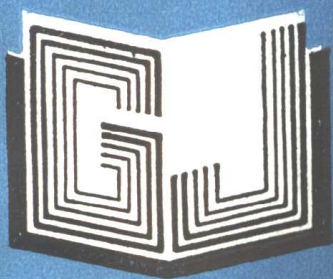


991138



高等学校教材

热 力 发 电 厂

系 统 设 计 与 运 行

华北电力大学 王加璇 编著

21
1



991138

高等学校教材

热 力 发 电 厂

系 统 设 计 与 运 行

华北电力大学 王加璇 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书以讲述火力发电厂为主,兼顾核电厂的动力装置,全书以蒸汽发生系统、汽轮机系统与电厂冷端系统三大部分为主体,全面论述热力发电厂的主要内容,并根据当代电厂设计中使用的高科技手段对电厂部件和系统仿真和优化作了适量的介绍与论述。本书的目的是为高校热动类专业提供一本与以往教材在风格与体系上不同的教科书,也适用于这类专业的研究生与工程技术人员作参考书。

图书在版编目(CIP)数据

热力发电厂系统设计与运行/王加璇编著.-北京:中国电力出版社,1997

高等学校教材

ISBN 7-80125-317-5

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

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第04587号

中国电力出版社出版

(北京三里河路6号 邮政编码100044)

北京市地矿局印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

1997年10月第一版 1997年10月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 17印张 386千字

印数0001—3220册 定价15.70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

本书是根据能源部热动类专业教学委员会组织制订的第三轮高校教材编写计划,并由热力发电厂教学组讨论确定的教学基本要求编著的。这些要求集中到一点就是要与现行的同名教材在风格与体系上有所区别,尽力反映现代的新技术新内容,为我国高校教材多样化作一些探索。

为此,作者根据多年在此领域中进行教学与科研的经验,参阅了一些国内外同类教材和相关的专著,形成了一套不同于传统教材的体系。以发电厂中的蒸汽发生系统、汽轮机系统与电厂的冷端系统三大部分为主体建立课程的基本骨架,同时考虑到核电厂将在我国有较大的发展,为它准备人才应有一定的超前度;而且从动力装置的角度,当今的核电厂除蒸汽发生装置不同外,再无其他原则区别,因此全书贯穿着以火电为主、兼顾核电的线索,在蒸汽发生系统中将火电使用的锅炉系统与核电的反应堆和蒸汽发生器系统并列,都从系统观点讲述,可收相互对比之效。这样虽然看起来似乎锅炉系统与先修的锅炉设备课程有某些重复,但作者认为这是必要的,其重复率不超过热力系统分析与工程热力学,汽轮机系统与汽轮机装置的重复率。何况与学生不甚熟悉的反应堆系统相对照,可以较容易地掌握新内容。

随着机组容量的增大,热力系统更加复杂,而仿真与优化技术日臻成熟,在一些工业技术先进的国家中早已将它们列入电厂设计的必经步骤,并运用它们指导和预测运行,因此,本书也以适量的篇幅收入这两部分内容。

汽轮机装置为电厂能量转换的中心环节,其回热系统的分析与计算也是本书的中心内容。这部分内容的处理是简要地介绍传统的热力系统计算方法后,主要地讲述美国 GE 公司资深的专业培训总工程师 K. Salisbury 多年积累开发的“组合结构”法。当把这套方法收入教材之前已由张树芳同志与作者本人在不同的班次与场合试用过,效果良好。张树芳同志为本书的这部分内容提供了初稿。但需指出 Salisbury 的方法初看起来较难理解,似乎不易掌握,但是一旦掌握便可得心应手,实现不须简化的快速计算。作者在这里用了较多篇幅和笔墨,力求能使人入门容易一些,作为教材使读者掌握较多的计算方法是必要的。特别是能掌握不同类型的加热器的搭配,计算各种搭配的组合损失及其对全厂热耗率的影响,是此法的关键。

