

基于分段保护的光纤分布式传感智能控制系统

徐士博^{1,2}, 朱礼斌¹, 傅星², 杨先辉¹, 刘铁根²

¹ 中国石油集团渤海钻探工程有限公司油气井测试分公司, 河北 廊坊 065000;

² 天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 利用光纤分布式传感器对长距离输油管线等高危作业区域进行安全监测已被广泛研究和应用,但在使用过程中由于各种原因导致传感光纤断裂或损坏的情况时有发生,严重制约其对被测目标的长期监测。通过分析加载光纤传感器之结构,将传感光纤沿被测长度区间分为数段并建立若干传感控制节点,在节点间设置冗余光纤并组建全光远程控制系统,为目标传感器提供具有分段控制保护的故障位置自动诊断以及传感功能自动恢复的光纤智能传感系统。对传感结构进行故障概率的模拟分析和计算表明,该结构可有效地提升传感器的生存能力。拟将该系统应用于油田长距离输油管线安全监测的分布式光纤传感系统中,并提出相应的分段保护光缆连接结构。

关键词 光纤光学; 长距离分布; 光纤传感智能控制系统; 故障诊断; 分段保护

中图分类号 TP212.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030606

Distributed Fiber Sensor Intelligent Control System Based on Multi-Sections Protection

Xu Shibo^{1,2}, Zhu Libin¹, Fu Xing², Yang Xianhui¹, Liu Tiegeng²

¹ Well Testing Sub-Company, Bohai Drilling Engineering Company Limited, China National Petroleum Corporation (CNPC), Langfang, Hebei 065000, China;

² Key Laboratory of Opto-Electronics Information Technical, Ministry of Education, School of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Distributed fiber sensor has been widely used in safety monitoring area for long-distance transmission pipe laying or other high-risk work areas. However, the breakage or damage of sensing fiber cables occurs frequently, which restricts the long-term monitoring of the monitored targets. To solve this issue, we establish an intelligent fiber sensor system with the function of self-diagnosis and self-healing, which divide the monitoring area into several regions by controlling nodes and resilient sensing fibers to accomplish the automatic fault location and recovery of sensing service. The proposed system can improve the survivability of the distributed fiber sensor according to simulation analysis results of the sensor's working situation. We use the proposed system in distributed fiber sensor system for the long-distance pipe laying monitoring project and propose the multi-section combination structure to protect fiber cable.

Key words fiber optics; long distance distribution; fiber sensor intelligent control system; fault diagnosis; protection in multi-sections

OCIS codes 060.2370; 280.4788

1 引言

光纤传感技术以其独特的优势在航空航天、道

路桥梁、能源勘探开发等领域拥有广阔的应用前景,因而受到广泛关注^[1-5]。单模光纤的传输特性使得以特定拓扑结构组成的光纤传感器网络成为现

收稿日期: 2017-08-21; 收到修改稿日期: 2017-09-15

基金项目: 国家重大科学仪器设备开发专项(2013YQ030915)、国家自然科学基金(61227011, 61378043, 11004150, 61108070)、天津市科技支撑计划重点项目(11ZCFGX01900)、2016年天津市企业博士后择优资助项目

