

基于光纤测温和小波降噪的污水管道检测方法

尹海龙, 吴玟萱, 胡意扬, 魏 卿, 祁海玥

(同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 建立了基于小波降噪的光纤感温数据背景噪声值识别和污水管网入流无干扰检测方法, 并结合实际污水管道识别的动态入流入渗事件进行了验证。结果表明: 不同降噪算法得到的背景噪声阈值范围较大, 对照实际污水与雨水入流事件, 阈值取约 ± 0.3 °C 左右时的识别效果最佳; 阈值调节方法为算法选择的主导因素, 多级阈值调节相比不调节和单级调节具有明显优势。据此给出了小波函数、阈值估计方法和阈值调节方法的优化参数, 以实现可靠的污水管道检测效果。

关键词: 污水管道; 管道入流; 光纤分布式测温; 小波分析; 管道检测

中图分类号: X52; TU992.23

文献标志码: A

A Sewer Detection Method Based on Fiber-Optic Distributed Temperature Sensing and Wavelet Based Denoising

YIN Hailong, WU Wenxuan, HU Yiyang, WEI Qing, QI Haiyue

(College of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: This paper proposed a method to determine background noise of fiber temperature sensing data based on wavelet denoising, and then detected in-sewer inflow events without disturbing sewer flow conveyance. This method proposed was validated using detected dynamic inflow events in an actual sewer system. It was found that different wavelet denoising algorithms provide background noises that span a wide range, and a noise threshold of about ± 0.3 °C corresponds to the best identification of actual sewer and stormwater inflow events. Threshold rescaling is the dominant factor for algorithm employment, where the multi-level rescaling method is obviously superior to the non-rescaling and

single-level rescaling method. Accordingly, optimized parameters for the wavelet denoising algorithm including wavelet function, threshold selection rules and threshold rescaling were proposed, to enhance the reliability of sewer detection.

Key words: sewer pipe; pipe inflow; fiber-optic distributed temperature sensing; wavelet analysis; pipe detection

排水管网是重要的城市水环境基础设施, 在保证城市安全运行和改善水环境质量方面发挥着重要作用。截至 2022 年底, 我国城市排水管道长度超过 90 万 km, 其中近 47.5 % 的管道建成年限超过 10 年^[1]。在我国经济发达和排水管道基础设施建设较早的省市, 建成年限长的管道比例更高。对此, 亟需对排水管道的运行状况进行诊断评估, 为排水管道改造、修复和城镇污水治理提质增效提供科学依据。

目前排水管网检测评估的常用方法是闭路电视检测 (closed-circuit television, CCTV) 法, 该方法通过投放管道机器人获得管道内的实时图像, 直观显示管道结构性和功能性缺陷。但是, CCTV 在大范围的管网检测中不仅成本昂贵, 而且在污水管道中逐段的封堵、导排也难以实施。近年来, 基于水质特征因子的排水管网诊断方法也受到关注^[2-3]。作为一种数字化诊断方法, 该方法针对不同入流类型包括生活污水、工业废水、地下水等筛选水质特征因子和建立特征因子数据库, 并结合管网节点水质监测和化学质量平衡模型, 实现管网水量来源的分区定量解析, 进而判断管网的破损或者混接程度。水质特征因子法能够通过有限点位监测来筛选高风险管段, 但是不适用于对管网问题点位的精细化排查, 且

收稿日期: 2023-04-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (52170103); 国家重点研发计划资助项目 (2021YFC3200703); 上海市水务局科研项目

第一作者: 尹海龙, 教授, 工学博士, 博士生导师, 主要研究方向为城镇排水系统优化设计与运行。

E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn



对于动态入流入渗问题检测不适用。因此有必要在通过水质特征因子法筛选高风险管段的基础上,进一步研究管网不断水条件下的新型高分辨率检测方法。

光纤分布式测温(fiber-optic distributed temperature sensing, FDTS)是20世纪80年代发展起来的一项实时监测技术,通过沿纵向铺设光缆对周边介质温度进行感知,判定温度异常点位和进行实时预警。FDTS技术目前已较为广泛应用于燃气输送管线和输油管线的漏损实时监测、重要电力设备及输电电缆的升温预警、大型土工构筑物如水坝、隧道等的健康风险评估^[4-5]。在水文地质领域,FDTS应用于地表水与地下水交换过程的追踪^[6]。在排水管道检测中,作为一种管道内部水温信号的分布式实时“听诊”技术,FDTS对排水管道运行不造成干扰,而且具有全天候的时空高频观测优势。国际上Hose等^[7]和Schilperoort等^[8]于2009年率先报道了基于FDTS的排水管网入流检测技术研究。Hose等^[7]针对荷兰某地的排水系统,识别了雨水管道中生活污水的间歇性混接排放现象;Schilperoort和Clemens证实了在合流制排水管道应用FDTS的可行性,通过对荷兰某地合流污水管道开展持续一个星期的观测,分析了管道污水的水温沿程变化以及对应的旱天、雨天污水管道入流特点^[8]。此后Langeveld^[9]、Nienhuis^[10]、Kessili^[11]、Kechavarzi^[12]等相继开展了基于FDTS的管网破损、雨污混错接识别、合流制系统雨天截流效能评估等方面研究,进一步证实了该项技术在排水管道检测中的可行性。

