

# Research on Fire Alarm Technology Based on Fiber Bragg Grating

Hechi Ma, Danping Jia, Can Cao, Limin Zhao

School of Information Science and Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang Liaoning  
Email: 260266504@qq.com, 1518836533@qq.com, winnerjia@sohu.com, Zhaolm@sut.edu.cn

Received: Apr. 3<sup>rd</sup>, 2019; accepted: Apr. 19<sup>th</sup>, 2019; published: Apr. 26<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

It is a great significance to accurately and timely report a tunnel fire. Using FDS software to study the relationship between the temperature rise of the tunnel ceiling and the wind speed from the aspects of vehicle size, ambient temperature and fire source power, a reasonable dynamic alarm threshold is obtained. The scale tunnel model is made; the fiber grating temperature measurement system is built; the laboratory simulation experiment is carried out; the measurement error is determined to not exceed 0.7°C; and the false report problem of fire routine fixed threshold method is solved.

## Keywords

Fiber Grating, Tunnel Fire, Dynamic Threshold, Alarm

---

# 基于光纤光栅的火灾报警技术的研究

马赫驰, 贾丹平, 曹 璨, 赵立民

沈阳工业大学, 信息科学与工程学院, 辽宁 沈阳

Email: 260266504@qq.com, 1518836533@qq.com, winnerjia@sohu.com, Zhaolm@sut.edu.cn

收稿日期: 2019年4月3日; 录用日期: 2019年4月19日; 发布日期: 2019年4月26日

---

## 摘 要

隧道发生火灾时准确及时地报警具有十分重要的意义。利用FDS软件从汽车尺寸、环境温度及火源功率等方面, 研究火灾时隧道顶棚温升与风速的关系, 得到合理的动态报警阈值。制作缩尺隧道模型, 搭建光纤光栅测温系统, 进行实验室模拟实验, 确定了测量误差不超过0.7°C, 并验证了固定阈值与动态阈值相结合的火灾报警策略的可行性, 很好地解决了火灾常规固定阈值法漏报的问题。

## 关键词

光纤光栅, 隧道火灾, 动态阈值, 报警

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

随着社会的不断进步, 我国的交通建设得到了极大的发展, 至 2017 年末全国公路达到 477.35 万公里[1]。随着国民安全意识的不断提高, 公路的安全问题也日益得到重视。隧道作为公路的特殊路段, 与其它路段相比较为封闭、能见度较低、烟尘较多, 又具有照明、监控、供配电等设施, 因此极易发生事故。隧道中车流量多变, 运载货物多样, 随着隧道长度的加长, 交通量和运营时间的增加, 发生火灾的概率不断增加。当车辆碰撞或发生故障时, 极有可能发生火灾, 一旦引燃车辆油箱内的燃油, 或车辆运载的可燃物及其它危险物质, 将会导致火势迅速蔓延, 难以控制。一旦发生火灾, 隧道内的环境温度、烟雾和其它有害气体的浓度将在很短时间内快速升高, 对车内人员的生命造成较大威胁, 而且容易造成多部车辆的连续燃烧或爆炸等一系列的连锁反应[2]。因此对隧道火灾进行及时有效的报警具有极其重要的意义。

一般火灾报警采取固定阈值的方法进行定值报警。报警阈值设置过低时误报率增高; 而报警阈值设置过高时会发生报警滞后, 不利于消防救援工作快速开展。在实际隧道内往往有自然风存在且速度多变, 不同风速作用下, 传感器附近火灾烟气热能不同。因此, 设计一款与风速相关的动态阈值报警的隧道火灾报警系统具有十分重要的意义。

本文将对隧道火灾在不同风速下的顶棚温度进行仿真, 用于设定动态报警阈值。基于光纤光栅传感器搭建测温系统, 利用定值与动态阈值相结合的方式报警。

## 2. 光纤光栅测量火灾原理

目前隧道火灾探测器主要分为: 感烟型、感光型和感温型。由于公路隧道具有烟雾大、废气多、烟尘大的特点, 感烟型探测器会造成虚警率高。感光型探测器需火焰明亮清晰, 烟雾较少的情况下才会准确报警, 延误报警时间。感温型探测器中以光纤光栅传感器为最好。精度和灵敏度高, 长期稳定性好; 可远距离传输、抗电磁干扰、对环境适应性好。因此, 采用光纤光栅传感器为传感元件。

