮机级特性的影响	72
第四章 饱和蒸汽汽轮机的设计特点	82
§ 4-1 用湿蒸汽工作时汽轮机级的热计算特点	82
§ 4-2 喷管叶栅中的内槽式水分分离	88
§ 4-3 汽轮机通流部分中的水分分离	94
§ 4-4 工作叶片的侵蚀及其防护	102
§ 4-5 饱和蒸汽汽轮机转数的选择	112
第五章 原子能电站汽轮机的结构	122
§ 5-1 用过热蒸汽工作的汽轮机结构	122
§ 5-2 饱和蒸汽汽轮机以及用放射性蒸汽工作的汽轮机的结构特点	130
§ 5-3 饱和蒸汽汽轮机的结构	140
§ 5-4 燃气轮机	177
第六章 原子能电站汽轮机装置的运行	187
§ 6-1 汽轮机运行的特点和经验	187
§ 6-2 原子能电站汽轮机的调节	197
§ 6-3 汽轮机装置的动态过程	207
§ 6-4 汽轮机运行时的放射性	212
§ 6-5 汽轮机的事故	217
参考文献	220
附录	226

第一章 原子能电站汽轮机装置的热力系统图

§ 1-1 原理热力系统图

原子能电站的原理热力系统图主要根据反应堆的型式来确定。在汽轮机装置的设计及其运行中,电站的原理系统图又起着主要作用,特别是它决定汽轮机所用蒸汽或燃气轮机所用气体是放射性的还是“干净”的。汽轮机和汽轮机装置很多部件的结构也是由电站原理系统图的一系列特点(如汽轮机入口的蒸汽参数、中间再热器接入的方案、供给汽轮机的蒸汽是一种压力还是几种压力等)来确定的。

现在,许多型式的动力反应堆已被应用,有些堆型正处于研究阶段。反应堆的型式是由引起核燃料分裂的二次中子能谱、燃料的特性、增殖系数、载热剂、慢化剂、总的结构(壳式或管式)、负荷变化方式等等来区分的。

下面我们只研究在已经运行或正在设计的大容量现代原子能电站中得到了广泛应用的动力堆原子能电站系统图。

热中子堆是现代原子动力的基础,在1980年前的发展计划中其容量占全部动力堆的99%(表1-1)。

表 1-1 各类反应堆原子能电站的容量 $P_{电}$ ①

堆 型	总 计		正 在 运 行 的		正在建造或已经订货的		单元机组的 最大容量, 兆瓦
	反 应 堆 数 目	容 量 $P_{电}$, 兆瓦	反 应 堆 数 目	容 量 $P_{电}$, 兆瓦	容 量 $P_{电}$, 兆瓦	平 均 单 堆 容量, 兆瓦	
压水堆	91	63100	12	3100	60000	760	1200
沸水堆	71	46150	19	4150	42000	808	1115
石墨水冷堆	17	5740	13	1740	4000	1000	1000
轻水堆总计	179	114990	44	8990	106000	785	1200
重水堆	13	3335	4	285	3050	340	500
重水气冷堆	2	170	1	70	100	100	100
重水水冷堆	3	385	1	100	285	142	250
重水堆总计	18	3890	6	455	3435	286	500
石墨气冷堆	37	8445	32	5730	2715	543	590
改进型石墨气冷堆	9	4930	1	30	4900	612	625
高温石墨气冷堆	4	685	2	55	630	315	330
石墨气冷堆总计	50	14060	35	5815	8245	550	625
快中子堆	7	1336	2	74	1262	252	600
其 它	2	45			45	22	25
总 计	256	134321	87	15334	118987	704	1200

① 按1970年夏季前的情况[文献115]。

快中子堆暂时只得到了有限的应用,基本上作为研究用和试验-工业用动力堆,然

而现在正在建造和设计许多大容量快中子堆原子能电站。毫无疑义，由于其增殖比高，这种型式的原子能电站将来在原子动力中将会起很大的作用。

现在让我们根据反应堆的型式来分析一下原子能电站的原理系统图。

单回路系统图

如果工质直接由反应堆进入汽轮机，那末这种电站的系统图称为单回路系统图（图1-1）。当用普通沸水、沸腾重水或在反应堆出口具有很高温度的气体作载热剂时，单回路系统才是可能的。

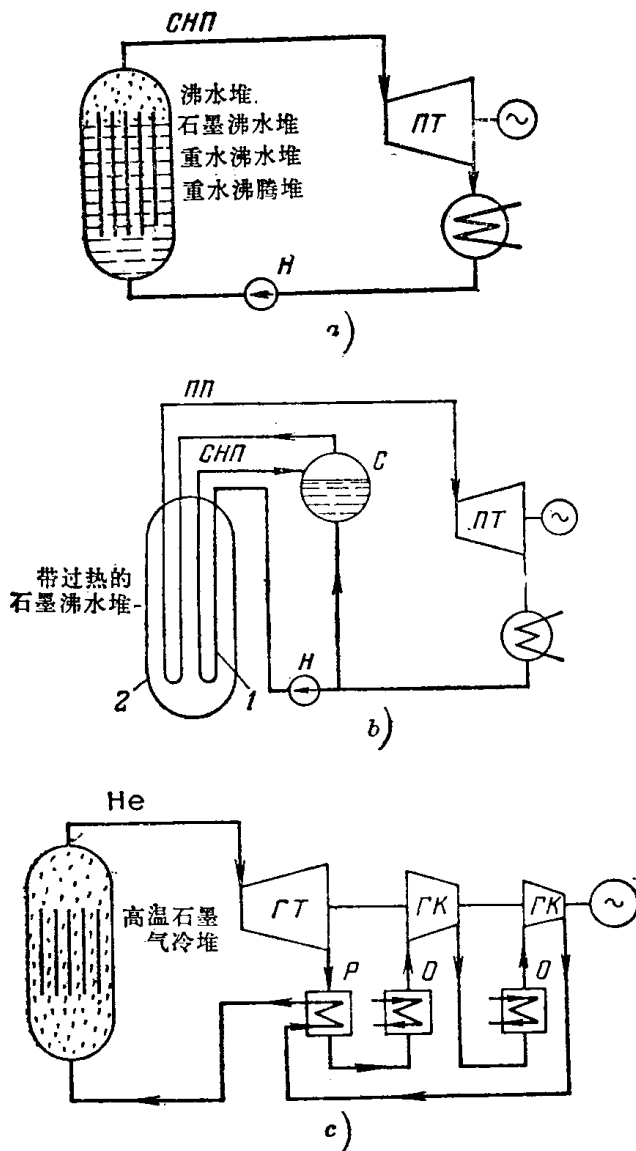


图 1-1 原子能电站单回路原理系统图

a——沸水堆、石墨沸水堆、重水沸水堆和重水沸腾堆电站的简单单回路系统图；*b*——在石墨水冷堆中产生过热蒸汽的单回路系统图：1——蒸发管，2——过热管；*c*——带闭式循环氦气轮机的高温石墨气冷堆电站单回路系统图。ПТ——汽轮机；H——泵；C——分离器；ГТ——燃气轮机；ГК——气体压缩机；P——回热器；O——冷却器；ПП——过热蒸汽；CHП——饱和蒸汽。

