

火力发电厂

生产指标管理手册

李青 张兴营 徐光照 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



ISBN 978-7-5083-5005-9



9 787508 350059 >

定价：39.00 元

销售分类建议：电力工程/综合

火力发电厂 生产指标管理手册

李 青 张兴营 徐光照 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书共七章三十七节,将生产指标划分为:汽轮机指标、化学环保指标、锅炉指标、燃料指标、单耗指标、联合循环指标、发电厂综合性指标、热电厂综合性指标、固定资产指标、热工指标、电气指标、计量指标、水务指标、财务指标、安全指标、可靠性指标、科技进步指标等。介绍了耗差分析法、等效焓降法在热力系统分析中的应用;介绍了月度节能分析方法、月度运行分析方法;介绍了火力发电厂节能评价体系等。

本书指标齐全,概念清楚,有问题,有措施。而且结合电厂实际,系统介绍了能耗指标分析方法,是火力发电厂运行人员、检修人员、生产管理人员、生产统计人员必备参考书。

图书在版编目(CIP)数据

火力发电厂生产指标管理手册/李青,张兴营,徐光照编著. —北京:中国电力出版社,2007

ISBN 978-7-5083-5005-9

I. 火... II. ①李...②张...③徐... III. 火电厂-生产指标-生产管理-手册 IV. F407.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 150341 号

中国电力出版社出版、发行

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

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2007 年 3 月第一版 2007 年 3 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 21.25 印张 521 千字

印数 0001—3000 册 定价 39.00 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)

序

《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十一个五年规划的建议》明确提出“要把节约资源作为基本国策，发展循环经济，保护生态环境，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。”并提出我国的主要目标是：“在优化结构、提高效益和降低消耗的基础上，实现2010年人均国内生产总值比2000年翻一番；资源利用效率显著提高，单位国内生产总值能源消耗比‘十五’期末降低20%左右。”

为贯彻党中央提出的节能目标，各发电公司都面临着实施管理革命、减低成本、提高经济效益的问题，而节能降耗则是提高经济效益的必经之路，生产指标管理是节能降耗的基础，各项生产经营指标的统计、计算、控制越来越发挥着重要的作用。

本书的三位作者，紧密结合电厂实际，从长期的工作实践中发现和提出问题，总结升华，编著了这本具有实用价值的生产指标管理手册，值得鼓励。

当前，国内论述火力发电厂生产指标的科学定义和计算方法、系统地提出火力发电厂生产指标的有效控制措施和方法的书籍尚不多见。在创建节约环保型企业的新形势下，经营管理指标、技术经济指标、生产设备管理指标已发生了部分改变，这就需要企业领导者、各级管理人员、计划统计人员乃至生产岗位上的每个职工都要不断学习、掌握各种指标的统计计算方法，熟悉和运用各种指标控制方法。《火力发电厂生产指标管理手册》的出版面世，将有力地推动火力发电厂的节能降耗工作。

李平

2006年10月

前言

在我国电源结构中,火力发电设备容量约占总装机容量的74%,火力发电机组年发电量占总发电量的82%以上,火力发电在相当长的时期内仍将在中国电源结构中占主导地位。电煤占我国煤炭生产量的比重超过了50%,燃煤电厂年排放二氧化硫达1200万t左右,给我国环境容量造成了很大的压力。另一方面,我国电力工业正处于高速发展时期,火电机组结构不断优化,大容量机组所占比例不断提高,火电机组设计和运行技术不断进步和完善,机组的运行水平不断提高,供电煤耗已由2000年的392g/(kW·h)降低到2004年的379g/(kW·h),但火电机组平均效率仍比国际先进水平低6%~7%,供电煤耗平均比国外高约50g/(kW·h),节能潜力仍然很大。

火力发电厂生产管理的一项重要工作是控制各热力设备、系统的主要生产指标(或参数)。控制好这些指标,机组就能安全经济运行。

本书通过对火力发电厂生产指标的分析,提出了改进机组性能的措施,期望在建设节约型、环保型社会的新形势下,促进火力发电厂节能技术监督和其他专业的技术监督工作,不断提高机组的运行水平,进一步降低火力发电厂的供电煤耗。

