

文章编号: 0258-7025(2010)11-2749-13

分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展

张在宣^{1,2} 金尚忠^{1,2} 王剑锋^{1,2} 刘红林^{1,2} 孙忠周^{1,2} 龚华平^{1,2} 余向东^{1,2} 张文生²

(¹ 中国计量学院光电子技术研究所, 浙江 杭州 310018
² 中国计量学院-北洋电气集团联合光纤传感技术研究中心, 浙江 杭州 310018)

摘要 研究和讨论了分布式光纤传感器系统的测温方法和原理,介绍了国内外的研究概况、存在的问题和当前的研究趋势,探索了新一代光纤非线性效应的光纤传感机理。提出了光纤非线性散射效应的融合原理,研究和设计了一系列基于光纤拉曼与布里渊散射的分布式光纤传感器,采用光纤色散与损耗光谱的自校正方法提高了系统的可靠性、空间分辨率和测温精度;采用脉冲编码调制光源,提高了系统的信噪比和测温精度。

关键词 传感器; 光纤拉曼散射; 光纤布里渊散射; 光时域反射; 智能化分布式光纤传感网

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103711.2749

Distributed Optical Fiber Raman Photon Sensor Research Review

Zhang Zaixuan^{1,2} Jin Shangzhong^{1,2} Wang Jianfeng^{1,2} Liu Honglin^{1,2} Sun Zhongzhou^{1,2}
Gong Huaping^{1,2} Yu Xiangdong^{1,2} Zhang Wensheng²

(¹ Institute of Optoelectronics Technology, China Jiliang University, Zhejiang, Hangzhou 310018, China
² China Jiliang University-Beiyang Electric Group United Research Center of Fiber Sensor Technology,
Zhejiang, Hangzhou 310018, China)

Abstract Temperature measurement methods and principles of the distributed optical fiber sensors (DOFS) are studied and discussed. The research profile and current research trends are introduced in this paper. New generation of optical fiber sensing mechanism based on optical fiber nonlinear effect is explored. The fusion principle of optical fiber nonlinear scattering effect is put forward to research and design a new generation of series distributed optical fiber sensors based on Raman and Brillouin scattering. The reliability, spatial resolution and temperature measurement accuracy of the system are improved using optical fiber dispersion and loss spectra of auto-correction method. Using pulse code modulation source, the signal to noise ratio of DOFS is improved.

Key words sensors; optical fiber Raman scattering; optical fiber Brillouin scattering; optical time-domain reflection; intelligent distributed fiber sensor network

1 引言

分布式光纤温度传感器(DOFS)采用光纤拉曼(Raman)散射效应测温,光纤所处空间各点的温度场调制了光纤中的背向 Raman 散射的强度[反斯托克斯(Anti-Stokes)背向 Raman 散射光的强度],经波分复用器和光电探测器采集带有温度信息的背向 Raman 散射光电信号,再经信号处理,解调后将温

度信息实时地从噪声中提取出来并进行显示,传感器所用的光纤既是传输介质又是传感介质,属于本征型的光纤传感器,是一种光纤测温网络^[1];在时域里,利用光纤中光波的传播速度和背向光回波的时间间隔,利用光纤的光时域反射(OTDR)技术对测温点进行定位,它是一种光纤测温雷达系统^[2]。分布式光纤传感器具有体积小、可嵌入、外形可变、重

收稿日期: 2010-03-18; 收到修改稿日期: 2010-05-29

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327804)、国家自然科学基金(60608009)和浙江省重大科技专项(2008C13041-1, 2009C11049)资助课题。

作者简介: 张在宣(1936—),男,教授,主要从事分布式光纤传感技术及激光光谱测量等方面的研究。

E-mail: zhangzx@mail.hz.zj.cn

量轻、成本低、不导电、耐高电压和强电磁场、耐电离辐射等优点,能在有害环境中安全运行、反应快、抗腐蚀,是本质安全型的。系统具有自标定、自校准和自检功能,即使在光纤受损时仍可继续工作,而且可检测出断点位置,在一根10 km光纤上可采集几万个点的温度信息并能进行空间定位,是一种实时的、在线的光纤温度测量系统,是近20多年来发展起来的一种用于实时测量空间温度场的高新技术。由于分布光纤传感系统的优越特性,开始应用于煤矿、隧道的火灾自动温度报警系统;也可应用于油库、危险品库、军火库的温度报警系统;大型变压器、发电机组的温度分布测量、热保护和故障诊断;大坝的渗水、热形变和应力测量;地下电力电缆的温度检测和热保护。分布式光纤温度传感器系统可显示温度的传播方向、速度和受热面积。可将报警区域的平面结构图和光缆布线图事先输入计算机,可自动或手动实时显示温度报警区域或故障区域。分布式光纤 Raman 和布里渊(Brillouin)散射传感器网络是一种 3S(Smart materials, Smart structure and Smart skill)系统,将光纤传感器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、煤矿、油气田和油气管道等各种设施中,可组成分布式的光纤传感网。

本文讨论了分布式光纤传感器系统的测温方法和原理,介绍了国内外的研究概况和分布式光纤 Raman 温度传感器产品的现状,探索新一代光纤非线性效应的光纤传感机理,提高分布式光纤传感器系统的测温精度、空间分辨率、测量长度、测量时间和提高系统的可靠性,实现多参量检测是当前发展传感技术的关键;建设智能化光纤测温传感网是发展趋势。提出了利用多种光纤非线性散射效应的光纤非线性效应融合原理,研究和设计了新一代的分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射光子传感器系统。采用光纤色散与损耗光谱的自校正方法提高了系统的可靠性、空间分辨率和测温精度;采用脉冲编码调制光源提高了系统的信噪比和测温精度。

2 研究概况

2.1 光纤非线性散射的温度效应及其测温方法

当激光脉冲在光纤中传播时,回到光纤的始端,每个激光脉冲产生的斯托克斯(Stokes)Raman背

向散射光的光通量为

$$\phi_s = K_s S \nu_s^4 \phi_e R_s(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_s)L], \quad (1)$$

Anti-Stokes Raman 背向散射光的光通量可以表示为

$$\phi_a = K_a S \nu_a^4 \phi_e R_a(T) \exp[-(\alpha_0 + \alpha_a)L], \quad (2)$$

式中 ϕ_e 为入射光的光通量, S 为散射截面, K_s, K_a 分别为和光纤的 Stokes 散射截面, Anti-Stokes 散射截面有关的系数, ν_s, ν_a 分别为 Stokes 散射光子和 Anti-Stokes 散射光子的频率, $\alpha_0, \alpha_a, \alpha_s$ 分别为在光纤中入射光, Anti-Stokes 光以及 Stokes 光的平均传播损耗, L 为光纤长度, $R_s(T), R_a(T)$ 分别为与光纤分子低能级和高能级上的布居数有关的系数,是 Stokes Raman 背向散射光与 Anti-Stokes Raman 背向散射光的温度调制函数

$$R_s(T) = \{1 - \exp[-h\Delta\nu/(kT)]\}^{-1}, \quad (3)$$

$$R_a(T) = \{\exp[h\Delta\nu/(kT)] - 1\}^{-1}, \quad (4)$$

式中 h 为普朗克常数, $\Delta\nu$ 是 Raman 上下能级差,即光纤分子的声子频率为 13.2 THz, k 是玻尔兹曼常(Boltzmann)数, T 是绝对温度。激光与光纤分子的非线性相互作用,入射光子放出一个声子称为 Stokes Raman 散射光子,吸收一个声子称为 Anti-Stokes Raman 散射光子,相应的分子完成两个振动态之间的跃迁,光纤分子能级上的粒子数热分布服从玻尔兹曼定律, Anti-Stokes Raman 散射光与 Stokes Raman 散射光的强度比 $I(T)$ 为

$$I(T) = \frac{\phi_a}{\phi_s} = \left(\frac{\nu_a}{\nu_s}\right)^4 \exp\left[-\left(\frac{h\Delta\nu}{kT}\right)\right], \quad (5)$$

由两者的强度比,得到光纤各段的温度信息^[1~7]。

在光纤的前端设置一段定标光纤,若定标光纤温度为 T_0 时,得出 Raman 强度比与温度的关系式

$$\frac{I_a(T)/I_s(T)}{I_a(T_0)/I_s(T_0)} = \frac{\exp[-h\Delta\nu/(kT)]}{\exp[-h\Delta\nu/(kT_0)]}. \quad (6)$$

