

引文格式:朱合华, 窦世琦, 沈奕, 等. 基于数字技术的交通隧道工程低碳发展理念与思考[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(6): 1-10.
ZHU Hehua, DOU Shiqi, SHEN Yi, et al. Concept and Reflection on Low-carbon Development of Traffic Tunnel Engineering Based on Digital Technology[J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(6): 1-10.

基于数字技术的交通隧道工程低碳发展理念与思考

朱合华^{1,2,3} 窦世琦¹ 沈奕^{1,2,3} 芮易^{1,2,3} 李晓军^{1,2}

(1. 同济大学土木工程学院, 上海 200092; 2. 土木工程防灾减灾全国重点实验室, 上海 200092;
3. 土木信息技术教育部工程研究中心, 上海 200092)

摘 要:在双碳目标的指引下, 低碳化乃至零碳化成为交通隧道工程发展的必由之路, 而数字化转型为此带来了机遇与挑战。智慧基础设施服务系统可从信息的采集、传输、处理、分析、表达与服务全过程为交通隧道工程的低碳化发展提供强有力的数字底座, 大数据、云计算、区块链、人工智能等前沿技术可为交通隧道工程的全面勘察、动态设计、智能建造与高效运维注入新的发展活力。目前关于低碳隧道的相关研究还处于起步阶段, 相关标准体系尚未形成, 低碳与零碳隧道的发展目标、数字化赋能的具体对象与实现路径尚未明晰, 相应的顶层设计理论也亟待深入研究。文章初步分析了交通隧道工程的碳排放特征, 回顾了当下数字化技术在隧道工程全寿命期的成功应用, 并在此基础上进一步梳理、展望了数字化技术在低碳隧道中的应用前景。未来, 低碳隧道的发展应把握好后发优势, 加强数字化与绿色低碳理念的深度融合, 在全面提升交通隧道工程数字化水平的同时, 推进交通隧道行业碳中和目标的稳步实现。

关键词:低碳隧道; 零碳隧道; 数字化技术; 全寿命期

中图分类号:U45

文献标志码:A

1 引言

应对气候变化已成为全球议题。2020年9月22日, 中国在第七十五届联合国大会上提出“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值, 努力争取2060年前实现碳中和”, 明确了碳中和约束目标与实施战略, 积极应对全球气候环境挑战。

国际隧道和地下空间协会的统计数据表明, 近年来, 中国已成为交通隧道工程数量最多、建设规模最大、发展速度最快的隧道大国, 在建隧道长度约占全球的50%^[1]。因此低碳化乃至零碳化成为了隧道工程发展的新主题。

20世纪90年代中期以来, 数字化赋能已逐步成为各行各业势不可挡的创新解决方案^[2,3]。在当今数字化转型的大背景下, 数字化技术正在重塑城市基础设施的规划、勘察、设计、施工和运维方式^[4], 也必将为交通隧道工程的绿色低碳转型带来新的机遇与

挑战。中共中央、国务院印发的《数字中国建设整体布局规划》^[5]也进一步强调, 应“深入推动数字技术赋能传统行业绿色化转型”。

然而, 低碳隧道的相关研究尚处于起步阶段, 研究体量小、成果少, 行业的相关标准体系也尚未形成, 而数字化赋能交通隧道工程绿色低碳发展的相关研究则基本处于空白。基础设施智慧服务系统 (Infrastructure Smart Service System, iS3)^[6]立足于信息流的基本概念, 打通了基础设施全寿命期的信息采集、传输、处理、分析、表达与服务过程, 可为低碳隧道的勘察、设计、施工、运维等提供数字底座支持。而在此基础上还需要对隧道的低碳化乃至零碳化发展进行顶层设计与统筹规划, 才能明确数字化赋能的具体对象与实现路径, 进而进行相应的科技攻关与推广应用。

本文基于已有的研究基础, 对“低碳隧道”“零碳隧道”与“隧道工程数字化”等概念进行了分析与探

收稿日期: 2023-10-13

修回日期: 2023-11-14

基金项目: 江西省交通运输厅科技项目(2022C0003): 山区高速公路碳排放计算与评估技术研究。

作者简介: 朱合华(1962-), 男, 博士, 中国工程院院士, 主要从事地下空间方面的研究工作, E-mail: zhuhehua@tongji.edu.cn。

通讯作者: 窦世琦(2000-), 女, 博士研究生, 主要从事低碳隧道、能源地下工程方面研究工作, E-mail: 2310059@tongji.edu.cn。

讨。通过梳理交通隧道工程全寿命期碳排放特征以及回顾总结当前隧道工程数字化转型取得的研究成果,本文强调了当今低碳隧道的发展离不开数字技术的全面应用与数字底座的支持,分析了数字化技术在低碳隧道建设中的应用前景,并为推动数字化转型与隧道工程低碳化发展的深度融合提出了建议。

2 低碳隧道与数字化

2.1 低碳隧道与零碳隧道

低碳隧道是碳中和背景下交通隧道工程发展的必由之路。江亿院士曾指出,除了需要燃烧过程的基础工业外,对我国大多数产业而言,实现碳中和就意味着零排放^[7]。因此,零碳隧道是隧道工程碳减排工作的终极目标。然而,当今一条2.5 km长的隧道(重庆金云山公路隧道)在施工期间排放的二氧化碳当量即可达52.6万吨^[1],在此背景下,零碳隧道——意味着隧道工程全寿命期的所有相关活动导致的温室气体排放量为零——无疑是一个艰巨而又长远的目标。

世界绿色建筑委员会(WGBC)就实现净零碳建筑所采用的技术行动需遵循的原则及其优先级提出了建议^[8],见表1。

表1 WGBC提倡的净零碳建筑实现原则及优先级
Table 1 The principles for realizing the net zero-carbon building advocated by WGBC and their priorities

优先级 排序	运营碳减排原则	隐含碳减排原则
1	减少并优化能源需求	翻新现有建筑替代开发新建筑
2	利用现场及场地外可再生能源	进行低碳设计,选择低碳材料、工艺并精益施工
3	进行碳排放补偿	延长建筑使用寿命,减少建筑更新拆除产生的碳排放
4	实现建筑运营深度脱碳	进行碳排放补偿

