

引文格式: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.DOI:10.13203/j.whugis20240264



**Citation:** 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. DOI: 10.13203/j.whugis20240264

# 城市生命线安全工程关键技术研究进展

袁宏永<sup>1,2</sup> 章 翔<sup>1</sup> 黄丽达<sup>1</sup> 潘 睿<sup>1</sup> 陈 杨<sup>1</sup> 刘 翼<sup>1</sup>

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

**摘要:**城市生命线安全工程是保障城市燃气、供水、供电等系统安全运行的国家重大民生工程。当前城市生命线安全工程面临三类难题:机理揭示和实验复现难,风险探测和早期识别难、精准预警和协同防控难。为突破机理揭示和实验复现难题,研发了全球首套全尺寸城市生命线多灾种大型科学装置,建立了生命线系15类、169种灾害耦合致灾模型,提出了地下管线与地上承载体耦合的综合风险动态评估方法;为攻关风险探测和早期识别难题,发明了有源光栅与波长偏置的高灵敏燃气传感激光芯片和探测器,研发了基于惯导、力平衡、声学频谱及北斗的供水管网泄漏定位智能球,突破了桥梁整体模态(指纹)监测技术;为解决精准预警和协同防控难题,攻克了城市生命线安全风险物理启发式人工智能预警技术,研发了具备协同感知、融合监测、靶向预警、联动响应等功能的监测预警系统。系列相关成果带动了安全应急产业发展,为城市生命线风险防控作出了开创性和实质性贡献。

**关键词:**城市生命线;风险评估;承载体;致灾机理;监测预警系统

中图分类号:P208

文献标识码:A

收稿日期:2024-07-16

DOI:10.13203/j.whugis20240264

文章编号:1671-8860(2024)08-1251-13

## A Review of Progress of Key Technologies for Urban Lifeline Safety Engineering

YUAN Hongyong<sup>1,2</sup> ZHANG Xiang<sup>1</sup> HUANG Lida<sup>1</sup> PAN Rui<sup>1</sup>  
CHEN Yang<sup>1</sup> LIU Gang<sup>1</sup>

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

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

**Abstract:** The urban lifeline safety project is a major national livelihood project, which ensures the safe operation of urban gas, water, electricity and other systems. Nowadays, the project is confronted with three types of difficulties: Difficulties in mechanism discovery and experimental reproduction; difficulties in risk detection and early identification, and difficulties in accurate early warning and collaborative prevention and control. In order to reveal the mechanism and reproduce the experiments, a full-size urban lifeline multi-hazard large-scale scientific device is firstly developed in the world, a series of disaster modes with 5 categories and 169 kinds of disasters coupled are established, based on which a comprehensive risk dynamic assessment method coupled with underground pipelines and above-ground disaster-bearing body is presented. To improve the risk detection and early identification, highly sensitive gas sensing laser chip as well as detector with active grating and wavelength-biased are invented. We develop an intelligent ball for leakage located in water supply pipe network based on the inertial guidance, force balance, acoustic spectrum and BeiDou. Bridge overall modal (fingerprint) monitoring technology is breakthrough. In order to solve the problem of accurate early warning and collaborative prevention and control, an urban lifeline safety risk physical

**基金项目:**国家重点研发计划(2023YFC3010000);中国工程院前瞻性储备性咨询课题(2023-JB-08-08)。

**第一作者:**袁宏永,博士,教授,研究方向为灾害监测预警。hy-yuan@tsinghua.edu.cn

**通讯作者:**黄丽达,博士,助理研究员。huanglida@tsinghua.edu.cn

heuristic artificial intelligence early warning technology is presented, based on which a monitoring and early warning system is developed with collaborative sensing, fusion monitoring, targeting early warning, linkage response and other functions. The related studies result in the development of the safety and emergency response industry, followed by the pioneering and substantial contributions to the prevention and control of urban lifeline risks.

**Key words:** urban lifelines; risk assessment; elements-at-risk; disaster mechanism; monitoring and warning system

城市生命线是指保障城市(区域)内社会基础功能运转的系统性工程,主要包括电力、交通、通信、给排水、燃气、热力等系统<sup>[1-4]</sup>,是物质、能量运输的城市动脉。城市生命线系统作为一个复杂、开放的巨系统,具有公共性高、涉及面广、相关性强等特点<sup>[5-7]</sup>。目前中国城市生命线规模世界第一,高速城市化进程使基础设施需求激增,地上、地下互相重叠交错,长期高密度建设、高负荷运行使生命线复杂巨系统加速老化,导致该巨系统发展进入事故集中爆发期,且因事故导致资源严重浪费<sup>[8-11]</sup>:每年燃气爆炸事故800多起、路面塌陷600多起,灾害事故造成450多万用户停电;城市燃气年均泄漏约88亿m<sup>3</sup>(相当于深圳两年的用气量)、供水年均漏失约94亿m<sup>3</sup>,严重影响城市正常运行和人民生命财产安全。

近年来,随着人工智能、物联网、大数据和云计算等技术的迅猛发展,人类生活向数字化、网络化和智能化发展,传统基础设施的数智赋能建设在系列技术的普及推动下蓬勃发展。完善城市生命线管理及监测监控,构建城市生命线在线监测及预警预报体系,利用智慧化手段整合城市生命线基础数据资源,通过传感数据监测有助于为相关部门应急决策提供数据支持,实现城市从规划、建设到管理的全过程、全要素、全方位的数字化、网络化、智能化,全面提升城市生命线信息化水平和资源管理、运维养护、应急处置的能力,为城市的安全运行管理提供有力保障。

在城市生命线智能化建设方面,传感网络已被世界各国优选为风险源监测预警的重要途径之一,如美国通用PredixTM智能管道系统<sup>[12]</sup>、德国西门子MindSphere供水管网物联网系统<sup>[13]</sup>等。已开展的相关研究<sup>[14-18]</sup>与工程实践<sup>[19-23]</sup>均以城市生命线中某一风险源监测为主,而燃气泄漏、水漏失、杂散电流在地下空间跨界蔓延、扩散集聚、级联耦合与外溢放大引发的严重链式灾害防控,尚无可供借鉴的成熟经验。过去十年,清华大学合肥公共安全研究院(以下简称“清华合肥院”)在城市生命线监测预警的关键技术、核心装备研

发与应用方面投入了大量精力,取得了理论方法-技术装备-工程应用全链条系统性突破,建成了中国首个通过监测预警和高效处置保障城市安全运行的城市生命线安全工程。本文简要回顾了该领域的一些重要成果,主要包括城市生命线风险评估理论与方法、监测检测技术与装备、智能预警技术与系统。

## 1 城市生命线安全工程总体架构

城市生命线安全工程的核心理念是,从城市整体安全运行出发,以预防燃气爆炸、桥梁倒塌、城市内涝、路面塌陷、大面积停水停气等重大安全事故为目标,以公共安全科技为核心,以物联网、云计算、大数据等信息技术为支撑,透彻感知城市生命线运行状况,分析城市生命线风险及耦合关系,实现对城市生命线的风险识别、透彻感知、分析研判、辅助决策,使市政基础设施管理“从看不见向看得见、从事后调查处置向事前事中预警、从被动应对向主动防控”的根本性转变。城市生命线安全工程总体架构按照“感、传、知、用”的架构设计,分为“五层两翼”。“五层”依次为前端感知层、网络传输层、数据服务层、应用软件层和用户交互层;“两翼”是指遵循的标准规范与安全保障体系、运行管理与协同联动机制<sup>[24]</sup>,如图1所示。

## 2 城市生命线风险评估理论与方法

城市生命线风险关联交织,微尺度泄漏、小尺度传导、中尺度耦合、大尺度致灾的跨尺度特征显著,导致真实致灾过程难复现,非线性耦合灾害风险难揭示、难表征。高质量的风险评估结果是城市生命线智能监测感知与监测的基石,故在生命线监测感知与监测工作开展前,通过还原城市生命线真实环境,在精准可控的实验条件下进行最大程度的全尺寸灾害模拟,明晰生命线巨系统跨尺度、链式灾害致灾机理,为实施高质量风险评估奠定基础。

