

锅炉热效率的正交优化控制

朱建宁

(南京电力高等专科学校)

〔摘要〕本文通过计算锅炉热效率的函数关系式,利用数理统计中的正交计算方法,求得实际运行状态下的优化参数控制值,提高锅炉经济性。

关键词 锅炉效率 优化控制

分类号 TK223

1 前言

锅炉设计热效率和实际运行热效率是用来从不同角度定量评价锅炉设备经济性的重要的数量指标,但在实际工业锅炉运行热效率普遍低于设计值(5—10)%的现状下,唯有实际运行热效率才能真实地反映能量有效利用的状况与水平。可见,如何在锅炉实际运行工况不可能与设计工况完全一致的条件,提高锅炉运行的稳定性,使反映锅炉实效的瞬时热效率尽可能稳定在设计的目标值附近,则是工业锅炉节能的一个重要内容。

分析工业锅炉实际运行经济性很差的原因,一方面是有悖于合理技术要求的运行操作;另一方面是设计、制造和安装中存在的计算标准和规范的问题。因此本文通过分析锅炉设计热效率的计算过程,借用正交方法,利用热效率同各运行参数间的函数关系计算式,提出在设计阶段即考虑影响热效率的因素有变化范围的情况下,找到在实际运行条件下优良的参数组合,以使实际运行热效率

尽可能稳定(通过误差因素的正交表来刻划热效率的稳定性)在设计的目标值附近。

2 影响设计热效率的因素分析

在设计锅炉时先估计或计算各项热损失,用反平衡法定出“设计热效率”,再由锅炉容量及蒸汽的参数求出有效热量后确定燃料消耗量,而后根据热平衡计算中选定的参数值进行锅炉的整体结构设计,以保证设计热效率的实现。

具体分析反平衡效率 $\eta_{\text{反}} = 100 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6)\%$ 的计算公式^{〔1〕}可以看出:当按国家标准《热设备能量平衡通则》中“原则上以环境温度为基准”来进行能量平衡的规定;煤种对燃烧过程的完善性有很大的影响,不同煤种要求使用与之相适应的燃烧设备和燃烧方式;设计选用的代表性煤种确定以后,主要由燃料种类决定的 q_3 和容量决定的 q_5 随之而定,此时 $\eta_{\text{反}} = f(a_{\text{pr}}, \theta_{\text{pr}}, a_{\text{in}}, c_{\text{in}}, c_{\text{in}})$ 。

收稿日期 1992 12 12

本文联系人 朱建宁 男 41 讲师 210013 南京市北京西路74号

由此从物质与能量平衡的观点考察锅炉的实际运行工况即可得出,设计过程中确定的参数值就是保证设计 η_{dl} 的控制参数。显然,实际工况与设计工况发生偏差时,设计参数值必然发生波动,而不是定值。如仍按设计参数值控制锅炉运行,则必然不能正常地实现其目标机能。因此在实际运行状态下单纯地通过比较(控制)有关参数的高低来判定运行的经济性好坏是不准确的,必须在考虑运行条件发生变化的情况下,与控制参数配套地进行判断和调整,使运行锅炉的热效率在实际使用条件下的数值最稳定地接近设计锅炉时的设计值。

以某台 $D=6t/h$ 的链条炉排工业锅炉为例⁽¹⁾,其设计煤种为 A II 烟煤,当 a_{lh} 、 q_3 、 q_4 、 q_5 、 q_6 、 θ_{py} 和 α_{py} 分别取 0.8%、1%、13.5%、2.4%、0.86%、180℃、和 1.8 时,设计 $\eta_{dl} = 72.4\%$,满足国家标准 72% 的要求。当保证煤种与使用锅炉相适应,假设实际使用烟煤的变化范围为代表性煤种 A I — A II, q_3 的变化范围为(0.5 — 2)%、 q_5 仍为 2.4% 时,如何选择设计参数 a_{lh} 、 α_{py} 、 θ_{py} 、 c_{lh} 、 c_{rh} ,使 η_{dl} 最稳定地接近于 72.4%,以保证锅炉的设计效率,这是个具有两个误差因素,五个可控参数的稳定性择优控制问题。因此通过参数的稳定性择优,使锅炉性能达到设计的要求,则是几乎不涉及设备投资而获得节能效果的重要途径。