在单回路原子能电站汽轮机装置的设计和运行中，提出了与工质的放射性有关的附加要求。

1. 沸水堆 在沸水堆中, 普通水 H_2O 既作慢化剂又作载热剂。在反应堆装置中, 载热剂达到沸腾并形成蒸汽。在反应堆装置出口, 蒸汽温度等于饱和温度, 因此进入汽轮机的蒸汽实际上是饱和蒸汽 (初湿度 $y_0=0.02-0.5\%$)。图 1-1a 所示的热力系统图是最简单的。中等的蒸汽初参数 ($p_0 < 7$ 兆帕斯卡^①) 和汽轮机通流部分工作在湿蒸汽区, 不可避免地使电站的经济性较低; 同时, 对汽轮机和汽轮机装置的结构和运行提出了特殊的要求。此外, 由于蒸汽的放射性, 还要求特别的生物防护。壳式结构的沸水堆通常用低浓缩铀工作。根据 1970 年 6 月以前的资料, 在原子能电站上已经安装、正在建造和已经订货的动力沸水堆总的电容量为 4600 万千瓦, 占原子能电站总容量的 34% [文献 92]。沸水堆原子能电站在美国、西德、日本和其它国家得到了发展。

2. 重水堆 以重水 D_2O 作为慢化剂的重水堆具有很大的优点, 这就是可使用天然铀作燃料和增殖系数高。同时, 由于重水的价格高, 单位投资几乎比普通水堆高一倍。

沸腾式重水堆其载热剂可用重水 (重水沸腾堆) 和普通水 (重水沸水堆)。在这种情况下, 电站的系统图是单回路的 (图 1-1a), 而汽轮机装置的参数和沸水堆原子能电站的参数差别很小, 也就是说汽轮机入口的蒸汽为中压饱和蒸汽 ($p_0=4.2-6.4$ 兆帕斯卡)。

3. 沸腾式石墨水冷堆 以石墨作慢化剂和普通水作载热剂的沸腾式石墨水冷堆 (石墨沸水堆) 做成管式结构。在这些反应堆中, 不仅可以产生饱和蒸汽, 而且也可以产生过热蒸汽。在产生饱和蒸汽的情况下, 从热力系统图和蒸汽参数的观点来看, 石墨沸水堆原子能电站和沸水堆原子能电站 (图 1-1a) 没有什么区别, 也就是说电站的系统图都是单回路的, 进入汽轮机的均为中压饱和蒸汽 ($p_0 < 5-6.6$ 兆帕斯卡)。苏联正在建造单机容量 $P_{\text{电}}=1000$ 兆瓦、初压 $p_0=6.4$ 兆帕斯卡的无过热石墨沸水堆原子能电站。

管式结构相对来说使有可能较为容易地增加反应堆的功率以及在专门的过热管道中实现过热 (图 1-1b)。第一次核过热是在别洛雅尔斯克原子能电站 (Бел АЭС) 的石墨水冷堆上完成的, 其过热温度达 $t_0=500-520^\circ\text{C}$; 这样, 就特别有可能应用广泛推广的列宁格勒金属工厂的标准汽轮机 K-100-90。

由于蒸汽过热也要求在反应堆中采用强烈吸收中子的不锈钢, 这就使原子能电站的技术经济指标变坏。但是, 从长远来看, 不能排除这种反应堆其它结构型式的继续发展。

4. 石墨气冷堆 在称作高温堆的、用高浓缩铀和钍的混合物工作的石墨气冷堆 (高温石墨气冷堆) 中, 反应堆出口的气体温度很高, 以致可以合理地采用带有燃气轮机的单回路系统图 (图 1-1c)。在这种情况下, 看来用惰性气体氦作载热剂是最有前途的 (见 §5-4)。目前这种堆型的西德格斯塔赫特原子能电站 (在初温 $t_0=730^\circ\text{C}$ 时容量 $P_{\text{电}}=25$ 兆瓦) 正在设计。

双回路系统图

如果利用反应堆的载热剂作为汽轮机的工质在技术上不可能或经济上不合理时, 那末就采用双回路系统图 (图 1-2)。在这种情况下, 一回路 (又称作反应堆回路) 载热剂 (水或气体) 进入热交换器, 在那里将其热量传给汽轮机的工质。这样, 二回路的汽轮机装置就已经是用非放射性的蒸汽工作了。

① 1 兆帕斯卡 = 10^6 牛顿/米² ≈ 10.2 公斤力/厘米²。——译者注

5. 压水堆 与沸水堆一样, 是带有压力 (12—16 兆帕斯卡) 的壳式水水反应堆 (压水堆), 用普通水同时作为慢化剂和载热剂的。为了不使水沸腾, 反应堆出口的水温应低于相应反应堆压力下的饱和温度。