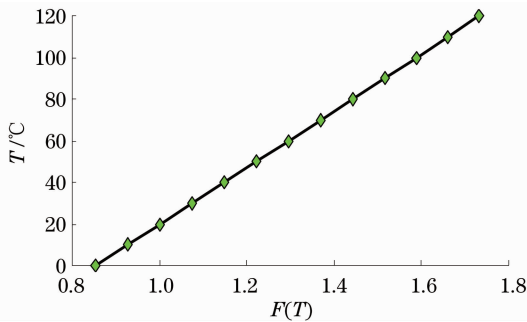
由(6)式得

$$\begin{aligned} \frac{1}{T} &= \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \ln \frac{\phi_a(T)/\phi_s(T)}{\phi_a(T_0)/\phi_s(T_0)} = \\ &= \frac{1}{T_0} - \frac{k}{h\Delta\nu} \ln F(T). \end{aligned} \quad (7)$$

在实际测量中,可以得到 $\phi_a(T), \phi_s(T), \phi_a(T_0), \phi_s(T_0)$ 经光电转换后的电平值,就能由(7)式求温度 T 。经过理论计算得到温度与 Raman 散射强度比的关系,如表 1 和图 1 所示。

表 1 温度与 Raman 散射强度比的关系 ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)Table 1 Temperature and ratio of Raman intensity in distributed fiber Raman temperature sensor ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

$T / ^\circ\text{C}$	T / K	$F(T)$
0	273.15	0.8536
10	283.15	0.9265
20	293.15	1.0000
30	303.15	1.0739
40	313.15	1.1480
50	323.15	1.2222
60	333.15	1.2962
70	343.15	1.3699
80	353.15	1.4436
90	363.15	1.5167
100	373.15	1.5893
110	383.15	1.6613
120	393.15	1.7326

图 1 光纤的 Raman 散射强度比 $F(T)$ 与温度 T 的关系 ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)Fig. 1 Relation of temperature T and ratio of Raman intensity $F(T)$ ($T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$)

在 $0\text{ }^\circ\text{C} \sim 120\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度范围内, 温度与 Raman 散射强度比为一条直线, 其斜率是相对灵敏度 $S_0 = 136.511\text{ }^\circ\text{C}$ 。它的倒数是相对温度灵敏度 $S'_0 = 0.007325\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。系统的相对灵敏度与定标光纤的温度有关, 以上推导均是在 $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时得到的, 随着定标光纤温度 T_0 的降低, S_0 值降低, 而 T_0 升高, S_0 值也升高(例如: $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $S_0 = 136.511\text{ }^\circ\text{C}$; $T_0 = 0\text{ }^\circ\text{C}$ 时, $S_0 = 116.575\text{ }^\circ\text{C}$)。在实验室里, 通常使用测温光纤段, 使它稳定地处在 $30\text{ }^\circ\text{C}$, $40\text{ }^\circ\text{C}$, $50\text{ }^\circ\text{C}$, $60\text{ }^\circ\text{C}$, $70\text{ }^\circ\text{C}$, $80\text{ }^\circ\text{C}$, $90\text{ }^\circ\text{C}$, 从分布式 Raman 光纤温度传感器系统可测量到不同温度的 Raman 强度比 $F(T)$, 得到系统的温度定标曲线, 由定标曲线的斜率得到实际系统的 S_0 。

2.2 分布式光纤 Raman 温度传感器的主要技术指标

2.2.1 测温精度和温度分辨率

系统的测温精度用不确定度 (uncertainty) 表示, 由标准偏差 σ 量度, 它表示从统计意义上, 多次

测量的平均值与测量值的均方根差。

系统的测温精度本质上由系统的信噪比决定, 系统的信号由探测激光器的脉冲光子能量决定, 与脉冲宽度、峰值功率相关, 系统的噪声主要与随机噪声与接收器光电雪崩管的噪声、前置放大器的带宽、噪声和信号采集与处理系统的带宽、噪声有关。但增加入射光纤的激光功率受到光纤产生非线性效应的阈值限制。在不影响系统空间分辨的前提下, 适当地控制系统的带宽, 也可抑制系统的噪声。

系统的温度分辨率由测温系统或仪器最小分度指示值来表征温度分辨率。

2.2.2 空间分辨率和采样分辨率

通常用最小感温长度来表征。系统的空间分辨率主要取决于脉冲激光器的宽度、光电接收器的响应时间和放大器(主要是前置放大器)的带宽和信号采集系统的带宽。要提高空间分辨率, 必须压缩探测激光脉宽, 这必然减少了脉冲抽运激光的强度, 也减弱了脉冲信号, 降低了系统的信噪比。

系统的采样分辨率由信号采集处理系统的采样速率确定。

2.2.3 测量时间和采样次数

系统的温度信号是淹没在噪声中的, 由于信号是有序的, 噪声是随机的, 因此可以采用多次采样、累加的办法提高信噪比, 信噪比的改善与累加次数的均方根成正比, 累加的采样次数确定后到底需要花多少时间来完成测量, 主要由信号的采集、累加系统和计算机的传输速度决定。因此在实际系统中测量时间比用采样次数显示更加方便。

2.2.4 测温光纤长度

在系统的信噪比确定后, 测温光纤长度与系统所选用的光谱波段、光纤的种类相关, 通常系统的信噪比与光纤的损耗决定测温光纤的长度。

2.2.5 测温范围

Raman 测温方法不受限制, 因此测温范围由光纤、光缆材料的耐温性质决定, 光纤涂层的工作温度范围^[1]如表 2 所示, 特种涂层材料的光纤可达 $500\text{ }^\circ\text{C}$ 以上。

表 2 光纤涂层的工作温度范围

Table 2 Operation temperature range of optical fiber coating

Optical fiber coating	Operation temperature range / $^\circ\text{C}$
Acrylate	-50~85
Fluoropolymer	-50~220
Thermoset resin	-50~300
Aluminium	-50~400
Metal	-50~550

这是系统的几个主要技术指标,相互间是有联系的,在设计分布式光纤 Raman 温度传感器时,根据应用的技术要求,对系统进行优化设计。

2.3 国内外分布式光纤 Raman 温度传感器研究的概况

1977 年 Barnoski 发明了 OTDR 系统,用于检测光纤的衰减和断裂,到了 1980 年, Rogers^[8] 首次提出可以利用 OTDR 技术测量光纤外部的参数。1982 年,英国的 Hartog 等^[9] 利用液芯光纤的瑞利 (Rayleigh) 散射在数百米长度光纤上实现了 $\pm 0.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的温度分辨率和 2 m 的空间分辨率。但因为采用的是液芯光纤,使用非常不方便,测温范围和长度也非常有限,没有实用性。1985 年,英国的 Dakin 等^[10] 在实验室用氩离子激光器作为光源进行了利用石英光纤 Raman 效应的分布式光纤温度传感器测温实验,同年, Hartog 等^[11] 和 Dakin 等^[12,13] 分别独立地用半导体激光器作为光源,研制出可实用的分布式光纤温度传感器实验装置,在 20 世纪 80 年代末,由 YORK 公司开始生产 DTS 型 DOFS,国内外有更多的研究部门开展了 DOFS 的研究。

英国南安普敦大学 Newson 研究团队在分布式光纤传感器方面做了大量的工作^[14~24], 1996 年, Newson 研究团队采用了 $1.64\text{ }\mu\text{m}$ 新光源,使用了低损耗窗口,提高了系统的信噪比和空间分辨率^[14]。1997 年,从理论上对 Raman 散射与 Brillouin 散射的全分布式光纤传感器作了比较^[15]。2003 年采用了脉冲 Raman 放大器的分布式光纤 Brillouin 散射传感器^[16],实现了测程 50 km^[17],空间分辨率为 15 m 的结果。2004 年,采用远程光纤 Raman 放大器的 Brillouin 散射传感器^[18,19] 提高系统的信噪比,实现了测程 100 km,空间分辨率为 20 m,累加 220 次,测温精度达到 $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的结果。2005 年, Newson 研究团队提出用单一的光源^[21],利用 Raman 散射效应测温度, Brillouin 散射频移效应测应变,该传感器在 6.3 km 范围内实现应变和温度的同时测量,空间分辨率为 5 m,温度分辨率为 $3.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,应力分辨率为 $80\text{ }\mu\epsilon$ 。同年, Newson 研究团队提出采用背向抽运的分布式光纤 Raman 放大器,实现了测程 150 km,空间分辨率为 50 m 时,测温精度为 $5.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[22,23]。2010 年,采用自发 Raman 散射温度补偿的办法,实现了 Brillouin 频域应力传感器的 24 cm 的空间分辨率^[24]。

2007 年,意大利 M. A. Soto 研究团队^[25~28] 报道了采用调幅 255 bit Simplex coded OTDR 编码技

术并采用分立式 Raman 放大器增加 Raman 温度传感器的传感长度,在 40 km 范围内实现了空间分辨率为 17 m,温度精度为 $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的测量结果。2009 年,意大利 M. A. Soto 研究团队^[29,30] 研究了 Raman 与 Brillouin 散射融合型的分布式光纤传感器,采用了多纵模的 F-P 腔激光器和分布反馈 (DFB) 窄线宽激光器双光源,取得了较好的效果,在 25 km 光纤长度测程范围内,实现了温度分辨率约 1.2 K,应变分辨率约 $100\text{ }\mu\epsilon$ 。

