

单输入功率谱统计检测算法的研究*

陈兵¹ 陈升忠² 吴龙标^{1**} 范维澄¹

1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230026; 2. 中国科学技术大学科技实业总公司烽森公司, 合肥 230026

摘要 结合数字信号处理的功率谱分析方法, 分析了火灾信号的频谱特征, 并通过计算火灾信号与非火灾信号的功率谱密度差, 以及大量的实验数据的处理、分析, 研究功率谱统计检测算法在火灾探测信号处理中的应用.

关键词 火灾探测 频谱特征 功率谱 功率谱密度差

火灾是一种失控的燃烧过程, 对其探测和预报的及时性、准确性极为重要. 传统的探测方法都是对火灾信号(如火灾产生的烟气、引起的高温、火焰等特征信号)的确定值与简单的阈值进行比较、积分、趋势等时域处理. 由随机过程的基本概念可知, 非火灾信号是广义平稳随机过程; 火灾信号是非平稳的随机过程, 充其量也只能认为是片断平稳的随机过程, 因此对于这类随机信号可引入信号频域分析中的二次统计处理. 目前, 已有人提出运用功率谱分析和自适应滤波原理将统计检测算法应用在火灾探测中, 若能加以校验和实现, 一定能提高火灾信号探测的能力.

1 火灾信号的频谱分析

由于火灾信号频带较窄, 且是慢变信号, 所以

要实现火灾信号的功率谱统计检测, 就应该首先对火灾信号的频谱特征进行分析, 从而确定火灾探测系统的频率响应范围. 这样, 在火灾探测信号处理中, 选取相同的时间长度进行频谱特征比较, 当出现火灾信号的特征频谱的幅值(也即能量值)大于非火灾信号的特征幅值, 并达到一定阈值的时候, 由于只有火灾信号在这个频域能够达到这样的高度, 因此可以判别出火灾的发生.

下面用具体的频谱图分析火灾信号频谱与无火灾环境信号频谱的差异.

图1是在无火灾环境用光学烟尘密度计采集的信号与4种标准火发生时的信号频谱特征比较, 这里已经将实验数据经过快速 Fourier 变换(FFT), 得到的各信号频谱图. 其中横坐标为频谱分量的第 n 个点, 纵坐标为频分量的幅值. n 与 f_n 的转换如下

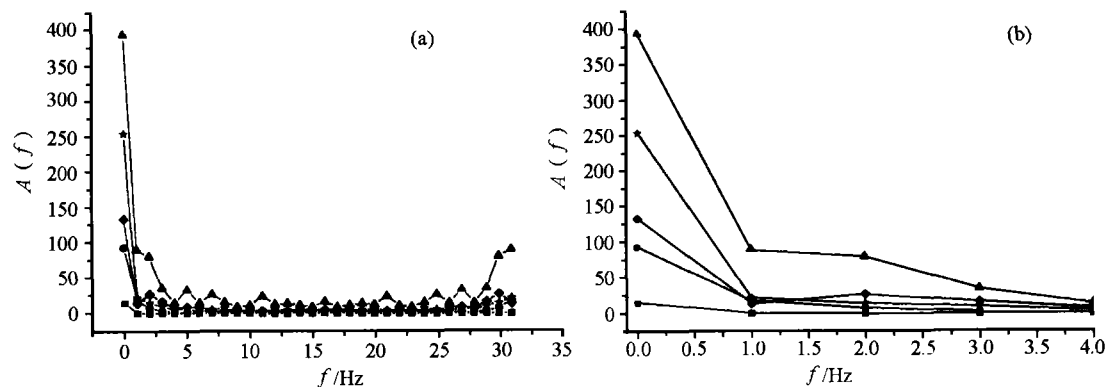


图1 无火灾环境信号于4种标准火的频谱图

(a) 全频段; (b) 低频段; ■ 无火灾环境信号; ◆ SH1 信号; ▲ SH2 信号; ● SH3 信号; ★ SH4 信号

2001-06-20 收稿, 2001-09-14 收修改稿

* 国家“211”工程重点资助项目(批准号: 103-107)

** 联系人, E-mail: wlb@mail.ustc.edu.cn

$$f_n = \frac{n}{NT},$$

其中 f_n 为第 n 个频分量, N 为 n 的最大值, T 为采样周期.

