

# 纵向风条件下隧道火灾着火点定位误差修正

范典<sup>1,2</sup>, 陈娇<sup>1,2</sup>, 王剑<sup>1,2\*</sup>, 刘嘉静<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> 武汉理工大学光纤传感技术国家工程实验室, 湖北 武汉 430070;

<sup>2</sup> 武汉理工大学信息工程学院, 湖北 武汉 430070

**摘要** 隧道内的纵向风会改变隧道内的热对流和烟气分布, 从而影响感温定位误差。从相关部门对隧道火灾探测的强制验收规定(点火后 60 s 内必须发出报警信号)出发, 开发了一种利用光纤光栅感温火灾的探测技术。通过采集不同风速、不同点火位置条件下多次点火实验的温度场, 分析了不同工况下的温度场分布及其动态变化, 提出了根据温度场修正着火点报警位置的智能算法。该算法可根据隧道火灾温度场分布和动态变化, 修正纵向风带来的火灾报警位置误差, 并在规定时间内智能判断火灾发生位置。

**关键词** 测量; 光纤光栅; 温度传感; 误差修正; 隧道火灾; 纵向风

中图分类号 TN929.11

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.141201

## Correction of Fire Location Error of Tunnel Fire Under Longitudinal Wind

Fan Dian<sup>1,2</sup>, Chen Jiao<sup>1,2</sup>, Wang Jian<sup>1,2\*</sup>, Liu Jiajing<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> National Engineering Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;

<sup>2</sup> School of Information Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China

**Abstract** The vertical wind in a tunnel will change the heat convection and smoke distribution in the tunnel and influence the temperature-sensing error. This study starts from the relevant state departments for the mandatory acceptance of tunnel fire detection (i. e., the alarm signal must be generated within 60 s after ignition). A fiber grating temperature sensing fire detection technology used to collect the temperature field of multiple ignition experiments under different wind speeds and ignition positions is then developed. The temperature field distribution and its dynamic changes under different working conditions are analyzed. Subsequently, an intelligent algorithm for correcting the fire point position based on the temperature field is proposed. The problem of the position error of the fire alarm caused by the longitudinal wind is corrected according to the temperature distribution and the dynamic change of the tunnel fire. In addition, the fire location can be intelligently determined within the specified time.

**Key words** measurement; fiber bragg grating; temperature sensing; error correction; tunnel fire; longitudinal wind

**OCIS codes** 120.6780; 060.2370; 140.3510; 160.2290

## 1 引言

交通隧道是半封闭的管状结构, 一旦发生火灾, 隧道内的烟气和热量容易聚集, 人员车辆难以撤离, 危险性极大<sup>[1]</sup>。国家相关部门对验收隧道火灾探测器有强制规定, 点火后 60 s 内必须发出报警信号。现有的火灾探测技术按原理可分为感烟、感光和感

温型<sup>[2]</sup>。隧道内烟气大, 感烟型火灾探测技术并不适用; 感光型火灾探测技术只能感知明火, 对火焰被遮挡或阴燃的情况则无法探测。因此, 我国隧道火灾探测大多采用线型感温探测技术。根据隧道火灾探测分区的要求, 线型感温火灾探测传感器一般安装在隧道顶部。当火灾产生的热对流和烟气发生辐射时, 隧道顶部的温度升高, 一旦线型感温火灾探测

收稿日期: 2018-12-25; 修回日期: 2019-01-16; 录用日期: 2019-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(61775173, 61505152)

\* E-mail: fandian@whut.edu.cn

传感器探测到分区内的温度值或升温速度达到阈值,就会发出火灾报警信号,进而启动分区火灾应急措施。但是,隧道有排烟的需求,需要启动风机排烟,因此隧道内经常有风速达数米每秒的纵向风。纵向风会改变隧道内的热对流和烟气分布<sup>[3]</sup>:一方面,纵向风减弱了火灾发生地点的热对流,使着火点正上方升温速度减慢;另一方面,纵向风将火灾产生的热烟气带往下游,使着火点下游的温度升高。如果火灾刚好发生在两个分区之间,在有纵向风的情况下,就可能产生错误的火灾报警分区信号。为此,本文应用光纤光栅感温火灾的探测技术,根据隧道火灾的温度场分布和动态变化,提出一种修正着火点报警位置的智能算法,该算法不仅修正了纵向风带来的火灾报警位置误差,还能在规定时间内智能判断出火灾发生的位置。

## 2 基于光纤光栅感温火灾探测技术的智能算法

光纤传感器由于具有高灵敏度和高精度的特性,已经被广泛地应用于结构健康监测<sup>[4]</sup>、温度和压力监测<sup>[5]</sup>、生物医学监测<sup>[6]</sup>等领域。光纤布拉格光栅(FBG)传感器作为一种波长调制型光纤传感器<sup>[7]</sup>,具有光纤传感器的所有优点<sup>[8]</sup>,已广泛应用于光通信网络、光纤激光器和光纤传感等领域<sup>[9]</sup>。由于光纤光栅是由介电材料制成的,所以其在本质上不受电磁干扰(EMI)的影响。相比传统的电子传感器,光纤光栅传感器更适合在高压环境下进行测试<sup>[10]</sup>。同时,与金属传感器相比,光纤光栅传感器的质量更小、空间更小,因此更适合嵌入结构里面或

