

普通高等教育“十五”规划教材



LARGE STEAM TURBINE OPERATION

# 大型汽轮机运行

孙奉仲 主 编



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

普通高等教育“十五”规划教材



LARGE STEAM TURBINE OPERATION

# 大型汽轮机运行

主 编 孙奉仲  
编 写 史月涛  
主 审 黄树红



中国电力出版社

<http://jc.cepp.com.cn>

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了汽轮机运行的基本原理和最新运行技术。在介绍汽轮机运行技术的同时,充分考虑现代单元机组的特点,理清汽轮机与锅炉的关系,兼顾介绍与汽轮机密切相关的锅炉运行技术。这是本书的一大特色。

本书首先论述了大型汽轮机的结构特点和热力特性,又介绍了暂态过程中汽轮机部件的热状态和寿命损耗,为分析汽轮机的启动和停机奠定了理论基础。然后重点介绍了大型汽轮机的启动和停机过程、运行方式、运行经济性和运行可靠性,汽轮机的调峰以及事故处理。在介绍传统机组技术特性的基础上,又介绍了机组的最新技术,包括超临界压力汽轮机和超超临界压力汽轮机的运行特点、汽轮机的全三维技术、核电汽轮机运行技术、联合循环汽轮机的运行技术以及空冷汽轮机的运行技术等。

本书可作为高等学校能源动力类及其他相关专业的教材,也可以供发电厂运行和管理人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

大型汽轮机运行/孙奉仲主编. -北京:中国电力出版社, 2005

普通高等教育“十五”规划教材

ISBN 7-5083-3017-X

I. 大… II. 孙… III. 火电厂-汽轮机运行-高等学校-教材 IV. TM621.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第004974号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://jc.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2005年3月第一版 2005年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17.5印张 406千字

印数 0001—3000册 定价 27.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

# 序

由中国电力教育协会组织的普通高等教育“十五”规划教材，经过各方的努力与协作，现在陆续出版发行了。这些教材既是有关高等院校教学改革成果的体现，也是各位专家教授丰富的教学经验的结晶。这些教材的出版，必将对培养和造就我国 21 世纪高级专门人才发挥十分重要的作用。

自 1978 年以来，原水利电力部、原能源部、原电力工业部相继规划了一至四轮统编教材，共计出版了各类教材 1000 余种。这些教材在改革开放以来的社会主义经济建设中，为深化教育教学改革，全面推进素质教育，为培养一批批优秀的专业人才，提供了重要保证。原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会在此间的教材建设工作中，发挥了极其重要的历史性作用。

特别需要指出的是，“九五”期间出版的很多高等学校教材，经过多年的教学实践检验，现在已经成为广泛使用的精品教材。这批教材的出版，对于高等教育教材建设起到了很好的指导和推动作用。同时，我们也应该看到，现用教材中有不少内容陈旧，未能反映当前科技发展的最新成果，不能满足按新的专业目录修订的教学计划和课程设置的需要，而且一些课程的教材可供选择的品种太少。此外，随着电力体制的改革和电力工业的快速发展，对于高级专门人才的需求格局和素质要求也发生了很大变化，新的学科门类也在不断发展。所有这些，都要求我们的高等教育教材建设必须与时俱进，开拓创新，要求我们尽快出版一批内容新、体系新、方法新、手段新，在内容质量上、出版质量上有突破的高水平教材。

根据教育部《关于“十五”期间普通高等教育教材建设与改革的意见》的精神，“十五”期间普通高等教育教材建设的工作任务就是通过多层次的教材建设，逐步建立起多学科、多类型、多层次、多品种系列配套的教材体系。为此，中国电力教育协会在充分发挥各有关高校学科优势的基础上，组织制订了反映电力行业特点的“十五”教材规划。“十五”规划教材包括修订教材和新编教材。对于原能源部、电力工业部组织原全国高等学校电力、热动、水电类专业教学指导委员会编写出版的第一至四轮全国统编教材、“九五”国家重点教材和其他已出版的各类教材，根据教学需要进行修订。对于新编教材，要求体现电力及相关行业发展对人才素质的要求，反映相关专业科技发展的最新成就和教学内容、课程体系的改革成果，在教材内容和编写体系的选择上不仅要有本学科（专业）的特色，而且注意体现素质教育和创新能力与实践能力的培养，为学生知识、能力、素质协调发展创造条件。考虑到各校办学特色和培养目标不同，同一门课程可以有多种教材供选择使用。上述教材经中国电力教育协会电气工程学科教学委员会、能源动力工程学科教学委员会、电力经济管理学科教学委员会的有关专家评审，推荐作为高等学校教材。

