

21 世纪能源与动力系列教材
Textbook Series of Energy & Power for 21st Century

汽轮机与燃气轮机原理及应用

Principle and Application of Steam Turbine and Gas Turbine

◇ 主 编 / 黄庆宏



东南大学出版社

21 世纪能源与动力系列教材

汽轮机与燃气轮机 原理及应用

主 编 黄庆宏

主 审 侯小刚

东南大学出版社

· 南 京 ·

内 容 简 介

全书按设备内容分为蒸汽轮机和燃气轮机两大部分,共10章。主要叙述了涡轮机级的工作原理、多级涡轮机、涡轮机变工况、蒸汽轮机的凝汽设备、蒸汽轮机调节保护系统、燃气轮机及其热力循环、压气机、燃烧室、联合循环与系统等内容。书中综合了蒸汽轮机和燃气轮机两种设备的工作特性,从其基本工作的角度出发,详细地讲解了各种设备的工作原理、性能分析、计算方法和管理运行等内容。此外,书中还跟踪当今燃气轮机的新技术成就,介绍了先进的大功率燃气轮机和联合循环、压气机的可控扩压叶型、燃煤联合循环、新的热力循环等,使读者能了解当今涡轮机械设备及其应用的发展水平。

本书不仅可作为高等学校热能工程专业本科“涡轮机械原理”课程的教科书,也可供从事涡轮机械设计、试验研究、人员培训的工程技术人员使用,以及作为本科生报考研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机与燃气轮机原理及应用/黄庆宏主编. —南京:
东南大学出版社,2005.11

(21世纪能源与动力系列教材)

ISBN 7-5641-0127-X

I. 汽... II. 黄... III. 蒸汽涡轮机—高等学校—教材 IV. TK26

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 047647 号

汽轮机与燃气轮机原理及应用

出版发行 东南大学出版社

出 版 人 宋增民

社 址 南京市四牌楼2号

邮 编 210096

电 话 025-83792954 025-83362442(传真)

电 邮 zhu_min_seu@163.com

经 销 江苏省新华书店

印 刷 丹阳兴华印刷厂印刷

开 本 787mm×1092mm 1/16

印 张 27.25

字 数 680千字

版 次 2005年11月第1版

印 次 2005年11月第1次印刷

印 数 1—3000册

定 价 45.00元

(凡因印装质量问题,请与我社读者服务部联系。电话:025-83792328)

21 世纪能源与动力系列教材编委会

主任 侯小刚

编委 侯小刚

余跃进

张 奕

卢 平

路诗奎

赵孝保

李传统

周 欣

辛洪祥

丁轲轲

徐生荣

郭恩震

张少凡

序

热现象是自然界中最普遍的物理现象。工程热力学、传热学是以热现象为研究对象的学科,主要研究热能与机械能或其他形式能量之间的转换与传递规律,研究对热能合理、有效利用的技术及方法。热能的转换、传输、控制、优化与利用的各环节都离不开对流体流动规律的认识与利用,离不开燃烧理论与技术的研究与运用。因此,工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等几门课程成为能源与动力类专业的主要技术基础课。

古人云:巧心、劳力、成器物者曰工。作为工程技术学科的教材,要体现探求规律,认识规律,运用规律,物化成果的要求。针对应用型工程技术专业的实际需要,南京师范大学等院校开展了对能源与动力学科系列课程的建设与改革,在此基础上组织编写了轮机原理及应用、工程流体力学、工程热力学、传热学、燃烧理论与技术等课程教材,作为能源动力类系列教材推出。几本教材既相互联系,又各具特色。随着教育、教学改革的深入,将陆续出版能源动力类系列教材。

工程专业是关于科学知识的开发应用和关于技术的开发应用的,在物质、经济、人力、政治、法律和文化限制内满足社会需要的,一种有创造力的专业。因此,对于工程应用专业人才,需要他们具备宽广的专业面、全面的工程素质。上述几本教材,还可以作为大多数工程技术专业的公共技术基础课程用,在培养全面发展的工程技术人才方面发挥作用。

