

# 后向喇曼散射分布式光纤感温 火灾报警系统稳定性的改进

王信群<sup>1,3</sup>, 何国敏<sup>2</sup>, 丁帮勤<sup>2</sup>, 黄鑫<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 安徽合肥 230027;

2. 中钢集团武汉安全环保研究院, 湖北武汉 430081; 3. 中国计量学院质量与安全工程学院, 浙江杭州 310018)

**摘要:**对基于后向喇曼散射分布式光纤感温火灾报警系统工作不稳定的主要原因进行逐一分析, 其中降低提取弱信号的喇曼散射光波分复用器的光路损耗为主要措施. 恒温恒压使 APD 工作在增益-偏压曲线平缓段, 以提高 APD 增益的稳定性. 采用实时累加采集卡来提高时间分辨率. 通过上述多种措施相结合, 系统稳定性明显提高.

**关键词:**后向喇曼散射光纤感温火灾报警系统; 波分复用器; APD; 增益稳定; 实时累加采集卡

**中图分类号:** X932 **文献标识码:** A

## Improvement of stability of Raman backscattering optical fiber temperature fire alarm system

WANG Xin-qun<sup>1,3</sup>, HE Guo-min<sup>2</sup>, DING Bang-qin<sup>2</sup>, HUANG Xin<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, USTC, Hefei 230027, China;

2. Wuhan Institute of Safety and Environmental Protection, Sino-Steel Group, Wuhan 430081, China;

3. Quality and Safety Institute, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

**Abstract:** The parameters affecting the stability of Raman backscattering optical fiber temperature fire alarm system were analyzed, and methods to improve stability were applied. A new wavelength division multiplier (WDM) was used to extract the Raman scattering signal from a data fiber, which can reduce peak insertion loss and increase isolation significantly. Measures were taken to keep APD (avalanche photo diode) working at a constant temperature and at a low reverse voltage so as to maintain the avalanche multiplication at a constant gain. A special data acquisition card for Raman signal processing was adopted to improve time resolution. The result shows that the stability of the system was improved with the application of these measures.

**Key words:** Raman backscattering optical fiber temperature fire alarm system; WDM (wavelength division multiplier); APD (avalanche photo diode); gain stability; special data acquisition card

## 0 引言

分布式光纤感温系统利用光时域反射原理, 将

窄带光脉冲注入光纤, 利用光雷达原理测出后向散射光强随时间、温度变化的关系来进行火灾早期定位, 是一种能在整个连续光纤的长度上以距离的连

续函数形式传感出被测温度随光纤长度方向变化的感温报警系统,其中的光纤传感器不会对电子设备产生电磁干扰.自从 1985 年 Dakin<sup>[1]</sup>第一个公布了基于后向喇曼散射分布式光纤感温系统以来,世界上许多研究机构及公司对该技术进行了更为深入的开发<sup>[2~4]</sup>,并在一些行业得到应用<sup>[5,6]</sup>.国内也有很多研究机构开展过类似研究<sup>[7~9]</sup>,但与国外相比,系统的工作稳定性差距较大,主要体现在系统主机工作环境温度改变时,温度漂移非常明显,因而直接影响系统的使用.因此,开展对基于后向喇曼散射分布式光纤感温系统稳定性的研究显得十分重要.

## 1 后向喇曼散射光纤感温火灾报警系统的基本原理及简介

在 0~200 °C 范围内,斯托克斯光强随温度的变化率为  $10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ,而反斯托克斯光强随温度的变化率为  $8 \times 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$ ,将两者相比可得喇曼散射的反斯托克斯光强与斯托克斯光强之比  $R(T)$  为<sup>[1,2]</sup>

$$R(T) = \frac{P_{as}(T)}{P_s(T)} = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_{as}}\right)^4 \exp\left[-\frac{h\nu}{\kappa T}\right] \quad (1)$$

式中,  $P_{as}(T)$ ,  $P_s(T)$  分别为反斯托克斯及斯托克斯光强;  $\lambda_{as}$ ,  $\lambda_s$  分别为反斯托克斯及斯托克斯波长;  $\nu$  为喇曼散射频移波数 ( $400 \text{ cm}^{-1}$ );  $h$  为普朗克数;  $c$  为真空中的光速;  $\kappa$  为波尔兹曼常数;  $T$  为绝对温度.

该比值与入射光功率、注入条件及应力等因素均无关,实际上是用反斯托克斯光强所携带的温度信息来测温,利用斯托克斯光作为参考光以消除诸如散射光经历的损耗、注入光功率大小等因素对反斯托克斯光强的影响.

