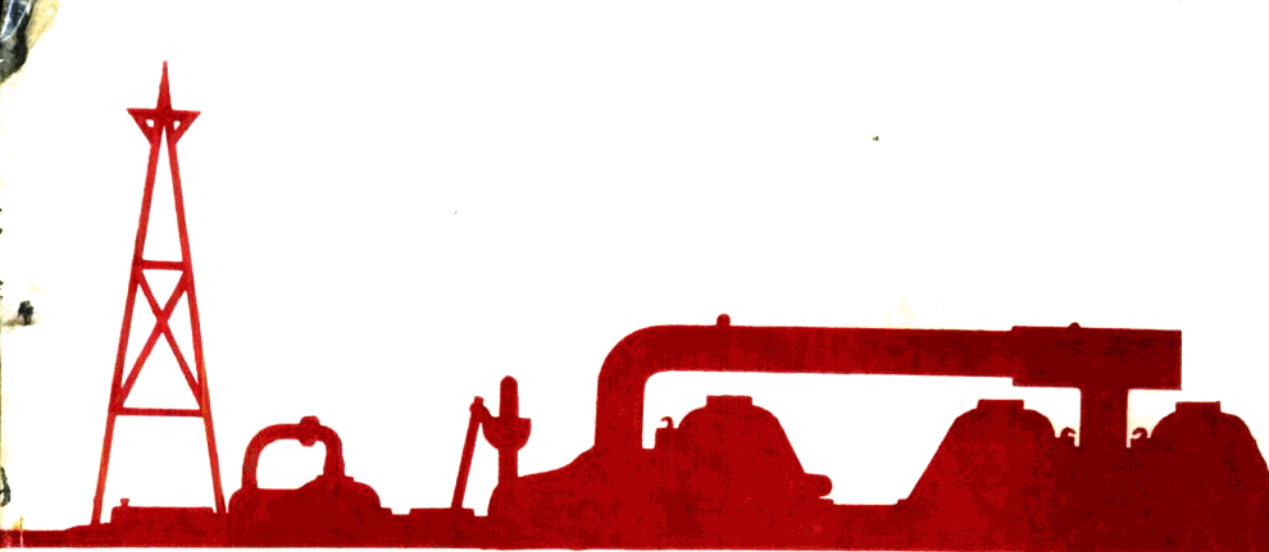




汽轮机结构

张 延 隆 编



职工教育出版社

前 言

国产20万千瓦汽轮发电机组现已成为我国电力生产的主力机组，而且在第七个五年计划期间还将大批地安装投运。因此，在电力行业中广泛普及这种机组的知识很有必要。

本书着重介绍了国产20万千瓦汽轮机的各系统及主要部件的结构、功能和工作原理。为了适应普及的目的，书中的文字叙述力求通俗易懂，简明扼要，并尽可能地采用制造厂提供的图样，以便于读者较容易地掌握这种机组的基本知识和主要构造。本书适合作为本科、专科、中专学校学生的实习教材，作为技工学校、职业高中学生的补充教材和热能动力类中、高级工人的培训教材，也可作为从事汽轮机运行、安装、检修和管理的各级技术工人的自学用书。

本书的初稿原拟用作学生的实习讲义，后在东北电业管理局教育处、沈阳电力专科学校领导和一些同志的建议下，对其内容作了适当的扩充。书稿由牛忠德高级讲师担任主审，并对部分内容提出了宝贵意见。在编辑过程中，承蒙从事航空发动机制造业多年的辽宁省职工教育教材编审委员会主编宋伯生同志过目，并提出了很有价值的建议。编者在此一并表示感谢。

由于作者的水平有限，加上时间仓促，书中的缺点和错误在所难免，敬候读者和同行们给予批评赐教。

编 者

1982/12

目 录

前 言

绪 论	(1)
-----	-------

第一章 汽轮机本体	(5)
-----------	-------

§ 1-1 汽缸	(5)
----------	-------

§ 1-2 隔板及隔板套	(18)
--------------	--------

§ 1-3 转子	(24)
----------	--------

§ 1-4 汽封	(29)
----------	--------

§ 1-5 轴承	(34)
----------	--------

§ 1-6 汽门	(39)
----------	--------

§ 1-7 汽轮机的装配	(43)
--------------	--------

第二章 汽轮机辅机	(48)
-----------	--------

§ 2-1 凝汽设备	(48)
------------	--------

§ 2-2 回热加热系统	(56)
--------------	--------

§ 2-3 除氧给水系统	(71)
--------------	--------

§ 2-4 旁路系统	(76)
------------	--------

§ 2-5 补充水系统	(77)
-------------	--------

§ 2-6 疏水系统	(79)
------------	--------

第三章 汽轮机的调节和安全保护	(82)
-----------------	--------

§ 3-1 汽轮机调节的基本概念	(82)
------------------	--------

§ 3-2 哈尔滨汽轮机厂20万千瓦汽轮机的调节系统	(83)
----------------------------	--------

§ 3-3 保安系统	(92)
------------	--------

§ 3-4 油系统	(104)
-----------	---------

§ 3-5 东方汽轮机厂20万千瓦汽轮机调节保安系统	(105)
----------------------------	---------

§ 3-6 上海汽轮机厂的调节系统原理	(114)
---------------------	---------

第四章 汽轮机组	(116)
----------	---------

§ 4-1 汽轮机的分类及用途	(116)
-----------------	---------

§ 4-2 汽轮机型号	(118)
-------------	---------

§ 4-3 汽机间的布置	(119)
--------------	---------

§ 4-4 汽轮机的启动	(119)
--------------	---------

绪 论

火力发电厂是由锅炉、汽轮机、发电机及其相应的辅助设备和系统组成的。

汽轮机是用蒸汽作工质的回转式原动机，它将蒸汽的热能转变为机械功。

汽轮机属于涡轮机械。涡轮机械的基本工作部件有静止的，也有回转的。它比往复式热力机械运行平稳，可以做成大功率的原动机。涡轮机的外来语为透平，故汽轮机又叫蒸气透平，或简称透平。