侯小刚

于南京师范大学

2003年10月

前 言

燃气轮机与蒸汽轮机都是连续工作的回转式机械,其工作原理都是将高温高压的工质在静叶(喷嘴)中加速,产生一股具有很高动能的流束,再用流束冲动安装在叶轮上的动叶片运动,产生高速旋转的运动机械能。与内燃机等一些动力设备相比,它们作为一种原动机,具有功率大、效率高、结构紧凑、性能可靠、环保性能好等诸多优点,被广泛应用在火力发电厂、航空发动机、热电联合发电厂等领域。

相对蒸汽轮机来讲,燃气轮机的研发、生产和应用等各个方面都相对要起步得晚些。自1883年第一台单级冲动式蒸汽轮机发电机组投入实际商业运行以来,蒸汽轮机已有一百多年的历史。而燃气轮机的真正发展和应用,主要是从上世纪20年代开始的,在50年代,燃气轮机不仅在航空发动机领域占据了主导优势,而且在其他非军事领域也取代了大部分内燃发动机。在新世纪之初,燃气轮机大发展的春天已经悄悄地向我们走来。随着“西气东送”工程的竣工和天然气的广泛引用,在华东地区,将建设一批大容量的燃气轮机电厂,这在我国是前所未有的,是燃气轮机在我国发展的转折点,预示燃气轮机发电机组将逐步走出配角的位置。

全书内容分为涡轮机级的工作原理、多级涡轮机、涡轮机在变工况下的工作、汽轮机的凝汽设备、蒸汽轮机调节及保护系统、燃气轮机、燃气轮机热力循环、压气机、燃烧室、联合循环与系统等10章。在编写过程中,注意吸收近年来蒸汽轮机和燃气轮机教学的经验和教训,参照了“汽轮机原理”和“涡轮机械原理”两课程的教学大纲,加强阐述了基础理论和基本原理的内容,在选材上注意体现了国内现阶段蒸汽轮机和燃气轮机的装机情况和运行中普遍存在的问题。

本书的特点之一是:将以往在蒸汽轮机和燃气轮机分别讲述的原理部分内容,糅合在一起,删除了重复的内容,保留了主要的内容。特点之二是:在每章的结尾处将本章的内容做了一个小结,并加进了编者结合多年教学实践经验而收集的思考题和习题,可供读者进一步加深对内容的理解和学习,也给自学者提供了自我总结、自我考核的依据。本书在编写过程中,得到了南京汽轮电机集团、科研部门、兄弟高等院校的热情帮助和支持,得到了南京师范大学“品牌与特色专业建设”专项基金的支助,本书由上海电力学院姚秀平教授审阅,在此向他们表示感谢。

由于编者水平有限,书中可能有错误和不妥之处,请读者批评指正。

编 者

2005年4月

目 录

1 涡轮机级的工作原理	(1)
1.1 气流在基元级内的流动	(2)
1.1.1 基本假设和基本方程式	(2)
1.1.2 基元级中气流参数的变化	(3)
1.1.3 气流在基元级喷嘴中的膨胀过程	(4)
1.1.4 气流在基元级动叶中的流动	(8)
1.1.5 气流在基元级内流动的基本公式	(10)
1.2 基元级的轮周效率和最佳速度比	(11)
1.2.1 速度三角形和轮周功率	(11)
1.2.2 轮周效率及其与速度比的关系	(14)
1.2.3 蒸汽轮机的速度级及其轮周功率、轮周效率	(18)
1.2.4 做功量系数	(21)
1.3 涡轮机叶片的冷却	(21)
1.3.1 对流冷却	(22)
1.3.2 冲击冷却	(23)
1.3.3 气膜冷却	(24)
1.3.4 发散冷却	(24)
1.3.5 综合冷却叶片	(25)
1.3.6 对冷却空气的要求	(25)
1.3.7 涡轮机叶片的闭环蒸汽冷却	(26)
1.3.8 有冷却的涡轮机级 $h-s$ 图	(27)
1.4 涡轮机叶栅的几何参数与叶片扭转规律	(28)
1.4.1 叶型参数	(29)
1.4.2 叶栅参数和叶栅气动参数	(30)
1.4.3 叶栅的气动性能	(31)
1.4.4 叶片的扭转规律	(33)
1.5 叶栅尺寸的确定	(40)
1.5.1 喷嘴栅尺寸的确定	(40)
1.5.2 动叶栅尺寸的确定	(41)
1.6 级内各项损失和级效率	(43)
1.6.1 级内损失	(43)
1.6.2 级效率和热力过程线	(58)
1.7 向心涡轮机	(59)
1.7.1 向心涡轮机的工作过程	(60)

