

吴楠, 杨锐, 张辉. 建筑火灾火源参数估计方法综述[J]. 灾害学, 2014, 29(3): 162 – 167. [Wu Nan, Yang Rui, and Zhang Hui. A Review of Researches on the Estimation of Building Fire Parameters[J]. Journal of Catastrophology, 2014, 29(3): 162 – 167.]

建筑火灾火源参数估计方法综述^{*}

吴楠, 杨锐, 张辉

(清华大学工程物理系 公共安全研究院, 北京 100084)

摘要: 长期以来, 保障建筑火灾安全一直是建筑火灾领域研究人员关注的热点问题之一。火灾发生时, 建筑火灾火源位置、强度等参数对于指导消防策略、疏散策略的制定具有重要的现实意义。随着近年来建筑结构的日趋复杂及高层建筑的不断涌现, 火灾发生时如何能快速、有效地对火源参数进行估计成为制约火灾应急救援有力开展的重要因素之一。在分析目前建筑内常用的火灾感知方法的基础上, 首先对国内外建筑火灾火源参数估计方法进行归纳总结, 根据使用信息不同将其划为探测信息估计方法、火灾模型估计方法以及探测信息同火灾模型相结合的方法。之后, 通过对比分析不同算法, 对各算法的优势和不足进行了简要分析。最后, 还对近年来新涌现的基于分布式思想的火源参数估计方法进行了介绍, 预测其在未来的发展方向。

关键词: 建筑火灾; 火源; 参数估计; 信息感知; 综述

中图分类号: X928.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-811X(2014)03-0162-06

doi: 10.3969/j.issn.1000-811X.2014.03.029

建筑火灾一直以来都是发生频率高、危害严重的灾害之一。火灾产生的高温、有毒烟气以及建筑结构损坏都严重威胁着人们的生命及财产安全。随着我国经济的高速增长和城市化进程的加快, 建筑结构日趋复杂, 高层、超高层建筑不断涌现, 这些为建筑火灾安全带来了新的隐患和难题。

首先, 建筑结构的复杂性使得火灾事件具有突发性和隐蔽性, 增加了火灾处置的响应时间。其次, 建筑物内的多种横向竖向管道(如电梯井、通风管道等)增加了火灾蔓延的途径和速度, 加速了火灾发展。最后, 在复杂建筑结构下需要确认疏散路径的畅通及安全, 延误了应急救援措施和自救行为的开展。因此如何尽早、准确地感知建筑火灾事件对应急救援和人员疏散的有效实施有着重要的现实意义。2010年吉林省吉林市商业大厦火灾^[1]以及2013年湖北省襄阳市花园酒店大火^[2]造成的重大生命财产损失的主要原因之一就是未能及时监测火情的发生, 延误了火灾扑救过程, 以至于错过了火灾扑灭与救援的最佳时机。

对火灾进行感知的手段之一是估计火源参数信息, 如位置、强度等。获取的火源参数能够用于指导消防救援策略和人员疏散策略的制定, 降低火灾造成的损失。例如, 估计的火源位置信息

能够帮助消防员实施针对性措施; 估计的火源强度或火灾增长速率等信息可以指导消防力量的投入。同时, 利用火源参数信息, 相关人员还可以通过某种快速的火灾模拟模型对火场温度及烟气厚度等同火灾危险性息息相关的物理量进行预测, 为确定火灾的影响范围、预测火灾态势、制定有效的烟气控制策略提供帮助。

1 建筑中常用的火灾感知方法

目前建筑对火灾的感知仍处于预警阶段, 主要依靠建筑物内部的火灾探测器进行。利用传感器采集火灾中出现的物理特征并通过某种探测算法判断火灾是否发生。传统火灾探测技术主要依靠阈值法、趋势算法等基本火灾探测算法^[3]对火灾特征物理量进行判定, 依据传感器内部的敏感元件通常可分为感温探测器、感烟探测器、气体探测器、火焰探测器、声音探测器以及视频探测器等。

由于探测器工作在噪声环境中, 基于单一物理参量的火灾探测技术易出现误报、漏报现象。因此, 依赖神经网络^[4-5]等信息融合技术的复合火

* 收稿日期: 2014-01-03

修回日期: 2014-02-27

基金项目: 国家“九七三”重大基础研究发展计划(2012CB719705); 国家自然科学基金(91224008, 91024032, 70833003)