本书的绪论与二、三章在于扩大知识面,避免在深入到后面的各章节的专门问题时,出现“只见树木,而不见森林”之偏颇。作者认为这对培养工程技术人员是非常必要的。

本书承西安交大林万超教授审阅,提供了若干宝贵意见和建议,在此深表感谢。

由于本书采用新体系,这是在教材改革中一次带有探索性的作法,又由于作者的经验 and 水平所限,疏漏和不妥之处在所难免,热忱欢迎批评指正。

作 者

1995.3

目 录

前 言	
第一章 绪论	1
第一节 电力工业在国民经济发展中的作用与地位	1
第二节 电厂规划的前提条件	2
第三节 可靠性管理与寿命管理	7
第四节 电力工业对工程技术人员培养的要求	10
第二章 发电厂的功能热电联产与供热	12
第一节 发电厂的类型	12
第二节 凝汽式电厂的热力系统	13
第三节 热电联产厂的热力系统	16
第四节 电厂热力系统的结构	17
第五节 联产电厂对外供热	18
第三章 发电厂的技术经济基础	27
第一节 凝汽式发电厂的热经济指标	27
第二节 热电联产厂的热经济性指标	33
第三节 发电厂总经济性指标	35
第四章 发电厂的蒸汽发生系统	40
第一部分 燃煤电厂的蒸汽发生系统	40
第一节 锅炉汽水系统	40
第二节 锅炉燃烧系统	44
第三节 锅炉主要设备的性能	48
第四节 锅炉的辅助设备和系统	52
第五节 控制污染的系统	55
第六节 在电厂系统设计中应考虑的问题	59
第二部分 核电站的蒸汽发生系统	61
第一节 人工核裂变的历史回顾	61
第二节 核反应堆及其分类	62
第三节 压水堆系统	64
第四节 沸水堆系统	70
第五节 快中子增殖堆系统	75
第六节 核防护系统及其工程安全特点	77
第七节 电厂系统设计时需考虑的问题	80
第五章 发电厂的汽轮机系统	83
第一节 回热循环的基本理论	83

第二节	实现回热循环的主要设备	88
第三节	汽轮机循环分析与计算引论	96
第四节	汽轮机热平衡计算	97
第五节	热平衡计算的组合结构法	101
第六节	加热器排列组合损失计算的符号体系	103
第七节	加热器组合方程式	107
第八节	F-D-C 循环中的排列组合损失	118
第九节	加热量分配损失	126
第六章	发电厂的冷端系统	132
第一节	凝汽系统的必要性	132
第二节	凝汽器的热力计算	140
第三节	冷却系统	147
第四节	冷水塔的热力设计	153
第五节	干式冷却系统	162
第七章	发电厂热力系统展开图与主管道系统	166
第一节	火电厂热力系统展开图	166
第二节	核电厂热力系统展开图	171
第三节	发电厂的主管道系统	175
第四节	管道自补偿计算	179
第八章	热力发电厂的仿真	185
第一节	仿真建模的基础	185
第二节	部件仿真	186
第三节	仿真建模中的拟合技术	189
第四节	换热器性能方程(解析法)	197
第五节	联立求解线性代数方程组的方法	202
第六节	系统仿真	209
第七节	运行培训仿真机	213
第九章	热力发电厂的优化	215
第一节	引论	215
第二节	单变量函数的优化方法	220
第三节	多变量函数的优化方法	228
第四节	正多面体直接优化法	236
附录 1	热力系统计算的常规方法及算例	244
附录 2	热力系统计算的并联解法与 $q-\gamma-\tau$ 矩阵	253
附录 3	800MW 机组热力系统展开图	261
附录 4	440MW 核电厂热力系统图	264
参考文献		266

第一章 绪 论

第一节 电力工业在国民经济发展中的作用与地位

能源是国民经济中的基础产业，是国民经济发展的先行工业，而电力是现代化的优质二次能源，是能源工业发展的中心产业。因此，在整个国民经济建设与发展中必须保证电力发展的优先地位，要有一定的弹性系数（按前苏联的叫法叫超前系数可能更确切），发展速度要高于国民经济其他部门。比如美国从1950年至1980年的30年间，实际国民经济生产总值平均年增长率为3.4%，而其电力需求量平均年增长率为6.26%；其电力工业的弹性系数为1.84，同期内英国为1.97，法国为1.49，前苏联为1.23，德国为1.55，这些数字足以说明这些工业先进国家十分重视电力工业的先行地位。世界各国电力弹性系数的平均值列在表1-1中，而到2020年世界电力工业预测的弹性系数见表1-2（转引自雷树萱·电力工业弹性系数·人民电业·1986.8）。

表 1-1 1961年~1989年世界电力弹性系数

年 代		60~70	71~79	80~89
世 界	国民经济平均增长 (%)	6.8	4.7	5.8
	电力年平均增长 (%)	8.6	5.5	7.1
	电力弹性系数	1.26	1.17	1.22
发达国家	国民经济年平均增长 (%)	5.8	3.6	4.7
	电力年平均增长 (%)	7.8	5.0	6.5
	电力弹性系数	1.34	1.39	1.33
发展中国家	国民经济平均增长 (%)	7.2	5.3	6.3
	电力年平均增长 (%)	9.4	9.5	10.5
	电力弹性系数	1.55	1.79	1.6

表 1-2 世界电力弹性系数从1960年~2020年的数值

年 份	平均年增长率 (%)		电力弹性系数
	生产总值	电力消费	
1960~1975	5.35	7.52	1.42
1975~1990	4.60	5.15	1.12
1990~2005	3.45	4.35	1.25 (预测值)
2005~2020	2.90	3.67	1.25 (预测值)