系统由光纤光栅传感器、解调模块、上位机三部分组成。将光纤光栅传感器架设于顶棚, 宽带光源所发出的激励光进入光纤, 入射到用光纤串接的光纤光栅传感器中, 光纤光栅因温度变换, 中心波长改变, 所反射的光通过光纤传送给解调模块。解调模块将光信号转换为电信号, 进行放大整形和线性化处理, 模拟信号转换成数字信号。硬件部分通过串口与上位机相连, 实时通信被测量, 上位机实现对测量温度的显示、报警等操作。

## 3. 仿真模型构建和场景设置

设定合理有效的报警阈值, 是隧道火灾报警中最关键的一步。准确掌握不同风速下的火灾顶棚温度具有重要的意义。FDS (Fire Dynamics Simulator) 仿真具有投资小、周期短、节省人力物力等优点, 因此被广泛用于火灾研究。

本文采用 FDS 软件建立了隧道模型, 选取隧道区间, 长度为 200 m。隧道高度和宽度分别为: 5.5 m、11 m。如图 1 所示。

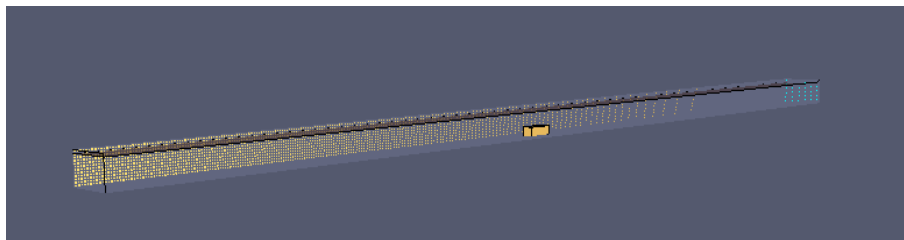


Figure 1. Tunnel simulation model

图 1. 隧道仿真模型

初始时刻, 隧道环境温度设为 20℃, 大气压力为 0.1 MPa。隧道两边端口定义为 OPEN。隧道属性设为 CONCRETE。火源热释放速率  $Q$  为 3 MW, 火源特征直径为  $D^* = 1.43$  m, 当网格尺寸采用  $D^*$  的 0.1 倍, 网格尺寸  $d$  为  $0.14 \times 0.14 \times 0.14$  m 时, 模拟结果比较准确。光纤光栅一般架设于距顶部一定距离的支架钢绞线上, 因此对高度为 5 m 平面进行温度仿真。

初起 60 秒是火灾报警的黄金时期, 隧道火灾分为初始火灾增长阶段、稳态燃烧阶段以及衰减阶段, 当火灾发生时间在 50 秒内, 周围温度即会发生明显变化[3] [4]。因此, 仿真时间采用 50 秒。

由文献可知, 隧道纵向自然风速主要分布在 1~4 m/s, 范围内最大可达 6 m/s [5]。因此, 仿真风速区间为 0~6 m/s。

## 4. 模拟结果与分析

隧道火灾顶棚温度与许多因素相关, 本文将通过多方面对火灾温度与风速之间的关系进行研究, 以达到排除其他因素单独对温度与风速关系研究的目的。

### 4.1. 汽车尺寸对不同风速下火灾温度的影响

不同尺寸车辆燃烧就会有不同尺寸的火源面形成。不同高度的车辆与隧道顶棚之间的高度差也不同。即使同一火源功率下, 汽车尺寸的差别也会影响隧道火灾顶棚温度。本文将具体研究同一火源功率下, 不同汽车尺寸对火灾顶棚温度的影响。选取了三种汽车尺寸:

