

城市供水管网运行安全监测技术及应用

王 飞^{1,2}, 胡智翔³, 胡群芳^{1,2}, 海 倩³, 车德路³, 施静康³, 吴 俨⁴

(1. 同济大学 上海防灾救灾研究所, 上海 200092; 2. 城市安全风险监测预警应急管理部重点实验室, 上海 200092;

3. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 4. 无锡悟莘科技有限公司, 江苏 无锡 214135)

摘要: 城市供水管网运行安全监测存在信息不全、手段缺乏的问题。首先通过管损数据分析, 研究了供水管网运行安全的影响因素, 提出了保护性监测和预防性监测 2 类监测, 建立了供水管网运行状态、管道结构和管网环境等“三类参数”的监测指标; 其次针对埋地管网, 研究了无线信号在地层中传输的路径损耗规律, 研发了无线透传感知网络技术; 最后, 在上海市供水管网抢修现场部署了监测系统。结果表明: 管网交叉路口、交叠管线和交变荷载“三交区域”为管损高发区域, 为监测的关键位置; 体积含水率是影响无线信号路径损耗的主要因素, 在高含水量下, 砂性土较黏性土路径损耗小; 多跳自组网可有效提升无线网络整体的地层穿透能力; 管道下方的回填土密实度对管道后期沉降影响大, 应确保回填质量, 结构监测系统可先于管网渗漏、压力流量变化进行安全预警。

关键词: 供水管网; 结构健康监测; 运行安全; 无线传感网络; 土层传输损耗

中图分类号: TU991

文献标志码: A

Operation Safety Monitoring Technology and Its Application in Urban Water Supply Network

WANG Fei^{1,2}, HU Zhixiang³, HU Qunfang^{1,2}, HAI Qian³, CHE Delu³, SHI Jingkang³, WU Yan⁴

(1. Shanghai Institute of Disaster Prevention and Relief, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Key Laboratory of Urban Safety Risk Monitoring and Early Warning of the Ministry of Emergency Management, Shanghai 200092, China; 3. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 4. Wuxi Wisen Innovation Co., Ltd, Wuxi 214135, China)

Abstract: There are problems of incomplete information and lack of means in monitoring the operation safety of

urban water supply pipeline networks. First, pipe loss data was analyzed to understand the influencing factors of water supply network operation safety. Protective monitoring and preventive monitoring were proposed for different purposes. Monitoring indexes were established, including the operation status, pipe structure, and environment conditions. Then, the path loss of wireless signal transmission for buried pipelines in the soil was studied. Finally, a monitoring system was deployed at the emergency repair site of Shanghai Water Supply Network. The results indicate that there are lots of pipe loss at the location involving the intersection, overlapping pipelines, and alternating load. They are the key locations for monitoring. The volumetric water content of soil is the main factor affecting the path loss of wireless signals. The path loss of sandy soil is smaller than that of clay soil at a high water content. The multi-hop network can effectively improve the penetrability of wireless network. The compactness of the backfill below the pipeline has a great impact on the later settlement of the pipeline. Therefore the quality of the backfill should be ensured. Structural monitoring can precede leakage, pressure, and flow change of water supply network for safety warnings.

Key words: water supply networks; structural health monitoring; operation safety; wireless sensor network; path loss of wireless signal transmission in soil

城市供水管网是市政管网系统的重要组成部分, 是保障城市正常运行、健康发展的重要基础设施。随着城市化进程, 城市供水管网的规模也日益扩大。全国供水管道长度由 2000 年的 25.4 万 km 增长到 2021 年的 106 万 km。近 20 年来平均每年增长

收稿日期: 2022-11-24

基金项目: 国家重点研发计划(2022YFC3801000); 国家自然科学基金(51978530); 上海市“科技创新行动计划”社会发展科技攻关项目(22dz1201200); 国家重点研发计划(2016YFC0802400)

第一作者: 王 飞(1985—), 男, 副研究员, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市基础设施风险智慧感知与灾害防控。E-mail: wangf@tongji.edu.cn

通信作者: 胡群芳(1978—), 男, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市市政管网运行安全与防灾、土木工程风险分析与评估。E-mail: huqunf@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

3.66万km,年均增长率7.04%^[1]。城市供水管网数量大、拓扑复杂、环境多变,因管道老化、第三方施工、荷载作用(力、温度)等造成管道泄漏、断裂、爆管等管损事件也越来越多。为减少管损事件和水资源浪费,对城市供水管网运行实施安全监测具有重要意义。

城市供水管网一般为埋地敷设,仅有阀门井、水表井以及过桥管等管道直接暴露,方便直接监测。因此,为保证水质安全和保障供水能力,长期以来城市供水管网均以水质^[2-4]、流量^[5-6]和水压^[7-8]的监测为主。通过流量监测或独立计量区域(DMA)分区管理,开展了供水管网漏损监测与识别^[9-13]。在保障供水能力的同时,压力监测可以用于爆管的监测与识别^[14-15]。随着物联网技术的发展,各城市逐步开展了智慧水务建设,采用NB-IoT、LoRa、4G/5G等方式进行监测数据的传输并构建监测系统^[16-19]。无线传感器网络(wireless sensor network, WSN)起源于20世纪70年代^[20],主要用于军事领域。进入21世纪,无线传感器网络不仅在军事安全方面得到应用,在工业控制、智能家居、环境感知和健康监测等领域也都有相关应用。无线地下传感器网络(wireless underground sensor network, WUSN)近年来受到了一些研究的关注,如边境入侵控制、智能农业、环境污染监测、地下结构监测等^[21-24]。

