引文格式:袁宏永,韩心星,吴翔飞,等.城市生命线安全工程发展现状与趋势[J].武汉大学学报(信息科学版),2025,50(6):1100-1109.DOI:10.13203/j.whugis20240296

Citation: YUAN Hongyong, HAN Xinxing, WU Xiangfei, et al. Development Status and Trends of Urban Lifeline Safety Engineering[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2025, 50(6): 1100-1109. DOI: 10.13203/j.whugis20240296

# 城市生命线安全工程发展现状与趋势

袁宏永[1,2] 韩心星[2] 吴翔飞[2,3] 付 明[2] 陈建国[1,2] 苏国锋[1,2]

1 清华大学安全科学学院,北京,100084

2 清华大学合肥公共安全研究院,安徽 合肥,230601

3 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室,安徽 合肥,230026

**摘 要**:城市生命线安全工程以预防燃气爆炸、桥梁坍塌、路面塌陷、城市内涝等重大安全事故为目标,以公共安全科技为核心,以物联网、大数据、云计算等数字化技术为支撑,实现对城市生命线工程的整体监测、动态体检、早期预警和高效应对。首先,阐述了城市生命线安全工程的理论体系;其次,分析了燃气、桥梁、供水、排水等重点领域的代表性监测预警技术;然后,分别介绍了合肥市和安徽省的城市生命线安全工程建设的基本情况及应用成效;最后,从国家重大需求、技术装备创新、应用场景拓展3个方面,提出了城市生命线安全工程未来的发展趋势。研究结果可加强对城市生命线安全工程的理解和认知,并助力城市生命线安全工程的全面推广。

**关键词**:城市生命线安全工程;理论体系;监测预警技术;应用成效;发展趋势

**中图分类号**:P208 **文献标识码**:A **收稿日期**:2024-11-20

**DOI**:10.13203/j.whugis20240296 **文章编号**:1671-8860(2025)06-1100-10

# Development Status and Trends of Urban Lifeline Safety Engineering

*YUAN Hongyong*[1,2] *HAN Xinxing*[2] *WU Xiangfei*[2,3] *FU Ming*[2] *CHEN Jianguo*[1,2] *SU Guofeng*[1,2]

1 School of Safety Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China

2 Hefei Institute for Public Safety Research, Tsinghua University, Hefei 230601, China

3 State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract**: The urban lifeline safety engineering aims to prevent major safety accidents such as gas explosions, bridge collapses, road surface collapses, and urban waterlogging. Based on the public safety technology and combined with digital technologies such as the internet of things, big data, and cloud computing, it is aimed to achieve overall monitoring, dynamic examination, early warning, and efficient response of lifeline engineering. First, the theoretical system of urban lifeline safety engineering is elaborated, including comprehensive monitoring theory of urban lifeline safety, the platform framework of sensing, transmitting, knowing, and using, the risk prevention and control mechanism of multi-departmental collaborative linkage, and the standard system for urban lifeline monitoring and operation services. Second, the representative monitoring and early warning technologies in four typical fields, such as urban gas, bridge, water supply, and drainage, are analyzed. Third, the basic situations and application effectiveness of urban lifeline safety engineering construction in Hefei City and Anhui Province are introduced. Finally, the future development trends are proposed from three perspectives of national major needs, technological equipment innovation, and application scenario expansion. The research results can strengthen the understanding and recognition of urban lifeline safety engineering, and assist in the comprehensive promotion of urban lifeline safety engineering in China.

**Key words**: urban lifeline safety engineering; theoretical system; monitoring and early warning technology; application effectiveness; development trend

---

**基金项目**:国家重点研发计划(2023YFC3010000)。

**第一作者**:袁宏永,博士,教授,研究方向为公共安全与综合应急。hy-yuan@tsinghua.edu.cn

城市生命线工程是指维系城市正常运行、满足群众生产生活需要的重要基础工程,涵盖燃气、桥梁、供水、排水、热力、电力等系统和设施[1-5]。随着城镇化的加快,2023 年中国城镇化率已达到 66.16%[6],同时城市生命线工程规模加速提升,其安全事故多发频发。如 2019 年无锡“10·10”312 国道桥面侧翻事故,造成 3 人死亡,事故直接经济损失 820 多万元;2021 年十堰“6·13”重大燃气爆炸事故,造成 26 人死亡,直接经济损失 5 300 多万元。这些事故均造成了严重的后果,因此预防城市生命线事故尤为重要。

对城市生命线工程相关事故的诱因进行分析发现,其运行风险存在隐蔽性、复杂性、脆弱性和信息封闭性的特点[7],具体表现为因建设年代久远、历史及技术原因造成的事故隐患难以排查,因难以掌握事故现场情况、不能及时干预造成的事故演化趋势难以把控,因各类生命线工程设施相互交错依赖、易引发交叉耦合事故造成事故难以准确预警和快速协同处置,因部门间存在信息壁垒造成的相关数据资源难以共享等,亟需建设城市生命线安全工程,实时监测城市生命线运行状态,动态体检运行异常,对运行风险进行早期预警和高效处置[8-9]。本文从城市生命线安全工程的理论体系、代表性监测预警技术、监测运营标准体系、应用实践等方面进行阐述,提出发展趋势,为城市生命线安全工程的科技创新和推广应用提供参考。

## 1　城市生命线安全工程理论体系

### 1.1　综合监测理论

在构建人本化城市安全空间和完善公共安全体系的过程中,针对城市生命线相互耦合、相互关联的复杂性特征和风险难以辨识的问题,提出综合考虑物理、网络、地理和逻辑相关性的物理脆弱性分析方法[10],以及城市安全运行耦合风险的动态评估方法。旨在通过物理-社会相结合、点-线-面-网多维结构数据融合,量化城市生命线多维度风险,并揭示其对城市社会经济运行的影响规律,建立城市生命线重特大突发事件的次生衍生演化模型,以应对隐蔽和耦合风险。