2007 年,美国 SensorTran, Inc. 公司 Kwang Suh 等^[31,32] 提出自相关双光源方法解决了 DOFS 中不同波段光纤损耗不同而引起的温度解调曲线的扭曲问题。2006 年,加拿大 Kellie Brown 等^[33] 提出了采用 Raman 散射与 Brillouin 散射传感器相结合的方法来实现高分辨率的温度与应变同时测量。2009 年加拿大鲍晓毅研究团队^[34] 提出利用光纤 Brillouin 增益差来改善长程分布式光纤传感器的测温精度和空间分辨率。

从 20 世纪 90 年代开始,国内在一些高等院校如重庆大学^[35]、中国计量学院^[36~44]、浙江大学^[45,46]、北京理工大学^[47]、山东大学^[48]、北京航空航天大学^[49]、清华大学^[50] 和电子科技大学^[51] 均开展了 DOFS 系统的研究。

近年来,张在宣等^[52~54] 对分布式光纤 Raman 放大器中 Rayleigh 散射线和 Brillouin 散射线的放大效应进行了研究。2006 年,提出了基于光纤非线性散射融合原理的全分布式光纤传感技术,重点研究和设计了一系列分布式光纤传感器件:集成 Raman 放大器的超远程分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射光子传感器^[55],集成 Raman 放大器的新型光纤 Brillouin 时域分析器^[56],集成 Raman 放大器超远程的分布式光纤 Raman 温度传感器^[57],新一代的分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射光子传感器^[58],全分布式光纤 Rayleigh 与 Raman 散射光子应变、温度传感器^[59]。2009 年,提出采用信号采集处理系统与已知温度标定光纤的自校正^[60],2010 年,提出了新的色散与损耗光谱的自校正方法^[61],还提出了采用脉冲编码、解码的 DOFS 系统^[62]。近 20 年来的光纤传感技术的科技成果由杭州欧忆光电科技有限公司产业化,已有 FGWC 型系列短程、中程和长程分布式光纤 Raman 温度传感器产品和高精度、高空间分辨率的分布式光纤 Raman 温度传感器产品提供市场,技术上达到国际先进水平,如表 3~5 所示。

表 3 短程分布式光纤 Raman 温度传感器特性

Table 3 Characteristic of short distance distributed fiber Raman temperature sensors

Parameters	DTS300(Sensa)	YOKOGAWA	FGWC-S02,S04(Hangzhou OE)
Fiber length /km	2	2	2,4
Temperature accuracy / $^{\circ}\text{C}$	± 1	± 1	± 1
Temperature resolution / $^{\circ}\text{C}$	0.1	0.1	0.05
Spatial resolution /m	3	4	1.5
Sample resolution/m	2.5	2	1
Measurement time /s	20	30	5,10

表 4 中程分布式光纤 Raman 温度传感器特性

Table 4 Characteristic of middle distance distributed fiber Raman temperature sensors

Parameters	N4385A/N4386A (Agilent)	DTS800M10 (Sensa)	DTS5100 (Sensortran)	FGWC-M (Hangzhou OE)
Fiber length /km	8 (max)	10	10	8,10,12
Temperature accuracy / $^{\circ}\text{C}$	± 2	± 2		± 1
Temperature resolution / $^{\circ}\text{C}$	0.1	0.1	0.1	0.05
Spatial resolution /m	1.5	1	1	1.5
Sample resolution/m	1	1	1	1
Measurement time /s	60	600	30	10

表 5 长程分布式光纤 Raman 温度传感器特性

Table 5 Characteristic of long distance distributed fiber Raman temperature sensors

Parameters	DTS800-S30 (Sensa)	DTS-XR (Sentinel)	FGWC-L30 (Hangzhou OE)
Fiber length /km	30	30	30
Temperature accuracy / $^{\circ}\text{C}$	± 2	± 1.2	± 2
Temperature resolution / $^{\circ}\text{C}$	0.1	0.05	0.1
Spatial resolution /m	8	2	< 4
Sample resolution /m	2	1	1
Measurement time /s	10	1	< 7

2007年,成都电子科技大学张利勋等^[51,63,64]提出了一种用于 DOFS 的对称解调新方案,采用 Rayleigh 散射 OTDR 曲线解调光纤的 Anti-Stokes 散射光时域反射仪曲线。采用对称解调方法的测温误差为 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 内,空间分辨率为 1 m;提出从信号处理的角度,改进了的温度解调方法使温度误差在 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$ 内。采用强循环解调方法使温度测量精度达到 $\pm 0.05^{\circ}\text{C}$ 。

2009年,清华大学张磊等^[65]提出用解卷积的算法来提高 DOFS 系统的空间分辨率,在实验上采用 300 ns 的主振荡-功率放大(MOPA)激光器,系统实现了 15 m 的空间分辨率。通过理论分析,采用 1.66 μm 光源的光纤 Raman 温度传感器,最高可获得约 1.94 倍的背向 Anti-Stokes 信号。在相同空间分辨率和温度分辨率的情况下,测量时间可以降低约 3/4。提出了在分布式光纤 Raman 温度传感器中,采用可变脉宽光源实现双功能温度监测的方法。采用窄脉冲获得高空间分辨率进行峰值温度监测,

再改用宽脉冲获得高温分辨率进行平均温度监测,降低了系统进行平均温度监测的测量时间^[50]。

2.4 国内外全分布式光纤 Raman 温度传感器产品的技术现状

近 10 多年来,光通信科学技术的成熟和电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、煤矿、油气田和油气管道等各种设施在线温度监测应用上的需要,推动了分布式光纤传感技术和光纤 Raman 传感产品的发展,DOFS 在国内外已形成系列产品,在国外生产全分布式光纤 Raman 温度传感器的主要有英国的 Sensa 公司, Sensornet 公司,美国的 Sensortran 公司, MOI 公司, Agilent 公司(现 Ap sensing 公司)和日本的横河公司(YOKOGAWA),国内生产全分布式光纤 Raman 温度传感器的主要有宁波振东公司、广州科思通公司、广州亿力公司、上海华魏公司、上海欧忆公司、上海波汇公司、西安四方公司、北京兴迪公司、威海北洋电气集团、杭州聚光科技和杭州欧忆光电科技公司等,并且生产其

他不同类型的分布式光纤拉曼温度传感器。

国内外现有短程、中程和远程分布式光纤 Raman 光子温度传感器产品技术现状见表 3~5 所示。

2.5 全分布式光纤 Raman 温度传感器发展的技术要求与研究方向

自从 20 世纪 80 年代中期,英国开发出 DOFS 以来,DOFS 技术日趋成熟,国内外已有各种类型的分布式光纤传感器产品,并开始嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、煤矿、油气田和油气管道等各种设施中,组成光纤测温传感网。在全分布式光纤传感技术的应用和发展过程中,根据科技发展的趋势和国家应用的需求,全分布式光纤传感技术发展的主要技术要求有以下几方面:

1) 超长距离

目前,DOFS 产品测温光纤长度还局限在 30 km 范围内,还不能满足电力电缆、油气管道等超长距离温度测量和监控的需要,虽然可以采用光纤开关时分复用方法,但影响测温的实时性。

2) 高空间分辨率

近年来,DOFS 产品的空间分辨率技术已达到小于 1 m,但还不能满足石化管道、电力高压开关和电力电缆热保护等应用要求,实现分米级的空间分辨率,虽然可以采用光纤绕组的点探头测温,但受热区随机性的影响,无法预计。

3) 高精度

近年来,DOFS 产品的测温精度已达到小于 1 °C,但还满足不了石化反应 0.1 °C 的需要。

4) 高可靠性

系统在恶劣、有害的环境下运行,作为报警系统要求高可靠性。

5) 多参量

温度、应力、振动和位移等多参量的检测。

6) 智能化

DOFS 系统通过光纤开关时分复用可以组成星形、环形光纤温度测量的局域传感网,大多数光纤传感网具有显示、报警功能,但尚不能联网实现智能化监控。

主要研究方向有:

1) 探索新的传感机理

要在光纤传感技术领域得到长足的发展,必须全面解决一系列重要的基础科学问题,关键在于机理创新。原有的分布式光纤传感器主要是利用单一的光纤非线性散射效应,张在宣等提出基于光纤非