结构表面进行监测<sup>[11]</sup>。此外,经过多年的发展,光纤的制造成本已大幅降低<sup>[12]</sup>。

线型感温火灾探测技术可细分为基于感温电缆和感温光纤两类。感温电缆的探测距离只有百米左右,不能满足隧道火灾探测长距离分布式的需求,而且该技术将一个防火分区作为一个整体进行测量,不能完成温度场的测量;因此,本文采用基于光纤光栅传感的线型感温火灾探测技术。光纤传感技术具有抗电磁干扰、远距离传输、易组网、高灵敏度、高可靠性等优点,在长距离、大范围和恶劣环境等条件下的传感应用中具有不可替代的技术优势<sup>[13]</sup>。基于光纤拉曼散射的火灾探测技术就是其中的一种,但是由于散射光较弱,需要一段时间累加一段光纤上的散射光才能获得足够的信噪比完成温度测量,所以系统响应时间较慢,无法满足我国 60 s 报警的验收标准,而且温度场定位不准,无法满足纵向风影响下隧道温度场及其动态变化的研究需求<sup>[14]</sup>。光纤光栅温度传感技术具有精度高、响应快、定位准等特点,已成为目前应用领域最广、产业化程度最高的光纤传感技术。该技术在早期主要应用于工程结构健康监测领域,在解决了光纤光栅传感技术难以大容量多点探测的难题后,其在火灾检测领域的应用也卓有成效<sup>[15]</sup>。现在,光纤光栅感温火灾探测技术已在国内超过5000 km的交通隧道中得到应用<sup>[16-17]</sup>。

光纤光栅感温传感系统能方便地使用波分复用技术在一根光纤中串接多个光栅( $S_1, S_2, \dots, S_n$ )进行分布式测量,如图 1 所示。光纤传感系统中的解调设备成本较高,分布式测量可以降低单点测量的成本,适合大规模应用。

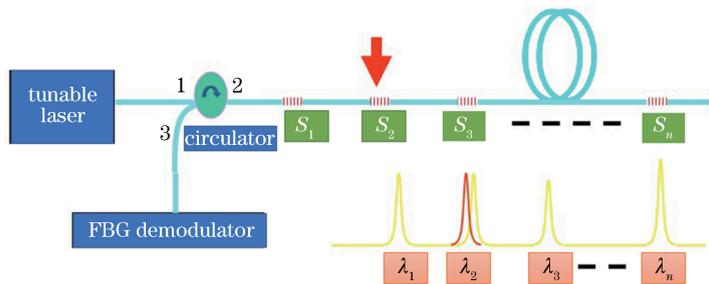


图 1 光纤光栅温度传感系统原理示意图

Fig. 1 Principle diagram of fiber grating temperature sensing system

光纤光栅用于温度传感,采集温度数据的过程如下:光栅会对入射光进行选择反射,反射一个中心波长与芯层折射率满足相位相匹配条件的窄带光,此中心波长被称为布拉格波长。布拉格波长取决于折射率调制的空间周期  $\Lambda$  和调制的幅度大小。

所谓相位相匹配就是指,相位间满足模式耦合理论的一级近似相位匹配条件,数学公式可表示为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中: $\lambda_B$  为光栅的布拉格波长; $n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率(折射率调制幅度的平均效应)。显然,当光栅

常数发生变化时,光栅所选择的反射窄带光的中心波长也发生变化,即

$$\Delta\lambda_B = 2(n_{\text{eff}}\Delta\Lambda + \Lambda\Delta n_{\text{eff}}), \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$  为光栅的布拉格波长变化值; $\Delta n_{\text{eff}}$  为光栅的有效折射率变化值; $\Delta\Lambda$  为折射率调制空间周期的变化值。

光栅的温度  $T$  发生变化时,由于热胀冷缩效应,光栅的条纹周期会发生变化;由于热光效应,光栅的有效折射率也会发生变化。所以,

$$\Delta\lambda_B = 2\left(n_{\text{eff}}\frac{\partial\Lambda}{\partial T} + \Lambda\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}\right)\Delta T, \quad (3)$$