汽轮机在火力发电厂中的地位可用图0—1来示意。从锅炉来的具有一定热能的高温高压过热蒸汽，进入汽轮机后膨胀做功，使汽轮机转子获得机械能。然后汽轮机转子再带动与其连接的发电机转动，又把机械能转变为电能。作过功的乏汽排到凝汽器中，被冷却水冷却，凝结成水。凝结水泵把凝结水打到除氧器中进行除氧，中间经过低压加热器时，凝结水在其中被从汽轮机中的抽汽加热，除氧器中的凝结水作为锅炉给水，由给水泵打出，经过省煤器，被送到汽包中。汽包中的水经下降管、下联箱和水冷壁，吸热汽化后又回到汽包。在汽包中分离出的蒸汽在过热器中又被加热成过热蒸汽。工质就是这样周而复始地循环着。

汽轮机的最基本的工作单元称为级。级主要由喷嘴和动叶组成。喷嘴被固定在汽缸或隔板上，静止不动；动叶是转子的重要组成部分，工作时高速旋转。喷嘴的作用是使蒸汽降压膨胀升速，把蒸汽的热能转变为汽流的动能，高速汽流通过动叶时，使转子转动，从而把汽流的动能又转变为转子转动的机械能。图0—2是仅有一个喷嘴的冲动式汽轮机级的示意图。图0—3表示了一般高压级喷嘴与动叶之间的相对位置。

汽流对动叶的作用分冲动作用和反动作用两种。如果相邻两动叶间的通道，沿着汽流的流动过程其横截面是不变的（如图0—4所示），则蒸汽在其间并不膨胀，只是作圆周流动。这时汽流对动叶所产生的作用力，叫做冲动力，汽流对动叶的这种作用叫冲动作用。

如果动叶汽道的横截面积沿汽流的方向是逐渐缩小的（见图0—5），则汽流在其间

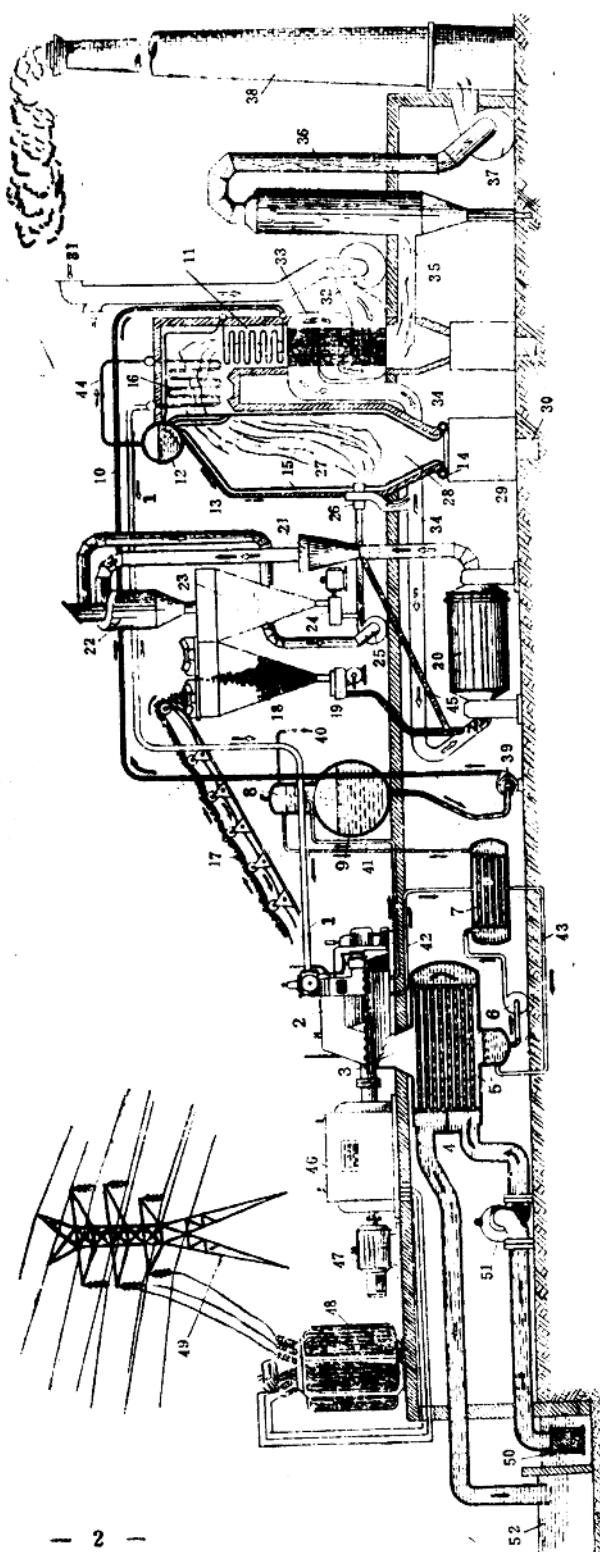


图0-1 凝汽式发电厂的生产过程示意图

工质流程: (1)主蒸汽管道→(2)汽轮机→(3)乏汽口→(4)凝汽器→(5)热井→(6)凝结水泵→(7)低压回热加热器→(8)除氧器→(9)给水箱→(39)给水泵→(10)给水管道→(11)省煤器→(12)汽包→(13)下降管→(14)下联箱→(15)水冷壁(上升管)→(16)汽包→(44)饱和蒸汽管→(16)过热器→(1)主蒸汽管道→(17)输煤皮带→(18)原煤仓→(19)圆筒磨煤机→(20)筒球磨煤机→(21)粗粉分离器→(22)旋风分离器→(23)煤粉仓→(24)给粉机→(25)排粉机→(26)喷燃器→(27)炉膛→(16)过热器→(11)省煤器→(33)空气预热器→(35)除尘器→(36)烟道→(37)引风机→(38)烟囱

空气系统: (31)送风机吸风口→(32)送风机→(33)空气预热器→(34)热风道→(26)喷燃器(其中有一股热风由热风道通至钢球磨煤机,又先后经过粗粉分离器、旋风分离器、排粉机去喷燃器)

烟气系统: (27)炉膛→(16)过热器→(11)省煤器→(33)空气预热器→(35)除尘器→(36)烟道→(37)引风机→(38)烟囱

其它设备: 39—给水泵; 40—化学补充水入口; 41—汽轮机第一级抽汽; 42—汽轮机第二级抽汽; 43—低加疏水管; 44—饱和蒸汽管; 45—回粉管; 46—发电机; 47—励磁机; 48—主变压器; 49—铁塔; 50—取水滤网; 51—循环水泵; 52—江湖或冷却水池