该倡议也同样适用于交通隧道工程。尽管“零碳隧道”目标的实现离不开我国能源结构的优化调整与上游建材生产等行业的积极脱碳革新,但如何在保证安全高质的前提下最大程度地减少隧道全寿命期的碳排放,仍是当今交通隧道行业发展的最重要议题之一。在明确技术手段优先级的基础上,还需进一步厘清交通隧道工程的碳排放特点,立足交通隧道的行业特征与发展现状,从而制定特色鲜明、

重点明确、切实可行的低碳隧道发展路径。

2.1.1 交通隧道工程全寿命期碳排放特征

勘察选址阶段产生的碳排放主要来源于工程地质的调查、测绘和勘探等活动所需的交通与机械设备,这部分碳排放仅占隧道全寿命期的极小份额,但勘察选址的结果却会对交通隧道工程的碳排放产生决定性影响。一方面,交通隧道建设本身来源于路网规划的需求,受宏观政策调控的影响极大;另一方面,围岩条件是影响隧道施工碳排放的关键变量。研究表明,V级和IV级围岩中隧道的碳排放量分别相当于Ⅲ级围岩的283%和188%^[1]。因此,精准的地质勘查工作与合理的隧道选线可大幅减少隧道建设产生的碳排放。

设计与施工阶段的碳排放主要集中在隧道施工过程,有3个主要来源:建筑材料、运输机械与施工机械。相关研究表明,隧道是材料和能量密度最高的交通设施^[9]。除围岩等级外,隧道埋深、开挖方法、开挖面积、施工工法及材料总质量等都与碳排放量息息相关^[1]。例如,挪威法(NMT)提倡使用单层衬砌系统,与采用复合衬砌的新奥法(NATM)相比,成型混凝土的移除可以节省大量水泥和钢筋,从而有效减少隧道施工碳排放。因此,对于低碳隧道而言,精细化的动态设计与施工至关重要。

运营阶段的交通隧道碳排放来自多个耗能(材)系统——照明、通风、排水与路面及衬砌维护等。这些系统共同营造了隧道内部的行车环境,保障了司机驾驶的安全稳定。因此,这一阶段的碳减排工作需以保障良好的司驾环境为前提条件^[10]。此外,由于隧道内部的车流是非恒定的,隧道运营期又不可避免地存在“能量浪费”现象,无法做到建筑中的“人走灯灭”^[11]。因此,交通隧道运维阶段的碳减排重点有三:一是通过前期的合理设计与结构健康监测等手段,制定以低碳为导向的隧道维护方案,在尽可能延长其使用寿命的同时减少因维修养护产生的碳排放;二是在明确隧道内环境与多个运营系统状态关系的基础上,实现以安全、舒适、低碳等目标的隧道运营系统优化控制;三是针对隧道长时间运营中的“能量浪费”现象,需探讨科学合理的“能量二次利用”方式,如借助隧道内的持续照明条件进行固碳微生物的培育^[12]等。另外还可通过建设能源隧道等方法挖掘隧道结构的产能、储能潜力,拓展在隧道运营期内实现碳补偿乃至碳增汇的可能性。

2.1.2 交通隧道工程碳排放核算边界

统一清晰的边界划分是开展低碳研究的先行条件。但由于低碳隧道的相关研究起步晚、体量小,我

国的交通隧道行业还未制定出明确的碳排放核算标准。依据国际公认的《温室气体核算体系》(GHG Protocol)^[13],碳排放可分为3个范围:

- (1) 直接碳排放,由直接拥有或控制的排放源产生,例如燃料燃烧活动产生的碳排放;
- (2) 间接碳排放,所需电力等能源产生的碳排放;
- (3) 隐含碳排放,其他类型的间接碳排放,需要考虑上游材料生产等过程。

在低碳建筑的研究中,目前我国房屋建造、运行的碳排放之比每年大致为4:6。随着新建建筑的逐年递减,未来的建造、运行碳排放之比或将为1:4^[14]。因此,在建筑工程中所计算的直接与间接碳排放往往只涵盖运行阶段,而建筑的勘察、设计、建造包括运行期间的维修养护等活动及建材生产所产生的温室气体排放则都被归于隐含类中^[15-17]。

许多学者在进行低碳隧道的相关研究时倾向于沿用低碳建筑的碳边界分类方法^[18,19]。但与房屋建筑相比,交通隧道工程的碳排放具有以下不同特征:

(1) 交通隧道为非标准化地下结构,其设计与施工和地质条件密切相关,因此施工工法、工艺、机械设备等的选择也更为复杂多样。在不同的地质条件下,不同隧道每延米的工程量并不相同,这也直接导致了不同地质环境中不同长度隧道的施工碳排放大相径庭。而且,由于隧道具有带状分布的特征,一个交通隧道工程极可能同时横穿多种不同的地质条件,导致每个隧道段的衬砌等设计都会进行相应的动态调整,这也造成了交通隧道施工碳排放的纵向分布不均匀。因此,施工阶段的碳排放计量与碳减排研究应与交通隧道工程特有的动态设计与施工模式息息相关。

(2) 随着隧道服役寿命的延长,隧道的运营碳排放也随之增加。研究表明,隧道运营阶段的能源使用和温室气体排放在全寿命期占比最高^[9]。但与建筑复杂的外环境和内部构造不同,隧道位于环境较为稳定的地下空间,且内部构造简单,不同隧道的运营系统设计思路也基本一致。因此,隧道运营期的碳排放计算模型与碳减排理论及方法等更容易在不同地区不同类型的隧道中推广与应用。

(3) 尽管建筑运行阶段的碳排放受到居民文化背景与活动特征等的显著影响^[20-22],但大多数建筑中的人群是相对固定的,即单个房屋建筑的能耗需求与碳排放是相对静态且孤立的。而隧道运行则受到动态的交通车流影响。在我国产生碳排放的3个主要部门——工业、建筑和交通中^[11],交通隧道工程既属于土木工程建筑^[23],又兼具交通服务功能。交

通隧道工程的建设与运维无疑增加了建筑部门的碳排放,但由于隧道可以优化交通路网并提高区域通行效率,故而交通隧道建设本身又可以减少交通运输业的车辆能耗与温室气体排放。

综上所述,在进行交通隧道工程碳排放核算边界划分与相关标准制定时,应充分考虑其动态设计与施工的复杂多变性、运营与维护设计理论的易推广性和隧道工程的“跨行业(建筑与交通)”特征。

