

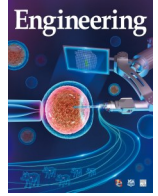


ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Civil Engineering—Review

交通基础设施智能化进展

杜彦良^{a,*}, 伊廷华^{b,c}, 李晓军^d, 戎晓力^e, 董陇军^f, 王大为^g, 高阳^h, 冷真ⁱ

^a College of Civil and Transportation Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518061, China

^b School of Civil Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China

^c School of Civil and Transportation Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China

^d Department of Geotechnical Engineering, College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

^e School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China

^f School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, China

^g School of Transportation Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China

^h School of Safety Engineering and Emergency Management, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China

ⁱ Department of Civil and Environmental Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

ARTICLE INFO

Article history:

Received 28 October 2022

Revised 30 December 2023

Accepted 4 January 2023

Available online 14 April 2023

关键词

智能化

交通基础设施

优化设计

自动化施工

结构健康监测

结构消纳

摘要

信息化社会背景下,土木工程科学与技术的发展正经历着深刻的变革,为传统建筑业的转型升级提供了千载难逢的历史性机遇。借助材料科学、计算机、人工智能和自动化控制等领域的前沿技术,新一代交通基础设施正朝着智能化方向快速发展,全球主要发达国家均因地制宜地大力推动以该方向为核心的交通基础设施行业革新战略。本文首先简述了交通基础设施智能化的基本定义、科学内涵和发展历程;然后以全生命周期为主线,系统梳理了交通基础设施在设计、施工、运维和消纳4个阶段中智能化技术的发展现状以及当前所面临的主要挑战;接着以世界首条基于智能化理念建造的铁路——京张高速铁路为例,综合展示了智能化技术的最新成就;文末从标准体系、理论方法和人才培养三个维度对交通基础设施智能化领域的未来发展趋势进行了展望。

© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

土木工程是建造各类工程设施的科学技术统称,既指工程建设的对象,即建在地上、地下、水中的各种工程设施,也指所应用的材料、设备和所进行的勘测、设计、施工、保养、维修等技术[1]。交通基础设施的发展历程贯通古今,按照建造材料、建造理论和建造技术的突破,先后经历了古代、近代和现代土木工程三个阶段[2]。在既

往各发展时期,工程师主要通过全程人工参与的方式来改善结构形式、提高材料性能、加强施工管理,以及实施定期检测评估和保养维修以确保工程结构满足预期概率下的性能需求。这种方式具有生产方式粗放、劳动效率低下、资源消耗巨大、环境污染严重和安全隐患偶发等突出问题,因此开展内涵集约式发展已成为当务之急。伴随新一代信息技术向交通基础设施领域的全面渗透,将建筑信息模型(BIM)、物联网、5G通信、大数据、云计算、人工

* Corresponding author.

E-mail address: du_yanliang@163.com (Y.-L. Du).

2095-8099/© 2022 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2023, 24(5): 239–252

引用本文: Yan-Liang Du, Ting-Hua Yi, Xiao-Jun Li, Xiao-Li Rong, Long-Jun Dong, Da-Wei Wang, Yang Gao, Zhen Leng. Advances in Intellectualization of Transportation Infrastructures. *Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.01.011>

智能和区块链等技术融为一体的交通基础设施智能化时代已临近。

交通基础设施智能化系指通过信息技术赋能工程结构,即利用以“三化”(数字化、网络化和智能化)和“三算”(算据、算法和算力)为特征的信息技术[3],在实现工程结构全要素资源数字化的基础上,通过规范化建模、网络化交互、可视化认知、高性能计算以及智能化决策支持,实现数字链驱动下的工程立项策划、规划设计、施工生产、运维消纳的一体化集成与高效率协同,最终使工程结构具备自感知、自诊断、自适应、自恢复和自循环的能力。因此,智能化的核心是工程结构全生命周期信息的互联互通,即通过BIM技术提供基础信息的创造、集成、管理、展示与服务,通过物联网技术提供生产、物流、施工、服役和消纳过程中的信息感知、采集、传输和反馈,通过人工智能技术提供全生命周期各个环节的信息处理、决策和操作。交通基础设施数字化可以看作是智能化的初级阶段,旨在实现立项决策、规划设计、施工管理、运营维护和消纳再生的全过程数字化管理,而智能化则是期望实现泛在感知条件下以无人或少人参与为主的各项工程活动。因此工程结构智能化需要数字建模和仿真交互技术、泛在感知与宽带物联技术、工厂制造和机器施工技术、人工智能与辅助决策技术、绿色低碳和生态环保技术作为发展支撑[4]。

交通基础设施智能化的萌芽可追溯至20世纪70年代,最初由Yao等[5]以结构控制为切入点,通过理论、实验到工程应用,形成了智能土木结构的初步构想,但这一概念的后续发展主要集中在结构的隔振、耗能减震和主动控制三个方面。与此同时,一些智能材料的出现,如压电陶瓷、形状记忆合金、渗透结晶自修复材料等,使结构具备智能化的监测、诊断和修复功能成为可能[6]。到80年代中后期,美国一些学者开始将大量的传感器布设于桥梁(如位于佛罗里达州的Sunshine Skyway Bridge),实现了设计假定的验证、施工质量的把控和服役状态的感知。到80年代后期,英国学者开始将自主研发的仪器设备用于大型桥梁的监测,并对各类监测方案进行了调查对比。90年代以来,中国伴随大规模基础设施建设的推进,许多新建的现代化桥梁(如香港青马大桥、港珠澳大桥等)和地标性建筑结构(如上海中心大厦、广州电视塔等)在施工期间就安装了结构健康监测系统,获取的海量数据不仅可以服务于工程结构的振动控制和健康状态分析,还可以为类似工程结构的设计提供有益指导,形成了由设计、施工到运维再反馈回设计优化的闭环路径。进入21世纪以来,以英、德、日、美等为代表的工业化国家开始借助

新一代信息技术快速推进土木工程结构的全生命周期智能化。欧洲于2003年启动了针对铁路桥梁的“可持续桥梁——评估未来的交通需求和更长使用寿命”(Sustainable Bridges: Assessment for Future Traffic Demands and Longer Lives)项目[7],旨在提高欧洲铁路运输能力及延长铁路桥梁使用寿命。美国于2005年启动了“桥梁长期性能”(Long-Term Bridge Performance)项目[8],通过收集全美高速公路桥梁的高质量自动检测与监测数据,促进工程人员对桥梁性能老化与退化状况的认识和理解,实现桥梁的合理维护及长寿命管理。英国于2013年推出“英国建造2025”(British Construction 2025)[9],提出了实施数字设计、智能建造、低碳和可持续建筑的战略措施。日本于2013年则推出了基于预防性维护理念的“基础设施长寿命化国家基本计划”(National Fundamental Plan for Long-Life Infrastructures)[10],旨在在桥梁发生致命性损伤之前,发现问题并及时采取修复加固措施,从而延长桥梁、隧道等重要土木工程结构的服役寿命。德国于2015年发布了“数字化设计与建造发展路线图”(National Fundamental Plan for Long-Life Infrastructures)[11],提出了工程建造领域的数字化设计、施工和运营的变革路径,其核心是通过推广应用BIM技术,不断优化设计精度和成本绩效。日本也于2015年提出了“建设工地生产力革命”(i-Construction Initiative)[12],即以物联网、大数据和人工智能为支撑提高建筑工地的生产效率,到2030年实现建筑建造与三维数据的全面结合。美国则在2018年发布了“美国基础设施重建立法纲要”(Legislation Outline for Rebuilding Infrastructure in America)[13],明确建筑产品和基础设施要实现安全(韧性)、绿色和耐久,并关注建造过程的经济效益和可持续发展。我国于2020年印发的“关于推动智能建造与建筑工业化协同发展的指导意见”(Guidance on Promoting the Developments of Intelligent Construction and Construction Industrialization)[14]明确提出,要围绕建筑业高质量发展总体目标,以大力发展建筑工业化为载体,以数字化和智能化升级为动力,形成涵盖科研、设计、生产加工、施工装配、运营等全产业链融合一体的智能建造产业体系。因此,土木工程结构智能化已成为建筑业发展的大势所趋。

从时间维度来看,智能化贯穿交通基础设施全生命周期的各个阶段,本文系统梳理了智能化设计、智能化施工、智能化运维和智能化消纳技术在国内外的最新研究进展和当前所面临的主要挑战,并以京张高速铁路为例综合展示了交通基础设施智能化的最新成就,文末对该领域的未来发展趋势进行了展望。

2. 智能设计技术

隧道建造中的一个关键环节是即时的隧道设计，以保证建造安全。由于地下地质和岩土条件极其复杂，隧道设计必须是动态的，最好能全面、及时地考虑所有相关数据和信息。隧道建造过程中广泛应用了各种物联网和其他相关信息技术，收集了大量的监测数据，这就要求对数据进行实时或即时（just-in-time, JIT）处理[15]，从而进行决策。因此，隧道智能设计需要整合新的设计理念、技术和模式，以提高施工效率和安全性，从而深刻改变传统的设计方法。智能设计的科学基础是构建具有全息感知、多源数据融合、过程控制、数据交互等能力的数字孪生模型，探索基于工程大数据和鲁棒人工智能技术的类人设计代理。上述技术形成了一种交互反馈、知识积累、决策的设计模式，将数字化、网络化设计转化为智能化设计。智能设计是智能施工的首要动力，其实现的关键要素包括JIT数据采集、数据解译和数据聚合。本文以地下工程为例，介绍了地下工程智能设计的发展现状和存在的科学问题。