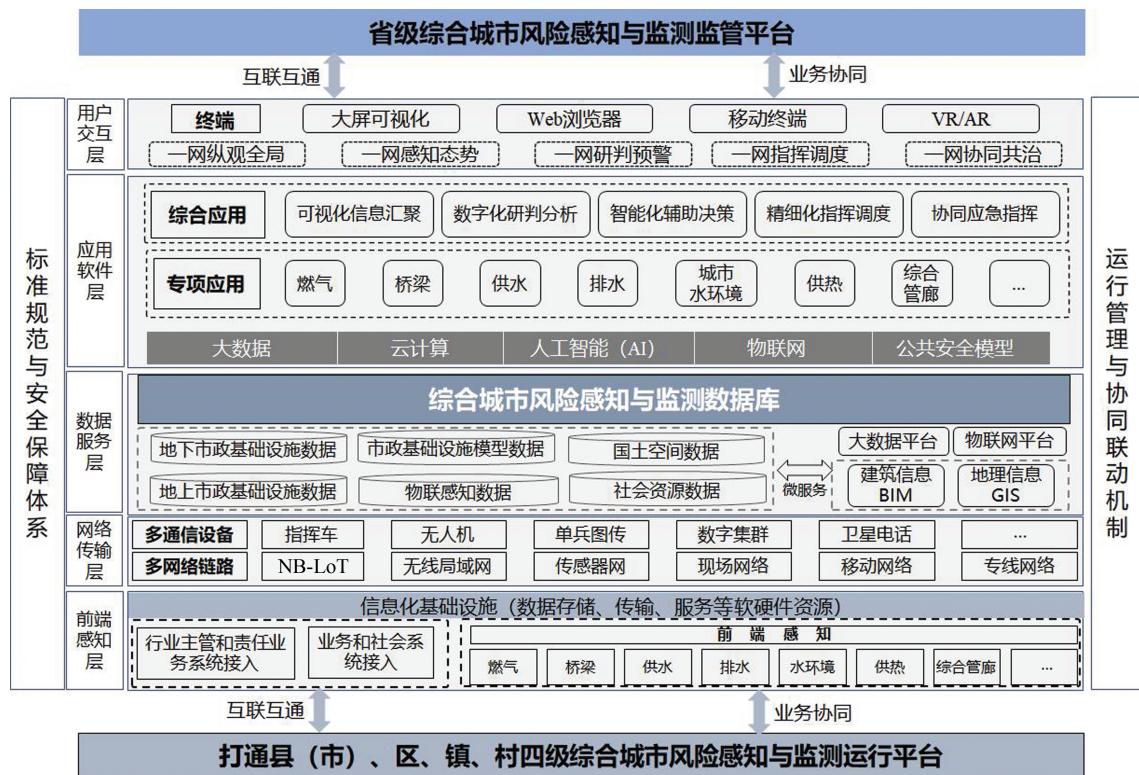


图 1 城市生命线智能感知与监测技术架构图

Fig. 1 Schematic of Urban Lifeline Intelligent Sensing and Monitoring Technology

## 2.1 城市生命线多灾种大型科学装置与实验

在灾害事故环境模拟与监测实验系统、灾害事故仿真与复杂系统建模技术等方面,发达国家在 20 世纪 70 年代就展开了相关研究(见图 2)。美国商业和房屋安全研究院建设大型飓风、降雨、火灾、冰雹等多灾种研究设施,实验舱尺寸为  $44.2 \text{ m} \times 44.2 \text{ m} \times 18.2 \text{ m}$ ,可研究模拟灾害对真实尺寸房屋、车辆等造成事故的影响。美国康奈尔大学建立了地下管道大型生命线测试设施(<https://lifelines.cee.cornell.edu/>),可模拟地面沉降、破坏、洪水、滑坡和地震等灾害场景,用以评估不同土壤特征(密度、水分含量和埋藏深度)对不同类型生命线(地下天然气、石油和水传输运输管道、电线管道、电信电缆等)的影响,但只能在常温实验环境下进行模拟实验。法国建筑学会建造了一套气候灾害风洞系统用于建筑、桥梁与户外设施的设计与结构改进,该系统可模拟各种气候环境灾害,包括强风、暴雨、雪灾和风暴潮等气候现象,同时可提供不同温度、沙土和烟雾等实验环境<sup>[25-26]</sup>。日本防灾科学技术研究所建立了世界最大全尺寸三维地震破坏实验设施<sup>[27]</sup>,该设施核心震动台的台面尺寸为  $20 \text{ m} \times 15 \text{ m} \times 5.5 \text{ m}$ ,最大承载能力 1 200 t,可模拟 7 级以上震级的地震,以最大水平和垂直方向分别为 200 cm/s

和 70 cm/s 的震动速度再现地震横纵向震动。该地震实验设施同时可与大型降雨装置、风雨实验楼、冰雪实验楼等实验装置联用,重点研究地震、火山、水土砂、冰雪灾害等耦合机理,注重多灾种耦合与风险评估的研究。



图 2 国外多灾害模拟实验平台

Fig. 2 International Multi-hazard Disaster Simulation Experiment Facility

为填补中国在城市生命线大型综合灾害模拟设施的空白,清华合肥院攻克了多灾种极端环境复现、热-力-电多类荷载耦合、城市生命线全尺寸、全要素重构等关键技术,研建了全球首套全

尺寸城市生命线灾害环境耦合模拟实验装置(见图3),可实现暴雨暴雪、极寒酷热等极端条件下生命线多灾耦合科学研究能力,与美国商业建筑安全研究中心相比,将模拟灾种类型增设至8个(增设暴雪、日照、高温和低温4类)。清华合肥院将深埋地下的燃气、电力、供水、排水、热力等管网“搬”进实验室,实现了复杂管网环境的真实重构和精准调控,成功解决了缩比实验和工程现场研究的失真和局限性问题。基于大型科学装置,率先开展了全尺寸城市生命线泄漏和燃爆实验,

揭示了地下空间气液多相输送、泄漏、扩散、集聚、爆炸全过程演化机理,阐明了埋地管网在对称及非对称动态电流干扰下的腐蚀规律,建立了动态杂散电流局部腐蚀管道的动力学机理模型。首次量化了全尺寸地下暗渠、连通管网、地下窨井等6类地下空间爆炸的冲击波超压、振动、高温、破片等危害因素的致灾特征,建立了生命线系统15类、169种灾害耦合致灾模型(见图4),获得了生命线设施设备、监测检测装备在极端环境下性能测试方法和失效规律。