小汽车: 高 1.3 m 宽 1.8 m 长 4.5 m

面包车: 高 1.8 m 宽 2.5 m 长 5 m

大货车: 高 2.7 m 宽 2.5 m 长 16 m

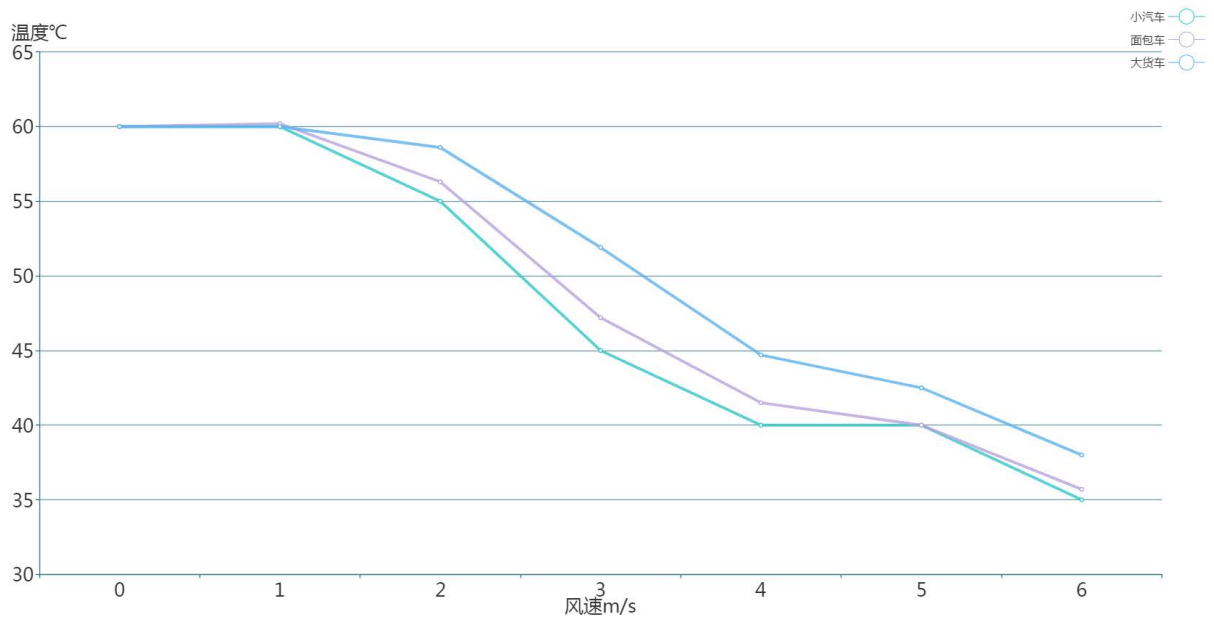
设定火源功率 3 MW, 环境温度 20℃, 研究火灾发生 50 秒时不同汽车尺寸下隧道火灾顶棚温度与风速之间的关系。

由图 2 可知, 同一风速下, 汽车尺寸越大, 火灾顶棚温度越大, 因此下文统一选择小汽车尺寸作为火源尺寸。

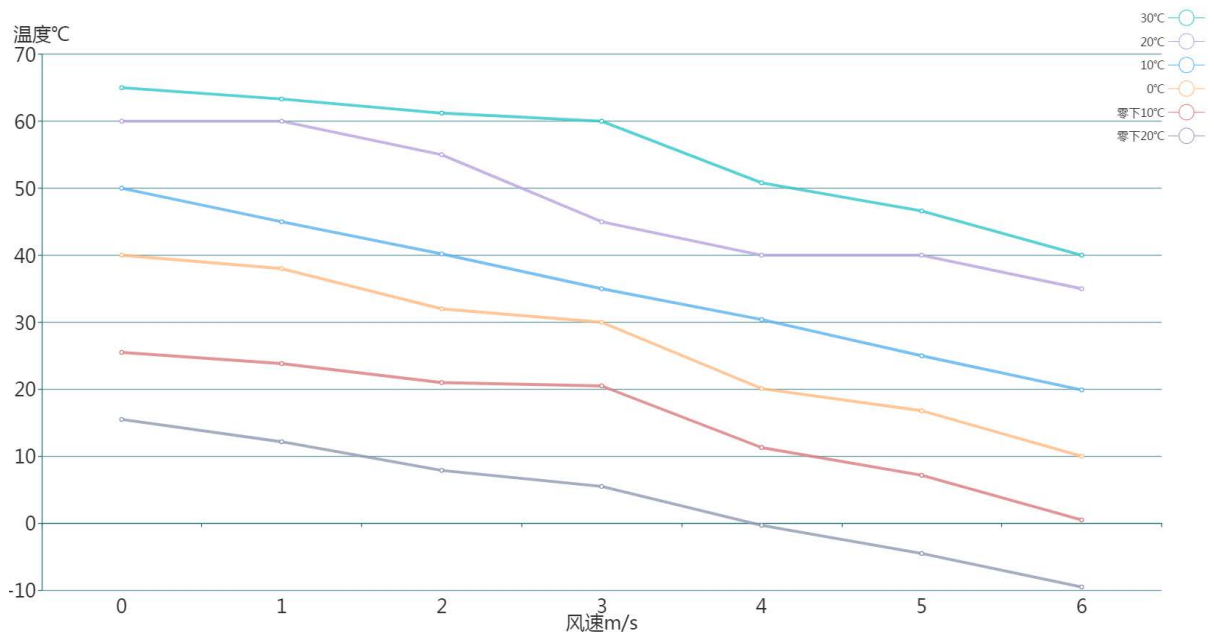
### 4.2. 环境温度对不同风速下火灾温度的影响

传感器测得温度主要来源有火灾烟气温度和环境温度。由经典隧道火灾 Kurioka 公式可知, 火灾顶棚温度会受环境温度的影响。本文将具体研究不同环境温度对火灾顶棚温度的影响。