在“十五”教材规划的组织实施过程中，得到了教育部、国家经贸委、国家电力公司、

中国电力企业联合会、有关高等院校和广大教师的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

教材建设是一项长期而艰巨的任务，不可能一蹴而就，需要不断完善。因此，在教材的使用过程中，请大家随时提出宝贵的意见和建议，以便今后修订或增补。（联系方式：100761 北京市宣武区白广路二条1号综合楼9层 中国电力教育协会教材建设办公室 010-63416237）

**中国电力教育协会**

# 前 言

电力是国民经济的重要基础产业，是经济和社会发展的重要能源。人类文明的进步，人民生活质量的提高，国民经济的发展，均离不开电力工业。作为火力发电厂原动机的汽轮机，也随着电力行业的快速发展，无论从技术理论上，设计运行上，还是制造检修方面，均有了很大的进展。从过去的中低参数的汽轮机，发展到亚临界压力、超临界压力以至于超超临界压力机组，从过去的中小容量汽轮机发展到超过 1000MW 的大型单元制机组，从过去的单一运行方式，发展到现在的滑参数启动、变压运行、中亚缸启动等新的运行方式，从过去的简单液压调节方式，发展到以数字技术为特征的全自动运行方式，这些进步都标志着汽轮机技术已经迈入了一个新的时代。

本书就是在这样的背景下写作的。

当本书第一稿完成的时候，已经是 2004 年的初春了。

在 2004 年，我国的电力装机总容量要达到 4 亿 kW。这种振奋人心的消息激励着编者，应该拿出一本质量更高、更能反映时代技术特征、更能反映最新技术、更能代表一代代研究汽轮机的专家学者们的技术思想、更能影响将要从事汽轮机运行事业的大学生的教科书。这就是本书的写作理念，这就是本书的写作目的。这个理念始终贯穿整个写作过程，这个理念始终要求着编者精益求精，这个理念始终组织着全书的基本内容。

汽轮机的运行内容非常丰富，对于具体的每台汽轮机组的运行步骤，都有详细的运行规程可以遵循。本书主要介绍涉及到汽轮机运行的有关理论和技术，包括大型汽轮机的结构特点和热力特性、暂态工况下汽轮机部件的热状态和寿命损耗、启动和停机、运行方式、运行经济性、运行可靠性、汽轮机的调峰以及事故处理等。还包括了汽轮机的最新技术，超临界压力汽轮机和超超临界压力汽轮机的运行特点、汽轮机的全三维技术、核电汽轮机运行技术、联合循环汽轮机的运行技术以及空冷汽轮机的运行技术等。

由华中科技大学黄树红教授审阅过的稿子中，编者看到了黄教授认真治学的态度，看到了黄教授卓越的学术水平，看到了黄教授为本书付出的心血。真诚感谢黄树红教授对本书的贡献。

当本书的第二稿改完的时候，正值 2004 年的秋末冬初，同时又传来了我国首台 1000MW 超超临界机组主设备投入安装的消息。这个消息让编者感到欣慰，因为本书中介绍的超超临界机组的内容在我国可以使用了。

本书的编写得到了中国电力教育协会能源动力学科教学指导委员会的大力支持，把本书列入了普通高等教育“十五”规划教材。但愿这本书的出版能够满足教学指导委员会的要求，同时感谢教学指导委员会的信任和支持。

本书的绪论，第一章至第四章，第七章由山东大学孙奉仲教授编写；第五章和第六章由

山东大学史月涛博士编写。在编写过程中，得到了山东大学领导以及同事们的大力支持，在此表示感谢。

本书的写作，还得到了兄弟院校、汽轮机制造厂、电力设计院、电力研究院等有关部门的大力支持，参考了他们的许多研究成果，在此表示感谢。

本书的写作，始终受到编者学生们的鼓励，每每编者站在讲台上，面对众多渴望知识的面孔，编者就倍受鼓舞。本书的写作，也始终受到工作在发电厂生产第一线的编者朋友们的鼓励，他们兢兢业业的工作态度和对技术知识的热爱，使编者信心倍增。本书的写作，也始终得到编者家人的支持和理解，特别感谢你们！