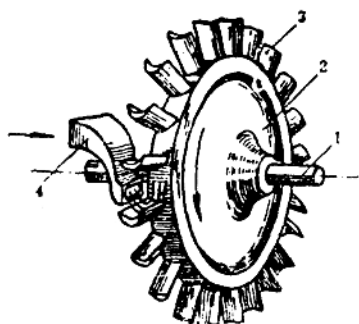


图 0-2 冲动式汽轮机简图
1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷嘴

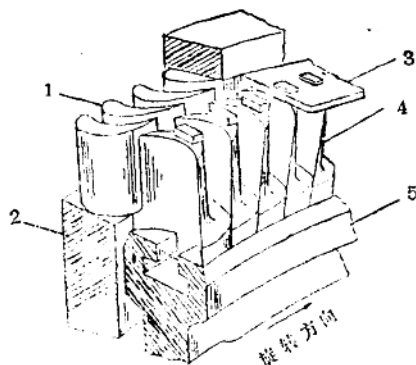


图0-3 导叶和动叶间相对位置
1—导叶；2—隔板；3—围带；4—动；5叶—叶轮

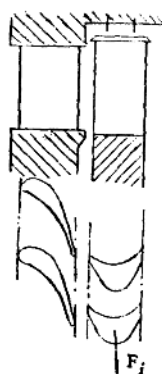


图0-4 冲动级动叶的受力图

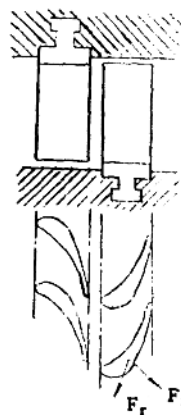


图0-5 反动级动叶的受力图

还要膨胀加速。根据作用力与反作用力的关系，被加速的汽流要给动叶一个反推作用力 F_r 。这种作用叫反动作用。在受反动作用的同时，动叶还要受到汽流的冲动作用力 F_i （如图0-5所示）。动叶是在 F_r 和 F_i 的合力作用下旋转作功的。

从热力学观点看，具有一定压力和温度的蒸汽具有一定的焓值。蒸汽的焓值代表了此蒸汽作功的能量。一般地说来，蒸汽的压力和温度越高，焓值也越高，蒸汽的作功能力也越大。

蒸汽在流经每一个级时都有一定的压降，也可以说都有一定的焓降 h_t 。动叶只受汽流冲动作用的级，动叶前后没有压降，蒸汽在流过动叶时可认为焓值不变。动叶既受汽流的冲动作用，又受其反动作用的级，动叶前后有压降，即有焓降 h_b 。蒸汽在流经动叶时所产生的焓降与整个级的焓降之比 h_b/h_t ，称为级的反动度。级的反动度反映了汽流在动叶中的膨胀程度。关于反动度的确切定义，可查阅讲述汽轮机原理的书籍。

反动度是汽轮机的一个重要概念。用它可以把汽轮机级进行严格的分类。反动度为0.5的级叫反动级，反动度为零的级叫纯冲动级。实际使用的并没有纯冲动级，而是带有一定反动度（反动度在0.02~0.5之间）的冲动级，简称冲动级。

由冲动级组成的汽轮机称为冲动式汽轮机，由反动级组成的汽轮机称为反动式汽轮机。就目前投入运行的国产机组来说，都是冲动式汽轮机。

国产20万千瓦汽轮机主要技术规范：

额定功率 200000千瓦（200MW）；

额定工作参数：

新蒸汽压力 12.75MPa；

（工程单位制为130绝对大气压）

新蒸汽温度 535℃；

再热蒸汽温度 535℃；

背压 0.005MPa。

（工程单位制为0.0525绝对大气压）

冷却水温度 20℃；

给水温度 240℃；

额定功率时蒸汽消耗量 610吨/小时。

从机头看，转子旋转方向为顺时针；

转速 3000转/分。

轴系临界转速	（转/分）	转子长度（毫米）	转子重量（公斤）
高压转子	2150	4377	7076
中压转子	1685	7711	21620
低压转子	2240	6735	21040

末级叶片长度 665毫米；

680毫米（东汽）；

末级叶片节径 2米；

总排汽面积 12.4米²；

凝汽器总冷却面积 11220米²；

凝汽器自重 261吨；

凝汽器冷却水量 25000吨/小时；

调节用压力油压 2MPa；

最大吊装重量：

安装时（低压缸下半） ~65吨；

检修时（低压缸上半） ~35吨。

该机组是一次中间再热、凝汽式、单轴、三缸、三排汽的冲动式汽轮机。

第一章 汽轮机本体

汽轮机本体包括静子（汽缸、隔板、汽封、轴承等）、转子、调节保安系统及油系统。但在生产实践中，又往往把调节保安系统及油系统分别单列。

§ 1—1 汽 缸

汽缸是汽轮机的外壳。在它里边安装着喷嘴室、隔板、隔板套和端部汽封体等部件；在它外边连接着进汽、排汽和抽汽等管道。这些部件都是静止的，故称为静子。汽缸和这些附件最基本的作用是组织汽流有规律地流动。