式中: $\Delta T$  为温度变化值。或者写成

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \beta)\Delta T, \quad (4)$$

式中: $\alpha = (1/\Lambda)(\partial\Lambda/\partial T)$  为光纤的热膨胀参数; $\beta = (1/n_{\text{eff}})(\partial n_{\text{eff}}/\partial T)$  为光纤的热光系数。(4)式右边第1项为热膨胀效应,即因热膨胀而引起的条纹周期变化;第2项为热光效应,即因温度变化而引起的折射率变化。 $\alpha$  和  $\beta$  基本上不随温度变化,因此, $\Delta\lambda_B$  和  $\Delta T$  具有很好的线性关系。实验中所用的光纤布拉格光栅的反射率是  $-30\text{ dB} \sim -40\text{ dB}$ , 这么弱的光栅是由拉丝塔在线刻光栅技术下完成的,拉光纤的同时完成相位掩模法刻栅,因而具有超低反射率。只要能够精确地测量光栅反射光的布拉格波长,就可以精确地知道光纤光栅处的温度。如果使用波分复用技术,就可在一根光纤中串接十几个甚至上百个布拉格光栅探测点(点数受限于光源谱宽和测点动态范围)进行分布式远程测量,从而实现数字式传感。多根光栅的中心波长均不相同,当用可调谐激光器进行波长扫描时,不同传感器位置可以根据光波反射谱的中心波长进行定位,从而利用时间来区分不同的传感器。光栅温度传感器进行实际测试前需进行温度标定,在温箱内多次取数据并与标准温度计进行对比较准,以确定波长漂移量与温度变化的具体关系。

光纤光栅感温火灾探测报警系统主要由光纤光栅感温探头、报警装置、火灾报警探测器、监测报警系统用户界面、系统通信总线,以及远程访问计算机等组成。光纤光栅感温探头布设在火灾探测隧道现场,感温传感信号通过光缆传输到火灾报警控制器,进行波长解调和判断处理。然后,火灾报警控制器输出两路报警控制信号:一路提供给报警装置进行声光报警,一路提供给监测报警系统进行集中控制。计算机也可以通过网络远程访问监测报警系统。本

文应用光纤光栅感温火灾探测技术,采集不同风速、不同点火位置下多次点火实验的温度场,分析不同工况下温度场的分布及其动态变化,提出根据温度场修正着火点报警位置的智能算法。实验中所用的光纤光栅是普通周期性光纤光栅,光纤光栅阵列的波长范围为  $1285 \sim 1305\text{ nm}$ , 相邻两个光栅常温常压下的中心波长间隔为  $2\text{ nm}$ , 中间由  $5\text{ m}$  长的光纤连接,整个探测器由  $11$  个光栅串联而成, $3\text{ dB}$  带宽为  $0.4\text{ nm}$ 。本实验所用 BGD-4L40 光纤光栅解调器的波长解调范围(2个波段)分别为  $1281.5 \sim 1295.5\text{ nm}$  和  $1295.5 \sim 1311.5\text{ nm}$ 。可调谐窄带光源是由 2 支 SLED 宽带光源和自主研发的波长选择器(IPD)结合而成的。可调谐窄带光源功率强度为  $1000 \sim 13000\ \mu\text{W}$ , 与一般的宽带光源相比,其传感信号的强度信噪比有很大的提高,测量范围也大大增加,为波长漂移的检测提供了良好的基础。由若干个探测器(PIN)、 $3\text{ dB}$  耦合器、梳状滤波器和传感光栅组成多通道分布式光纤光栅传感系统,其中,梳状滤波器用于波长校准。数字信号处理器(DSP)为光源和波长选择器提供驱动电压,并进行多路 PIN 的数据处理。该解调仪技术指标为:测量范围  $30\text{ nm}$ , 波长分辨率  $1\text{ pm}$ , 测量精度  $5\text{ pm}$ , 扫描频率  $1\text{ Hz}$ 。

火灾训练智能算法的流程如图 2 所示,在充分考虑温度场面积、风速等因素的前提下,根据现有实验数据训练学习得来的具体参数,实现修正着火点报警位置的目的。智能算法的具体步骤如下:

1) 传感点发生火灾可能性的判断。采用设定光纤光栅传感器温度报警阈值的方法判断传感点是否发生火灾。在自然风工况下,假设点火位置在 1 号点,那么 6 号光纤光栅传感器(以下简称  $S_6$ ) 在  $60\text{ s}$  内最先感应到温度的急剧变化,当其探测到温度达到  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , 并且温度变化率大于等于  $6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$  时,就会触发报警响应。同样,在其他风速下,相应的光纤光栅传感器也能触发报警。只要有报警信号,就可以认定发生火灾。

2) 采用火灾智能算法修正传统报警点定位误差。第一步,计算报警点上、下游  $15\text{ m}$  内的温度场面积,根据风速对温度场面积的影响(先前研究显示,风速大时面积大,风速小时面积小),对着火点进行初步修正。第二步,如果上游温度场面积大于下游温度场面积,根据面积比例,对位置做进一步修正;第三步,在报警点的基础上修正得到预估着火点。

