

输水隧洞液-气界面 DTS 监测方法

罗 焰, 任 伟

(广州北江原水供应有限公司安全管理部, 广州 510000)

摘要: 输水隧洞的运营状态与其水情息息相关, 确定隧洞内液-气界面高度是确保隧洞正常运行的重要前提。基于分布式温度传感(DTS)技术时空连续性、监测便捷性、高空分辨率等特点, 提出一种基于DTS技术的输水隧洞液-气界面分布式监测方法及液面高度经验公式, 并通过室内模型验证该方法的适用性, 分析液面高度、光缆布设角度、加热功率、光缆类型对感测性能的影响。结果表明: DTS液-气界面分布式监测方法配合铜网内加热传感光缆效果最佳, 当布设角度为 45° 、加热时间为2 min, 且界面高度处于28 cm及以上时, 可以准确反映隧洞内液-气界面高度。

关键词: 输水隧洞; 分布式温度传感(DTS); 液-气界面; 温度; 分布式监测

中图分类号: TU473 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2024)19-0270-08

输水隧洞的运行状态很大程度上取决于通过的水流条件、渗漏状况以及洞内淤积情况, 在非正常工况如排水系统堵塞以及极端天气情况易产生对输水隧洞的不利影响^[1], 因此, 开展输水隧道内的液体界面高度的安全监测尤为必要。

目前, 工程界广泛采用的液-气界面监测方法包括传统的水文站^[2]、压力式以及激光雷达等^[3-7], 在日常维护和环境适应性上都存在一定缺陷。基于图像识别及机器视觉的方法^[8-11]近年来备受青睐, 但此类方法在野外和一些复杂且有声噪干扰的环境下, 图像容易被杂物遮挡, 无法进行有效识别, 难以监测界面高度。光纤传感作为一种新型监测技术, 其在液-气界面监测方面的应用一直在探究。刘高等^[12]提出将光缆缠绕式布设, 利用分布式温度传感(distributed temperature sensing, DTS)监测水库中水位, 但当水温与空气相近时无法有效监测, 且无法进行长距离分布式监测。Martins等^[13]提出了一种基于光纤液位传感器监测系统, 但其造价较高, 监测结果精度也较低。de Oliveira等^[14]利用光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)实现了河流液-气界面和温度的实时监测。Wang等^[15]提出了一种远程光纤液位传感器, 可实现较长距离的监测, 但其敏感部位非光纤结构, 容易受复杂环境干扰。Lu等^[16]提出了一种基于奥林巴斯光纤液位传感器(Olympus micro-displacement fiber optic liq-

uid level sensor, OM-MD)光纤液位传感器, 但其易受环境影响而影响监测精度。

本文基于DTS技术, 提出一种输水隧洞连续分布式液-气界面监测方法, 通过室内试验, 验证该方法的可行性并提出DTS液-气界面监测的经验公式, 确定其适用范围, 并分析液面高度、光缆布设角度、加热功率、光缆类型等因素对监测结果的影响, 以为分布式光纤温度传感技术在输水隧洞的分布式液-气界面的识别提供技术支撑。

1 液-气界面监测方法

1.1 DTS 测温原理

分布式光纤温度传感(DTS)技术基于拉曼散射原理进行长距离测温: 由激光器发出的激光脉冲在光纤中传输, 入射的光量子与光纤物质分子产生碰撞, 当产生非弹性碰撞时, 发生能量交换, 光量子可以释放或吸收声子, 表现为产生一个波长较长的斯托克斯光和一个波长较短的反斯托克斯光, 根据这两种光的比值与温度的定量关系得到具体待测点的温度, 如图1所示。

$$R(T) = \frac{I_a}{I_b} = \left(\frac{V_a}{V_b} \right)^4 e^{\frac{-hc\nu}{KT}} \quad (1)$$

式中: $R(T)$ 为待测温度的函数; I_a 为反斯托克斯光强度; I_b 为斯托克斯光强度; V_a 为反斯托克斯光的频率; V_b 为斯托克斯光的频率; c 为光速; ν 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。

收稿日期: 2024-04-17

作者简介: 罗焰(1975—), 女, 湖南长沙人, 高级工程师, 研究方向为结构安全; 任伟(1988—), 男, 吉林大安人, 助理工程师, 研究方向为结构安全管理。

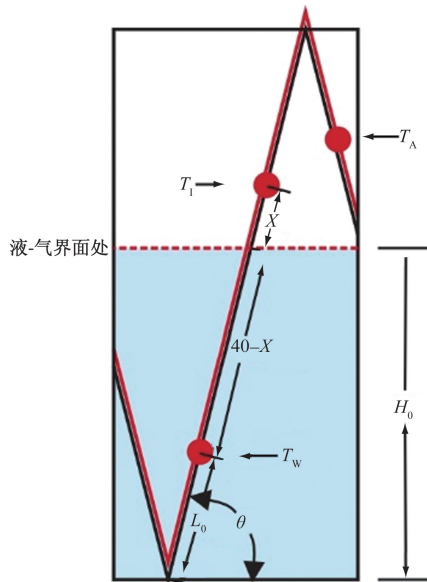
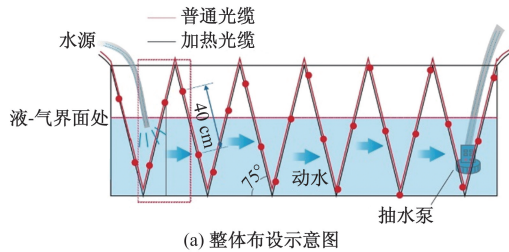
1.2 液-气界面高度计算