作者简介: 吴楠(1986-), 女, 辽宁鞍山人, 博士研究生, 主要从事建筑火灾风险分析与态势评估方法研究。

E-mail: wunan805@126.com

灾探测技术应运而生。该技术能够综合考虑烟、温升、辐射、气体浓度变化等两个或多个物理参数,以对火灾的发生进行更加可靠的判定^[6]。

尽管随着探测领域的高速发展,许多新兴的火灾探测技术都被证实能够有效降低误报率,提高建筑火灾安全性,该方法本身仍具有一些弊端。目前火灾探测器在建筑内的分布位置及数量有限,以致单纯依靠探测器对火源进行感知的可靠性差。对于起火房间内未安装有火灾探测器的情况,临近探测器监测到火情会有一定的滞后,这就不可避免地增加了火灾处置的延迟。此外,虽然当探测器的布置密度和探测精度较高时,利用探测器可以对起火房间有个大致估计,但单一依靠探测技术很难对复杂的火源参数信息进行感知,尤其是火灾态势信息。

2 建筑火灾火源参数估计方法

许多学者就复杂火源信息的感知进行了广泛研究,主要从探测信息、火灾模型以及探测信息同火灾模型相结合的角度入手,为建筑火灾早期感知和处置提供了技术支撑。

2.1 探测信息估计方法

火灾早期,热烟气将向上蔓延至顶棚,当烟气湍流作用较弱,壁面对烟气运动干扰较小时火灾烟气可被认为在顶棚以圆形波形式扩散。根据热烟气波前到达探测器的时间不同,探测器监测到火灾信号(温度、烟气浓度等)会有不同的时间延迟。探测信息估计算法主要就是依据探测器阵列接收信号的延迟,采用时延估计算法实现对火源的定位。根据火源同探测器阵列的距离 r 与探测器阵列中探测器的间距 d 的关系,该方法可进一步分为远场算法^[7-8]、近场算法和远近场相结合的算法^[9-11]。

远场算法适用于 $r \gg d$ 的情景,此时可以将圆形烟气扩散波进一步简化为平面波,如图 1a 所示。热烟气波将首先传播到 S_1 ,继而是 S_2, S_3, S_4 。

假设火灾烟气蔓延速度为 v ,热烟气波通过 S_1, S_2 ,以及 S_1, S_3 的信号延迟分别为 τ_{12}, τ_{13} ,二者同探测器采样频率及传感器阵列内不同传感器之间的信号时延 k_{in} 相关^[10]。由图 1a 可得如下关系式:

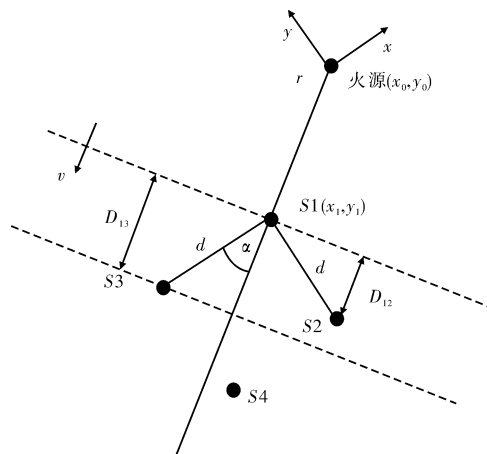
$$|v| \tau_{12} = d \sin \alpha, \quad (1)$$

$$|v| \tau_{13} = d \cos \alpha. \quad (2)$$

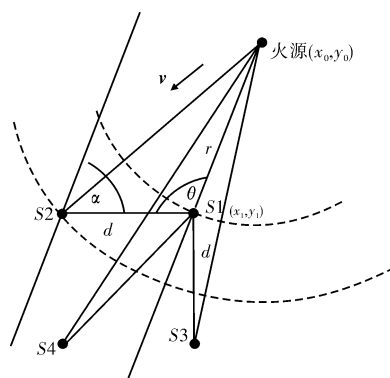
根据式(1)及式(2),火源方位角 α 和热烟气传播速度 $|v|$ 为:

$$\alpha = \arctan(\tau_{12}/\tau_{13}), \quad (3)$$

$$|v| = d \cos \alpha / \tau_{13}. \quad (4)$$



(a) 远场算法^[8]