感谢本书的编辑卓有成效的工作，使得本书能够快速出版。

鉴于编者的水平和掌握的资料有限，本书难免有论述不当之处，甚至错误，欢迎批评指正！

孙奉仲于山东大学

sfzh@sdu.edu.cn

# 目 录

序	
前言	
绪论	1
<b>第一章 汽轮机的热力特性及结构特点</b>	<b>5</b>
第一节 概述	5
第二节 汽轮机的热力特性	8
第三节 汽轮机的结构特点	20
第四节 超临界压力汽轮机	50
<b>第二章 汽轮机部件暂态工况下的热状态及寿命损耗</b>	<b>59</b>
第一节 暂态工况下的传热现象	59
第二节 热应力	62
第三节 热膨胀	67
第四节 热变形	70
第五节 特殊条件下的材料机械性质	71
第六节 汽轮机的寿命	76
第七节 汽轮机的寿命管理与预测	88
<b>第三章 汽轮机的启动和停机</b>	<b>98</b>
第一节 汽轮机的启动方式分类	98
第二节 冷态滑参数启动	101
第三节 热态启动	111
第四节 中压缸启动	114
第五节 汽轮机的停机	118
第六节 汽轮机启动、停机中的几个特殊问题	124
<b>第四章 汽轮机的运行调整与可靠性</b>	<b>137</b>
第一节 汽轮机的运行方式与运行监督	137
第二节 运行经济性	147
第三节 汽轮机组的协调运行	153
第四节 超临界压力汽轮机运行	159
第五节 汽轮机的非正常运行方式	166
第六节 汽轮机的运行可靠性	170
<b>第五章 汽轮机调峰运行</b>	<b>175</b>
第一节 概述	175
第二节 汽轮机的调峰方式	179



第三节	汽轮机的低负荷运行与小容积流量工况 .....	192
第四节	汽轮机调峰运行的分析 .....	202
<b>第六章</b>	<b>汽轮机的运行安全性</b> .....	<b>206</b>
第一节	事故处理原则 .....	206
第二节	叶片损坏 .....	207
第三节	油系统故障 .....	212
第四节	汽轮发电机振动事故 .....	222
第五节	大轴弯曲 .....	245
第六节	汽轮机进水 .....	248
<b>第七章</b>	<b>特种汽轮机的运行</b> .....	<b>256</b>
第一节	核电汽轮机 .....	256
第二节	联合循环汽轮机 .....	259
第三节	空冷汽轮机 .....	262
<b>参考文献</b>	.....	<b>269</b>

## 绪 论

随着我国国民经济的发展,工农业生产的需要和人民生活水平的提高,作为基础工业的电力工业也得到了迅速发展。一大批大、中型火电厂相继建成投产,到2003年底全国装机容量已达384500MW。在电力工业的发展过程中,单机容量不断增大,机组参数逐渐提高,从单机操作管理到机、炉、电协调控制,自动化水平迅速发展。这标志着我国电力工业的运行管理水平有了较大的提高。作为火力发电厂和原子能发电厂发电机的原动机,汽轮机是一种大型高速回转式动力机械。材料工业的发展,计算机技术的应用,自动化水平的提高,极大地促进了大型汽轮机机组的生产和使用。

20世纪投运的火力发电单轴最大功率汽轮机是原苏联列宁格勒金属工厂制造的23.5MPa/540℃/540℃超临界压力1200MW汽轮机,采用一次中间再热,冲动式五缸六排汽,低压末级叶片高度为1200mm,3000r/min,设计热耗7650kJ/(kW·h),于1982年12月正式投运。

20世纪投运的火力发电双轴最大功率汽轮机是ABB公司制造的24.2~25.4MPa/538℃/538℃超临界压力1300MW汽轮机,采用一次中间再热,反动式六缸八排汽,低压末级叶片高度为760mm和1016mm,3600/3600(r/min)和3600/1800(r/min)。首台1300MW汽轮机于1972年投运,到1992年底,国外共有9台1300MW双轴汽轮机投入运行,全部安装在美国。

