

203912

高等学校交流讲义

蒸汽轮机

哈尔滨工业大学汽轮机教研室编著

国防工业出版社

圖書部

中国工业出版社

本书主要内容是介绍蒸汽轮机及其主要辅助设备的工作原理、设计、运行等各方面的問題。全书共分十一章。第 1~4 章阐述蒸汽在汽轮机中流动、作功的原理和汽轮机的热力计算；5、6 两章阐述汽轮机的变动工况和配汽机构；第 7 章介绍汽轮机调节系統；第 8 章介绍汽轮机各主要零件的强度计算；第 9 章介绍各种汽轮机的结构；第 10 章介绍汽轮机各主要辅助设备（凝汽器、加热器等）的工作原理；第 11 章介绍汽轮机操作运行维护方面的問題。

本书可作为高等学校非汽轮机专业学习“蒸汽轮机”課程的交流讲义，并可供汽轮机的设计、运行人员参考。

蒸 汽 轮 机

哈尔滨工业大学汽轮机教研室編著

第一机械工业部教材編审委员会編委会編輯

(北京复兴門外三里河第一机械工业部)

*

中国工业出版社出版(北京佟麟閣路 10 号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第 110 号)

中国人民大学印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行，各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ ，印張 20 $\frac{3}{8}$ ，插頁 1，字數 434,000

1961 年 12 月北京第一版，1961 年 12 月北京第一次印刷

印数 0001—1643，定价(10-6)2.45 元

*

統一书号: 15165 · 583(一机-110)

前 言

本书系根据我室对非汽轮机专业学生讲授的汽轮机学的讲义，经过补充和修改编写成的。内容适用于高等学校非汽轮机专业学生学习之用，也可以作为中等专业学校有关专业的教学参考书，对于汽轮机制造厂及发电站工作人员自学汽轮机基本知识也会有一定的帮助。

汽轮机的生产是电力工业的一个重要组成部分。电力工业的发展在一定程度上取决于汽轮机生产发展的速度，因此汽轮机生产也就与国民经济的发展速度有着密切的关系。

我国在解放前，工农业生产极为落后，电力工业也是微不足道。旧中国仅有的一些火力发电站中安装的汽轮机都是从国外进口的，甚至汽轮机的修理工作也都要送到国外制造厂去进行。解放以后由于党的正确领导和全国人民的积极努力，又学习了苏联和各兄弟国家的先进经验。我国汽轮机制造工业取得了巨大的成就。因此，在1955年就试制成功了国产第一台6000瓩凝汽式汽轮机。为我国制造汽轮机创造了光辉的开端。此后，我国各汽轮机制造厂就从仿造国外先进产品中，转向独立设计制造结合我国实际需要的新产品，更好地满足了国民经济对电力的迫切需要。

由于各个专业的课程密切联系着，因此，许多其他有关专业的学生都有必要学习汽轮机课程，对汽轮机作一全面的扼要的了解。根据几年来对非汽轮机专业学生讲授汽轮机学的经验，我们在编写本书时，内容力求全面，使学习本书同志对汽轮机的有关问题有一较全面的了解。但由于各专业的课程时数不同，课程的重点也不一致，因此本书对汽轮机的热力过程、调节、强度、结构、凝汽设备及运行等方面，均作了必要的叙述，使用本书时可按照各专业的需要，加以选择。

本书中部分材料是根据苏联专家尼·德·格里亚兹诺夫副教授于1955~1956年间在本校讲课时的讲稿编写成的。

本书经1963年~~哈尔滨工业大学~~锅炉专业¹ 恒选会议讨论，推荐为高等学校交流讲义。

哈尔滨工业大学汽轮机教研室

前言	1	§5-2 漸縮噴管的變動工况	110
第一章 汽輪機的一般介紹	1	§5-3 縮放噴管的變動工况	113
§1-1 汽輪機製造在國民經濟中的意義	1	§5-4 變動工况下工作葉片進口處的沖 擊損失	115
§1-2 汽輪機的工作原理	2	§5-5 變動工况下汽輪機級的詳細計算	116
§1-3 汽輪機的分類	5	§5-6 蒸汽流量與級內蒸汽參數的關係	119
§1-4 汽輪機裝置的循環及其效率	11	§5-7 變動工况下反動度的變化	123
第二章 蒸汽在噴管中的流動	17	§5-8 凝汽式汽輪機的變動工况	125
§2-1 研究蒸汽流動的基本假設	17	§5-9 凝汽式汽輪機的最后級的變動工况	127
§2-2 蒸汽流動的基本方程	17	§5-10 背壓式汽輪機的變動工况	128
§2-3 蒸汽在噴管內的流動	23	§5-11 汽輪機軸向推力的變化	129
§2-4 噴管截面積與蒸汽參數之間的關係	27	第六章 配汽系統	134
§2-5 臨界速度	28	§6-1 节流調節法	134
§2-6 噴管出口截面積的計算	29	§6-2 噴管調節法	136
§2-7 蒸汽在噴管斜切部分內的膨脹	33	§6-3 旁通調節法	140
§2-8 噴管計算舉例	34	§6-4 內旁通調節法	142
第三章 蒸汽在汽輪機級內的工作過 程	36	§6-5 配汽系統的選擇及設計	143
§3-1 蒸汽在工作葉片汽道內的工作	36	第七章 汽輪機的調節	145
§3-2 工作葉片計算	41	§7-1 汽輪機調節的任務及其基本方法	145
§3-3 級的輪緣效率	43	§7-2 直接調節和調速器	146
§3-4 速度級	47	§7-3 間接調節和錯油門油动机机构 (又称滑閘伺服机构)	151
§3-5 汽輪機的級內損失和整個汽輪機 的損失	53	§7-4 汽輪機調節系統中的蒸汽机构	156
例題: 雙列速度級的計算	65	§7-5 調節系統的靜特性	158
第四章 多級汽輪機	69	§7-6 汽輪機液動調節和油系統	161
§4-1 多級汽輪機的工作過程及其優點	69	§7-7 汽輪機的保护裝置	163
§4-2 多級汽輪機的重熱系數	70	§7-8 背壓式汽輪機的調節及中間抽汽 式汽輪機的調節	165
§4-3 多級汽輪機的設計步驟	72	§7-9 調節系統的运动过程(动力学)以 及防止超速的基本措施	169
§4-4 調節級型式及焓降選擇	75	第八章 汽輪機零件的結構和強度計 算	175
§4-5 多級汽輪機的焓降分配	76	§8-1 工作葉片的結構及材料	175
§4-6 多級汽輪機設計中的几个問題	79	§8-2 工作葉片的強度計算	178
§4-7 汽輪機的極限功率	81	§8-3 工作葉片的振動	183
§4-8 扭曲葉片	81	§8-4 轉子的結構	185
§4-9 熱能與電能的聯合生產	83	§8-5 叶輪的強度計算	191
§4-10 回熱循環	88	§8-6 叶輪松脫轉速及配合公差確定	201
§4-11 中間過熱循環	93	§8-7 主軸的強度計算	207
例題: 多級凝汽式汽輪機的計算	95	§8-8 轉子的臨界轉速	209
第五章 汽輪機的變動工况	100		
§5-1 汽輪機變動工况的主要研究內容	100		