设定火源功率 3 MW, 小汽车尺寸, 研究火灾发生 50 秒, 改变环境温度由 -20℃~30℃, 改变风速由 0~6 m/s 进行研究讨论。



**Figure 2.** Relationship between temperature and wind speed for different car sizes  
**图 2.** 不同汽车尺寸下温度与风速关系图



**Figure 3.** Relationship between temperature and wind speed at different ambient temperatures  
**图 3.** 不同环境温度下温度与风速关系图

由图 3 可知，不同环境温度下，曲线斜率基本一致。因此研究火灾温度与环境温度之差  $\Delta T$  与风速之间的关系如图 4 所示。

由图 4 可知，在同一风速下，不同的环境温度的  $\Delta T$  基本统一，因此下文选用 20°C 作为仿真的环境温度。

#### 4.3. 火源功率对不同风速下火灾温度的影响

火源功率是隧道火灾安全设计中最重要参数，直接决定了火灾现场的危险性。不同汽车具有不同

大小的油箱，燃烧时所产生火源功率也不同。范围为 3~50 MW。

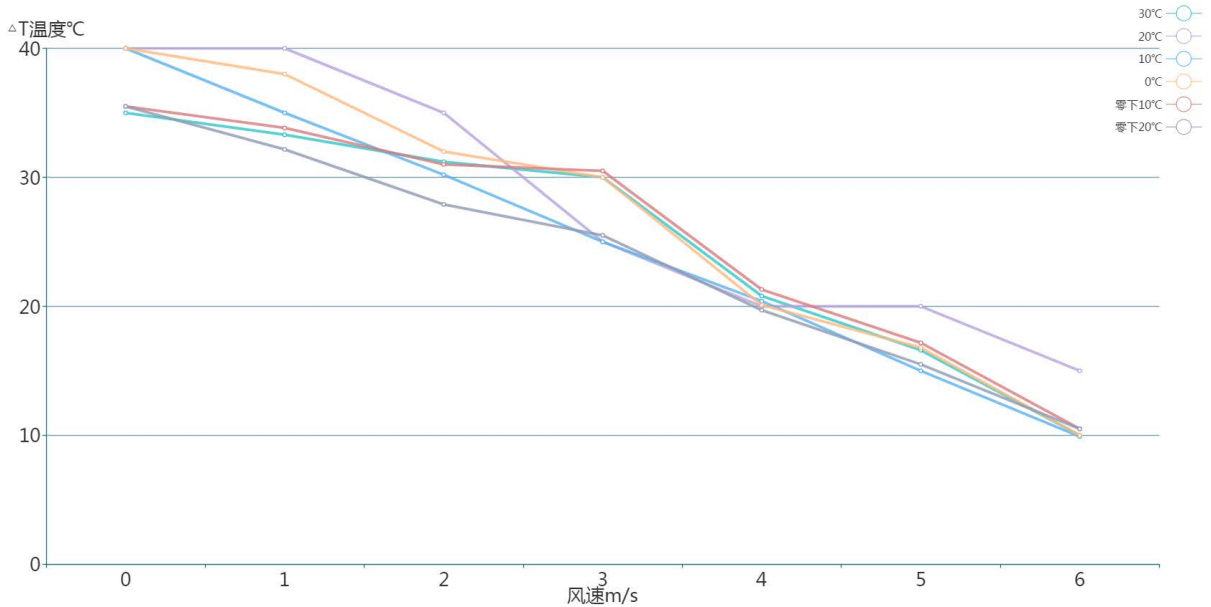


Figure 4. Relationship between  $\Delta T$  and wind speed at different ambient temperatures

图 4. 不同环境温度下  $\Delta T$  与风速关系图

Table 1. Relationship between  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$  and wind speed  $V(\text{m/s})$  under different fire source powers