本书对各项生产指标进行了分类,对每个指标的概念和含义进行了介绍,对指标的计算公式和计算方法进行了讲解,对影响各项指标的因素进行了分析,重要的是对控制生产指标的措施做了一一详尽的论述。

本书第一章、第五章由李青同志编写,第六章、第七章由张兴营同志编写,第二章、第三章和第四章由徐光照同志编写,最后由张兴营同志统稿。

在编写过程中,得到了西安热工院薛彦廷高工、南通电厂方超高工和福州电厂陈信疆高工的大力支持,在此谨致谢意。

由于水平所限,书中错误在所难免,敬请读者批评指正。

编者

2006年9月8日于华能国际电力股份有限公司

目 录

序

前言

第一章 经济指标管理与控制	1
第一节 经济指标分类	1
第二节 汽轮机指标	5
第三节 化学环保指标	28
第四节 锅炉指标	53
第五节 燃料指标	80
第六节 单耗指标	102
第七节 联合循环指标	112
第八节 发电厂综合性指标	116
第九节 热电厂综合性指标	135
第十节 试验指标	141
第二章 设备指标管理与控制	148
第一节 固定资产指标	148
第二节 热工指标	162
第三节 电气指标	168
第四节 计量指标	180
第三章 水务指标管理与控制	189
第一节 废水和重复利用指标	189
第二节 取水量指标	193
第四章 安全可靠性指标管理与控制	200
第一节 可靠性指标	200
第二节 安全性指标	213
第五章 科技进步指标	227
第一节 增长速度方程	227
第二节 科技进步贡献率	230
第三节 利润与成本	232
第四节 经济量	237
第五节 科技投入率和科技投入产出比	241

第六节 技术改造的投资回收期	244
第六章 指标分析方法	247
第一节 耗差分析原理	247
第二节 125MW 机组耗差分析方法举例	250
第三节 300MW 机组耗差分析方法举例	256
第四节 凝汽机组等效焓降法应用举例	259
第五节 供热机组等效焓降法应用举例	271
第六节 各项小指标对能耗的影响值	276
第七节 燃煤发热量变化对机组经济性的影响	283
第八节 燃煤水分变化对机组经济性的影响	287
第九节 机组效率变化与热耗的关系	288
第十节 月度节能分析方法	290
第十一节 月度运行分析方法	295
第七章 火力发电厂节能评价体系	301
第一节 火力发电厂节能工作评价体系	301
第二节 火力发电厂节能工作评价报告	316
附录 全国火电大机组 (300MW 级) 竞赛评分办法 (2005 年 12 月)	322
参考文献	332

第一章

经济指标管理与控制

第一节 经济指标分类

火力发电厂生产指标很多,例如热工指标、电气指标、环保指标、安全指标、科技指标、可靠性指标等。生产指标还可以分为经济指标和技术指标,而经济指标又可分为大指标和小指标。小指标是根据影响大指标的因素或参数,结合生产过程各环节的特点,按照工种、设备和岗位对大指标进行分解得到的,因此叫做小指标。

1. 大指标

火力发电厂的主要经济技术指标为:发电量、供电量和供热量、供电成本、供热成本、供电标准煤耗、供热标准煤耗、厂用电率、等效可用系数、主要设备的最大出力 and 最小出力、单位发电量取水量。这些指标叫大指标或主要指标。除此之外,各厂还应根据具体情况,制订、统计、分析和考核各项小指标。

2. 小指标

小指标包括锅炉专业小指标、汽轮机专业小指标、燃料专业小指标、化学专业小指标等。

除按上述传统方法分类外,火力发电厂经济指标还可以分为以下四级指标,见表 1-1:

表 1-1 火电厂技术经济指标体系表

一级指标	供 电 煤 耗						
二级指标	燃料指标		供电量		发电煤耗/电厂效率		
三级指标	入厂、入炉煤质	入厂、入炉煤量	发电量	厂用电率/单耗	锅炉效率	汽机热效率/热耗	管道效率
四级指标	检质率	检斤率	负荷率	给水泵耗电率	蒸发量	主蒸汽参数	管道散热
	低位热值	燃料收入量	运行小时	循环水泵耗电率	过热蒸汽参数	再热汽参数	锅炉排污率
	水分	入炉煤量	利用小时	凝结水泵耗电率	再热汽参数	高压缸效率	汽水损失率
	灰分	盘点盈亏量	等效可用系数	送风机耗电率	送风温度	中压缸效率	补水率