由反应堆出来的水导入热交换器, 即蒸汽发生器中, 在那里通常是产生饱和蒸汽或过热度不大的蒸汽。

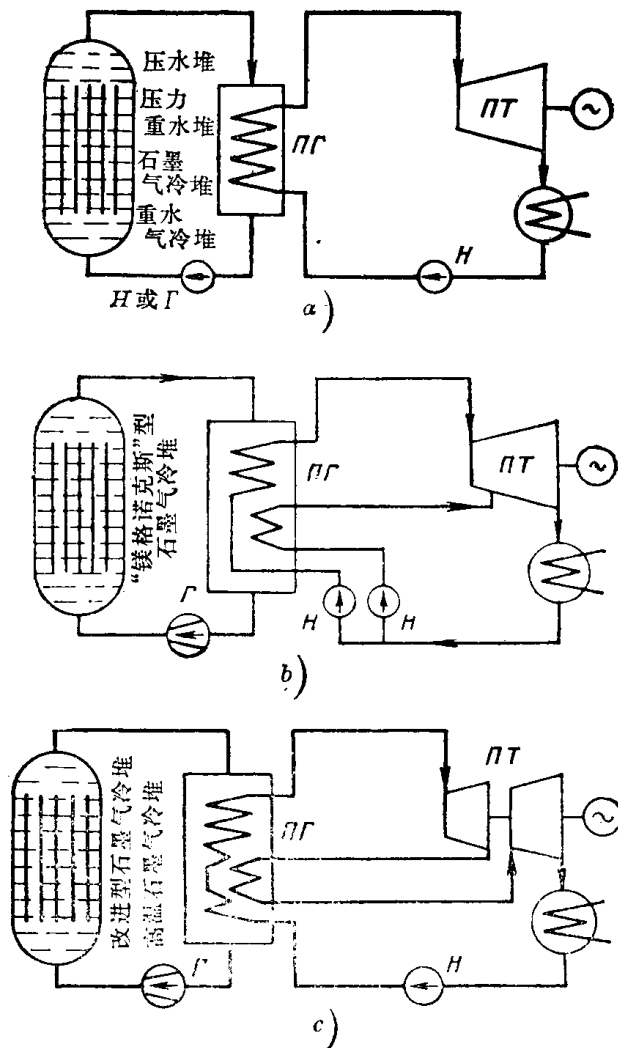


图 1-2 原子能电站双回路原理系统图

a——压水堆、压力重水堆、重水气冷堆和石墨气冷堆电站的普通双回路系统图; *b*——具有双压汽轮机和“镁格诺克斯”型石墨气冷堆的双回路系统图; *c*——具有在蒸汽发生器中进行蒸汽中间再热的双回路系统图 (改进型石墨气冷堆和高温石墨气冷堆)。ΠΤ——汽轮机; ΠΓ——蒸汽发生器; H——泵; Γ——鼓风机。

在最简单、最常见的情况下, 当蒸汽发生器没有经济器和蒸汽过热器时, 它所产生的饱和蒸汽温度应比蒸汽发生器出口 (反应堆入口) 载热剂的温度低 (通常低 15—20°C)。由于载热剂在反应堆中还要加热 30—40°C, 故在反应堆出口, 载热剂得到的温度比汽轮机入口的蒸汽温度高 $\Delta t = 45—60^{\circ}\text{C}$ 。所以汽轮机入口处的蒸汽压力比反应堆出口水的压力低得多 (低 5—7 兆帕斯卡)。这个差值是由 Δt 和反应堆中水的压力超出载热剂饱和压力的量来确定的。

压水堆原子能电站通常采用饱和蒸汽汽轮机。但也有这样的系统图, 其汽轮机入口处

的蒸汽稍有过热（参见图 5-38）。在蒸汽发生器中进行的这种过热提高了汽轮机的可靠性和经济性，使其运行简化并具有一定的机动性。

蒸汽发生器入口载热剂温度与其出口蒸汽温度之差使蒸汽有可能在蒸汽发生器中过热到 $\Delta t'_0 < \Delta t$ 。通常 $\Delta t'_0 = 15—30^\circ\text{C}$ 。为了实现这样的过热，要求在蒸汽发生器中设有专门的过热表面，这就增加了蒸汽发生器的总面积，并使其造价提高。

根据订货和预测判断，在不远的将来（最低限度在 1980 年前），压水堆原子能电站是世界上最常见的一种原子能电站型式（47%），且在苏联、美国、西德、德意志民主共和国和其它国家正在采用。在苏联，压水堆已安装在容量为 $P_{\text{电}} = 210—440$ 兆瓦的新沃龙涅什原子能电站（Нововоронежская АЭС）上，并正在建造容量为 $P_{\text{电}} = 1000$ 兆瓦的具有几个单元机组的原子能电站。应该指出，在美国，汽轮机入口处蒸汽过热度为 $\Delta t_0 = t_0 - t_s = 15—20^\circ\text{C}$ 的装置约占已经工作、正在建造和已经订货的压水堆单元机组总数的 25%。在苏联，也正在设计具有这样过热度、容量为 $P_{\text{电}} = 1000$ 兆瓦、初压为 $p_0 = 6$ 兆帕斯卡的单元机组。

6. 压力重水堆 与压水堆一样，是带有压力（8—11 兆帕斯卡）的重水堆（压力重水堆），也被采用在具有双回路系统图的原子能电站上（图 1-2a）。在蒸汽发生器中产生的饱和蒸汽进入汽轮机。目前正在建造的原子能电站中，进入汽轮机的蒸汽压力为 $p_0 = 3.8—4.2$ 兆帕斯卡。由于蒸汽初参数低，电站的效率不高，但反应堆用天然铀工作。这种型式的原子能电站主要是在加拿大，同时也在瑞典和印度建造。

7. 石墨气冷堆 以石墨作慢化剂、气体作载热剂的石墨气冷堆在英国和法国获得了发展。到目前为止，大部分这种反应堆是用天然铀工作的。金属天然铀的温度，在一定程度上也是释热元件包壳的温度，使反应堆出口的气体温度限制在 $t = 400—410^\circ\text{C}$ 以下。载热剂是二氧化碳（法国马库尔原子能电站用空气工作）。这种原子能电站的系统图是产生过热蒸汽的双回路系统图（图 1-2a）。由于汽轮机入口处蒸汽温度不高（ $t_0 \approx 400^\circ\text{C}$ ），为了降低汽轮机中的蒸汽湿度而又不使装置复杂，初压选为中等压力： $p_0 = 3.5—4.6$ 兆帕斯卡。

这种型式的电站通常都装有双压汽轮机（图 1-2b）。在载热剂的高温区所产生的蒸汽进入汽轮机的第一级。在载热剂的低温区产生较低压力的蒸汽，这种蒸汽引入汽轮机的中间级。在这种情况下，低压回路的存在可以降低蒸汽发生器出口的载热剂温度。因此，增加了载热剂放出的热量，因而也就减少了载热剂的流量。这种系统图虽然复杂，但它另一个重要的优点是减少了载热剂循环所消耗的鼓风机的功。这两个因素大大地降低了鼓风机的功率。对这种型式的石墨气冷堆来说，鼓风机功率不超过 $10—15\% P_{\text{电}}$ 。

用天然铀工作的石墨气冷堆，其释热元件基本上都是用镁合金做包壳，因此也称作“镁格诺克斯”型反应堆（镁格诺克斯型石墨气冷堆）。这些反应堆对英国动力来说是有代表性的。在其它国家同样也有这种型式的原子能电站。