3 参数控制

3.1 选优表

按理论上分析,运行控制参数之间是互相制约、互相依存和互相矛盾的,这些因素作用的结果综合地反映在能量有效利用的程度上,所以设计参数是通过技术经济比较确定的。根据国标《评价企业合理用热技术导则》

中对运行工业锅炉的经济技术指标所作的规定及实际操作上的可能,关于因素 α_{py} 、 θ_{py} 、 a_{lh} 、 c_{lh} 、 c_{rh} 取值(位级或水平)的范围见表 1。这是五个因素,每个因素有三个位级的选优问题。采用正交表 $L_{18}(3^7 \times 2^1)$ 的前五列,把表 1 中的因素代入后所得之表称选优表,如表 2 所示。

表 1 因素位级表

因素 位级	α_{py}	θ_{py} (℃)	a_{lh}	c_{lh} (%)	c_{rh} (%)
1	1.65	160	0.8	10	25
2	1.75	170	0.85	15	30
3	1.85	180	0.9	20	35

这 18 个条件到底哪一号条件好呢?问题在于这时燃料种类和 q_3 都有波动,即使按某一条件选取参数,由于煤质和 q_3 的波动,将会使 η_{dl} 的数值是参差不齐的。那么,如何来评判一个条件的好坏,这个评判优劣的标准该如何制定呢?

3.2 误差表

评判条件的好坏以每一条件下的 η_{dl} 值距离设计 η_{dl} 的远近来衡量。为此由煤质和 q_3 的波动范围,取表 3 所示的煤质和 q_3 的波动位级表。将表 3 代入正交表 $L_9(3^2)$ 的前 2 列,此时对于表 2 所列的每一条件均得一用正交表来取子样的误差表。如对第九号条件而言, α_{py} 、 θ_{py} 、 a_{lh} 、 c_{lh} 、 c_{rh} 之值均取相同的数值,故表中没有列出; η_{dli} 表示误差表中九个样品的锅炉热效率之值,根据反平衡公式求出。此时由表 2 中每个条件的优劣评判转化为对每一条件的误差表进行比较。

3.3 考核指标

选优表条件的优劣,应用每一条件的误差表计算的九个 η_{dli} 值与设计值 72.4% 的接

表 2 选优表及考核指标 $L_{18}(3^7 \times 2^1)$

列号 条件号	a_{py}	θ_{py} (°C)	a_m	c_h (%)	c_m (%)	γ	η_{60} (%)	σ^2
1	1(1.65)	1(160)	3(0.9)	2(15)	2(30)	41.9148	74.16	0.00794
2	2(1.75)	1	1(0.8)	1(10)	1(25)	41.5356	76.55	0.00466
3	3(1.85)	1	2(0.85)	3(20)	3(35)	93.6535	67.97	0.01802
4	1	2(170)	2	1	2	39.6512	76.17	0.00493
5	2	2	3	3	1	65.8221	69.81	0.01364
6	3	2	1	2	3	59.8859	70.01	0.01243
7	1	3(180)	1	3	1	71.0679	69.33	0.01442
8	2	3	2	2	3	50.0423	70.88	0.01068
9	3	3	3	1	2	30.2440	75.39	0.00421
10	1	1	1	1	3	41.2325	74.57	0.00738
11	2	1	2	3	2	76.3831	69.35	0.01569
12	3	1	3	2	1	37.3952	73.84	0.00728
13	1	2	3	3	3	79.5791	69.05	0.01612
14	2	2	1	2	2	46.7588	71.75	0.01012
15	3	2	2	1	1	34.6768	76.01	0.00422
16	1	3	2	2	1	38.0242	73.17	0.00786
17	2	3	3	1	3	32.4344	75.28	0.00479
18	3	3	1	3	2	94.9045	67.28	0.01707
I	311.4697	332.1147	355.3852	219.7747	288.5218	I + II + III = 975.2061		
II	312.9763	326.3739	332.4311	274.0212	329.8566			
III	350.7601	316.7175	287.3898	481.4102	356.8277			
R	39.2904	15.3972	67.9954	261.6355	68.3059			

