



全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

电厂汽轮机设备

全国电力职业教育教材编审委员会 组编
孙为民 高清林 主编

行动导向式



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

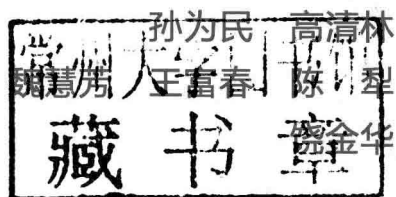


全国电力高职高专“十二五”规划教材
电力技术类（动力工程）专业系列教材

中国电力教育协会审定

电厂汽轮机设备

全国电力职业教育教材编审委员会 组 编



主 编
副主编
主 审



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为全国电力高职高专“十二五”规划教材。本书主要采用行动导向编写方式，是电力职业教育工学结合和理实一体教学模式的具体体现，全书共分八个项目，采用以突出能力培养为核心的教学理念，对汽轮机及其辅助设备，汽轮机调节、保安及油系统，汽轮机启动与停机，汽轮机事故处理、汽轮机性能试验、供热式汽轮机运行与维护等内容进行全面的阐述，课程教学内容的选取既考虑了学生首次就业岗位的要求，又兼顾其未来职业发展方向的需求。

本书可作为电力技术类电厂热能动力装置、火电厂集控运行专业的学历教育教材，也可作为相关科技人员的参考用书。

图书在版编目 (CIP) 数据

电厂汽轮机设备/孙为民，高清林主编；全国电力职业教育教材编审委员会组编. —北京：中国电力出版社，2015.1

全国电力高职高专“十二五”规划教材. 电力技术类（动力工程）专业系列教材

ISBN 978-7-5123-6324-3

I. ①电… II. ①孙…②高…③全… III. ①火电厂-蒸汽透平-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 187541 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 1 月第一版 2015 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21 印张 513 千字

定价 42.00 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

全国电力职业教育教材编审委员会

主 任 薛 静

副 主 任 张薛鸿 赵建国 刘广峰 马晓民 杨金桃 王玉清
文海荣 王宏伟 王宏伟(女) 朱 颢 何新洲 李启煌
陶 明 杜中庆 杨建华 周一平

秘 书 长 鞠宇平 潘劲松

副秘书长 李建强 谭绍琼 武 群 黄定明 樊新军

委 员 (按姓氏笔画顺序)

丁 力	马敬卫	方舒燕	王 宇	王火平	王玉彬
王亚娟	王俊伟	毛文学	兰向春	冯 涛	任 剑
刘家玲	刘晓春	汤晓青	阮予明	齐 强	佟 鹏
余建华	吴金龙	吴斌兵	宋云希	张小兰	张进平
张惠忠	李建兴	李高明	李道霖	李勤道	陈延枫
屈卫东	罗红星	罗建华	郑亚光	郑晓峰	胡 斌
胡起宙	饶金华	倪志良	郭连英	盛国林	章志刚
黄红荔	黄益华	黄蔚雯	龚在礼	曾旭华	董传敏
解建宝	廖 虎	潘汪杰	操高城	戴启昌	

动力工程专家组

组 长 李勤道 何新洲

副组长 杨建华 董传敏 朱 飙 杜中庆

成 员 (按姓氏笔画顺序)

丁 力 阮予明 齐 强 佟 鹏

屈卫东 武 群 饶金华 黄定明

黄蔚雯 盛国林 龚在礼 曾旭华

操高城 潘汪杰

本书编写组

组 长 孙为民

副组长 高清林

组 员 魏慧芳 王富春 陈 犁 刘红蕾 张献岭

李子文

出版说明

为深入贯彻《国家中长期教育改革和规划纲要(2010—2020)》精神,落实鼓励企业参与职业教育的要求,总结、推广电力类高职高专院校人才培养模式的创新成果,进一步深化“工学结合”的专业建设,推进“行动导向”教学模式改革,不断提高人才培养质量,满足电力发展对高素质技能型人才的需求,促进电力发展方式的转变,在中国电力企业联合会和国家电网公司的倡导下,由中国电力教育协会和中国电力出版社组织全国14所电力高职高专院校,通过统筹规划、分类指导、专题研讨、合作开发的方式,经过两年时间的艰苦工作,编写完成全国电力高职高专“十二五”规划教材。