1.7.2 向心涡轮机的反动度·····	(63)
1.7.3 向心涡轮机的功与功率·····	(64)
1.7.4 向心涡轮机的比转速·····	(65)
1.7.5 向心涡轮机的效率·····	(65)
本章小结·····	(65)
思考题·····	(66)
习题·····	(67)
2 多级涡轮机·····	(70)
2.1 多级涡轮机的优越性及其特点·····	(70)
2.1.1 多级涡轮机的优点·····	(71)
2.1.2 子午剖面通流部分的形式·····	(71)
2.1.3 比焓降分配与级数选择·····	(72)
2.1.4 重热现象和重热系数·····	(73)
2.1.5 多级涡轮机各级段的工作特点·····	(75)
2.1.6 蒸汽轮机装置的评价指标·····	(76)
2.2 蒸汽轮机进汽、排汽损失和热力过程线·····	(78)
2.2.1 进汽阀门节流损失·····	(78)
2.2.2 排汽管阻力损失·····	(79)
2.3 多级涡轮机的轴向推力及其平衡·····	(80)
2.3.1 冲动式涡轮机的轴向推力·····	(80)
2.3.2 反动式涡轮机的轴向推力·····	(84)
2.3.3 轴向推力的平衡方法·····	(84)
2.4 轴封及其系统·····	(85)
2.4.1 曲径轴封·····	(85)
2.4.2 蒸汽轮机轴封系统的特点·····	(89)
本章小结·····	(90)
思考题·····	(90)
习题·····	(91)
3 涡轮机在变工况下的工作·····	(92)
3.1 渐缩喷嘴的变工况·····	(92)
3.1.1 渐缩喷嘴的流量关系式·····	(92)
3.1.2 彭台门系数 β 定义及近似关系·····	(93)
3.1.3 喷嘴前后参数变化的流量变化·····	(93)
3.1.4 流量网图·····	(94)
3.1.5 相似原理在燃气轮机中的应用·····	(95)
3.2 级与级组的工况变化·····	(101)
3.2.1 级前后压力与流量的关系·····	(101)

3.2.2 级组压力与流量的关系	(104)
3.2.3 弗留格尔公式在蒸汽轮机中的应用	(106)
3.2.4 工况变动时, 涡轮机级扭矩的变化	(107)
3.3 蒸汽轮机的配汽方式和调节级的变工况	(110)
3.3.1 喷嘴调节和调节级的变工况	(110)
3.3.2 节流配汽	(115)
3.3.3 汽轮发电机组滑压运行的经济性与安全性	(117)
3.4 工况变动时各级比焓降、反动度的变化	(118)
3.4.1 工况变动时各级比焓降的变化	(118)
3.4.2 工况变动时级的反动度变化规律	(121)
3.5 轴向推力的变化	(123)
3.5.1 冲动式蒸汽轮机轴向推力的变化	(123)
3.5.2 反动式蒸汽轮机轴向推力的变化	(125)
3.6 凝汽式蒸汽轮机的工况图	(125)
3.6.1 节流配汽凝汽式蒸汽轮机工况图	(125)
3.6.2 喷嘴配汽凝汽式蒸汽轮机工况图	(126)
3.6.3 蒸汽量调节方式的比较与选择	(126)
本章小结	(127)
思考题	(128)
习题	(129)
4 蒸汽轮机的凝汽设备	(131)
4.1 凝汽设备的组成及作用	(131)
4.1.1 凝汽设备的组成	(131)
4.1.2 凝汽设备的作用	(132)
4.2 凝汽器内压力的确定及其影响因素	(133)
4.2.1 凝汽器内压力的确定	(133)
4.2.2 影响凝汽器压力的因素	(133)
4.2.3 总体传热系数的确定	(135)
4.3 凝汽器的变工况	(136)
4.3.1 基本概念	(136)
4.3.2 工况变化对冷却水温升和传热端差的影响	(136)
4.3.3 凝汽器特性曲线的计算与绘制	(137)
4.3.4 凝汽器的运行	(138)
本章小结	(141)
思考题	(141)
习题	(142)