线性散射效应的融合原理,利用两种以上的光纤非线性散射效应实现温度、应变测量,利用受激 Raman 放大效应实现超长距离检测。

2) 发展新的传感技术与方法

采用 Raman 相关双光源方法解决了光纤色散与损耗光谱对 DOFS 系统空间分辨率和测温精度的严重影响。采用脉冲编码调制技术提高了系统的信噪比。2010 年 Newson 研究团队提出采用温度补偿的基于布里渊光时域反射(BOFDR)的分布式光纤 Brillouin 传感器,实现了 24 cm 空间分辨率。

3) 采用新的信号采集处理技术

采用高速信号采集处理技术提高系统的信噪比、空间分辨率、可靠性和缩短测量时间。采用激光短脉冲技术与脉冲细分测量及小波变换等变换技术提高系统的空间分辨率。

4) 组网技术

与传统的传感器相比,光纤传感器本身不带电,具有抗电磁干扰、电绝缘、耐腐蚀等优点,是本质安全型的,光纤传感器具有多参量(温度、应力、振动、位移、转动、电磁场、化学量和生物量)、灵敏度高、重量轻、体积小、可嵌入(物体)的特点,随着信息科学和光纤通信技术的发展,光纤传感器是近代科学技术、工业过程控制、灾害预防和健康检测的重要手段,把传感器嵌入和装备到电网、铁路、桥梁、隧道、公路、建筑、供水系统、大坝、油气管道等各种设施中,把局域光纤传感网接入计算机进行联网,组成智能化光纤传感网。

3 研究进展

3.1 基于光纤非线性散射效应融合原理的全分布式光纤传感器

激光与光纤分子的相互作用,有弹性散射, Rayleigh 散射,只改变光子的传播方向,并不改变光子能量。也有非弹性散射,即非线性散射,入射光子被分子散射放出一个声子称为 Stokes Raman 散射光子,吸收一个声子称为 Anti-Stokes Raman 散射光子,相应的分子完成两个振动态之间的跃迁,产生 Raman 散射效应,Raman 散射的声子频率高,光纤分子的声子频率约 13.2 THz,因此,光子频移很大,光纤中 Raman 增益带宽约 5 THz,光纤 Raman 增益系数比较低约 7×10^{-14} m/W,受激的阈值比较高。在光纤中,入射光纤的探测激光与光纤中声波的非线性相互作用,光波通过电致伸缩产生声波,引起光纤折射率的周期性调制(折射率光栅),产生

Brillouin 散射光子,称为光纤 Brillouin 散射效应,光纤 Brillouin 散射也是入射光子与光纤分子相互作用的非弹性碰撞,参与的是声学声子,声子的频率为 11 GHz,因此 Brillouin 散射光的频移小。光纤中的 Brillouin 增益带宽很窄,为 20~100 MHz,光

纤 Brillouin 增益系数比较高约 5×10^{-11} m/W,受激的阈值比较低,与 Raman 散射相比背向散射较强。光纤的 Rayleigh 散射,Raman 散射和光纤 Brillouin 散射频谱特性及其温度效应如图 2 和表 6 所示。

表 6 光纤非线性散射的物理特性

Table 6 Physical property of optical fiber nonlinear scattering

Parameter	Frequency shift /GHz	Bandwidth / MHz	Gain coefficient / (10^{-11} m/W)	Scattering	Temperature	Temperature	Strain	Strain
				power ratio (to Rayleigh)/ dB	sensitivity / $^{\circ}\text{C}$	sensitivity/ (MHz / $^{\circ}\text{C}$)	sensitivity / $\mu\epsilon$	sensitivity/ (MHz / $\mu\epsilon$)
Raman	13.2k	$\sim 5\text{M}$	$\sim 7 \times 10^{-3}$	~ 30	$\sim 0.8\%$	—	—	—
Brillouin	11	20~100	~ 5	~ 15	$\sim 0.3\%$	~ 1.1	$\sim -9 \times 10^{-4}\%$	~ 0.048

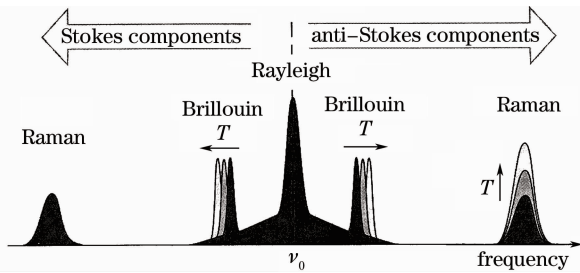


图 2 光纤的散射效应及频谱

Fig. 2 Scattering effect and frequency spectrum of optical fiber

利用光纤中单一的非线性散射效应已成功地开发出各种用于光纤通信和光纤传感的器件,例如:利用光纤自发 Raman 散射的温度效应和光时域反射原理已研发成功 DOFS,利用光纤受激 Raman 散射效应研发成功分立式和分布式宽带光纤 Raman 放大器。利用光纤自发 Brillouin 散射光频移和强度的温度和应变效应和光时域反射原理已研发成功分布式光纤 Brillouin 应变、温度传感器,利用光纤受激 Brillouin 散射效应已研发成功测量应变的 Brillouin 时域分析器和窄带 Brillouin 放大器。

充分利用光纤中多种非线性散射效应的融合现象,基于光纤非线性散射融合原理,重点研究和设计了一系列分布式光纤传感器件:集成 Raman 放大器的超远程分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射光子传感器^[55],集成 Raman 放大器的新型光纤 Brillouin 时域分析器^[56],集成 Raman 放大器超远程的分布式光纤 Raman 温度传感器^[57],新一代分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射光子传感器^[58],全分布式光纤 Rayleigh 与 Raman 散射光子应变、温度传感器^[59]。

全分布式光纤 Raman 温度传感器只能实现温度测量,因此要实现温度和应变的同时测量,采用融

合 Raman 与 Brillouin 效应的全分布式光纤传感器,由于 Brillouin 频移同时受应变和温度的影响,可以由 Raman 传感器获得待测量场的温度信息,然后从测量光纤的测量 Brillouin 信息中扣除温度信息以获得待测量场的应变信息,从而实现温度和应变的同时测量。2005 年英国南安普敦大学 Newson 研究团队^[21]首次报道了 Raman 和 Brillouin 联合传感器,该传感器在 6.3 km 范围内实现应变和温度的同时测量,空间分辨率为 5 m,温度分辨率为 3.5°C ,应力分辨率为 $80 \mu\epsilon$ 。如图 3 所示。

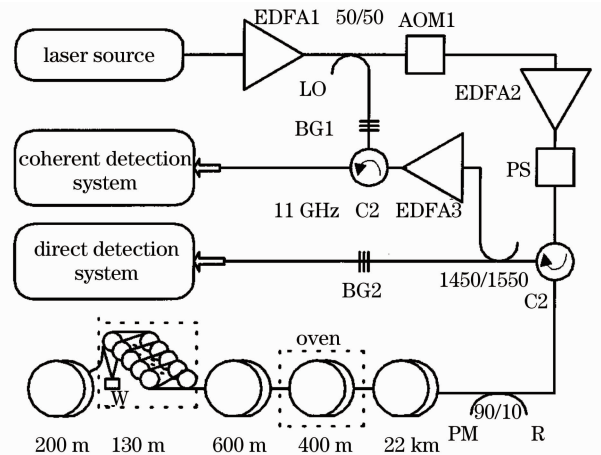


图 3 Raman 和 Brillouin 联合传感器装置

Fig. 3 Set-up of combined Raman and Brillouin sensor

2007 年,中国计量学院张在宣等^[55]提出利用光纤非线性 Raman 散射的温度效应,Brillouin 散射应变效应和温度效应,受激 Raman 放大效应和光时域反射原理制成的集成光纤 Raman 放大器的超远程分布式光纤 Raman 与 Brillouin 光子传感器。该传感器是基于光纤自发 Raman 散射、受激 Raman 散射和受激 Brillouin 散射融合原理,将分布式光纤 Raman 光子温度传感器,分布式光纤 Brillouin 光子