将传感光缆呈 W 形布设在隧洞内(图 1),由于隧洞内存在液体,光缆上存在完全在液体中、完全在空气中和处于液-气界面处的 3 种测点,由于介质不同,则温度监测值也存在 3 种情况:完全在水下的温度 T_w 、完全在空气中的温度 T_A 和包含液体与空气段的温度 T_1 。值得注意的是,受限于 DTS 设备的空间分辨率(40 cm),本次试验中默认每个测点的温度为此测点前 40 cm 测量段的平均温度。

将图 1(a)中某一完整测温段进行解析,如图 1(b)所示。测点 T_1 所测得的温度由完全在水中的温度 T_w 与完全在空气中的温度 T_A 两部分组成,因此引入加权平均的数学算法进行温度计算,推导过程如下:

$$T_A X + T_w(40 - X) = 40 T_1 \quad (2)$$

式中: X 为液-气界面所在测量段光缆处于空气中的长度。



T_1 为光缆处于液体与空气界面处测量段的温度; T_A 为光缆完全在空气中的温度; T_w 为光缆完全处于液体中的温度; X 为液气界面所在测量段光缆处于空气中的长度; θ 为光缆布设的角度; H_0 为液气界面监测高度; L_0 为模型底部至测量段的光缆长度

(b) 局部解析示意图

图 1 监测原理

通过监测已知 T_A 、 T_1 、 T_w 的温度值,将式(2)进行变换得到 X 的表达式为

$$X = \frac{40(T_1 - T_w)}{T_A - T_w} \quad (3)$$

布设光缆时通过局部定点确定第一个测点位置,再根据 40 cm 可确定模型底部至测量段的光缆长度 L_0 ,液-气界面监测高度 H_0 可由式(4)表示,其中 θ 为光缆布设的角度。

$$H_0 = (40 - X + L_0) \sin \theta \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)得液-气界面监测高度 H_0 表达式为

$$H_0 = \left[40 - \frac{40(T_1 - T_w)}{T_A - T_w} + L_0 \right] \sin \theta \quad (5)$$

将式(5)整理得

$$H_0 = \left[\frac{40(T_A - T_1)}{T_A - T_w} + L_0 \right] \sin \theta \quad (6)$$

通过式(6)可知,液-气界面高度与布设角度 θ 、光缆在空气中的温度 T_A 、在水中的温度 T_w 及在界面处的温度 T_1 均有关。通过 DTS 获取传感光缆沿线温度,得到温度曲线,即可实现长距离分布式液-气界面的自动化监测。

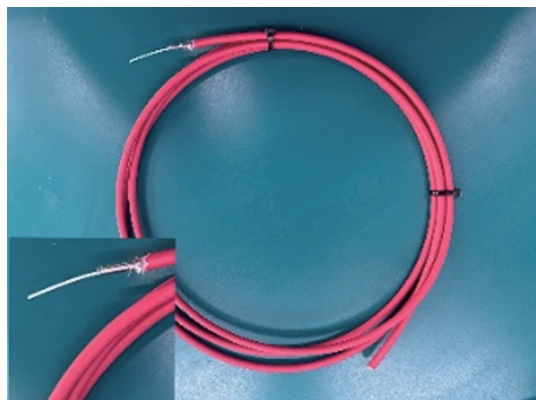
2 输水隧洞液-气界面模型试验

2.1 试验装置及材料

为模拟输水隧道现场环境,定制尺寸为 236 cm × 45 cm × 80 cm PP(聚丙烯)材质长方体模型水箱,用于室内试验,现场验证采用 300 cm 长侧斜管用于布设光缆下放至河道内。测温光缆采用苏州南智传感科技有限公司生产塑封铠装分布式温度传感光缆和铜网内加热分布式温度传感光缆(图 2),两种光缆各约 50 m,参数见表 1。采用防水胶将光缆以不同角度呈“W”形布设于水箱两侧壁,通过跳线与温补箱和 DTS 连接,铜网内加热光缆需连接可调电源,并在试验时以 8 W/m 功率加热。试验装置如图 3 所示。

表 1 光缆参数

参数	取值	
	塑封铠装温度传感光缆	铜网内加热温度传感光缆
纤芯数量	1	3
光缆直径/mm	5	5.8
布里渊温度系数/(MHz·°C ⁻¹)	1.10	1.10
加热阻值/(Ω·m ⁻¹)	—	0.02
工作温度/°C	-20~80	-20~80



