



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热力系统分析与优化

张艾萍 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育本科规划教材

热力系统分析与优化

主 编 张艾萍
参 编 张炳文 姜铁骊 韩 为
主 审 付忠广



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为“十三五”普通高等教育本科规划教材。

本书共分八章，主要内容包括火力发电厂经济性分析与运行优化技术现状与展望，热力系统经济性分析与诊断，数学规划及最优化计算方法，汽轮机设备及系统运行优化，汽轮机真空系统的运行优化，热电厂运行优化，单元机组的经济运行，典型火电厂运行优化系统等。全书内容丰富，论述精练，深入浅出。

本书主要作为普通高等教育能源与动力工程专业本科生教材，也可作为成人函授教育或能源动力类相关专业教材，还可作为从事火力发电机组运行、检修及管理工作的工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

热力系统分析与优化/张艾萍主编. —北京：中国电力出版社，2016.10

“十三五”普通高等教育本科规划教材

ISBN 978-7-5123-9857-3

I. ①热… II. ①张… III. ①火电厂—热力系统—高等学校—教材 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 238830 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp-sgcc.com.cn>)

三河市百盛印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016 年 10 月第一版 2016 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.25 印张 322 千字

定价 30.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
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

为贯彻落实教育部《关于进一步加强高等学校本科教学工作的若干意见》和《教育部关于以就业为导向深化高等职业教育改革的若干意见》的精神,加强教材建设,确保教材质量,中国电力出版社制订了能源与动力工程专业“十三五”教材规划。该规划强调适应不同层次、不同类型院校,满足学科发展和人才培养的需求,坚持专业基础课教材与教学急需的专业教材并重、新编与修订相结合。本书为新编教材。

火电厂是一次能源(煤)消耗大户,而我国一次能源紧张的现状和节能减排的规划,都要求各火电厂必须节能降耗。为此,火电厂除加强各生产环节的管理、提高职工的运行和检修技能外,深入研究并完善火电厂经济运行技术,将进一步给整个火电厂带来可观的经济效益。

本书是作者根据多年从事火电厂经济性分析和运行优化技术的教学和研究所得并参考国内外相关文献资料,同时根据我国电力市场发展形势和需要而编写的。

本书共分八章,主要介绍火力发电厂经济性分析和运行优化技术现状与展望,热力系统经济性分析与诊断方法,数学规划及最优化计算方法,汽轮机设备及系统运行优化方法,汽轮机真空系统的运行优化方法,热电厂运行优化方法,单元机组的运行经济指标及运行调整和典型火电厂运行优化系统等。

本书由张艾萍主编,姜铁骝、张炳文、韩为参编,其中第一章、第二章第一~二节、第七章和第八章由张艾萍编写,第二章第三~四节和第六章由张炳文编写,第三章由韩为编写,第四章和第五章由姜铁骝编写,全书由张艾萍统稿。

华北电力大学付忠广教授对本书的编写给予大力支持和帮助,并担任本书的主审,提出了许多宝贵意见和建议,在此表示衷心感谢。

由于编者水平所限,书中难免会有不妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2016年9月于东北电力大学

目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 热力系统的基本概念	1
第二节 热力系统分析与运行优化概述	2
第三节 火电厂经济性分析与运行优化技术的现状	5
第四节 火电厂运行优化方法及优化技术展望	7
第二章 热力系统分析方法及应用	10
第一节 热力系统分析方法概述	10
第二节 等效热降法	12
第三节 焓分析法	22
第四节 热力系统的经济性诊断	41
练习题	52
第三章 最优化计算方法及其应用	54
第一节 一维优化方法及其应用	54
第二节 多维线性优化方法及其应用	60
第三节 多维非线性优化方法及其应用	79
第四节 现代最优化计算方法及其应用	90
练习题	98
第四章 汽轮机设备及其系统运行优化	100
第一节 汽轮机组减负荷最优运行方式确定	100
第二节 机组负荷优化组合和调度	103
第三节 汽轮机组启动和停机优化	112
第四节 汽轮机组最优调峰方式的确定	117
第五节 给水泵的变速运行与经济调度	120
第六节 滑压运行机组最优运行初压的确定	129
练习题	132
第五章 汽轮机真空系统的运行优化	134
第一节 汽轮机背压变化对汽轮机功率的影响	134
第二节 凝汽器最佳真空的确定方法	138
第三节 凝汽器清洁率的测量方法及其应用	146
第四节 胶球清洗凝汽器装置的最佳运行方式	148
练习题	151

第六章 热电厂运行优化	153
第一节 热电负荷分配优化	153
第二节 并列运行锅炉间负荷优化分配	160
第三节 母管制并列运行机组间负荷优化分配	163
第四节 热网运行优化	164
练习题	172
第七章 单元机组的经济运行	174
第一节 单元机组的经济指标及提高经济性的措施	174
第二节 单元机组的运行报表分析和运行管理	178
第三节 单元机组的运行监视与调整	182
第四节 给水加热器对机组经济运行的影响	190
练习题	194
第八章 典型火电厂运行优化系统	195
第一节 大型火电机组性能分析系统 XPAS	195
第二节 发电厂实时信息分析与运行优化系统 (SIS)	197
第三节 火电厂经济运行决策支持系统	201
练习题	204
参考文献	205

