



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

汽轮机设备及运行

杨巧云 李建刚 主 编
杨雪萍 王学斌 副主编

行 动 导 向 式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十二五”职业教育国家规划教材
经全国职业教育教材审定委员会审定

汽轮机设备及运行

主 编 杨巧云 李建刚
副主编 杨雪萍 王学斌
编 写 李钰冰
主 审 黄树红



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书分为汽轮机设备认知、汽轮机工作过程分析、汽轮机启动、汽轮机运行维护、汽轮机停机及汽轮机典型事故处理六个学习情境，系统地介绍了汽轮机设备及汽轮机运行的知识。各学习情境分为若干学习任务，通过具体任务的实施，学习汽轮机设备、运行的专业知识，培养汽轮机运行维护的专业技能，提升综合素质。

本书可作为火电厂集控运行、电厂热动力装置、新能源发电技术等专业学生的学历教育教材，也可作为企业职工职业资格培训和岗位技能培训用书，还可供发电厂安装、调试、运行、检修和管理人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

汽轮机设备及运行/杨巧云, 李建刚主编. —北京: 中国电力出版社, 2014. 12

“十二五”职业教育国家规划教材

ISBN 978 - 7 - 5123 - 6579 - 7

I. ①汽… II. ①杨… ②李… III. ①火电厂—汽轮机运行—高等职业教育—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 234590 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2014 年 12 月第一版 2014 年 12 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 20 印张 491 千字

定价 40.00 元

敬 告 读 者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

❖ 前言

本教材采用行动导向编写方式，以岗位分析为基础，根据岗位规范和职业资格标准选取教学内容，并跟踪汽轮机的发展，加入新技术、新工艺，使教学内容具有较强的针对性、适应性、科学性和先进性。全书设计的学习情境由简单到复杂，由浅到深，符合学生的学习认知规律和能力递进的职业能力培养规律。

本书以汽轮机生产过程为主线序化教学内容，划分为六个学习情境，包括汽轮机设备认知、汽轮机工作过程分析、汽轮机启动、汽轮机运行维护、汽轮机停机及汽轮机典型事故处理。

本书由武汉电力职业技术学院杨巧云、郑州电力高等专科学校李建刚担任主编。杨巧云编写了学习情境二、四、五，并负责全书的统稿工作；李建刚编写了学习情境一中的任务一和任务二；郑州电力高等专科学校杨雪萍编写了学习情境一中的任务三和任务四及学习情境三；武汉电力职业技术学院王学斌编写了学习情境六；武汉电力职业技术学院李钰冰对书稿进行了整理。

本书由华中科技大学黄树红教授、国电汉川发电有限公司张国军高级工程师审阅。两位审稿老师对本书稿进行了认真的审阅，提出了许多宝贵的意见和建议，在此表示诚挚的感谢。

本书在编写过程中，参考了大量书籍及相关资料文献，同时得到了有关企业和院校领导、专家及老师的大力支持和热情帮助，在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中疏漏和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者

2014年9月

目 录

前言

学习情境一	汽轮机设备认知	1
	任务一 汽轮机初步认知	2
	任务二 汽轮机结构认知	12
	任务三 凝汽设备认知	56
	任务四 汽轮机调节及保护系统认知	73
	复习思考题	135
学习情境二	汽轮机工作过程分析	138
	任务一 汽轮机级的工作过程分析	138
	任务二 多级汽轮机工作过程分析	181
	复习思考题	195
学习情境三	汽轮机启动	197
	任务一 汽轮机启动方式选择	197
	任务二 汽轮机的冷态滑参数启动	211
	任务三 汽轮机的热态启动	225
	复习思考题	229
学习情境四	汽轮机运行维护	230
	任务一 汽轮机的变工况运行	230
	任务二 汽轮机运行中的监视和维护	261
	复习思考题	275
学习情境五	汽轮机停机	277
	任务一 汽轮机正常停机	277
	任务二 汽轮机故障停机	287
	复习思考题	290

学习情境六

汽轮机典型事故处理	291
任务一 汽轮机叶片损坏处理	292
任务二 汽轮机大轴弯曲处理	295
任务三 汽轮机进水处理	298
任务四 真空下降处理	301
任务五 汽轮机轴承损坏处理	304
任务六 汽轮机严重超速处理	305
任务七 汽轮机油系统故障处理	307
任务八 厂用电中断处理	310
复习思考题	312

参考文献	314
------------	-----

学习情境一

汽轮机设备认知



【学习情境描述】

以汽轮机实物、模型及火电机组仿真运行系统为教学载体,通过具体工作任务的实施,引导学生学习汽轮机做功基本理论及汽轮机设备的知识,培养对汽轮机设备的认知能力、分析汽轮机主要部件结构对其运行影响的能力及对汽轮机设备的运行情况进行监视和检查的初步技能。



【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握汽轮机的基本概念。
- (2) 掌握汽轮机本体的组成及其主要零部件的结构。
- (3) 掌握汽轮机主要零部件的工作特性。
- (4) 掌握汽轮机结构对其运行的影响。
- (5) 掌握凝汽设备的作用、组成及工作过程。
- (6) 熟悉凝汽器的组成部分及工作过程。
- (7) 掌握汽轮机调节系统的作用、组成及工作过程。
- (8) 熟悉功频电液调节系统的概念、工作原理,反调产生的原因及消除方法。
- (9) 掌握数字电液调节系统的工作原理、特性及主要设备。
- (10) 掌握汽轮机保护系统的功用、原理,汽轮机设置的主要保护项目。
- (11) 掌握汽轮机供油系统的作用、组成设备及工作过程。