(b) 近场算法^[9]

图1 应用探测器阵列估计火源位置示意图

为了提高估计火源位置的准确性,通常采用两组传感器阵列,假设二者之间距离为 l ,求得的火灾方位角分别为 α_1, α_2 ,则火源位置 (x_0, y_0) 可以用下式进行估计^[9]:

$$\hat{x}_0 = l \frac{\tan \alpha_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} + x_1, \quad (5)$$

$$\hat{y}_0 = l \frac{\tan \alpha_1 \tan \alpha_2}{\tan \alpha_1 + \tan \alpha_2} + y_1. \quad (6)$$

当火源距离探测器阵列较近时,烟气扩散波不可再视为平面波,但在火灾早期阶段湍流作用较弱且无壁面遮挡的情况下仍可按照圆形波进行处理。以图 1b 所示烟气扩散波及探测器阵列为例,利用 S_1, S_2, S_1, S_3 以及 S_1, S_4 所在三角形的几何关系及探测器接收到热烟气波的时间延迟 τ 可得出如下关系式^[9]:

$$(|v| \tau_{12} + r)^2 = r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta, \quad (7)$$

$$(|v| \tau_{13} + r)^2 = r^2 + d^2 - 2rd \sin \theta, \quad (8)$$

$$(|v| \tau_{14} + r)^2 = r^2 + 2d^2 - 2rd \cos \theta + 2rd \sin \theta. \quad (9)$$

利用以上三个关系式,未知量 $\theta, |v|$ 以及 r 可以求解得出,进而可以得到火源方位角 α 的表达式。

相比于远场算法,近场算法不再对火源和探测器阵列之间的距离进行限制,因而适用性更强,同时近场算法可仅依靠单一探测器阵列对火源位置进行估计,进一步节约了硬件成本。然而近场算法中 $|\mathbf{v}|$ 的求解过程较为复杂,在这种情况下远近场相结合的算法得到广泛应用。该方法先用远场算法计算火源方位角 α 和热烟气传播速度 $|\mathbf{v}|$ 的估计值,再代入近场算法的方程式中,求解 r, θ 以及火源方位角的精确值。

基于火灾燃烧时的温度场(烟气浓度场)特性和阵列信号相关原理,探测信息估计方法能够依赖少量温度(烟气)传感器构成的探测器阵列对火灾进行较为准确的定位。然而由于该方法的应用是以烟气呈平面波或圆形波扩散的假设为前提,并不适用于火灾烟气湍动强度较大的情况,也不适用于固壁阻挡不可忽略的场景。因此,该方法在复杂建筑物内的应用受限。此外,同单纯依靠探测器报警一样,单一使用探测信息仅能对火源进行定位,难以提供火灾强度、发展速率等重要参数。

2.2 火灾模型估计方法

基于给定火灾参数信息,利用火灾模型对火灾动力学过程进行模拟,已经成为一种预测火灾态势、重现火灾场景的常用工具。因此,在使用火灾模型估计火源信息的同时通常可以预测火灾态势。

事前模拟^[12](blind modeling/priori prediction)是应用火灾模型进行参数估计与态势预测的一种常用方法。该方法在建立火灾模型时仅依靠火灾初场信息,而对于真实的火灾场景细节,如燃料特性、热释放速率等,都不进行具体描述。可以基于文献、相似的火灾场景或者模拟人的主观推断构建这些信息。目前利用火灾模型进行事前模拟的研究^[12-16]较少,其中Guillermo等人^[16]曾应用round-robin方法对真实火灾场景建立事前模拟模型,通过对7个小组独立模拟得出的10组结果进行无差异对比,估计火灾的热释放速率、预测火灾的温度场及烟气场变化。在该研究中,各组的模拟结果呈现了较大的差异,同实验结果偏差也较多。

针对真实火灾参数的高不确定性,概率抽样方法为使用火灾模型重建火灾场景提供了另一种可能。通过蒙特卡洛等抽样方法对火源参数的概率分布函数进行抽样,再利用火灾模型对生成的火灾参数样本进行模拟,预测火灾态势^[17]。这种方法能够综合考虑火源参数不确定性对火灾态势发展的影响,然而,对于复杂的火灾场景,火源