2.2 交通隧道工程数字化

自20世纪90年代中期以来,数字化逐渐成为不可逆转的发展态势^[4]。在当今数字化转型的大背景下,数字化技术正在改变着以交通隧道工程为代表的土木基础设施的建设与运维方式^[24,10,25-27]。

2.2.1 智慧基础设施服务系统

在交通隧道等基础设施的全寿命期中会产生海量、繁杂、格式不一且相互关联的数据与信息,单一的数字化技术并不能满足工程全寿命数据监测处理、工程云分析服务等需求,土木信息服务系统的概念应运而生。

如前所述,交通隧道工程是非标准化的地下结构,因此相应的数字化系统中应至少涵盖隧道的结构信息、内环境及相关运营系统信息与周围的岩土环境信息。

地理信息系统(Geographic Information System, GIS)具备通用的空间数据管理、地图服务、图形显示、空间查询与分析等功能,可用于创建、存储、管理、分析、显示与空间有关的数据与信息,但对基础设施信息流缺乏有效的管理手段。建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)技术具有直观性、可分析性、可共享性与可管理性等特征,已在建筑工程的规划、勘察、设计、施工及运维阶段得到广泛应用,但在全寿命期多对象信息集成管理方面还存在较为明显的短板^[28]。

基础设施智慧服务系统(Infrastructure Smart Service System, iS3)由基础设施全寿命周期过程数据的采集、传输、处理、表达、分析和一体化决策服务等6部分组成,如图1所示。

iS3集成了GIS和BIM的数据存储、数据管理、空间分析和模型创建等功能,进一步集成地质建模软件和专业分析软件等功能,建立了基于统一数据模型的信息共享平台,如图2所示。

由于iS3以信息流为基础,广义上讲,其适用于任何领域的信息化应用^[6],故而可有效集成管理隧道全寿命期的结构信息、内环境及相关运营系统信

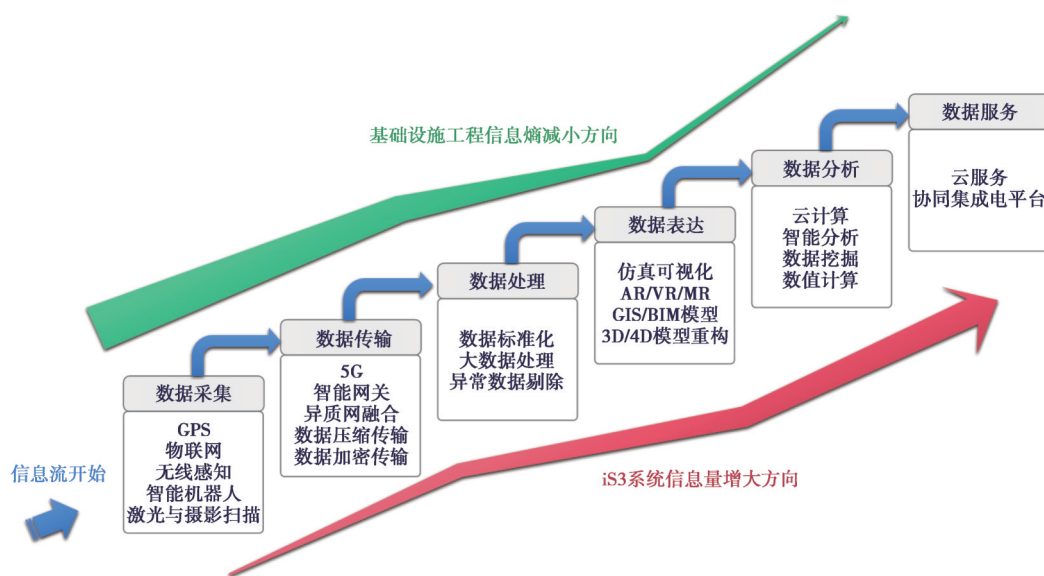


图1 基础设施智慧服务系统概念

Fig.1 Concept of infrastructure smart service system

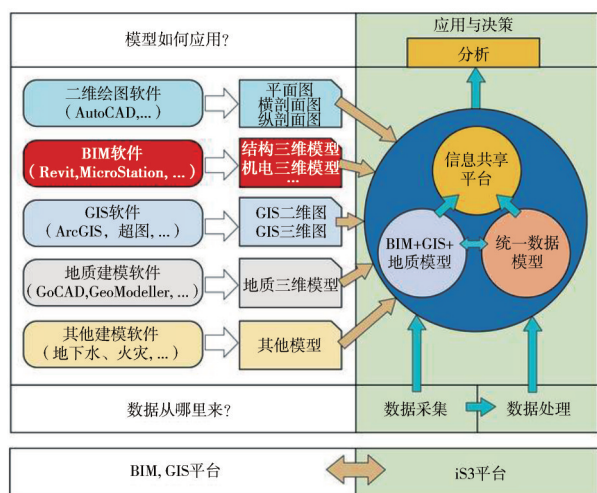


图2 基础设施智慧服务系统

Fig.2 The infrastructure smart service system

成整合了建国以来我国的油气、矿产、能源资源与地质环境和地质灾害调查的科学数据^[29];上海也建成了地质资料信息共享服务平台,面向社会提供市内地质信息的发布和检索服务^[30];雄安新区初步构建的“透明雄安”地质信息平台则建立了涵盖地下 10 000 m 内的地质层、含水层与热储层的地质框架模型^[31],如图3所示。

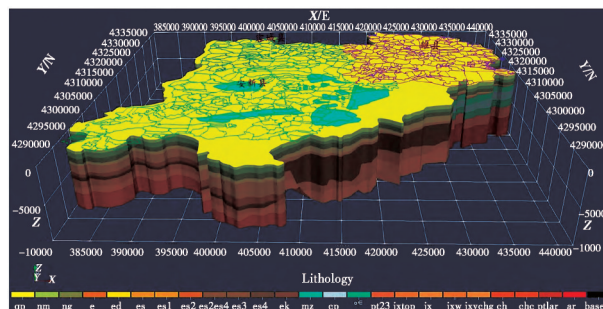


图3 雄安新区三维结构框架模型(0~10 km)^[31]

Fig.3 The 3D structural framework model for Xiongan New Area (0~10 km)^[31]

