

文章编号:1001-5078(2024)03-0473-08

· 光纤传感及光通讯技术 ·

基于主动加热方法的隧道积水分布式光纤传感器

方忠强¹,王皓宇²,胡慧江¹,张坤¹,任康²,张丹^{1,2}

(1. 水下隧道智能设计、建造与养护技术与装备交通运输行业研发中心(华设设计集团股份有限公司),江苏 南京 210014;

2. 南京大学地球科学与工程学院,江苏 南京 210023)

摘要:针对目前隧道积水事件及积水范围监测需求,研发了两种新型隧道积水传感器,提出了基于分布式温度传感(DTS)的隧道积水分布式感测方法。通过将传感光缆按二维平面螺旋封装方式提高了传感器的空间分辨率,利用主动加热方法,显著提高了水-气界面传感光缆的温度差异,进而实现对积水事件和积水范围的识别。通过室内模型试验,对传感光缆的性能及影响因素进行了研究。结果表明,研发的两种传感器均具有较高的空间分辨率,由于螺旋 I 型的环间距更小,其空间分辨率及定位精度均高于螺旋 II 型;在多种典型工况下两种传感器均可以准确识别积水的水-气界面,定位误差均小于 10 cm;适当增大加热温度可以提高传感器的定位精度,50 ℃ 加热工况时的定位精度明显优于 35 ℃ 和 20 ℃。

关键词:隧道;积水;DTS;光纤传感;主动加热方法

中图分类号:TP212.4⁺4;TN29 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.03.020

Distributed optical fiber sensor for tunnel waterlogging based on actively heated method

FANG Zhong-qiang¹, WANG Hao-yu², HU Hui-jiang¹, ZHANG Kun¹, REN Kang², ZHANG Dan^{1,2}

(1. China Design Group, Research and Development Center of Transport Industry of Technologies and Equipments for Intelligent Design, Construction and Maintenance of Underwater Tunnel, Ministry of Transport, Nanjing 210014, China; 2. School of Earth Science and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: In response to the current demand for monitoring the waterlogging events and the extent of waterlogging in tunnels, two new types of tunnel waterlogging sensors are developed, and a distributed sensing method for tunnel waterlogging based on distributed temperature sensing (DTS) is proposed in this paper. Firstly, the spatial resolution of the sensor is improved by encapsulating the optical sensing cable in a two-dimensional plane spiral pattern and an actively heated method is used to significantly improve the temperature difference of the optical sensing cable at the water-air interface, thereby realizing the identification of the events and range of tunnel waterlogging. Then, through the indoor model tests, the performance and influencing factors of the optical sensing cable are studied. The results show that the two sensors developed have higher spatial resolution. Due to the smaller spacing of the spiral circle, the spatial resolution and positioning accuracy of the spiral type I sensor are higher than those of the spiral type II sensor. Both sensors can accurately identify the water-air interface under various typical working conditions, and their positioning errors are less than 10 cm. The positioning accuracy of the sensors can be improved by appropriately increasing the heating temperature, and the positioning accuracy under the heating conditions of 50 ℃ is significantly better than 35 ℃ and 20 ℃.

Keywords: tunnel; waterlogging; DTS; optical fiber sensing; actively heated method

基金项目:江苏省战略新兴产业发展专项资金项目;江苏省“六大人才高峰”高层次人才 A 类项目(No. XNY-002)资助。

作者简介:方忠强(1976-),男,硕士,高级工程师,主要从事隧道及地下工程等方面的设计与研究工作。

E-mail:707525111@qq.com

通讯作者:张丹(1976-),男,博士,主要从事岩土工程监测等方面研究。E-mail:zhangdan@nju.edu.cn

收稿日期:2023-07-05; **修订日期:**2023-08-08

1 引言

近年来,随着我国经济社会和城市化进程的快速发展,城市人口和交通带来的压力持续增加,隧道工程等地下空间的开发利用蓬勃发展。渗漏水是隧道施工和管养中的常见病害之一^[1],当排水不良时,会造成隧道积水问题。积水现象在综合管廊、电缆隧道和电缆沟内也时有发生。积水会给隧道行车带来安全隐患,也会造成隧道内线路和设备故障,影响其使用寿命。在寒区交通隧道积水后易出现冻害问题,造成排水沟冰塞和路面积冰,严重危及隧道结构和运营安全^[2]。因此,监测并准确识别渗漏积水范围对于提高隧道、管廊等地下空间的管养水平具有显著的工程应用价值。

