

蒸汽蓄热器容积最优化研究

(东华大学 环境科学与工程学院, 上海 200051) 曹家枞 钟 伟

摘要:建立了蓄热器必需热量最小化的算法模型,并将计算机程序应用于一个实例。计算结果显示了该程序能找到往往比手工计算的结果小得多的最小必需蓄热量,为蓄热器容积最小化,从而为其工程方案的优化创造了条件。

关键词:工业锅炉; 蒸汽蓄热器; 容积; 优化; 计算机程序

中图分类号: TK229.6 文献标识码: A

1 前言

工业锅炉耗用煤炭占全国煤产量的三分之一强,其热效率的高低对我国能源利用率或单位能耗的高低起着举足轻重的影响,而且对环境的污染也有相当大的影响。就全国而言,我国工业锅炉的实际运行平均热效率长期徘徊在60%左右的水平,普遍比锅炉产品鉴定效率低10%左右,全国工业锅炉每年因此多耗煤七千万吨以上^[1,2]。多年来,锅炉制造行业及使用单位为此从锅炉房主辅机的角度作了许多改进和革新,提高了锅炉的热平衡试验效率。然而这些技术进步,并未从根本上改善工业锅炉实际运行时的平均热效率。可见工业锅炉的运行情况是造成实际运行效率远低于热平衡效率的根本原因。

大多数工业锅炉实际运行时负荷的波动很大。在我国99%以上燃煤工业锅炉是层燃炉,其动态特性有很大的时滞,当负荷扰动时,现有的热工调节系统仍难免一段时间内燃烧工况的恶化,各受热面的传热工况也会受到干扰。当负荷扰动较频繁,幅度较大时,锅炉热效率会出现较大的下降。图1为一燃气锅炉的负荷扰动(零到运行负荷之间)频率和负荷水平对其热效率的影响^[3]。可见频率越高效率就越低。只有当负荷扰动周期长达2~4小时时,在高负荷区的热效率与稳定负荷下的热效率(热平衡试验效率)接近。负荷扰动幅度对锅炉热效率的影响可从图2看出。可见幅度越大,热效率越低^[4]。锅炉容量越大以上现象越严重。

适当设计的蒸汽蓄热器系统能滤掉供热系统负

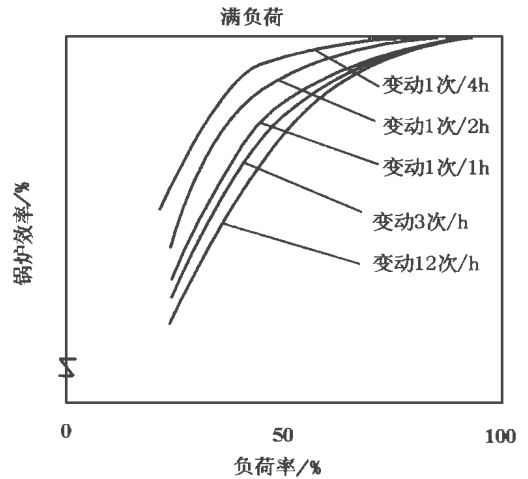


图1 锅炉负荷波动与热效率的关系

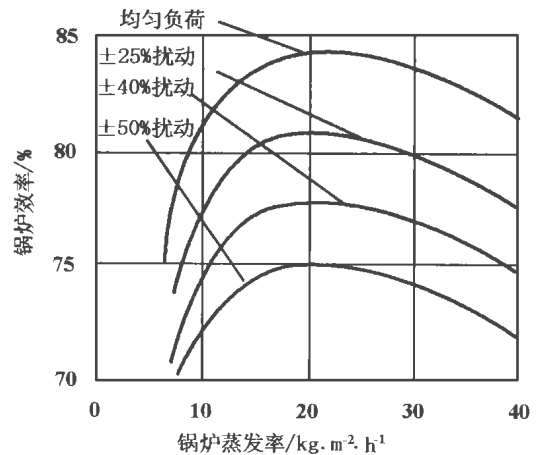


图2 锅炉负荷扰动幅度对热效率的影响

荷的波动,使锅炉的蒸汽出力和压力保持不变,从而保证了锅炉外部理想的运行条件,使其热效率趋近热平衡试验效率,为大大提高我国工业锅炉实际运行热效率提供了可能。因此,蒸汽蓄热器在1983年10月的第三次全国节能技术情报交流会上被列为值得推广的十项节能技术之一;1987年国家经委计委进一步将该项目列为推广的通用节能技术。然而十多年后,此项技术并未得到令人满意的推广。事