5 蒸汽轮机调节及保护系统	(143)
5.1 蒸汽轮机调节保护系统的任务和系统组成	(143)
5.1.1 蒸汽轮机调节保护系统的任务	(143)
5.1.2 中间再热蒸汽轮机调节保护系统的特点	(144)
5.1.3 蒸汽轮机调节系统的基本组成和种类	(146)
5.2 典型的蒸汽轮机的调节系统简介	(148)
5.2.1 高速弹性调速器调节系统	(148)
5.2.2 径向泵液动调节系统	(149)
5.2.3 旋转阻尼液动调节系统	(150)
5.3 蒸汽轮机调节系统的静态特性	(151)
5.3.1 四方图	(151)
5.3.2 速度变动率	(152)
5.3.3 迟缓率	(153)
5.3.4 同步器与静态特性曲线平移	(155)
5.4 蒸汽轮机调节系统的动态特性	(156)
5.4.1 动态特性基本概念	(156)
5.4.2 影响甩负荷动态特性的主要因素	(157)
5.5 蒸汽轮机液压调节系统	(159)
5.5.1 转速感受机构	(159)
5.5.2 传动放大机构	(162)
5.5.3 油动机	(165)
5.5.4 配汽机构	(171)
5.5.5 蒸汽轮机液压调节系统分析	(174)
本章小结	(175)
思考题	(176)
习题	(176)
6 燃气轮机	(178)
6.1 燃气轮机的工作原理	(178)
6.2 燃气轮机的类型和优点	(179)
6.2.1 燃气轮机的类型	(179)
6.2.2 燃气轮机的优点	(181)
6.3 燃气轮机的现状及趋势	(182)
6.3.1 燃气轮机的现状和水平	(182)
6.3.2 燃气轮机的发展趋势	(183)
6.4 燃气轮机在我国的应用与发展	(185)
6.4.1 燃气轮机在我国的应用	(185)
6.4.2 我国燃气轮机工业的发展	(185)
本章小结	(188)

思考题	(189)
7 燃气轮机热力循环	(190)
7.1 理想简单循环	(190)
7.2 实际简单循环	(192)
7.2.1 压气机和涡轮机效率	(194)
7.2.2 燃烧室效率	(195)
7.2.3 压力损失	(196)
7.2.4 工质流量的差别	(197)
7.2.5 机械损失	(198)
7.2.6 工质热力性质的差别	(198)
7.3 回热循环	(199)
7.4 复杂循环	(201)
7.4.1 间冷循环	(201)
7.4.2 再热循环	(202)
7.4.3 间冷再热循环	(204)
7.4.4 回热的复杂循环	(204)
7.5 航空燃气轮机循环	(205)
7.5.1 航空燃气轮机的应用及种类	(205)
7.5.2 涡喷发动机	(205)
7.5.3 涡扇与涡桨发动机	(208)
7.6 闭式循环	(209)
7.7 燃气轮机热力循环计算方法	(210)
7.7.1 概述	(210)
7.7.2 简单循环的计算	(213)
本章小结	(220)
思考题	(220)
习题	(221)
8 压气机	(222)
8.1 概述	(222)
8.2 压气机级的工作原理	(225)
8.2.1 基元级概念的引出	(225)
8.2.2 基元级的气流速度三角形	(225)
8.2.3 外界通过工作叶轮对气体施加的理论功	(228)
8.2.4 基元级的压缩功	(229)
8.2.5 基元级的效率	(233)
8.2.6 基元级的反动度	(234)
8.3 压气机叶栅的几何参数与叶片扭转规律	(236)

