

文章编号:1000-582X(2006)02-0057-03

## 分时段运行工业锅炉房负荷的最优分配\*

何 大 鹏, 彭 岚, 李 友 荣

(重庆大学 动力工程学院, 重庆 400030)

**摘 要:**提出了一种具有实用性和经济性的分时段运行工业锅炉房负荷的最优分配模型. 利用静态锅炉模型辨识方法得到了锅炉的最佳负荷率, 确立了分配模型的目标函数和约束条件. 通过工程实例检验了提出的负荷分配理论, 并获得了相应的数据. 针对不同的工业锅炉房, 只要得到各台锅炉准确的燃料所耗量的特性方程, 就可以应用该分配模型得到锅炉房负荷的最优分配结果.

**关键词:**工业锅炉; 数学模型; 优化分配; 最佳负荷率

**中图分类号:**TK221

**文献标识码:**A

在造纸、纺织、制糖、橡胶、食品、制药、卷烟、冶金等行业甚至火电厂中, 由于生产工艺的需要, 蒸汽负荷往往存在频繁的大幅度波动. 实践证明, 合理设计的蒸汽蓄热器系统能滤掉供热系统负荷的波动, 稳定整个锅炉房的运行负荷, 从而保证锅炉外部理想的运行条件, 有利于提高整个锅炉房的实际运行效率. 正确计算蒸汽蓄热器的必须蓄热量, 是合理设计蒸汽蓄热器的重要前提条件. 积分曲线法是计算蒸汽蓄热器必须蓄热量的基本方法. 为了减少必须蓄热量以缩小蒸汽蓄热器的体积, 可采用分时段调整锅炉房平均供汽量的方法, 相应地使用周期分段积分曲线法确定蒸汽蓄热器的必须蓄热量<sup>[1]</sup>. 采用分时段调整锅炉房平均供汽量的同时, 锅炉房负荷的最优分配就是文中所要解决的问题, 以期能为工业锅炉房燃烧过程的自动控制提供参考.

### 1 数学模型

工业锅炉房的分时段运行模式, 即将锅炉房 24 h 逐时负荷记录曲线根据计算蒸汽蓄热器最小必须蓄热量的需要分成若干段, 比如在每个时间  $K$  段内, 由于蒸汽蓄热器的作用, 整个锅炉房的负荷就为该时间段的平均负荷, 而锅炉房的各台锅炉就按照合理分配的负荷稳定地运行. 一个时间段结束另一个时间段开始,

锅炉房又处在一个新的负荷水平上, 同样的各台锅炉又以重新分配的负荷稳定运行.

工业锅炉房负荷的最优分配是一个动态优化问题, 数学模型的建立需要合理的目标函数和约束条件. 目标函数应能直接反映锅炉房运行的经济性, 同时尽量保证各台锅炉运行在自己的最佳经济工况区域, 约束条件应充分考虑实际运行过程中各台锅炉性能、状态的优劣. 设锅炉房有  $n$  台锅炉, 每台锅炉的最佳负荷率为  $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ , 对应其单位产汽量最低煤耗, 目标函数取为  $n$  台锅炉偏离最佳负荷率  $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的平方和最小, 则分时段运行工业锅炉房负荷最优分配的目标函数和相应的约束条件如下:

$$\min f(D, X, \beta) = \sum_{i=1}^n x_i (d_i - \alpha_i)^2, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^n x_i y_i d_i = Y_j, \quad i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, k \quad (2)$$

$$d_{\min_i} \leq d_i \leq d_{\max_i} \quad (3)$$

$$x_i = 0 \text{ 或 } 1, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^n x_i \leq n, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

式中,  $X$  为锅炉运行的开关向量,  $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)'$ ;

\* 收稿日期:2005-09-11

作者简介:何大鹏(1980-),男,新疆石河子人,重庆大学硕士研究生,主要从事供热系统节能方面的研究.

$D$  为锅炉实际的运行负荷率向量,  $D = (d_1, d_2, \dots, d_n)'$ ;  $y_i$  为锅炉的额定负荷, (t/h);  $Y_j$  为各时段锅炉房的总负荷, (t/h);  $d_{\min i}, d_{\max i}$  为各台锅炉负荷率的上、下限;  $\beta$  为各台锅炉运行的优先因子向量,  $\beta = (\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n)'$ .