息、周围的岩土环境信息等。因此可基于 iS3 理念与系统开发交通隧道工程的数字底座,推动涵盖交通隧道全寿命场景的数字化应用。

2.2.2 数字技术助力全要素地质信息共享

地质勘察对工程建设的重要性不言而喻。随着数字化平台模式的引入和 GIS、人工智能、大数据、云计算等新一代信息技术的推广与应用,面对过去积累的地质资料资源分散、存储碎片化、标准不完善、信息发掘利用率低等系列问题^[25],建设全要素地质信息共享平台成为了当今工程勘察行业的新兴解决方案。如中国地质调查局上线的“地质云 3.0”集

全要素地质信息的共享实现了多年来零散的工程地质勘察成果的高效集成,为隧道等地下基础设施的规划与设计提供了重要参考。同时,在数字化技术的赋能下,平台提供的海量地质数据具有显著的理论科研价值和经济效益^[25]。

2.2.3 数字技术赋能隧道智能建造新业态

随着交通隧道工程数字化转型的推进,越来越多的新兴数字技术在隧道的动态设计与施工中发挥

重要作用。如朱合华等^[32]基于三维重构、精细化提取与分析算法,通过施工现场的双目照相采集即实现了对地质信息的融合建模和精细化分析;Rossi等^[33]通过在施工机械上安装智能传感设备,实现了

施工机械运行状态的实施评估。而随着数字化网络化技术与隧道施工应用场景的深度融合,陈超等^[24]建立了基于iS3的隧道智能建造系统,其总体框架如图4所示。

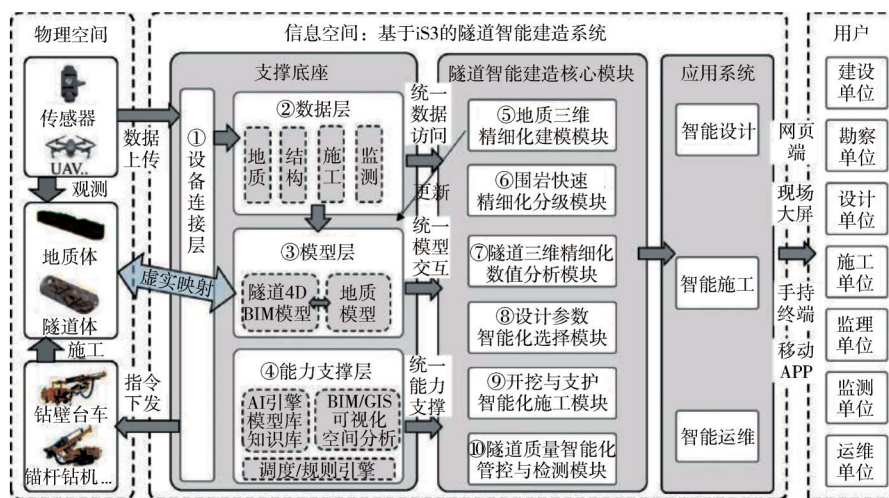


图4 基于iS3的隧道智能建造系统总体框架^[24]

Fig.4 General framework for tunnel intelligent construction system based on iS3^[24]

该系统已成功应用于峨汉高速公路大峡谷隧道。从工地信息提取到设计方案自动反馈的全过程仅需10 min时间^[24],为交通隧道的动态设计与施工提供了智能化解决方案。

2.2.4 数字技术保障隧道安全高效运营

数字化技术在交通隧道运营阶段也愈发挥重要的作用。如基于VR试验研究隧道照明相关理

论^[34],借助数值模拟研究隧道通风效果并进行系统优化设计^[35],通过一系列智能传感器的布设与人工智能方法实现交通隧道工程结构健康监测等^[36,37]。

数字化防灾则通过综合运用物联网、人工智能、云计算、数字孪生等技术,实现了灾害预警与信息快速获取、灾害信息实时处理与灾害实时反演、灾害场动态重构与动态决策等功能(图5),为提升交通隧

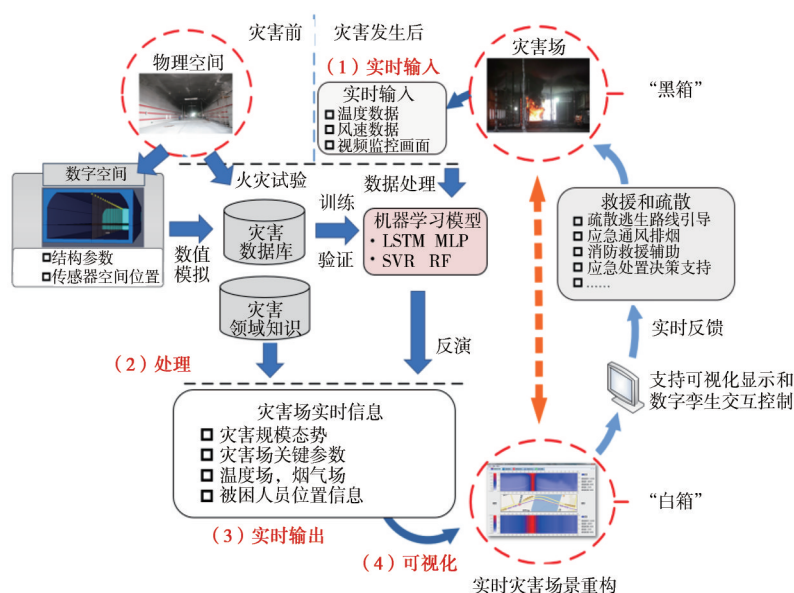


图5 长大交通隧道数字化防灾示意^[38]

Fig.5 Schematic diagram for digital disaster prevention system for long and large traffic tunnel^[38]

道工程防灾减灾能力提供了新的思路和保障^[38,39]。

3 基于数字技术的低碳隧道发展模式分析

3.1 数字底座支撑交通隧道全寿命碳排放评估

明确隧道全寿命期各个阶段各项活动产生的碳足迹是交通隧道工程实现低碳化与零碳化的第一步。由于无法对某项技术或举措的碳减排效果进行直接测量与验证,令人信服的碳排放计算模型是开展低碳隧道研究的基础保障。

生命周期分析(Life Cycle Assessment, LCA)是计量碳排放的最常用方法,然而在过去十余年的LCA相关研究与应用实践中,数据的缺乏与不可靠显然成为了碳排放精准计量工作的最大阻碍^[40-42]。