为满足城市高风险空间致灾因子的实时动态监测、综合预警防控和处置决策支持的技术需求,提出时域、空域、能域新型风险的监测预警体系框架[10]。构建全链条城市生命线安全监测预警工程技术体系架构,如图 1 所示,包括风险评估、物联网感知、多网融合传输、大数据分析、专业模型预测和事件预警联动等,实现城市安全空间风险源头治理和分级防控。

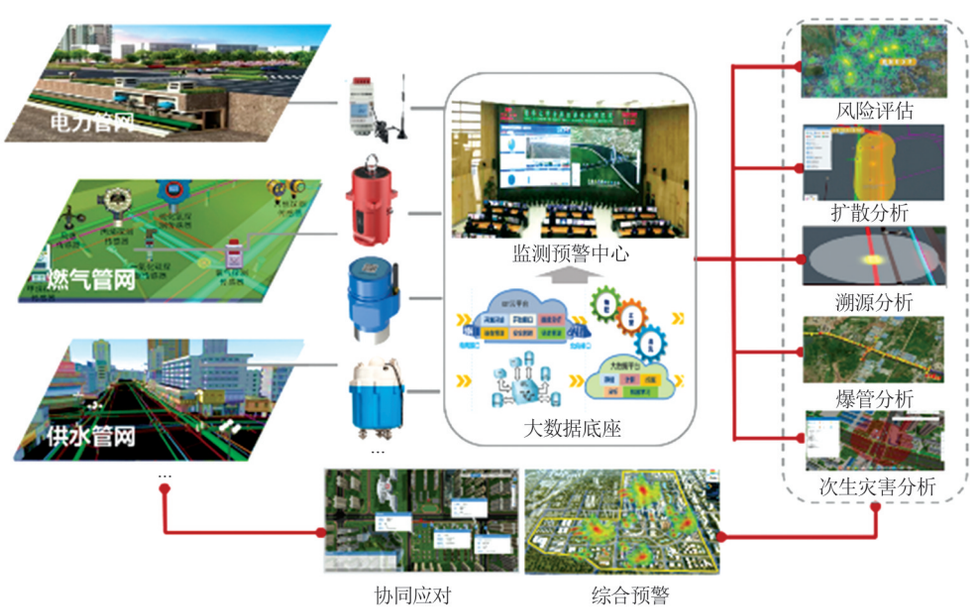



图 1　城市生命线安全监测预警技术架构

Fig. 1　Technical Framework for Monitoring and Early Warning of Urban Lifeline Safety

### 1.2　平台技术架构

城市生命线安全工程依托监测预警平台感知、分析、研判城市生命线运行风险,进而对风险进行联动处置。平台遵循“感、传、知、用”的架构设计[11],如图 2 所示,其中前端感知层作为信息收集的基础,汇聚各行业监测感知

网,接入多源数据,实现对城市生命线运行风险的全方位、立体化动态监测;网络传输层利用移动网络、窄带物联网(narrow band internet of things,NB-IoT)等,实现感知数据的高效传输和共享;数据服务层依托建筑信息模型(building information modeling,BIM)、地理信息系统(geographic information system,GIS)等技术,对城市级信息资源进行聚合和共享,为各级应用提供支撑;应用软件层集成了综合应用系统和专项应用系统,实现实时监测、风险评估、监测报警、预警分析、联动处置等功能,形成风险监测预警和协同联动体系;用户交互层通过多样化的展示形式,使应用系统更加直观易用。

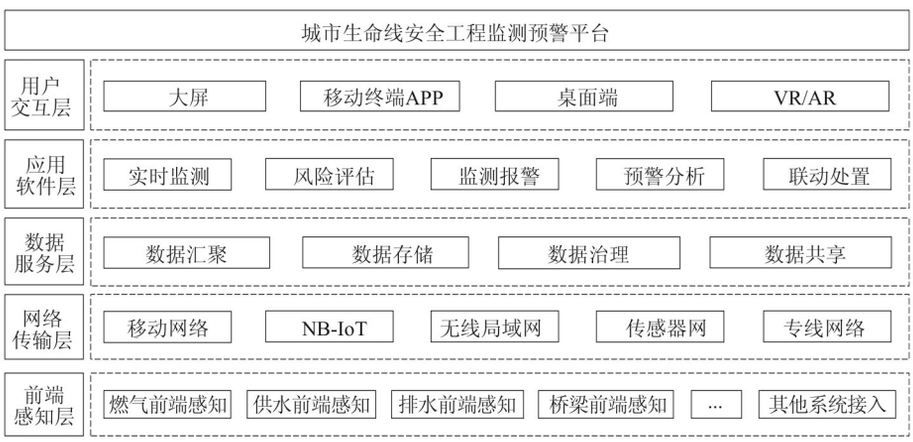



图2 城市生命线安全工程监测预警平台架构

Fig. 2 Platform Framework for Monitoring and Early Warning of Urban Lifeline Safety Engineering

### 1.3 联动防控机制

针对城市生命线运行风险涉及应急、住建、市政等多部门及相关运管企业,权属复杂、职责不清、风险交叉[12],成立城市生命线工程安全运行监测中心,对系统进行7×24 h监测值守,根据系统报警进行初步分析,排查系统误报;当确认为真实警情后,结合报警信息、报警点附近危险源、防护目标、人口交通等信息,依据警情可能导致的事故后果的严重性进行预警分级;根据不同风险预警级别,及时发布预警,联动运管企业、行业主管部门、应急部门等相关单位进行风险处置;在风险处置过程中,监测中心为现场处置人员提供周边管线位置、泄漏点溯源、影响范围分析等相关信息,并结合风险实时演化情况预判可能发生的事故灾害。这种多部门协同联动的风险防控机制,有效实现了风险防范关口主动前移,城市生命线基础设施安全运行风险高效防控。

