文章编号:1000-6761(2004)03-0366-04

模糊自适应方法在垃圾焚烧炉温度控制系统中的应用

沈 凯, 陆继东, 昌 鹏, 李正华, 刘 刚
(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室,武汉 430074)

摘 要:垃圾焚烧炉的运行过程受众多不确定性因素的影响,垃圾焚烧过程的不稳定将导致产生大量新的有害物质,随着人们对垃圾焚烧过程中二次污染问题的日益关注,如何控制垃圾焚烧温度的稳定以减少二次污染的发生已经成为一个重要的研究方向。应用模糊自适应控制策略对垃圾焚烧炉温过程进行控制,并对该控制策略进行了仿真。仿真结果和应用表明:模糊自适应方法具有良好的控制效果,是解决垃圾焚烧过程炉温不稳定的有效途径。图 6 参 6

关键词:自动控制技术;垃圾焚烧炉;自适应控制;模糊控制
中图分类号:TK323 **文献标识码**:A

Application of Adaptive Fuzzy Control Method in Combustion Temperature Process Control System of Incinerator

SHEN Kai, LU Ji-dong, CHANG Peng, LI Zheng-hua, LIU Gang
(State Key Laboratory of Coal Combustion, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: There are many factors which affect the combustion process of incinerators and under the unstable process, it will generate new emissions. How to control the process of the combustion in the incinerators and reduce the emissions from the process has become an important research subject. In this paper, the adaptive fuzzy control strategy is used to stabilize the combustion temperature. From the simulation results and application, we can make a conclusion that the adaptive control strategy with the adaptive factors is a good method to solve the problem of the incineration temperature control objective. Figs 6 and refs 6.

Key words: autocontrol technique; incinerator; adaptive control; fuzzy control

1 垃圾焚烧过程特性

城市生活垃圾经过环卫部门的收集运至垃圾焚烧电站,储存在垃圾堆放池中,然后通过垃圾吊抓取,从料斗进入料井,充满料斗与料井使炉室封闭。根据燃烧控制指令使用液压式加料器按设定的速度将垃圾加入炉内。垃圾在炉内运动的炉排上燃烧。焚烧过程中,一次风由炉排下方的空气室吹入,穿过垃圾层,同时与垃圾发生反应,促使垃圾燃烧。二次风由炉排上方的风管吹入,二次风的主要作用是促使挥发气体和料床上未燃尽的垃圾燃烧[1]。此外,GAH(烟气空气预热器)设有旁路,可以通过调节旁路挡板来改变风温,控制炉温趋于稳定。垃圾焚烧流程示于图 1。

在整个垃圾焚烧过程中稳定燃烧的一个主要指标是控制炉内的温度分布,维持炉内较高的焚烧温度并保持炉温稳定,特别是炉膛温度控制在 850℃~950 ℃。因为较高的炉温有利于垃圾的充分干燥

收稿日期:2003-07-28
基金项目:国家自然科学基金资助项目(50276019)
作者简介:沈 凯(1979-),男,江苏宿迁人,博士研究生。主要从事热力系统优化与控制技术研究工作。

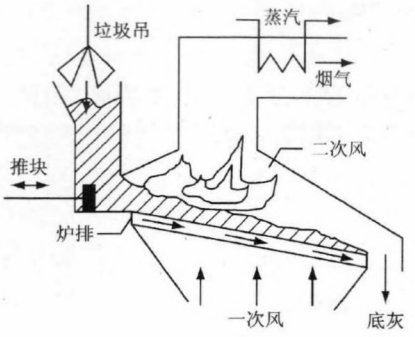

图 1　垃圾焚烧流程图

Fig 1　The MSW incineration process

和挥发份的析出，并促进残碳的燃尽，从而提高垃圾的燃尽程度；同时较高的炉温也有利于减少有害污染物例如二恶英等的排放；此外，稳定炉温于较高水平也有利于提高蒸汽参数，改善蒸汽品质和产量，真正实现垃圾的资源化利用[2]。

