

# 基于模糊方法的垃圾焚烧炉燃烧控制系统

沈 凯, 陆继东, 刘 刚, 李正华

(华中科技大学 煤燃烧国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘 要:**垃圾焚烧技术作为一种垃圾资源化的成熟技术在国内得到了越来越广泛的应用。垃圾焚烧炉的燃烧过程控制是垃圾焚烧炉稳定运行的基础, 采用基于模糊方法的控制策略对垃圾焚烧过程进行研究, 具体阐述了垃圾焚烧的模糊控制算法并与常规 PID 控制算法进行了比较, 最终在实际设备上进行了连续运行, 取得了较好的效果。

**关 键 词:**垃圾焚烧; 模糊控制; 焚烧炉; 模糊方法

中图分类号: TK323 文献标识码: A

## 1 国内外研究现状

垃圾焚烧技术是一种较为成熟的垃圾资源化利用技术, 在欧美国家已经得到了广泛的应用。在我国, 长久以来垃圾处理以填埋和露天焚烧为主, 不仅占用了大量的土地资源同时露天焚烧又会带来无法估量的二次污染。近几年来, 随着国民经济的发展和环保要求的提高, 垃圾焚烧技术的应用在国内得到飞速发展, 相应的焚烧控制技术的研究也成为一项重要课题。国外对垃圾焚烧过程的研究起步较早, 研究的重点集中在垃圾焚烧数值计算模型以及二次污染物的生成与控制机理方面。20 世纪 80 年代中后期, 日本和欧洲的部分研究者借鉴模糊控制方法在燃煤锅炉的成功应用经验<sup>[1~3]</sup>, 对垃圾焚烧炉焚烧过程进行控制, 取得了一定的进展。近年来, 又有少数研究者采用基于神经网络和遗传算法的控制策略对垃圾焚烧炉进行控制<sup>[4~5]</sup>, 也取得了一定的效果。但目前国内垃圾焚烧现有控制策略仍以 PID 控制算法为主<sup>[6~7]</sup>, 而在实际应用的过程中 PID 控制效果不太理想。很多垃圾焚烧发电厂在实际运行过程中以人工控制为主。在本文中, 作者建立了一种基于模糊方法的垃圾焚烧炉燃烧过程控制系统, 并用于实际的 1 台 150 t/d 马丁炉排式垃圾焚烧炉上<sup>[8~9]</sup>, 取得了较好的控制效果。

## 2 马丁炉排式垃圾焚烧炉工艺特点

在 150 t/d 马丁炉排式垃圾焚烧炉中, 垃圾从料斗进入料井, 并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, 经过烟气空气预热器(GAH)预热过的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。

燃烧控制的目的是维持安全稳定燃烧且控制主汽压力稳定在设定值。安全稳定燃烧的一个主要指标是控制炉膛内的温度分布, 特别是炉排上方烟气温度控制在 850~950 °C, 防止烟温过高引起结焦或者因为烟温过低而出现熄火。为达到相应的控制目标, 主要的控制手段是调节给料量、一次风、二次风和 GAH 旁路风量, 其中 GAH 旁路风量的控制在本台焚烧炉中根据设计, 运行时将其简化操作, 只设置全开或全关。控制的影响因素有: 当垃圾热值稳定, 含水率较低时, 增加给料量或减少风量使炉温升高; GAH 旁路风量的变化会引起炉温变化, 但变化幅度不十分明显; 垃圾热值、含水率的变化影响炉温变化; 负荷变化引起炉膛温度分布发生变化等。

## 3 垃圾焚烧炉燃烧过程控制系统的实现

在垃圾焚烧炉实际控制中, 为保证燃烧控制的精度避免风门调节机构的非线性影响, 通过调试将风门开度与风量的对应关系加以确定。由于本台垃圾焚烧炉所在垃圾焚烧发电厂以供汽为主同时带一

收稿日期: 2004-01-08; 修订日期: 2004-05-11

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, 华中科技大学博士研究生

台 3 000 kW 汽轮发电机组, 负荷变动幅度很大, 因此整个控制方案分负荷粗调和炉温细调两个部分。首先按照蒸汽负荷 ( $P_s$ ) 大小设定给料量和送风量以便快速跟随负荷的大幅度扰动, 称为粗调; 然后根据炉温 ( $T$ )、炉温变化率 ( $dT/dt$ ) 和 GAH 风压 ( $P_{GAH}$ ) 调节给料量和风量大小, 炉膛负压 ( $P_f$ ) 调节则采用随调方式。燃烧控制系统的原理如图 1 所示。

