

文章编号: 1000-5013(2007)01-0019-04

# 早期火灾 CO 气体的时间序列建模

龚 雪, 张认成, 杜建华, 余俐莹

(华侨大学 机电及自动化学院, 福建 泉州 362021)

**摘要:** 通过傅里叶变换红外光谱探测技术, 对火灾燃烧过程中产生的 CO 气体体积分数进行探测和定量分析, 并对现场实测数据的非平稳时间序列进行平稳化处理和  $AR(p)$  模型(自回归模型)建模. 通过对模型参数在相平面上的分析, 提取早期火灾发生过程中的特征信息, 建立一种及时的火灾探测、报警的方法.

**关键词:** 早期火灾探测; 气体光谱; 时间序列; 自回归模型

**中图分类号:** X 924.2; X 928.903; TP 212.9

**文献标识码:** A

火灾探测技术需要利用敏感元件检测到由于火灾产生的烟雾、高温、火焰和特有的气体等特征参数<sup>[1]</sup>, 但这些特征参数在非火灾情况下也会发生变化, 有时其变化规律与火灾发生时极其相似. 为了从传感器信号中正确区分出真实火灾信号, 减少误报警, 就必须提取真实火灾信号的特征. 目前, 常用的火灾探测算法主要有趋势算法、持续时间算法、模糊逻辑与神经网络算法和复合偏置滤波算法等<sup>[2-3]</sup>. 这些算法虽然有较高的灵敏度和抗干扰性能, 但是实现较为复杂. 时间序列分析方法是一种成熟的动态数据处理方法. 它通过参数模型对所观测到的、按时间顺序排列的、随时间变化且相互关联的数据序列进行分析<sup>[4]</sup>, 找出反映被观察对象内部隐含的、随时间变化的本质规律, 从而提取时间序列中的特征信息, 对数据变化趋势做出正确的分析或预报.

## 1 傅里叶变换红外光谱探测原理

傅里叶变换红外光谱探测技术, 是基于 Lambert-Beer 定律及气体对红外线的选择性吸收原理的. 将待测气体通入气体池, 利用傅里叶变换红外光谱仪测得气体对红外光的吸收光谱, 吸收光谱图中每点的数据表示该波数处气体的吸光度大小. 每种气体分子在振动过程中都会吸收红外光的能量, 而且特定的分子结构气体只吸收特定波长的红外光, 在实际光谱中表现为在特定的波长上有吸收峰. 因此, 通过测量吸收峰的波长就可以知道气体分子结构, 也就知道是何种气体. 气体吸收峰面积与气体体积分数大小服从 Lambert-Beer 定理<sup>[5]</sup>, 即当吸收系数和气体池长度一定时, 红外光通过被测气体, 则吸光度与气体体积分数成正比关系. 通过测定特定吸收峰的大小, 就可以计算出气体的体积分数.

CO 的体积分数在空气中几乎为 0, 而几乎所有的火灾中都会产生一定数量的 CO, 特别是对于某些特定的有机物, 它们的不完全燃烧现象在火灾初期更为明显, 会很快产生一定量的 CO. 此时, CO 气体的产生比烟雾和气溶胶要早, 因此, 探测 CO 更适合早期的火灾报警<sup>[6]</sup>. 本文采用傅里叶变换红外光谱探测技术, 对大量典型火灾中的 CO 气体数据进行采集, 通过时间序列分析方法研究火灾发生过程中的 CO 气体体积分数变化规律, 提取出早期火灾气体的特征参数.

## 2 非平稳时间序列分析方法

火灾探测信号是一个复杂的非平稳随机过程, 火灾过程中各个时刻产生的 CO 气体体积分数的实

收稿日期: 2006-05-09

**作者简介:** 龚 雪(1983), 女, 硕士研究生, 主要从事现代检测技术与新型传感器的研究; 通信作者: 张认成(1961-), 男, 教授. E-mail: phzrc@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 福建省自然科学基金资助项目(D0210015); 华侨大学科研基金资助项目(06HZR09).