(a) 塑封铠装温度传感光缆



(b) 铜网内加热温度感测光缆

图2 光缆

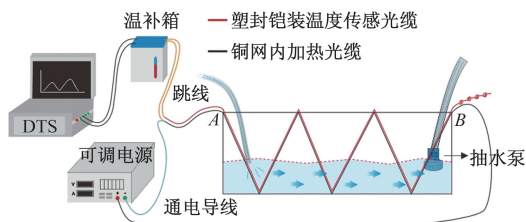


图3 试验装置

2.2 试验方法

为验证 DTS 在输水隧洞监测液-气界面的可行性,开展多组模型试验。试验前,使用热风枪加热图 3 中 A、B 两点,标定测量段起点和终点。试验过程中使用抽水泵模拟输水隧洞真实动水环境,保持流量相等,使液-气界面高度始终保持不变。

按照布设角度将试验共分为 4 组:30°角布设、45°角布设、60°角布设及 75°角布设。每组试验在 28、48、60 cm 液面高度情况下,分别对两种光缆加热 5 min,利用 DTS 连续测量采集加热 2、3、5 min 的温度数据,得到温度曲线,进而进行液-气界面高度计算。

3 试验结果

3.1 液-气介质中温度分布特征

利用 DTS 连续测量得到若干组温度曲线,以 45°角布设、液-气界面为 60 cm(图 4)、加热 3 min 时的温度分布曲线为例,如图 5 所示。试验前标定测量段为 58.95~66.58 m,点 a(58.95 m, 43.6 °C)为完全处于空气中的测点(空气点),点 b(58.36 m, 36.29 °C)为处于液-气界面处测量段的测点(界面点),点 c(58.77 m, 32.85 °C)为完全处于水中测量段的测点(水中点)。实际监测中,DTS 存在系统误差,当空气点和水中点与相邻测点温度差小于 1.5 °C 时,认为这些点处于同一状态,如图 5 所示,黑色标注点为空气点,红色标注为界面点,蓝色标注点即为水中点,计算时宜采用界面点相邻的空气点与水中点。

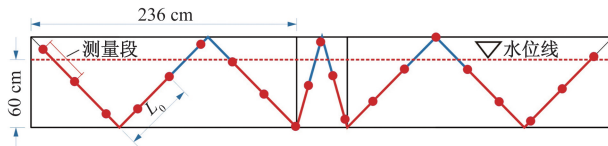


图4 45°角布设 60 cm 界面光缆布设示意图

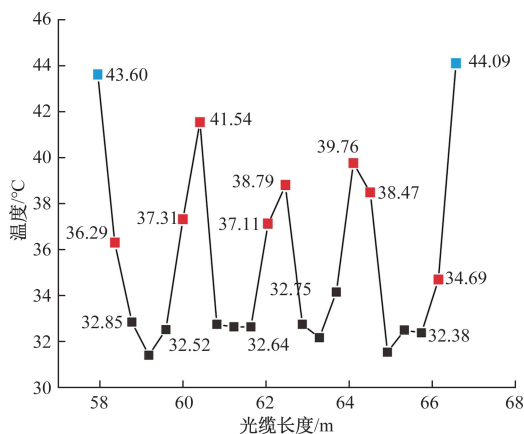


图5 45°角布设 60 cm 界面加热 3 min 温度曲线

3.2 液-气界面计算

根据测点 a~c 的温度值,利用式(3)计算出 X,在图 4 中以 40 cm 为一个测点推算测量段全长及各测点位置,可以发现,图 5 中界面点与图 4 中液-气界面处测量段相互对应。需要注意的是,图 4 中蓝色标注的测量段由于水位过高,导致相邻无空气点,此时通过式(3)计算时应对应公式进行修正,当界面点相邻不存在空气点 T_A 时,应采用测量段起点处空气点温度,如图 4 中点 a 的温度值代入式(3)计算得到 X。

对式(3)修正计算得到 X , 根据式(6)换算求得此时液-气界面高度 H_0 。表 2 为本组试验液-气界面高度计算结果, 图 6 为本组室内试验监测液-气界面高度示意图, 经计算, 最大误差为 -34 mm, 平均误差为 21 mm, 平均相对误差为 0.018 。为保证试验中光缆的连续性, 界面点 f 、 g 所在测量段未按照 45° 角布设, 未列入试验结果, 因此该方法在输水隧洞液-气界面监测方面具有可行性。

表 2 45° 60 cm 加热 3 min 液-气界面高度计算结果

界面点	b	d	e	h	i	j
温度/ $^\circ\text{C}$	36.2	38.3	41.54	39.76	38.47	34.69
H_0/mm	600	607	628	627	629	566
误差/mm	0	7	28	27	29	-34

