

汽輪機設備及其运行

本书主要介绍汽轮机的工作原理、热力性能和热力计算,以及汽轮机主要部件的构造和强度计算。同时对汽轮机的调节原理、系统、试验和调整方法作了分析与比较。此外,还着重讨论了凝汽器和抽汽器的特性。在最后一章中,介绍汽轮机的启动、维护、停机的一般原理和操作方法,分析常见的几种事故并说明其处理方法。

本书可作为中等专业学校热能动力装置专业的教材,对热力发电厂的技术人员也有一定的参考价值。

本书由上海电力学校车雄夫、傅龙泉、方永年,吉林电力学院张洪林,重庆电力学校杨育軒同志编写;并经上海电力学校徐振声、章兴华、蒋大恩、沈立铭、陆楚龙、施琴芳同志审核。

汽轮机设备及其运行

上海电力学校等校编

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南营房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

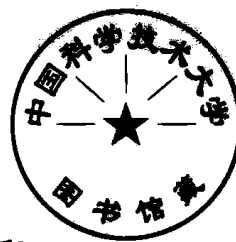
开本 $787\times 1092\frac{1}{16}$ ·印张 $21\frac{5}{8}$ ·插页4·字数494,000

1961年8月北京第一版·1962年1月北京第二次印刷

印数3,534—4,383·定价(94)2.20元

*

统一书号: K15165·356(水电-56)



目 录

第一章 緒論	3
第一节 汽輪机发展簡史和它的发展方向	3
第二节 汽輪机在发电厂中的地位 and 它的基本构造	7
第三节 汽輪机的分类和代号	10
第二章 汽輪机級的工作原理	14
第一节 气体的基本流动方程	14
第二节 噴管截面的变化規律	17
第三节 斜切噴管內的热力过程及尺寸計算	19
第四节 級的概念及級內热降的分配	26
第五节 动叶柵內的热力过程及尺寸計算	27
第六节 級內的損失及效率	31
第七节 效率及速度比的关系	47
第八节 扭轉叶片的成型	49
第九节 速度級的工作原理和性能	53
第三章 凝汽式多級汽輪机	62
第一节 凝汽式多級汽輪机的热力过程	62
第二节 汽輪发电機組的損失、效率和經濟指标	67
第三节 凝汽式多級汽輪机的构造	73
第四节 多級汽輪机热力計算的若干問題	86
第四章 汽輪机零件构造和强度核算	112
第一节 汽輪机汽缸的构造和材料	112
第二节 噴管弧的构造和材料	117
第三节 隔板的构造及材料	118
第四节 汽封的构造	130
第五节 汽輪机軸承的型式与构造	133
第六节 汽輪机的轉子	139
第七节 动叶柵的构造和强度計算	150
第八节 动叶柵的振动	161
第五章 汽輪机在变动工况下的工作	176
第一节 变动工况下噴管的工作	176
第二节 級組內流量改变时对各級压力和热降的影响	181
第三节 变动工况下級的反动度	185
第四节 变动工况下級的詳細热力推算	188
第五节 配汽方式对变动工况的影响	193
第六节 蒸汽参数对汽輪机工作的影响	200
第七节 汽輪机的特殊运行方式	204
第六章 凝汽式汽輪机的調节	203

第一节 汽轮机调节的基本概念	203
第二节 调节机构及其特性	210
第三节 同步器	220
第四节 汽轮机的保护装置	225
第五节 汽轮机的供油系统	232
第六节 凝汽式汽轮机的调节系统	241
第七节 汽轮机的液动调节	245
第八节 调节系统正常工作的要求	248
第九节 调节系统的试验与调整	250
第七章 热电合供式汽轮机	258
第一节 背压式汽轮机	258
第二节 具有一次可调节抽汽的凝汽式汽轮机	261
第三节 具有二次可调节抽汽的凝汽式汽轮机	269
第八章 凝汽设备	277
第一节 凝汽器的功用及构造	277
第二节 凝汽器的热力计算	291
第三节 凝汽设备的热力特性	300
第四节 凝汽器的合理结构及其改善方法	304
第九章 汽轮机的运行	308
第一节 汽轮机的起动	309
第二节 汽轮机的正常运行	320
第三节 汽轮机的停机	334
第四节 汽轮机事故处理	337

第一章 緒 論

第一节 汽輪机发展簡史和它的发展方向

汽輪机是一种蒸汽发动机，它开始被运用在工业生产方面的历史并不太久，但它的工作原理在很早以前，便在其他方面得到运用了。

紀元前 120 年左右亚力山大城的希罗所制造的反动式汽球(图1-1)就是反动式汽輪机的雛型。

汽球 3 上装有二支弯管 5，蒸汽从其中噴出并形成反作用力。因而使汽球向反汽流方向旋轉。

到十九世紀末，由于生产力的发展，需要功率較大的原动机来带动机器，于是，促进了汽輪机的发展和运用。在1883年，瑞典工程师拉伐尔，首先創造了一部功率为 5 馬力的汽輪机，其构造如图1-2所示。在拉伐尔汽輪机噴管出口处的汽流速度达到1200米/秒。这股高速度汽流冲击叶片并使轉輪轉动。轉輪的轉速为32000轉/分。



图 1-1 希罗的反动式汽球

1—热源；2—水箱；3—汽球；4—支柱；5—噴管；6—軸。

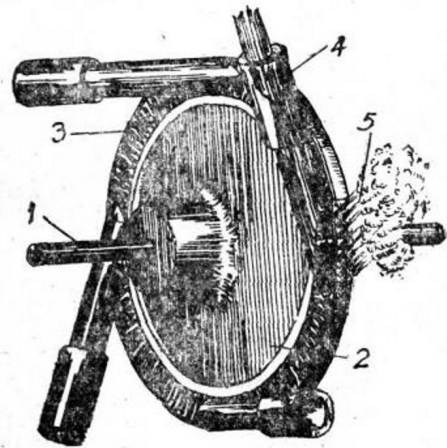


图 1-2 拉伐尔汽輪机的构造簡图

1—轉軸；2—轉輪；3—叶片；4—噴管；5—汽流。

由于拉伐尔汽輪机的轉数很高，必須装設减速傳动装置，又由于蒸汽从拉伐尔汽輪机叶片流出时还有很高的速度，所以，汽輪机的功率不大、效率很低。远不能滿足日益发展的工业需要。

