



汽轮机热经济性 诊断技术及应用

■ 李 勇 曹丽华 著



科学出版社

汽轮机热经济性 诊断技术及应用

李 勇 曹丽华 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本研究汽轮机热经济性诊断技术的专著。书中系统阐述汽轮机热经济性诊断的原理、方法、技术及其应用。首先,介绍火力发电厂生产过程中各环节效率的概念及定义方法,并对其间的关系进行分析;其次,介绍汽轮机本体通流部分、汽轮机回热系统以及凝汽设备的热经济性诊断方法;最后,介绍现代人工神经网络在汽轮机热经济性诊断中的应用。本书融入了作者从事汽轮机热经济性诊断的一些观点和体会,注重理论与实际应用相结合,便于读者阅读理解。

本书可供从事火力发电厂能源管理、汽轮机运行管理、汽轮机节能理论研究以及相关领域的技术人员参考,也可作为大专院校能源、动力类专业的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

汽轮机热经济性诊断技术及应用/李勇,曹丽华著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-033369-8

I. ①汽… II. ①李… ②曹… III. ①火电厂-蒸汽透平-热力系统-诊断技术 IV. ①TM621.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 007204 号

责任编辑:王志欣 陈 婕 潘继敏 / 责任校对:张凤琴
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

源海印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 2 月第一次印刷 印张: 16 1/4

字数: 314 000

定价: 50.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

电力工业是中国国民经济发展中最重要的基础能源产业,同时也是高耗能、高污染的产业之一。截至 2009 年年底,全国发电设备总容量为 87407 万 kW,其中火力发电机组容量为 65205 万 kW,占全部发电设备总容量的 74.59%。2009 年全国发电量总计 36506.23 亿 kW·h,其中火力发电机组发电量 29814.22 亿 kW·h,占总发电量的 81.67%。日本福岛核电站事故后,核电发展受到一定的影响。因此,在相当长的时期内,火力发电仍将在中国电源结构中占主导地位,全社会用电主要靠火电企业提供。火电机组在电源结构中的高比例决定了火力发电仍然是中国的煤炭消耗大户。2009 年中国原煤产量为 29.6 亿吨,其中 60%左右用于火力发电。火力发电行业节能减排的任务仍相当艰巨。

汽轮机的运行经济性诊断技术是一种了解和掌握汽轮机运行过程中的经济状态,确定其整体或局部的热经济性能是否正常,及早发现引起经济性能下降的原因及部位,预测其发展趋势的实用技术。该技术的实施,对提高汽轮机运行的经济性、降低发电成本、实现火力发电厂的节能减排具有重要的意义。

鉴于此原因,作者完成了本书,目的在于通过汽轮机运行经济性诊断技术的推广与应用,促进火力发电厂的节能降耗。

本书主要以作者长期以来从事火力发电厂汽轮机运行经济性诊断所取得的经验为基础,系统总结国内外研究者特别是作者在汽轮机热经济性诊断方面的研究成果。

全书共分 6 章。第 1 章介绍汽轮机热经济性诊断的内容、意义及当前的发展状况和存在的问题。第 2 章介绍各种效率的定义,对锅炉热效率和发电标准煤耗率的计算方法进行分析,指出不同计算方法所得结果之间的差别,以及火力发电厂热力系统局部因素变化对相关热效率的影响。第 3 章对汽轮机本体通流部分的损失产生原因及计算方法进行分析,然后对汽轮机通流部分热经济性的评价指标——相对内效率的定义方法进行讨论,介绍相对内效率的简单测量方法。第 4 章首先分析现有的理想循环热效率的定义方法及其存在的问题;同时,分析等效热降法在实际应用中存在的问题;然后,通过对理想循环热效率定义方法的改进,得到基于改进理想循环热效率的等效热降法——理想等效热降法。第 5 章对凝汽器真空应达值的确定方法进行讨论,并提出凝汽器清洁率的测量方法,分析汽轮机真空系统严密性试验结果的修正方法以及真空系统严密性试验对凝汽器安全性和经济性的影响;最后给出凝结水过冷度的产生机理和水环式真空泵汽蚀的监测方法,并

提出了一种新的凝汽器冷却水流量的测量方法。第6章首先提出一种新的BP网络训练方法,以便提高其训练收敛速度;然后介绍人工神经网络在汽轮机特性方程、冷却塔运行特性数学模型、凝汽器清洁率预测模型建立中的应用;最后,给出人工神经网络在凝汽器故障诊断、汽轮机相对内效率应达值、漏入汽轮机真空系统空气量的软测量中的应用。