20世纪蒸汽参数最高的百万千瓦级大功率汽轮机是日本三菱公司和日立公司生产的24.5MPa/600℃/600℃超临界压力1000MW汽轮机。三菱公司的产品为一次中间再热反动式双轴四缸四排汽,3600/1800(r/min),低压末级动叶片高度为1170mm,发电效率为44%。首台机组于1998年6月投运。日立公司的机组为一次中间再热冲动式双轴四缸四排汽,3000/1500(r/min),低压末级叶片高度为1041.1mm,发电效率44.74%。首台机组于1998年6月投运。

20世纪最大功率的核电汽轮机是GEC-ALSTHOM公司制造的7.1MPa/286.3℃,功率1531MW,冲动式单轴四缸六排汽,1500r/min,低压末级动叶片高度为1450mm,首台机组于1992年在法国Chooz核电站投运。

基于世界各国的能源政策和能源价格,20世纪90年代,大部分大功率发电机组仍然是燃煤机组,但是燃用煤炭比燃用其他燃料如天然气、重油等会释放出更多的污染物,例如SO<sub>x</sub>、NO<sub>x</sub>、CO<sub>2</sub>、烟尘等。锅炉的烟气净化和脱硫装置的单位造价随着汽轮机功率的增大而下降,因此20世纪90年代后期投运的火电汽轮机呈现出大功率和蒸汽参数高温高压化的倾向,并且向更大功率、更高参数的二次中间再热电站汽轮机发展。俄罗斯列宁格勒金属工厂认为:1200MW的单轴汽轮机与800MW单轴汽轮机相比,单位千瓦的制造成本可降低10%左右,金属消耗量可减少14%,电站投资可降低4%,发电成本可降低2.5%。该厂生产的

1200MW 汽轮机于 1982 年已投运, 现在正在设计开发火电 1600MW 单轴超临界压力汽轮机, 还准备进一步研制火电 2000MW 单轴超临界压力汽轮机。

我国自 1958 年开始生产汽轮机, 60 年代开始生产 200MW 和 300MW 的高参数机组, 后来生产 600MW 的亚临界压力机组。近十余年来, 除国产的机组外, 还从国外引进了一批大容量、高参数的机组, 包括 300MW、600MW、900MW 和 1000MW 的机组, 以及 600MW 的超临界压力机组。到目前为止, 高参数大容量机组已有数百台在运行, 在电力工业中发挥着重要的作用。我国已经能生产 600MW、900MW 的大型机组, 这表明我国汽轮机的设计制造技术已达到一个新水平。

在 300MW、600MW 汽轮机的基础上, 我国正在开展更大功率 (1000MW 级) 超临界蒸汽参数汽轮机的研制。为了进一步降低煤耗, 积极发展和开发供热机组, 实行热电联产, 我国重点发展 125~600MW 热电联产汽轮机。为了更好地使煤富水贫地区的经济迅速发展, 重点开发 300~600MW 空冷汽轮机。

汽轮机从开始应用发展到现在, 其蒸汽参数不断提高, 机组容量不断增大, 级数越来越多, 复杂程度越来越高, 因此对于汽轮机运行技术的要求也越来越高。汽轮机启动方式由额定参数启动发展到目前的滑参数启动和中压缸启动, 运行方式由最初的定压运行发展到现在的复合滑压运行方式。随着控制技术和计算机数字技术的发展, 汽轮机的调节与控制更是由原来的纯液压调节方式发展到目前的数字电液调节方式。在汽轮机发展过程中, 其主要特点有七点。

#### 1. 增大单机功率

增大单机功率不仅能迅速发展电力生产规模, 而且具有下列优点:

- (1) 单位功率投资成本低;
- (2) 单机功率越大, 机组的热经济性越好;
- (3) 降低电站建设投资和运行费用。

#### 2. 提高蒸汽参数

为了提高机组的经济性并降低环保设备投资, 汽轮机应采用较高的蒸汽参数。现代大功率机组采用的新蒸汽参数越来越高, 从高温高压机组, 发展到超高压、亚临界压力、超临界压力机组。当今世界上 300MW 及以上容量的机组均为亚临界压力或超临界压力的机组, 甚至采用超超临界压力的机组。

#### 3. 普遍采用中间再热

采用中间再热后可降低低压缸末级排汽湿度, 减轻末级叶片水蚀程度, 为提高蒸汽初压创造了条件, 从而可提高机组内效率、循环效率和运行可靠性。有些机组甚至采用了二次再热。