在JIT数据采集方面，传统的数据采集方法包括对原始数据（如文本、图像、图纸）的采集、梳理和数字化，以及监测/检测数据。随着传感器技术的进步，数字照相（DP）、三维激光扫描（TLS）、随钻测量和其他超前地质预报等物联网技术可以高精度、高效率地采集工程数据。基于这些新兴技术，可以实时获取隧道施工过程中新揭露

的数据，并可用于修改原设计方案。根据Ling等[15]的研究，使用不同的智能物联网技术可以大大提高数据采集效率。例如，使用数字照相技术，通常只需不到1 min就能捕捉隧道表面的图像。采用三维激光扫描技术，隧道工作面扫描所需时间可控制在10 min以内，随钻测量和超前地质预报技术获取数据所需的时间可小于2 h。相比之下，传统的隧道掌子面素描方法最长可达4 h [16]。因此，可以得出结论，使用先进的物联网技术可以大大提高智能设计效率。

在JIT数据解译方面，通过大数据分析、数字数值一体化、自然语言处理、三维模型重建等方法，可以对海量数据参数进行提取和解译，形成“空-天-地”一体化测量方案[17-24]。例如，利用数字照相获取基于双目三维重建技术的点云数据，再现高精度的结构几何信息，可自动获取岩体结构面的迹长、产状、间距、粗糙度等特征信息。图1 [25]为含RGB信息（色彩模式）的岩体不连续面照片和岩体点云数据。经过聚类、分组、迹线提取、连接、线性化等步骤，可以得到岩体迹线信息。一般情况下，从现场采集的原始数据中提取和解译的参数多为不连续面信息、岩石结构信息、涌水信息和软弱夹层信息。根据解译算法和硬件可计算性，解译时间可以从秒到小时[16]。

在JIT数据聚合方面，早期人工智能在土木工程设计中的应用主要是支持专家的决策，使用符号模型（如规

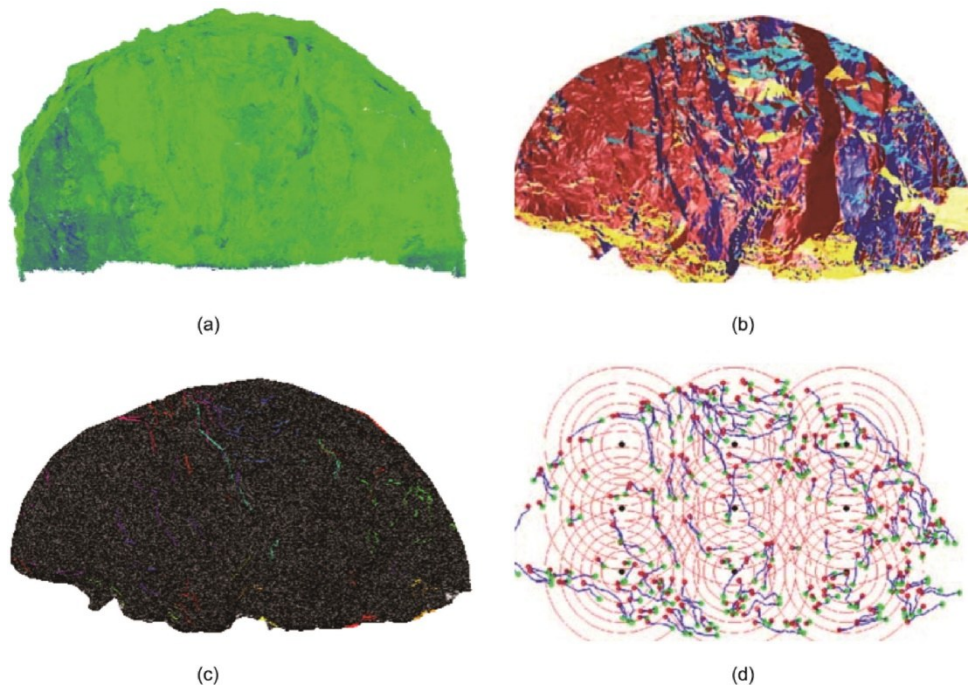


图1 岩体三维重建与信息提取。(a) 隧道掌子面三维激光扫描点云数据；(b) 三维重建掌子面模型；(c) 自动提取表面迹线信息；(d) 表面迹线信息分析。经允许转载自参考文献[25]。

则、语义网络和框架)和专家系统[25–27]。面向这些应用,数值分析软件通常用于结构系统和承载力设计。设计常用的建模软件有 AutoCAD、Rhino、Grasshopper 等,高层建筑分析软件有 SAP2000、ETABS、MIDAS GEN 等。岩土和隧道分析常用的软件有 FLAC、ANSYS、GeoXH、GeoFBA 等。

近年来,机器学习算法已应用于工程结构的选择及其初步设计。除了专家知识之外,机器学习方法还通过从现有的工程设计项目中提取信息而被应用到当前工程中[28–30]。例如,神经网络、遗传算法和群体智能方法已成功应用于岩石分级和智能设计。对于地质体和地质构造的破坏准则,许多学者成功地采用了精确的模型和修正方法,并将其整合起来,形成了自动设计系统[31–35]。

在隧道智能设计中,低效、传统的四方协调,基于会议的设计变更正被基于使用数字化技术对施工现场的全面了解的动态设计和反馈所取代。智能设计模式的下一步是充分利用数字孪生技术[36–37],创建与物理实体相对应的虚拟模型,通过数据融合分析,使用交互式反馈系统优化物理设计,增强物理实体的性能,扩展物理实体的能力。数字孪生系统承载了土木工程领域的地理和地质信息,同时将土木工程设计信息加载到虚拟模型中。将这两种数字信息进行整合,可以实现信息检索、视觉传达、数字分析、现场体验、项目管理等功能,实现全仿真建造全过程的准确呈现。

随着土木工程信息技术的不断发展,智能设计将逐渐取代传统设计。当前,迫切需要解决的科学问题主要有以下三个方面:

(1) JIT 设计方法。该方法以新一代信息技术为载体,以数据流为核心,通过软硬件系统的无缝连接来实现 JIT 采集、解译和聚合。现有的设计方法虽然在一定程度上提高了设计效率,但在某些情况下仍存在耗时过长的问題。例如,当三角网格尺寸为 4 cm、有 382 085 个面时,工作站(英特尔酷睿 i7-2600 CPU 和 16 GB RAM)解释点云大约需要 2.5 h [38]。因此,为了满足隧道设计快速响应的内在要求,可以采用更高效的算法和计算方法来提高解译和聚合的速度。最先进的深度学习技术可用于解决图像解译等问題,而并行计算和云计算等计算方法可用于解决数值建模和点云数据解译问題。

(2) 智能设计平台。智能设计平台是一个异构的多智能体系统,可以集成和可视化关键技术,如图 2 [15]所示。该平台应具有复杂环境下的鲁棒性、人机交互的可信度和安全性、应急任务的协同性等特点。关键技术包括:目标识别与逆向建模算法、多源异构数据融合算法、多智

能体协同工作优化算法、岩石物理性质表达与关联方法、语义信息提取方法、动态模型交互、各要素信息化识别、土木工程性能动态演化、土体和结构分析方法,以及基于数字孪生的智能施工控制算法。

(3) 基于数字孪生的智能设计模式。数字孪生的核心技术包括物理空间与虚拟空间的虚实动态融合,虚拟实体与物理实体的双向映射,以及贯穿整个生命周期的实时精确对比与协作。地下工程涉及多个孪生体(地质、构造、力学环境)的复杂作用,地质条件和相互作用机制难以确定;此外,还存在多场耦合时空效应。未来,应通过数值模型和三维点云模型进一步加强物理实体到虚拟实体的映射。虚拟模型应该被准确地表示,并且应该是可实时操作的。应构建创新的三维可视化信息系统,以支持数字孪生模型的知识建模、自适应、自学习和自优化,基于实时数据的模型预测,动态参数调整和迭代过程优化,最终目标是提供准确优化的设计方案。

3. 智能施工技术

随着工业技术水平的不断提升,机械化、装配化、标准化、数字化施工逐渐取代传统的人力粗放型施工方式,在工程建造领域得到广泛的应用[39–42]。先进施工技术的引入不但极大地降低了人力成本,提高了施工效率,同时显著提升了工程建造质量。中国进入新世纪以来,川藏铁路、深中通道、渤海湾跨海通道等一批重大交通基础设施提上建设或规划议程,以深长隧道、特大桥梁为代表的控制性节点工程建设对施工技术提出了新的要求与挑战,日益复杂的极端修建环境迫使施工方式向“少人化、无人化”转变[43]。由此,智能化施工技术成为交通基础设施建设的重要发展趋势。

智能化施工是在融合先进的施工机械装备、工厂化预制工艺、装配式施工方式、标准化施工流程、数字化施工管理等的基础上,进一步根据智能设计的要求,在规定的时空范围内,利用人工智能等信息技术完成各类施工工序的智慧赋能与高效管控[44],通过对环境、地质、结构、机械、人员、材料等信息的全面感知、泛在互联、融合处理、主动学习和科学决策,实现安全、高效、可靠的工程施工建造。智能化施工是一个复杂的工程系统,可以抽象为两个层次(图 3),即智能施工对象(smart construction object, SCO)和智能施工平台(smart construction platform, SCP) [45]。SCO 是智能施工的基本单元,包含各种施工资源(自然条件、机械、人力、材料等要素)。通过提高各单元的感知、处理与通信能力,使之具备意识、沟