根据以上两表中的统计数字可见电力工业的弹性系数保持在1.25~1.30是恰当的。若低于此数，必会出现电力供应紧张，甚至限制国民经济的总体发展，或虽然发展了而缺乏

后劲。当然也不能过高，比如高过 2，则会使装机容量过多，而使设备利用率降低，而且造成资金积压或浪费也是不利于国民经济发展的。

我国自己的经验也可说明必须保证电力工业的先行地位。建国以来，直到 1965 年末，我国电力工业发展较快，年平均增加发电量为 13.5%，发电设备年平均增容 11.3%。但自 1970 年后，设备增长速度逐年下降，致使 16 年来长期缺电，到处都遇到“拉闸限电”的问题，这当然不是好事，但它从反面使人们更进一步认识到电能的重要。只要缺了电，一切都会变得缺乏生机。

电力建设要依靠一次资源，而我国在世界上是为数不多的富煤国家之一，因此我国的电厂主要的是燃煤电厂。我国水力资源多分布在西南三江（金沙江、雅砻江和澜沧江）一河（大渡河）。这些地区水利资源丰富，适于开发水电厂。如金沙江自向家坝（宜宾下游）以上至虎跳峡共有 8~9 个站址，是很雄厚的水力发电的后备资源，但需解决远距输电问题。

我国有丰富的煤矿资源，但比较集中分布在晋、陕和内蒙西部，也须解决煤炭运输问题，单靠铁路解决不了运量问题。除需用铁路、水运以及管道输煤外，主要地还靠发展坑口、港口、路口的所谓“三口”电站群，因为输电总比输煤容易，而且不会造成严重的城市污染问题。

总之，电力工业要发展，必须有可资利用的天然资源，为了更好地利用这些天然资源，则需有很科学的规划。

第二节 电厂规划的前提条件

一、单机容量

规划电厂首先应该考虑的是机组型式与单机容量的选择。从经济因素考虑，单机容量应尽可能的大，因为单位功率的投资随机组容量增大而明显地降低，电厂运行和维护所需人工费用也低；大机组一般效率高，即煤耗率低。

当然单机容量增大，汽轮发电机组、电气设备以及自动控制设备等单位造价降低得非常明显，但锅炉略有些例外，随着单机容量的增大，特别是超过 500MW 以后，其造价降低的趋势明显地减弱，而锅炉造价在整体投资中所占比重最大。当超过 500MW 时，其单位造价降低的趋势就越来越不明显。

此外单机容量的选择还要根据负荷增长预测、厂址选择以及电网容量等情况确定，特别是电网容量常常成为决定性因素。这主要考虑到当网内最大机组因故突然停运时，网内其余机组应有立即补充其功率的能力，换言之，网内应有足够的备用容量。图 1-1 给出 40 年来电厂建设单位造价变化情况。

此图系西方国家统计资料，从图上可见 600MW 单机容量之后曲线趋近平行于横坐标轴，即说明单位兆瓦造价降低渐渐微弱下来。从世界各国的电力发展经验看，单机容量在 600~800MW 之间比较适宜。只有美国投产运行过 1300MW 的机组，日本投运了 1000MW 的机组。表 1-3 给出一些国家的最大单机容量的统计资料。

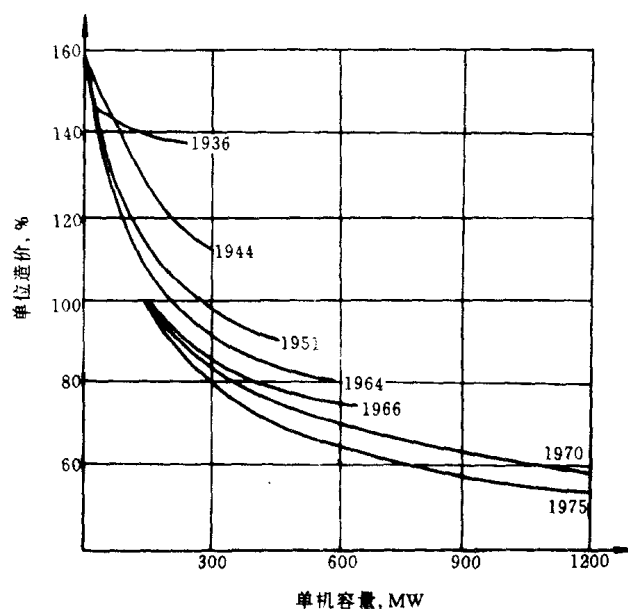


图 1-1 1936 年至 1975 年 40 年来电厂
建设单位兆瓦造价变化

表 1-3 一些国家最大机组容量一览表

国 家	机 组	汽轮发电机功率 (MW)	主蒸汽参数 (MPa/°C/°C)	投运年份
埃及	Suez 1, 2	150	14.3/535/535	1983
阿尔及利亚	Ras Djinet 1~4	176	13.8/535/535	1986
阿根廷	Costanera 6	350	16.6/566/538	1976
澳大利亚	Vales Point 5~6	660	15.9/537/537	1979
比利时	Les Awirs	290	18.2/540/540	1973
巴 西	Candiota 3	300	18.4/540/540	1955
原联邦德国	Heyden 4	800	18.2/540/540	1986
丹 麦	Abenra	630	18.6/530/530	1979
原民主德国	Boxberg 12	530		1980
芬 兰	Inkoo 1~4	266	18.1/525/535	1974
法 国	Cordomais 2, 3	600	16.3/540/540	1976
希 腊	Megalopolis	300	14.4/540/540	1975
英 国	Drax 1~3	660	16.5/566/566	1974
印 度	Tata Trambay	500	16.7/538/538	1982
伊 朗	Manzadaran 1~4	440	17.8/530/530	1980
意大利	La Spezia	660	25.5/538/538	1967
日 本	Kashima 5	1000	24.6/538/538	1974
南斯拉夫	Obrenovac B12	618	17.7/535/535	1981

