

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.08.009

## 综合管廊运维目标、原则及新技术应用

许云骅<sup>1</sup>, 金善朝<sup>2</sup>, 徐浩煜<sup>3</sup>

(1. 上海市城市建设设计研究总院<集团>有限公司, 上海 200125; 2. 江苏安防科技有限公司, 江苏 南京 211808; 3. 联想研究院 上海分院, 上海 201203)

**摘要:** 自 2015 年以来,我国综合管廊建设规模和里程已达到世界前列,目前已将重心从建设转移到运维上。总结归纳了综合管廊运维中需要达成的目标及应该贯彻的原则,介绍了提升综合管廊运维管理水平的新技术,并参考已有市政设施管理模式提出未来综合管廊运维的发展方向,以期综合管廊运营单位“怎么做”“如何做”提供借鉴。

**关键词:** 综合管廊; 运维; 智能巡检机器人; 人工智能

**中图分类号:** TU990.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)08-0053-06

## Targets, Principles and New Technologies Application of the Utility Tunnel Operation and Maintenance

XU Yun-hua<sup>1</sup>, JIN Shan-chao<sup>2</sup>, XU Hao-yu<sup>3</sup>

(1. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute <Group> Co. Ltd., Shanghai 200125, China; 2. Jiangsu I-Front Science & Technology Co. Ltd., Nanjing 211808, China; 3. Shanghai Branch, Lenovo Research Institute, Shanghai 201203, China)

**Abstract:** Since 2015, the construction scale and built length of utility tunnels in China are at the frontline in world. At present, the focus has shifted from the construction to the operation and maintenance. This paper summarizes the targets and principles of the operation and maintenance of the utility tunnels, and introduces some new technologies, which may improve the performance of the operation and maintenance of the utility tunnels. Based on the existing management model of the municipal facility, the development direction of operation and maintenance for the utility tunnel is proposed, so as to provide reference for the related units and departments.

**Key words:** utility tunnel; operation and maintenance; intelligent inspection robot; artificial intelligence

综合管廊可以有效收纳各类市政管线、节约地下空间,是提高地下管线建设和管理水平的重要方法之一。截止到 2017 年,全国累计建成综合管廊约 4 700 km,基本达到预期目标,建设规模和里程居世界前列<sup>[1]</sup>。如今综合管廊的重点转移到运维上,因此部分城市如西安、南京、临沂、深圳等地区出台了

综合管廊管理办法,将运维管理放在首位。业已发布的《城市地下综合管廊运行维护及安全技术标准》(GB 51354—2019),说明各方对综合管廊的运行维护已形成基本共识。在前期建设的过程中,已有国外经验证明对综合管廊实行全生命周期管理,运维管理提前介入到设计阶段等做法有助于提升综

合管廊运维品质,如新加坡滨海湾综合管廊实现了亚洲第一个综合管廊全生命周期运维<sup>[2]</sup>,日本临海副都心东京港地下管线共同沟利用信息化技术,将传感器大量布置在廊体内,实现了综合管廊的实时管理<sup>[3]</sup>。因此全生命周期管理应成为今后我国综合管廊运维中需要实践和贯彻的重要理念。

由于我国从2015年起开始大规模兴建综合管廊,目前实际投入运营的管廊案例还不多,知名度较高的有上海张扬路综合管廊、世博园综合管廊、长沙高铁新城综合管廊、合肥高新区综合管廊等。从已建成管廊的运维情况看,我国综合管廊运维的经验还不够丰富,主要体现在数据存量不完整、数据标准不一致、信息采集不统一、网络建设不规范、运维平台不统一等<sup>[4]</sup>。为此,有必要对综合管廊运营单位“怎么做”“如何做”进行探讨。

## 1 综合管廊运维原则

### 1.1 满足入廊管线要求

做好综合管廊运维的前提是做好运维目标、运维业务等的梳理、固定及标准化,与管线权属单位做好沟通并形成相关机制,尽可能满足入廊管线要求。规范化综合管廊运维业务需要因地制宜、因廊制宜,必须满足入廊管线的规格、数量和风险控制要求,并明确管线权属单位的工作界面。可以预见这些工作非常繁杂,需要在实践中不断摸索和改进。