#### 4. 采用燃气—蒸汽联合循环, 以提高电厂效率

目前以天然气和油为燃料的燃气蒸汽联合循环发电效率已达 50% 以上, 技术已经成熟; 以煤为燃料的联合循环, 例如整体煤气化联合循环 (IGCC), 在我国也在筹划建设中。以燃料电池为高端发电设备、燃气轮机为中端发电设备、蒸汽轮机为低端发电设备的三联合循环技术也在研究中, 届时, 整个电站的发电效率将超过 60%。

### 5. 提高机组的自动化水平

大功率机组的控制极其复杂。随着计算机技术的发展, 机组的自动化控制水平逐渐提高。利用计算机可以进行运行的实时监控, 性能、效率的在线计算, 启动、停机、增减负荷的自动控制等。目前国外已经有了以计算机为主体的全自动化火力发电厂, 同时还确立了有效利用彩色电视显像、音响通报装置、辅机听音装置等视听机能的综合人机对话系统。可以说, 国外某些电厂已进入了利用设备诊断技术、以系统运行管理为目标的超自动运行的火力发电时代。

### 6. 提高机组的可靠性

机组容量大、系统结构复杂, 相应地发生事故的可能性也变大, 因此提高其安全可靠非常重要。现代大机组在结构设计上采取了大量提高可靠性的措施, 例如单独阀体结构、多层汽缸、转子冷却、取消转子中心孔等。为了提高机组运行、维护和检修水平, 增设和改善了保护、报警和状态监测系统, 有的还配置了智能化故障诊断系统。

### 7. 提高机组的运行水平

基于寿命管理的变负荷控制方式, 机炉电的协调控制等都是运行水平提高的标志。随着电网容量的不断增大, 调峰任务也势必落到大机组上, 因此大机组在结构、系统方面应能适应变工况运行的性能要求。经常保持主辅设备和系统的优化运行, 以提高机组的运行经济性, 并保证规定的设备使用寿命, 这是评价大容量机组技术水平的重要标准。

对汽轮机运行总的要求就是保证设备的安全性和运行的可靠性, 在安全的前提下, 取得最高的经济性, 并可以适应电网负荷的变化。汽轮机的启动、停机和负荷变化, 必然会产生一些损耗, 从而使得设备的可靠性和经济性都有所降低, 因此应了解并掌握汽轮机各种工况下的热力特性和运行特性。汽轮机在启动、停机和负荷变动等暂态过程中, 其工作状态不断发生变化, 蒸汽与金属之间的热交换也会发生变化, 造成汽轮机部件受热不均匀, 从而可能产生比较大的温差, 使得汽轮机内部产生较大的热应力、热变形和热膨胀。转子部件和静子部件的热膨胀不相等, 易引起通流部分及汽封处轴向间隙的变化而产生磨损; 转子轴向推力过大, 汽缸膨胀滑销系统的卡涩均会破坏设备的同轴性, 使机组振动恶化等, 这些都是很重要的运行问题。因此, 作为运行者应了解机组启动、停机和变负荷的特性, 熟悉启动、停机和变负荷的规程和这些规程所依据的基本理论等。

在长期的运行实践中, 积累了丰富的经验, 尤其是典型事故的分析 and 处理。吸取前人的教训, 借鉴以往发生的重大事故的经验, 以防患于未然, 对于汽轮机运行人员同样是重要的。

根据以上论述, 作为运行者, 为了保证汽轮机能够长期安全连续地运行, 必须熟悉汽轮机设备的热力特性和结构特点, 掌握涉及到汽轮机启动、停机 etc 暂态过程的基本分析方法, 包括涉及到的材料科学、机械科学、信息科学、热科学等相关学科的基本知识, 熟悉影响汽轮机工况变化速度的各种因素。在此基础上, 能够对各种容量、各种参数的汽轮机组, 进行运行经济性和可靠性的分析, 制定更适合于机组特点、更符合实际情况的运行规程; 对于实际运行过程中的参数能够进行综合分析, 获得影响机组经济性和可靠性的因素, 以确定最优的运行方式; 对于运行中出现的各种现象、故障或者事故, 能够及时进行正确的分析和处