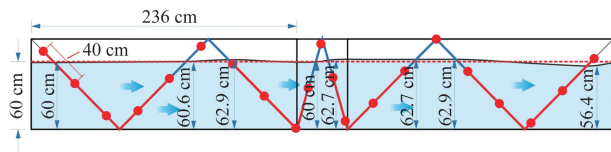


图 6 45° 60 cm 界面加热 3 min 液-气界面监测高度示意图

4 影响因素及适用性分析

4.1 光缆适用性

为了验证不同测温光缆在液-气界面监测时的适用性, 对比塑封铠装分布式温度传感和铜网内加热光缆的测试效果。图 7 所示为 45° 角布设的塑封

铠装分布式温度传感光缆在 28 、 48 、 60 cm 界面高度时的温度曲线。可以发现, 光缆无主动加热情况下, 相对图 5 加热光缆的温度曲线, 其温度无明显变化规律, 且温度变化幅度较小, 无法区分界面点与水中点。因此利用非加热光缆监测液-气界面较为困难。

4.2 光缆加热时间

以相同功率主动加热铜网内加热光缆, 对不同液-气界面高度及布设角度的每组试验各加热 5 min, 获取其第 2 、第 3 和第 5 min 时刻的温度曲线, 如图 8~图 11 所示。随着加热时间逐渐增长, 完全处于水中的测点温度几乎不变, 空气点和界面点的温度随加热时间而升高。

根据所得温度曲线, 利用式(6)计算得到各测量段所处的液-气界面高度, 与实际设定液-气界面高度进行对比。图 12 为绝对误差分析图。除 30° 角布设 28 cm 界面高度时, 加热时间对绝对误差影响较稳定, 其余各组监测界面绝对误差在加热 2 min 时均为最低, 误差随光缆加热时间增长而增大, 且变化较高。图 13 为相对误差对比。当液-气界面较低时, 相对误差较高, 随界面升高, 相对误差逐渐减小, 且各组试验中光缆加热 2 min 时, 相对误差最小。因此光缆主动加热 2 min 时, 液-气界面高度监