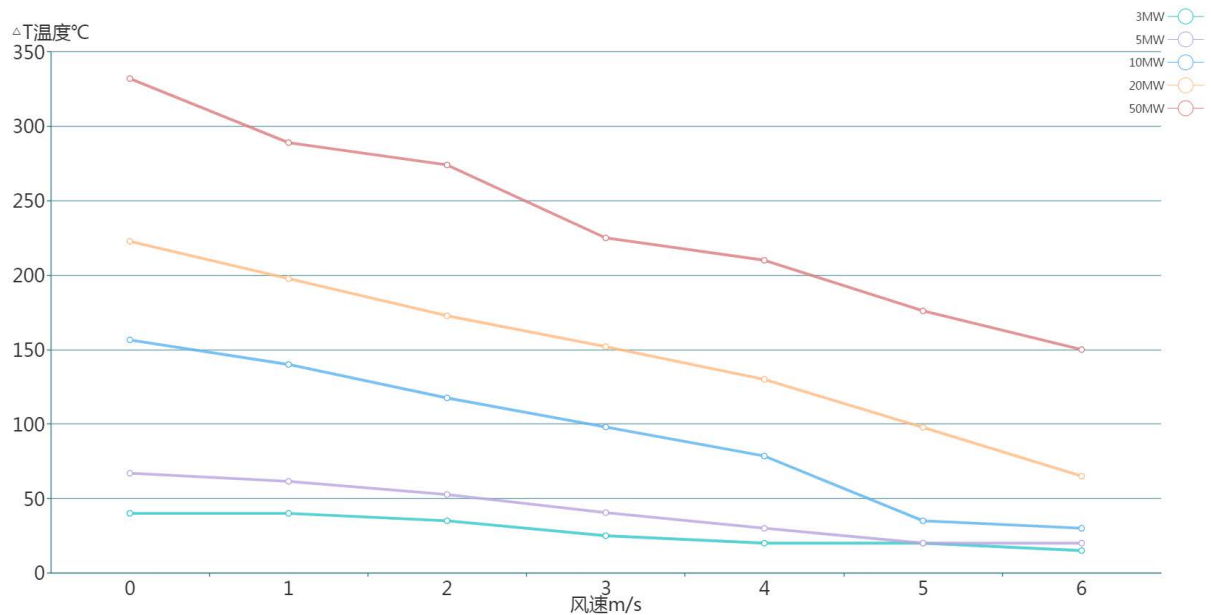
表 1. 不同火源功率下  $\Delta T(^{\circ}\text{C})$  与风速  $V(\text{m/s})$  的关系

风速	3 MW	5 MW	10 MW	20 MW	50 MW
0	40	66.95	156.5	222.7	332
1	40	61.5	140	197.7	289
2	35	52.65	117.5	172.7	274
3	25	40.5	98	152	225
4	20	30	78.5	130	210
5	20	20	35	97.7	176
6	15	20	30	65	150

设定环境温度 20°C，小汽车尺寸，火灾发生 50 秒时不同火源功率下隧道火灾顶棚温升  $\Delta T$  与风速之间的关系见表 1 所示，由此得到的关系曲线如图 5 所示，并分别得出各曲线的拟合公式列入表 2 中。

由表 2 可知，火源功率为 3 MW 时， $k$  为最小，符合所有情况，所以采用此时的拟合曲线  $y = -4.6429x + 46.429$ ，其中  $y$  为  $\Delta T$  (隧道顶棚温度与环境温度之差)，单位  $^{\circ}\text{C}$ ， $x$  为风速，单位  $\text{m/s}$ 。

火灾报警策略为固定阈值与动态阈值相结合的方式，即：采用常规火灾判定法，当探测器测得隧道顶棚温度大于 50°C 时即报警，此为固定阈值报警。但是根据上述仿真可以看出，隧道顶棚温度随着环境温度及风速的变化而变化，当风速较大或环境温度较低时，即使有火灾发生，隧道顶棚温度也会远低于 50°C，固定阈值报警会出现漏报，为此我们提出了动态阈值报警法，即当隧道尺寸固定，通过仿真可以得到最小火源情况下的温升与风速的关系曲线，测得隧道的环境温度和实时风速，通过该曲线能够由实时风速计算出温升  $\Delta T$ ，再加上此时的环境温度，即得到理论上此条件下隧道顶棚温度，如果探测器测得