图1—1是哈尔滨汽轮机厂制造的5万千瓦汽轮机汽缸的外形。从锅炉来的新蒸汽，

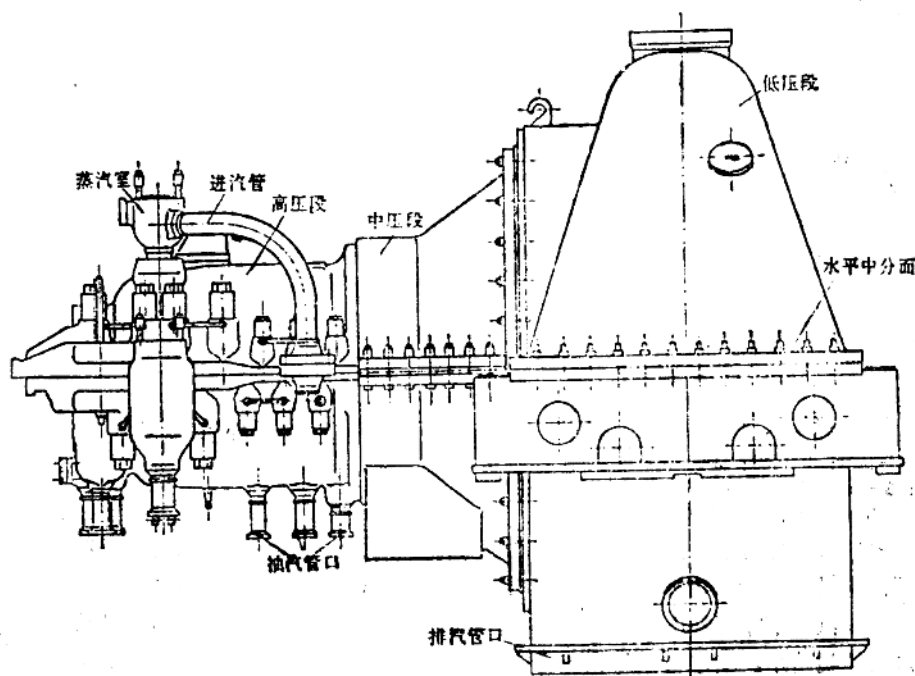


图1—1 高压单缸凝汽式汽轮机汽缸外形

经过进汽管、调节阀所在的蒸汽室，然后依次在高压段、中压段和低压段中做功，最后，进入与低压段（也称低压缸）排汽口相连接的凝汽器。低压缸内末级以后的通流部分又称排汽缸。

为了便于制造、安装、检修和运输起见，汽缸必须有水平中分面。大机组的汽缸还要用垂直中分面分成前后两段或三段。

大机组的排汽缸，因为体积太大，不便于铸造成形，通常都以钢板为主焊接而成。同时也根据上述汽缸采用中分面的理由，低压缸又作成双层的。图1—2是低压双层缸上半部的一个排汽通道的剖面图。图中的排汽缸内有四个导流环（图中称扩压器4），每一个都呈喇叭状，一个“套”一个。它们把从未级叶片排出的乏汽分三层导出排汽缸，防止各层汽流之间发生拥挤。这样，尽管排汽缸轴向方向上比较狭窄（此处狭窄是因为受转子长度的限制），但导流环也还是把汽流组织得比较均匀，使汽轮机排汽也很畅通。设置导流环的主要目的还是希望使排汽通道逐渐扩大，排汽的动能可部分地转变成压力势能。因此，导流环又称扩压器。如果本机组的凝汽器压力不变，则汽轮机末级后的背压就会更低些。这样可使整个汽轮机的焓降增大，从而提高了机组的作功能力和效率。

图1—2中的扩压管斜前壁7是防止排汽流进低压内缸的上部，同时也起到加强低压外缸刚度的作用。

图1—3 是某机组低压外缸的立体图。

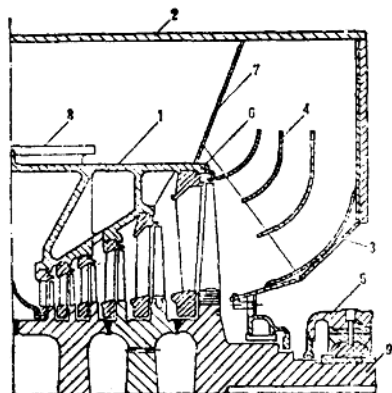


图1—2 双层缸结构排汽缸

1—内缸；2—外缸；3—排汽室；4—扩压器；5—汽轮机后轴承；6—隔板；7—扩压管斜前壁；8—进汽口；9—低压转子

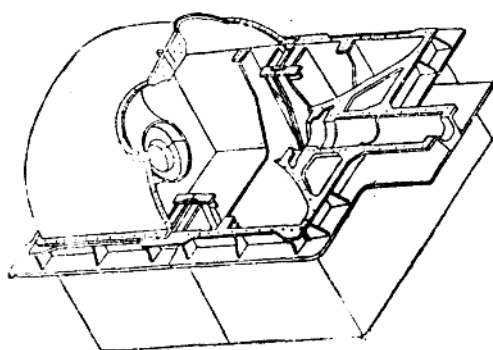


图1—3 低压外缸立体图

图1—4 是哈尔滨汽轮机厂5万、10万、20万千瓦汽轮机和东方汽轮机厂7.5万、20万千瓦汽轮机的焊接结构排气缸纵剖面图。

在排汽缸下半部的内侧还附设有喷水管，这叫喷水装置。管内喷出的是从凝结水泵出口来的凝结水。喷水方向与汽流方向一致。

在机组启停过程中，尤其在额定转速下空负荷运行时，汽轮机进汽量少，在中、低压段，汽流没有充满整个通流部分。这样，动叶与滞留在通流部分内的蒸汽之间会产生摩擦现象。此外，动叶对这些蒸汽还有鼓风作用。摩擦鼓风产生的热量又不能及时地被蒸汽带走，从而使排汽温度升高。排汽缸温度升高，会发生热变形，安装在排汽缸上的轴承座的垂直位置会发生变化，这很容易导致机组振动。设置喷水装置的作用是当排汽缸温度高于80℃时，进行喷水减温。

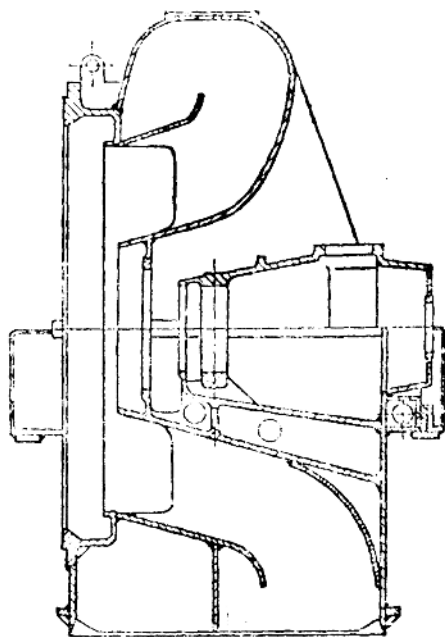


图1—4 焊接结构排汽缸

图1—5，该图1—6和图1—7分别是哈尔滨汽轮机厂20万千瓦汽轮机的高压缸、中压缸和低压缸的剖面图。书后的附图1是该厂生产的20万千瓦汽轮机的纵剖面图，东方汽轮机厂也生产20万千瓦汽轮机，除了调节系统外，两厂生产的该机组基本上一样。