一般采用人工巡测的方法识别隧道积水问题,然而该方法难以做到实时监测,隐蔽区段积水排查困难,且自动化程度较低,人力和时间成本较高^[3-5]。为解决这一问题,一些新兴的技术逐步用于隧道渗漏水 and 积水的监测,如三维激光扫描技术和机器视觉技术等^[6-9]。近年来,应用分布式光纤传感技术对岩土体和工程结构进行监测发展非常迅速^[10-11]。由于分布式光纤传感技术具有抗干扰能力强、精度高、稳定性好、耐久性强、可实现远距离大范围分布式监测等优点,在隧道积水监测方面具有巨大的应用潜力。

采用主动加热分布式光纤测温法根据介质间导热系数差异而产生的温度差,辨识出气-水-固的分界,从而监测渗漏^[12];Cote 将主动加热测温法与分布式温度光纤传感(Distributed Temperature Sensing, DTS)结合,应用于大坝渗漏监测^[13];严珺凡等提出了渗流场碳纤维加热光缆的分布式温度光纤感测技术^[14];肖衡林利用 DTS 技术监测渗流,建立光纤温度和渗流流速等变量间的关系^[15];叶少敏等在京雄城际铁路机场 2 号隧道利用主动加热光缆作为传感器对隧道渗漏进行监测^[16];Márquez 等将主动加热光缆和温度传感光缆放置在钻孔的 U 型管内进行热响应测试,结果表明主动加热光缆的加热功率为 9.9 W/m ^[17];Zhang 等研发了一种新型铜网加热感测光缆(Copper-Meshheated Cable, CMHC),提高了 DTS 监测钻孔温度的可靠性。利用主动加热光缆作为加热源具有加热电阻阻值小,加热功率低的优点,可以有效控制监测成本,更适用于长距离工

程监测^[18]。

由于 DTS 技术以最小感温长度来表征空间分辨率,受到探测激光脉宽的限制,其空间分辨率相对较低,使得定位精度受到了限制^[19]。通过改进传感光缆的铺设方式,可以提高 DTS 的事件定位精度^[20];陈亚峰采用一种螺旋缠绕方式,提高了管道泄漏定位精度^[21];李一雄等将温度传感光缆螺旋缠绕在 PVC 管材上,测量河道淤积厚度,空间分辨率可达 2 cm ,显著提高了定位精度^[22]。

本文研制了基于主动加热方法的高分辨率积水光纤传感器(螺旋I型和螺旋II型),利用介质间导热系数不同而产生温度差异,提出了一种基于二维平面螺旋光纤封装方式实现了隧道积水事件的准确识别和积水范围的高精度定位。通过室内模拟试验,对比分析了多种工况下传感器的测量性能,验证了该隧道积水分布式光纤传感器的有效性和准确性。

2 隧道积水的感测原理

2.1 DTS 技术原理

分布式光纤测温系统(DTS)是基于拉曼散射温度效应和光时域技术实现的。拉曼散射是由于光纤中分子的热运动与光子相互作用发生能量交换而产生的,包括斯托克斯光和反斯托克斯光^[23-24]。根据反斯托克斯光与斯托克斯光强度之比和温度的定量关系,得到测点的温度,如下式所示:

$$R(T) = \frac{I_s(T)}{I_{as}(T)} = \left(\frac{\lambda_{as}}{\lambda_s}\right)^4 \exp\left(-\frac{hcv}{KT}\right) \quad (1)$$

式中, $R(T)$ 为待测温度的函数; $I_s(T)$ 为斯托克斯光强度; $I_{as}(T)$ 为反斯托克斯光强度; λ_s 为斯托克斯光波长; λ_{as} 为反斯托克斯光波长; c 为真空中的光速; v 为拉曼频移量; h 为普朗克常数; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度。

结合光时域反射技术(OTDR), DTS 检测出斯托克斯光强和反斯托克斯光强的比值,解调出温度分布情况以实现积水范围的定位。

2.2 积水分布式测量原理

为了实现高分辨率测量,同时考虑安装铺设的便利性,将传感光缆采用二维平面螺旋缠绕方式封装为积水范围感测传感器,可以实现对隧道内部积水的长距离、分布式监测,如图 1 所示。积水沿 X 轴方向扩展,在相同传感距离上,螺旋封装传感光缆的温度传感点密度更高,相应地提高了