作者简介: 徐士博(1986—),男,博士后,主要从事光纤传感及其在油田开发方向的理论及应用方面的研究。

E-mail: shibo_xu@tju.edu.cn

实^[6], 光纤传感网络可完成对大型建筑或重点区域的精确测量, 在提高光谱资源利用率的同时也能够对光纤传感器进行集中管理和控制。

不过由于传感光纤较为脆弱, 使用过程中因外界因素致使光缆断裂的情况偶有发生, 而光缆的修复过程需要耗费一定的人力、物力及时间成本, 且在修复完成之前对故障区域的实时监测将无法进行。多年来研究人员针对光纤传感网拓扑结构及智能化设计开展了大量研究。其中 Hu 等^[7]提出了一种基于波长扫描时分复用的极弱光纤光栅传感器系统, 低插入损耗及可忽略的串扰使得大规模扩容光纤布拉格光栅(FBG)数量成为可能, 其传感器网络中光纤光栅传感器数量达到上千, 但其研究重点不在于对光纤传感器故障的修复。还有研究人员将六边形及蜘蛛网式拓扑结构应用于结构健康监测中^[8-10], 并通过智能切换替代故障 FBG 传感器, 其局限在于无法实现长距离控制及信号传输, 且传感器类型单一。Urquhart 等^[11-17]提出具有自诊断及多路保护的总线型光纤传感网, 其中加载的传感器主要是 FBG 和强度调制型光纤传感器, 根据接收端监控信号光的变化能够自动定位识别故障点位置, 但控制系统结构较为复杂, 光纤连接器件较多, 信号损耗很大, 且随着传感器数量的增多信号衰减将成倍增加, 系统成本也相对较高。王金红等^[18]提出的分布式光纤传感器控制系统实现对传感器各组成模块工作状态的控制和报警, 而王建峰等^[19]提出的分布式光纤传感控制系统通过设置光开关模块实现传感距离的增加, 二者均没有涉及传感光纤故障诊断的功能。基于此, 提出并设计具有自诊断及自愈能力的传感

网络控制系统, 是实现光纤传感器长期稳定工作的一种积极探索^[20-21]。

本文针对分布式光纤传感器在长距离输油管线安全监测应用中的特点, 设计了一种结构简单、易实现且具有一定冗余度的智能传感控制系统, 可实现分布式光纤传感器的分段保护、故障自动定位及传感恢复等功能。该系统将整个被测区域划分为若干部分, 通过在传感控制节点间布设工作光纤和备用光纤, 完成对各节点间传感光纤的自诊断及自愈控制。同时, 节点间实现全光通信, 保证控制中心能够在复杂条件下对各节点内传感器运行状态进行长距离实时监测, 提高输油管线光纤安全监测系统的生存及应对突发状况的能力。

2 系统结构及工作原理

图 1(a) 为包含 3 个传感节点(节点数量可扩展)的总线式传感结构及样机实物图, 节点间以串联方式连接。系统的控制部分由一个中心节点 M 和若干份控制节点 S 构成。图 1(b) 中 WDM 为光纤波分复用器, λ_d 、 λ_u 分别为由微处理器控制光发射节点发出的用于节点间通信的下行及上行控制信号, λ_c 为用于监控其余通道状态的信号光, C 为智能微处理器, PIN 为光电探测器。将长距离传感光纤及备用光纤(置于光缆中)沿被测长度范围划分为若干区域, 在系统自动控制指令下对所有光纤的状态进行实时监控及保护, 备用光纤(冗余光纤)的数量可根据需要设定。中心节点负责整个系统运行状态的收集, 并通过其与上位机的通信接口将传感系统内的工作情况实时上传显示。

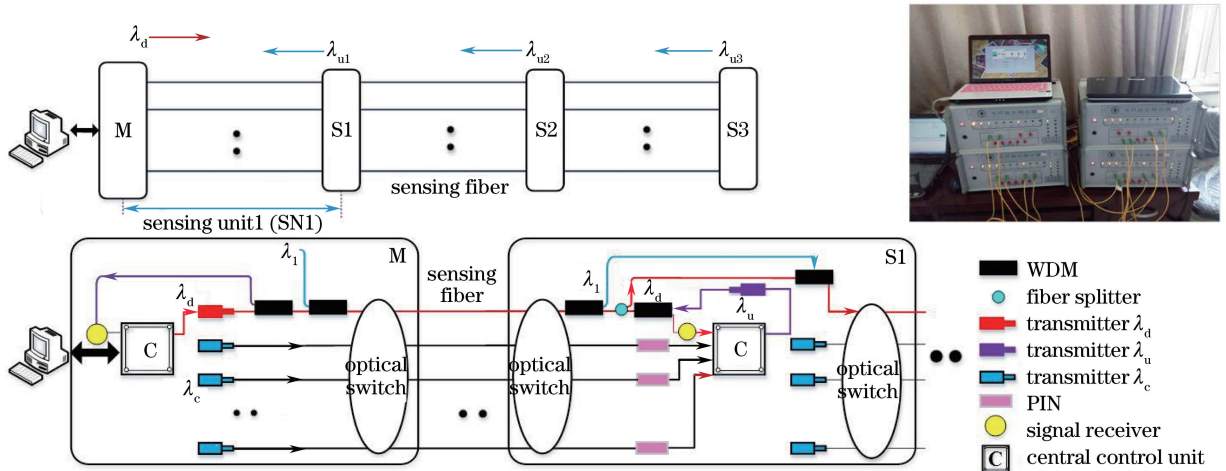


图 1 (a) 控制系统整体结构及控制节点实物图; (b) 中心及分控制节点内部结构图

Fig. 1 (a) System architecture and photograph of control nodes; (b) internal structures of central and slave nodes