2. 能力目标

- (1) 能说出汽轮机主要零部件的作用、形式及特点。
- (2) 能分析汽轮机主要部件结构对其运行经济性、安全性的影响。
- (3) 能分析说明影响凝汽器真空的因素。
- (4) 能分析调节、保护系统的工作流程;能看懂仿真机组上数字电液调节系统的各种画面,能在仿真机组上进行数字电液调节系统的相关操作与监控。
- (5) 能分析汽轮机供油系统的工作流程;能在仿真机组上进行油系统的启动操作。



【教学环境】

多媒体教室及多媒体课件,汽轮机实物或模型,火电机组仿真运行系统。

任务一 汽轮机初步认知



【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 了解汽轮机的基本结构。
- (2) 掌握级的基本概念及其做功原理。
- (3) 掌握级的类型及其特点。
- (4) 掌握汽轮机的分类及其型号。
- (5) 了解汽轮机的发展概况。

2. 能力目标

- (1) 根据汽轮机模型，能讲述汽轮机的基本结构及作用。
- (2) 能讲述汽轮机级的定义及作用，能定性讲述冲动作用原理与反动作用原理。
- (3) 能讲述级反动度的概念，能根据反动度将级进行分类，能讲述不同类型级的特点。
- (4) 能根据工作原理、热力特性、主蒸汽参数将汽轮机进行分类。
- (5) 能表述汽轮机的型号。

3. 素质目标

- (1) 培养团队意识与协作精神。
- (2) 培养刻苦钻研业务，爱岗、敬业的精神。
- (3) 培养安全和责任意识。



【任务描述】

汽轮机的初步认知是正确认知汽轮机设备和掌握汽轮机做功基本理论的重要基础。通过汽轮机实物或模型上的模拟，熟悉汽轮机的基本结构与组成，培养学生对汽轮机的初步认知能力，以及掌握汽轮机做功基本理论的初步能力。



【任务准备】

分析汽轮机初步认知工作任务单，明确该任务的内容、目标和要求；制定实施工作任务



【任务实施】

分析工作任务单；查阅汽轮机技术资料，熟悉汽轮机设备的基本构成；在教师的指导下，学习汽轮机的相关基础知识，在汽轮机实物或模型上完成对汽轮机的初步认知。



【相关知识】

汽轮机是以水蒸气为工质，将热能转变为机械能的高速旋转式原动机。与其他热力原动机相比，它具有单机功率大、效率较高、运转平稳、单位功率制造成本低和使用寿命长等优

点,因而得到广泛应用。汽轮机不仅是现代火电厂和核电站中普遍采用的发动机,而且还可设计成变速运行,广泛用于冶金、化工、船运等部门直接驱动各种从动机械,如各种泵、风机、压缩机和船动螺旋桨等。在使用化石燃料的现代常规火电厂、核电站、生物质电厂以及地热发电站中,汽轮机是用来驱动发电机生产电能的,故汽轮机与发电机的组合称为汽轮发电机组。全世界发电总量的绝大部分是由汽轮发电机组发出的,所以汽轮机是现代化国家中重要的动力机械设备。

一、概述

(一) 汽轮机基本结构

1. 基本结构简介

汽轮机是电厂最重要的设备之一,其作用是将水蒸气的热能转变为机械能。汽轮机从结构上可分为单级汽轮机和多级汽轮机。

图 1-1 所示为单级汽轮机主要部分结构简图。动叶按一定的距离和一定角度安装在叶轮上形成动叶栅,并构成了许多相同的蒸汽通道。动叶栅与叶轮以及叶轮轴组成汽轮机的转动部分被称为转子。静叶按一定距离和一定角度排列形成静叶栅,静叶栅固定不动,构成的蒸汽通道称为喷嘴,转子及静叶都装在汽缸内。具有一定的压力和温度的蒸汽先在固定不动的喷嘴中膨胀,膨胀时,蒸汽压力、温度降低而速度增加,在喷嘴出口形成高速汽流。从喷嘴出来的高速汽流,以一定的方向进入动叶通道,在动叶通道中汽流改变速度,对动叶产生一个作用力,推动转子转动做功。喷嘴的作用是将蒸汽的热能转换成动能。

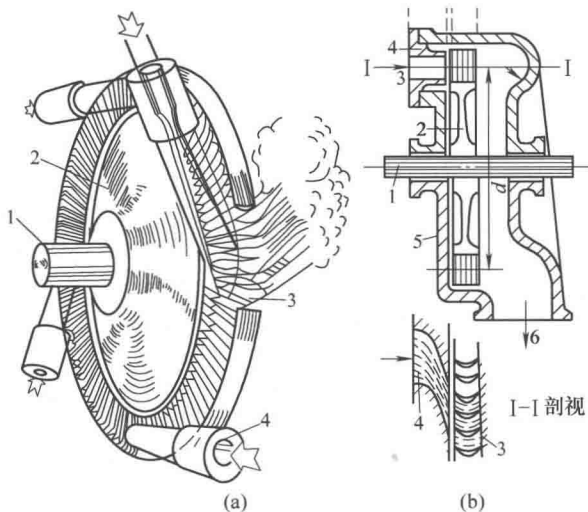


图 1-1 单级汽轮机主要部分结构简图

(a) 立体图; (b) 剖面图

1—主轴; 2—叶轮; 3—动叶; 4—喷嘴;
5—汽缸; 6—排汽口

动叶栅的作用是将来自喷嘴高速汽流的动能转换为机械能。一系列静叶栅和一系列动叶栅组成了从热能到机械能转换的基本单元,称为级。

汽轮机以转速 n 工作时,旋转着的动叶栅具有圆周速度 u (牵连速度)。假定从喷嘴出来的高速汽流速度为 c_1 (绝对速度),则蒸汽以相对速度 w_1 流进动叶通道。当蒸汽从动叶通道流出时,其相对速度为 w_2 ,绝对速度为 c_2 。动叶中蒸汽的绝对速度 c 、相对速度 w 以及动叶的圆周速度 u 之间的矢量关系为