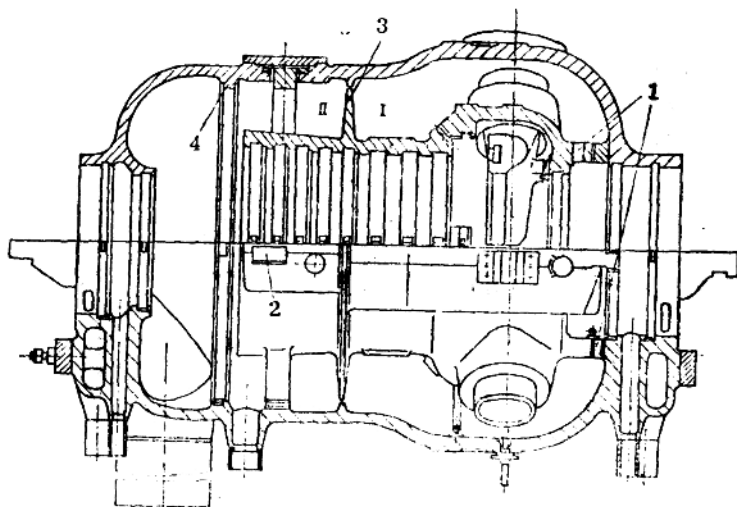


图1—5 高压缸

1—上、下滑键；2—左、右滑键；3—凸缘；4—外缸凸缘

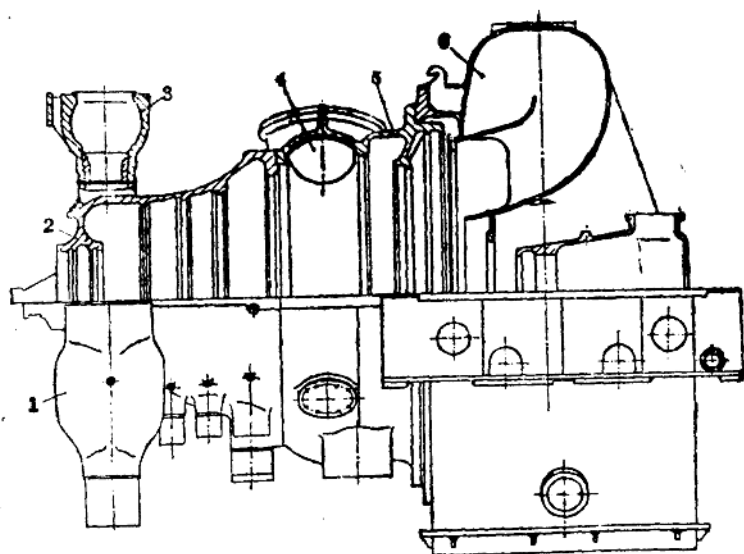


图1—6 中压汽缸

1—侧部蒸汽室；2—中压缸前部；3—上部蒸汽室；4—蒸汽分流口；5—中压缸中部；6—中压缸后部

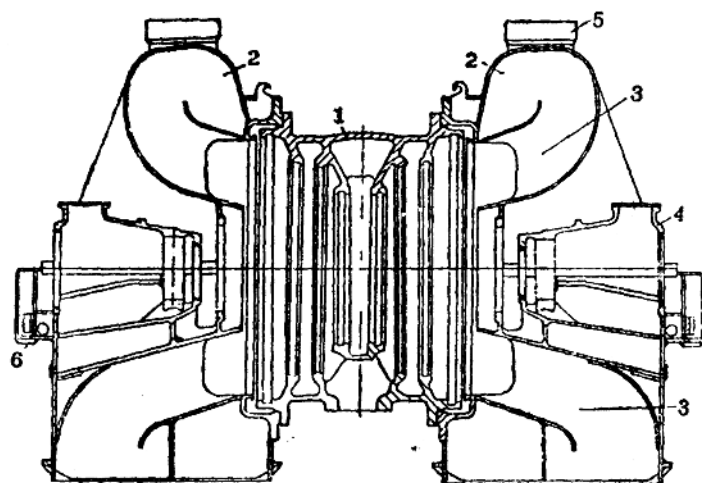


图1—7 低压汽缸

1—低压缸中部；2—排汽缸；3—不对称扩压管；4—轴承座；5—大气安全门；6—定型后的死点位置

参见书后附图 I 可知，国产20万千瓦汽轮机的高压缸与中压缸是对头布置，低压缸

内采用了分流（从中间进汽，从两端排出）。这样布置，主要目的是为了平衡各单跨转子间的轴向推力。因为各级叶轮前后都有压差，每根转子上各级叶轮所承受的轴向推力加起来是高达上百万牛顿的轴向推力，多缸汽轮机采用对置和分流是平衡本机组轴系内轴向推力的最有力的措施。

高压缸是由耐热合金钢铸造的，汽缸壁往往很厚。机组在启停时，汽缸内外壁面因热阻而出现温差。在启动时，汽缸内壁温度高，但它受温度较低的外层壁面的约束，膨胀受阻，因此受压应力；外壁面受拉应力。在停机时，汽缸壁内外层受力则相反。如果机组启动（或停机）的时间是一定的，汽缸壁越厚，则沿壁厚的温差越大，热应力也越大。因此，高压汽缸壁厚了，容易变形，或产生裂纹。再者，高压缸内压力越高，不仅壁厚增加，而且法兰厚度也随之增加，上下半法兰总厚度可达400mm以上。而在启动时，法兰受热比连接法兰的螺栓快，这样，螺栓就有被拉断的危险。汽缸壁越厚，热透就越慢，启停时间也就越长，显然，降低了机组的启停灵活性。为此，高参数汽轮机的高压缸都作成双层缸结构。国产20万千瓦汽轮机高压双层缸定型后的结构如图1—5所示。

该机组的新汽压力是12.75MPa，温度是535℃。第一级喷嘴镶在喷嘴室上，第一级后的压力才是汽缸内承受的最高压力，其值为9.7MPa，温度为502℃。如果汽缸作成单层的，则汽缸壁承受的最大压差为9.6MPa，承受的最大温差为480℃左右。现在的高压缸是双层的，高压内缸装有9级，9级后的蒸汽进入内外的夹层内。9级后的蒸汽压力为3.75MPa，温度为363℃。这时，内缸承受的最大压差为5.95MPa，最大温差为139℃，内外缸承受的压差和温差都大为减小，壁厚可以明显减薄，热应力也大大降低。由于内外缸承受的最高温度相差139℃，它们可选用不同的材质，从而节省了优质耐热合金钢。