本套教材分为电力工程、动力工程、公共基础课、工科专业基础课、学生素质教育五大系列。其中,动力工程专业系列汇集了电力行业高等职业院校专家的力量进行编写,各分册主编为该课程的教学带头人,有丰富的教学经验。教材以行动导向形式编写而成,既体现了高等职业教育的教学规律,又融入电力行业特色,适合高职高专动力工程专业的教学,是难得的行动导向式精品教材。

本套教材的设计思路及特点主要体现在以下几方面。

(1) 按照“行动导向、任务驱动、理实一体、突出特色”的原则,以岗位分析为基础,以课程标准为依据,充分体现高等职业教育教学规律,在内容设计上突出能力培养为核心的教学理念,引入国家标准、行业标准和职业规范,科学合理设计任务或项目。

(2) 在内容编排上充分考虑学生认知规律,充分体现“理实一体”的特征,有利于调动学生学习积极性,是实现“教、学、做”一体化教学的适应性教材。

(3) 在编写方式上主要采用任务驱动、行动导向等方式,包括学习情境描述、教学目标、学习任务描述、任务准备、相关知识等环节,目标任务明确,有利于提高学生学习的专业针对性和实用性。

(4) 在编写人员组成上,融合了各电力高职高专院校骨干教师和企业技术人员,充分体现院校合作优势互补,校企合作共同育人的特征,为打造中国电力职业教育精品教材奠定了基础。

本套教材的出版是贯彻落实国家人才队伍建设总体战略,实现高端技能型人才培养的重要举措,是加快高职高专教育教学改革、全面提高高等职业教育教学质量的具体实践,必将对课程教学模式的改革与创新起到积极的推动作用。

本套教材的编写是一项创新性的、探索性的工作,由于编者的时间和经验有限,书中难免有疏漏和不当之处,恳切希望专家、学者和广大读者不吝赐教。

全国电力职业教育教材编审委员会

前 言

《电厂汽轮机设备》根据高职高专电厂汽轮机设备的课程标准编写而成,本书以《关于全面提高高等职业教育教学质量的若干意见》为指导,依据电厂汽轮机设备运行、检修、维护等岗位能力要求,针对目前发电技术的应用情况选取教学内容,采用行动导向编写方式,是电力职业教育工学结合和理实一体教学模式的具体体现。在编写过程中注意将教学改革成果融于其中,进一步深化行动导向教学模式,全面提升电力职业教育人才培养水平;在划分项目任务时,充分考虑学生认知规律,充分体现任务驱动的特征,充分调动学生学习积极性。

本书编写分工如下:郑州电力高等专科学校孙为民编写项目1;孙为民和郑州电力高等专科学校陈犁编写项目2;孙为民和大唐首阳山电厂张献岭编写项目3;四川水利电力职业技术学院王富春编写项目4;山西电力职业技术学院魏惠芳编写项目5;福建电力职业技术学院高清林编写项目6;华润焦作热电有限公司李子文编写项目7;国网技术学院刘红蕾编写项目8。本书由孙为民、高清林担任主编,孙为民负责全书的统稿工作。

本书由江西电力职业技术学院饶金华教授担任主审,主审老师提出的许多宝贵意见使编者受益匪浅。同时,本书在编写过程中参考了有关兄弟院校和企业的诸多文献、资料,并得到有关老师和专家的热情帮助,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