实表明, 相对大的初投资以及要求较大的场地是影响蒸汽蓄热器顺利推广的主要的客观原因之一。由于蒸汽蓄热器工程的初投资直接取决于蓄热器本体的价格, 若能够在保证蓄热器的技术与热工性能要求的条件下, 令其容积最小化, 就能尽可能减少投资, 促进蒸汽蓄热器的顺利推广。

2 蓄热器容积的优化

2.1 确定蓄热器容积的基本方法

设在所考虑的锅炉房热负荷周期内, 热负荷为 $q(t)$, 平均负荷为 Q_{av} 。则平均负荷相对于热负荷的盈亏为 $\Delta Q = Q_{av} - q(t)$, 于是积分曲线

$$Q(t) = \int_0^t \Delta Q dt \quad (1)$$

就代表了从规定的起始时刻起到时刻 t 为止累计的蓄热器应当蓄存或放出的蓄热量。 $Q(t)$ 在整个负荷周期内的最大值与最小值之差即为所求的必需蓄热量。由此可很容易算得蓄热器的理论容积和实际容积。

众所周知, 当适当地将热负荷周期加以分段后分别应用式(1), 在整个热负荷周期内可将必需蓄热量显著降低, 从而可大大减少相应的必需容积^[4]。问题是在保证锅炉房热效率基本上为最高的前提下, 这个必需蓄热量应是最小的。

2.2 蓄热器必需蓄热量优化的计算机程序

考虑工业锅炉房的日负荷曲线, 其周期长度为 24 小时。将负荷曲线等时间间隔地取取 24R 个负荷记录, 依次给予顺序号 $S (S = 1, 2, \dots, 24R)$, R 即每小时选取的负荷记录个数。设每工作日能允许的最多负荷调整次数为 N , 此即最多允许分段数。由实际经验知, 层燃炉的相隔 2 或 3 小时的两次负荷调整对燃烧效率的影响甚小。设此间隔为 M (不小于 2 或 3 小时)。在满足上述 N, M, R 和 S 的条件下有众多的可行分段方案。从其中(可行域)找出必需蓄热量为最小, 同时各稳定运行分段区间内的平均负荷都能保证使各锅炉运行在高效率的负荷范围内的最优分段方案。

考虑任意第 k 次分段方案。设将编号为 S 的负荷记录作为所考虑的日负荷周期的起点, 第 i 段的起始及终止时刻分别为 T_{i-1} 和 T_i , 则在该段的时刻 t , 式(1)可改写为:

$$Q_{s,k}(i, t) = \frac{t - T_{i-1}}{T_i - T_{i-1}} \int_{T_{i-1}}^{T_i} q(t) dt - \int_{T_{i-1}}^t q(t) dt,$$

$$(T_{i-1} \leq t \leq T_i) \quad (2)$$

实际上负荷曲线 $q(t)$ 一般不易用解析式表达, 将上式离散化, 有时可使计算更快捷方便:

$$Q_{s,k}(b_i, e_i, j) = \frac{1}{R} [\frac{j - b_i + 1}{e_i - b_i + 1} \sum_{j=b_i}^{e_i} q(j) - \sum_{j=b_i}^j q(j)], \quad (b_i \leq j \leq e_i) \quad (3)$$