**Figure 5.** Relationship between  $\Delta T$  and wind speed under different fire source powers at  $20^{\circ}\text{C}$   
**图 5.**  $20^{\circ}\text{C}$  不同火源功率下  $\Delta T$  与风速关系图

**Table 2.**  $\Delta T$  and wind speed formula under different fire source powers  
**表 2.** 不同火源功率下  $\Delta T$  与风速公式

火源功率	拟合公式	拟合度
3 MW	$y = -4.6429x + 46.429$	$R^2 = 0.9389$
5 MW	$y = -8.8036x + 76.871$	$R^2 = 0.9733$
10 MW	$y = -22.446x + 183.43$	$R^2 = 0.9792$
20 MW	$y = -25.564x + 250.51$	$R^2 = 0.9935$
50 MW	$y = -29.857x + 356$	$R^2 = 0.9882$

的温度高于计算温度则报警，把此计算的温度值叫做动态报警阈值。采用固定阈值与动态阈值相结合的方法，解决了常规固定阈值法漏报的问题。

## 5. 火灾报警系统设计

本温度测量系统主要由光纤光栅传感器、解调模块、上位机组成。由 ASE 宽带光源发出宽带光，多种波长光经由光环形器传入到光纤光栅中，其中符合光纤光栅中心波长的光将被反射回去，其它波长的光将由光纤光栅直接透射出去。反射回来的光信号经过光环形器后进入到波长解调模块中，解调模块将不同波长光信号分离，进行放大整形线性化，以及光电转换，将获取的中心波长值传输到计算机中。

硬件通过串口通信将数据发送至上位机，上位机程序采用 MFC 编写，将数据存储到数据库中，数据库采用存储量大的 SQL SERVER 2008。用户显示界面采用 Visual Studio2015 的 web 网页设计而成，从数据库中读取数据，实现温度显示。

## 6. 隧道火灾模拟实验

### 6.1. 标定实验

标定实验是为了测得光纤光栅中心波长变化与温度的关系以便系统用于直接显示温度。标定实验所



用的升温装置由电炉子与稳压器组成。通过调节稳压器的电压大小对电炉进行升温。

利用红外热成像仪来观察升温装置温度，每升高 10℃，观察光纤光栅反射光的中心波长的值，分别记录升温装置的温度以及对应的中心波长值，将得到的这组数据进行处理，得出温度 - 波长关系图。因此，可以通过获取中心波长值计算得到实时隧道温度值[6]。图 6 为温度与对应的中心波长值的测量数据。