传统报警点定位方法的局限性。传统的报警点定位采取的是“单点温度差温/定温综合算法”。该方法可以根据多次实验,推算出报警点与实际着火点的偏差,从而得到各种风速下报警位置的误差修正值,这个修正值是采用单点温度差温/定温综合计算出来的。但是,该方法将每个传感器作为一个个体判断,只要该传感器的温度值超过差定温报警阈值即输出报警信号,并没有将传感器测量的温度场及其动态变化作为一个整体进行综合分析。本研究在通过单点温度差的方法确定有火灾发生后,设置了修正算法,通过综合分析温度场面积、对称性以及风速后,对位置估计进行修正,从而实现更准确的定位。

火灾智能算法的优点。传统的单点温度差温/定温综合算法基于某一感温单元或传感器进行火灾报警识别和报警定位,而本算法充分挖掘了线型光纤感温对温度场数据的同步测取能力,通过考察空间区段温度场变化的相关性,快速捕捉隧道火灾导致的环境温度在幅值与范围上的综合变化,消除隧道通风引发的报警延迟,从而实现火警快速响应,并有效剔除非火灾特征的虚警干扰。同时,通过考察空间温度场升温分布,捕捉温度极值及升温区间包络相对于极值位置的对称性,依据对称性差异给出隧道报警位置纠偏参数,修正隧道通风引发的报警定位漂移,从而实现隧道火灾部位的准确估计。

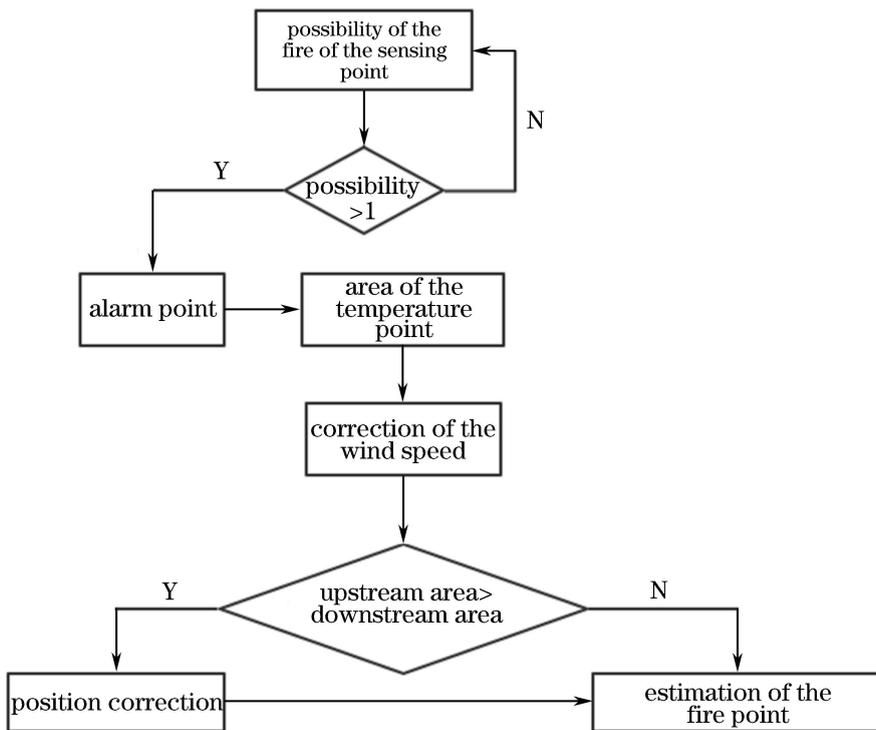


图2 着火点估计算法流程图

Fig. 2 Flow chart of fire point estimation algorithm

### 3 纵向风下隧道火灾点火实验

点火实验在全尺度模拟实验隧道中进行,隧道主体长100 m,宽12.75 m,高6.7 m,可提供的隧道纵向风速为0~5 m/s。点火采用的燃料为符合GB 19147—2016规定的车用柴油(1.5 L/次),引燃燃料采用分析纯级的正庚烷(0.15 L/次)。燃料添加时,先向实验火盘内添加车用柴油,然后再向实验火盘中部添加引燃燃料。实验火盘采用厚度不小于2.0 mm的钢板制成,内部容积尺寸(长×宽×深)为

80 cm×80 cm×10 cm,底部距地面的高度不超过10 cm。实验火罩放置在实验火盘的上方,用以模拟隧道内发生火灾时汽车车体对实验火的遮挡情况。点火时,在点火器的棉纱上蘸少许引燃燃料,用打火机点燃后迅速引燃实验火盘中的引燃燃料,随即将点火器棉纱端置入一个封闭的金属筒内熄灭。用点火器引火时,应利用实验火罩遮挡,避免点火器火苗引发探测系统误报警。