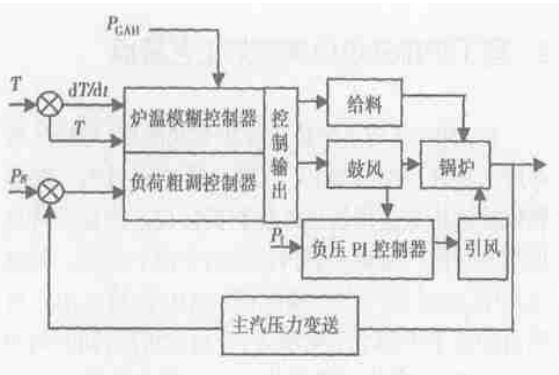


图 1 燃烧控制系统原理图

由于垃圾焚烧炉蒸汽压力的变化, 实际上反映了蒸汽负荷的变化, 即蒸汽的产生量和蒸汽的消耗量(负荷)不相适应。当蒸汽负荷增加时, 如果入炉垃圾量不变, 蒸汽压力就要下降, 为了保持蒸汽压力不变, 当负荷增加时, 就必须适当的改变入炉垃圾量, 增加蒸发量, 以恢复蒸汽的压力。因此, 首先设定蒸汽压力给定值, 当负荷变化导致蒸汽压力波动时, 根据蒸汽压力的偏差值将其模糊化为 5 个状态值: NB、NM、O、PM、PB, 然后根据运行经验由表 1 设定给料量  $M$  和送风量  $N$  的大小。

表 1 模糊子集

$\Delta P(D)$	NB	NM	O	PM	PB
$M$	$M_{NB}$	$M_{NM}$	$M_O$	$M_{PM}$	$M_{PB}$
$N$	$N_{NB}$	$N_{NM}$	$N_O$	$N_{PM}$	$N_{PB}$

表中 NB、NM、O、PM 和 PB 分别表示超低、中低、额定、中高和超高 5 个状态的模糊概念。

炉温细调则依据现场调试和跟班运行的结果得出垃圾焚烧炉温模糊控制规则, 规则的表达式采用产生式知识表达方式, 这种表达方式的优点在于每个规则的形式一致, 并且易于建立与修改, 模糊控制器的输入参数为炉温 ( $T$ )、炉温变化率 ( $dT/dt$ ) 和 GAH 风压 ( $P_{GAH}$ )。具体的表述如下:

风压很高(PB) THEN 大大减少给料量(NB);

IF 炉温很高(PB) AND 慢速下降(NM) AND GAH 风压较高(PM) THEN 适当减少给料量(NM);

.....

IF 炉温很低(NB) AND 快速上升(PB) AND GAH 风压基本不变(O) THEN 给料量基本不变(O)。

将所得到的垃圾焚烧炉炉温模糊控制关系叠加, 就可得到垃圾焚烧炉适用的炉温模糊控制控制规则表。由于三输入的模糊控制规则表规则过多, 鉴于篇幅所限就不再一一列出。

模糊控制规则表建立后, 通过模糊推理、解模糊和模糊查询表的建立, 可得出相应的炉温模糊控制器的给料控制输出值, 该输出值与负荷粗调的给料输出值相比较, 其偏差即为当前给料量变化值。与传统的 PID 控制方式不同的是, 这里给料量的改变是通过调整加料和停料时间来实现的, 是一种间断加料的方式。传统的 PID 控制则是通过调整炉排速度和给料器速度来实现的, 是一种连续加料的方式。相对于连续加料, 间断加料更能适应垃圾焚烧实际运行的需要。由于垃圾热值变化较大同时垃圾成分不同, 它的容积变化也较为明显, 因此与燃煤锅炉不同, 加料器每次行程所加的垃圾虽然体积上基本相同, 但相应的重量和热值却千差万别。连续加料没有体现出垃圾的这种特性, 它是基于与燃煤锅炉类似的燃料量标定方式, 假设加料器每次行程所加燃料量(表现为垃圾容积)即本质上是带入炉内的热量是基本相同的。但对于垃圾而言这种假设是不成立的。相反采用间断给料方式, 通过调整加料时间和停料时间来控制加料量, 根据控制规则判断炉内料层减薄, 就增加加料时间, 减少停料时间, 也就是增加加料的频率, 采用这种基于模糊控制策略的加料频率调节方式, 事实证明是一种相对于连续加料而言更加有效的调节方式。

#### 4 控制软件编写

本系统在实际应用中由于该厂已经建立了基于 FIX 组态软件的在线监测控制系统, 因此本燃烧过程控制软件安装在工程师站上, 处于后台运行。在该厂现有的计算机监控系统中, 工程师站是系统管理员对操作站一级进行管理的窗口, 在工程师站上可以对基于 FIX 组态软件的监控系统进行编程修改甚至重新组态, 因此为方便起见, 软件系统安装平台