传感器和分布式光纤 Raman 放大器这三者有机地集成在一起组成一种新型的超远程分布式光纤温度、应力传感器。该传感器将 Anti-Stokes 和 Stokes Raman 散射光分别通过两个带通滤波器输入检测系统,测量出两者的强度比,从而得到光纤各段的温度信息;同时将反向光纤 Brillouin 散射光经窄带光纤光栅滤光器与外腔窄带光纤激光器的本地光拍频进行相干检测,测量出 Brillouin 频移得到光纤各段的应变信息。在该系统中引入光纤 Raman 放大器提高了系统的信噪比,采用了双探测光源,宽带 F-P 腔 1550 nm 半导体激光器作为光纤 Raman 散射传感器的探测光源和 1555 nm 窄带外腔半导体激光器作为光纤 Brillouin 散射传感器的探测光源,采用 1465 nm 高功率可调谐 Raman 激光器作为光纤 Raman 放大器的抽运光源,单模光纤长度为 100 km,测量精度 $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。该传感器已获国家发明专利授权,具体实验装置如图 4 所示。包括半导体 F-P 腔脉冲宽带光纤激光器(11)和半导体外腔窄带脉冲光纤激光器(12),分波器(13),合波器(14),单向器(15),光纤 Raman 激光器(16),分布式光纤 Raman 放大器(17)与双向耦合器(18)相连,它的一端与超远程单模光纤(19)相连,另一端将光纤反向的 Rayleigh 散射, Brillouin 散射和 Raman 散射光通过光纤光栅窄带反射滤光器(20)将有害的光纤 Raman 放大器抽运光的 Rayleigh 散射反射掉,经过过滤的散射光通过波分复用器(21)的两个端口将 Anti-Stokes 和 Stokes Raman 散射光分别通过两个带通滤波器(22),(23)输入直接检测系统(24),测量两者的强度比,得到光纤各段的温度信息;波分复用器的另一端口将反向光纤 Brillouin 散射光,经过窄带光纤光栅滤光器(25),通过环行器(27)与经过窄带光纤光栅滤光器(26)的外腔窄带光纤激光器的本地光,通过相干检测系统(28)拍频进行相干检测,测量频移得到光纤各段的应变信息。为了证实原理的可行性,中国计量学院张在宣等^[52~54]研究了在背向抽运分布式光纤 Raman 放大器中 Rayleigh 散射线, Stokes 与 Anti-Stokes Brillouin 散射线的放大现象,采用外腔可调谐半导体激光器(ECL)作为信号光源,背向抽运光源为可调谐高功率光纤 Raman 激光器,在实验中从 400 mW 升到 1000 mW,使用 25 km G652 单模光纤。实验结果如图 5 所示,图中的 Bp 为背向 Rayleigh 散射信号,SB₋ 为背向 Stokes Brillouin 散射信号,SB₊ 为背向 Anti-Stokes Brillouin 散射信号。背向 Rayleigh 散射信号的饱和增益为 23 dB,背向

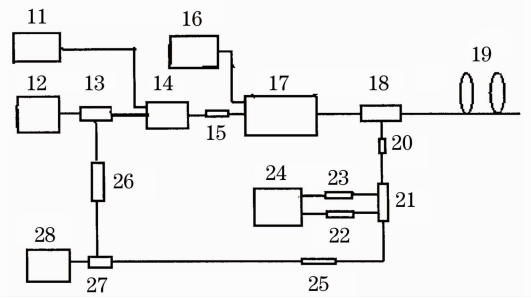


图 4 集成 Raman 放大器的远程分布式光纤 Raman, Brillouin 传感器

Fig. 4 Long distance distributed optical fiber Raman and Brillouin sensor integrated the Raman amplifier

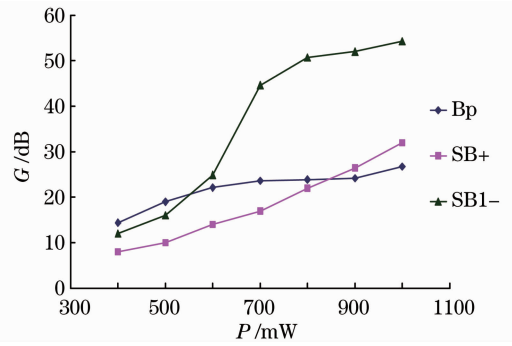


图 5 在不同抽运功率下的 Rayleigh 散射和 Brillouin 散射的增益

Fig. 5 Gain of Rayleigh scattering and Brillouin scattering with different pump powers

Anti-Stokes Brillouin 散射信号的饱和增益为 52 dB。

2009 年,意大利 M. A. Soto 等研究团队^[29,30]研究了 Raman 与 Brillouin 散射融合型的分布式光纤传感器,其中采用了多纵模的 F-P 腔激光器和 DFB 窄线宽激光器双光源,装置如图 6 所示。取得了较好的效果,采用 25 km 长度光纤,温度分辨率

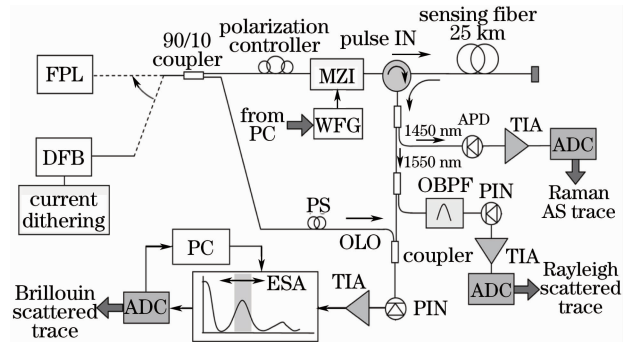


图 6 Raman 与 Brillouin 散射融合型分布式光纤传感器装置

Fig. 6 Set-up of fused Raman and Brillouin scattering distributed optical fiber sensor

约 1.2 K, 应变分辨率约 $100 \mu\epsilon$ 。

3.2 光纤色散与损耗光谱自校正分布式光纤 Raman 温度传感器

光纤 Raman 散射的频移为 13.2 THz, 因此光纤的 Anti-Stokes Raman 散射光与 Stokes Raman 散射光的波长差较大, 由于光纤的色散, 光纤的背向 Anti-Stokes Raman 散射光与 Stokes Raman 散射光在光纤中传播速度不同, 因此造成光纤 Anti-Stokes Raman 散射光与 Stokes Raman 散射光的时域反射曲线的“差步”或“走散”现象, 通常在 DOFS 中用光纤的背向 Stokes Raman 散射光的时域反射信号来解调 Anti-Stokes Raman 散射光的时域反射信号, 获得光纤各段的温度信息, 两个不同波长的光时域反射信号的“差步”或“走散”现象, 降低了系统的空间分辨率和测温精度, 甚至造成测量错误。由于各个波段的光纤损耗是不同的, 即光纤损耗存在光谱效应, 在 DOFS 中用 Anti-Stokes Raman 散射光作为测量温度信号通道, 用 Stokes Raman 散射光作为测量温度参考通道, 由于两个通道在不同波段, 测温光纤的损耗不同, 在测温系统中用 Stokes Raman 参考通道解调 Anti-Stokes Raman 信号时, 温度解调曲线出现倾斜、畸变, 而造成的测温误差, 降低了测温精度。另一方面在现场使用测温光纤、光缆, 容易引起弯曲和受压拉伸造成光纤的非线性现象, 造成各个波段的损耗不同, 而且光纤、光缆产生的弯曲和受压拉伸大小和位置均有随机性, 难以人为校正, 需要采用自校正的办法。

2007 年, Chung E. Lee 等^[66] 提出了一个解决方案, 并获得了美国专利, 如图 7 所示。专利中采用了双光源, 主激光器为 1060 nm 半导体激光器与副激光器为 980 nm 半导体激光器, 主激光器与副激光器的波长差为双倍的 Raman 位移波长, 通过光纤开关时分交替地输出同一波段的主激光器的光纤背向 Anti-Stokes Raman 散射波与副激光器的光纤 Stokes Raman 散射波, 通过副激光器的光纤 Stokes Raman 散射波解调主激光器的光纤背向 Anti-Stokes Raman 散射波, 得到光纤各段的温度信息。这种双程的 Raman 散射光时域反射曲线, 虽然回波处于同一波段, 但入射波处于主激光器波长和副激光器波长两个相隔双 Raman 位移的波长, 实际上还无法完全校正光纤色散和光纤损耗光谱的影响, 而且由于两个光源不同, 影响了系统的稳定性。

2009 年, 中国计量学院张在宣等^[60] 提出 Raman 相关双波长光源自校正分布式光纤 Raman 温度传感

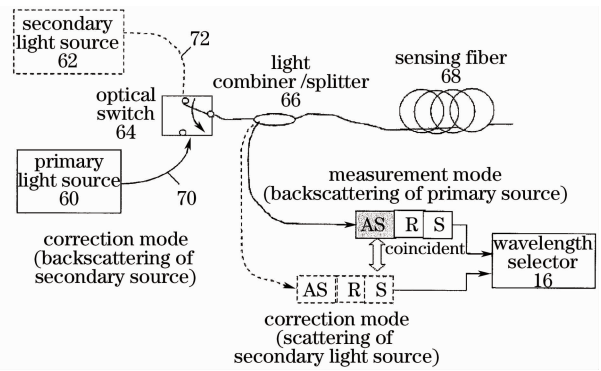


图 7 用于分布式温度系统的双光源校正装置
Fig. 7 Apparatus for dual source calibration for distributed temperature system