FDTS数据中通常包含了来自光电探测与信号采集处理过程中的突变、波动等噪声,当外部入流水温与管道水温差别较小时,温度数据的质量直接影响数据分析和结果判定的可靠性。因此,有必要研究光纤测温数据的降噪方法。尤其是当外部入流水温与管道水温差别较小时,FDTS噪音水平识别不合理会造成诊断结果的误判。赵亚^[13]提出了一种基于实验室FDTS数据的管道泄漏识别方法,首先由聚类方法定性判断是否存在泄漏,而后通过对无泄漏信号的累加平均与异常值剔除,得到背景温度,将存在泄漏的测温数据与背景温度比较获取泄漏位置信息。Kessili^[11]则基于排水管道未发生外部入流时的水温波动仅来自于测量噪声的假设,通过空间相邻两点温差的统计分析确定背景噪声阈值,并在此基础上识别管道中的污水接入和雨水入流事件。但是实际排水管道中是否存在外部入流入渗事先未

知,背景阈值难以直接确定,因此有必要研究复杂温度信号条件下的背景噪声阈值识别方法。

小波变换作为一种时频分析手段,能够根据测量信号与噪声的频率特性差异,从时域和频域上进行特征提取与噪声滤除,适用于非平稳信号的降噪^[14-16]。在小波变换去噪的过程中,小波参数的选取对降噪结果可靠性至关重要。其中,小波函数的选取由于与具体信号特性的关系较大,往往通过实验室测量或参考经验来确定^[17-19]。然而,实验室测量数据与实际管道测温数据在环境温度沿程变化趋势、入流入渗温度响应、噪声特性等方面不尽相同。对此,本研究选择实际污水管道进行了FDTS测量,获取了长时间的动态监测数据。在建立基于小波降噪的污水管道入流自动识别方法基础上,采用不同小波降噪算法开展数值实验,获取了FDTS测量数据的噪声阈值,据此对各种降噪算法判断实际污水管道入流事件的可靠性进行了分析。

1 研究方法

1.1 光纤分布式测温系统布设

如图1示,光纤测温系统由一条标准光纤和一台包括激光发射器、光电信号接受器在内的主处理机终端组成。使用时,沿管道先将穿线器由下游检查井引至上游,待末端连接感温光纤后再拉回至下游。对于较长的管段,在若干个检查井之间依次重复上述步骤,即可完成光纤在整个管段内部的敷设。光纤的一端与放置在管道外的主机连接。

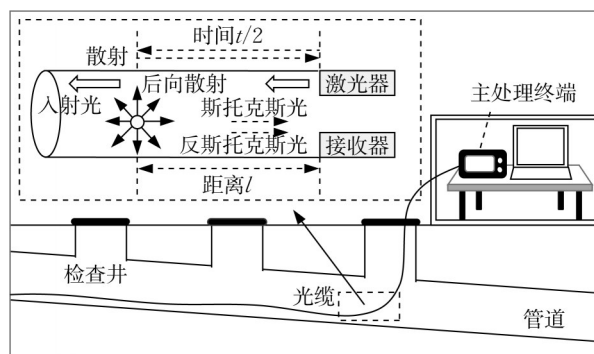


图1 光纤测温系统的布置与工作原理

Fig. 1 Schematic diagram of layout and operating principle of FDTS

光纤测温系统工作时,脉冲光首先由激光器发射并注入光纤。它在光纤中向前传输的过程中不断产生后向散射光,并返回接收器进行信号放大和处

理。根据光纤不同点位(代表了管道不同点位)后向拉曼散射光中的反斯托克斯光和斯托克斯光光子强度相对大小,可实时计算对应点位的温度^[14]。

1.2 基于小波变换的FDTS数据去噪算法基本原理

光纤采集的温度信号通常包含了系统器件带来的噪声信号,其主要来源于光电探测过程与信号采集处理过程。频谱分析方法利用光纤测温数据趋势部分和噪声部分频幅不同的特点,提取出数据中的趋势部分。噪声相比于温度信号通常表现出振荡频率更高、振幅更小的频率特性。本文采用离散小波变换,变换后原信号分解为包含温度信号特征的低频部分,产生近似系数;以及包含噪声特征,产生细节系数的高频部分。基于小波变换的阈值去噪算法对细节系数设定一个阈值,当系数小于该阈值时,判断为噪声进行滤除,对大于阈值的部分予以保留。小波降噪算法的实现主要有以下三个基本步骤:

(1)信号的小波分解与重构

不同的小波函数具有不同的频谱特性,选择合适的小波函数有助于准确地分解与表示信号。在温度信号去噪中,常用的离散正交小波族为 Daubechies (dbN)、Symlets (symN) 和 Coiflets (coifN), N 为小波函数的阶数。dbN 小波函数具有良好的正则性,随阶数增加使得重构信号更加光滑,除 db1 外不具有对称性, symN 小波对 dbN 小波进行对称性改良,使信号的相位失真减小。coifN 小波则有更长的支撑长度、更大的消失矩阶数,使能量集中程度更高而局部化能力较差。综合小波函数的性质与经验^[20-21],选取 db2、db4、db5、coif1、coif4、sym6、sym8 小波进行数值实验。

分解层数通常不应超过 $\log_2 n$ (n 为信号数据长度),并考虑信噪比大小进行选取。分解层数越多,更多的高频分量被滤除,但同时伴随数据失真及计算量的增加,通常取 3~5 层分解^[14-16]。

(2)小波系数的阈值处理

对信号的细节系数进行阈值处理,理想的阈值应该刚好大于最大噪声水平,以尽可能去除所有噪声而不滤掉有用的温度信号。常用的阈值估计方法包括,无偏风险估计阈值(rigrsure,简称 rigr);固定式阈值(sqtwolog,简称 sqtw);启发式阈值(heursure,简称 heur);极大极小方差阈值(minimaxi,简称 mini)。其中,固定式与启发式阈值估计能够更有效地去噪,而无偏风险与极大极小方差阈值估计则更为保守,适合提取弱小信号。

传统的阈值函数包括硬阈值(表示为 hard)和软

阈值(表示为 soft)两种类型。前者保留完整的细节系数,后者将系数减去阈值,使得重构信号更平滑。为避免硬阈值函数产生的温度突变,本文统一选择软阈值函数。随着分解层数的增加,噪声细节系数在不断衰减,温度信号近似系数逐级增大^[20],为此各分解层数的阈值需一并调节。阈值调节方法包括不调节(one)、基于第一层系数的单级噪声阈值调节(sln)和基于每层系数的多级噪声阈值调节(mln)。

(3)小波重构

将最后一层的近似系数与处理后的细节系数进行小波逆变换,完成去噪信号的重构。

1.3 基于降噪的污水管道入流自动识别

1.3.1 背景噪声阈值确定

基于 1.2 节所述的小波阈值去噪算法,确定实际污水管道中光纤测温背景噪声阈值。方法描述如下:

(1)光纤设备采集的管道水温数据可由矩阵 S 表示,如式(1)所示。每个元素 T 表示在 t_n 时刻, $t=1, 2, \dots, n$, 在距离为 l_m , $l=1, 2, \dots, m$ 处的温度测量;

$$S = \begin{bmatrix} T_{t_1 l_1} & T_{t_1 l_2} & \cdots & T_{t_1 l_m} \\ T_{t_2 l_1} & T_{t_2 l_2} & \cdots & T_{t_2 l_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T_{t_n l_1} & T_{t_n l_2} & \cdots & T_{t_n l_m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

(2)对于每个测量时刻,对整个管道长度 m 的温度信号进行小波变换及降噪处理,得到降噪后的温度数据 T' 及降噪水温矩阵 D ;

$$D = \begin{bmatrix} T'_{t_1 l_1} & T'_{t_1 l_2} & \cdots & T'_{t_1 l_m} \\ T'_{t_2 l_1} & T'_{t_2 l_2} & \cdots & T'_{t_2 l_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ T'_{t_n l_1} & T'_{t_n l_2} & \cdots & T'_{t_n l_m} \end{bmatrix} \quad (2)$$

(3)将含噪水温矩阵 S 与降噪后矩阵 D 相减,得到噪声矩阵 O ;

$$O = S - D = \begin{bmatrix} N_{t_1 l_1} & N_{t_1 l_2} & \cdots & N_{t_1 l_m} \\ N_{t_2 l_1} & N_{t_2 l_2} & \cdots & N_{t_2 l_m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ N_{t_n l_1} & N_{t_n l_2} & \cdots & N_{t_n l_m} \end{bmatrix} \quad (3)$$