测数据是按照一定的时间先后次序采集的. 它们之间存在着必然的因果关系, 次序是不能相互调整的, 这些数据是一个时间序列, 并且是非平稳的( 均值、方差不是常数, 自协方差不是时间间隔  $\tau$  的函数). 因此, 完全可以采用时间序列的分析方法对 CO 气体体积分数数据进行处理. 对于平稳化后的 CO 气体体积分数数据的时间序列, 满足自回归 AR( $p$ ) 模型<sup>[7]</sup>, 其形式为

$$W_t - \varphi_1 W_{t-1} - \varphi_2 W_{t-2} - \dots - \varphi_p W_{t-p} = a_t \quad t = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

上式中,  $W_t, W_{t-1}, W_{t-2}, \dots, W_{t-p}$  为平稳化后的测定值;  $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_p$  为参数;  $a_t$  是白噪声;  $p$  为阶数.

2.1 时间序列的平稳化

对于非平稳序列的平稳化方法一般有两类<sup>[4]</sup>: 一类是通过差分法, 将确定部分从非平稳时间序列中直接剔除掉; 另一类是趋势项提取法, 从非平稳时序中提取确定性部分, 将确定性部分用明确的函数关系式表达, 剩下的即为平稳时序. 在火灾的发生发展过程中, 被测空间的 CO 气体体积分数将会显著增加, 在时间序列的历程中, 表现为数据是在某一呈上升趋势向性曲线附近随机波动. 因此, 采用趋势项直接剔除法更适合于模型的建立. 对于趋势项的提取, 最常采用的是多项式最小二乘拟合法, 使该非平稳时间序列回归于确定的多项式曲线上, 可以将此多项式曲线剔除, 再对剩下的具有随机特征的平稳时序进行建模.

2.2 模型识别与参数估计

模型识别就是要确定阶数  $p$  的值, 使时序模型能充分描述火灾过程中的特征规律; 而参数估计是确定  $\varphi_j(j= 1, 2, \dots, p)$ , 可采用最小二乘法原则建立自回归(AR) 模型. 对于一个具有  $N$  个数据点的  $p$  阶 AR 模型, 令

$$Y = \begin{bmatrix} x_{p+1} \\ x_{p+2} \\ \vdots \\ x_N \end{bmatrix}, \quad \varphi = \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_p \end{bmatrix}, \quad W = \begin{bmatrix} a_{p+1} \\ a_{p+2} \\ \vdots \\ a_N \end{bmatrix},$$
$$X = \begin{bmatrix} x_p & x_{p-1} & \dots & x_1 \\ x_{p-1} & x_p & \dots & x_2 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ x_{N-1} & x_{N-2} & \dots & x_{N-p} \end{bmatrix}, \quad Y = X\varphi + W.$$

对于一个估计的  $\varphi$ , 要求残差平方和为最小, 即

$$\frac{d(W^T W)}{d\varphi} = 0.$$

由此, 可求得参数  $\varphi$  的最小二乘估计为

$$\varphi = (X^T X)^{-1} X^T Y.$$

2.3 模型适用性检验

从理论上来说, 模型成立的最根本的条件是  $a_t$  为白噪声. 因此, 模型适用性的最根本的检验准则是检验模型残差  $a_t$  是否为白噪声. 另外, 对于模型阶数来说, 阶数太低不能准确反映火灾特征; 阶数过高, 则计算量大、建模过程复杂. 因此对于建立的时间序列模型应进行适用性检验, 根据实验和理论分析综合考虑, 建立适合的时序模型. 进行模型适用性检验的方法很多, 较为常用的是赤池信息准则( Akaike Information Criterion, AIC 准则)<sup>[4]</sup>, 它适合于自回归(AR)、滑动平均(MA) 和自回归滑动平均(ARMA) 模型的检验. 对于  $N$  个数据点的  $p$  阶 AR 模型, 定义准则函数为