2　炉温自适应模糊算法

由以上对垃圾焚烧过程特性的分析可知：在垃圾焚烧炉的燃烧影响因素中，炉温的波动将引起燃尽率的变化，导致灰渣热灼减率超标，同时也会影响蒸汽的生产，降低焚烧炉运行的经济性，因此整个焚烧炉燃烧过程控制的核心就在于炉温控制。目前，在垃圾焚烧控制领域基本上仍然以采用经典的 PID 控制为主，但单一的 PID 控制器在实际的应用过程中效果并不理想，炉温波动仍然较大，其原因是垃圾由于热值和含水量变化剧烈，加料与温度的变化趋势并不相符，加料既有可能导致温度上升，也有可能在一段时间内导致温度急剧下降。而 PID 控制是按照加料将导致温度上升这一基本原则来进行考虑的，从而会造成反向调节。作者在以前的研究中采用了常规的模糊控制器对炉温进行控制，在一定的范围内取得了良好的控制效果[2]。但由于控制规则在调试完成后，就固定不变了，因此对工况变化情况下的跟踪能力有限。本文在原有的阶段性研究成果基础上，对炉温采用增加子适应因子的模糊控制策略，同时设置参数修正模块保证自适应因子的有效性。

2.1　模糊变量

由于控制调节的目标是控制炉温维持在给定范围，因此炉温偏差是必不可少的模糊输入参数。同时，由于炉温偏差的变化情况能够较好地反映炉温波动的敏感性，可以作为另一模糊输入参数。根据实际运行中，垃圾焚烧炉在 850 ℃～950 ℃范围内运行时，蒸汽产量稳定同时通过烟气在线监测系统的监测数据判断，这种工况下烟气污染物的排放较小。取样分析结果表明，此时的灰渣热灼减率也是最小和最稳定的。因此设定炉温给定值为 900 ℃。

影响炉温的关键因素有两个：一个是垃圾给料量的变化；一个是垃圾热值的变化。目前，对垃圾热值还没有一个可靠的可用于工业领域的在线量化方法。而且在现有条件下，在我国由于没有垃圾分选等前处理工艺，入炉垃圾热值是不可控的。因此，系统的控制输出为垃圾给料量，具体到实际的过程中就是加料时间和停料时间。

最终本系统的模糊变量包括：

（1）温度偏差（BE）：温度给定值设为 $T_0=900$ ℃，温度偏差定义为 t 时刻 $e(t)=T(t)-T_0$。基本论域定义为[－60 ℃，＋60 ℃]，量化等级范围为[－6，＋6]。预设的模糊子集为：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，用英文字头缩写为{NB，NM，NS，O，PS，PM，PB}；

（2）温度偏差的变化率（CE）：温度偏差的变化为温度偏差对时间的微分，其基本论域定义为[－10 ℃/20s，10 ℃/20s]，量化等级范围为[－6，＋6]。预设的模糊子集为：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，用英文字头缩写为{NB，NM，NS，O，PS，PM，PB}；

（3）加料时间（JS）：加料时间的基本论域为[90s，150s]，量化等级[－6，＋6]。预设的模糊子集为：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，用英文字头缩写为{NB，NM，NS，O，PS，PM，PB}；

（4）停料时间（TS）：停料时间的基本论域为[210s，460s]，量化等级[－6，＋6]。预设的模糊子集为：{负大，负中，负小，零，正小，正中，正大}，用英文字头缩写为{NB，NM，NS，O，PS，PM，PB}；

