



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DAXING QILUNJI YUNXING

大型汽轮机运行

孙奉仲 主编

Thermal Energy & Power



中国电力出版社

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

工程流体力学(第三版)
工程流体力学
高等工程流体力学
泵与风机(第四版)
泵与风机
工程热力学
工程传热学
计算流体力学与传热学
辐射介质传热
电站锅炉原理及计算
锅炉原理
电厂锅炉原理及设备(第三版)
电厂锅炉原理(第二版)
循环流化床锅炉设备及系统

大型汽轮机运行

汽轮发电机组振动与处理
单元机组运行(第二版)
燃气轮机与联合循环
热力发电厂(第二版)
热力发电厂(第三版)
动力工程概论
能源与环境系统工程概论
现代发电厂概论(第二版)
能源与动力装置基础
热能工程试验研究方法与技术
热工测量及仪表(第三版)
自动测量技术
电厂热工过程自动控制
电厂热工过程自动调节(第二版)
电厂自动控制系统
热工保护与顺序控制(第二版)
工程燃烧学
燃烧理论与应用
燃烧污染与环境保护
能源环境控制理论及治理技术
热动力设备排放污染及控制
能源与节能技术(第二版)
能源经济学
能源工程管理
能源与动力专业英语(第三版)
热控专业英语(第二版)
核能发电原理(第二版)
水利水电工程概论(第三版)
水电站水库运行与调度

孔 珑
杜广生
吴克启、舒朝辉
何 川、郭立君
安连锁
严家骥
许国良
陶文铨
刘 伟
岑可法
樊泉桂
叶江明
丁立新
朱皑强、芮新红

孙奉仲

李录平
牛卫东
姚秀平
郑体宽
叶 涛
付忠广
方梦祥、金 滔
文 锋
何国庚
岑可法
朱小良
丁轲轲
王建国
丁轲轲
张建华
王志祥
汪 军
徐明厚
邱建荣
岑可法
龚金科
黄素逸
黄素逸
任有中
阎维平
齐宪华等
马 进
田士豪
陈森林

ISBN 978-7-5083-7647-9



9 787508 376479 >

定价: 32.00元



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
PUTONG GAODENG JIAOYU SHIYIWU GUOJIAJI GUIHUA JIAOCAI

DAXING QILUNJI YUNXING

大型汽轮机运行

主编 孙奉仲
编写 史月涛
主审 黄树红 李录平



中国电力出版社

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

Thermal Energy & Power

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。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, 2008

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-5083-7647-9

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(2008)第094594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>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年7月第一版 2008年7月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 19.75印张 482千字

定价 32.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
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

随着经济的快速发展,我国的发电行业已经发展到历史上最为辉煌的时期,装机总容量已达7亿kW,超临界参数以上的机组数量已达近200台,仅超超临界参数的1000MW机组已经规划建设近100台,已有数台1000MW机组在运行。与此同时,国家对于节能减排的重视,使得我们必然面临一系列新的挑战,新的设备、新的技术、新的要求等将出现在我们面前。这一切,给作者提出了更为严格的要求。

本书力图展现现代汽轮机运行最新技术、最新发展,全面反映现代汽轮机运行的一般原理和特殊规则。在内容编排上,加重了汽轮机运行原理和汽轮机结构特点的分析与介绍,汽轮机热力特性和结构特点分别单独列为一章,更为系统和全面。为了适应节能的需要,增加了汽轮机运行经济性的分析内容,并把汽轮机作为火电厂整体循环的有机组成部分,分析回热系统的经济性、超临界参数的机组的选择等。与当今现代火电技术的发展相适应,本书依然把全三维技术、超临界参数、超超临界参数机组的分析作为重点。同时,增加现代大型汽轮机材料一节,分析了超临界、超超临界参数机组所用材料的发展历史与展望。

本书注重知识性和方法性的结合,既介绍了汽轮机运行的相关理论,又着重于介绍某一类问题的分析方法,使得读者能够触类旁通,掌握现代汽轮机运行知识的学习方法和分析方法。

本书由华中科技大学黄树红教授和长沙理工大学李录平教授担任主审。黄教授和李教授在宏观上和细节上均给出了合理的建议,提出了详细的修改意见。作者诚恳接受两位教授的意见,本书的全部内容,都有两位教授的心血,真诚感谢黄树红教授和李录平教授对本书的贡献。

本书已列入国家“十一五”重点规划教材,感谢教学指导委员会的信任和支持。

本书的绪论,第一章~第五章、第八章由山东大学孙奉仲教授编写,第六章、第七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、设计单位、研究单位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。