将中心节点 I/O 端口的控制信号经过光发射节点转化为的下行信号光 λ_d (由中心至各分节点称为下行光信号, 反之为上行), 通过 WDM 与传感信号 λ_1 合波, 在各分节点信号接收模块将 λ_d 转化为电信号并送至控制芯片的 I/O 端口, 数据接收后由分节点向中心节点进行反馈, 上行光信号波长为 λ_u 。控制信号 λ_d 携带指令信息依次传至各分节点, 各分节点向上与中心节点间的通信依靠 λ_{u1} 、 λ_{u2} 、 λ_{u3} 等光载波信号, 通过对 λ_{u1} 、 λ_{u2} 、 λ_{u3} 编号区分不同分节点的上行信号, 其波长均相同, 不会发生信号重叠的原因在于中心节点控制器与各分节点控制器间采用串联和并联结合的连接方式, 如图 1 所示。另外, 下行控制信号 λ_d 在传输过程中由分路器按一定比例分别传至各分节点, 为了避免传感信号功率损失, 需要再次通过 WDM 将 λ_1 与 λ_d 、 λ_u 分开。

通过预先设定的节点间的通信协议, 可实时掌握所有光纤的通断状况, 备用通道监控由连续激光 λ_c 负责。各分节点会将所属通道的实时监控情况在每一个程序周期内发送至中心节点, 当工作或某一备用通道发生信号丢失, 中心节点会根据预设程序发出指令并通过光开关自动对传感网络做出切换控制动作并报警。此外, 控制系统能够根据不同结构的分布式光纤传感器设计相应的加载方式。

系统程序流程图如图 2 所示, 在一个机器周期内, 中心节点通过 λ_d 依次问询各分控制节点。若握手成功, 分节点将本节点内各备用通道监测情况通过 λ_u 发送至中心节点, 随后分节点等待下一周期与中心的握手, 同时中心节点转向下一节点问询; 当握手失败时, 说明相应节点内通信中断, 相关两节点内相对的一对光开关切换程序自动激活, 将传感信号切换至其他通道内, 并利用上位机软件及指示灯报警, 待通信重新建立后, 继续重复上述过程向各节点问询。系统从发现故障、报警到恢复传感, 整个过程耗时不超过 0.5 s, 实验证明光纤传感器的信号接收不会受到任何实际影响。另外, 如图 1 所示, 各节点内的光开关会对控制信号 λ_d 、 λ_u 、 λ_c 及传感信号 λ_1 产生微弱的插入损耗, 且传感信号 λ_1 在通过 WDM 接入、导出传感系统时, 引入的额外附加损耗也较弱, 总体计算两者相加不超过 1 dB, 因此基本不会对传感距离产生影响。由于控制信号 λ_d (λ_u) 在经过每个控制节点内的分路器(合波器)时要损失一部分功率, 随着节点数量的增多, 功率损失逐渐变大, 直至探测器无法识别, 此为当控制信号光源功率及探测电路确定时系统节点数的主要制约因素。也就