2014年12月

目 录

出版说明

前言

项目 1 电厂汽轮机的认识	1
任务 1.1 熟知汽轮机的基本概念	1
任务 1.2 分析汽轮机级的基本工作原理	14
任务 1.3 分析多级汽轮机的工作特点和轴向推力的产生及平衡	50
任务 1.4 认知汽轮机本体结构	64
项目 2 电厂汽轮机凝汽设备及其他辅助系统的认识	111
任务 2.1 认知汽轮机凝汽设备及系统	111
任务 2.2 认知汽轮机其他辅助设备及系统	125
项目 3 电厂汽轮机调节、保安及油系统的认识	137
任务 3.1 熟知汽轮机调节的任务与形式	138
任务 3.2 分析液压调节系统的工作原理	142
任务 3.3 分析电液调节系统的工作原理	154
任务 3.4 认知电液调节系统的主要设备	169
任务 3.5 分析汽轮机危机遮断保护和供油系统	185
项目 4 电厂汽轮机的启动与停机	195
任务 4.1 分析汽轮机受热的特点	195
任务 4.2 分析汽轮机的启动方式及过程	203
任务 4.3 分析汽轮机的停机方式及过程	209
项目 5 电厂汽轮机的运行与维护	216
任务 5.1 分析喷嘴变工况的基本规律	217
任务 5.2 分析级与级组变工况的基本规律	220
任务 5.3 分析汽轮机变工况的基本规律	227
任务 5.4 分析汽轮机的调节方式及调节级变工况的基本规律	229
任务 5.5 分析蒸汽参数变化对汽轮机工作的影响	234
任务 5.6 分析汽轮机运行的经济性	237
任务 5.7 分析汽轮机的非正常运行	246
任务 5.8 分析超(超)临界压力汽轮机的运行特点	253
项目 6 电厂汽轮机的事故处理	261
任务 6.1 汽轮机事故处理原则和分析方法	261

任务 6.2 汽轮机典型事故处理和预防	266
项目 7 电厂汽轮机组试验	286
任务 7.1 汽轮机汽门严密性试验	287
任务 7.2 汽轮机超速试验	289
任务 7.3 汽轮机危急保安器喷油试验	292
任务 7.4 汽轮机甩负荷试验	294
任务 7.5 轴向位移保护试验	297
任务 7.6 汽轮机抽汽止回阀活动试验	298
任务 7.7 发电机气密性试验	300
项目 8 供热式汽轮机的认识	303
任务 8.1 分析背压式汽轮机的结构及调节	303
任务 8.2 分析一次调节抽汽式汽轮机的工况图及调节	308
任务 8.3 分析二次调节抽汽式汽轮机的工况图及调节	314
附录一 需巡回检查的设备及检查标准	320
附录二 热力机械操作票	324
参考文献	325

项目 1

电厂汽轮机的认识

【项目描述】

通过学习,掌握汽轮机的基本概念,理解汽轮机的基本工作原理,掌握汽轮机的轴向推力及其平衡,熟悉汽轮机的本体结构及特点。

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 理解汽轮机的一般概念;
- (2) 掌握汽轮机的工作原理;
- (3) 掌握多级汽轮机的工作特点;
- (4) 掌握多级汽轮机的轴向推力及平衡;
- (5) 掌握汽轮机的本体结构及特点。

2. 能力目标

- (1) 能描述和分析汽轮机的基本概念及发展概况;
- (2) 能描述和分析汽轮机的工作原理;
- (3) 能描述汽轮机的本体结构及特点;
- (4) 能描述多级汽轮机的工作特点;
- (5) 能描述和分析多级汽轮机的经济性;
- (6) 能描述和分析多级汽轮机的轴向推力及平衡。

【教学环境】

多媒体教室结合实训室或利用理实一体化教室实施课程教学,需要具备反映汽轮机设备的模型和发电厂主要生产流程的模型。

任务 1.1 熟知汽轮机的基本概念

【教学目标】

1. 知识目标

- (1) 掌握汽轮机的概念;
- (2) 理解蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理;

- (3) 掌握级的类型和特点;
- (4) 清楚汽轮机的分类;
- (5) 清楚国产汽轮机产品型号组成及蒸汽参数表示法;
- (6) 了解汽轮机的发展概况;
- (7) 了解汽轮机各工况的含义;
- (8) 掌握汽轮机配汽方式的类型、概念、应用及特点。