综合国内外研究进展,目前城市供水管网运行安全监测仍然存在三方面技术难题:①常规监测主要以水质、水压和水量等功能监测为主,缺少可表征安全性态的指标;②管网长期敷设于地下,数据传输困难,设备易损坏,无成熟可适用于埋地条件下的长时集成监测技术及设备;③供水管网数量大、拓扑结构复杂,无法开展大范围性态安全监测,难以划定重点区域。

针对以上技术难题,开展供水管网运行安全影响因素分析,提出供水管网全空间多参量感知指标体系,研发供水管网无线透传感知网络技术与系统,并在上海市开展现场实际应用,为供水管网运行安全监测提供技术支撑。

1 供水管网全空间多参量感知指标体系

1.1 供水管网运行安全影响因素

截至2020年底,上海市现有供水水厂38座,供水管网长度达3.96万km,日供水能力达1220.5万m³,年供水总量达28.79亿m³。上海市供水管网数

量庞大,部分管道敷设年代久远,面临的落后、老化病害问题突出。收集了某区域DN300以上的供水管网数据164189条,2002—2021年该区域管损事件6293条,类型包含渗漏、腐蚀、断裂/崩裂、爆管(含严重爆管)等,设备包含管道、水表、阀门等。DN500以上供水管线与燃气、排水管线的交叠位置、交叠间距等管线交叠数据1205条。该区域中A区内的道路交叉口共584个,含供水管线72.75km,管损事件共662起。笔者参与了部分严重管损事件的现场事故分析与抢险工作,如图1所示。

经统计分析,该区域47.9%的管损事件位于道路交叉口,交叉口内事故率为0.19,大于非交叉口区域3倍以上。管损事件中包含581个断裂/崩裂、爆管(含严重爆管)等严重管损事件,其中281个位于交叉口范围内,占比48.36%。严重管损事件中爆管级漏水34个,在交叉路口的是22个,占比64.7%,其中严重爆管15个,在交叉路口14个,占比93.3%。该区域交叉口内管损率为0.19(管损率为单位长度管道的管损事故年平均值),大于非交叉口区域3倍以上,其中A区平均一个路口就有1.13个管损事件,管损率更是达到0.455,是该区域的2倍以上。分析表明,道路交叉口为供水管网的管损事件高发区域,尤其是严重的爆管事件往往发生在道路交叉口。

与此同时,管线交叠后产生的管道间相互作用也是影响供水管网运行安全的重要因素。根据GB 50289—2016,筛查该区域交叠净距不满足规范的燃气交叠点($d < 0.15\text{m}$)有13个、排水交叠点($d < 0.40\text{m}$)有123个,其中该区域中A区有3个燃气交叠点和44个排水交叠点。这3个燃气交叠点全部位于交叉口中,平均每个交叉口有1.67个事故,大于A区的平均每个交叉口1.13个事故。不满足规范的排水交叠点中,有81.9%在交叉口内,平均每个交叉口有1.52个事故,同样大于A区平均水平。通过该区域铺管方式分析,供水管道大多处于燃气管道和排水管道之间,易受到其他类型管道影响而发生供水管网管损事件,同时,管线交叠位置存在多种管道耦合事故风险。

交变荷载是指在供水管道运行期间受到的各类动态变化的荷载,如管道内压、道路车辆荷载、温度荷载、周边施工引发的不均匀沉降荷载等。其中道路车辆荷载与道路交叉口有强相关,即道路交叉口往往有更高频次的荷载作用和更加复杂的荷载情况。温度荷载对于浅埋的供水管网有显著影响,通



图1 严重管损事件

Fig. 1 Serious pipe loss event

过现场实测数据表明,埋深1m的供水管道年温差可超过30℃,同时,大口径管道管顶至管底的温差同样会产生巨大的温度应力。近些年,极端天气温度对供水管网产生了严重影响,以2016年和2020年寒潮为例,均产生了严重的供水管网管损事件。此外周边施工引发的地层变形会导致供水管道局部产生不均匀沉降,从而引发渗漏甚至爆管事件。

通过上述城市供水管网时空场景分析,管网交叉路口、交叠管线和交变荷载“三交区域”是供水管网发生管损尤其是严重爆管事故的重点区域,应加强结构安全监测。然而,目前供水管网监测主要以水质、水量和水压等系统功能监测为主,部分区域开展了渗漏噪声监测,而缺少必要的供水管网运行状态、服役状况、外部影响和安全监管等方面运行安全综合监测,从而无法获悉管网的结构安全状态。以上海为例,目前全市共部署水压监测点844个、水质监测点256个。

1.2 供水管网运行安全感知监测类型

发生管损事故的管道主要为灰口铸铁管、球墨铸铁管、钢管等,灰口铸铁材料的管道管损事故占51.8%,球墨铸铁材料的管道管损事故占36.7%,钢管管损事故占7.5%。经统计分析,该区域47.4%的管损事件发生在10~20年的使用时间内,相比于使用时间为0~10年的17.2%,是其的3倍左右,这说明管道老化对于管道破损影响很大。管道发生漏水、断裂、爆管多集中于接口处。针对供水管网运行

