



普通高等教育“九五”国家级重点教材

高等学校教材

热力发电厂

郑体宽 编

中国电力出版社

PU TONG GAO DENG JIAO YU

"JIU WU "GUO JIA JI ZHONG DIAN JIAO CAI

普通高等教育“九五”国家级重点教材

高等学校教材

热 力 发 电 厂

重庆大学 郑体宽 编

中国电力出版社

内 容 提 要

本书从电力工业可持续发展的角度出发,着重介绍常规国产大型火电机组及一些有发展前景的其他火力发电机组的基本理论、热力计算。主要内容包括:热力发电厂的评价、热力发电厂的蒸汽参数及其循环、新型动力循环、给水回热加热系统、给水除氧系统和发电厂辅助汽水系统、热电厂的热经济性及其供热系统、发电厂的原则性和全面性热力系统等。各章有内容提要、复习思考题和习题。

本书为高等学校热能动力工程专业热力发电厂主干专业课的教材,也可供有关专业师生和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂/郑体宽编. -北京:中国电力出版社,2000
普通高等学校“九五”国家级重点教材 高等学校教材
ISBN 7-5083-0493-4

I. 热... II. 郑... III. 热电厂-高等学校-教材
IV. TM621

中国版本图书馆CIP数据核字(2000)第81152号

中国电力出版社出版

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

北京丰源印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

2001年3月第一版 2003年10月北京第四次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.75印张 469千字 4插页

印数15001—18000册 定价25.00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)

前 言

本书已列入原中国电力企业联合会普通高校热能动力类专业第四轮后三年（1998～2000年）教材规划。1997年1月9日，经原国家教委批准将本书列为“九五”国家级重点教材。

根据原国家教委对“九五”国家级重点教材的要求和原普通高校热能动力类专业教学委员会审订的专业教学计划中关于热力发电厂课程的基本要求，拟定了本书的编写大纲，经两位主审、出版社责任编辑的审查，按照修订后的编写大纲编写的。

1999年4月完成本书送审稿，请有关单位专家、教授审查，并于1999年5月在东南大学召开了审稿会，根据审稿意见进行了修改。

我们总结了1980年、1986年、1995年前三轮热力发电厂教材的编写实践经验，保留了教材起点高、注重理论基础的特点，进一步调整了课程体系。世纪之交的教育更要面向现代化、面向世界、面向未来，作为专业课教材，书中考虑了我国大电网、高参数、大容量发电机组的实际，从电力工业的可持续发展角度出发，更新了专业知识，涉及本课程的诸如核电厂、燃气-蒸汽联合循环发电、洁净煤发电、热电冷及热电（煤）气三联产发电等均作了适当介绍，以扩大学生视野。

本书在内容上加强理论基础，强调优化和环保。在论述上循序渐进，分散难点，给学生留有恰如其分的思考余地。每章前有内容提要，增加了例题；每章后有复习思考题和习题。为减轻学生负担，习题中的汽水参数值一般都给出，让学生集中在解算能力、思考分析能力上得到锻炼。

全书取材以国产300、600MW机组及其热力系统为主，适当介绍引进机组和国外有代表性的不同发电机组。

作为国家级重点教材，要照顾到全国各类高校的不同情况，各校使用时可有所调整。

本书由重庆大学郑体宽编写，由东南大学汪孟乐、西安交通大学林万超主审。在编写过程中，承兄弟院校、锅炉制造部门、汽轮机制造部门、设计和生产单位的大力支持，编者仅向他们表示深切的谢意。

由于编者水平有限，书中错误和不妥处，请读者批评指正。

编 者

1999年12月

目 录

前言	
绪论	1
复习思考题	5
第一章 火力发电厂的评价	6
第一节 火力发电厂的安全可靠性	6
第二节 火力发电厂的环保评价	11
第三节 火力发电厂热经济性评价	18
第四节 凝汽式发电厂的热经济性指标	24
第五节 发电厂的技术经济比较与经济效益的指标体系	33
第六节 我国能源和电力工业的可持续发展	35
复习思考题	36
习题	37
第二章 火力发电厂的蒸汽参数及其循环	38
第一节 提高蒸汽初参数	38
第二节 降低蒸汽终参数	50
第三节 给水回热循环	59
第四节 蒸汽再热循环	68
第五节 热电联产循环	78
复习思考题	88
习题	89
第三章 新型动力循环	90
第一节 燃气—蒸汽联合循环	90
第二节 原子能发电厂	103
第三节 其他火力发电厂	115
复习思考题	124
习题	124
第四章 给水回热加热系统	126
第一节 热力系统的概念及分类	126
第二节 回热(机组)原则性热力系统	127
第三节 回热(机组)原则性热力系统的计算	144
第四节 回热加热器的运行	150
复习思考题	152