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u} \quad (1-1)$$

由于单级汽轮机容量有限,故现代汽轮机均为多级汽轮机,它由按工作压力高低顺序排列的若干个级组合而成。图 1-2 所示为上海汽轮机厂生产的 1000MW 超超临界压力汽轮机组的纵剖面图,图 1-3 所示为上海汽轮机厂生产的 300MW 反动式汽轮机组的纵剖面图。虽然汽轮机由很多零部件组成,但概括地看,可分为转动部分(转子)和静止部分(定子)。转子主要由主轴和叶轮(反动式汽轮机为转鼓)以及叶轮上嵌有的动叶片等构成。静止部分

主要是汽缸、隔板（反动式汽轮机为静叶环）、静叶以及轴承等。汽缸的作用是将汽轮机中的蒸汽和大气隔开，形成蒸汽能量转换的密闭空间，并对汽缸内的其他部分起支承定位作用。根据机组容量的不同，汽缸可以是一个，也可以是多个。隔板装在汽缸内，隔板上装有喷嘴（静叶）。轴承分支承轴承和推力轴承。支承轴承用于保证定子对转子的支承作用，并且确定转子与定子的相对径向位置。推力轴承用于保证转子在轴向推力的作用下仍然能够维持相对于定子的正确轴向位置。

转子和定子之间的密封是用汽封来实现的。在汽轮机内部，凡是有压力差存在而又不希望有大量工质流过的地方都装有汽封。在汽缸的两端装有轴封，在多级汽轮机的级与级之间装有隔板汽封，在动叶顶部装有叶顶汽封。

