

内 容 提 要

前 言

本书是根据 1990 年 6 月在安徽马鞍山召开的全国热能工程专业协作会议的决定,由重庆大学、江苏石油化工学院、山东工业大学、河北工学院四校合作编写。

本书是一本高等工程教材,编者力图从工业汽轮机的基本原理、结构特点、调节和运行等方面少而精、系统的为学生奠定坚实的理论基础,同时注意了与工程实际的结合和吸收国外资料,对于与汽轮机相类似的燃气轮机装置也作了必要的论述,以扩大学生的知识面。

重庆大学侯曼西担任主编并编写前言、第一章、第四章、第五章、第八章;江苏石油化工学院肖立川编写第二章、第三章;山东工业大学刘振乾编写第六章、第七章;重庆大学凌建编写第九章;河北工学院喻颐秦编写第十章。

本书由西安交通大学蔡颐年教授、王璧玉教授主审。

本书的出版得到全国高等院校热能工程专业协作委员会、兄弟院校和杭州汽轮机厂、东方汽轮机厂、洛阳发电设备厂、龙桥发电厂等的大力支持,编者在此深表谢意。

由于水平有限,本书不足之处恳请读者批评指正。

编者

1994 年 6 月

目 录

第一章 工业汽轮机概述	1
第一节 工业汽轮机装置.....	1
第二节 工业汽轮机的分类与型号.....	2
第三节 大型合成氨工厂用工业汽轮机.....	4
第四节 国内外工业汽轮机的发展.....	7
第二章 级的工作原理	9
第一节 基本概念.....	9
第二节 蒸汽在喷嘴中的流动.....	12
第三节 蒸汽在动叶栅中的能量转换.....	19
第四节 级的工作过程.....	24
第三章 单级工业汽轮机	37
第一节 单级工业汽轮机的型式及用途.....	37
第二节 双列速度级工业汽轮机.....	41
第三节 单级工业汽轮机热力计算程序.....	45
第四节 单级工业汽轮机的技术规范.....	50
第四章 多级工业汽轮机	51
第一节 多级工业汽轮机的形成.....	51
第二节 多级工业汽轮机的热力设计.....	64
第三节 多级工业汽轮机的系列化.....	88
第五章 工业汽轮机的变工况	96
第一节 级的变工况.....	96
第二节 级组的变工况.....	105
第三节 配汽方式与机组的变工况特性.....	111
第四节 变工况的热力校核计算.....	117
第五节 驱动用工业汽轮机的变工况.....	127
第六章 工业汽轮机的结构	132
第一节 工业汽轮机的转动部分.....	132
第二节 工业汽轮机的静止部分.....	139
第三节 叶片振动及其技术处理.....	144
第四节 转子的临界转速与振动.....	152
第七章 工业汽轮机的调节	156
第一节 工业汽轮机的自动调节系统.....	156
第二节 调节系统的静态特性及其组成.....	160
第三节 调节系统的动态特性及对调节系统的要求.....	174

第四节 工业汽轮机的保护装置·····	177
第八章 凝汽设备 ·····	180
第一节 凝汽设备的作用及组成·····	180
第二节 表面式凝汽器·····	181
第三节 抽气器·····	189
第四节 凝汽设备的变工况·····	191
第五节 凝汽设备的运行·····	196
第九章 工业汽轮机的运行 ·····	199
第一节 工业汽轮机的启动·····	199
第二节 正常停机与事故停机·····	206
第三节 工业汽轮机的正常运行·····	210
第四节 工业汽轮机的事故处理·····	219
第十章 燃气轮机 ·····	223
第一节 燃气轮机装置概述·····	223
第二节 燃气轮机的热力循环·····	226
第三节 燃气轮机的热力计算·····	236
第四节 燃气轮机的结构·····	241
参考文献 ·····	256

第一章 工业汽轮机概述

工业汽轮机是指除中心电站用汽轮机、船舶用汽轮机以外的,主要用于工业生产中作为工厂自备电站或区域发电站用以及驱动用的变转速汽轮机。

工业汽轮机是以蒸汽为工质的旋转式热力原动机械,它既要与锅炉及其辅助设备配合工作又要与被它驱动的发电机、水泵、风机、压缩机等从动机械相配合协调工作。因此,与中心电站固定转速的汽轮机相比,它更具有由于使用目的不同而带来的特殊要求。具有转速较高、热力参数、功率及转速变化范围较大,应用广泛,品种繁多等特点。

近几十年来,随着工业的发展,工业汽轮机为各类工业部门提供动力,形成了一个新兴的工业部门,在国民经济中起着重要的作用。

第一节 工业汽轮机装置

工业汽轮机装置如图 1-1 所示。由工业生产部门或地区发电站的锅炉 2 产生的蒸汽,推动工业汽轮机 4 输出机械功,实现热能变为动能的转变。作过功的废汽排入凝汽器 5 中,经冷却水冷凝为凝结水,水泵 1 将凝结水输送回锅炉形成闭合循环。主机经靠背轮与从动机械 6 相连,为工业部门提供动力或电力。

锅炉设备因各工业部门的工艺流程而不相同,可以专为驱动工业汽轮机而设立锅炉设备,亦可在工厂总蒸汽管道系统的分汽缸上引出蒸汽。一个工厂有多台工业汽轮机,除每台机组各有独立的凝汽器外,也可将它们的排汽引入一个公用的凝汽器中。辅助管路和辅助设备亦有实行母管制或互为备用的各种方案。

从动机械的种类有多种,由工业汽轮机直接带动发电机时,由于电能生产要求稳定的周波和电压,这类工业汽轮机应是转速恒定的。而驱动水泵、压缩机、风机等从动机械的工业汽轮机应按从动机械的负荷变化而改变转速以达到调节水量、工作介质流量和风量等,从而达到生产系统的要求,因此这类工业汽轮机是变转速的。