是说, 在该传感控制系统中, 当分布式传感总体距离确定时, 需合理设计控制信号光功率, 探测放大电路性能及各节点内分光比, 以实现系统的最优化设计。

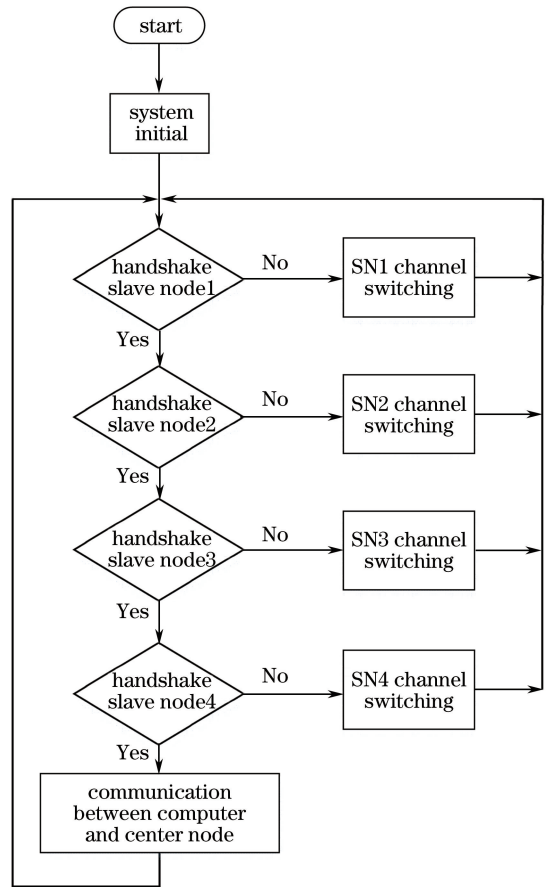


图 2 控制系统程序流程图

Fig. 2 Software flowchart of control system

3 系统稳健性分析

光纤分布式传感器常用于对长距离输油管线、重点区域周界安防的实时安全监测, 在使用过程中经常会因人为及不可抗力因素损坏传感光缆, 继而影响整个传感光缆铺设范围内的实时监测。基于上述考虑, 在铺设光缆时通常会设置一定数量的冗余纤芯, 当工作光纤发生故障时替换纤芯, 这样既消耗一定的人力物力成本, 又不利于发挥传感光纤的稳健性。本文将传感光缆按照实际需求对不同区域分别进行控制和保护。

假设在某一固定时间内长度为 L 的单根传感光纤发生损坏的概率为 p , 可用光纤总数量为 n , 将被测区域分为 m 个组成部分, 每部分的长度由 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_k, \dots, a_m$ 表示, 则

$$a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_m = L. \quad (1)$$

由于故障发生概率在光纤长度范围内服从均匀

分布,则该故障落在长度 a_k 区域内的概率由 $a_k p/L$ 表示。需要说明的是, m 个区域在计算发生故障的概率时相互间具有互斥关系,即当故障落在 a_1 处时,其余区域均无故障发生。在这种情况下,纤芯数为 n 、分为 m 个区域、总长度为 L 的光缆 ($n \geq 1$) 能够正常工作的概率 P 为

$$P = 1 - \left[\left(\frac{a_1}{L} \right)^n + \left(\frac{a_2}{L} \right)^n + \left(\frac{a_3}{L} \right)^n + \dots + \left(\frac{a_m}{L} \right)^n \right] \times p^n, \quad (2)$$

当 $n=1$ 时,有

$$P = 1 - p, \quad (3)$$

当 $m=1$ 时,有

$$P = 1 - p^n. \quad (4)$$

联立(1)式、(2)式,当 $a_1 = a_2 = a_3 \dots = a_m = L/m$ 成立时,得到的最大成功概率 P_{\max} 可表示为

$$P_{\max} = 1 - \frac{p^n}{m^{n-1}}. \quad (5)$$

图 3 为 $p=0.5$ 时传感光纤正常工作概率 P 与冗余光纤数量 n 及节点个数 m 的关系,可以看出,随着可用光纤数量 n 及区域等分数量 m 的增加,

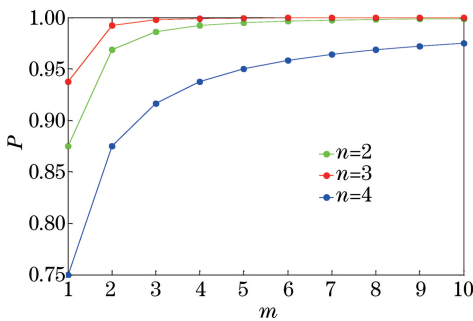


图 3 节点及冗余光纤数量对传感器持续正常工作的影响

Fig. 3 Influence of number of node and redundant fiber on healthy state of a distributed sensor in long-term monitoring