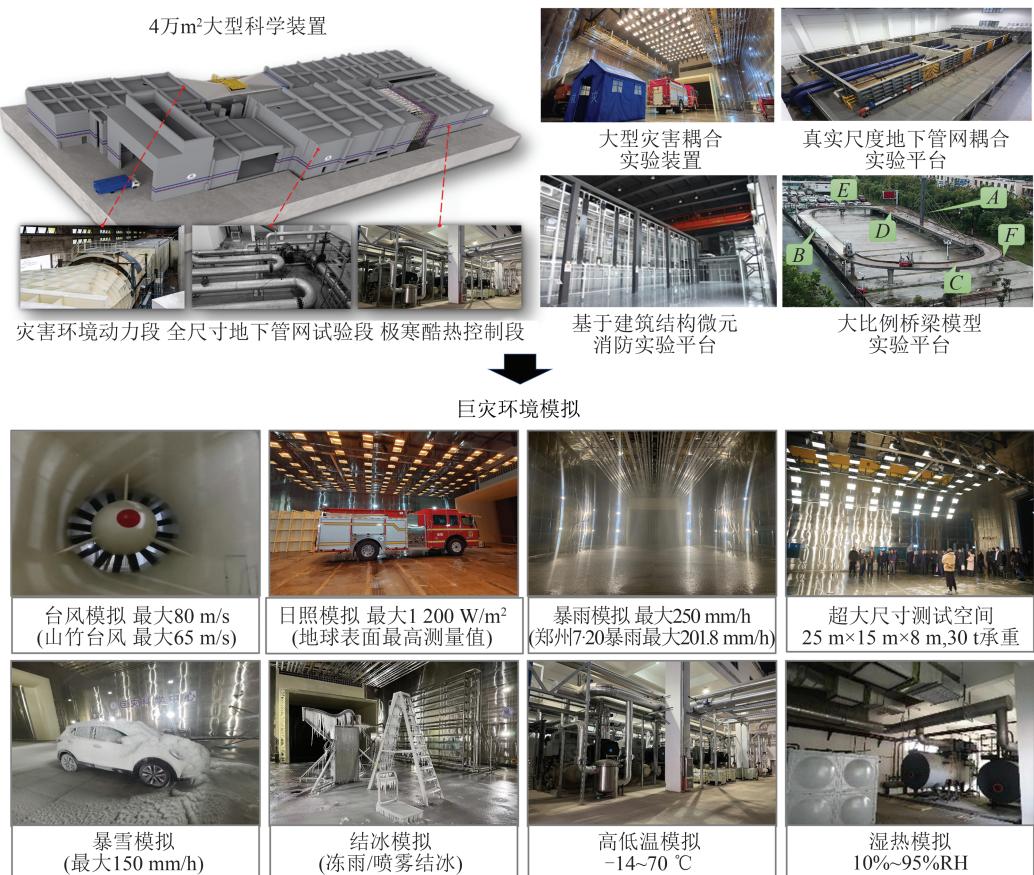


图3 全尺寸城市生命线多灾种大型科学装置

Fig. 3 Full-Scale Urban Lifeline Multi-hazard Large-Scale Scientific Device

## 2.2 城市生命线动态风险评估方法

城市生命线风险评估主要是对生命线管网的运行风险进行评估,评估流程是基于事故演化规律对城市生命线失效因素、失效可能性及失效后果进行分析,然后根据不同风险定义建立城市生命线风险评估的数学模型:基于城市生命线区域内灾害种类和初始风险特征,分析灾变动力学规律和灾害间耦合风险,结合综合风险信息和应对能力,评估城市生命线的最终综合风险<sup>[28]</sup>。针对城市生命线规模庞大、布局交错、风险叠加等问题,笔者团队基于国内外112条生命线系统事件链解耦分析,确定了需要考虑的灾害类型,发

现某些单一灾害可引发多种灾害同时发生<sup>[29-30]</sup>,故团队在单一灾害的基础上分析基于触发关系的物理和功能耦合关系并建立耦合规则,通过监测预警时空大数据与知识挖掘协同的风险全息扫描技术的突破,建立了地下管线与地上承灾体耦合的综合风险动态评估方法<sup>[19,31-33]</sup>(见图5)。

## 3 城市生命线监测检测核心技术与装备

城市生命线微小风险点多、面广,灾害前兆指征弱,风险检测监测难,为此发达国家开展了高性



图 4 灾害耦合致灾模型

Fig. 4 Coupled Disaster Causation Model

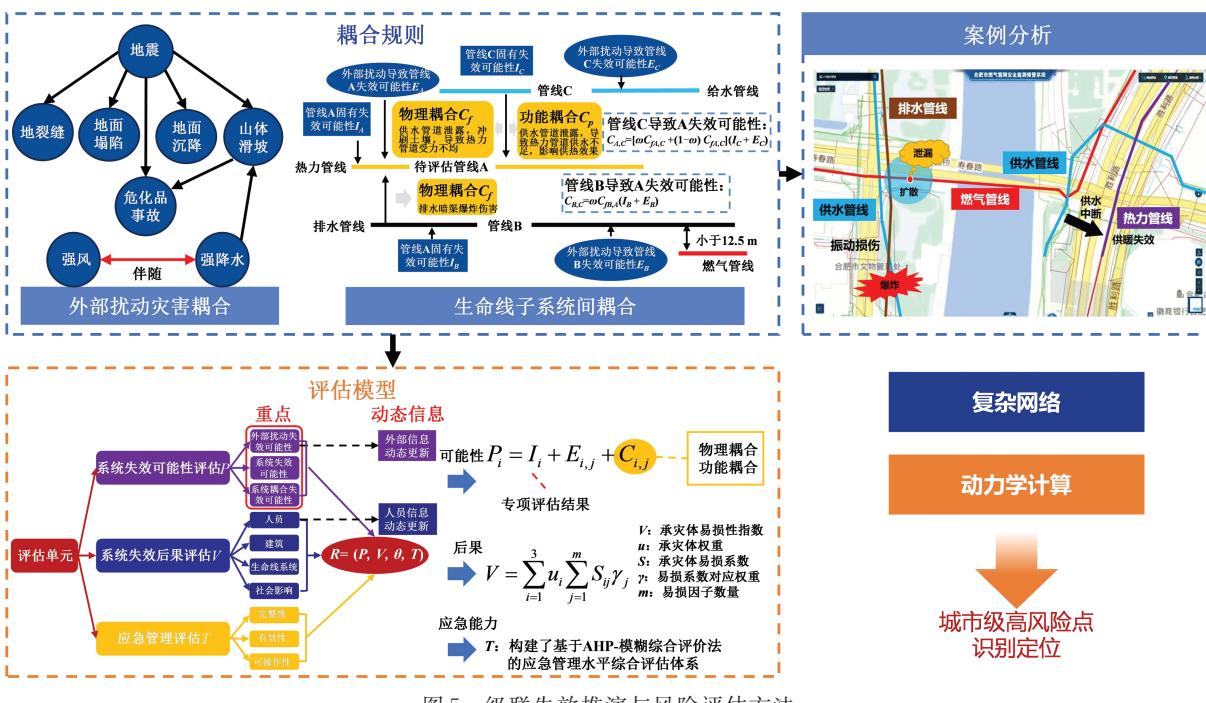


图 5 级联失效推演与风险评估方法

Fig. 5 Cascade Failure Rehearsal and Risk Assessment Methodology

能基础探测传感器研发,如基于声学探测的供水管网泄漏检测传感器<sup>[34-35]</sup>,基于无线电波的地面空洞塌陷检测传感器<sup>[36]</sup>,基于倾角、加速度、扭矩等高精度测量的桥梁变形监测传感器<sup>[37-38]</sup>等。中国在城市生命线监测预警方面虽在局部领域有进展,但整体水平较差,多数精密传感装备依赖进口,如燃气泄漏高灵敏传感芯片等,传感装备研发

跨学科合作难,缺乏系统性研究。如何实现城市全域燃气、供水、桥梁等生命线工程运转的精准监测和风险源精确定位,并在突破装备技术难题的同时摆脱进口依赖并打破技术垄断,是当前城市生命线监测检测核心技术与装备发展的方向。

### 3.1 燃气探测激光芯片和探测器

目前,半导体、电化学和催化燃烧等国内外

主流接触式燃气探测器存在灵敏度低、可靠性差、寿命短等问题,而燃气激光探测因高灵敏、快响应、免校准(5年内)等优势成为了未来燃气探测主要发展方向之一<sup>[39-41]</sup>。燃气激光探测器为保证波长一致性,需将激光输出波长精准锁定在燃气特征吸收峰附近,但国内外激光芯片波长一致性差( $\pm 1 \text{ nm}$ ),良品率低于50%,且波长锁定依赖半导体制冷器、封装工艺复杂、成本高昂(依赖进口),制约了燃气激光探测器在国内的规模化应用。为突破前述难题与制约,清华合肥院研制了国产化燃气探测激光芯片<sup>[42]</sup>,其控温原理是基于环境温度变化和所处温度场当前与目标温度,确定加热组件在温控周期内的加热功率。首先,依据当前环境温度变化计算PID(proportion, integral,differential)参数的调整量:

$$\begin{cases} \Delta K_p(i) = \text{etc}(i) \cdot a \\ \Delta K_i(i) = \text{etc}(i) \cdot b \\ \Delta K_d(i) = \text{etc}(i) \cdot c \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\Delta K_p(i)$ 、 $\Delta K_i(i)$ 、 $\Delta K_d(i)$ 依次为当前测温周期的比例参数调整量、积分参数调整量、微分参数调整量;etc为当前测温周期的环境温度变化情况;  $i$ 为测温周期的序号;  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 分别为比例参数、积分参数、微分参数的常量系数。然后依据PID