参数的高不确定性使得该方法的计算效率较低,不适用于实时的火灾应急场景。在上述方法基础上,一种计算效率较高的方法——矩积分方法被提出。Upadhyay等人^[18]曾利用矩积分方法考虑热释放速率不确定性对烟气厚度的影响,通过对从文献中或依据专家经验得到的相关参数的概率分布进行抽样,使用火灾模拟工具以及累积分布函数重建方法,获得火灾烟气高度的概率分布。

火灾模型依赖输入参数对火灾动力学过程进行模拟,目前已有的研究手段,如事前模拟方法,概率抽样方法,由于不能提供准确的模型输入信息所得到的模拟结果具有高不确定性。此外,目前大多数火灾模型的计算复杂性较高,且将随着建筑尺寸的增加非线性增长,因而无法实现在线实时模拟。综上,火灾模型方法目前尚无法为火灾应急提供快速、可靠的结果^[19]。

2.3 探测信息同火灾模型相结合法

从前两种方法可以看出,单独利用探测器仅能对火灾参数进行简单初步的估计,在不考虑火灾动力学过程的前提下难以预测火灾强度。而使用火灾模型对火灾参数进行预测估计时,由于只强调了动力学过程,没有利用可用的火场信息,模拟结果不确定性较高。因此,如果能结合上述两种方法,将探测信息引入火灾动力学模拟过程则可以在很大程度上弥补前两种方法的不足。用探测信息同火灾模型相结合的方法对火源参数进行估计的研究已经开展了很长时间,根据具体估计算法,可将其分为直接方法、优化方法和概率方法三种。

2.3.1 直接方法

直接方法是利用已知的探测信息直接对火灾动力学相关的方程组进行反向求解。Davis等^[20-21]开发了一种探测器驱动的火源参数估计模型,利用建筑内顶板射流温度或烟气浓度的探测信息,通过反解二者同火源位置和强度的近似解析关系式来估算火源位置和强度。Lee等^[22]提出了一种连续时间的反演方法,不需收集整个模拟时间域内的测量数据,可以在每个时间间隔,通过利用有限差分法逐步反算出当时的火源位置与强度,能够在一定程度上克服数值反向求解算法的不稳定性。

然而,由于火灾动力学方程的非线性程度较高,尤其对于多室火灾场景,其反向求解过程通常十分复杂,且稳定性差。目前直接方法仍只适用于单室火灾或者火灾房间已知的场景下。

2.3.2 优化方法

优化方法将需要估计的火灾参数视为优化变

量,通过构造探测信息和火灾模拟信息的目标函数,求解最优估计值,使其产生的模拟结果最大程度的与测量信息相匹配。从1990年代开始,就有学者利用穷举搜索法、梯度优化法等传统优化方法对火源参数进行估计。近年来,随着遗传算法、模拟退火算法、神经网络等演化类优化方法不断发展,应用优化方法对火源参数进行估计已经成为一种重要手段。

Richards等^[23-24]预先利用区域火灾模型模拟各探测器的报警时间,通过对528种场景的穷举搜索得到使测量值同模拟值最相近的火源位置和强度。Neviakas, Trouvé等人^[25-26]则利用遗传算法求解热释放速率的平均值。Kristopher等人^[27]则采用梯度优化算法,利用瞬时温度测量值重建了热释放速率的变化曲线。

相比于直接方法,优化方法的应用性较强,可以求解非线性较强的多室火灾火源参数估计问题。然而,该方法通常只求解一个最优解作为估计值,不能提供整个关键区域的信息。此外,由于无法直接考虑探测信息和火灾模型误差,最优解的准确性对探测信息和火灾模型模拟结果的质量依赖性较高。为了确保最优解可靠,通常需要重复求解以进行不确定性分析。

2.3.3 概率方法

相比于优化方法,概率方法可以直接将测量误差与模型误差引入参数估计过程,在给定火源参数先验概率分布的条件下推断出一定置信度下火源参数的后验概率分布。近年来,贝叶斯理论与蒙特卡洛抽样相结合的概率方法已经广泛用于源参数估计研究中,包括:大气污染物源项估计^[28]、室内污染物源项估计^[29],以及建筑火灾源项估计^[30]等。