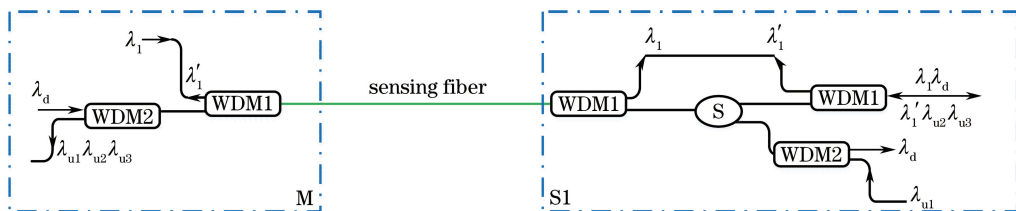


图 5 控制节点间通信及传感光路结构

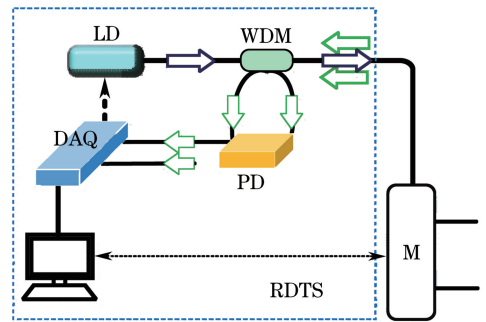
Fig. 5 Structure of optical control and sensing signals between nodes

虽然各控制节点的上行/下行控制信号并没有在波段上进行区分,但各节点中的智能微处理器能够通过信号中所携带的地址码进行识别,以此完成节点间

P 值逐渐增大,说明在这种情况下,增加节点及冗余光纤数量可显著提升传感结构的稳健性。需要指出的是, p 值通常是在大量实验样本的基础上获得的,并通过上述数值分析得出最优监测方案,且 m 与 n 需合理取值,以免增加系统成本。

4 基于分段保护的光纤分布式温度传感监测系统

如图 4 所示,光纤分布式温度拉曼传感系统 (RDTS) 的传感光纤通过中心节点加载至控制系统中,传感信号对应图 1 中的 λ_1 ,且传感器的解调系统与控制系统互不影响,传感光纤被控制节点分成 3 段。



DAQ: data acquisition card; PD: photoelectric detector

图 4 RDTS 与控制系统联合运行原理框图

Fig. 4 Combined operation of RDTS and proposed control system

WDM 参数及具体连接结构如图 5 及表 1 所示。 λ_1 代表波长为 1550 nm 的传感信号, λ_d 代表波长为 1390 nm 且由中心控制节点发送至各分节点的下行控制光信号, $\lambda_{u1}, \lambda_{u2}, \lambda_{u3}$ 代表 1350 nm 分节点至中心节点的上行控制光信号, λ'_1 代表背向散射的 1450 nm 和 1663 nm 斯托克斯和反斯托克斯光信号。 WDM1 负责组合及分离传感与控制信号, WDM2 负责组合及分离上行及下行控制信号。

的通信。同时,由于中心与各分节点采取一对多的连接方式,因此各分节点中的光纤分路器是用来将下行控制信号 λ_d 分出一路给所属分节点,其余继续向后

表 1 WDM 参数表

Table 1 Parameters of WDM

WDM	Pass channel /nm	Reflect channel /nm
1	1340~1400	1440~1670
2	1390±10	1350±10

传输。基于上述因素,控制系统除了需选取功率满足条件的激光器,还需对各接收模块进行逐一调试,以适应传感控制系统连通后的接收光功率。

以图 6 所示的由 3 个传感节点、2 路冗余光纤构成的传感系统所发生的故障为例,说明当传感光纤发生断裂时系统的自诊断及自愈处理过程。图中数字①~③表示断裂发生的先后顺序,以上部的光纤为默认的工作通道。考虑到系统的信号处理和传输速度,即使是同时发生的故障,在信号检测端的处理也存在先后顺序,故不存在精确时间意义上的同时发生。

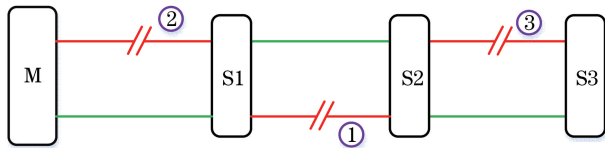


图 6 模拟故障情况

Fig. 6 Failure situation simulation

1) 当节点 2 内的备用光纤发生断裂,监控光源丢失,中心节点会在下一个机器周期内收到节点 2 上行的通信信息,包含该节点内各通道的运行状态。在收到上行信息后中心节点的控制面板上有指示灯亮起,并发出报警。