器, 主激光器为 1550 nm 光纤脉冲激光器, 副激光器为 1450 nm 光纤脉冲激光器, 主副激光器的波长间隔差为一个 Raman 位移波长, 采用信号采集处理系统与已知温度标定光纤的自校正, 实现了色散与损耗光谱的自校正, 还解决了光源的自校正, 提高了系统的稳定性。并采用了价格低廉、可靠性更好的电子开关, 取代光纤开关, 是一种成本低、结构简单、信噪比高、可靠性好的自校正 DOFS, 已申请发明专利, 实用新型专利已授权, 实验装置如图 8 所示。

Raman 相关双波长光源自校正 DOFS 包括 Raman 相关双波长光纤脉冲激光器模块 [由驱动电源 (31), 电子开关 (32) 和主激光器 (33) 和副激光器 (34) 组成], 集成型光纤波分复用器 (35), 两个光电接收放大模块 (36), (37), 数字信号处理器 (38), 显示器 (39) 和本征型测温光纤 (30)。集成型光纤波分复用器具有 5 个端口, 其中输入的 1, 2 端口分别与 Raman 相关双波长的 33, 34 相连, 35 的 3 端口与 30 相连, 输出的 4 端口 (1450 nm 端口) 与 36 相连, 输出的 5 端口 (1550 nm 端口) 与 37 相连, 36 的另一端和 37 的另一端分别与 38 相连, 38 的信号输出端连接 39。

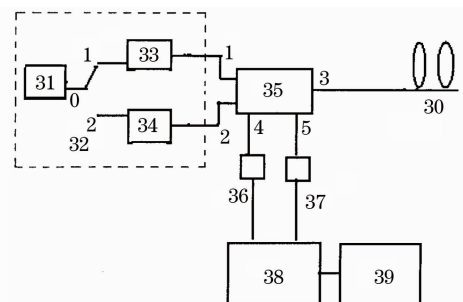


图 8 自校正分布式光纤 Raman 温度传感器装置
Fig. 8 Set-up of auto-correction distributed optical fiber Raman temperature sensor

3.3 脉冲编码调制光源的 DOFS

在分布式光纤传感器中,为了提高系统的空间分辨率,需要压缩激光器的脉宽,为了提高系统的信噪比,需要增加激光器的功率,但是光纤的入射功率超过光纤的阈值时,就会出现非线性现象,呈现不稳定状态。

近年来,在分布式光纤传感器中,采用脉冲编码调制光源,即激光序列脉冲编码技术,该技术采用了激光序列脉冲作为发射源,大大提高了发射信号光子数,在不影响系统空间分辨率的基础上使得回波信号强度大大提高,从而提高了系统的信噪比,并且有效地抑制了光纤非线性效应,由于采用了编码、解码技术,提高了系统对信号的提取、辨别能力,在同样的信号平均次数下能获得更好的信噪比,采用脉冲编码调制光源的分布式光纤传感器系统的空间分

辨率由组成序列脉冲的最小脉宽的码元脉冲宽度和接收机带宽决定。采用 N 位的序列脉冲编码解码可获得的信噪比改善为

$$R_{SN_N} = \sqrt{\frac{\sigma^2}{N}} / \sqrt{\frac{\sigma^2}{(N+1)^2}} = \frac{N+1}{2\sqrt{N}}. \quad (8)$$

由(8)式可知,信噪比改善随着编码位数的提高而提高。

当 N 取 255 时有

$$R_{SN_{255}} = \frac{255+1}{2\sqrt{255}} \approx 8.02. \quad (9)$$

韩国 J. Park 等^[67]研究了采用脉冲编码光源的基于 Raman 散射的分布式光纤温度传感器,Agilent 公司的 N4385A/4386A/4387A 产品,已采用了该技术,该传感器结构如图 9 所示。

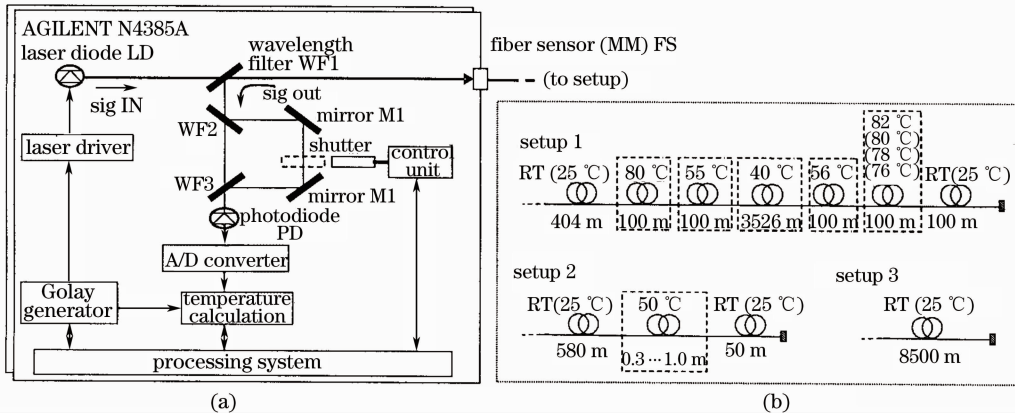


图 9 (a) 分布式光纤温度传感器, (b) 用在实验里的传感光纤装置

Fig. 9 (a) Scheme of DOFS, (b) set-up of sensing fiber used in experiments

采用脉冲编码技术后,提高了分布式光纤温度传感器的信噪比,Agilent 公司采用了平均功率为 18 mW 的脉冲编码调制 1064 nm LD 激光器,测量光纤长 8 km,测温精度 $\pm 2^\circ\text{C}$,空间分辨率为 1.5 m,测量时间为 60 s。

3.4 组网技术

DOFS 通过光纤开关时分复用可以组成星形、环形光纤温度测量的局域传感网,需要通过接口和协议接入计算机进行智能化监测、显示和控制。图 10 是 DOFS 组成 123 km 的日本东京电力监控光纤传感网。

该光纤传感网由日本横河电气公司^[68]实施,采用三台 DOFS 通过路由器与主控计算机连接,保存与处理所有的监测数据,构成一个广域测温传感网。电力火灾监测系统中第一台 ROTDR,监测 6 路电缆

隧道,测温光缆总长为 42 km,第二台 ROTDR,监测 4 路电缆隧道,测温光缆总长为 29 km,第三台 ROTDR,监测 5 路电缆隧道,测温光缆总长为 52 km,在电缆隧道内总共铺设 123 km 测温光缆,实时监测电缆隧道内的电缆温度异常情况,监控火灾。

4 结 论

研究和讨论了分布式光纤传感器系统的测温方法和原理,介绍了国内外的研究概况和当前的研究趋势,提出了利用多种光纤非线性散射效应的光纤非线性效应的融合原理,研究和设计了新一代分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射传感器,集成 Raman 放大器超远程的分布式光纤 Raman 温度传感器,集成 Raman 放大器的新型光纤 Brillouin 时

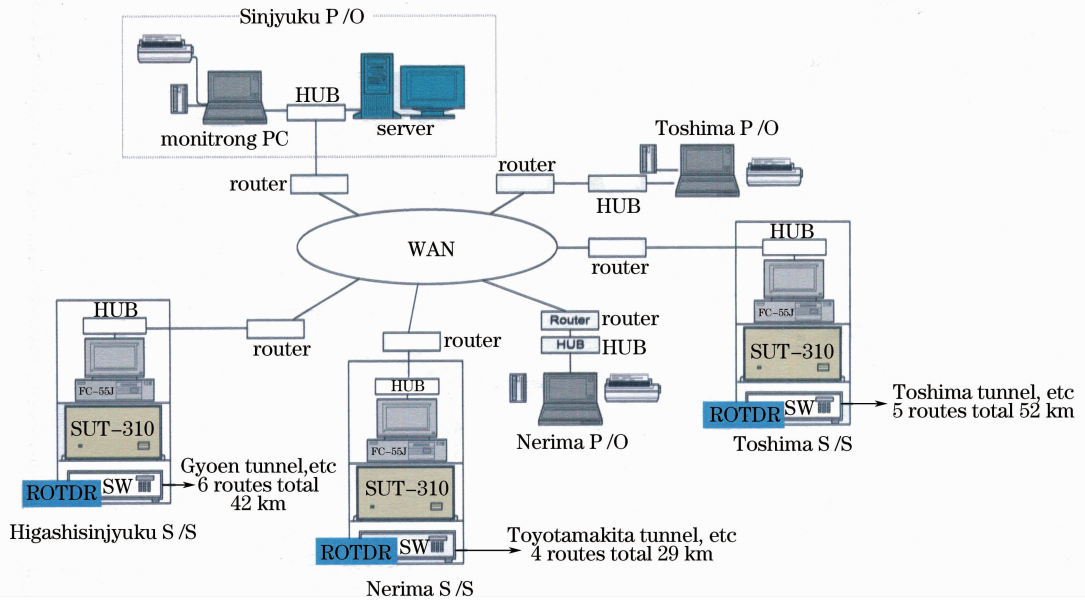


图 10 电力火灾监控光传感网

Fig. 10 Electric fire monitoring optical fiber sensor network

域分析器(BOTDA),集成 Raman 放大器的超远程分布式光纤 Raman 与 Brillouin 散射传感器。采用光纤色散与损耗光谱的自校正方法提高了系统的可靠性、空间分辨率和测温精度;采用脉冲编码调制光源提高了系统的信噪比。全分布式光纤 Raman 和 Brillouin 散射光子传感器网络是一种 3S 系统。通过时分、波分复用技术组成星形或环形的局域传感网,接入计算机,组成综合的智能光纤传感网。