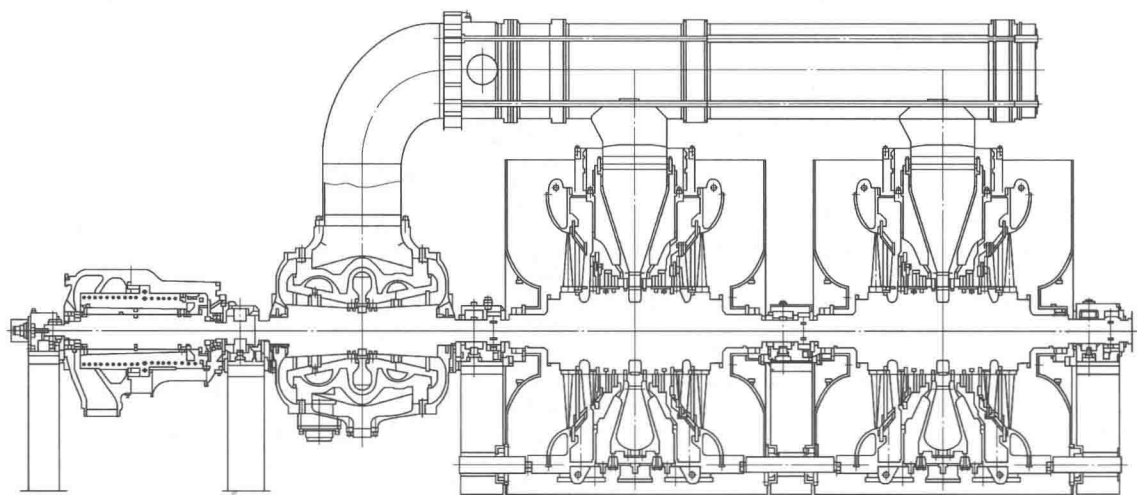


图 1-2 上海汽轮机厂生产的 1000MW 超超临界压力汽轮机组的纵剖面图

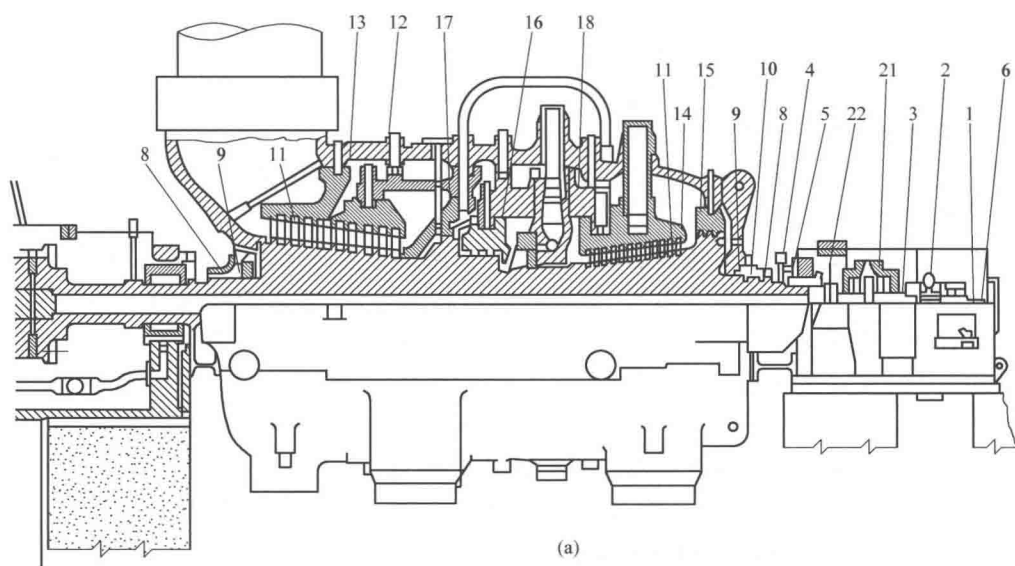


图 1-3 上海汽轮机厂生产的 300MW 反动式汽轮机组的纵剖面图（一）

（a）高、中压部分

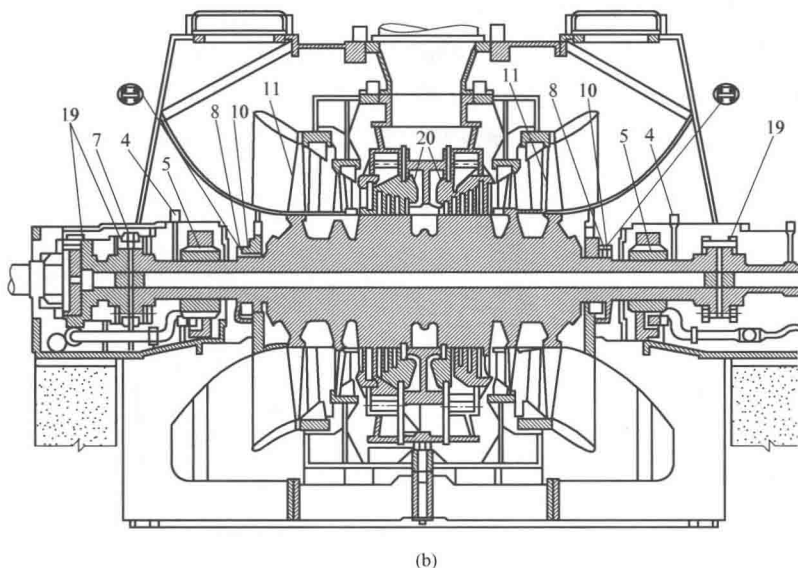


图 1-3 上海汽轮机厂生产的 300MW 反动式汽轮机组的纵剖面图 (二)

(b) 低压部分

- 1—超速脱扣装置；2—主轴泵；3—转速传感器+零转速检测；4—振动检测器；5—轴承；6—偏心+鉴相器；
7—胀差检测器；8—外轴封；9—内轴封；10—汽封；11—叶片；12—中压 1 号持环；
13—中压 2 号持环；14—高压 1 号持环；15—低压平衡持环；16—高压平衡持环；
17—中压平衡持环；18—内上缸；19—联轴器；20—推力轴承；
21—轴向位移+推力轴承脱扣检测器；22—测速装置（危急脱扣系统）

汽轮机除以上简介的机体主要结构外，还有附属于本体的各种系统，如滑销系统、调节保护系统、供油系统、汽水系统等，只有各系统有机协同工作，汽轮机才能很好地完成将水蒸气的热能转变为机械能的任务。

2. 叶栅的几何特性

由汽轮机级的基本结构可知，无论是静叶栅还是动叶栅都是由各自叶型相同的叶片以相同的间隙和角度在同一回转面上排列而成。所谓叶型是指叶片的横断面形状，其周线称为型线。良好的叶片型线应全部由圆滑曲线组成。叶型沿叶高不变的叶片称为等截面叶片，叶型沿叶高变化的叶片则称为变截面叶片。汽轮机叶栅是一种环形叶栅，如图 1-4 (a) 所示。如果把叶栅展开在一个平面内则称为平面叶栅，如图 1-4 (c) 所示。不同的叶栅具有不同的几何特性参数，这些参数影响着蒸汽在叶栅通道中的能量转换。

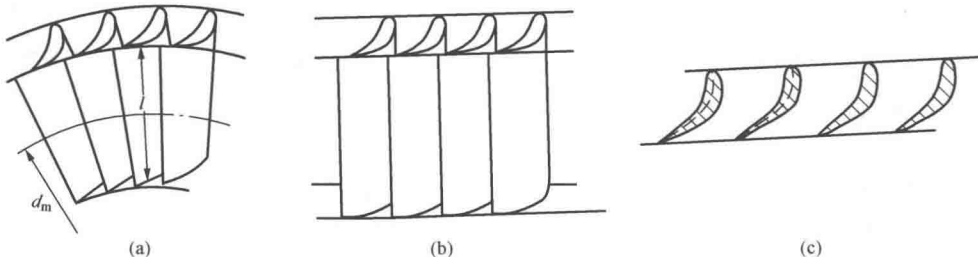


图 1-4 叶栅示意

(a) 环形叶栅；(b) 直列叶栅；(c) 平面叶栅

反映叶栅几何特性的主要参数 (见图 1-5), 有环形叶栅的平均直径 d_m 、叶片高度 l 、叶栅节距 t (叶栅中两相邻叶型相应点间的距离)、叶栅宽度 B 、叶型弦长 b (中弧线两端点间的距离)、出口边厚度 Δ 、进口边宽度 a 和出口边宽度 a_1 、 a_2 等。叶型的中弧线是叶型各内切圆圆心的连线, 叶型中弧线的前端点和后端点分别称为叶栅的前缘点和后缘点。