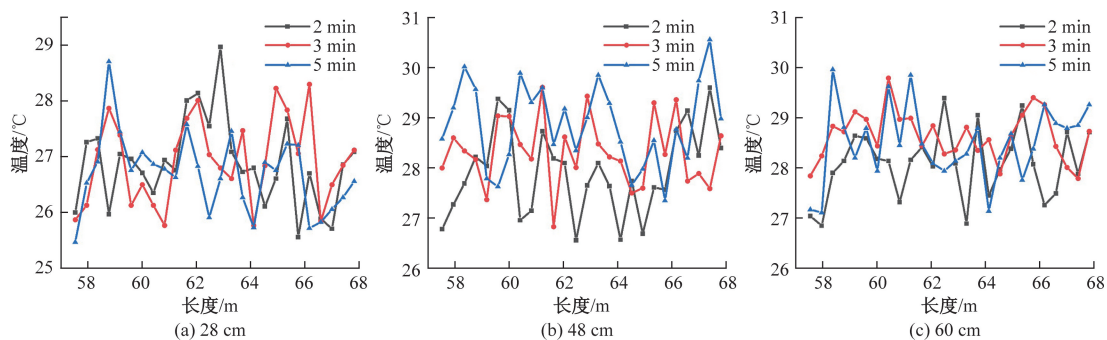


图 7 45° 角布设 28 、 48 、 60 cm 界面普通光缆温度曲线

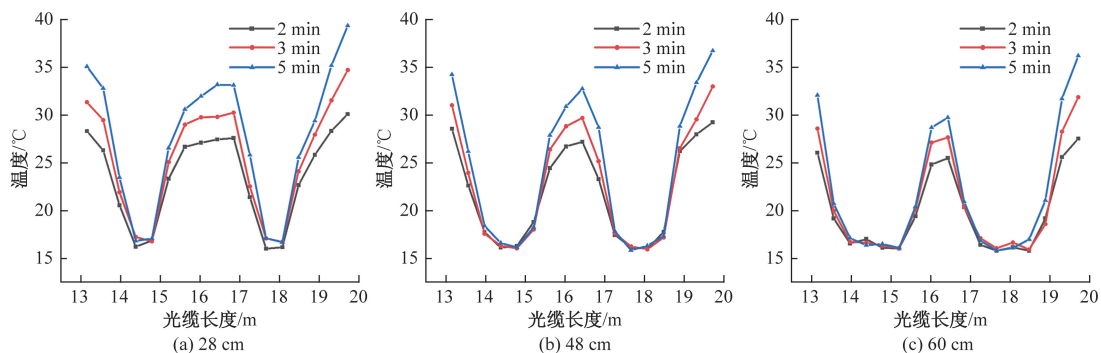


图 8 30° 角布设 28 、 48 、 60 cm 界面高度加热 5 min 温度曲线

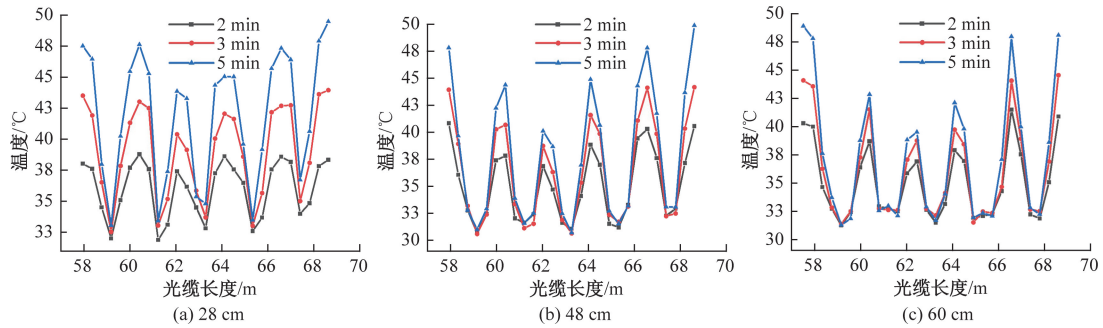


图9 45°角布设 28、48、60 cm 界面高度加热 5 min 温度曲线

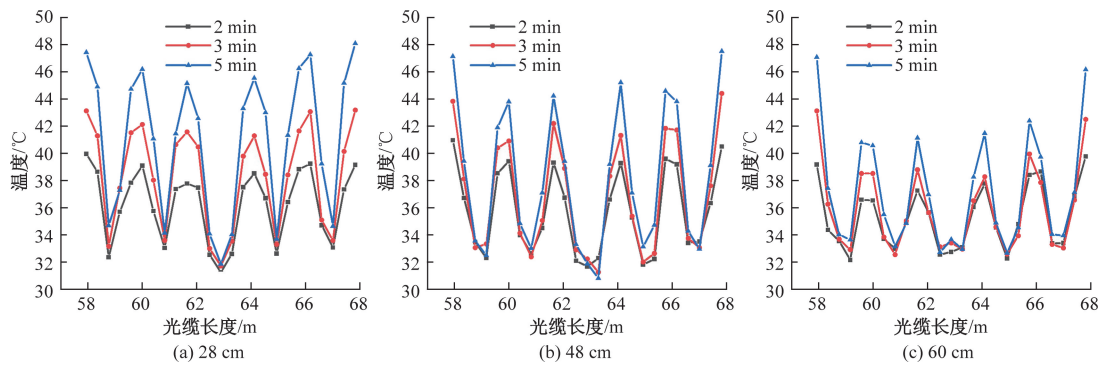


图10 60°角布设 28、48、60 cm 界面高度加热 5 min 温度曲线

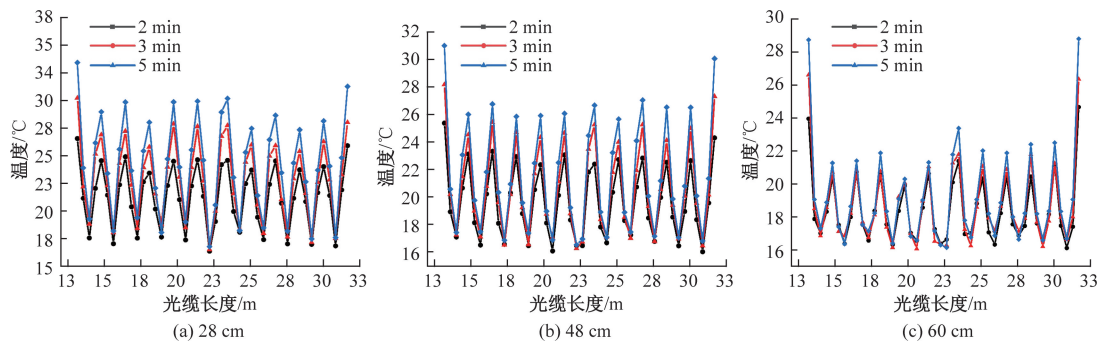


图11 75°角布设 28、48、60 cm 界面高度加热 5 min 温度曲线

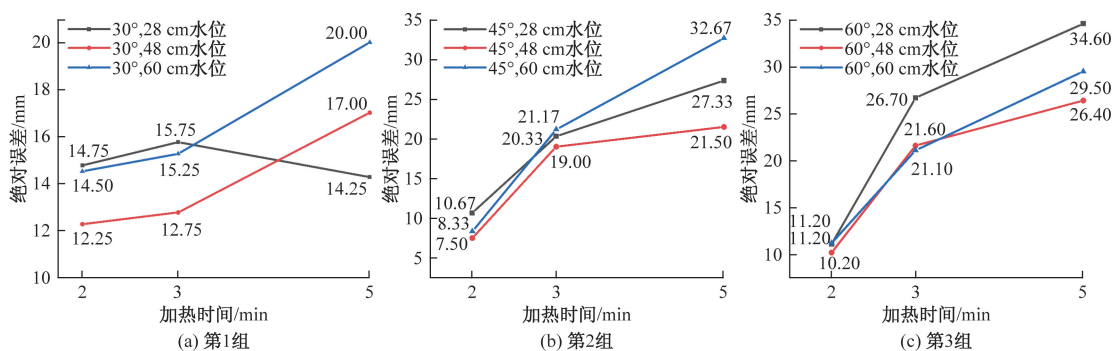


图12 各组不同加热时间界面绝对误差对比

测较为精准,说明了铜网内加热光缆在主动加热条件下对长距离输水隧洞内液-气界面高度监测的可行性。

4.3 光缆布设角度

图14为铜网内加热光缆在3种布设角度下加热2 min时的液-气界面高度误差,实际液-气界面在

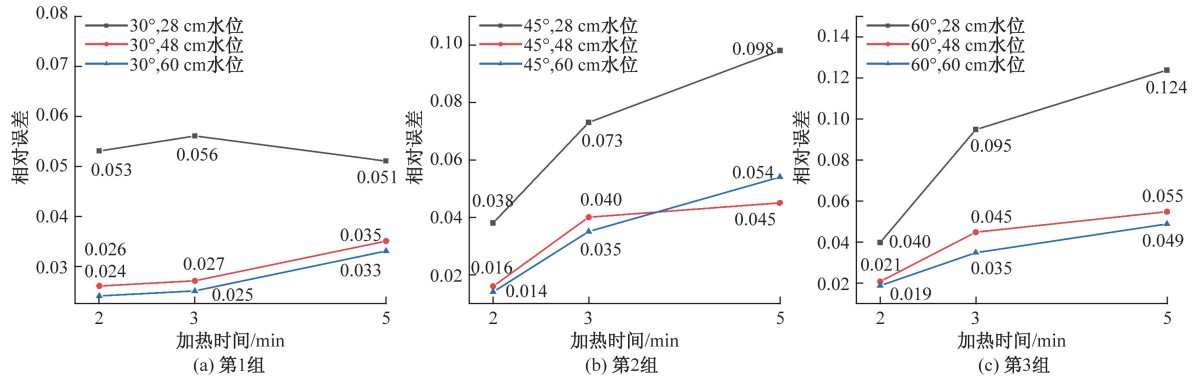


图 13 不同加热时间界面相对误差对比

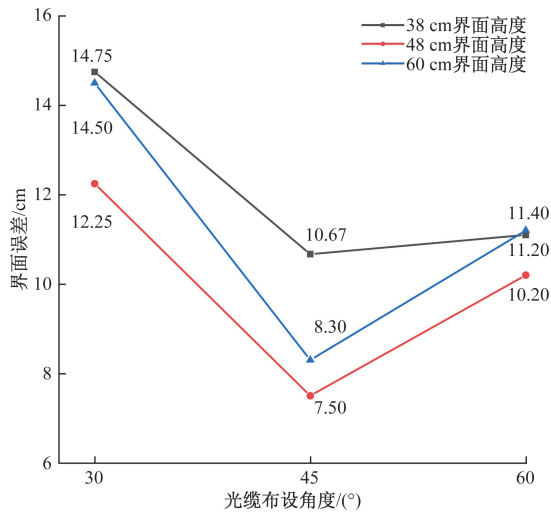


图 14 不同光缆布设角度界面误差对比