### 1.4 监测运营标准体系

为规范城市生命线安全工程的监测服务内容及运营质量,建立了城市生命线监测运营服务标准体系[13-14],如图3所示。其中,服务通用基础标准体系是整个监测运营服务标准体系建立和实施的基础;服务提供标准体系是监测运营服务标准体系的核心,用于指导生命线监测运营服务;服务保障标准体系是保障服务有效提供的标准集合;岗位标准体系是支撑服务提供和服务保障有效施行的岗位标准集合。

## 2 城市生命线安全工程的代表性监测预警技术

针对城市燃气、桥梁、供水、排水等风险较为突出的领域,介绍城市生命线安全工程的代表性监测预警技术现状。

### 2.1 燃气安全风险监测预警技术

城市燃气安全风险监测预警技术依据监测对象与监测指标的不同,可分为燃气管道运行状态监测预警技术、燃气管网相邻地下空间泄漏监测预警技术及燃气管道第三方施工破坏监测预警技术[15]。

1)燃气管道运行状态监测技术

目前燃气公司大多采用SCADA(supervisory control and data acquisition)系统进行燃气管网日常监测和运行管理。国外早在20世纪60年代就开始研究SCADA系统,到20世纪90年代,SCADA系统已在工业发达国家的燃气输配系统中得到广泛应用。中国自20世纪80年代开始引进和开发SCADA系统,随着经济迅速发展及城市燃气管网结构愈加复杂,SCADA系

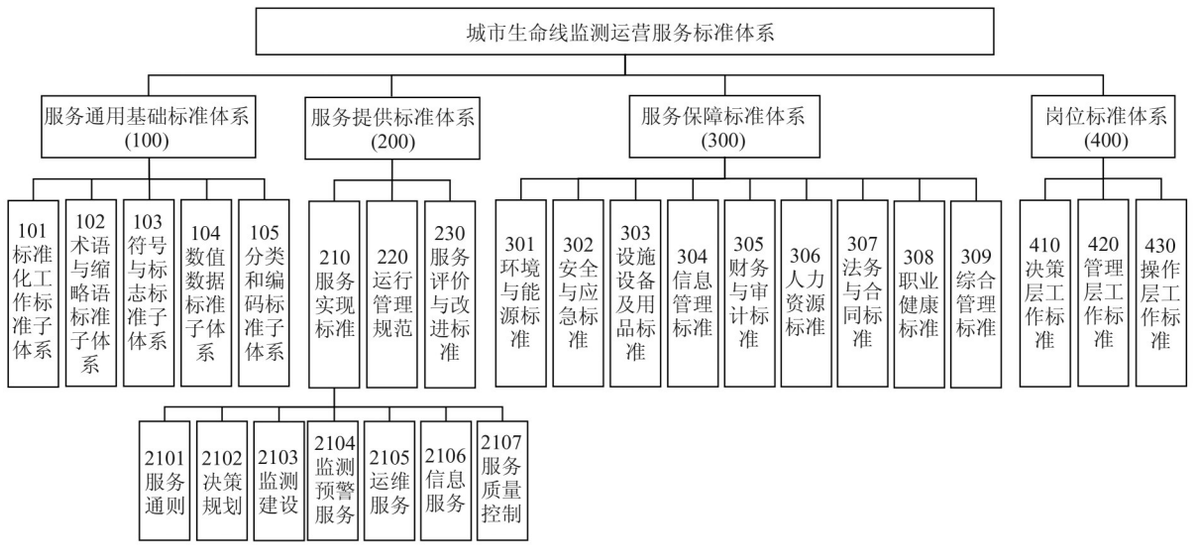



图 3　城市生命线监测运营服务标准体系

Fig. 3　Standard System for Urban Lifeline Monitoring and Operation Services

统应用越来越广泛[16]。由于SCADA系统能在线实时监测各节点压力流量,因此对于全管断裂等原因引起的大规模泄漏导致压力骤然下降能做到有效监测,但是无法发现管网中出现的微小泄漏。

2)燃气管网相邻地下空间泄漏监测预警技术

随着城市地下管网建设规模和密度的不断增加,地下空间交叉穿越和间距不足等问题频繁出现,埋地燃气管道泄漏扩散至相邻地下空间燃爆事件呈现出高发趋势。目前相邻地下空间燃气聚集主要通过在地下空间安装燃气监测设备来实时感知,同时结合燃气扩散、爆炸研判分析对燃气燃爆风险进行预测预警[17],弥补了传统燃气管道监测的不足。此外,由于地下空间环境恶劣,存在多积水、沼气滋生、空间温差大、通讯信号弱等特点,清华大学研发的高可靠性监测传感器较好地解决监测装备环境适应性难题。

3)燃气管道第三方施工破坏监测预警技术

近年来,城市地下燃气管道第三方施工破坏事件频发,已成为城镇燃气管道安全运行的主要威胁。随着信息化技术的不断进步,视频识别[18]、埋地光纤感知[19]、声学/振动传感器感知[20]等技术被逐步应用到燃气管道第三方施工破坏防控领域。上述技术尚存在一定缺陷,如视频识别探测距离有限,需沿管道大量布设,且城区建筑物遮蔽等均对视频监控存在一定影响;光纤一般需与燃气管道同步敷设,对于已服役地下管道不适用。基于声学/振动的第三方施工识别技术是研究热点,美国多家研究所和公司、加拿大NRC(National Research Council)的研究人员都进行了基于声信号的管道监测[21],中国学者们也对管道的第三方破坏预警开展了研究工作[22-23]。相关研究和产品应用证明了基于声学/振动信号识别第三方施工威胁的可行性,且针对管道本体监测可实现在较少监测点下更大范围覆盖。