按规范要求,光纤光栅感温火灾探测器安装在隧道纵向中心的顶部,光栅传感器间距为5 m,依次

为传感器  $S_1 \sim S_{11}$ , 全长 50 m。如图 3 所示, 1 号点火位置位于  $S_6$  的正下方; 2 号和 3 号点火位置分布在远离隧道纵向中心的横向位置, 分别距离 1 号点火位置 2.5 m 和 5.0 m; 4 号点火位置位于  $S_5$  和  $S_6$  的中间; 5 号和 6 号点火位置分布在远离 4 号点火位置的横向位置, 与 2 号、3 号点火位置平行。点火实验在 4 种风速工况下进行, 分别为自然风 1.5, 3.0, 4.5 m/s 风速, 每种风速选取 4~6 个点火位置共进行 21 次点火实验。这 21 次点火工况和报警响

应时间及报警传感器如表 1 所示。报警响应时间都能满足验收标准 (60 s 以内)。在无纵向风的情况下, 系统的报警位置在  $S_5$  和  $S_6$ ; 在有纵向风的时候, 由于热对流被破坏, 热烟气被带到下游, 报警响应时间变长, 部分工况下, 报警位置为  $S_7$  和  $S_8$ 。此时的报警算法是将每个传感器作为一个个体进行判断, 只要该传感器的温度值超过差定温报警阈值即输出报警信号, 没有将传感器测量的温度场及其动态变化作为一个整体进行综合分析。

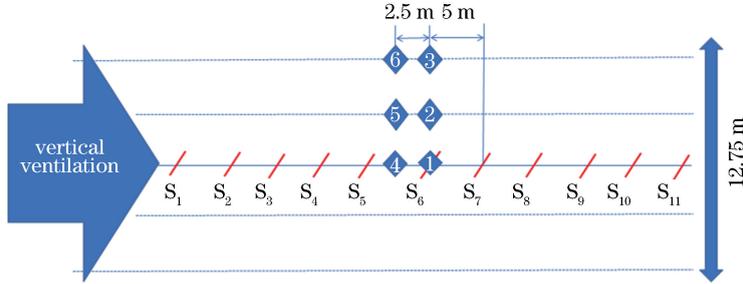


图 3 全尺度模拟实验隧道传感器分布及点火位置示意图

Fig. 3 Diagram of tunnel sensor distribution and ignition positions in full-scale simulation test

表 1 点火实验工况及报警响应信息表

Table 1 Ignition test conditions and alarm response information table

Serial number	Ignition position	Wind speed / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Response time / s	Alarm sensor	Serial number	Ignition position	Wind speed / ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	Response time / s	Alarm sensor
1	1 <sup>st</sup>	Natural wind	16	$S_6$	12	3 <sup>rd</sup>	3	24	$S_6$
2	1 <sup>st</sup>	Natural wind	11	$S_6$	13	6 <sup>th</sup>	3	22	$S_6$
3	2 <sup>nd</sup>	Natural wind	21	$S_6$	14	5 <sup>th</sup>	3	30	$S_6$
4	3 <sup>rd</sup>	Natural wind	16	$S_6$	15	4 <sup>th</sup>	3	45	$S_6$
5	6 <sup>th</sup>	Natural wind	22	$S_5$	16	4 <sup>th</sup>	4.5	42	$S_6$
6	6 <sup>th</sup>	1.5	31	$S_6$	17	1 <sup>st</sup>	4.5	45	$S_7$
7	3 <sup>rd</sup>	1.5	20	$S_7$	18	2 <sup>nd</sup>	4.5	46	$S_8$
8	2 <sup>nd</sup>	1.5	11	$S_7$	19	3 <sup>rd</sup>	4.5	37	$S_8$
9	1 <sup>st</sup>	1.5	22	$S_7$	20	5 <sup>th</sup>	4.5	33	$S_8$
10	1 <sup>st</sup>	3	33	$S_6$	21	6 <sup>th</sup>	4.5	51	$S_6$
11	2 <sup>nd</sup>	3	25	$S_6$					

## 4 火灾自动探测报警及单点温度差温/定温计算

### 4.1 报警模式设定

火灾自动报警传感器巡检周期为 0.5 s, 传感器间距为 5 m, 报警模式采用差定温方式, 其中定温阈值为  $45\text{ }^\circ\text{C}$ , 差温阈值为  $6\text{ }^\circ\text{C}/\text{min}$ 。报警温度依据国家标准 GB 16280—1996《线型感温火灾探测器技术要求及试验方法》设置。风速较高时, 报警响应时间都在规定范围以内, 但是报警点的位置偏差较大, 都是点火位置下方 10 m 以外的传感器在 5 s 内升温率先超过阈值。分析原始温度数据可知, 虽然

报警位置的升温速率较快, 但是温度变化的绝对值不高, 和该点 1 min 以前的温度相比并未超过  $6\text{ }^\circ\text{C}$ 。所以, 将温度变化率大于  $0.1\text{ }^\circ\text{C}/\text{s}$ , 温度差大于  $6\text{ }^\circ\text{C}$  作为判断条件。下面以 1 号点火位置 4 次风速的实验数据为例进行分析, 阐述传感器自动探测报警及单点温度差温/定温算法。

