



高等学校教材

火电厂计算机分析

浙江大学 郭丙然 主编

521.39



内 容 提 要

本书综合应用热工理论、最优化方法和计算机技术对火力发电厂进行系统分析。主要内容包括：蒸汽生产系统、汽轮机热力系统和电厂冷端系统的计算机分析；对发电厂设计、运行、检修和安装中的主要问题进行优化；计算机绘图在电厂中的应用和电厂建设经济效益的计算机分析。为配合读者的学习和应用，本书提供了大量的计算程序和计算结果输出清单（还配有5个磁盘，如需要，可向作者单位联系）。

本书可作为高等工科院校热能工程、能源管理和火力发电厂等专业高年级学生和研究生教材；也可供从事这方面工作的工程技术人员参考。

高等学校教材

火电厂计算机分析

浙江大学 郭丙然 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行，各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

*

787×1092 毫米16开本 15.5印张 332千字

1991年5月第一版 1991年5月北京第一次印刷

印数 0001—1990册

ISBN7-120-01235-5/TK·200

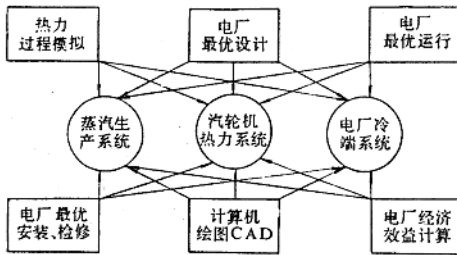
定价 4.05元

前言

本书综合应用热力学、传热学和流体力学的原理对火力发电厂进行系统分析与最优化,从而提高电厂的安全性、经济性和管理水平。近年来,有关电厂的计算机辅助设计、计算机辅助运行、计算机辅助管理和计算机辅助分析的研究工作发展很快,然而尚未见有关这一课题的现代专著。本书力图阐述这一领域的研究成果和最新进展。在当前世界性能源紧张的情况下,电厂生产过程最优化具有十分重要的意义。能源工业中应用最优化技术和电子计算机,将会使能源的节约、开发和生产管理水平提升到一个新的高度。

为生产实际需要,本书深入而具体地分析了火力发电厂的主要生产过程,并提供许多计算机程序和计算结果清单,著者认为这些都将是大有裨益的。

从系统观点看,火力发电厂是一个系统,它包括五个子系统:燃料制备系统、蒸汽生产系统、汽轮机热力系统、电厂冷端系统和电气系统。本书专门分析蒸汽生产系统、汽轮机热力系统和电厂冷端系统,以及研究分析这些系统的方法。用0-1图来说明本书各章之间的关系是很清楚的。三个圆圈表示电厂的三个子系统,即本书的第一、二、三各章;六个长方块代表本书后六章,即第四、五、六、七、八和九各章。读者可先阅读前三章,然后根据工作需要选读后面六章,后六章在一定程度上是相对独立的。



0-1 本书各章关系图解

第一章蒸汽生产系统有大量计算机程序,由于篇幅限制,只能提供运行中常用的燃料燃烧计算程序,锅炉煤耗量和效率计算程序,炉膛出口温度计算分析程序和过热蒸汽温度喷水减温计算程序。

汽轮机热力系统计算虽然是一个比较经典的问题,但由于没有应用计算机技术,迄今不能令人满意。第二章介绍的利用 $q-y-t$ 矩阵的计算机并联计算法,是一种快速、高精度的计算方法,利用它可以进行热力过程模拟与优化。这种方法进一步发展,还可应用于实时检测和控制。

凝汽器、冷却塔、汽轮机排汽部分和循环水系统构成电厂的冷端系统,对电厂经济性

例 PP4-1, GUO 含义为第4章第1个程序

例 PP2-11A 含义为第2章第1个程序方案A的第1张清单

五个磁盘的名称为:

- (1) 蒸汽锅炉计算机分析;
- (2) 电厂热力过程模拟与优化方法;
- (3) 火电厂设计、运行、安装及检修最优化;
- (4) 火电厂管道系统绘图程序包;
- (5) 火电厂生产成本和经济效益指标计算。