传感器的空间分辨率。螺旋封装传感器的空间分辨率表示为:

$$\alpha = \frac{L_{\text{optic}}}{L} \cdot A \quad (2)$$

式中, α 为螺旋封装传感器空间分辨率 (mm); L 为传感光缆长度 (mm); L_{optic} 为长度为 L 的光缆螺旋封装后沿 X 轴延伸的距离 (mm); A 为 DTS 解调系统的空间分辨率 (mm)。

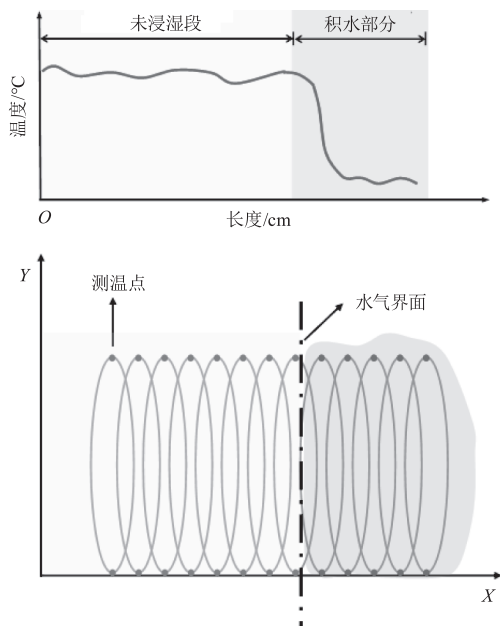


图1 利用螺旋封装提高空间分辨率原理图

Fig. 1 Principle of improving spatial resolution by spiral encapsulation

传感器使用了金属加热基带, 测温光缆平铺在金属基带上, 使光缆受热均匀, 具体参数如表 1 所示。改良后的传感器, 其上缠绕的传感光缆可以用无限长圆柱形热源描述, 加热后的温升解析解为:

$$\Delta T = T(t) - T_0 = \frac{Q}{4\pi\lambda} \left[\ln(t) + 4\pi R\lambda + \ln\left(\frac{4K}{a^2 c}\right) \right] \quad t \gg \frac{a^2}{K} \quad (3)$$

式中, ΔT 为加热时间 t 时刻 (s) 对应的传感器温度变化值 (°C); Q 为单位长度的加热功率 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$); λ 为介质导热系数 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); R 为单位长度上测温光缆与介质间的热阻 (MkW^{-1}); K 为介质热扩散系数 ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$); a 为传感器外径 (m); $c = 1.7811 = \exp(\gamma)$ 且 $\gamma = 0.5722$, γ 为欧拉常数。由 (3) 可知, ΔT 随着单位长度加热功率的增加而增大, 在传感器长度一定时, 加热传感器所需能耗与加热温度有关。因此增大加热温度可以提高 ΔT 值, 温度分布曲线上的温度陡降更加显著, 进而提高传感器的定位精度。影响光缆上某一点温度的因素有

加热时间 t 、导热系数 λ 和热扩散系数 K 。利用金属基带作为传热介质, 测温光缆呈螺旋状沿金属基带长度方向布设封装, 采用加热带对传感器进行加热。传感器处于空气中时, 热量传递的顺序依次为: 加热带、金属基带、空气和传感光缆, 而处于积水部分中时, 顺序依次为: 加热带、金属基带、积水和传感光缆。在传感器加热过程中, 保持加热功率与时间一致, 由于水的导热性更好, 积水中的传感器温度低于空气部分。因此, 利用 DTS 对传感光缆的温度分布进行测量, 温度分布曲线上温度陡降段即为水-气界面 (图 1), 实现积水范围的识别。积水范围传感器主要应用于交通与市政隧道, 布置在隧道道路两侧, 可以利用分段加热实现长距离、低功耗、分布式监测, 如图 2 所示。

表 1 金属加热基带主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of heated metal substrate

参数类型	参数值
额定电流/A	1.2
额定电压/V	220
加热功率/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$)	40
最大加热温度/°C	70
加热精度/°C	0.1

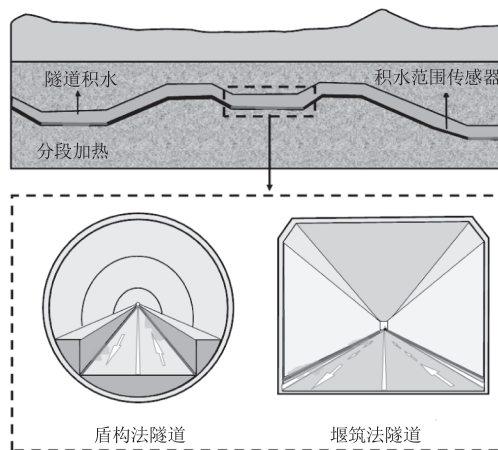


图2 隧道积水范围传感器布设示意图

Fig. 2 Layout diagram of the tunnel waterlogging sensors

3 室内试验

3.1 试验装置

根据光缆螺旋缠绕结构的不同, 积水传感器分为螺旋 I 型和螺旋 II 型。将传感光缆按直径 r 为 5 cm 的圆环螺旋布设在金属基带上, I 型传感器的环间距为 $1/4r$, II 型传感器的环间距为 $1/2r$ 。加热带沿金属基带长度方向固定在传感光缆两侧。两种