汽轮机运行对汽缸的要求是：

（1）要求汽缸不但要有足够的强度，而且还要有足够的刚度。因为汽缸在运行时受有各种力的作用（汽缸在热胀冷缩时，20万千瓦汽轮机的中压缸要依次推拉2号轴承箱），高压缸和前轴承箱，这里有推拉力、汽缸及其附件的自重、高温高压蒸汽对汽缸壁的张力、管道膨胀时对汽缸的推力等，这些力大得都很可观。

（2）从减小汽缸热应力考虑，应尽可能减薄汽缸壁与法兰的厚度，汽缸的形状也要作到简单对称。

（3）汽缸的形状应保证汽流在进汽、排汽及通流部分的流动性能要好。

（4）汽轮机的各汽缸在受热后应按一定方向膨胀，冷却时按一定方向收缩，不改变其中心位置。这一要求是靠机组的滑销系统来保证的。

国产20万千瓦汽轮机的滑销系统如图1—8所示。

滑销系统由立销、纵销、横销、角销等组成。它们的作用如下：立销引导汽缸沿垂直方向膨胀；纵销引导汽缸和轴承箱沿轴向膨胀；横销引导汽缸或轴承箱沿横向膨胀；角销也称压板，是防止轴承箱在滑动时一端翘起。各种滑销的结构见图1—9。

汽缸横销中心线与纵销中心线的交点是机组的绝对死点。20万机组有两个绝对死点。绝对死点是汽缸与其连接的轴承箱向同一侧三维方向上膨胀的坐标原点。绝对死点相对于运行层是不动的。

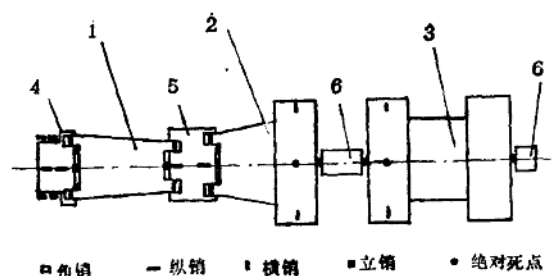


图1-8 国产20万千瓦汽轮机的滑销系统

1—高压缸；2—中压缸；3—低压缸；4—前轴承箱；5—2号轴承箱；6—基座

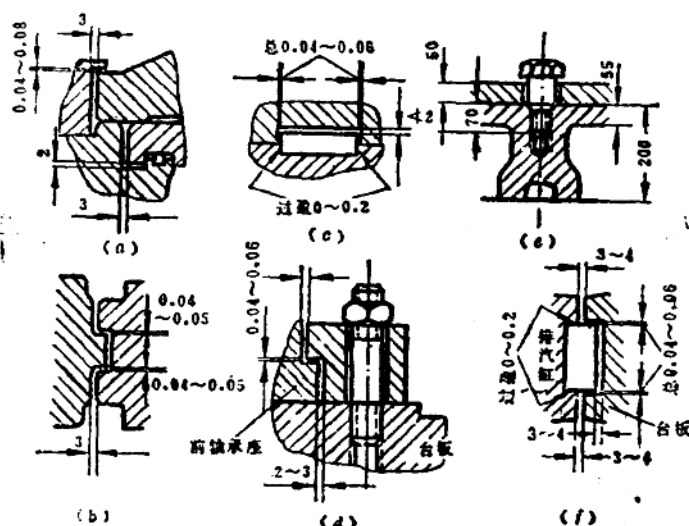


图1-9 汽轮机滑销结构图

a—猫爪横销；b—前缸立销；c—前轴承纵销、后缸横销；d—角销（压板）；
e—联系螺栓；f—后缸立销

汽轮机的绝对死点都是设置在低压缸的排汽口处，使机组向高压侧膨胀。这样设置的目的在于低压缸和凝汽器是直接连接的，如果低压缸位移较大，势必造成连接上的困难。同时，低压缸又是最重的，如果强行机组从高压缸向低压缸膨胀，会迫使汽缸变形，使一些间隙和中心发生变化，最终可能导致机组振动。再者汽缸与转子膨胀数值很大，如果机组从高压缸向低压缸膨胀，又会引起发电机转子与其静子之间的相对位移，使发电机励磁中心发生较大的偏移。

由于国产20万千瓦汽轮机的三个排汽缸均为庞大的焊接结构，故设有两个绝对死

点：一个在中压缸排汽口中心处，另一个在低压缸前排汽口中心处。这样，在机组启动时，可使高、中压缸向前膨胀，低压缸向后（即发电机方向）膨胀，从而使转子对静子的相对膨胀量都明显地减少了。