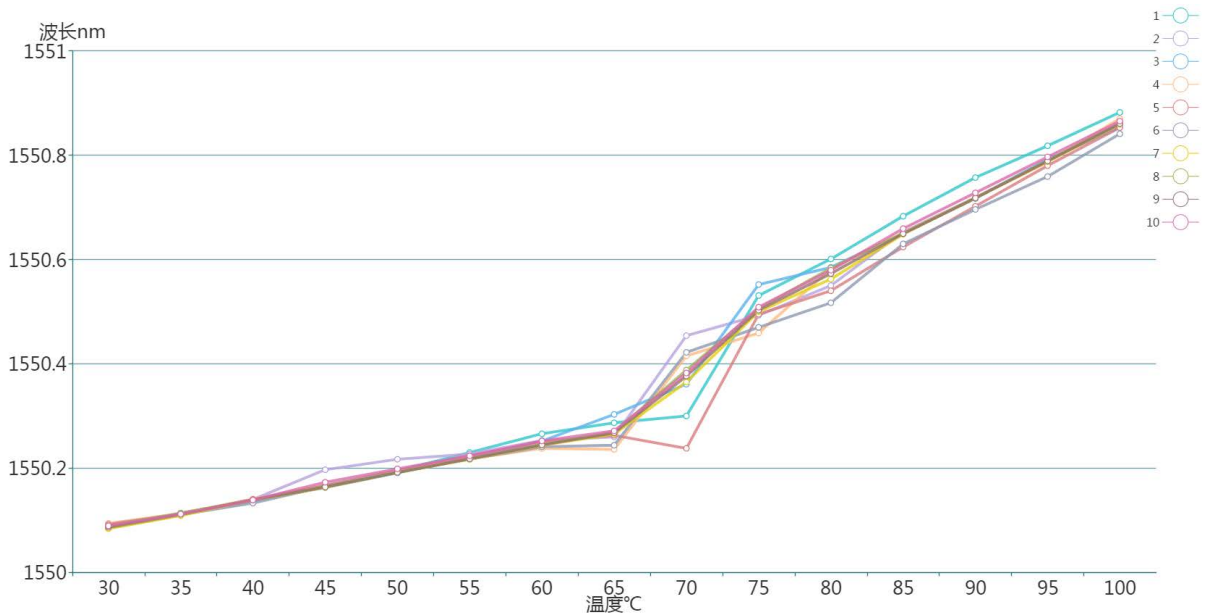


Figure 6. Temperature vs. Center wavelength  
图 6. 温度与中心波长关系图

由温度与中心波长关系图可知，温度与波长之间具有线性关系，对获取的数据用线性法进行拟合处理，得到关系式： $y = 189.88x - 294300$ ，根据拟合得到的关系式可知， $x$  为波长值，单位是 nm； $y$  为温度，单位是℃。标定之后进行了从 30℃~90℃温度测量，得到测量误差为均小于 1.79℃。

## 6.2. 缩尺实验

火灾实验中往往以全尺寸隧道火灾实验研究最有效，但是其耗费大量人力、物力。全尺寸实验往往针对单一隧道，无法进行多种工况实验，实验结果对于其他隧道不具有普适性。缩尺模型实验是按照相似原理对全尺寸隧道进行尺寸缩小化，减少资源浪费。实验室模拟实验采用 1:11 的比例搭建隧道模型。隧道由防火铝箔板制成，光纤光栅架设于顶棚。隧道高为 50 cm，宽为 100 cm。采用直径为 15 cm 的圆盘作为托盘，酒精作为燃料。在模型隧道一侧设置风机，采用希玛 AT-816 风速仪测得风速，测得不同风速下隧道火灾顶棚温度。实验实物图如图 7。

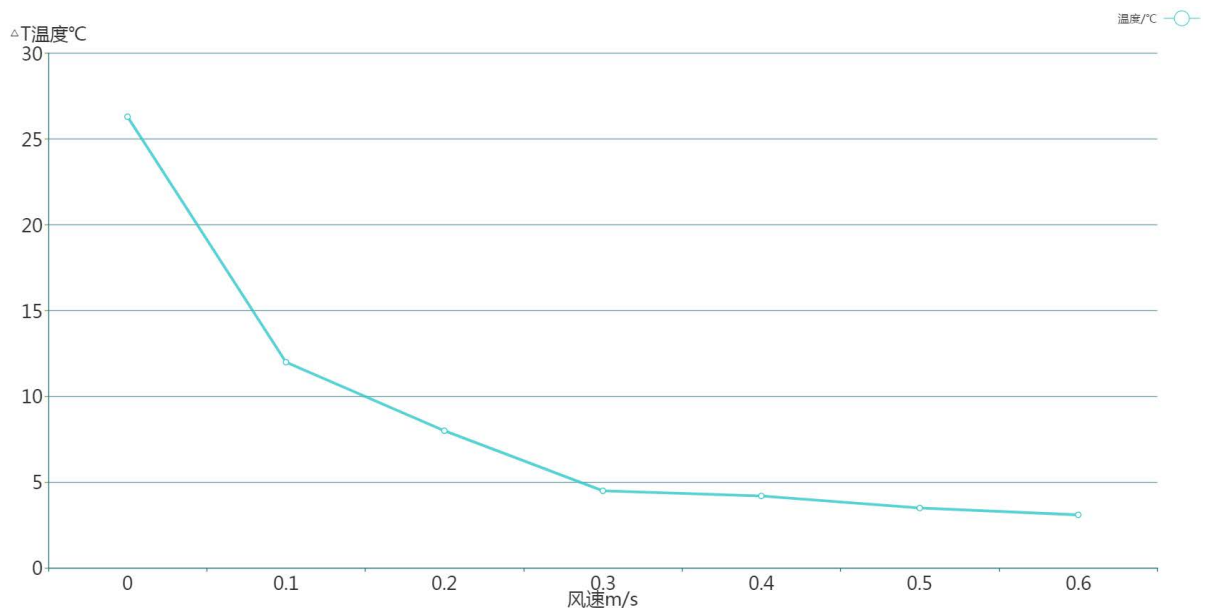
由图 8 可知，风速越大隧道顶棚温度越小。由于实验材料、实验环境、火源大小等无法完全与实际隧道火灾进行同比例缩小。为验证仿真结果可应用于实际隧道，按照实验环境进行仿真，验证仿真合理性。表 3 为实验数据与仿真数据的误差分析，最大误差为 0.7℃。因此，针对隧道的仿真结果可应用于实际隧道火灾的报警阈值设定。