本书力求理论和实际应用的结合,注重实际应用,以便推广汽轮机热经济性诊断技术。同时,汽轮机热经济性诊断技术的发展很快,不断有新问题和新的解决方法出现,因此,本书不可能囊括当前的所有方法。

本书在编写过程中得到了东北电力大学有关领导、同事和研究生的大力支持和帮助,借此机会向他们表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

李 勇 曹丽华

2011年3月于东北电力大学能源与动力工程学院

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 火力发电厂节能诊断的意义	1
1.1.1 火力发电厂节能的意义	1
1.1.2 火力发电厂运行经济性诊断的意义	3
1.2 汽轮机目前运行经济状况及节能潜力分析	6
1.2.1 影响汽轮机热经济性的因素分析	6
1.2.2 汽轮机的节能潜力分析	10
1.3 汽轮机热经济性诊断的现状存在的问题	15
1.3.1 国内外研究及应用现状	15
1.3.2 汽轮机热经济性诊断存在的问题	16
参考文献	17
第 2 章 火力发电厂各效率之间的关系	20
2.1 火力发电厂的主要能量转换环节	20
2.2 火力发电厂的全厂热效率和发电标准煤耗率	25
2.2.1 DL/T 904—2004 中的锅炉热效率及发电标准煤耗率	25
2.2.2 GB 10184—88 和 DL/T 606.3—2006 中锅炉热效率及相应的发电标准煤耗率	27
2.2.3 两种计算方法得到的发电标准煤耗率分析	28
2.2.4 两种发电标准煤耗率的定义方法分析	30
2.2.5 计算实例	30
2.3 火力发电厂热力系统局部因素变化对相关热效率的影响	31
2.3.1 火电厂管道热效率和实际循环热效率的计算方法分析	32
2.3.2 实例计算与分析	33
2.4 本章小结	40
参考文献	40
第 3 章 汽轮机本体通流部分热经济性诊断方法	42
3.1 汽轮机通流部分及其损失	42
3.1.1 汽轮机级的内部损失	43
3.1.2 汽轮机级的外部损失	54
3.2 汽轮机通流部分运行经济性的评价指标	56

3.2.1	汽轮机相对内效率定义方法分析	56
3.2.2	两种汽轮机相对内效率之间的关系分析	57
3.2.3	两种相对内效率的等效性分析	59
3.3	汽轮机焓降型相对内效率的测量计算方法	62
3.3.1	汽轮机焓降型相对内效率计算方法概述	62
3.3.2	汽轮机焓降型相对内效率常规计算方法	63
3.4	汽轮机功率型相对内效率的测量计算方法	72
3.4.1	汽轮机功率型相对内效率测量计算方法概述	72
3.4.2	汽轮机功率型相对内效率测量计算	73
3.5	汽轮机功率型相对内效率的在线监测计算方法	76
3.5.1	在线监测与热力试验工况之间的区别	76
3.5.2	汽轮机相对内效率在线监测的简单热力学方法	77
3.5.3	汽轮机相对内效率在线监测的改进热力学方法	79
3.6	各汽缸相对内效率变化对整机相对内效率影响的计算方法	83
3.7	级组相对内效率变化对所在汽缸相对内效率影响的计算方法	85
3.8	汽轮机通流部分状态的监测与诊断方法	91
3.8.1	汽轮机通流部分状态正常时各级组前后压力比分析	93
3.8.2	汽轮机通流部分状态失常时级组前后压力比变化的分析	96
3.8.3	汽轮机通流部分状态的精确监测与诊断方法	97
3.9	本章小结	102
	参考文献	102
第4章	汽轮机回热系统及设备的热经济性诊断方法	104
4.1	汽轮机回热系统存在的损失	104
4.1.1	回热系统设备或管路本身所引起的损失	105
4.1.2	回热系统非正常运行所造成的损失	108
4.2	汽轮机回热系统运行热经济性评价方法及存在的问题	110
4.2.1	汽轮机实际循环热效率概念的分析	110
4.2.2	理想循环热效率的概念及定义方法分析	110
4.2.3	回热做功比的概念及定义方法	112
4.3	理想循环热效率定义方法的改进	114
4.3.1	改进后的理想循环热效率定义方法	114
4.3.2	改进后的理想循环热效率对回热系统各参数变化的敏感程度	115
4.3.3	改进后的理想循环热效率对汽轮机相对内效率变化的敏感程度	117
4.3.4	改进的理想循环热效率在汽轮机热经济性诊断中的应用	117
4.4	改进的理想循环热效率应达值确定方法	118
4.4.1	改进的理想循环热效率的系统修正方法	118