语言变量的隶属函数采用三角形隶属函数，如图 2 所示。

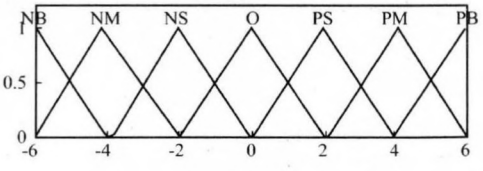

图 2　语言变量的隶属函数

Fig 2　Membership function of fuzzy variables

2.2　自适应算法设计

由于入炉垃圾在热值、含水量、成分等多方面具有不确定性，因此垃圾焚烧过程工况也较为复杂，传统的模糊控制策略在调试完成后，控制规则就固定

不变了。一成不变的控制规则很难适应复杂的焚烧过程的要求。所谓控制规则自适应方法就是增加可变的输入参数调节权重，在不同的工况下，控制输入参数对燃烧工况的影响大小是不同的。当处于 850 ℃以下的低温段时，此时的控制目标是升温，必须避免此时温度偏差的权重过大导致反向调节，因此此时温度偏差的权重应取得较低，一般初设置为 0.2～0.4，温度变化的权重应较高 0.4～0.6。为适应控制规则自适应算法调节的需要，此时的控制规则应采用数学解析方法进行描述[3][4]，设温度偏差 BE、温度偏差变化率 CE、及控制量加料时间 JS、停料时间 TS 的论域选取为：

$$\{BE\} = \{CE\} = \{JS\} = \{TS\} = \{-N, K-2, -1, 0, 1, 2, K, N\}$$

则在全论域范围内带有自调整因子的模糊控制规则其 JS 控制查询表可表示为：

$$\begin{cases} JS = -\langle \alpha BE + (1-\alpha)CE \rangle \\ \alpha = \dfrac{1}{N}(\alpha_s - \alpha_0)|BE| + \alpha_0 \end{cases}$$

式中 $0 \leqslant \alpha_0 \leqslant \alpha_s \leqslant 1$，$\alpha \in [\alpha_0, \alpha_s]$。

在全论域范围内带有自调整因子的模糊控制规则其 TS 控制查询表可表示为：

$$\begin{cases} TS = -\langle \alpha BE + (1-\alpha)CE \rangle \\ \alpha = \dfrac{1}{N}(\alpha_s - \alpha_0)|BE| + \alpha_0 \end{cases}$$

式中 $0 \leqslant \alpha_0 \leqslant \alpha_s \leqslant 1$，$\alpha \in [\alpha_0, \alpha_s]$。

上述控制规则的特点是调整因子 α 在 α_0 至 α_s 之间随着温度误差绝对值 $|BE|$ 的大小呈线性变化，因 N 为量化等级，故 α 有 N 个可能的取值。当取 $\alpha_s = \alpha_0$ 时，即转化为具有一个调整因子的控制规则了。

在上述两式中所描述的量化控制规则体现了按照温度偏差的大小自动调整误差对控制作用的权重，因为这种自动调整是在整个温度偏差的论域上进行的，所以是全论域范围内带有自适应因子的模糊量化控制规则。

这种自调整过程符合人在控制决策过程中的思维特点，并且易于用计算机实现其算法。

2.3 自适应因子的修正算法

在自适应因子的算法中 α_0 与 α_s 是需要重点加以优化的参数，它们决定了自适应因子在控制规则中所起作用的范围。为简化控制算法在本系统中取 $\alpha_0 = 0$，对 α_s 通过修正算法进行优化。

设参数 α_s 的经验方程为[5]：$y = x^T \alpha_s + e$

式中 y 为现场调试测试值；$x = [x_1 \quad x_2 \quad \Lambda \quad x_n]^T$ 为已知系数，它可以随时间变化；e 表示调试时由于观测噪声和方程不准确引起的误差。如果进行 N 次调试，则可得到矩阵方程为：

$$Y_N = X_N \alpha_s + E_N$$

式中

$$Y_N = [y_1 \quad y_2 \quad \Lambda \quad y_N]^T$$

$$E_N = [e_1 \quad e_2 \quad \Lambda \quad e_N]^T$$

$$X_N = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{11} & \Lambda & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \Lambda & x_{2n} \\ M & M & & M \\ x_{N1} & x_{N2} & \Lambda & x_{Nn} \end{bmatrix}$$

根据 N 次调试的结果估计参数 α_s，使得 J 最小。

$$J = \sum_{k=1}^{N} e^2(k) = E_N^T E_N = (Y_N - X_N \alpha_s)^T (Y_N - X_N \alpha_s)$$