根据上述机理分析,系统组成的结构如图 1 所示.由脉冲触发系统产生电脉冲,驱动半导体激光器(LD)产生激光脉冲,激光脉冲耦合入传感光纤中,

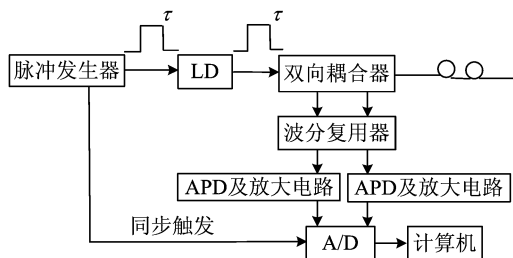


图 1 后向喇曼散射分布式光纤感温火灾报警系统结构图

Fig. 1 Schematic of Raman backscattering optic fiber temperature fire alarm system

在此脉冲下产生的瑞利散射、喇曼散射中的斯托克斯光及反斯托克斯光后向传播,再经过波分复用器中的光学滤波器强滤除瑞利光,并将斯托克斯光及反斯托克斯光分开,耦合进两只雪崩光电探测器(avalanche photo diode, APD),实现光电转换,并进行信号放大;同时激光脉冲触发系统触发采集卡,进行数据采集;最后由 PC 机进行数据处理以获取光纤不同位置上的温度信息.

## 2 系统稳定性分析

作为火灾报警系统,要求其具有很高的稳定性.后向喇曼散射分布式光纤感温火灾报警系统涉及激光技术、光谱技术、微弱信号检测技术等方面,其中任何一个环节的不稳定都将导致系统不稳定.系统不稳定主要体现为温度漂移<sup>[10]</sup>.这些不稳定因素主要由以下几方面导致:

(I) 激光器选择不当,致使在工作过程中工作波长或功率发生较为严重的漂移.

(II) 波分复用器总损耗过大,使本来就十分微弱的喇曼信号强度大幅度降低,而为获取信号不得不使 APD 工作在过高的反向电压状态下,致使其倍增的稳定性更难控制.

(III) APD 后续放大电路放大倍数过大,甚至达到数千倍,温度漂移现象严重.

(IV) 高速累加采集卡工作状态不稳定.

为了提高系统稳定性,很多学者开展了研究<sup>[10~13]</sup>,有的甚至将整个机箱进行恒温,但距离实用化还有一定差距.

## 3 提高系统稳定性的措施

稳定、可靠地工作是系统实用化、产业化的保证,为此从以下几个方面提高系统稳定性.

### 3.1 提高激光器工作的稳定性

早期系统使用大光腔大功率(10W)脉冲半导体激光器,与光纤耦合效率较低(7%).为提高激光器稳定性,改用量子阱激光器,与光纤的耦合效率达到 70%,波长温漂系数  $< 0.3 \text{ nm}/^{\circ}\text{C}$ ,激光器驱动达到稳定脉冲,无过冲,有效脉宽为 50 nm(系统距离分辨率为 5 m).

### 3.2 大幅度降低波分复用器的光学损耗

喇曼散射的光强本身就十分微弱(为入射光的  $10^{-8}$ ),一般的分布式光纤系统中,使用 Y 型耦合器,总损耗达 11 dB,同时滤光片的隔离度不高,不

能将瑞利光有效隔离,为此采用滤光片叠加,又增加光信号损耗 6~8 dB,这样光强总损耗达到 20 dB,使后续光电转换及放大电路变得更为复杂.为此,专门设计了一种低损耗、高隔离度的专用波分复用器(wavelength division multiplier, WDM),用以提取斯托克斯及反斯托克斯信号,其示意图及技术指标分别如图 2 及表 1 所示.

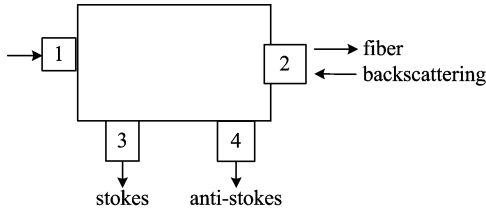


图 2 提取喇曼信号 WDM 示意图

Fig. 2 Schematic of WDM used to extract the Raman scattering signal

表 1 WDM 技术指标

Tab. 1 Specifications of WDM filter

主要指标	指标值
1 端到 2 端	<1.5
插入损耗/dB 2 端到 3 端	<0.8
2 端到 4 端	<1.5
波长隔离度/dB	>35
方向性/dB	>60
工作温度/℃	0~65