8.3.1 叶型几何参数	(236)
8.3.2 叶栅几何参数	(239)
8.3.3 气流特征角	(239)
8.3.4 叶片扭转规律	(239)
8.3.5 准三元流理论—— S_1 和 S_2 面理论	(249)
8.3.6 全三元解	(249)
8.4 跨声速压气机级	(250)
8.4.1 概述	(250)
8.4.2 超声速基元级的增压原理及设计特点	(251)
8.4.3 超声速基元级的叶型	(252)
8.5 压气机级中的能量损失	(253)
8.5.1 叶型损失	(254)
8.5.2 环端面损失	(256)
8.5.3 二次流损失	(256)
8.6 压气机工作过程的特点	(259)
8.7 多级轴流压气机	(263)
8.7.1 概述	(263)
8.7.2 多级轴流压气机中各级的特点	(264)
8.7.3 单级效率与多级效率的关系	(265)
8.7.4 多级轴流式压气机通流部分形式	(268)
8.8 压气机变工况及特性曲线	(269)
8.8.1 压气机性能的主要参数	(269)
8.8.2 压气机的变工况	(270)
8.8.3 压气机的特性线	(271)
8.8.4 压气机的通用特性曲线	(275)
8.9 压气机的喘振及防喘措施	(278)
8.9.1 在压气机中发生喘振的原因	(278)
8.9.2 压气机中防止喘振的措施	(283)
8.10 轴流压气机通流部分的设计方法	(286)
8.10.1 平面叶栅法	(286)
8.10.2 模型级法	(286)
8.10.3 整机模化设计	(287)
8.10.4 加级设计	(287)
8.11 离心压气机	(287)
8.11.1 概述	(287)
8.11.2 径向叶片工作轮的进口前缘及气流的进、出口速度三角形	(288)
8.11.3 工作叶轮	(289)
8.11.4 无叶扩压器	(296)
8.11.5 叶片扩压器	(298)
8.11.6 离心压气机特性曲线	(298)

本章小结	(299)
思考题	(300)
习题	(302)
9 燃烧室	(303)
9.1 概述	(303)
9.2 燃烧室的工作特点、要求和指标	(304)
9.2.1 燃烧室的工作特点	(304)
9.2.2 燃烧室的工作要求和性能指标	(306)
9.3 燃烧室的热力过程	(312)
9.3.1 过量空气系数	(312)
9.3.2 燃料完全燃烧产物的组成成分和热力性质	(314)
9.3.3 燃料的发热量	(317)
9.3.4 燃烧过程的热平衡和热力计算	(319)
9.4 燃烧过程的物理化学原理概要	(323)
9.4.1 概述	(323)
9.4.2 化学反应速度	(324)
9.4.3 气体燃料的均相预混燃烧现象及其某些规律	(325)
9.4.4 气体燃料扩散燃烧现象的基本规律	(329)
9.4.5 液体燃料燃烧现象的基本规律	(330)
9.5 典型燃烧室中燃烧过程的组织	(332)
9.5.1 概述	(332)
9.5.2 燃烧室中空气流的组织	(333)
9.5.3 燃烧室中燃料流的组织	(336)
9.5.4 燃烧室中的火焰概貌	(337)
9.6 燃烧室部件与结构	(338)
9.6.1 一次配气机构	(338)
9.6.2 燃气的混合机构	(341)
9.6.3 火焰筒壁的冷却机构	(342)
9.6.4 过渡段	(345)
9.6.5 点火机构	(345)
9.6.6 燃气轮机燃烧室结构分析要点	(348)
9.6.7 典型环型燃烧室结构介绍	(351)
9.7 液体燃料喷嘴	(353)
9.7.1 液体燃料的雾化	(353)
9.7.2 液体燃料雾化的质量指标	(354)
9.7.3 常用离心式喷嘴的原理和工作特性	(355)
9.7.4 空气雾化喷油嘴	(361)
9.7.5 机械-空气雾化喷油嘴	(362)