表 3 误差因素位级表

因素 位级	燃料种类	σ_3 (%)
1	AI	0.5
2	AI	1.25
3	AII	2.0

注:燃料特性见参考资料[1]。

近程度来衡量。若九个 η_{60} 值都接近 72.4% 则该条件好;若九个 η_{60} 值中的一部分与 72.4%

有较大的偏差,则该条件就不好。故以偏差均

方: $\gamma = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\eta_{60i} - 72.4)^2$ 作为考核稳定性好坏的指标,其值越小越好。将每一条件的误差表所得的九个 η_{60} 值,分别代入计算偏差均方的公式计算出 γ 值后将其数值填入表 2 中。

由表 2 可知:(1) 第九号条件的 $\gamma = 30.2440$ 为最小,故该条件为直接看的好条件;(2) 分别由每种因素三个位级的 γ 之和 I、II、III 与极差 R 可知算一算的好条件是: a_{py} 的位级 1(1.65), θ_{py} 的位级 3(180°C), a_m 的位级 3(0.9), c_h 的位级 1(10%), c_m 的位级 1(25%)

的搭配。由此将这种参数搭配作为一种条件，计算其误差表， $\gamma = 40.4452$ ，故这种条件不符合要求，也即算一算的好条件不可取；(3) 第九、十五和十七号条件的 γ 值分别为 30.2440、34.6768 和 32.4344，数值之间差别不大，所以用偏差均方值的大小作为评判指标，仅能反映希望找到的参数搭配接近设计值的程度，不能反映出当煤质和 q_3 发生变化时，希望找到的参数搭配在整体上接近设计值的特性。因而还必须刻划 η_{bl} 值的分散情况，要求其误差样本的特性值互相靠近(稳定在其平均数附近)。

表 4 选优表第九号条件误差表

因素 样品号	燃料种类	q_3 (%)	η_{bl} (%)
1	1(A I)	1(0.5)	70.18
2	2(A I)	1	76.94
3	3(A II)	1	81.3
4	1	2(1.25)	69.43
5	2	2	76.19
6	3	2	80.55
7	1	3(2)	68.68
8	2	3	75.44
9	3	3	79.80

3.4 稳定性指标

取样本变异系数 $c^2 = s^2/(\bar{\eta}_{bl})^2$ 作为刻划 η_{bl} 的分散指标。式中： s^2 为样本方差， $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\eta_{bli} - \bar{\eta}_{bl})^2$ ； $\bar{\eta}_{bl}$ 为选优表中每一号条件 η_{bl} 的平均数， $\bar{\eta}_{bl} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \eta_{bli}$ 。 c^2 值越小，按该条件搭配的参数的 η_{bl} 值就越集中在其平均数 $\bar{\eta}_{bl}$ 的附近。在前面计算的基础上，进一步计算出每一号条件的 $\bar{\eta}_{bl}$ 和 c^2 ，并列入表 2 的右侧。