参 考 文 献

- Zhang Zaixuan, Insoo S. Kim, Wang Jianfeng *et al.*. Distributed optical fiber sensors system and networks [C]. *SPIE*, 2001, **4357**: 35~53
- Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Guo Ning *et al.*. 30 km distributed optical fiber Raman photons temperature lidar [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 78~82
- Zhang Zaixuan, Liu Tianfu, Zhang Buxin *et al.*. Laser Raman type distributed optical fiber temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1995, **15**(11): 1585~1589
张在宣, 刘天夫, 张步新等. 激光 Raman 型分布光纤温度传感器系统 [J]. *光学学报*, 1995, **15**(11): 1585~1589
- Liu Tianfu, Zhang Buxin, Chen Yang *et al.*. Optical fiber backward Raman scattering temperature character and its application [J]. *Chinese J. Lasers*, 1995, **A22**(9): 695~700
刘天夫, 张步新, 陈阳等. 光纤后向拉曼散射温度特性及其应用 [J]. *中国激光*, 1995, **A22**(9): 695~700
- Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Liu Honglin *et al.*. Experimental research of 30 km long distance optical fiber Raman temperature sensor system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 613~616
张在宣, 王剑锋, 刘红林等. 30 km 远程分布光纤拉曼温度传感器系统的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 613~616
- Zhang Zaixuan, The research of temperature effect of optical fiber molecular and application progress for distributed optical

fiber temperature sensor network [J]. *Journal Atomic and Molecular Physics*, 2000, **17**(3): 559~565

- 张在宣. 光纤分子背向散射的温度效应及其在分布光纤温度传感网络上应用研究的进展 [J]. *原子与分子物理学报*, 2000, **17**(3): 559~565
- Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Wang Jianfeng *et al.*. Optimum design of 30 km long-distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system (invited paper) [C]. *SPIE*, 2004, **5634**: 182~190
 - A. J. Rogers. Polarisation optical time domain reflectometry [J]. *Electron. Lett.*, 1980, **16**(13): 489~490
 - A. H. Hartog, D. N. Payne. Fiber optic temperature distribution sensor [C]. *Proc. IEE Colloq Optical Fibre Sensors*, 1982
 - J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby. Distributed anti-Stokes ratio thermometry [C]. *Proc. OFS 3*, San Diego, 1985. Postdeadline paper PDS-3
 - A. H. Hartog, A. P. Leach, M. P. Gdd. Distributed temperature sensing in solid-core fibers [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(23): 1061~1062
 - J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby *et al.*. Distributed optical fibre Raman temperature sensor using a semiconductor light source and detector [J]. *Electron. Lett.*, 1985, **21**(13): 569~570
 - J. P. Dakin, D. J. Pratt, G. W. Bibby. Temperature distribution measurement using Raman ratio thermometry [C]. *SPIE*, 1985, **566**: 249~253
 - G. P. Lees, A. P. Leach, A. H. Hartog *et al.*. 1.64 μm pulsed source for a distributed optical fibre Raman temperature sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(19): 1809~1810
 - P. C. Wait, K. De Souza, T. P. Newson. A theoretical comparison of spontaneous Raman and Brillouin based fibre optic distributed temperature sensors [J]. *Opt. Commun.*, 1997, **144**(1-3): 17~23
 - Huai Hoo Kee, G. P. Lees, T. P. Newson. 1.65 μm Raman-based distributed temperature sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(21): 1869~1870
 - Y. T. Cho, M. Alahbabi, M. J. Gunning *et al.*. 50-km single-ended spontaneous-Brillouin-based distributed-temperature sensor

- exploiting pulsed Raman amplification[J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(18): 1651~1653
- 18 Y. T. Cho, M. N. Alahbabi, M. J. Gunning *et al.*. Enhanced performance of long range Brillouin intensity based temperature sensors using remote Raman amplification [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**: 1548~1552
- 19 Mohamed N. Alahbabi, Yuh T. Cho, Trevor P. Newson. 100 km distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2004, **15**: 1544~1547
- 20 Y. T. Cho, M. N. Alahbabi, G. Brambilla *et al.*. Remote amplification in long range distributed Brillouin based temperature sensors[C]. *SPIE*, 2005, **5855**: 72~75
- 21 M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, T. P. Newson. Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering[J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(11): 1276~1278
- 22 Mohamed N. Alahbabi, Yuh T. Cho, Trevor P. Newson. 150-km-range distributed temperature sensor based on coherent detection of spontaneous Brillouin backscatter and in-line Raman amplification [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2005, **22**(6): 1321~1324
- 23 Mohamed N. Alahbabi, Yuh Tat Cho, Trevor P. Newson. Long-range distributed temperature and strain optical fibre sensor based on the coherent detection of spontaneous Brillouin scattering with in-line Raman amplification [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1082~1090
- 24 Mohammad Belal, Yuh Tat Cho, Morten Ibsen *et al.*. A temperature-compensated high spatial resolution distributed strain sensor[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2010, **21**(1): 015204
- 25 M. A. Soto, P. K. Sahu, S. Faralli *et al.*. Distributed temperature sensor system based on Raman scattering using correlation-codes[J]. *Electron. Lett.*, 2007, **43**(16): 862~864
- 26 Marcelo A. Soto, Gabriele Bolognini, Fabrizio Di Pasquale *et al.*. Simplex-coded BOTDA fiber sensor with 1 m spatial resolution over a 50 km range[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **35**(2): 259~261
- 27 Gabriele Bolognini, Jonghan Park, Marcelo A. Soto *et al.*. Analysis of distributed temperature sensing based on Raman scattering using OTDR coding and discrete Raman amplification [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2007, **18**(10): 3211~3218
- 28 M. A. Soto, P. K. Sahu, S. Faralli *et al.*. High performance and highly reliable Raman-based distributed temperature sensors based on correlation-coded OTDR and multimode graded-index fibers[C]. *SPIE*, 2007, **6619**: 66193B
- 29 Gabriele Bolognini, M. A. Soto, Fabrizio Di Pasquale. Fiber-optic distributed sensor based on hybrid Raman and Brillouin scattering employing multiwavelength Fabry-Pérot lasers [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2009, **21**(20): 1523~1525
- 30 M. A. Soto, Gabriele Bolognini, Fabrizio Di Pasquale. Use of Fabry-Pérot lasers for simultaneous distributed strain and temperature sensing based on hybrid Raman and Brillouin scattering [C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 750328
- 31 Kwang Suh, Chung Lee. Auto-correction method for differential attenuation in a fiber-optic distributed-temperature sensor [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(16): 1845~1847
- 32 Kwang Suh, Chung Lee, Michael Sanders *et al.*. Active plug & play distributed Raman temperature sensing [C]. *SPIE*, 2008, **7004**: 700435
- 33 Kellie Brown, Anthony W. Brown, Bruce G. Colpitts. Combined Raman and Brillouin scattering sensor for simultaneous high-resolution measurement of temperature and strain [C]. *SPIE*, 2006, **6167**: 616716
- 34 Yongkang Dong, Xiaoyi Bao, Wenhai Li. Fiber differential Brillouin gain for improving the temperature accuracy and spatial resolution in a long-distance distributed fiber sensor [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(22): 4297~4301
- 35 Huang Shanglian, Liang Dawei, Liu Gong *et al.*. The research of distributed optical fiber temperature sensor system [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 1991, **12**(4): 359~364
黄尚廉, 梁大巍, 刘 龚等. 分布式光纤温度传感器系统的研究 [J]. *仪器仪表学报*, 1991, **12**(4): 359~364
- 36 Wang Wei, Zhou Bangquan, Zhang Zaixuan *et al.*. Temperature measurement accuracy of the distributed optical fiber Raman photons temperature sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 1999, **19**(1): 100~106
王 玮, 周邦全, 张在宣等. 分布型光纤 Raman 光子温度传感器系统的测温精度 [J]. *光学学报*, 1999, **19**(1): 100~106
- 37 Zhang Zaixuan, Wang Kequan, Insoo S. Kim *et al.*. Distributed optical fiber temperature sensor (DOFTS) system applied to temperature automatically alarm of coal-mine and tunnel [C]. *SPIE*, 2000, **4047**: 128~132
- 38 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Feng Haiqi *et al.*. Measurement of performance characters of a 10 km LD distributed optical fiber temperature sensor(LDOFTS) system [C]. *SPIE*, 2000, **4220**: 245~249
- 39 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Feng Haiqi *et al.*. Sampling correct technology of distributed optical fiber temperature sensor (DOFTS) system [C]. *SPIE*, 2000, **4220**: 250~254
- 40 Zhang Zaixuan, Guo Ning, Yu Xiangdong *et al.*. Distributed fiber optics Raman high temperature (1000 °C) measuring networks [C]. *SPIE*, 2001, **4603**: 116~120
- 41 Liu Honglin, Zhuang Songlin, Zhang Zaixuan *et al.*. The dynamic base matching method to increase the stability of distributed optical fiber temperature sensors [C]. *SPIE*, 2002, **4920**: 295~298
- 42 Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Guo Ning *et al.*. The optimum designs of 30 km distributed optical fiber Raman photons temperature sensors and measurement network [C]. *SPIE*, 2002, **4920**: 268~279
- 43 Zhang Zaixuan, Liu Honglin, Guo Ning *et al.*. 30 km distributed optical fiber Raman photons temperature lidar [C]. *SPIE*, 2003, **4893**: 78~82
- 44 Zaixuan Zhang, Honglin Liu, Jianfeng Wang *et al.*. Optimum design of 30 km long-distance distributed optical fiber Raman temperature sensor system (invited paper) [C]. *SPIE*, 2004, **5634**: 182~190
- 45 Song Muping, Tang Weizhong, Zhou Wen. Theoretical analysis of high spatial resolution of distributed optical fiber sensors [J]. *Optical Communication Technology*, 1999, **23**(1): 64~69
宋牟平, 汤伟中, 周 文. 实现高空间分辨率分布式光纤传感器的理论分析 [J]. *光通信技术*, 1999, **23**(1): 64~69
- 46 Song Muping, Bao Chong, Ye Xianfeng. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(3): 757~762
宋牟平, 鲍 翀, 叶险峰. 基于正交偏振控制的布里渊光时域分析长距离分布式光纤传感器 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(3): 757~762
- 47 Zhao Hongzhi, Li Naiji, Zhao Dazun. Research of distributed optical fiber temperature sensor based on backward Raman scattering [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 1996, (5): 7~13
赵洪志, 李乃吉, 赵达尊. 基于背向拉曼散射的分布式光纤温度传感器的研制 [J]. *仪表技术与传感器*, 1996, (5): 7~13
- 48 Guo Bing, Mu Zhihua, Jiang Mingshun *et al.*. Design of a single-mode fiber distributed Raman temperature sensor system [J]. *Study on Optical Communication*, 2009, (4): 47~49, 63
国 兵, 牟志华, 姜明顺等. 单模光纤分布式喇曼温度传感系统设计 [J]. *光通信研究*, 2009, (4): 47~49, 63