§ 8-9 联轴节	216	§ 10-5 凝汽器	285
§ 8-10 汽缸的结构和强度计算	219	§ 10-6 凝汽器工作的变动工况	288
§ 8-11 喷管组的结构	219	§ 10-7 循环水泵及凝结水泵	291
§ 8-12 隔板的结构和强度计算	222	§ 10-8 加热器、除氧器、蒸发器及冷油器	297
§ 8-13 轴承的计算	226	第十一章 汽轮机的运行	301
第九章 典型的汽轮机的结构	237	§ 11-1 汽轮机运行人员的任务	301
§ 9-1 选择汽轮机结构的一些原则	237	§ 11-2 汽轮机的启动	302
§ 9-2 凝汽式汽轮机	238	§ 11-3 汽轮机在热状态下的启动	308
§ 9-3 供热式汽轮机	262	§ 11-4 汽轮机的停机	309
§ 9-4 废汽式汽轮机	270	§ 11-5 汽轮机在运行中的维护	311
第十章 凝汽设备及热交换器	272	§ 11-6 运行条件的改变对汽轮机运行的影响	313
§ 10-1 凝汽设备在汽轮机装置中的作用	272	§ 11-7 汽轮机通流部分的结垢及清洗	317
§ 10-2 凝汽器的工作原理	273	§ 11-8 汽轮机负荷的分配	322
§ 10-3 凝汽器的结构	275		
§ 10-4 凝汽器的热力计算	280		

第一章 汽輪机的一般介紹

§ 1-1 汽輪机制造在国民經济中的意义

国民經济的发展,要求电力工业相应的迅速发展。才能为扩大工农业生产、提高劳动生产率創造条件。

电力生产或用水力,或用火。水力发电的特点是:造价高、建設時間长、不能随便靠近用戶,但是发电成本低;火力发电的特点是恰恰相反:造价低、建設時間短、易于靠近用戶,但是消耗煤或其他燃料多,发电成本較高。因此,必須結合具体情况、具体分析,来确定水力和火力发电的比例,使水电与火电起到相輔相成的作用。

根据統計資料,現在全世界的电力工业中,采用汽輪发电机的火力发电站,無論在机组的总安装容量上,以及在发电量上,都占有首要地位。贏得時間是我們和資本主义經济竞赛中特別重要的問題,最近苏联提出了在現在阶段,火电站比較好些,因为火电站可以更快地投入生产。苏联 1959—1965 年的七年計劃中已明确規定了优先建設要以天然煤气、重油和廉價煤为燃料的火力发电站。

我国在发展电力工业中一直是对水力发电和火力发电都很重視。我国水力資源极为丰富,目前还没有充分加以利用。火力发电造价低、建設時間短,因此特別适合于我国国民經济高速度发展的需要。在我国国民經济的发展过程中,水电和火电都应大大发展,以满足工农业对电力的需要。因此,汽輪机制造的发展,对电力工业的发展,具有重大的意义。

汽輪机也广泛地应用于交通运输业,作为大型及高速船舶的动力机械。汽輪机并可用于傳动其他设备,如鼓风机、送风机以及各种泵等,因此也是矿冶、石油、化工等工业中不可缺少的设备。

汽輪机的工作介質是蒸汽,一般都由蒸汽鍋炉供給。在原子能发电站以及原子能船舶动力装置中,則由原子能鍋炉产生蒸汽,供給汽輪机。因此,汽輪机也是和平利用原子能的重要设备之一。

汽輪机在国民經济的各个部門中的广泛应用,是由于汽輪机具有許多优点。汽輪机是一种具有連續工作过程的迴轉机械,將工作介質的位能轉換为动能,并再將动能轉換为机械功。由于工作过程是連續的,因此,当汽輪机在一定的稳定工况(工作状态)下工作,亦即是发出一定的功率时,汽輪机内任何一点的蒸汽的压力、温度和汽流速度,就不随着時間而变化。而在往复式机械中,即使在稳定的工况下,任何一点的工作介質的压力、温度和流动速度,都随着時間而变化。因此,往复式机械的工作介質的平均流动速度就不可能很高,否則流动損失就較大;而在汽輪机中却可以采用較高的汽流速度,仍不致引起很大的汽流損失。汽輪机的功率是和蒸汽流量以及蒸汽的可以利用的能量成比例。工作介質的流动速度較高,通过机组的流量就可以較多,因此就有可能制造出現代发电站以及交通运输业所需要的大功率汽輪机。同样功率的汽輪机,与蒸汽机比較,尺寸也就較小,重量也就較輕。柴油机的效率虽較高,但功率較小,現在最大的柴油机是船用柴油机,仅为 10,000 馬力左右。世界上最大的汽輪机的功率,現在已达 45 万瓩,并正在考慮設計更大的汽輪机。