2. 能力目标

- (1) 能讲述汽轮机的概念;
- (2) 能解释蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理;
- (3) 能说出级的类型和特点;
- (4) 能描述汽轮机的分类;
- (5) 能描述国产汽轮机产品型号组成及蒸汽参数表示方法;
- (6) 能讲述汽轮机的发展过程;
- (7) 能描述汽轮机 THA、TRL、T-MCR、VWO 工况的含义;
- (8) 能描述节流配汽、喷嘴配汽的概念及特点;
- (9) 能描述滑压配汽的概念、特点及方式。

3. 态度目标

- (1) 能积极主动学习, 在完成任务过程中发现问题、分析问题和解决问题;
- (2) 以团队协作的方式, 与小组成员共同完成本学习任务。

【任务描述】

在学习汽轮机基本结构和蒸汽作用原理的基础上, 以 2~3 人学习小组的形式对汽轮机的基本概念进行深入学习和研讨, 共同熟知汽轮机的基本概念。在讨论中能正确、清晰地表述出汽轮机结构的组成, 汽轮机级的分类, 汽轮机级的结构特点, 并能详细描述汽轮机的分类及型号。

【任务准备】

课前预习相关知识部分, 独立思考并回答下列问题:

1. 什么叫汽轮机的级? 蒸汽在级中是如何进行能量转换的?
2. 什么是蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理?
3. 何谓级的反动度?
4. 汽轮机的级是如何进行分类的? 何谓纯冲动级、反动级、带反动度的冲动级、复速级? 蒸汽在这些级的通流部分中压力和速度是如何变化的? 这些级有何工作特点和结构特点?
5. 在什么情况下, 动叶栅才能受到反动力的作用?
6. 说明冲动级的工作原理和级内能量转换过程及特点。
7. 说明反动级的工作原理和级内能量转换过程及特点。
8. 汽轮机是如何进行分类的?
9. 汽轮机的型号是如何表示的?
10. 汽轮机的工况有哪些表示方法?
11. 何谓汽轮机的配汽方式? 各有什么特点?

【相关知识】

汽轮机又名“蒸汽透平”，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。与其他原动机（如燃气轮机、柴油机等）相比，汽轮机具有单机功率大、效率高、运转平稳、单位功率制造成本低和使用寿命长等优点，广泛用于常规火电厂和核电站中驱动发电机来生产电能。汽轮机与发电机的组合称为汽轮发电机组，全世界由汽轮发电机组发出的电量约占各种形式发电总量的 80%。汽轮机可以设计成变速运行，用于驱动泵、风机、压气机和船舶螺旋桨等。此外，汽轮机的排汽或中间抽汽可用来满足生产和生活上供热的需要，这种用于热能和电能联合生产的热电式汽轮机，具有更高的经济性，对节约能源和环境保护具有重要意义。所以汽轮机是现代化国家重要的动力机械设备。

一、汽轮机的基本结构简介

汽轮机是电站最重要的主力设备之一。汽轮机的作用就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 是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，静叶栅是固定不动的，静叶栅构成的蒸汽通道称为喷嘴，转子以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为动能。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，称之为级。