就工业汽轮机本身结构而言,由于采用的工作原理、热力过程的设计方案及组合方式的不同,又可分为各种类型。

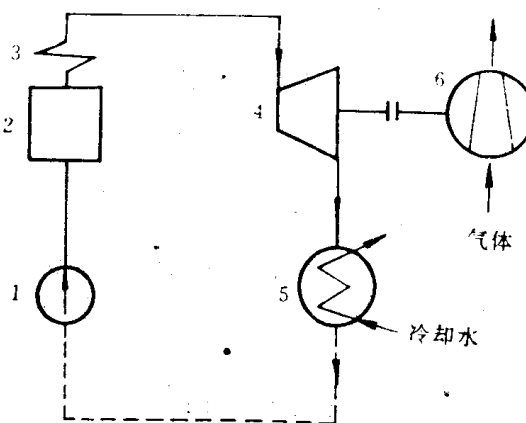


图 1-1 工业汽轮机装置简图

1—给水泵;2—锅炉;3—过热器;
4—工业汽轮机;5—凝汽器;6—离心式压缩机

第二节 工业汽轮机的分类与型号

工业汽轮机的分类方法较多,现着重论述按工作原理、热力过程、结构特点、新蒸汽参数和应用范围五个方面的分类。

一、按工作原理分类

1. 冲动式工业汽轮机

按冲动作用原理设计,蒸汽主要在汽轮机级的喷嘴中膨胀或在动叶中有少量膨胀的汽轮机都统称为冲动式工业汽轮机。其转子采用转盘式,按机组功率大小在一个主轴上设置一个或多个转盘。

2. 反动式工业汽轮机

各级按冲动和反动原理设计,蒸汽在汽轮机级的喷嘴和动叶中相等的膨胀的汽轮机称为反动式工业汽轮机。其转子采用转鼓结构,有些机组的调节级采用冲动级或速度级,而非调节级采用反动级也一并称为反动式汽轮机。

二、按热力过程分类

1. 凝汽式工业汽轮机

工作蒸汽全部排入冷凝器的汽轮机称为纯凝汽式的工业汽轮机。为提高工业汽轮机装置的效率,采用回热抽汽加热给水,除回热抽汽外其余蒸汽全部进入冷凝器的汽轮机也称为凝汽式工业汽轮机。

2. 抽汽凝汽式工业汽轮机

抽汽除供给水加热外,另有供给工业及采暖热负荷的抽汽,其余蒸汽进入冷凝器的汽轮机称为抽汽凝汽式工业汽轮机。抽汽压力在一定范围内可调节,又称调节抽汽凝汽式工业汽轮机。

3. 背压式工业汽轮机

作过功的蒸汽在高于大气压下排出机外,排汽可供工业或采暖热负荷用汽,称为背压式工业汽轮机。排汽压力较高直接供给中、低压汽轮机工作蒸汽的称为前置式工业汽轮机,也属于背压式机类型。

4. 抽汽背压式工业汽轮机

工作蒸汽在机组的某中间级抽出供工业用汽,排汽供采暖及其它热负荷用的汽轮机称为抽汽背压式工业汽轮机。因抽汽可在一定压力范围内调节,又称调节抽汽背压式工业汽轮机。

三、按结构特点分类

1. 单级工业汽轮机

由一个冲动级或一个双列速度级组成的小型工业汽轮机,结构简单,应用广泛,称为单级工业汽轮机。

2. 多级工业汽轮机

由多个级首尾相连组成的工业汽轮机称为多级工业汽轮机。由于配汽方式的不同又分为有调节级的喷管配汽的多级汽轮机和无调节级的节流配汽的多级汽轮机,都可称为多级工业

汽轮机。

四、按新蒸汽参数分类

1. 低压工业汽轮机

低压工业汽轮机新汽压力为 1.18~1.47MPa。

2. 中压工业汽轮机

中压工业汽轮机新汽压力为 1.96~3.92MPa。

3. 高压工业汽轮机

高压工业汽轮机新汽压力为 11.77~13.73MPa。

五、按应用范围分类

1. 发电用工业汽轮机

区域发电站、工厂自备电站带动发电机用工业汽轮机,要求机组为恒定转速。

2. 驱动用工业汽轮机

用于化工、石油、钢铁等工业企业中用以带动给水泵、离心式压缩机、鼓风机等的工业汽轮机,要求变动速度以适应从动机械变负荷的要求。

工业汽轮机的型号,各国编制方法各不相同,欧美及日本的工业汽轮机型号均按各制造厂家传统规范编制,无统一标准。

美国 ELLIOTT(意洛特)小型工业汽轮机的型号编制,分为 YR 系列(单级工业汽轮机)和 E 系列(多级工业汽轮机)两种,举例如下:

YR 系列

$$\frac{\Delta}{1} \quad \frac{\Delta}{2} \quad \frac{\Delta}{3}$$

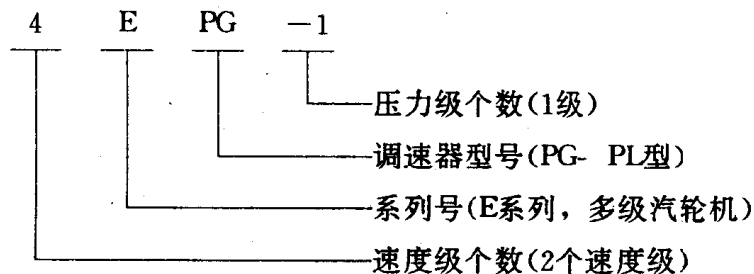
1. 用英文字母表示叶轮节径(A——14 英寸,B——18 英寸,C——22 英寸,D——28 英寸)。注:1 英寸=25.4mm。