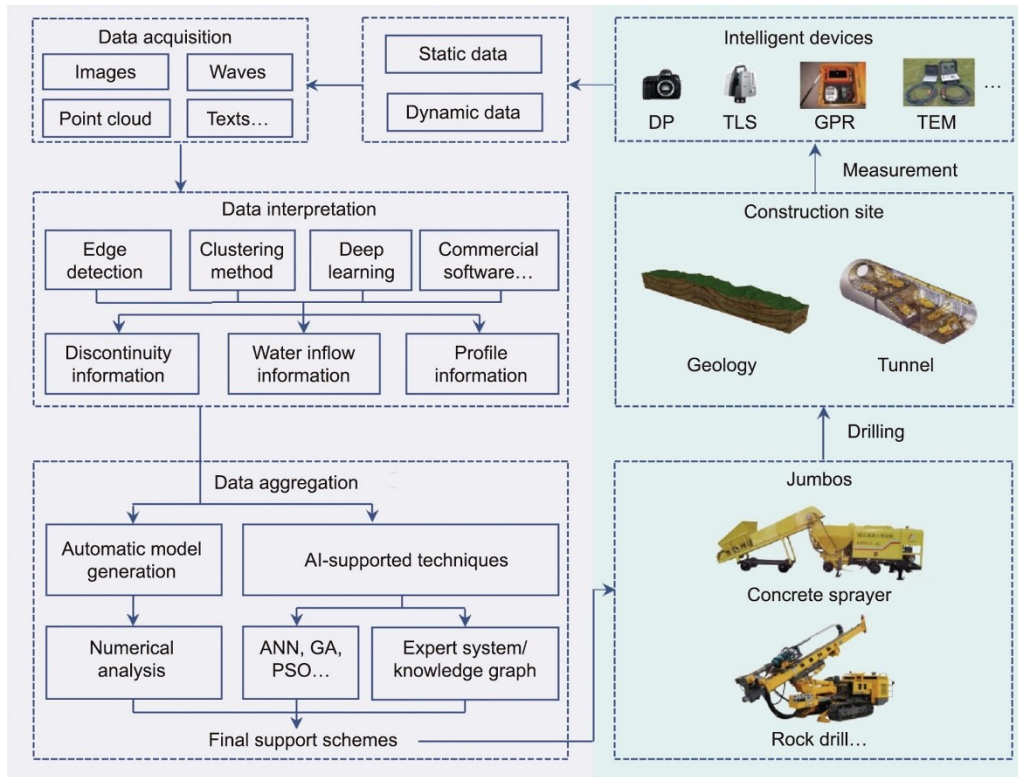


图2. 一种采集-解译-聚合的动态隧道设计方法。经允许转载自参考文献[15]。GPR：探地雷达；TEM：瞬变电磁法；AI：人工智能；ANN：人工神经网络；GA：遗传算法；PSO：粒子群优化。

通、自主性三个核心属性（图4 [44]），从而实现单元与单元间、单元与平台间的互动。而机器学习、深度学习等信息技术的采用，使得施工平台能够进行智能优化决策，保证各类施工资源配置具有较好的工程环境适应性。总的来说，智能化施工的内涵即为为施工组织提供了“大脑”，对施工过程赋予了多源感知能力、环境适应性学习能力及自主优化决策能力[46]。其中，感知是基础，学习是手段，智能决策是最终目标，相比于传统的施工方式，通过对施工机械、施工技术与管理智慧赋能，能够促使工程建造更好地感知环境、适应环境，从而降低施工安全风险，最终达到工程与自然环境间的和谐。



图4. SCO的三个核心属性示意图。经允许转载自参考文献[44]。

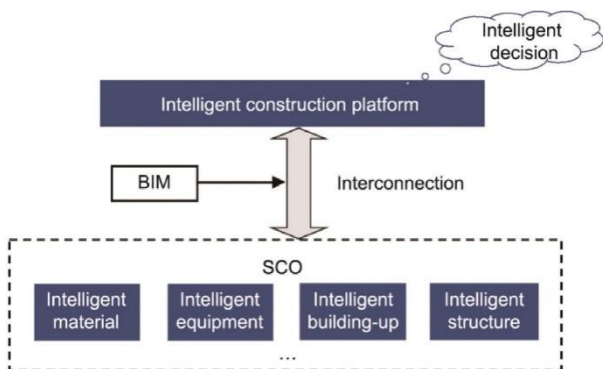


图3. 智能建造系统的层次结构。SCO：智能建筑对象。

目前，智能化施工技术已经在道路、桥梁、隧道等交通基础设施工程领域得以迅速的发展。以隧道工程为例，中国已初步建立起了隧道智能建造体系架构，并在智能装备、智能感知、智能分析、智能决策等方面持续发展和完善相应的技术[47-52]。无论采用何种隧道施工工法，“岩-机”间的相互作用、相互协调均是施工过程中需要考虑的核心内容[53]，也是隧道智能化施工技术发展应重点突破的关键技术。这就要求首先对隧道围岩地质条件进行精细化感知，以及对施工参数的智能判识与智能选择。对单一

机械设备进行智能化提升,并在此基础上研制全工序的智能化施工机械装备与智能化的施工管控平台,实现施工资源配置、施工工序组织、施工机械调度、灾害调控手段选取等方面的智能优化决策。下文将围绕钻爆法隧道、盾构法隧道、沉管法隧道,介绍近年来中国代表性的隧道智能化施工技术进展。

3.1. 钻爆法隧道

相比于盾构法隧道与沉管法隧道,钻爆法隧道施工工序复杂,机械化施工装备分散,智能化推进难度相对较大。但钻爆法凭借其较强的复杂地层施工适应性能力,仍然是当前隧道的主要施工工法之一。目前,钻爆法隧道的智能化施工技术进展主要集中于围岩地质感知与判别、施工装备智能化和施工管理智能化等方面[54-57]。其中,随钻参数结合深度学习预测岩石参数[54]、融合图像识别和光谱分析实现岩性和不良地质智能识别[55-56],是近年来智能施工地质感知方面的代表性突破。中国铁建重工集团股份有限公司在郑万高铁隧道施工中开发了围岩参数智能判识与处理系统[57],通过智能凿岩台车随钻参数采集与分析系统自动采集围岩数据,利用钻孔分析法和图像分析法自动输出围岩亚分级结果,自动判识掌子面前方围岩地质及稳定性,并自动实现设计参数优化。

另外,为配合工程实施的基于全工序机械化配套的隧道安全、快速、高质量修建技术,从智能装备“单机智能化”、智能装备“机群集中操控”、智能装备“自感知-自判断-互联互通-协同管理”三个层面出发,针对超前支护、钻爆开挖、初期支护、二次衬砌等关键工序开发了系列化智能装备[图5(a)],并基于大数据系统架构、物联网、多源异构数据融合、3D地理信息系统(GIS)+BIM结合应用等先进技术,构建了隧道装备大数据协同管理平台[图5(b)],具备隧道施工环境自感知、目标导向定位自执行、施工状态与反馈自学习、施工效果自评估、施工

组织自决策、施工过程自管理等智慧能力。综合现阶段的发展现状,钻爆法隧道智能化施工应从复杂地质条件的智能感知与判识、施工装备的高度集成化与智能化、施工信息实时监测与动态反馈分析、施工装备机群物联网系统构建与协同控制等方面重点展开。机械化施工装备与信息化网络技术深度融合,将能够极大提高施工作业与管理效率,从而在海拔隧道、海底隧道等极端修建环境中发挥重要的作用。

3.2. 盾构法隧道

盾构法施工自身便是隧道建造方法中机械化、信息化集成程度最高的工法之一,其智能化施工技术的发展水平相比于钻爆法隧道具有明显的优势。近年来,盾构法隧道的智能化施工技术进展主要集中于围岩地质感知与智能判别、智能化掘进开挖、线型智能化控制、智能化管片拼装、智能化注浆、地表沉降智能化分析与控制等方面[58-61]。代表性地,上海隧道工程有限公司率先在行业内制造了首台具有自主决策和自动掘进能力的智能盾构“智驭号”[图6(a)][62]。基于5G通信、大数据及人工智能技术,智能盾构机能够精确捕捉掘进过程中的地质特性、施工参数、盾构姿态、环境影响等近千组数据,自主快速判断自身状态并感知周边环境特征。基于数-图-数多重转换的异常发现算法,建立了盾构掘进环境辨识、盾构机立体位姿规划与控制、地面变形规划与自适应控制和多参量协同控制等系列智能模型,并开发了“超级大脑-盾构管控系统平台”[图6(b)],使得盾构机能够在精准感知施工信息的基础上,自动发出指令,实现地下工程更适应、更快速、更安全的智慧化无人掘进。

综合现阶段的发展现状,盾构法隧道智能化施工未来的发展应重点瞄准机器学习算法的改进并加强其在实际工程开挖中的应用,包括盾构设备状态分析与掘进性能预测、地质参数反演与地表变形预测、盾构管片病害监测与