续表

国 家	机 组	汽轮发电机功率 (MW)	主蒸汽参数 (MPa/°C/°C)	投运年份
加 拿 大	Nanticoke 4~6	500	24.7/538/538	1976
哥伦比亚	Barranquilla 34	71	8.7/510	1980
朝 鲜	Unggi 3	110	12.8/545	1977
韩 国	Go Jeong	500		1983
利比亚	Tri Polis 东 1~4	120	12.8/535/535	1981
荷 兰	Maasbracht B	630	24.0/535/535	1978
奥地利	Simmering	380	19.5/535/535	1979
葡萄牙	Setubal 1, 2	250	16.2/540/540	1979
瑞 典	Karlshamn 1~3	320	17.1/535/535	1967
瑞 士	Chavalon	150	18.5/540/540	1970
西班牙	Meirama	553	17.4/538/538	1979
南 非	Matla 1~3	600	16.1/535/535	1981
叙利亚	Baniyas 1, 2	175		1980
突尼斯	Sousse 1, 2	160	13.8/535/535	1980
土耳其	Elbstan 1~4	300	20.6/540/540	1985
前苏联	Kostroma 9~11	1200		1980
美 国	Cumberland	1300	24.1/538/538	1973
委内瑞拉	Planta Cento 1, 2	400	16.2/538/538	1978

二、燃料

燃料是电厂设备选型的重要依据，因为它影响锅炉与烟气净化设备。如确定以煤作燃料，电厂设计时就要考虑煤的输送、贮存和煤粉制备等设施。煤的水分、灰分和灰分特性直接影响着锅炉型式与结构尺寸以及贮灰场等，这些因素对电厂厂址选择常起决定性的作用，而且燃料价格直接影响到电厂的全寿期经济核算。所谓全寿期经济核算就是在电厂设备工作年限全部时期内的经济核算，这里最重要的是燃料价格及其变化。

三、冷却水

发电厂本身是耗水大户，最大的水量消耗莫过于冷却水（或叫循环水），一般来说有三种冷却系统方案：

(1) 直流供水冷却方案 此方案必须具备一定的客观条件，如厂址附近有流量足够大的天然河流或有足够容量的天然湖泊作水源，电厂从其上游取水，一次性地通过凝汽器，升温之后排放至其下游。随着机组容量增大，这种冷却方式越来越受到限制，因为要求有更大的流量才能满足机组排汽所需冷却水。在我国，煤炭资源主要在北方，但北方一般干旱，很少有这种条件，有时甚至采用第二种方案循环冷却系统时水量也不足，因而在厂址选择中变成了重大难题。厂址在海边的自然可以利用海水冷却，但因海水易腐蚀设备，需有特

殊处理。

(2) 循环供水冷却方案 适用于少水或只用地下水冷却汽轮机排汽的方案，说起来可以有多种形式，如冷却水池、喷水池、冷水塔、机力冷却塔等，在我国大多数情况下采用冷水塔方案，多为双曲线形自然通风冷却的方案，但因这种方案水主要靠蒸发冷却，因此水的损失很大，经常所需的补充水量也很可观，故又出现第三种方案：干式冷却塔。

(3) 干式冷却方案 又分两种型式：直接冷却和间接冷却，直接冷却方案是将空气引入凝汽器，使之流动吸收汽轮机排汽的热量，使之冷却而凝结；间接冷却则采用一中间回路循环将冷却后而温升的工质送至干冷塔进行冷却，再回凝汽器循环使用。干式冷却方案很适合我国富煤而缺水地区建造的发电厂，因此这种空冷技术是很引人注目的课题。细节将在第六章发电厂冷端系统中详述。但这里须指出各种不同形式冷却方案的总体结构和设备费用相差很大，在规划电厂建设时，需要进行认真的方案比较和论证。