习题	152
第五章 给水除氧和发电厂的辅助汽水系统	154
第一节 火电厂的汽水损失及补充	154
第二节 锅炉连续排污利用系统	156
第三节 化学除氧	159
第四节 热除氧器及其原则性热力系统	161
第五节 除氧器的运行	174
复习思考题	180
习题	181
第六章 热电厂的热经济性及其供热系统	183
第一节 热负荷的特性及载热质的选择	183
第二节 热电厂的主要热经济性指标	188
第三节 热电厂的对外供热系统	202
第四节 热电厂的经济分析及供热系统的优化	209
复习思考题	215
习题	215
第七章 发电厂原则性热力系统	217
第一节 发电厂原则性热力系统的拟定	217
第二节 发电厂原则性热力系统举例	220
第三节 发电厂原则性热力系统的计算	236
第四节 发电厂原则性热力系统计算举例	240
复习思考题	253
习题	253
第八章 发电厂全面性热力系统	257
第一节 发电厂全面性热力系统的概念	257
第二节 管道与阀门的基本知识	258
第三节 主蒸汽系统	270
第四节 旁路系统	281
第五节 给水系统及给水泵的配置	294
第六节 回热系统全面性热力系统	305
第七节 全厂公用汽水系统	310
第八节 发电厂全面性热力系统举例	317
复习思考题	322
习题	322
参考文献	324

绪 论

一、我国的能源资源和能源结构

能源是国民经济发展的物质基础。以原始状态存在于自然界中，无需加工或转换即可直接用于供热或提供动力的能源称为一次能源，如煤、石油、天然气、水能、潮汐能、风能、地热能等天然能源。其中煤、石油、天然气和水能统称为常规能源。由一次能源经加工转换成的电能、热能（蒸汽、热水）、焦炭、煤气、各种石油制品、酒精、沼气等统称为人工能源（即二次能源）。电力是唯一的能够大规模利用煤炭、水力、核能的二次能源。用太阳能、生物能、海洋能、地热能、风能发电等，统称为新能源发电。

我国能源资源丰富，是能源生产大国，也是能源消费大国，其能源构成及其消费构成，如表 0-1 所示。

表 0-1 我国的能源储量、构成及其消费构成

类别	能源资源				能源构成, %		消费构成, %	
	储量	世界名位	1990年产量	世界名位	1980年	1995年	1970年	1995年
煤炭	14400 亿 t	3	10.79 亿 t	1	59.48	76.00	80.9	75.0
石油	787.5 亿 t	5	1.38 亿 t	5	21.16	4.18	14.7	17.3
天然气	33400 亿 m ³		152 亿 m ³	22			0.9	1.8
水能	675GW	1	1264 亿 kW	15	19.36	18.55	3.5	5.9
核能						1.27		

我国能源资源虽较丰富，但分布严重不均，水力资源的 90% 在西部，煤炭资源的 80% 在北部，而 70% 的能源消费却是集中在东部及沿海新开发地区。水力资源丰富矿不多，开发难度大。在能源消费结构中，煤电占 75% 以上。我国是由资源特点决定的以煤电为主的世界上少数几个国家之一。而且在今后相当长一段时间内不会有大的变化。我国年产煤近 14 亿 t，动力用煤约占 4/5，火电厂用煤量约占全国煤产量的 30%。燃煤污染极为严重，1992 年全国排放 SO₂ 1687 万 t，烟尘 1414 万 t，排放工业固体废物 5.6 亿 t，粉煤灰排放占地 13000ha，酸雨区面积已达国土面积的 1/3。仅 SO₂ 排放造成的经济损失就占国民生产总值的 1.98%。大量煤、渣运输，是造成我国交通运输紧张的重要因素之一。

我国的能源利用率低，平均能耗高，产值能耗约为发达国家的 4~5 倍，产品单耗比发达国家高 40%，能源综合利用率不到 30%。能源消费水平很贫，不到世界人均水平的 1/2，人均用电水平只及世界平均水平的 1/3。

表 0-2 为世界上一些国家一次能源消费及其发电能源消费情况，前者我国仅为 10% 左右，不及美国的一半，后者我国为 31.5%，发达国家却为 35% 以上。

表 0-2 世界一些国家一次能源消费 (A) 及发电能源消费 (B) 的情况

国别	美国		俄罗斯		中国		日本		德国		英国		加拿大		法国		意大利	
	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年	1991年	1995年
A	24.9	25.78	10.50	8.57	9.48	11.19	5.34	5.45	4.38	3.93	2.91	2.64	2.68	2.74	2.84	2.63	2.11	2.01
B	41.0	39.9	30.1	27.8	27.4	31.5	51.2	52.2	36.2	37.3	36.3	36.8	61.4	61.0	50.9	55.9	31.8	33.2