9.8 气体燃料的燃烧	(362)
9.8.1 天然气的燃烧问题	(363)
9.8.2 双燃料喷嘴	(365)
9.8.3 低热值煤气的燃烧问题	(366)
9.9 重质燃油的燃烧	(367)
9.9.1 燃气轮机燃用渣油产生的问题	(367)
9.9.2 燃用渣油在燃烧技术上应采取的措施	(369)
9.9.3 防止结垢与腐蚀的措施	(370)
9.10 低污染排放燃烧室	(371)
9.10.1 燃烧室中污染物的产生	(371)
9.10.2 干式低排放(DLE)燃烧室	(372)
9.10.3 催化燃烧	(374)
本章小结	(375)
思考题	(376)
习题	(377)
10 联合循环与系统	(379)
10.1 燃气蒸汽联合循环的基本方案	(379)
10.1.1 余热锅炉型联合循环	(379)
10.1.2 排气补燃型联合循环	(380)
10.1.3 增压燃烧锅炉型联合循环	(381)
10.1.4 加热锅炉给水型联合循环	(381)
10.1.5 锅炉并联型联合循环	(381)
10.2 联合循环的热力性能	(382)
10.2.1 联合循环的参数	(382)
10.2.2 燃气轮机循环性能对联合循环的影响	(382)
10.2.3 蒸汽循环性能对联合循环的影响	(384)
10.2.4 余热锅炉性能对联合循环的影响	(385)
10.3 提高联合循环效率的措施	(386)
10.3.1 改善余热锅炉和蒸汽轮机的性能	(386)
10.3.2 充分利用燃气轮机排气热量	(387)
10.3.3 提高蒸汽侧循环效率	(387)
10.4 余热锅炉与蒸汽轮机	(388)
10.4.1 联合循环中的蒸汽轮机	(388)
10.4.2 联合循环中的余热锅炉	(390)
10.5 联合循环的运行	(396)
10.5.1 联合循环启动的类型	(396)
10.5.2 多轴联合循环机组的启动	(396)
10.5.3 单轴联合循环机组的启动	(399)

10.5.4 其他特点	(401)
10.6 燃煤联合循环	(401)
10.6.1 整体煤气化联合循环(IGCC)	(401)
10.6.2 增压流化床燃烧联合循环(PFBC-CC)	(402)
10.6.3 常压流化床燃煤联合循环	(403)
10.7 新的热力循环	(404)
10.7.1 卡林那(Kalina)循环	(404)
10.7.2 湿空气燃气轮机(HAT)循环	(405)
10.7.3 化学回热燃气轮机(CRGT)循环	(405)
10.7.4 燃料电池联合循环	(406)
10.8 燃气轮机热电联供	(407)
10.8.1 联供系统的方案	(407)
10.8.2 联供系统的性能	(409)
10.8.3 联供系统的设计	(410)
10.8.4 应用举例	(412)
10.8.5 多联供系统	(412)
本章小结	(413)
思考题	(414)
习题	(415)
参考文献	(416)

1

涡轮机级的工作原理

蒸汽轮机和燃气轮机是一种将工质(蒸汽或燃气)的热能转换为机械功的旋转式动力机械。它们都隶属于涡轮机械(简称涡轮机),使用蒸汽的被称为蒸汽轮机,它是现代火力发电厂中应用最广泛的动力机械。使用燃气的被称为燃气轮机,它是一种新型的动力机械,可以用在火力发电厂来带动发电机,也可以用在飞机、舰船和机车等运输工具上,作为发动机。

蒸汽轮机和燃气轮机应用于动力工业上,是为了驱动发电机并使它产生大量的电能或驱动其他动力机械(例如大型水泵或高炉鼓风机等)以满足日益发展的工农业生产的需要。目前发电厂的发动机主要是蒸汽轮机;供发电厂用的燃气轮机在我国还处在试验研究性的试制阶段,然其在航空上已大量被采用。

涡轮机被广泛地应用于国民经济各部门,是因为它们与其他动力机械(如蒸汽机和内燃机)比较具有以下几方面的特点:

第一,它的功率大。涡轮机是连续工作的回转式机械,在其内工质的热能,首先转换成动能,然后再由动能转换为机械功;而活塞式发动机是一种往复式的动力机械,在其内工质的热能将直接转换为机械功。进入气缸的气流不能太多,因为若进入气缸内的气流增加,必将造成活塞的行程增加、气缸的直径增大(与此相应的活塞直径亦增加),这样,气缸的尺寸及活塞的直径就很大,增加了活塞往复运动时的惯性力,降低了运行时的安全可靠性能。但在蒸汽轮机和燃气轮机内,由于它们是连续回转式机械,所以,可以大大地提高进入其中的气流量,从而提高涡轮机的功率。

第二,它具有高速性。所谓高速性是指涡轮机叶片的运动速度很高。在上述内容中已说明了进入涡轮机中的气流量可以增加,单位时间内流入涡轮机中的气流量与其速度有关。在第3章将要分析,气流的流动速度与涡轮机叶片的运动速度有一定的比例关系。气流的增加,必然导致涡轮机叶片运动速度的提高。