本书在浙江大学作为热能专业高年级学生和研究生教材已使用多年, 得到能源部电厂教学组同志和产业部门进修同志的一致好评。

全书由浙江大学郭丙然主编, 并编写第1、2、4、5、6、7章和第3章的冷却塔部分; 叶衡副教授编写第9章和第3章的凝汽器部分; 陈松同志编写第8章。

在编写过程中, 华东电业管理局干部学校杨霁明先生提供PERT网络分析资料; 研究生徐精华、严晓军协助调试了部分程序; 蒙华北电力学院王加璇教授主审, 在此表示衷心感谢。限于编者学术水平和编篡经验, 疏误难免, 敬祈批评和指正。

编者

1989年7月浙江大学

计算程序和计算结果清单目录

序 号	程序或清单编号	程 序 或 计 算 结 果 清 单 名 称	图 号
1	PP1-1. GUO	燃料燃烧计算程序	
2	PP1-2. YAN	锅炉效率计算程序	
3	PP1-3. GUO	炉膛出口烟温计算分析程序	
	PP1-31	炉膛出口烟温计算	1-3
	PP1-32	炉膛热释放率变化的炉膛出口烟温计算	1-4
	PP1-33	过剩空气变化的炉膛出口烟温计算	1-5
	PP1-34	火焰黑度和壁面黑度变化的炉膛出口烟温计算	1-6
4	PP1-4. YAN	过热蒸汽温度控制喷水量计算程序	
5	PP2-1. GUO	汽轮机热力系统计算机分析程序	
	PP2-10A	N-125汽轮机额定工况计算 方案号A: 高加无疏水过冷	2-7(a)
	PP2-10B	N-125汽轮机额定工况计算方案号B: 高加有疏水过冷	2-8
	PP2-1M1 x	低加全部为混合式加热器	2-7(b)
	PP2-1C	图2-5所示疏水泵热力系统计算	2-7(c)
	PP2-1D	图2-6所示疏水逐级自流热力系统计算	2-7(d)
	PP2-11A	第一级高加切除计算	2-9(a)
	PP2-11B	第一级高加切除计算	2-9(b)
	PP2-12AB	两级高加都切除	2-10
	PP2-13A	提高除氧器压力运行	2-12(a)
	PP2-13B	提高除氧器压力运行	2-12(b)
	PP2-14A	疏水泵事故停用	2-14(a)
	PP2-14B	疏水泵事故停用	2-14(b)
	PP2-15A	高加给水旁路	2-16(a)
	PP2-15B	高加给水旁路	2-16(b)
	PP2-16A	给水泵给水抬升	2-18(a)
	PP2-16B	给水泵给水抬升	2-18(b)
	PP2-20	疏水过冷模拟与优化	2-19
6	PP3-1. GUO	凝汽器模拟计算程序	
7	PP3-3. GUO	冷却塔特性数NTU计算程序	
8	PP3-41	非设计工况麦克尔方程计算 (I)	3-25
9	PP3-51	非设计工况麦克尔方程计算 (II)	3-26
10	PP4-1. GUO	多变量线性回归分析程序	
	PP4-11	冷却塔运行数据拟合	4-7
	PP4-12	汽轮机真空运行数据拟合	4-8
11	PP4-2. GUO	多项式曲线拟合程序	
12	PP4-3. DFP	DFP法非线性拟合	无
	PP4-31	冷却塔运行数据拟合	4-9
13	PP4-4. XJH	Powell法非线性拟合	无
	PP4-41	汽轮机真空运行数据拟合	4-10
14	PP4-5. XJH	非线性方程组计算 (泵、风机并列运行模拟) 程序	
	PP4-51	水泵并列运行模拟	PP4-5. GUO清单
	PP4-52	电厂冷端热力系统模拟计算	4-19
15	PP5-1. BAS	电厂最优设计程序	
16	PP6-1. GUO	负荷最优分配程序	
	PP6-11	负荷最优分配计算	PP6-1. GUO
17	PP7-1. GUO	PERT网络计算机分析程序	
	PP7-12	锅炉检修PERT网络计算	7-19
	PP7-13	汽轮机检修PERT网络计算	7-21
	PP7-14	发电机检修PERT网络计算	7-23
18	PP8-1. CHS	原则性热力系统绘图程序	
19	PP8-2. CHS	主蒸汽管道系统绘图程序	
20	PP8-3. CHS	给水管道路系统绘图程序	
21	PP8-4. CHS	一个简单的CAD程序	
22	PP9-11	电厂经济效益指标计算结果	图9-2