### 1.2 安全性

综合管廊运维需要综合考虑管廊日常运行安全,包括但不限于安保、物性参数等内容,这需要在设计相关系统时充分调研运维单位的需求并加以实施。设计单位可以适时引入新技术和新方法,以提高综合管廊运维的信息化水平。

### 1.3 经济性

综合管廊运维要积极应用人工智能等技术,实现智能控制、应急辅助决策等。智慧化可以辅助决策、降低人为风险,从而提高综合管廊运维的效率和经济效益,为未来实现“少人管理”乃至“无人管理”奠定基础。在实施智慧化方案时要进行技术经济分析,确保方案的经济合理性和运维效益的正外部性。

## 2 综合管廊运维目标及内容

由于综合管廊内作业属于地下有限空间作业,作业空间受限、环境条件复杂、安全风险因素多,同时同一舱室内可能敷设多种管线,管养任务重、难度大,因此给综合管廊运维带来更大的挑战。

## 2.1 综合管廊运维目标

### 2.1.1 安全

综合管廊是城市生命线工程,对维系城市功能正常运作具有决定性作用。同时综合管廊也是重要的战略目标,战时非常容易受到攻击。因此要将安全放在综合管廊的首要位置。

① 保障结构及管线正常运行。相比直埋管道,综合管廊内的管道所处环境较为适宜,且基本杜绝了外力破坏等人为事故。但是目前大多数综合管廊为了减少造价,多将各类管线布置在同舱,一旦发生事故可能会造成严重后果。因此,管廊运维不仅要保证综合管廊的结构安全,还要兼顾管线的正常使用。

② 与城市综合防灾机制联动。随着温室效应的加剧,极端暴雨天气出现频率越来越高。综合管廊也与其他地下构筑物一样存在城市内涝风险,需要与省市级的综合防灾平台联通,共享监测数据和警报信号,以便有关部门及时处理处置。

③ 确保城市地下国土的安全。综合管廊作为地下国土的重要组成部分,承担着城市正常运行的重要职责。目前综合管廊兼顾人防的研究和工程案例较少,因此在综合管廊运维中需要加强保密制度建设和提高抗打击能力。对于国家重点城市和地区建设的综合管廊,在运维过程中更应做好有关预案。

### 2.1.2 高效

综合管廊的运维工作包括日常巡检、大中小修和应急抢修,运维过程中形成的大量过程文件和数据需要整理和报送。目前可以通过物联网、三维可视化、大数据分析等技术建立运维管理系统平台来实现高效管理的目的<sup>[5-6]</sup>。

① 直观显示运维情况。综合管廊运维应将管理人员关注的信息经可视化处理后展现出来,主要分为地理信息、组织信息、设备及检修信息和实时监控等内容。

② 精细管理资产情况。利用精细建模可以将实物资产与虚拟资产实现构件级的对应,并实现可视化、实时化、动态化分析各类资产的位置、残值及生命周期状态,还可以按照空间位置或系统管理各类资产,从而提升管理效率。

### 2.1.3 绿色

综合管廊内最大的成本为能量费用(主要为电费),通过制定合理的运维调度和管理策略可大大

降低综合管廊内的能耗,对降低综合管廊运维成本具有重要意义。

① 节省能量开支。利用智能运维系统监测到的管廊环境数据(如温度、湿度)来启闭风机进行通风、除湿。国内已有案例通过传感器感知人的行动轨迹来启闭照明。上述措施可以有效减少综合管廊内的能量消耗,从而节省运维开支。

② 减少管道漏损。直埋管道与土壤接触,受管材材质、杂散电流及土壤理化特点的影响,容易产生腐蚀现象。控制综合管廊内的温度、湿度,可以实现管道正常寿命应有的环境。但是管廊内施工面较小,可能造成管道连接不够紧密,出现局部的“跑冒滴漏”现象。这需要在运维过程中加强人员巡视或采用其他手段判断管道漏损情况并提出预警。

## 2.2 综合管廊运维内容

信息化和 BIM 技术可以为综合管廊运维的安全、绿色和高效三大目标的实现提供帮助,大数据和人工智能的发展也给综合管廊运维提供了很大的想象空间。大数据和人工智能可以通过挖掘混凝土和设备背后的信息,从而降低运维人员的工作强度并提高工作效能,同时提高设备的使用效能,从而达到绿色、经济的要求。