4.4.2 改进的理想循环热效率的参数修正方法	121
4.4.3 改进的理想循环热效率应达值的确定	124
4.5 等效热降法及其应用分析	124
4.5.1 等效热降法简介	125
4.5.2 等效热降法在实际应用中存在的问题	129
4.5.3 等效热降法与常规热平衡方法之间的关系	133
4.6 基于改进理想循环热效率的理想等效热降法	135
4.6.1 理想等效热降法的提出	136
4.6.2 等效热降法改进算法的合理性分析	138
4.7 理想等效热降法在汽轮机回热系统热经济性诊断中的应用	141
4.8 低压给水加热器运行热经济性评价方法研究	142
4.8.1 低压加热器端差应达值计算方法	143
4.8.2 低压加热器应达值计算方法的验证	147
4.8.3 低压加热器运行性能的评价	150
4.9 本章小结	151
参考文献	152
第5章 汽轮机凝汽设备的热经济性诊断方法	154
5.1 凝汽器真空变化对汽轮机热经济性的影响	154
5.1.1 凝汽设备的组成	154
5.1.2 凝汽器真空对汽轮机运行经济性的影响	155
5.2 凝汽器内压力的确定及其影响因素	157
5.2.1 凝汽器内压力的确定	157
5.2.2 影响凝汽器压力的因素	158
5.3 凝汽器真空应达值的计算方法	162
5.3.1 凝汽器真空应达值的确定方法	163
5.3.2 应达值确定方法在凝汽器运行状态分析中的应用	165
5.4 凝汽器端差增大原因的分离方法	167
5.5 考虑空气影响时蒸汽凝结放热系数的计算方法	169
5.5.1 空气对凝汽器蒸汽凝结放热的影响	170
5.5.2 空气对蒸汽凝结放热系数影响的计算方法及其比较	172
5.6 真空系统严密性试验动态数值仿真	175
5.6.1 真空系统严密性试验动态数学模型及其计算	175
5.6.2 真空系统严密性试验对凝汽器冷却管受力的影响	181
5.6.3 真空系统严密性试验对汽轮机热经济性的影响	183
5.7 真空系统严密性试验结果的修正方法	184
5.7.1 真空系统严密性试验的静态仿真	184

5.7.2 真空系统严密性试验结果的修正	187
5.8 水环真空泵汽蚀的监测及其对凝汽器运行特性的影响	188
5.8.1 水环真空泵汽蚀的监测	189
5.8.2 水环真空泵汽蚀对凝汽器运行特性的影响	191
5.9 凝汽器清洁率的概念及其测量方法	192
5.9.1 凝汽器清洁率的概念	192
5.9.2 凝汽器管束布置系数	194
5.9.3 凝汽器清洁率的测定	195
5.10 凝汽器冷却水流量的测量方法	197
5.10.1 垂直弯管中理想流量与内外压差的关系	197
5.10.2 垂直弯管内流体流动的数值模拟	200
5.10.3 试验验证	201
5.11 汽轮机凝结水过冷度产生机理分析	202
5.11.1 冷却水温度和流量对凝汽器汽阻和过冷度的影响	203
5.11.2 冷却水温度和流量对凝结液膜及过冷度影响分析	206
5.12 本章小结	210
参考文献	211
第6章 人工神经网络及其在汽轮机热经济性诊断中的应用	214
6.1 BP 网络及其训练算法	214
6.1.1 BP 网络及有关概念	214
6.1.2 BP 网络的训练算法	216
6.2 具有自适应学习率的 BP 网络训练算法	222
6.2.1 BP 网络的学习率分析	222
6.2.2 改进学习率的 BP 网络训练算法	223
6.3 基于 BP 网络的汽轮机运行特性方程	227
6.3.1 现有的汽轮机运行特性方程建立方法及其存在的问题	228
6.3.2 基于 BP 网络的汽轮机特性数学模型的建立	228
6.4 汽轮机相对内效率应达值的确定方法	230
6.4.1 汽轮机相对内效率应达值的定义	230
6.4.2 汽轮机各级组相对内效率应达值的确定	231
6.5 BP 网络在凝汽设备故障诊断中的应用	235
6.6 凝汽器清洁率预测的 BP 网络模型	237
6.7 漏入汽轮机真空系统空气量的软测量	239
6.8 基于 RBF 网络的冷却塔运行特性数学模型	242
6.9 本章小结	247
参考文献	248