8. 改进型石墨气冷堆 用低浓缩铀工作的、被称作改进型的石墨气冷堆具有带不锈钢包壳的释热元件；工艺管采用耐高温的锆合金。正在建造中的原子能电站，其反应堆出口的气体（通常为二氧化碳 CO_2 ）温度达 648°C 。在这种情况下，其中也包括在蒸汽发生器中进行蒸汽中间再热的情况（图 1-2c），汽轮机入口处的蒸汽参数可能等于或接近于采用有机燃料的电站参数。一些改进型石墨气冷堆原子能电站正在英国建造，其汽轮机前的

蒸汽参数为 $p_0=16$ 兆帕斯卡, $t_0=t_{\text{再热}}=538^\circ\text{C}$ ($P_{\text{电}}=660$ 兆瓦); 而丹季尼斯原子能电站的机组参数为 $p_0=16$ 兆帕斯卡, $t_0=t_{\text{再热}}=566^\circ\text{C}$ 。在这样的蒸汽参数下可采用普通的汽轮机, 且汽轮机装置的效率很高。

载热剂初温高就减少了它的流量, 因此也就减少了鼓风机的功率, 但由于引入了第二个压力回路而使系统图复杂是不合理的。这种原子能电站的效率高, 但造价也高, 目前还大大超过使用普通燃料的电站的造价。

应该指出, 由于系统的热惯性大和不存在放射性液体的排放问题, 所以石墨气冷堆的特点是简单和安全性好。当不仅把反应堆, 而且把整个放射性回路 (包括蒸汽发生器) 都摆在一个由预应力混凝土做成的总壳体中时, 原子能电站的安全性就大大地提高了 [文献 62]。

同时, CO_2 石墨气冷堆的长期运行经验还暴露了许多蒸汽渗入一回路管线 (在高压处) 和 CO_2 渗入二回路管线 (在低压处) 的麻烦事。

9. 高温石墨气冷堆 上面已叙述过的高温石墨气冷堆和改进型石墨气冷堆一样, 能用在双回路系统中 (图 1-2a), 其中也包括带有蒸汽中间再热的系统 (图 1-2c)。通常, 这些反应堆可与蒸汽初参数为 $p_0=16.6\text{—}17.6$ 兆帕斯卡、 $t_0=t_{\text{再热}}=530\text{—}538^\circ\text{C}$ 的普通汽轮机一起使用。同上面分析过的其它堆型相比较, 高温石墨气冷堆具有很大的转换比, 其值接近于一。

10. 重水气冷堆 在重水气冷堆中, 一般是用二氧化碳 CO_2 作为载热剂。这些反应堆要求用低浓缩铀作燃料。这种电站的系统图是双回路的, 与石墨气冷堆原子能电站的系统图 (图 1-2a) 类似, 但在蒸汽发生器中产生的是过热蒸汽。这样的原子能电站为数不多; 已经设计的单元机组最大容量在 $p_0=10$ 兆帕斯卡、 $t_0=530^\circ\text{C}$ 时为 $P_{\text{电}}=106$ 兆瓦 (西德的尼德尔艾赫巴赫原子能电站)。

11. 此外, 还存在着处于单、双回路中间状态的系统图:

1) 蒸汽的产生是按双回路系统图进行的, 而蒸汽的过热则是按单回路系统图进行的。这样的系统图应用在别洛雅尔斯克原子能电站的第一个单元机组上。在这种情况下, 由于蒸汽是从不含放射性杂质的二回路去过热的, 那末, 过热后蒸汽仍然是非放射性的, 然而, 管式反应堆的运行经验表明, 就是在一回路中, 蒸汽实际上也是非放射性的。因此, 在别洛雅尔斯克原子能电站的第二个单元机组上已采用了单回路系统图 (图 1-1b)。

2) 大部分蒸汽直接由反应堆进入汽轮机, 而另外一小部分低压蒸汽则在蒸汽发生器中产生 (例如, 见 § 5-3 中贡德瑞明根原子能电站的叙述)。这样的系统图是在原子能电站发展的第一阶段采用的, 而在以后没有得到推广。

可能还有其它的原子能电站中间状态系统图的方案 (见文献 30)。

三 回 路 系 统 图

12. 快中子堆 快中子堆用浓缩燃料——铀和钚的混合物工作。很高的增殖比 (1.4 或更高) 是快中子堆的主要优点, 因此, 对原子动力来说, 快中子堆具有最大的发展前途。与热中子堆不同, 在快中子堆的活性区中不应有慢化剂, 所以载热剂可以是气体和液态金属, 而不是具有慢化性质的水与其它介质。

虽然原则上以气体 (例如氦) 作载热剂的快中子堆原子能电站采用双回路系统图是可能

的[文献 159], 但所有正在建造和已经订货的动力用快中子堆都用导热性高和比热大的液态钠作载热剂。在反应堆中压力低的情况下, 在其出口也可获得很高的温度。然而由于与水相互作用时钠的活性很大, 因此要求用复杂的三回路系统图(图 1-3), 以保证在事故情况下不使放射性的钠和水发生危险的直接接触。

这样, 在一回路循环的是低压放射性钠, 其出口温度为 $550-600^{\circ}\text{C}$; 在高压的中间回路中(为了不使放射性钠漏泄)循环的已是温度低 $20-35^{\circ}\text{C}$ 的非放射性钠了; 最后是一个包括蒸汽发生器和过热器在内的高压回路(水——蒸汽), 并且汽轮机入口处的温度大于 500°C 。

显然, 在这类系统图中可以采用普通的汽轮机, 且循环的经济性高。例如, 在苏联建造的 BHP-600 快中子堆原子能电站, 将用列宁格勒金属工厂生产的 K-200-130 型汽轮机工作[文献 62]。快中子堆电站造价高, 复杂, 此外无论是反应堆本身还是整个电站还有很多建造和运行的技术问题尚未彻底解决。这就限制了这种型式原子能电站的广泛发展。同时还应该提到的是, 由于钠的熔化温度高(大于 90°C), 为了起动电站, 不仅要求对反应堆, 而且也要求对一回路和中间回路的管道进行预热。

对原理热力系统图的分析表明, 与使用有机燃料的电站不同, 原子能电站、它的系统图及其汽轮机装置的各种各样的型式还要同时存在很长时间。将来究竟优先发展那种型式的原子能电站将取决于运行经验、电站设备(其中包括汽轮机)的研究成效、核燃料的价格等等。

