

# 光纤光栅传感技术在隧道火灾监控中的应用

张嵩,王剑

(武汉理工大学 光纤传感技术与信息处理教育部重点实验室,湖北 武汉 430070)

**摘要:**分析了国内现有的隧道火灾监控系统现状,介绍了光纤光栅传感技术的原理,阐述了这一新技术在工程应用中的优点,并提出了基于光纤光栅感温探测器的隧道火灾报警监测系统,并结合工程实例介绍了该系统在隧道火灾监控中的应用。

**关键词:**光纤光栅;隧道;火灾报警

**中图分类号:**TP212.14      **文献标识码:**A

## Application in the tunnel fire monitoring of fiber Bragg grating sensor technology

ZHANG Song, WANG Jian

(Key Laboratory of Fiber Optic Sensing Technology and Information Processing, Ministry of Education, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The monitoring systems status of the existing tunnel fire in China is analyzed, the sensor principle of fiber grating technology is introduced, the merits of the new technology in the engineering applications is elaborated and the tunnel fire alarm monitoring system based on fiber Bragg grating temperature detector is put forward, the system applications in the tunnel fire monitoring combining the project is introduced.

**Key words:** fiber Bragg grating; tunnel; fire alarm monitoring

### 1 引言

近年来随着国家对交通基础设施建设投入的加大,隧道的修建日益增多。火灾是公路隧道以及铁路隧道所面临的高危灾害之一,然而隧道由于其污染大、不同季节温差大,且很多隧道位居偏远等原因,导致隧道的火灾监控成为一个难点,随着光纤光栅传感技术应用的日益成熟,较好地解决了这一问题;光纤光栅以其以光纤作为信号的传输与传感媒体,使用寿命长,耐腐蚀,信号采用光纤传输,信号衰减小,易于远传,且不受电信号、雷击因素干扰的优点,在许多行业得到了广泛应用,在隧道火灾监控方面更成为首选。

### 2 国内隧道火灾监控的现状

国内现有隧道火灾监控系统有基于双波长火焰探测和感烟式火灾探测的点型感光探测系统以及基于线性感温电缆、空气管差温探测、热敏合金线差温

探测、激光光纤感温探测的线型感温探测系统,点型感光探测系统由于其原理主要是对明火明光进行探测,容易受到干扰,如起火点被物体遮挡或非火灾引起的烟雾等,都会引起漏报或误报,影响正常工作运作。而线型感温探测系统中的感温电缆和空气管温差探测是较早期的产品,由于可靠性不稳定,现基本已被公路隧道业所淘汰。热敏合金线差温火灾探测器是现在应用较为普遍的一种,但是探测器之间是用电缆连接,易受电磁干扰,传输距离短。光纤感温探测是利用光纤拉曼散射的强度分析温度的变化,检测信号微弱对激光光源的要求较高且易损坏,而且分析计算的计算量较大,监测距离越远、要求的空间分辨率和温度精度越高,其相应速度就越低。其

**作者简介:**张嵩(1968-),男,工程师,硕士学位,主要从事光纤光栅传感应用方面的研究。E-mail:hustguo2005@yahoo.cn

**收稿日期:**2009-08-19

在我国的应用刚刚开始,但是由于价格比较昂贵,现在应用的工程较少。

而光纤光栅感温火灾报警系统则基本克服了这些缺点,具有长期耐用性、测量的长期稳定性和连续性、远距离监测、测量精度。最重要的是光纤布拉格光栅传感器是数字式的,它的传感信号为波长调制,这样测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗和探测器老化等因素的影响,同时避免了一般干涉型光纤传感器中相位测量的不清晰和对固有参考点的需要,并且将传统波分复用技术和全同光纤光栅复用技术结合,使单根光纤上光纤光栅传感探头的复用数成数量级增加,因此满足了在线监测的要求。

### 3 光纤光栅感温火灾报警系统

#### 3.1 光纤光栅传感原理

光纤 Bragg 光栅是近年来出现的一种新型传感元件<sup>[1]</sup>。光纤 Bragg 光栅的基本结构为沿纤芯折射率周期性的调制(如图 1 所示),所谓调制就是本来沿光纤轴线均匀分布的折射率产生大小起伏的变化。