第 1 章 绪 论

1.1 火力发电厂节能诊断的意义

1.1.1 火力发电厂节能的意义

《中华人民共和国节约能源法》指出,节能是指加强用能管理,采取技术上可行、经济上合理以及环境和社会可以承受的措施,减少从能源生产到消费各个环节中的损失和浪费,更加有效、合理地利用能源。因此,节能就是在满足相同需要的前提下,减少能源消耗量,所减少的能源数量就是节能的数量。

对于火力发电厂来说,节能就是指在电厂输出功率一定的条件下,减少燃料的消耗量,即减少供电煤耗率。因此,一切有助于减少供电标准煤耗率的措施,都可以称为节能措施。此外,加强燃料管理,减少燃料在厂内的损耗量,也是节能的具体体现。

中国是以火力发电为主的电力生产、供应国,发电厂既是能源生产大户,也是能源消耗大户。每年全国大大小小的火电厂耗煤量占到全国煤炭流通总量的 60% 以上。据中国电力企业联合会编制的《全国电力工业 2009 年度统计数据》报道,截至 2009 年底,全国发电设备总容量为 87407 万 kW,其中火力发电机组容量为 65205 万 kW,占全部发电设备总容量的 74.59%。2009 年中国发电量总计 36506.23 亿 kW·h,其中火力发电机组发电量为 29814.22 亿 kW·h,占总发电量的 81.67%。通过与 2008 年同期数据进行对比可以发现,虽然 2009 年火力发电装机总容量占全部发电设备总容量的比例比 2008 年减少了 1.28 个百分点,但 2009 年火力发电机组发电量占全国总发电量的比例却比 2008 年增加了将近 1 个百分点。另外,日本福岛核电站事故后,全球核能发电发展必然受到一定的影响。因此,在相当长的时期内,火力发电仍将在中国电源结构中占主导地位,全社会用电主要靠火电企业提供,中国电力供应主要依赖煤炭的局面不会改变。同时,随着中国国民经济的发展、用电量的加大,对煤炭的需求量也会进一步增大。因此,火力发电厂的节能,具有重要而现实的意义。

第一,节能是实现国民经济又好又快发展的重要保证。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十一个五年规划纲要》指出:节能减排是贯彻落实科学发展观、构建社会主义和谐社会的重大举措;是建设资源节约型、环境友好型社会的必然选择;是推进经济结构调整,转变增长方式的必由之路;是维护中华民族长远利益的

必然要求。胡锦涛总书记在 2006 年 12 月 25 日主持中央政治局集体学习时指出：“能源资源是人类社会生存和发展的重要物质基础，也是我们全面建设小康社会、加快推进社会主义现代化的重要物质基础。坚持节约资源的基本国策，加快建设资源节约型、环境友好型社会，促进经济发展与人口、资源、环境相协调，是贯彻落实科学发展观、走新型工业化道路的必然要求，是实现可持续发展、保障经济安全和国家安全的必然要求。我们必须以对国家和人民高度负责、对子孙后代高度负责的精神，把节约能源资源工作放在更加突出的战略位置，切实做到节约发展、清洁发展、安全发展、可持续发展，坚定不移地走生产发展、生活富裕、生态良好的文明发展道路。”胡锦涛总书记还提出：“要坚持把节能降耗作为转变经济增长方式的主攻方向。”中国政府目前正在以科学发展观为指导，加快发展现代能源产业，坚持节约资源和保护环境的基本国策，把建设资源节约型、环境友好型社会放在工业化、现代化发展战略的突出位置，努力增强可持续发展能力，建设创新型国家，继续为世界经济发展和繁荣做出更大贡献。

第二，火力发电节能是减少能源资源消耗量的最直接措施。据文献[1]报道，2003 年，中国用于火力发电的原煤 7.6 亿吨。2006 年，中国用于火力发电的原煤 11.43 亿吨。2007 年，中国用于火力发电的原煤 12.82 亿吨，占当年原煤产量的 51%。

根据英国石油公司(British Petroleum, BP)的《世界能源统计 2011》得到 2010 年底主要国家煤炭存储量以及全年的开采和消耗量，见表 1.1。