28、48、60 cm, 布设角度为 45° 时, 界面误差均比 30° 与 60° 角布设时低, 说明 45° 角布设光缆监测液-气界面有更高的精度, 同时在对比较不同光缆布设角度中, 45° 角布设监测效果更优。布设角度为 75° 不同加热时间和不同界面高度监测的温度曲线(图 11)显示, 当界面高度为 28 cm 时, 有多组界面处测量段相邻无完全在水中的测量段, 计算界面高度时, 无法利用式(6)进行计算, 需多次进行修正, 即使多次修正, 误差也较大, 且在温度曲线中无法清晰地判断界面点。根据界面高度极限值计算可得, 当布设角度为 75° 时, 监测数据较精确的界面高度应为 39~41 cm, 其范围远小于 45° 的 28~52 cm, 因此在相同环境下, 75° 角布设光缆相比其他布设角度, 当界面高度处于极端高或低时, 存在监测数据部分无法计算或部分数据计算误差较大问题, 且当界面高度低于最低或高于最高装置临界高度大于 10 cm 时即无法监测。

4.4 液-气界面高度

改变液-气界面高度, 光缆加热时间和布设角度

保持不变, 通过 DTS 监测获得不同界面高度下的光缆温度曲线, 监测得到界面高度与实际界面高度误差, 如图 15 所示。

当液-气界面处于 48 cm 时, 监测所得的界面误差均处于最低值, 原因是当实际液-气界面处于 48 cm 时, 各界面点都存在相邻的空气点和水中点, 即每一界面处测量段都存在相邻的完全处于空气中和完全处于水中的测量段, 因此无需在计算式(3)中 X 的数值时对公式修正, 因此利用 DTS 监测液-气界面时, 由于布设方式及设备的系统误差, 在界面高度处于最低和最高临界值中间时, 测量误差最小, 最低临界值为在界面处测量段相邻必存在完全处于水中的测量段时界面高度值即 $40\sin\theta$, 最高临界值为在界面处测量段相邻必存在完全处于空气中的测量段时的界面高度值即 $H - 40\sin\theta$, 其中 H 为模型水箱高度, θ 为布设角度。在本文试验中, 当 48 cm 界面高度测量时, 精度最高, 而界面高度超过或低于临界界面高度时, 需进行修正。