为了充分地利用蒸汽的能量，制造出功率更大的原动机以滿足日益发展的工业生产需要，于1900年寇蒂斯設計和制造出具有二个速度級的單級汽輪机。根据原設計者的姓名，这种汽輪机称为寇蒂斯式汽輪机，或称为复速級汽輪机。

寇蒂斯式汽輪机的工作原理可以从图1-3中很清楚地看出来。汽輪机只有一个轉輪，

但是在轉輪上裝有兩圈葉片，在兩圈葉片之間裝有導向葉片7，導向葉片用來改變汽流的方向。蒸汽在噴管4中，把熱能轉換為動能，以高速度沖擊第一圈工作葉片3，然後進入導向葉片7改變方向後，再沖擊第二圈工作葉片。這樣，蒸汽離開汽輪機時的速度減小了，動能損失小了，汽輪機的实际作功本領也增加了。

從拉伐爾汽輪機發展到寇蒂斯式汽輪機並不是汽輪機發展的唯一道路，在寇蒂斯式汽輪機出現的同一年，出現了三級沖動式汽輪機，其原理如圖1-4所示：

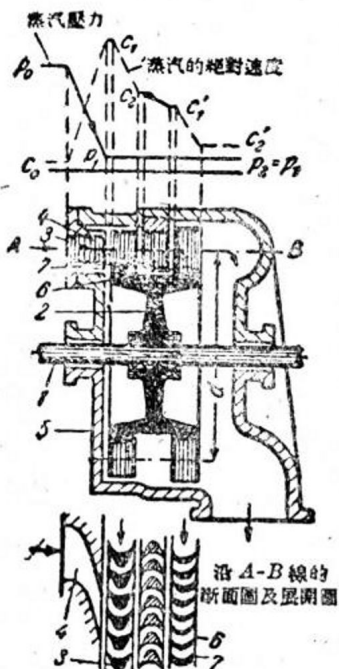


圖 1-3 具有二個速度級的沖動式汽輪機斷面簡圖

1—軸；2—轉輪；3—第一列工作葉片；4—噴管；5—汽缸；6—第二列工作葉片；7—導向葉片。

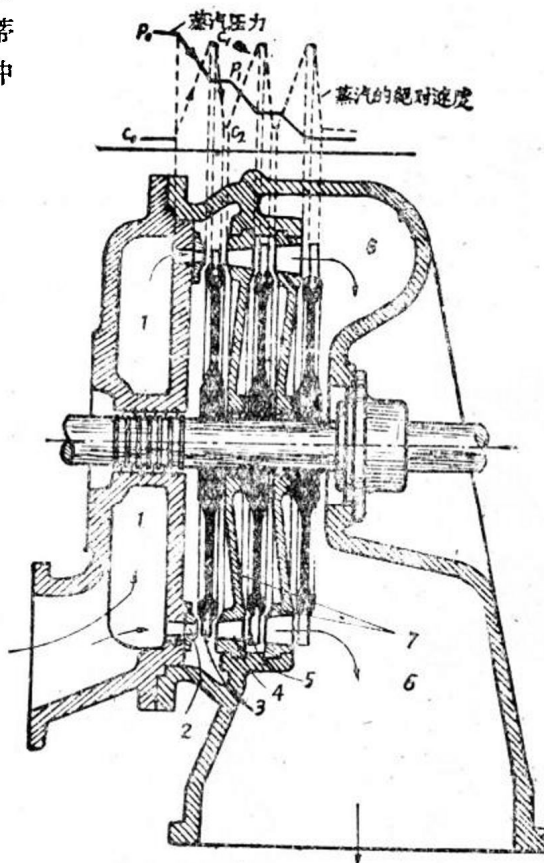


圖 1-4 帶有三個壓力級的沖擊式汽輪機的縱剖面簡圖

1—新蒸汽的環形汽室；2—第一級噴管；3—第一級工作葉片；4—第二級噴管；5—第二級工作葉片；6—排汽管接頭；7—隔板。

壓力較高的蒸汽進入環形汽室1以後，在噴管2中把熱能轉換為動能，以很高的速度沖擊第一級工作葉片3，使轉輪轉動作功。這樣，一個葉輪及其前面的噴管就成為汽輪機作功的一個單元，我們稱它為“沖動級”。

蒸汽從第一級的葉片出來後，進入第二級的噴管，并在其中膨脹把熱能轉換為動能，又在第二級的葉片中把動能轉換為轉輪轉動的機械能。以後，又進入第三級中進行能量轉換。

由於蒸汽在噴管中進行逐級膨脹時，蒸汽壓力要降低，所以蒸汽從第三級葉片出來時其壓力要比環形汽室1中的壓力低得多。

汽輪機的級數可以做成很多，所以多級汽輪機可以充分地利用蒸汽的能量，同時，

也可能用很高压力的蒸汽来工作,因此,多级汽轮机的功率就可以达到很大的数值,在工业上的运用也更为广泛。

在拉伐尔利用汽流冲动转轮的原理制造出历史上第一台冲动式汽轮机的同时,希罗球的反作用原理也开始利用在动力工业上。

1884年,柏生氏首先制成了利用蒸汽的反作用力来工作的汽轮机,这种汽轮机称为反动式或称为反作用式汽轮机,有时又称为柏生氏汽轮机。图 1-5 所示即为柏生氏汽轮机的一种构造。

新汽从汽室 7 进入汽轮机,在汽轮机的外壳 10 和转鼓 1 上装有特殊形状的导向叶片和工作叶片,蒸汽从环形汽室 7 进入装在外壳 10 上并分布于全周的导向叶片中,并在导向叶片中进行膨胀,蒸汽的一部分热能转变为动能,汽流以一定的速度流入装在转鼓 1 上的工作叶片中,冲击叶片并带动转鼓转动,同时蒸汽在工作叶片中也要进行膨胀,汽流的速度增大以反作用力推动叶片带动转鼓转动做功。每一圈导向叶片和它后面的一圈工作叶片构成了反动式汽轮机的一个做功单元,我们称它为“反动级”。蒸汽从第一级工作叶片出来后,依次地进入第二级导向叶片和第二级的工作叶片中进行膨胀做功,然后逐级地进入第三级,第四级……直到最末级。