令 $\dfrac{\partial J}{\partial \alpha_s} = 0$，得到 α_s 的修正值 $\hat{\alpha}_{满}$ 足 $X_N^T X_N \hat{\alpha}_s = X_N^T Y_N$，在调试次数 $N \geqslant n$ 时，$X_N^T X_N$ 满秩，则可得到所要求的参数修正值：

$$\hat{\alpha}_s = (X_N^T X_N)^{-1} X_N^T Y_N$$

经过以上各过程，我们就获得了完整的垃圾焚烧炉燃烧过程自适应模糊控制策略。

3 仿真结果分析

采用常见的二阶环节对原有的不带自适应因子的模糊控制器和以上的带自适应因子的模糊控制器进行仿真，设被控对象如下[6]：

$$G(S) = K_0 * e^{-\tau S} / (T_1 S + 1)(T_2 S + 1)$$

其中，$T_1 = 2.0s$，$T_2 = 4.5s$，$\tau = 6s$，$T_s = 3S$，$K_0 = 1.8$；自适应模糊控制器自调整因子上限 α_s 为 0.6。同时在仿真中加入阶跃信号。两种控制器对应的仿真曲线如图 3 所示。

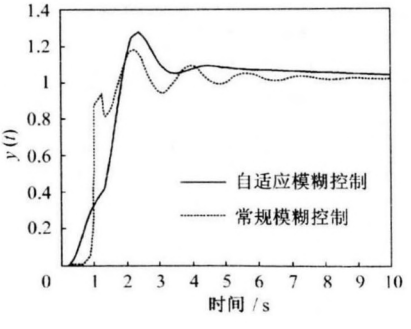

图 3 两种控制策略二阶对象仿真曲线

Fig 3 Responses of two control strategies for the input $y(t)$

从仿真的结果来看：说明自适应模糊控制器的控制效果良好，在加入阶跃扰动的情况下，对比未带自适应因子的模糊控制器，新的控制策略具有过渡过程时间短，抗干扰能力强的特点，具有较好的鲁棒性。这主要是由于自适应因子 α 由系统输入的偏差信号在整个论域范围内进行调整，α 随着 BE 的变化在不断地进行优化，增强了系统偏差信号对控制系统的作用，从而使系统对扰动及时做出响应。同时模糊控制是一种非线性控制，为了提高上升速度，缩短过渡过程，它允许调节工具输出较大的动作，同时又通过规则使其抑制超调，避免调节过程中因动作过度而引起振荡。从而使系统迅速达到稳定。

此外，α_s 的变化对系统的控制特性也有一定的影响。由式 $\alpha=[(\alpha_s-\alpha_0)|BE|]/N+\alpha_0$ 可知：当针对一条具体的控制规则即一种确定工况时，由于 α_0、$|BE|$ 为定值，α_s 的值就直接导致了系统控制性能的好坏。α_s 的变化对控制效果的影响如下图 4 所示。当 α_s 取不同值时，观察模糊控制系统对上述二阶被控对象阶跃扰动下的响应曲线可以看出，不同的 α_s 值所对应的控制特性是不一样的。当 α_s 较大时，如 $\alpha_s=1$，对应的 α 值较大，表明控制规则对温度偏差 BE 加权大，而对偏差变化 CE 加权小，因此阶跃曲线响应较快，产生的超调较大，拖长了调整时间，过渡过程相应较长；当 α_s 减小，如实验中对一条具体规则，当 $\alpha_s=0.6$，α 的值为 0.5，虽然此时对偏差 BE 和偏差变化 CE 的加权相同，超调仍较大，过渡过程也较长；当 α_s 使得 α 稍大于 0.5，如 $\alpha_s=0.75$ 时，$\alpha=0.6$，这意味着控制规则中对偏差的加权稍大于对偏差变化的加权，这种情况不仅超调较小，而且响应时间也较短。