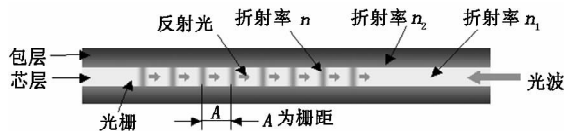


图 1 光纤布拉格光栅结构示意图

光纤的材料为石英,由芯层和包层组成。通过对芯层掺杂(通常是掺锗),使芯层折射率  $n_1$  比包层折射率  $n_2$  大,形成波导,光就可以在芯层中传播。当芯层折射率受到周期性调制后,即成为布拉格光栅<sup>[2]</sup>。布拉格光栅会对入射的宽带光进行选择性反射,反射一个中心波长与芯层折射率调制相位相匹配的窄带光(带宽通常约为 0.1~0.5 nm)。此中心波长称之为布拉格波长。所谓相位相匹配是指布拉格波长决定于折射率调制的空间周期  $\Lambda$  和调制的幅度大小,它们满足模式耦合理论的一级近似相位匹配条件,用数学公式表示为:

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

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(折射率调制幅度大小的平均效应);  $\Lambda$  为光栅条纹周期(折射率调制的空间周期)。

显然当光栅常数发生变化时,光栅所选择反射窄带光的中心波长也发生变化,即:

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

光栅的温度发生变化时,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<sup>[2]</sup>,所以:

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

或者写成:

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

式(4)右边第一项为热膨胀效应:因热膨胀引起的条纹周期变化,  $\alpha = \frac{1}{\Lambda}\frac{\partial\Lambda}{\partial T}$  为光纤的热膨胀参数;第二项为热光效应:因温度变化引起的折射率变化,  $\beta = \frac{1}{n_{\text{eff}}}\frac{\partial n_{\text{eff}}}{\partial T}$  为光纤的热光系数。实验表明,  $\alpha$  和  $\beta$  基本上不随温度变化,  $\Delta\lambda_B$  和  $\Delta T$  具有很好的线性关系。因此只要能够精确地测量光栅反射光的布拉格波长,通过标定就可以精确地知道光纤光栅处的温度。

#### 3.2 系统组成

武汉理工光科股份有限公司的 TGW 系统采用光纤光栅作为温度敏感元件,对波长信号进行数字式测量;采用先进的可调法布里-珀罗腔滤波技术进行波长检测<sup>[3]</sup>。TGW 系统的原理图如图 2 所示,当信号处理器检测到光纤光栅的反射波长出现异常,它会发送报警信号给火灾报警控制器,火灾报警控制器再发出采取措施的信号。

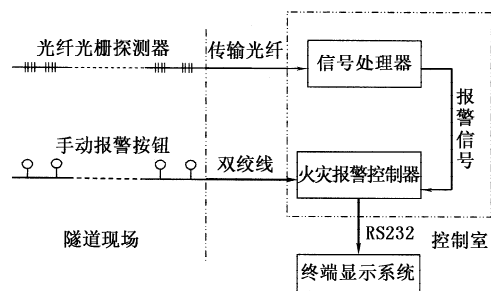


图 2 火灾报警信号传输示意图

在传统的光纤光栅系统中,由于受光源带宽的限制下,传感器探头的复用数量非常有限,一般只有 15~30 个左右,不能满足隧道的应用需求。

武汉理工光科股份有限公司的 TGW 光纤光栅感温火灾报警系统将传统波分复用技术和全同光纤光栅复用技术结合,使用波分复用与全同光纤光栅混合复用方法,解决了火灾报警的难题。

波分复用与全同光纤光栅混合复用的方法如图 3 所示,系统将监测场所分为多个防火分区,不同防火分区以全同光栅的波长  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  进行区分,每个分区长度为 50~100 m。  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$  中每一

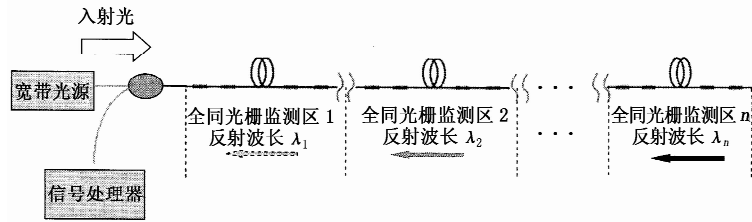


图3 混合复用方法示意图

个波长对应的防火分区内有許多监测点,同一防火分区的所有监测点采用全同光栅,通常 100 m 的监测区布设 10~15 个监测点,这些监测点上的光纤光栅的反射波长都等于该区域的对应波长。如果系统检测到  $\lambda_i$  波长产生了移动,就表明它所监测的防火