交通隧道工程LCA核算所需的数据可分为两类:

(1) 工程量数据。关于建筑材料和能源使用的明确清单,当下的主要来源包括隧道前期的勘察设计资料、施工图纸、运营期间的各类设备数量表和运营计划等。但一方面,这些繁杂的数据往往需要研究人员手动进行输入统计,大大增加了碳核算的前期成本投入;另一方面,目前交通隧道建设方等提供的资料往往无法满足LCA计量的要求,因此需引入大量假设,而这也大大增加了LCA分析结果的不确定性。

(2) 碳排放因子。其主要来源于各种数据库、政府组织、专业机构和相关参考文献提供的计算结果。尽管目前已有包括联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)数据库、Ecoinvent、中国生命周期数据库(CLCD)、GaBi等在内的多个数据库为LCA核算提供支持,但不同国家不同地区乃至不同公司所生产同类产品的碳排放因子皆存在差异。当下的碳排放因子数据库水平还远远无法支撑我国各个交通隧道工程的碳排放精准计量。

综上所述,导致LCA分析面临“数据困境”的根本原因在于当下交通隧道工程的数字化水平不足。而由于碳排放核算所需数据涉及交通隧道全寿命期的方方面面,且需要包括建材生产与运输等上游行业的碳排放因子数据库支持,因此,这一困境的突破离不开可靠的数字底座的支撑。

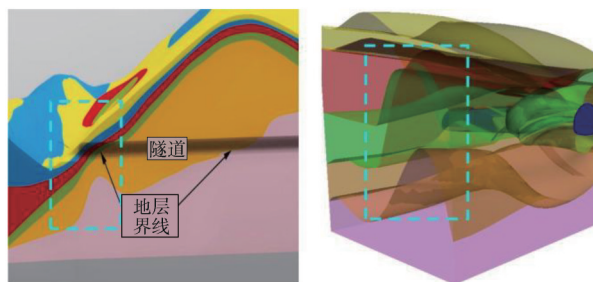
基于iS3的信息流理念,首先需要建立适用于交通隧道工程LCA核算的各项数据标准,并完善相关的碳排放因子数据库。在此基础上,借助智能传感器、物联网、语义识别等人工智能技术等,同时考虑与BIM、GIS等模型集成,实现工程量清单等数据

的自动采集、传输、处理、分析、表达,最终实现交通隧道工程全寿命期碳排放的高效、精准测量服务。

3.2 数字化技术助力交通隧道全寿命期碳减排

虽然低碳隧道的相关研究起步较晚,但近年来数字化隧道的研究已取得了丰硕的成果。在绿色低碳理念的指引下,这些数字化技术将为交通隧道的碳减排工作带来强大助力。

地质条件是影响交通隧道工程碳排放的关键参数,地质勘查阶段对于低碳隧道也至关重要。已建成的全要素地质信息共享平台可最大程度地避免数据浪费与重复工作,从而控制勘察工作中的碳排放。而现有的智能勘测手段与面向隧道复杂地质界面渐进式预测的多尺度建模方法等^[43](图6),在高效收集地质信息的同时将其数字化,在数字底座的支撑下,可为后续的低碳设计与碳排放计量等工作提供重要的数据支持。



(a) 区域尺度地质模型局部侧剖面 (b) 工程尺度地质界面透视图

图6 地质界面渐进式精细建模^[43]

Fig.6 Progressive fine modeling of geological interface^[43]

在建筑设计过程的早期阶段做出的决定将对最终建筑的性能产生重大影响^[41, 44-46]。这一理念对于低碳隧道也同样适用。在设计的早期阶段可通过粗粒度的LCA核算方法从绿色低碳角度对多个设计方案进行评估与比选^[41,46,47],并通过敏感性分析确定设计方案的最有效优化方向^[16]。在此基础上还可借助遗传算法等智能优化方法帮助设计人员自动选择碳排放最少的交通隧道设计方案^[48-50]。基于iS3的数字底座可保障这一过程中数据流通的顺畅有序。然而,由于早期阶段工程数据的缺乏,科学合理的假设必不可少,而已建隧道的碳排放标准化计量结果则是这些假设的可靠依据。

隧道施工阶段的碳减排离不开精细化的动态设计与施工,而智能建造模式所包含的全息感知、融合建模、智能分析、闭环控制和持续优化学习等技术,

大大提高了隧道施工过程的可控性^[24,27]。在 iS3 数字底座的支持下,将这些技术与 LCA 碳排放核算模型相结合,即可实时计算当前衬砌、支护等设计方案的碳排放,并根据隧道现场收集的围岩条件等信息,在保障施工安全的条件下,以碳排放最少为优化目标进行施工方案的动态更新。在对现场低碳施工进行科学指导的同时,这一流程也实现了数字底座中交通隧道施工相关数据的自动化收集存储,为后续的相关研究提供数据基础。

交通隧道运营期的碳减排应综合考虑隧道内部交通流与多个运营系统之间的相互作用关系,通过数字底座集成隧道的照明、通风、排水、路面维护等系统,通过动态仿真等手段研究这些系统的状态对交通隧道内司驾环境的影响规律,并借助智能分析与优化学习等算法制定兼顾安全舒适的低碳隧道运营策略。此外,还应将隧道健康监测系统与 LCA 碳排放核算模型相结合,尽可能减少隧道维护产生的碳排放等。

3.3 交通隧道低碳化发展数字化赋能的多行业视角

如前所述,交通隧道是承担交通功能的土木工程建筑,具有“跨部门”特征。因此,在核算由隧道施工运维等活动产生的碳排放的同时,也应借助区域尺度的交通路网模型与 LCA 模型对隧道在交通路网中的节能减排作用进行合理量化,从而更全面地理解隧道工程的碳排放属性,也可为低碳隧道的规划选址等提供科学依据。

4 结论与建议

交通隧道的建设来源于交通需求,在国家“双碳”战略背景下,隧道工程的低碳化乃至零碳化是交通隧道发展的必由之路。而在数字化转型政策指引下,应积极采取数字化技术赋能交通隧道工程的绿色低碳转型(图7),争取早日实现零碳隧道的最终发展目标。为实现交通隧道工程领域的数字化与低碳理念双驱动发展,本文提出以下建议:

(1) 在低碳隧道的相关研究与标准制定等过程

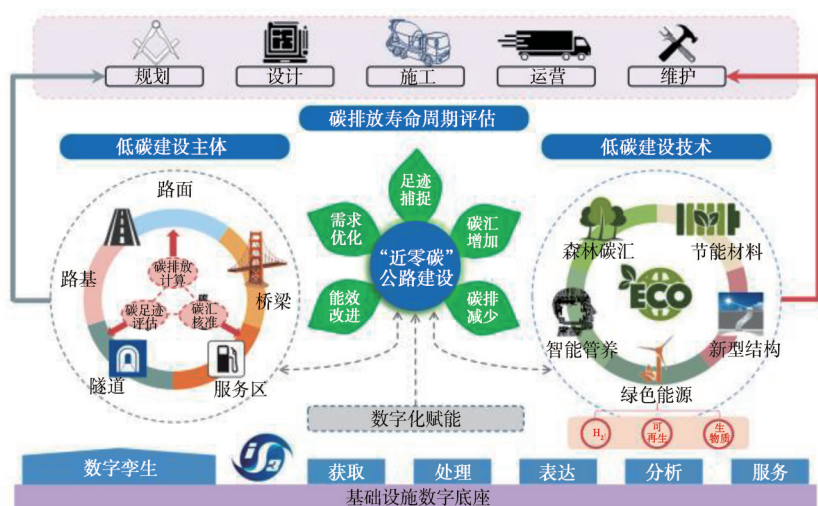


图7 数字化技术赋能交通隧道工程的绿色低碳转型

Fig.7 Green and low-carbon transition of traffic tunnel engineering empowered by digital technology

中,需充分考虑其动态设计与施工的复杂多变性、运营与维护设计理论的可推广性和隧道工程的“跨行业(建筑与交通)”特征。基于交通隧道工程的碳排放特征与发展现状,制定特色鲜明、切实可行的发展路径。

(2) 明确的交通隧道工程碳排放核算边界是进行大规模低碳隧道研究的先行条件;数据标准化则是数字化技术赋能的有力保障。因此应尽快制定低碳隧道研究相关的行业数据标准等,并在绿色低

碳发展理念的指导下,基于 iS3 系统建立交通隧道工程的数字底座,为数字化技术赋能低碳隧道保驾护航。

(3) 充分发挥低碳隧道建设的后发优势,科学合理地借鉴低碳建筑等相关领域的研究与实践经验,推动已有的数字化转型成果与低碳隧道应用场景的深度融合。以绿色低碳理念为指引,以数据为底板,以数字技术为支撑,加快推进交通隧道工程高质量发展的同时争取早日实现隧道领域的“双碳目标”。

参考文献

References

- [1] GUO Chun, XU Jianfeng. Carbon Emission Calculation Methods for Highway Tunnel Construction[M]. Singapore: Springer, 2022.
- [2] BIBRI S E, KROGSTIE J. Smart Sustainable Cities of the Future: an Extensive Interdisciplinary Literature Review[J]. Sustainable Cities and Society, 2017, 31: 183–212.
- [3] LÖFGREN K, WEBSTER C W R. The Value of Big Data in Government: The Case of ‘Smart Cities’[J]. Big Data & Society, 2020, 7(1): 1–14.
- [4] 朱合华. 立足数字底座推动智慧基础设施蓬勃发展[J]. 中国公路, 2023(6): 28–30.
ZHU Hehua. Based on Digital Infrastructure, Promoting the Vigorous Development of Smart Infrastructure[J]. China Highway, 2023(6): 28–30.
- [5] 中国共产党中央委员会, 中华人民共和国国务院. 中共中央国务院印发《数字中国建设整体布局规划》[EB/OL]. (2023–02–07)[2023–09–28]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/27/content_5743484.htm.
Central Committee of the CPC, State Council of the PRC. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council Have Issued the “Overall Layout Plan for the Construction of Digital China”[EB/OL]. (2023–02–07)[2023–09–28]. https://www.gov.cn/xinwen/2023-02/27/content_5743484.htm.
- [6] 朱合华, 李晓军, 林晓东. 基础设施智慧服务系统(iS3)及其应用[J]. 土木工程学报, 2018, 51(1): 1–12.
ZHU Hehua, LI Xiaojun, LIN Xiaodong. Infrastructure Smart Service System (iS3) and Its Application[J]. China Civil Engineering Journal, 2018, 51(1): 1–12.
- [7] 江 亿, 胡 珊. 中国建筑部门实现碳中和的路径[J]. 暖通空调, 2021, 51(5): 1–13.
JIANG Yi, HU Shan. Paths to Carbon Neutrality in China’s Building Sector[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(5): 1–13.
- [8] Anon. The Commitment[EB/OL]. [2023–09–27]. <https://worldgbc.org/thecommitment/>.
- [9] MILIUTENKO S, ÅKERMAN J, BJÖRKLUND A. Energy Use and Greenhouse Gas Emissions during the Life Cycle Stages of a Road Tunnel—the Swedish Case Norra Länken[J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2012, 12(1): 39–62.
- [10] SHEN Yi, LING Jiaxin, LI Xiaojun, et al. Holistic Digital-twin-based Framework to Improve Tunnel Lighting Environment: from Methodology to Application[J]. Building and Environment, 2022, 224: 109562.
- [11] 江 亿. 城乡能源系统碳排放核算与减排路径[J]. 可持续发展经济导刊, 2022(4): 14–19.
JIANG Yi. Carbon Emission Accounting and Emission Reduction Path of Urban and Rural Energy System[J]. China Sustainability Tribune, 2022(4): 14–19.
- [12] 沈 奕, 窦世琦, 朱合华. 一种内置于公路隧道内的微藻生物固碳系统: CN202210326249.6[P]. 2022–10–11.
SHEN Yi, DOU Shiqi, ZHU Hehua. A Microalgae Biological Carbon Sequestration System Embedded in Highway Tunnels: CN202210326249.6[P]. 2022–10–11.
- [13] Greenhouse Gas Protocol. Standards[EB/OL]. [2023–09–27]. <https://ghgprotocol.org/standards>.
- [14] 江 亿. 建筑领域的低碳发展路径[J]. 建筑, 2022(14): 50–51.
JIANG Yi. The Low-carbon Development Path in the Field of Architecture[J]. Construction and Architecture, 2022(14): 50–51.
- [15] NIZAM R S, ZHANG Cheng, TIAN Lu. A BIM Based Tool for Assessing Embodied Energy for Buildings[J]. Energy and Buildings, 2018, 170: 1–14.
- [16] BASBAGILL J, FLAGER F, LEPECH M, et al. Application of Life-cycle Assessment to Early Stage Building Design for Reduced Embodied Environmental Impacts[J]. Building and Environment, 2013, 60: 81–92.
- [17] ROBATI M, OLDFIELD P, NEZHAD A A, et al. Carbon Value Engineering: a Framework for Integrating Embodied Carbon and Cost Reduction Strategies in Building Design[J]. Building and Environment, 2021, 192: 107620.
- [18] 郭 春, 郭亚林, 陈 政. 交通隧道工程碳排放核算及研究进展分析[J]. 现代隧道技术, 2023, 60(1): 1–10.
GUO Chun, GUO Yalin, CHEN Zheng. Carbon Emission Accounting and Research Progress Analysis of Traffic Tunnel Engineering [J]. Modern Tunnelling Technology, 2023, 60(1): 1–10.
- [19] BANYAI J P, CASPERSEN A. A Look at Embodied Carbon in Segmental Tunnel Lining[C]//Expanding Underground – Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World, Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress 2023. London: CRC Press, 2023: 3–8.
- [20] AGUILAR J, GARCES-JIMENEZ A, R-MORENO M D, et al. A Systematic Literature Review on the Use of Artificial Intelligence in Energy Self-management in Smart Buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 151: 111530.
- [21] SEYRFAR A, ATAIE H, MOVAHEDI A, et al. Data-driven Approach for Evaluating the Energy Efficiency in Multifamily Residential Buildings[J]. Practice Periodical on Structural Design and Construction, 2021, 26(2): 04020074.