图5. 中国铁建重工集团股份有限公司研发的系列化隧道智能施工装备(a)与协同管理平台(b)。

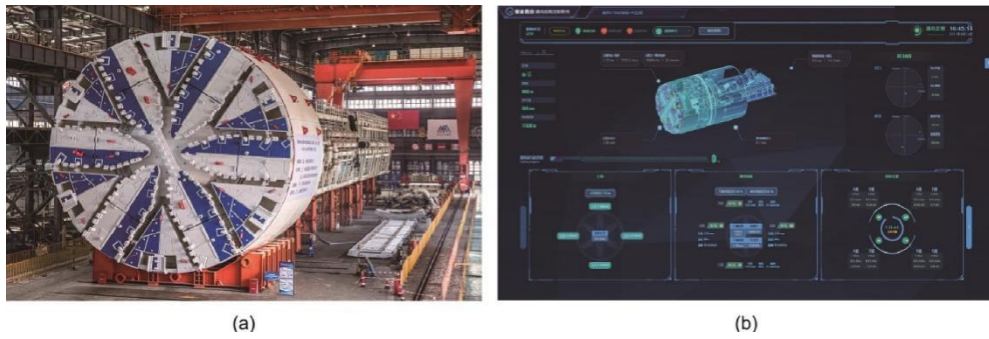


图6. 上海隧道工程有限公司研发的“智驭号”智能盾构机 (a) 与盾构管控系统平台 (b)。

预测等方面。另外，随着盾构施工的广泛开展以及5G传感、物联网、云计算等技术的不断成熟，亟待建立汇聚海量多源盾构施工数据的数据库系统，集成不同工程、不同设备、不同隧道的监测信息，通过大数据训练来增强机器学习模型的泛化能力，进一步提高盾构隧道智能管控平台的自主决策水平。

3.3. 沉管法隧道

相比于钻爆法与盾构法隧道，沉管法隧道建造过程在工厂化、装配化、标准化方面具有显著的优势。近年来，沉管法隧道的智能化施工技术进展主要集中于基槽清淤智能化、工厂法预制智能化和沉管安装智能化等方面[63–65]。代表性地，深中通道钢壳混凝土沉管隧道工程在钢壳智能制造、钢壳混凝土智能浇注、沉管智慧安装等方面取得了显著的智能化施工技术进展（图7）。基于互联网、BIM与智能机器人技术，研发了钢壳小节段车间智能制造、中节段数字化搭载、大节段自动化总拼生产线，实现了钢壳的智能制造及品质、工效的大幅提升。构建了钢箱梁智能制造生产线，克服了正交异性钢桥面板焊接接头初始缺陷，提升了正交异性钢桥面板疲劳性能。研发了自密实混凝土浇筑设备，开发了智能浇筑控制系统，基于大数据辅助决策，实现了沉管预制各环节任务智能分配、实时监控记录以及施工缺陷快速定位，有效提升了自密实混凝土的浇筑质量。研发了沉管运输安装一体船及沉管沉放智

能控制系统，基于沉管浮运数字化指挥导航、沉管锚泊定位、沉管高精度无人沉放和沉管水下精调等技术，实现了沉管在施工水域的自动定位与高效安装。

综合现阶段的发展现状，沉管法隧道智能化施工应重点关注打造智慧的沉管预制工厂，将智能制造与智能建造相结合，充分利用数字孪生、BIM等信息技术，研发智能化机器人并构建标准化生产线，提高沉管的生产效率及工艺质量。在沉管安装过程中，采用先进的监测传感技术，实现沉管与基槽状态的智能感知，开发沉管隧道工程全工序协同管理平台，提升沉管隧道施工的抗风险水平。

智能化施工不仅显著地提高了交通基础设施建造的高效性、经济性与安全性，更催生了施工工艺的变革，带动了上下游相关产业的快速发展。究其本质，智能化施工是对现有机械化、装配化等施工方式进行智慧赋能，使得工程在改造自然的过程中，能更有效地感知环境、学习环境并适应环境，从而提高工程对灾害的防御能力，打造生态和谐的工程建造方式。然而为实现上述目标，未来智能化施工技术仍需在以下5个方面（首字母缩略词为SMART）重点突破。

(1) “S”为可持续韧性施工：施工过程应更加注重施工资源对自然环境的智能感知，提高施工机械、施工工艺、施工结构等对建造环境的自主适应性，提高施工期灾害的防御能力。



图7. 深中通道沉管工厂化生产采用的智能化生产线 (a) 与智能化质量控制系统 (b)。

(2) “M”为模块化和精细施工：智能施工和智能制造相结合，对复杂的施工过程进行拆分和优化，在工业化预制和精细装配的基础上，提高施工作业的质量和效率，减少施工周期、成本和风险。

(3) “A”为人工智能与决策：基于数据挖掘和机器学习，创建一个相对完善的施工管理知识图谱；培养较强的识别、判断和决策支持能力；更好地利用施工设备，提高施工管理水平。

(4) “R”为机器人和无人系统：目前，大多数施工机器人只能在单个场景中使用，应面向施工环境、工艺流程、结构部件和许多复杂对象，提高智能施工设备集群的互联能力，使其具有高度的鲁棒性，减少人力资源的投入。

(5) “T”为技术集成和信息建模：智能施工需要材料、结构、设备等技术相互促进和全面集成，应与BIM更紧密结合，全面、主动、准确地实时填补施工现场的信息缺口。发展数字孪生技术，建立工程设施全寿命周期数字档案，提高施工的智能化管理能力。

4. 智能运维技术

交通基础设施的智能运维是指通过云计算、物联网、

人工智能、人机交互和其他技术，对工程结构全生命周期的各个阶段进行维护，实现损伤自感知、信息自记忆、数据自训练、方案自决策和维护自进行，以延长结构寿命并保障其长期安全可靠的技术。运维是一个持续和长期的过程，从施工完成时开始直至结构完全失效时结束。运维不仅只修复旧结构，使结构保持“旧而修”，有时还需要重新制造新的结构来修复旧的结构。

交通基础设施智能运维包括4个方面：智能检测/监测、智能管理、智能维护和智能改造（图8）。智能检测/监测旨在通过智能设备、信息技术平台和科学化技术来实现工程结构的实时监测和问题的快速检测，以达到检测波动情况和早期异常的目标。智能管理旨在利用人工智能算法、数值模拟技术和力学分析，对工程结构风险因素的变化趋势进行科学研究、推导和预测。此外，智能管理在决策层面实现了自动预警，并可提供预防性对策。智能维修旨在通过人工辅助机械、工业机器人和绿色修复材料等对工程结构进行预测性维修和早期损伤的有效修复，这是保障结构长生命周期和绿色低碳运行的关键。智能化改造是重大工程的新改造模式，基于数据挖掘、环境变化趋势预测、承载能力和功能需求分析，在不破坏结构完整性的前提下实现未来性能和未来功能的双重提升。