四、厂址选择

在厂址选择上有一系列因素需要考虑。首先是厂址位置的问题，一般来说厂址应选定在负荷中心，离用户较近的地区，但这里出现了两个问题，一是负荷中心的工业区与燃料产地的距离，若工业区就在燃料产地，这个问题就简单了。但大多数工业区不在燃料产地，这就要考虑输煤合算还是输电合算的问题，谈到输煤，又涉及到煤种，如燃烧发热值高的硬煤与发热值低的褐煤又不一样，含灰量多与含灰量少的煤也不同，因为还有灰渣处理问题。另一个问题是关于城市环境保护的问题。我们知道，发电厂是排放二氧化硫及一氧化氮等各种有害物质、对环境的污染源，从这一观点出发，厂址的选择最好是远离人口稠密的城市，因此对于大容量凝汽式电厂，一般是建在产煤区，即所谓的坑口电站。尤其是燃用劣质煤的电厂更应设在矿区，它所排放的灰渣还可用来回填矿坑。对于燃用天然气的电厂，自然建在天然气输送管线附近为最佳选择。其次是关于水源问题，前面已讨论过，是厂址选择时需考虑的重要、有时甚至是决定性因素。这里需补充一点是凝汽器废热排放对环境也是不利因素，也常常是厂址选择需考虑的重要问题。有一些问题是具有两面性的，就以废热排放问题而论，若能把它引入暖房，则又变成有利因素。在某些情况下，燃煤电厂的灰渣与脱硫产物进行了综合利用，则问题的考虑可能又变成另一种性质了。

此外，厂址选择中对电厂的地形地貌、地质结构、地震级别、是否有被洪水淹没等危险，以至于与电网连接等都是需考虑的问题。

在本书的开端，我们把这些问题的摆在读者面前，一方面提醒我们当钻研到一些具体的理论与技术问题，避免“只见树木而不见森林”的倾向；另一方面也使读者们领略这些问题都是从大范围里必须宏观考虑的问题。当然限于篇幅，这些问题在这里不可能全展开来讨论，只希望能留下一个概念：电厂建设是一个相当复杂的系统工程。

五、运行方式

我们知道电能（包括热能）生产与生产其他产品相比有一个突出特点，就是其生产的连续性，其产量必须与用户的需求完全同步，用户需要多少电就要发多少电。现代电厂一般都联接在大电网中，由集中调度机构实行统一调度，但在昼夜的各段时间里，用户的需求量（用我们的术语叫做负荷）是随时间变化的，那么电厂或电力系统就要跟随这个变化

而满足用户的需求，送出合乎质量要求的电能（一定的电压与频率）和热能（一定温度和压力）。集中于电厂调度来掌握运行工况，一般就要分清带基本负荷、中间负荷和调峰负荷的电厂，这样才能在一定规模上实现峰谷负荷调节。上述三类电厂可根据其机组的年利用小时数 τ 划分。

$$\tau = \frac{\text{年发电总量}}{\text{单元机组的额定功率}} \quad (1-1)$$

式中 $\tau > 5000\text{h}$ 者为基本负荷机组； $\tau = 2000 \sim 5000\text{h}$ 者为中间负荷机组； $\tau < 2000\text{h}$ 者，为尖峰负荷机组。

承担尖峰负荷的电厂首先要用抽水蓄能电站和燃气轮机电厂。抽水蓄能电站原本就是为调节峰谷负荷而设计的，当电力系统处在负荷低谷时，其发电机变成电动机，而水轮机变成水泵，将水送上高位水库，以此蓄能；当系统处于高峰负荷时，这套机组又变成水轮发电机组来承担高峰负荷。对这类机组的效率要求不高，因而造价也比较低廉。燃气轮机电厂燃用价格昂贵的燃料油，但与燃煤电厂相比，它有起动与停机快、而损失燃料少的优点，因此用它作调峰机组，经济上还是合算的。

在电网里不具备抽水蓄能电站和燃气轮机电厂时，也只能用燃煤电厂调峰，一般是用效率比较低的电厂。至于带基本负荷的电厂，照例是效率较高，因为它要长期满负荷运行，是决定电网发电成本的基本因素。电网里若有并列工作的水电厂，一般是水电厂作调峰比较有利。

上述这些调峰机组都有共同特点，就是起动与停机快，而损失少，适应负荷变化的能力强，自动化程度高。确定电厂是基本负荷、中间负荷还是调峰负荷的类型是电厂规划的前提条件之一。因为只有根据这种性质的确定，才能明确未来电厂的运行方式而确定电厂热力系统的设计。涉及热膨胀的结构形式、起动与停机系统以及自动化水平等。当然在制定规划时也应考虑随着科学技术的发展，必有更新型、效率更高的机组在电网中投入运行，这些新机组又将会取代原有的相形见绌的机组而成为基本负荷机组，而把原来带基本负荷的机组替换下来带中间负荷，甚至于作调峰机组。这些可能发生的情况在作电厂规划时都应作为前提条件予以确定，才能作出经得起时间考验的规划。

六、热力设计

这里说的热力设计系指规划阶段的热力设计，而不是具体的热力系统分析与计算，热力系统分析与计算是本书的中心内容之一，我们将留在后面第五章中讲。规划阶段的热力设计，应在给定燃料价格和燃烧方式等基本情况确定之后进行，从而获得发电的最低成本。当燃料成本很高而又要求机组按带基本负荷运行时，则要求电厂设计有良好的经济性。这里主要涉及主蒸汽参数、再热蒸汽参数以及冷端方案的设计。中心问题是设法通过这些选择而降低机组的热耗率。除此之外，还有一系列的其他措施来降低平均净热耗。归纳起来这些措施主要有：