### 4.2 1 号点火位置 4 次风速实验结果分析

实验中用的光纤光栅传感器包括 11 个光栅, 图 4 显示的是 8 个光纤光栅。这是由于本次点火实验是在 11 个传感器的中间位置进行的, 而且图 4 的处理方法是传统的“单点温度差温/定温综合算法”, 为了在图中更直观、清晰地显示变化曲线, 在数据处理

时仅选取其中的 8 个传感器进行分析。从图 4 可以看出:自然风时,报警响应时间为 11 s,报警点为  $S_6$ 。以同样的方法可以计算得到:当风速为 1.5 m/s 时,报警响应时间为 22 s,报警点为  $S_7$ ;当风速为 3 m/s 时,报警响应时间为 33 s,报警点为  $S_6$ ;当风速为 4.5 m/s 时,报警响应时间为 45 s,报警点为  $S_7$ 。

对实验数据进行分析可知:

1) 点火位置在  $S_6$  的正下方,各实验风速工况下,都能在规定时间内及时报警。隧道顶部的温度一般不可能达到定温报警值,报警信号是升温速度超过差温报警阈值后发出的。

2) 当设定风速为 1.5 m/s 和 4.5 m/s 时,报警点位置发生偏差,说明在进行差温报警时不能只考虑单点的温度变化,而要根据周边测点的温度变化情况进行综合分析后才能得出准确的报警位置。

3) 风速越大,隧道顶部温度变化开始得越晚,但是温度变化速度越快,所以不能单纯只考虑超出差温的报警阈值,还要分析超出的幅度才能实现在不同风速下的及时准确报警。

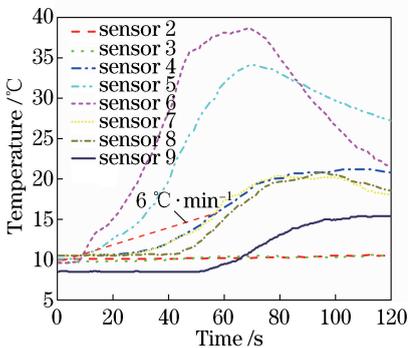


图 4 1 号点火位置自然风下实验传感器温度随时间的变化曲线

Fig. 4 Temperature versus time of sensor under natural wind at No. 1 ignition position

## 5 温度场分析及对着火点位置的修正

### 5.1 纵向风对温度场的影响

选取表 1 中的第 2, 9, 10, 17 次点火实验的数据绘制温度场的变化,如图 5 所示,图中的多根曲线指的是火灾初起阶段前 100 s 的温度场变化,具体数量是 200 根。火灾自动报警传感器巡检周期为 0.5 s,每秒采集 2 次。这 4 次点火实验是在 1 号点火位置不同风速下的实验结果。X 轴坐标为传感器的分布位置,50 m 的范围内分布了 11 个传感器,点火位置在  $S_6$  下方 25 m 的位置;Y 轴坐标为点火

后经历的时间,传感器都在标准规定的 60 s 内发出报警信号,并且在报警后采取灭火措施,温度下降,所以只选取了前 100 s 的数据;Z 轴为传感器的温度,60 s 内最高温度点的温度都不超过 40 °C,而且风速越高,最高温度点的温度越低。

不同风速下,隧道内温度场的分布及其动态变化完全不同:在自然风情况下,传感器温度升高基本上是对流引起的,即火焰加热空气,热空气上升到隧道顶部逐步加热着火点上方的传感器  $S_6$ ,热空气沿隧道轴向扩散,温度逐渐下降,测到的温度场基本以着火点为中心对称,如图 5(a) 所示;随着纵向风速加大,这种稳定的对流被打破,推迟了隧道顶部温度的变化,导致点火后 10~30 s 内温度场没有任何变化,而同时大量的烟气携带着热量向着火点下游方向流动,部分工况下着火点下游的传感器  $S_7$  率先升高进入报警状态(如表 1 所示),虽然最高温度点最终出现在  $S_6$ [如图 5(b) 和 (c) 所示],但下游温度点的温度较上游温度明显升高;当纵向风达到 4.5 m/s 时,这种现象进一步加剧,最高温度点下移到 30 m 处的  $S_7$ [如图 5(d) 所示],而报警点出现在  $S_8$ ,偏离着火点位置 10 m。

### 5.2 训练智能算法估计着火点

火灾发生时,隧道内的空气会随着火焰的燃烧剧烈地流动,热传递的 3 种基本方式——传导、对流和辐射同时存在,隧道内的纵向风和烟气改变了气体流动的特性,使热传递存在很大的随机性。根据有限元方法对火灾温度场和烟场建模的软件有很多,但没有任何一种现有模型可以准确预测火灾初起阶段前 100 s 的温度场及其动态变化。所以,只能通过大量的实验数据分析训练智能算法,使其在各种工况下及时准确地报警。采用如图 2 所示的算法流程,根据温度场变化,进行智能算法训练,根据现有实验数据训练学习所得,修正着火点报警位置,实现相应工况下及时准确的报警。具体如下。