### 2.2　桥梁安全风险监测预警技术

桥梁安全风险监测预警代表性技术主要包括响应超限预警技术、算法模型预警技术及综合实验预警技术等。

1)响应超限预警技术

针对较为平稳的单一监测指标,可以采用动态响应超限预警技术[24],依托有限元模型、统计数据及行业标准规范等,设定位移、应变、加速度等动态响应参数的阈值,将实时监测的时域数据与之进行即时比对,判断实时数据是否超出预设的安全阈值,实现对潜在突发事件的快速研判。与国内强调的预防性监测方法不同,一些地震频发国家则会更注重利用响应数据进行灾后寿命评价[25]。通过实时比对震时响应数据与抗震设计数据,可以为桥梁健康状况的研究和灾害预警提供重要决策依据[26]。

2)算法模型预警技术

在实际桥梁安全监测过程中,监测数据可能会受到温度效应、传感器松动、噪声较大等情况的干扰,需要采用算法模型预警技术[27],对监测数据通过算法模型进行处理后再开展分析预警,减小或消除异常数据影响,实现监测数据深度挖掘,如动态阈值算法模型预警、模态参数算法模

型预警、结构损伤识别模型预警[28]和关联分析模型预警等。在此基础上,国外进一步发展了适用于处理桥梁长期监测数据的更复杂的深度学习模型,如基于长短期记忆网络的预测模型能够有效捕捉时间序列数据中的长期依赖性[29];通过卷积神经网络模型提取监测数据中的空间特征,应用于结构损伤识别和分类任务[30],以提升桥梁健康监测的智能化水平,为养护决策提供更为科学的依据,最终延长桥梁的使用寿命并确保使用功能安全[31]。

3)综合实验预警技术

当历史监测数据不足、难以支撑辅助分析时,可采用综合实验预警技术,即通过有限元模型或实验桥梁复现部分难遇或罕遇的突发事件场景,对数值模拟结果或实验结果进行分析,以期评估实际运行桥梁在此类场景下的抗灾能力[32-33]。清华大学合肥公共安全研究院建设有全国体量最大的桥梁结构实体模型,具有140余个结构类、环境类及荷载类传感器,可以对桥墩沉降、单板受力、拉索断裂、主梁倾覆等20余种桥梁典型风险场景进行模拟复现,用于综合分析预警研究。

### 2.3 供水安全风险监测预警技术

供水安全风险监测预警代表性技术主要包括供水管网泄漏监测预警技术、供水管网爆管定位及辅助影响分析技术等。

1)供水管网泄漏监测预警技术

城市供水管网泄漏是引发城市路面塌陷的一个重要诱因。传统的人工检测法和区域流量平衡等方法无法及时有效地探测到供水管网泄漏。城市生命线安全工程主要应用瞬态流量压力分析[34]和漏失声波监测[35]的方式,实现对城市供水管网全天候实时监测。瞬态流量压力分析主要利用动态阈值算法识别瞬变压力和流量,通过模型判断及与历史监测数据比对,触发供水泄漏报警。漏失声波监测是拾取供水管道泄漏时,水从管道破损处溢出产生的声音信号,进一步通过信号处理确定漏点。此外,一些发达国家的知名机构协会很早就开始供水泄漏定位技术的研究,如美国用水工程协会、英国水研究中心和日本水道协会等,如美国菲力尔公司研发的红外热成像法[36]可以捕捉管道表面泄漏点附近热分布差异来检测泄漏并定位。

2)供水管网爆管定位及辅助影响分析技术

当管网供水发生异常事件时,一定程度上会在压力、流量、声音和振动等信号方面反映出来。爆管定位[37-38]及辅助影响分析首先基于管网监测信号物理特征,通过分析各监测点压力、流量的波动特性,根据数据波动找出异常发生的区域;然后在计量分区内根据空间距离将管网监测点进行聚类分组,根据最大压降所在分组内的各监测点的异常个数,判定爆管事件并确定所处的爆管区域;最后基于定位算法求解出爆管点坐标实现定位。针对供水管网爆管、维修和施工等场景,通过应用图论传递闭包理论计算识别管网子区和多余阀门,对相应管线上游、下游的有效边界阀门进行快速搜索和识别,提出适用单事故点和多事故点工况的供水管网全网关阀预案一次、二次生成算法,给出受爆管等事件影响区域范围。近年来,随着机器学习技术的兴起,学者们着力于模型算法上的突破,利用数学模型和机器学习的方法[39-40]模拟供水管网的运行工况,实时预测供水管网是否发生泄漏,并进行精准定位。

### 2.4 排水安全风险监测预警技术

排水安全风险监测预警代表性技术主要包括排水管网病害监测诊断技术和城市积水内涝风险预警技术。

1)排水管网病害监测诊断技术

排水管网的主要病害有管网淤堵、错接混接、入流入渗[41-42]。排水管道淤积会导致上下游管网的水力学工况发生变化,可对排水管网淤积的特征规律进行分析和总结;排水管网雨污混接可通过水质、水量、液位监测数据,结合排水管网拓扑关系进行系统性诊断;雨水入流入渗监测诊断技术以整体、分区诊断为思路,采用水质水量平衡分析法,以污水处理厂、泵站、管道分级,通过排水管网拓扑关系,逐级识别入流入渗重点区域,最终追踪问题源至管道级别。国内外都非常重视城市排水问题,积极研发GIS系统,德国GeoGrat公司在20世纪90年代研发城市排水GIS系统,即GEOGIS系统,对城市地下管网进行综合治理,并在欧洲200多个城市得到应用;日本大部分城市都建立了基于GIS的管网信息系统,对城市排水设施进行科学监测管理;中国北京、武汉、南京等城市也基于GIS技术开发了城市地下管网或排水管理信息系统,实现对排水设施的信息化管理[43]。