由于蒸汽在导向叶片和工作叶片中进行膨胀时压力要降低,所以从最末级工作叶片中出来的蒸汽的压力要比环形汽室中的压力低得多。

实际的反动式汽轮机构造要比图 1-5 所示复杂得多,如图 1-6 所示。

1912年瑞典容克斯川兄弟利用了反动式原理设计了辐流式汽轮机,如图 1-7 所示。

这种汽轮机有二个转轮,在垂直于转轮的转动平面上,装有一圈圈的工作叶片,蒸

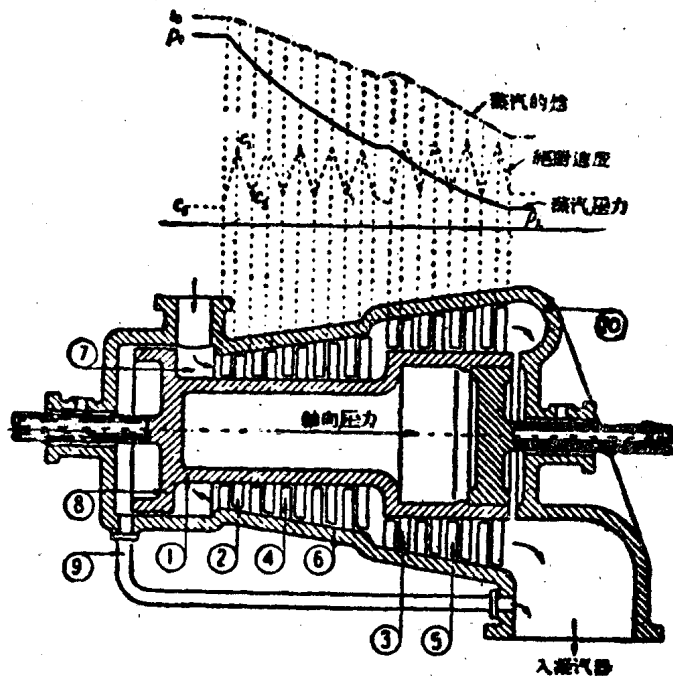


图 1-5 中型反动式汽轮机断面简图

1—转鼓; 2—工作叶片; 4, 5—导向叶片; 6—汽缸; 7—环状蒸汽室; 8—平衡活塞; 9—蒸汽管; 10—外壳。

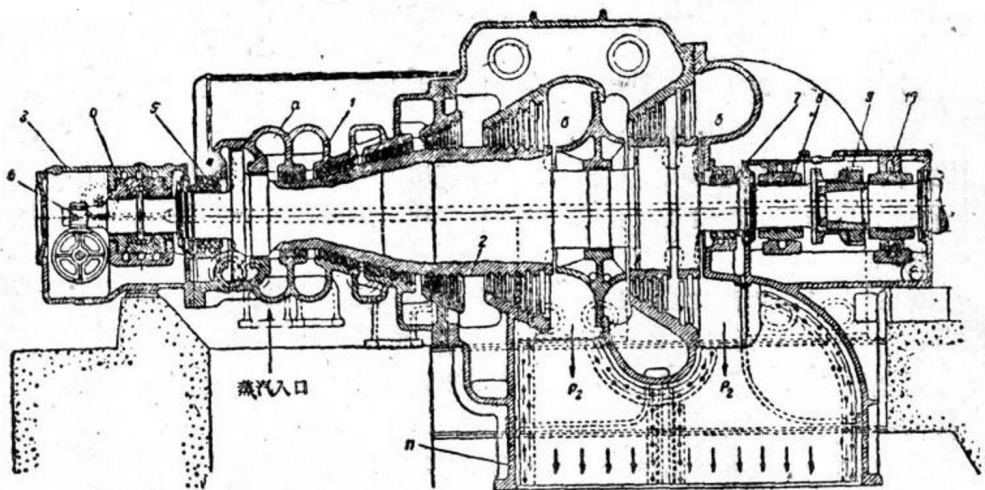


图 1-6 大型柏生氏单缸汽轮机断面图

1—汽轮机外壳；2—汽轮机转鼓；3—前端轴承外壳；4—前端径向及推力联合轴承；5—前端的轴颈；6—调速器的蜗轮传动；7—后端的轴颈；8—汽轮机后端的径向轴承；9—汽轮机和发电机的联轴节；10—发电机的轴承；11—汽轮机的乏汽管。

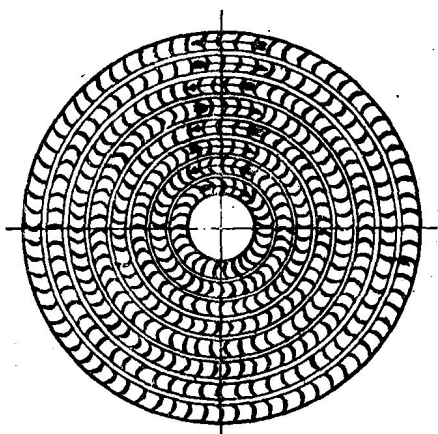


图 1-7 辐流式汽轮机构造简图

1, 2—汽轮机的转鼓；3—新汽管；4, 5—汽轮机的轴；6—汽轮机外壳；7, 8—新汽室及乏汽室。

汽从新汽管 3 经过转鼓上的孔进入中央汽室 7，然后由中央汽室流经所有各圈叶片的汽道中，按照反动式汽轮机的原理工作，做功后的蒸汽流向乏汽室 8。

蒸汽从初压 p_0 膨胀到压力 p_2 发生在所有各圈转动的叶片汽道中。在这种汽轮机中，根本没有固定不动的导向叶片。

从汽流的总体方向看，汽流在这种反动式汽轮机中流动时，从中心沿转鼓的直径方向向外流动。为了和前面的几种汽轮机区别开来，我们把这种反动式汽轮机称为径流式或称为辐流式汽轮机。而把汽轮机内汽流总体流动方向与轴大致平行的汽轮机称为轴流式汽轮机。