首先,根据传感器的温度及其变化判断该点发生火灾的可能性,当可能性超过 1 时进入着火点位置估计算法;然后,通过温度场面积估计风速,再用温度场上下游面积的比例修正位置;最后,给出估计的着火点位置。共进行 21 次点火实验,着火点估计算法的修正结果如表 2 所示。

在设定风速为 3 m/s 及以下时,根据温度场估计的风速基本和设定风速一致,有 2 次报警位置出现在  $S_7$ ,但也能根据算法修正到误差不超过 3 m 的

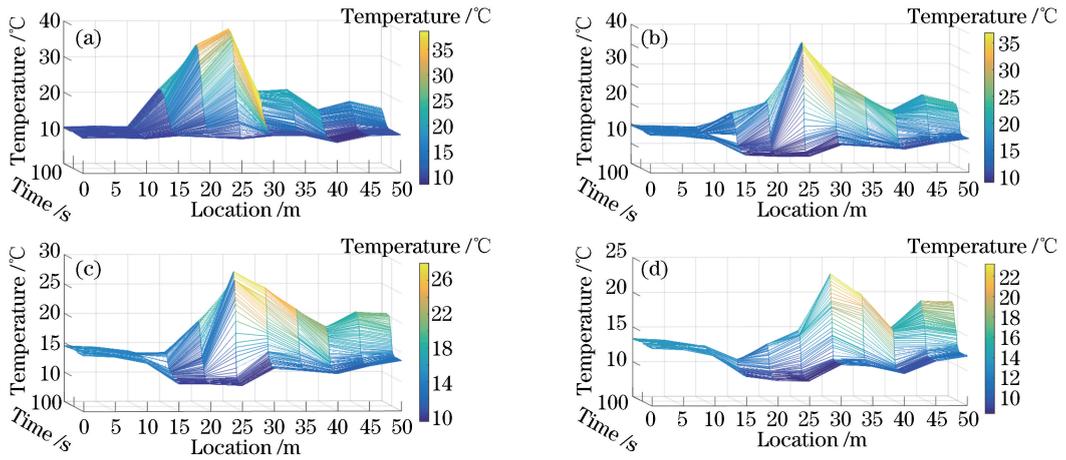


图 5 1号点火位置在不同风速下的温度场变化图。(a)自然风;(b)纵向风速 1.5 m/s;  
(c)纵向风速 3 m/s;(d)纵向风速 4.5 m/s

Fig. 5 Temperature field changes under different wind speeds at No. 1 ignition position. (a) Natural wind; (b) longitudinal wind speed of 1.5 m/s; (c) longitudinal wind speed of 3 m/s; (d) longitudinal wind speed of 4.5 m/s

表 2 着火点估计算法修正结果表

Table 2 Correction result table of ignition point estimation algorithm

Ignition No.	Set position / m	Set wind speed / (m · s <sup>-1</sup> )	Estimated wind speed / (m · s <sup>-1</sup> )	Alarm indication	Estimated fire point / m
1	25	Natural wind	0.2	S <sub>6</sub>	25
2	25	Natural wind	0.0	S <sub>6</sub>	25
3	25	Natural wind	0.1	S <sub>6</sub>	25
4	25	Natural wind	1.6	S <sub>6</sub>	25
5	22.5	Natural wind	1.1	S <sub>5</sub>	20
6	22.5	1.5	2.3	S <sub>6</sub>	25
7	25	1.5	1.8	S <sub>7</sub>	27.1
8	25	1.5	0.8	S <sub>6</sub>	25
9	25	1.5	1.3	S <sub>6</sub>	25
10	25	3	2.1	S <sub>6</sub>	25
11	25	3	1.3	S <sub>6</sub>	25
Ignition No.	Set position / m	Set wind speed / (m · s <sup>-1</sup> )	Estimated wind speed / (m · s <sup>-1</sup> )	Alarm indication	Estimated fire point / m
12	25	3	2.0	S <sub>7</sub>	26.9
13	22.5	3	2.3	S <sub>6</sub>	25
14	22.5	3	3.3	S <sub>5</sub>	20
15	22.5	3	4.6	S <sub>6</sub>	18.9
16	22.5	4.5	3.0	S <sub>6</sub>	20.2
17	25	4.5	3.7	S <sub>7</sub>	25.1
18	25	4.5	2.6	S <sub>7</sub>	30
19	25	4.5	1.6	S <sub>8</sub>	35
20	22.5	4.5	3.7	S <sub>6</sub>	25
21	22.5	4.5	1.4	S <sub>6</sub>	25