式中, j 即负荷记录的 S 系列号, b_i 和 e_i 分别为第 i 段的起点和终点的 S 系列号。一组 b_i 和 $e_i (i = 1, 2, \dots, N)$ 决定了一个分段方案 k 。当 S 取遍 $1-24R$ 时, 分段方案可达 K 个:

$$K = \begin{cases} 1 & (N = 1) \\ 24R - NRM + 1 & (N = 2) \\ \frac{1}{2} \sum_{p_{N-2}=1}^{24R-NRM+1} \sum_{p_{N-3}=1}^{p_{N-2}} \dots \sum_{p_2=1}^{p_3} \sum_{p_1=1}^{p_2} p_1(p_1+1) & (N \geq 3) \end{cases} \quad (4)$$

对于一定的 M 和 N , 必需蓄热量 $Q_{min}^{(M,N)}$ 的最小化问题可表述如下:

$$\begin{aligned} \min \quad & Q^{(M,N)}(S, k, x_2, x_3, \dots, x_N,) = \\ \max_{i,j} \quad & Q_{s,k}(b_i, e_i, j) - \min_{i,j} Q_{s,k}(b_i, e_i, j), \\ & (i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, 24R) \\ \text{s.t.} \quad & b_1 = 1, e_N = 24R; \\ & b_i = MR(i-1) + 1 + x_i, \quad (i = 2, 3, \dots, N) \\ & b_{i+1} - b_i \geq MR, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \\ & e_i = b_{i+1} - 1, \quad (i = 1, 2, \dots, N-1) \\ & x_i \in \{1, 2, \dots, R(24 - MN)\}; \quad (i = 2, 3, \dots, N) \\ & S = 1, \dots, 24R; \quad k = 1, \dots, K \end{aligned} \quad (5)$$

这个非线性规划问题最简捷可靠的寻优策略是用网格法找整体最优解。可很快从穷举的可行方案中得到最优的分段方案及其相应的最小必需蓄热量 $Q_{min}^{(M,N)}$ 。

2.2.1 计算程序的 $N-S$ 图

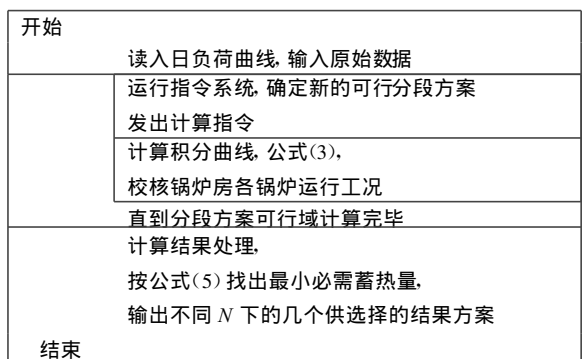


图 3 计算程序 $N-S$ 图

2.2.2 指令系统模型

要穷举所有可行的分段方案, 必须有一个指令系统统筹可行域的计算。先考虑分成两段进行积分计算。这是个基本的过程 $P(I, II)$ (图 4)。24 小时的时间区间可分成 I 和 II 两段。

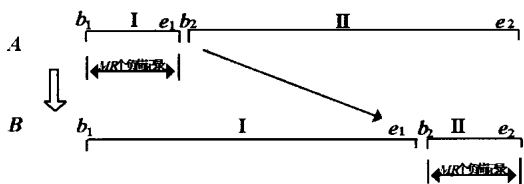


图 4 基本过程 $P(I, II)$

上述过程, 就可覆盖分成两段的所有可行方案。当分段数为 N 时, 只要对过程 P 进行递归调用 (图 5), 并使 b_1 在 $S = 1$ 到 $S = 24R$ 之间循环, 就可获得穷举的结果。考虑到任意第 i 分段的起点和终点的范围分别可用式 (6) 和式 (7) 描述, 不难实现以上过程。

$$b_{i+1} = MR(i - 1) + 1$$

$$\sim 24R - MR(N - i + 1) + 1 \quad (6)$$

$$e_i = iMR \sim 24R - MR(N - i) \quad (7)$$

3 蒸汽蓄热器容积最优化计算实例

上海重型机器厂将一个 155 立方米的蒸汽蓄热器用于有短时蒸汽负荷大幅度脉动的供热系统中,

取得了良好的节能效果^[9]。该厂 24 小时蒸汽负荷如表 1^[9]。使用本文介绍的计算机程序, 读入此 24 小时负荷记录, 取 $M = 3$, 得到当分段数 $N = 4, 5, 6$ 时, 最小必需蓄热量为 9.0 ~ 10.42 吨蒸汽。本文列出 $N = 5$ 和 6 时的结果 (表 2、表 3), 其最小必需蓄热量分别为 9.9 和 9.0 吨蒸汽, 比该厂的计算结果减少了