类型传感器的纤芯直径均为 $62.5\ \mu\text{m}$, I 型传感器封装后的空间分辨率为 $70\ \text{mm}$; II 型传感器的空间分辨率为 $140\ \text{mm}$ 。分别截取两类传感器的一部分,结构示意图见图 3。

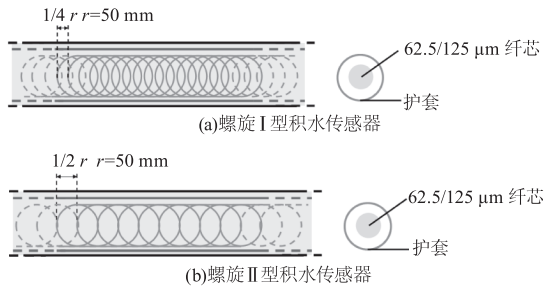


图3 I型与II型隧道积水范围监测传感器
Fig. 3 Type I and type II tunnel waterlogging Sensors

积水传感器由加热、测量和封装三部分组成。加热部分为沿金属基带长度方向固定的加热带组成,加热带位于传感光缆两侧,实现对传感器的均匀加热;测量部分由沿金属基带长度方向螺旋布设的传感光缆组成;封装部分是由粘贴材料组成,用于将加热带和传感光缆固定在金属基带上,保证测温光缆与金属基带受热均匀。传感光缆一端连接分布式光纤温度解调仪(DTS),试验装置如图4所示。本次试验所采用DTS的主要技术指标如表2所示。

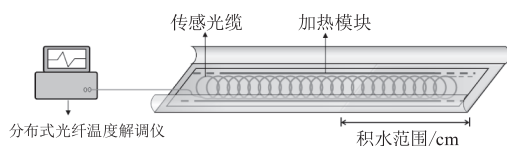


图4 隧道积水传感器性能测试装置
Fig. 4 Performance testing device of the tunnel waterlogging sensor

表2 DTS 主要技术指标
Tab. 2 Main technical indicators of DTS

参数类型	参数值
测试距离/km	1 ~ 16
测温范围/℃	-40 ~ 120
光纤类型/ μm	多模 62.5/125 或 50/125
测温精度/℃	± 0.3
温度分辨率/℃	0.1
响应时间/s	2

DTS 测得的沿传感光缆的温度分布及变化,需要根据传感光缆的螺旋封装参数将传感光缆的长度转换为传感器位置,从而实现利用温度分布确定积水范围,其换算关系为:

$$X = (l - l_0) \cdot \alpha \quad (4)$$

式中, X 为传感器位置(mm); l 为 DTS 解调仪上显示的光缆长度(m); l_0 为光缆跳线长度(m); α 为传感器空间分辨率(mm),由式(2)求得。

3.2 试验内容

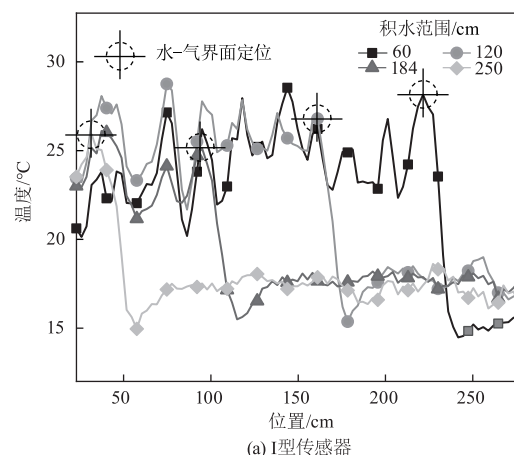
将 I 型和 II 型传感器置于试验水槽中,设置加热带温度为 $50\ ^\circ\text{C}$,加热时间为 $30\ \text{min}$,分别模拟 60 、 120 、 184 和 $250\ \text{cm}$ 积水范围条件下,测试积水传感器的感测性能,验证积水感测方法的可行性。此外,试验研究了传感器表面局部淋湿和不同加热温度对传感器性能的影响。