(1) 改善汽轮机循环的热效率。为此就需增加汽轮机制造和加工费用，也就是要加大一次投资，这种投资的增加可以用运行中节省的燃料费用来均衡。因为在技术经济论证中总是要在设备的一次投资与运行费用（主要是燃料费用）之间进行权衡和取舍。

(2) 采用性能良好的回热系统中的设备。如采用带蒸汽和疏水冷却器的加热器和性能良好的减温器,以降低回热系统中的温差(端差)传热所带来的不可逆性损失。

(3) 采用耗能量低的给水泵驱动装置。对于现代大容量发电厂,一般是采用汽轮机驱动的给水泵,这就要考虑采用效率高的驱动汽轮机,以及其他耗能量低的厂用机械设备。

(4) 尽量降低管道系统中的压力与散热损失。

(5) 炉膛燃烧除采用高效燃烧设备外,还要尽量降低过量空气系数,降低排烟温度,以降低排烟损失。

(6) 利用换热器或调节烟气流量的方式,以减少再热蒸汽调温带来的热损失。

(7) 对有脱硫装置的电厂,要采用最有利的方式提高脱硫装置后面净化了的烟气温度。

(8) 采用低损耗的起动系统和起动方式。

(9) 利用热电联产方式提高一次能源有效利用率。

总之,当燃料价格高时,要尽量采用效率高的设备,为此所花的代价可以用节省下的燃料来均衡。所节约的燃料在规划阶段可以宏观地由下式计算:

$$K = 3.6 \times 10^{-3} P \Delta W B \frac{1}{A} n \quad (1-2)$$

式中 K ——节约燃料所减少的成本,元;

P ——机组容量,MW;

ΔW ——降低的净热耗,kJ/MW;

B ——燃料价格,元/GJ;

A ——本息偿还率(按还本年限平均值计);

n ——机组年利用小时数。

改善设备所增加的投资不得超过 K 值。

七、环境保护

我们已经说过电厂是排放各种污染物的大气污染源,因此电厂规划中必须考虑尽量降低对环境污染的问题。一般统计,为降低环境污染,电厂所需增加于防止污染的设备费用大约占总投资的 25%~30%。此外还应考虑这些设备的折旧、运行消耗物料以及维修和厂用电的增加量等费用。上述费用事关全球性的公益,是应该支付的。

第三节 可靠性管理与寿命管理

一、关于可靠性管理

可靠性技术起源于航天与军事工业,60年代后期才引入民用工业,特别是电力工业,世界各国竞相研究、确立各行各业的准则或标准,开发研究可靠性理论与技术。对于这样的学科内容,自然对各行各业有所不同,但基本上都用随机理论和对随机事件发生的概率进行数理统计。电力系统和电力工业也不例外,它是对电力系统(包括发电厂)中发生的各种随机事件的概率统计、分析,并作出科学的评估。现代大电力网是很复杂的,许多不同

类型的发电厂并联在公共用户的电力网上，任意点上发生事故都将波及全网，影响系统稳定。

电力工业可靠性管理的终极目的是保证给所有的用户提供符合一定质量要求、不间断的供电和供热。实际上以前也从规划、设计、设备制造、安装施工、运行与维修各不同角度来考虑了工作的可靠性，如采用备用设备切换、必要的旁路以及各种工艺保护装置与设施等等，但是这些考虑基本上是分散的，而未形成一个统一的系统理论和方法，把系统当成一个完整的整体来考虑。可靠性理论的功绩就在于把从系统的部件观点考虑问题提高到从系统观点考虑问题，从而产生出一系列的理论技术与方法。美国对可靠性的各有关术语（一个新学科出现，术语不统一是常见的事）作了统一定义和解释，在此基础上制定了数十个性能指标。在这之前美国的某些电力公司采用了各种不同的对用户供电可靠性指标，如“电力不足概率（LOLP）”、“电量不足概率（LOEP）”、“停电频率时间持续曲线”，有的还采用所谓的“供电愉快度”等等。在日本和英国也相继提出各种不同的指标。这些措施的采取也是因为国际大电网中发生的一系列重大事故引起人们注意所致。这些重大事故中最突出的一次是发生在美国、包括世界最大城市纽约在内的东北部系统于1965年11月9日发生的全面大停电事故，曾引起全社会的秩序紊乱。这是国际电业史上一次最突出的案例。其他国家也相继发生了一些电力系统大面积停电事故。1968年美国在政府推动下成立了美国全国电力可靠性协会（NERC），全国分成九大安全协调区（美国在1979年年净发电量22749亿kW·h，装机总容量61655万kW，除企业自备电厂外，公用电业约3500家，私营业者约400家，但却拥有77%的装机容量），共同拟定可靠性准则，规定在任何事故情况下，不得发生电力系统中的连锁反应。规定了“电力不足概率”（LOLP）这个指标作为规划电网的基本指标，即必须达到这个指标后，再考虑费用的最佳方案。在欧洲则普遍实行“ $n-1$ ”原则，其含义是在 n 个电厂或 n 条线路中允许一个或一条发生事故，但不得影响其他 $n-1$ 条向用户供电。