第一章 概 述

能源是人类文明和社会进步的强大推动力,是发展社会经济和提高人民生活水平的重要物质基础。对于正在致力于经济建设的我国来说,能源一直是制约经济发展的重要因素。解决能源问题已成为我国经济可持续发展的战略重点之一。在我国能源十分紧张,能源利用水平较低的情况下,大力提高和改善各种用能系统中能量利用的有效性,使有限的能源产生更大的经济效益,成为当前的迫切任务。

目前,在能源利用过程中,大约有 90% 左右的能源是以热能的形式被直接利用,或者是经过热能这个重要环节转化为其他形式的能量再使用的,例如,火力发电、核电、太阳能热发电等。因此,分析研究电厂热能的产生、转换与利用系统的性质及用能特点,对有效利用能量具有十分重要的意义。

第一节 热力系统的基本概念

热能工程的主要任务就是研究如何合理有效地利用热能,包括热能的产生、转换、输送、使用和回收等几个环节。各环节又是由一些基本的热工设备或热力过程构成的。所谓热力系统就是指由若干个相互作用和相互依赖的热能单元(热工设备或热力过程)按一定的规律组合而成,并具有特定功能的有机整体。热力系统与其他系统一样,具有以下几个特征:

一、集合性

热力系统是由许多热能单元按照一定的方式组合起来的,即所谓系统的“集合性”。例如,火电厂蒸汽热力循环系统是由锅炉、汽轮机、凝汽器、给水泵及加热器等热力设备组成的;余热回收系统是由各种换热器、余热锅炉、汽轮机或热泵等组成的;工厂能量利用系统是由锅炉、工业汽轮机、热交换设备、热力管网和各种用能设备组成的。随着科学技术和社会生产的发展,热力系统越来越复杂,其组成设备数目也越来越多,例如,燃气—蒸汽联合循环电厂、IGCC 电厂等。

二、关联性

热力系统的各个组成部分之间是相互联系和相互制约的,即所谓的“关联性”。这种关联性是具有一定规律的,就是系统中各单元设备不是随意的组合或无序的堆积,而是按照其性能上的特点和规律匹配联结起来的。

三、目的性

热力系统总是具有其特定的功能,即所谓系统的“目的性”。按照功能的不同,可分为热能的生产、转换、输送、利用或回收系统,可以供应生产和生活所需要的电力、动力、热量、冷量、工艺蒸汽、煤气或软化水等,也可以回收生产过程中的余热或工质。因此,它们可以由少数几个设备构成的单功能的简单系统,也可以是由许多单元设备组成的多功能复杂系统。例如,锅炉房与热力管网系统用于供热,凝汽式电厂热力系统用于发电,热电厂用

于发电和供热（热电联产，也有热电冷三联产），以煤为燃料的联合循环热电厂用于产生热、电和煤气，化工厂、毛纺厂和制药厂等工厂的公用工程系统需要满足生产所需要的各种能量和载能工质（水蒸气）。热力系统的目的就是要合理有效地转换和利用能量，满足不同目的的能量需要。

四、环境适应性

热力系统总是存在并活动于一个特定的环境下，与环境不断地进行物质和能量的交换，即所谓系统的“环境适应性”。热力系统都有输入和输出，外界环境向系统提供工质和能量，这些工质和能量在系统中流动，形成物流和能流，并不断被加工、转换、处理或利用。同时，系统也要向环境输出工质和能量。在热电联产系统中，外界向系统提供燃料的化学能和工质（水），系统通过锅炉先将燃料的化学能转化为蒸汽的热能，再通过汽轮机将蒸汽的部分热能转化为机械能，并进一步通过发电机转化为电能输出，此外汽轮机的排汽或抽汽同时向外界供热。系统和环境不仅有输入和输出的相互作用，而且系统在进行能量转换的整个过程中总是受到环境条件的制约。正是由于系统与环境之间的相互作用和制约，以及系统内部能量的转化和转移过程，才确定了系统的特殊功能。

五、层次性

热力系统和单元设备之间具有相对性。也就是说，一个系统总是另一个更大的系统的子系统，而子系统又是由更小的子系统构成的，即所谓系统的“层次性”。

第二节 热力系统分析与运行优化概述

一、热力系统分析与运行优化的主要内容

热力系统分析就是利用热力学分析方法，寻找系统在设计 and 运行中影响经济性的因素（设计参数或运行参数），以及它们的影响程度，从而为设备改造、运行调整和设备检修维护提供依据。

通常所说的最优化不外乎三者之一，即最优化设计、最优化运行和最优化管理。本书主要讨论最优化运行问题，不涉及最优化管理。最优化运行包括运行参数最优化和运行方式最优化。