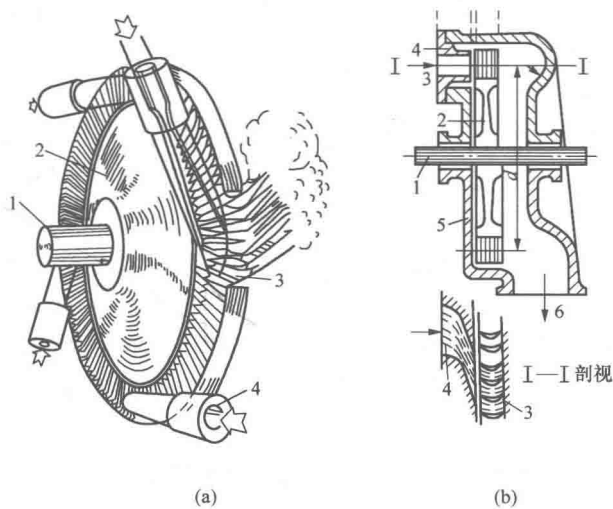


图 1-1 单级汽轮机主要部分结构简图

(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

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 和 w_2 进、出动叶通道。动叶中

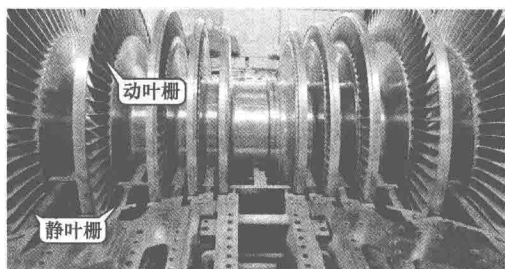


图 1-2 多级汽轮机低压缸及转子实物图

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

$$\vec{c} = \vec{w} + \vec{u}$$

由于单级汽轮机容量有限,故现代汽轮机均为多级汽轮机,它是由按工作压力高低顺序排列的若干个级组合而成。图 1-2 为安装中的多级汽轮机低压缸及转子实物,包括了固定在汽缸上的静叶栅(下半部分)和固定在转子上的动叶栅。

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(静子)。转子主要由主轴、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)。轴承分支持轴承和推力轴承。支持轴承用于保证静子对转子的支承作用,并且确定转子与静子的相对径向位置。推力轴承用于保证转子在轴向推力的作用之下仍然能够维持相对于静子的正确轴向位置。

转子和静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。

汽轮机除以上介绍的本体主要结构外,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。

二、汽轮机的发展

1883 年瑞典工程师拉伐尔(Laval)创造出世界上第一台轴流式汽轮机,这是一台 3.7kW 的单级冲动式汽轮机。在这台汽轮机中,拉伐尔解决了等强度轮盘、挠性轴和缩放喷嘴等较为复杂的汽轮机技术问题。

1884—1894 年,英国工程师帕森斯(C. A. Parsons)相继创造了轴流式多级反动式汽轮机、辐流式汽轮机和背压式汽轮机。

1900 年前后,美国工程师寇蒂斯(Curtis)创造出了复速级单级汽轮机。与此同时,法国工程师拉托(Rateau)和瑞士工程师崔利(Zoelly)分别在拉伐尔的基础上制造出了多级冲动式汽轮机。

这样在前后十几年的时间里,已形成了汽轮机的两种基本类型,即多级冲动式汽轮机和多级反动式汽轮机。

1903—1907 年间,出现了热能、电能联合生产的汽轮机,即背压式和调节抽汽式汽轮机,以满足其他工业部门对蒸汽的需要。

1920 年左右,随着蒸汽动力装置循环的改进,出现了采用回热循环的汽轮机。这种汽轮机的应用提高了装置的循环效率,特别是创造了提高单机功率的条件。所以,此后采用回热循环的汽轮机几乎完全代替了原来的纯凝汽式汽轮机,一直使用到现在。

1925 年出现了第一台中间再热式汽轮机。这种汽轮机的优点是减少了末级的蒸汽湿度，能提高汽轮机的相对内效率和在再热参数选择合适时提高循环效率。

1912 年瑞典的容斯特罗姆兄弟创造了具有两个反向转子的辐流式汽轮机，这种汽轮机的缺点是不能制造成大功率机组。1930 年德国西门子公司将辐流式高压级与普通的任何一种轴流式低压级结合起来，制造成一种能采用较高参数的汽轮机。

至此，今天所能见到的电站汽轮机主要类型已经基本具备。

自汽轮机产生到现在的一百多年时间里，其发展很快，尤其是近几十年发展更加迅速，主要有以下特点。

1. 增大单机功率

世界工业发达国家的汽轮机生产在 20 世纪 60 年代已达到 500~600MW 机组等级水平。1972 年瑞士 BBC 公司制造的 1300MW 双轴全速汽轮机 (24MPa/538℃/538℃、 $n=3600\text{r/min}$) 在美国投入运行；1976 年西德 KWU 公司制造的单轴半速 ($n=1500\text{r/min}$) 1300MW 饱和蒸汽参数汽轮机投入运行；1982 年世界最大 1200MW 单轴全速汽轮机 (24MPa/540℃/540℃) 在前苏联投入运行。增大单机功率具有下列优点：