2) 当节点 1 内的传感光纤断开,中心与该分节点握手失败,双方自动将工作通道切换至完好的备用光纤,并重新建立起中心与各分节点的通信路径。在这一过程中光开关从接到指令至切换完成所耗时间最长不超过 50 ms,不会对传感器的工作造成任何影响。

3) 由于节点 3 内的故障也是默认通道发生断裂,因此相关自动控制过程与节点 1 内故障发生的过程基本相同。

此外,将传感器解调软件与控制系统上位机程序用于通信,即使光纤没有断裂,只是发生信号衰减、畸变等传感系统无法正常解调信号的情形,仍然可以通过上位机对控制节点发出指令,切换传感通道。同时,为了系统能够正常运行,需保证任意节点间至少有一根光纤是完好的。因此还需要考虑光缆的铺设和连接方式,避免破坏性行为造成多根光纤同时损坏。

5 基于分段保护的光缆铺设方案

目前,我国陆地输油管道铺设方式主要分为地上架设和地下掩埋铺设两种,且均将光缆沿被测管道外壁铺设,通过光纤分布式传感系统进行温度场及扰动行为的实时探测。长距离的输油管线安全监测站的设立可根据具体环境及地形而设立,一般设站距离约为 30 km 或更长,平时站与站间会设有专人巡视,同时向站点内提供电源等物资,当 220 V 电源供电时,不同站点间的控制节点均可执行传感控制功能。当传感器探测灵敏度一定时,传感光纤位置会对传感结果产生影响;当采用两种不同的光缆铺设方式时,两种光缆势必在探测效果上有所不同(即使差别非常细微),必须尽量确保两种铺设方式均能够实现对被测目标的有效传感。

如图 7 所示,当只有一根多芯光缆用于监测时,在遇到盗挖、偷油等破坏性行为时,光缆经常被切断,导致无法继续工作。为解决该问题,将分布式传感光纤加载于该控制系统中,控制节点沿管线铺设范围将其分为若干部分(图 8 所示为用 4 节点分为 3 部分)进行保护,将光缆放置在管线的上下或左右两侧,或根据实际情况合理铺设光缆,避免同时遭到破坏,在保证传感器正常工作的情况下,提高了传感器智能化控制水平及传感光纤的稳健性,同时增加了光缆的使用寿命。

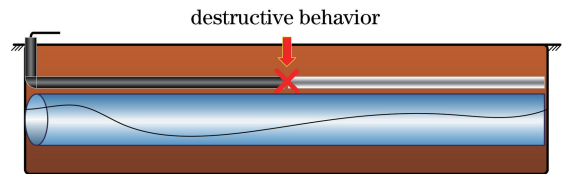


图 7 光缆地下输油管线监测方案示意图

Fig. 7 Schematic diagram of regular optical cable monitoring pipe laying

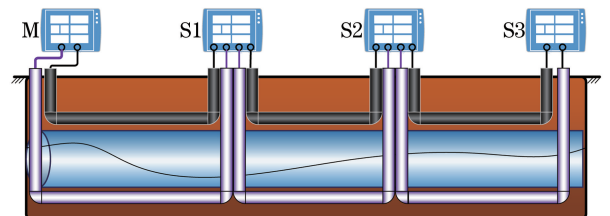


图 8 智能分段保护的光纤分布式输油管线监测结构示意图

Fig. 8 Schematic diagram of multi-section intelligent distributed fiber sensor control system for pipe laying monitoring

6 结 论

针对分布式光纤传感器在实际使用过程中存在的问题,提出了具有自动故障定位及传感冗余保护功能的光纤传感控制系统。该系统能够将传感光纤沿被测范围分成若干区域的同时,利用各控制节点实现对传感光纤的长距离全光智能保护及控制。通过对故障情况的模拟分析,总结了影响传感器长期稳定工作的若干要素。这对于增强长距离输油管线、区域安防等大型光纤监测项目的稳定性和提高传感系统智能化控制水平具有积极意义。