参数的调整量、所处温度场当前和目标温度计算当前温控周期的控制输出量  $M(n)$ :

$$M(n) = \left[ (K_p - \Delta K_p(i)) \cdot e(n) + (K_i - \Delta K_i(i)) \sum_{j=0}^n e(j) + (K_d + \Delta K_d(i)) [e(n) - e(n-1)] \right] \quad (2)$$

式中,  $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$ 依次为比例参数、积分参数和微分参数的常量系数;  $e(j)$ 为目标温度与第  $j$  个周期温度场的温差值;  $e(n)$  和  $e(n-1)$  分别为目标温度分别与当前温度场、上一个温控周期温度场的温差值,  $n$  为当前温控周期的序号。最后, 依据控制输出量确定加热组件的驱动功率, 先由控制输出量确定脉冲宽度调制信号的占空比, 再基于占空比计算所述加热组件的驱动功率。通过波长偏置与单向升温协同的激光波长锁定技术研发, 解决了半导体制冷器依赖问题, 通过国产化燃气探测激光芯片研制, 芯片波长一致性达到  $\pm 0.5 \text{ nm}$ , 优于国外高端产品, 良品率提高了一倍, 成本降低90%, 解决了良品率低和进口依赖的问题, 实现了高端器件国产自主可控(见图6)。

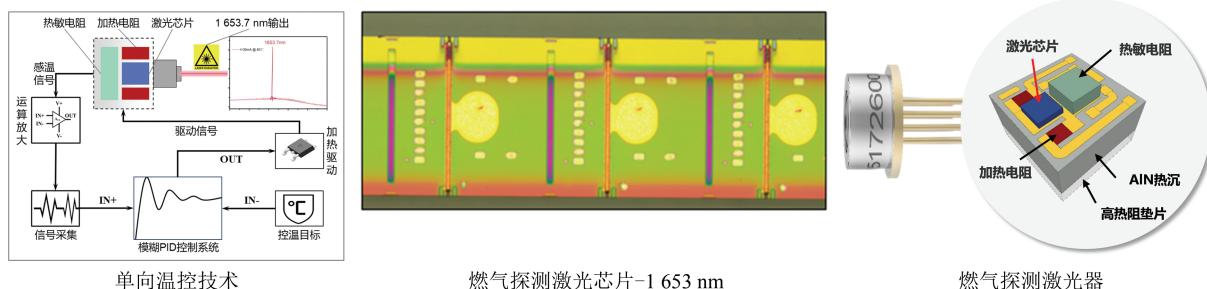


图6 燃气探测激光芯片和激光器

Fig. 6 Gas Detection Laser Chips and Detectors

现行燃气探测器在地下空间的工作环境可能存在强酸、强碱、高湿度、水淹等恶劣情况, 导致探测器工作寿命短(仅6个月)和稳定性差(每3~6个月需校准)。为实现高可靠性、高灵敏度和长寿命的燃气探测器以适用于地下恶劣环境, 清华合肥院研制了基于燃气探测激光芯片和激光器的燃气探测器(见图7)。通过叠复式激光光路、螺旋式进气气路和自闭式防水结构, 解决了稳定、高精度测量和防水抗腐蚀问题<sup>[43]</sup>, 实现了免标定(大于3年)的功能。通过不同类型井盖信号屏蔽效果、信号强度与一次通信成功概率研究, 基于窄带物联网的数据融合传输技术, 形成

了适用于地下环境条件下的数据传输机制。通过传感设备测量和数据传输能耗自主调控优化算法, 创新形成电池寿命与供电优化技术, 解决了传感器能耗高、工时短的问题, 极大延长了电池使用寿命。与国内外同类产品相比, 在燃气探测灵敏度、抗恶劣环境、工作寿命等方面达到或局部超过国内外同类产品。

### 3.2 供水管网泄漏定位智能球

国内外主流供水管道漏失检测与定位技术主要以大漏失量为主, 但面对城市供水管网微小泄漏时, 存在检测精度不够、抗干扰能力差、实施成本过高、漏失点定位偏差过大等问题, 高精度

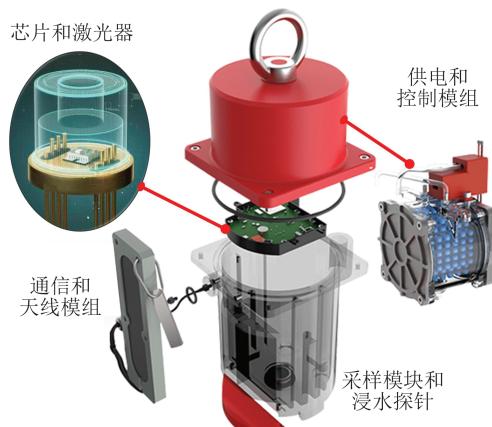


图 7 激光燃气探测器

Fig. 7 Laser Gas Detectors

检测与精准定位尚未得到有效解决。如何结合流体力学和声学等基础理论,应用声波检测和多数据融合定位技术,实现管网内微小漏失的精准检测与定位,是城市供水管网安全防控的重要研究方向之一。通过研究城市地下供水管道微小漏失在不同管道环境传播过程中各参量的衰减特性与变化规律,建立三维非稳态漏失声学模型,形成了微小泄漏信号时域分段频谱抗噪声干扰识别方法。如图 8 所示,通过听觉显著图技术<sup>[34,44]</sup>,识别漏失声波引发振动幅值和频率变化的凸显特征,灵敏度优于 0.3 L/min。

在定位供水管道泄漏点方面,研制了基于惯导、显著图识别、北斗的供水管网泄漏定位智能球(见图 9),定位精度±2 m,在国内率先实现了供水管线不停水精准泄漏定位检测能力,打破了国外技术装备垄断。泄漏定位智能球的工作原理是:首先,通过分析刚性球体管内运动受力特性与流场各状态参数之间的变化规律建立球体管内运动受力模型<sup>[45]</sup>(见图 10);然后,结合球体

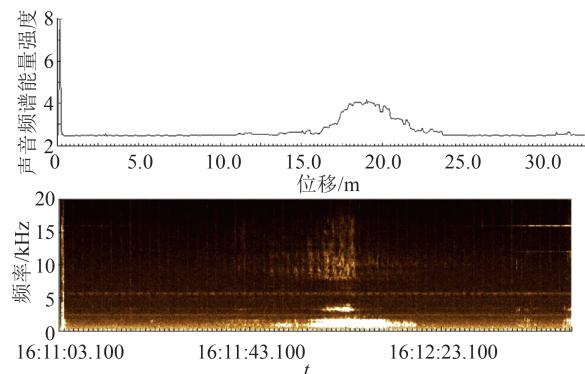


图 8 供水管道漏失信号听觉显著图

Fig. 8 Auditory Saliency Map of Water Supply Pipeline Leakage Signal

运动模型,通过复合振子的机电耦合特性、响应特性与能量转化效率分析,设计了复合超声波振子结构以超声波远距离传播(见图 11);最后,基于超声波及微机电系统数据融合技术,构建了一种基于扩展卡尔曼滤波的综合滑动速度与位置在线分析算法,实现了漏失检测仪管内远距离跟踪与漏失点精准定位,表达式如下<sup>[46]</sup>:

$$\hat{S}_{yk} = \hat{S}_{y(k-1)} + (N_{qk} - N_{q(k-1)}) \times D \times \pi + \frac{\hat{V}_x}{N} \quad (3)$$