表 0-3 为 1993 年时我国与世界电力工业水平的比较。

表 0-3 1995 年我国与 1993 年世界电力工业水平比较

地区或国家	装机容量, MW	人均装机容量, kW/人	发电量, 亿 kW·h	人均发电量, kW·h/人
全世界	2846700	0.50	119480	2115
发达国家	1483700	2.10	60395	8365
中等发达国家	457600	1.10	18017	4300
中国 (1995 年)	182910	0.15	8395	700
上海 (1995 年)	7647	0.65	373	3109

世界电业界普遍认为, 若一个国家的人均装机容量达到 1kW/人, 就认为该国已进入中等发达的国家。而我国人均装机容量还不到 0.2kW/人, 要连续翻四番才能达到现在的中等发达国家的水平。这种现状既是差距所在, 更是电业巨大发展的前景。

二、我国火力发电工业的成就

建国 50 年来, 我国电力工业有了很大的发展, 特别是改革开放 20 年更有较快的发展, 连续跨上两个台阶: 1987 年发电装机容量跨上 1 亿 kW、1995 年又突破 2 亿 kW。1988 年以来连续 10 年每年投产大中型机组 1000 万 kW 以上。1978 年装机容量 5712 万 kW, 发电量 2566 亿 kW·h, 1998 年装机容量达 2.6 亿 kW, 发电量达 11580 亿 kW·h, 分别是 1978 年的 4.45 倍和 4.42 倍, 翻了两番以上, 装机容量和发电量于 1995 年开始跃居世界第二位。全国 2300 多个县, 已有 99.03% 的乡镇、97.66% 的行政村用上电, 分别比 1978 年提高了 12 个百分点和 36 个百分点。全国持续多年的缺电局面, 制约国民经济发展的“瓶颈”现象已基本结束。

到目前为止, 我国已能自行设计、制造亚临界参数 300、600MW 火电机组的成套设备, 并出口成套 210MW 火电设备, 引进技术设计制造了 MS5000、MS6000 系列的燃气轮机, 自行设计制造 300MW 核电设备并出口。几台国外制造的超临界压力 300、500、600、800MW 汽轮机组已在我国投运。全国拥有 1000MW 级电厂 40 座。现有 900MW 核电机组 2 台、600MW 火电机组 7 台、300~350MW 95 台、200MW 312 台, 总容量达到 89.2GW, 占全国装机容量的 42.2%, 火电厂和大机组已成为中国电力的主力。华北、东北、华东、华中和南方联营等五大跨省区电网装机容量都超过 25GW, 其中华东电网的容量为 37.029GW, 是全国最大的电网, 为全国联网奠定了基础。

运行管理水平也有较大提高，全国平均供电煤耗率逐年下降，由1989年的0.432标煤/(kW·h)降至0.408kg标煤/(kW·h)。1994年6月28日，华能大连电厂成为我国第一家一流火电厂。现已有18家火电厂被评为一流火电厂。1998年7月9日，山东省电力集团公司被命名为首家“中国一流管理的电力公司”。1993年上海石洞口二厂一年投产两台超临界600MW燃煤机组，标志着施工速度和安装水平跃上了新台阶。1997年11月6日邹县电厂6号机600MW机组达标投产，安装工艺和文明施工提高到了一个新的水平。我国新能源发电从无到有，到1997年底，装机容量已达到21万kW。

邹县发电厂是我国最大的火电厂，分三期建成，总容量为2400MW，即4×300MW和2×600MW机组。年发电量为120亿kW·h。

但是，我国幅员广、人口多，还是发展中国家，人均资源占有量仅为世界平均数的1/2、美国的1/10，人均装机容量仅为发达国家的1/20~1/15。一次能源利用率仍较低，中小机组所占比例大，200MW以下机组占火电机组的比例高达约58%，这是我国火电事业煤耗高、污染严重的重要原因之一。

三、我国电力规划及火电技术发展动向

前两年对我国电力工业的发展预测结果指出，我国的经济增长趋势为：1990年仅为8%~9%，2000~2010年为6%~8%，2010~2020年为5%~6.3%。据此分析预测，到2020年我国装机容量将达到790.1GW，如表0-4所示。

表 0-4 我国电力供应能力预测

项 目	“九五”到2000年				中期到2010年				远期到2020年			
	装机容量		发电量		装机容量		发电量		装机容量		发电量	
	GW	%	TW·h	%	GW	%	TW·h	%	GW	%	TW·h	%
火 电	235.0	76.9	1175.0	83.2	413.8	77.2	2069.0	82.3	575.8	72.9	2879.0	78.5
煤 电	207.0		1035.0		368.8		1844.0		500.8		2504.0	
油 电	20.0		100.0		30.0		150.0		50.0		250.0	
气 电	8.0		10.0		15.0		75.0		25.0		125.0	
水 电	67.5	22.1	220.0	15.6	100.0	18.7	318.0	12.7	160.0	20.2	498.0	13.6
抽水蓄能	1.5				10.0					20.0		
核 电	2.7	0.9	16.2	1.1	20.0	3.7	120.0	4.8	40.0	5.1	248.0	6.8
新能源	0.5	0.1	1.6	0.1	2.0	0.1	5.8	0.2	14.31	1.8	41.0	1.1
总 计	305.7	100.0	1412.8	100	535.8	100	2512.8	100	790.1	100	3666.0	100