## 2 锅炉最佳负荷率

各台锅炉的最佳负荷率可以由 3 种方法获得, 即锅炉生产商提供的锅炉设计效率曲线、锅炉的实际运行效率曲线以及锅炉实际运行的单位产汽量成本数据库。但是, 锅炉的设计效率与实际运行效率往往有很大的出入。另外, 锅炉的实际运行效率曲线受很多不确定因素的影响, 一般很难得到。文中采用单位产汽量最低煤耗所对应的负荷率为最佳负荷率, 最佳负荷率直接反映了各台锅炉运行的经济性。

应用在线辨识的方法可以求得锅炉负荷与煤耗间的关系。锅炉房的各台锅炉处于稳定运行状态时, 计算机可以在几天内采集输入的煤量和输出的蒸汽流量。根据各台锅炉的实际运行煤耗和负荷数据库, 可以利用最小二乘法辨识各台锅炉的燃料耗量特性方程。采用非线性形式, 可设模型为:

$$Q = a_0 + a_1 F + \dots + a_n F^n, \quad (6)$$

式中,  $F$  为锅炉稳定运行的实际负荷;  $Q$  为锅炉负荷为  $F$  时的煤耗;  $a_0, a_1, \dots, a_n$  为模型的待辨识参数。利用最小二乘法原理, 使模型参数误差的平方和最小, 即:

$$\min f = \sum_{i=0}^n (a_i - a_i^0)^2, \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (7)$$

式中,  $a_i^0$  为模型参数  $a_i$  的真值。在实际工程中, 该模型为二次函数就可以完全满足工程的需要, 则有:

$$Q = a_0 + a_1 F + a_2 F^2. \quad (8)$$

考虑到锅炉的额定负荷为  $y$ , 负荷率为  $\alpha$ , 对式(8)简单变形可得下式:

$$q = \frac{a_0}{y\alpha} + a_1 + ya_2\alpha. \quad (9)$$

式中,  $q$  为锅炉单位产汽量的煤耗。应用式(9)不难求得各台锅炉单位产汽量最低煤耗所对应的锅炉最佳负荷率  $\alpha_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 。

## 3 算例分析

某卷烟厂锅炉房有 2 台锅炉: 1\*10 t/h 锅炉和 2\*10 t/h 锅炉。2 台锅炉的产汽流量上限为 10 t/h, 下

限为 1 t/h。锅炉房为母管制运行, 应用笔者的研究结果, 根据各台锅炉的实际运行煤耗和负荷数据库, 1\*10 t/h 锅炉的燃料耗量特性方程:  $Q = 1.27F^2 + 49F + 58$ ; 2\*10 t/h 锅炉的燃料耗量特性方程:  $Q = 1.85F^2 + 55F + 61$ 。式中:  $F$  为锅炉稳定运行时的负荷, t/h;  $Q$  为锅炉负荷为  $F$  时的煤耗, kg/h。应用式(9)很容易得到锅炉的负荷率与单位产汽量煤耗间的关系如图 1 所示。两台锅炉的最佳负荷率分别为: 1\*锅炉  $\alpha_1 = 0.6758$ , 2\*锅炉  $\alpha_2 = 0.5742$ 。

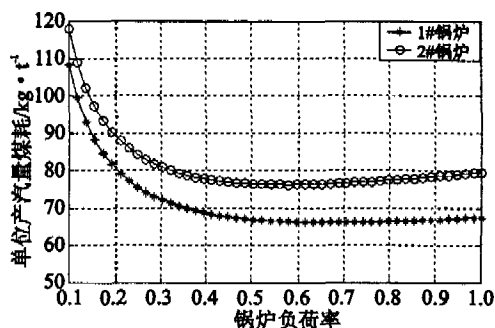


图 1 锅炉单位产汽量煤耗曲线

根据此卷烟厂的 24 h 逐时负荷记录曲线, 利用周期分段积分曲线法<sup>[1]</sup>可以得出锅炉房的分时段运行方案如表 1。

表 1 锅炉房分时段运行方案

| 时段序号                     | I           | II           | III          |
|--------------------------|-------------|--------------|--------------|
| 时间区间                     | 0:00 ~ 7:00 | 7:00 ~ 19:00 | 19:0 ~ 24:00 |
| 区间长度/h                   | 7           | 12           | 5            |
| 平均负荷/t · h <sup>-1</sup> | 10.69       | 13.12        | 11.38        |