贝叶斯公式可表示为:

$$P(\mathbf{X}|\mathbf{Y}) = P(\mathbf{Y}|\mathbf{X})P(\mathbf{X})/P(\mathbf{Y})。 (10)$$

在火源参数估计中, \mathbf{X} 为不确定火源参数构成的向量,如火源位置、强度; \mathbf{Y} 为建筑内温度探测信息构成的向量; $P(\mathbf{X}|\mathbf{Y})$ 表示探测信息 \mathbf{Y} 下火源参数 \mathbf{X} 的条件概率分布,又称后验分布; $P(\mathbf{X})$ 为火源参数的先验分布,可以根据火源的已知信息和事前判断给定; $P(\mathbf{Y}|\mathbf{X})$ 为给定火源参数 \mathbf{X} 时探测值 \mathbf{Y} 的条件概率,通常称为似然概率或似然函数。考虑到探测信息同火灾模型模拟值的不确定性,假设二者的误差服从高斯分布,则似然函数可表示为^[30]:

$$P(\mathbf{Y}|\mathbf{X}) = \prod_{i=1}^n \prod_{j=1}^s P(Y_i^{(j)}|\mathbf{X}) \propto \exp\left\{-\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^s \frac{[F_i^{(j)}(\mathbf{X}) - Y_i^{(j)}]^2}{2[\sigma_{Y,i}^{(j)2} + \sigma_{F,i}^{(j)2}]}\right\}。 (11)$$

式中: s 和 n 分别为探测器个数和每个探测器能够提供的测量值数目; F 代表利用火灾模型求解所得的模拟值; σ_Y, σ_F 则分别代表了探测信息、模拟信息误差分布的方差。

由于直接计算式(10)的积分项比较复杂,尤其在参数空间维数较高的情况下,实际应用中通常使用MCMC(Markov Chain Monte Carlo 马尔科夫蒙特卡洛)抽样方法对其进行求解。该方法可以直接产生一组目标分布为火源参数后验分布的抽样点,来提高反演算法的效率。^[28]

郭少东等人^[30-31]首先将基于贝叶斯理论的MCMC抽样方法应用于建筑火灾火源参数估计中,对多房间场景的火源位置和强度同时进行了推断。

概率方法同优化方法一样适用于处理强非线性的多室火灾问题。同时,相比于优化方法该方法能够直接考虑测量信息与模拟结果的不确定性,从而易于衡量估计结果的可靠性。此外,该方法给出的不再是单一的最优解,而是参数所有可行解上的概率分布,这对于应急救援更有指导性作用。

2.3.4 基于分布式思想的概率方法

随着建筑复杂程度的增加,尤其高层建筑的不涌现,上述三种方法已不能满足应急救援对火源参数估计算法在可靠性及实时性上的需求。传统优化方法和概率方法中涉及的探测信息和模拟信息都是基于整个建筑的。随着建筑规模的扩大,探测器数目将不断增多以保证建筑火灾安全,这不仅增大了算法需要处理的信息数量,降低了算法效率,同时也增大了建筑内信息传输系统的压力,影响了信息的准确性。此外,火灾模型的计算复杂度也随建筑尺寸的增大而非线性增加。为实现火灾参数的实时估计,上述传统方法需要离线生成火灾模拟值。这种非实时的火灾模拟没有体现出真实的火灾场景,增加了待估计参数向量的维度,同时也提高了估计结果的不确定性。

为了解决上述问题,已有学者将目前已应用到结构振动控制、电力系统等领域上的分布式控制思想引入建筑火灾火源参数估计中,将复杂问题拆分为若干子问题进行求解。目前已有的用于估计建筑火源参数的分布式算法是在传统贝叶斯、MCMC抽样相结合的概率方法的基础上使用分布式理念处理探测信息^[32]。该方法首先构建建筑的分区结构及各分区的通信拓扑关系,之后基于局部信息(本区或者以及临区的探测信息)对火源参数进行估计。其结果表明使用少量高质量探测信息对火源参数进行估计既可以保证算法的准确性