$$AIC(p) = N \ln \sigma_a^2 + 2p,$$

式中,  $\sigma_a^2$  为残差方差,  $\sigma_a^2 = W^T W / (N - 2)$ . 显然,  $AIC(p)$  是模型阶次  $p$  的函数, 当  $p$  增大时,  $\sigma_a^2$  减小,  $\ln \sigma_a^2$  减小, 而后一项  $2p$  增大. 因此, 综合考虑模型阶次和残差这两个因素, 取  $AIC(p)$  值最小时的模型阶次  $p$  为适用模型阶次.

3 实验结果及时序建模

本实验系统主要由 NEXUS 傅里叶变换红外光谱仪、10 m 气体池、材料加热装置、辅助传感器、气

体输送管道、燃烧室和检测室构成. 取多种实验材料如木块、胶合板、毛巾、棉绳、纸张、蜡烛、抽烟、厨房液化气等作为火灾火源, 分别进行火灾模拟实验. 由 FTIR 红外光谱仪及气体红外定量分析系统, 探测采集各种材料从开始加热到燃烧热解所得的 CO 气体体积分数数据, 经过多次实验, 以 1 min 为采样时间较为合适. 通过实验检测到无试验火的情况下, CO 的体积分数几乎为 0, 因此实验中检测的 CO 仅为火灾释放的气体, 无外界泄漏 CO 的情况. 纸张、木块、毛巾、棉绳这 4 种试验火在燃烧热解时, 所释放 CO 体积分数  $\varphi(\text{CO})$  的曲线图, 如图 1 所示. 图中的阴燃阶段和火灾初期, 由于是不完全燃烧, CO 有所增加, 明显高于正常燃烧情况下的含量; 随着时间的增长, CO 的体积分数有减少的趋势.

蜡烛、抽烟、厨房液化气等生成极少量的 CO, 如图 2(a) 所示. 图中, 由于噪声相对 CO 较大, 所以 CO 的体积分数变化杂乱无章. 图 1(a), (b) 有不同的过程特征, 通过时间序列建模, 提取它们的过程信