从表 2 可看出：(1) c^2 和偏差均方 γ 的从小到大的次序是不同的，除个别条件外， c_{bl} 值越小，其稳定性越好；(2) 第九号条件的 c^2 和 γ 值最小，从而说明按此条件搭配的参数控制不但 η_{bl} 值最稳定地接近于设计值，而且在煤质和 q_3 各有波动的情况下， η_{bl} 值最集中地落在其平均值 $\bar{\eta}_{bl} = 75.39\%$ 的附近；(3) 由第十五、十七号条件的 c^2 和 γ 值与第九号条件的相应数值相差无几说明，即按第十五、十七号条件搭配的参数运行也能得到相当好的稳定性。此结论是在煤质和 q_3 在一定范围内变化， q_5 、 α_{py} 、 θ_{py} 、 a_{lh} 、 c_{lh} 和 c_m 保持不变的条件下得到的，所以从分析第十五、十七号条件的参数搭配情况可认为，如用最佳条件即第九号条件作为锅炉运行的控制参数时，因各参数值不可避免的存在着波动(设 $\alpha_{py} = 1.85 \pm 0.1$ 、 $\theta_{py} = 180 \pm 10^\circ\text{C}$ 、 $a_{lh} = 0.9 \pm 0.05$ 、 $c_{lh} = 10 \pm 5\%$ 、 $c_m = 30 \pm 5\%$)，则瞬时热效率的平均数同目标值仍有一定的系统偏差。

3.5 因素取值的调整

为了消除系统偏差，在最佳条件处采用 $L_{18}(3^7)$ 作为误差表，对第九号条件的 18 个 η_{bl} 值分别计算出每个位级六个 η_{bl} 之和 I、II、III 及极差。显然 $\bar{\eta}_{bl} = \frac{I + II + III}{18}$ ，此时每个因素对瞬时热效率的影响程度，用 $\frac{I}{6}$ 、 $\frac{II}{6}$ 、 $\frac{III}{6}$ 偏离平均值 $\bar{\eta}_{bl}$ 的大小即列平方和 s 来衡量。 $s = 6[(\frac{I}{6} - \bar{\eta}_{bl})^2 + (\frac{II}{6} - \bar{\eta}_{bl})^2 + (\frac{III}{6} - \bar{\eta}_{bl})^2] = \frac{1}{6}(I^2 + II^2 + III^2) - \frac{1}{18}(I + II + III)^2$ 容易验证：列平方和 s 可分解为线性平方和 s_L 和二次平方和 s_q ，即 $s = s_L + s_q = \frac{1}{12}(III - I)^2 + \frac{1}{36}(I + III - 2II)^2$ 。 s 值越大，说明此因素对 η_{bl} 的影响越大，因此为把瞬时热效率的平均值调整到目标值上去，应挑选 s 值较大，线性关系较好的参数来进行

调整。第九号条件在诸因素均有波动的情况下对瞬时热效率的影响如表 5 所示。

从表 5 可知:(1)由 s 的大小可说明煤质的变化对 η_{el} 的影响最大,此结论说明以“锅炉的多品种适应多煤种”为原则不断研制、生产各种型式的锅炉的方针是正确的。问题是如用户不按所用煤种去选择锅炉,或正在

使用的锅炉不供应与其相适应的煤种,那么锅炉设计上的努力也就白费了。因此在设计阶段如何考虑适当扩大锅炉对煤种的适用范围,在使用过程中尽量以小范围的煤种变化去适应锅炉,也许是改变工业锅炉基本状况的捷径之一。(2)由数理统计理论可证明: s_4 很小就表示点偏离回归直线很少,某因素和

表 5 诸因素对热效率的影响 $L_{18}(3^7)$

列号 条件号	燃料	q_3 (%)	α_{py}	θ_{py} (°C)	c_{th}	c_{th} (%)	c_{th} (%)	η_{el} (%)
1	1(A I)	1(0.5)	3(1.95)	2(180)	2(0.9)	1(5)	2(30)	74.45
2	2(A I)	1	1(1.75)	1(170)	1(0.85)	2(10)	1(25)	78.07
3	3(A II)	1	2(1.85)	2(190)	3(0.95)	3(15)	3(35)	79.16
4	1	2(1.25)	2	1	2	3	1	64.89
5	2	2	3	3	1	1	3	75.85
...
17	2(A I)	3(2)	3(1.95)	1(170)	3(0.95)	3(15)	2(30)	73.04
18	3(A II)	3(2)	1(1.75)	3(190)	2(0.9)	1(5)	1(25)	81.43
I	414.61	464.51	453.46	455.23	443.27	470.74	453.04	
II	455.66	447.42	447.78	453.39	449.69	451.30	449.60	
III	483.18	441.52	452.21	444.83	460.49	431.41	450.81	
R	68.57	22.99	5.68	10.4	17.22	39.33	3.44	
s	369.91	47.53	2.97	10.26	25.24	128.9056	1.01	
s_1	391.82	44.05	0.13	9.01	24.71	128.90	0.41	
s_2	5.09	3.48	2.84	1.25	0.53	0.0056	0.60	