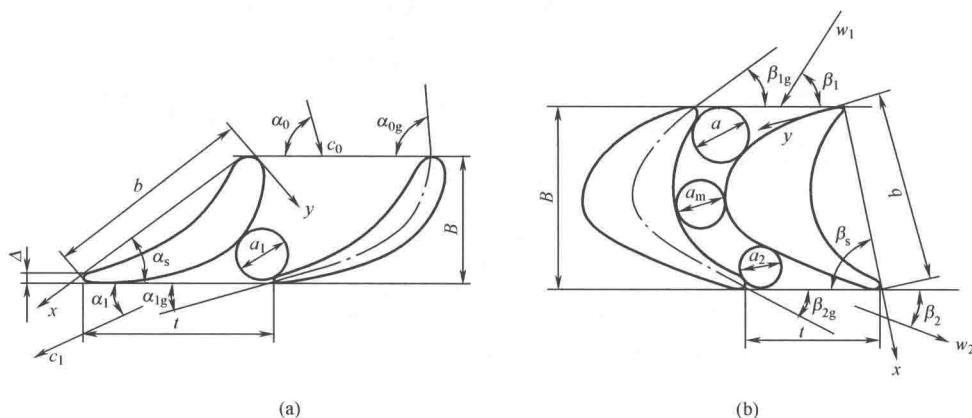


图 1-5 汽轮机叶栅参数

(a) 喷嘴叶栅; (b) 动叶栅

为了便于说明汽流特性相同的几何相似叶栅, 一般用无因次的相对值来表征叶栅的几何特性。在汽轮机中常用的相对参数有相对节距 $\bar{t} = t/b$, 相对高度 $\bar{l} = l/b$, 径高比 $\theta = d_m/l$ 等。尽管在汽轮机级中所采用的叶栅都是环形叶栅, 但当级的径高比较大时, 除叶片上下两端面外, 汽流参数沿叶片高度将无显著变化。所以, 对于大径高比的级 (一般 $\theta > 8 \sim 12$), 可将其叶栅当作直列叶栅研究, 如图 1-4 (b) 所示。在直列叶栅中, 除端部外, 沿任何叶片高度上流面内, 汽流的运动情况是相同的。因此, 只需研究叶栅某一高度上流面内 (通常为平均直径处的流面) 的流动就可知道其他流面内的流动状况。

为了表明静叶栅和动叶栅相应的叶栅几何特性参数, 可对上述叶栅几何特性参数分别加注下标 n 或 b 以示区分。

此外, 还有一些与叶栅汽道形状和汽流方向有关的汽流角和叶型角, 也是叶栅几何特性的重要参数。图 1-5 中, α_1 和 β_2 为喷嘴叶栅和动叶栅的出口汽流角, α_0 和 β_1 为进口汽流角。对于亚声速汽流, $\alpha_1 = \arcsin(a_{\min}/t_n)$, $\beta_2 = \arcsin(a_{\min}/t_b)$, 其中, $a_{\min}$ 和 $a_{\min}$ 分别为喷嘴叶栅与动叶栅通道最小截面宽度, t_n 和 t_b 分别为喷嘴叶栅与动叶栅节距。

α_s 和 β_s 是叶栅的安装角, 它是叶栅额线与弦长之间的夹角。对一定的叶型, 安装角直接影响到叶栅汽道的形状和出口汽流角 α_1 和 β_2 的大小。

α_{0g} 和 β_{1g} 为叶型进口几何角, 它是叶型中弧线在前缘点的切线与叶栅前额线之间的夹角, 它只随安装角变化, 与汽流无关。 α_{1g} 和 β_{2g} 为叶型出口几何角。

(二) 蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理

来自喷嘴的高速汽流通过动叶栅时, 发生动量变化对动叶栅产生冲力, 使动叶栅转动做功而获得机械能。由动量定理可知, 所获得机械能的大小取决于工作蒸汽的质量流量和速度变化量, 质量流量越大, 速度变化越大, 作用力也越大。这种作用力一般可分为冲动力和反动力两种形式。汽流在动叶汽道内不膨胀加速, 即 $w_1 = w_2$, 而只随汽道形状改变其流动方

向, 汽流改变流动方向对汽道所产生的离心力, 称为冲动力 F_i , 这时蒸汽所做的机械功等于它在动叶栅中动能的变化量, 这种级称为冲动级, 如图 1-6 所示。

当蒸汽在动叶汽道内随汽道改变流动方向的同时仍继续膨胀、加速, 即 $w_1 < w_2$, 则加速的汽流流出汽道时, 对动叶栅将施加一个与汽流流出方向相反的反作用力, 这个作用力称为反动力 F_r 。此力如同火箭发射时, 从火箭尾部喷出的高速气流, 给火箭一个与气流流动方向相反的反作用力, 推动火箭飞向太空。依靠反动力推动做功的级称为反动级。

现代汽轮机级中, 通常蒸汽在汽道中一方面将其在静叶栅内所获得的动能转换为动叶栅上的机械功, 在动叶栅上施加冲动力; 另一方面, 在动叶栅中继续膨胀, 对动叶栅产生一个反作用力。在冲动力和反动力的共同作用下产生合力 F , 合力 F 在轮周方向上的分力 F_u 使动叶栅旋转而产生机械功, 如图 1-7 所示。