1981年美国的NERC扩大成北美电力可靠性协会，经过整顿，与美国电力研究院（EPRI）合作，从联合系统、发、输、配及至用户系统均拟定了可靠性准则。他们对外推荐的是P-A-R制，其中P为性能（Performance），A为可用率（Availability），R为可靠度（Reliability），作为其改进设计与设备制造的依据。其他国家，如法国、日本、前苏联都制定了自己相应的标准。不一一详述，从这些国家的作法看，大致可以归纳出以下几点：

（1）电力工业的可靠性与安全、质量不可分，美国叫可靠性准则，英国叫安全导则，实际上都是指同一概念，其目的都在于保证用户的供电可靠度。

（2）解决供电可靠性问题必须从规划、设计、设备制造、施工安装，一直到运行维护与检修乃至人员培训，都要贯彻可靠性的原则。

（3）评价电力工业可靠性可用某种数量概念，如供电可靠率或其他准则。

（4）电力工业可靠性理论研究尚在发展，如日本宫田秀介与前苏联鲁静柯都指出：电力工业与电子工业不同，目前把电子工业形成的可靠性理论用于电力工业，并不完全恰当；认为还要从电力工业的实际情况出发，开发研究自己的理论。鲁静柯认为电力系统是大系统的问题，应根据这一特点研究“大型动力系统的可靠性理论”。

我国从 70 年代开始探索可靠性管理,并进行了许多试点,如华东电管局在所属的 23 台 N125 型机组上推行可靠性管理,宣威发电厂对设备可用率进行了分析与评价,当时的水电部已决定把设备可用率定作可靠性管理的考核指标,并计划用五年时间在全国逐步推行电力工业可靠性管理,制定了可靠性准则或导则,建立可靠性信息反馈系统。

设备可用率 p 与故障停运率 q 的定义如下:

$$p = \frac{\text{每年机组可带负荷运行小时数}}{8760} \times 100\% = \frac{\text{实运时间} + \text{停运待命时间}}{8760} \times 100\% \quad (1-3)$$

$$q = \frac{\text{故障停运时间}}{\text{故障停运时间} + \text{实运时间}} \times 100 = \frac{\text{计划停运时间} + \text{非计划停运时间}}{8760} \times 100\% \quad (1-4)$$

我国各火电厂机组的可用率相差较大,有些电厂可达 85%,而另一些电厂仅为 70%。实际上可用率在某种程度上也反映着经济效益,如一座 1000MW 的火电厂,将其可用率提高 1% (即多发电 3.65 天),即可多发 70GW·h 电,仅电费收入达 560 万元,可增加工业产值两亿元以上。

发电设备可靠性预测,就是分析电源能否满足最大电负荷需要,以往是按备用装机容量百分比判断发电容量的充裕度,现在许多国家和电网转用概率理论,按照设备强制停运率和计划检修停运率来预测缺电时间概率。缺电时间概率由各电网规定,年均几小时或几天,如美国规定为 0.1 天/年。

显然

$$p + q = 1$$

若第一台机组设备可用率和故障率分别为 p_1 与 q_1 ,第二台机组的为 p_2 和 q_2 ,则

$$(p_1 + q_1) = 1; (p_2 + q_2) = 1$$

因此, $(p_1 + q_1)(p_2 + q_2) = 1$, 即 $p_1 p_2 + q_1 p_2 + q_2 p_1 + q_1 q_2 = 1$ (1-5)

式中 $p_1 p_2$ ——两台机组都运行的可用率;

$q_1 p_2, q_2 p_1$ ——一台机组运行,另一台故障停运的概率;

$q_1 q_2$ ——两台机组同时发生故障停运的概率。

仿此,若单元机组中锅炉与汽轮机的可用率与故障停运率分别为 p_b, p_t, q_b, q_t , 则

$$p_b p_t + p_t q_b + q_t p_b + q_b q_t = 1$$

则单元故障率为

$$q_u = p_t q_b + q_t p_b + q_b q_t \quad (1-6)$$

若系统中有 n_1 与 n_2 两组相同型式的机组,其故障机组数分别为 m_1 和 m_2 ,则其故障率为

$$\frac{n_1!}{m_1!(n_1 - m_1)!} q_1^{m_1} p_1^{(n_1 - m_1)} \frac{n_2!}{m_2!(n_2 - m_2)!} q_2^{m_2} p_2^{(n_2 - m_2)}$$