其次，根据蒸汽动力装置的循环分析，提高蒸汽的初参数(压力及温度)和降低排汽压力，可以提高循环效率，改进蒸汽动力装置的经济性。汽轮机的工作原理是将能量经过两次转换。蒸汽的膨胀过程，主要是在静止的喷嘴中进行，有时也在叶片中进行。和蒸汽机不同，汽轮机中蒸汽膨胀的过程，不受到工作机件的运动的限制，可以充分膨胀。同时，由于结构上的特点，使汽轮机有可能采用蒸汽的多级膨胀，构成多级汽轮机，来充分地利用蒸汽的能量。因此，汽轮机就特别适合于采用较高的蒸汽参数和较低的排汽压力，与蒸汽机相比较，可获得较高的经济性。

再次，由于汽轮机是一种旋转机械，没有往复运动及因此而引起的周期性的惯性扰动，因此汽轮机的转速可以较高，而运行时振动较小，且安全可靠。近代的汽轮机可以在电站长期运行，一般每1—2年大修一次，每年小修二至三次。

汽轮机的转速较高，又可以使工作机件的运动速度较高，使工作机件的运动速度与汽流速度成一定的比例，以获得较高的汽轮机效率。同时，转速较高又可使汽轮机的尺寸较小、重量较轻。

汽轮机的工作原理，虽然由来已久，但是由于当时工业上既没有迫切需要，技术上又有许多问题还没有得到解决，因此一直没有得到重视。汽轮机制造的发展，只是在十九世纪末才开始。此后，随着工业生产的发展，汽轮机制造工业也有了迅速的发展。

我国在解放前，只建立了很少的一些火力发电站，但是所有的汽轮机都是从国外进口，不能自制。解放以后，在党的正确领导下，建立了自己的汽轮机制造工业。现在已能生产我国电力工业所需的各种汽轮机。

我国汽轮机制造工业，在解放后的十年中，已从无到有，从仿造苏联及其他社会主义国家的先进产品到自行设计制造适合我国实际的汽轮机，这种发展速度是非常快的。

苏联在十月革命时，汽轮机制造工业是很薄弱的。但在十月革命以后，苏联汽轮机工业得到迅速的发展。1937年苏联设计制造了中压100,000瓩凝汽式汽轮机，转速为3000转/分，为当时高转速单轴汽轮机的最大机组。第二次世界大战后，苏联开始生产25,000至100,000瓩的高压汽轮机系列。1953年苏联又制造成功参数为170绝对大气压，550°C，功率为150,000瓩的单轴凝汽式汽轮机，1958年又制造成功参数为130绝对大气压，565°C，功率为200,000瓩的凝汽式汽轮机。苏联现在已生产出参数为240绝对大气压，580°C，功率为300,000瓩的汽轮机。苏联的汽轮机制造工业现在已达到高度水平。我国汽轮机制造工业，在党的正确领导下，鼓足干劲、力争上游，并努力学习苏联及社会主义国家的先进经验，一定能很快的达到世界水平。

§ 1-2 汽轮机的工作原理

蒸汽的能量在汽轮机中经过两次转换。蒸汽流经装在汽缸上的喷嘴4(图1-1)，将位能变成动能，即蒸汽在喷嘴中膨胀，压力降低，汽流速度增大。从喷嘴出来的高速蒸汽，冲到装在叶轮2上的工作叶片3，使叶轮转动，因而将蒸汽的动能转换成机械功。因此，每一个汽轮机必须具备两套主要部件：

- (1) 汽缸，以及固定在汽缸上的喷嘴；
- (2) 转子，包括轴、叶轮以及装在叶轮上的工作叶片。

如果蒸汽的位能转换成动能的过程，只在喷嘴中进行，则此种汽轮机称为冲动式汽轮机。

机，如果蒸汽的动能只有一部分（约为一半）是在喷管中转换成动能，另一部分是在工作叶片汽道中转换成动能（即在工作叶片汽道中蒸汽继续膨胀），则此种汽轮机称为反动式汽轮机。

冲动原理

汽流以速度 C_1 流向圆弧弯曲面（图1-2）。此弯曲面即相当于汽轮机的工作叶片，它能沿着平行于汽流的方向移动。汽流进入弯曲面内弧所构成的汽道后，沿着内弧逐步改变流动方向，最后流出汽道时的速度为 C_2 ，方向恰与 C_1 相反。工作介质的每一微团沿弯曲面的内弧流动时，都受到向心力的作用，因此汽流流过弯曲面内弧（即相当于工作叶片汽道）时，即引起一个方向相反、大小相同的离心力，作用在弯曲面（工作叶片）上。假如汽流微团的离心力用向量 $P_1, P_2, \dots, P_6$ 表示。在点1处的离心力 P_1 可以分成轴向分力 P_{a1} 及运动方向的分力 P_{u1} 。在点6处的离心力 P_6 可以分成 P_{a6} 及 P_{u6} 。轴向分力 P_{a1} 与 P_{a6} 恰好抵销。同样，点2与点5的轴向分力也互相抵销。因此，汽流微团的离心力在轴向的分力之和 $P_{a1} + P_{a2} + \dots + P_{a6}$ 等于零，而在弯曲面运动方向的分力之和为 $P = P_{u1} + P_{u2} + \dots + P_{u6}$ 。在这个力的作用下，弯曲面（工作叶片）向右运动，并作出机械功。这就是汽轮机的冲动原理。