表 1.1 2010 年底主要国家煤炭存储量及 2010 年开采和消耗量

排 序	国 家	探明储量 ^① (百万吨)	储采比 ^② /年	年开采量/ (百万吨标准煤)	年消耗量/ (百万吨标准煤)
1	美国	237295	241	803.1	762.9
2	俄罗斯	157010	495	216.4	136.4
3	中国	114500	35	2618.3	2491.9
4	澳大利亚	76400	180	342.3	63.1
5	印度	60600	106	314.3	403.7
6	乌克兰	33873	462	55.4	52.9
7	哈萨克斯坦	33600	303	81.7	52.5
8	哥伦比亚	6746	91	70.2	5.5
9	加拿大	6582	97	50.8	34.0
10	巴西	4559	超过 500	3.1	18.0

①煤的探明储量通常是指，通过地质与工程信息以合理的肯定性表明，在现有的经济与作业条件下，将来可从已知储层采出的煤炭储量；②储采比是指，假设将来的产量继续保持在某年度的水平，那么用该年年底的储量除以该年度的产量所得出的计算结果就是剩余储量的可开采年限。

由表 1.1 可见,中国是煤炭储量大国,虽然煤炭储量绝对数位列全球第三位,但每年开采量和消费量巨大,2010 年底中国煤炭资源的储采比只有 35 年,远远小于全球 118 年的平均水平。火力发电的节能,是缓解煤炭供需矛盾、减少煤炭资源的开采、节约煤炭资源的有效手段。

第三,火力发电厂节能有利于降低发电成本,提高企业经济效益。火电厂的燃煤成本占发电成本的 60% 左右。近几年来由于发电用煤供需矛盾加大,煤炭价格上涨超过 8%。而且,在煤价上涨的同时,运价的上涨速度超过煤价。火力发电厂只有在节能上狠下工夫,提高能源转化效率,才能降低发电成本,提高企业的经济效益。

另外,2007 年 12 月 19 日,国家发展和改革委员会、国家环境保护总局、国家电力监管委员会、国家能源领导小组办公室发出《节能发电调度试点工作方案》和《节能发电调度办法实施细则(试行)》(以下简称《细则》)。《细则》明确规定了燃煤火电机组按以下顺序确定发电序位。按照能耗水平由低到高排序,节能优先;能耗水平相同时,按照污染物排放水平由低到高确定发电排序。因此,火力发电厂的节能水平也是决定机组参与电量竞争的一个重要因素。

第四,火力发电厂节能有利于减少环境污染。火力发电厂通过燃烧的方式消耗大量的煤炭,煤炭在燃烧过程中产生了粉尘、烟气、硫化物、氮化物等污染物。2009 年中国电力企业二氧化硫排放量约 948 万吨,占全国二氧化硫排放量的 42.82%,虽然五大发电集团提前完成了在“十一五”全国燃煤电厂脱硫启动仪式上承诺的“到 2010 年电力行业二氧化硫排放总量将控制在 1000 万吨”的目标,但烟气中的重金属等污染物的控制也提到了议事日程。

随着中国电力工业的快速增长,电力发展与资源环境的矛盾也日趋尖锐,只有坚持节约发展、清洁发展、安全发展,才能实现电力工业的又好又快发展。同时,温室气体排放引起全球气候变暖备受国际社会广泛关注。进一步加强节能和减排工作,是应对全球气候变化的迫切需要,也是我们应该承担的责任。

在未来的几年中,中国政府确保实现到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年降低 40%~45% 的目标,火力发电行业的节能减排将面临更大的压力。

节能即意味着减少了能源的开发与消耗,从而减少了烟、尘、灰、硫及其他污染物的排放,实现对环境的保护。

1.1.2 火力发电厂运行经济性诊断的意义

火力发电厂运行经济性诊断技术,是一种了解和掌握火力发电厂运行过程中的热经济性状态,确定其整体或局部的热经济性是否正常,及早发现引起热经济性降低的原因和部位并预测其未来发展趋势的实用技术^[2]。该技术的实施,对提高火力发电厂的运行经济性、挖掘节能潜力,提高火力发电厂的经济效益,具有重要

的意义。

1. 有利于火力发电厂运行经济性失常的早期发现并及时处理

随着中国节能减排的进一步深化,对火力发电厂的运行经济性提出了更高的要求。如何保证火力发电机组的经济运行,对中国节能减排具有十分重要的意义。

要实现发电厂的经济运行,必须首先明确火电机组当前的经济性状态是否正常。但长期以来,在评估火电机组的运行经济性时,习惯于与发达国家的平均水平相比^[3,4]。随着中国电力工业的高度发展,这种方法已经难以适应需要^[5]。一是发达国家之间本身就存在差异。即使在同一个发达国家内,不同企业、不同时期的机组节能降耗水平也很难比较。二是中国的发展并非一定要走发达国家的老路。同时,中国由于火电机组运行经济指标的计算方法与国外也存在一定的差别,导致中国和发达国家之间经济指标的不可比性^[6]。