在表面局部淋湿试验中,利用医用纱布覆盖传感器表面并淋水,使未浸入水槽的传感器表面有少量积水,模拟隧道运维期内的清洗或洒水等工况,利用 I 型传感器对积水范围 $120\ \text{cm}$ 和 $250\ \text{cm}$ 进行了试验,利用 II 型传感器对积水范围 $115\ \text{cm}$ 和 $230\ \text{cm}$ 进行了试验。在变温加热试验中,设置 $20\ ^\circ\text{C}$ 、 $35\ ^\circ\text{C}$ 和 $50\ ^\circ\text{C}$ 三级温升梯度,试验过程中保持积水范围恒定。采用 DTS 连续测量光缆的温度分布,测试传感器的积水事件识别和定位性能。

4 结果分析

4.1 传感器的感测性能

分别对 I 型和 II 型传感器的水-气界面定位性能进行了试验,试验结果如图 5 所示。图中横坐标表示传感光缆长度,虚线圆圈内的峰值点为水-气界面,左侧为空气,右侧为积水。在不同积水范围条件下, I 型和 II 型传感器的温度分布曲线均有明显的陡降段,进而判断水-气界面。由于 II 型传感器的传感光缆与金属基带接触面积较大,在相同时间内可以获得更多热量,因此 II 型传感器的温度要高于 I 型传感器。



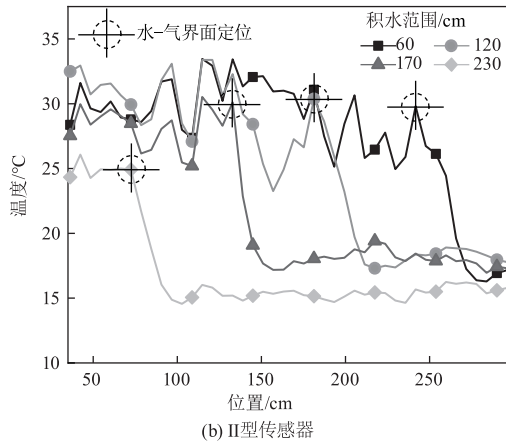


图5 不同积水范围条件下 I 型与 II 型传感器温度分布曲线

Fig. 5 Temperature distribution of type I and type II sensors under the condition of different waterlogging ranges

由表 3 可见, I 型和 II 型传感器的定位误差均小于 10 cm, 均具有较好的定位精度。I 型传感器的平均误差低于 II 型传感器, 这是因为单位长度传感器, I 型传感器的光缆更长, 具有较高的空间分辨率, 定位也更为精确。

表 3 I 型与 II 型传感器水 - 气界面定位情况比较
(单位: cm)

Tab. 3 Comparison of the water-air interface positioning of type I and type II sensors (Unit: cm)

传感器类型	积水范围	水 - 气界面实际位置	水 - 气界面实测位置	误差	平均误差
I 型	60	220	221.48	1.48	1.31
	120	160	161.07	1.07	
	184	96	94.92	1.08	
	250	30	31.64	1.64	
II 型	60	237	241.69	4.69	5.07
	120	177	181.25	4.25	
	170	127	132.89	5.89	
	230	67	72.47	5.47	

4.2 表面局部淋湿对传感器性能的影响

在隧道运行维护过程中, 路面受多种因素影响会存在淋水或小范围、短时积水现象, 如隧道清洗或洒水作业, 传感器仅表面被淋湿, 且持续时间短。该工况可能会对研发的传感器辨识水 - 气界面产生影响, 因此需要对传感器表面局部淋湿工况下传感器的积水感测性能进行进一步的试验验证。试验中利用医用纱布覆盖传感器表面并淋

湿, 使得未浸入水槽传感器表面有一定量积水, 以此模拟表面局部淋湿工况。设置加热带的温度为 50 °C。试验结果如图 6 所示, I 型和 II 型传感器仍可以清楚地观察到温度陡降段, 可以实现水 - 气界面的准确识别。