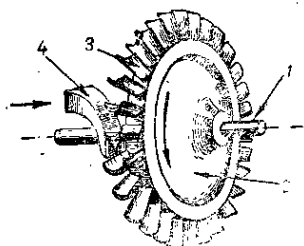


图1-1 冲动式汽轮机简图：

1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷管。

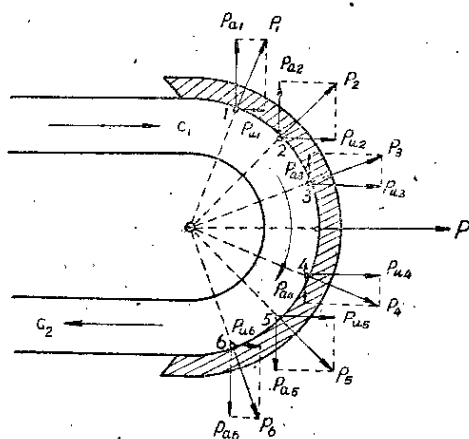


图1-2 蒸汽微团作用在叶片上的离心力。

在实际的汽轮机中，从喷管流出来的汽流，并不是与运动方向平行，而是与运动方向有一夹角。工作叶片形状也不完全是圆弧形，但是冲动原理同样也适用于实际的冲动式汽轮机。

在冲动式汽轮机的叶片汽道中，蒸汽不再膨胀，因此工作叶片汽道截面既不收缩，也不扩散。

反动原理

当蒸汽从汽道中流出时的速度, 大于进入汽道的速度, 每一蒸汽微团上产生一个沿着蒸汽流动方向的力, 而蒸汽也作用在汽道壁上(即工作叶片上)一个大小相同、方向相反的力。这个力称为汽流的反动力。现以一个容器为例, 在一个可以沿着蒸汽流动方向的平面上移动的容器内(图 1-3a), 通入压力为 10 公斤/厘米² 的蒸汽。容器的四壁都受到同样的压力, 容器静止不动。如果在容器的左壁上开一孔(图 1-3b), 蒸汽经孔口膨胀加速, 流至周围大气中。此时, 蒸汽的每一微团就产生一个向左的力, 而容器上也受到一个大小相同、方向相反的力, 容器即向右移动。

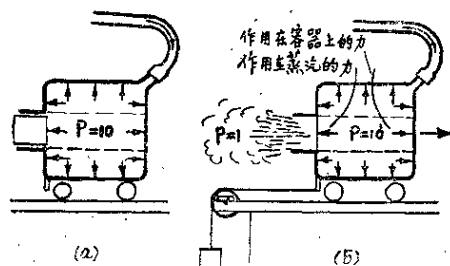


图 1-3 汽流的反动力。

在反动式汽轮机中(图 1-4), 蒸汽在喷嘴 1 中膨胀后达到较高的速度。蒸汽离开喷嘴后进入工作叶片汽道, 即沿着汽道壁的内弧改变流动方向, 并从压力 P_1 继续膨胀至压力 P_2 。由于汽流沿着汽道壁的内弧流动, 因此工作叶片上就受到由于冲动原理而引起的力 P_{axm} 。由于汽流在汽道内继续膨胀, 因而工作叶片上又受到由于反动原理而引起的力 P_{pax} 。这两个力的合力为 P 。此外, 工作叶片前后的压力差也引起一个轴向力 P_a 。 P 与 P_a 的合力 P_{pc} , 即为作用在工作叶片上的力。沿工作叶片运动方向的分力使工作叶片向左移动, 并作出机

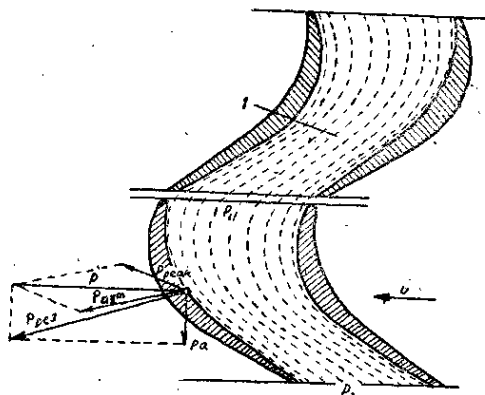


图 1-4 反动式汽轮机的级。

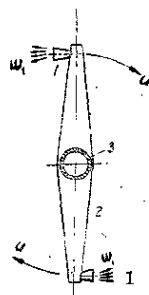


图 1-5 喷嘴示意图。

械功。因此,在反动式汽轮机中,既利用了冲动原理,又利用了反动原理。

图 1-5 所示的喷水器,采用了纯粹的反动原理。水流经过空心轴 3 及空心管 2,再经喷管 1 流出。空心管受到水流的反动力,沿 II 方向绕轴转动。

§ 1-3 汽轮机的分类

汽轮机可按结构特点、热力过程特点、以及其他特点,进行分类。以下结合汽轮机的分类,对各种汽轮机作简单的介绍。

(1) 按结构分类

1. 单级汽轮机:

单级冲动式汽轮机是最简单的汽轮机(图 1-6),现在只偶而用以传动辅助设备。汽缸 5 上装有喷管 4。工作叶片 3 装在叶轮 2 的轮缘上。叶轮与轴的装配是用紧配合(叶轮加热后套在轴上,即所谓红套),并用键固定。图 1-6a 为 A-B 断面的展开图,图中给出了喷管和工作叶片汽道的截面,以及工作叶片的运动方向。蒸汽在喷管内由初压 P_0 膨胀到压力 P_1 (图 1-6a),汽流速度也由初速 C_0 增加到速度 C_1 ,蒸汽的位能在喷管中已转换成了动能。此后,蒸汽即进入工作叶片汽道,在叶片汽道内改变流动方向,并按冲动原理,产生了作用在工

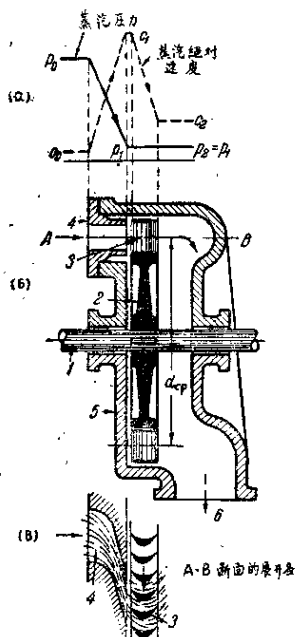


图 1-6 单级冲动式汽轮机的示意图:

1—轴; 2—叶轮; 3—工作叶片; 4—喷管;
5—汽缸; 6—排汽管。

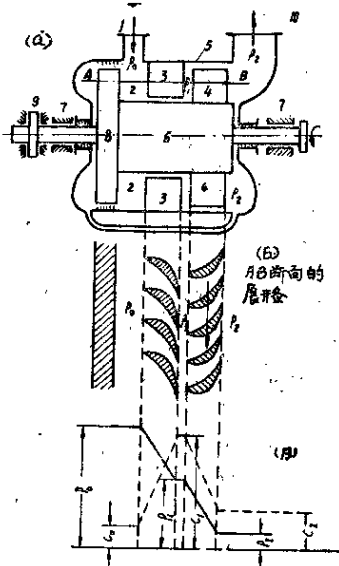


图 1-7 单级反动式汽轮机的示意图:

1—进汽管; 2—蒸汽室; 3—静叶片; 4—动叶片;
5—汽缸; 6—转子; 7—径向轴承; 8—平衡活塞;
9—止推轴承; 10—排汽管。

作叶片上的力,使叶轮及轴转动,作出机械功。蒸汽离开工作叶片时,由于已将一部分能量转换成机械功,因此,蒸汽的绝对速度降低到速度 C_2 。蒸汽离开工作叶片时带走的动能,称为余速损失。这部分能量不能在汽轮机内转换为机械功。

冲动式汽轮机的特点是:蒸汽只在喷嘴中膨胀,而在工作叶片汽道中不再膨胀。因此,工作叶片前后的蒸汽压力相等,即 $P_1 = P_2$ (图 1-6a)。

单级反动式汽轮机从未在生产中采用过。图 1-7a 为一个单级反动式汽轮机的示意图。以下说明它的工作原理,同样也适用于多级反动式汽轮机的每一个级。反动式汽轮机的特点是:蒸汽的位能转换成动能的过程,即膨胀的过程,不仅在喷嘴 3 (在反动式汽轮机中称为静叶片) 中进行,而且又在工作叶片 4 (动叶片) 中进行。动叶片既受到汽流的冲动力,又受到反动力。由于蒸汽在动叶片中也膨胀,因此 $P_1 > P_2$ (图 1-7b)。蒸汽在汽轮机中作功后离开叶片时,绝对速度 C_2 已较低。

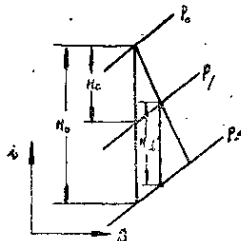


图 1-8 $i-s$ 图上的反动级内膨胀过程。

蒸汽在反动级内的膨胀过程,可在 $i-s$ 图上表示(图 1-8),图中:

H_0 ——级的理想焓降,大卡/公斤,

H_c ——喷嘴(静叶片)的理想焓降,大卡/公斤,

H_a ——工作叶片的理想焓降,大卡/公斤。

工作叶片的理想焓降 H_a 与喷嘴及工作叶片的理想焓降之和 $H_0 + H_a$ 的比值,称为级的反动度 ρ ,即:

$$\rho = \frac{H_a}{H_0 + H_a} \approx \frac{H_a}{H_0}$$

对于冲动级: $H_a = 0$, 因此冲动级的反动度 $\rho = 0$ 。如果级的反动度 $\rho = 0.05 \sim 0.15$ 左右,则这种级仍称为冲动级;或称为带有少量反动度的冲动级。通常所称的反动级,是指反动度 $\rho \approx 0.5$ 的级,此时 $H_0 \approx H_a$ 。

图 1-7a 中并绘有反动式汽轮机结构上特有的平衡活塞 8。由于平衡活塞的右端的压力为 P_0 ,左端的压力为较低的压力 P_A (大约与 P_2 相等),因此平衡活塞受到向左的轴向力。此轴向力可以抵消或平衡掉作用在叶片上的向右的推力的一部分,使止推轴承 9 上所受的推力减少。

2. 双列速度级汽轮机:

图 1-9b 为双列速度级(又称寇蒂斯级)汽轮机的示意图。和单级冲动式一样,压力为 P_0 、速度为 C_0 的蒸汽,进入喷嘴 4,并在喷嘴中膨胀到压力 P_1 ,蒸汽流速增加到 C_1 。此后,蒸汽进入第一列工作叶片汽道,改变了流动方向,作出了机械功。蒸汽离开第一列叶片时,绝对速度已降低到 C_2 。

在单级冲动式汽轮机中,喷嘴出口处蒸汽的动能 $\frac{AC_1^2}{2g}$ 不能全部转换成机械功。蒸汽离开叶片时的绝对速度为 C_2 ,相应的动能被蒸汽带走,成为余速损失,即

$$\Delta h_{ec} = \frac{AC_2^2}{2g}$$

当级的前后的压力差较大时,蒸汽流出喷嘴的速度很高,设计时往往发现工作叶片出口处的蒸汽绝对速度 C_2 较大,因而余速损失也较大。为了充分利用蒸汽的能量,在第一列工作叶

片后安装了导向叶片 7，使汽流在导向叶片内改变流动方向，再进入第二列工作叶片 6。导向叶片安装在汽缸上，第二列工作叶片安装在叶輪上。蒸汽在导向叶片中不再膨胀，但是由于蒸汽流动的损失，蒸汽速度由 C_2 降至 C'_1 。在第二列工作叶片中，蒸汽也不再膨胀，只在工作叶片中改变流动方向，将动能 $\frac{AC_1'^2}{2g}$ 的一部分转换成机械功。蒸汽离开第二列工作叶片时，绝对速度降低到 C'_2 。由于 $C'_2 < C_2$ ，因此双列速度级的余速损失就相应减小。

双列速度级的特点是可以利用较大的焓降，即双列速度级汽轮机的焓降较单级冲动式汽轮机的焓降为大。同时，双列速度级的结构简单紧凑，制造成本低，运行维护较方便，但是效率不高。因此，双列速度级汽轮机只用以带动功率不大的泵、通风机以及其他辅助设备。