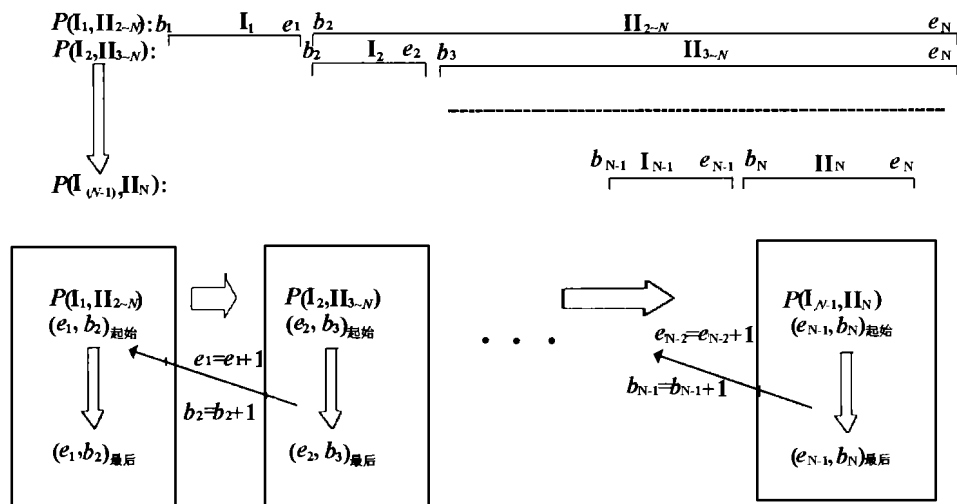


图 5 分段数为 N 时对过程 P 的递归调用

每段自起点 b_1, b_2 分别至终点 e_1, e_2 对负荷曲线应用式 (3)。从 A 方案起, 分别逐次改变 e_1 和 b_2 , 重复过程 $P(I, II)$, 直至 B 方案为止。然后按负荷记录系列 S 依次改变起点 b_1 和终点 e_2 以改变 24 小时负荷周期的起终点。使 b_1 从 $S = 1, 2, 3$ 到 $24R$ 为止, 相应地 e_2 从 $S = 24R, 1, 2$ 到 $24R - 1$ 为止。重复

17.5% 和 25%; 蓄热器的容积也因此分别仅需 128 和 116 立方米, 比厂家使用方案减少了 17.4% 和 25.2% (见表 2)。按本文的计算结果, 该项目的投资应该有显著减少。计算机还给出了优化的锅炉房负荷分段方案及锅炉房运行工况调节的参考方案 (表 3)。

表 1 上海重型机器厂 24 小时蒸汽负荷

| | | | | | | | | |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 时间 | 1:00~2:00 | 2:00~3:00 | 3:00~4:00 | 4:00~5:00 | 5:00~6:00 | 6:00~7:00 | 7:00~8:00 | 8:00~9:00 |
| 蒸汽负荷/ $t \cdot h^{-1}$ | 16 | 16 | 16 | 27.25 | 16 | 16 | 17.125 | 20.5 |
| 时间 | 9:00~10:00 | 10:00~11:00 | 11:00~12:00 | 12:00~13:00 | 13:00~14:00 | 14:00~15:00 | 15:00~16:00 | 16:00~17:00 |
| 蒸汽负荷/ $t \cdot h^{-1}$ | 20.5 | 19.375 | 17.125 | 20.5 | 31.75 | 19.375 | 16 | 27.25 |
| 时间 | 17:00~18:00 | 18:00~19:00 | 19:00~20:00 | 20:00~21:00 | 21:00~22:00 | 22:00~23:00 | 23:00~24:00 | 24:00~1:00 |
| 蒸汽负荷/ $t \cdot h^{-1}$ | 16 | 16 | 16 | 16 | 27.25 | 16 | 16 | 16 |