火电技术发展动向为：

(1) 研制600MW甚至1000MW等级的超临界压力机组，研制300、600MW空冷机组以及超高参数、亚临界参数的200、300MW高效供热式机组。

(2) 建设大型坑口、路口电厂，变输煤为输电，逐步改变“西煤东送”、“北煤南运”的局面。

(3) 强化煤电的环境保护，发展洁净燃煤技术。建立200~300MW级循环流化床锅

炉的示范性电站；完成 15MW 增压流化床锅炉联合循环 PFBC-CC 中试工程，建设 100MW PFBC-CC 试验机组。

(4) 大力发展中间负荷机组，适应电网调峰需要。力争 2000 年前，大容量燃气-蒸汽联合循环发电在我国开始起步，大量兴建抽水蓄能电站和调峰火电厂。

(5) 发电能源多样化，适当发展核电和新能源发电，将进口部分天然气、液化气，作为国内发电资源的一个补充。在偏远地区和有条件的农村地区发展风能、太阳能等新能源发电。

(6) 进一步提高火电自动化水平，实现自动测量控制及单元机组集控值班。

我国的能源政策是“开发和节约并重，近期把节能放在优先地位”，而且节能是发展国民经济的一项长期战略任务。具体措施为：

(1) “九五”、“十五”期间，加强、改造和完善各省及各大区电网，预计在 2010~2020 年，将形成基本覆盖全国的统一联合电网，实现电网统一调度，推行火电厂的经济运行。

(2) 我国火电机组年均供电煤耗率与国外先进水平相比还有很大差距，约为 60~70g 标煤/(kW·h)，按目前发电量计，约浪费 40Mt 标准煤。要采取有效措施和先进技术降低煤耗，如增加高效的大容量机组比重，积极发展热电联产，用现代化技术改造老机组，特别是汽轮机通流部分和热力系统的改进。小机组、小锅炉既浪费能源，又严重污染环境，要关闭淘汰，有条件的可改为热电联产或燃气-蒸汽联合循环。国家电力系统要关停 50MW 及以下小火电（或以大代小）机组容量总计 14000MW，即 1998 年已停 2840MW，1999 年为 1800MW，2000 年为 3100MW，2001~2003 年为 4500MW，2004 年关停高压 50MW 凝汽式机组 1760MW。

(3) “九五”期间，只有每年新增发电能力 8%~10%，每年节约用电 2% 以上，才能满足国内生产总值增长 8%~10% 对电力的需求。

(4) 节约水资源，要一水多用，综合利用，提高重复用水率，降低全厂耗水指标。在缺水地区要装空冷机组。

四、热力发电厂的类型及对热力发电厂的要求

热力发电厂的类型如表 0-5 所示。

表 0-5 热力发电厂的分类

分类方法	热 力 发 电 厂 类 型					
能源	化石燃料发电厂	原子能发电厂	地热发电厂	太阳能发电厂	磁流体发电厂	其他，如垃圾发电厂
电厂功能	供电的凝汽式发电厂	供电供热的热电厂	供电、供热、供冷（制冷）的发电厂	供电、供热、煤气的发电厂	多功能热电厂	
原动机类型	汽轮机发电厂	燃气轮机发电厂	内燃机发电厂	燃气-蒸汽联合循环发电厂		
单机容量	50MW 及以下为小型	100~200MW 为中型	300MW 及以上为大型			

分类方法	热 力 发 电 厂 类 型					
电厂容量	小容量电厂 200MW 以下	中等容量电厂 200 - 800MW	大容量电厂 1000MW 及以上			
蒸汽初参数 ^①	中低压发电厂 3.43MPa 以下	高压发电厂 8.83MPa	超高压发电厂 12.75MPa	亚临界压力发电厂 16.18MPa	超临界压力发电厂 22.05MPa 以上	超超临界压力发电厂 30MPa 以上
承担负荷性质 ^②	带基本负荷电厂	带中间负荷电厂	调峰负荷电厂			
主设备布置	室内布置	半露天布置	露天布置			
服务性质	孤立发电厂	列车电站	企业自备发电厂	区域性发电厂		
电厂位置	负荷中心电厂	坑口、路口、港口发电厂	煤源与负荷中心之间发电厂			