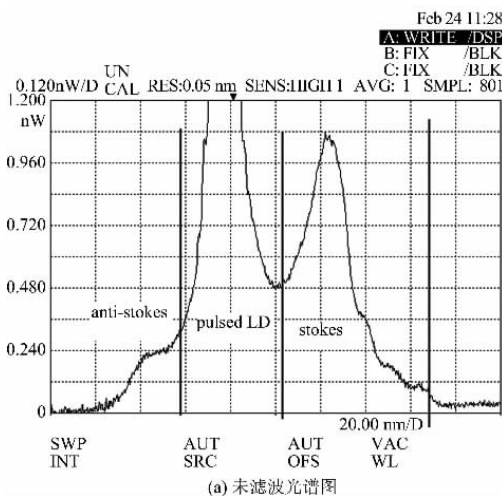
采用改进后的波分复用器后,光强总损耗约为 3.8 dB,比传统方法降低 15 dB;同时将瑞利散射有效隔离,为降低后续 APD、放大电路及信号处理的工作难度创造了极为有利的条件.其滤波效果如图 3 所示.

### 3.3 APD 及后续放大电路工作稳定性的提高

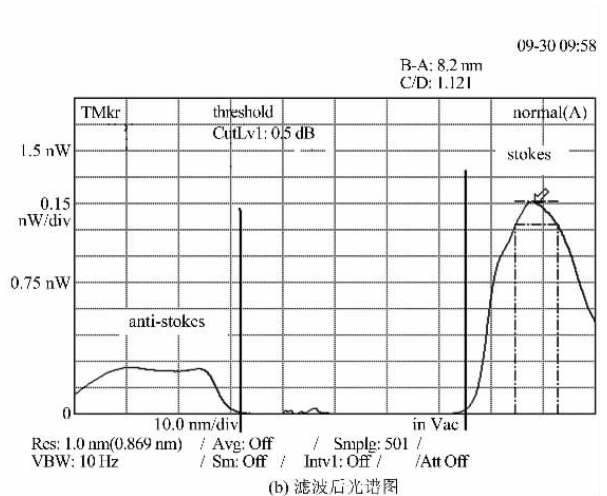
硅雪崩光电二极管(APD)由于其内部对光电信号的雪崩倍增作用,使其探测灵敏度比普通硅 PIN 光电二极管(SIPIN)大几十倍,但是在应用技术上比 PIN 管要复杂得多. APD 的增益同时受到环境温度和偏置电压的影响. 由于喇曼散射信号极其微弱,传统的光波分复用器的条件下,Raman 光信号损耗较大,使得 APD 工作在极限状态下(加置的反向电压过高),此时由温度产生的增益漂移非常难以控制,致使 APD 倍增因子不稳定,从而严重影响系统的稳定性.

使 APD 以恒定增益工作的方法有偏置电压温度补偿法及恒温恒压法. 偏置电压温度补偿法即调节 APD 的偏置电压使其随环境温度的变化而按一定比例改变,以保持 APD 的增益不变. 此方法的关键是温度的准确测量及在不同偏置电压下温度漂移系数的一致性,恒温及恒定偏置电压下使偏置电压随环境温度按一定比例改变. 但在实际中发现,各 APD 生产厂商给出的 APD 击穿电压-温漂系数均为典型值,实际上每个 APD 击穿电压-温漂系数均不相同. 例如某供应商提供的击穿电压  $V_B$  温度系数为  $1.8\sim 2\text{ V}/^\circ\text{C}$ ,为此我们用图 4 所示的试验系统对 APD 电压温漂系数进行了实际测量,所用光源功率为 13 nW,通过调节 APD 反向工作电压及恒温装置的环境温度,得出电压温漂曲线如图 5 所示.

由图 5 可知,即使在温差相同的情况下,APD 电压温漂系数在不同的反向电压下也不是线性关系,因此,对于信号极其微弱的喇曼散射,采用偏置电压温度补偿法并不实用.