安全,统计分析供水管网管损事故,表明供水管道的材质、年限、位置、第三方干扰等是导致管损甚至爆管的主要因素。针对以上问题,本文系统地提出保护性监测和预防性监测2类监测。保护性监测是指为防止邻近区域施工、超载等周边活动造成供水管道发生损坏开展的监视和测定活动。预防性监测是指为避免供水管网发生影响其正常运行或造成安全风险的各类事件开展的监视和测定活动。保护性监测主要针对第三方干扰、第三方破坏等场景,预防性监测主要针对落后管材、老化严重等老旧管网场景。在具体应用中,保护性监测主要应用于邻近施工影响范围内的供水管道,预防性监测主要应用于DN800及以上、实施维护抢修的管道、交叉路口、交叠管线、交变荷载区域内敷设的管道。

1.3 供水管网多参量感知指标体系

通过供水管网运行安全影响因素分析可知,为获取供水管网运行安全状态,需要开展供水管网运行状态、管道结构和管网环境等“三类参数”的监测。

① 管网运行状态监测指标包括运行水压及流量;② 管道结构监测指标包括竖向位移、水平位移、不均匀沉降、管道竖向变形、管道接口变形、管道腐蚀、管道破损;③ 管网环境监测指标包括管道管顶土压力、管侧土压力、地下水水位、孔隙水压力、管内水温、管道周边土体温度、土壤腐蚀性、气象条件、环境噪声、机动车交通信息。不同的监测类型选取不同的监测指标,监测指标具体选择见表1。

表 1 供水管网运行安全风险监测指标
Tab. 1 Operation safety risk monitoring index of water supply pipeline network

类别	序号	监测指标	预防性监测	保护性监测
管网运行状态监测	1	运行水压	√	√
	2	流量	○	√
管道结构监测	3	竖向位移	○	√
	4	水平位移	○	√
	5	不均匀沉降	○	√
	6	管道竖向变形	○	○
	7	管道接口变形	√	√
	8	管道腐蚀	○	○
	9	管道破损	√	√
管网环境监测	10	管道管顶土压力	√	√
	11	管侧土压力	○	○
	12	地下水水位	○	√
	13	孔隙水压力	○	√
	14	管内水温	○	○
	15	管道周边土体温度	√	√
	16	土壤腐蚀性	○	○
	17	气象条件	√	√
	18	环境噪声	○	○
	19	机动车交通信息	○	√

注:√为必选项,○为可选项。

2 供水管网无线透传感知网络技术

2.1 埋地管网无线透传感知网络

供水管网管道一般采用直埋方式敷设,管道内为水体,外侧为土层。传统的有线传输现场布设困难,且后期易损坏,并需要建设独立的监测井或利用阀门井、水表井等进行数据采集。近些年兴起的物联网无线传输技术目前仅适用于在井内监测的场景。然而,针对大量的埋地管网,管道内外水土的敷设特征导致监测与传输的技术难题亟待突破。天然土层是土壤颗粒、空气和水的复合体,通常是不均匀和各向异性的,在这样的土壤中传输,由于吸收、反射、折射和散射,信号会发生明显的路径损耗和散射,并且在WUSN的实际应用中,面临着4个方面的挑战,即电源保护、拓扑结构设计、天线设计和极端环境^[21]。在地下50cm以内的浅层低含水率土层无线传输中,通过433MHz LoRa实现了单跳无线信号收发^[24]。供水管网普遍埋深在0.8~3.0m的范围,埋设深度、土体类型和地下水对无线信号传输带来了挑战。

为解决以上问题,提出了地下管网监测无线信号在水土气多介质环境中“透传”的概念,如图2所示,即实现埋地设备之间的数据通信(UG2UG),埋地设备与地上设备的数据通信(UG2AG和AG2UG),将获取的监测信息通过无线信号“穿透”

土体传输到地面及服务器。与此同时,充分考虑供水管网的埋设深度和水土环境条件,为实现更大距离的数据传输,研究了多跳“透传”组网技术,实现了传感器信息6层“接力”与数据交互,建立了无线透传感知网络(penetrating wireless sensor network, PWSN),如图3所示。

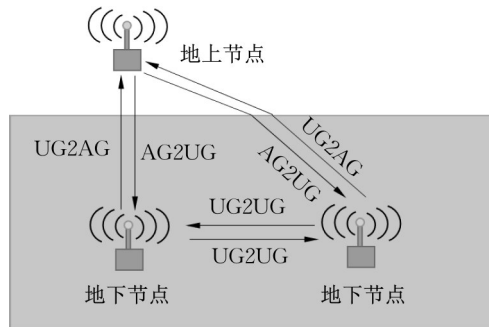


图2 无线透传概念

Fig. 2 Concept of penetrating wireless

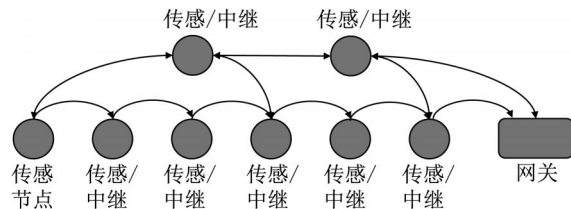


图3 无线透传感知网络

Fig. 3 Penetrating wireless sensor network (PWSN)