本书的出版,希望给我的朋友们、同仁们、学生们、家人们一个安慰,感谢你们的支持和理解。

鉴于作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

前言

绪论	1
第一章 汽轮机的热力特性	5
第一节 汽轮机功率规范及基本热力性能保证	5
第二节 汽轮机的基本蒸汽参数及规律	10
第三节 汽轮机流量变化对于热力特性的影响	14
第四节 汽轮机调节方式对于热力特性的影响	16
第五节 汽轮机蒸汽参数变化对于热力特性的影响	21
第六节 汽轮机级内反动度及轴向推力的变化	29
第七节 汽轮机的总体热力特性及热力过程线	33
第二章 现代汽轮机结构特点	38
第一节 汽轮机的基本结构特点	38
第二节 汽缸	53
第三节 转子与轴系	71
第四节 超临界参数汽轮机	78
第五节 现代汽轮机材料	89
第三章 汽轮机部件暂态工况下的热状态及寿命损耗	97
第一节 暂态工况下的传热现象	97
第二节 热应力	100
第三节 热膨胀	107
第四节 热变形	110
第五节 特殊条件下的材料机械性质	112
第六节 汽轮机的寿命	116
第七节 汽轮机的寿命管理	128
第四章 汽轮机的启动和停机	138
第一节 汽轮机的启动方式分类	138
第二节 冷态滑参数启动	141
第三节 热态启动	151
第四节 中压缸启动	154
第五节 汽轮机的停机	159
第六节 汽轮机启动、停机中的几个特殊问题	164
第五章 汽轮机的运行调整与可靠性	180
第一节 汽轮机的运行方式与运行监督	180
第二节 运行经济性	191

第三节	汽轮机组的协调运行	198
第四节	超临界参数汽轮机运行	203
第五节	汽轮机的非正常运行方式	212
第六节	汽轮机的运行可靠性	215
第六章	汽轮机调峰运行	219
第一节	概述	219
第二节	汽轮机的调峰方式	223
第三节	汽轮机的低负荷运行与小容积流量工况	234
第四节	汽轮机调峰运行的分析	244
第七章	汽轮机的运行安全性	247
第一节	事故处理原则	247
第二节	叶片损坏	248
第三节	油系统故障	252
第四节	汽轮发电机振动事故	263
第五节	大轴弯曲	284
第六节	汽轮机进水	287
第八章	特种汽轮机的运行	295
第一节	核电汽轮机	295
第二节	联合循环汽轮机	298
第三节	空冷汽轮机	301
主要参考文献		307

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2006年底全国装机容量已达6.22亿kW。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。

自20世纪90年代开始,汽轮机技术的新突破主要体现在两个方面:第一,从1993年起新一代铁素体9%~10%Cr钢成功地在600℃机组中得到应用,日本和欧洲开发了世界新一代超超临界参数汽轮机,并正向含B和Co的620℃铁素体11%Cr材料、650℃奥氏体材料、700℃镍基材料发展;第二,为满足800~1000MW全速汽轮机低压缸以及配“F”级燃气轮机的同轴140MW单流汽轮机低压缸的需求,新一代技术——排汽面积突破11m²的特大型长叶片开发成功。最早起步的西门子1146mm叶片以及60Hz的钛合金1067mm叶片于1997年投运。近十多年,特大型长叶片成为各大公司技术开发的重点。

20世纪投运的火力发电单轴最大功率汽轮机是前苏联列宁格勒金属工厂制造的23.5MPa/540℃/540℃超临界参数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℃超临界参数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℃超临界参数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_x、NO_x、CO₂、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 单轴超临界参数汽轮机,还准备进一步研制火电 2000MW 单轴超临界参数汽轮机。

进入 21 世纪以来,我国开始投运 1000MW 容量的汽轮机组。而在欧洲、美国,其新建的洁净燃煤电厂,考虑到脱硫、脱硝、除尘装置的综合费用,都以 600~800MW 为其基本机型。

我国自 1958 年开始生产汽轮机,20 世纪 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 300、600、900MW 和 1000MW 的机组,以及 600MW 的超临界参数机组。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 600、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 300、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。近几年我国大批超临界参数机组顺利投运,成功地实现了从亚临界向超临界产品技术的飞越;一批世界最先进的、最大容量的燃气轮机及联合循环机组投运;代表世界洁净燃煤最高技术水平的一系列超超临界参数 1000MW 机组制造及投运;大批世界新一代直接空冷汽轮机的开发等,将标志着中国电力工业发电设备及技术进入了关键发展时期。

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目前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,分述如下。