在经济性状态监测方面,以往采用数目庞大的二次仪表和记录设备等对机组运行参数进行显示和记录、凭经验对机组的运行经济性进行判断的传统方式已经不能适应对机组经济运行的要求。传感器技术、信号处理技术以及计算机技术的发展为机组经济性分析的实现奠定了雄厚的基础。借助于计算机技术,可以对机组当前运行状态下的经济性应达值进行计算,并与实际检测得到的运行经济性进行对比,实现对机组运行经济性失常的早期发现并预测其未来的发展趋势。通过对比经济性失常所损失的经济效益与提高经济性所需要的投资及所产生的经济效益,确定是否对机组运行经济性失常进行处理。另外,借助于运行经济性诊断技术,还有利于及时调整运行方式,提高机组的经济性。

2. 有利于诊断火力发电厂运行经济性能降低的原因和部位

当机组运行经济性失常时,必须首先明确引起火电机组运行经济性失常的原因和部位,也就是明确火电机组的节能潜力。

鲁迅先生在《集外集拾遗·中山先生逝世后一周年》中指出:“不能诊断,如何用药?”火力发电厂是一个由主要设备和众多的辅助设备及各子系统组成的生产电能的工厂。这个庞大的工厂中包含了大量独立和相互依存的参数。运行中,任何一个设备或子系统的热经济性失常,都将导致火力发电厂的运行经济性失常。因此,如何找出引起火力发电厂热经济性失常的原因及部位,以便“对症下药”,为挖掘火力发电厂的节能潜力提供依据,是运行人员所关心的问题,此也正是火力发电厂运行经济性诊断主要应该解决的问题。

目前,大部分火力发电厂的运行经济性诊断还停留在定性诊断的水平上。这种方法对于简易的运行经济性诊断是适用的。为此,中国于2006年制定了千家企业节能行动方案,对年消耗1万吨标准煤以上的企业实施能源审计。但能源审计

只是一种企业总体的经济性诊断方法,只能粗略确定火力发电厂节能的薄弱环节,而不能对锅炉、汽轮机等设备的运行经济性进行诊断^[7~9]。随着中国节能减排的深入,大部分火力发电厂的节能潜力已经进行了较深入的挖掘,导致火力发电厂的节能潜力越来越小。传统的定性诊断及简易诊断方法远远不能满足对火力发电厂节能减排的要求。

火力发电厂节能减排今后的发展方向应该是采用精确定量经济性诊断技术,分析引起设备经济性降低的原因和部位,以便为挖掘节能潜力提供定量的、准确的依据。

3. 为火力发电厂的状态维修奠定基础

安全、经济运行是火力发电厂的主要目标,对火电机组进行定期预防性维修是保持其健康水平的一项有效措施,在一定程度上可以提高机组的可用率。然而,何时应该对机组进行维修亦即维修的周期是多少,机组的制造厂家并未给出实际上也无法给出一个明确的规定。往往靠运行部门根据机组长期运行的经验,总结出机组的维修周期。长期以来,火电机组运行部门一直采用定期对机组进行预防性维修的维修方式。然而,无论是从保持机组的可靠性和经济性,还是从减少维修工作量、节约维修费用、缩短维修时间上考虑,基于时间的定期预防维修方式都有其本质上的缺点^[2,10]。

火电机组的状态维修是一种结合机组状态监测与诊断和预测技术于一体的维修方式,这种维修方式不规定具体的维修周期,而是根据机组的安全和经济性状态确定机组是否应该进行维修,从而避免了传统的基于时间的定期维修方式所带来的维修过剩或维修不足的问题,是维修方式的未来发展趋势^[2]。

采用火力发电厂运行经济性诊断技术,有利于维修过程中挖掘节能潜力更有针对性,从而缩短停机时间,提高机组的可用率。

由上述分析可以看出,针对火力发电厂运行的实际经济性状态,并考虑到先进国家发电经济指标与中国发电经济指标之间的不可比性,在目前的条件下,落实到具体的火力发电厂,节能工作应该分两步进行。首先,深入挖掘机组的节能潜力,保证机组各个部件及系统达到设计状态,也就是经济指标达到或接近其应达值。此工作无需对设备或系统进行改造,只需注意对机组运行经济状态的监测,注意运行参数或运行方式的调整,即可以实现。然后,在机组经济指标已经达到应达值的基础上,再进一步采用先进技术、先进设备或先进的运行方式,力争使机组的运行经济性高于其应达值。此过程需要对机组设备、系统进行改造,或需要对运行方式进行改进。