在图 1 的频谱图上, 4 种标准火信号的幅值都大大超过了无火灾环境的信号. 由于火灾烟雾信号最高频率不超过 20 mHz^[1], 在图 1(a) 的比较中, 发现在低频段火灾信号频分量的能量明显高于无火灾环境信号, 在频分量逐渐升高时, 火灾信号的幅值也和无火灾环境信号一样逐渐趋于零. 这个趋势在图 1(b) 低频段局部放大图上十分清楚.

由于上述实验数据的采集都是在标准试验火刚发生即火灾发生的初始阶段, 已经可以分析出火灾信号与无火灾环境信号在同频域内能量幅值的区别, 并且信号幅值高出很多. 因此, 可以利用低频区火灾信号与无火灾环境信号在能量幅值上的显著差异准确地做出火灾信号的判别.

2 单输入功率谱统计检测算法

2.1 算法的引入

基于上述分析, 火灾探测信号 $x(t)$ 是非平稳随机过程, 但可以认为它是片断平稳的随机信号^[2], 对于这类随机信号可以利用信号的短时自相关函数和功率谱密度特征进行火灾检测.

由随机信号分析理论可知, 一个平稳随机信号 $x(t)$ 或(经过抽样后的离散信号 $x(n)$) 可以由功率谱密度 $S_{xx}(\omega)$ (对离散信号为 $S_{xx}(e^{j\omega})$) 来描述, 为了使用信号的功率谱特征进行火灾探测, 首先考虑限定信号在频带 $-\omega_g < \omega < \omega_g$ 内的功率谱密度. 由目前分析可知, 火灾传感器信号主频谱频带较窄^[3], 因此这种限制是合理的, 然后寻找一个非火灾情况下的参考信号 $x_r(n)$, 计算火灾信号 $x(n)$ 与 $x_r(n)$ 的平均功率差即功率谱密度的积分, 当该积分值达到某一阈值时, 说明两个信号之间有较大的差异, 可以判断为火灾. 引入两个信号平均功率差^[2]的定义

$$\gamma = \int_{-\omega_g}^{\omega_g} (S_{xx}(\omega) - S_{x_r x_r}(\omega))^2 d\omega. \quad (1)$$

这里计算功率谱密度的平方是为了保证计算结

$$R_{xx}(n, k) = \begin{cases} 2\mu R_{xx}(n-1, k) - 2\mu R_{xx}(n-2, k) + x(n)x(n-k), & k < 0; \\ \frac{1}{L-k} \sum_{i=k+1}^L x(i)x(i-k), & k \geq 0; \end{cases} \quad 0 < \mu < 1, \quad (7)$$

果大于等于零. 由 Wiener-Khintchine 定理可知, 它们的功率谱密度可以分别由其自相关函数 $R_{xx}(n)$ 和 $R_{x_r x_r}(n)$ 的离散 Fourier 变换表示

$$\begin{aligned} S_{xx}(\omega) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{xx}(n) e^{-j\omega n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{xx}(n) \cdot \\ &\quad (\cos(\omega n) - j \sin(\omega n)), \quad (2) \\ S_{x_r x_r}(\omega) &= \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{x_r x_r}(n) e^{-j\omega n} = \sum_{n=-\infty}^{\infty} R_{x_r x_r}(n) \cdot \\ &\quad (\cos(\omega n) - j \sin(\omega n)). \end{aligned}$$