### 2.2.1 BIM + 可视化技术

① 数据统计及展示。结合 GIS 和 BIM 技术,可对综合管廊数据模型进行属性查看、测量及多角度观察等,方便管理人员规划巡检或逃生路线。将管廊内的设备、运维数据与 BIM 模型进行关联,可以随时调取和录入施工、安装、调试和管养等信息,方便管理人员制定运维计划。

② 多维度调度指挥。作为综合管廊运维的核心,运维管理应包括应急预案、人员物资调度、预警预报等基本功能。通过多维度的调度指挥,可提高灾情预判、响应能力,并根据处置情况提供复盘功能,为今后避免突发事件造成的人员及财产损失提供重要保障。

③ 设备及资产管理。综合管廊内具有多类子系统,设备品种多、数量多、品牌多,因此运维管理要做好设备台账和维修台账两大功能,其中设备台账要对每台设备的基本参数做好及时的更新和盘点,同时还要统计设备的运行状态。

### 2.2.2 大数据 + 人工智能

① 优化配置运维方案。目前综合管廊的运维

模式主要是人员驻扎在控制中心,一般实行三班倒的工作制度。为减少运维人员的工作负担,可以通过大数据和人工智能的方式,以资产数据、巡检历史数据等信息为依据优化运维方案,重点关注易损耗设备、易损坏本体结构等,同时以清单的方式让运维人员清晰了解运维计划和目标。

② 自动提出风险预警。传统运维主要依靠感官检查,虽然直观、成本低,但是严重依赖人员的经验、责任心和工作状态。如果遇到混凝土的细小裂缝或机电设备不正常的轰鸣声等,巡查人员很难做到及时发现并排查。通过大数据和人工智能技术,可以实现采集管廊内异常现象的表征(如漏水裂缝等),结合巡检机器人及传感器实现的 24 h 巡检,及时发现隐患并上报。此外,还可以结合综合管廊的各类设备、资产数据及日常巡检数据自动提出风险预警并提示运维人员。

③ 形成知识库及专家系统。针对运维人员流动性大、培训难度大的问题,可以通过建设综合管廊知识库系统来解决。比如,新员工可以将检索词输入到知识库中,通过自然语言处理技术将运维手册、运维标准等语料分解为最小单位,并通过余弦相似度等算法进行检索,在此基础上还可以开发专家系统,无需人力干涉就能将现场照片或者问题描述转译为可能存在的问题和解决措施,并联动管理平台快速处置与处理。

## 3 综合管廊运维新技术

### 3.1 智能巡检机器人

智能巡检机器人(见图 1)系统利用挂轨式或轮式机器人在综合管廊内进行巡检等任务,可有效减轻巡检人员的工作量,还能弥补监控系统只能定点监控的缺陷<sup>[7]</sup>。



图 1 智能巡检机器人示意

Fig. 1 Schematic diagram of intelligent inspection robot

结合人工智能技术,目前智能巡检机器人可以做到:

① 自主完成巡检任务并出具体检报告。智能巡检机器人可设定基本任务,运维人员通过选择任务、编排顺序、选择巡检管段等操作,定义日检内容并由机器人自主执行。机器人工作过程中,无需人工干预,系统自动将数据上传到服务器进行数据分析。此外,体检报告还可展示隐患点现状以及异常数据。

② 智能识别渗漏水等管廊病灾。经过大量真实照片的训练后,系统可针对该管廊的特征渗漏水做出标示,帮助巡检人员筛选出隐患点,并且记录该隐患点的历史变化趋势,巡检人员只需对筛选出的隐患点进行重点补救或监控病灾的演变趋势。

③ 完整、准确的巡检数据采集。智能巡检机器人系统可实现连续且完整的数据采集,从依靠巡检人员经验判断隐患转变为数据阈值判定进行隐患告警,从没有数据档案的维护历史转变为大数据分

析进行历史重现和趋势预判。

④ 应急状态下的高速驰援和现场实时监控。当出现紧急状况时,机器人可通过高速驰援,先于救援人员到达事故现场,回传现场实况画面和现场环境参数(如 O<sub>2</sub>、CO、H<sub>2</sub>S、CH<sub>4</sub> 气体浓度以及温湿度等),以协助制定救援方案,自带的语音通话功能可提高救援效率。