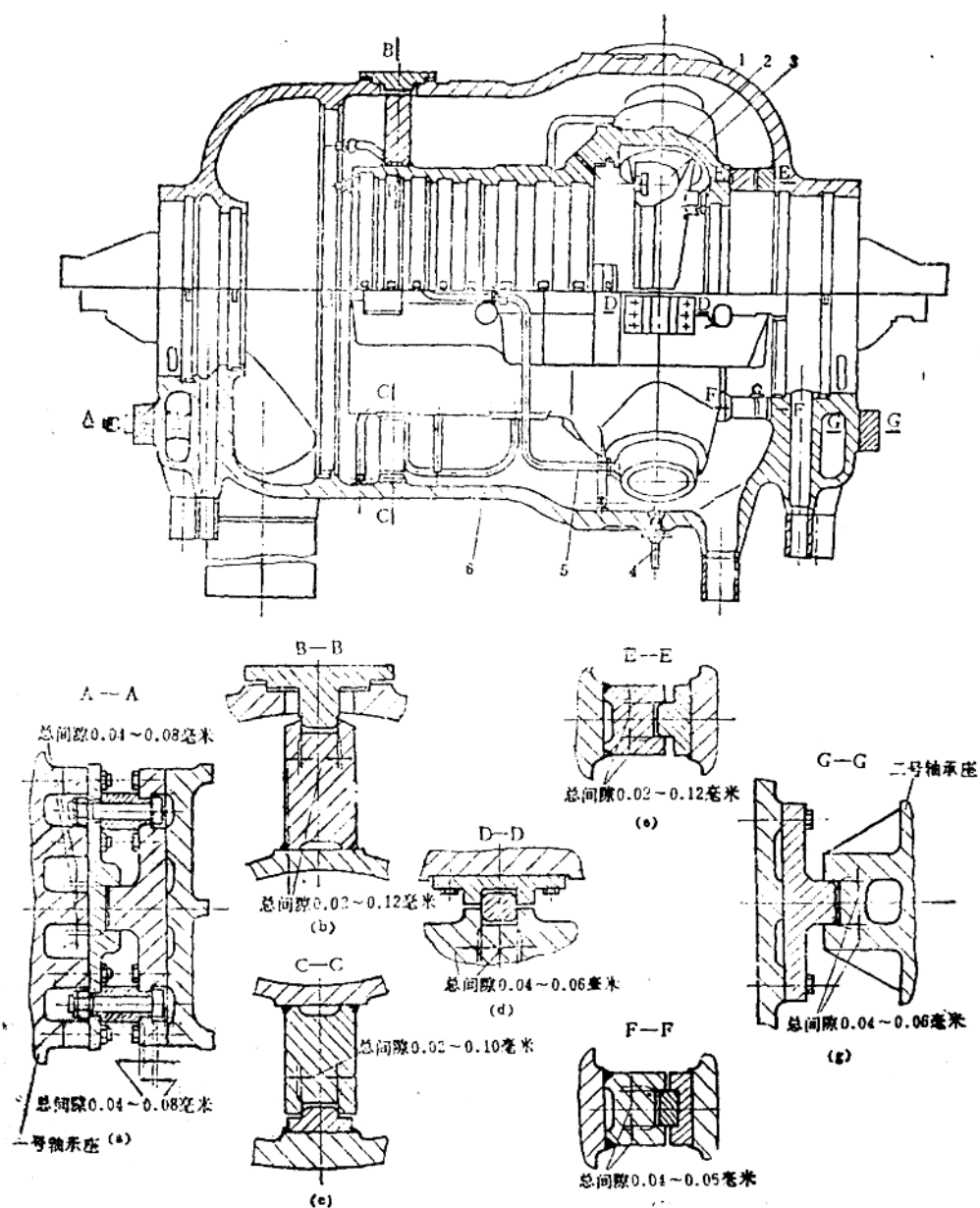


图1-10 高压汽缸

1—高压外缸；2—高压内缸；3—喷嘴室；4—内缸疏水管；5—进汽管漏汽接管；6—外缸加热喷汽管

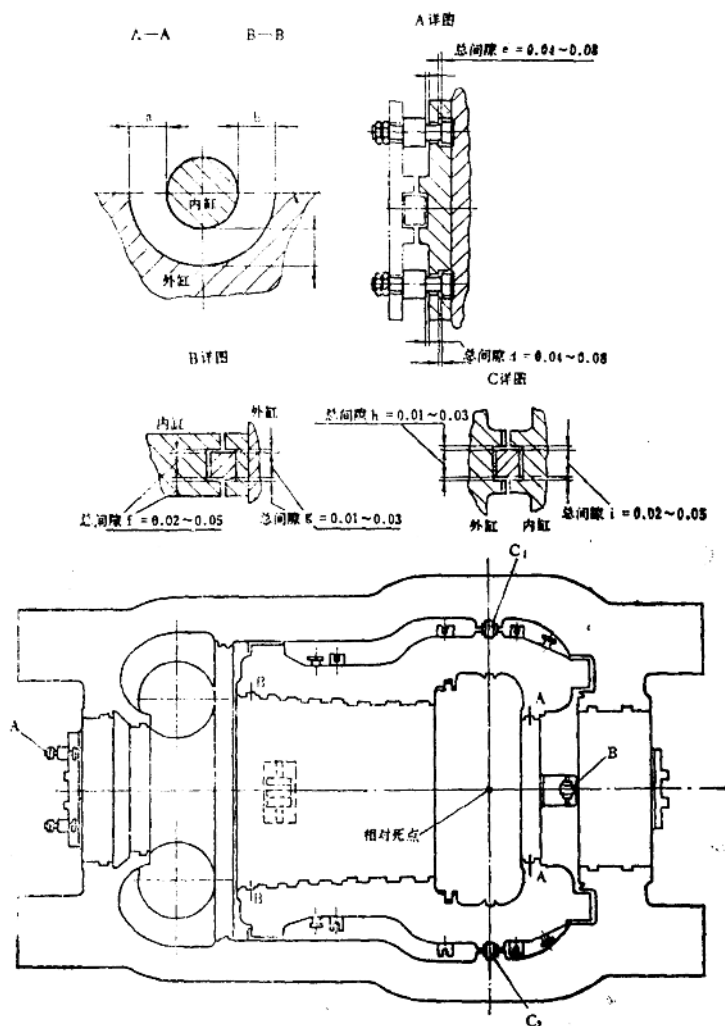


图1-11 高压汽缸安装要求

图1-10和图1-11示出了高压内缸在外缸中的定位情况。图1-10中A-A详图示出了高压外缸与前轴承座（图中称一号轴承座）之间的立销结构。图中示出的两个螺钉是供机组冷却时，高压缸拉前轴承箱之用，两个螺钉上的定位套筒是供高压缸推前轴承箱之用。该详图与图1-11中的A详图结构不一样，它们代表了不同时期的不同设计情况。

图1-10中进汽管漏汽接管5一头接在喷嘴室的进汽短管上，另一头装在一号隔板套上（因图1-10中没画出一号隔板套，故该接头在那里悬着），它的作用是把进汽管漏汽送到高压缸排汽口。哈尔滨汽轮机厂在定型设计时，将此漏汽接管取消了。

图1-10中外缸加热喷汽管6是加热外缸用的，整体形状由图1-12示出。因为高压汽缸是双层结构，蒸汽进入汽缸后首先加热的是内缸和转子，外缸是用第9级后的蒸汽加

热的，其温度要低于高压缸的进汽温度，所以外缸的加热速度要慢于内缸，更慢于转子。第10~12级隔板和高压后汽封都是装在外缸上的，外缸加热慢于转子，在这些部位就可能发生动静之间的摩擦。因此，在机组启动过程中，自汽缸法兰、螺栓加热联箱来的蒸汽，从下缸左右两侧引入两根进汽管1，然后从环形的喷汽管2的小孔中喷出，这样，可使高压外缸更快的膨胀。