IF 炉温很高(PB) AND 快速上升(PB) AND GAH

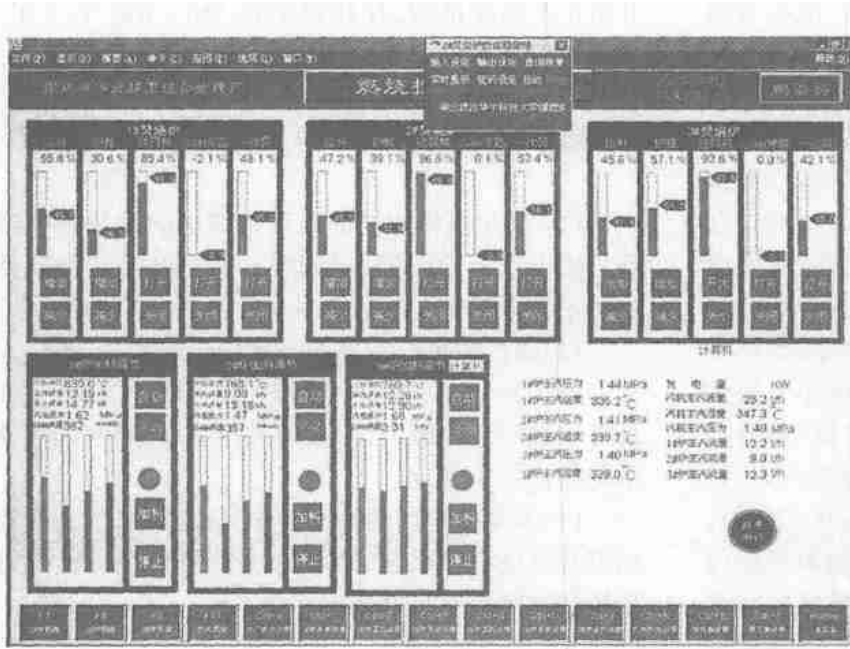


图 2 燃烧控制主界面

选择在工程师站上, 并锁定在加料控制模块上。面向用户的燃烧控制主界面, 如图 2 所示。

燃烧过程控制系统包括: 燃烧过程控制算法软件、SQL Server 数据库系统、Excel 电子表格和 FIX 监控系统软件。其中燃烧过程控制软件用于进行控制算法的在线计算, 获取控制输出值; SQL Server 数据库系统用于存储温度、风压等进行控制算法计算所必须的监测量; Excel 电子表格则用于存储控制算法软件的计算结果; FIX 监控系统软件则向数据库系统传输监测量并获取控制输出来驱动现场执行机构实现燃烧的自动控制。燃烧过程控制系统软件在后台运行。必要时通过管理员账号可调出燃烧过程控制软件的参数与规则调整模块进行修改, 如图 2 顶端所示。

由图 2 可以看出针对 3 台垃圾焚烧炉在 FIX 监控系统软件中分别设置了 3 个燃烧自动控制回路, 反映在图 2 中即为 3 个加料调节面板中的自动与手动按钮, 为便于操作人员明确当前加料所处的状态, 将当前系统所处状态加亮显示。当系统处于自动状态下时, 操作人员的动作将对系统不产生任何作用。

## 5 仿真结果对比

采用常见的二阶环节对原有的 PID 控制器和以

上的模糊控制器进行仿真, 设被控对象如下:

$$G(S) = K_0 \times e^{\delta s} / (T_1 S + 1)(T_2 S + 1)$$

其中:  $T_1 = 2.0 \text{ s}$ ,  $T_2 = 4.5 \text{ s}$ ,  $\tau = 4 \text{ s}$ ,  $T_S = 3 \text{ s}$ ,  $K_0 = 1.8$ ; 同时在仿真中加入阶跃信号作为系统的外部扰动。两种控制器对应的响应曲线如图 3 所示。

从仿真的结果来看, 说明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 PID 控制器, 新的控制策略具有过渡时间短, 抗干扰能力强的特点, 具有较好的鲁棒性。这主要是由于模糊控制器根据规则由系统输入的偏差信号在整个论域范围内进行调整, 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, 缩短过渡时间, 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。