又能够明显提高算法的效率。

然而,该方法仅在探测信息的获取上采用分布式思想,其火灾模型仍是基于建筑的全局结构,需要事前对可能的多种火灾场景进行模拟,这在一定程度上制约了该方法的准确性。可以预见的是,如果能够将分布式思想同样应用于火灾模型中,即将原本基于全局结构的火灾模型离散为若干个只基于局部(本区或者以及临区)结构信息(如建筑几何参数、通风口参数等)的子模型,火灾模型的计算复杂度将不再随着建筑尺寸的增长而增长,这使得火灾模型的在线模拟成为可能。

3 总结

建筑火灾火源参数估计可以为火灾应急救援提供支撑性信息,目前实现手段主要可以分为探测信息估计方法、火灾模型估计方法以及探测信息同火灾模型相结合方法。其中,前两种方法由于未能将火灾的实时探测信息同其动力学过程相结合,应用范围有限。根据估计算法使用的数学模型,第三种方法可进一步划分为直接方法、优化方法和概率方法,后两种方法由于不直接处理火灾动力学所涉及的方程组,而是采用火灾模拟工具直接生成模拟结果,求解较容易,适用范围较广。相比于优化方法,概率方法在参数不确定性分析以及估计解的应用范围上都有明显优势。

随着建筑规模的不断增加以及高层建筑的涌现,基于全局探测信息和建筑结构的传统估计方法已无法满足火灾应急救援所需的高效性。在这种情况下一种分布式概率估计方法应运而生。目前已可以实现基于分区探测信息的火源参数估计。

基于分布式思想的火源参数估计方法目前仍处于初期阶段,还没有实现基于分区思想的火灾模拟计算,模拟值仍需要离线生成。但是相信在未来不久,该方法凭借其高效性、可扩展性及鲁棒性能够在火灾应急救援中拥有广阔的发展前景。

参考文献:

- [1] 翟玉琢. 全省开展45天火灾隐患集中排查整治行动[N]. 北方法制报, 2010-11-09(A01).
- [2] 省政府对襄阳市“4·14”重大火灾事故作出处理湖北日报[N]. 湖北日报, 2013-10-10(006).
- [3] 陈涛, 袁宏永, 范维澄. 火灾探测技术研究的展望[J]. 火灾科学, 2001, 10(2): 108-112.
- [4] 刘雪飞, 贾勤. 基于模糊神经网络的中庭火灾探测仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(8): 159-162.
- [5] 张嘉琪, 胡兆杰, 徐场等. 基于Labview的BP神经网络在火灾探测中的应用[J]. 消防科学与技术, 2013, 32(2): 165-167.
- [6] 张鑫, 隋金雪, 张岩. 信息融合技术在火灾探测中的应用研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(6): 94-98.
- [7] Kaiser T. Fire detection with temperature sensor arrays [C]//IEEE Carnahan Conference proceedings. Ottawa: IEEE, 2000, 262-268.
- [8] Berentsen M, Kaiser T. Fire location estimation using temperature sensor arrays [C]//12th International Conference on Automatic Fire Detection Proceedings Gaithersburg: NIST, 2001: 432-443.
- [9] Wang S, Berentsen M, Kaiser T. Signal processing algorithms for fire localization using temperature sensor arrays [J]. Fire Safety Journal, 2005, 40(8): 689-697.
- [10] 郭晓虹. 基于温度传感器阵列的火灾定位方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006: 1-18.
- [11] Xia D H, Wang S, Zhu M, et al. A method research on fire source localization using dual-line gas sensor array [C]//7th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2008, 5862-5865.
- [12] U. S. NRC. ASTM E1355 Standard guide for evaluating predictive capability of deterministic fire models [S]. West Conshohocken: American Society for Testing and Materials, 2005.
- [13] U. S. NRC. NUREG-1824, EPRI 1011999, Verification and validation of selected fire models for nuclear power plant applications, Vols. 1-7 [R]. Palo Alto: U. S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC and Electric Power Research Institute, 2007.
- [14] Salley M H, Dreisbach J, Hill K, et al. Verification and validation—how to determine the accuracy of fire models [J]. Fire Protection Engineering Magazine, 2007: 34, 38, 40, 42, 44.
- [15] Wen J, Kang K, Donchev T, et al. Validation of FDS for the prediction of mediumscale pool fires [J]. Fire Safety Journal, 2007, 42(2): 127-138.
- [16] Guillermo R, Jose L T, Wolfram J, et al. Round-robin study of a priori modelling predictions of The Dalmarnock Fire Test One [J]. Fire Safety Journal, 2009, 44(4): 590-602.
- [17] Magnusson S E, Frantzych H, Harada K. Fire safety designs based on calculations; uncertainty analysis and safety verification [J]. Fire Safety, 1996, 27(4): 305-334.
- [18] Upadhyay R, Ezekoye O A. Treatment of design fire uncertainty using quadrature method of moments [J]. Fire Safety, 2008, 43(2): 127-139.
- [19] Adam C, Wolfram J, Cecilia A E, et al. Sensor assisted fire fighting [J]. Fire Technology, 2010, 46(3): 719-741.
- [20] Davis W D, Forney G P. A sensor-driven inverse zone fire model [C]//Fire Suppression and Detection Research Application Symposium. Proceedings of Fire protection research foundation. Orlando, FL, 2000: 204-211.
- [21] Davis W D, Cleary T, Donnelly M, et al. Using sensor signals to analyze fires [C]//Fire Suppression and Detection Research Application Symposium. Proceedings of Fire Protection Research Foundation. Tampa, FL, 2002: 205-224.
- [22] Lee W S, Lee S K. The estimation of fire location and heat release