为实现无线信号“透传”,开展了无线信号在地层中的损耗研究,试验系统由2个无线传感器节点、1个网关和1台笔记本电脑组成。通过开挖试验孔且采用不同类型土体和不同厚度土体开展损耗规律研究,如图4所示。节点1埋在孔的底部,节点2放置在回填土的表面。节点1和节点2之间的土层厚度随着覆盖土的厚度增加而发生变化。在每个时间间隔内,传感器节点形成一个网络拓扑,并将数据发送到接收节点。传感器节点2接收到节点1发送的信号,记录RSSI(接收信号强度指数),并将该信息传输到网关。网关通过移动网络向远程服务器传输网络信息,包含节点1和节点2的传输功率和接收功率,据此分析无线信号路径损耗。

实验中采用不同的土即黏性土和砂性土以及不同的体积含水率(volumetric water content, VWC)进行对比试验,回填土参数见表2。试验采用1种黏性土和2种含水率不同的砂土进行对比,试验结果如图5所示。由对比分析可知,含水率为48.1%的黏性土路径损耗为150~170 dB·m⁻¹,含水率为4.9%

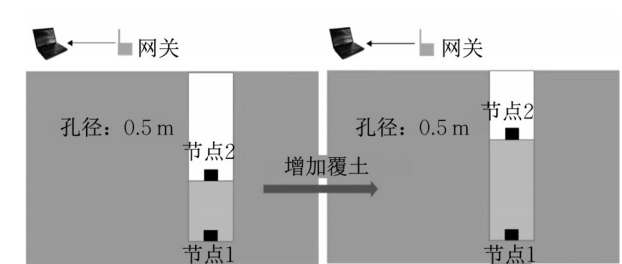


图 4 无线信号在地层中损耗研究试验

Fig. 4 Experiment on wireless signal loss in soil

的砂土的路径损耗为 $13.5\text{ dB}\cdot\text{m}^{-1}$, 而干砂的路径损耗几乎为零。通过试验可知, 相对而言砂性土路径损耗低于黏性土, 含水率越高路径损耗越高。

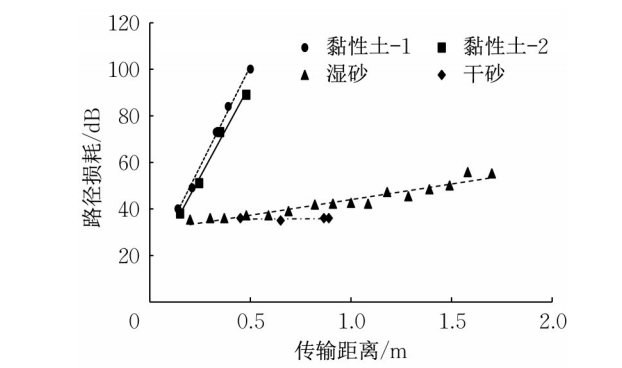


图 5 不同土层信号路径损耗

Fig. 5 Signal path loss in different types of soil

为进一步研究土层性质对无线信号路径损耗的影响, 根据供水管网地层无线透传感知网络的使用场景, 考虑无线损耗中的近场和远场损耗, 提出了近场-远场两阶段损耗模型^[25], 并进行试验验证。采用该模型分析土层物理性质对信号路径损耗的影响。由图 6 可知, ①相较于土体类型, VWC 对于信号路径损耗影响更大; ②在低含水量下, 信号路径损耗对土壤颗粒组成不敏感, 这是由于干燥土壤的电导率非常低, 因为阳离子和阴离子以盐的形式沉淀, 导致可动离子的缺乏; ③在高含水量下, 土壤成分对信号路径损耗影响很大, 且相比于黏土颗粒含量较少的土壤, 黏土颗粒含量较大的土壤中信号路径损耗对 VWC 更敏感。由于供水管网埋深范围受到地下水

位波动影响, 无法有效控制, 根据信号路径损耗规律, 在传感器布设位置及其传输路径上, 尽可能采用砂性土回填可有效增加无线信号传输距离。同时, 也可以对传感器起到一定的保护作用, 避免杂填土回填损坏传感器。此外, 文献[26]考虑道路路面等结构, 对混凝土的无线传输损耗规律进行了研究与探索。