系统的最优化（System Optimizing），它包括系统设计参数的最优化和系统的运行最优化。为了保证系统的某个或某几个指标最优，例如，效率最高、成本最低或能耗最小，需要确定系统的最优设计参数和最优运行参数。由于外界环境在不断地变化，系统本身的某些部分也随之不断地变化，因此还需通过改变控制变量或决策变量的方法使系统的运行状态达到最优。

本书主要介绍利用等效热降法和焓分析方法分析热力系统在运行中影响经济性的主要因素以及它们的影响程度，然后通过系统最优化方法寻找最佳运行参数，使热力系统始终在最佳状态下运行，从而达到节能减排的目的。

二、热力系统分析与优化的方法

1. 热力学分析方法

对热力系统进行分析与优化，除了运用系统工程的方法以外，还必须掌握热力学分析方法，因为热力系统的性质和规律完全遵循热力学的基本定律。而热力学的基本理论和分析方

法也在不断地发展和完善。根据热力系统单元过程的特点,一般包含有传热、传质、流动、燃烧反应及能量的转换与利用等过程。这些过程只能在热力学第一定律和第二定律所限定的范围内进行。因此,热力学分析方法是热力系统分析与优化的重要理论基础。

热力学分析方法中的焓分析法利用热力学第一、二定律相结合,可以揭示出能量系统中焓的转换、传递、利用和损失的情况,确定出系统的焓效率。该方法的突出特点是不仅从能量“量”的角度,而且从能量“质”的角度来考察热力系统的性能。本书在第二章中将介绍热力学分析的基本理论和方法。

2. 数学规划方法

前已叙及,热力系统分析与优化的核心目的是系统的最优化。也就是说,系统分析与优化的过程可以归结为一个相应的数学规划问题的求解过程。在系统优化中,利用最优化技术对已知的系统寻求最优的系统参数或运行控制参数。因此,寻求数学模型最优解的数学规划法是进行系统优化的主要手段之一,也是系统工程的基础。

数学规划作为一个研究领域,已发展成为一个独立的数学分支。简单地说,数学规划所涉及的通常是有约束的极值问题,它包括线性规划、非线性规划、整数规划、二次规划、几何规划及动态规划等。在进行系统运行优化时,要寻求系统在某一规定最佳目标下的一组决策变量值,就需要寻求或掌握行之有效的优化计算方法。这不仅要了解数学规划的基本理论和基本概念有所了解,还要很好地理解一些常用的具体算法,并用来解决热力系统工程的实际问题。但由于数学规划内容十分丰富,教科书种类繁多,加之本书的篇幅所限,不可能全面地介绍,只在第三章及其他有关章节中介绍经典数学规划在热力系统运行优化中的应用。如果要了解更多数学规划的基本理论和算法,读者可以参考有关的书籍。

3. 计算机的应用

由于热力系统日趋复杂,方案众多,而每一方案中总是包含有大量的变量。因此无论是系统分析、参数优化,还是系统综合,都必须在高速计算机上才能得以实现。从这种意义上说,热力系统分析与优化相当于计算机在热能工程领域中应用的理论基础,其发展和广泛应用与计算机的出现密切相关。计算机是进行系统分析与优化的主要计算工具和手段,可以说离开计算机就无法掌握、研究和发展热力系统工程。这就要求我们不仅熟悉计算机软件系统,还应当具有计算机程序设计能力,同时还要熟悉一些适合于计算机的数学方法和数值计算技术。

三、火电厂最优化问题

我们在做一切工作时,总希望我们所选用的方案是一切可能方案中最优的方案,这就是最优化问题。

下面举一些电力生产中的实际例子来进一步说明之。

(1) 电厂地址选择方面。例如,工厂如何合理布局,燃料、水如何合理调配,使运输费用为最省。

(2) 交通运输方面。例如,汽车运输问题,如何选择合适的路线,使运输费用最省。

(3) 在设备安装方面。如何合理组织工序,使设备安装总时间最少。

(4) 混煤方面。在燃料比较紧张的情况下,混合燃料燃烧是节约能源和降低电厂发电成本的一种有效手段。如何合理将各种燃料进行搭配,在保证正常燃烧及环保要求的前提下使燃料的成本最低。

(5) 设计方面。如何选择管道保温层厚度,使全年热损失价值和每年偿还的投资之和最小。在汽轮机级的设计阶段,应该保证汽轮机各级等于或接近其最佳速度比,以便保证在设计工况下,各级均具有最高的相对内效率;在汽轮机热力系统设计阶段,涉及锅炉最佳给水温度、最佳回热抽汽级数、给水在加热器内的最佳焓升等,以便保证设计工况下的汽轮机热耗率最小;在汽轮机参数选择方面,存在着最佳主蒸汽参数、再热蒸汽参数及背压问题;在凝汽器设计上,存在着最佳冷却面积、最佳冷却水流量等问题,以便保证年运行效益最大;在汽轮机调节系统设计过程中,涉及如何选择脉冲油压以便使调节系统的灵敏度最高等。