2. 用英文字母 YR 表示叶轮为一个速度级。

3. 用英文字母表示特殊条件,M——表示出口管加大,H——背压式(背压 250 磅/英寸²),HH——背压式(背压 350 磅/英寸²)。注:1 磅/英寸²=6894.76Pa。

例如,BYRH 型洛意特出品的工业汽轮机,表示该机为叶轮节径为 18 英寸,由一个速度级组成的,背压为 250 磅/英寸² 的背压式工业汽轮机。

E 系列



我国工业汽轮机型号,全国统一编制,分为单级与多级两种系列。

单级工业汽轮机型号由四部分组成

$$\frac{\Delta}{1} \quad \frac{\Delta}{2} \quad \frac{\times \times}{3} \quad \frac{\Delta \Delta}{4}$$

“1”为工业汽轮机型式标记,用汉语拼音字母表示。

B——背压式,N——凝汽式。

“2”为新蒸汽参数标记,对于压力高于 3.43MPa,温度为 435°C 的高压蒸汽,用汉语拼音字母 G 表示,压力低于 3.43MPa 则不作标记。

“3”为叶轮节圆直径,取二位数用厘米为单位的圆整阿拉伯数表示。若为双列速度级则以第一级列叶片的轮缘直径表示。

“4”为特殊结构标记,用汉语拼音字母表示。

G——带变速齿轮箱,D——单列级叶轮,H——回流式,X——悬臂式,按字母顺序排列。

例如,B32GDH 型工业汽轮机即表示为背压式,低蒸汽参数,叶轮轮缘直径为 32cm,带变速齿轮箱,单列,回流式工业汽轮机。

多级工业汽轮机型号编制方法为六部分组成,介绍于后:

$$\frac{\Delta}{1} \quad \frac{\Delta}{2} \quad \frac{\Delta}{3} \quad \frac{\times \times}{4} / \frac{\times \times}{5} / \frac{\times \times}{6}$$

“1”为抽汽标记,若为抽汽式用 C 表示。

“2”为排汽标记,B—背压式,N—凝汽式,S—双分流凝汽式。

“3”为新蒸汽参数标记,压力 > 3.43MPa(435°C),用 G 表示;压力 = 2.35~3.43MPa(390~435°C),用 Z 表示,压力 < 2.35MPa 不作标记。

“4”为调节级叶轮轮缘直径,用厘米表示。

“5”为末级叶轮轮缘直径,用厘米表示。

“6”为叶轮个数,用二位数的阿拉伯数表示。

例如 NZ70/52/09 型工业汽轮机,表示凝汽式,中参数,调节级叶轮轮缘直径为 70cm,末级叶轮轮缘直径为 52cm,共 9 级的工业汽轮机。

第三节 大型合成氨工厂用工业汽轮机

现代工业企业中,工业汽轮机得到广泛的应用及迅速的发展。工业汽轮机的配置、系列布置应根据企业的生产工艺的整体要求来进行。现以大型合成氨工厂用工业汽轮机的设计方案为例来阐明工业汽轮机在企业中的作用与地位。

如图 1-2 所示为大型合成氨工厂热力系统简图。全厂使用的蒸汽为三种规范,即高压蒸汽(10.5MPa)系统、中压蒸汽(3.85MPa)系统、低压蒸汽(0.35MPa)系统。该图最上一排为化工生产过程示意图,从天然气经脱硫、转化炉、变换炉、脱碳、甲烷化炉、合成塔等工艺流程生产出氨的过程中,有多项吸热和放热过程,吸热时由蒸汽系统提供换热设备热能,放热时将其热能经换热设备回收并入相关系统。如二段转化炉放热被给水吸收变成高压蒸汽贮存于汽包,甲烷化炉及合成塔放出的热量加热锅炉给水,低压蒸汽可用于润滑油加热、贮槽加热、建筑物取暖等,系统能有效合理地利用各种品位的热能。