(1) 单位功率投资成本低。大功率机组单位功率用的材料、人工等相应减少，降低了成本。

(2) 单机功率越大，机组的热经济性越好。如国产引进型 300MW 机组的热耗率为 8091kJ/kWh，而国产 100MW 机组的热耗率为 9252kJ/kWh，前者为后者的 87%。

(3) 加快电站建设速度，降低电站建设投资和运行费用。

2. 提高蒸汽参数

增大单机功率后宜采用较高的蒸汽参数。当今世界上 300MW 以上容量的机组均采用亚临界或超临界压力的机组，甚至采用超超临界压力的机组。

3. 提高效率

采用中间再热和燃气-蒸汽联合循环，可以提高电厂效率。

4. 提高机组的运行水平

现代大型机组增设和改进保护、报警和状态监测系统，有的还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。

目前世界上生产多级轴流冲动式汽轮机的主要制造企业有美国的通用电气公司 (GE)、英国的通用电气公司 (GEC)、日本的东芝公司和日立公司、意大利的安莎多公司以及俄罗斯的列宁格勒金属工厂、哈尔科夫透平发动机厂和乌拉尔透平发动机厂等。制造反动式汽轮机的企业有美国西屋公司 (WH)、欧洲 ABB 公司、日本三菱公司、英国帕森斯公司、法国电气机械公司 (CMR) 等。另外，法国的阿尔斯通—大西洋公司 (AA)，既生产冲动式汽轮机又生产反动式汽轮机。

我国自 1955 年制造第一台中压 6MW 汽轮机以来，在之后的近 40 年时间里，已经走完了从中压机组到超临界压力 600MW 机组的全过程，特别是近十几年内，发展较快。这预示着我国将制造出更大功率等级的汽轮机，逐步达到世界先进水平。

我国生产汽轮机的主要工厂有上海汽轮机厂、哈尔滨汽轮机厂、东方汽轮机厂，其次有北京重型电机厂、青岛汽轮机厂和武汉汽轮发电机厂等，还有以生产工业汽轮机为主的杭州

汽轮机厂和以生产燃气轮机为主的南京汽轮发电机厂等。

三、蒸汽的冲动作用原理和反动作用原理

在汽轮机的级中能量的转变是利用冲动作用原理和反动作用原理实现的。

1. 冲动作用原理

由力学可知，当一个运动的物体碰到另一个静止的或速度不同的物体时，就会受到阻碍而改变其速度的大小和方向，同时给阻碍它运动的物体一个作用力，这个力称为冲动力。冲动力的大小取决于运动物体的质量和速度变化，质量越大，冲动力越大；速度变化越大，冲动力越大。若在冲击力的作用下，阻碍运动的物体速度改变，则运动物体就做出了机械功。根据能量守恒定律，运动物体动能的变化值就等于其做出的机械功。利用冲动力做功的原理就是冲动作用原理。

在汽轮机中，从喷嘴中流出的高速汽流冲击在汽轮机的动叶上，受到动叶的阻碍，而改变了其速度的大小和方向，同时汽流给动叶施加了一个冲动力。图 1-3 所示为无膨胀的动叶通道，蒸汽以速度 w_1 进入通道，由于受到动叶的阻碍不断地改变运动方向，最后以速度 w_2 流出动叶，则蒸汽对动叶施加了一个轮周方向的冲动力 F_i ，该力对动叶做功使动叶带动转子转动。 F_i 的大小主要取决于单位时间内通过动叶通道的蒸汽质量及其速度的变化。蒸汽质量越大，速度变化越大，则冲动力就越大。

2. 反动作用原理

反动力的产生与冲击力的产生原因不同。反动力是由原来静止或运动速度较小的物体，在离开或通过另一物体时，骤然获得一个较大的速度增量而产生的。例如火箭内燃料燃烧所产生的高压气体以很高的速度从火箭尾部喷出，这时从火箭尾部喷出的高速气流就给火箭一个与气流方向相反的作用力，在此力的推动下火箭向上运动。这种由于膨胀加速产生的作用力称为反动力。在汽轮机中，蒸汽在动叶构成的汽道内膨胀加速时，汽流必然对动叶片作用一个反动力，推动叶片运动，做机械功。这就是反动作用原理。