2)城市积水内涝风险预警技术

城市积水内涝预警主要分为雨前的模型预测技术和雨中的监测预警技术[44]。雨前的模型

预测主要基于城市地表径流模型及管网、河道一维水力学模型,以降雨实测数据和未来降雨预报数据为输入,结合泵站、闸门等工程设施的控制规则,输出排水管网的流量、流速、液位、充满度等水力学工况结果数据,提前对排水管网的运行负荷进行预测,获得排水管网设施针对暴雨预警的应对能力,对可能超载管网、溢流管点、溢流量等进行预测,指导提前做好处置应对工作。国外的雨前模型预测技术发展早、历史长,如暴雨洪水管理模型、处理与溢流模型等,自2006年起,国内学者们基于暴雨洪水管理模型逐步开展本地化城市暴雨内涝研究应用[45]。雨中的监测预警基于排水管网液位监测设备,通过设置多级报警阈值方式,可对排水管网溢流进行实时监测和预警。

## 3　城市生命线安全工程应用实践

### 3.1　合肥市城市生命线安全工程

1)基本情况

2015年合肥市在全国率先启动城市生命线安全工程建设,构建覆盖燃气、供水、排水、热力等约7 000 km地下管网、58 km地下综合管廊、137座桥梁的立体化监测网络,成立中国首个城市生命线工程安全运行监测中心,在人才队伍、平台建设、关键技术突破等方面持续发力,有效发挥拱卫城市安全的科技哨兵作用。

2)应用成效

合肥市城市生命线安全工程运行以来,取得显著成效。通过地理信息平台“一张图”可以动态显示生命线异常情况,风险排查效率提高70%;通过风险的精准感知、智能分析、联动处置等,大幅提升城市精细化管理水平。截至2024年7月,已联动处置三级以上预警932起,其中燃气泄漏可能引发燃爆险情488起;建立地下综合管线地理信息系统,为城市建设提供管线信息和分布态势,节约探测费约6亿元,同时有效避免了重复开挖和施工风险。

2021年9月,国务院安全生产委员会办公室、应急管理部进行城市安全风险综合监测预警工作体系建设试点部署,在合肥市召开全国城市安全风险监测预警工作现场推进会,组织现场考察,交流推广了合肥市城市生命线安全工程经验做法。

### 3.2　安徽省城市生命线安全工程

1)基本情况

安徽省在合肥市城市生命线安全工程的基础上进行全省推广,提升城市运行效率,保障城市运行安全,打造韧性城市。全省16个设区市已覆盖燃气、桥梁、供水、排水防涝等重点领域,构建“1+16”城市生命线安全监测运行体系,推动城市安全治理模式向事前预防转型。

2)应用成效

建立地下管网地理信息系统和地上建筑信息模型系统,累计汇聚14.4万km的城市地下管网基础数据和945 $km^2$的地上建筑模型;依据专业风险评估结果,已完成布设17万余套前端感知设备,实现传感设备精准布控、高效监测。截至2024年7月,发布并有效处置三级以上预警1 754起;通过燃气地下相邻空间全天候监测、桥梁每天2次综合健康评估、供水管网漏损实时监测、城市积涝趋势超前预测、老旧管网更新改造辅助决策等,推动安全源头治理;在风险监测预警、应急处置救援、安全服务等领域形成核心竞争力,带动产业链上下游企业实现产值200亿元,为全国城市生命线安全提供技术、产品、方案和服务。

2023年5月,住房和城乡建设部在安徽省合肥市召开推进城市基础设施生命线安全工程现场会,全面介绍安徽省经验做法,部署在全国全面推广。截至目前,已在北京、深圳、天津、成都、西安、乌鲁木齐等全国70多个城市推广应用,累计成功预警各类突发险情2万多起,较大及以上事故发生为0。

## 4　城市生命线安全工程的发展趋势

### 4.1　国家重大需求

1)国家战略需求

中国共产党第二十次全国代表大会报告提出“推动公共安全治理模式向事前预防转型”,把人民生命安全和身体健康作为城市发展的基础目标,把城市安全摆到了前所未有的高度。城市生命线安全工程是保障城市燃气、桥梁、供水、排水等基础设施安全运行的国家重大民生工程。国务院印发《深入实施以人为本的新型城镇化战略五年行动计划》,提出实施城市生命线安全工程,加强地下综合管廊建设和老旧管线改造升级,同步加强物联感知设施部署和联网监测。

2)安全发展需求

城市生命线设施长期高密度建设、高负荷运行,已经进入事故集中暴发期。复杂灾害耦合事故进入城市安全认知的无人区,事故发生频度、

复杂程度、影响范围、损失规模不断超出认知边界,多灾种全链条防范应对困难,迫切需要通过城市生命线安全工程建设动态感知和及时预警风险,遏制重特大事故发生。

3)自主可控需求

中国高性能安全传感芯片等核心部件仍掌握在发达国家手中,自给率低且几乎无替代品可供使用,导致不利于中国安全应急产业惠及民生。目前中国城市生命线安全监测预警的基础工程软件受制于人,对支撑保障国家安全带来严峻挑战。远程控制、抑爆减灾、现场抢险、人员防护、更新修复等救援装备国产化率低,产业链尚不能自主可控,严重影响产业链和供应链安全。

### 4.2 技术装备创新

与国外相比,中国在城市生命线安全领域仍处于并跑、跟跑水平,亟需在城市生命线安全诊断与韧性增强理论、运行监测与灾害预警技术及防控技术与处置装备等方面开展攻关。

1)城市生命线安全诊断与韧性增强理论

突破城市生命线泄漏、垮塌、滑移、断裂、倾覆等结构破坏或功能失效引发的火灾、爆炸、路面塌陷、大面积停水、停电、停气等耦合风险的动力学演化机理、韧性评价理论及方法、韧性增强技术、本质安全新材料等共性关键技术,建立城市生命线安全风险精确认知理论与方法,解决城市生命线运行诊断、防灾设计、灾变监测和灾害预测的理论、方法、技术和标准难题。