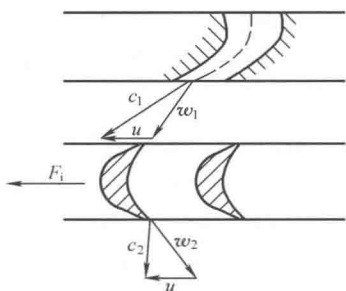


图 1-6 无膨胀动叶汽道内蒸汽的流动情况

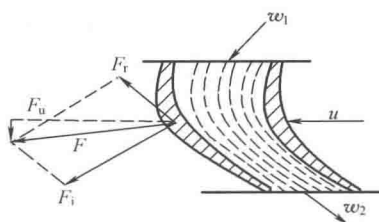


图 1-7 有膨胀动叶汽道内蒸汽的流动情况

(三) 汽轮机级的反动度

常用级的反动度 Ω_m 表示蒸汽在动叶汽道内膨胀程度的大小, 它等于蒸汽在动叶汽道内膨胀时的理想比焓降 Δh_b 和整个级的滞止理想比焓降 Δh_t^* 之比, 即

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_t^*} \quad (1-2)$$

式中: Ω_m 为级的平均反动度, 是指在级的平均直径截面上的反动度, 它由平均直径截面上喷嘴和动叶中的理想比焓降所确定。平均直径是动叶顶部和根部处叶栅直径的平均值。

图 1-8 是级中蒸汽膨胀在焓熵图上的热力过程线。0 点是级前的蒸汽状态点, 0^* 点是蒸汽等熵滞止到初速等于零的状态点, p_1 、 p_2 分别为喷嘴出口压力和动叶出口压力。蒸汽从滞止状态 0^* 点在级内等熵膨胀到 p_2 时的比焓降为级的滞止理想比焓降 Δh_t^* 。而蒸汽从级前状态 0 点在级内等熵膨胀到 p_2 时的比焓降为级的理想比焓降 Δh_t 。按照同样的定义, Δh_n^* 为蒸汽在喷嘴中的滞止理想比焓降, Δh_b 为蒸汽在动叶中的理想比焓降。

由于 $h-s$ 图上等压线向着熵增方向有渐扩趋势, 则 $\Delta h_b' \neq \Delta h_b$, 但可以认为 $\Delta h_b' \approx \Delta h_b$ 。根据图 1-8 和式 (1-2) 可得

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b'} \approx \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b} \quad (1-3)$$

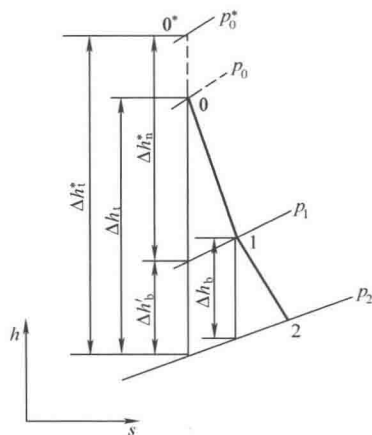


图 1-8 级中蒸汽膨胀在焓熵图上的热力过程线

则有 $\Delta h_b = \Omega_m \Delta h_t^*$, $\Delta h_n = (1 - \Omega_m) \Delta h_t^*$ 。

实际上蒸汽参数沿叶高是变化的, 在动叶不同直径截面上的理想比焓降是不同的, 因此, 反动度沿动叶高度也不相同。对于较短的直叶片级, 由于蒸汽参数沿叶高差别不大, 因此通常不计反动度沿叶高的变化, 均用平均反动度表示级的反动度。对于长叶片级, 在计算不同截面时, 须用相应截面的反动度。

(四) 汽轮机级的类型及其特点

根据蒸汽在汽轮机级的通流部分中的流动方向, 汽轮机级可分为轴流式与辐流式两种。电厂用汽轮机级绝大多数采用轴流式。轴流式级通常有下列几种分类方法。

1. 冲动级和反动级

按照蒸汽在动叶内不同的膨胀程度, 可将轴流式级分为冲动级和反动级两种。

(1) 冲动级。

1) 纯冲动级。反动度 $\Omega_m = 0$ 的级称为纯冲动级, 它的特点是蒸汽只在喷嘴叶栅中膨胀, 在动叶栅中不膨胀而只改变其流动方向, 其动叶片的形式为对称叶片。因此, 动叶栅进、出口压力及其相对速度均相等, 即 $p_1 = p_2$, $w_1 = w_2$, 且 $\Delta h_b = 0$, $\Delta h_t^* = \Delta h_n^*$ 。纯冲动级做功能力大, 流动效率较低, 现代汽轮机中均不采用纯冲动级。

2) 带反动度的冲动级。为了提高汽轮机级的效率, 冲动级应具有一定的反动度 ($\Omega_m = 0.05 \sim 0.20$), 这时蒸汽膨胀大部分在喷嘴叶栅中进行, 只有一小部分在动叶栅中继续进行。因此, $p_1 > p_2$, $w_1 < w_2$, $\Delta h_n^* > \Delta h_b$ 。由流体力学知识可知, 汽流加速可改善汽流的流动状况, 故这种级具有做功能力比反动级大且效率比纯冲动级高的特点, 得到了广泛的应用。

3) 复速级。复速级 (又称双列速度级) 通常是一个级内要求承担很大比焓降时才采用。它由喷嘴叶栅、装于同一叶轮上的两列动叶栅和两列动叶栅之间固定不动的导向叶栅组成。第二列动叶栅是将第一列动叶栅的余速动能进一步转换成机械能, 导向叶栅的作用是改变汽流方向, 与第二列动叶栅进汽方向相符。复速级的做功能力比单列冲动级要大, 但效率较低。为了改善复速级的效率, 也采用一定的反动度, 使蒸汽在各列动叶栅和导向叶栅中进行适当的膨胀。复速级常用于单级汽轮机和中小型多级汽轮机的第一级。