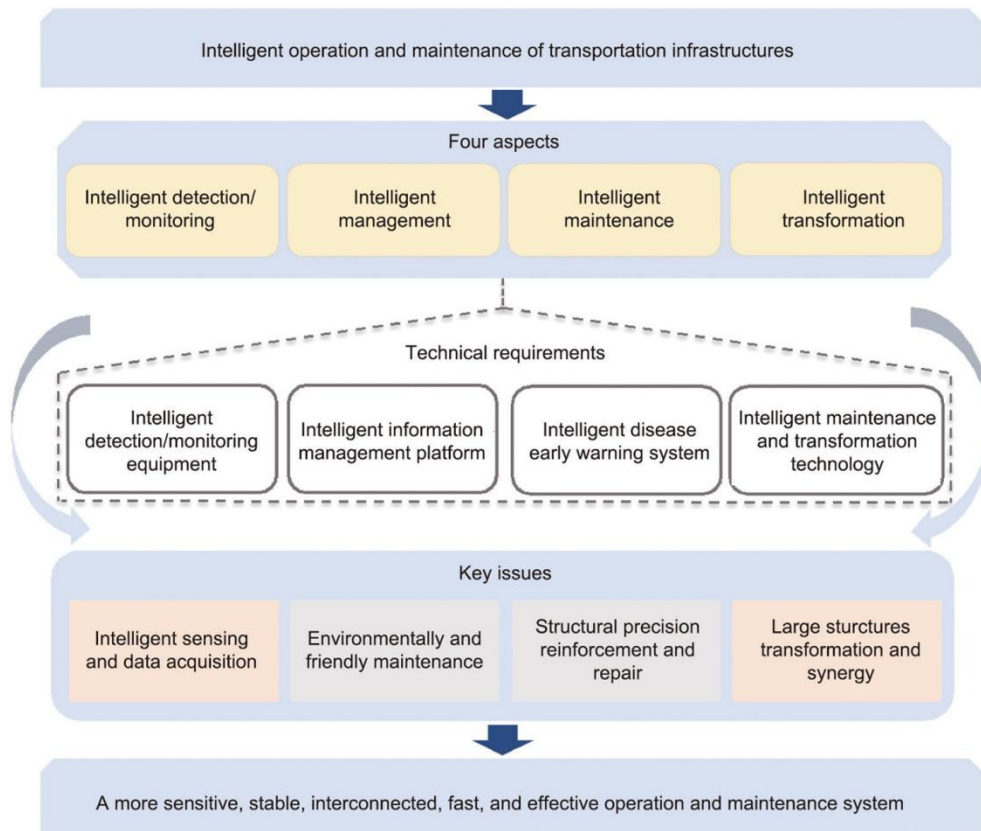


图8. 交通基础设施智能运维系统示意图。

图8显示了交通基础设施智能运维技术的应用、待解决问题及目标。以桥梁为例，结构和环境的检测/监测数据的可靠获取和视觉监督是管理和维护的基础。在早期，桥梁检测主要依靠工程师的经验，之后先进的无损检测技术开始被推广。如今，智能化的结构健康监测技术已经普及[66]，通过各种智能化技术来感知结构的激励和响应，然后对这些信息进行处理和分析，以确定交通基础设施性能的波动、劣化和损伤情况，从而为管理和维护提供决策支持[67]。近年来，桥梁的预防性管理和维护日益成为桥梁行业的基本战略[68]，桥梁运维技术也取得了很大的进步。以中国浙江省的杭州湾跨海大桥为例，杭州湾跨海大桥是中国“五纵七横”国道主干线中同江至三亚沿海大通道跨越杭州湾的最便捷通道，该项目于2003年6月8日启动，2007年6月26日完成联合施工，2008年5月1日建成通车。大桥通车后，必须进行管理和维护，以保障其生命周期。对此，中国宁波市公路管理局和北京公科桥梁技术有限公司为杭州湾跨海大桥开发了一套养护管理系统，于2010年投入使用[69]。该管理系统包括几个子系统，如系统管理、进度管理、检测管理等，可以在BIM模型的基础上数字化显示桥梁及其结构部件。该系统在健康检测和养护系统之间建立接口，完成检测数据的处理、敏感指标的分析，以及结构信息、损坏信息和检测历史的结合，确保桥梁维护的效率[69-70]。该养护系统建成后，可反映桥梁的结构状况和养护状态，从而保证桥梁数年内的有效养护和维修[69]。随着大数据和人工智能的发展，管理和维护技术也在不断完善。近年来，还为杭州湾跨海大桥开发了可靠的云控制平台，该平台打通了大桥原有的各业务系统的独立软件系统，可以直接在云控制平台上管理和存储数据，从而为大桥早期损伤的防护提供更有效的支撑[71]。目前，杭州湾大桥采用的管理维护模式也已在大型桥梁的运营管理中得到了广泛推广。

历史悠久、服役时间长的桥梁通常面临着修复和改造的问题，需要有针对性地进行改造，以解决物理空间、承载力和多种功能的新需求。在改造方面也有了很成功的案例，例如，南京长江大桥的主桥桥面板在运行48年后于2016年被全新修整[72]。双曲拱桥和主桥桥面板都进行了翻新，桥梁性能得到了很大的改善。为了恢复古姆海关旧址文物原有的历史风貌，于2013年至2016年对该文物进行了修复[73]。智能运维技术在发展的同时也面临着许多问题，例如，为了实现对桥梁的有效维护，需要了解发生损伤的时间和地点。因此，有必要建立一个全寿命设计和分析的理论[74-75]。目前，结构健康监测技术已经从简单的状态监测逐步扩展到结构性能演变分析[76-77]，

然而，因为环境噪声干扰和设备的敏感性，结构性能诊断的效果有时并不理想[78]。由于损伤的多样性、复杂性和随机性，建立全寿命理论仍然具有挑战性。大部分的相关研究还处于数值模拟或模型验证阶段，迫切需要开发更精确的损伤诊断技术、准确的结构寿命预测技术和可靠的风险预警技术。此外，在智能管理方面，尽管BIM技术可以大幅提高信息化、可视化和智能化水平，但它的前期成本很高，缺乏统一的管理和维护标准。因此，提高效率的同时降低BIM成本是一个需要解决的问题[79-80]。

总的来说，交通基础设施的智能运维是一个综合的技术系统，目前仍处于早期发展阶段。智能运维的发展需要更精密、更灵敏、更持久的检测/监测技术，更可靠的数据传输和集成网络，更互联互通的信息可视化和共享平台，更高效的数据分析和预测预警能力，更及时的早期保护措施，更有效的加固方案及更合理的改造技术。未来需全面提升检测/监测、信息管理、预警维护等技术的智能化水平，以构建更精准和更适宜的运维系统，目前亟待突破的关键科学和技术问题主要包括：

(1) 智能感知和数采技术。准确感知结构特征参数是智能运维决策的基础，这对传感器、集成器、采集终端等设备的性能有很高的要求。有必要研发适用于不同工程结构和损伤的新型检测/监测设备，形成系列化的智能感知和数采技术，以实现海量数据的同步采集、稳定传输、高效存储、快速调用和智能处理。

(2) 环境友好型维护技术。交通基础设施维护的及时性和有效性是确保其安全运行的关键，不同工程结构因所处的环境（如二氧化碳浓度、pH值等）不同，维护的侧重点也不同。为了达到最佳的维护效果，有必要应用人工智能技术来智能评估不同条件下的维护效果。开发智能维护决策和实施系统，根据不同的环境和人员情况提供最合理的维护方案，具有重要的意义。

(3) 结构的精准加固维修技术。发现工程早期损伤的准确位置，并对其进行及时有效的加固维修是恢复结构健康状态的关键。未来，有必要针对结构的各种状态开发新的复合加固材料，同时考虑关键结构元素的应力状态和历史维护细节，以提高新旧界面的相容程度，从而保障工程结构的安全性、美观性和长寿命化。

(4) 大型结构改造与协同技术。对于服役多年的大型交通基础设施，拆除和重建并不经济环保。有必要建立可面向不同改造方案的结构全寿命周期设计、分析和预测方法，在实现工程结构长寿命化的基础上实现其功能和性能的双重提升。此外，还应充分考虑改造工程的周边环境，确保结构的区域协调性和统一性。

5. 智能消纳技术

交通基础设施智能消纳是指利用智能技术, 实现将达到使用寿命的建筑和基础设施进行智能化拆除、清运、分类、回收、资源化和再利用的过程(图9), 是集智能分类、高效转化、清洁利用、精深加工和精准管控为一体的整条技术链[81]。智能消纳的科学内涵是以资源化和无害化为核心原则, 以循环利用和污染协同控制理论为支撑, 基于新一代信息技术建立的整装成套的建筑固废资源化利用技术、解决方案和推广模式。智能消纳技术体系的建立, 可显著提高建筑固废的处理效率, 推动建筑材料的再生循环利用, 降低建筑制造的能耗和碳排放, 促进建筑业的碳达峰和碳中和, 实现交通基础设施的绿色可持续发展。

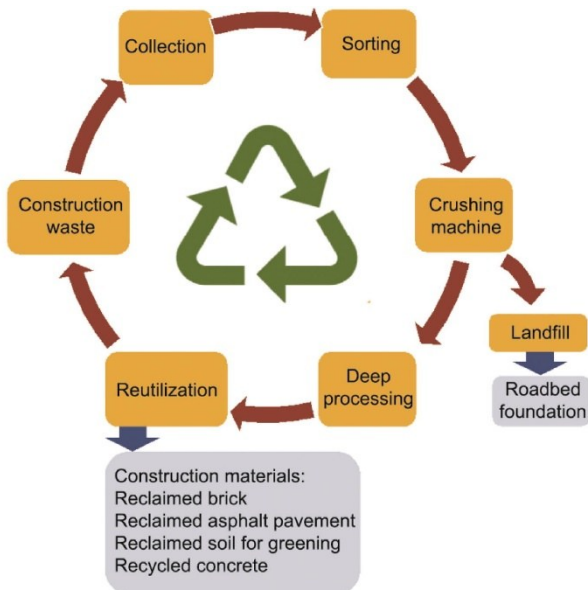


图9. 建筑固废消纳循环过程。

以道路工程为例, 交通基础设施智能消纳是基于建筑固废的绿色回收和综合利用理论与技术协同发展的结果。理论层面上, 由于固废的产生、储运和处置全过程均会释放污染物, 污染物会随着介质迁移转化而对人与自然环境产生影响, 因此许多学者致力于建筑固废资源环境属性时空分布规律和差异分析的研究。通过建立特征污染物及毒害组分的释放、迁移和累积的量化表征模型和固废指纹特征数据库[82], 阐明毒害成分阻断原理, 构建固废资源化全过程风险评估体系。

技术层面上, 建筑固废的分类分拣方法、管控策略的开发与创新同再利用技术的开发与创新齐头并进。首先, 随着基于深度学习的图像处理识别[83]、多功能检测、计

算机视觉和人工智能[84]等技术的快速发展, 建筑固废的分拣和分类已从以人工为主的传统方式逐渐向智能分拣转变[85]。建筑固废分选装置[86] (图10)、SpotGarbage [87]、ZenRobotics Recycler [88] (图11)、多波段红外成像智能装置[89]等智能垃圾识别设备相继出现, 基于传感器和计算机视觉技术的分类系统不仅提高了建筑固废分拣和分类效率, 还保证了分类的准确性, 使得从众多建筑垃圾中自动准确地分离金属、混凝土、木材和塑料成为可能[90-91]。智能分拣模式有助于快速筛选建筑固体废弃物中的可回收部分, 与传统分选技术相比, 在成本、准确度和复杂度等方面都有了很大的改善。其次, 泛在传感和宽带物联网技术为建筑固废消纳管控策略的形成带来新的发展契机[92]。通过射频识别装置、红外感应器和5G通讯等信息设备将建筑固废与互联网相连接, 可实现对建筑固废产生、运输和回收的全过程进行智能识别、定位追踪、远程监控和管理决策。例如, 物联网技术已被应用于建筑工程渣土运输和建筑垃圾回收设施的管理[93], 实现了车、路、人、云之间的智能信息交换和共享, 促进了建筑固废资源的快速追踪和调度, 提高了建筑固废的回收和利用效率。此外, 建筑固废的再利用技术和下游产品的开发已逐渐与建材、建筑、市政、交通和环境治理等产品应用领域深度融合。建筑固废可根据工程场景用作不同用途, 如地基和路基的填料、再生沥青路面(RAP)材料、再生砖生产原料、再生绿化土和再生混凝土[94]。尽管再生骨料混凝土在强度和耐久性等方面尚存在一定局限性, 但随着加速碳化[95]、结晶处理[96]、钢筋螺旋约束[97]、再生混合骨料混凝土[98]等技术的引入, 可在一定程度上弥补再生骨料混凝土的缺陷。利用RAP材料建造新路面是一个颇具潜力的热门发展方向。尽管RAP的性能存在一定缺陷, 但添加基质沥青或如生物油和食用油类再生剂[99], 可以使RAP达到与原始沥青混合料相当的路用性能。现场铣刨和搅拌设备的使用也极大地提高了RAP的回收利用效率。另外, 将建筑固废生产成再生材料用于路基填充, 是实现资源最大化利用的有效途径[100]。