目 录

前 言

计算程序和计算结果清单目录

第一章 蒸汽生产系统计算机分析	(1)
1-1 燃烧计算	(2)
1-2 锅炉煤耗量与效率	(6)
1-3 炉膛出口烟气温度的计算机分析	(9)
1-4 过热器	(13)
1-5 省煤器和空气预热器	(15)
第二章 热力系统计算机分析	(20)
2-1 热力系统计算的一般方法	(20)
2-2 热力系统串联计算法	(26)
2-3 热力系统并联计算法	(29)
2-4 热力系统变工况计算机分析	(39)
第三章 电厂冷却设备及系统	(57)
3-1 凝汽器概述	(57)
3-2 总传热系数	(58)
3-3 水力阻力	(60)
3-4 凝汽器热力计算	(63)
3-5 凝汽器特性	(66)
3-6 冷却塔概述	(68)
3-7 逆流式冷却塔热力计算	(71)
3-8 横流式冷却塔热力计算	(74)
3-9 填料特性	(77)
3-10 冷却塔计算机辅助设计与辅助运行	(79)
第四章 热力过程模拟	(89)
4-1 系统、模型和辨识	(89)
4-2 建立数学模型的机理分析方法	(91)
4-3 建立数学模型的黑箱法	(95)
4-4 电厂冷却系统回归分析	(105)
4-5 水泵 (风机) 并列运行模拟	(110)
4-6 发电厂冷端热力系统模拟	(118)
第五章 电厂最优设计问题	(128)
5-1 最优化问题概述	(128)
5-2 电厂建设问题	(132)

5-3 热电厂热力系统最优合成	(135)
5-4 发电厂水力网最优设计	(140)
5-5 复杂热力系统热绝缘的最优设计	(146)
第六章 电厂最优运行主要问题	(157)
6-1 热力设备能耗特性	(157)
6-2 热力发电厂机动性	(160)
6-3 发电机组当量能耗特性	(162)
6-4 负荷最优分配数学模型	(164)
6-5 集中制蒸汽母管电厂的当量能耗特性	(170)
6-6 热力设备动力特性的贮存与拟合	(172)
第七章 电厂检修、安装最优化的主要问题	(176)
7-1 网络图	(176)
7-2 网络图时间参数计算	(179)
7-3 电厂主要设备检修的PERT网络图	(184)
第八章 计算机绘图在电厂中的应用	(197)
8-1 微机绘图概述	(197)
8-2 电厂热力系统图的绘制方法	(204)
8-3 三维图形的二维图象	(207)
第九章 热力发电厂的经济效益计算与分析方法	(224)
9-1 电能生产成本	(224)
9-2 复利现值、年金现值	(226)
9-3 经济效益分析	(228)
9-4 经济效益分析计算实例	(232)

第一章 蒸汽生产系统计算机分析

蒸汽生产系统通常称为锅炉设备，它的示意图见图1-1。燃料在炉膛内燃烧，主要以辐射方式把热量传给水冷壁；水冷壁是蒸汽生产系统的蒸发部分。离开炉膛的烟气在过热器中把蒸发部分产生的饱和蒸汽进一步加热为过热蒸汽，然后馈送给汽轮机发电。过热器后的烟气温度仍然很高，为了利用热能，烟气总经过省煤器把经高压加热器的给水进一步加热。再经空气预热器冷却后，经烟囱排入大气。近代火电厂的设计和运行与蒸汽生产系统关系十分密切，例如锅炉参数的变化，不仅影响它传热面的布置，而且也影响主厂房的布置。对于燃料制备、除尘除灰和自动控制系统的的设计和运行，也必须有蒸汽生产系统的数值分析计算，例如：