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、亚临界参数、超临界参数机组。当今世界上 300MW 及以上容量的机组均为亚临界参数或超临界参数的机组,甚

至采用超超临界参数的机组。

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性非常重要。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。

提高运行经济性也是目前火力发电厂提出的重要课题。随着我国各行各业对节能减排的严格要求、环境保护的重视,从运行的角度控制汽轮机的经济性,使其处于高效率运转状态,也成为运行管理的一项重要任务。现今,我国运行的发电机组,平均发电效率在 35% 左右,发电煤耗在 $374\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 左右;国产亚临界参数机组的发电效率在 38% 左右,发电煤耗在 $350\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 左右;引进的 60 万 kW 超临界参数机组的发电效率在 39% 左右,发电煤耗在 $310\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 左右;超超临界参数机组的发电效率在 44% 左右,发电煤耗在 $256\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$ 左右。2006 年,我国火电机组供电标准煤耗为 $366\text{g}/(\text{kg}\cdot\text{h})$,较国际先进水平高 60g 左右。因此,我国通过运行控制达到节能的潜力还是很巨大的。

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,掌握涉及汽轮机启动、停机等暂态过程的基本分析方法,包括涉及的材料科学、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

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、900、1000MW 等大容量,亚临界、超临界、超超临界参数的机组。为了掌握汽轮机运行特性,提高运行管理水平,必须对汽轮机组的热力特性有所了解。

汽轮机的热力特性,就是汽轮机在完成热能向机械能转化过程中表现出来的工质热力学状态参数(压力、温度、比焓、比熵、密度等)、过程特征参数(速度、焓降、流量、速度比、反动度、功率、效率)的变化规律,反映了几何尺寸与介质参数的匹配性,反映了设计的汽轮机材料特性、气体动力学特性与经济性、可靠性的关系。它包括蒸汽参数、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,对其进行合理地利用和有效地维护。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拟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。

第一节 汽轮机功率规范及基本热力性能保证

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(IEC 45-1, 1991)

(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:在规定的主蒸汽参数条件下,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, 考虑年平均水温等因素规定的背压 [排汽压力为 4.9kPa (a)], 补水率为 0% 及回热系统正常投入, 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) 调节汽阀全开工况 (VWO) 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和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, 但却是不合理的。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. 中国的相关规定

早期中国的发电设备容量较小，技术落后，当时汽轮机出力的概念仅局限于额定出力（或铭牌出力，最大出力）和经济出力两种提法，它们均是以冷却水温 20℃ 和 0% 补水率为基础，并且只要求在夏季 33℃ 冷却水温下，仍能保证机组发额定出力。随着国民经济和电力工业迅猛发展，发电机组的容量日益增长，陆续从国外引进一批 300MW 及以上容量的机组，开始出现最大连续出力、阀门全开出力等一些新提法。

(1) 额定功率

当汽轮机在额定主蒸汽、再热蒸汽参数及所规定的汽水品质，额定背压（4.9kPa），回热系统正常投运，补水率为 0%，规定的最终给水温度，以及发电机为额定运行条件、额定效率时，汽轮发电机组输出的功率为额定功率，该工况称为汽轮机的额定工况，此时的蒸汽流量称为汽轮机的额定蒸汽流量。机组在此工况运行最经济，通常作为热耗率保证值的验收工况，是热耗考核工况（THA）之一。机组的 75%THA 工况为热耗率保证值的第二验收工况。

(2) 铭牌功率（TRL）

当汽轮机在额定主蒸汽、再热蒸汽参数及所规定的汽水品质，对湿冷机组一般背压为 11.8kPa（对空冷机组背压一般为 30kPa），回热系统正常投运，补水率为 3%，规定的最终给水温度，以及发电机为额定运行条件与额定效率时，汽轮发电机组输出的功率为铭牌功率，该工况称为汽轮机的能力工况，此时的蒸汽流量称为最大保证流量。此工况通常作为汽轮机额定出力的验收工况。

我国规定，在夏季冷却水温或气温升高时，汽轮机应能发出额定功率。冷却水温及气温升高时对应的凝汽器压力，一般在上述背压附近，故汽轮机铭牌功率工况通常也称为汽轮机夏季工况。

(3) 最大连续功率（TMCR）

当汽轮机在额定进汽参数和额定背压（4.9kPa）下，回热系统正常投运，补水率为 0%，发电机额定运行条件、额定效率时，通过汽轮机的流量为铭牌功率的蒸汽流量时，汽轮发电机组输出功率为汽轮机的最大连续功率。

(4) 调节阀全开功率 (VWO)