续表

四级指标	挥发分	存损率	强迫停运率	引风机耗电率	排烟温度	低压缸效率	供热回水率
	热值差	运损率	非计划停运次数	一次风机耗电率	排烟氧量	主蒸汽流量	
	水分差	亏吨率	非计划停运小时	排粉机耗电率	飞灰可燃物	轴封汽量	
	配煤合格率	亏吨索赔率		磨煤机耗电率	炉渣可燃物	给水流量	
	入炉煤合格率	燃料耗用量		脱硫耗电率	预热器漏风	凝结水流量	
	煤炭质级不符率	燃料库存量		给煤机耗电率	尾部烟道漏风率	汽耗率	
	亏卡索赔率	实际燃料消耗量		上煤耗电率	制粉系统漏风	加热器端差	
		助燃油用量		除灰/尘耗电率	散热损失	给水温度	
		点火用油量		空冷耗电率	入炉煤质	高压加热器投入率	
		煤炭到货率		非生产用电率	煤粉细度	排汽温度	
					燃油量	凝汽器端差	
					煤粉细度合格率	凝汽器真空度	
					点火用油量	真空严密性	
					助燃油用量	凝汽器清洁度	
					吹灰器投入率	凝结水过冷度	
					除灰灰水比	循环水进口温度	
					电除尘器投入率	循环水温升	
					除尘器漏风系数	胶球装置投入率	
					最低稳燃负荷	胶球装置收球率	
					大修后锅炉效率恢复值	冷却塔温降	
						传热系数	
						大修后汽机效率恢复值	

(1) 第一级指标：供电煤耗率。根据原电力工业部《火力发电厂按入炉煤量正平衡计算发电煤耗的方法（试行）》规定，火力发电厂煤耗计算以正平衡为主，反平衡计算校核。正平衡计算煤耗，就是直接计算或测量燃料消耗量求出煤耗，通常作为考核机组运行性能的最主要指标。而通过反平衡计算结果，可以分析机组运行中的缺陷和不足，为改善机组的性能提供决策依据，反平衡计算结果还可以校核正平衡计算结果的正确与否。

(2) 第二级：燃料指标、供电量、发电煤耗或电厂效率。

(3) 第三级：发电量、厂用电率、锅炉效率、汽机效率、管道效率。

(4) 第四级：包括燃料质量和数量指标、厂用电率、锅炉效率、汽机效率和管道效率的各项小指标，具体如下：

a) 燃料质量、数量指标：检质率、低位热值、水分、灰分、挥发分、热值差、配煤合格率、检斤率、入厂煤量、入炉煤量、盘盈亏量、场损率等。

b) 厂用电率：送风机耗电率、吸风机耗电率、一次风机耗电率、排粉机耗电率、磨煤耗电率、给水泵耗电率、循环水泵用电率、凝结水泵耗电率、脱硫耗电率、空冷耗电率等。

c) 锅炉效率：排烟温度、排烟氧量、进风温度、预热器漏风、制粉系统漏风、飞灰可燃物、炉渣可燃物、吹灰器投入率、入炉煤质、煤粉细度、燃油量、散热损失等。

d) 汽轮机效率：汽机主蒸汽、再热蒸汽参数，高、中、低压缸效率，排汽温度，凝汽器真空度，真空严密性，凝汽器端差，循环水入口温度，循环水温升，给水温度（有时给水温度也归属于锅炉指标），加热器端差，高压加热器投入率等。

e) 管道效率：高温管道散热，锅炉排污率，汽水损失率，主蒸汽、再热蒸汽旁路系统的严密性等。

提高经济技术指标的主要措施包括：

(1) 将全厂全年的供煤耗率指标分解落实到各项小指标，逐级分解到班组，并从时间上分解到季度、月度计划指标，确保各部门、班组完成全年全厂供电煤耗率、综合厂用电率等指标。