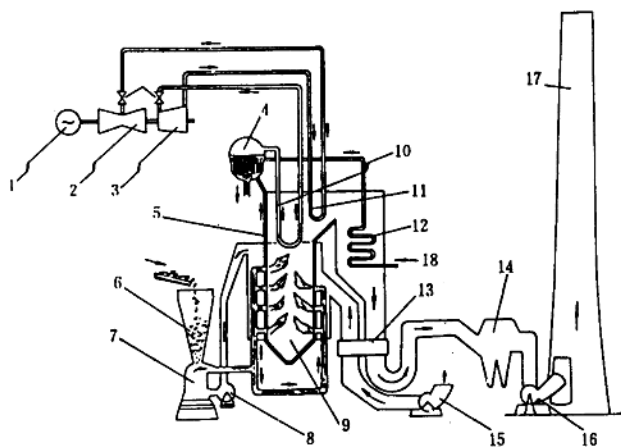


图 1-1 发电厂蒸汽生产系统示意图

1—发电机；2—汽轮机中压缸；3—汽轮机高压缸；4—汽包；5—水冷壁；6—煤斗；7—磨煤机；
8—一次风；9—炉膛；10—过热器；11—再热器；12—省煤器；13—空气预热器；
14—除尘器；15—送风机；16—引风机；17—烟囱；18—给水入口

- (1) 燃料燃烧计算程序；
- (2) 锅炉效率与燃料消耗量程序；
- (3) 根据现场实测数据计算锅炉效率程序；
- (4) 炉膛出口温度计算分析；
- (5) 蒸汽流量孔板和给水流量孔板计算；
- (6) 过热器金属温度计算分析；
- (7) 肋片传热面温度计算分析；
- (8) 省煤器运行特性计算；
- (9) 蒸汽节流后性质计算；

(10) 蒸汽、空气、烟气、油和水的流动阻力计算程序；

(11) 汽侧、水侧、空气和烟气的传热系数计算程序；

(12) 过热蒸汽温度控制喷水量计算。

限于篇幅,我们这一章在简单地讲述基本原理后,介绍(1)、(2)、(4)和(12)四个程序。

1-1 燃 烧 计 算

炉膛中,燃料的可燃元素与空气中的氧发生燃烧化学反应,释放出热能。根据化学反应方程式的物质平衡,可得煤的燃烧常数(见表1-1)。

表 1-1 燃 烧 常 数 (kg/kg燃料)

物 质 种 类	燃 烧 所 需 物			烟 气 产 物			SO ₂
	O ₂	N ₂	空 气	CO ₂	H ₂ O	N ₂	
C	2.664	8.863	11.527	3.664		8.863	
H ₂	7.937	26.407	34.344		8.937	26.407	
S	0.998	3.287	4.285			3.287	1.998

任何一种燃料为了完全燃烧所必须的最少空气量称为理论空气量 W_{ia} 。根据燃烧常数表不难写出理论空气量的计算公式

$$W_{ia} = 100(2.664C + 7.937H_2 + S - O_2) \frac{1}{23} \quad (1-1)$$

式中C、H₂、S和O₂分别为燃料元素分析中碳、氢、硫和氧的质量百分数。实际上理论空气量不可能达到完全燃烧的目的。为了改善燃烧,必须供应过量的空气,过量空气的多少与炉膛设计、燃料种类和燃烧器型式有关。实际过量空气 W_a 与理论空气量的关系为

$$W_a = W_{ia}E \quad (E > 1) \quad (1-2)$$

燃烧需要干空气,严格的写法应该把 W_a 写为 W_{da} , W_{da} 是实际的干空气。由于相对湿度不会恰好等于零,空气中总有水分存在。水分可用下式计算:

$$d_s = \frac{\text{水蒸气 (kg)}}{\text{干空气 (kg)}} = \frac{p_s V / R_s T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_s / R_s}{(p_t - p_s) / R_a} = 0.622 \frac{\varphi p_s''}{p_t - \varphi p_s''} \quad (1-3)$$

式中 d_s ——湿度比,水蒸气kg数/干空气kg数;