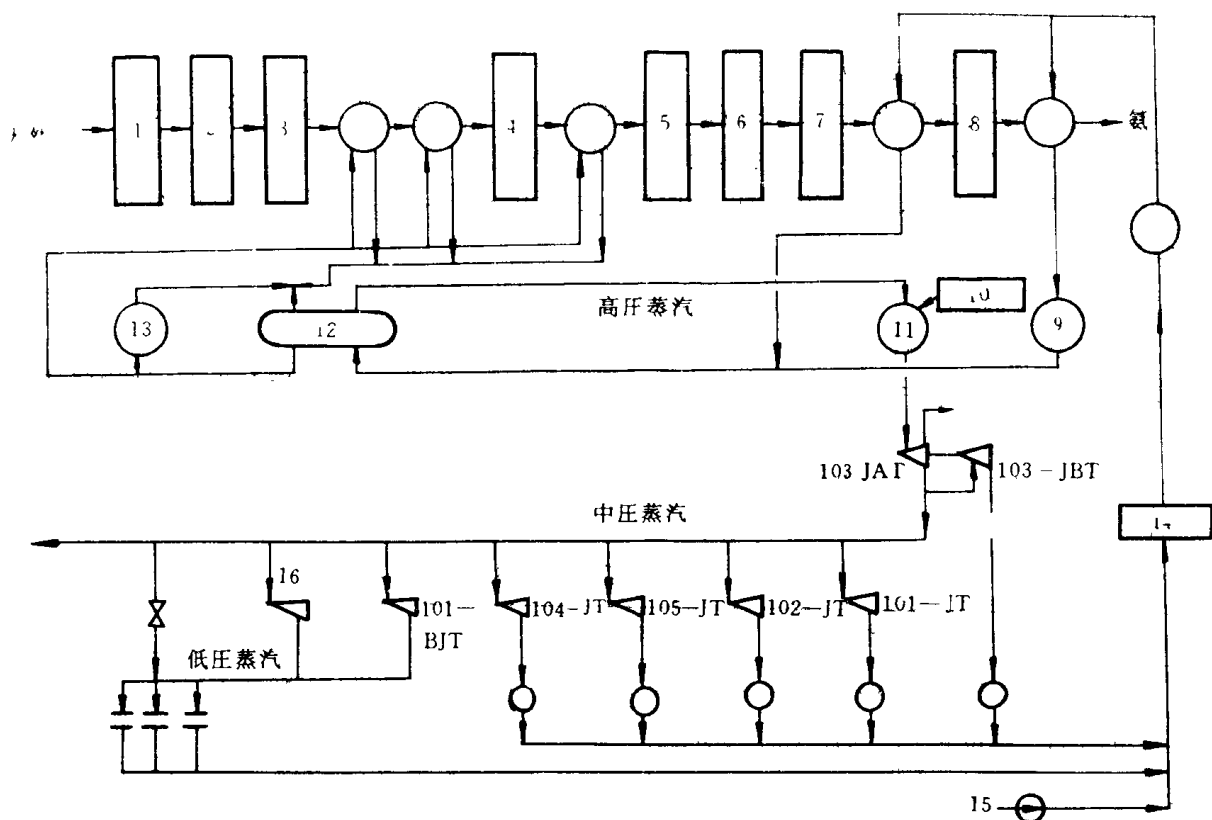


图 1-2 大型合成氨用工业汽轮机系统

1—脱硫;2—一段转化炉;3—二段转化炉;4—高温变换炉;5—低温变换炉;6—脱碳;
7—甲烷化炉;8—合成塔;9—锅炉给水预热器;10—对流段;11—过热器;12—汽包;
13—辅助锅炉;14—水处理;15—锅炉给水补充泵;16—其它工业汽轮机

一、输入蒸汽及锅炉设备

大型合成氨系统设有汽包汇集由生产系统放热反应加热给水产生的蒸汽,其工作压力为 10.5MPa,温度 314℃,经转化炉对流段的再加热而成过热蒸汽压力 10.5MPa,温度 410℃,为全系统输入蒸汽源。

系统内还装有两台快装式锅炉,锅炉工作压力为 3.85MPa,产汽量共 70t/h,与系统的中压蒸汽管道相连接。在合成氨系统开工初期,由该锅炉对设备进行清扫,并作为中压和低压蒸汽的汽源。当与汽包相连的辅助锅炉投产后,快装锅炉停运。

二、工业汽轮机的配置

1. 高压工业汽轮机

系统中有一台高压汽轮机。美国型合成氨系统配置一台背压式汽轮机,用其排汽作为中压汽轮机工作蒸汽,与该机同轴运转的还有一台中压凝汽式汽轮机共同驱动合成气压缩机。日本型、法国型合成氨系统是采用抽汽凝汽式工业汽轮机驱动合成压缩机,当高压汽轮机停运时,由减温减压装置供中压蒸汽。前置式高压汽轮机进汽压力为 10.5MPa、温度 410℃,排汽压力

为 3.85MPa、温度 320℃。同轴中压凝汽式汽轮机进汽参数与前置式排汽相同，而排汽压力为 0.013MPa。

2. 中压工业汽轮机

(1) 中压凝汽式工业汽轮机

直接驱动原料气压缩机、空气压缩机、氨压缩机均为中压凝汽式工业汽轮机，与前所述合成气压缩机统称为“四大机组”，为合成氨系统的骨干机组。

除“四大机组”外，驱动锅炉给水泵、一段转化炉引风机、半贫液循环泵和贫液循环泵等均采用凝汽式工业汽轮机。

凝汽式工业汽轮机进汽参数为压力 3.85MPa、温度 320℃。

(2) 中压背压式工业汽轮机

驱动合成氨系统各种泵类的小型汽轮机均采用背压式机组，以取其设备简单、结构紧凑、操作方便、可以分散独立工作的特点。如冷凝水泵、润滑油与密封油泵、脱盐水泵、CO₂ 再生塔回流泵、冷氨产品泵、一乙醇胺循环泵等均由中压背压式机直接驱动，其排汽作为低压蒸汽系统汽源。

表 1-1 大型合成氨工厂用工业汽轮机表

序号	工位号	进汽参数		排汽参数		转速 (r/min)	功率 (kW)	汽耗率 (kg/kW·h)	流量 (t/h)
		压力(MPa)	温度(℃)	压力(MPa)	温度(℃)				
1	103-JAT	10.5	441	3.5	321	10313	13191.75	32.6	260.195
2	103JBT	3.8	321	0.07	115	10313	1658	10.2	247
3	101-JT	3.8	321	0.07	115	7090	7275	8.4	36.959
4	102-JT	3.8	321	0.07	115	10800	3750	4.31	21.546
5	104-JT	3.8	321	0.07	115	3430	1331.2	6.12	10.87
6	105-JT	3.8	321	0.07	115	7035	8400	8.3	42.166
7	101BJT	3.8	321	0.07	115	4670	360	10.88	5.225
8	110B-JT	3.8	321	0.07	115	2970	22.5	36.2	1.088
9	1107-JBT	3.8	321	0.07	115	3640	397.5	7.95	4.207
10	1110-JAT	3.8	321	0.07	115	3650	180	9.97	2.395
11	112-JT	3.8	321	0.07	115	1475	67.5	31.7	2.857
12	1110-JCT	3.8	321	0.07	115	3650	180	19.1	4.572
13	2201-JAT	3.8	321	0.07	115	4605	787.5	18	8.573
14	2206-JT	3.8	321	0.07	115	2970	12.97	75	0.509
15	161-JT	3.8	321	0.07	115	2970	11.25	36.2	0.541