图 1-9 表示蒸汽流经各种冲动级时, 其压力和速度的变化情况。图中表明了蒸汽在各冲动级喷嘴叶栅、导向叶栅和动叶栅出口处的压力和速度的数值差异。

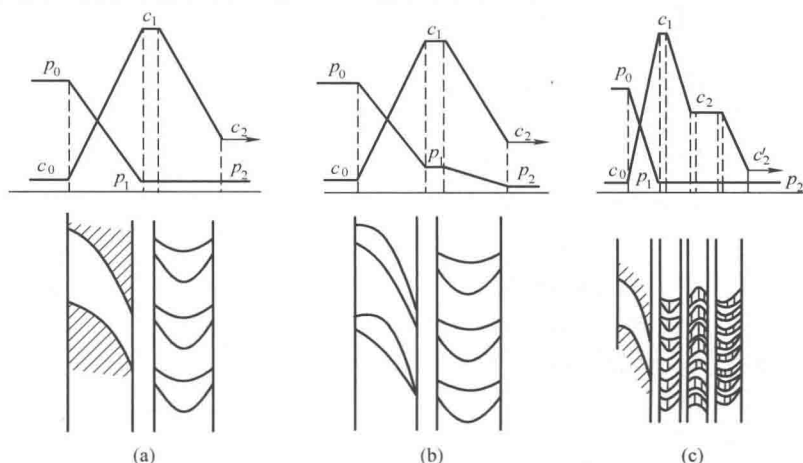


图 1-9 冲动级中蒸汽压力和速度变化情况

(2) 反动级。反动度 $\Omega_m=0.5$ 的级称为反动级。其工作特点是蒸汽在反动级中的膨胀一半在喷嘴叶栅中进行, 另一半在动叶栅中进行, 即 $p_1 > p_2$, $w_1 < w_2$, $\Delta h_n^* = \Delta h_b = 0.5 \Delta h_t^*$ 。也就是说, 蒸汽在级中的膨胀各占一半左右, 流动情况一样, 故动静叶栅互为镜内映射状叶栅。这种级的结构特点是喷嘴叶型和动叶型相同。由于蒸汽在动叶栅中膨胀加速, 因此它是在冲动力和反动力的合力作用下, 使叶轮转动做功。反动级的效率比冲动级高, 但做功能力较小。图 1-10 表示反动级中蒸汽压力和速度变化情况。

2. 压力级和速度级

按照蒸汽的动能转换为转子机械能的过程不同, 汽轮机的级可分为压力级和速度级。

(1) 压力级。蒸汽的动能转换为转子机械能的过程在级内只进行一次, 称为压力级。这种级只装一列动叶栅, 故又称单列级。它可以是冲动级, 也可以是反动级。

(2) 速度级。蒸汽的动能转换为转子机械能的过程在级内不只进行一次, 称为速度级。速度级有双列和多列之分。

3. 调节级和非调节级

按级通流面积是否随负荷大小而变, 汽轮机的级可分为调节级和非调节级。

(1) 调节级。通流面积随负荷大小而变的级称为调节级。喷嘴调节汽轮机第一级采用的通流面积是可以随负荷变化而改变的, 因而通常称其为调节级。调节级可以是复速级, 也可以是单列级。一般中小型汽轮机用复速级作为调节级, 而大型汽轮机常用单列冲动级作为调节级。

(2) 非调节级。通流面积不随负荷大小而变的级称为非调节级。非调节级既可以是全周进汽也可以是部分进汽, 而调节级总是做成部分进汽。

二、汽轮机的分类及型号

(一) 汽轮机的分类

1. 按工作原理分类

(1) 冲动式汽轮机。主要由冲动级组成, 蒸汽主要在喷嘴叶栅 (或静叶栅) 中膨胀, 在动叶栅中只有少量膨胀。

(2) 反动式汽轮机。主要由反动级组成, 蒸汽在喷嘴叶栅 (或静叶栅) 和动叶栅中都进行膨胀, 且膨胀程度相同。现代喷嘴调节的反动式汽轮机, 因反动级不能做成部分进汽, 故第一级调节级常采用单列冲动级或双列速度级。

2. 按热力特性分类

(1) 凝汽式汽轮机。蒸汽在汽轮机中膨胀做功后, 进入高度真空状态下的凝汽器, 凝结成水。目前, 凝汽式汽轮机均采用回热抽汽, 若再将在汽轮机中做过功的蒸汽从某级引出送回锅炉进行再热后, 返回汽轮机继续膨胀做功, 即为中间再热凝汽式汽轮机。