表2 蓄热器计算结果

| | 蓄热量(蒸汽)/t | 充热压力/MPa | 放热压力/MPa | 单位容积蓄热量/kg·m ⁻³ | 充水系数 | 容积/m ³ |
|----------|-----------|----------|----------|----------------------------|------|-------------------|
| 重机厂方案 | 12 | 1.5 | 0.4 | 86 | 0.9 | 155 |
| 本文计算方案I | 9.0 | 1.5 | 0.4 | 86 | 0.9 | 116 |
| 本文计算方案II | 9.9 | 1.5 | 0.4 | 86 | 0.9 | 128 |

表3 上海重型机器厂锅炉运行工况分段调节方案

| 方案I | 分段区间 | 1:00~5:00 | 5:00~11:00 | 11:00~14:00 | 14:00~17:00 | 17:00~22:00 | 22:00~1:00 |
|-------|-----------------------------|-----------|------------|-------------|-------------|-------------|------------|
| | 锅炉房运行负荷工况/t·h ⁻¹ | | 18.813 | 18.25 | 23.125 | 20.875 | 18.25 |
| 方案II* | 分段区间 | 5:00~9:00 | 9:00~14:00 | 14:00~17:00 | 17:00~22:00 | 22:00~5:00 | |
| | 锅炉房运行负荷工况/t·h ⁻¹ | | 17.406 | 21.85 | 20.875 | 18.25 | 17.607 |

*计算时锅炉负荷率取为0.7~1.1。

如果把本文介绍的计算机程序略作改动,此程序尚能用来在线控制锅炉房的负荷分配,从而随时获得优化的运行工况。事实上,如蓄冷和某些设备系统的生产调度等具有类似模型的系统的优化,在原则上也可以应用这个程序。

4 结论

(1)负荷的频繁波动及低负荷率是我国燃煤工业锅炉实际平均运行热效率长期远低于热平衡效率的主要原因之一。蓄热器是解决此难题的有效手段,然而其较大的投资是此项技术未能顺利推广的重要原因。

(2)借助于本文所述的蒸汽蓄热器容积最优化的计算机程序,能得到合乎技术要求的蓄热器最小容积,从而使蓄热器工程的初投资有望得到较大的降低。

(3)本文所述计算机程序原则上还可以应用于已有蒸汽蓄热器的锅炉房优化负荷分配的在线控制等其它场合。

参考文献

- [1] 张素刚. 引进国外先进技术,提高工业锅炉产品水平,工业锅炉,1998,(4):2~5.
- [2] 蒋耀祖,徐谦,沈秋月. 工业锅炉房燃烧优化控制的研究,动力工程,1987,(5):31~36.
- [3] Tanton D M, Cohen R R, Probert S D. Improving the effectiveness of a domestic central-heating boiler by the use of heat storage. Applied Energy, 1987, 27: 53~82.
- [4] 程祖虞. 蒸汽蓄热器的工程设计与应用,机械工业出版社,1985,77~78,12,15.
- [5] 盖永光,张超杰. 热电联产效益分析及系统构成分析,山东电力技术,1994,(2):20~23.
- [6] 瞿道和. 变压式蒸汽蓄热器在“蒸汽自供”系统中的应用及节能效果. 能源研究与信息,1997,(4):26~31.

(何静芳 编辑)

(上接277页)

较后,可以看出锅炉过热系统过热蒸汽温度的仿真结果与实测结果吻合很好。可见,本文利用集总参数法建立的系统机理模型为主导,并辅之以动态神经网络的在线修正,从而构成的全工况锅炉过热系统仿真模型无论在大扰动下的过渡过程,还是在非稳态工况中都表现出很强的鲁棒性,并能保持很好的工程精度。

参考文献

- [1] 王科俊,王克成. 神经网络建模、预报与控制. 哈尔滨工程大

学出版社,1996,40~58.