- 49 Liu Jiansheng, Li Zheng, Zhang Qishan. Research progress of full distributed optical fiber temperature sensor [J]. *Electronic Science and Technology Review*, 1999, (3): 10~13
刘建胜, 李 铮, 张其善. 光纤完全分布式温度传感系统研究进展[J]. *电子科技导报*, 1999, (3): 10~13
- 50 Zhang Lei, Feng Xue, Zhang Wei *et al.*. Fiber Raman distributed temperature sensor based on the light source with adjustable pulsewidth [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38** (10): 2584~2587
张 磊, 冯 雪, 张 巍等. 基于变脉宽光源的分布式光纤拉曼温度传感器研究[J]. *光子学报*, 2009, **38**(10): 2584~2587
- 51 Zhang Lixun, Liao Yun, Ou Zhonghua *et al.*. Symmetrical demodulation of distributed fiber Raman temperature sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(3): 400~403
张利勋, 廖 云, 欧中华等. 分布式光纤拉曼温度传感器的对称解调[J]. *光学学报*, 2007, **27**(3): 400~403
- 52 Zaixuan Zhang, Bizhi Dai, Xiaolai Li *et al.*. The amplification effect on stimulated Brillouin scattering in the S-band forward G652 fiber Raman amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(11): 629~632
- 53 Zaixuan Zhang, Bizhi Dai, Xiaolai Li *et al.*. Experimental study of Raman amplification on stimulated Brillouin scattering in the G652 fibers at 1520 nm [C]. *SPIE*, 2006, **6027**: 602742
- 54 Zaixuan Zhang, Huaping Gong. Amplification effect on SBS and Rayleigh scattering in the backward pumped distributed fiber Raman amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(5): 393~395
- 55 Zhang Zaixuan, Gong Huaping. Ultra-long distance distributed optical fiber Raman and Brillouin photons sensor; China, 200710156868[P]. 2008-04-16
张在宣, 龚华平. 超远程分布式光纤拉曼与布里渊光子传感器; 中国, 200710156868[P], 2008-04-16
- 56 Zhang Zaixuan, Zhang Shuqin. New type optical fiber Brillouin optics domain analyzer (BOTDA); China, 200810063711 [P]. 2008-12-17
张在宣, 张淑琴. 新型光纤布里渊光时域分析器; 中国, 200810063711[P]. 2008-12-17
- 57 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng. Ultra long distance distributed optical fiber Raman photon temperature sensor integrated a Raman amplifier; China, 20072019219[P]. 2008-08-27
张在宣, 王剑锋. 一种集成 Raman 放大器的超远程分布式光纤拉曼光子温度传感器; 中国, 20072019219[P]. 2008-08-27
- 58 Zhang Zaixuan, Jin Shangzhong, Wang Jianfeng *et al.*. New type distributed optical fiber Raman, Brillouin scattering sensors; China, 201010145895. x[P]. 2010
张在宣, 金尚忠, 王剑锋等. 新型分布式光纤拉曼, 布里渊散射传感器; 中国, 201010145895. x[P]. 2010
- 59 Zhang Zaixuan. Full distributed Rayleigh and Raman scattering photons stress and temperature sensor; China, 200910099463 [P]. 2010-03-03
张在宣. 全分布式光纤瑞利与拉曼散射光子应变、温度传感器; 中国, 200910099463 [P]. 2010-03-03
- 60 Zhang Zaixuan. Auto-correction distributed fiber Raman temperature sensor based on Raman-relation dual wavelength source; China, 200910102201[P]. 2010-02-03
张在宣. 拉曼相关双波长光源自校正分布式光纤拉曼温度传感器; 中国, 200910102201[P]. 2010-02-03
- 61 Zhang Zaixuan, Wang Jianfeng, Zhang Wensheng *et al.*. Dispersion and loss spectra of a new type auto-correction distributed optical fiber Raman temperature sensor; China, 201010145912. x[P]. 2010
张在宣, 王剑锋, 张文生等. 新型色散与损耗光谱自校正分布式光纤拉曼温度传感器; 中国, 201010145912. x[P]. 2010
- 62 Yu Xiangdong, Zhang Zaixuan, Zhang Wensheng. Distributed optical fiber Raman temperature sensor used serious pulse code and decode optical source; China, 201010169596. x[P]. 2010
余向东, 张在宣, 张文生. 采用序列脉冲编码解码的分布式光纤拉曼温度传感器; 中国, 201010169596. x[P]. 2010
- 63 Zhang Lixun, Ou Zhonghua, Liu Yongzhi *et al.*. A circulated demodulated method of distributed fiber Raman temperature sensor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(8): 1176~1178
张利勋, 欧中华, 刘永智. 分布式光纤拉曼温度传感器的循环解调法[J]. *光子学报*, 2005, **34**(8): 1176~1178
- 64 Zhang Lixun, Ou Zhonghua, Liu Yongzhi *et al.*. Distributed optical fiber Raman temperature sensor with amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(4): 559~561
张利勋, 欧中华, 刘永智等. 带光放大器的分布式光纤拉曼温度系统[J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(4): 559~561
- 65 Lei Zhang, Xue Feng, Wei Zhang *et al.*. Improving spatial resolution in fiber Raman distributed temperature sensor by using deconvolution algorithm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(7): 560~563
- 66 Chung E. Lee, Kent Kalar, Michael E. Sanders. Methods and apparatus for dual source calibration for distributed temperature systems[P]. US, 2007/0223556 A1, 2007-09-27
- 67 Jonghan Park, Gabriele Bolagnini, Duckey Lee *et al.*. Raman-based distributed temperature sensor with simplex coding and link optimization[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **18**(17): 1879~1881
- 68 The 《Optical fiber sensing》Reference material supplied by YOKOGAWA International Trade Ltd, Shanghai
《光纤传感》参考资料由上海横河国际贸易有限公司提供