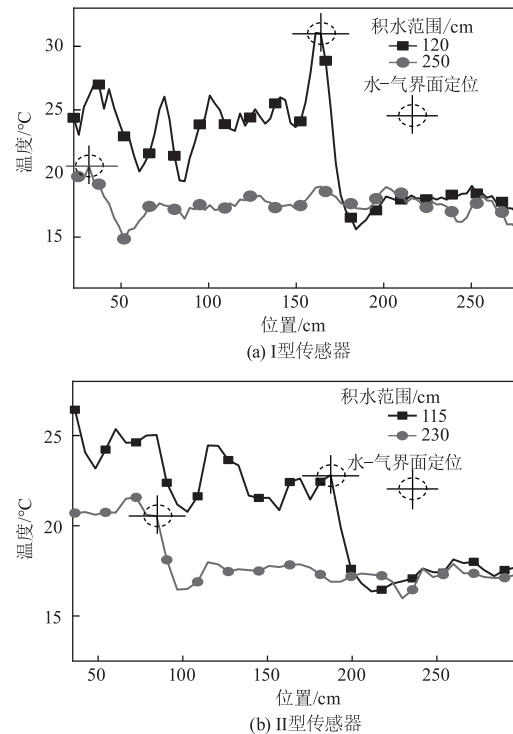


图6 表面局部淋湿工况下积水传感器温度分布曲线
Fig. 6 Temperature distribution of waterlogging sensors under the condition of localized wetting

由表 4 可见, 在表面局部淋湿工况下, I 型精度仍高于 II 型传感器。由于传感器表面被浸湿, 空气侧传感器表面温升受到一定影响, 造成水 - 气界面两侧温度差异减小, 将对水 - 气界面的识别和定位精度略有影响。

表 4 表面局部淋湿工况下水 - 气界面定位情况对比 (单位: cm)

Tab. 4 Comparison of the water-air interface positioning under the condition of localized wetting (Unit: cm)

传感器	积水范围	水 - 气界面实际位置	水 - 气界面实测位置	误差
I 型	120	160	163.94	3.94
	250	30	31.64	1.64
II 型	115	182	187.28	5.28
	230	67	72.47	5.47

4.3 加热温度对传感器性能的影响

在传感器长度一定的条件下,加热传感器所需能耗与加热温度有关。在不影响传感器感测性能的情况下应尽可能降低加热温度,以降低能耗。试验中,控制积水范围为 120 cm,设置加热温度分别为 50 ℃,35 ℃,20 ℃,研究不同加热温度条件下 I 型和 II 型传感器的感测性能,如图 7 所示。

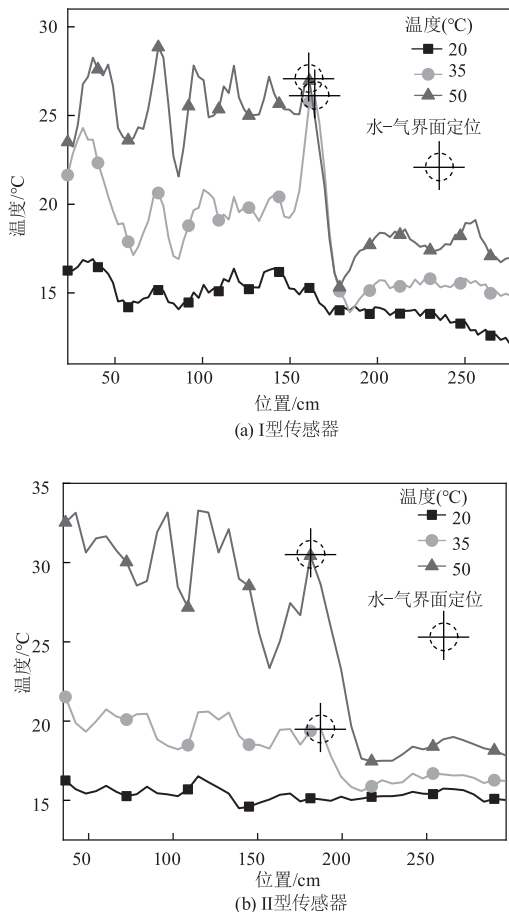


图7 不同加热温度工况下 I 型与 II 型传感器积水传感器温度分布曲线

Fig. 7 Temperature distribution of waterlogging sensors under the condition of different heating temperatures

当加热温度为 50 ℃时,温度分布曲线上有明显的温度陡降段,水-气界面的定位精度最好;但当加热温度为 20 ℃时,未出现明显的温度陡降段,传感器无法准确识别水-气界面。可见,随着加热带温度的增高,水-气界面的温度差异增大, I 型和 II 型传感器对积水范围的定位精度均较高。水-气界面的定位情况如表 5 所示。

表 5 不同加热温度工况下水-气界面定位情况对比
Tab. 5 Comparison of the water-air interface positioning under the condition of different heating temperatures