* 大型合成氨系统共有工业汽轮机 20 多台。

中压背压式机进汽压力为 3.83MPa、温度 321℃，排汽压力为 0.35MPa、温度 235℃。

系统中工业汽轮机直接驱动压缩机、风机和泵有许多优点，汽轮机比电动机起动扭矩大，升速平稳；直接与高速从动机械连接不需要齿轮增速箱，安装调试简便；汽轮机可以在较大范

围内改变转速,以适应被驱动机械变负荷的要求;汽轮机较发电机更易达到防爆防火的要求;在电源故障时,汽轮机有热力系统调剂及其蒸汽储备也不会像电动机那样突然停车,对于保证系统安全运行也有一定作用。

三、冷凝水系统

美国型大型合成氨系统的冷凝水系统采用统一规划、设备简明、管理集中、投资节省的设计方案。凝汽式工业汽轮机排汽进入共用的凝汽器中,再由冷凝水泵输送至除氧器进行除氧,中间经过混合床精制器。冷凝水还可以作为二段转化炉和第一废热锅炉的水夹套中的冷却水的来源。合成氨生产过程中所产生的冷凝水,如 CO_2 再生塔蒸汽再沸器、 H_2S 再生塔再沸器等,根据压力的高低分别返回凝汽器或除氧器。所有除氧器的凝结水经给水泵送入锅炉。美国型合成氨装置只有一台凝汽器,对工业汽轮机装置的可靠性有所影响。而日本、法国型装置中,每台凝汽式汽轮机都有其各自的凝汽器,工作更可靠。

综上所述,工业汽轮机在现代化大型企业中扮演了重要的角色。它既能合理的、有效的利用热能,提供热电联合生产的手段,又能直接驱动生产过程的从动机械,对企业实现热、电、机械能综合合理利用、节约能源、降低生产成本有重要作用。

表 1-1 所示为大型合成氨工厂所用汽轮机的技术规范表。

第四节 国内外工业汽轮机的发展

据 1980 年前后不完全统计,全世界工业汽轮机生产概况如表 1-2 所示。工业汽轮机在传统的热电并供领域内得到发展的同时,在一个新兴的且不断扩大的工业驱动领域内得到快速的更大范围的应用。

表 1-2 工业汽轮机产量统计表

应用领域	总装机容量 (MW)	年装机容量 (MW)	年增长率 (%)	单机功率 (kW)	台数估计	
					总数	年产量
热、电用	90000~100000	≈3000	≈4.0	1000~10000	≈10000	300~400
驱动用	30000~36000	≈2000	≈4.0	1~50000	10000~20000	1000~1500

在石油工业中,乙烯生产过程采用工业汽轮机驱动裂解气压缩机、丙烯压缩机、乙烯冷冻压缩机和原料气压缩机等,其中驱动裂解气压缩机的工业汽轮机功率为 4.5MW,蒸汽流量为 37.5t/h,驱动丙烯冷冻压缩机的工业汽轮机,为防止工作气体过热,要求快速起动,技术要求很高。

煤的气化、液化及合成燃料加工、液化天然气工艺中均需要中压或高压工业汽轮机驱动压缩机,如美国 GE 公司和法国 CNIM 合作生产的背压式工业汽轮机进汽参数为压力 3.7MPa、温度 420℃,排汽压力 0.98MPa,功率为 10.954MW,转速 7863r/min,在这些领域应用广泛。

冶金工业中,驱动高炉鼓风机用的工业汽轮机,一般采用中参数、低转速且变转速的凝汽式机组功率为几十至几万 kW,美国 Fairfield 工厂安装的这类机组,进汽参数为压力 6.03MPa、温度 482.2℃,功率为 32.3MW,转速 3938r/min。

中心电站的锅炉给水泵也由工业汽轮机驱动,给水泵用凝汽式工业汽轮机进汽压力一般

为 $0.4 \sim 1.0 \text{ MPa}$, 总绝热焓降为 $750 \sim 1050 \text{ kJ/kg}$, 汽耗率为 $4 \sim 5 \text{ kg/kW} \cdot \text{h}$, 工作转速较高, 一般为 $4500 \sim 6000 \text{ r/min}$ 。给水泵用背压式工业汽轮机, 它的汽源来自主机中间再热器前的蒸汽管道, 排汽引入主机的热力系统, 给水泵用背压式工业汽轮机虽无凝汽器结构简单, 但由于与主机热力系统关系复杂, 应用没有前者广泛。

现代大型工业民用建筑物均采用空调系统, 以保证产品质量与工作人员及居住者的舒适性。驱动离心式制冷压缩机的工业汽轮机, 既可向建筑物供冷又可供暖, 有些设计还将汽轮机的低压排汽驱动吸收式制冷机供空调系统的冷量补充也是一种节能手段。在国外的大型宾馆、医院、办公楼有所应用。

传统的热电并供系统的工业汽轮机应用于区域发电站、工厂自备电站中, 特别是在制糖、造纸、轻工、化肥等工业中应用普遍。

国外工业汽轮机制造厂家很多, 如美国意洛特(ELLIOTT)工厂、意大利新比隆公司、德国西门子(Siemens)工厂和日本三菱重工等。我国的杭州汽轮机厂、东方汽轮机厂、洛阳发电设备厂、青岛汽轮机厂、南京汽轮机厂是主要的制造厂家。有关国内外厂家的部分产品规范, 将在单级及多级工业汽轮机的有关章节中介绍。

第二章 级的工作原理

第一节 基本概念

工业汽轮机是利用蒸汽的热能作功的旋转式原动机。

工业汽轮机的工作原理是应用喷嘴使蒸汽的热能转变为速度能,从喷嘴流出的高速蒸汽进入弯曲的动叶流道,在流动的过程中对动叶产生作用力,推动动叶作圆周运动,带动叶轮和转轴旋转,从而汽轮机转轴可对外输出机械功。通常由若干个喷嘴组成一系列静叶栅组装于隔板或汽缸上。动叶片均匀嵌装于叶轮的外缘,组成一系列动叶栅。由一系列静叶栅和一系列动叶栅组成的一个能量转换的基本单元,称为汽轮机的级。汽轮机则由一个或若干个级组成。对工业汽轮机工作原理的研究,必须先研究级的工作原理。