- rate by using sequential inverse method [J]. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers, 2005, 26(2): 201–207.
- [23] Richards R, Munk B, Plumb O. Fire detection, location and heat release rate through inverse problem solution Part I: Theory [J]. Fire Safety Journal, 1997, 28(4): 323–350.
- [24] Richards R F, Ribail R T, Bakkom A W, et al. Fire detection location and heat release rate through inverse problem solution Part II: Experiment [J]. Fire Safety Journal, 1997, 28(4): 351–378.
- [25] Neviackas A. Inverse fire modeling to estimate the heat release rate of compartment fires [D]. College Park, Maryland: University of Maryland, 2007.
- [26] Leblanc M, Trouvé A. Inverse Modeling of Enclosure Fire Dynamics [C]//Proceedings of the 6th U. S. National Combustion Meeting. Ann Arbor, Michigan, 2009.
- [27] Kristopher J O, Ofodike A E. Characterizing heat release rates using an inverse fire modeling technique [J]. Fire Technology, 2012, 48(4): 893–909.
- [28] 郭少冬, 杨锐, 翁文国. 基于 MCMC 方法的城区有毒气体扩散源反演 [J]. 清华大学学报, 2009, 49(5): 629–634.
- [29] 郭少冬, 杨锐, 苏国锋, 等. 基于伴随方程和 MCMC 方法的室内污染源反演模型研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 2010, 18(4): 695–704.
- [30] Guo S, Yang R, Zhang H, et al. New inverse model for detecting fire-source location and intensity [J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2010, 24(4): 745–755.
- [31] Guo S, Yang R, Zhang H. Development and validation of inverse model to detect fire source and intensity [C]//2nd International symposium on computational mechanics 12th international conference on the enhancement and promotion of computational methods in engineering and science, AIP Conference proceedings, HongKong: ISCM 2010, 1291–1296.
- [32] Wu N, Yang R, Zhang H, et al. Decentralized inverse model for estimating building fire source location and intensity [J]. AIAA Journal of Thermophysics and Heat Transfer, 2013, 27(3): 563–575.

A Review of Researches on the Estimation of Building Fire Parameters

Wu Nan, Yang Rui and Zhang Hui

(Institute of Public Safety Research, Department of Engineering Physics, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: For a long time, how to ensure fire safety on buildings has attracted more and more attentions of the researches in related fields. In fire incidents, fire source location and intensity always play important roles in guiding the establishment of the strategy of firefighting and evacuation. Along with the emergence of high rise buildings and buildings with much more complicated structure in the recent days, an efficient and effective method for estimating fire parameters has become one of the key factors in the fire emergency rescue. By analyzing the fire sensing methods currently adopted in buildings, this paper firstly summarizes worldwide researches on the estimation of building fire parameters. Based on the type of information in use, the researches can be categorized into three methods: sensor data, fire modeling and the combination of them. Then, through the comparison between different methods, the advantages and defects of each algorithm are briefly analyzed. Finally, this paper also introduces a new proposed distributed method in fire parameter estimation and predicts its possible further improvements.

Key words: building fire; fire source; parameter estimation; fire sensing, review