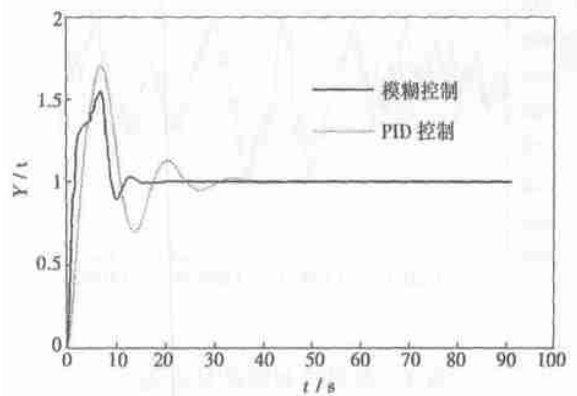


图 3 响应曲线对比图

## 6 控制效果对比

经过研究和现场调试, 在现有计算机监控系统的基础上, 改变了原有燃烧自动控制系统的传统 PID 调节算法, 采用模糊控制策略, 同时优化了加料方式, 使燃烧自动控制系统从原先基本不可用变为正常投入运行。在原有的燃烧自动控制系统情况

下,由于采用了一般过程控制的PID算法,没有考虑到我国垃圾焚烧炉运行的实际特点,因此可用性较差,在连续给料情况下经常出现燃烧温度波动剧烈,严重时甚至达到 $\pm 100 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$ ,而且炉渣垃圾含量高,燃尽率差等问题。现在采用模糊控制后以上情况得到了较大改善,由于系统中增加了风压参数,在一定的配风条件下可以较好地反映料层厚度,因此能够在一定程度上解决燃尽状况无法及时判断的问题。加入温度变化率控制参数,由它和风压参数一起对垃圾热值情况进行综合判断,可以减小一般情况下的垃圾热值变化对炉温稳定的不良影响,经过实际运行,在垃圾成份处于系统的变化范围内时,炉温模糊控制系统可将炉温基本稳定在 $\pm 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右。在对比测试过程中首先采用PID方法对垃圾焚烧过程进行控制,然后投入基于模糊方法的燃烧控制系统,比较见图4。采用模糊控制策略后,炉温基本稳定在 $800 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ,炉温波动明显减小。超过70%的运行时间,炉温处于 $850 \sim 950 \text{ }^\circ\text{C}$ 的标准范围内,处于 $800 \text{ }^\circ\text{C}$ 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。

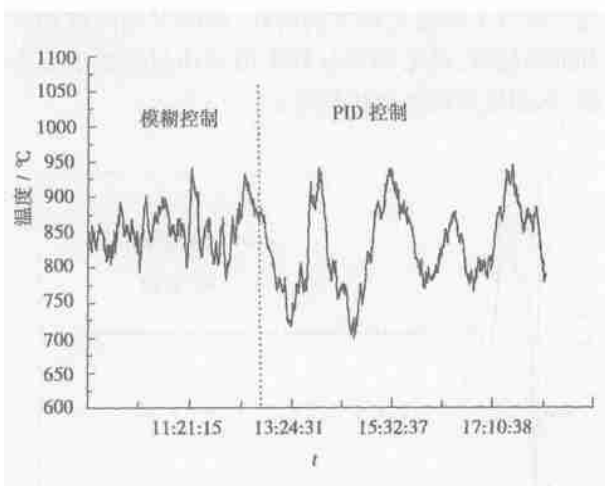


图4 炉温控制效果对比图

但对于热值太低难以着火特别是含水量很大的垃圾,模糊控制策略经实际运行发现也很难使温度

升至正常温度范围,往往徘徊在 $550 \sim 650 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,这种情况下也只有切除自控转入手动投油稳燃。