2)城市生命线安全运行监测与灾害预警技术

研发市政管网缺陷、桥梁病害等智能识别诊断技术,突破城市燃爆、暴雨内涝、路面塌陷等次生、衍生事件预警研判技术,攻克高端安全传感芯片、气体精准探测、低功耗长寿命管网泄漏诊断等关键技术,研发城市生命线安全诊断基础工程软件,构建服务全国的超大规模城市生命线安全运行监测预警系统,突破城市生命线安全监测精细感知技术与装备,解决基础工程软件和传感芯片的国产替代问题。

3)城市生命线安全防控技术与处置装备

面向复杂多变城市安全事故现场环境的高适应性、高可靠性装备的短板和弱项,研究灾害事故现场全息感知、智能研判、高效调配技术,研发组件标准化、装备模块化集成技术,研制抵近观测、远程控制、抑爆减灾、现场抢险、更新修复等重大技术装备,研发重大灾害事故高效协同联动指挥系统,构建城市生命线重大灾害处置精准救援装备与系统,实现高端装备自主可控。

### 4.3 应用场景拓展

中国全面启动城市生命线安全工程建设,目前主要聚焦城市燃气、桥梁、供水、排水等领域,热力管网、综合管廊、电力设施、轨道交通等领域的存量风险和新兴风险防控需要进一步开展技术突破。

1)地下热力管网易泄漏、难定位等难题

研究热力管网爆管预警技术、热力介质漏损高精度定位技术,研发适用于高温高湿恶劣环境的声振漏失监测装备、管道内检测装备及地下空间温度感知装备,实现热力管网的全线路、全天候、精准化在线多维度感知、故障实时诊断与精确定位。

2)综合管廊全体系防控难题

研制综合管廊智能巡检机器人、管廊高危管道及防护系统在线检测监测技术与设备、高危管道可靠性测试装备、廊内可燃气体监测设备,提升综合管廊全生命周期安全保障能力。

3)极端自然灾害环境下电力设施失效难题

研究城市电力设施风险监测预警与安全保障技术,研制电力设施智能化无人机巡检系统、变电站阻燃变压器油、阻燃线缆火灾灭火剂、分布式储能站安全监测预警系统等,为电力系统综合风险评价、监测预警及安全运行保障提供技术装备支撑。

4)轨道交通耦合突发事件防控难题

研究轨道交通极端自然灾害条件下的灾害链形成、演化及断链技术;针对地铁火灾与大客流疏散,研究地铁火灾常态化监控技术以及客流疏散仿真模型、灭火监测系统等。

## 5 结 语

1)城市生命线安全工程是保障城市基础设施系统安全运行的国家重大民生工程。中国城市生命线规模世界第一,城市生命线设施长期高密度建设、高负荷运行,形成了复杂巨系统并在加速老化,已经进入事故集中暴发期。

2)城市生命线安全工程对城市基础设施进行整体监测、动态体检、早期预警和高效应对,科学预防燃气爆炸、桥梁坍塌、路面塌陷、城市内涝、大面积停水、停气等重大安全事故。

3)中国在城市生命线安全工程领域已形成一整套风险评估理论体系,攻克了一系列关键核心技术,并取得了良好的应用实践成效。

4)从国家重大需求、技术装备创新、应用场景拓展3个方面,提出了城市生命线安全工程未来的发展趋势,加快提升城市安全韧性和产业链自主可控水平。

## 参 考 文 献


[1] 袁宏永,苏国锋,付明. 城市安全空间构建理论与技术研究[J]. 中国安全科学学报,2018,28(1):185-190.
YUAN Hongyong, SU Guofeng, FU Ming. Study and Application of Architecture Method and Technology of Urban Safety Space [J]. *China Safety Science Journal*, 2018, 28(1): 185-190.

[2] 韩心星,张壮壮,程之宽,等. 城市生命线安全工程领域标准需求与建议分析[J]. 中国安全生产科学技术,2024,20(2):5-12.
HAN Xinxing, ZHANG Zhuangzhuang, CHENG Zhikuan, et al. Analysis of Requirements and Suggestions for Standards in Field of Urban Lifeline Safety Engineering [J]. *Journal of Safety Science and Technology*, 2024, 20(2): 5-12.

[3] ZHAO X D, CAI H, CHEN Z L, et al. Assessing Urban Lifeline Systems Immediately After Seismic Disaster Based on Emergency Resilience[J]. *Structure and Infrastructure Engineering*, 2016, 12(12): 1634-1649.

[4] HAN L, ZHAO X D, CHEN Z L, et al. Assessing Resilience of Urban Lifeline Networks to Intentional Attacks[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2021, 207: 107346.

[5] 江建华,李素贞,李杰. 基于GIS的城市生命线工程地震反应仿真研究:以上海市供水系统为例[J]. 灾害学,2001,16(1):23-28.
JIANG Jianhua, LI Suzhen, LI Jie. Simulation Research of Seismic Response of Urban Lifeline Engineering on GIS Basis—A Case Study on Water Supply System in Shanghai [J]. *Journal of Catastrophology*, 2001, 16(1): 23-28.

[6] 国家统计局. 中华人民共和国2023年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-05-29]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.
National Bureau of Statistics. Statistical Bulletin on National Economic and Social Development of the People's Republic of China in 2023[EB/OL]. (2024-02-29)[2024-05-29]. https://www.stats.gov.cn/sj/zxfb/202402/t20240228_1947915.html.