把(2)式代入(1)式中得到

$$\begin{aligned} \gamma_n &= [R_{xx}(0) - R_{x_r x_r}(0)]^2 + \\ &\quad 2 \sum_{k=1}^{\infty} [R_{xx}(k) - R_{x_r x_r}(k)]^2. \quad (3) \end{aligned}$$

对于一个任意随机过程(由矩阵描述)的抽样矢量

$$\mathbf{X}^T(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-q)],$$

如果设在时间间隔 $(n-q) \leq k \leq n$ 中信号的二次统计不变, 则自相关函数矩阵^[4]元素可以简化为

$$\begin{aligned} R_{xx}(n-i, n-j) &= R_{xx}(n-j, n-i) = R_{xx}(n, k), \\ k &= i-j = 0, 1, \dots, q, \quad (4) \end{aligned}$$

即相应地自相关函数只与时间 n 有关. 用信号矢量的 L 个抽样值组成的观测矢量

$$\mathbf{X}(n-k) = [x(n-k), x(n-1-k), \dots, x(n-L-k)]^T$$

来估计时间 n 相对于位移 k 的自相关序列

$$R_{xx}(n, k) = [\mathbf{X}^T(n) \mathbf{X}(n-k)] h(n), \quad (5)$$

这里 $h(n)$ 是一个窗函数的单位冲激响应, 若采用 Bar-nwell 窗来递归计算式 $R_{xx}(n, k)$, Bar-nwell 窗定义为

$$h(n) = \begin{cases} 0 & n < 0; \\ (n+1)(1-\mu)^2 \mu^n, & n \geq 0; \end{cases} \quad 0 < \mu < 1, \quad (6)$$

则自相关函数的递归算式为

$R_{x_r x_r}(n, k)$ 的表现形式同上. 这样可得到计算火灾探测信号与参考信号的平均功率差的公式

$$\gamma_n(n) = C \left[\left(R_{xx}(n, 0) - R_{x_r x_r}(n, 0) \right)^2 + 2 \sum_{k=1}^q \left(R_{xx}(n, k) - R_{x_r x_r}(n, k) \right)^2 \right]. \quad (8)$$

实际应用中把求和项限定到 q , 参考信号 $x_r(n)$ 可以用 $x(n)$ 本身在非火灾情况下的信号代替, 即用一个长窗从 $x(n)$ 中截取 $x_r(n)$, 长窗能使噪声平滑, 而用短窗计算功率谱密度则可以保证不丢失火灾信息. 最后 γ_n 经阈值比较可给出火灾或非火灾判决. 对于广义平稳随机信号, γ_n 接近为 0, 它随着环境的变化可能发生缓慢变化, 但只要环境改变引起的信号变化在参考窗长以内, γ_n 输出均能保持接近为 0. 在这里, γ_n 就是火灾信号与参考信号(即非火灾信号)的频谱能量的密度差值, 事实上只要 γ_n 达到一定阈值, 就可以判断出是火灾发生. 因此用于判别火灾的判据即是 γ_n 值.

2.2 实验环境、设备及标准试验火

实验在中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室的火灾探测实验台上进行, 它分为试验燃烧室和试验探测室. 实验燃烧室按照 GB4715-93 的相关要求建设, 能满足火灾试验所需要的环境条件. 在实验探测室里, 主要运用了离子烟浓度计、光学烟尘密度计和温度场动态采集系统采集试验数据, 并

对算法进行检测、分析.

在以上实验条件下, 进行了以 4 种国家标准试验火相关数据采集: 试验火 SH1-木材热解阴燃火; 试验火 SH2-棉绳阴燃火; 试验火 SH3-聚氨酯塑料火; 试验火 SH4-正庚烷火. 利用相关试验设备, 对 4 种标准火试验进行数据采集. 同时, 还在试验燃烧室中无火灾实验的状况下进行了无火灾环境信号的采集, 并进行了虚假火灾的模拟, 采集油烟信号数据.

在本文中若无特殊说明, 数据采集的起始时间都为点火时间或材料开始加热时间, 数据采集的结束时间为试验火的结束时间.