(2) 背压式汽轮机。排汽压力高于大气压力, 直接用于供热, 无凝汽器。

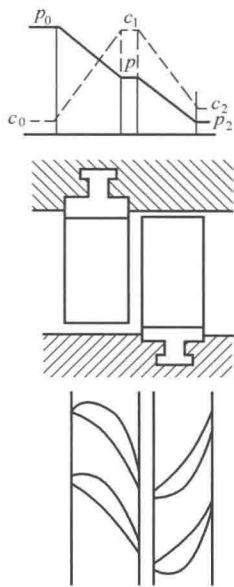


图 1-10 反动级中蒸汽压力和速度变化情况

(3) 调整抽汽式汽轮机。从汽轮机中间某级后抽出参数与流量可以调整的蒸汽对外供热，其排汽仍排入凝汽器。根据供热需要，分为一次调整抽汽和二次调整抽汽。

(4) 抽汽背压式汽轮机。它是具有调整抽汽的背压式汽轮机。调整抽汽和排汽都分别对外供热。

背压式汽轮机、调整抽汽式汽轮机和抽汽背压式汽轮机统称为供热式汽轮机。

对于背压式汽轮机，当排汽作为其他中、低压汽轮机的工作蒸汽时，称为前置式汽轮机。

3. 按主蒸汽压力分类

按进入汽轮机的主蒸汽压力不同等级可分类如下：

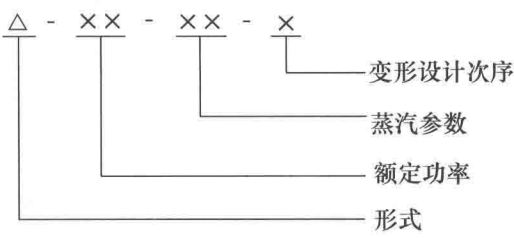
- (1) 低压汽轮机。主蒸汽压力小于 1.5MPa。
- (2) 中压汽轮机。主蒸汽压力为 2~4MPa。
- (3) 高压汽轮机。主蒸汽压力为 6~10MPa。
- (4) 超高压汽轮机。主蒸汽压力为 12~14MPa。
- (5) 亚临界压力汽轮机。主蒸汽压力为 16~18MPa。
- (6) 超临界压力汽轮机。主蒸汽压力大于 22.15MPa。
- (7) 超超临界压力汽轮机。一般主蒸汽压力大于 24.2MPa 或蒸汽温度达到 566℃ 以上。

此外，按汽流方向可分为轴流式汽轮机、辐流式汽轮机；按用途可分为电厂汽轮机、工业汽轮机、船用汽轮机；按汽缸数目可分为单缸、双缸和多缸汽轮机；按机组转轴数目可分为单轴和双轴汽轮机；按工作状况可分为固定式和移动式汽轮机等。

(二) 国产汽轮机产品型号

为了便于识别汽轮机的类别，常用一些符号来表示它的基本特性或用途，这些符号称为汽轮机的型号。我国生产的汽轮机所采用的系列标准及型号已经统一，主要由汉语拼音和数字所组成。

1. 产品型号组成



2. 汽轮机形式代号

汽轮机形式代号见表 1-1。

表 1-1 汽轮机形式代号

代号	N	B	C	CC	CB	H	Y
形式	凝汽式	背压式	一次调整抽汽式	二次调整抽汽式	抽汽背压式	船用	移动式

3. 汽轮机型号中蒸汽参数表示方式

汽轮机蒸汽参数的表示方式见表 1-2。

表 1-2 汽轮机蒸汽参数表示方式

形式	参数表示方法	示例
凝汽式	主蒸汽压力/主蒸汽温度	N100-8.83/535
凝汽式（中间再热）	主蒸汽压力/主蒸汽温度/中间再热温度	N600-24.2/566/566
一次调整抽汽式	主蒸汽压力/抽汽压力	C12-4.9/0.981
二次调整抽汽式	主蒸汽压力/高压抽汽压力/低压抽汽压力	CC200-12.75/0.78/0.25
背压式	主蒸汽压力/背压	B50-8.83/0.98
抽汽背压式	主蒸汽压力/抽汽压力/背压	CB25-8.83/1.47/0.49

注 功率单位为 MW；压力单位为 MPa；温度单位为℃。

三、汽轮机的发展

汽轮机不仅是电厂最重要的设备，而且广泛用于冶金、化工、船运等部门用来直接驱动各种从动机械，如各种泵、风机、压缩机和传动螺旋桨等。因此，自从 1883 年制造出第一台实用的单级冲动式汽轮机以来，汽轮机已有一百多年的发展历史，特别是近几十年汽轮机的发展尤为迅速。

目前，在发电汽轮机中已有瑞士制造在美国投运的双轴 1300MW 汽轮机、苏联制造的单轴 1200MW 汽轮机和法国制造的 1500MW 核电站汽轮机等，2000MW 高参数全速汽轮机的开发研制工作正在进行中。汽轮机是在高温、高压、高转速下工作的大型动力机械，它的研发、制造和运行涉及许多高科技领域和工业部门，是一个国家科学技术和工业装备技术发展水平的重要标志。

随着汽轮机向着高参数、大容量方向的不断发展，提高汽轮机的经济性、安全性、负荷适应性和自动化水平始终是汽轮机发展的中心和重点。与此同时，汽轮机的热力系统、调节保护系统、监测控制系统等都将更加复杂。

核电是一种安全、可靠、清洁的能源。近年来，核电厂的发展很快，许多国家核电所占比重很大。核电站汽轮机是在火电厂汽轮机的基础上发展起来的，其发展的主流是大型化，为多缸、中间再热凝汽式汽轮机。

近几十年汽轮机的发展主要表现在以下几个方面：

- (1) 增大单机功率。增大单机功率不仅能迅速发展电力生产，而且可降低单位功率投资成本，有利于提高机组的热经济性和加快电厂建设速度。
- (2) 提高蒸汽参数。提高蒸汽初参数是提高热效率的重要途径，同时也可提高单机功率。
- (3) 提高效率。采用给水回热和具有合理中间再热参数的中间再热循环，两者均可提高机组的热效率。采用中间再热还可降低低压缸末级排汽湿度，提高机组运行的可靠性，为提高初压创造条件。
- (4) 提高机组的运行水平。现代大型机组增设和改善了保护、报警和状态监测系统，有的配置了智能化故障诊断系统，提高了机组运行、维护和检修水平，增强了机组运行的可靠性，并保证了规定的设备使用寿命。

目前，世界上主要汽轮机制造企业有：美国的通用电气公司（GE），日本的三菱、东芝