根据文中的数学模型, 借助于 MATLAB6.5 优化工具箱 (Optimization Toolbox), 应用序列二次规划法 (Sequential Quadratic Programming, SQP) 并调用 fmincon 函数编制相应的计算机程序, 对模型各时段优化分配问题进行求解。表 2 给出了各时段锅炉房负荷的最优分配结果。

表 2 锅炉房负荷的最优分配结果

| 时段序号    | I          | II           | III          |
|---------|------------|--------------|--------------|
| 时间区间    | 0:0 ~ 7:00 | 7:00 ~ 19:00 | 19:0 ~ 24:00 |
| 1*锅炉负荷率 | 0.585 3    | 0.706 8      | 0.619 8      |
| 2*锅炉负荷率 | 0.483 7    | 0.605 2      | 0.518 2      |

图 2 为分别应用平均分配方法和文中的优化模型所得出的各时间段锅炉房每小时煤耗曲线。可见, 应用文中的优化数学模型, 借助于 MATLAB 优化工具箱对分时段运行工业锅炉房的负荷进行分配, 不仅方便、快捷, 而且具有很好的节能效果。

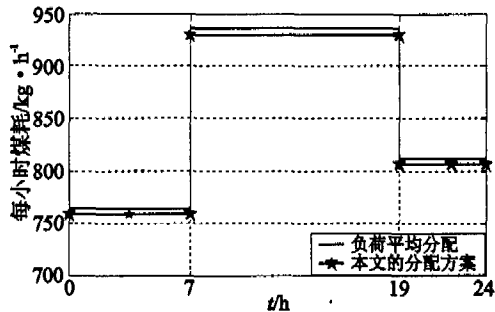


图2 锅炉房各时段每小时煤耗

#### 4 结 论

1) 文中的优化数学模型是针对装有蓄热装置的工业锅炉房提出的,但同样适用于其它的工业锅炉房,只需获得锅炉房内各台锅炉的燃料耗量特性方程。

2) 计算结果表明实行负荷优化分配必须在满足锅炉房总负荷的要求下,尽量减少锅炉房运行锅炉的数目才能取得更好的效果。

3) 此优化方法为运行人员提供了动态的运行分析和操作指导。若进一步与工业锅炉房 DCS 连接,实现实时监控,将进一步体现该优化方法的经济效益。

#### 参考文献:

- [1] 马连湘. 计算蒸汽蓄热器必须蓄热量的周期分段积分曲线法[J]. 青岛化工学院学报, 2001, 22(2): 117 ~ 120.
- [2] 盛德仁, 陈坚红. 供热机组间热电负荷优化分配的研究[J]. 动力工程, 2001, 21(6): 1 560 - 1 563.
- [3] 卢勇, 徐向东. 数据挖掘与锅炉负荷多模型自适应控制研究[J]. 电站系统工程, 2003, 19(4): 49 - 51.
- [4] 徐成贤, 陈志平. 近代优化方法[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [5] 孙德明. 工程最优化方法及其应用[M]. 合肥: 中国科技大学出版社, 1991.
- [6] 苏金明, 阮沈勇. MATLAB6. 1 实用指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2002.

## Optimization of Load Distribution for Industrial Boilers Running in Divided Period

HE Da-peng, PENG Lan, LI You-rong

(College of Power Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** A more practical and economic optimization mathematical model of load distribution for industrial boilers is presented. The optimum load rates of boilers are advanced by the method of static boiler model. The target function is built up, and in particular the restrictions are established. The theory of load assignment is checked through a project case. For various industrial boilers, once the definite characteristic functions of fuel consumption are given, the optimal load assignment can be obtained using this optimization model.

**Key words:** industrial boiler; optimization distribution; mathematical model; optimal load rate

(编辑 陈移峰)