参 考 文 献

- [1] Liu K, Feng B W, Liu T G, *et al.* Continuous distributed fiber strain location sensing based on optical frequency domain reflectometry[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, 42(5): 0505006.
刘琨, 冯博文, 刘铁根, 等. 基于光频域反射技术的光纤连续分布式定位应变传感[J]. *中国激光*, 2015, 42(5): 0505006.
- [2] Song M P, Bao C, Ye X F. Brillouin optical time-domain analyzer based on orthogonal polarization control for long-distance distributed optical-fiber sensors[J]. *Chinese Journal of 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.
- [3] Zhang C, Yang N, Bao Y, *et al.* Spectral resolution improvement technique for optical frequency-domain reflectometry-based optical fiber distributed sensing [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(8): 0806001.
张超, 杨楠, 包艳, 等. 基于光频域反射计的光纤分布式传感中光谱分辨率提升技术[J]. *光学学报*, 2017, 37(8): 0806001.
- [4] Xie K L, Rao Y J, Ran Z L. Distributed optical fiber sensing system based of Rayleigh scattering light φ -OTDR using single-mode fiber laser with high power and narrow linewidth[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 569-572.
谢孔利, 饶云江, 冉曾令. 基于大功率超窄线宽单模光纤激光器的 φ -光时域反射计光纤分布式传感系统[J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 569-572.
- [5] Liu D M, Sun Q Z. Distributed optical fiber sensing technology and its applications [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, 46(11): 29-33.
刘德明, 孙琪真. 分布式光纤传感技术及其应用[J].

激光与光电子学进展, 2009, 46(11): 29-33.

- [6] Hotate K. Fiber sensor technology today [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006, 45(8B): 6616-6625.
- [7] Hu C, Wen H, Bai W. A novel interrogation system for large scale sensing network with identical ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(7): 1406-1411.
- [8] Peng P C, Huang K Y. Fiber Bragg grating sensor system with two-level ring architecture [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2009, 9(4): 309-313.
- [9] Peng P C, Wang J B, Huang K Y. Reliable fiber sensor system with star-ring-bus architecture [J]. *Sensors*, 2010, 10(5): 4194-4205.
- [10] Peng P C, Tseng H Y, Chi S. Self-healing fibre grating sensor system using tunable multi-port fibre laser for intensity division multiplexing [J]. *Electronics Letters*, 2002, 38(24): 1510-1512.
- [11] Abad S, López-Amo M, López-Higuera J M, *et al.* Single and double distributed optical amplifier fiber bus network with wavelength division multiplexing for photonic sensors [J]. *Optics Letters*, 1999, 24(12): 805-807.
- [12] Montoya V, Lopez-Amo M, Abad S. Improved double-fiber-bus with distributed optical amplification for wavelength division multiplexing of photonic sensors [J]. *IEEE Photonics Technology Letter*, 2000, 12(9): 1270-1272.
- [13] Schlüter M, Urquhart P. Optical fiber bus protection network to multiplex sensors: dedicated line and dedicated path operation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2011, 29(15): 2204-2215.
- [14] Vallejo M F, Perez-Herrera R A, Elosua C, *et al.* Resilient amplified double-ring optical networks to multiplex optical fiber sensors [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2009, 27(10): 1301-1306.
- [15] López O, Schires K, Urquhart P, *et al.* Optical fiber bus protection network to multiplex sensors: amplification by remotely pumped EDFAs [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, 58(9): 2845-2851.
- [16] Izquierdo E L, Urquhart P, López-Amo M. Protection architectures for WDM optical fiber bus sensor arrays [J]. *Journal of Engineering*, 2007, 1(2): 1-18.
- [17] Fernandez-Vallejo M, Olier D, Zornoza A, *et al.* 46-km long Raman amplified hybrid double-bus network with point and distributed Brillouin sensors [J]. *IEEE*

Sensors Journal, 2012, 12(1): 184-188.

- [18] Wang J H. Control design of distributed fiber optical sensing system [D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2012.

王金红, 分布式光纤传感系统中控制设计 [D]. 北京: 北京邮电大学, 2012.

- [19] Wang J F, Hong Y, Ma J D, *et al.* Application research of optical switch in distributed optical fiber temperature sensor system [J]. Journal of Optoelectronics•Laser, 2010, 21(9): 1291-1293.

王剑锋, 宏岩, 马建东, 等. 光开关在分布式光纤温度传感系统的应用研究 [J]. 光电子•激光, 2010, 21(9): 1291-1293.

- [20] Xu S, Liu T, Ge C, *et al.* The resilient hybrid fiber sensor network with self-healing function [J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(3): 156-162.

- [21] Xu S, Liu T, Ge C, *et al.* Multi-bus fiber sensor protection network operation with robustness analysis [J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 16(6): 1754-1761.