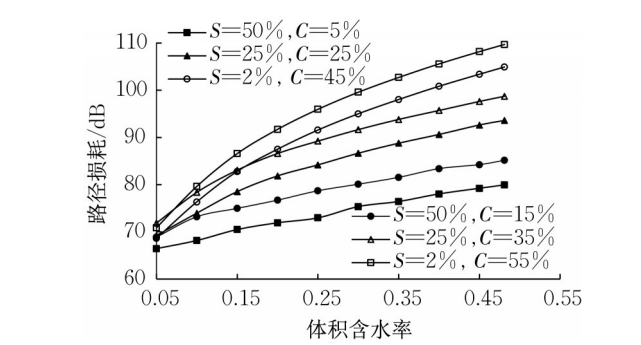


图 6 土层物理性质对土壤信号路径损耗的影响

Fig.6 Effect of soil physical properties on signal path loss in soil

2.2 供水管网无线透传感知网络系统

在上述研究的基础上, 自 2016 年起联合无锡悟莘科技有限公司开发了直埋无线传感器以及无线网关, 如图 7 所示。针对供水管网监测预警应用场景, 结合研究提出的感知指标和监测设备, 构建了供水管网无线透传感知网络监测系统, 包括感知层、传输层、大数据层和应用层, 如图 8 所示, 并于 2018 年开始现场应用测试。该系统特征如下: ①可接入多种类型传感器, 可感知管网运行状态、管道结构和管网环境等参数, 传感器具有高强度外壳, IP68 以上防护等级, 可直埋敷设; ②无线透传感知网络具备高穿透能力, 可实现地下 5m 范围内的供水管网监测数据传输。采用网状网络动态自组网, 兼容星状、线状网络, 并可实现 6 跳传输; ③超低功耗 (20uA), 传感支点采用工业电池供电, 可达到 10 年以上使用寿命 (频率 $1\text{ 次}\cdot\text{h}^{-1}$); ④远程控制, 如采集周期、发射功率、网络拓扑、回网周期等。⑤通过多参量综合感知, 可实现供水管网运行安全的监测与预警。

表 2 回填土参数							
Tab. 2 Parameters of backfilled soil							
土体类型	土体干密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土颗粒密度 / ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	VWC / %	体积电导率 / ($\text{S}\cdot\text{m}^{-1}$)	土体颗粒质量分布 / %		
					砂性粒	淤泥颗粒	黏土颗粒
黏性土	1.366	2.72	48.10	0.400	2.70	71.00	26.30
湿砂	1.34	2.69	4.90	0.001	53.80	36.60	9.60
干砂	1.34	2.69	0	0	53.80	36.60	9.60

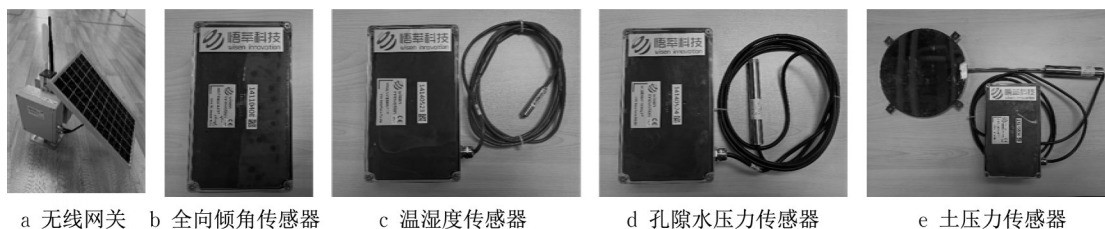


图 7 无线透传感知网络传感器与网关

Fig. 7 Sensors and gateway of PWSN

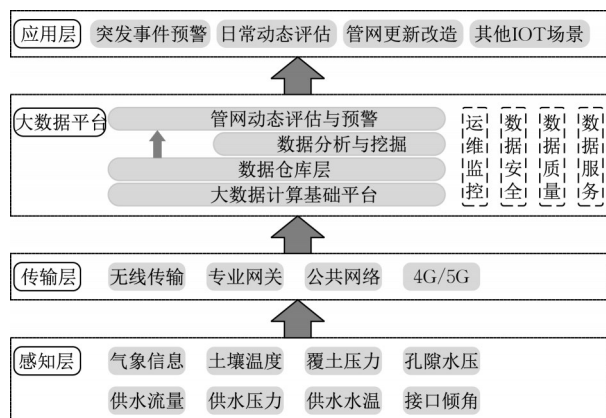


图 8 供水管网无线透传感知网络监测系统

Fig. 8 Monitoring system of water supply pipeline using PWSN

3 城市供水管网运行安全智慧感知技术应用

2020年7月13日凌晨3:06,某路口DN1200供水管爆管,管材为灰口铸铁,管顶埋深2.2m。爆管导致地面发生塌陷,路面受损约320m²,路面严重积水,事故现场如图9所示。该路口为市中心繁华路段,车流量大。凌晨3:31,供水企业抵达现场开展抢修工作。修复段共分3个管段,其中北段管道为原管道,管底土层为原状土,中段管道为更换钢管,长度1.91m,管底为回填砂层,南段管道为原管道,管底土层为回填砂层。3个管段2个接口采用2个哈夫节进行连接。砂层回填至管顶,冲水密实后回填80cm碎石层,后回填1m杂填土,路基为碎石,路面为沥青,路基与路面厚度共40cm。

由于该爆管位置地处市中心繁华路段,车流量大,周边环境影晌大,因此需要对该修复位置开展长期监测,实时监控供水管网安全状态,避免再次发生事故。该监测点共安装11个传感器,包括3个倾角传感器、4个温度传感器、4个中继。传感器编号见表3。其中,倾角传感器0417位于北段管道,倾角传



图 9 爆管事故现场

Fig. 9 Accident site of a burst pipe

感器040B位于中段管道,倾角传感器042D位于南段管道;温度传感器052F位于管道管顶,温度传感器0534位于管道管底;2个土温传感器分别位于地下1.0m和0.9m,4个中继依次位于地下1.8m、1.4m、0.5m。由南至北传感器之间的间距依次为640mm、510mm、430mm、830mm。倾角传感器Y轴正向朝北。详细布置位置见图10,现场安装如图11所示。

表 3 传感器编号

Tab. 3 Sensor No..