指标的关系近似呈直线分布。如 $s_L > 160s_4$, 则可粗略认为线性项对二次项是显著的;如 $s_L > 4000s_4$, 则称线性项对二次项是高度显著的,据此可认为考核指标同该列因素的三个位级呈线性关系。 c_{th} 的平方和仅次于煤种的 s 值,说明提高燃烧效率减少 q_4 是提高锅炉效率的重要因素。由 c_{th} 的 $s_L > 4000s_4$, 可认为指标 η_{el} 与 c_{th} 的三个位级呈线性关系,因而找出这一线性关系,并用它进行调整。

设回归直线为 $\eta_{el} = b(c_{th} - 10) + \bar{\eta}_{el}$, 一次项系数的估计值 $\hat{b} = (\frac{III(c_{th}) - I(c_{th})}{6})$ 。
 $\frac{1}{2\Delta c_{th}} = -0.6555$ 。所以回归直线为: $\eta_{el} = -0.6555(c_{th} - 10) + \frac{1}{18} \sum_{i=1}^{18} \eta_{el}$ 。若要控制 η_{el} 与设计值不超过一定偏差,令 $\bar{\eta}_{el} = 74\%$, 设计值 $\eta_{el} = 72.4\%$, 则 $c_{th} = \frac{74 - 72.4}{0.6555} + 10 \approx 12(\%)$ 。这样就得到调整后的条件为:

$\alpha_{py} = 1.85, \theta_{py} = 180^\circ\text{C}, a_{th} = 0.9, c_{th} = 12\%,$
 $c_{th} = 30\%$, 在此条件下列误差表(如表 4 形
 式)计算得: $\bar{\eta}_{th} = 74\%, \gamma = 29.962$, 瞬时 η_{th}
 更接近 72.4%, 且偏差均方 γ 又减少了一些。

3 结 论

由参数控制的正交计算方法求得在燃
 料和 q_3 各有变化的情况下, 当 α_{py} 取 1.85, θ_{py}
 取 180°C , a_{th} 取 0.9, c_{th} 取 12%, c_{th} 取 30%(对
 A I 烟煤, $q_4 = 9.97\%, q_6 = 0.97\%$) 时, 锅炉
 运行热效率的数值较其它允许的条件最稳定
 地接近设计值。从而在理论上证明了当运行
 条件发生变化后, 如仍按设计值控制运行参
 数必然会引起较大的误差; 突破了设计中当
 煤种 q_3, q_4, q_5, q_6 作为定值处理后, 给调整试
 验及实际运行中为保证稳定状态在操作上带
 来的困难, 须知 q_3, q_4 和 q_6 本身就是同煤质有
 关的量; 同时如在设计阶段即考虑参数的变
 化趋势及范围, 则必然引起相应受热面积的
 改变。

一般认为由 α_{py} 和 θ_{py} 所引起的 q_2 是锅炉
 的一项主要热损失, 在运行中应严格控制其
 数值。从表 5 的计算结果可看出, α_{py} 和 θ_{py} 并

不是影响 η_{th} 的最主要因素(分别排在第 6 和
 第 5 位), 且和 η_{th} 间并不存在明显的线性关
 系, 如在运行中一味强调这两个数值的稳定
 必然带来调整上的困难或失误, 而应根据煤
 质的变化及 q_4 的大小来调整风量、风压, 以稳
 定 η_{th} 。因此本文认为数理统计中的正交计算
 方法在节能工作中有一定的推广应用价值。