⑤ 对接综合管理平台,提升智慧化水平。智能巡检机器人系统在数据采集、数据分析、实时监控和应急处理上的优势,必将成为综合管廊运维平台的有效补充。灵活的接口对接能力,还可以将信息数据对接至更高一级的智慧管理平台,尤其为突发事件的多部门协同解决提供了技术支持。如果将智能巡检机器人与现有的弱电、安防系统对接,则可实现多系统联动,提升整体管廊运维系统的智能化。

传统巡检方式(人工巡检+固定式传感器)与智能巡检机器人巡检方式的效率优化对比结果如表1所示。

表1 传统巡检方式与智能巡检机器人巡检方式的比较

Tab.1 Comparison between traditional inspection and intelligent inspection robot

优化项		传统人工巡检+固定式传感器	智能巡检机器人系统
覆盖率	巡检区域覆盖率	离散式分布,平均<5%	全覆盖,100%
	工作时间	8 h/人次	24 h
运维成本	采购成本/安装费用	成本随巡检距离增加而线性增加	成本随巡检距离增加而摊薄
	系统自身维保费用	自身的维保费用是其售价的3倍以上,且随巡检距离增加而增加	机器人可自主回维护站进行保养,且费用随巡检距离增加而摊薄
	巡检费用	依赖人工巡检、管理难度大、成本逐年增加	部分或全部替代人工巡检、管理简易、成本逐年降低
运维效果	智能化程度	低:只记录、无法分析、风险预测难	高:有图像识别、趋势分析、主动告警、协同处理事故等能力,且可自主拓展功能
	巡检效率	人工巡检频次低	机器人巡检频次高,全天候
	人员安全保障	巡检人员暴露在阴暗潮湿、有辐射、有害气体环境中,屡有伤亡案例	运维人员只需在监控平台上进行运维设定与操作,只在检修时进入巡检区域,且与机器人协同配合

### 3.2 BIM + AR 技术

增强现实(AR)硬件作为人工智能的核心硬件之一,集成了大量的人工智能技术,例如通过物体识别技术识别和理解现实环境、依靠语音识别技术检测和分析用户指令、利用空间同时定位及建图判别所在空间中的位置等。

Honeywell 公司<sup>[8]</sup>的专利技术利用计算机呈现 BIM 数据(包括 3D 建筑示意图和建筑管理系统等数据)和增强现实图片生成系统,但是未能形成产品。伊利诺伊大学<sup>[9]</sup>将四维增强现实技术应用于

施工进度监控中,形成了交互式、可视化、自动化的 AR 模型。AR 在综合管廊中的应用主要体现在“AR + BIM”方面,可以用于设计展示、施工管理、工程测量、室内定位追踪等领域。产品的技术方案如图2所示。目前,在现有 AR 设备的基础上,针对 BIM 行业的特殊工作环境,研制适用于 BIM 行业工作环境的 AR 分体式设备,搭建具有物体识别、基于深度学习的异常目标检测、BIM 模型轻量化、3D 内容管理的云服务平台,开发面向 BIM 行业的基于 AR 技术的智能化应用,并进行产业化示范,从而协