式中,  $\hat{S}_{y(k-1)}$  为上个采样时刻智能球的定位值;  $N_{q(k-1)}$  为上个采样值时刻智能球的滚动圈数;  $\hat{V}_x$  为上个有超声波数据时综合滑动速度的估算值;  $D$  为智能球的直径;  $N$  为传感器采样频率。

### 3.3 桥梁整体模态(指纹)监测技术

针对城市桥梁车船撞击、车辆超载、恶劣天气、结构病害等可能存在风险,有学者<sup>[47-48]</sup>开展了桥梁多场景、多要素病害监测诊断试验,建立了桥梁监测传感器优化布设方法(见图 12)。通过监测桥梁结构动静态、外部环境指标(形变、

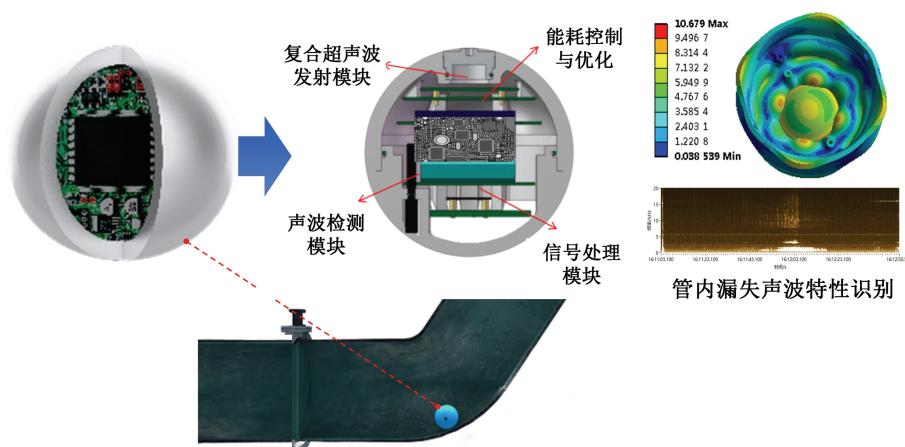


图 9 供水泄漏监测智能球

Fig. 9 Water Supply Leakage Monitoring Smart Sphere

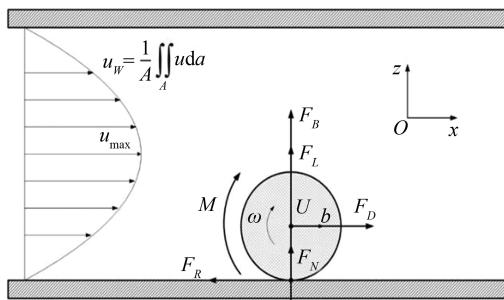


图 10 球体管内运动数学模型

Fig. 10 Mathematical Modelling of Sphere Motion in Tubes

位移、沉降、偏移、疲劳、模态特性等),将1~2年一次的阶段化评估转为每天早晚2次常态化评估,及时清晰地判断桥梁运行老化速度、结构弹性情况、不均匀沉降等信息,给桥梁的运行和养护提供科学支撑,确保桥梁疾病“早发现,早处置”。形成的基于多参数耦合分析方法的桥梁整体模态(指纹)监测技术(见图13),将桥梁安全状

况实时把控,当桥梁出现严重超载、车船撞击、地震等严重影响桥梁结构安全的状况时,桥梁结构指纹对比技术在2 h内便可做出桥梁重大突发事故影响分析,改变了通过封桥、限行进行长时间检测的传统模式。

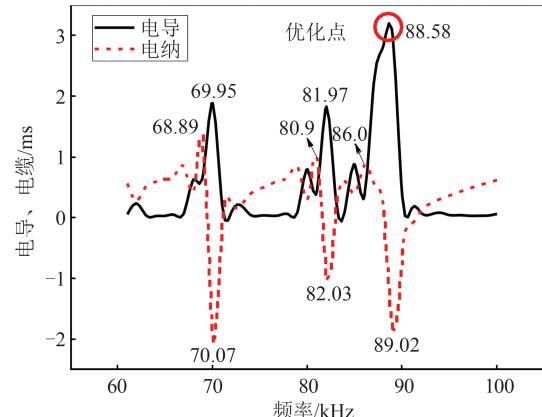


图 11 超声波脉冲发射优化

Fig. 11 Ultrasound Pulse Emission Optimization

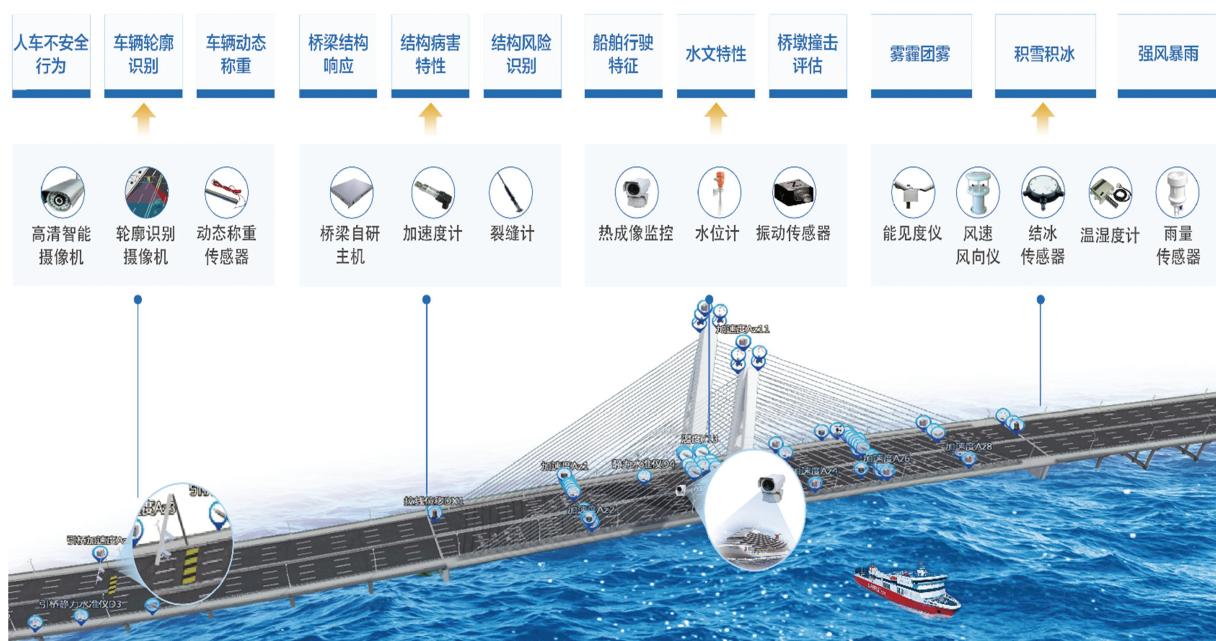


图 12 桥梁监测传感器优化布设方法

Fig. 12 Optimized Deployment Method for Bridge Monitoring Sensors

## 4 城市生命线安全工程监测预警系统

### 4.1 基于物联网的多源协同监测技术

生命线监测是确保城市安全和稳定运行的重要环节之一,针对供水、供电、燃气、交通和通信网络等不同场景,涵盖多系统管龄、管材、结构特征、巡检维护、运行工况、监测数据等要素,而信息来源广泛、数据格式与标准不一、质量参差不齐、误报滋扰大量汇聚,全要素数据融合、

关联分析和融合监测能力亟待提升。为提升监测准确性与效率,物联网技术的引入实现了全面感知、接入、监控和预警,整合并分析来自不同监测源的数据,实现了传感器、智能设备与系统间的互联互通,为决策提供科学支撑。以燃气监测为例,地下空间内常以甲烷气体浓度(燃气主要成分)判断是否发生泄漏,然而沼气(甲烷为主)存在常引发监测的误报漏报。清华合肥院基于燃气和沼气在浓度、温度变化趋势上