第三,它具有较高的经济性。由热力学得知,提高热力循环的初参数,可以提高热效率。而在蒸汽轮机和燃气轮机中,可采用高温高压的蒸汽和燃气。尤其是在蒸汽轮机中,各国采用的蒸汽初压可达 $160\sim 245\text{ MPa}$,初温可达 $535\sim 565^\circ\text{C}$ 。此外,在凝汽式蒸汽轮机中,由于采用很低的背压(可达 $3\,040\text{ Pa}$),所以可充分利用蒸汽做功,从而提高涡轮机的工作经济性。

由于以上特点,涡轮机与其他动力机械比较,有着显著的优越性。目前各国对涡轮机的发展非常重视。

本章将介绍涡轮机级的工作原理和气动热力计算。

“级”是涡轮机中最基本的工作单元。在结构上看它是由静叶栅(喷嘴栅)和对应的动叶栅组成。从能量观点上看,它是将气流的能量转变为涡轮机能的一个能量转换过程。气流的热能在喷嘴栅中(也可以有部分在动叶栅中)首先转变为气流的动能,然后在动叶栅中这部分动能再转变为机械能。级的工作过程在一定程度上反映了整个涡轮机的工作过程,对涡轮机工作原理的讨论一般总是从“级”开始的,这有助于理解和掌握全机的内在规律性。

气流的热能之所以能转变为涡轮机的机械能,是由气流在涡轮机喷嘴栅和动叶栅中的热

力过程形成。因此,研究级的热力过程,也就是研究气流在喷嘴栅和动叶栅中的流动特点和做功原理,以及产生某些损失的原因,并从数量上引出它们相互之间的转换关系。

1.1 气流在基元级内的流动

1.1.1 基本假设和基本方程式

1) 基本假设

为了讨论问题的方便,除把气流当作理想气体处理外,还假设:

(1) 气流在级内的流动是稳定流动,即气流的所有参数在流动过程中与时间无关。实际上,绝对的稳定流动是没有的,气流流过一个级时,由于有动叶在喷嘴栅后转过,气流参数总有一些波动。当涡轮机稳定工作时,由于气流参数波动不大,可以相对地认为是稳定流动。

(2) 气流在级内的流动是一元流动,即级内气流的任一参数只沿一个坐标(流程)方向变化,而在垂直截面上没有任何变化。显然,这和实际情况也是不相符的,但当级内通道弯曲变化不激烈,即曲率半径较大时,可以认为是一元流动。

我们设想一个级内的流动是由无限多层环形薄层所组成,像我们把平面二元流场以流线分为很多平面上的基元流管一样。但在这里是用很多由回转面形成的流面(这种流面是由一个以转动轴为圆心的圆上的所有质点的轨迹组成),把级分成许多环形的流管,即许多同心无限薄层的级,这就是基元级。若进一步假定径向分速很小,可以忽略,就成为我们所要研究的圆柱面基元级。对轴流式涡轮机,以平均直径处的圆柱面为基元级,按照一元流动的假设,用平均直径上的参数代表垂直截面上的所有参数。

(3) 气流在级内的流动是绝热流动,即气流流动的过程中与外界无热交换。由于气流流经一个级的时间很短暂,可近似认为正确。

考虑到即使用更复杂的理论来研究气流在级内的流动,其结论与涡轮机真实的工作情况也不完全相符,而且推算也甚为麻烦,因此,上述的假设在用一些实验系数加以修正后,在工程实践中也是可行的。

2) 基本方程式

在汽轮机的热力计算中,往往需要应用可压缩流体一元流动方程式,这些基本方程式有:状态及过程方程式、连续性方程式和能量守恒方程式。

(1) 状态及过程方程式

理想气体的状态方程式为

$$p = RT\rho \quad (1-1)$$

式中: p ——绝对压力(Pa);

R ——气体常数,蒸汽常数 $R=461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$,空气常数 $R=287.06 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——热力学温度(K);

ρ ——气体密度(kg/m^3)。

当气流进行等熵膨胀时,膨胀过程可用下列方程式表示:

$$p/\rho^k = \text{常数} \quad (1-2)$$

其微分形式为