注 ① 指进入汽轮机的蒸汽压力，单位为 MPa。

② 原子能发电厂承担基本负荷、火力发电厂承担中间负荷或调峰负荷。

对热力发电厂的基本要求是：在满足安全可靠生产的前提下，提高经济效益，符合环保要求，便于施工、运行、维修和扩建，提高劳动生产率和自动化程度，开展安全文明生产创水平的双达标活动，瞄准国际先进水平的一流企业。

五、本课程的任务和作用

读者应在已学工程热力学、汽轮机和锅炉等课程的基础上学习热力发电厂课程。本课程是以热力发电厂整体为对象，着重研究不同热力发电厂的热功转换理论基础，并以汽轮机发电厂的热力设备及其热力系统为重点，在安全、经济、灵活、环保的前提下，分析热力发电厂的经济效益。热经济性的定性分析以嫡方法为主，定量计算以常规方法为主。

热力发电厂是一门政策性强、综合性强与电厂生产实际紧密相连的专业课程之一。通过本课程的学习，培养学生树立安全、效益（经济效益、社会效益、环境效益）相统一的观点，以提高学生分析、研究、解决热力发电厂课程业务范围内生产实际问题的独立工作能力。

复习思考题

- 0-1 我国发电能源结构对电力工业和国民经济的发展、一次能源需求和环境保护有何影响？
- 0-2 优化的发电能源结构应是怎样的结构？应从哪些方面来具体实施发电能源结构的优化？
- 0-3 什么是火电厂的经济效益？评价经济效益的原则是什么？
- 0-4 提高火电厂经济效益的主要途径有哪些？
- 0-5 与先进国家相比，我国火电方面还有哪些差距？
- 0-6 世纪之交，火电厂面临的形势如何？对未来的热能工程师有何要求？

第一章 热力发电厂的评价

本章提要

对热力发电厂总的评价是要在安全、可靠的前提下，提高其热量利用率，并符合环保的要求，适应电力可持续发展的需要。本章先讨论发电厂的安全、可靠管理和寿命管理，再讨论火力发电厂的环保评价，然后重点讨论热力发电厂热经济性评价的两种基本分析方法，以及我国现行的用热量法分析凝汽式发电厂的热经济性及其指标的定量计算。

第一节 热力发电厂的安全可靠性

一、安全管理

电力是国民经济建设的能源物质基础，关系到整个国家经济发展和人民物质文化生活水平的提高。电力工业必须先行，与其他行业相比，其突出特点是电力的产、供、销是连续、瞬时完成的，电能不可能大量储存。如果电力生产不安全，供电不可靠，就势必严重影响工农业生产和人民生活，造成国民经济的巨大损失，甚至酿成严重的社会灾害，乃至人的生命。电力企业的效益，首先体现在安全可靠供电的社会效益方面。

随着生产的发展和科学技术的进步，火力发电向高参数（亚临界、超临界蒸参数）、大容量（功率 600~1000MW 级）发展，电网也不断扩大至几千万千瓦，甚至全国联网。高参数、大机组、大电网虽然有很多优点，但是既然联网构成整体，各厂众多设备、部件相互关联，任一环节、部件或某一运行操作不当，发生事故，如不能及时消除，会连锁反应酿成大面积或整个电网长时间停电，甚至全网瓦解。1965 年美国纽约电网大停电，影响美国东北部八个州和加拿大两个省，停电功率达 25GW，最长停电时间 13h 32min。1982 年我国华中电网瓦解，湖北电网事故甩负荷 895MW，全省停电十几个小时。这些事故造成了巨大的直接间接经济损失。

电力企业必须坚持“安全第一、预防为主”的方针，这是电力工业生产特征所确定的，是任何时候都不能动摇的电力工业企业生产和建设的基本方针，必须加强安全管理。要特别强调指出，电力安全生产是涉及全过程管理的问题，不应仅仅是运行部门的事，应从煤的质量、设备和原材料及其制造工艺和质量、规划设计、安装调试、运行能力以及生产经营、组织管理等各环节抓起、抓好，才能做到预防为主、安全第一。

火电设备日趋先进，高度机械化、自动化，并能做到离线、在线计算机监控等。再好的硬件设备，最终仍须人去操作、管理。提高火电职工素质将对保障安全、提高效益有极大作用。如火电、核电运行人员培训，相应的培训仿真机培训工具，就是提高运行人员水

平的重要物质基础。我国已进口并自行开发了 200、300MW 火电、核电仿真培训机，已建成了一些仿真培训中心，取得了良好效果，这是火电安全管理的突出实例。

二、可靠性管理

1. 火电厂可靠性管理的任务与作用

可靠性的理论研究与开发应用，最早是用于空间技术和军工方面。60 年代中期，一些工业发达国家相继发生特大停电事故，才开始可靠性管理引用到电力工业。美国和加拿大于 1968 年联合成立了北美电力可靠性协会（NERC），1980 年美国电气电子工程师学会（IEEE）制订了“统计、评价发电设备可靠性、可用率和生产能力用的术语定义”试用标准。日本、英、法和原苏联等国家也都开展了电力可靠性管理工作，均取得显著效果。这项工作在我国 70 年代后才起步，现已建有中国电力可靠性管理中心。