一、汽轮机级的工作原理

根据蒸汽在级内进行能量转换机理的不同,可分为冲动级和反动级。

1. 冲动级工作原理

图 2-1(a)是最简单的单级冲动式汽轮机。具有一定压力和温度的蒸汽进入喷嘴 4,在喷嘴内降压、膨胀、加速,成为动能很大的蒸汽射入叶片 3。高速蒸汽沿叶片的弯曲流道流动的同时逐渐改变流动方向,流速逐渐降低,以冲动力作用于动叶。动叶被蒸汽的冲动力推动,安装有叶片的转轮随之旋转。蒸汽在冲动级内的能量转换,可分为二个阶段:第一阶段为蒸汽在喷嘴中膨胀、加速,压力和温度降低(焓值减少),蒸汽的热能转变为蒸汽的动能;第二阶段为蒸汽在动叶流道中流动将蒸汽的动能转换为转子的旋转机械能,并通过轴 1 带动从动机械转动而输出机械能。图(b)的上方还表示了蒸汽的压力和速度在喷嘴和动叶中的变化情况。

蒸汽的热能转变为动能的过程仅在喷嘴中进行,而在动叶中只是把蒸汽的动能转换为机械功的汽轮机级称为冲动级。

2. 反动级工作原理

当蒸汽从流道中流出的速度大于进入流道的速度时,在每一个蒸汽微团上产生一个沿着蒸汽流动方向的力,而在流道壁(即工作叶片)上也受到一个大小相同、方向相反的力,这个力称为汽流的反动力。

如图 2-2 所示,火箭发动时,燃料燃烧所产生的高压气体高速地从火箭尾部排向周围大气中,高压气体的每一微团就产生一个向下的力,而火箭上也受到一个大小相同、方向相反的力推动火箭向上运动,与高压气体流动方向相反的力即为反动力。

在反动级中,蒸汽在喷嘴中膨胀压力由 p_0 下降到 p_1 ,以较高的速度流入动叶流道,蒸汽沿着流道壁的内弧改变流动方向,产生冲动力 $\bar{F}_{im}$,在动叶流道内从压力 p_1 继续膨胀至压力 p_2 ,汽流加速对动叶片产生反作用力 $\bar{F}_r$,从而动叶受到由于冲动原理产生的冲动力和由于反动原理引起的反动力 $\bar{F}_r$ 合力 $\bar{F}$ 的作用(如图 2-3)。因此,反动级同时利用了冲动和反动两种

