

[文章编号] 1003-4684(2023)06-0041-06

# 高原山区铁路悬索桥信息化设计及实践

李艳哲<sup>1,2</sup>, 王熊珏<sup>1,2</sup>, 王 波<sup>1,2</sup>

(1 中铁大桥局集团有限公司, 湖北 武汉 430034; 2 桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 湖北 武汉 430034)

**[摘 要]** 随着我国桥梁建造技术的不断发展,以机械自动化、BIM、物联网、人工智能、大数据等新一代技术为代表的桥梁信息化建设理论和方法日益完善,推动了我国桥梁数字化建造的发展。在分析对国内外桥梁信息化建设发展背景的基础上,针对高原山区复杂地质条件下大跨悬索桥建造过程信息化应用系统框架、构建方法、预期成果等进行研究。通过研究成果进一步明确桥梁建造信息化发展方向,研究内容和成果可为我国桥梁信息化、数字化建设的推广及应用作参考。

**[关键词]** 铁路桥梁; 虚拟建造; 智能建造; BIM 技术; 数字孪生

**[中图分类号]** U446 **[文献标识码]** A

桥梁工程建设作为一项极其复杂的系统工程,具有建设周期长、参与单位数量多、协同组织困难、现场数据数量大、管理难度高、施工环境复杂、质量安全风险控制责任重大等特点。因此,桥梁工程信息化工作需落到实处,并形成一套规范的应用体系,确保能在实际生产过程中发挥重要作用。

随着建筑工程领域信息化发展的需求,项目建设各参与方对 BIM 技术的重视程度不断增加,越来越多的工程项目应用 BIM 技术取得了突出的成绩和效果。在桥梁领域,对 BIM 技术的应用研究大多集中在施工模拟、工程算量、智能出图、可视化展示等层面<sup>[1]</sup>。但是仅运用 BIM 技术难以对桥梁施工管理、安全监察、智能建造等环节进行全面的信息化升级,仍然存在着施工传统、信息断层、协同性不高等问题。目前国内对于信息化技术整体架构的研究仍然较少,缺乏对桥梁建设协同机制的深入研究和建造全过程的集成应用。

本文针对高原山区悬索桥建造项目,设计一套运用于桥梁施工全过程的信息化运用架构,对各个环节信息化技术的应用进行整合、管理,推动项目建造全过程精细化、智慧化、高效化协同发展。

## 1 桥梁信息化运用内容及系统构成

### 1.1 信息化整体概况

信息技术虽然为桥梁施工提供了发展方向和技术支持,但是应用缺乏整体规划、顶层设计,导致在

实际运用过程中难以将信息技术的优势完全发挥。在桥梁施工过程中信息技术的运用均停留在比较浅的层次上,信息化建设以网络建设为主,基本实现了高效网络部署、视频监控、视频会议的应用。但是对于施工过程中的重难点,难以进行深度结合<sup>[2]</sup>。导致投入多、成果少,应用流于表面等问题。

本文根据高原山区悬索桥项目特点,结合施工管理需求,通过智能化施工装备、智能监测控制系统、硬件及软件系统集成、三维可视化等技术,构建桥梁施工信息化平台。平台包括桥梁虚拟建造、桥梁智能建造、BIM 及数字孪生、现场信息化管理四大模块,覆盖了施工规划、施工工艺、施工监控、施工管理所有的环节。旨在通过集成统一管理,提升建造的安全、质量和效益水平。

### 1.2 信息化整体概况

根据高原山区悬索桥的施工特点,将平台按照四大板块 25 个模块进行规划。桥梁虚拟建造侧重前期规划和过程可视化,桥梁智能建造侧重施工过程智能化应用,BIM 及数字孪生侧重施工过程模拟及分析,现场信息化管理侧重施工监管。各板块根据自身需求配套相应的软硬件,通过信息化平台进行统一的集成,其模块规划如表 1 所示。