[7] 袁宏永,苏国锋,付明,等. 城市生命线工程安全运行共享云服务平台研究与应用[J]. 灾害学,2018,33(3):60-63.
YUAN Hongyong, SU Guofeng, FU Ming, et al. Research and Application of Cloud-Based Service Platform for Urban Lifeline Safety Operation System [J]. *Journal of Catastrophology*, 2018, 33(3): 60-63.

[8] 李舒,付明. 城市生命线安全防范新思路和新技术[J]. 现代职业安全,2020(2):30-31.
LI Shu, FU Ming. New Ideas and Technologies for Urban Lifeline Safety Prevention[J]. *Modern Occupational Safety*, 2020(2): 30-31.

[9] 袁宏永. 重塑城市生命线安全监测系统[J]. 城市管理与科技,2021,22(5):39-41.
YUAN Hongyong. Reshape the Urban Lifeline Safety Monitoring System[J]. *Urban Management and Science & Technology*, 2021, 22(5): 39-41.

[10] 中国应急管理报. 推动城市安全发展丨城市生命线安全工程"合肥模式"[EB/OL]. (2021-09-27)[2024-05-29]. https://yjt.ah.gov.cn/cdpa/mtjj/146100981.html.
China Emergency Management News. Promoting Urban Safety Development丨The "Hefei Model" of Urban Lifeline Safety Engineering [EB/OL]. (2021-09-27)[2024-05-29]. https://yjt.ah.gov.cn/cdpa/mtjj/146100981.html.

[11] 袁宏永,章翔,黄丽达,等. 城市生命线安全工程关键技术研究进展[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2024,49(8):1251-1263.
YUAN Hongyong, ZHANG Xiang, HUANG Lida, et al. A Review of Progress of Key Technologies for Urban Lifeline Safety Engineering [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, 49(8): 1251-1263.

[12] 丁斌. 合肥市城市生命线安全监测预警系统建设工程的做法与思考[J]. 安徽化工,2021,47(5):29-32.
DING Bin. Practice and Thinking of Hefei City Lifeline Safety Monitoring and Early Warning System Construction Project[J]. *Anhui Chemical Industry*, 2021, 47(5): 29-32.

[13] 合肥市城乡建设局. 合肥市:风险看得见、城市更安全 城市生命线工程安全监测成效显著[J]. 城乡建设,2022(7):57-59.
Hefei Urban and Rural Construction Bureau. Hefei City: The Risk Is Visible and the City Is Safer. The Safety Monitoring of Urban Lifeline Project Has Achieved Remarkable Results[J]. *Urban and Rural Development*, 2022(7): 57-59.

[14] GB/T 24421.2. 服务业组织标准化工作指南 第2部分:标准体系[S]. 北京:中国国家标准化管理委员会,2023.

GB/T 24421.2. Guidelines for Standardization of Organizations in Service Sector-Part 2: Standard System Construction[S]. Beijing: Standardization Administration of China,2023.

[15] 国务院安全生产委员会办公室. 关于印发《城市安全风险综合监测预警平台建设指南(试行)》的通知[EB/OL]. (2021-09-23)[2024-05-29]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202110/t20211009_399738.shtml.
Office of the State Council's Work Safety Committee. Guidelines for the Construction of Comprehensive Monitoring and Early Warning Platforms for Urban Safety Risks (Trial)[EB/OL]. (2021-09-23)[2024-05-29]. https://www.mem.gov.cn/gk/zfxxgkpt/fdzdgknr/202110/t20211009_399738.shtml.

[16] 翟金媛. 城市燃气SCADA系统的设计[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.
ZHAI Jinyuan. Design of SCADA System for City Gas[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010.

[17] 谭琼, 冯国梁, 袁宏永, 等. 燃气管线相邻地下空间安全监测方法及其应用研究[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(3): 902-908.
TAN Qiong, FENG Guoliang, YUAN Hongyong, et al. Applied Research for the Gas Pipeline Installation and the Monitoring Method for the Safety of the Adjacent Underground Spaces[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(3): 902-908.

[18] 吴真真, 唐超, 杨晓飞. 基于深度学习的视频识别及动态监测技术应用: 以轨道交通建设工程为例[J]. 测绘通报, 2022(9): 23-28.
WU Zhenzhen, TANG Chao, YANG Xiaofei. Application of Video Recognition and Dynamic Monitoring Technology Based on Deep Learning: Taking the Rail Transit Construction Project as an Example[J]. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2022(9): 23-28.

[19] LI S Z, PENG R Z, LIU Z L. A Surveillance System for Urban Buried Pipeline Subject to Third-Party Threats Based on Fiber Optic Sensing and Convolutional Neural Network[J]. *Structural Health Monitoring*, 2021, 20(4): 1704-1715.

[20] 袁文强, 郎宪明, 曹江涛, 等. 基于声波法的管道泄漏检测技术研究进展[J]. 油气储运, 2023, 42(2): 141-151.
YUAN Wenqiang, LANG Xianming, CAO Jiangtao, et al. Research Progress of Pipeline Leakage Detection Technology Based on Acoustic Wave Method[J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2023, 42(2): 141-151.

[21] HUNAIDI O, CHU W T. Acoustical Characteristics of Leak Signals in Plastic Water Distribution Pipes[J]. *Applied Acoustics*, 1999, 58(3): 235-254.

[22] 王强. 基于声信号检测的管道TPD预警系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
WANG Qiang. The Buried Pipeline TPD Signals Preventive Detecting System Based on Acoustic Signal[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.

[23] 陈朋超. 长输管道安全预警系统若干关键技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2010.
CHEN Pengchao. Study on Several Key Techniques of the Long-Distance Pipeline Security Prewarning System[D]. Tianjin: Tianjin University, 2010.

[24] GE B, WANG Z C, XIN Y, et al. Dynamic Real-Time Reliability Prediction of Bridge Structures Based on Copula - BHDLM and Measured Stress Data[J]. *Measurement*, 2022, 203: 112006.