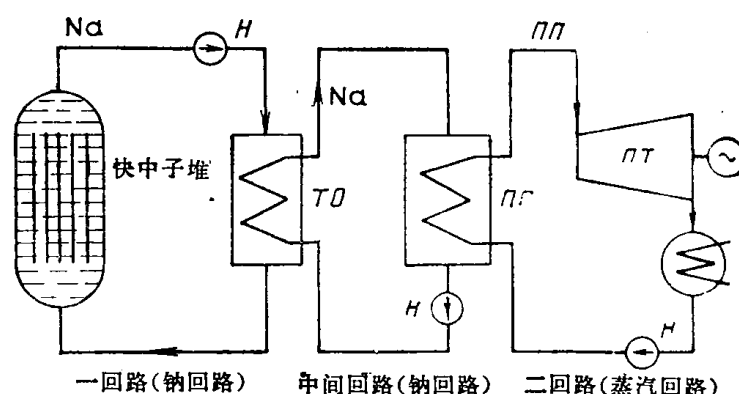


图 1-3 以液态钠作载热剂的快中子堆原子能电站的三回路原理系统图
ПТ——汽轮机；ПГ——蒸汽发生器；ТО——热交换器；H——泵；ПП——过热蒸汽。

表 1-2 给出了最常见的原子能电站型式的简要比较。苏联原子能电站大型单元机组的主要指标见表 1-3。

§ 1-2 汽轮机装置的主要参数及其对经济性的影响

原子能电站和汽轮机装置的经济指标

与使用普通燃料的电站一样, 应该区分汽轮机装置的效率 $\eta_{\text{电}}$ 和 电站效率 $\eta_{\text{电站}}$ ^① $\eta_{\text{电站}}$ 。汽轮机装置的效率

① 这里及以后所指的电站效率为一个单元机组的效率。——译者注

表 1-2 各种主要类型

特 性	热 中				
	水 堆			石 墨 水 冷 堆	
	沸 水 堆 图 1-1 a	压 水 堆 图 1-2 a		石 墨 水 冷 堆 图 1-1 a	石 墨 水 冷 堆 图 1-1 b
回路数	1	2		1	
燃 料	<3% U^{235}	<3.5% U^{235}		<3% U^{235}	
慢化剂	水	水		石 墨	
载热剂	水、蒸汽	水		水、蒸汽	
p , 兆帕斯卡	6.8	15.5		6.5	7.8
t , °C	饱和	318		饱和	520①
汽轮机工质	载热剂	水蒸汽		载热剂	载热剂
p_0 , 兆帕斯卡		5.4	6.3		
t_0 , °C		饱和	300		
电站净效率 $\eta_{\text{电站}}^{\text{净}}$, %	32—33	32—33	33—34.5	32—33	34
汽轮机最大容量, 兆瓦					
在运行的	800	700	900	500	100
在设计的	1150	1300	1000	1000	1000④

① 过热管后。② 双压循环。③ 在蒸汽发生器中二次过热。④ $p_0=6.5$ 兆帕斯卡和 $t=450^\circ\text{C}$ 的

$$\eta_{\text{电}} = P_{\text{电}} / Q_{\text{装置}}, \quad (1-1)$$

它表示汽轮机装置热量利用的有效性($P_{\text{电}}$ ——发电机的电功率, $Q_{\text{装置}}$ ——向汽轮机装置供汽的热功率)。电站的效率

$$\eta_{\text{电站}} = P_{\text{电}} / Q_{\text{电站}}, \quad (1-2)$$

表 1-3 苏联原子能电站大型单元机组的主要指标[文献 34、36、62]

名 称	新 沃 龙 涅 什 原 子 能 电 站			1000兆瓦单 元机组原型		麦列克 斯原子 能电站	别 洛 雅 尔 斯 克 原 子 能 电 站			舍甫琴 柯原子 能电站
	单元机组 I	单元机组 II	单元机组 III与IV				单元机组 I	单元机组 II	单元机组 600	BH-350
堆 型	压水堆	压水堆	压水堆	压水堆	石墨沸 水堆	沸水堆	石墨沸 水堆	石墨沸 水堆	快中子堆	快中子堆
热功率, 兆瓦	760		1375	3200		250	286	530	1430	1000
单元机组电功率, 兆瓦	210 (278)	375	440	1000	1000	50	100	200	600	150+每 昼夜12万 吨水
汽轮机组电功率, 兆瓦	70	75	220	500	500	50	100	100	200	
汽轮机前蒸汽压力, 兆帕斯卡	2.74	2.94	4.32	5.88	6.3—6.8	2.74	8.8	8.8	13—14	5
汽轮机前蒸汽温度(或 状态), °C	饱和	饱和	饱和	饱和	饱和	饱和	500	500	540/540	440
净效率, %	25.5	{ 25.7	29.7	{ 32.5	—	—	—	34	42②	—
毛效率, %	27.6		32.0		—	—	—	—	—	—
每瓦装机容量造价, 卢布/瓦	326	186①	127①	130	—	—	—	—	—	—
每瓦小时电的价格, 戈比/瓦·小时	1.3③	0.7	0.5	0.4	—	—	—	—	—	—

① 扩建的造价。② 汽轮机装置的效率。③ 在1968年为0.94戈比/瓦·小时。

原子能电站的比较

子堆						快中子堆
重水堆		石墨气冷堆				
压力重水堆 图 1-2 a	重水沸水堆 图 1-1 a	镁格诺克斯型 图 1-2 b	改进型 图 1-2 c	高温石墨气冷堆 图 1-2 c	高温石墨气冷堆 图 1-1 c	快中子堆 图 1-3
2 天然铀 重水 11 299 重水, 蒸汽 4.0 饱和 29—30 540 800	1 <2% U^{235} 水 水, 蒸汽 6.0 饱和 载热剂 30—33 270 270	2 天然铀 石墨 二氧化碳 3.0 410 4.6② 400 30—31.5 335 335	2 <3% U^{235} 石 水 4.2 650 16 538/538⑥ 至41.5 40 660	1 93% $U + Th$ 石墨 氦 4.0 750 18 530/530⑥ 39—40 45 335	1 2.5 730 载热剂 40 — 25	3 <30% $UO_2 + PuO_2$ — 钠 0.1 560 水蒸汽 14 540/540③ 41 60 250

单元机组。

式中 $Q_{\text{电站}}$ ——在反应堆中核燃料分裂产生的热功率。

由于在反应堆、蒸汽发生器和循环系统中的损失，电站效率低于汽轮机装置的效率。如果从电站功率中减去厂用电的功率 $P_{\text{厂用}}$ (给水泵、载热剂泵或鼓风机和其它机械的功率)，那末在这种情况下电站功率被称为输出功率或净功率：

$$P_{\text{净}} = P_{\text{电}} - P_{\text{厂用}}.$$

比值

$$\eta_{\text{电站}} = P_{\text{净}} / Q_{\text{电站}} \quad (1-3)$$

称为电站的净效率。

单位时间内载热剂从反应堆中带出的热量称为反应堆的热功率 $P_{\text{热}}$ 。因为在反应堆中损失不大(不大于1%)，那末实际上可以认为 $P_{\text{热}}$ 等于单位时间内核燃料的分裂能： $P_{\text{热}} \approx Q_{\text{电站}}$ 。