传感器类型	传感器编号
倾角	0417、040B、042D
温度	052F、0534、0512、052D
中继	0515、0521、051B、0514

选取2020年7月14日至2022年2月1日时间段监测数据进行分析。传感器Y轴转角表征管道不均匀沉降导致的管道竖向转动。由图12可知,回填阶段管道发生明显的竖向转动,截止15日早7点路面沥青施工完成,北段管道转角为0.36°,中段管道为1.06°,南段管道为-1.24°。分析其原因主要是北段管道管底土层为原状土,密实度高、土体压缩模量大,不易变形。而中段和南段管道管底土层为回填砂层,即便采用了喷水方式进行密实,但其密实度和压缩模量偏低,在回填过程中产生了明显的压缩变形,导致管道发生沉降,中段修复管道两端不均匀沉

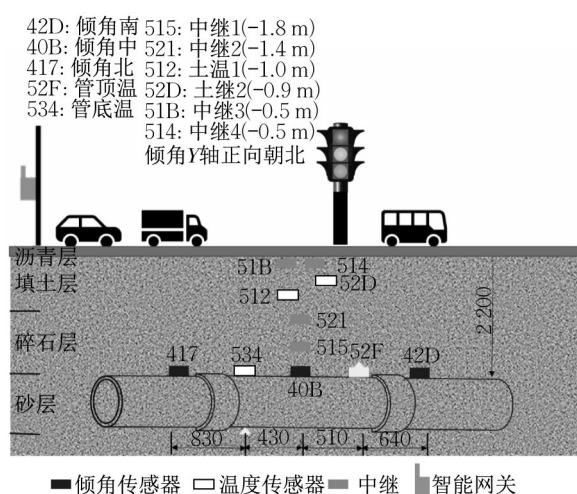


图10 传感器布置

Fig. 10 Layout of sensors



图11 传感器现场安装

Fig. 11 Installation of sensors

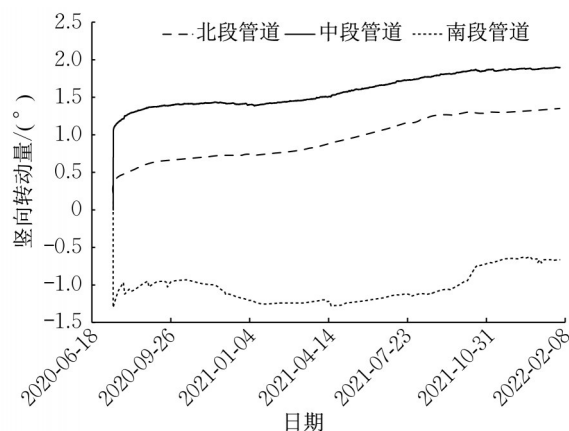


图12 北段、中段和南段管道竖向转动量

Fig. 12 Vertical rotation of north-pipe, mid-pipe, and south-pipe

降为35.3mm,如图13所示。

回填阶段的不均匀沉降导致了修复管道哈夫节接口变形,产生相对转角,如图14所示。北段与中段管道相对转角为 -0.7° ,中段与南段管道转角为 2.3° 。根据哈夫节厂家的建议,DN1200管道哈夫节

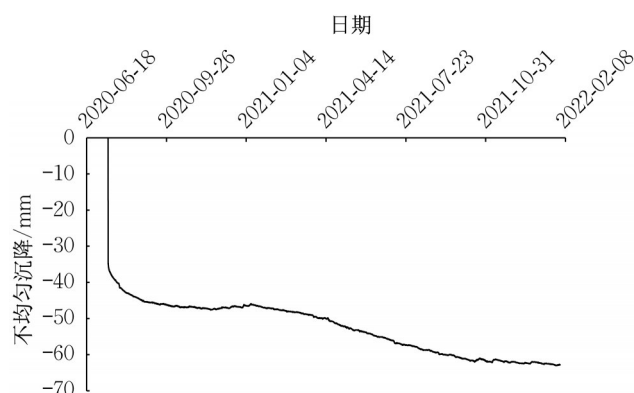


图13 中段管道两端不均匀沉降

Fig. 13 Differential settlement at both ends of mid-pipe

两侧管道相对转角变形不宜超过 3° ,否则容易造成接口密封失效,从而导致渗漏。由此可见,管道修复后的不均匀沉降变形是导致接口渗漏的重要隐患。如果接口长期渗漏,又将会导致周围回填砂层流失,从而沉降进一步发展,从而导致结构损坏。监测系统在2020年7月28日捕捉到一次明显的沉降和接口转角突然增大,随即触发了报警。供水企业立即开展现场检查,经现场检查确认,由于路面在2周左右的交通荷载下产生了明显的沉降,因此进行了细沥青施工,确保路面平整。

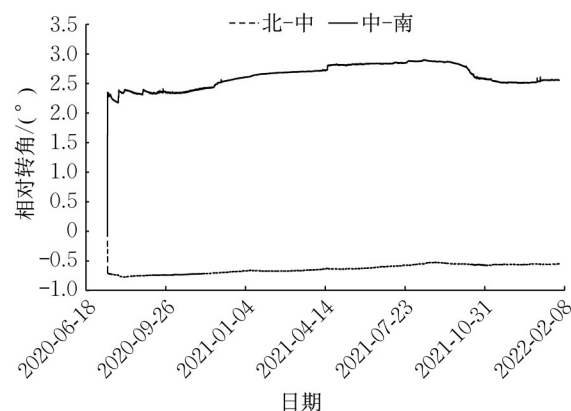


图14 北段管道-中段管道、中段管道-南段管道的接口相对转角

Fig. 14 Joint relative rotation of north-pipe and mid-pipe, and mid-pipe and south-pipe