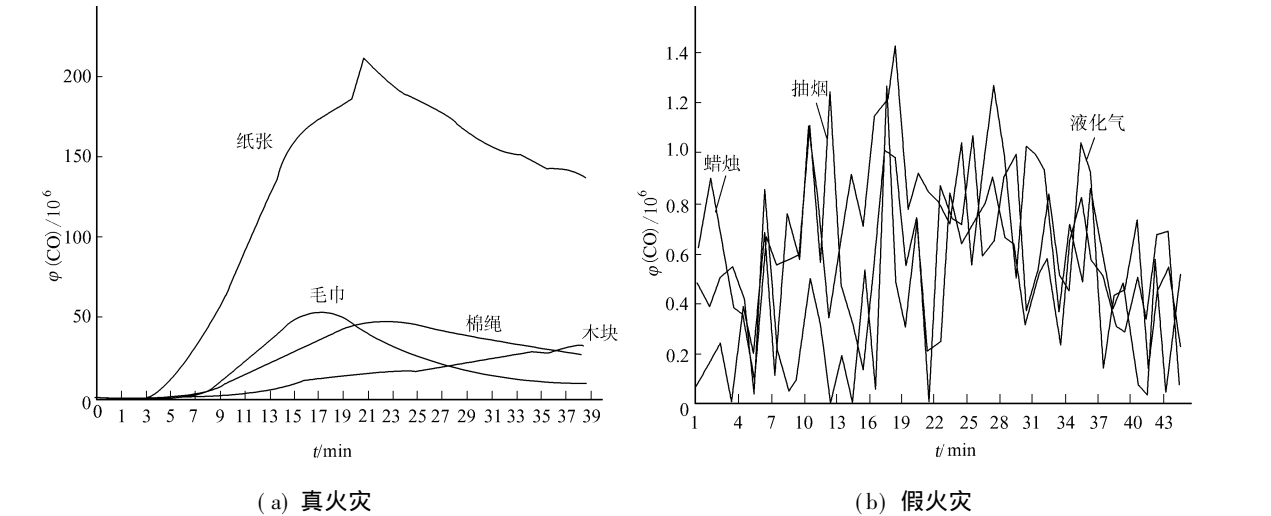


图 1 真火灾释放的 CO 变化曲线图  
Fig. 1 CO concentration curves of fires

息. 根据非平稳时间序列分析原理, 将火灾实验中实测的 CO 体积分数数据进行归一化等预处理, 进而对数据进行曲线拟合, 剔除趋势项, 得到零均值平稳时间序列. 通过验证比较, 采用多项式三次曲线可以取得较好的拟合效果, 如图 2 所示. 图中, 圆圈为测得的 CO 体积分数数据, 实线为拟合曲线. 经过模型适用性检验, 选取使  $AIC(p)$  值最小的阶数, 因此建立阶数为 2 的自回归 AR 时序模型, 并且对模型参数进行分析. 由于图 2 试验火体积分数变化杂乱无章, 其残差标准差  $\sigma_a$  较大, 而图 1 试验火体积分数变化规律明显, 建立的数据模型精度高, 得到的残差分散范围小,  $\sigma_a$  较小. 因此, 采集从材料开始加热到 20 min 的数据, 考察模型参数  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  与各自的残差  $\sigma_a$  标准差的比值分布情况, 如图 3(a) 所示. 图中, 圆圈代表图 2 的试验火, 星号代表图 1 的试验火. 由图 3(a) 可以看出, 两种火源实验的模型参数/标准差在相平面上有明显不同的分布特征, 它们分别位于两个互不交叠的区域内, 图 2 试验火火源的参数主要分布在原点附近. 因此, 模型参数  $\varphi_1, \varphi_2$  能真实反映出真假火灾的过程特征, 能够用来区分不同 CO 体积分数的两种火灾源. 为了提高火灾报警的效率, 分别采集从材料开始加热到 12 min, 13 min 的 CO 体积分数数据. 图 3(b, c) 分别为加热 12 min, 13 min 时的参数/标准差在相平面上的分布情况. 由图可见, 加热 13 min 时采集的数据的模型参数仍然可以准确地将真假火源区分在不同的两个区域内; 而加热 12 min 时采集的数据的模型参数区分性已不明显, 两种火源的分界线趋于模糊. 因此, 对于材料加热 13 min 以后的数据建模, 才能实现火灾的报警.