传感器	加热温度 /℃	积水范围 /cm	水-气界面实际位置/cm	水-气界面测量位置/cm	误差 /cm
I 型	20	120	160	无明显现象	/
	35			163.94	3.97
	50			161.07	1.07
II 型	20	120	177	无明显现象	/
	35			186.27	9.27
	50			181.25	4.25

5 结论

针对隧道积水监测技术的不足,研发了基于分布式光纤温度传感(DTS)的隧道积水传感器,通过二维平面螺旋封装结构显著提高了传感器的空间分辨率,利用主动加热方法提升了水-气界面的温度差异,提高了积水的定位精度,通过室内模拟试验验证了传感器具有良好的感测性能,主要结论如下:

(1)研发的螺旋 I 型和螺旋 II 型传感器的定位误差在不同试验工况下均小于 10 cm; I 型传感器的空间分辨率更高,其水-气界面的定位精度略高于 II 型传感器。

(2)在表面局部淋湿工况下,当加热带的温度为 50 ℃时,水-气界面的温度差异相对于无淋湿工况有所减小,但仍可以准确识别水-气界面。可见,通过提高加热带温度可以克服局部淋湿对水-气界面识别精度的影响。

(3)加热温度对传感器的感测性能有影响。20 ℃加热工况时,无法准确识别水-气界面。而随着加热带温度的增高, I 型和 II 型传感器对积水的识别能力及对水-气界面的定位精度均显著提高, 50 ℃加热工况的定位误差分别为 1.07 cm 和 4.25 cm,明显低于 35 ℃加热工况的误差 3.97 cm 和 9.27 cm。

参考文献:

- [1] Gong Xiaonan, Guo Panpan. Prevention and mitigation methods for water leakage in tunnels and underground structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 1-30. (in Chinese)
龚晓南, 郭盼盼. 隧道及地下工程渗漏水诱发原因与

- 防治对策[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 1-30.
- [2] Wan Jianguo. Review on and present situation and prospect of antifreezing technologies for tunnels in cold areas in China[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(7): 1115-1131. (in Chinese)
万建国. 我国寒区山岭交通隧道防冻技术综述与研究展望[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(7): 1115-1131.
- [3] Gong Xiaonan, Guo Panpan. Prevention and mitigation methods for water leakage in tunnels and underground structures[J]. China Journal of Highway and Transport, 2021, 34(7): 1-30. (in Chinese)
龚晓南, 郭盼盼. 隧道及地下工程渗漏水诱发原因与防治对策[J]. 中国公路学报, 2021, 34(7): 1-30.
- [4] Asakura T, Kojima Y. Tunnel maintenance in Japan[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2003, 18: 161-169.
- [5] Quan Yannan, Wu Songhua, Tan Jie, et al. Automatic infrared detection technology for immersed tube tunnel water leakage[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(2): 237-245. (in Chinese)
全燕南, 吴松华, 谭杰等. 沉管隧道渗漏水红外自主检测技术[J]. 激光与红外, 2023, 53(2): 237-245.
- [6] Luan Qinghua, Qin Zhiyu, Wang Dong. Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 106-116, 140. (in Chinese)
栾清华, 秦志宇, 王东, 等. 城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 106-116, 140.
- [7] Gao Hong, Li Kai, Ma Quanming, et al. Research on application of mobile 3D laser measurement system in subway operation tunnel disease monitoring[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(8): 96-101, 161. (in Chinese)
高洪, 李凯, 马全明, 等. 移动三维激光测量系统在地铁运营隧道病害监测中的应用研究[J]. 测绘通报, 2019(8): 96-101, 161.
- [8] Liu Xuezheng, Sang Yunlong, Sun Yunfan. Detection technology of tunnel leakage disaster based on digital image processing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(S2): 3779-3786. (in Chinese)
刘学增, 桑运龙, 苏云帆. 基于数字图像处理的隧道渗漏水病害检测技术[J]. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S2): 3779-3786.
- [9] Attard L, Debono C J, Valentino G, et al. Vision-based change detection for inspection of tunnel liners[J]. Automation in Construction, 2018, 91: 142-154.
- [10] Shi Bin, Zhang Dan, Zhu Honghu. Distributed fiber optic sensing for geoenvironmental monitoring[M]. Science Press, Beijing, 2019. (in Chinese)
施斌, 张丹, 朱鸿鹄. 地质与岩土工程分布式光纤监测技术[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [11] Wu Jinghong, Ye Shaomin, Zhang Jiqing, et al. Structural health monitoring of large-section tunnel of jingxiang high-speed railway based on fiber bragg grating monitoring technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(21): 113-121. (in Chinese)
吴静红, 叶少敏, 张继清, 等. 基于光纤光栅监测技术的京雄高铁大断面隧道结构健康监测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(21): 113-121.
- [12] Xiang Huangbin. Study on water pipeline leakage monitoring based on active heating fiber optic temperature measurement[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2020. (in Chinese)
向黄斌. 基于主动加热光纤测温的供水管道渗漏监测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.
- [13] Cote A, Carrier B, Leduc J. Water leakage detection using optical fiber at the peribonka dam[C]//Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics. Massachusetts, 2007: 1-12.
- [14] Yan J F, Shi B, Cao D F, et al. Experiment study of seepage field monitoring in sandy soil using carbon coated heating optical fiber-based C-DTS[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(2): 430-436. (in Chinese)
严珺凡, 施斌, 曹鼎峰, 等. 基于碳纤维加热光缆的砂性土渗流场 C-DTS 分布式监测试验研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(2): 430-436.
- [15] Xiao Henglin, Cai Desuo, He Jun. Measuring method of geomaterial thermal conductivity based on distributed optical fiber sensing technology[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(4): 819-826. (in Chinese)
肖衡林, 蔡德所, 何俊. 基于分布式光纤传感技术的岩土体导热系数测定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(4): 819-826.
- [16] Ye Shaomin, Huang Sheng, Ma Zhifu, et al. Research and application of intelligent monitoring system for water leakage in high speed rail tunnels based on self-heating temperature sensitive fiber optic cable[J]. China Railway,