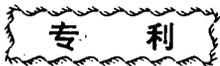
符 号

- q_i ($i = 2, 3, \dots, 6$) 分别表示排烟热损失率、气体未
 完全燃烧热损失率、固体未完全燃烧热损失率、散
 热热损失率和排渣热损失率;
- θ_{py} 为排烟温度;
- α_{py} (排烟过量空气系数) = a_i (炉膛出口过量系数)
 + $\sum \Delta\alpha$ (漏风系数);
- a_{th} 为炉灰份额;
- c_{th}, c_{th} : 分别为飞灰和炉灰含碳量百分数。

参 考 文 献

- 1 小型锅炉设计与改装. 哈尔滨工业大学热能工程教研
 室. 科学出版社, 1987
- 2 可计算性项目的三次设计. 中国现场统计研究会三次设
 计组. 北京大学出版社, 1985

(渠源沥 编辑)



热水锅炉无压运行控制器

专利号: 932220169

本专利技术主要应用在热水锅炉上, 只需将其安装在热水锅炉的回水总管上, 即可实现热
 水锅炉的无压运行, 不必对有压热水锅炉改造, 使炉内压力不大于 0.1 MPa。该产品适用于锅
 炉厂对热水锅炉配套使用和对现有热水锅炉的改造。

服务方式: 省独家转让一次付清 40 万元, 普通许可全国 20 家, 每家一次付清 20 万元。汇
 款 80 元, 即寄专利说明书。

联系人: 黑龙江省海伦市海伦农场建设科 高建伟

邮 编: 152365 电 话: 768233 768232

CONTENTS

- (250)EGT Experience with Gas Turbines Burning Ash-Forming Fuels.....M. Moliere, J. P. Gazonnet, J. P. Vinicersi
- (261)A Dynamic Mathematical Model of SK15HE Gas Turbine And Its Simulation by the Use of a Real-time Simulator.....Lu Zehua, Zhao Shihang, Xu fusheng (*Tsinghua University*)
With SK15HE three-shaft gas turbine serving as an example the authors have set up a dynamic mathematical model for the real-time simulation of a three-shaft gas turbine. On the basis of the special features of the turbine control system a diagnostic detection is conducted of the gas turbine control system with the help of a real-time simulator, thereby solving the contradiction between simulation precision and simulation duration in a satisfactory manner. **Key words:** *gas turbine, mathematical model, real-time simulation*
- (269)Orthogonal Optimization Control of Boiler Thermal Efficiency..... Zhu Jianing (*Nanjing Electric Power Advanced Technical School*)
Through a functional relation for calculating boiler thermal efficiency and by the use of a computation method in mathematical statistics an optimized parameter control value has been determined, which can lead to an enhanced boiler operating efficiency. **Key words:** *boiler efficiency, optimization control*
- (275)The Determination of NO_x Content in Flue Gases of a 600 MW Boiler Installed at Pingwei Power Station and a Study on the Effectiveness of its Reduction..... Yuan Xiaobo (*Harbin Power Plant Equipment Design Institute*), Wu Banqiu (*Harbin Institute of Technology*)
This paper describes the procedures for determining the NO_x content in flue gases of boiler NO_x installed at Pingwei Power Station. A secondary air swinging nozzle has been installed at the boiler top to reduce the NO_x content in boiler flue gases. An analytical study on the effectiveness of such a method was also undertaken. **Key words:** *NO_x determination, NO_x reduction, boiler unit*
- (280)A New Method for Designing the Grate Firing Furnace Arch with a Highly Turbulent a-shaped Combustion Flame..... Huishien, Xu tongmo, Liu Zhongjun, Jiang Huishu (*Si'an Jiaotong University*)
Through an experimental study based on furnace aerodynamics and hydrodynamic theory the authors have come up with a new method for designing a grate firing furnace arch featuring highly turbulent a-shaped combustion flame. When calculated on the basis of an aerodynamic and resultant momentum method, the resultant momentum of the front and rear arch should emerge within the range of $2/3 \sim 4/5$ of the front arch straight section. When an intersection angle of $\delta \geq 110^\circ$ with the front arch straight section is formed the coordination of the front