(2) 尽可能保持每一个可控的运行参数处于其设计值或目标值，使机组在最佳状态运行。每月分析哪些参数的偏差与运行方式有关，确定改进运行方式的建议。只有通过连续的实际运行值和目标值的比较，才能找出问题所在，从而判定节能措施。

(3) 燃料特性对锅炉范围内的设备运行有重要影响。由于发电用煤供应紧张，入厂煤质变化较大，需要加强配煤和掺烧工作，加强对所燃用煤种煤质特性的分析研究，及时为运行人员提供煤质数据，以便更好地保证机组的安全稳定运行。

(4) 加强燃料计量管理，认真做好入厂煤管理，做到车车计量、检斤，车车取样检质。对入厂煤量和入炉煤量进行对比分析，确保燃料计量准确，保证正平衡计算发、供电煤耗的准确性。

(5) 重视热力性能试验。热力性能试验是了解设备经济性能、对设备进行评价和考核、提出改进措施的基础工作。电厂应特别重视热力试验工作，要立足自身条件进行一般性试验，更好地为生产运行服务。热力试验必须严格执行有关标准和规程对试验方法、试验数据处理方法、测点数量、仪表精度、试验持续时间、试验次数等的规定，确保试验结果的精度。对试验数据及结果，要在认真分析的基础上，对设备的性能进行评价，必要时提出改进措施建议，并形成报告。

(6) 利用大小修、调停、临修等机会,认真清理检查各类换热设备,提高其热交换效率,如锅炉受热面清理、预热器清理、凝汽器清理、冷油器清理、板式换热器清理等。

(7) 对于主要运行监视参数(如主蒸汽温度、再热蒸汽温度、减温水量、受热面管壁温度等)异常(高或低)的锅炉,应结合常用煤种的煤质特性,对照锅炉设计加以校核以发现存在的设计或运行问题,通过全面的燃烧调整试验,必要时采取相应的技术改造措施加以解决。当锅炉燃煤或燃烧相关设备发生较大变化后,应及时进行锅炉燃烧和制粉系统优化调整试验,以确定最佳煤粉细度、一次风粉分配特性、风量配比、磨煤机投运方式等,提出针对不同煤质、不同负荷的优化运行方案。

(8) 电厂应根据情况进行煤耗的微增调度曲线试验,为进行主机、辅机的经济调度提供依据。

(9) 采用先进理念、先进工艺、先进方法、先进设备进行系统优化和设备技术改造,是提高机组设备经济性的重要途径。应定期分析评价全厂生产系统、设备的运行状况,要根据设备状况、现场条件、改造费用、预期效果、投入产出比等进行经济技术可行性研究,确定改造的先后顺序,编制中长期节能技术改造项目规划和年度节能项目计划,按年度计划落实节能技术改造项目的实施,以保证节能总目标的实现。

(10) 每一台设备或系统都有一组能反映该设备性能的参数,通过对这些参数的监视,则可以及时发现设备异常,从而避免对机组运行性能影响。表 1-2 中列出了典型的改进机组运行性能的预防性检修项目,可根据设备的实际情况确定各项目的间隔。

表 1-2 典型设备的改进机组运行性能的预防性检修项目

系统或部件	影响的参数	检查维修内容	建议间隔
磨煤机	排烟氧量; 未燃尽碳; 石子煤	核对磨出口温度、压力; 核对一次风量; 核对煤的水分; 核对煤粉细度; 检查部件的磨损; 石子煤	经常 根据需要 根据需要 经常 不定期 经常
燃烧设备	排烟氧量; 机组最大出力	检查火焰燃烧外观; 检查烟囱排烟外观; 核对部件外观; 核对挡板位置; 核对炉膛和风量压差; 检查喷口燃料分配状况; 检查喷口结焦状况	经常 经常 不定期 经常 经常 经常 不定期
系统或部件	影响的参数	检查维修内容	建议间隔
受热面(烟侧)	排烟温度 主蒸汽温度 再热汽温度 机组最大出力	炉膛负压; 省煤器进出口烟气差压; 受热面灰灰; 受热面积灰、清洁状况检查; 烟气挡板状况检查; 吹灰器状况检查	经常 经常 经常 根据需要 根据需要 根据需要