V ——空气、水蒸气混合物体积, m³;

p_t ——大气压力, $p_t = p_a + p_s$, Pa;

p_a ——干空气分压力, Pa;

p_s ——水蒸气分压力, Pa;

p_s'' ——饱和蒸汽分压力, Pa;

$$\varphi \text{——相对湿度, } \varphi = p_s / p_s'' = p_s' / p_s''; \quad (1-4)$$

R_a ——干空气的气体常数, $R_a = 287 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

R_s ——水蒸气的气体常数, $R_s = 461.5 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$;

T ——空气、蒸汽混合物的绝对温度, K。

如果指定 27°C 、相对湿度为 60% 的空气为标准空气, 那么每 kg 干空气含有 0.013 kg 的水。因此供给燃烧的湿空气是 $1.013W_{da}$ 。

例 1-1 锅炉燃煤的元素分析 (质量%) 如下: 碳 72.8, 氢 4.8, 氧 6.2, 氮 1.5, 硫 2.2, 水分 3.5, 过量空气系数 0.25。求:

- (1) CO_2 、 H_2O 、 SO_2 的分压力;
- (2) 干烟气中按体积计算的 O_2 和 CO_2 含量的百分数;
- (3) 所需的干空气量 W_{da} 和湿空气量 W_{wa} ;
- (4) 所生成的干烟气量 W_{dg} 和湿烟气量 W_{wg} ;
- (5) 干烟气和湿烟气的烟气成分 (体积%)。

解: 利用燃烧常数表和本题的数据计算每 kg 燃料燃烧所需的 O_2 和空气量

$$\text{O}_2 = 2.664 \times 0.728 = 1.939$$

$$\text{空气量} = 11.527 \times 0.728 = 8.392$$

同理计算 H_2 和 S, 汇总成表 1-2。

表 1-2 质量法做燃烧计算

烟气分析成分	质量 %	O_2	1 kg 燃料的理论空气量
C	72.8	1.939	8.392
H_2	4.8	0.381	1.649
O_2	6.2		
N_2	1.5		
S	2.2	0.022	0.094
H_2O	3.5		
灰分	9.0		
100.0		2.342	10.135
减去燃料中的氧		-0.062	-0.268
		2.28	9.867

$$\text{过量 } \text{O}_2 = 2.28 \times 0.25 = 0.57$$

$$W_{da} = 9.867 \times 1.25 = 12.33 \text{ kg/kg 燃料}$$

$$W_{wa} = 12.33 \times 1.013 = 12.5 \text{ kg/kg 燃料}$$

利用燃烧常数表, 与上表类似的计算方法计算燃烧产物, 汇总成表 1-3。

表 1-3

燃烧产物的烟气分析

气 体	kg/kg燃料
$\text{CO}_2 = 3.664 \times 0.728$	2.667
$\text{H}_2\text{O} = 8.937 \times 0.048 + 12.33 \times 0.013 + 0.035$	0.624
$\text{SO}_2 = 1.998 \times 0.022$	0.044
O_2 (过量)	0.570
$\text{N}_2 = 12.33 \times 0.77 + 0.015$	9.51
湿烟气质量 $W_{\text{湿}}$	13.4
干烟气质量 $W_{\text{干}} = 13.4 - 0.624$	12.776

把烟气的某种成分的质量百分数 (kg/kg燃料) 除以该成分气体的摩尔质量就得到它的摩尔数 (mol/kg燃料), 然后以摩尔数除以总摩尔数就求出体积百分数, 结果见表 1-4。

表 1-4

由质量换算到体积

气 体	质量% (kg/kg燃料)	摩尔质量 (kg/mol)	摩尔数 (mol/kg燃料)	体积% (湿)
CO_2	2.667	44	0.0605	$13.21 = \frac{0.0605}{0.45769} \times 100$
H_2O	0.624	18	0.0347	7.58
SO_2	0.044	64	0.00069	0.16
O_2	0.570	32	0.0178	3.90
N_2	9.510	28	0.034	75.15
总 计			0.45769	100

通过上述燃烧计算可以获得如下数据:

(1) 燃烧一定量燃料所需要的空气量, 从而可以确定送风机的型号和空气通道的尺寸。

(2) 得到燃烧所生成的烟气量和烟气成分, 从而可以确定引风机、灰尘收集器、除尘设备的选型以及传热设备和烟道的尺寸。

(3) 烟气成分分析可用于计算不发光火焰传热系数, 并用于监测过量空气水平。一定程度上反映了锅炉和电厂的效率。

按上述原理设计的燃料燃烧计算程序见本章末的程序 PP1-1.GUO。这个程序的输入原始数据是燃料的元素分析、过量空气系数、环境温度和相对湿度。输出结果是干的和湿的空气量, 干的和湿的烟气量, 烟气的相对分子质量和密度, 烟气摩尔数。程序 PP1-1.GUO 的输出结果即例 1-1。它的名词、变量名和单位见表 1-5。程序所用计算公式如下:

$$p_i = \exp[23.7093 - 4111/(237.7 + t)]$$

$$d_i = \frac{0.622 \varphi p_i}{98066 - \varphi p_i}$$

表 1-5

燃烧计算程序名词与变量名

名 词	变 量 名	说 明 和 单 位
CO'_1	I	湿烟气中 CO_2 百分比 (%)
O'_1	J	湿烟气中 O_2 的百分比 (%)
N'_1	K	湿烟气中 N_2 的百分比 (%)
$\text{H}_2\text{O}'$	L	湿烟气中水汽百分比 (%)
MW	A 35	烟气摩尔数 (%)
SO'_2	Q	湿烟气中 SO_2 的百分比 (%)
d_s	M	空气中的水分 (1kg/1kg干空气)
p_s	P	饱和蒸汽压 (Pa)
t	T	环境温度 (°C)
φ	R	相对湿度
ρ_g	D	烟气密度 (kg/m^3)
$\text{O}_{2,d}$	U	干烟气中 O_2 的百分比 (%)
$\text{CO}_{2,d}$	V	干烟气中 CO_2 的百分比 (%)
$\text{N}_{2,d}$	A 45	干烟气中 N_2 的百分比 (%)
C	C	燃料中C的百分比 (%)
H_2	H	燃料中 H_2 的百分比 (%)
S	S	燃料中S的百分比 (%)
O_2	O	燃料中 O_2 的百分比 (%)
N_2	N	燃料中 N_2 的百分比 (%)
F	F	湿烟气摩尔数 (mol)
W	W	燃料中水分 (%)
$W_{d,0}$	A	燃料燃烧干空气 (1kg/1kg燃料)
$W_{w,0}$	B	燃料燃烧湿空气 (1kg/1kg燃料)
$W_{d,t}$	Z	干烟气 (1kg/1kg燃料)
$W_{w,t}$	G	湿烟气 (1kg/kg燃料)
E	E	过量空气系数1.25含义125%
HHV	HHV	高热值 (kJ/kg)
LHV	LHV	低热值 (kJ/kg)

$$W_{da} = 100(2.664C + 7.937H_2 + S - O_2) \frac{E}{23}$$

$$W_{wa} = W_{da}(1 + d_s)$$

$$W_{wg} = 3.66C + 8.94H_2 + W + W_{da}d_s + 2S + 0.77W_{da} \\ + N_2 + 0.23W_{da}(E - 1)/E$$

$$W_{dg} = W_{wg} - (8.94H_2 + W + W_{da}d_s)$$

$$F = 0.08318C + 0.031258 + \frac{8.94H_2 + W + W_{da}d_s}{18} \\ + \frac{0.77W_{da} + N_2}{28} + \frac{0.23W_{da}(E - 1)}{32E}$$