(4)根据噪声矩阵 O 的所有噪音数据绘制累计频率直方图。以 95 % 置信区间作为参考,将 0.025 分位数对应负向背景噪声阈值,0.975 对应正向背景噪声阈值。

1.3.2 污水管道入流识别

在确定背景噪声阈值的基础上,进一步构建基

于空间相邻两点水温温差的三值矩阵,实现污水管道入流点位的自动识别。具体方法为:

(1)对空间相邻两点的温度做差值计算,如式(4)所示:

$$\Delta T = T(t, l) - T(t, l-1) \quad (4)$$

(2)获得整个温度数据集的空间水温差值矩阵 S_1 ,如式(5)所示:

$$S_1 = \begin{bmatrix} \Delta T_{t_1 l_1} & \Delta T_{t_1 l_2} & \cdots & \Delta T_{t_1 l_{m-1}} \\ \Delta T_{t_2 l_1} & \Delta T_{t_2 l_2} & \cdots & \Delta T_{t_2 l_{m-1}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Delta T_{t_n l_1} & \Delta T_{t_n l_2} & \cdots & \Delta T_{t_n l_{m-1}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

(3)将得到的背景噪声阈值与水温差值进行比较,赋予-1、0、1三个数值,标识管道的不同状态。具体规则如下:

$$X_{il} = \begin{cases} -1, & \Delta T \leq -\lambda \\ 0, & -\lambda < \Delta T < +\lambda \\ 1, & T \geq +\lambda \end{cases} \quad (6)$$

当某点位的 ΔT 超出阈值,表示该点位的水温异常,将温差高于正向阈值的事件记作1,低于负向阈值的事件记作-1,温差处于正、负阈值内的视为由噪声引起的正常温度波动,记作0。所有时空点位的取值构成三值矩阵,并作图以可视化的方式识别管道入流事件的发生位置及其时间。

2 方法应用

2.1 研究区域及数据采集

在上海某公司内部院落污水管道铺设光纤,实时采集管道水温数据(图1)。选择该地点的优势在于:①该地点受交通干扰小,适用于长时间观测;②污水排放点位和动态排放规律已知,便于进行光纤测温检测结果的验证;③污水管道入流既包括了污水动态排放,也包括了降雨期间的地表径流动态流入流污水管道,因此验证的污水管道入流场景全面。

采用DSC-DTS2K-1BX型光纤测温仪及GL-KZ-100-MM-H2型感温光纤,测量频率为 $1 \text{ min} \cdot \text{次}^{-1}$,空间分辨率为 1 m ,温度分辨率 0.1°C 。使用光纤总长 110 m ,其中管道内的测量位置对应光纤的 $33 \sim 75 \text{ m}$,其余部分离开水面,与外界空气接触。

监测时段为2020年8月6日13:00至8月25日16:00,共计19 d;数据采集期间还经历了一次降雨事件。根据现场调查,在该公司内部办公楼及食堂的位置(图2中的1、2号点位),存在有规律的间歇性

污水入流,对应于光纤的 36 m 及 44 m 。8月10日16:40~18:00期间经历了强降雨事件,雨水径流由3、4号点位的检查井孔进入污水管道,对应于光纤的 45 m 及 75 m 位置。使用自编的数据解译程序将光纤测温仪中存储的二进制数据转换为十进制。

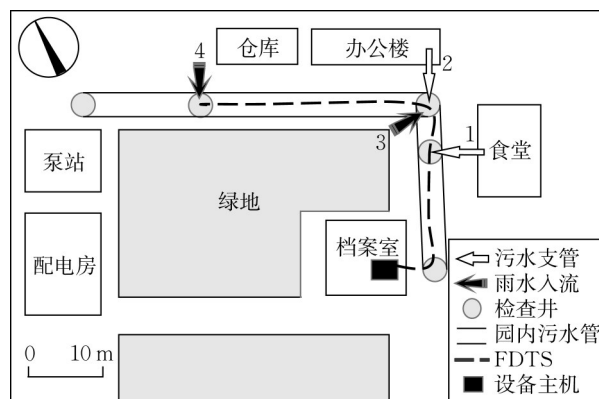


图2 研究区域示意图

Fig. 2 Description of study site

2.2 降噪结果与讨论

2.2.1 数值试验及阈值结果分析

使用Matlab小波工具箱开展小波降噪算法的数值试验,参数设定如表1所示。具体对4种阈值估计方法、3种阈值调节方法和7种小波函数,形成小波降噪算法的参数组合方案,进行数值计算试验。

表1 小波去噪算法的参数设置

Tab. 1 Parameters determination of wavelet based denoising algorithm

参数名称	参数设定与选项
阈值估计方法	rigr, heur, sqtw, mini
阈值函数	soft
阈值调节方法	mln, sln, one
分解层数	5
小波函数	db2, db4, db5, coif1, coif4, sym6, sym8