### 1.3 硬件选择及智能化升级

硬件作为信息化实施的基础,各板块都有着不同的硬件需求。主要分为以下几类:信息采集硬件设备,包含各类智能传感器,倾斜摄影无人机,三维

[收稿日期] 2022-02-14

[基金项目] 湖北省重大专项(2020ACA006);中铁重大专项课题(2021-专项-03)

[第一作者] 李艳哲(1971-),黑龙江哈尔滨人,中铁大桥局副总工程师,研究方向为桥梁智能建造与施工。

[通信作者] 王熊珏(1991-),湖北监利人,桥梁智能与绿色建造全国重点实验室第二研究所副主任,研究方向为桥梁智能建造及信息化。

激光扫描仪,测量机器人等;信息化处理硬件,包含智能算法服务器,边缘计算盒子,图形工作站等;智能化生产硬件,包括钢筋智能加工设备、智能拌和站系统、液压可控爬模以等;现场反馈及展示硬件,包含可视化大屏、智能预警扩音系统、集中控制室等。各子系统采用的硬件种类及作用如表 2 所示。

表 1 高原山区悬索桥信息化平台模块规划

桥梁虚拟建造	桥梁智能建造	BIM 及数字孪生	现场信息化管理
BIM+GIS 场地规划	混凝土智能生产	BIM 模型深化	平安智慧工地
高陡边坡施工模拟	钢筋智能加工	数字孪生模型	网格视频监控
4D 全桥建造过程模拟	大体积混凝土智能温控	桥梁力学行为可视化	空天地边坡监测
	隧道锚智能建造		隧道锚监控量测
	主塔智能建造		桥梁主体监控量测
720°全景漫游	智能放索	数字化档案	便道智能化管理
	钢梁虚拟拼装		钢筋智能超市
	钢梁可视化吊装		可视化工艺交底
	高栓数字化施拧		大临结构安全管理

表 2 高原山区铁路悬索桥信息化硬件及其实施目标

系统名称	建设内容	设备内容	实施目标
桥梁虚拟建造	交互式电子沙盘	图形工作站、服务器;倾斜摄影无人机	构建基于 GIS 引擎的电子沙盘结合桥梁、临建等 BIM 模型进行规划设计
	信息调度中心	信息调度中心大屏(LED 展示屏/拼接屏)	呈现桥梁虚拟建造效果
桥梁智能建造	智能化混凝土拌合站及钢筋加工中心	智能化生产设备	少人化拌合站通过 ERP 系统实现一键生产;钢筋智能下料生产
	智能化生产	具备防风抗风功能的智能液压爬模平台,千米级重载智能化缆索吊机;各类传感器	实现桥梁施工过程各工序的智能化施工,实时监控
	钢梁虚拟拼装	三维激光扫描仪,全站仪测量机器人	通过虚拟拼装指导现场施工,减少预拼装步骤
BIM 及数字孪生	桥梁孪生平台构建	各类环境监控、力学传感器;运算服务器;数据服务器	多源数据桥梁施工孪生系统应用,生产数据孪生管理
现场信息化管理	人员设备管理	摄像头,边缘计算盒子,便道管理系统,无人积分超市	人员不安全行为智能识别;道路运输及设备使用管理
	施工过程监控及管理	北斗 GNSS,倾角传感器等各类型传感器、智能网络调理器、摄像头、报警系统	边坡、临建、主体结构施工可视化监控及预警

1.4 数据处理与传输系统

信息化平台各功能模块硬件设施包含数据采集设备及运算处理设备。由于采集设备种类繁多,分布广泛,因此对于网络建设和数据传输系统需要进行合理的设计。为防止长距离传输造成的信号失真和减少电磁信号干扰,以隧道锚等特殊地形条件下传输效率,需要考虑多种传输手段结合使用<sup>[3-4]</sup>。