$$CO_2' = \frac{8.318C}{F}$$

$$O_2' = \frac{23W_{da}(E - 1)}{32EF}$$

$$N_2' = \frac{0.77W_{da} + N_2}{28F} 100$$

$$H_2O' = \frac{8.94 + W + W_{da}d_s}{18F} 100$$

$$SO_2 = \frac{3.125S}{F}$$

$$MW = \frac{44CO_2' + 32O_2' + 28N_2' + 18H_2O + 64O_2'}{100}$$

$$\rho_g = 16.0185$$

$$O_{2d}' = \frac{O_2'}{100 - H_2O} 100$$

$$CO_{2d}' = \frac{CO_2'}{100 - H_2O} 100$$

$$N_{2d}' = \frac{N_2'}{100 - H_2O} 100$$

$$HHV = 33698C + 144088 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9296$$

$$LHV = HHV - 22589H_2 - 2580W$$

1-2 锅炉煤耗量与效率

锅炉煤耗量取决于它的蒸汽生产量、燃料的热值和锅炉效率等因素，可用下式计算：

$$B = \frac{1}{HHV\eta_b} [D_s(h_2 - h_1) + D_r(h_4 - h_3) + D_b(h_s - h_1)] \quad (1-5)$$

式中 B ——锅炉燃料消耗量, kg/h ;
 D_s ——蒸汽生产量, kg/h;
 D_r ——再热蒸汽流量, kg/h;
 D_b ——锅炉排污, kg/h;
 η_b ——锅炉效率;
 h_1 ——锅炉给水焓, kJ/kg;
 h_2 ——锅炉出口过热蒸汽焓, kJ/kg;
 h_3 ——再热器入口蒸汽焓, kJ/kg;
 h_4 ——再热器出口蒸汽焓, kJ/kg;
 h_s ——锅炉压力饱和水焓, kJ/kg;
 HHV ——燃料高热值, kJ/kg。

1kg燃料完全燃烧的燃烧产物冷却到初始温度时所释放出的热量称为燃料的热值。如果燃烧产物中的水分以水蒸气存在则为低热值;如果这份水蒸气完全凝结则为高热值。煤的高热值 HHV 计算公式为

$$HHV = 33698C + 144088 \left(H_2 - \frac{O_2}{8} \right) + 9296S \text{ kJ/kg}$$

式中 C, H, O, S 是燃料元素分析的质量百分数。上式用于烟煤、无烟煤是很合适的;对其它煤种可以修正后使用。 HHV 减去煤中水分的汽化热就得到煤的低热值 LHV ,即

$$LHV = HHV - 22589H_2 - 2580W \quad (1-7)$$

式中 W 是煤元素分析中的水分。

式(1-5)实际上是锅炉效率的定义。锅炉效率可以根据高热值或低热值计算。西欧一些国家(如联邦德国)习惯以低热值计算,美国则用高热值计算。因为这两种计算的效率是可以互相换算的,因此重要的倒是要注明一个锅炉效率数值是按哪种热值计算的。

以式(1-5)计算称为正平衡法;以下式计算称反平衡法或热损失法。

$$\eta_b = \frac{HHV - \text{全部损失}}{HHV} \times 100\% \quad (1-8)$$

发生在锅炉中的全部损失如下:

(1) 干烟气损失 L_1 由于离开锅炉的烟气温度比环境干球温度高得多, L_1 是一项很大的热损失,它的计算式为

$$L_1 = [C_{pg}W_a(1+M) + (1-G)] \frac{t_g - t_a}{HHV} \quad (1-9)$$

式中 C_{pg} ——烟气比热, kJ/(kg·K);
 W_a ——实际空气量, kg/kg燃料;
 M ——空气中水分, kg/kg干空气;
 G ——燃料水分, kg/kg燃料;