表1中共计设置了12种阈值组合方式,即: one-heur、one-rigr、one-sqtsw、one-mini、mln-heur、mln-rigr、mln-sqtsw、mln-mini、sln-heur、mln-rigr、mln-sqtsw、mln-mini。在此基础上对应7种小波函数,得到共84种小波降噪算法。各种降噪算法得到的背景噪声阈值如图3所示,其中图3a、图3b分别给出了正、负背景噪声阈值。可以看出,使用不同小波降噪算法得到的噪声阈值有明显差异,范围在 $\pm 0.07^\circ\text{C} \sim \pm 0.78^\circ\text{C}$ 。

图3表明,①不同阈值调节方法产生的噪声阈值,由大到小依次为:one>mln>sln,它对阈值结果的影响大于小波函数与阈值估计方法,是影响噪声

阈值的关键因素。②使用 one 以及 mln 阈值调节方法时,不同组合的降噪结果差异大,如 coif4 与 db4 小波函数相比其他函数,在正、负方向上都表现出更大的噪声阈值;而使用 sln 阈值调节方法时,各个小波函数所得阈值结果相近。③在阈值调节方法与小波

函数不变时,不同阈值估计方法产生的噪声阈值由大到小依次为: $\text{sqtw} > \text{heur} > \text{mini} > \text{rigr}$ 。总体上 sqtw 与 heur 阈值估计表现出更好的去噪能力,mini 与 rigr 阈值估计则更为保守。

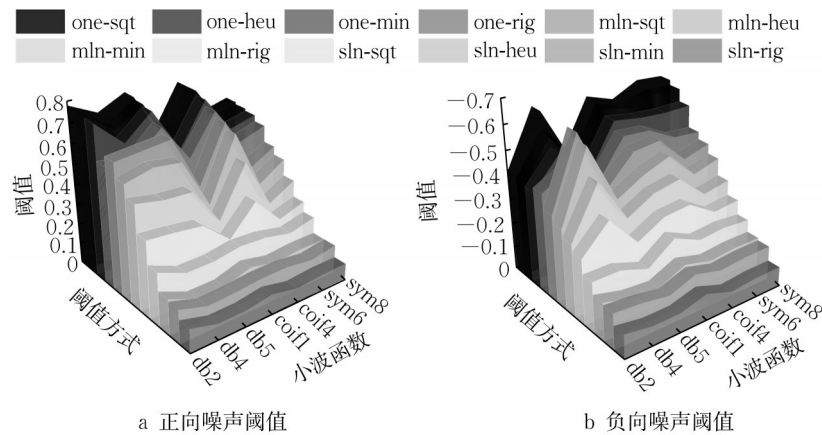


图3 背景噪声阈值结果

Fig. 3 Threshold of background noise

2.2.2 不同阈值的去噪效果分析

根据 84 种背景噪声阈值结果,得到三值矩阵并制图,如图 4—6 所示,分别显示了 one、mln、sln 三种阈值调节方法的降噪结果。图中每个像素块表示一种算法组合的降噪结果,其中白色表示异常升温(对应三值矩阵的取值 1),黑色表示异常降温(对应取值 -1),灰色表示相邻观测点的温度无变化(取值 0)。具体而言,若某一点位上游出现白色像素,下游出现黑色像素,表示该点处有高温水接入;反之,表示该点处有低温水接入。