针对山区桥梁工程建设现场多作业面同时施工而搭建的泛在智能感知体系,构建立体移动传输体系,如图 2 所示。包括:基于射频识别(RFID)、数据传输单元(DTU)、近距离无线通信(NFC)等技术的近场通信;基于 WiFi、蓝牙等技术的短距离大容量通信;基于 NB-IoT、LoRa 等技术的低功耗远距离通信;基于 4G、5G 和卫星等技术的远距离通信。对于近场数据采集在有条件的情况下还是以光纤等有

线传输手段为主以保证稳定性。通过部署基站硬件及软件措施,实现多种信息源、不同物理信号的采集与预处理,针对施工区域特点进行专项设计。总体实现建设现场、参与各方的无障碍传输,形成立体移动传输体系。



图 1 基于移动互联网数据传输体系

1.5 数据存储与分析系统

信息化平台运用 SQL 数据库进行数据的存储与处理。对采集回来的数字信号,综合运用频域、时域内的统计、平均、平滑等各种数学处理方法分析,得到各机械设备当前使用状态规律及趋势。通过编

制智能算法,确定各指标阈值,当检测指标出现异常时进行警报,确保设备使用状况正常。摄像头采集的视频数据同样通过数据库进行管理,视频覆盖周期为一个月<sup>[5]</sup>。数据库服务器由交通与建筑领域内唯一的 A 级共享数据中心“大桥云”提供,保障数据的存储容量、处理速度及安全性。

### 1.6 系统集成及驾驶舱

每个应用板块根据架构建立管理系统,基于 GIS 引擎将四个板块进行集成。根据各模块的需求,以可视化、可交互、可控制的方式将所有的功能进行了集中和分类,管理者通过平台即对当前项目实施情况一目了然。

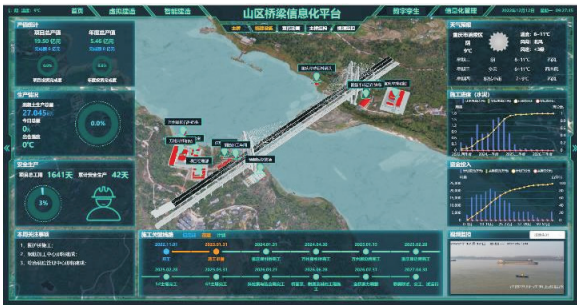


图 2 信息化驾驶舱

## 2 高原山区悬索桥信息化应用系统设计

信息化平台用户终端采用 B/S 架构,通过接入大桥云服务器获取数据展示、信息接收,实现对传感器的远程控制等功能。中继转发设备根据实际的施工位置进行布设:隧道锚施工时需要布设无线通信专用网络和外部通讯,一方面负责将无线通信专网的数据上传至大桥云,另一方面将接收大桥云服务器发出的操作指令转发至隧道锚内无线通信网络;缆索施工和塔柱施工过程中由于施工高度高,同样需要通过无线传输的方式将数据传输至基站后再由基

站上传至大桥云;对于有条件布设有限网路的施工部位,例如桩基施工时则可以采用有线的方式将终端和基站设备连接起来。系统架构如图 3 所示。

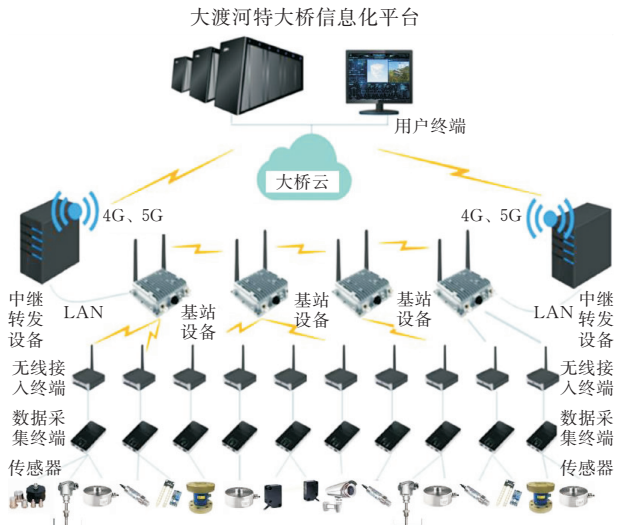


图 3 桥梁智能建造平台网络架构

### 2.1 桥梁虚拟建造

桥梁虚拟建造旨在针对项目实施前期,通过虚拟结合实景的高度可视化,解决高原山区高陡边坡山区地形下分散式临建选址、便道规划难的问题。我们在设计交付的施工图 BIM 模型基础上,结合项目管理需要开展 BIM 应用。施工过程中,结合现场的工程特点,开展基于 BIM 模型的虚拟建造应用。