火电厂可靠性是指在预定时间内和规定的技术条件下，保持系统、设备、部件、元件发出额定电力的能力，并以量化的一系列可靠性指标来体现。

2. 火电厂的可靠性指标

火电厂主要设备的可靠性是火电厂可靠性指标的基础。设备的可靠性是以统计时间为基准用机组所处状态的各种性能指标来表征。

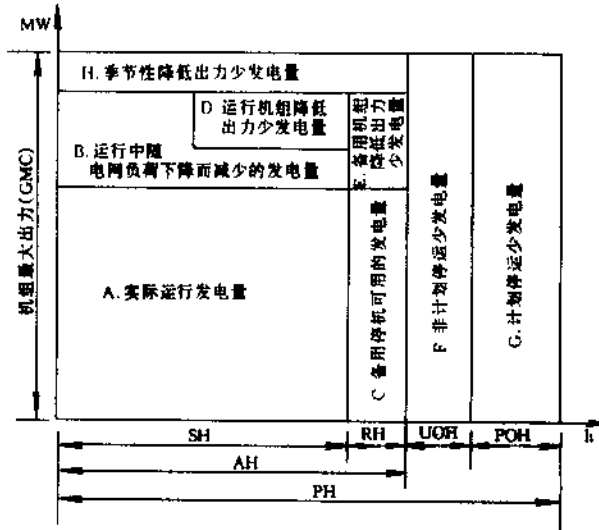


图 1-1 火电机组状态图

图 1-1 为机组状态图，纵坐标为机组最大出力 GMC，单位为 MW，一般为机组额定容量。横坐标 PH 为统计期间（按季或年计）的小时数。图中面积即为发电量，单位为 MW·h。由图可知，可用小时 AH 为运行小时 SH 与备用小时 RH 之和。POH 为计划停用小时数。UOH 为非计划停运小时数，分为五类情况，依次为：①UOH₁ 需立即停运；②UOH₂ 需 6h 内停运；③UOH₃ 在 6h 以上，但在周末前停运；④UOH₄ 可延至周末后，但需在下次计划停用前从可用状态退出运行的停用；⑤UOH₅ 超过计划停用期限的延长时间的停运。前三项总称为强迫停用小时 FOH。

我国火电厂可靠性指标有 23 个，其中最主要的是可用系数 AF、非计划停运系数

UOF、等效可用系数 EUF、强迫停用率 FOR 和非计划停用次数。后两项是目前考核发电厂可靠性的指标。

$$\text{可用系数 } AF = \frac{AH}{PH} \times 100 - \frac{SH + RH}{PH} \times 100 \quad (1-1)$$

$$\text{非计划停用系数 } UOF = \frac{UOH}{PH} \times 100 \quad (1-2)$$

$$\text{等效可用系数 } EUF = \frac{AH - (EUNDH + ESDH)}{PH} \times 100 \quad (1-3)$$

$$\text{强迫停用率 } FOR = \frac{FOH}{FOH + SH} \times 100 \quad (1-4)$$

式中 EUNDH——等效降低出力小时, $EUNDH = \frac{\sum D_i T_i}{GMC}$, h;

D_i ——统计期内机组各次降低出力数, GM;

T_i ——各次降低出力的运行和备用时间, h。

机组等效季节性降低出力小时 ESDH 为季节性降低出力数, 乘以降低出力运行小时, 再除以机组的 GMC。

国外电力系统的可靠性指标, 如缺电时间概率 LOLP, 为一定时间内 (通常为一年) 系统发电容量不能满足负荷需要的时间概率期望值的总和。美、加拿大的 LOLP 标准为每十年不得大于一天。

表 1-1 国产火电机组强迫停运率和非计划停运次数的考核指标

机组容量, MW	强迫停运率, %	非计划停运次数, 次/(台·年)
100 - 125	6	1.5 ~ 2
200 - 250	12	3
300 - 320	10	3.5

我国原水利电力部对国产火电机组的强迫停运率和非计划停用次数的考核指标的规定, 如表 1-1 所示。

我国电力可靠性管理中心从 1985 年起, 定期发布 100MW 以上火电机组和 40MW 以上水电机组

的运行可靠性指标。据统计, 1991 年我国大型火电厂机组的等效可用系数为: 100MW 机组 87.88%, 200MW 机组 80.57%, 300MW 机组 81.01%。1997 年统计了 574 台 100MW 及以上机组的等效可用系数达 88.3%, 比 1996 年提高了两个百分点。

我国大火电机组的可用率, 比国外同容量的火电机组低 5%~12%, 如果能将可用率提高 5%, 相当于国家不投资却多建设 3000~3250MW 容量的机组, 足见其经济效益之巨大。