[25] PRENDERGAST L J, LIMONGELLI M P, ADEMOVIC N, et al. Structural Health Monitoring for Performance Assessment of Bridges Under Flooding and Seismic Actions[J]. *Structural Engineering International*, 2018, 28(3): 296-307.

[26] SIRINGORINGO D M, FUJINO Y. Seismic Response of a Suspension Bridge: Insights from Long-Term Full-Scale Seismic Monitoring System[J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2018, 25(11): e2252.

[27] JIANG H C, GE E S, WAN C F, et al. Data Anomaly Detection with Automatic Feature Selection and Deep Learning[J]. *Structures*, 2023, 57: 105082.

[28] 李舒. 城市道路高架桥基于宏应变的损伤识别方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
LI Shu. Macro Strain-Based Damage Identification Method for Municipal Highway Viaduct[D]. Nanjing: Southeast University, 2018.

[29] WANG C W, ANSARI F, WU B, et al. LSTM Approach for Condition Assessment of Suspension Bridges Based on Time-Series Deflection and Temperature Data[J]. *Advances in Structural Engineering*, 2022, 25(16): 3450-3463.

[30] NGUYEN D C, SALAMAK M, KATUNIN A, et al. Vibration-Based SHM of Railway Steel Arch Bridge with Orbit-Shaped Image and Wavelet-Integrated CNN Classification[J]. *Engineering Structures*, 2024, 315: 118431.

[31] JIAN X D, ZHONG H Q, XIA Y, et al. Faulty

Data Detection and Classification for Bridge Structural Health Monitoring *via* Statistical and Deep-Learning Approach [J]. *Structural Control and Health Monitoring*, 2021, 28(11): e2824.

[32] 李舒, 薛海斌, 李祥东, 等. 一种基于大数据的桥梁结构安全评价方法及装置: CN112561257A[P]. 2021-03-26.
LI Shu, XUE Haibin, LI Xiangdong, et al. Bridge Structure Safety Evaluation Method and Device Based on Big Data: CN112561257A [P]. 2021-03-26.

[33] LI S, GAN L Y, ZHAO R N, et al. Research on Bridge Integrity Assessment and Early Warning Monitoring Methods Based on Bearing Reaction Force[J]. *Buildings*, 2024, 14(3): 763.

[34] 陈凌, 刘隧庆, 李树平. 城市供水管网瞬态水力模型的建立和应用[J]. 给水排水, 2007, 43(5): 109-114.
CHEN Ling, LIU Suiqing, LI Shuping. Construction and Application of Transient Hydraulic Model of Urban Water Supply Distribution Network[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2007, 43 (5): 109-114.

[35] 肖梓铭. 供水管网泄漏声检测与漏点定位系统设计[D]. 南昌: 南昌航空大学, 2022.
XIAO Ziming. Design of Leak Acoustic Detection and Leak Location System for Water Supply Network[D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University, 2022.

[36] SHAKMAK B, AL-HABAIBEH A. Detection of Water Leakage in Buried Pipes Using Infrared Technology; A Comparative Study of Using High and Low Resolution Infrared Cameras for Evaluating Distant Remote Detection[C]//IEEE Jordan Conference on Applied Electrical Engineering and Computing Technologies (AEECT), Amman, Jordan, 2015.

[37] 王子川. 基于小波变换和决策树的水锤事件识别及事故诊断[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2023.
WANG Zichuan. Water Hammer Event Identification and Accident Diagnosis Based on Wavelet Transform and Decision Tree[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2023.

[38] 杨玉龙, 何凯军, 季京宣, 等. 基于ZIP模型的供水管网灰口铸铁管爆管预测[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(2): 560-568.
YANG Yulong, HE Kaijun, JI Jingxuan, et al. Gray Cast Pipe Failure Prediction Model in Water Distribution System Based on Zero-Inflated Poisson Model[J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2022, 53 (2): 560-568.

[39] RAJESWARAN A, NARASIMHAN S, NARASIMHAN S. A Graph Partitioning Algorithm for Leak Detection in Water Distribution Networks[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2018, 108: 11-23.

[40] KANG J, PARK Y J, LEE J, et al. Novel Leakage Detection by Ensemble CNN-SVM and Graph-Based Localization in Water Distribution Systems [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2017, 65(5): 4279-4289.

[41] 陈俊宇. 排水管网病害分析及改造策略研究[J]. 给水排水, 2023, 59(9): 137-143.
CHEN Junyu. Drainage Network Disease Analysis and Reconstruction Strategy Research[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2023, 59(9): 137-143.

[42] 谢宏桥, 田旦. 排水管网测量在城镇排水系统病害排查和诊断中的应用[J]. 城市道桥与防洪, 2023(7): 148-152.
XIE Hongqiao, TIAN Dan. Application of Drainage Pipe Network Survey in Disease Investigation and Diagnosis of Urban Drainage System[J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2023(7): 148-152.

[43] 彭欢. 城市排水GIS系统研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2014.
PENG Huan. Study on GIS System of Urban Drainage[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.

[44] 李海燕, 吴晓绚, 王婷, 等. 广州城市暴雨内涝模型模拟效果评估[J]. 热带气象学报, 2023, 39(5): 689-696.
LI Haiyan, WU Xiaoxuan, WANG Ting, et al. Evaluation of Simulation Effect of Urban Rainstorm Waterlogging Model in Guangzhou [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2023, 39 (5): 689-696.

[45] 薛丰昌, 陈笑娟, 吕鑫, 等. 利用社会公众拍摄图像构建城市内涝深度等级评估模型[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240290.
XUE Fengchang, CHEN Xiaojuan, LÜ Xin, et al. Constructing an Urban Waterlogging Depth Assessment Model Using Public Video Information [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2024, DOI: 10.13203/j.whugis20240290.