通过虚拟建造规划及应用,实现虚拟预演、提前规划,优化施工场地布局。桥梁虚拟建造基于模型技术,能够在采集现场地形数据的基础上,进一步通过可视化、可交互、可模拟的手段,模拟预演建造难点、呈现建造完成效果、监控建造施工过程,从而管控项目进度、提高施工质量、保障现场安全,具有精度高、效率高、效果佳的特点,在前期项目临建设施的场布规划中起到了极大的促进和保障作用。



图 4 桥梁虚拟建造功能架构



2.2 桥梁智能建造

针对高原山区悬索桥施工重难点,通过智能化施工装备、智能监测控制系统、三维可视化等技术,

构建智能建造系统,提升建造的安全、质量和效益水平。

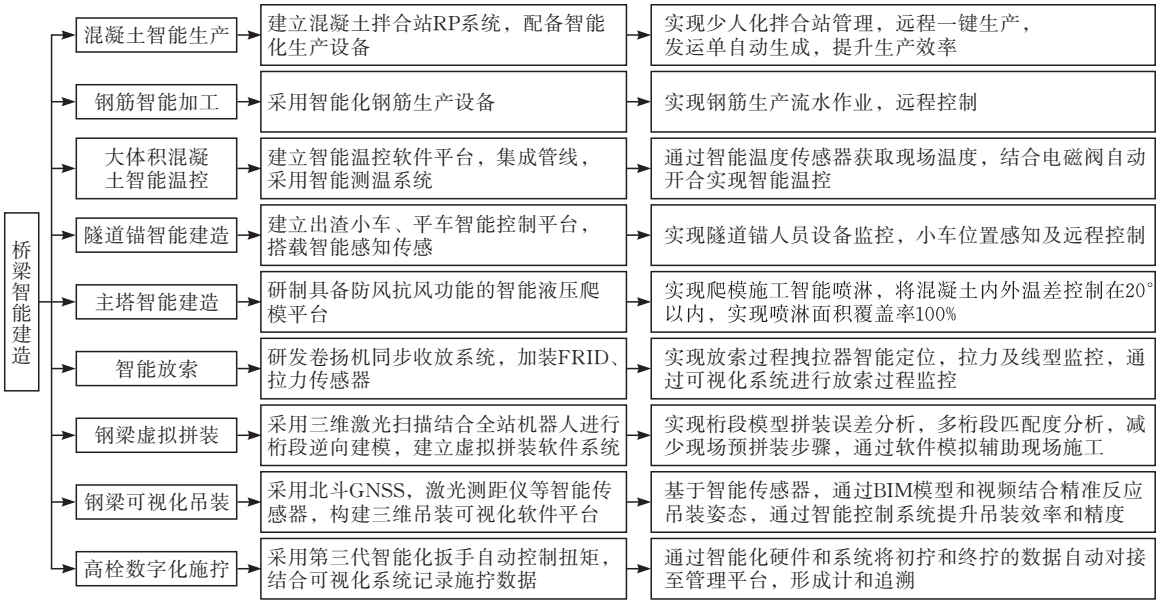


图 5 桥梁智能建造功能架构

智能建造的实施是一个长期的过程,伴随整个项目。智能建造的规划旨在实现远程控制、可视调度,推动建造过程提质增效。在隧道锚、主塔、主缆、主梁等结构专项智能建造方案制定过程中,我们结合虚拟建造技术进行技术攻关和研发,实现混凝土生产、钢筋加工、主塔液压爬模智能喷淋养护、钢梁虚拟拼装、钢梁吊装等工序的智能远程控制、可视化调度和协同管理,大大提升管理人员处置突发事件的效率效能。