(6) 在机组启停方面。在保证设备安全的条件下,使总费用最小。例如,对于汽轮机启动过程来说,在汽轮机并网之前,其输出功率为零,所消耗的能量全部是损失;并网后,汽轮机负荷较低,其效率也较低,与额定工况相比,其热耗率和煤耗率均较高,相当于产生了额外的能量损失。加快启动速度,缩短启动时间,可以使启动过程中的能量损失减少,但相应加快了汽轮机零件的加热速度,使汽缸及转子等零部件内部的热应力增大,转子相对胀差增加。热应力增加即使不超过材料强度的许用应力,也会加速材料的疲劳损伤和加快蠕变速度,缩短材料的使用寿命。相对胀差增加,可能会造成汽轮机动、静部分摩擦和机组振动,影响机组安全。因此要综合安全和经济两个方面,对汽轮机启动过程进行优化,以保证在转子允许最大热应力的条件下,合理确定启动速度,使启动时间最小。

(7) 自动控制系统中参数的设定。例如,在PID自动调节系统中,如何合理选择PID调节器的参数,使自动调节系统的品质指标为最好。

(8) 在机组运行方面。例如,在当时汽轮机负荷及冷却水温度条件下,如何合理选择循环水泵运行台数或转速(对于轴流式循环水泵来说是叶片角度),以便保证汽轮机运行净收益最大;当凝汽器真空降低时,投入备用抽气设备会使真空提高,但同时也使厂用电增加,如何保证备用抽气设备投入后净收益最大;煤粉细度对磨煤机出力及耗电量均产生较大的影响。一般地,煤粉越粗,其出力越大,耗电量越小,但煤粉过粗对锅炉燃烧效率、燃烧稳定性以及结渣特性等均产生不利影响。因此,煤粉存在最佳细度的问题;对于滑压运行机组,存在着在某一定负荷区域内,优化选择定压或滑压运行方式的问题;在全厂承担电负荷或热负荷一定的条件下,如何在各机组之间进行合理分配,使全厂煤耗量最小的问题。

(9) 在机组检修方面。由于火力发电厂是一个包括锅炉、汽轮机、发电机及众多辅助设备的复杂大系统,各种设备的固有工作寿命及运行条件不同,导致其劣化速度不同。这样,在安排其检修周期时需要实行比其固有工作寿命短得多的间隔期来进行维修。如果检修周期定得过短,使设备尚未出现异常时便进行维修,必然导致维修“过剩”,造成不必要的人力和财力损失;反之,如果这个周期定得过长,则可能由于设备达到工作寿命极限而未及时更换或维修将使机组出现故障,同样也要产生一定的经济损失。因此,从火力发电的整个系统来看,设备维修周期存在着最佳值。而且,不同设备维修周期的最佳值是不同的。

另外,在机组检修的实施阶段,如何安排检修程序,使整个检修工期最短,以便提高设备的可用率,也是人们普遍关心的问题。

通过上述例子可以看出,最优化技术就是回答如何使操作、运行效果更好;在一定的环境、技术条件和其他因素约束下,如何使生产过程的效果更好,如能耗最少、成本最低、可靠性最大、性能最好、重量最轻、风险最小和期望寿命最长等。这种寻求最优效果的内容和愿望,几乎渗透到了电力生产过程的各个方面和各个环节。经过不断实践和提炼,产生了最

优化的概念、理论和方法。最优化技术就是研究和解决最优化问题的一门学科。它研究和解决如何在一切可能的方案中寻求最优解。

最优化技术实际上体现在火电厂的各个环节。作为火电厂的一员,应该时刻树立优化意识,保证自己所从事的工作达到最优,则整个火电厂的安全运行和经济效益才能达到最好的水平。

第三节 火电厂经济性分析与运行优化技术的现状

随着各种优化算法的不断涌现和对生产工程领域经济性方面要求的提高,优化技术越来越广泛地应用于工程领域。火电厂是一次能源(煤)的消耗大户。我国一次能源紧张的现状和电力行业实施“厂网分开”“竞价上网”的竞争机制,都要求各火电厂必须节能降耗。为此,火电厂除加强各生产环节的管理、提高职工的运行和检修技能外,深入研究并完善火电厂优化技术将进一步给整个火电厂带来可观的经济效益。本节内容通过对国内外火电厂优化技术理论及工程应用的分析,指出各种优化技术的特点和存在的不足,旨在寻求合理的方法来完善火电厂的优化技术。

随着计算机技术在火电厂的广泛应用和工程技术人员、电力行业专家多年研究工作的积累,优化技术在火电厂各生产环节都有不同程度的应用。

一、国内外技术现状及发展趋势

国外在电厂优化方面的研究和应用较成熟,特别是欧美的代表——德国和美国,在大型火电厂的在线运行优化管理方面已有十多年的经验。如德国斯递亚克电力公司的运行优化管理系统(简称SR4)可实时、动态地指导工人操作,使设备在最优情况下运行。国外主要是在建设电厂时,综合考虑各方面的条件,如负荷中心位置、对环境的影响、电厂投资回收年限等,然后进行电厂的优化设计;在机组快速启动优化方面也做了较深入的研究,已有较成熟的优化模型和程序;另外在控制系统方面进行多目标优化设计和改进,在负荷预测、分配和调度优化方面作了较深入的研究。