火力发电厂的节能减排对中国的节能减排目标的实现产生很大的影响,火力发电厂的节能减排任务仍十分艰巨。火力发电厂运行过程中应树立节能意识,为

实现中国节能减排目标作出自己的最大贡献。

1.2 汽轮机目前运行经济状况及节能潜力分析

1.2.1 影响汽轮机热经济性的因素分析

衡量汽轮机整体运行经济情况好坏的指标是热耗率。所谓热耗率偏高,是指汽轮机实际运行的热耗率值高于其相应的应达值。造成汽轮机热耗率高于其相应应达值的原因主要是汽轮机初、终参数和再热蒸汽参数偏离其应达值,汽轮机通流部分状态如间隙、叶片表面光洁度等偏离其设计状态以及汽轮机回热系统状态偏离应达值引起的^[1]。当这些参数偏离设计值或应达值时,理想循环热效率和汽轮机相对内效率偏离应达值,从而影响到汽轮机的热耗率^[12]。

下面分析汽轮机目前的运行经济状态及其节能潜力。

1. 汽轮机初参数及再热蒸汽参数

在设计工况下,汽轮机在某一设计的初参数及再热蒸汽参数下运行。为了保持汽轮机热耗率达到设计值,汽轮机初参数及再热蒸汽参数应该保持在设计值。运行中,当这些参数降低时,汽轮机偏离其设计工况,必然导致汽轮机热耗率增大。

1) 主蒸汽温度

从热力学的角度看,提高初参数,有利于提高系统的理想循环热效率。运行中,主蒸汽温度降低时,必然导致蒸汽动力循环吸热过程的平均吸热温度降低,引起理想循环热效率降低。同时,当主蒸汽温度在正常范围内降低时,对中间再热汽轮机相对内效率的影响较小。

因此,主蒸汽温度降低对汽轮机热耗率的影响,主要是通过引起理想循环热效率降低体现出来的。对于 300MW 汽轮机,其主蒸汽温度降低 1℃,汽轮机热耗率约增大 0.024%,发电标准煤耗率增大 0.07g/(kW·h),按每年满负荷运行 6000h 计算,全年多消耗标准煤 127.1t。

2) 主蒸汽压力

运行中,主蒸汽压力降低时,也会导致蒸汽动力循环吸热过程的平均吸热温度降低,引起理想循环热效率降低。

同时,当主蒸汽压力在正常范围内降低时,若保持调节汽门开度不变,除了少数低压级之外,大多数级内蒸汽的理想焓降基本不变,故汽轮机相对内效率变化较小。若保持汽轮机电功率不变,则主蒸汽压力降低,汽轮机调节汽门开度增大,节流损失减少,汽轮机相对内效率略有增大。

因此,主蒸汽压力降低对汽轮机热耗率的影响,也主要是通过引起理想循环热效率降低体现出来的。对于 300MW 汽轮机,其主蒸汽压力降低 0.1MPa,汽轮机热耗率约增大 0.045%,发电标准煤耗率增大 0.13g/(kW·h),按每年满负荷运行 6000h 计算,全年多消耗标准煤 238.3t。

3) 再热蒸汽温度

汽轮机运行过程中,再热蒸汽温度的降低也导致蒸汽动力循环吸热过程的平均吸热温度降低,引起理想循环热效率降低。同时,当再热蒸汽温度降低时,汽轮机排汽湿度增大,汽轮机中低压缸的相对内效率降低。

因此,再热蒸汽温度降低对汽轮机热耗率的影响,是通过引起理想循环热效率和汽轮机相对内效率降低综合体现出来的。对于 300MW 汽轮机,其再热蒸汽温度降低 1℃,汽轮机热耗率约增大 0.022%,发电标准煤耗率增大 0.065g/(kW·h),按每年满负荷运行 6000h 计算,全年多消耗标准煤 116.5t。

4) 再热蒸汽压损

汽轮机运行过程中,当蒸汽在再热器内的流动阻力增大时,在高压缸排汽压力一定的条件下,会引起再热蒸汽压力降低,也导致蒸汽动力循环吸热过程的平均吸热温度降低,引起理想循环热效率降低。同时,再热蒸汽压力降低导致汽轮机排汽湿度减小,汽轮机相对内效率略有提高。