---

理；可以根据技术的进步和设备的改进，进一步完善机组的运行规程和运行方式。所有这些要求，都是建立在掌握和熟悉汽轮机运行基本理论的基础上的。

因此，本书的重点就是全面介绍汽轮机运行的相关理论基础和技术。

## 第一章 汽轮机的热力特性及结构特点

随着我国电网容量的增大和汽轮机技术的发展,我国已经能够管理、运行 300、600、900MW 等大容量、亚临界或超临界压力的机组。为了掌握汽轮机的运行特性、提高运行管理水平,必须对汽轮机组的工作特性和相应的结构特点有所了解。有关汽轮机的热力特性已在汽轮机原理等书中介绍,本章为适应运行的要求,对其影响运行的特点作一简要介绍。

### 第一节 概 述

汽轮机运行,就是要使现在服役的机组能够以最安全的方式、最经济的过程,达到该机组所能够达到的出力。因此,在研究汽轮机运行原理之前必须了解汽轮机组的基本规范以及基本要求。事实上,汽轮发电机组的规范已由国际电工委员会(IEC)制定。

#### 一、功率

1. 国际电工委员会对汽轮发电机组功率(或出力)等术语的一般定义

(1) 发电机功率:发电机接线端(输出端)处的功率。若采用非同轴励磁时,还需扣掉外部励磁的功率。

(2) 净电功率:发电机功率减去厂用电功率。

(3) 经济功率(ECR):机组在此功率下,汽轮机热耗率或汽耗率为最小值。

(4) 保证最大连续功率(T-MCR):在规定的终端参数(合同中规定的各端部条件,包括主蒸汽和再热蒸汽参数、最终给水温度、排汽压力、转速、抽汽要求等)和边界条件下,机组不超过使用寿命长期连续运行所发出的功率,也就是额定功率。通常该功率对应一个热耗保证值。此工况下调节阀不一定全开。

(5) 调节汽阀全开工况(VWO)的功率:在规定的蒸汽参数条件下,汽轮机调节汽阀全开,机组所能输出的功率。

(6) 最大过负荷能力:在规定的过负荷条件下,如末级给水加热器停运或主蒸汽压力提高,汽轮机调节汽阀全开下,机组所能输出的最大功率。

2. 国际上对大容量汽轮发电机组功率等术语的一般定义

(1) 额定功率(铭牌功率,铭牌出力)。指汽轮机在额定主蒸汽和再热蒸汽参数下,排汽压力为 11.8kPa(a)、补水率为 3%时,在发电机接线端输出的功率。

(2) 机组的保证最大连续功率(T-MCR)。指汽轮机在通过铭牌功率所保证的进汽量、额定主蒸汽和再热蒸汽参数工况下,排汽压力为 4.9kPa(a)、补水率为 0%时,机组能保证达到的功率。它一般比额定功率大 3%~6%。

(3) 汽轮机的设计进汽流量(计算最大进汽量)。在所保证的进汽量基础上增加一定的

裕量, 即 1.03~1.05 倍保证进汽量, 且调节汽阀全开。近代由于制造水平提高, 裕量取前者, 即 3%。

(4) 调节汽阀全开 (VWO) 时的计算功率。机组在调节汽阀全开时, 通过计算最大进汽量和额定的主蒸汽、再热蒸汽参数工况下, 并在额定排汽压力为 4.9kPa、补水率 0% 条件下计算所能达到的功率。

对于火电机组的额定出力, IEC 标准已有明确的定义, 但出力裕量没有具体数值上的规定, 应根据实际情况和制造厂的传统习惯而定。设计上的出力裕量涉及到冬夏季的平均温差、制造厂整体的生产技术水平、机组的安装运行情况、配套辅机的性能以及热经济性等多种因素。但也并非裕量越大越好, 如设计裕量偏大, 机组正常运行的工况的热经济性就会降低, 热力系统及相应的辅机配套也会造成一定容量的浪费。

机组的出力与实际运行中的蒸汽参数、热力系统状态有关, 也与安装误差有关。运行一段时间后还要考虑老化的影响。根据统计, 机组在大修前出力会降低约 3%, 考虑这些因素, 机组的出力裕量一般应考虑约 4%。设计计算与加工装配存在一定的制造公差, 考虑制造加工因素的影响, 机组出力裕量还应加上约 4%。还应考虑夏季冷却水温 and 年平均冷却水温的差距带来的影响, 如夏季冷却水温若取 33℃, 年平均冷却水温取为 26℃, 则为了在夏季能保证达到额定出力, 应考虑约 5% 的出力裕量。还有其他因素需要考虑, 例如系统补水超标 (通常电厂运行中系统补水均大于设计值), 厂用抽汽等, 应考虑约 1% 的出力裕量。