三、寿命管理

火电设备寿命管理, 以设备运行状态及金属材料的长期连续地监督为基础, 计算其寿命损耗, 并适时进行各种探伤检查, 全面掌握设备技术状况, 及时维修或更换, 使设备在使用年限内发挥最佳效益或延长其寿命。

1. 寿命分配

火电设备及其管道, 特别是锅炉汽包、汽轮机转子、叶片、汽缸和主蒸汽管道, 承受

高温和热应力的作用，经长期运行后，金属材料将发生蠕变或松弛，尤其是在启停或工况急剧大幅度变化时，由于冷热交变应力，使得部件产生低周疲劳，最终导致寿命损耗殆尽。

随着电网的扩大和用电构成的变化，峰谷差也相应扩大，有的电网竟高达 50%。目前电网仍多以火电为主，水电多为径流式，所以即使是大容量火电机组也必须承担调峰任务，使机组启停次数增多，加剧火电设备的金属温度变化幅度和寿命损耗

为保证火电设备的安全可靠运行，须合理选择寿命损耗系数，合理寿命分配。即预计火电设备在设计寿命年限内启动、停机次数和启停方式以及工况变化、甩负荷次数等，分配其各种工况下允许寿命损耗，并根据允许寿命损耗率，合理控制其启停速度、运行温度、负荷变化率等，以保证使用寿命期间安全运行。表 1-2 为国产 200MW 机组带基本负荷疲劳寿命分配，表 1-3 为我国宝山电厂引进的日本三菱 350MW 机组的寿命分配。

表 1-2 国产 200MW 机组带基本负荷疲劳寿命分配

运行方式	温度变化,℃	30 年总次数, 次	每次寿命损耗率, %	30 年内寿命损耗率, %	控制应力极限, MPa
冷态启动	480	202	0.024	5	441
温态启动	320	900	0.016	15	417
热态启动	235	1875	0.014	28	402
变负荷运行	50	12840	0.002	30	255
甩负荷				2	
总计				80	

表 1-3 日本三菱 350MW 机组寿命分配

运行方式	温度变化,℃	温度变化时间, min	极限循环次数, 次	每次寿命损耗率, %	30 年使用次数, 次	30 年内寿命损耗率, %	控制应力极限, MPa
冷态启动	500	300	10000	0.01	100	1.0	460
温态启动	300	200	10000	0.01	1000	10	460
热态启动	200	100	11000	0.0091	3000	27.3	440
极热态启动	180	30	3500	0.029	10	0.3	690
正常停机	100	60	5000	0.002	4000	8	290
强迫冷却停机	170	180	4000	0.0025	100	0.3	310
正常负荷变化	80	30	4000	0.0025	12000	30	310
带厂用电运行	180	20	3000	0.033	10	0.3	720
总计						77.2	

我国已研制成 100、200MW 汽轮机转子寿命在线监视设备，HG-410/9.8 型锅炉汽包寿命损耗微机在线管理技术等多项技术。这表明我国火电设备寿命管理工作正在起步，已有良好开端。

2. 设备延寿

锅炉、汽轮机等火电设备设计寿命一般为 30 年，超过设计寿命后能否采取技术措施，

使其能超期安全经济运行，是很现实的问题。如我国五六十年代投运的火电厂，均已超过30年。1990年美国超过30年的老机组已达总容量的15%，其他工业发达国家也均有类似情况。采用新技术改造经济上还有一定优势的老机组，使之降低热耗并延长寿命，可能比新建电厂经济。因此，火电设备延寿问题，已引起各国电力部门极大的关注。

高温构件、高温蒸汽管道的设计寿命，一般为 10^5 h。高温蒸汽管道的延寿，是火电设备延寿的一个不可分割的重要问题。其主要延寿措施集中在弯管等应力集中的部件上，显然这些部件的寿命比直管短。

四、火电厂的计算机监视

现代大容量高参数火电机组，对自动化要求越来越高。过去常规的靠眼看耳听手摸的监视方式已很难适应。近代大机组需监视的信号超过2000点，要操作的阀门、挡板超过500个，必须要有完善的检测和控制手段。我国《火力发电厂电子计算监视系统设计技术规范 NIXJ 91-89（试行）》规定，火电200MW及以上机组宜采用电子计算进行安全监视，主要实现数据采集与处理、CRT屏幕显示、制表打印及事故追忆性能计算等。

一般火电厂的计算机监控功能为：①运行状况的巡回检测、数据处理和运行日报的打印制表；②运行异常情况的越限报警，发生故障能自动记录故障时的有关参数，即事故追忆的打印制表；③运行主要技术经济性指标的计算及其打印制表；④发电设备的启动操作顺序监控；⑤发供电生产过程的闭环控制；⑥发电设备的自动启停；⑦电厂故障自动监测与处理；⑧电厂安全经济运行的最佳控制。目前我国火电设备的实际应用水平，大部分属于①~④项。我国进口的一批大机组多为分散控制系统，多具有①~⑥项的功能，均取得了保证安全经济运行的明显效果。