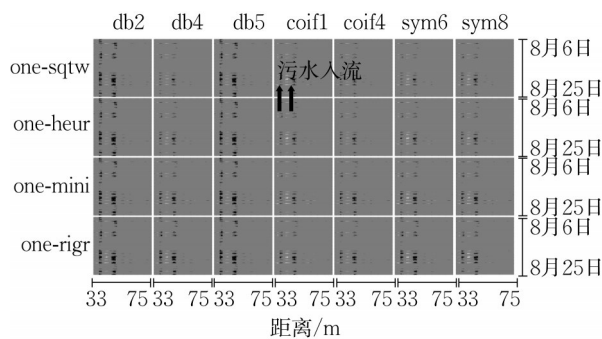


图4 使用不调节阈值方法的降噪后三值图像

Fig. 4 Denoised three-value image based on one threshold rescaling method

从图 4—6 可以看出,降噪后的三值图像能够清楚地识别管道的污水接入。即使背景噪声阈值取值很大,仍能识别出 36 m 和 44 m 处出现的间歇性高温

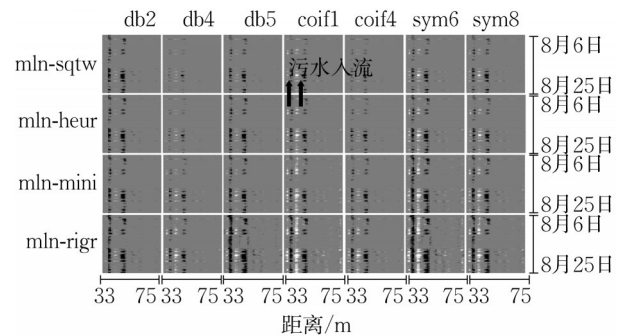


图5 使用多级噪声阈值调节方法的降噪后三值图像

Fig. 5 Denoised three-value image based on mln threshold rescaling method

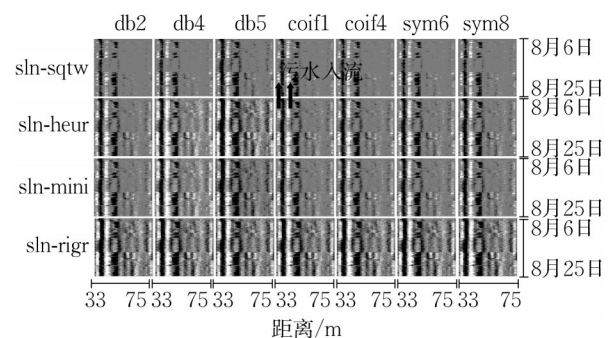


图6 使用单级噪声阈值调节方法的降噪后三值图像

Fig. 6 Denoised three-value image based on sln threshold rescaling method

水接入,与 1、2 点位生活污水入流位置相对应。原因是生活污水主要来自于公司食堂餐饮废水和办公

楼洗浴水,其水温明显高于接入点附近的管道水温,产生的水温变化远大于最大噪声阈值 $\pm 0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$,因此可以容易地识别这两个污水接入点的位置。

对于污水管道的降雨入流事件,由于雨水入流产生的水温变化较小,其识别效果与噪声阈值取值有关:若背景噪声阈值取值很小,则降雨入流事件“淹没”在背景噪声中,很难将其识别出来。这说明合理确定背景噪声阈值至关重要。图4—6对于降雨入流事件的判断可靠程度,取决于与现场记录信息的吻合度,即:①降雨始于2020年8月10日16:44;②光纤45 m及75 m两个点位对应的污水管道检查井有地表径流流入;③降雨期间有两次雨势增强,分别为17:00前后与17:50前后,且后者较弱。对比观察三值图像的异常水温响应情况,筛选出较好的雨水入流识别结果,其细节放大后如图7所示。可以得出,合理的背景噪声阈值范围为 $-0.43\text{ }^{\circ}\text{C}\sim-0.32\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 0.43\text{ }^{\circ}\text{C}$,对应平均值为 $-0.37\text{ }^{\circ}\text{C}$ 及 $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

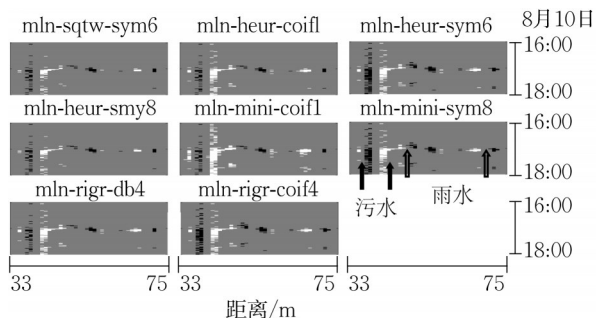


图7 雨水入流识别效果好的小波降噪方法

Fig. 7 Wavelet denoising methods with ideal storm-water inflow identification

分析与该背景噪声阈值范围对应的小波函数和阈值方法,可以发现 mln 阈值调节方法具有明显优势,说明对阈值的多级调节是必要的;在不同的分解尺度上调节阈值,可以获取更准确的噪声大小。

在使用 mln 阈值调节的基础上,不同的阈值估计方法对应的最优小波函数不同。从4种阈值估计方法来看, sqtw 阈值估计只有在使用 sym6 小波函数时得到了合理的噪声阈值; heur 阈值估计在使用 coif1、sym6、sym8 小波函数时得到合适的噪声阈值; mini 阈值估计是在使用 coif1、sym8 小波函数时得到合适的噪声阈值;而 rigr 阈值估计则是在使用 db4、coif4 小波函数时得到的噪声阈值合理。从该结果来看,阈值估计方法与小波函数的选择对于得到合理的噪声阈值是相互影响的,应该以组合的形式判断最佳的方法。