国内火电厂发电技术的优化已有很多研究成果,从电厂筹建选址时就开始对火电厂各可行方案进行技术经济比较,选取较优的方案。选用主机和辅助设备时,厂家依据建厂地址的地理和气候环境同样进行各设备的结构和热力参数优化设计及设备的优化组合。此外,电厂运行和检修中的各种优化技术更是层出不穷(国内大部分优化技术的研究都是针对这方面的)。国内也有较成熟的应用产品,如华东电力试验研究院有限公司和西安热工研究院有限公司研制的运行优化管理系统分别应用于上海外高桥发电厂3号机和石洞口二厂1号机上。可在一定范围指导运行人员在最优参数附近运行机组,但由于运行的可达值在2次大修期间不能更改,因而缺少动态寻优特性。

二、火电厂运行优化技术应用现状

火电厂优化可分为设计优化、运行优化和设备改进优化。以下主要从运行角度说明优化技术的应用现状。电厂是一个大型复杂系统,如果同时考虑各方面的因素,优化问题将变得极为复杂,会带来“维数灾”和增加计算机寻优时的困难。为将优化问题简单化,一般将全厂系统分级、分层为多个层次的子系统进行优化,通过层次间协调以达到全厂的优化。主要包括机组负荷优化组合和调度、给水系统优化、循环水系统优化、锅炉受热面吹灰时间间隔

优化等。

1. 机组负荷优化组合和调度

火电厂的运行优化最先运用于负荷的合理分配。依据机组特性得到具体的目标函数，依据外界总负荷和机组自身特性的约束条件得到负荷分配的数学模型；通过拉格朗日最小二乘法求解最优解；得出按“等微增率”原则可解决并列运行的汽轮发电机组负荷经济调度和分配的问题。这种负荷优化分配的缺点是没有考虑到机组的启停费用对整个负荷分配经济性的巨大影响，因而在实际应用中存在较大的局限性。近些年已应用遗传算法来求解负荷的经济分配。值得注意的是，为适应当今电网的用电结构，并列机组启停计划和启停次序的优化也是一个很具有现实意义的研究方向。

2. 给水系统优化

运行时对给水系统的优化，关键是对给水泵运行方式的优化。电厂中给水泵在设计选型时会考虑满足特殊情况下（如在真空恶化但机组必须满发时）锅炉的最大给水量，因而会有约 10% 的富裕量。正常运行时为达到工质的进出平衡要通过给水阀进行节流调节，此举将带来节流损失，必然存在优化的可能。给水泵是电厂耗电大户，占厂用电的 1/3 左右，有很大的节能潜力。因而优化给水泵的运行可获得很明显的经济效益。单元制给水系统运行优化的目标函数就是火电厂在保持发电煤耗不变的前提下，得出供电煤耗关系式。工程上实现优化的方法就是采用变速给水泵，改变泵运行的工作点，使之在最优点运行。这样虽可减少给水出口阻力，简化给水操作台，然而改变泵转速的同时将会使泵偏离高效率点运行，因而也会引起泵单位给水的耗电量、给水泵焓升的变化，所以在改变给水泵转速的基础上还有优化的空间。对于母管制给水系统，除具有单元制系统的优化特点外，还存在给水的分配及组合。以往建模时，有的用等效热降方法列出节能量的目标函数，有的仅以减少泵出口阻力损失为目标。这些方法只看到优化问题的某一方面，较为有效的方法是综合考虑各种主要因素，力求得出一个较准确的优化模型。

3. 循环水系统优化

循环水系统是电厂的一个重要系统，它运行得好坏直接影响汽轮机真空，从而影响汽轮机出力和安全。另外，凝汽系统的用电量为发电量的 1.5%~2%，真空升高可使出力增大，但又会增大厂用电量，因而存在优化的可能。许多工程技术人员和科研工作者对该系统的优化做了很多工作，建立了一些较准确的优化模型。

循环水系统优化运行的目标函数是在汽轮机热耗量不变的前提下，汽轮发电机组发电量与循环水泵耗电量的差额达到最大。循环水系统的优化过程很复杂，应考虑的因素很多，如循环水进水温度、循环水流速（量）、蒸汽热负荷、管子清洁度、管网阻力特性、凝汽器及抽气器结构特性，海水作为循环水的电厂还与潮汐有关。对于母管制循环水系统还有优化组合的问题。

要对循环水系统建立优化数学模型，首先必须获得一些性能特性：

- (1) 汽轮机在一定排汽量条件下循环水量与发电机功率的特性。
- (2) 循环水泵流量与耗功的特性。
- (3) 循环水泵的扬程特性。
- (4) 循环水系统网管的阻力特性。
- (5) 凝汽器水阻力特性。

(6) 凝汽器传热特性 (传热系数计算方法)。

这些特性可通过试验得到数据,利用回归方法求出特性方程。在以前的优化中一般只考虑第(1)、(2)特性,得到所谓的“最佳真空”。循环水系统为母管制运行方式时,更应考虑其他的特性方可得到准确的优化数学模型,从而为运行人员提供最佳运行的理论依据。