显然，燃料的单位耗量取决于电站的效率。当1公斤核燃料(裂变材料)完全分裂时，用于生产电能的核燃料单位耗量

$$b'_{\text{燃料}} = 5.3 \times 10^{-8} / \eta_{\text{电站}} \quad \text{公斤/瓩·小时} \quad (1-4)$$

然而，装在反应堆中的裂变材料有一部分是不能利用的，并在换料时将其从反应堆中排除。如果用 a 表示分裂了的核燃料份额，并称为燃耗深度，那末每生产1瓩·小时的电能反应堆中需要装的裂变物质的总量

$$b_{\text{燃料}} = \frac{5.3 \times 10^{-8}}{a \cdot \eta_{\text{电站}}} \quad \text{公斤/瓩·小时} \quad (1-4a)$$

如果象通常做的那样(例如文献36)，把 K 作为燃烧1公斤 U^{235} 的兆瓦天，那末核燃料的年消耗量

$$B = \frac{P_{\text{电}} \tau_{\text{装}} \times 10^{-3}}{24 K \cdot \eta_{\text{电站}}} \quad \text{公斤/年}, \quad (1-5)$$

式中 $\tau_{\text{装}}$ ——一年中原子能电站装机容量利用小时数。

在原子能电站设计、设备选型、汽轮机装置和汽轮机本身设计以及方案比较时，每瓩小时的计算费用是主要指标。计算费用是由输出电能的成本和与投资成正比的利率相加得来的。至于电能的成本，它是由三部分相加而成：

$$S_{\text{电能}} = \frac{S_{\text{燃料}} + S_{\text{投资}} + S_{\text{运行}}}{\Theta_{\text{年}}} \quad \text{卢布/瓩} \cdot \text{小时}, \quad (1-6)$$

式中 $S_{\text{燃料}} = b_{\text{燃料}} c_{\text{燃料}}$ ——燃料部分的成本； $c_{\text{燃料}}$ ——在电站交货的燃料价格，卢布/公斤； $S_{\text{投资}}$ ——取决于投资、正比于电站造价部分的成本； $S_{\text{运行}}$ ——运行部分的成本； $\Theta_{\text{年}}$ ——每年生产的电量，瓩·小时[文献 30]。

现在，在原子能电站上燃料部分的成本相对地说的不大的，虽然它在很大程度上取决于反应堆的型式，例如，在从重水堆转换到普通水堆和改进型石墨气冷堆时，燃料部分的成本将增加。同时，水堆的投资比重水堆小得多。

在解决技术经济问题时，应考虑如下因素：

1. 反应堆和整个单元机组功率的增加将使单位投资下降。例如，沸水堆的单元机组功率从 500 兆瓦增至 2000 兆瓦，其单位投资大约下降 30%[文献 51]。由于经验的积累和技术的进步，使电站的设备和建设更加完善，因而导致原子能电站造价的降低，也应归入此点。

2. 铀的世界价格有迹象将会提高，这将引起 $c_{\text{燃料}}$ 的增加。

初 参 数 的 选 择

众所周知，汽轮机装置的效率随着供热平均温度的增加而提高。因此，火电站是用 13—25 兆帕斯卡和 535—560°C 的蒸汽参数工作，并有一级甚至二级蒸汽中间再热（例如，见文献 56 和 61）。火电站蒸汽初参数的提高基本上受长期运行条件下电站工作可靠性的限制，并由技术经济指标来确定。对原子能电站来说，进行初参数选择时要考虑到很多因素：

1) 技术上允许的反应堆出口载热剂温度。这个温度可能受燃料或反应堆活性区结构材料热态强度的限制，也可能受原子能电站反应堆部分制造的可靠性和可能性条件的限制。

2) 原子能电站其它设备的可靠性，其中包括汽轮机的可靠性，特别是耐侵蚀的性能。

3) 载热剂参数对有效增殖系数的影响。

4) 当载热剂温度高时，由于反应堆释热元件的钢制包壳中的中子有害损失使燃耗深度减小[文献 51]。

5) 汽轮机入口参数对汽轮机装置效率和电站净效率的影响。

6) 在某些情况下降低反应堆入口载热剂温度的必要性。

7) 载热剂和汽轮机工质的参数对原子能电站设备的结构和价格的影响。

归根到底，在保证原子能电站可靠工作的条件下，初参数的选择由计算费用的最小值

来确定。在选择参数时,要考虑运行的经验以及所采用的初参数的发展远景。

用饱和蒸汽工作的汽轮机初压 p_0 的选择是根据一系列的因素来进行的。这些因素是:

1. 汽轮机中蒸汽膨胀终点的允许湿度。这个限制与叶片侵蚀有关,我们将在§4-4中详细研究。显然, p_0 越低,终湿度 $y_{终}$ 越小。

2. 汽轮机装置的热效率。这时,简单循环(没有回热和中间再热)的效率 η_t 在压力达到 $p_0=16-17$ 兆帕斯卡以前随初压的增加而升高,而在更大的压力下则随初压增加而下降。

3. 湿度对汽轮机效率 η_{oi} 的影响。当用湿蒸汽工作时,级和整个汽轮机的效率均减小。如果这个减小按简单的关系[文献68],即每1%平均图示湿度使汽轮机或级组的效率下降0.87%,那末,在 $p_{终}=5$ 千帕斯卡^①时,汽轮机装置的效率 $\eta_{电}$ 与初压 p_0 的关系表示在图1-4a上。例如,若 p_0 从7兆帕斯卡提高到9兆帕斯卡,则 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}=2.8\%$;使 p_0 降到5兆帕斯卡时,将使装置效率降低4.5%。考虑到湿度对汽轮机相对内效率的影响,当 $p_0=13-15$ 兆帕斯卡时装置效率最高。

4. 影响单回路原子能电站初参数选择的沸腾时壁至水的放热系数与压力的关系。对水来说,最高的放热系数相应于压力大约为 $p=7$ 兆帕斯卡时。

大多数采用饱和蒸汽汽轮机和沸腾式反应堆(沸水堆和石墨沸水堆)的电站现在都设计成 $p_0=6.5-7$ 兆帕斯卡。

5. 能够用来计算反应堆壳体(对压水堆电站双回路系统图)的压力与温度的极限值。目前大多数压水堆设计成压力为12—16兆帕斯卡,相应于汽轮机前的蒸汽压力为 $p_0=4.9-6.3$ 兆帕斯卡[文献139]。