当汽轮机为调节阀全开、额定进汽参数和额定背压 (4.9kPa)、回热系统正常投运、补水率为 0%，以及发电机为额定运行条件时，汽轮发电机组的输出功率为调节阀全开功率，又称为汽轮机的最大功率。此时通过汽轮机的流量约为铭牌功率工况流量的 105%。汽轮机的最大功率一般不作为保证值。此工况又称为汽轮机的最大计算工况。

上述各工况中的汽轮机功率，当采用静态励磁、电动主油泵时，应为扣除各项所消耗后的功率。

铭牌出力与传统的额定出力的根本区别在于铭牌出力是以 33℃ 的冷却水温和 3% 补水率为基点，而额定出力是以 20℃ 冷却水温和 0% 补水率为基点，因此造成同一出力数字下机组实际发电能力的巨大差别。

表 1-1 给出了汽轮机的工况与功率的关系。

表 1-1 汽轮机工况与功率的关系

汽轮机工况	汽轮机功率	主要技术条件	对应的流量
能力工况	铭牌功率	排汽压力 11.8kPa，补水率 3%	设计值
最大连续工况	最大连续功率 (TMCR)	额定排汽压力 (4.9kPa)，补水率 0%	与能力工况相同
阀门全开工况 (最大计算工况)	阀门全开功率 (VWO)	额定排汽压力 (4.9kPa)，补水率 0%	相当于 (103~105)% 的 最大连续工况的进汽量
经济工况	经济功率 (ECR)	额定排汽压力 (4.9kPa)，补水率 0%	额定进汽量

现以某亚临界参数 600MW 汽轮机为例，说明各个功率的意义以及与汽轮机参数的关系，见表 1-2。

表 1-2 N600-16.7/537/537 汽轮机各个功率与汽轮机参数之间的关系

参数	THA 工况	TRL 工况	TMCR 工况	VWO 工况	高压加热器切除工况
功率 (MW)	600	600.4	632.14	662.916	600.255
进汽量 (t/h)	1792.462	1908.9	1908.9	2026	1546.53
主蒸汽压力 (MPa)	16.7	16.7	16.7	16.7	16.7
主蒸汽温度 (℃)	537	537	537	537	537
高压缸排汽压力 (MPa)	3.581	3.766	3.794	4.006	3.723
高压缸排汽温度 (℃)	314.4	319.6	320.5	326.6	322.8
再热蒸汽压力 (MPa)	3.223				
再热蒸汽温度 (℃)	537				
再热蒸汽流量 (t/h)	1496.14	1567.967	1586.49	1676.628	1530.548
额定冷却水温度 (℃)	24				
背压 (MPa)	5.88 (额定) 11.8 (夏季)	11.8	5.88	5.88	5.88
给水温度 (℃)	273.7	277.4	277.7	281.6	172
补水量 (t/h)	0	57.268	0	0	0
热耗 (kJ/kWh)	7850.9	8165.5	7846.1	7846.5	8124.4

5. 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 400h。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 汽轮机的基本蒸汽参数及规律

一、蒸汽参数的特点

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、亚临界参数机组、超临界和超超临界参数的机组。表 1-3 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 125~200MW 机组采用超高压参数，蒸汽压力为 12.7~13.2MPa；300MW 汽轮机组采用亚临界参数，蒸汽压力为 16.2~16.7MPa；600MW 机组亚临界参数和超临界参数均有采用，21 世纪建设的 600MW 机组多采用超临界参数，亚临界 600MW 机组的参数一般为 16.56MPa，超临界参数 600MW 机组一般为 24MPa；600MW 以上的机组一般采用超超临界参数，达到 25~31MPa。国外超临界参数机组发展很快，从 125MW 到 1300MW 均有采用，美国埃迪斯顿电厂是目前蒸汽参数最高的电厂，设计蒸汽参数为 34.3MPa，温度为 649/566/566℃，采用二次中间再热。

表 1-3 汽轮机的蒸汽参数

功率 (MW)	新蒸汽压力 (MPa)	新蒸汽温度 (℃)	再热温度 (℃)
100	8.82	535	
125	13.24	550	550
200	12.74	535	535
300	16.17	550	550
300	16.66	537	537
300	16.7	538	538
300	17.74	540	540
600	16.56	537	537
600	24.2	538	538
1000	26.25	600	600
1300	24.13	543	543

现代高参数汽轮机采用更高的蒸汽参数，有的将超过 30MPa，700℃。值得提出的是，在蒸汽参数逐渐提高的过程中，再热蒸汽温度的提高往往早于主蒸汽温度的提高，也就是