2.3 实验数据的处理和分析

要验证单输入功率谱统计监测算法对于火灾信号处理的有效性, 就要对通过这个算法处理后的实验数据进行分析, 找出一个有效、及时判断火灾信号的判据阈值.

图 2 是在无火灾环境下采集的信号数据和虚假火灾情况下采集的信号数据经算法处理得到的 γ_n 值随时间变化的数据图. 从图 2 可以看到, 在火灾环境下, γ_n 值最高达到 0.00012, 而绝大多数值都分布在 0.000004 以下, 即烟气密度变化很小, 其信号能量幅值几乎等于零. 而虚假火灾信号的 γ_n 值最大达到 0.0007. 因此, 可以确定, 判据 γ_n 的阈值最低不应低于 0.0007. 但是, 不能单从虚假火灾信号的最大值分析, 还要具体分析标准火试验信号的 γ_n 值变化.

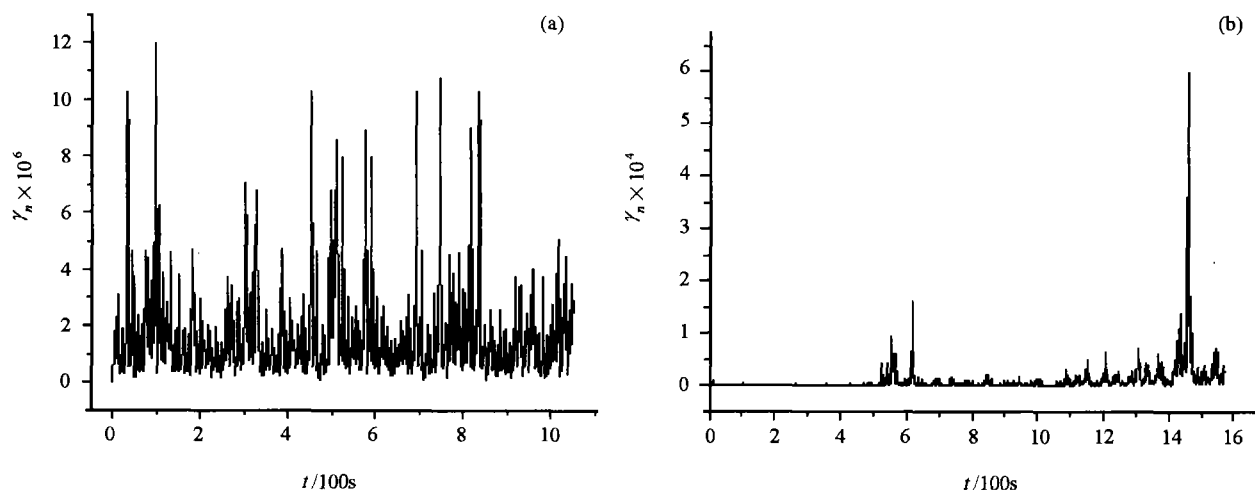


图 2 平均功率差与时间的关系
(a) 无火灾环境信号; (b) 虚假火灾信号

4种标准火实验由光学烟尘密度计所采集得到的信号, 经过算法处理后得到的判据 γ_n 值的变化. 不同的试验火其信号值变化性质是不一样的, 其信号快变化的区域各不相同, 信号快变化时他们的快慢幅度也不一样, 因此计算产生的 γ_n 值即信号能量变化必然不会一样.

火灾信号经处理后, 其判据 γ_n 能在最短的时间内超过选取的阈值, 同时, 阈值必须大于正常环境信号(即无火灾环境信号)和虚假火灾信号的 γ_n 值, 这样才能尽量减少在该环境下的误报警. 分析发现, 4种标准火的信号能量相差数十倍, 这是由于不同的火, 其烟气变化特征不同造成的. 若选取一种峰值最小的标准试验火信号的 γ_n 值来分析, 若对它能够准确、及时地报警, 则另三类标准试验火也能够准确地、及时地报警. 由于 SH3 标准实验火信号的 γ_n 峰值最小, 故选择 SH3 标准实验火信号与虚假火灾信号进行分析.