辐流式汽轮机的叶片是垂直地装在转鼓上的，当汽轮机工作时，叶片的离心力使叶片内部产生很大的弯曲应力，叶片不能做得很长，所以不能通过较大的蒸汽量，汽轮机的功率不可能做得很大，虽然它的结构紧凑，但还不能充分满足工业上的动力需要。目前，世界各国广泛地制造和使用冲动式汽轮机。

革命前的俄国，蒸汽透平很少应用，又没有透平制造厂。但是在苏维埃政权年代已打下了巨大的透平制造的基础，也就是建立了许多头等的制造厂，使苏联制造业得到极为迅速的发展，为苏联的电力工业生产着新式的蒸汽透平。

1923~1924年苏联制成了功率为 2,000 瓩的汽轮机，而在 1931年初，苏联制造成了用 29 绝对大气压、温度为 400°C 的蒸汽来工作的功率为 50,000 瓩和 100,000 瓩汽轮机。从

1952~1961最近十年中，由于冶金工业的技术水平不断提高和空气动力学理論的进一步发展，使汽輪机的工作蒸汽参数和汽輪机的效率提高很快。目前，大功率汽輪机的蒸汽参数高达240絕對大气压，650°C。而苏联正在开始設計和制造用300絕對大气压、650°C的蒸汽来工作的30万瓩和60万瓩大型汽輪机。

由于汽輪机制造业充分地利用了空气动力学方面的科学研究成果，采用了新型的結構，所以汽輪机的效率也不断提高。

在汽輪机的功率方面也增长很快。目前已經可以制造几十万瓩的汽輪机了。苏联在1960年生产了世界上功率最大的单軸汽輪机，它的功率为30万瓩。目前正在制造40万瓩的汽輪机。

解放前，我国由于受帝国主义、封建主义和官僚資本主义的重重压迫和剝削，民族工业的发展受到极大的摧殘，所以当时也根本没有汽輪机制造工业，直到解放以后，在党的正确领导下，在社会主义国家兄弟般的无私帮助下，才开始有我們自己的汽輪机制造工业。1953年建成了我国第一个汽輪机制造厂，只花了一年的时间，克服了种种技术上、設備上的困难，终于在1954年制造出我国第一台功率为6000瓩的汽輪机。在1956年开始自行設計制造功率为12000瓩、压力为35絕對大气压、温度为435°C的汽輪机。在同一年，又建成了我国第二个汽輪机制造厂，制造以90絕對大气压，温度为500~535°C的高参数汽輪机。

1958年以来，汽輪机制造工业亦和其他工业一样，在党的建設社会主义的总綫路的光輝照耀下，得到更为蓬勃的发展，小型的汽輪机制造厂，在許多地方相继建立，大大促进了电力工业的发展。在大型汽輪机制造厂中，汽輪机的制造技术水平也不断提高，1958年制成了功率为25,000瓩的中压汽輪机(35絕對大气压，435°C)和高压汽輪机(90絕對大气压，500°C)。1959年制造成功了功率为50,000瓩的高压和中压汽輪机。而1960年又有了更大的发展。在汽輪机运行管理水平上，解放后几年来亦有显著提高，增加出力，提高效率，长期无事故运行等先进事例，不断地广泛地涌现出来。

我們所以能取得以上輝煌的成績，所以能高速度的发展汽輪机制造工业，是由于党的正确领导，由于社会主义制度的优越性，由于兄弟国家的帮助和全国人民的一致努力。尽管在前进的道路上还有許多困难，但是我們坚信，在党的领导下，不論在汽輪机制造或运行上，我們一定能在不太长的时间内赶上和超过世界上最发达的資本主义国家，进入世界最先进技术水平的行列。

第二节 汽輪机在发电厂中的地位和它的基本构造

汽輪机在发电厂中是作为带动发电机的原动机，它是发电厂中的主要設備之一。它必須和一系列的其他設備如鍋炉、給水泵等配合才能很好地工作。

图1-8所示即为发电厂汽輪机車間內的总体布置情况。

汽輪机車間分为上下二层，上面一层称为汽輪机平台，下面一层称为凝汽間。在图1-8上我們从左至右可以看到，汽輪机平台上有抽气器7，汽輪机1和发电机2，励磁机21。在凝汽間有冷油器23、凝結水泵4、凝汽器3。

鍋炉布置在專門的鍋炉房中(称为鍋炉車間)，蒸汽由鍋炉房引出，經蒸汽管7送到汽輪机中，按照第一节中所述的流动过程，在多级汽輪机中逐級地进行膨脹动作，并带

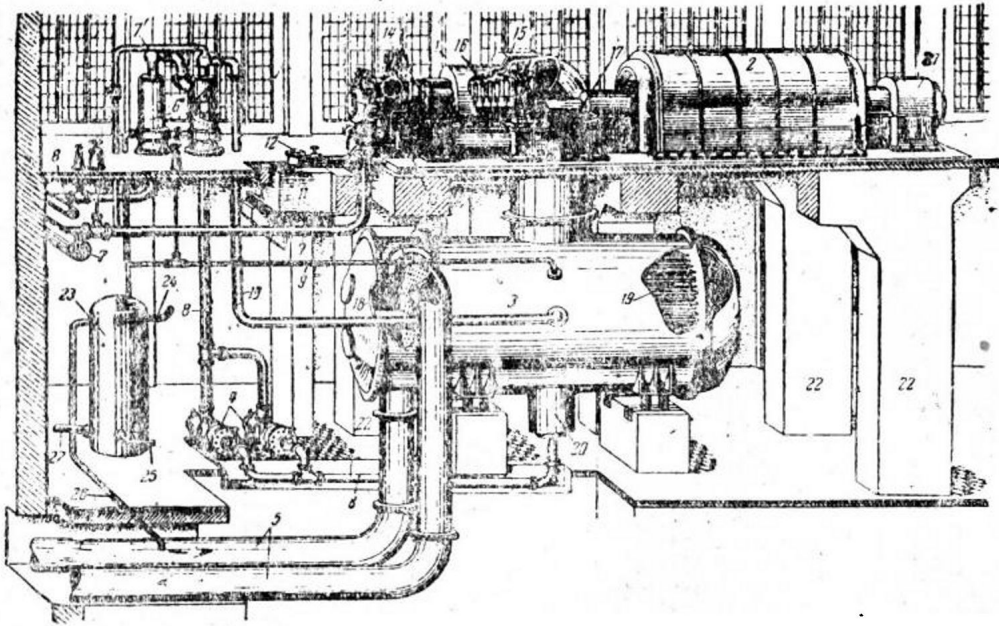


图 1-8 汽輪機車間的布置情况

1—汽輪机；2—发电机；3—凝汽器；4—凝結水泵；5—循环水管；6—二級抽汽器；7—引向抽气器的蒸汽管；8—凝結水管；9—凝結水再循环管；10—凝汽器空气抽出管；11—油箱；12—汽动輔助油泵；13—汽輪机的停汽阀；14—汽輪机的調节机构；15—汽缸；16—汽輪机級；17—乏汽管；18—凝汽器管板；19—凝汽器銅管；20—凝結水井(热水井)；21—发电机的励磁机；22—基础；23—冷油器；24—冷油器出油管；25—冷油器进油管；26—冷油器进水管；27—冷油器出水管。