循环水系统的优化在现场中实现的方法主要有:

- (1) 运行台数和叶片角度变动的配合使用。
- (2) 改造现有的水泵电动机,利用极数可变实现有级变速。
- (3) 现场允许的情况下将相邻两机组循环水系统加设一根联络母管,方便台数调度。

循环水系统的优化应包括真空抽气设备的运行优化,因抽气设备固有的抽气负荷特性会影响机组最佳真空。综合考虑诸多因素会大大增加模型的复杂度,但随着快速优化算法不断出现,相信有好的解决办法。

4. 锅炉受热面吹灰时间间隔优化

由于煤中含有灰分,在燃煤锅炉受热面上都会有不同程度的积灰,加大了换热热阻,导致排烟损失增加。为减少积灰产生的损失,电厂运行时会按一定方式和程序进行受热面吹扫。但吹灰所用的高压介质消耗一定能量,这就是一种附加损失。因而当吹灰设备和介质一定时,如何确定吹灰的时间间隔就是一个优化问题。通过建立各受热面吸热变化的数学模型,考虑系统损失和吹灰介质损失,将上述3项损失之和在某时间间隔段平均损失达到最小为目标函数,最后求出最优的时间间隔。如同时结合设备安全性来考虑,便成为一个多目标的优化问题。

5. 其他方面的优化

火电厂中还有其他系统的优化,如控制系统优化、燃料混合燃烧的优化组合、锅炉制粉系统优化、发电厂补水系统优化和厂用电系统优化等。此外在热电厂中,发电和供热之间存在明显的依赖和约束关系,也有许多方面的优化,如热化系数优化,热电联产多目标优化(如投资、回收年限、节能费用等)。

第四节 火电厂运行优化方法及优化技术展望

优化是一门决策学科。以前的优化一般是进行各种可行方案的比较,从中选出最好的方案,这样的优化并不一定是最优,因此也缺乏准确性。随着人们对发电技术认识的深入及优化方法的进步和电子计算机技术的发展,准确的优化技术不断应用于发电技术中。

一、优化步骤和优化方法

1. 优化步骤

火电厂生产过程最优化任务就是提高能量转换系统的效率及辅助系统的节能,并减少对环境的污染及对一些安全性、经济性问题的合理解决。这就决定了优化过程的一般步骤:

- (1) 依据电厂热力设备在系统中的物理化学过程特性与生产过程中的技术要求、运行状态、限制条件和安全性等,抽象出具体的数学模型(包括目标函数、约束条件)。
- (2) 分析模型的数学特征选用适当的优化算法,借助计算机编程求最优解。
- (3) 验证模型的正确性,即进行优化前后的经济性(如热耗、煤耗等)的比较。

2. 优化方法

最优化就是在一定的限定条件下求出某个函数的最大或最小值（最优值）及对应的一些参量。古典的数学方法利用变分法进行寻优，最典型的方法就是拉格朗日乘子法，这种方法远不能满足现有工程的要求。随着现代应用数学和计算机技术的发展便出现了一个解决最优问题的有效方法——数学规划法，基本的优化方法如下：

(1) 线性规划法：用于目标函数和约束条件为线性的场合。

(2) 整数规划法：一般用于具有离散型决策变量的场合。

(3) 非线性规划法：包括无约束、有约束非线性规划法。

(4) 动态规划法：可用于回热系统的参数优化和带有随机因素的优化问题。

(5) 各种启发算法：主要用于机组运行优化组合。

(6) 遗传算法：一种流行和有效的算法，优化时将决策变量映射为某种进制链码，依据进化论思想对决策变量进行全局寻优。

二、优化理论和算法的发展趋势

国外在进行火电厂发电技术寻优过程中不仅考虑热经济性，而且还重点考虑生态环境的约束和相关物质价格的动态变化。国内在火电厂优化运行方面的研究已越来越广泛和深入，且不同程度地应用于现场，取得了一定成绩。但现有的运行优化数学模型缺少动态寻优特点。一方面没有考虑或忽略了一些不确定的因素，如地区水价、煤价、电价、金属价格的变动；另一方面优化基准值由试验确定，没有考虑设备运行时多变的具体情况所对应的最优值；再者，有些系统的优化模型难以建立，子系统模型没有进行必要的协调。这些都是亟待解决和值得研究的问题。

随着现代应用数学的快速发展，除了传统的数学规划法应用于火电技术优化外，相信更多更好的数学方法将会陆续应用于优化领域，如灰色系统的预测理论对处理火电机组优化运行中的不确定因素将会起到很好的作用。遗传算法（GA）对处理大规模、关系复杂的离散问题显得很有效。国外已较普遍地采用遗传算法对电厂进行电网中多台机组启停的热经济优化，并取得了一定的经济效益。国内在运行优化方面也作过这样的尝试，解决了热电厂多台机组热负荷经济调度问题。还有人工神经网络（ANNS）算法，该算法已普遍应用于设备性能预测、过程控制和故障诊断等领域，但此算法用于系统优化还不是很广泛，一般适用于目标函数为二次型的优化模型中。可以预测，人工神经网络（ANNS）算法将会在火电厂优化技术中扮演越来越重要的角色。