目前, 建筑固废分拣、回收和综合利用的全产业链已逐渐形成。中国贵州、广东和山东等地相继建成了多个高效、高质和高值的建筑固废综合利用示范工程。将建筑固废的分拣、分类、深加工和再利用生产线进行了集中和整合, 实现了在同一产业园完成建筑固废消纳的全过程, 大幅缩短了消纳周期, 有效降低了消纳过程中的能耗和碳排放。

智能消纳是实现交通基础设施绿色发展不可或缺的关键环节, 其科学和技术体系的完善需从以下几个方面



图10. 建筑垃圾分类装置。经允许转载自参考文献[86]。

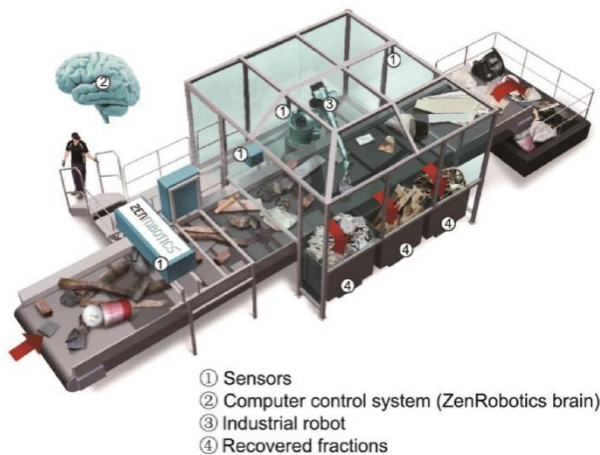


图11. ZenRobotics再循环器。①传感器；②电脑控制系统；③工业机器人；④分类回收。经允许转载自参考文献[88]。

着手：

(1) 智能分选回收技术。成分复杂且难以区分是阻碍建筑固废高效回收的关键难题。因此，智能分拣技术的开发是建筑固废回收技术亟需突破的瓶颈问题。尽管计算机和图像识别等信息技术的发展十分迅速，但其在建筑固废智能分拣中的应用还存在如存在分类不细致、分类准确性差和分拣效率低等诸多局限。需加强多功能成像技术、计算机视觉技术与人工智能技术的融合，开发和完善建筑固废智能分拣系统，提高分类准确性和工作效率，实现建筑固废的智能高效回收。

(2) 清洁增值利用、高效安全转化和精深加工技术。应充分利用大数据和计算机辅助决策等现代化信息技术，开发并建立建筑固废综合利用信息管理系统，整合建筑固废产生单位、产生量、品质及利用情况等内容，提高资源配置的效率。同时深度开发自动化和人工智能技术，建立先进的工厂制造和机器施工技术，促进建筑固废综合利用率的提升，最终实现建筑固废高效安全资源化。

(3) 精准管控决策。精准管控包括精准管理、安全和环境风险控制两个方面。首先，应充分结合现代信息化技术，建立精准高效的管控系统，实现从固废发生源管控的

长远规划设计和科学组织；其次，完善毒害成分阻断原理及多元组份协同调控机理研究，建立环境监测体系和风险管控机制，利用计算机辅助计算手段进行科学规划，实现建筑固废消纳全过程的风险因素最低化。

6. 交通基础设施智能化技术综合应用

目前智能建造技术体系架构已基本形成并逐步落地，一些单项工程已开始试点应用，并在工程实践中取得了良好的和社会效益。表1给出了一些典型交通基础设施的智能化技术的需求程度。

表1 典型交通技术设施智能化技术需求

| | Intelligent design | Intelligent construction | Intelligent maintenance | Intelligent elimination |
|-----------------|--------------------|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Bridges | ★★ | ★★★ | ★★★ | ★ |
| Tunnels | ★★★ | ★★★ | ★★★ | ★ |
| Roads | ★★ | ★★★ | ★★ | ★★★ |
| Port structures | ★★★ | ★★★ | ★★ | ★ |

★: optional intellectualizations; ★★: suggested intellectualizations; ★★★: necessary intellectualizations.

京张高速铁路是中国《中长期铁路网规划》中“八纵八横”高速铁路网北京至兰州通道的重要组成部分，其主线由北京北站至张家口站，正线全长174 km，最高设计速度达 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 。由于该线路具有地质条件复杂、生态环境脆弱、沿线古建众多等特点，中国国家铁路集团有限公司综合应用智能设计技术、智能施工技术和智能运维技术，建成了世界首条基于智能化理念建造的高速铁路。京张高速铁路采用的智能建造技术主要包括：

(1) 在勘察设计阶段。通过低空遥感航测和北斗卫星导航等“空、天、地”一体化智能勘察技术，合理规避环保、城市规划、文物古迹等重点区域及重要设施，有效降低了铁路建设初期的决策风险；构建了基于BIM的全专业、全线统一环境的协同设计平台；开发了测绘、线路、桥梁、隧道、路基、接触网、信号等多个BIM协同软件，实现了多专业参数化设计、工程量计算、专业间装配、成果集成化管理和信息无损化传递。

(2) 在施工组织阶段。建立了基于工业机器人和大数据的智能双块式轨枕生产线，实现了轨枕制造全工序过程的自动化、枕场全要素数据的在线集中管理、轨枕施工质量的高精度检测；形成了路、桥、隧、站的智能化施工和精细化管理成套技术，实现了施工机械自动引导、协同作业、无缝衔接，施工工艺可视化交底和施工过程的三维动

态监控。例如，官厅水库特大桥京张高速铁路的控制性工程之一，创新性地采用了智能控制多点同步顶推和自动监测技术，突破性地解决了多孔大跨钢桁梁的顶推施工难题（图12）。



图12. 官厅水库特大桥同步顶推。

（3）在运维管理阶段。构建了全链条智能安全监测和多专业一体化综合运维系统，实现了监测数据全时汇聚、致灾因子综合研判、危情险情预测预警和应急处置联动协同；研发了基于BIM+GIS的高铁工程管理平台，实现了构件级三维形象进度、质量和安全的综合管控，工程建设数据的多角度、多维度和多尺度综合分析与管理。

京张高速铁路自2019年开通运营以来，因显著减少的事故率和广泛突出的示范效应，赢得了社会各界的普遍赞誉。

7. 结论和展望

快速推进智能化进程是土木工程行业生产方式转型升级的关键所在，也是实现“碳达峰、碳中和”国家战略的重要途径。未来在以大数据智能、混合增强智能、类脑智能等为代表的信息技术战略性突破大背景下，应充分挖掘和广泛利用这些技术在主动感知、自主学习、优化决策和交互应用方面的独特优势，推进土木工程和交通基础设施领域的智能化研究水平，关注交通基础设施智能化技术体系架构的建设与逐步落地，从而为构建“安全可靠、智能高效、绿色低碳”的新一代工程结构提供支撑保障。因此，未来应重点强化以下三个方面的研究：

（1）构建、完善交通基础设施智能化的统一标准和评价体系。政府部门应做好结构智能化的顶层规划，编制智能标准化体系建设指南。牵头组织相关科研院所、咨询机构和大型企业，加强跨机构、跨组织、跨领域的合作研究。建立土木工程智能化协同创新体系。联合制定与智能化相匹配的设计标准、施工标准、运维标准、消纳标准和

建筑产业互联网数据交换标准等基础共性标准。推动建立结构智能化的基本规定、评分体系、评价等级和认证机构等，加快实现智能化技术和产品的规范化。

（2）突破制约交通基础设施智能化的基础理论和关键技术。一是逐步完善智能化基础理论体系架构，明确体系各组成部分的科学内涵与逻辑关系，从而为工程结构智能化的高质量发展指明方向；二是加快推进以BIM技术为代表的智能化软件与平台的开发，全面提升智能化的信息化水平；三是以人机交互技术为驱动，融合应用先进传感、5G通信、激光扫码、射频识别，以及超动态、多频段、高精度采集技术，建成具有泛在感知、智慧决策和预知维护的智能化综合管控系统；四是强化土木工程领域的智能化研究深度，推动智能化设计、施工、运维和消纳相关技术装备的研发和应用。

（3）健全交通基础设施智能化所需的复合型人才培养体制。基于“多学科交叉融合”的基本培养内涵，围绕智能化人才需求，跨界建筑、土木、电信、机械等传统工科专业以及人工智能、物联网、区块链等新兴领域，不断推进培养方案的改革和创新，全面落实满足该行业人才需要具备的交叉学科知识储备。同时，联合各国知名建筑企业，加强建立校企合作和协同育人的一体化教学实践环境，提高学生的创新精神和实践能力，培养能够突破专业知识壁垒、擅长融会贯通与跨界整合、懂得充分利用创造性思维的“一专多能”的全面型人才。

致谢

感谢国家自然科学基金项目(51991390和52250011)的资助。

Compliance with ethics guidelines

Yan-Liang Du, Ting-Hua Yi, Xiao-Jun Li, Xiao-Li Rong, Long-Jun Dong, Da-Wei Wang, and Yang Gao declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