在图 1-6a 及 1-9a 所示的汽轮机中，喷管不是连续地分布在平均直径为 d_{cp} 的整个圆周上，而是只占整个圆周的一部分圆弧。这是因为当汽轮机的流量和进入汽轮机的蒸汽比容都较小时，汽轮机的容积流量就较小。为了保证喷管效率较高，喷管必须有一定的高度（一般应大于 12 毫米）。在这两个图中所示的汽轮机中，一个或数个喷管的汽道截面积，就已经足够通过汽轮机所需的流量。如汽轮机的流量较大，则所需的喷管数也就较多。在平均直径为 d_{cp} 的圆周上，喷管所占的弧长与整个圆周长度之比，称为部分进汽率 s ，即

$$s = \frac{\text{喷管所占弧长}}{\pi d_{cp}}$$

冲动式汽轮机的部分进汽率 s 可以等于 1 或小于 1。反动式汽轮机中，叶片前后有压力差，因此不允许采用部分进汽，必须全进汽 ($s=1$)。

3. 多级汽轮机:

多级汽轮机是由若干个单级组成的。每一级仅利用整个汽轮机中的蒸汽焓降的一部分。因此，多级汽轮机可以利用较大的焓降，使有可能提高进入汽轮机的蒸汽的初压与初温，提高汽轮机装置的循环热效率。现在发电站中应用的汽轮机都是多级的。级的数目和汽轮机的种类（冲动式或反动式）、蒸汽的初参数和排汽压力、汽轮机的转速、级的几何尺寸（平均直径）等有关。一般来说，可从 3—5 级至 30—40 级。为了降低小功率汽轮机的价格，级数应尽量减小。对于高参数大功率的汽轮机，在保证有一定经济性的条件下，为了使汽轮机的效率较高，级数就较多，有时还需要将汽轮机的各级，分配在几个汽缸内，构成多缸式汽轮机。

图 1-106 为多级冲动式汽轮机的纵剖面图。整个汽轮机的焓降分为三部分，分别由三个冲动级加以利用。每一个冲动级的压力降，只占整个汽轮机的压力降的一部分。

蒸汽经过蒸汽室 1，进入装在汽缸上的第一级的喷管 2。蒸汽在喷管中膨胀，压力降低

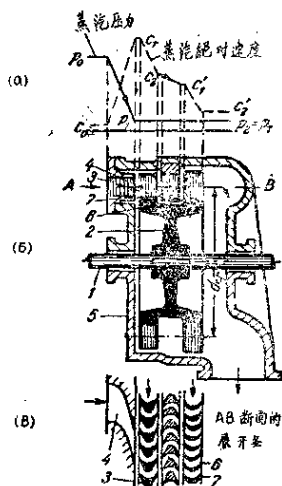


图 1-9 具有双列速度级的冲动式汽轮机示意图:

- 1—缸; 2—叶輪; 3—第一列工作叶片;
4—喷管; 5—汽缸; 6—第二列工作叶片; 7—导向叶片。

到 P_1 ，流速增加到 C_1 (图 1-10a)。在第一级工作叶片中，蒸汽压力不变。蒸汽流过叶片作出机械功后，离开叶片时的蒸汽的绝对速度降低到 C_2 。第二级的喷嘴 4 装在隔板 7 上。隔板分成上下两半，分别装入汽缸上半及下半。蒸汽自第一级叶片汽道中流出后，即进入第二级喷嘴，并在第二级喷嘴中继续膨胀，压力降低，流速增加。在第二级工作叶片中蒸汽压力也不变。蒸汽流过第二级工作叶片作出机械功后，离开第二级叶片时的绝对速度又降低，此后，蒸汽再进入第三级喷嘴，在第三级喷嘴中继续膨胀到汽轮机的排汽压力。蒸汽流过第三级叶片时，又作出机械功。汽轮机的功率等于各级的功率的总和，并通过主轴传至发电机。

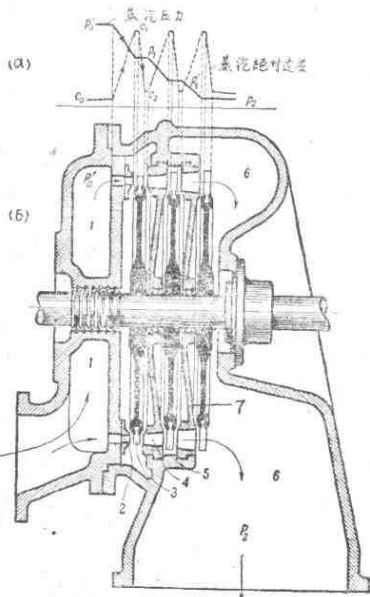


图 1-10 具有三个压力级的多级冲动式汽轮机：

1—新鲜蒸汽室；2, 4—喷嘴；3, 5—工作叶片；6—排汽管；7—隔板。

由于蒸汽压力逐级降低，因此蒸汽比容逐级增大。各级的喷嘴和工作叶片的高度，也就必须逐级增加。

隔板前后的蒸汽压力不同，隔板与轴之间的间隙中就可能漏汽，因此必须安装汽封，使能减小间隙，减少漏汽。主轴穿过前后汽缸处，也必须安装轴封，以减少漏汽。

多级汽轮机中，各级叶片出口处的绝对速度的动能，可以在下一级部分地或全部加以利用。但最后一级的余速动能，全部成为损失。

图 1-11b 为多级反动式汽轮机。在反动式汽轮机的静叶片及动叶片中，蒸汽都进行膨胀，因此压力都在降低 (图 1-11a)。在静叶片中，蒸汽经过膨胀，速度增大。在动叶片中，由于蒸汽作了机械功，因此动叶片出口处的汽流绝对速度比静叶片出口处的汽流绝对速度低。

反动式汽轮机叶片前后有压力差，因此就产生轴向推力。为了减少轴向推力。多级反动式汽轮机不采用叶轮结构，而是将动叶片直接装在鼓筒转子上。但是叶片上仍受到轴向力，因此必须采用平衡活塞8。静叶片直接装在汽缸上，不采用隔板。