分区的温度发生了变化,若温度变化超过了设定值,系统就会报警。这种混合复用的方法,大大增加了系统的测量距离和测量点数,使之能够应用到更长距离的监控场所工程中去<sup>[4]</sup>。

基于光纤光栅隧道火灾报警系统组成图如4所示。

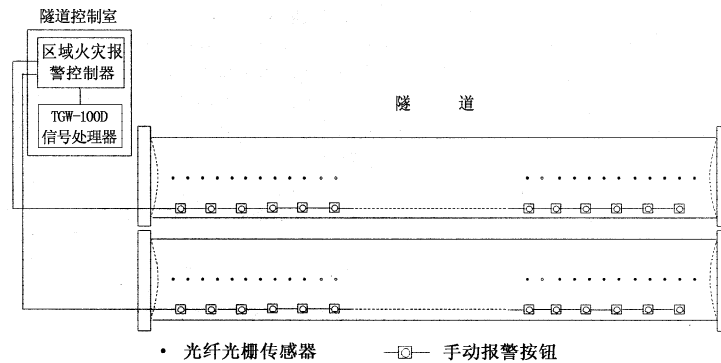


图4 基于光纤光栅隧道火灾报警系统组成

#### 4 光纤光栅火灾报警探测系统隧道模拟火灾试验

在重庆交通科研设计院的隧道与交通工程所内的实验用隧道中,在无风状况下进行点火实验,火盆位于传感光缆正下方,并与1号光缆的第5个传感器和三号光缆的第5个传感器对准,选取其中的一个传感器实验数据进行分析。实验时设定的差温报警的升温速度为 0.2 °C/s,定温报警的温度值为 4 °C,实验开始时的环境初始温度为 10 °C。

点火后起火点正上方温度迅速升高,温度在 10 s 内升高 18 °C,达到 50.8 °C,在 27 s 时达到最高温度 103.8 °C,如图5所示。此时开始灭火,温度迅速下降,而周围温度随着大量烟气的蔓延继续逐步升高。说明系统有效报警区域为 ±20m,即单个传

感器能探测到 ±20 m 以内的 0.5 m<sup>2</sup> 火灾,并在 30 s 内报警。

#### 5 结论

光纤光栅感温火灾报警系统采用光栅进行信号检测,实现现场无电检测,本质防爆;数值量检测,检测精确度高,运行稳定性好;采用分布式测量方式,测量点多,方式灵活;系统具有自检功能,可实时监测自身运行情况并输出故障报警声光信号;采用光纤传输信号,克服传输中的电磁干扰,准确可靠;信号可远距离传输,实现远程监控;结构紧凑,安装维护方便;抗腐蚀性,使用寿命长,光纤光栅在隧道工程上的应用会越来越广泛。

#### 参考文献:

[1] 廖延彪. 光纤光学[M]. 北京:清华大学出版社,2000: 69-80.  
 [2] 张沂明,余有龙,朱勇. 光纤光栅传感系统的信号解调技术[J]. 光电子技术与信息,2002,15(4):17-20.  
 [3] 何涛,赵鸣,谢强,等. 光纤光栅传感器用于盾构隧道施工的监测[J]. 地下空间与工程学报,2008,4(1): 157-161.  
 [4] 姚远,易本顺,肖进胜. 光纤光栅传感器波长解调技术研究进展[J]. 光通信技术,2007,31(1):41-45.

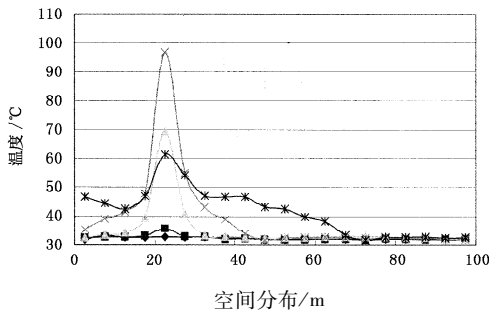


图5 点火后30s内隧道内温度场分布变化