通过长期监测,管道沉降和转角在2021年10月5日左右初次稳定,稳定时间约为80d。截至2022年2月1日,北段管道转角 1.35° ,中段管道转角 1.89° 。南段管道由于上部燃气管道交叠影响,转角波动较大,最大 -1.3° ,最小 -0.6° 。北段管道与中段管道接口相对转角为 -0.55° ,在长期运行中较为稳定,

且变形略有恢复。中段管道两端不均匀沉降为 62.8mm。然而,由于中段管道与南段管道的管底土层为回填土,与此同时,南段管道上部有 2 根燃气管道交叠敷设,其管道接口相对转角最大为 2.9° ,发生在 2021 年 8 月 15 日,逼近接口转角控制值,且波动较大,易受到外界影响,应加强关注。

图 15 为管道管顶温度和管底温度监测数据。12 月至 1 月平均温度最低,2020 年 12 月 19 日管顶最低温度为 4.6°C ,管底最低温度为 7.3°C 。7 月至 8 月平均温度最高,2020 年 8 月 26 日管顶最高温度为 33°C ,管底最高温度为 29.6°C 。管顶年度最大温差为 28.4°C ,管底年度最大温差为 22.3°C 。冬季管底温度高于管顶,最大温差 5.2°C (2020 年 12 月 7 日),夏季管顶温度高于管底,最大温差为 3.7°C (2020 年 8 月 15 日)。

无线透感知网络监测系统布设后,网络拓扑如图 16 所示。其中一层网络支点为中继 3(埋深 50cm)、中继 4(埋深 50cm)、倾角北(埋深 2.2m),二层网络支点为倾角南(埋深 2.2m)、倾角中(埋深 2.2m)、管顶温(埋深 2.2m)、管底温(埋深 2.2m)、中

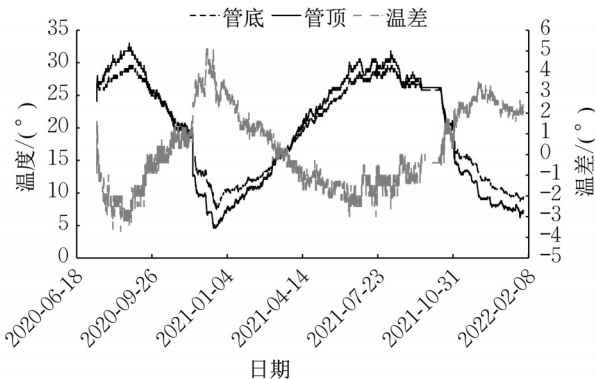


图 15 管顶管底温度

Fig. 15 Top and bottom temperature of pipe

继 1(埋深 1.8m)、中继 2(埋深 1.4m)、土温 2(埋深 90cm),其中中继 2、倾角南和管顶温通过中继 3 将数据传输给网关,中继 1、倾角中、温度 2、管底温通过倾角北将数据传输给网关。倾角北为一层支点中埋深最大支点,埋深达到 2.2m,网关与倾角北水平距离约 25m,网关距离地面垂直高度 3.5m,由于其在空间位置上更加靠近网关,因此作为一层支点自组网。

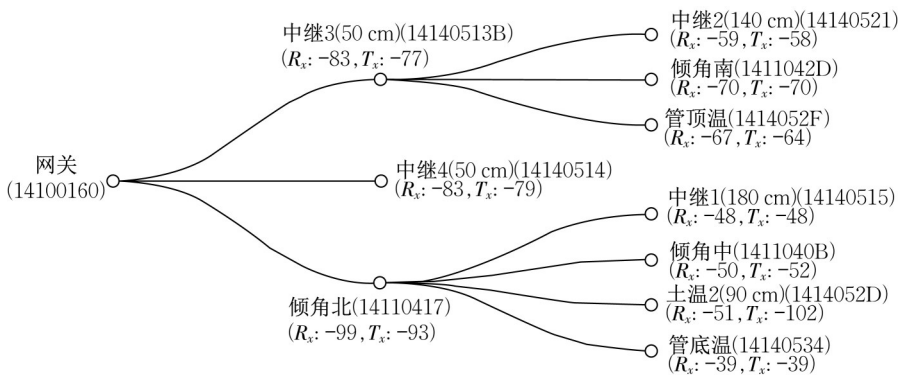


图 16 无线透感知网络拓扑图

Fig. 16 Topology diagram of PWSN

4 结论

从城市供水管网运行安全角度出发,提出了感知监测指标体系,研发了适用于埋地供水管网的无线透感知网络技术,并开展现场应用。主要结论如下:

(1)城市供水管道结构安全是管网系统安全运行的基础和关键,在供水管网水质、压力、流量等功能性监测的基础上,应开展供水管网运行状态、管道结构和管网环境的全空间多参量指标感知。

(2)管网交叉路口、交叠管线和交变荷载的“三

交区域”是供水管网发生管损高发区域,尤其针对严重爆管,占比可达 90% 以上。“三交区域”是供水管网监测预警的重点位置,并应针对不同场景需求开展保护性监测和预防性监测。