助工程设计、施工监理、工程维保等企业人员提高工作效率,具体的建设内容如图3所示。

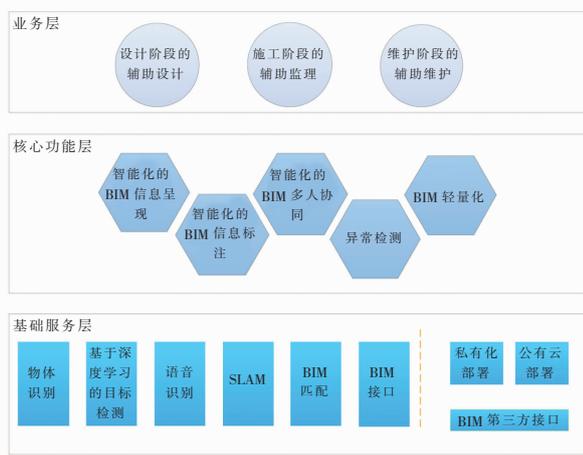


图2 AR + BIM 产品的技术方案

Fig.2 Technical proposal of AR + BIM

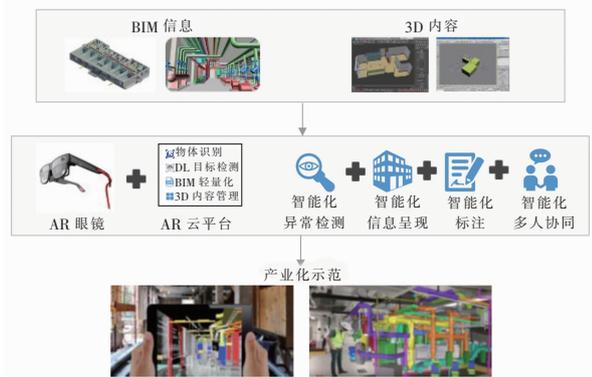


图3 AR + BIM 产品建设内容

Fig.3 Construction contents of AR + BIM

运用到综合管廊运维的 BIM + AR 可以实现以下功能:

① 基于视觉的异常检测。基于视觉的异常检测功能利用 BIM 匹配和深度学习检测技术进行协同决策,智能检测场景中的异常。基于 BIM 匹配技术的异常检测即将建筑的三维模型叠加到真实场景之上,通过真实场景与三维模型的 1:1 匹配,检测出建筑中存在的异常。通过对异常样本的大量学习,能够得到不同类型异常的本质特征,从而对真实场景中的异常进行检测。基于深度学习的异常目标检测对位置的要求不高,因此能够很好地补充 BIM 匹配技术的不足。真实场景图像在同时经过上述两种检测方式处理后,再通过智能化的协同决策系统进行最终的决策处理,智能判定异常类型和异常位置。

② 智能化 BIM 信息呈现。基于增强现实系

统中的多种人工智能技术,将 BIM 模型直接嵌入到真实场景中,通过虚实融合的方式,实现智能化的 BIM 信息呈现。首先,增强现实系统中的物体识别技术识别场景中的目标,其次通过 SLAM 技术估计当前的位置和姿态,最后通过虚拟融合技术,将虚拟的 BIM 信息以特定的大小和姿态固定到真实场景中。使用者通过增强现实设备可以实时全方位观察 BIM 模型,即可以在设计阶段与客户共同探讨设计实例和模型展示,也可以在施工阶段及时了解当前施工进度和剩余进度,更可以在维保阶段作为维修参考基准。

③ 智能化 BIM 信息标注。智能化 BIM 信息呈现通过 AR 虚实叠加等人工智能技术,把工程设计、施工及维保过程中发现的问题和其他相关内容,实时标注到 BIM 模型中。支持的标注类型包括任意画圈、高亮显示、文字标注等。

④ 智能化 BIM 多人协同。智能化 BIM 多人协同交互功能,搭建了一个包含多个用户的全息交流场景,支持随时随地“面对面沟通”,同时每个参与者都能以自己的独有视角学习、体验、互动,并且支持多用户通过手势操作等方式对同一个 BIM 模型进行交互操作。

## 4 综合管廊运维趋势

### 4.1 可靠的设计建设是前提

从目前的综合管廊建设经验来看,由于前期设计和建设没有考虑周全,导致在建设完毕移交给运维部门后发现众多不合理的问题,甚至严重影响正常使用,未达到预期效果。因此运维部门应提前介入到设计阶段并参与到设计方案与图纸的审查,将运维工作中可能遇到的问题和困难在设计阶段予以解决。此外,目前 BIM 技术在综合管廊的全生命周期管理中起着越来越重要的作用,利用 BIM 技术可以直观、准确地发现潜在的问题,提高设计和建设的可靠度。

### 4.2 质优价廉的设备是基础

综合管廊要达到预期效果,就需要提高自动化、信息化、智慧化的程度,这些都离不开可靠、性价比高的设备。例如,综合管廊中传感器数量和种类非常多,这些都是控制中心的“触角”,但是目前传感器的设置主要以自控系统为基础,不同的系统要设置不同的传感器,这就导致传感器的敏感度、精度和抗干扰性受到影响。如果未来可以实现传感器的集

成化与小型化,那么对提高管廊运维品质会有很大帮助。目前运用于管廊内的新技术(如巡检机器人等)越来越多,对提升管廊运维品质具有重要作用,但是这些技术目前成本较高,全面铺开使用有一定的困难。如果未来能突破新技术的价格壁垒,相信这些设备可以更好地为管廊运维服务。