- 2020,(1):11-15. (in Chinese)
- 叶少敏,黄胜,马志富,等. 基于自加热温敏光缆的高铁隧道渗漏水智能监测系统研究与应用[J]. 中国铁路,2020,(1):11-15.
- [17] Vélez Márquez MI, Raymond J, Blessent D, et al. Distributed thermal response tests using a heating cable and fiber optic temperature sensing [J]. *Energies*, 2018, 11(11):3059.
- [18] B Zhang, K Gu, B Shi, et al. Actively heated fiber optics based thermal response test; a field demonstration[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 134:110336.
- [19] Xu Yang, Li Jian, Zhang Mingjiang. Research progress of raman distributed optical fiber temperature sensor[J]. *Journal of Applied Sciences-Electronics and Information Engineering*, 2021, 39(5):713-732. (in Chinese)
- 许扬,李健,张明江. 拉曼分布式光纤温度传感仪的研究进展[J]. *应用科学学报*, 2021, 39(5):713-732.
- [20] Cao Danping, Lü Junjun, Sun Shangrao, et al. Three-component signal acquisition mechanism of distributed acoustic sensing based on helically winding fiber-optic[J]. *Geophysical Prospecting for Petroleum*, 2022, 61(1):60-69. (in Chinese)
- 曹丹平,律军军,孙上饶,等. 基于螺旋缠绕光纤的分布式声波传感三分量信号采集机理研究[J]. *石油物探*, 2022, 61(1):60-69.
- [21] Chen Yafeng, Zhang Xiaoming, Zhang Ruiping, et al. Research on thermal pipeline leakage monitoring system based on optical fiber spiral winding technology[J]. *Automation & Instrumentation*, 2017, 32(10):1-5, 10. (in Chinese)
- 陈亚峰,张晓明,张睿平,等. 基于光纤螺旋缠绕技术的热力管道泄漏监测系统研究[J]. *自动化与仪表*, 2017, 32(10):1-5, 10.
- [22] Li Yixiong. Study on multi-parameter monitoring of embankment based on distributed fiber-optic sensing technology[D]. Nanjing: Nanjing University, 2021. (in Chinese)
- 李一雄. 堤防多参量分布式光纤监测研究[D]. 南京: 南京大学, 2021.
- [23] Hu Ziang, Wang Qiang, Gu Xiaohong, et al. Online monitoring of syngas pipeline temperature based on distributed fiber sensing[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(1):90-96. (in Chinese)
- 胡子昂,王强,谷小红等. 基于分布式光纤传感的合成气管道温度在线监测研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(1):90-96.
- [24] Zhao Ya, Wang Qiang, Song Junjun, et al. Detection and location of water pipeline leakage based on distributed fiber temperature measurement [J]. *Laser & Infrared*, 2018, 48(7):891-895. (in Chinese)
- 赵亚,王强,宋俊俊等. 基于分布式光纤测温的水管泄漏检测与定位[J]. *激光与红外*, 2018, 48(7):891-895.