- [1] Fu W. A closer look at the construction of common terminology. Beijing: China Electric Power Press; 2014. Chinese.
- [2] Du Y, Sun B, Zhang G. Smart materials and structural health monitoring. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press; 2011. Chinese.
- [3] Chen K, Ding L. Development of key domain-relevant technologies for smart

- construction in China. *Strateg Stud Chin Acad Eng* 2021;23(4):64–70. Chinese.
- [4] Liu W. Key Technology System of Intelligent Construction. *Constr Archit* 2020; 421:72–7. Chinese.
- [5] Yao JTP. Concept of structural control. *J Struct Div* 1972;98(7):1567–74.
- [6] Ou JP, Guan XC. Research and development on the intelligent structural systems in civil engineering. *Earthquake Eng Dyna* 1999;2:21–8. Chinese.
- [7] Bridges S. Assessment for future traffic demands and longer lives [Internet]. Sweden: Community Research and Development Information Service; 2003 Dec [cited 2022 May 25]. Available from: <https://cordis.europa.eu/project/id/1653>.
- [8] Bu GP, Lee JH, Guan H, Loo YC, Blumenstein M. Prediction of long-term bridge performance: integrated deterioration approach with case studies. *J Perform Constr Fac* 2015;3:04014089.
- [9] Government HM. Industrial strategy: construction 2025. London: Government and Industry in Partnership; 2013.
- [10] Discussion on the management of road bridges [Internet]. Tokyo: National Institute for Land and Infrastructure Management; 2013 Sep [cited 2022 May 30]. Available from: <http://www.nilim.go.jp>. Japanese.
- [11] Oztemel E, Gursev S. Literature review of Industry 4.0 and related technologies. *J Intell Manuf* 2020;31:127–82.
- [12] Yoshioka D. The future of construction drawn by I-Construction. *New Archit* 2017;92(4):44–6. Japanese.
- [13] Legislative outline for rebuilding infrastructure in America [Internet]. Washington DC: The White House; 2018 Feb 12 [cited 2021 Oct 26]. Available from: <https://www.politico.com/f/?id=00000161-8a9d-d53a-a5f5-bffd597b0000>.
- [14] Guiding opinions on promoting the coordinated development of intelligent construction and building industrialization [Internet]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development; 2020 July 3 [cited 2021 Oct 26]. Available from: http://www.mohurd.gov.cn/wjfb/202007/t20200728_246537.html. Chinese.
- [15] Ling J, Li X, Li H, Shen Y, Rui Y, Zhu H. Data acquisition-interpretation-aggregation for dynamic design of rock tunnel support. *Autom Constr* 2022; 143:104577.
- [16] Huang J, Feng X, Zhou Y, Yang C. Stability analysis of deep-buried hard rock underground laboratories based on stereophotogrammetry and discontinuity identification. *Bull Eng Geol Environ* 2019;78(7):5195–217.
- [17] Gore A. The digital earth: understanding our planet in the 21st century. *Photogramm Eng Remote Sensing* 1999;5:528–30.
- [18] Zhu H. From digital earth to digital stratum-new thinking of geotechnical engineering development. *Geotech Eng World* 1998;12:15–7. Chinese.
- [19] Zhu H, Li X. Underground space and engineering. *Chin J Rock Mech Eng* 2007;26(11):227788. Chinese.
- [20] Miorandi D, Sicari S, Pellegrini FD, Chlamtac I. Internet of things: vision applications and research challenges. *Ad Hoc Netw* 2012;10(7):1497–516.
- [21] Li J, Lu Z. Method for calculating the tunnel convergence based on the locating laser scanning point cloud. *Geotech Investig Surv* 2016;44(12):52–5. Chinese.
- [22] Leberl F, Irschara A, Pock T, Meixner P, Gruber M, Scholz S, et al. Point clouds: lidar versus 3D Vision. *Photogramm Eng Remote Sensing* 2010;76(10): 1123–34.
- [23] Li X, Chen J, Zhu H. A new method for automated discontinuity trace mapping on rock mass 3D surface model. *Comput Geosci* 2016;89:118–31.
- [24] Xin X, Cai H. Ontology and rule-based natural language processing approach for interpreting textual regulations on underground utility infrastructure. *Adv Eng Inf* 2021;48:101288.
- [25] Zhu H, Wu W, Li X, Chen J, Huang X. High-precision Acquisition, analysis and service of rock tunnel information based on iS3 platform. *Chin J Rock Mech Eng* 2017;36(10):2350–64. Chinese.
- [26] Lin S, Yi T, Li H, Chen Y. Damage detection in the cable structures of a bridge using the virtual distortion method. *J Bridg Eng* 2017;22(8):04017039.
- [27] Hammad A, Itoh Y, Nishido T. Bridge planning using GIS and expert system approach. *J Comput Civ Eng* 1993;7(3):278–95.
- [28] Rafiq MY, Bugmann G, Easterbook DJ. Neural network design for engineering applications. *Comput Struc* 2001;79(17):1541–52.
- [29] Ballal T, Sher W. Artificial neural network for the selection of buildable structural systems. *Eng Construct Architect Manag* 2003;10(4):263–71.
- [30] Jootoo A, Lattanzi D. Bridge type classification: supervised learning on a modified NBI dataset. *J Comput Civ Eng* 2017;31(6):04017063.
- [31] Sigmund O, Maute K. Topology optimization approaches. *Struct Multidiscipl Optim* 2013;48(6):1031–55.
- [32] Yu Y, Hur T, Jung J, Jang IG. Deep learning for determining a near-optimal topological design without any iteration. *Struct Multidiscipl Optim* 2019;59(3): 787–99.
- [33] Zhou G, Sun Y, Jia P. Application of genetic algorithm based BP neural network to parameter inversion of surrounding rock and deformation prediction. *Mod Tunn Technol* 2018;55(1):107–13. Chinese.
- [34] Ling T, Qin J, Song Q, Hua F. Intelligent displacement back-analysis based on improved particle swarm optimization and neural network and its application. *J Railw Sci Eng* 2020;17(9):2181–90. Chinese.
- [35] Zhu H, Li X, Lin X. Infrastructure Smart Service System (iS3) and its application. *China Civ Eng J* 2018;51(1):1–12. Chinese.
- [36] Tao F, Liu W, Zhang M, Hu T, Qi Q, Qi Q. Five-dimension digital twin model and its ten applications. *Comput Integr Manuf Syst* 2019;25(1):1–18. Chinese.
- [37] Sakdirat K, Qiang L. Digital twin aided sustainability-based lifecycle management for railway turnout systems. *J Clean Prod* 2019;228:1537–51.
- [38] Chen J, Zhu H, Li X. Automatic extraction of discontinuity orientation from rock mass surface 3D point cloud. *Comput Geosci* 2016;95:18–31.
- [39] Hwang B, Shan M, Ong J, Krishnankutty P. Mechanization in building construction projects: assessment and views from the practitioners. *Prod Plann Contr* 2020;31(8):613–28.
- [40] Gao S, Jin R, Lu W. Design for manufacture and assembly in construction: a review. *Build Res Inform* 2020;48(5):538–50.
- [41] Pellicer E, Correa CL, Yepes V, Alarcón LF. Organizational improvement through standardization of the innovation process in construction firms. *Eng Manag J* 2012;24(2):40–53.
- [42] Woodhead R, Stephenson P, Morrey D. Digital construction: from point solutions to IoT ecosystem. *Autom Construct* 2018;93:35–46.
- [43] Chayama K, Fujioka A, Kawashima K, Yamamoto H, Nitta Y, Ueki C, et al. Technology of unmanned construction system in Japan. *J Robot Mechatron* 2014;26(4):403–17.
- [44] Forcael E, Ferrari I, Opazo-Vega A, Pulido-Arcas JA. Construction 4.0: a Literature review. *Sustainability* 2020;12(22):9755.
- [45] Niu Y, Lu W, Chen K, Liu D. Smart construction objects. *J Comput Civ Eng* 2015;30(4):04015070.
- [46] Liu W. Modernization, informationization, digitalization, intelligentization and their interconnections. *Chin Railways* 2011;1:83–6. Chinese.
- [47] Zhang P, Chen R, Dai T, Wang Z, Wu K. An AloT-based system for real-time monitoring of tunnel construction. *Tunn Undergr Sp Tech* 2021;109:103766.
- [48] Li J, Jing L, Zheng X, Li P, Yang C. Application and outlook of information and intelligence technology for safe and efficient TBM construction. *Tunn Undergr Sp Tech* 2019;93:103097.
- [49] Koopialipoor M, Tootoonchi H, Armaghani DJ, Mohamad ET, Hedayat A. Application of deep neural networks in predicting the penetration rate of tunnel boring machines. *Bull Eng Geol Environ* 2019;78(8):6347–60.
- [50] Wu R, Fujita Y, Soga K. Integrating domain knowledge with deep learning models: an interpretable AI system for automatic work progress identification of NATM tunnels. *Tunn Undergr Sp Tech* 2020;105:103558.
- [51] Mahmoodzadeh A, Mohammadi M, Daraei A, Faraj RH, Omer RMD, Sherwani AFH. Decision-making in tunneling using artificial intelligence tools. *Tunn Undergr Sp Tech* 2020;103:103514.
- [52] Lu C, Liu J, Liu Y, Liu Y. Intelligent construction technology of railway engineering in China. *Front Eng Manag* 2019;6(4):503–16.
- [53] Wu Z, Wei R, Chu Z, Liu Q. Real-time rock mass condition prediction with TBM tunneling big data using a novel rock – machine mutual feedback perception method. *J Rock Mech Geotech Eng* 2021;13(6):1311–25.
- [54] Zhao R, Shi S, Li S, Guo W, Zhang T, Li X, et al. Deep learning for intelligent prediction of rock strength by adopting measurement while drilling data. *Int J Geomech* 2023;4:04023028.
- [55] Xu Z, Shi H, Lin P, Liu T. Integrated lithology identification based on images and elemental data from rocks. *J Pet Sci Eng* 2021;205:108853.
- [56] Xu Z, Liu F, Lin P, Shao R, Shi X. Non-destructive, *in-situ*, fast identification of adverse geology in tunnels based on anomalies analysis of element content. *Tunn Undergr Sp Tech* 2021;118:104146.
- [57] Wang Z. Status and prospect of intelligent construction technology of tunnel of Zhengzhou–Wanzhou high-speed railway. *Tunnel Constr* 2021;41(11):1877–90.
- [58] Kong F, Lu D, Ma Y, Li J, Tian T. Analysis and intelligent prediction for displacement of stratum and tunnel lining by shield tunnel excavation in complex geological conditions: a case study. *IEEE T Intell Transp* 2022;23(11): 22206–16.
- [59] Zeng L, Shu W, Liu Z, Zou X, Wang S, Xia J, et al. Vision-based high-precision intelligent monitoring for shield tail clearance. *Automat Constr* 2022; 134: 104088.
- [60] Zhang K, Lyu HM, Shen SL, Zhou A, Yin ZY. Data on evolutionary hybrid neural network approach to predict shield tunneling-induced ground settlements. *Data Brief* 2020;33:106432.