续表

系统或部件	影响的参数	检查维修内容	建议间隔
受热面（水侧）	主蒸汽温度 再热汽温度 排烟温度 机组最大出力	检查炉管内部的清洁状况； 检查汽包内部装置状况； 检查炉水处理过程； 炉管清洗	根据需要 根据需要 根据需要 根据需要
炉墙和保温	排烟氧量	检查炉墙有无漏风； 检查保温层又无损坏	不定期 不定期
系统或部件	影响的参数	检查维修内容	建议间隔
风机	排烟氧量； 机组最大出力	检查送风机出口压力； 检查送风机进口滤网堵塞； 检查风机挡板位置； 检查风机机电电流； 检查引风机叶片清洁程度	经常 不定期 不定期 不定期 不定期
预热器	排烟氧量； 排烟温度	预热器进出口烟气差压； 预热器出口热风温度； 预热器进口烟气温度； 换热元件的清洁程度； 预热器漏风	经常 经常 经常 根据需要 每季度
系统或部件	影响的参数	检查维修内容	建议间隔
凝汽器	凝汽器真空	核对循环水温升； 核对凝汽器端差； 核对排汽与凝结水温度； 核对循环水进出口压差； 核对真空严密性； 计算凝汽器清洁度系数； 清洗凝汽器管	经常 经常 经常 经常 每月 每季度 根据需要
给水系统	给水温度； 加热器端差	核对给水进口温度； 核对加热器端差； 调整给水加热器水位； 清洗加热器管； 检查放气口	经常 经常 根据需要 根据需要 根据需要

第二节 汽轮机指标

汽轮机是指将蒸汽所携带的热能转变为机械能驱动发电机组的原动机。汽轮机设备包括汽轮机本体（如汽缸、隔板、喷嘴、汽封、轴承、转子、动叶片等）、调速系统、油系统（如主油泵、高压油泵、交流油泵、直流事故油泵、冷油器和油箱等）及其附属设备（如给水泵、凝汽器、抽汽器、凝结水泵、低压加热器、除氧器、高压加热器等）等。

具有一定压力、温度的蒸汽，进入汽轮机，流过固定不动的喷嘴并在喷嘴内膨胀，蒸汽的压力和温度不断地降低，获得很高的速度，使蒸汽的热能转化为动能。高速流动的蒸汽流给动叶一定的作用力，动叶带动汽轮机转子，按一定的速度均匀转动。

在汽轮机内做完功的蒸汽被排至低压缸后的凝汽器。在凝汽器内蒸汽将热量进一步传给循环水,最终成为凝结水,凝结水再通过高、低压加热器等设备进入锅炉。

一、热耗与效率指标

在火力发电厂中,热能转化为电能的过程中存在各种损失,通常使用各种效率来衡量整个能量转换过程中不同阶段的能量利用程度。一个装置的效率是输出能量(或功率)与输入能量(或功率)之比。若将汽轮机装置放在热力循环中考虑,这时的输入能量为每千克蒸汽在锅炉中的吸热量,再分别考虑汽轮发电机组的不同损失后提出的不同能量作为输出能量,这样得到的一组效率叫做绝对效率;若单独考虑汽轮发电机组,以汽轮机的理想焓降作为输入能量所得到的的一组效率叫做相对效率。

1. 热耗量

汽轮发电机组每小时所消耗的热量叫做热耗量 Q_0 , 机组热耗量等于锅炉总有效利用热量与管道效率的乘积。

$$Q_0 = Q_b \eta_{bd}$$

式中 Q_0 ——汽轮发电机组热耗量, kJ/h;

Q_b ——锅炉总有效利用热量, kJ/h;

η_{bd} ——管道效率, 一般为 99%~99.5%。

对于再热机组热耗量的计算公式为

$$Q_0 = G_{ms} h_{ms} - G_{fw} h_{fw} + G_{rh} h_{thr} - G_{chl} h_{chl} - G_{rs} h_{rs} - G_{ss} h_{ss} \\ G_{ms} = G_{fw} + G_{ss} - G_{bl} - G_{ml} - G_{sl}$$