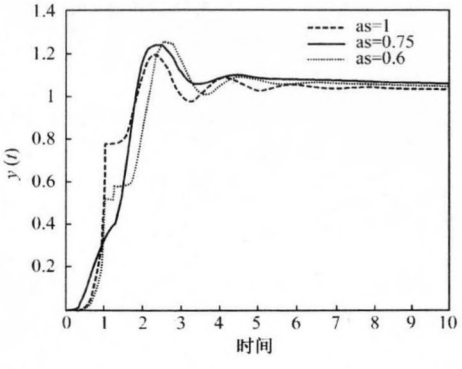

图 4　α_s 对控制效果的影响比较图

Fig 4　Simulation of adaptive fuzzy control strategy when α_s changes

目前，该控制策略存在的主要问题是自适应因子算法中 α_s 仍然需要通过经验方程来确定，其系数矩阵 x 的确定时有一定难度的，这也是今后深化研究的重点。

4　应用

本自适应模糊控制方法已经应用于深圳某台 150t/d 垃圾焚烧炉上，首先采用自适应模糊控制方法对垃圾焚烧过程进行控制。同时取相邻一天的同一时间段的人工控制的结果进行比较示于图 5。对应的比较温度分布图如图 6 所示。采用自适应控制策略后，炉温基本稳定在 800 ℃ 到 950 ℃，炉温波动明显减小。超过 70% 的运行时间，炉温处于 850 ℃到 950 ℃的标准范围内，处于 800 ℃以上的时间超过了 85%。此外灰渣的热灼减率也控制在国家标准以内。

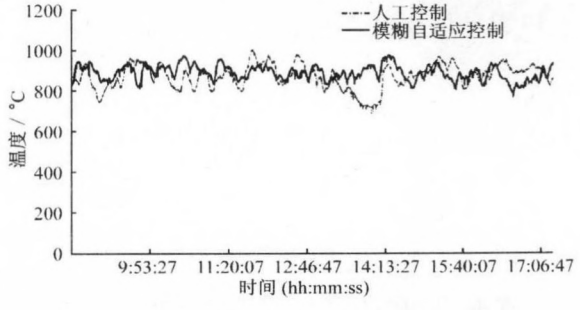

图 5　自适应控制与人工控制对比图

Fig 5　The comparison of fuzzy adaptive control and manual control

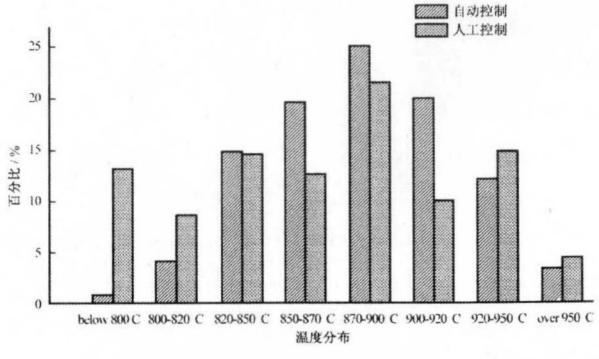

图 6　炉温分布对比图

Fig 6　The temperature range of the comparison data

5　结　论

(1) 带自适应因子的模糊控制器由于综合了模糊控制器和自适应算法，其控制品质优于常规的模糊控制器。

(2)通过根据控制系统的实际运行状态，采用修正算法来调整控制系统的自适应因子，不仅可以使

（下转第 410 页）

家标准还有一定难度，允许参照欧盟关于挥发份低于 10%的 NOx 排放低于 1300mg/m3 的规定[2]比较合理。随着环保要求越来越严格，还应采用新技术进行改造以降低 NOx 排放浓度。

(2) 在无烟煤锅炉 NOx 总排放中热力型 NOx 占不到 20%。

(3) 三次风的投入对于降低 NOx 排放浓度效果明显。

(4) 低一次风速利于降低 NOx 排放。

(5) 适当的二次风配风方式可以降低 NOx 排放。

参考文献：

[1] 毛健雄，毛健全，赵树民，等. 煤的洁净燃烧[M]. 科学出版社.

[2] 张建中. 试论低挥发份燃煤电厂 NOx 排放物的达标难度和前景[J]. **电站系统工程**，1998(14)：2，35～39.

[3] McCarthy K，Laux J. Advanced furnace air staging and burner modifycations for ultra-Low NOx firing systems [J]. **Fuels Combust Technol**，1999，23(1)：179～184.