因此,再热蒸汽压损增大对汽轮机热耗率的影响,也主要是通过引起理想循环热效率体现出来的。对于 300MW 汽轮机,其再热蒸汽压损每增大 0.1%,汽轮机热耗率约增大 0.009%,发电标准煤耗率增大 0.026g/(kW·h),按每年满负荷运行 6000h 计算,全年多消耗标准煤 47.7t。

2. 汽轮机排汽压力

汽轮机排汽压力由汽轮机排汽量、凝汽器冷却水流量、冷却水温度以及凝汽器和抽气设备的运行状态共同决定。在设计工况下,汽轮机均在某一设计的排汽压力下运行。为了保持汽轮机热耗率达到设计值,汽轮机排汽压力应该保持在设计值。运行中,当汽轮机排汽压力升高时,汽轮机运行偏离其设计工况,必然导致汽轮机热耗率增大。

当汽轮机排汽压力升高时,蒸汽动力循环放热过程的平均温度升高,理想循环热效率降低。

同时,随着汽轮机排汽压力的升高,汽轮机排汽湿度减小,湿汽损失减少。而且,随着汽轮机排汽压力的升高,汽轮机排汽容积流量减少,排汽余速损失也会减少,使汽轮机相对内效率提高。

因此,汽轮机排汽压力升高对热耗率的影响,是通过使理想循环热效率降低和汽轮机相对内效率提高这二者综合作用体现出来的。一般地,当汽轮机排汽

压力由设计值升高时,理想循环热效率的相对降低值总是大于相对内效率的相对提高值,因此导致汽轮机热耗率增大。对于 300MW 汽轮机,在其排汽流量为设计值的条件下,排汽压力升高 0.1kPa,汽轮机热耗率约升高 1.7%,发电标准煤耗率增大 5.0g/(kW·h),按每年满负荷运行 6000h 计算,全年多消耗标准煤 9002.7t。

影响汽轮机排汽压力的因素,可分为正常因素和非正常因素两类。正常因素是指由于汽轮机排汽量、冷却水泵运行数量或转速以及冷却水温度变化引起的汽轮机排汽压力的变化。非正常因素是指由于凝汽器运行状态失常而引起的汽轮机排汽压力变化。下面主要讨论非正常因素变化对汽轮机排汽压力的影响。

1) 抽真空系统

抽真空系统通过抽出漏入汽轮机真空系统的空气和其他非凝结气体,来建立和维持凝汽器的真空。空气和其他非凝结气体使凝汽器传热系数降低,引起凝汽器真空降低。良好的抽气设备,有利于及时抽出漏入真空系统的空气和其他非凝结气体,防止因凝汽器端差增大而引起汽轮机排汽压力升高。

2) 凝汽器冷却管水侧脏污

当凝汽器水侧脏污时,凝汽器传热系数降低,端差增大,凝汽器真空降低,汽轮机排汽压力升高。保持凝汽器水侧处于清洁状态,是降低汽轮机排汽压力的有效措施。运行中,首先应该保证凝汽器冷却水的清洁程度,冷却水中不应含有杂质和绿苔以及浮游生物。对于采用闭式循环的冷却水系统,应严格控制循环冷却水的浓缩倍率和极限碳酸盐的硬度,做好循环冷却水的排污工作。其次,应保持凝汽器胶球清洗系统处于正常工作状态,胶球质量合格,也可以对凝汽器冷却管进行高压水冲洗或酸洗。

3) 真空系统的严密性

汽轮机运行过程中,凝汽器及汽轮机的低压级处于真空状态。如果其严密性失常,空气将会漏入凝汽器,引起凝汽器传热系数降低,端差增大,汽轮机排汽压力升高。因此,在凝汽器运行过程中,应该注意保持真空系统的严密性及轴封供汽压力的调整,防止因空气和其他非凝结气体漏入而引起汽轮机排汽压力升高。

3. 汽轮机通流部分

1) 汽轮机通流部分结垢

随着火电机组单机功率的逐渐提高,火电机组中超临界参数机组的比例也在逐渐增大。机组初参数提高,对提高火力发电厂的循环热效率具有重要的作用。但同时也发现,随着火电机组向高参数大容量方向的发展,尤其是大容量直流锅炉以及超(超)临界机组的投入运行,对锅炉给水品质提出了更高的要求。由于直流锅炉没有汽包,不能够采用常规的汽水分离、蒸汽清洗等锅内净化措施来控制蒸汽