作用原理。

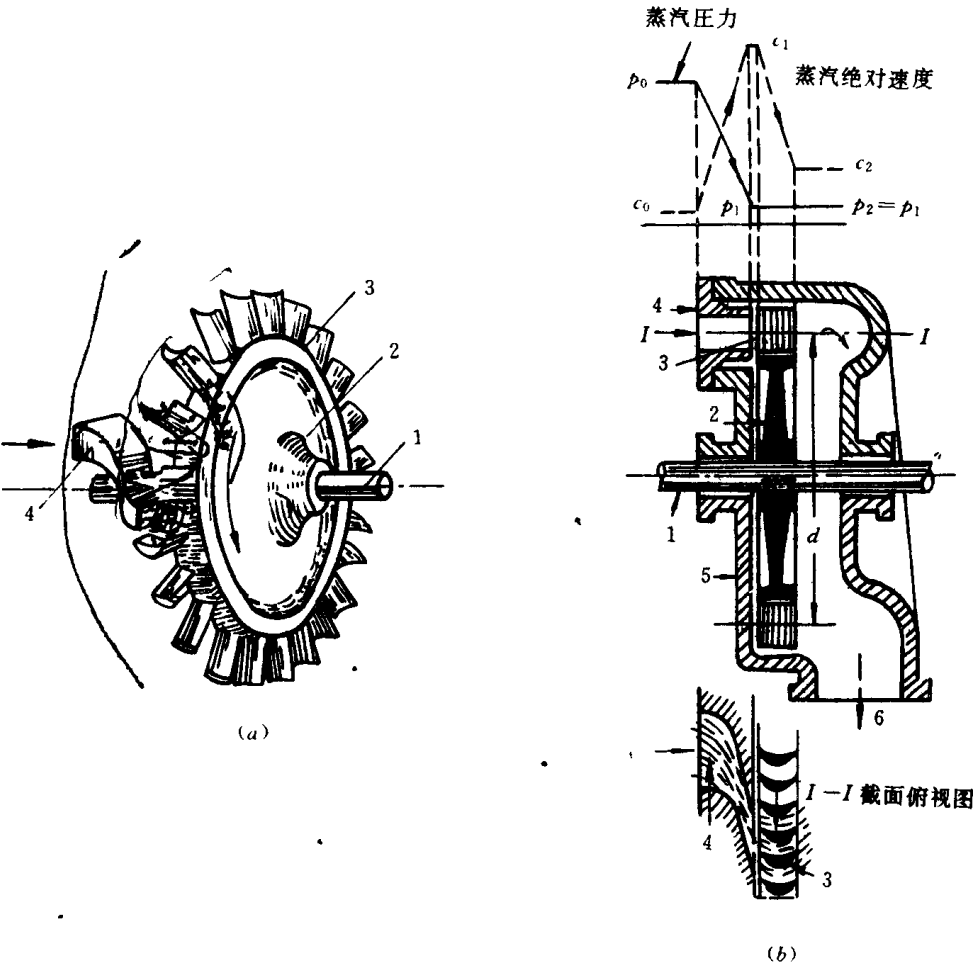


图 2-1 冲动式汽轮机示意图

- (a) 冲动式汽轮机简图

1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷嘴
- (b) 单级冲动式汽轮机的断面示意图

1—轴；2—叶轮；3—叶片；4—喷嘴；5—汽缸；6—排汽管

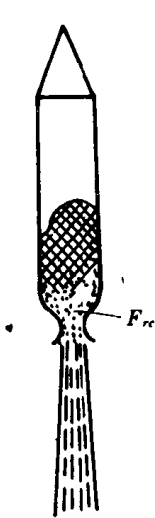


图 2-2 火箭工作原理示意图

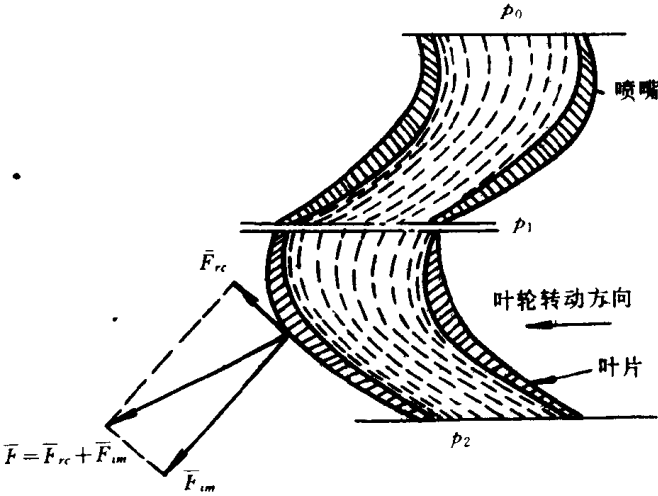


图 2-3 蒸汽对反动式汽轮机叶片的作用力

二、级内蒸汽流动的基本假设

研究蒸汽在级内流动与能量转换的过程时,为了研究问题方便起见,一般作如下一些基本假设:

(1)假设蒸汽是一元流动。即只考虑蒸汽在流动方向上的参数变化,而忽略垂直于流动方向上的参数变化。这种假设对于通流部分相对高度较小的短叶片是足够精确的。当通流部分相对高度较大时,可将通流部分沿高度方向分为若干区段进行研究,或应用三元流动的理论研究。

(2)设蒸汽在流道中是稳定流动。即在研究流道的任一截面上,蒸汽的状态参数不随时间而变化。在汽轮机级中,当负荷不变时,可以近似地认为是稳定流动。

(3)设流动是绝热的。由于级的流向距离很小,而蒸汽的流动速度很高,蒸汽通过汽轮机级的时间极短,在良好保温条件下,实际流动过程接近绝热过程。

蒸汽在级内的流动简化为可压缩流体的稳定、绝热一元流动。

三、蒸汽在流道中流动的基本公式

研究蒸汽在级内流动的基本规律时,在上述基本假设的条件下,建立了一些热力学和流体力学的基本公式。常用的有热力过程方程、连续方程、动量方程和能量方程。

1. 热力过程方程

在理想情况下,蒸汽在喷嘴或动叶片中的实际流动过程是绝热过程,其表达式为

$$pv^k = \text{常数} \quad (2-1)$$

式中 k ——绝热指数, $k = \frac{c_p}{c_v}$;

c_p ——定压比热, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$;

c_v ——定容比热, $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$ 。

将式(2-1)取自然对数并微分可得

$$\frac{dp}{p} + k \frac{dv}{v} = 0 \quad (2-2)$$

公式(2-1)中绝热指数 k 的值由实验确定,对于过热蒸汽, $k=1.3$; 干饱和蒸汽, $k=1.135$; 湿蒸汽, $k=1.035+0.1x$ (x 为蒸汽的干度)。

2. 连续方程

连续方程的一般表达式为

$$Gv = Ac \quad (2-3)$$

式中 G ——流过某一截面的流量, kg/s ;

A ——该截面的面积, m^2 ;

c ——该截面流体的流速, m/s ;

v ——该截面流体的比容, m^3/kg 。

连续方程的微分形式为

$$\frac{dA}{A} + \frac{dc}{c} = \frac{dv}{v} \quad (2-4)$$

研究喷嘴中蒸汽流动的特性,喷嘴截面沿流程变化的基本规律和喷嘴计算均要应用连续方程。

3. 动量方程

一元等熵流动的动量方程的表达式为

$$\text{微分形式} \quad -vdp = cdc \quad (2-5)$$

$$\text{积分形式} \quad \frac{c_{1t}^2 - c_0^2}{2} = \frac{k}{k-1} p_0 v_0 \left[\left(1 - \frac{p_1}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \quad (2-6)$$

式中 c_{1t} ——蒸汽流出喷嘴的理想速度, m/s;

c_0 ——蒸汽流入喷嘴的速度, m/s;

k ——绝热指数;

p_0, p_1 ——分别为蒸汽进入和流出喷嘴时的压力, MPa。

4. 能量方程

稳定流动能量方程一般表达式为

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} + q = h_1 + \frac{c_1^2}{2} + W \quad (2-7)$$

式中 c_0, c_1 ——分别为蒸汽进入和流出喷嘴的速度, m/s;

h_0, h_1 ——分别为蒸汽进入和流出喷嘴时的焓值, kJ/kg;

q ——蒸汽在喷嘴中流动时吸收外界的热量, kJ;