随着反动力的产生，蒸汽在动叶栅中完成了两次能量的转换，首先是蒸汽经动叶通道膨胀，将热能转换成蒸汽流动的动能，同时随着蒸汽的加速，则又给动叶栅一个反动力，推动转子转动，完成动能到机械功的转换。

一般情况下，蒸汽在动叶通道中流动时，一方面给动叶栅一个冲动力 F_i 的作用，另一方面，在动叶栅中继续膨胀，给动叶栅一个反动力 F_r 的作用，这两个力的方向都与轮周方向不一致。两个力的合力 F 作用在动叶栅上，其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 1-4 所示。

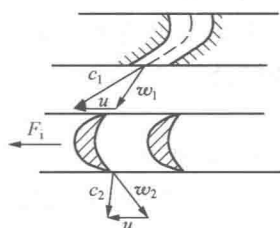


图 1-3 蒸汽流过无膨胀动叶通道时速度的变化

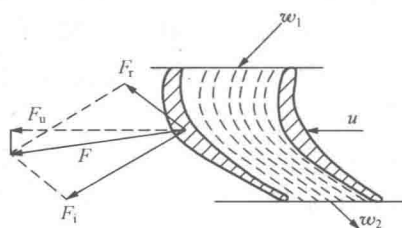


图 1-4 蒸汽在动叶通道内膨胀时对动叶的作用力

四、反动度和级的类型

(一) 汽轮机级的反动度

实际汽轮机的级，大多按冲动和反动两种原理做功，蒸汽在级中膨胀的热力过程如图 1-5 所示。0 点是级前的蒸汽状态点，0* 点是气流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 0* 滞止状态点在级内等熵膨胀到 p_2 时的焓（沿用习惯的说法，实际应为比焓，本书中如不加特别说明，焓均指比焓）降 Δh_t^* 为级的滞止理想焓降。同样的定义 Δh_n^* 为蒸汽在喷嘴中的滞止理想焓降，而 Δh_b 为蒸汽在动叶中的理想焓降。

通常用反动度 Ω_m 来衡量蒸汽在动叶栅中膨胀的程度。它等于蒸汽在动叶栅中膨胀时的理想焓降 Δh_b 和蒸汽在整个级中膨胀时的滞止理想焓降 Δh_t^* 之比，即

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

根据图 1-5，式 (1-1) 又可表示为

$$\Omega_m = \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n^* + \Delta h_b} \approx \frac{\Delta h_b}{\Delta h_n' + \Delta h_b}$$

因为在 $h-s$ 图上等压线向着熵增方向有扩张趋势，所以 $\Delta h_b' \neq \Delta h_b$ ，但可认为 $\Delta h_b' = \Delta h_b$ 。根据式 (1-1) 又可得到

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

由上式可知， Ω_m 越大， Δh_b 越大，则蒸汽对动叶栅的反动力也越大。

实际上蒸汽参数沿动叶高度是变化的，所以在动叶不同直径截面上的理想焓降是不同的。因此，反动度沿动叶高度亦不相同。用 Ω_m 表示动叶平均直径截面上的理想焓降所确定的反动度，称为平均反动度。对较短的直叶片级，由于蒸汽参数沿叶高差别不大，所以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，必须用相应截面的反动度。

(二) 汽轮机级的类型及特点

根据蒸汽在级通流部分的流动方向，可将汽轮机级分为轴流式（气流方向与轴平行）和辐流式（气流方向和轴垂直）两种。目前国内发电用汽轮机绝大多数为轴流式。轴流式汽轮机的级通常可分为下列几种。