2.3 BIM 及数字孪生

数字孪生技术指在建造物理世界桥梁的同时,通过数模互通、场景孪生等技术手段,将物理世界中的桥梁主塔、施工设备、施工环境等数字化,在孪生世界中即可进行数据管理、监控数据分析。从而实现项目数字化管理的同时,通过对数据实时的解析进行风险预测,保障项目施工安全。在实际项目实

施过程中,通过深化 BIM 模型,构建地质、设备、环境模型,将模型进行多源数据融合并赋予监测及管理信息,形成 GIS+BIM+GM+管理数据+监控数据的桥梁数字孪生应用。孪生模型中的模型构件具备唯一性,存储了与该构件相关的过程管理文件以及监测信息,通过数字孪生平台即可实现溯源施工过程管理数据、模拟桥梁力学状态、预警施工风险等功能,为施工提供辅助决策。在项目完工后孪生平台可将所有数字化的信息对接桥梁运维,形成全生命周期数字孪生应用。

桥梁数字孪生平台不仅构建了交互式数字化场景对项目施工状态进行实时查看,同时通过持续深化模型,将管理和监测数据对接至相应构件,通过台进行统计、管理、调用,实现了项目数据的可视化。数字孪生平台架构如图 6 所示。

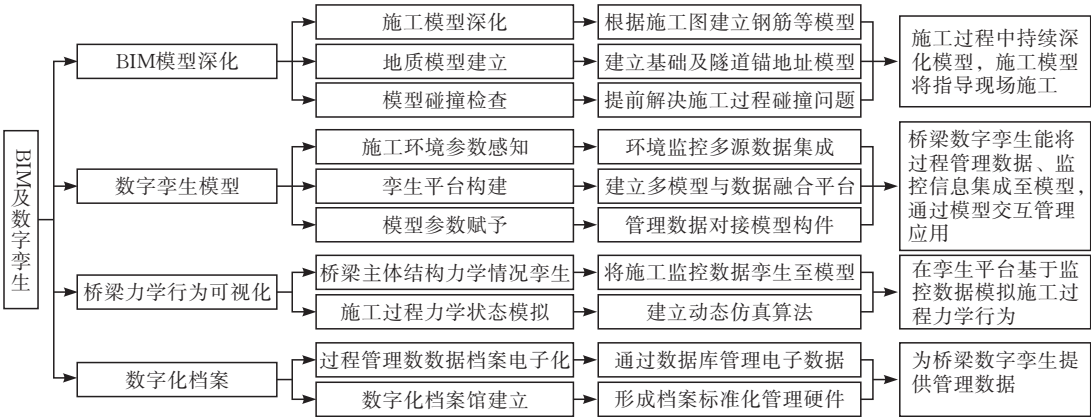


图 6 BIM 及数字孪生功能架构

2.4 现场信息化管理

为提高施工现场管控智能化程度,开展智慧工地相关应用,对工地环境、安全、质量等进行智能状态感知和主动预警,打通信息化落地的最后一公里。

高原环境下施工安全风险因素多,需要对施工现场边坡位移、桥梁、隧道施工过程中的位移、变形

和应力进行自动化监测与控制,确保工程施工的质量与安全。通过建立施工监控监测信息化平台,覆盖施工全过程的结构和施工装备,以自动化监测为主,并辅以人工测量数据录入上传功能,实现数据展示、预警及控制。现场信息化管理功能架构如图 7 所示。