位置。采用火灾快速响应识别算法和着火点位置估计,可以实现 3 m/s 纵向风速下标准火实体试验性能指标:1) 报警响应时间不超过 45 s;2) 报警部位偏差不大于 5 m。因此,基于光纤光栅感温火灾探测技术的智能算法在中速风时具备可靠性和稳定性。

但是,当风速超过 4.5 m/s 时,估计风速和设定值差别较大,而且出现两次修正后报警位置误差仍超过 3 m 的情况。这是由于风速越大,温度场及其动态变化的随机性就越强。因此,仍然需要提出新的算法以应对这些情况。

## 6 结 论

现有的隧道火灾检测系统在定位点判断上存在

一定的误差。针对这一问题,对光纤光栅感温火灾探测技术、纵向风下隧道火灾温度场及着火点位置修正算法进行了详细系统的研究,并通过开展大量实验,得出了相应工况条件下隧道火灾自动探测报警位置的修正算法。通过大量的实验数据分析,并利用现有实验数据训练学习,设置合理的参数,采用训练的智能算法流程,可根据温度场修正着火点报警位置,实现中低速纵向风工况下及时准确的报警。

## 参 考 文 献

[1] Zhang S J. Application of fiber distributed temperature monitoring system in tunnel fire monitoring [J]. Technology Innovation and Application, 2012(11): 24-24.

- 张胜姣. 光纤分布式温度监测系统在隧道火灾监控中的应用[J]. 科技创新与应用, 2012(11): 24-24.
- [2] Peng H, Yan K. Comparison of conventional tunnel fire detection systems[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2003, 20(s1): 38-39.  
彭辉, 燕科. 常用隧道火灾探测器的比较[J]. 公路交通科技, 2003, 20(s1): 38-39.
- [3] Zhu W, Zhou X F, Hu L H, *et al.* Effects of longitudinal ventilation on maximum ceiling temperature and its position in tunnel fire[J]. Journal of Safety and Environment, 2012, 12(3): 142-145.  
朱伟, 周晓峰, 胡隆华, 等. 纵向风对隧道火灾拱顶最高温度及其位置的影响[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(3): 142-145.
- [4] Yau M H, Chan T H T, Thambiratnam D P, *et al.* Static vertical displacement measurement of bridges using fiber Bragg grating (FBG) sensors [J]. Advances in Structural Engineering, 2013, 16(1): 165-176.
- [5] Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. Sensors, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [6] Milczewski M S, da Silva J C C, Martelli C, *et al.* Force monitoring in a maxilla model and dentition using optical fiber Bragg gratings[J]. Sensors, 2012, 12(9): 11957-11965.
- [7] Ma J, Yu H H, Xiong J G, *et al.* Research progress of photonic crystal fiber sensors [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(7): 070006.  
马健, 余海湖, 熊家国, 等. 光子晶体光纤传感器研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(7): 070006.
- [8] Kersey A D, Davis M A, Patrick H J, *et al.* Fiber grating sensors [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442-1463.
- [9] Liao C R, He J, Wang Y P. Study on high temperature sensors based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser [J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328009.  
廖常锐, 何俊, 王义平. 飞秒激光制备光纤布拉格光栅高温传感器研究[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328009.
- [10] Bohnert K, Gabus P, Kostovic J, *et al.* Optical fiber sensors for the electric power industry[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2005, 43(3/4/5): 511-526.
- [11] Udd E, Spillman W B. Fiber optic sensors: an introduction for engineers and scientists [M]. Hoboken: John Wiley & Sons Inc., 2011: 884-894.
- [12] Udd E. Fiber optic smart structures[J]. Proceedings of the IEEE, 1996, 84(6): 884-894.
- [13] Wang M, Liu F F, Zhou X, *et al.* Optical fiber sensing technologies based on femtosecond laser micromachining and sensitive films[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(7): 070703.  
王闵, 刘复飞, 周贤, 等. 基于光纤微结构加工和敏感材料物理融合的光纤传感技术[J]. 物理学报, 2017, 66(7): 070703.
- [14] Hu N. Tunnel fire detection technology [J]. Transportation Science & Technology, 2009(1): 86-88.  
胡宁. 隧道火灾探测技术比较[J]. 交通科技, 2009(1): 86-88.
- [15] Liao Y B, Yuan L B, Tian Q. The 40 years of optical fiber sensors in China[J]. Acta Optica Sinica, 2018, 38(3): 0328001.  
廖延彪, 苑立波, 田芊. 中国光纤传感 40 年[J]. 光学学报, 2018, 38(3): 0328001.
- [16] Jiang D S, He W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2002, 13(4): 420-430.  
姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子 • 激光, 2002, 13(4): 420-430.
- [17] Wang W Q, Liu X L. The research into optical fiber heat sensitive fire alarm in tunnels of high wind speed [J]. Fire Science and Technology, 2014, 33(12): 1408-1411.  
王文青, 刘筱璐. 高风速条件下隧道线型光纤感温火灾报警研究[J]. 消防科学与技术, 2014, 33(12): 1408-1411.