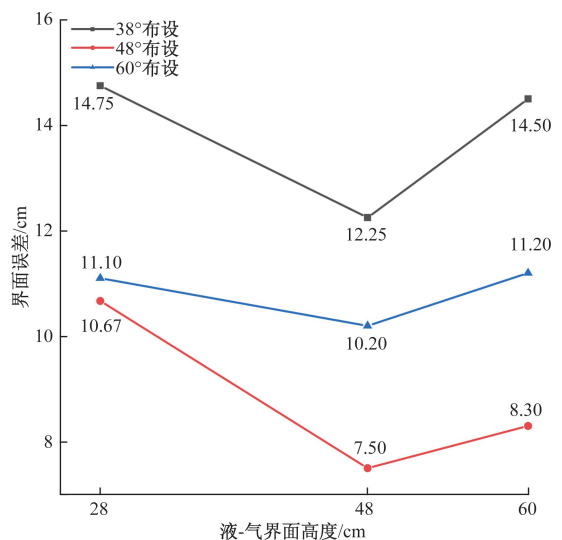


图 15 不同液-气界面高度界面误差对比

5 现场验证

为模拟输水隧洞真实运营环境,寻找某河道进行可行性试验验证。试验前对光缆测量段进行标定,可得测量段全长 15.62 m,现场选取室内试验中精度较高的参数调配即 45° 角 W 形布设加热 2 min,结合上述经验公式进行液-气界面监测,以验证分布式光纤温度传感在输水隧洞中液-气界面监测的可行性,图 16 为现场光缆布设示意图,图 17 为现场验证试验。

图 17 中将铜网内加热光缆以 45° 角布设于河道侧壁,使用测斜管将光缆下放至河道底部光缆中铜网通过导线与直流电源连接,光缆另一端通过跳线与 DTS 连接,以 8 W/m 功率加热 2 min 进行温度采集,图 18 为现场验证监测温度曲线,结果显示测量段光缆共存在 4 个界面点(图 18 中红色点标记),界面点相邻温度 T_A 、 T_W 见表 3。经上述公式计算可得各界面点处液-气界面高度与实测界面高度平均误差约 3.2 cm,验证了分布式光纤温度传感在输水隧洞液-气界面中应用的可行性并具有较高精度。

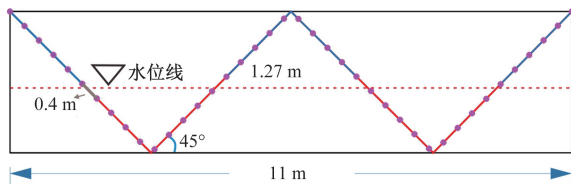


图 16 现场验证光缆布设示意图

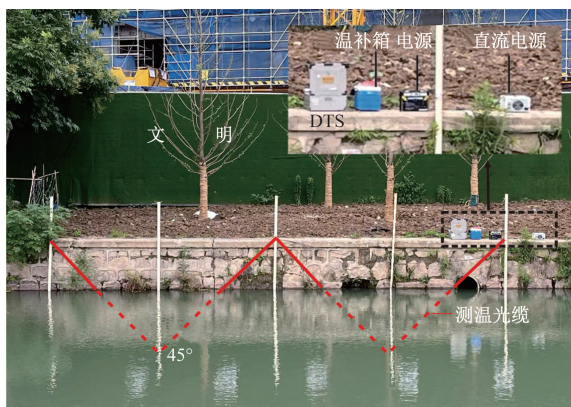


图 17 现场验证试验

表 3 现场验证监测数据

参数	界面点 1	界面点 2	界面点 3	界面点 4
$T_A/^\circ\text{C}$	28.09	28.14	28.14	28.08
$T_i/^\circ\text{C}$	21.79	24.11	24.69	22.18
$T_w/^\circ\text{C}$	18.98	19.09	19.37	19.44
H_0/mm	1 250	1 305	1 304	1 229
误差/mm	20	35	34	41

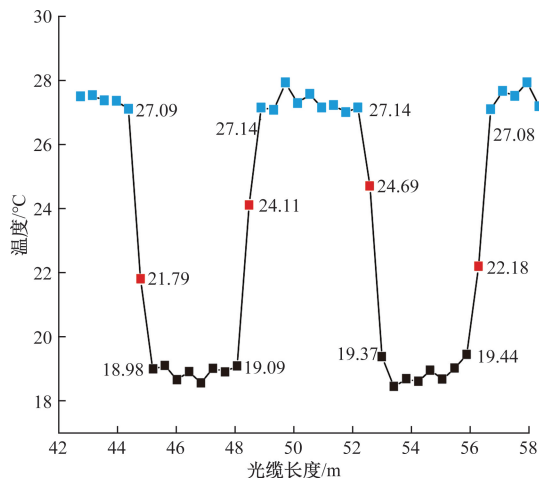


图 18 现场验证监测温度曲线

6 结论

提出了一种基于分布式光纤温度传感(DTS)的长距离输水隧洞内液-气界面分布式感测方法,通过室内试验验证了该方法的可行性,提出了 DTS 监测液-气界面的计算方法,探究了光缆的加热时间、光缆布设角度、液-气界面高度及不同光缆种类对监测性能的影响,得到以下结论。