三、优化技术工程应用

随着国家电力运营体制改革的深入，在火电厂增强自身竞争力过程中，必将增加工人的劳动强度。因此开发优化管理系统，减轻工人工作强度很有必要，也有广阔的前景。国内电厂现有运行优化在线管理系统是在性能监测上发展起来的，其中运行优化系统中所谓的最优值一般由稳态试验结果决定，并在一段时间内不变，而在实际生产过程中各点的参数是变动的，与试验时的状态肯定有偏差，因而这些数据明显缺乏可靠性。为使优化准确，应将原来以设备生产厂家的一些特性曲线数据或试验数据变为以现场的采集分析后的动态数据作为优化时的状态变量或比较的基准值。而这些数据可通过电厂已有的数据采集和性能监测系统可靠、实时地提供，通过优化模型实时求解决策变量，借助计算机屏幕和声光系统实时指导运行人员进行最优操作，同时又可使现有的性能监测系统内容更加丰富多彩。此外，优化技术

也是目前兴起的火电厂设备状态检修技术决策的依据。通过现有的性能监测软件和优化模块库,可量化设备运行状况的好坏,从而决定设备是否应进行相应项目的检修。最优化技术用于火电厂生产过程,给电厂带来了日益增长的经济效益。继续深入研究、完善并发展优化技术在发电技术中的应用是一个很有意义的课题。

四、最优化技术的发展

20 世纪 40 年代以前,主要用微分法、变分法等古典数学方法解决最优化问题。第二次世界大战中,由于军事上的需要产生了运筹学,从而产生了无法用上述古典数学方法解决的最优化问题,出现了对解决最优化问题很有效的数学方法——最优化方法。此后,最优化的理论和方法逐步得到了丰富和发展。特别是从 60 年代起,随着电子计算机的发展和完善,计算技术的进步,使许多最优化方法得以实现。

促进最优化技术在火电厂中得到应用的主要因素是:

(1) 现代科技与生产发展的需要。随着电力工业的发展,火电机组向大容量、高参数、自动化及智能化方向发展。特别是随着电力工业改革的深入,经济计划与经济管理开始由粗放型向集约型方向发展。尤其是近几年随着电力供需矛盾的缓和,电力市场化的机制将逐渐形成,厂网分离、竞价上网已成为必然趋势,在这种形式下,降低发电成本、提高经济性已成为发电厂的迫切需要。电厂管理者的每一个决策、运行人员的每一种运行方式,可能都会对电厂运行的安全性和经济性产生重大的影响。因此,电厂管理人员要求寻求最优的决策、运行人员要求寻求最优的机组运行方式,以便获得最好的经济效益。这就促进了最优化技术在电厂中的应用。

(2) 电子计算机的飞速发展。电子计算机的发展,为最优化技术提供了有力的计算工具。由于最优化技术是要在一切可能的方案中寻求最优的方案,往往需要大量的计算。若没有电子计算机而采用人工进行计算,则不仅工作量较大,而且有些问题根本无法解决,而有了计算机这一有力的工具,就使得最优化技术得以迅速发展。

目前,最优化技术几乎已经渗透到国民经济的各个领域,成为促进国民经济快速发展的有利工具。有理由相信,最优化技术将为电力工业的发展提供更好的方案。

第二章 热力系统分析方法及应用

电能是最洁净、最便于使用的二次能源。生产电能要消耗大量的一次能源，目前我国电力生产消耗的一次能源以煤为主，其耗量约占全国产煤的 55%。尽管新能源及其利用技术在不断研究和开发中，但我国电力工业在今后相当长的一段时间内仍然将以燃煤的火力发电为主。电站节煤是关系节能全局以及可持续性发展的大事，是我国经济由粗放型向集约型转变必须解决的问题，也是热能动力工作者面临的严肃课题之一。

火力发电厂既是产能大户，又是能耗大户。对作为其运行经济性考核工具的热力系统分析计算方法进行研究，具有十分重要的理论和现实意义。它既是热力系统设计、技术改造的理论基础，又是火力发电厂热力设备经济运行在线分析的实用技术。对火电厂各个机组间的热、电负荷进行最佳分配，以保证全厂的煤耗量最小是一个不断向纵深发展的节能研究领域，是进行单机经济性诊断的前提，是火电厂经济性诊断和经济运行不可分割的重要组成部分。本章主要围绕火力发电厂热力系统分析方法及其在经济性诊断方面的应用加以介绍，重点介绍以热力学第一定律为基础的等效热降法和以热力学第二定律为基础的熵分析法。

第一节 热力系统分析方法概述

火电机组热力系统定量分析计算方法种类繁多，目前常用的有常规热平衡、等效热降法、熵析法、循环函数法、常规热平衡法简捷算法、热力系统广义数学模型、热力系统平衡的拓扑算法、自由路径法、热耗变换系数法、热量品味系统法、质量单元矩阵分析法等。另外，流程图理论、人工神经网络等在热力系统定量分析计算中也有所应用。其中前几种分析方法比较成熟，被广大使用者广为接受，并应用于研究及生产领域。