实际环境温度为 24℃，光纤光栅系统测得温度与环境温度之差  $\Delta T$  如图 8。

隧道火灾报警策略采取固定阈值与动态阈值相结合的方式。流程图左侧为固定阈值方式，温度超过 50℃即报警。当温度小于 50℃时，判断温度是否大于  $T_1$ ，大于则进行报警。 $T_1 = T_0 + \Delta T$ ， $\Delta T$  与风速之间关系式通过仿真获得。流程图如图 9 所示。



**Figure 7.** Wind speed and fire temperature diagram  
**图 7.** 风速与火灾温度关系图



**Figure 8.** Wind speed and fire temperature diagram  
**图 8.** 风速与火灾温度关系图

**Table 3.** Error analysis  
**表 3.** 误差分析

风速 m/s	仿真 ΔT 温度℃	实验 ΔT 温度℃	误差℃
0	26	26.3	0.24
0.1	11	12	0.7
0.2	8	8	0
0.3	4.5	4.5	0
0.4	3.5	4.2	0.4
0.5	3	3.5	0.31
0.6	2	3.1	0.7



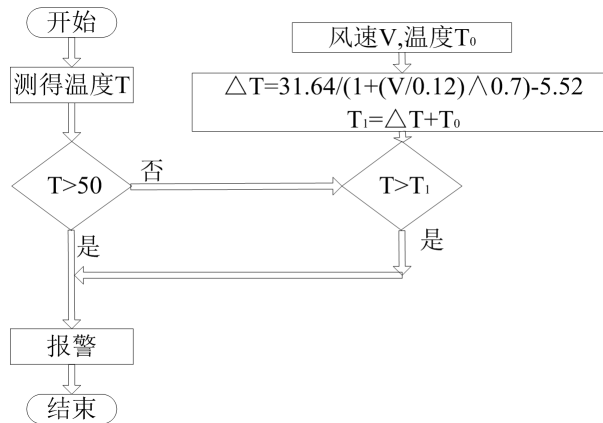


Figure 9. Alarm flow chart  
图 9. 报警流程图

应用于实际隧道时，对实际隧道进行仿真得到  $\Delta T$  与风速之间关系式。替换流程图中公式即可设定报警阈值，进行合理有效地报警。

根据仿真确定报警阈值的方法，即节约资源又具有针对性，准确有效。

## 7. 结论

1) 通过仿真确定隧道火灾报警策略为：固定阈值与动态阈值相结合的方式。其中，固定阈值采用常规火灾报警阈值  $50^{\circ}\text{C}$ 。在隧道尺寸固定后，通过仿真可得到隧道在不同火源功率下的温差与风速关系式，从而确定  $\Delta T$  的拟合公式。利用实时风速套用公式即可得到  $\Delta T$ ， $\Delta T$  加上环境温度即为动态报警阈值。

2) 通过标定实验得到中心波长与温度之间的关系，数据结果误差小于  $1.79^{\circ}\text{C}$ 。光纤光栅适合作为隧道火灾报警系统的传感器。

3) 搭建缩尺隧道模型，并对实验环境进行实测与仿真对比，二者最大误差为  $0.7^{\circ}\text{C}$ 。因此，针对隧道的仿真结果可应用于实际隧道火灾的报警阈值设定。

4) 根据仿真确定报警阈值的方法，即节约资源又具有针对性，准确有效。

## 参考文献

- [1] 2017 年交通运输行业发展统计公报[J]. 中国物流与采购, 2018(11): 51-55.
- [2] 胡嘉伟. 纵向风下隧道火灾近火源区顶棚射流特性研究[D]: [硕士学位论文]. 淮南: 安徽理工大学, 2014.
- [3] 马定超. 高风速下的隧道火灾温度场实验研究与火灾自动报警系统实施[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉理工大学, 2015.
- [4] 梁平, 韦良义, 龙新峰. 基于 FDS 的隧道火灾中烟道作用的数值模拟[J]. 交通科学与工程, 2010, 26(1): 53-58.
- [5] 于丽, 王明年, 张子晗. 六盘山隧道洞内自然风现场实测研究[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2016, 12(5): 5-7.
- [6] 寇笑婷. 基于光纤光栅的电缆温度监测系统研究[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2016.

**知网检索的两种方式：**

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2331-0235，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：[jsta@hanspub.org](mailto:jsta@hanspub.org)