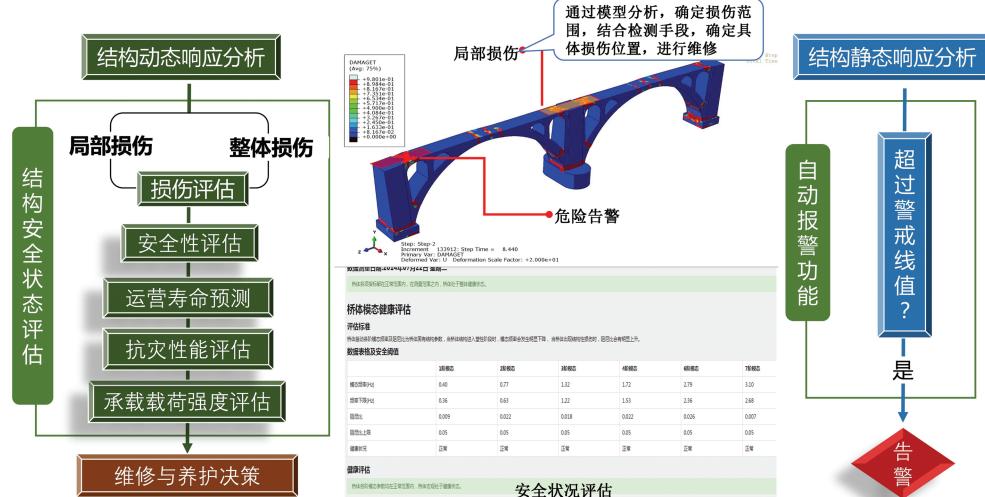


图 13 桥梁整体模态监测技术

Fig. 13 Overall Modal Monitoring Technology for Bridges

的特征分析,通过燃气管网及相邻地下空间安装的可燃气体监测设备,将监测数据接入物联网系统,同时采集并分析温度、风速、天气等多源数据,结合信号特征中周期性、多探测器信号

的时空相似性信息,实现了燃气泄漏与沼气误报的快速智能甄别,大幅降低了人工审核压力(见图 14),进而为更大规模的监测预警能力奠定基础。

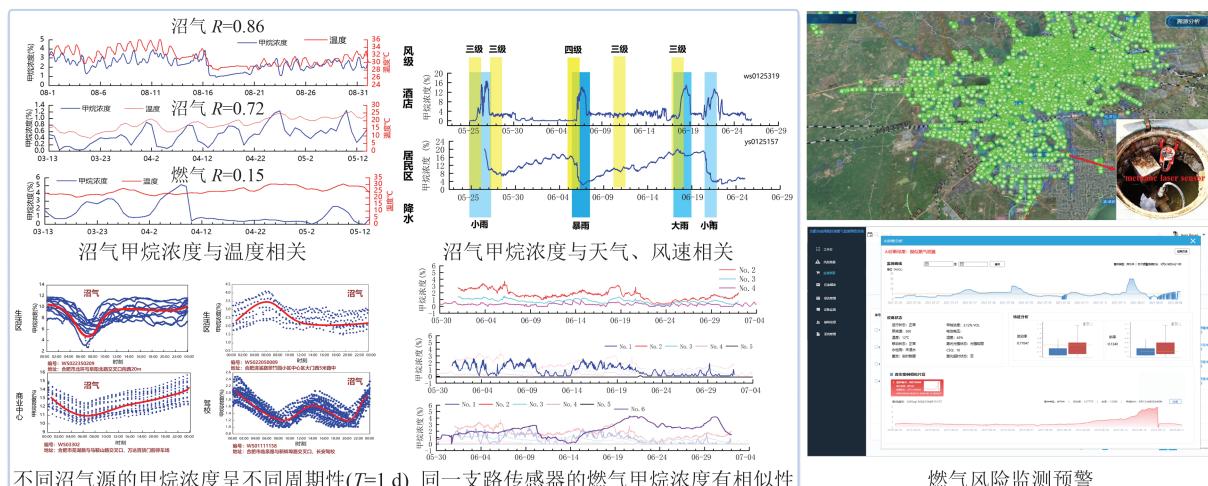


图 14 燃气与沼气快速甄别模型及效果

Fig. 14 Rapid Screening Modelling and Effectiveness of Gas and Biogas

## 4.2 智能化数据分析与推演技术

如前所述,物联网接入后可融合的多源数据提取关键特征,如通过探测器获取的燃气泄漏扩散、供水爆管、路面塌陷、电网台风灾损等灾害早期过程的物理特性,以及地质环境、人口、经济、重要目标等承灾载体特性,结合风险评估过程建立事故推演模型,可预测事故可能的影响范围和严重程度,为应急措施和决策方案的制定提供基础,减少主观判断的误差,从而采取正确的预防措施避免事故的发生或扩大。清华合肥院研发的启发式人工智能预警技术将风险数据推断和

物理机制相融合(见图 15),成功应对燃气泄漏扩散溯源、供水爆管风险预警、路面塌陷衍生灾害、电网台风灾损预测等多种城市生命线事故场景,将事故监测结果与风险推演过程有效结合。以燃气泄漏爆炸事故为例,当燃气管道发生泄漏后,可以根据报警点的周围环境信息,如密度、孔隙率、含水量、天气变化、降雨、干旱、高低温、冻土等对土壤的影响等,估算燃气扩散的半径,使用优化算法和随机逼近等反演方法可以实现对密封空间泄漏源的定位与泄漏量计算,针对性地构建不同介质的燃气泄漏扩散模型与燃爆风险