式中 G_{ms} 、 G_{fw} ——分别为主蒸汽流量和最终给水流量, kg/h;

G_{rh} 、 G_{chl} ——分别为再热蒸汽流量和冷再热蒸汽流量, kg/h;

G_{rs} 、 G_{ss} ——分别为再热器减温水流量和过热器减温水流量, kg/h;

G_{bl} ——炉侧不明泄漏量(例如经过不严的阀门漏至热力系统外), kg/h;

G_{ml} ——炉侧明泄漏量(例如排污等), kg/h;

G_{sl} ——汽包水位的变化当量, kg/h;

h_{thr} 、 h_{chl} ——分别为再热器出口和入口蒸汽的焓, kJ/kg;

h_{ms} 、 h_{fw} ——分别为蒸汽的焓和锅炉给水焓, kJ/kg;

h_{rs} 、 h_{ss} ——分别为再热器减温水焓和过热器减温水焓, kJ/kg。

对于非再热机组热耗量的计算公式为

$$Q_0 = G_{ms} h_{ms} - G_{fw} h_{fw} - G_{ss} h_{ss}$$

2. 汽耗率

汽轮发电机组每生产 $1\text{kW} \cdot \text{h}$ 电能所消耗的主蒸汽流量称为汽耗率 d , 单位为 $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。汽轮机组汽耗率是一个比较容易观察的指标, 直接影响汽轮机效率。在同样条件下, 汽耗率增大, 汽轮机效率降低。

$$\text{汽耗率 } d = \frac{\text{计算期内主蒸汽流量累计值 (kg)}}{\text{计算期内发电量 (kW} \cdot \text{h)}} = \frac{G_{ms}}{P_2}$$

式中 G_{ms} ——汽耗量, 指每小时汽轮机消耗的主蒸汽量, kg/h;

P_2 ——计算期内发电功率, kW。

由上式可知, 如果汽轮发电机组的各种效率很高, 汽耗率就较低, 反之汽耗率就较高。

一般情况下汽耗率在 $2.8 \sim 5 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 范围内。汽耗率每增高 $0.01 \text{ kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 发电煤耗率就增加 $0.90 \sim 1.2 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

对于初终参数不同的汽轮机, 即使功率相同, 它们消耗的蒸汽量也不同, 汽耗率不同, 因此不便于用汽耗率进行经济性比较, 对于供热机组更是如此。所以汽耗率不适应于比较不同类型机组的经济性, 而只能用来比较同参数同类型的机组。对于不同参数的汽轮机组, 可用热耗率评价其经济性。

对于国产机组, 额定条件下的汽耗率应不超过设计值的 3% 。

3. 汽轮机组热耗率

汽轮机组热耗率是指汽轮发电机组每产生 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电能所消耗的热量, 称为汽轮发电机组的热耗率 q , 简称热耗, 单位为 $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。计算公式为

$$\text{汽轮机组热耗率 } q[\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})] = \frac{\text{计算期内热耗量}(\text{kJ})}{\text{计算期内发电量}(\text{kW} \cdot \text{h})} = \frac{Q_0 h}{W_i} = \frac{Q_0}{P_2}$$

式中 h ——发电机运行时间, h ;

W_i ——计算期内发电量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 。

(1) 毛热耗率的计算。当采用电动给水泵供水时, 中间再热凝汽式机组的毛热耗率 q 为

$$q = \frac{G_{fw}(h_{ms} - h_{fw}) + G_{rhl}(h_{thr} - h_{rhl}) + G_{rs}(h_{thr} - h_{rs}) + G_{ss}(h_{ms} - h_{ss})}{P_2}$$

$$= d[(h_{ms} - h_{fw}) + \frac{G_{rh}}{G_{ms}}(h_{thr} - h_{rhl})]$$

对于无再热机组毛热耗率 q 为

$$q = \frac{G_{ms}h_{ms} - G_{fw}h_{fw}}{P_2} = d(h_{ms} - h_{fw})$$

式中 h_{thr} 、 h_{rhl} ——分别为再热器出口和入口蒸汽的焓, kJ/kg ;

h_{ms} 、 h_{fw} ——分别为新蒸汽的焓和锅炉给水焓, kJ/kg ;