当 p_0 给定时,蒸汽初温的选择由如下因素确定:初始过热度不仅明显地提高了循环效率 η_t ,而且也明显地提高了汽轮机本身的效率 η_{oi} (由于通流部分中湿度的减小)。此外,还提高了叶片的可靠性,减少了专门分离设备的数量与尺寸。根据初压 p_0 , $\Delta t=t_0-t_s$ 每提高 10°C ,装置效率提高 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}=0.4-0.9\%$ (图1-4b)。

另一方面,汽轮机入口湿度大,就降低了电站效率。由图1-4c可见,每增加1%的初湿度 Δy_0 使装置效率降低 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}=0.3-0.4\%$ 。因此,对于饱和蒸汽汽轮机通常采用

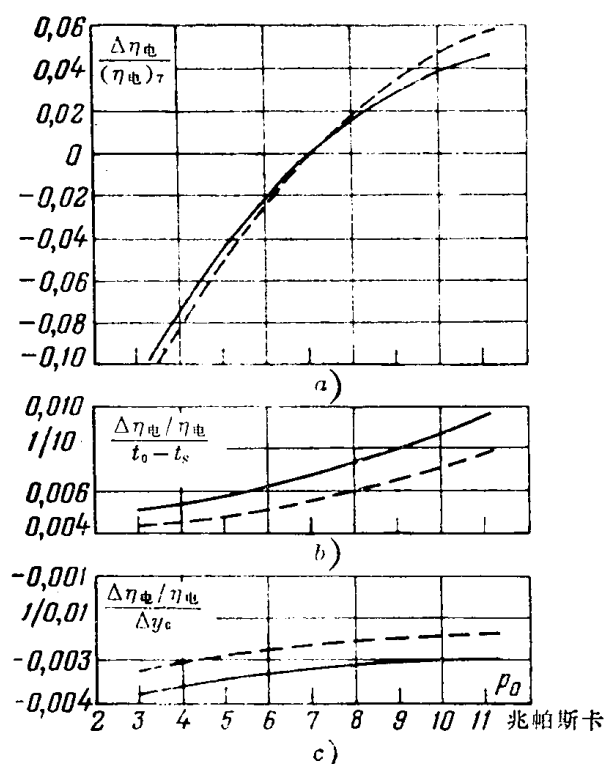


图 1-4 蒸汽初参数对汽轮机装置经济性的影响
(在 $p_{终}=5$ 千帕斯卡时)

a——压力 p_0 对饱和蒸汽装置效率 $\eta_{电}=\eta_i\eta_{oi}$ 相对电的影响,图中 $(\eta_{电})_7$ ——在 $p_0=7$ 兆帕斯卡时的效率; b——根据初压 p_0 , $\Delta t=t_0-t_s$ 每变化 10°C 装置效率的变化 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}$ (这里 t_s ——饱和温度); c——根据初压 p_0 ,初湿度 Δy_0 每变化1%装置效率的变化 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}$ 。——没有中间再热; ---有蒸汽中间再热(一级或二级)。

① 1千帕斯卡 $=10^3$ 牛顿/米² ≈ 0.0102 公斤力/厘米²。——译者注

$\gamma_0 < 0.5\%$ 。

终压的选择

原子能电站终压 $p_{终}$ 的选择原则上与火电站没有区别，并由如下因素确定：

1) 降低 $p_{终}$ 使电站效率增加。例如，对于改进型石墨气冷堆原子能电站来说，真空从 4 千帕斯卡提高到 3 千帕斯卡，效率提高 $\Delta\eta_{电}/\eta_{电}=1.5-2\%$ ，而对饱和蒸汽循环效率相应提高 2.5—3%。

2) 降低 $p_{终}$ 要求冷凝器和循环水冷却装置的表面积大，循环水泵的功率大等等。

3) 降低 $p_{终}$ ，因而增大了末级后的蒸汽比容（在同样的排出损失下），使汽轮机的结构复杂。

这样， $p_{终}$ 的选择乃是一个已为很多作者（对原子能电站，参见文献 1）所解决了的技术经济问题。

同时，在分析原子能电站 $p_{终}$ 的选择问题时，应考虑两个因素。首先，原子能电站的地点与燃料产地完全无关，可以选择在能够供给原子能电站足够冷却水的水源附近。其次，在许多国家，其中包括苏联，原子能电站将设置在人口稠密的地区。众所周知，那里没有多余的水。这样， $p_{终}$ 的选择实际上是由原子能电站所处的地点来决定。

对大容量汽轮机装置参数的分析表明，在许多国家中原子能电站 $p_{终}$ 的设计值明显地低于火电站 $p_{终}$ 的设计值。例如，西德 1970 年火电站 $p_{终}$ 的平均值为 $p_{终}=4.65$ 千帕斯卡，而正在建造和设计的原子能电站， $p_{终}=4.06$ 千帕斯卡。在美国，对于正在设计和建造的容量为 $P_{电}>500$ 兆瓦的火电站单元机组来说，规定 $p_{终}=8.9$ 千帕斯卡，而原子能电站

$p_{终}=5.9$ 千帕斯卡。

实际上，不分析汽轮机末级的工作就不能研究 $p_{终}$ 对 $\eta_{电}$ 的影响。

如果末级叶片的蒸汽负荷 $G_{终}/\Omega$ （这里 $\Omega=\pi d l$ ——所有流道末级叶片环形面积的总和）不大，那末排汽速度损失 $h_{排速}$ 也不大（见 § 2-3）。在这种情况下，尽管 $p_{终}$ 的降低和排汽速度损失的增加也使汽轮机效率 η_{oi} 降低，但这一降低明显地低于在热效率 η_t 方面获得的好处。相反，在末级蒸汽负荷 $G_{终}/\Omega$ 大的情况下，当 $p_{终}$ 下降时， $h_{排速}$ 的绝对增加量已经是非常重要的了，在 $\eta_{电}$ 方面获得的好处也就不那么明显，而在一定的条件下，好处甚至就不存在了（图 1-5）。

在这个图中，为了方便起见，比值 $G_{终}/\Omega$ 用 $P_{电}/\Omega$ 代替，在研究 $\eta_{电}$ 大致相同的装置时，这样做没有带来明显的误差。由 $p_0=7$ 兆帕斯卡的图 [文献 155] 可见，在 $P_{电}/\Omega=20$ 兆瓦/米² 时， $p_{终}$ 从 7 千帕斯卡变化到 4 千帕斯卡实际上并不影响装置效率 $\eta_{电}$ 。同时，当 $P_{电}/\Omega=5$ 兆瓦/米² 时， $p_{终}$ 在同样的范围