动发电机发电，从最后級叶片中出来的蒸汽称为乏汽。它从乏汽管17进入凝汽器3中，并在其中凝結成水。乏汽在凝結成水的过程中由于体积大大縮小，在凝汽器中便形成了真空。

为了保証蒸汽不断地凝結成水，必須使循环水不断地通过凝汽器，把蒸汽凝結时所放出的热量带走。

抽气器的作用是从凝汽器中不断抽出空气，以保持凝汽器的真空。这些空气是从不严密部分漏入凝汽器的。

乏汽凝結成水后，流到凝汽器下面的热水井20中，再由凝結水泵4打到除氧器进行除氧，除氧后的水由給水泵打到鍋炉去。

对于能够从中間抽出蒸汽用来回热凝結水和給水的汽輪机，在凝汽間还应当布置回热加热器。

冷油器23是用来冷却軸承潤滑油的。

为了便于了解，我們可以把汽輪機車間的各种輔助設備划分为以下几个主要系統：

1. 蒸汽管路系統——包括引入汽輪机的新鮮蒸汽管路、回热抽汽管路等。
2. 凝結水系統——包括凝汽器、抽气器、凝結水泵、回热加热器及其有关的凝結水管路等。

3. 冷却水系統——包括流經凝汽器、冷油器和发电机的冷却水管路。

4. 油系統——包括各种潤滑油管路和汽輪机进汽調节油管路。

如果要使汽輪机能良好地工作，必須全面地了解汽輪机及其有关輔助設備的构造、

特点和性能。

汽轮机是由许多结构复杂的零件所构成的。在还没有系统地学习汽轮机理论知识以前，先了解一下汽轮机的各个主要组成部分的情况是很有益的。

为了说明汽轮机的大体构造情况，我们以国产的功率为12,000瓩汽轮机作为了解汽轮机构造的例子。

国产12,000瓩汽轮机是用35绝对大气压、435°C的蒸汽来工作的。其工作转速为3,000转/分，直接带动发电机。其构造如图1-9(见书末插页)所示。

汽轮机共有九级，其中第一级为寇蒂斯级(复速级)。汽轮机是按照冲动式的原理来工作的。

汽轮机本体可以看成由三个主要部分组成的。

1. 转体——即汽轮机的运动部分，包括轴、转轮、叶片和联轴节等。
2. 静体——即汽轮机的静止部分，包括汽缸、隔板、喷管、汽封、轴承和支座等。
3. 调速润滑装置——包括调速器、调节汽阀、油泵、调速传动机构、安全保护装置等。

汽轮机的轴是用高强度合金钢制成的。轴被制成中间粗两头较细而且呈阶梯形。这是为了便于装配转轮。九级转轮都是用热套法装在轴上的。前头四级转轮从轴的前端套入，后面五级从轴的后端套入。在轴和转轮配合处装有平键防止转轮松动。第一级为复速级，所以转轮上装有二圈叶片，其它各级转轮上只装上一圈叶片。

为了带动发电机转子，用齿轮联轴节把汽轮机和发电机转子连接起来，联轴节装在后轴承箱内。

汽轮机的转子支持在它自己的前后轴承上，前轴承是推力支持联合轴承。它的推力轴承部分用来承受汽轮机的轴向推力，并使转子的轴向位置保持不变。它的支持轴承部分用来支持转子的重量，并使转子的径向位置保持不变。

汽缸是汽轮机的重要零件，大而且重，它可以沿着水平面分开。上下二部分汽缸都有它自己的法兰，可以用螺丝钉把上下二汽缸连接成一体。图1-10所示即为上汽缸揭开后所看到的汽轮机构造情况。

为了便于制造和运输，上下汽缸又可以分为前后二部分。前后汽缸之间也是用螺钉连接。在图1-9中所示的汽轮机，其前后汽缸都是铸造成功的。最近以来，改为用钢板焊接来制造后汽缸了。

为了使蒸汽在汽缸内能够逐级进行膨胀，在汽缸内装有八块隔板，把汽缸分成九个汽室。转子的叶轮一个个被分配在各汽室中，每一块隔板又可分为上下二半。在隔板上装有喷管，以便蒸汽在喷管中膨胀把热能转换为速度能冲击叶片做功。图1-11所示即为喷管装配在隔板上的情形。

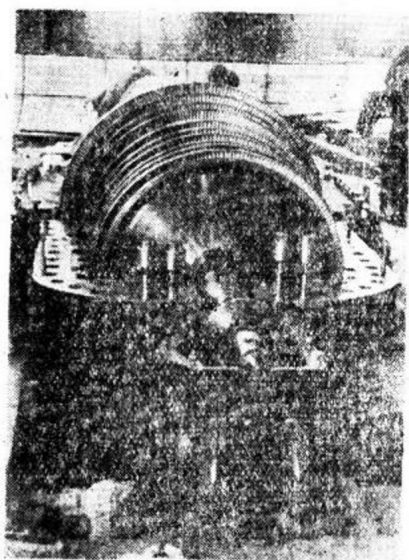


图 1-10 上汽缸揭开后看到的汽轮机构造情况

汽輪机的第一級沒有隔板，它的噴管直接嵌在汽缸上。

隔板直接放在汽缸內的环形槽中，在轉子通过隔板处，存在一定的間隙，为了减少从这些間隙中漏过的蒸汽，隔板上装有汽封，称为隔板汽封或称为中間汽封。

在轉子两端，机軸穿过汽缸处也装有汽封，称为軸端汽封。前軸端汽封是用来减少蒸汽漏出汽輪机，后軸端汽封是用来减少空气从汽缸后部漏入汽輪机。因为最末級后的乏汽是处于真空状态的，大量空气从后汽缸处漏入会破坏真空，降低汽輪机效率。