#### 4.3 “少人值守”“自我驱动”是最高目标

如今综合管廊的运维模式借鉴市政工程的管养方法,依靠人力、定时定班进行巡检。采用 AR + BIM 和机器人巡检技术可以较大程度上减轻巡检人员的工作压力。目前,人工智能技术发展日新月异,专家系统和物联网技术的结合可以在综合管廊运维的大数据基础上,以人工智能为工具、BIM 为载体实现自我学习、自我纠偏乃至自我运行,在较少人力干预的情况下实现自动化的运行及控制,这也是综合管廊运维未来发展的趋势。

#### 5 结语

综合管廊运维是一个新课题,需要紧密依靠数据和人工智能的支持,从而提高运维效率、加强安全保障以及降低运维成本;需要完善、更新传统市政管养方式,在规范化、信息化和智慧化的基础上提高综合管廊运维管理水平,最终促进城市的科学化、精细化、智能化管理。

#### 参考文献:

- [1] 王军,陈欣盛,李少龙,等. 城市地下综合管廊建设及运营现状[J]. 土木工程与管理学报,2018,35(2):101-109.  
WANG Jun, CHEN Xinsheng, LI Shaolong, *et al.* About construction and operation present situation of utility tunnel in urban [J]. Journal of Civil Engineering and Management, 2018, 35(2): 101-109 (in Chinese).
- [2] 李春梅. 全生命周期管理:地下综合管廊的新加坡模式[J]. 中国勘察设计, 2016(3): 72-75.  
LI Chunmei. Whole life cycle management: Singapore model of underground utility tunnel [J]. China Exploration & Design, 2016(3): 72-75 (in Chinese).
- [3] 朱思诚. 东京临海副都心的地下综合管廊[J]. 中国给水排水, 2005, 21(3): 102-103.  
ZHU Sicheng. Underground pipe gallery in new area of Tokyo [J]. China Water & Wastewater, 2005, 21(3): 102-103 (in Chinese).
- [4] 张伟,邓祺琪,陆尧琪. 综合管廊智慧运维系统建设探

讨[J]. 城乡建设, 2018(24): 50-52.

ZHANG Wei, DENG Qiqi, LU Yaoqi. Discussion on the construction of intelligent operation and maintenance system of utility tunnel [J]. Urban and Rural Development, 2018(24): 50-52 (in Chinese).

- [5] 台启民,史金栋,曹蕊,等. 综合管廊智慧运维管理系统的研究及应用[J]. 工程建设标准化, 2018(5): 14-20.  
TAI Qimin, SHI Jindong, CAO Rui, *et al.* Research and application of intelligent operation and maintenance management system of utility tunnel [J]. Standardization of Engineering Construction, 2018(5): 14-20 (in Chinese).
- [6] 杨敦锋,刘晓东,苏锋,等. 城市地下综合管廊智慧运维管理研究与应用[J]. 土木工程信息技术, 2017, 9(6): 28-33.  
YANG Dangfeng, LIU Xiaodong, SU Feng, *et al.* Research and application of intelligent operation management of urban utility tunnel [J]. Journal of Information Technology in Civil Engineering and Architecture, 2017, 9(6): 28-33 (in Chinese).
- [7] 谢军,吴晓维,汪胜. 智能巡检机器人巡检系统在综合管廊中的应用研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(2): 105-107.  
XIE Jun, WU Xiaowei, WANG Sheng. Application research for intelligent robot inspection systems in utility tunnels [J]. Electrical Automation, 2018, 40(2): 105-107 (in Chinese).
- [8] Honeywell International Inc. Systems and Methods for Presenting Building Information: US9342928 [P]. 2012-06-29.
- [9] University of Illinois. Four-dimensional Augmented Reality Models for Interactive Visualization and Automated Construction Progress Monitoring: US9070216 [P]. 2012-12-12.

**作者简介:**许云骅(1990-),男,江苏昆山市人,大学本科,工程师,从事给排水工程、给排水管网、厂站及市政 BIM 设计工作,曾获 2018 年第九届“创新杯”建筑信息模型(BIM)应用大赛管廊类 BIM 应用二等奖。

**E-mail:** tomxuyunhua@163.com

**收稿日期:** 2019-07-24

**修回日期:** 2020-05-15

(编辑:丁彩娟)