[4] Kimoto Masayoshi，Tsuji Hirofumi，Makino Hisao，et al. Scale-up of adevenced Low Nox and high turndow pulverized coal burner[J]. **J Jap Inst Energy**，1999，78(6)：404～415.

[5] 曾汉才，朱全利，聂名局，等. 大型贫煤锅炉 NOx 排放特性试验研究[J]. **热力发电**，1999(2)：15～19.

[6] 罗孝良，戴元声. 化学反应速度常数手册[M]. 四川科学技术出版社.

[7] 冯志华，常丽萍，任 军，等. 煤热解过程中氮的分配及存在形态的研究进展[J]. **煤炭转化**，2000，23(3)：6～11.

[8] Shinji K，Takayuki T，Masaru T，et al. Relation between forms functional of coal nitrogen and NOx emission from pulverized coal combus-tion[J]. **Fuel**，1995(74)：1247～1253.

(上接第 369 页)

系统具有较强的自适应能力，对扰动及时响应，而且能够使系统尽快趋于稳定。

(3)本系统提出的自适应控制算法和自适应因子修正算法是合理的，仿真研究结果和现场应用表明：该算法在垃圾焚烧炉炉温控制领域具有良好的应用前景。

参考文献：

[1] Leskens M，Van Kessel L B M，Van den Hof P M J. MIMO closed-loop identification of an MSW incinerator [J]. **Control Engineering Practice**，2002，(10)：315～326.

[2] 龚佰勋，沈 凯，袁宏伟，等. 垃圾焚烧炉稳定性控制研究[J]. **电站系统工程**，2003，19(1)：55～57.

[3] 李士勇. 模糊控制，神经网络和智能控制论[M]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学出版社，1996.

[4] Papadakis S E，Theocharis J B. A GA-based fuzzy modeling approach for generating TSK models [J]. **Fuzzy Sets and Systems**，2002，(131)：121～152.

[5] Martin Fischer，Oliver Nelles，Rolf Isermann. Adaptive predictive control of a heat exchanger based on a fuzzy model [J]. **Control Engineering Practice**，1998，(6)：259～269.

[6] Padmanabhan K T，Bowman C T，Powell J D. An adaptive optimal combustion control strategy [J]. **Combustion and Flame**，1995，(100)：101～110.

(上接第 387 页)

[J]. **热能动力工程**，1998，78(13)：387～391.

[2] Niklas D，Agren，Mats O J. Westermark. Design study of part flow evaporative gas turbine cycles：performance and equipment sizing part Ⅱ：industrial core[C] **ASME** paper No. 2001-GT-0113. Proceedings of ASME TURBO EXPO，June 4～7，2001，New Orleans，USA.

[3] 刘志刚，刘咸定，等. 工质热物理性质计算程序的编制及应用[M]. 北京：科学出版社，1992.

[4] 华自强，张忠进. 工程热力学[M]. 北京：高等教育出版社，1999.

[5] 陈安斌. 湿空气热力性质计算方法[J]. **哈尔滨工业大学学报**，2001，33(6)：799～801，815.

[6] 严家騄，杨玉顺，刘 明. 烃类燃料的燃气热力性质表[M]. 北京：科学出版社，1989.

[7] Ji X. Yan Humidity J. enthalpy and entropy for the humid air form 298 to 573 K and up to 200 bar[C]，Accepted for publication at the 16th European Conf. for Thermophysical Properties，London：2002(9)：14.

[8] Farnosh Dalili，Martin Andren，etc. The impact of thermodynamic properties of air-water vapor mixtures on design of evaporative gas turbine cycles[C]. ASME paper No. 2001-GT-0098. Proceedings of ASME TURBO EXPO，June 4～7，2001，New Orleans，USA.

[9] 童景山. 流体的热物理性质[M]. 北京：中国石化出版社，1996.

[10] 丁 皓，吉晓燕，等. 高温高压下饱和湿空气焓与湿度的预测[J]. **化工学报**，2002，No. 8.

[11] Tsonopoulos C. An empirical correlation of second virial coefficients [J]. **AICHE. J**，1974，20(2).