G_{ms} 、 G_{rh} ——主蒸汽流量和再热蒸汽流量, kg/h ;

d ——汽耗率, $\text{kg}/(\text{kW} \cdot \text{h})$;

q ——热耗率, $\text{kJ}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

当采用汽轮机驱动给水泵供水时, 进行机组毛热耗率计算还需考虑汽动给水泵的轴功率, 上式应写成

$$q = \frac{G_{fw}(h_{ms} - h_{fw}) + G_{rhl}(h_{thr} - h_{rhl}) + G_{rs}(h_{thr} - h_{rs}) + G_{ss}(h_{ms} - h_{ss})}{P_2 + P_b}$$

或

$$q = \frac{G_{ms}h_{ms} - G_{fw}h_{fw}}{P_2 + P_b}$$

式中 P_b ——汽动给水泵轴功率。

(2) 净热耗率的计算。在相同功率下的毛热耗率不能说明由于泵功率的变化所引起性能值的差异。由于蒸汽流量的差异将影响泵的功率, 因此汽轮机的性能值最好采用净热耗率来表示, 对于电动给水泵, 其计算公式为

$$q_t = \frac{G_{fw}(h_{ms} - h_{fw}) + G_{rhl}(h_{thr} - h_{rhl}) + G_{rs}(h_{thr} - h_{rs}) + G_{ss}(h_{ms} - h_{ss})}{P_2 - P_s}$$

对于汽动给水泵, 其计算公式为

$$q_7 = \frac{G_{fw}(h_{ms} - h_{fw}) + G_{rhl}(h_{rhl} - h_{rhl}) + G_{rn}(h_{rhl} - h_{rn}) + G_{ss}(h_{ms} - h_{ss})}{P_2}$$

式中 P_2 ——不是由汽轮机驱动的给水泵设备耗功。

对于国产机组，在凝汽工况下，实际热耗率应不高于设计值的 3%；对于进口机组，在凝汽工况下，实际热耗率应不高于设计值的 1%。

4. 缸效率的计算

汽轮机缸效率计算公式为

$$\eta_{ci} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2i}}$$

式中 h_1 ——汽轮机高、中、低压缸进汽焓，kJ/kg；

h_2 ——汽轮机高、中、低压缸排汽焓，kJ/kg；

h_{2i} ——汽轮机高、中、低压缸排汽等熵膨胀终点焓，kJ/kg。

高、中压缸效率是根据实测的进出高、中压缸蒸汽的参数来确定的。低压缸效率是由低压缸的进汽参数、排汽压力及通过整个汽轮机的能量平衡得出的低压缸排汽焓来计算。

目前，提高高、中压缸效率的主要措施是进行汽封改造，例如某电厂采用哈尔滨汽轮机厂生产的国产引进型 N300-16.7/537/537 亚临界、一次中间再热、单轴、高中压合缸、凝汽式汽轮机，运行几年后汽轮机缸效率下降较大，特别是高压缸效率下降最多，热耗明显增高。汽轮机高、中压轴封漏汽量为再热蒸汽流量的 5.19%，高于设计值的 2 倍。大修期间投资不到 70 万元将汽轮机的高中压缸 12 圈梳齿迷宫汽封更换为布莱登汽封。汽封径向间隙按下列标准进行调整：高压进汽平衡环 0.5~0.8mm，高压排汽平衡环 0.45~0.6mm，中压进汽平衡环 0.45~0.55mm，高中压缸端部内汽封（电、调端）0.4~0.45mm，以上数值均优于哈尔滨汽轮机厂的设计值。汽封间隙小可以减少级间漏汽，高压缸效率提高 2%，低压缸效率提高 1%。