(3)供水管网的无线透感知网络技术是解决埋地管网监测数据感知与传输的有效手段。试验表明,体积含水率是影响无线信号路径损耗的主要因素,在高含水量下,黏性土较砂性土信号路径损耗更大。多跳自组网可有效提升网络整体的穿透能力,实现供水管网监测信息传输。

(4)通过现场监测获取了管道结构变形与温度

数据。表明管道下方的回填土密实度对管道后期沉降影响大,应确保回填质量,减少不均匀沉降导致的管道接口变形,避免产生渗漏甚至结构破损。同时,大口径管道的年度温差近 30℃,管顶管底温差可达 5℃以上,温差作用不可忽视,浅埋大口径管道更应重视温差作用。

作者贡献声明:

王 飞:供水管网全空间多参量感知指标体系和无线透传感知网络技术研究、现场应用开展。

胡智翔:现场监测部署与数据分析。

胡群芳:城市地下管网“三交区域”监测理论及供水管网全空间多参量感知指标体系研究。

海 倩:现场监测数据分析。

车德路:供水管网运行安全影响因素研究。

施静康:无线信号在地层中的损耗试验研究。

吴 俨:直埋无线传感器以及无线网关等设备研发。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城乡建设统计年鉴: 2021年[M]. 北京:中国计划出版社, 2022.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. China urban-rural construction statistical yearbook (2021) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2022.
- [2] 姜旭, 舒强, 纪峰. 城市供水管网水质在线监测预警系统构建及应用研究[J]. 给水排水, 2017, 53(S1): 282.
JIANG Xu, SHU Qiang, JI Feng. Construction and application of early warning system for online monitoring of water quality in urban water supply network [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 53(S1): 282.
- [3] 李震, 宛如意. 智慧水务背景下的水质在线监测系统[J]. 电子测试, 2018(9): 97.
LI Zhen, WAN Ruyi. On-line water quality monitoring system under the background of smart water[J]. Electronic Test, 2018 (9): 97.
- [4] 李晓旭. 供水管网在线监测及事故预警系统设计研究[J]. 地下水, 2022, 44(1): 121.
LI Xiaoxu. Research on the design of online monitoring and accident warning system for water supply network[J]. Ground water, 2022, 44(1): 121.
- [5] 武佳佳, 王威, 马东辉. 供水管网健康监测流量点优化布局集成方法研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2018, 40(5): 487.
WU Jiajia, WANG Wei, MA Donghui. Integration method on the optimal layout of flow monitoring points in water supply network for health monitoring[J]. Journal of Wuhan University of technology (Information & Management Engineering), 2018, 40(5): 487.
- [6] 梁建文. 城市供水管网健康监测与诊断(I): 用户流量的预测[J]. 地震工程与工程振动, 2010, 30(4): 126.
LIANG Jianwen. Health monitoring and diagnosis of a water distribution system (I): Forecasting of user's demand [J]. Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2010, 30(4): 126.
- [7] 梁建文. 城市供水管网健康监测与诊断:IV. 监测点压力在线预测[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(3): 241.
LIANG Jianwen. Health Monitoring and diagnosis of a water distribution system: IV. Online forecast of pressure at monitoring stations [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(3): 241.
- [8] 梁建文, 肖笛, 张宏伟, 赵新华. 供水管网健康监测的压力监测点优化布置[J]. 防灾减灾工程学报, 2013, 33(S1): 51.
LIANG Jianwen, XIAO Di, ZHANG Hongwei. Optimal monitoring of pressure in water distribution system for health monitoring [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2013, 33(S1): 51.
- [9] WU Z Y, SAGE P, TURTLE D. Pressure-dependent leak detection model and its application to a district water system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2010(1): 116.
- [10] NASIRIAN A, MAGHREBI M F, YAZDANI S. Leakage detection in water distribution network based on a new heuristic genetic algorithm model [J]. Journal of Water Resource & Protection, 2013(3): 294.
- [11] ADACHI S, TAKAHASHI S, KURISU H, *et al.* Estimating area leakage in water networks based on hydraulic model and asset information[J]. Procedia Engineering, 2014, 89: 278.
- [12] SOPHOCLEOUS S, SAVIC D, KAPELAN Z. Leak localization in a real water distribution network based on search-space reduction[J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 2019, 145(7): 4019024.
- [13] 张士乔, 邵煜. 城镇供水管网漏损监测与控制技术及应用[J]. 中国环境管理, 2017, 9(2): 109.
ZHANG Tuqiao, SHAO Yu. Leakage monitoring and control technology and application of urban water supply network[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9 (2): 109.
- [14] 彭森, 程蕊, 吴卿, 等. 基于极限学习机算法的供水管网爆管识别研究[J]. 中国给水排水, 2022, 38(7): 56.
PENG Sen, CHENG Rui, WU Qin, *et al.* Identification of water supply network pipe burst based on extreme learning machine algorithm [J]. China Water & Wastewater, 2022, 38 (7): 56.
- [15] 程伟平. 供水管网爆管监测体系研究[J]. 给水排水, 2021, 57 (8): 145.
CHENG Weiping. Research frame of pipe burst monitoring system in water distribution system [J]. Water & Wastewater

(下转第212页)