下汽缸同样分为前后二部分，后下汽缸和乏汽管鑄成一体，前下汽缸有三个管子接头法兰，用来联接抽汽管，以便把回热抽汽送到回热加热器中去，前后汽缸用螺釘連結成一体。前下汽缸的前部支持在前軸承座上，而前軸承又支持在前台板上，后下汽缸則支持在二块側台板和一块后台板上。

上汽缸的上部，装有四个調节汽閥，用来調节汽輪机的进汽量，汽閥的动作是由装在前軸箱上面的調速器来控制的，調速器根据汽輪机的轉速变化，指揮調节汽閥开大或关小，保持汽輪机的轉速在一定範圍內。調节汽門的动作是用油动机来操纵。

为了供給軸承、联轴节和調速装置所必需的用油，在前軸承箱的前下方装有齿輪油泵。油泵的出油压力为 $3.2 \sim 4.8$ 绝对大气压。

在后軸承箱上部，装有盘車装置，它是在汽輪机起動或停机时用来低速轉动轉子的。它由一个电动机和一套减速傳动机构組合成的。其原理如图1-12所示。

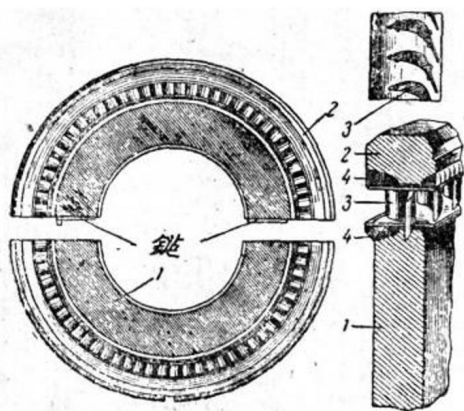


图 1-11 噴管装配在隔板上的情形

1—隔板內圈；2—隔板外圈；3—噴管；
4—焊接处。

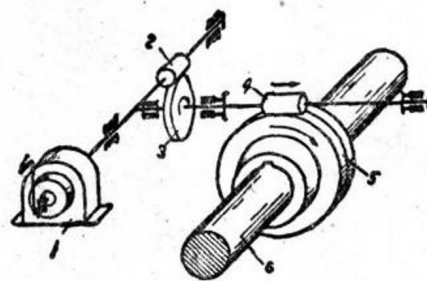


图 1-12 盘車装置簡图

1—电动机；2、3—蜗杆，蜗輪；4—蜗杆；
5—联轴节；6—主軸。

第三节 汽輪机的分类和代号

近代动力工业的高度发展不仅使热力发电厂的規模不断增大，效率不断提高，同时使汽輪机的結構、热力特性等也发生很大的变化，出現了各种不同类型的汽輪机。

根据汽輪机的构造特点、热力过程特性、新汽与乏汽的参数和它在工业上的应用等，可以将汽輪机分为下列各种基本类型：

一、按蒸汽的流动方式划分，有：

1. 軸流式汽輪机——蒸汽流动的总方向大致与軸平行。
2. 輻流式汽輪机——蒸汽流动的总方向与轉輪的轉动平面大致平行。

二、按汽轮机工作蒸汽参数的高低划分，有：

1. 低参数汽轮机——用12~20绝对大气压以下的蒸汽工作。
2. 中参数汽轮机——用21~80绝对大气压的蒸汽工作。
3. 高参数汽轮机——用81~150绝对大气压的蒸汽工作，通常较多用90~130绝对大气压的蒸汽。
4. 超高参数汽轮机——用151~225绝对大气压的蒸汽工作。
5. 超临界参数汽轮机——用226绝对大气压以上的蒸汽工作。

三、按汽轮机的热力过程特性划分，有：

1. 纯凝汽式汽轮机——蒸汽在汽轮机中做功后全部在凝汽器中凝结，并且没有回热抽汽。
2. 凝汽式汽轮机——蒸汽在汽轮机中做功时有一部分蒸汽从汽轮机中间级抽出用来回热凝结水和锅炉给水，绝大部分蒸汽在凝汽器中凝结。
3. 供热式凝汽汽轮机——可从汽轮机中间抽出一股或二股一定压力的蒸汽，用来供给工业热力用户或民用取暖，其余蒸汽在汽轮机内做功后都在凝汽器中凝结。通常，供热式凝汽汽轮机也有回热抽汽。
4. 中间再热汽轮机——蒸汽在汽轮机中开头几级作了功后，用蒸汽管把蒸汽引至中间再热器再次加热到某一温度以后，再送至汽轮机后面几级中继续膨胀做功。这类汽轮机一般功率较大，蒸汽参数较高，而且有回热抽汽，做功后的乏汽在凝汽器中凝结。

四、按汽轮机乏汽参数的高低划分，有：

1. 高真空汽轮机——汽轮机的乏汽压力在0.1绝对大气压以下，一般凝汽式汽轮机都属于高真空汽轮机。
2. 低真空汽轮机——汽轮机的乏汽压力在0.1绝对大气压以上，在1个大气压以下，这种汽轮机很少遇到。
3. 背压式汽轮机——乏汽压力在1个绝对大气压以上；有的背压式汽轮机乏汽压力很高，甚至达到几十个绝对大气压，其乏汽送到低压汽轮机中继续做功。这种背压式汽轮机又称为前置式汽轮机。如果背压式汽轮机乏汽用来供给工业热力用户或供给民用取暖，则又称为供热式汽轮机。

五、按汽轮机的作用原理划分，有：

1. 冲动式汽轮机——蒸汽仅在喷管中把热能转换为动能，以汽流对叶片的冲动作用来工作的汽轮机称为冲动式汽轮机。
2. 反动式汽轮机——蒸汽不仅在固定的导向叶片中有膨胀，而且在工作叶片中也有很大膨胀的汽轮机，称为反动式汽轮机。汽轮机的叶片不仅受气流的冲击作用力，而且受到很大的汽流反作用力。