- [2] 陈晓东. 电站仿真器锅炉汽水系统建模方法的研究[博士学位论文]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1998,76~84.
- [3] 王广军,章国华. 热力系统动力学及其应用. 北京:科学出版社,1997,70~81.
- [4] Elman J L. Find structure in time, Cognitive Science, 1990, 14(2): 179~211.
- [5] Pados A G. Application of the recurrent multilayer perceptron in modeling complex process dynamics. IEEE Trans. on Neural Networks, 1994, 5(2): 255~266.

(复 编)

right and left side of both the upper furnace and the convection flue. This is generally attributed to the flue gas residual rotation. An analytical study was conducted to address this issue. Moreover, a 410 t/h boiler was selected as a specific object of study in this regard. By the use of a numerical simulation method and based on an initial design scheme, the authors have made changes in such flow parameters as secondary air injection angle and the secondary air inverse tangential flow at the furnace uppermost layer. After a summing-up and analysis of the simulation results a feasible scheme was proposed to lower the deviation of the flue gas speed at the furnace outlet. **Key words:** tangential firing, numerical simulation, three-dimensional flow field, pulverized coal-fired boiler

炉内流场对水冷壁高温腐蚀影响的数值模拟和分析 = Numerical Simulation and Analysis of the Effect of an In-furnace Flow Field on the High-temperature Corrosion of Water Walls in a Tangentially Fired Boiler Furnace

[刊, 汉] / Wang Ying, Qin Yukun, Wu Shaohua (College of Energy Science and Engineering under the Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —284~286, 303

With the help of a numerical simulation method for gas-solid dual-phase flows an analysis was performed of the cause of high-temperature corrosion in water walls of a tangentially fired 1000 t/h once-through boiler. The main cause of such corrosion has been identified as the rectangular layout of the burners at the front and rear walls, which leads to the impingement of flue gases on the water walls. The lack of oxygen in the neighborhood of the wall surface due to an irrational air distribution has also been found to be a main culprit. **Key words:** boiler, water wall, high-temperature corrosion, numerical simulation

舰用燃气轮机排气蜗壳流场数值模拟 = Numerical Simulation of the Flow Field of a Naval Gas Turbine Exhaust Volute

[刊, 汉] / Liu Xueyi, Liu Min (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code 150036), Sun Haiou, Zheng Hongtao, *et al* (Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code 150009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —287~289

Based on a N-S equation and K - ϵ turbulent flow model the authors have conducted the numerical simulation of two types of exhaust volute. Through an analysis of pressure loss and flow field status a performance evaluation was given of the above-cited exhaust volutes. **Key words:** gas turbine, exhaust volute, pressure loss, numerical simulation

适用于燃煤气的 STIG 循环中湿燃气的状态方程 = Status Equation of the Wet Gas in a Steam Injected Gas Turbine (STIG) Cycle Plant Fit for Burning Gases

[刊, 汉] / Chen, Anbin, Shang Demin, Yan Jialu, *et al* (Teaching and Research Department of Thermal Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —290~293

The wet gas in a gas-fired steam injected gas turbine cycle plant is treated as a real gas. Set up is the wet gas status equation by utilizing the corresponding status mode of a two-term Virial equation. The thermodynamic properties of the wet gas have been calculated by the use of the above-cited status equation and a complementary function correction method. Moreover, a comparison was conducted of the wet gas thermodynamic properties with those calculated on the basis of an ideal gas. **Key words:** gasification, steam injected gas turbine cycle, wet gas, status equation

蒸汽蓄热器容积最优化研究 = Optimization Study of Steam Accumulator Volume

[刊, 汉] / Cao Jiacong, Zhong Wei (China National Textile University, Shanghai, China, Post Code 200051) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —2000, 15(3). —294~297

An algorithm model was set up for minimizing the essential heat storage of a steam accumulator with a computer program being applied to a specific example to illustrate this approach. The results of computation indicate that with the help of the above-mentioned program one can determine a minimal heat storage capacity required, which is considerably less than that obtainable by a manual calculation. This makes it possible to attain a minimized heat storage capacity required of an accumulator, creating the necessary conditions for the optimization of a steam accumulator design. **Key words:** industrial boiler, steam accumulator, heat storage capacity, volume, optimization, computer program