- [22] AMASYALI K, EL-GOHARY N. Machine Learning for Occupant-behavior-Sensitive Cooling Energy Consumption Prediction in Office Buildings[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 142: 110714.
- [23] 中国建筑节能协会建筑能耗与碳排放数据专业委员会. 2022 建筑能耗与碳排放研究报告[R/OL]. 重庆: 重庆大学, 2022 [2023-09-28]. <https://carbon.landleaf-tech.com/report/4621>.
Building Energy Consumption and Carbon Emission Data Professional Committee of China Building Energy Conservation Association. 2022 Research Report of China Building Energy Consumption and Carbon Emissions[R/OL]. Chongqing: Chongqing University, 2022[2023-09-28]. <https://carbon.landleaf-tech.com/report/4621>.
- [24] 陈超, 李晓军, 武威, 等. 基于 iS3 的隧道智能建造系统及其应用[J]. 土木工程学报, 2022, 55(增2): 12-19+28.
CHEN Chao, LI Xiaojun, WU Wei, et al. Tunnel Intelligent Construction System Based on iS3 and Its Application[J]. China Civil Engineering Journal, 2022, 55(S2): 12-19+28.
- [25] 倪海江, 朱合华, 李程, 等. 地质信息共享平台发展概述及思考[J]. 高校地质学报, 2023, 29(3): 395-402.
NI Haijiang, ZHU Hehua, LI Cheng, et al. Overview and Reflections on the Development of Geological Information Sharing Platform[J]. Geological Journal of China Universities, 2023, 29(3): 395-402.
- [26] 陈湘生, 曾仕琪, 韩文龙, 等. 机器学习方法在盾构隧道工程中的应用研究现状与展望[J/OL]. 土木与环境工程学报(中英文): 1-14[2023-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220712.1736.002.html>.
CHEN Xiangsheng, ZENG Shiqi, HAN Wenlong, et al. Review and Prospect of Machine Learning Method in Shield Tunnel Construction[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-14[2023-09-28]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1218.TU.20220712.1736.002.html>.
- [27] 陈湘生, 喻益亮, 包小华, 等. 基于韧性理论的盾构隧道智能建造[J]. 现代隧道技术, 2022, 59(1): 14-28.
CHEN Xiangsheng, YU Yiliang, BAO Xiaohua, et al. Intelligent Construction of Shield Tunnels Based on Resilience Theory[J]. Modern Tunnelling Technology, 2022, 59(1): 14-28.
- [28] 李晓军, 田吟雪, 陈树汪, 等. 建筑信息模型 (BIM) 技术在隧道工程中应用现状与分析[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 953-963.
LI Xiaojun, TIAN Yinxue, CHEN Shuwang, et al. Application Status and Analysis of Building Information Model (BIM) Technology in Tunnel Engineering[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 953-963.
- [29] 高振记. “地质云 3.0”——国家地球科学大数据共享服务平台简介[J]. 中国地质, 2022, 49(1): 2.
GAO Zhenji. “Geological Cloud 3.0”—Introduction to the National Earth Science Big Data Sharing Service Platform[J]. Geology in China, 2022, 49(1): 2.
- [30] 杨丽君, 严学新, 王军. 上海地质资料信息共享服务平台及其运维模式[J]. 上海国土资源, 2020, 41(2): 88-92+100.
YANG Lijun, YAN Xuexin, WANG Jun. Operation and Maintenance Mode of the Shanghai Geological Data Information-sharing Platform[J]. Shanghai Land & Resources, 2020, 41(2): 88-92+100.
- [31] 马震, 黄庆彬, 林良俊, 等. 雄安新区多要素城市地质调查实践与应用[J]. 华北地质, 2022, 45(1): 58-68.
MA Zhen, HUANG Qingbin, LIN Liangjun, et al. Practice and Application of Multi-factor Urban Geological Survey in Xiongan New Area[J]. North China Geology, 2022, 45(1): 58-68.
- [32] 朱合华, 武威, 李晓军, 等. 基于 iS3 平台的岩体隧道信息精细化采集、分析与服务[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(10): 2350-2364.
ZHU Hehua, WU Wei, LI Xiaojun, et al. High-precision Acquisition, Analysis and Service of Rock Tunnel Information Based on iS3 Platform[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2017, 36(10): 2350-2364.
- [33] ROSSI A, VILA Y, LUSIANI F, et al. Embedded Smart Sensor Device in Construction Site Machinery[J]. Computers in Industry, 2019, 108: 12-20.
- [34] LI Xiaojun, LING Jiaxin, SHEN Yi, et al. The Impact of CCT on Driving Safety in the Normal and Accident Situation: a VR-Based Experimental Study[J]. Advanced Engineering Informatics, 2021, 50: 101379.
- [35] 周豫菡, 朱合华, 冯守中. 公路隧道能见度与烟雾浓度的概念辨析及计算分析[J]. 公路交通科技, 2013, 30(10): 152-158.
ZHOU Yuhuan, ZHU Hehua, FENG Shouzhong. Analysis of Concept and Calculation of Highway Tunnel Visibility and Smoke Concentration[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2013, 30(10): 152-158.
- [36] ABBAS N, UMAR T, SALIH R, et al. Structural Health Monitoring of Underground Metro Tunnel by Identifying Damage Using ANN Deep Learning Auto-Encoder[J]. Applied Sciences, 2023, 13(3): 1332.
- [37] 任高峰, 陈硕, 周长进, 等. 运营期盾构隧道结构健康安全评估方法研究[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2023, 45(4): 520-526.
REN Gaofeng, CHEN Shuo, ZHOU Changjin, et al. Research on Health and Safety Assessment Method of Shield Tunnel Structure during Operation Period[J]. Journal of Wuhan University of Technology(Information & Management Engineering), 2023, 45(4): 520-526.
- [38] 闫治国, 田野, 朱合华, 等. 隧道火灾动态预警疏散救援系统及其应用[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 31-35+43.
YAN Zhiguo, TIAN Ye, ZHU Hehua, et al. Tunnel Fire Dynamic Early-warning, Evacuation and Rescue System and Its Application[J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 31-35+43.