以概率法进行可靠性分析时,显然,统计的年限越长则其概率越真实。

二、寿命管理

这里所说的寿命系指电厂中锅炉、汽轮机等设备的服役期限,因为它们在使用期限里总是经历着冷热交变循环,而承受着冷热交变应力,所以最终必然导致疲劳破坏而结束其

寿命。

随着电网容量增大，用电结构发生明显的变化。因而峰谷负荷差值随着增大，已达30%~50%，这样，大容量机组参与调峰运行就成为必然趋势。对于调峰机组，其启动、停机以及负荷波动频繁，加剧了在机炉部件与其管道连接上产生较大的温差和交变应力，加速部件的低频疲劳损耗，导致部件上固有缺陷的扩展与材料强度性能减退，其中尤以汽轮机转子为甚，而直接涉及到机组的安全运行。为此，近年来，世界各国都在开展大机组疲劳寿命与寿命管理的研究，特别是对大机组调峰特性并以汽轮机转子和锅炉汽包热应力与疲劳损耗为重点的研究。

在寿命管理中首先确定一些定义，以汽轮机为例，当出现第一条裂纹时，统计在此之前的总工作时间，即为汽轮机的寿命。每启动或停机一次，或增减负荷一次所折损的寿命，以百分数表示，称为寿命损耗系数。金属温度变化幅度小或金属温度变化速率小，则其寿命损耗系数就小，反之亦然。这样，便可以计算并分配其损耗系数，合理选定寿命损耗率、分配其寿命和允许的不同状态起、停次数，进行有目的、有计划的寿命管理。

以从日本引进的350MW再热式机组为例，制造厂商提供的寿命数据为30年，其寿命损耗在30年内进行了有计划的分配，以保证该机组的工作寿命。寿命损耗分配如表1-4所示。

表 1-4 日本 350MW 再热式机组 30 年内的寿命损耗分配

序 号	汽轮机启停情况	使用次数 (次)	寿命损耗 (%)	序 号	汽轮机启停情况	使用次数 (次)	寿命损耗 (%)
1	正常负荷变化	12000	30	5	冷态启动	100	10
2	正常停机	4000	8	6	强迫冷却停机	100	0.3
3	热态启动	3000	27.3	7	厂内单独运行	10	10
4	温态启动	1000	10	8	极热态启动	10	0.3

表中极热状态启动系指从最高负荷骤降至最低负荷，或从最高负荷停机后立即又重新启动，这是最恶劣的起停工况，30年内仅限10次，其寿命损耗率要严格控制在0.3%。该机组采用寿命损耗率的屏幕显示，便于值班人员密切监视。

近年来寿命管理的研究又把注意力集中到大机组的扭振上，这是或因联网的电力系统中发生的振荡，或因汽轮机本身事故发生时的快关，在汽轮发电机组轴上产生扭转力矩而带来的对汽轮机的损坏。这是更严重的破坏，因而引起人们更密切的关注，目前解决的办法是采用较灵敏的应力监测系统及相应的保护装置。可见电力系统中由于机组容量与系统结构的不断变化而引起一些新的可能发生的事故，科学技术的发展总是又找到新的对策，这种变化与发展是无止境的。

第四节 电力工业对工程技术人员培养的要求

能源和电力工业的迅猛发展，要求大力培养为其服务的工程技术人员，必须有计划地

开发人才，实现人才的现代化。现代化的一个重要条件和其重要结果是人的现代化。要胜利实现电力工业现代化，必须培养出一批又一批优秀的科技人员和管理人员，要特别着力培养出一批国际上第一流水平的专家，以带动整个队伍素质的提高。

作为电力部门工作的工程技术人员，不仅要掌握机械制造、电工技术、物理和化学等单一学科的知识，还必须掌握能源经济、环境保护和有关法律与政策等多方面、多学科的综合知识。

应该指出我国工科高等教育中某些专业，其中包括电力工程专业划分范围过细，专业面过窄，不利于现代化工程技术人员的培养。这种状况亟待改革，否则根本不可能培养出知识领域宽厚、能够担当起我国电力工业现代化建设的历史任务，也不可能培养成国际一流水平的专家。

其次还应指出包括外语在内的基础理论知识还须加深，基础理论知识，这里包括数理基础、计算能力与计算机应用方面的能力都需加强。另外还要加强生产实际知识和工程实践能力的锻炼。这方面的能力与其说是在学校里培养，不如说是在工作岗位上培养。不论学制有多长，高等学校所能提供给学生的只是最基础的东西，没有这个基础是不可能继续不断地提高，只靠这点基础也同样不可能满足未来工作的需要，更何况要能解决电力工业中一些重大的科技问题。

此外，还要有远大的目光，既要了解我国，也要了解外国，要有及时了解国外先进经验的能力。为此目的，除了有渊博而坚实的业务基础，外语是十分重要的。只有巩固地掌握外语，才能及时地了解和掌握国外先进理论和经验；也只有掌握好外语，才能与国外同行进行交流，最后跻身于国际一流专家的行列，引进和发展先进理论和技术，而避免在低水平上重复人家已经作过的工作，以及人家已经走过的弯路。

总之要使我国电力工业现代化，必须造就一批现代化的人，否则现代化是难以实现的。