一、热力系统分析方法概况

1. 常规热平衡法

常规热平衡法是最基本的热力系统分析计算方法，是热力学第一定律在火电厂热力系统计算中的直接表述，是一种单纯的汽水流量平衡和能量平衡方法。理论上其他各种分析方法都可以由它推导出来，它以单个加热器为研究对象，通过逐级列写各个加热器的汽水质量平衡和能量平衡方程，以得到各级加热器抽汽系数，并利用功率方程和吸热方程最终求解系统的热经济指标。近几年来，在我国逐渐重视节能的大环境下，对火电机组节能要求的提高，客观上对火电机组热力系统分析计算方法的计算精度有了较高的要求。特别是随着火电机组单机容量和总体容量的增大，由于热力系统计算模型误差带来的煤耗计算偏差不容小视。一次常规热平衡方法计算结果的高精度，越来越显示出其优势。以常规热平衡法为基础，结合矩阵思想逐渐成为一种新的研究热点。

2. 等效热降法

作为一种热工理论，其前提是假定新蒸汽流量不变，循环的初终参数和汽态线不变，而

以内功率的变化（等效热降）来分析热力系统的热经济效益。对于确定的热力系统，汽水等参数均为已知时，等效热降和抽汽效率均随之确定，作为一次性参数给出。等效热降法既可以用于整体热力系统的计算，也可用于热力系统局部定量分析。它摒弃了常规热平衡法的缺点，不需要全盘重新计算就能查明系统变化的经济效益。即用简捷的局部运算代替整个系统的复杂运算。另外，在考虑了附加因素后，该方法可单独求出这些附加因素对整个系统热效率的影响。这样运用等效热降提出的小指标耗差分析计算模型，可节省大量的复杂运算，基本满足现场热经济性分析的要求，对火电厂深入开展运行经济性分析和节能降耗工作具有实用价值。但目前的研究表明，等效热降法在以下两方面存在着不足：一方面是等效热降法将再热器吸热的做功效率取为汽轮机装置的效率，由其他热力系统计算方法计算获得，即在等效热降法中所用到的重要数据需要通过其他的分析方法来获得，因此动摇了等效热降法；另一方面，一般认为基于等效热降法的分析模型是精确的。但最新研究表明：在局部定量分析中，部分模型具有一定的近似性。

3. 循环函数法

循环函数法是另外一种热力系统计算方法。该方法根据热力学第二定律，提出用循环不可逆性来定性分析，用循环函数式来定量计算蒸汽循环的经济性。这不仅简化了电厂热力系统的整体计算，而且解决了辅助用汽、用水的单项热经济指标计算。该方法能够较好地适应计算复杂热力系统，也适用于局部定量分析。它采用单元进水系数来计算凝汽系数，无须联立求解 $(Z+1)$ 元方程，只要给定循环参数和热力系统，就可根据相应的通式直接列出其函数方程。将有关的汽水参数值代入方程即可求出，简化了计算。在作不同热力系统方案选择时，如不同的方案仅涉及某一加热单元的变化，只需重新计算该单元的进水系数。方案中未变化的其他加热单元的进水系数不必再计算，使计算工作量大为减少，功能与等效热降法相似，与常规的热力计算方法相比，此点尤为突出。该方法对概念的理解要求比较高，推导烦琐。因此，在实际生产领域，相比等效热降法而言，该方法应用较少。

4. 质量单元矩阵分析法

矩阵分析法只是一个泛称，并不特指某种具体的分析方法。一般而言，只要计算方法采用矩阵形式表达，即可划为这一范畴。随着计算机的普及和计算机技术的发展，这类分析方法是当前热力系统分析计算方法的主流研究方向。公开发表见诸各学术期刊的有常规热平衡简捷算法、火电厂热力系统平衡的拓扑算法、热力系统广义数学模型、循环组合法以及热力单元矩阵分析法等。其中以常规热平衡简捷算法研究较为广泛。这类分析方法的共性在于模型均采用矩阵形式表达，突出特点是“数”与“形”的结合，即，矩阵结构与热力系统结构一一对应，矩阵中矩阵元素数值与热力系统中相关热力参数一一对应。当热力系统结构或参数发生改变时，只需调整矩阵的结构和矩阵元素数值即可，使系统的计算通用性更佳，非常适合于编制通用计算程序。

5. 焓分析法

热力学第一定律“能量守恒定律”只是从数量上说明了能量在转化过程中的总量守恒关系，它可以发现装置或循环中哪些设备、部位能量损失大，但未顾及能量质量的变化，不能发现耗能的真正原因。而热力学第二定律阐述了孤立系统熵增原理，从能的本性的高度，规定过程发生的方向性与限制，特别是指出了能量转化的条件和限制，指出能量在转移过程中具有部分地乃至全部地失去其使用价值的客观规律。焓分析方法是建立在热力学第一定律的