综合上面的各种因素, 机组总的出力裕量可定为约 14%。对于这样大的设计出力裕量, 如果仅用增加进汽裕量、增大进汽面积来解决, 虽然完全能够做到, 却是不合理的。带来的问题是 1~2 只调节阀经常不开或部分开启, 造成节流损失, 对机组的工作可靠性也不利。所以通常用 VWO+5%OP 来实现。这样, 机组设计时只需留 10% 的通流面积裕量, 其余部分通过超压 5% 来实现。下述的美国的机组就是这样规定的。

### 3. 美国设计的大容量汽轮发电机组各项功率的术语和定义

(1) 汽轮发电机组额定功率: 在额定主蒸汽和再热蒸汽参数下、排汽压力为 11.8kPa (a)、补水率为 3% 时汽轮发电机组的保证功率 (出力)。

(2) 进汽量: 在额定工况下汽轮发电机组发出保证功率所需的主蒸汽流量。

(3) 保证最大功率: 汽轮机在额定的主蒸汽和再热蒸汽参数工况以及额定的排汽压力与补水条件下, 通过对应于额定功率时的进汽量的机组功率。

(4) 最大计算功率 (或 VWO 功率): 汽轮发电机组在额定的进汽参数和额定背压与补水率条件下, 调节汽阀全开时, 通过最大计算进汽量时的计算功率 (非保证值)。一般比最大保证功率高出 4.5%, 即 1.045 倍最大保证功率。

(5) 超压 5% 的连续运行功率: 除核电机组外, 汽轮发电机组能安全地在调节汽阀全开和所有回热加热器投运下, 超压 5% 连续运行的功率。这种运行方式下汽轮机通流能力比额定主蒸汽压力下的通流能力增加 5%。

美国设计的机组以 VWO 工况为运行基础, 为适应日间峰值负荷的需要, 可采用 VWO+5%OP 工况超压 5% 连续运行, 或采用停运最末级高压加热器的运行方式。当采用这种方式运行时, 在 12 个月的运行期内, 其平均进汽压力不超过额定压力的 105%, 上限不超

过额定压力的 106%，瞬时最高值为 130% 额定压力。在 12 个月内，进汽压力在 106% ~ 130% 额定压力的运行时间累计不超过 12h。根据此规定，机组允许超压 5% 长期运行，但与作为额定参数运行要求是不同的。5% 超压工况并非额定设计工况，如作为额定工况来运行，机组就会偏离最佳设计点，除非对通流部分重新设计。其次，如作为额定工况来运行，则通流部分强度上也不允许。

日本或其他欧洲国家所设计的大容量机组以 VWO 工况下的功率为汽轮机最大功率，而以超压 5% 为最大负荷能力，即每天可超压 5% 运行的时间需加以限定，也就是超压 5% 仅作为机组短时间过负荷的能力。

#### 4. 机、炉、电容量匹配

(1) 发电机容量：一般发电机的功率应与 VWO 工况的功率相匹配，即等于 VWO 工况功率/功率因数 (MVA)。若采用美国机组，则发电机的功率应与汽轮机 VWO + 5% OP 工况的功率相匹配。在我国，考虑汽轮机和发电机功率配合时，除了功率因数外，还应合理确定发电机的效率。

(2) 锅炉最大连续蒸发量 (B-MCR)：应与汽轮机的设计流量 (即计算最大进汽量) 相匹配，不必再加裕量。若汽轮机按 VWO 工况计算最大功率，B-MCR 蒸发量等于汽轮机 VWO 工况的最大进汽量；若采用美国设计的机组，则 B-MCR 蒸发量可等于汽轮机 VWO + 5% OP 工况的最大进汽量。日本生产的机组通常在铭牌功率或 T-MCR 工况下运行，其锅炉最大连续蒸发量比汽轮机 VWO 工况时的进汽量约大 0 ~ 3.3%。

### 二、热耗率或汽耗率的保证值

按照 IEC 规定，保证的热耗率和汽耗率是与负荷相对应的，因此应规定一个或几个负荷，而当保证值是用一系列负荷下的加权平均值表示时，则应明确计算方法。为了校验保证值，试验所测得的热耗率和汽耗率，应考虑试验工况与规定工况的差别。