- [39] GUO Chao, GUO Qinghua, ZHANG Tong, et al. Study on Real-time Heat Release Rate Inversion for Dynamic Reconstruction and Visualization of Tunnel Fire Scenarios[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2022, 122: 104333.
- [40] ONOSSEN A, MUSONDA I. Barriers to BIM-based Life Cycle Sustainability Assessment for Buildings: An Interpretive Structural Modelling Approach[J]. Buildings, 2022, 12(3): 324.
- [41] KAMARI A, KOTULA B M, SCHULTZ C P L. A BIM-based LCA tool for Sustainable Building Design During the Early Design Stage[J]. Smart and Sustainable Built Environment, 2022, 11(2): 217-244.
- [42] XU Jiayi, TENG Yue, PAN Wei, et al. BIM-integrated LCA to Automate Embodied Carbon Assessment of Prefabricated Buildings [J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 374: 133894.
- [43] WANG Jingxiao, LI Peinan, ZHUANG Xiaoying, et al. Multi-source Data Integration and Multi-scale Modeling Framework for Progressive Prediction of Complex Geological Interfaces in Tunneling[J]. Underground Space, 2024, 15: 1-25.
- [44] AZHAR S, CARLTON W A, OLSEN D, et al. Building Information Modeling for Sustainable Design and LEED® Rating Analysis [J]. Automation in Construction, 2011, 20(2): 217-224.
- [45] DAWOOD S, CROSBIE T, DAWOOD N, et al. Designing Low Carbon Buildings: a Framework to Reduce Energy Consumption and Embed the Use of Renewables[J]. Sustainable Cities and Society, 2013, 8: 63-71.
- [46] AZZOUZ A, BORCHERS M, MOREIRA J, et al. Life Cycle Assessment of Energy Conservation Measures during Early Stage Office Building Design: a Case Study in London, UK[J]. Energy and Buildings, 2017, 139: 547-568.
- [47] OYARZO J, PEUPORTIER B. Life Cycle Assessment Model Applied to Housing in Chile[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 69: 109-116.
- [48] ABANDA F H, BYERS L. An Investigation of the Impact of Building Orientation on Energy Consumption in a Domestic Building Using Emerging BIM (Building Information Modelling)[J]. Energy, 2016, 97: 517-527.
- [49] GAO Hao, ZHANG Liwenbo, KOCH C, et al. BIM-based Real Time Building Energy Simulation and Optimization in Early Design Stage[J]. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 556(1): 012064.
- [50] SULTANGUZIN I A, KRUGLIKOV D A, YATSYUK T V, et al. Using of BIM, BEM and CFD Technologies for Design and Construction of Energy-efficient Houses[J]. E3S Web of Conferences, 2019, 124: 03014.

Concept and Reflection on Low-carbon Development of Traffic Tunnel Engineering Based on Digital Technology

ZHU Huhua^{1,2,3} DOU Shiqi¹ SHEN Yi^{1,2,3} RUI Yi^{1,2,3} LI Xiaojun^{1,2,3}

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092; 2.State Key Laboratory of Disaster Reduction in Civil Engineering, Shanghai 200092; 3.Engineering Research Center of Civil-informatics, Ministry of Education, Shanghai 200092)

Abstract: To accomplish the dual carbon goals, low-carbon or even zero-carbon development is the inevitable approach for traffic tunnel engineering, and the digital transformation brings both opportunities and challenges in this regard. The intelligent infrastructure service system affords a strong digital base for low-carbon development of traffic tunnel engineering in terms of information acquisition, transmission, processing, analysis, expression and service process. The cutting-edge technologies such as big data, cloud computing, blockchain and artificial intelligence bring new momentum for comprehensive survey, dynamic design, intelligent construction and efficient O&M in traffic tunnel engineering. The research into low-carbon tunnel is still in its early stage, the relevant standard system is not established yet, the development objectives of low-carbon and zero-carbon tunnels, the object of digital empowerment and the implementation approach are still unclear, and the relevant top-level design theory needs to be further investigated. This paper offers a preliminary analysis on the carbon emission characteristics of traffic tunnel engineering, a retrospect of the digital technologies that have been successfully applied in the full life cycle of tunnel projects, and also an outlook on the prospect of digital technologies in low-carbon tunnel development. In the future, the late-mover advantage should be exploited in development of low-carbon tunnel, and the digital technologies and the green low-carbon development concept should be intensively integrated, so as to enhance the level of digitization in traffic tunnel engineering and also steadily accomplish carbon neutrality in traffic tunnel engineering industry.

Keywords: Low-carbon tunnel; Zero-carbon tunnel; Digital technology; Full life cycle