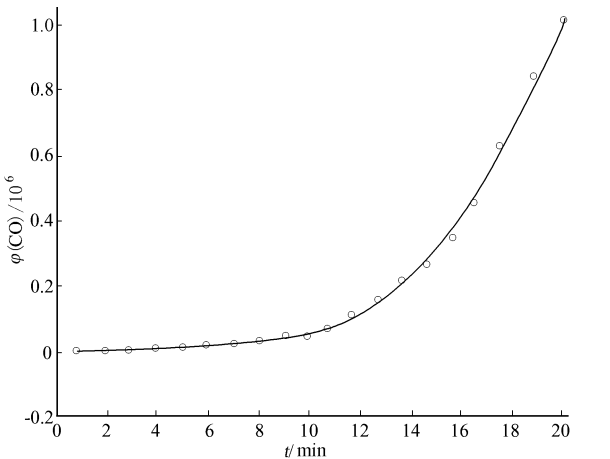


图 2 纸张 CO 体积分数拟合曲线  
Fig. 2 CO volume fraction's fitting curve of paper

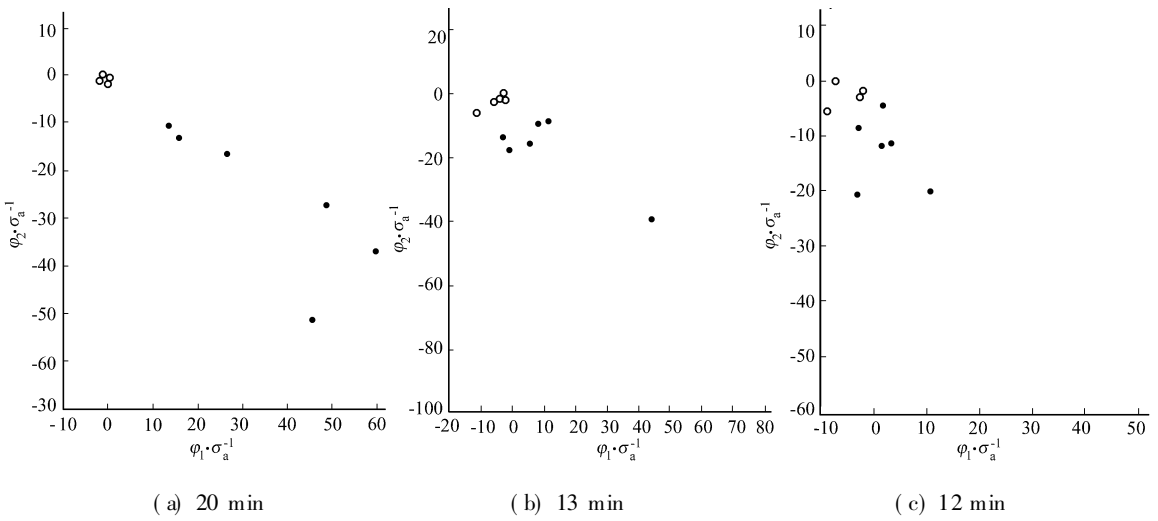


图 3 AR(2) 参数/ 标准差分布

Fig.3 The graph of AR(2) parameter/ mean square deviation

## 4 结 束 语

安全是人类研究的永恒课题, 随着城市发展的不断加快, 火灾隐患也随之增多, 能实现早期预报的火灾探测技术仍为火灾探测领域中研究的热点. 采用非平稳时间序列的分析方法研究火灾早期产生的 CO 气体特征参量, 能够及时、有效地进行火灾报警. 由于时间有限, 基于该算法的实际应用还有待进一步研究.

### 参考文献:

[1] 吴龙标, 袁宏永. 火灾探测与控制工程[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1999: 6-30.  
[2] 王 殊, 杨宗凯. 火灾自动探测的复合偏置滤波算法[J]. 华中理工大学学报: 自然科学版, 1998, 26(6): 8-13.  
[3] 王 殊. 复合火灾信号的一种模糊处理方法[J]. 华中理工大学学报: 自然科学版, 1997, 25(9): 66-68.  
[4] 杨叔子. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1991: 345-354.  
[5] 吴瑾光. 近代傅里叶变换红外光谱技术及应用: 上卷[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1994: 669-699.  
[6] 蒋亚龙, 袁宏永. 红外 CO/CO<sub>2</sub> 气体分析仪在火灾探测中的应用[J]. 消防科学与技术, 2003, (2): 129-130.  
[7] 汪荣鑫. 随机过程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1987: 117-120.

## Time Series Modeling of CO in the Early Fire Detection

GONG Xue, ZHANG Ren-cheng, DU Jian-hua, SHE Li-ying

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

**Abstract:** The time series analysis method has been widely used and succeeded in a lot of fields of engineering. In this paper, we detect the volume fraction of CO in the combustion by the theory of FTIR (Fourier Transform Infrared) spectroscopy, and nonstationary time series method is used in the AR(*p*) model (auto regressive model) distinction. It's feasible to reduce the false alarms and increase sensitivity of early fire detection through the identifying and modeling of the concentration of the gas.

**Keywords:** early fire detection; gas spectrum; time series; auto regressive model

(责任编辑: 黄仲一)