1. 冲动级和反动级

按蒸汽在动叶通道内膨胀程度的不同，即反动度的大小不同，轴流式汽轮机的级可分为冲动级和反动级。

(1) 冲动级。反动度 $\Omega_m = 0$ 的级称为纯冲动级，如图 1-6 所示。它的工作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，当不考虑损失时，动叶通道进出口压力相等，相对速度也相等（即 $w_1 = w_2$ ），且 $\Delta h_b = 0$ ，故 $\Delta h_t^* = \Delta h_n^*$ 。它的结构特点是，动叶叶型几乎为对称弯曲，即动叶通道内各通流截面近似相同。纯冲动级做功能力大，但效率比较低，现代汽轮机均不采用纯冲动级，而是采用带少量反动度（ $\Omega_m = 0.05 \sim$

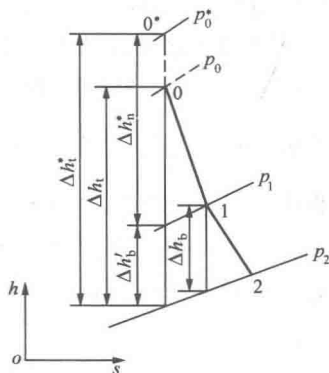


图 1-5 级的热力过程线

0.2) 的冲动级。它的工作特点是蒸汽的膨胀大部分在喷嘴叶栅中进行, 只有一小部分在动叶栅中进行, 即 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n > \Delta h_b$ 。蒸汽作用在动叶栅上的力主要是冲动力, 还有一小部分是反动力。这种级的做功能力比反动级大, 效率比纯冲动级高, 所以得到了广泛的应用。

(2) 反动级。反动度 $\Omega_m \approx 0.5$ 的级称为反动级。它的工作特点是蒸汽在喷嘴和动叶通道中的膨胀程度相等, 即 $p_1 > p_2$, $\Delta h_n \approx \Delta h_b \approx 0.5 \Delta h_t$ (因为 $\frac{c_0^2}{2}$ 一般较小)。由于蒸汽在动叶中的膨胀占了整级膨胀的一半, 产生的反动力很大, 所以在这种级中做功的力基本上冲动力和反动力各占一半。这种级的结构特点是动叶叶型与喷嘴叶型相同, 如图 1-7 所示。反动级的效率比纯冲动级高, 但做功能力较小。

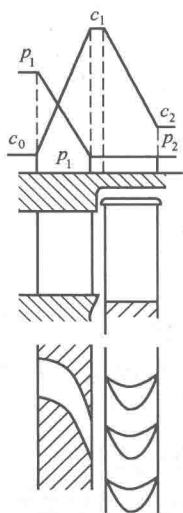


图 1-6 纯冲动级中压力和速度变化示意

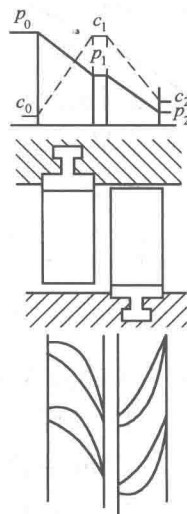


图 1-7 反动级中蒸汽压力和速度变化示意

2. 压力级和速度级

按蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程不同还把汽轮机的级分为压力级和速度级两种。

(1) 压力级。蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程在级内只进行一次的级称为压力级。这种级在叶轮上只装一列动叶栅, 故又称单列级。压力级可以是冲动级, 也可以是反动级。

(2) 速度级。蒸汽的动能转换为转子的机械能的过程在级内进行一次的级称为速度级, 速度级可以是双列和多列。

蒸汽从单列级动叶通道流出时, 仍具有一定的速度 c_2 , 其带走的动能为 $\frac{c_2^2}{2}$, 这部分动能在本级中无法转变成机械功, 称为余速损失。

当级的焓降很大时, 动叶的排汽余速 c_2 也很大, 仍具有一定的做功能力。此时, 可以在同一叶轮的第一列动叶后再装一列动叶, 由于第一列动叶出口的汽流方向与叶轮旋转方向相反, 所以在两列动叶之间还要装设一列固定在汽缸上的导向叶片。第一列动叶通道的排汽经过导向叶片后改变方向, 然后进入第二列动叶通道继续做功。这种只有一列喷嘴, 后面有