图3是SH3标准实验火信号与虚假火灾信号的 γ_n 值得比较曲线, 虚假火灾信号的 γ_n 值(实线)在图上相对于SH3标准火信号的 γ_n 值(虚线)呈现出几乎趋于零值, 而SH3的 γ_n 值则有很大的跳变. 考虑到虚假火灾信号采集并没有什么统一的标准, 而燃烧实验室的环境又是一个国家标准试验室, 所以设定的阈值0.02(较细的带箭头线)相对于虚假火灾信号的 γ_n 值达两个数量级, 以防止可出现的其他因素引起的干扰信号的 γ_n 值高峰而造成误报.

阈值为0.02的SH3标准试验火在129s时就可以判别出火灾. 而这在SH3试验火过程中, 还处于火灾的初期阶段, 报警是比较及时的. 通过SH3标准火信号的 γ_n 值分析, 阈值已初步确定, 现在再用这个选取的阈值(0.02)对其他3类标准实验火进行检测. 同样的方法, 可以得到SH1, SH2, SH4的

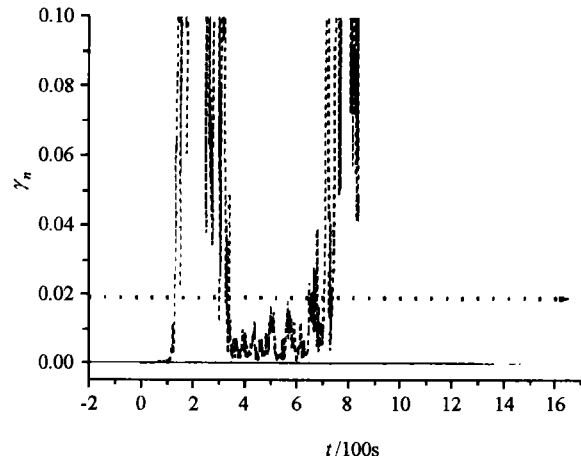


图3 SH3标准试验火信号与虚假火灾信号 γ_n 的比较

阈值响应时间分别为532, 113, 28s, 都仅处于实验火的初期阶段, 报警是十分及时的. 同时, 因阈值高出无火灾环境信号和虚假火灾信号的 γ_n 值很多, 误报率低, 报警是较准确的. 所以对于烟尘光学密度信号的功率谱检测算法阈值的设定是合理的, 可以及时、准确地做出预报并减少误报.

由于本文主要是分析单输入信号的功率谱检测算法, 信号的功率谱检测分析原理是相同的, 但对于不同信号的 γ_n 值, 其表现特征不同, 统一使用一个阈值可能会引起漏报或误报, 因此还需对不同类型火灾探测器的信号分别进行分析.

表1是实验过程中各类火灾探测器的报警时间与功率谱检测算法阈值响应的的时间, 进行比较可以看出, 其中除了SH3标准试验火的判别稍落后外, 其余的与传统感烟探测器相比都有很大的优势, 对该环境下的虚假火灾实验信号都没有产生误判. 所以, 功率谱统计检测算法对于火灾烟气的判别是一种较为有效的方法.