W ——蒸汽流过喷嘴时对外界作的功, kJ/kg。

第二节 蒸汽在喷嘴中的流动

一、蒸汽通过喷嘴叶栅时的能量转换

汽轮机的喷嘴叶栅是直接固定在汽缸上,或是固定在隔板上再装入汽缸内。因此,虽然蒸汽流过喷嘴时汽流和喷嘴之间有相互作用力,但由于喷嘴不运动,故蒸汽不会对外作机械功。蒸汽在喷嘴中的实际膨胀过程是有损失的流动过程,如汽流与流道壁面之间、汽流各部分之间会产生摩擦而形成能量损失。因此整个过程虽是绝热的,但不是等熵的。图 2-4 为蒸汽在喷嘴中流动过程的焓熵图。图中 0^*01t 为等熵流动过程, 0^*01 为实际绝热流动过程。实际过程中存在的流动阻力所产生的热量使喷嘴内每一个截面的蒸汽在等压下受热而熵值增加。因此整个过程曲线 0^*01t 位置移到右方 0^*01 位置。

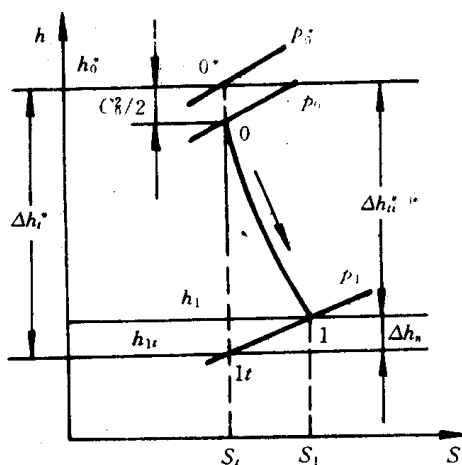


图 2-4 蒸汽的实际膨胀过程

工业汽轮机中,多数级蒸汽进入喷嘴时的初速是不等于零的,即 $c_0 \neq 0$ 。为了便于计算,设想将蒸汽等熵滞止到初速等于零的状态,称为滞止状态,滞止状态对应的参数为滞止参数。如图 2-4 中蒸汽进入喷嘴的入口状态点为“0”,其参数为 $p_0, t_0, h_0, c_0 \neq 0$,而滞止状态点为“0*”,其状态参数为 $p_0^*, t_0^*, h_0^*, c_0 = 0$ 。

滞止状态的焓值与入口状态的焓值有如下关系

$$h_0^* = h_0 + \frac{c_0^2}{2} \quad (2-8)$$

即 $q=0$, 喷嘴又不对外做功, 即 $W=0$, 则能量方程可简化为

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_1 + \frac{c_1^2}{2}$$

如果是理想流动, 则 $h_1 = h_{1t}$, $c_1 = c_{1t}$

$$h_0 + \frac{c_0^2}{2} = h_{1t} + \frac{c_{1t}^2}{2}$$

喷嘴出口处蒸汽的理想速度按下式计算

$$c_{1t} = \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} = 1.414 \sqrt{h_0^* - h_{1t}} \quad (2-9)$$

喷嘴出口处蒸汽的实际速度可写为

$$\begin{aligned} c_1 &= \varphi c_{1t} = \varphi \sqrt{2(h_0 - h_{1t}) + c_0^2} \\ &= \varphi \sqrt{2(h_0^* - h_{1t})} = \varphi \sqrt{2\Delta h_{1t}^*} \end{aligned} \quad (2-10)$$

在喷嘴的每一截面上汽流速度较相应的理论值有所降低。实际速度与理想速度的比值用 φ 表示, 称为喷嘴的速度系数。喷嘴中的实际焓降与理想焓降之比为

$$\frac{\Delta h_{1t}}{\Delta h_{1t}^*} = \frac{h_0^* - h_{1t}}{h_0^* - h_{1t}} = \frac{\varphi^2 c_{1t}^2}{c_{1t}^2} = \varphi^2 \quad (2-11)$$

φ^2 表示蒸汽通过喷嘴转换的理想能量中能够转换成蒸汽动能的百分比, 称为喷嘴的效率。喷嘴内的能量损失用 Δh_n 表示, 称为喷嘴损失, 其值为

$$\begin{aligned} \Delta h_n &= \Delta h_{1t}^* - \Delta h_{1t} = (1 - \varphi^2) \Delta h_{1t}^* = (1 - \varphi^2) \frac{c_{1t}^2}{2} \\ &= \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right) \Delta h_{1t}^* = \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1\right) \frac{c_1^2}{2} \text{ J/kg} \end{aligned} \quad (2-12)$$

损失的能量 Δh_n 与喷嘴中理想焓降 Δh_{1t}^* 之比称为能量损失系数, 用 ξ_n 表示。不难看出, ξ_n 为

$$\xi_n = \frac{\Delta h_n}{\Delta h_{1t}^*} = 1 - \varphi^2 \quad (2-13)$$

若用能量损失系数表示速度系数, 则

$$\varphi = \sqrt{1 - \xi_n} \quad (2-14)$$

式(2-13)及式(2-14)表示喷嘴的能量损失系数与速度系数的关系。

喷嘴的速度系数 φ 由实验确定, 并与许多因素有关。喷嘴的高度、表面光洁度、汽道的形状、蒸汽的压力比以及蒸汽的状态与品质等都影响 φ 值的大小。

喷嘴高度 l_1 与速度系数 φ 的关系如图 2-5 所示。由图可见, 速度系数 φ 随喷嘴高度

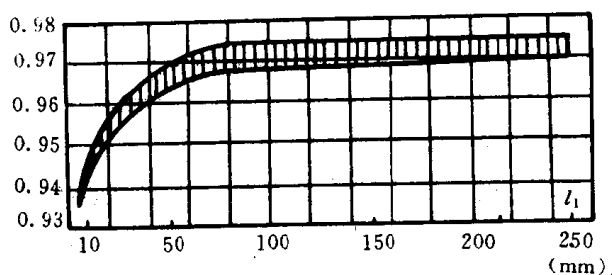


图 2-5 渐缩喷嘴的速度系数与喷嘴出口高度 l_1 的关系曲线