为进一步量化8种阈值估计方法与小波函数组合的性能,采用信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)与均方根误差(root-mean-square error, RMSE)两个指标做量化评价,量化结果见表2。信噪比 n_{SNR} 为降噪后水温与背景噪声值的比值,计算公式为

$$n_{\text{SNR}} = 10 \lg \left(\frac{\sum_{n=1}^N D(n)^2}{\sum_{n=1}^N [S(n) - D(n)]^2} \right) \quad (7)$$

式中: $S(n)$ 为原始温度数据; $D(n)$ 为降噪后的温度数据; N 为数据个数。

均方根误差 W_{RMSE} 衡量管道各点降噪前与降噪后水温的偏差大小,计算公式为

$$W_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [S(n) - D(n)]^2} \quad (8)$$

均方根误差越小,表明管道水温数据受噪声值的影响就越小。

表2 阈值估计方法与小波函数方法组合的去噪效果比较

Tab. 2 Comparison of denoising effects using different threshold value estimation and wavelet function combinations

组合方法	信噪比	均方根误差
sqtw—sym6	39.8	0.21
heur—coif1	40.7	0.21
heur—sym6	40.7	0.18
heur—sym8	39.2	0.21
mini—coif1	42.2	0.18
mini—sym8	41.2	0.17
rigr—db4	41.1	0.21
rigr—coif4	41.4	0.18

从表2看出,基于8种最佳噪声阈值组合算法,光纤测温数据的信噪比在39.2~42.2之间,平均为40.8;均方根误差在0.17~0.21之间,平均为0.19。以变差系数衡量,基于信噪比、均方根误差和综合系数的计算结果分别为0.03、0.11、0.13。这进一步说明不同最佳组合算法对于光纤长时间序列数据的降噪结果,总体上具有一致性。

3 结论与展望

本文建立了基于光纤测温和小波降噪的污水管道数字化检测方法,以解决管道不断水运行条件下的污水管道检测问题,总结如下:

(1) 针对实际污水管道的FDTs数据,不同小波降噪算法生成的背景噪声阈值差距明显。基于84种小波降噪数值试验结果表明,不同降噪算法得到的噪声阈值范围在 $\pm 0.07\text{ }^{\circ}\text{C}\sim\pm 0.78\text{ }^{\circ}\text{C}$ 之间。对照

实际污水管道的入流事件,合理的FDTS背景噪声值约为 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。因此,小波降噪算法的选择对于准确判断污水管道污水和雨水入流事件具有重要影响。背景噪声阈值过大,会将异常温度数据信息误认为噪声而造成入流事件判断的遗漏;背景噪声阈值过小,则入流事件“淹没”在背景噪声中,难以将其识别出来。

(2)各种小波降噪算法中,阈值调节方法对降噪效果的影响较大。在不调节、单级噪声阈值调节、多级噪声阈值调节方法中,多级噪声阈值调节方法具有明显的优势。在多级噪声阈值调节的基础上,发现不同阈值估计方法对应的最优小波函数不同,二者对降噪效果具有相互作用关系。8种阈值估计方法与小波函数组合算法具有理想的降噪效果。

(3)基于光纤测温和小波降噪的污水管道数字化检测方法,对于本研究中温差较小的雨水入流事件也具有理想的识别效果。在合理选择小波降噪算法的基础上,该方法不仅可用于污水管道的入流识别,也可用于污水管道地下水入渗、河湖水倒灌、雨水管道污水混接等各种管道问题的检测,同时具有不对管道运行造成干扰的优势。后续研究中可针对更多的实际排水管道检测,采用小波降噪算法确定不同检测场景下的FDTS背景噪声阈值,并对本研究建议的小波降噪算法合理性予以进一步验证。

作者贡献声明:

尹海龙:负责协调研究的整体设计与规划,监督研究的进展,并在研究概念生成、论文的审阅及修订工作中提供了重要指导。

吴玫萱:负责实验方法设计、数据分析及结果可视化,并撰写论文初稿。

胡意扬:负责数据采集。

魏 卿:协助完成了论文的撰写和修订。

祁海玥:协助完成了论文的撰写和修订。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 2022年城乡建设统计年鉴 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2023.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook 2022 [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2023.
- [2] 徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙. 基于水质特征因子和Monte Carlo理论的雨水管网混接诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11): 1715.

- XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo-based marker species approach [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(11): 1715.
- [3] 徐祖信, 王诗婧, 尹海龙, 等. 污水管网中雨水混接来源的高效诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2017, 45(3): 384.
XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Cost-effective locating inappropriate rainfall inflow into urban sewer network [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2017, 45(3): 384.
- [4] SILVA L C B, SEGATTO M E V, CASTELLANI C E S. Raman scattering-based distributed temperature sensors: A comprehensive literature review over the past 37 years and towards new avenues[J]. Optical Fiber Technology, 2022, 74: 103091.
- [5] LI Jian, ZHANG Mingjiang. Physics and applications of Raman distributed optical fiber sensing [J]. Light: Science & Applications, 2022, 11(1): 128.
- [6] DEL VAL L, CARRERA J, POOL M, *et al.* Heat dissipation test with fiber-optic distributed temperature sensing to estimate groundwater flux [J]. Water Resource Research, 2021, 57(3): 1.
- [7] HOES O A C, SCHILPEROORT R P S, LUXEMBURG W M J, *et al.* Locating illicit connections in storm water sewers using fiber-optic distributed temperature sensing [J]. Water Research, 2009, 43(20): 5187.
- [8] SCHILPEROORT R P S, CLEMENS F H L R. Fibre-optic distributed temperature sensing in combined sewer systems [J]. Water Science & Technology, 2009, 60(5): 1127.
- [9] LANGEVELD J G, DE HAAN C, KLOOTWIJK M, *et al.* Monitoring the performance of a storm water separating manifold with distributed temperature sensing [J]. Water science & technology, 2012, 66(1): 145.
- [10] NIENHUIS J, DE HAAN C J, LANGEVELD J G, *et al.* Assessment of detection limits of fiber-optic distributed temperature sensing for detection of illicit connections [J]. Water Science and Technology, 2013, 67(12): 2712.
- [11] KESSILI A, VOLLERTSEN J, NIELSEN A H. Automated monitoring system for events detection in sewer network by distribution temperature sensing data measurement [J]. Water Science & Technology, 2018, 78(7): 1499.
- [12] KECHAVARZI C, KEENAN P, XU X, *et al.* Monitoring the hydraulic performance of sewers using fibre optic distributed temperature sensing [J]. Water, 2020, 12: 2451.
- [13] 赵亚, 王强, 凌张伟. 基于选择性平均阈值的分布式光纤自来水管泄漏检测定位及实验分析[J]. 激光与光电子学进展, 2019, 56(3): 34.
ZHAO Ya, WANG Qiang, LING Zhangwei. Experimental analysis and leakage location detection of tap water pipes based

- on distributed optical fiber with selective average threshold[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(3):34.
- [14] SAXENA M K, RAJU S D V S J, ARYA R, *et al.* Raman optical fiber distributed temperature sensor using wavelet transform based simplified signal processing of Raman backscattered signals[J]. *Optics and Laser Technology*, 2015, 65:14.
- [15] 薛志平, 王东, 王宇, 等. 分布式光纤拉曼测温系统信噪比优化研究[J]. *传感技术学报*, 2020, 33(1):17.
XUE Zhiping, WANG Dong, WANG Yu, *et al.* Research on performance optimization of snr for distributed optical fiber raman temperature measurement system[J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2020, 33(1):17.
- [16] 宁武霆, 赵春菊, 周宜红, 等. 混凝土坝光纤测温噪声特征及降噪方法[J]. *水电能源科学*, 2021, 39(6):73.
NING Wuting, ZHAO Chunju, ZHOU Yihong, *et al.* Combined noise reduction model of distributed optical fiber temperature measurement data for concrete dam [J]. *Water Resources And Power*, 2021, 39(6):73.
- [17] 解海军, 李静蕊, 董毅, 等. 小波基和阈值参数对瞬变电磁信号去噪效果影响[J]. *西安科技大学学报*, 2020, 40(4):682.
XIE Haijun, LI Jingrui, DONG Yi, *et al.* Influence of wavelet base and threshold parameters on de-noising effect of transient electromagnetic signal [J]. *Journal of Xi'an University of Science and Technology*, 2020, 40(4):682.
- [18] 李维松, 许伟杰, 张涛. 基于小波变换阈值去噪算法的改进[J]. *计算机仿真*, 2021, 38(6):348.
LI Weisong, XU Weijie, ZHANG Tao. Improvement of threshold denoising method based on wavelet transform [J]. *Computer Simulation*, 2021, 38(6):348.
- [19] XIAO Han, HU Danfeng, WANG Jiajun. Threshold selection of wavelet denoising based on optimization algorithms [C]// *International Conference on Innovations and Development of Information Technologies and Robotics (IDITR)*. Chengdu: IEEE, 2022:88-92.
- [20] 张恒, 潘仲明. 平稳小波去噪算法中的参数选择[J]. *国防科技大学学报*, 2019, 41(4):165.
ZHANG Heng, PAN Zhongming. Parameters selection of stationary wavelet denoising algorithm [J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 2019, 41(4):165.
- [21] WANG Honghui, WANG Sibao, WANG Xiang, *et al.* RDTS noise reduction: A fast method study based on signal waveform type[J]. *Optical Fiber Technology*, 2021, 65:102594.