六、按汽轮机的汽缸数目多少划分，有：

1. 单缸汽轮机——汽轮机只有一个汽缸。
2. 双缸汽轮机——汽轮机有两个汽缸。
3. 多缸汽轮机——汽轮机的汽缸有三个或三个以上。

七、按汽轮机转子轴心线数目多少划分，有：

1. 单轴——汽轮机只有一支轴心线。有些汽轮机有两个或三个转子，但各个转子是

串联起来的，仍称为单轴汽轮机。

2. 双轴或多轴汽轮机——汽轮机转子轴心线在两根或两根以上。这是由于大型汽轮机级数多，汽缸数多，如果转子全部串联起来，汽轮机的尺寸便很长。为了缩短汽轮机总长度，把一部分汽缸平行布置，这样便出现了多轴汽轮机。多轴汽轮机必须带二个或二个以上的发电机。

八、按在工业上的应用划分，有：

1. 固定式变速汽轮机——汽轮机工作时不能移动位置，但汽轮机的工作转速可以改变。这种汽轮机常用来带动鼓风机、抽风机、水泵等。

2. 固定式定速汽轮机——汽轮机工作时不能移动位置，并且转速波动很小，这种汽轮机常用来带动发电机。

3. 非固定式变速汽轮机——这种汽轮机用于轮船、军舰和铁路运输等。

汽轮机这门课程只讨论固定式定速汽轮机及其有关附属设备的原理和运行问题。

由于汽轮机的分类方式很多，种类繁多，为了便于使用起见，我们特来用某些代号把各种不同类型汽轮机的基本特征——蒸汽参数，热力特性和容量等表示出来。下面将介绍我国和苏联表示汽轮机型号的方法。

汽轮机的代号分为三段：第一段表示汽轮机的蒸汽参数和热力特性；第二段表示汽轮机的功率，其单位为兆瓦；第三段表示设计类号。

表示汽轮机蒸汽参数的代号列于表1-1。

表 1-1 蒸汽参数代号一览表

参 数 分 类	蒸 汽 压 力 (绝对大气压)	温 度 (°C)	我 国 代 号	苏 联 代 号
低 参 数	12~20	300~360	2	I'
中 参 数	21~40	361~450	3	A
	41~80	451~480	4	B
高 参 数	81~125	481~535	5	B
	126~150	536~570	6	ΠB
超 高 参 数	151~225	571~600	7	CB
超临界参数	226以上	600以上	8	CK

表示汽轮机热力特性的代号列于表1-2。

表 1-2 汽轮机热力特性代号一览表

汽 轮 机 热 力 特 性	我 国 代 号	苏 联 代 号
凝汽式汽轮机	1	K
汽轮机具有一次供暖用抽汽	2	T
汽轮机具有一次工业用抽汽	3	Π
汽轮机具有工业和供暖抽汽	4	ΠT
背压式汽轮机	5	P

代号第一段的前面部分表示蒸汽参数，后面一部分表示热力特性。例如：我国生产的31-25-1型汽轮机，其代号的含义是：中参数凝汽式汽轮机，功率为25兆瓦（即25000

挺)，第一种設計。又如54-50-2型汽輪机，它的代号意义是：高参数汽輪机，具有工业用抽汽和供暖用抽汽，功率为5万千瓦，第二种設計。

以苏联生产的CKK-300-1汽輪机为例：它的代号意义是：超临界参数凝汽式汽輪机，功率为30万千瓦，第一种設計。

我国和苏联生产的汽輪机主要型号見表1-3、表1-4、表1-5。

表1-3 国产凝汽式汽輪机

序 号	型 式	容 量 (千瓩)	蒸 汽 参 数		备 注
			絕 对 压 力	汽 温 (°C)	
1	21-0.75	0.75	13	340	辐流式
2	21-1.0	1.0	13	340	
3	21-1.5	1.5	13	340	
4	31-1.5	1.5	24	390	
5	21-2	2.0	13	340	
6	31-2.5	2.5	35	435	
7	31-3-1	3.0	24	340	
8	31-3-2	3.0	35	435	
9	31-6	6.0	24	340	
10	31-6-3.1	6.0	35	435	
11	31-6-1	6.0	35	435	
12	31-6-2	6.0	24	340	
13	31-12-1	12.0	35	435	
14	31-12-2	12.0	35	435	
15	31-25-1	25.0	35	435	
16	31-50-1	50.0	35	435	
17	51-25-1	25.0	90	500	
18	52-50-1	50.0	90	500	
19	51-50-2	50.0	90	535	

表1-4 国产抽汽式汽輪机

序 号	型 式	容 量 (千瓩)	蒸 汽 参 数		抽 汽 规 范				制 造 厂
			绝对压力	汽 温 (°C)	工 业 抽 汽		低 压 抽 汽		
					绝对压力	温 度 (°C)	绝对压力	温 度 (°C)	
1	33-3	3.0	24	390	6±1	20	—	—	上 汽
2	33-6-1	6.0	35	435	5±1	45	—	—	
3	33-6-2	6.0	35	435	6±1	45	—	—	
4	33-6-3	6.0	35	435	8~13	45	—	—	
5	33-12-1	12.0	35	435	6±1	25	—	—	
6	33-12-2	12.0	35	435	8~13	75	—	—	
7	34-12	12.0	35	435	8~13	50	12~25	40	哈 汽
8	52-25-1	25.0	90	500	—	—	12~25	100	
9	54-25-1	25.0	90	500	8~13	72	12~25	54	
10	54-25-2	25.0	90	535	8~13	70	12~25	50	
11	54-25-3	25.0	90	500	—	—	—	—	