量化表征模型,进而确定发生泄漏的可能位置与严重程度。此外,启发式人工智能预警技术还可

为决策者提供如气体积聚浓度分析、事故风险预警等级、事故灾害损失评估等多方面信息。

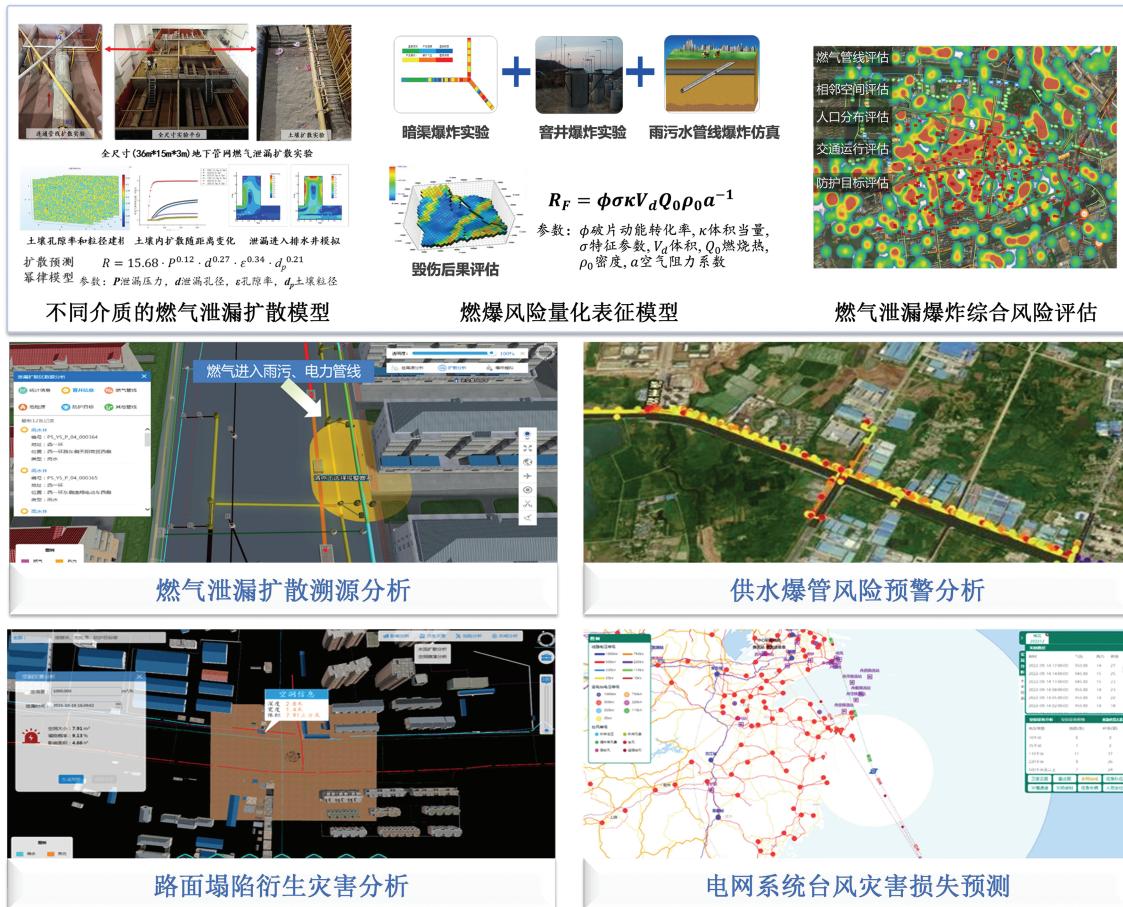


图 15 启发式人工智能预警技术

Fig. 15 Heuristic Artificial Intelligence Early Warning Techniques

#### 4.3 综合预警系统与平台建设

城市生命线监测预警方法的实现与运转关键在于数字化系统,构建基于物联网、云计算、网络通信与数据处理的平台是预警系统的基础。系统平台需要包含风险态势一张图、运行态势感知、综合分析研判、协同联动处置等重要功能,同时针对各类城市生命线专项构建应用系统,并包含监测中心、综合展示区、值班操作区、监测区、会商研判区、应急决策区、运行保障区等功能分区。监测中心用于开展风险感知、监测报警、研判预警和联动处置,综合展示区用于实现监测中心数据展示和跟踪处置,值班操作区用于实现设备控制和各应用系统调用等功能,监测区用于运行监测和报警处置功能,会商研判区用于各类突发风险事件的专家研讨分析功能,应急决策区用于主要领导对各类突发事件的决策、指挥等功能,平台的运行保障区包括机房、设备运行监控和库房等场所。

清华合肥院创建了首个城市生命线安全运行监测预警系统,以地质环境、人口、经济、重要目标

等承灾载体以及救援队伍、物资装备等应急救援数据作为主体,结合多数据要素融合的预警方法,实现分级靶向预警并支撑跨部门联动快速响应。监测预警系统布设在各级预警中心(见图 16),以轮岗值班和协同处置相结合的形式,实现输电线路安全、供水安全、热力安全、燃气安全、排水安全、综合管廊安全等多种类城市生命线安全的监测预警与协同应急云服务,日均分析数据达 500 亿条,为全国城市生命线安全运行提供了支撑,与欧美国家供水监测和燃气监测等各自独立的系统相比,实现了城市生命线安全工程水电气多领域的协同感知、融合监测、靶向预警和联动响应。

## 5 结语

城市生命线安全工程作为国家重大民生工程,是国家公共安全的重要基石。由于城市生命线规模庞大、布局交错、复杂系统关联交织,生命线安全工程面临多灾种级联耦合、灾前特征弱、全



图 16 生命线安全运行监测预警系统

Fig. 16 Monitoring and Early Warning System for Safe Operation of Urban Lifelines

域感知难、靶向预警和协同防控难以实现等问题,已成为世界性难题,且在国内外没有可供借鉴的成熟经验。本文介绍了清华大学团队在城市生命线安全工程取得的科学装置、基础理论、关键技术装备、预警技术与系统等研究成果。相关成果已在全国范围推广应用,为国家安全发展示范城市和城市安全风险综合监测预警平台建设提供了关键技术和装备支撑,得到了国家有关部门和领导的高度肯定。未来仍将科学研究、技术创新和风险防控应用在城市安全治理框架中,全方位感知城市环境、基础设施、运行系统中的海量信息,进一步推动公共安全治理模式向事前预防转型。

## 参 考 文 献

- [1] Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Terminology in Earthquake Engineering: JGJ/T 97—2011 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (中华人民共和国住房和城乡建设部. 工程抗震术语标准: JGJ/T 97—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.)
- [2] Shiro T, Junichi U. Failure Analysis Urban Lifeline System by Statistical Technique [J]. *Memoirs of the Graduate School of Science and Technology*, 1983, 1A: 19–30.
- [3] Motteff J D, Copeland C, Fischer J W. Critical Infrastructure: What Makes an Infrastructure Critical? [R]. Report for Congress, 2003.
- [4] Yang Jiandong. Research and Application of Key Technologies of Internet of Things for Urban Lifeline Management [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2016. (杨建栋. 面向城市生命线管理的物联网关键技术研究与应用[D]. 北京: 北京工
- 业大学, 2016.)
- [5] Zhou Qianqian. Evaluation of Disaster Prevention Toughness of Urban Lifeline Engineering [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020. (周倩倩. 城市生命线工程防灾韧性度评价[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.)
- [6] Li J, Liu W. Lifeline Engineering Systems [M]. Singapore: Springer Nature Singapore, 2020.
- [7] Fu Ming, Tan Qiong, Yuan Hongyong, et al. Development of Urban Lifeline Monitoring Standard System [J]. *China Safety Science Journal*, 2021, 31(1): 153–158. (付明, 谭琼, 袁宏永, 等. 城市生命线工程运行监测标准体系构建[J]. 中国安全科学学报, 2021, 31(1): 153–158.)
- [8] Wan Li, Han Yun, Zheng Ju. Research on Risk Monitoring and Response for Safe Operation of Urban Lifelines [J]. *Electrical Technology of Intelligent Buildings*, 2024, 18(1): 31–34. (万力, 韩运, 郑驹. 城市生命线安全运行风险监测及响应研究[J]. 智能建筑电气技术, 2024, 18(1): 31–34.)
- [9] Xiang W N, Stuber R M B, Meng X C. Meeting Critical Challenges and Striving for Urban Sustainability in China [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(4): 418–420.
- [10] Li Ruofei. Study on Vulnerability Assessment of Urban Lifeline System from the Perspective of Disaster Loss [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017. (李若飞. 灾害损失视角下城市生命线系统脆弱性评估研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2017.)
- [11] 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. (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.)
- [12] Axel H, Elaine H, Mauricio P. Intelligent Pipeline Solution: Leveraging Breakthrough Industrial Internet Technologies and Big Data Analytics for Safer, More Efficient Oil and Gas Pipeline Operations [C]// Pipeline Technology Conference, Berlin, Germany, 2015.
- [13] Ostroukh A, Karelina M, Filippova N, et al. Intelligent System for Digital Substation Control [J]. *Transportation Research Procedia*, 2021, 57: 385–391.
- [14] Huang Ping, Wu Ziqian, Yuan Mengqi, et al. Analysis of Gas Leakage Features of Urban Inspection Wells Based on Real-Time Monitoring Data [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2019, 19(2): 569–575. (黄平, 吴子谦, 袁梦琦, 等. 基于实时监测数据的城镇窨井可燃气体泄漏特性分析[J]. 安全与环境学报, 2019, 19(2): 569–575.)
- [15] Wang Chunxue. Study on Disaster Evolution and Risk Assessment of Urban Gas Pipeline Network Leakage[D]. Beijing: Capital University of Economics and Business, 2018. (王春雪. 城市燃气管网泄漏致灾演化与风险评价研究[D]. 北京: 首都经济贸易大学, 2018.)
- [16] Qian J L, Du Y Y, Liang F Y, et al. Evaluating Resilience of Urban Lifelines Against Flooding in China Using Social Media Data [J]. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 2024, 106: 104453.
- [17] Nourzadeh D, Mortazavi P, Ghalandarzadeh A, et al. Numerical, Experimental and Fragility Analysis of Urban Lifelines Under Seismic Wave Propagation: Study on Gas Distribution Pipelines in the Greater Tehran Area [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2020, 106: 103607.
- [18] Wang L Y, Li Z T, Han J, et al. A Cost-Effective Earthquake Disaster Assessment Model for Power Systems Based on Nighttime Light Information [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(6): 2325.
- [19] 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. (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.)
- [20] Bai Guangbin. Study on the Application of GIS-Based Earthquake Damage Prediction System for Urban Lifeline [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007. (白广斌. 基于GIS的城市生命线震害预测系统应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.)
- [21] Han J Q, Chen J G. Research on Integrated Monitoring and Emergency Disposal Technology of Urban Gas Pipe Network Internet of Things [J]. *China Management Informationization*, 2017, 20 (19): 186–189.
- [22] Fujiwara T, Adachi A, Shimazaki Y, et al. Interference of Wireless LAN and Mitigation Technique on TD-CDMA System for City Lifelines Monitoring [J]. *IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems*, 2001, 121(11): 1727–1733.
- [23] Kang L S, Liu S F, Zhang H K, et al. Person Anomaly Detection-Based Videos Surveillance System in Urban Integrated Pipe Gallery [J]. *Building Research & Information*, 2021, 49(1): 55–68.
- [24] Zheng Ruibo, Luo Geng. Design and Implementation of Urban Underground Municipal Infrastructure Management Platform [J]. *Urban Geotechnical Investigation & Surveying*, 2023(3): 29–33. (郑睿博, 骆庚. 城市地下市政基础设施管理信息平台设计与实现[J]. 城市勘测, 2023(3): 29–33.)
- [25] Gandemer J. La Soufflerie Climatique "Jules Verne" [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1992, 41(1/2/3): 43–54.
- [26] Imaizumi T. Technical Trends on Wind Tunnel Europe. Oshu ni okeru fudo gijutsu no doko [J]. *Jidōsha Kenkyū*, 1993, 15(1): 16–23.
- [27] Ling Xianchang. E-Defense and Research Tests [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2008, 28(4): 111–116. (凌贤长. E-Defense建设与相关研究[J]. 地震工程与工程振动, 2008, 28(4): 111–116.)
- [28] Yuan Mengqi, Qian Xinming, Gao Yuan, et al. Urban Lifeline Risk Assessment Method and Device: CN111784107A [P]. 2020-10-16. (袁梦琦, 钱新明, 高源, 等. 城市生命线风险评估方法和装置: CN111784107A [P]. 2020-10-16.)
- [29] Li Miao, Chen Jianguo, Chen Tao, et al. Probability for Disaster Chains in Emergencies [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2010, 50(8): 1173–1177. (李藐, 陈建国, 陈涛, 等. 突发事件的事件链概率模型[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2010, 50(8): 1173–1177.)
- [30] Weng Wenguo, Ni Shunjiang, Shen Shifei, et al. Dynamics of Disaster Spreading in Complex Networks [J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, 56 (4): 1938–1943. (翁文国, 倪顺江, 申世飞, 等. 复杂网