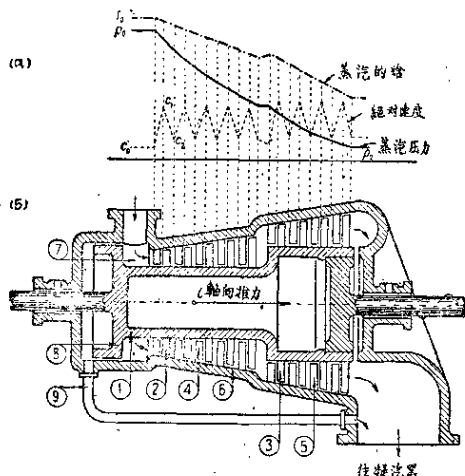


图1-11 多级反动式汽轮机：

1—鼓筒转子；2,3—工作叶片；4,5—静叶片；6—汽缸；
7—新鲜蒸汽室；8—平衡活塞；9—联接管。

4. 辐流式汽轮机(或称径向式汽轮机)：

以上介绍的几种汽轮机都属于轴流式汽轮机，因为汽轮机内蒸汽的流动方向是沿着轴的方向。在辐流式汽轮机内，蒸汽是在垂直于轴心线的平面上流动(图1-12)。在叶轮1及2上，通过膨胀环4(图1-13)装有不同直径的叶片环3。辐流式汽轮机采用的反动式工作叶

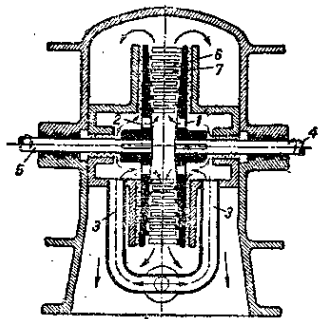


图1-12 辐流式汽轮机示意图：

1,2—叶轮；3—新鲜蒸汽室；
4,5—汽轮机轴；6,7—工作叶片。

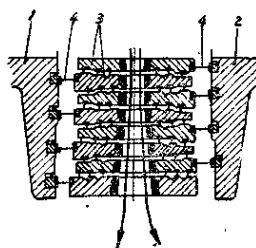


图1-13 辐流式汽轮机叶片环安装方法：

1,2—叶轮；3—叶片环；4—膨胀环。

片,就裝在叶片环上。蒸汽从新鮮蒸汽管3(图1-12)进入汽輪机,经过叶輪1及2上的孔口,进入叶輪間的汽室,然后经过各级叶片,逐级膨胀,并将动能轉換成机械功,推动叶輪轉动。辐流式汽輪机的两个叶輪的轉动方向相反,各排叶片都是轉动的动叶片。两个叶輪分別裝在4及5两根軸上(图1-12),这两根軸又分別带动两个发电机。

(2) 按热力过程分类

1. 凝汽式汽輪机:

在凝汽式汽輪机中,蒸汽在汽輪机中作功后,經排汽管排至凝汽器。在凝汽器內,蒸汽將汽化潜热傳給在凝汽器銅管内流动的冷却水后,凝結成水。发电站用的凝汽式汽輪机的排汽压力,一般为0.035—0.07絕对大气压。小型汽輪机可以不采用回热循环,即汽輪机的蒸汽流量全部流过汽輪机的各级,最后进入凝汽器。大型汽輪机均采用回热循环,以提高循环热效率,因此进入凝汽器的蒸汽流量較进入汽輪机的流量小。

2. 背压式汽輪机:

在背压式汽輪机中,排汽压力大于1个絕对大气压。从汽輪机排汽管排出的蒸汽,通向热用戶,以供采暖或工业上加热之用。背压式汽輪机的排汽,也可以通到低压汽輪机,再在低压汽輪机內繼續膨胀。这种背压式汽輪机称为前置式汽輪机。它是用以改建旧的低蒸汽参数的发电站,使发电站可以充分利用高蒸汽参数的优点,提高发电站效率。同时,原有的汽輪机设备仍可繼續利用,因为可以降低发电站的扩建費用。

3. 具有調节抽汽的汽輪机:

凝汽式汽輪机及背压式汽輪机,均可設計成具有調节抽汽的汽輪机。进入汽輪机的蒸汽,在几个級內膨胀做功后,将其中的一部分抽出以供采暖或工业上加热之用。在另一些設計中,可以有二种不同压力的抽汽,分別供采暖及工业上加热之用。由于采暖用抽汽或工业用抽汽的温度及压力需要保持一定数值,因此必須能自动調节抽汽的压力。常用的采暖抽汽压力为1.2絕对大气压,工业抽汽压力为6(5)、10及13絕对大气压。

(3) 按用途分类

汽輪机可按用途分为固定式及运输用汽輪机。固定式及运输用的汽輪机,当用于带动交流发电机时,轉速保持不变,大型汽輪机的轉速一般为3000轉/分。当用于带动泵、鼓风机,以及船舶的螺旋桨时,汽輪机轉速將随着負荷的变化而变动。

表 1-1

参 数	参 数 范 围		标 准 参 数	
	压力絕对大气压	温 度 °C	压力絕对大气压	温 度 °C
超 臨 界	>225.65	—	30J	650
			240	58J
超 高 压	—	—	170	550
高 压	50—150	450—565	130	535
			90	535(50J)
中 压	20—50	350—450	35	435
低 压	<20	<350	13	310

(4) 按蒸汽参数分类

汽轮机可按参数分为低压、中压、高压、超高压及超临界汽轮机，详见表 1-1。

为了合理组织汽轮机的生产，充分发挥制造厂的生产能力，苏联生产的汽轮机都按苏联标准 ГОСТ3618-47 及 3678-47，对蒸汽参数、功率及型式加以统一。最近，由于汽轮机制造的迅速发展，原有的苏联标准已不能适应目前的需要，苏联现在正在修订新的汽轮机标准。