表1 火灾探测实验报警时间(s)比较

火源	功率谱统计检测算法		离子感烟探测器	光电感烟探测器	紫外火焰探测器	火灾图像监测控制系统
	烟尘光学密度信号	离子烟浓度信号				
SH1	532	684	780	780	不报	不报
SH2	113	137	600	780	不报	不报
SH3	128	112	60	不报	2	1
SH4	28	18	120	不报	120	1
虚假火灾	不报	不报	不报	不报	2	2

3 结论

由于功率谱检测算法就是对离散数据序列进行频域分析,即信号能量的计算、火灾信号的能量变化是很大的,所以对于有较大噪声干扰的弱信号的处理,频域分析比时域分析有较大的优势。

本文研究的单输入功率谱检测算法能够较快地识别4种标准火信号,且不会对该环境下的虚假火产生误报,具有较高的及时性和准确性;算法对烟气信号的检测处理明显优于传统算法的处理。总之,功率谱检测算法具有较强的实用性,是火灾探测信号检测的一种新方法,在一定的适应场合内能

及时准确地预报火灾。

参 考 文 献

- 1 吴龙标,等. 火灾探测与控制工程. 合肥:中国科学技术大学出版社,1999
- 2 Klose J. Analysis and simulation of fire signals as a tool for the test of automatic fire detection system. *Fire Safety Journal*, 1991, 17(4): 499
- 3 Klose J, et al. A Fire Detection Algorithm Using Second Order Statistics. London: Fire Safety Science(Proceedings 3. International Symposium)Elsevier Appl Science Publ, 1991
- 4 方兆本,等. 随机过程. 合肥:中国科技大学出版社,1993
- 5 姚伟祥,等. 火灾探测的一种模糊神经网络方法. *自然科学进展*, 1999, 9(8): 739

黄土古气候学研究取得新进展

目前,亚洲内陆包含了北半球最大的荒漠区。这些荒漠是何时形成的?为什么?这些一直是学术界关注的、但没有解决的问题,对理解荒漠的发展也有一定的现实意义。2002年3月14日,英国《Nature》周刊以“亮点文章”的形式,发表了中国科学院地质与地球物理所郭正堂博士等的论文“中国黄土指示亚洲荒漠化起源于2200万年前”。《Nature》杂志高级编辑Langenberg博士专门写了评述,题为“风尘可能解决喜马拉雅的争议”。这项研究工作是在国家自然科学基金资助下,从1998年开始的一项阶段性研究成果,是全球变化领域基础研究的最新进展。《Nature》周刊在新闻发布后,新华社伦敦分社播发了消息,国内外许多媒体竞相作了报道。

在甘肃秦安县境内新发现的厚达253 m的黄土-古土壤序列是全球迄今发现的最为连续完整的晚新生代陆相风尘堆积序列,也是全球独一无二的古环境演化纪录。通过磁性地层和化石研究确定,它的形成时代为2200~620万年前,从而将中国风尘堆积的概念扩展到中新世初期的2200万年前。由于中新世是新生代以来全球环境、古生物和构造等的大变革时期,新发现的这套记录为全球和区域环境演化及相关研究提供了诸多的可能性;大量的古环境信息有待于在未来的研究中开发。美国著名古气候学家、威斯康星-麦迪逊大学Kutzbach教授评论说,“这项工作的主要贡献之一是把地球轨道与气候变化的对比扩展到800万年以前的时段”。

自20世纪80年代后期,古气候学界将亚洲内陆荒漠化作为全球新生代气候恶化的重要标志之一,其发生的时代和原因对理解新生代环境演化的因素和机理有重要意义。新发现的这套风尘堆积揭示出亚洲内陆荒漠化和亚洲冬季风环流起源于2200万年前,比过去的认识至少推前了1400万年。由于亚洲内陆荒漠化起源和发展过程影响到动物、植物和类人猿的迁移和演化,这个认识对若干领域的研究有重要意义。

研究工作所获得的证据还显示出,青藏高原隆升对水汽的阻挡和对大气环流的改变是亚洲内陆荒漠化起源、产生风尘堆积的主要因素;副特提斯海在渐新世晚期和中新世期间的退缩,使亚洲内陆水汽来源减少,对早期荒漠化可能也起了作用;此外,中新世初期持续的全球变冷会减少来自海洋的水汽,可能也影响了干旱化的发展,但其影响对上新世及第四纪的干旱化更为显著。

(供稿:姚玉鹏)