## 7 结 论

(1) 基于模糊方法的垃圾焚烧炉燃烧过程控制系统由于综合了模糊控制器的优良性能,其控制品质优于常规的PID控制器。

(2) 通过根据控制系统的实际运行状态,结合人工专家经验建立有效的控制规则,不仅可以使系统具有较强的适应能力,对扰动及时响应,而且能够使系统尽快趋于稳定。

(3) 本系统提出的控制算法是合理的,仿真研究结果和现场应用表明,该算法在垃圾焚烧炉燃烧过程控制领域具有良好的应用前景。

## 参考文献:

- [1] GOH Y R, YANG Y B. Development of an incinerator bed model for municipal solid waste incineration[J]. *Combust Sci and Tech*, 2001, 162: 37-58.
- [2] MCCAULEY BELL, REINHART D, SEIR H, et al. Municipal solid waste composition studies[J]. *ASCE Practice Periodical of Hazardous and Radioactive Waste*, 1997, 1(4): 158-163.
- [3] DAVID COOPER, BRAIN KIM C, JOHN MACDONALD. Estimating the lower heating values of hazardous and solid wastes[J]. *J Air and Waste Manage Assoc*, 1999, 49(4): 161-168.
- [4] SUGENO M, KANG G T. Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1986, 18: 329-346.
- [5] ONO H, OHNISHI T, TERADA Y. Combustion control of refuse incineration plant by fuzzy logic[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 1989, 32: 193-206.
- [6] CHEN W C, CHANG NIN BIN, CHEN JENG CHUNG. GA-based fuzzy neural controller design for municipal incinerators[J]. *Fuzzy Sets and Systems*, 2002, 129: 343-369.
- [7] 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.
- [8] 沈 凯, 陆继东, 董统永, 等. 垃圾焚烧炉稳定燃烧的模糊控制系统研究[J]. *中国电力*, 2003, 36(8): 47-50.
- [9] 龚佰勋, 沈 凯. 垃圾焚烧炉稳定性控制研究[J]. *电站系统工程*, 2003, 19(1): 55-57.

# 节 约 能 源, 利 国 利 民!

occupies a middle position between the above-cited two elements, resulting in a volatility expressed as  $As > Cd > Cr$ . Tests have proved that with a rise in temperature the volatility of these elements also gradually increase, and  $As \gg Cd > Cr$ . **Key words:** trace element; release; As; Cd; Cr

高温低氧燃烧过程中  $NO_x$  排放规律研究 = **A Study of  $NO_x$  Emission Mechanism during a High-temperature and Low-oxygen Combustion Process** [刊, 汉] / ZHONG Shui-ku, MA Xian-guo (Power Engineering Institute under the Shanghai University of Science & Technology, Shanghai, China, Post Code: 200093), ZHAO Wu-fei, SHUI Xiang-rong (Shanghai No. 711 Research Institute, Shanghai, China, Post Code: 200011) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 483 ~ 486

An experimental investigation was conducted of the  $NO_x$  emission mechanism during the process of high-temperature and low-oxygen combustion. The  $NO_x$  emission mechanism was identified under various air-preheating temperatures and different oxygen-contents of preheated air. Meanwhile, CFD (computational fluid dynamics) general software has been employed to perform a numerical calculation of the  $NO_x$  emission concentration during the high-temperature and low-oxygen combustion process, resulting in the acquisition of some general law-conforming relationships. **Key words:** high-temperature air combustion,  $NO_x$  emission, experimental investigation, numerical calculation

木屑在固定床焚烧中 HCl 的控制研究 = **Research on the Control of HCl during the Incineration of Sawdust in a Fixed Bed** [刊, 汉] / JIANG Xu-guang, LI Xiang-pai, CHI Yong, et al (Education Ministry Key Laboratory on Energy Clean Utilization and Environmental Engineering under the Thermal Energy Engineering Institute of Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5) — 487 ~ 490

Through tube-furnace tests the dechlorination effectiveness of various dechlorinating agents was investigated. By comparing the dechlorination results of the one and the same dechlorinating agent under various operating conditions the optimum dechlorination conditions were determined. The results of tests indicate that the dechlorination efficiency of calcium-based absorbents is higher than that of magnesium-based absorbents. The optimum dechlorination conditions of CaO can be given as follows: combustion temperature 500 - 600 °C, residence time 5 - 15 min. At a high temperature section the dechlorination efficiency of CaO is reduced drastically due to the high-temperature hydrolysis of dechlorination product  $CaCl_2$ . **Key words:** HCl, sawdust, combustion, CaO, absorbent, combustion dechlorination, pollution control

基于模糊方法的垃圾焚烧炉燃烧控制系统 = **Combustion Control System of a Fuzzy Logic-based Municipal Solid Waste (MSW) Incinerator** [刊, 汉] / SHEN Kai, LU Ji-dong, LIU Gang, et al (National Key Laboratory on Coal Combustion under the Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, China, Post Code: 430074) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2004, 19(5). — 491 ~ 494

As an item of mature technology for refuse waste-heat utilization refuse incineration systems have found increasing applications in China. The combustion process control of a refuse incinerator constitutes the basis for the stable operation of such incinerators. The authors have conducted a study of the refuse incineration process by making use of a fuzzy method-based control strategy. The fuzzy control algorithm of refuse incineration is briefly described and compared with conventional PID (proportional, integral and differential) control algorithm. The continuous operation of a specific unit based on the recommended algorithm has been realized with a relatively high effectiveness. **Key words:** refuse incineration, fuzzy control, incinerator, fuzzy method

改变进气流量实现可调回流区位置的研究 = **A Study of the Realization of an Adjustable Recirculation-zone Location through the Change of Inlet Airflow Rates** [刊, 汉] / FU Wei-biao, GONG Jing-song (Department of Engineering Mechanics, Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal En-