5. 相对内效率

在汽轮机内蒸汽热能转化为功的过程中，由于进汽节流、汽流通过喷嘴和叶片摩擦、叶片顶部间隙漏汽及余速损失等原因，实际只能使蒸汽的可用焓降的一部分变为汽轮机的内功。蒸汽实际用于做功的焓降与蒸汽理想焓降之比称为汽轮机相对内效率。如果汽轮机的输入理想功率为 P_i （汽轮机的输入能量为汽轮机的理想焓降 ΔH_i ），输出的内功率为 P_i （蒸汽在汽轮机的能量转变过程中，热能转变为机械能的有效焓降为 ΔH_i ，对应的汽轮机输出功率为内功率 P_i ），蒸汽量为 G ，则

$$P_i = G\Delta H_i$$

$$P_i = G\Delta H_i$$

则汽轮机的相对内效率

$$\eta = \frac{P_i}{P_i} = \frac{\Delta H_i}{\Delta H_i}$$

式中 η ——汽轮机相对内效率，%；

P_i ——不考虑任何损失，蒸汽的焓降全部转变为机械功，此时汽轮机所发出的功率称为理想功率，kW；

P_i ——当考虑到汽轮机的各种内部损失后，汽轮机所发出的功率称为内功率，kW；

ΔH_i ——蒸汽的理想焓降，kJ/kg，对于非再热机组 $\Delta H_i = h_{ms} - h_{cs}$ ；

ΔH_i ——汽轮机的有效焓降，kJ/kg，对于非再热机组 $\Delta H_i = h_{ms} - h_c$ ；

h_{ms} ——汽轮机的进汽焓, kJ/kg;

h_c ——汽轮机实际排汽焓, kJ/kg;

h_{cs} ——理想汽轮机排汽焓, kJ/kg;

G ——汽轮机的蒸汽流量, kg/h。

以汽轮机的理想功率 P_i 为输入能量得到的各种效率称为汽轮发电机组的相对效率。相对内效率越高, 说明汽轮机的内部损失越小, 因此它是衡量汽轮机热力过程完善程度的指标, 目前汽轮机的相对内效率一般为 86%~90% 左右。

所谓理想蒸汽是指满足三个条件的蒸汽: ①一元流动, 即喷嘴中的蒸汽参数只沿流动方向改变, 而垂直截面上不变; ②稳定流动, 即流道中任一点的参数不随时间变化; ③绝热流动, 即蒸汽快速通过喷嘴时, 与外界不产生热交换。蒸汽的理想焓降是指汽轮机内理想蒸汽的热能转换为机械能的最大能量。

汽轮机的内部损失包括以下八项损失:

(1) 蒸汽流经喷嘴时, 部分蒸汽产生扰动和涡流, 蒸汽和喷嘴表面有摩擦, 引起做功能力的损失, 叫喷嘴损失。喷嘴损失计算公式为

$$\Delta h_n = \frac{v_1}{2} \left(\frac{1}{\varphi^2} - 1 \right)$$

式中 φ ——喷嘴的速度系数;

v_1 ——喷嘴出口实际速度, m/s;

Δh_n ——喷嘴损失, kJ/kg。

减少喷嘴损失的方法是: 在冲动级中采用一定的反动度, 使蒸汽流过动叶栅时相对速度增加; 在强度允许的条件下, 尽量减小叶片出口边厚度; 采用渐缩型叶片、窄型叶栅等。

(2) 蒸汽流经动叶时, 由于气流与动叶表面发生摩擦和涡流, 引起做功能力的损失, 叫动叶损失。动叶损失计算公式为

$$\Delta h_b = \frac{w_1}{2} \left(\frac{1}{\psi^2} - 1 \right)$$

式中 w_1 ——喷嘴出口实际相对速度, m/s;

ψ ——动叶片的速度系数;

Δh_b ——动叶损失, kJ/kg。

减少动叶损失的方法是: 改进动叶型线; 采用适当的反动度。

(3) 蒸汽从动叶排出时, 绝对速度具有一定的动能, 这部分动能未被利用, 引起做功能力的损失, 叫余速损失。余速损失计算公式为

$$\Delta h_c = \frac{v_2^2}{2}$$

式中 v_2 ——蒸汽离开动叶时具有的绝对速度, m/s;

Δh_c ——余速损失, kJ/kg。

减少余速损失的方法是: 选用最佳的速度比; 将汽轮机的排汽管做成扩压式, 以便回收部分余速能量。

(4) 汽缸端部轴封漏汽和级内漏汽损失, 包括隔板汽封、动叶和汽缸间隙等处的漏汽损失等叫做漏汽损失。漏汽损失近似计算公式为