### 三、最高转速

每台汽轮机转子均需做超速试验。超速试验的试验转速应为：当调速器失灵而且最高转速只由超速脱扣装置的动作用来限制所能出现的最大转速再加 2%。超速试验的延续时间不得超过 2min，超速试验只能进行一次。

在任何情况下，超速试验不得超过额定转速 20%。

### 四、振动

汽轮机振动可在轴承座或轴上测出。直接在轴上测出的振动，往往要比轴承座上测出的值大得多，这取决于轴的节点、拾振器的轴向位置以及轴承设计等因素。

汽轮机轴系的临界转速应避开额定转速并有一定的余量，以避免机组在频率变化、超速脱扣和超速试验的转速范围内运行时影响到安全性。

### 五、零部件强度

为了保证加工质量和材料强度，所有在工作时承受蒸汽压力的部件，当其工作压力超过大气压力时应做水压试验。试验时的水压至少应超过该部件工作时最高压力的 50%。

对于承受高温的部件，如果运行时不承受较大的应力，选择材料时，应避免由于内部结构或组织的变化，或由于材料和周围环境间的作用而形成材料性质的改变。如果运行时承受



较大的应力，则应保证部件在工作应力、温度和寿命损耗等条件下，不发生断裂或变形超过允许值。

## 六、额定汽压、汽温的变化限制

### 1. 压力

在任何 12 个月的运行周期内，汽轮机进口的平均压力不得超过额定压力。在保持此平均值的情况下，压力不得超过额定压力的 110%。在例外情况下可允许达到额定压力的 120%，但在任何 12 个月的运行周期内，这些压力波动的累计运行时间不得超过 12h。

再热器安全阀应整定到使再热器前的汽轮机排汽压力，不能超过该机以额定功率运行时此点压力的 120%。

### 2. 温度

额定温度在 565℃ 及以下者，其允许的变化如下：在任何 12 个月的运行周期内，汽轮机的任何进口处平均蒸汽温度不得超过额定温度。在保证此平均值的情况下，温度一般不得超过额定温度 8.3℃。在例外情况如温度超过额定温度 8.3℃，温度瞬时值可在超过额定温度 8.3~14℃ 的范围内变化，但在任何 12 个月的运行周期内，在此温度范围内的运行时间不得超过 400 h。在超过额定温度 14~28℃ 的范围内运行也可允许，但在任何 12 个月的运行周期内，在此温度范围总运行时间不得超过 80h。任何情况下，温度不得超过额定温度 28℃ 以上。

如有两个或更多平行管道对汽轮机供汽时，各管道中蒸汽温度相差不得超过 17℃。在例外情况下，如温度波动延续不超过 15min，可允许不超过 28℃ 的温度差。但最热管道中的蒸汽温度不得超过上段所给出的限制。

## 第二节 汽轮机的热力特性

汽轮机的热力特性包括蒸汽参数、各级的焓降分配、工作过程、各级的特征参数如反动度、速度比的变化规律以及变工况规律等，因此，热力特性与蒸汽在汽轮机中的做功过程密切相关，直接影响到能量的转换和利用。汽轮机作为火力发电厂中的原动机，要求它能够长期连续安全运行，并且尽可能保持较高的经济性，要做到这一点，就必须充分了解汽轮机的热力特性、制订合理的运行规程和检修规程，对其进行合理的利用和有效的维护。例如，对新投产的机组，要根据压力和温度的变化规律以及材料的强度特性详细制订汽轮机的启动曲线，对于工况经常变动的机组，要根据变工况规律去研究机组运行经济性和零部件的安全性。因此，汽轮机运行的经济性和安全性均与热力特性有关。

### 一、蒸汽参数

#### (一) 概述

中小型汽轮机采用的蒸汽参数较低，大多以中温中压机组为多，新蒸汽参数一般为 3.43MPa、435℃，机组尺寸较小，运行时易于控制。现代大功率机组采用的新蒸汽参数越来越高，从高温高压机组，发展到超高压、亚临界压力机组、超临界压力和超超临界压力的机组。表 1-1 列出了几种汽轮机的蒸汽参数。就目前我国电力工业发展的水平，一般 125~