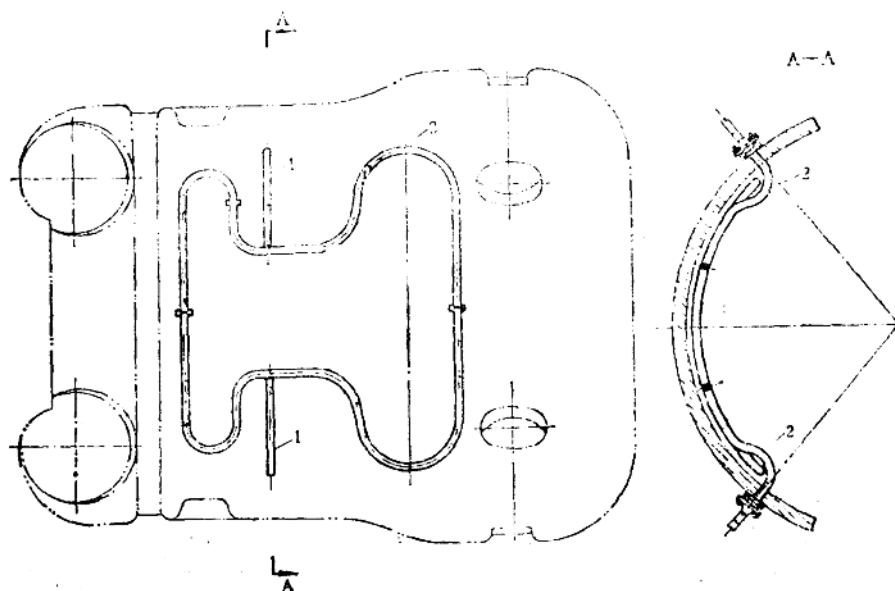


图1—12 高压外缸壁加热装置

1—进汽管；2—喷汽管

汽缸和轴承箱间在水平面内的相对位置是靠滑销系统来确定。而它们在垂直方向的相对位置是靠调整它们支承部位下边的垫板厚度来确定，详述如下：

国产20万千瓦汽轮机高压缸前后各伸出两个搭爪，俗称“猫爪”。猫爪放在轴承箱上，轴承箱沿着纵向销在基础台板上滑动，基础台板用地脚螺钉固定在基础上。

汽缸的支承又分上缸猫爪支承和下缸猫爪支承两种，分别如图1—13和1—14所示。

采用下猫爪支承，汽缸水平中分面的高度靠调整支承块的厚度来实现。这种支承的优点是安装方便，其缺点是猫爪温升后会将汽缸中分面上抬，而转子中心线不变，结果使下汽缸径向间隙变小，上汽缸径向间隙增大。

采用上猫爪支承，汽缸水平中分面的高度靠调整安装垫铁的厚度来实现。安装完毕后，换成工作垫铁支承。这种支承可使汽轮机转子始终与汽缸洼窝同心，缺点是安装检修比较麻烦。

低压缸的支承是利用下半缸伸出的部分（支撑脚）直接座落在基础台板（基架）上。可参见书后的附图 I。

中压缸前部和后部的支承分别和高压、低压缸的支承相类似。

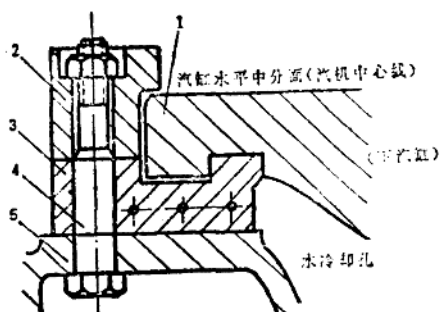
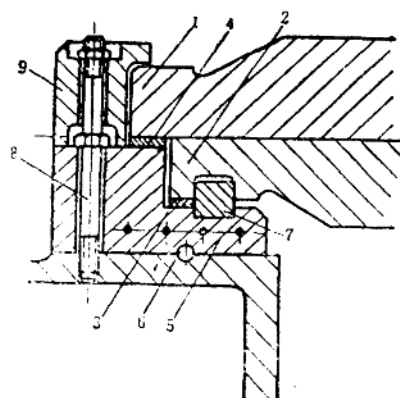


图1—13 下缸猫爪支承

1—猫爪；2—压块；3—支承块；4—
紧固螺栓；5—轴承座



图—14 上缸猫爪的中分面支承

1—上缸猫爪；2—下缸猫爪；3—安装垫铁；4—工作垫
铁；5—水冷垫铁；6—定位销；7—定位键；8—紧固螺
栓；8—压块

国产机组的汽缸，上下半部都是通过法兰用螺栓把紧的。图1—15是铸造汽缸法兰连接的局部剖视图。由图可见，法兰和汽缸壁的厚度是不一样的故其热容量不一样。在启停机组时，为防止汽缸变形和螺栓被拉断，同时也是为了加快机组的启停速度，应使这三者的温升速度比较接近。因此，高压外缸设置了法兰和螺栓加热装置，分别如图1—16和图1—17所示。高压内缸的螺栓加热和中压缸的法兰螺栓加热和上边所说的相类似。

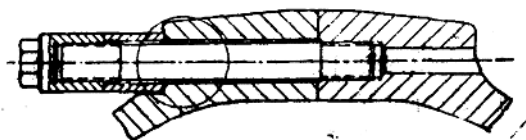


图1—15 法兰螺栓连接图

铸造汽缸内的蒸汽压力较高，为了保持法兰结合面处的良好汽密性，不仅法兰螺栓布置得很密，使螺栓间的距离很小，而且螺栓中心线尽量靠近汽缸壁厚的中心线，使螺栓处在汽缸壁和法兰过渡处的洼窝内。在这种情况下用普通六角螺母是不能装卸的，只好用罩螺母了（见图1—15）。罩螺母还可以保持螺纹连接处的清洁。

罩螺母下设置有套筒式高垫圈，见图1—15。垫圈的截面积远远小于法兰的截面积，因此比较容易变形。当法兰温度高于螺栓时，则法兰与螺栓的热膨胀差值，将大部分分配在垫圈与法兰的压缩上，仅有一小部分分配在螺栓的拉伸上，这就减少了在螺栓中的附加热应力。