我国的火电厂计算机监视系统的制造单位（生产厂、研究单位、高等学校）也先后研制出不少产品并已商品化。

五、设备的故障诊断

大型火电设备复杂，事故造成的损失、影响大，利用诊断技术对设备运行工况和部件材质性能的监测，以及时掌握设备的健康状态，对可能发生的故障或事故的概率以及寿命损耗，作出判断和评价，以便作出对策或采取其他措施。

设备的故障诊断与设备的检修是紧密联系的。设备的检修有三种情况：①事故维修，又称强制维修，即设备已出现故障而不得不进行维修。②定期维修，即常规的火电设备大小修的制度，视设备而异，间隔4~8月进行小修，间隔2~3年进行大修（详见原水利电力部《发电厂检修规程》）。这种维修虽能将事故消灭在发生之前，能避免小缺陷造成的大事故，保证了安全运行，但同时也带来了很大的浪费。据美国资料显示，1980年用于设备检修的费用高达2460亿美元，专家分析指出其中将近1/3即750亿美元是不合理检修费用造成的。③预估检修，又称状态检修，既能减少突发性事故，又能节省大量检修费用。

预估检修的前提是对设备的状态监测。早在60年代，美英等国开始研究设备故障诊断技术，某些故障诊断设备已商品化。我国70年代末才起步研究，已有多项故障诊断装置研制成功，如《大型汽轮发电机组振动监视及其故障诊断系统3MD-1》、《汽轮机振动

的频谱分析与故障诊断》等，均已通过鉴定投运。其功能为：实时在线数据采集与处理，频谱分析、趋势分析及预报，故障识别与诊断以及自动寄存，动态时域信号多幅连续显示或示波显示和打印等。重庆发电厂的主蒸汽管微机在线监测，也通过鉴定投运。

第二节 火力发电厂的环保评价

一、环境保护的重要性及对火电厂环保评价的要求

(一) 环境保护的重要性

自然资源的开发利用和工业生产的高速发展，出现了高度集中的工矿区和城市，自然环境和社会环境发生了一系列变化。自然环境日趋恶化，发生了一些震惊世界的公害事件，如 1948 年 10 月美国多诺拉事件，1952 年 12 月英国伦敦烟雾事件等。环境恶化威胁着人类生存和发展，环境保护成为人们共同关心的社会问题。1972 年联合国在斯德哥尔摩召开了第一次人类环境会议，发表了《人类环境宣言》，它是促进全世界重视环境问题的里程碑。

大型火电厂的建设，是工农业生产、国防建设、提高人民物质文化生活的重要物质基础，虽然会为社会发展做出贡献，但要占用大面积土地，建造高大的建筑群体，要耗费大量的一次能源和水资源，还要排放大量废气、废水和废渣（简称“三废”），给环境带来一定的影响。例如，2400MW 燃煤电厂，厂区占地 60~80 万 m²，厂区外灰场占地 200 万 m²，年耗煤约 750 万 t，助燃油 3 万 m³，采用循环供水系统时，耗补水 5000~7000m³。若以煤的含硫量 1%，除尘器效率 99.5% 计，年排放 SO₂ 14 万 t，NO_x 7 万 t，飘尘 0.68 万 t，灰渣 150 万 t，补给水中有相当部分成为废水排放，被循环水排放至大气的热量约为全厂热耗的 55%（相当年烧 400 万 t 煤的热量）。

我国对环境问题的认识较发达国家迟，在《人类环境宣言》发表一周年后，即 1973 年 8 月才召开了第一次全国环境保护会议，承认中国存在环境问题，制定了我国的“全面规划、合理布局、综合利用、化害为利、依靠群众、大家动手、保护环境、造福人民”的环境保护方针，并相应成立了我国第一个环境保护机构。

我国电力工业环境保护工作开始于 1973 年，并成立了管理部门和电力环境保护研究所，在高校设立了环境工程系和专业及一个硕士点。从此，掀开了电力工业环境保护新篇章，做了许多工作，取得了明显效果。如火电厂的排放情况就有了改进，表 1-4 为我国 6MW 及以上火电厂排放情况，1995 年与 1980 年相比，燃煤量增加了 2 倍，烟尘排放量基本持平，而粉煤灰综合利用量却增加了 11 倍。

表 1-4 我国 6MW 及以上火电厂排放情况 (Mt/a)

项 目	用煤量	烟尘排放	SO ₂ 排放	灰 渣		
				排放	利用	利用率, %
1980 年	119.78	4.43	2.87	30.31	4.24	14
1995 年	360.05	3.95	6.00	99.36	51.88	52.2