$$G = 8.94H_2 + W + 0.01W_aEM \quad (1-10)$$

$$W_a = W_{a,i}(1 + 0.01E)$$

$$W_{at} = 11.53C + 34.3(H_2 - 0.125O_2) + 4.29S$$

式中 W_{at} ——理论空气量, kg/kg燃料。

(2) 燃料水分引起的损失 L_2 燃料中水分在锅炉中蒸发和过热, 随烟气一起排出锅炉。

$$L_2 = 100(9H_2 + W) \frac{1080 + 0.46t_g - t_a}{HHV} \quad (1-11)$$

(3) 空气中水分引起的损失 L_3 空气进入锅炉, 水分处于蒸汽状态, 只要计算过热部分, 不必计算潜热。

$$L_3 = 100C_{H_2O} MW_a (1 + 0.01E) \frac{t_g - t_a}{HHV} \quad (1-12)$$

式中 C_{H_2O} ——水蒸气比热, kJ/(kg·K)。

(4) 辐射损失 L_4 锅炉表面虽然保温, 但仍然比环境温度高, 所以辐射损失是不可避免的。

(5) 未燃烧损失 由于锅炉设计不合理, 燃料会不经燃烧就随灰渣落到炉底或被烟气带走。它与过量空气大小、燃烧器设计、炉膛型式等因素有关, 难以计算, 可根据经验和测定灰分可燃物来确定。

按上述原理设计的锅炉效率计算程序见本章末程序PP1-2.YAN。程序所用名词的变量名见表1-6。该程序计算结果输出清单所用的原始数据如下:

锅炉热负荷 = 142×10^{12} kJ/h

H = 0.125

O = 0

C = 0.865

S = 0.01

M = 0

N = 0

E = 0.2

表 1-6 锅炉效率计算程序名词和变量名

名 词	变 量 名	说 明 和 单 位
C	C	燃料中碳的百分比 (%)
E	E	过量空气 (%)
G	G	湿 分 (%)
H ₂	H	燃料中的氢百分比 (%)
HHV	V	燃料高热值 (kJ/kg)
L ₁	I	排烟损失 (%)
L ₂	J	燃料水分引起的损失 (%)
L ₃	K	空气水分引起的损失 (%)
L ₄	N	辐射损失 (%)

续表

名 词	变 量 名	说 明 和 单 位
L_s	X	未测量损失 (%)
LHV	L	低热值 (kJ/kg)
M	M	燃料中的水分 (kg/kg)
N_2	Y	燃料中氮的百分比 (%)
O_2	O	燃料中氧的百分比 (%)
Q	Q	锅炉负荷 ($\times 10^4$ kJ)
φ	R	相对湿度 (%)
S	S	燃料中硫的百分比 (%)
p_s	P	饱和蒸汽压力 (kPa)
t_a	B	环境空气温度 (°C)
t_g	T	烟气出口温度 (°C)
W_a	—	实际空气量 (kg/kg)
$W_{a,1}$	A	理论空气量 (kg/kg)
η_{HHV}	A27	高热值锅炉效率 (%)
η_{LHV}	A28	低热值锅炉效率 (%)

环境温度 = 27 °C；排烟温度 = 177 °C；相对湿度 = 0.6；辐射热损失 = 1.5 %。

程序运行后，用户从键盘输入数据，计算机即显示并打印出计算结果。

1-3 炉膛出口烟气温度的计算机分析

现代的水冷壁锅炉在其燃烧室的四壁，都敷有水冷壁管，其作用一方面保护炉墙，另一方面又充当蒸发管。它在燃烧室里吸收燃料燃烧所释放出的热量（主要是辐射热），使管内流动的炉水升温而汽化，上升入汽包。汽包中有汽水分离器，蒸汽经汽水分离器进入过热器。给水系统不断输送给水入汽包，由与汽包相联的下降管在炉墙外引入下联箱，再分配到水冷壁管。这样便形成水循环，起到既能使水汽化又保护炉墙的双重作用。

在燃烧室中，经过燃烧的燃料化成灰渣，由底部的灰斗排出。根据灰分的熔点高低，可设计成干式排渣和液态排渣两种型式；前者用于干灰分熔点高的燃料，后者用于灰分熔点低的燃料。因为此时仍用干式排渣则常引起燃烧室底部结渣。如采用液态排渣，当设计锅炉时，应设法将燃烧室底部温度提高，以便灰渣呈熔融状态流出，故称液态排渣，此法还可以减少飞灰，以减轻锅炉尾部受热面磨损积灰问题。但因燃烧室底部处于高温下工作，故需验算金属是否超温。如果设计时，燃烧室底部的温度比较低，则灰渣以干的状态从炉底排出。干式除尘灰渣一般只收集20 %的灰分，因而锅炉就需要有比较大的收集飞灰设备。