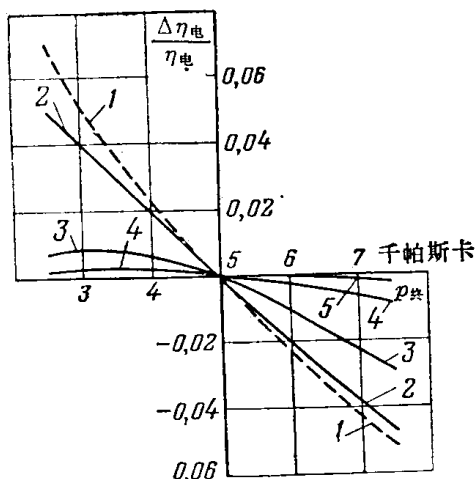


图 1-5 终压 $p_{终}$ 对饱和蒸汽汽轮机装置 ($p_0=7$ 兆帕斯卡) 效率的影响

1——在 $G_{终} v_{终}/\Omega$ 值不变时对任何 $p_{终}$ 值的曲线；其余的曲线为：

曲线号	$P_{电}/\Omega$, 兆瓦/米 ²
2	5
3	10
4	15
5	20

注：在 $p_0=5$ 兆帕斯卡时，曲线 2—5 的值应乘上 1.15。例如，在 $P_{电}/\Omega=8.7$ 兆瓦/米² 时，应使用曲线 3，这里 $P_{电}/\Omega=8.7 \times 1.15=10$ 兆瓦/米²。

内变化对装置效率的影响则为 $\Delta\eta_{\text{电}}/\eta_{\text{电}}=5.8\%$ 。显然, 如果对 $p_{\text{终}}$ 的每一个计算值设计一个具有新的排汽面积 Ω 的汽轮机, 以使排汽速度损失 $h_{\text{排速}}$ 不变, 那末由于提高真空而得到的好处将是最大的(图 1-5 上的虚线)。

蒸汽的中间再热和外部分离

对蒸汽初参数高的汽轮机, 采用中间(第二次)再热(例如, 见图 1-2c)可使循环热效率 η_t 由于平均供热温度的增加而提高, 并使汽轮机效率由于级中湿度的减小而提高。

对于中间再热有一个最有利的压力 $p_{\text{再热}}^{\text{最佳}}$ 。在这个压力下, 在效率方面得到的好处将是最大的[文献 38、60]。通常这个压力为 $p_{\text{再热}}^{\text{最佳}}=(0.2-0.3)p_0$ 。从中间再热获得的好处为 $\Delta\eta_{\text{电}}/\eta_{\text{电}}=3-6\%$, 此值取决于蒸汽初参数、中间再热温度 $t_{\text{再热}}$ 和汽轮机终压 $p_{\text{终}}$ 。

在饱和蒸汽汽轮机的低压级中, 经常也在中压级中, 蒸汽湿度很大, 致使 η_{oi} 比用过热蒸汽时低得多。在这种情况下, 叶片的侵蚀将达到不允许的程度。图 1-6 表示了当饱和蒸汽初压为 $p_0=6$ 兆帕斯卡、终压为 $p_{\text{终}}=4$ 千帕斯卡时蒸汽在 $i-s$ 图上的膨胀过程。如果不采取任何除湿措施, 那末终湿度可达 $y_{\text{终}}=24\%$ 。在采用了现代化除湿和外部分离方法(见 § 1-3、4-2 和 4-3), 以及完善的回热系统后, 终湿度 $y_{\text{终}}$ 已为 14.3% 了。而对带有中间再热, 其再热温度达到 $t_{\text{再热}}=260^\circ\text{C}$ 的汽轮机来说, 终湿度甚至只有 10.6% 。为了比较起见, 在图 1-6 上还画出了在带有中间再热的高参数汽轮机中蒸汽的膨胀过程, 这时终湿度为 $y_{\text{终}}=7.7\%$ 。

对于饱和蒸汽汽轮机, 上述 $y_{\text{终}}=24$ 、 14.3 和 10.6% 的终湿度值意味着汽轮机效率由于湿度损失相应地降低了 $\Delta\eta_{oi}=10.5$ 、 6.3 和 3.7% 。

叶片的侵蚀取决于很多因素(见 § 4-4), 首先取决于湿度 y 。一般认为, 当叶片外缘的圆周速度 $u_{\text{外缘}}<520$ 米/秒时, 湿度 $y_{\text{终}}=10\%$ 是允许的, 而当 $u_{\text{外缘}}<400$ 米/秒时^①, 湿度为 $y_{\text{终}}=16\%$ 也是允许的。即使采用目前已知的保护叶片的高效能方法, 大的湿度实际上也是不允许的。因此, 为了降低饱和蒸汽汽轮机中的湿度, 必须采取根本的措施。这些措施可以是: 在分离器中进行蒸汽干燥, 蒸汽的中间再热或两种方法同时使用。

外部分离 在高效能的分离器中可使蒸汽干燥到 $y_2=0.005-0.01$ (图 1-6), 因此, 减少了以后各级中的湿度, 显著地改善了汽轮机的效率 η_{oi} 。在分离器中, 或更确切地说在配有隔离阀门的分离器的整个管线中, 蒸汽压力有所降低。然而, 这个损失并不大, 因此, 外部分离实际上总是能够提高装置效率的, 至少是 $\Delta\eta_{\text{电}}/\eta_{\text{电}}=2-2.5\%$ 。

汽水分离提高了汽轮机最后几级在侵蚀情况下工作的可靠性。当然, 外部分离也要求附加投资; 在分离器中, 称作分缸压力 $p_{\text{分缸}}$ 的蒸汽压力越低(蒸汽比容增加), 分离器出口湿度 y_2 越小(蒸汽越干燥), 这个附加投资就越大。分离器的尺寸很大(参见图 5-15、5-20、5-28、5-32), 以致通常对大容量机组要装设几个分离器: 每 $P_{\text{电}}=125-250$ 兆瓦设一个分离器。

分缸压力 $p_{\text{分缸}}$ 的选择, 如同其它参数一样, 是由考虑到许多因素的计算费用的最小值来确定:

1. 汽轮机膨胀终点的极限湿度 $y_{\text{终}}^{\text{极限}}$ 是根据防止末级叶片侵蚀的条件来选择的。显

① 瑞士爱雪·维司公司具有在 $y_{\text{终}}=16\%$ 和 $u_{\text{外缘}}=396$ 米/秒条件下汽轮机工作 9 万小时以上的经验[文献 107]。