(a) 未滤波光谱图



(b) 滤波后光谱图

图 3 新型 WDM 滤波效果

Fig. 3 The extraction performance of Raman scattering spectrum by the newly WDM

表 2 用于处理喇曼散射信号的实时累加采集卡技术指标

Tab. 2 Specifications of data acquisition card for Raman signal process

最高采样率 /sps	单次采样信噪比 /dB	单次及累加 采样长度/K	累加次数	累加结果 信噪比增益倍	累加平均效率 /(次·s <sup>-1</sup> )	工作温度/°C
50 M	>55	1~4	1~65 536	300	5 000	0~50

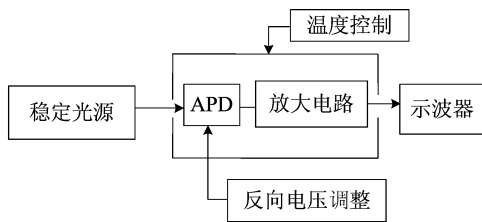


图 4 APD 电压温漂系数试验装置示意图

Fig. 4 Schematic of APD Temperature coefficient vs reverse voltage experimental system

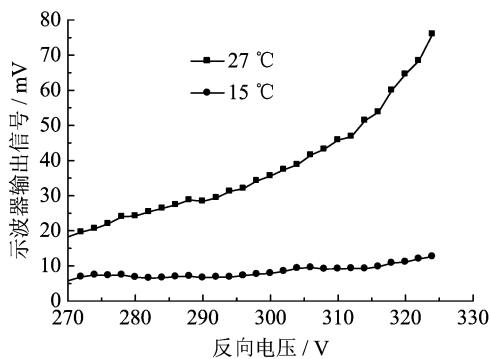


图 5 反向电压-温漂系数试验结果

Fig. 5 Experimental results of Temperature coefficient vs reverse voltage of APD

另一种使 APD 以恒定增益工作的方法是恒温恒压法,即将 APD 安装在小的恒温箱中,利用一级热电制冷器(TEC)及 APD 组件自带的温度传感器使 APD 在恒温下工作,同时让 APD 工作在增益-反向电压比较平缓的部分(即在较低的反向电压下工作)。这样更加有利于 APD 增益的稳定,从而提高整个系统的稳定性。

由于采用了新型的波分复用器(WDM),喇曼散射光信号损耗较小,使得后续放大电路放大倍数大大减小,由原来的 1 000~4 000 倍降低到 400~500 倍,工作稳定性进一步提高。

### 3.4 信号数字积累平均的改进

在喇曼散射分布式光纤感温火灾报警系统中,为了解决信号淹没在噪声之中这个难题,一般都使用时域积累平均的方法改善信噪比并恢复波形。设被测信号  $F(t) = S(t) + N(t)$ ,其中  $N(t)$  为噪声,  $S(t)$  为信号。积累平均为每隔时间  $t$  全部取样一次。

其中第  $i$  点(全部取样中的任一点)的第  $k$  次取样值为

$$F(t_k + it) = S(t_k + it) + N(t_k + it) \quad (2)$$

传统的累加方式是将本次取样值与微机中相应单元的前一次取样值作线性累加,经  $m$  次取样后,第  $i$  点的存储量为:

$$\sum_{k=1}^m F(t_k + it) = \sum_{k=1}^m S(t_k + it) + \sum_{k=1}^m N(t_k + it) = mS(it) + \sqrt{m}\delta \quad (3)$$

式中,  $N(t)$  为随机噪声,  $\delta$  为有效值,  $m$  为平均次数。则有:

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{out}} = \frac{mS(it)}{\delta\sqrt{m}} = \sqrt{m}\left(\frac{S}{N}\right)_{\text{in}} \quad (4)$$

传统方法中系统每取样一次,都要将数据传入微机,测量周期非常长,时间分辨率差。为此采用了专门用于处理喇曼散射微弱信号的实时累加采集卡,其技术指标如表 2 所示。

由于采用了上述高性能的专用累加采集卡,系统各项性能及稳定性得到进一步提高。

### 3.5 性能提高后系统的测量结果及技术指标

采用上述一系列提高稳定性的措施后,组装了整机,如图 6 所示,将 4 870 m 处的 3 m 长光纤放入烘箱进行加温试验,烘箱内同时放置普通酒精温度计。当酒精温度计温度为 44~45 °C 时(烘箱内温度场本身也不均匀),本系统显示的温度值为 45 °C。系统在某钢铁厂运行一年,性能稳定,达到产业化要求。系统总体技术指标见表 3。

表 3 系统改进后的技术指标

Tab. 3 Specifications of optical fiber distribution temperature alarm system after improvement

测温范围/°C	-20~200(可提高)
空间分辨率/m	5
温度分辨率/°C	±2
测温距离/km	5
时间分辨率/s	<2
主机稳定工作温度/°C	0~40

## 4 结论

(I) 基于光纤中后向喇曼散射的分布式感温