- 络上灾害蔓延动力学研究[J]. 物理学报, 2007, 56(4): 1938-1943.)
- [31] Gai Chengcheng, Weng Wenguo, Yuan Hongyong. Multi-hazard Risk Assessment Using GIS in Urban Areas[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2011, 51(5): 627-631. (盖章程, 翁文国, 袁宏永. 基于 GIS 的多灾种耦合综合风险评估[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2011, 51(5): 627-631.)
- [32] Zheng Yiting, Su Guofeng, Chen Jianguo, et al. Model on Reliability of Earthquake-Damaged Water System with Effects of Electric Power Availability [J]. *Journal of Catastrophology*, 2015, 30(3): 204-207. (郑艺婷, 苏国锋, 陈建国, 等. 震害下考虑供电的供水管网可靠性分析模型[J]. 灾害学, 2015, 30(3): 204-207.)
- [33] Zhou Yang, Li Yunfei, Yuan Hongyong, et al. Identification Method of Long Distance Pipeline Leakage Based on Auditory Saliency Map[J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2020, 50(4): 1487-1494. (周扬, 李云飞, 袁宏永, 等. 基于听觉显著图的长输管道漏失检测算法[J]. 吉林大学学报(工学版), 2020, 50(4): 1487-1494.)
- [34] Hunaidi O, Chu W, Wang A, et al. Detecting Leaks in Plastic Pipes[J]. *Journal AWWA*, 2000, 92(2): 82-94.
- [35] Gao Y, Brennan M J, Joseph P F, et al. On the Selection of Acoustic/Vibration Sensors for Leak Detection in Plastic Water Pipes[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2005, 283(3/4/5): 927-941.
- [36] Chen D H, Wimsatt A. Inspection and Condition Assessment Using Ground Penetrating Radar [J]. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2010, 136(1): 207-214.
- [37] Gatti M. Structural Health Monitoring of an Operational Bridge: A Case Study[J]. *Engineering Structures*, 2019, 195: 200-209.
- [38] Bao Y Q, Chen Z C, Wei S Y, et al. The State of the Art of Data Science and Engineering in Structural Health Monitoring [J]. *Engineering*, 2019, 5(2): 234-242.
- [39] Werle P. A Review of Recent Advances in Semiconductor Laser Based Gas Monitors[J]. *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 1998, 54(2): 197-236.
- [40] Stetter J R, Li J. Amperometric Gas Sensors: A Review [J]. *Chemical Reviews*, 2008, 108(2): 352-366.
- [41] Aldhafeeri T, Tran M K, Vrolyk R, et al. A Review of Methane Gas Detection Sensors: Recent Developments and Future Perspectives[J]. *Inventions*, 2020, 5(3): 28.
- [42] Liu Yunlong, Yin Songfeng, Cheng Yue, et al. Full Range and High Precision Laser Methane Sensor Based on Algorithm Fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2024, 61(19): 1928001. (刘云龙, 殷松峰, 程跃, 等. 基于算法融合的全量程高精度激光甲烷传感器[J]. 激光与光电子学进展, 2024, 61(19): 1928001.)
- [43] Li Yayun, Wang Xiang, Cao Kai, et al. Experimental Study on the Adaptability of Laser-Type Methane Detectors to Extreme Climatic Environments [J]. *Equipment Manufacturing Technology*, 2023(8): 5-6, 27. (李亚运, 王祥, 操凯, 等. 激光式甲烷探测器极端气候环境适应性试验研究[J]. 装备制造技术, 2023(8): 5-6, 27.)
- [44] Simonyan K, Vedaldi A, Zisserman A. Deep Inside Convolutional Networks: Visualising Image Classification Models and Saliency Maps [J]. ArXiv e-Prints, 2013: arXiv: 1312.6034.
- [45] Xu Wei, Zhang Fei, Li Yunfei, et al. Mechanical Behavior of a Moving Sphere in Water Supply Pipelines[J]. *Journal of Lanzhou Institute of Technology*, 2020, 27(2): 1-8. (许威, 张飞, 李云飞, 等. 供水管道中球体运动受力特性分析[J]. 兰州工业学院学报, 2020, 27(2): 1-8.)
- [46] Li Yunfei, Wang Weihao, Fu Ming, et al. Positioning of Spherical Detector for Water Supply Pipeline Based on Ultrasonic Method [J]. *Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)*, 2023, 53(5): 1505-1513. (李云飞, 汪炜昊, 付明, 等. 供水管道球形检测器超声波定位技术[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(5): 1505-1513.)
- [47] Lan Mingqiang, Liu Xiaoyong, Wang Xiang, et al. Bridge Front-End Monitoring Sensor Field Calibration Engineering Practice: Taking a City Lifeline Project as an Example [J]. *Construction Economy*, 2022, 43(S1): 1055-1059. (兰明强, 刘小勇, 王祥, 等. 桥梁前端监测传感器现场校准工程实践: 以某城市生命线工程项目为例[J]. 建筑经济, 2022, 43(S1): 1055-1059.)
- [48] Qin Huairong, Chen Yong, Jin Yong, et al. Research on Bridge Monitoring and Warning System Based on Internet of Things Technology [J]. *Theoretical Research in Urban Construction*, 2017(36): 137-139. (秦怀荣, 陈涌, 金勇, 等. 基于物联网技术的桥梁安全监控预警系统研究[J]. 城市建设理论研究(电子版), 2017(36): 137-139.)