- [61] Wang F, Lu H, Gou B, Han X, Zhang Q, Qin Y. Modeling of shield-ground interaction using an adaptive relevance vector machine. *App Math Model* 2016; 40(9):5171–82.
- [62] Hu M, Wu B, Zhou W, Wu H, Li G, Lu J, et al. Self-driving shield: Intelligent systems, methodologies, and practice. *Autom Construct* 2022;139:104326.
- [63] Wang F, Sui H, Kong W, Zhong H. Application of BIM+ VR technology in immersed tunnel construction. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Bristol: IOP Publishing; 2021.
- [64] Liu C, Bu Q, Lin S, Li F. BIM-based collaborative management and intelligent manufacturing in the Shenzhong Link Project. *E3S Web of Conferences*. Essonne: EDP Sciences; 2019.
- [65] Zhao N, Liu R, Hao S, Li J, Wu K, Jiao C. Research on Shenzhong Link immersed tunnel intelligent traffic control strategies. *International Conference on Intelligent Transportation Engineering*. Singapore: Springer; 2022.
- [66] Brownjohn JMW. Structural health monitoring of civil infrastructure. *Philos Trans- Royal Soc, Math Phys Eng Sci* 1851;2007(365):589–622.
- [67] Yi T. *Structural health monitoring*. Beijing: Higher Education Press; 2021. Chinese.
- [68] Shim CS, Dang NS, Lon S, Jeon CH. Development of a bridge maintenance system for prestressed concrete bridges using 3D digital twin model. *Struct Infrastruct Eng* 2019;15(10):1319–32.
- [69] Gao Z. Design and Application of maintenance management system for Hangzhou Bay Sea-Crossing Bridge. *Highw* 2013;03:196–201. Chinese.
- [70] Xia Z, Gao W, Jing Q. Application and the prospect of BIM technology in bridge operation and maintenance stage. *Guangdong Highw Commun* 2022; 48(01):32–7. Chinese.
- [71] Gu Y, Shui J, Yu J. Construction and application of intelligent cloud control platform for Hangzhou Bay Sea-Crossing Bridge. *China ITS J* 2021;05:122–5. Chinese.
- [72] Xiong W, Liu H, Guo J, Wu J. Bridge deck system reconstruction and mechanical behavior analysis of Nanjing Yangtze River Bridge. *J Southwest Univ* 2018;48(2):350–6. Chinese.
- [73] Sun Y. Reconstruction and reuse of the modern architecture-taking the customhouse cultural relics renovation project as an example. *Archit Cult* 2017; 11:83–4. Chinese.
- [74] Liu H. Research on service life prediction model of concrete structure of sea-crossing. *Const Des Proj* 2016;10:100–2. Chinese.
- [75] Huang H, Yi T, Li H, Liu H. New representative temperature for performance alarming of bridge expansion joints through temperature-displacement relationship. *J Bridg Eng* 2018;23(7):04018043.
- [76] Yi T, Yao X, Qu C, Li H. Clustering number determination for sparse component analysis during output-only modal identification. *J Eng Mech* 2019; 145(1):04018122.
- [77] Yang X, Yi T, Qu C, Li H, Liu H. Modal identification of high-speed railway bridges through free-vibration detection. *J Eng Mech* 2020;146(9):04020107.
- [78] Dong L, Hu Q, Tong X, Liu Y. Velocity-free MS/AE source location method for three-dimensional hole-containing structures. *Engineering* 2020;6(7):827–34.
- [79] Fu Y, Yang Z, Liang Z. Based on research on the application of structural health monitoring of bridge Operation BIM technology. *Southwest Highw* 2019;1:20–5. Chinese.
- [80] Guo J, Lin J, Han Y, Li X, Liu J. Application study of BIM technology in refined management of project cost. *Chongqing Archit* 2016;15(8):10–2. Chinese.
- [81] Ministry of science and Technology of the People's Republic of China. Exposure draft of the Application Guide for 2021 Targeted Projects of the Key Project of 'Solid Waste Resource Recovery' 2020 [accessed 10 October 2020]. Chinese.
- [82] Lin Z. Study on crystal modulation dynamics and pollutant interface behavior during heavy metal pollution control. In: *Proceedings of the 2016 National Symposium on Environmental Nanotechnology and Nanoimpact*; Xiamen: Chinese Chemical Society, China Instrument and Control Society; 2016.
- [83] Zhang J, Chen W, Zhang S, Guo J, Lui S. Multimodal deep neural network for construction waste object segmentation. *J Image Graph* 2019;24(7):1136–47.
- [84] Zhang S, Chen Y, Yang Z, Gong H. Computer vision based two-stage waste recognition-retrieval algorithm for waste classification. *Resour Conserv Recycling* 2021;169:105543.
- [85] Xu Z. Analysis on the technology and innovation development of chinese solid waste resource utilization. *Appl Energy Tech* 2021;3:19–21.
- [86] Hu K, Chen Y, Naz F, Zeng C, Cao S. Separation studies of concrete and brick from construction and demolition waste. *Waste Manag* 2019;85:396–404.
- [87] Mittal G, Yagnik KB, Garg M, Krishnan NC. SpotGarbage: smartphone app to detect garbage using deep learning. In: *Proceedings of the 2016 ACM International Joint Conference on Pervasive and Ubiquitous Computing*; 2016 Sep 12–16; Heidelberg, Germany: ACM Digital Library; 2016. p. 940–5.
- [88] Carlos B, Alejandro R, Manuel E. Automatic waste classification using computer vision as an application in Colombian high schools. In: *Proceedings of the 6th Latin-American Conference on Networked and Electronic Media*; 2015 Sep 23–25; Medellin, Colombia: IEEE Xplore; 2015.
- [89] Lukka TJ, Tossavainen T, Kujala JV, Raiko T. Zenrobotics recycler – robotic sorting using machine learning. *Proceedings of the International Conference on Sensor-Based Sorting (SBS)*. Citeseer, 2014;1:1.
- [90] Wang S, Xu F, He C. Development of industrial sorting robots based on visual analysis. *Shandong Ind Tech* 2017;24:22. Chinese.
- [91] Liu WL, Jia SL, Liu J. Separation of solid waste organic materials and inorganic materials based on Infrared Absorption Spectroscopy. In: *Proceedings of the 2019 National Academic Conference on Environmental Engineering (the second volume)*, Beijing: Industrial Construction Magazine Agency; 2019:298–301. Chinese.
- [92] Kong X. The research of solid waste management and monitoring system based on Internet of Things technology. *Shenyang: Shenyang Ligong University*; 2012. Chinese.
- [93] Liu S. Study on construction waste intelligent management system based on Internet of Things technology. *Dalian: Dalian Maritime University*; 2015. Chinese.
- [94] Wang N. Demonstration and control model of construction waste and demonstration of practical engineering application. *Beijing: Beijing Jiaotong University*; 2019. Chinese.
- [95] Kazmi S, Munir MJ, Wu YF, Patnaikuni I, Zhou YW, Xing F. Effect of recycled aggregate treatment techniques on the durability of concrete: a comparative evaluation. *Constr Build Mater* 2020;264:120284.
- [96] Wang X, Yang X, Ren J, Han NX, Xing F. A novel treatment method for recycled aggregate and the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *J Mater Res Technol* 2020;10:1389–401.
- [97] Munir MJ, Wu YF, Kazmi S, Patnaikuni I, Zhou YW, Xing F. Stress-strain behavior of spirally confined recycled aggregate concrete: an approach towards sustainable design. *Resour Conserv Recycling* 2019;146:127–39.
- [98] Wu B, Ji M, Zhao X. State-of-the-art of recycled mixed concrete (RMC) and composite structural members made of RMC. *Eng Mech* 2016;33(1):1–10.
- [99] Ahmed RB, Hossain K. Waste cooking oil as an asphalt rejuvenator: a state-of-the-art review. *Constr Build Mater* 2020;230:116985.
- [100] Zhang JH, Ding L, Li F, Peng JH. Recycled aggregates from construction and demolition wastes as alternative filling materials for highway subgrades in China. *J Clean Prod* 2020;255:120223.