§ 1-4 汽轮机装置的循环及其效率

汽轮机是火力发电站中主要设备之一。图 1-14 为蒸汽动力装置的简图。在理想的朗肯循环中，每公斤蒸汽(水)经过各个设备时的状态变化，可用 $T-S$ 图表示(图 1-15)。

给水泵 1 (图 1-14) 将给水从压力 P_k 升压到 P_0 ，并送入锅炉 2 中。对于每公斤水，给水泵所消耗的功为 l_B 。由于水的比容非常小，同时当压力增高后，水的比容变化极小，因此在绝热压缩过程中，水的压缩功为 $l_B = V(P_0 - P_k)$ ，且数值很小。水的焓值变化以及温度变化也就很小。图 1-15 中用 aa' 表示水的温度的提高。

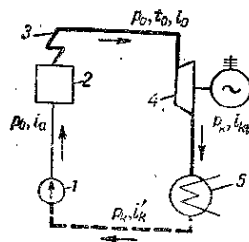


图 1-14 蒸汽动力装置简图：
1—给水泵；2—锅炉；3—过热器；
4—汽轮机；5—凝汽器。

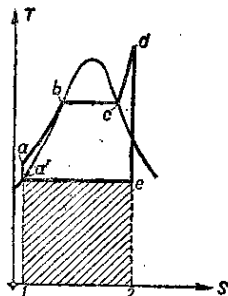


图 1-15 朗肯循环的 $T-S$ 图。

在锅炉中，水在等压下被加热至沸腾温度(图 1-15 的 ab 段)，再经过蒸发(bc 段)，然后进入过热器 3。蒸汽在过热器中被加热至温度 T_0 ，焓值升高至 i_0 大卡/公斤(cd 段)。每公斤蒸汽(水)在锅炉和过热器中吸收的热量等于：

$$q_1 = i_0 - i_a \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-1)$$

蒸汽进入汽轮机内膨胀做功，每公斤蒸汽在理想汽轮机内所作的功为 l_0 。如果蒸汽在汽轮机内膨胀时没有损失，汽轮机工作时也没有损失，并且汽轮机在膨胀作功时与外界不发生热交换，则蒸汽的膨胀为等熵膨胀(图 1-15 的 de 段)。

在汽轮机中工作过的蒸汽排向凝汽器 5 (图 1-14)。在凝汽器内，蒸汽在等压 ($P_k = \text{常数}$) 下，把汽化潜热放给冷却水后凝结为水(图 1-15 的 ea 段)。在这过程中，冷却水的冷却作用使排汽的焓 i_{kt} 降低到凝结水的焓 $i_{k'}$ 。每公斤蒸汽在凝汽器内放出的热量，亦即冷却水吸收的热量，为：

$$q_2 = i_{kt} - i_{k'} \text{ 大卡/公斤。} \quad (1-2)$$

实际的汽轮机装置的布置图见图 1-16。从锅炉出来的蒸汽，经过蒸汽母管 3、截流阀 4、汽水分离器 5、进汽管 2；通至起动机 1，然后进入汽轮机。汽水分离器下部接至自动疏水器 6。蒸汽在汽轮机中工作后通向凝汽器 8，凝结水积聚在热水井 11 中，再由凝结水泵 12 抽出，经过射汽抽气器的蒸汽冷却器 16，通至凝结水管道 24。凝汽器上装有玻璃水位计 22。冷却水由管 9 进入凝汽器的水室，流经凝汽器中的铜管后，再经出水管 10 排出。

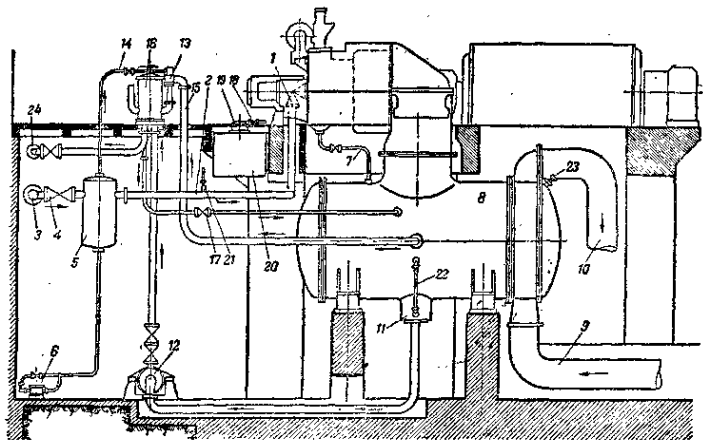


图 1-16 凝汽式汽轮机装置的布置图：

1—起动机；2—进汽管；3—蒸汽母管；4—截流阀；5—汽水分离器；6—疏水器；7—疏水管；8—凝汽器；9—冷却水进水管；10—冷却水出水管；11—热水井；12—凝结水泵；13—射汽抽气器；14—通往抽气器的蒸汽管；15—空气抽气管；16—抽气器的蒸汽冷却器；17—凝结水循环管；18—通往汽动油泵的蒸汽管；19—汽动油泵；20—油箱；21—通往大气的阀；22—凝汽器的玻璃水位计；23—放气阀门；24—凝结水管。

在所研究的循环中，每公斤蒸汽所做的功（以热量单位表示）等于加入的热量 q_1 与排出的热量 q_2 之差，即：

$$\begin{aligned} Al &= q_1 - q_2 \\ &= (i_0 - i_a) - (i_{ht} - i_{ht'}) \\ &= (i_0 - i_{ht}) - (i_a - i_{ht'}). \end{aligned} \quad (1-3)$$

汽轮机中每公斤蒸汽所作的功为：

$$Al_0 = i_0 - i_{ht}, \quad (1-4)$$

给水泵中每公斤水所消耗的功为：

$$Al_H = i_a - i_{ht'}. \quad (1-5)$$

因此，汽轮机装置中每公斤蒸汽所产生的功，等于每公斤蒸汽在汽轮机中所作的功，减去给水泵所消耗的功，即

$$Al = Al_0 - Al_H. \quad (1-6)$$

汽轮机装置的理想循环绝对效率（或称热效率）为：