表 1-5 苏联各厂出产的凝汽式汽轮机

序号	型 式	蒸汽初参数		功 率 (千瓦)	轉 数	抽 汽 参 数		抽 汽 量		給水溫度	汽机冷却 水 溫
		絕 对 大气压	溫 度 (°C)			一 次	二 次	一 次 (吨)	二 次 (吨)		
1	AT-12	29	400	12	3000	—	—	60	—		
2	AK-25	29	400	25	3000	1.2~2.5	—	—	—		
3	AT-25	29	400	25	3000	1.2~2.5	—	100	—		
4	AII-25	29	400	25	3000	7±1	—	150	—		
5	AK-50	29	400	50	3000	—	—	—	—		
6	AK-50	29	400	50	1500	—	—	—	—		
7	AII-0.75	35	435	0.75	3000或1500	5±1	—	—	—	150	20
8	AK-1.5	35	435	1.5	3000或1500	—	—	—	—	50	20
9	AT-1.5		435	1.5	3000或1500	1.2~2.5	—	9	—	50	20
10	AII-1.5	35	435	1.5	3000或1500	5±1	—	12	—	150	20
11	AK-2.5	35	435	2.5	3000或1500	—	—	—	—	50	20
12	AT-2.5	35	435	2.5	3000或1500	1.2~2.5	—	14	—	150	20
13	AII-2.5	35	435	2.5	3000或1500	5±1	—	18	—	150	20
14	AK-4	35	435	4	3000	—	—	—	—	150	20
15	AT-4	35	435	4	3000	1.2~2.5	—	22	—	150	20
16	AII-4	35	435	16	3000	5±1	—	25	—	150	20
17	AK-6	35	435	6	3000	—	—	—	—	150	20
18	AT-6	35	435	6	3000	2~2.5	—	35	—	150	20
19	AII-6	35	435	6	3000	5±1	—	40	—	150	20
20	AK-12	35	435	12	3000	—	—	—	—	150	15
21	AT-12	35	435	12	3000	1.2~2.5	—	65	—	150	20
22	AII-12	35	435	12	3000	1.2~2.5	11±2	40	50	150	20
23	BПT-12	90	480	12	3000	1.2~2.5	—	30	40	215	20
24	BK-25	90	480	25	3000	—	—	—	—	215	15
25	BT-25	90	480	25	3000	1.2~2.5	—	100	—	215	20
26	BПT-25	90	480	25	3000	1.2~2.5	8~13	60	80	215	20
27	BK-50	90	480	50	3000	1.2~2.5	—	—	—	215	10.15
28	BK-100	90	500或535	100	3000	—	—	—	—	215	10.15

第二章 汽轮机级的工作原理

从第一章中可以了解到,組成汽輪机的基本部分是級(噴管与叶片),蒸汽的热能轉变为汽輪机轉子的机械能是由于汽流在噴管以及动叶柵中流动而引起的,如果掌握了汽輪机級內的能量轉換过程,那末对整台汽輪机工作原理也就不难理解了。所以本章从热工学中已学过的水蒸汽在管道中流动的理论出发,着重介绍汽流动能在动叶柵中所产生的功率大小,噴管动叶柵的损失和主要尺寸的計算等内容。

第一节 气体的基本流动方程

当气流流过某一管道时,其参数也随之发生变化,对蒸汽在噴管中膨胀来讲,它是一个热能降低动能增加的过程,因此蒸汽在噴管中流过后蒸汽的压力 p , 温度 t , 热焓 h 降低,而流速 C , 比容 v 增大。

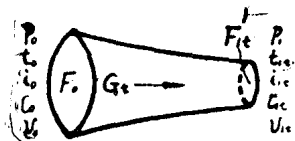


图 2-1 理想汽流通道

图 2-1 示有喷嘴一只。在理想过程中，经过喷嘴流量为 G_t ，进出口汽态分别为 p_0, t_0, i_0, c_0, v_0 和 p_1, t_1, i_1, c_1, v_1 。

为了研究蒸汽在喷嘴中的流动理论，引出下列几个基本的流动方程式。同时为了使讨论简便起见，假设汽流流过喷嘴时为稳定流动（喷嘴内任意点的汽态不随时间而变化）和单元流动（汽态只在一个方向发生变动）。

一、运动量方程式

设有一管道，其横截面逐渐改变（见图 2-1），若蒸汽流过此管道（是绝热的过程，则汽流在管道进出口动能的）增量，是由于汽流膨胀所引起的，它们之间的关系可由下式来决定：

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2g} = \int_{p_1}^{p_0} v dp$$

等式的左边为汽流动能的增量，右边则为流动时所做的膨胀功。

又因
$$v_0 p_0^{\frac{1}{K}} = v_1 p_1^{\frac{1}{K}} = v p^{\frac{1}{K}}$$

即
$$v = v_0 p_0^{\frac{1}{K}} p^{-\frac{1}{K}}$$

代入上式后得
$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2g} = v_0 p_0^{\frac{1}{K}} \int_{p_1}^{p_0} p^{-\frac{1}{K}} dp$$
 积分后所得到的公式即为运动量方程式：

$$\frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2g} = \frac{K}{K-1} p_0 v_0 \left(1 - \left(\frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{K-1}{K}} \right).$$

如果用来求喷嘴出口的速度 c_{1t} ，则可化成如下形式：

$$c_{1t} = \sqrt{2g \frac{K}{K-1} p_0 v_0 \left(1 - \varepsilon_1^{\frac{K-1}{K}} \right) + c_0^2} \quad (2-1)$$

式中 ε_1 ——喷嘴前后压力比 $\varepsilon_1 = p_1/p_0$ ；

K ——绝热指数；

$K = 1.935 + 0.1x$ ；（干度为 x 的饱和蒸汽）

$K = 1.135$ （干饱和蒸汽）

$K = 1.3$ （过热蒸汽）

从上式可知，喷嘴出口的蒸汽速度是由参数的变化来决定的。并且与最初的动能有关，当最初的动能很小时，我们可以把它忽略不计。

则公式(2-1)可写成：

$$c_{1t} = \sqrt{2g \frac{K}{K-1} p_0 v_0 \left(1 - \varepsilon_1^{\frac{K-1}{K}} \right)} \quad (2-2)$$

如果最初的动能不能忽略，那末我们可以假定这一动能是由于蒸汽从某一假想参数 P_0, ϕ ， v_0, ϕ 等熵膨胀到实际汽流中所具的参数 P_0, v_0 时所引起的。在 P_0, ϕ, v_0, ϕ 参数之下，初速等于零，换言之，参数 P_0, ϕ, v_0, ϕ 是以初速 C_0 从 P_0, v_0 等熵滞止到没有速度，因此我们称 P_0, ϕ, v_0, ϕ 为滞止参数。根据上面的定义，可以在初参数 P_0, v_0 的基础上加一段相当于初