(1)当液-气界面高度处于最高和最低临界值之间时,通过加热感测光缆方法可以计算得到液-气面高度,且精度较高。当界面高度超过临界值时,需对公式进行修正后应用。

(2)在试验中对铜网内加热光缆加热不同时间,通过 DTS 监测并计算监测误差,得到加热 2 min 时,传感光缆监测液-气高度精度最高,误差为 2 cm 左右。

(3)由于布设方式对光缆弯折角度小、传感光缆之间不易相互导热等原因, 45° 角布设光缆监测液-气界面高度范围较大,其监测误差相对较小,精度较高。

(4)当液-气界面高度为 48 cm 时,该方法的监测精度最高,计算误差最小,当布设的角度不同时,监测最优界面高度的范围也不同,当布设角度为 45° 时,最优界面高度为 28~52 cm,在实际输水隧洞中,其最优监测范围根据隧洞高扩大。

DTS 可以实现长距离的分布式监测,因此在输水隧洞中液-气界面的监测具有较好的应用价值,其现场应用效果有待进一步研究。

参考文献

- [1] 胡恒福. 富水岩溶铁路隧道水害成因及排水洞整治效果分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(7): 170-176.

- [2] 祝敏刚, 郑晓晶, 覃雨璐, 等. 水库蓄水对移民安置场地稳定性影响分析[J]. 科技和产业, 2023, 23(18): 254-260.
- [3] 周海龙. 拜城水文站雷达水位计比测分析[J]. 海河水利, 2023(3): 98-101.
- [4] CHETPATTANANONDH K, TAPOANOI T, PHUK-PATTARANONT P, et al. A self-calibration water level measurement using an interdigital capacitive sensor[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 209: 175-182.
- [5] 李琨, 张泽玉, 韩鹏. 调水工程智能水位计创新应用[J]. 水电站机电技术, 2023, 46(11): 108-111.
- [6] 陈晓燕, 齐明杰, 程之恒, 等. 基于岸基激光雷达的水位智能监测技术[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(2): 90-95, 102.
- [7] 高玉方. SEBA 雷达水位计在水文站中的应用[J]. 电子技术, 2023, 52(8): 9-11.
- [8] 周建国, 彭朵, 蒋卫国, 等. 智能全站仪大坝自动化监测时的辅助水位测量[J]. 长江科学院院报, 2023, 40(6): 160-165.
- [9] GAO A, WU S, WANG F, et al. A newly developed unmanned aerial vehicle(UAV) imagery based technology for field measurement of water level[J]. *Water*, 2019, 11: 124.
- [10] LIN Y T, LIN Y C, HAN J Y. Automatic water-level detection using single-camera images with varied poses[J]. *Measurement*, 2018, 127: 167-174.
- [11] ELIAS M, KEHL C, SCHNEIDER D. Photogrammetric water level determination using smartphone technology[J]. *The Photogrammetric Record*, 2019, 166: 198-223.
- [12] 刘高平, 杨如祥, 秦一涛. 光纤温度传感器在水库水位监测中的应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2008(5): 112-116.
- [13] MARTINS J, RODRIGUEZ C, DOMINGUE F, et al. Low-cost and high-performance optical fiber-based sensor for liquid level monitoring[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19: 4882-4888.
- [14] DE OLIVEIRA L A, DE SOUSA F B, DE SOUSA F M, et al. Prototype of a sensor for simultaneous monitoring of water level and temperature of rivers in the Amazon using FBG[J]. *Optical and Quantum Electronics*, 2022, 54: 731.
- [15] WANG D, XUE Z, JIN B, et al. Chaotic correlation optical fiber liquid level sensor[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2018, 37(3): 1023-1028.
- [16] LU H L, NIN Y L, YANG L, et al. Liquid level sensor based on PM-MD fiber structure loop mirror[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 62: 102464.

Liquid-gas Interface Monitoring Method by DTS in Water Conveyance Tunnel

LUO Yan, REN Wei

(Safety Management Department, Guangzhou Beijiang Raw Water Supply Co., LTD., Guangzhou 510000, China)

Abstract: The operation state of the water conveyance tunnel is closely related to the water condition, so determining the height of the liquid-gas interface in the tunnel is an important premise to ensure the normal operation of the tunnel. Based on the characteristics of distributed temperature sensing(DTS) technology, such as time-space continuity, monitoring convenience and high altitude resolution, a distributed monitoring method of liquid-gas interface and an empirical formula of liquid level height based on DTS technology were proposed, and the applicability of the method was verified by indoor models. The effects of liquid level height, optical cable laying Angle, heating power and optical cable type on sensing performance are analyzed. The results show that the DTS distributed monitoring method has the best effect when combined with the heating sensor cable in the copper network. When the laying Angle is 45° , the heating time is 2 minutes, and the interface height is 28 cm or above, the liquid gas interface height in the tunnel can be accurately reflected.

Keywords: water conveyance tunnel; distributed temperature sensing(DTS); liquid-gas interface; temperature; distributed monitoring