图 7 现场信息化管理功能架构

现场信息化管理内容繁多,因此建立一个平台将生产过程中人机料法环集成管理旨在实现实时监控、在线预警,保障施工现场安全。通过现场信息化管理实现了“空、天、地”边坡监测、现场环境监测、风力风向监测等数据的实时呈现,及可视化预警。该平台与现场管理体系深度融合,其中搭载的智慧工地应用,可借助智能化管理设备等辅助手段,实现劳务实名制、智能视频不安全行为识别、车辆位置油耗监测等信息化、精细化管理,提升管理效能,保障现场安全。现场信息化管理的模块也将随着项目推进不断丰富,能够实现基于管理数据的数据分析,形成技术沉淀。

3 信息化应用关键问题

总体来说,信息化技术在桥梁领域的应用尚处于快速发展初级阶段,如何利用先进的信息技术、智能化自动化设备,建立完善智能建造技术体系,是当前面临的核心难题,也是桥梁信息化建设领域研究发展的趋势。可概括为以下 3 点。

1) 完善桥梁信息化理论创新

综合物联网、云计算、移动互联、大数据、BIM、GIM 等技术,立足信息化技术和施工技术的深度融合,基于桥梁施工技术、工程理论、工程经济学,构建

适用于我国国情的桥梁智能建造平台顶层设计体系及功能架构。通过引入工程控制论的基本思想,提出适用于桥梁建造全生命周期的建造方案规划、数据采集传输、信息整合融合、材料适配优选、工程经济优化等方面的理论体系。

2) 加快多功能智能化桥梁建造装备研发

近年来来桥梁工程突破了一个个挑战,港珠澳跨海大桥、丽香铁路金沙江特大桥、平潭海峡大桥等项目的相继建成,将桥梁建设推向了一个新的高度,同时随着我国高原地区铁路建设的开启也为桥梁施工提出了新的要求。高原地区海拔高、地形复杂,对大型桥梁建造设备有着更高要求。因此对桥梁施工常用的液压爬模、缆索吊、塔吊等设备进行研究,在硬件升级的同时结合智能化监控设备和配套软件,达到可视、安全、高效的目的。装备研发还需要结合新材料、新技术研发以能够满足多种建造要求。

3) 推动桥梁数字孪生应用

数字孪生常在园区管理及运维项目中应用,在桥梁施工过程中没有进行过尝试。基于高原山区桥梁实际项目,从模型维度、数据维度、连接维度、功能维度四个方面整合了 BIM 模型、GIS 模型、GM 地质模型三种模型。采用了大数据管理、数据分析与挖掘、数据集成与融合等方面的技术,通过物联网平

台将各种传感器数据的双向连接、双向交互、双向驱动,且强调实时性,从而形成信息物理闭环系统。基于模型和数据双驱动,在力学仿真、虚拟验证和可视化等方面展现了应用价值。为数字孪生在桥梁施工中的应用提供了思路。

4 结束语

大力发展施工信息化建设,推动桥梁产业变革,是一个复杂而艰巨的历史性征程,对于持续推动我国桥梁工程建造高质量发展,迈向工程建造强国具有决定性的意义。目前信息化技术,与实际桥梁工程结合还处在起步阶段,大量的新兴技术与传统技术结合势必需要进行深度磨合方能完全发挥出这些技术在桥梁建造中的价值。本文提出的信息化平台设计在一定程度为智能建造、数字孪生等技术在桥梁工程中的应用提供了思路。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 丁烈云.智能建造创新型工程科技人才培养的思考[J].高等工程教育研究,2019(05):1-4.  
[2] 王同军.中国智能高速铁路体系架构研究及应用[J].铁道学报,2019,41(11):1-9.

[3] 王同军.智能铁路总体架构与发展展望[J].铁路计算机应用,2018,27(07):1-8.  
[4] 王戒躁,钟继卫,王波.大跨桥梁健康监测系统设计构成及其进展[J].桥梁建设,2009(S2):7-12.  
[5] 马智亮.智能建造与建筑工业化协同发展的技术创新思考[J].中国勘察设计,2020(09):28-30.  
[6] 董丽娟,黄祯尹,卢刚,等.我国桥梁工程技术发展趋势分析[J].公路交通科技(应用技术版),2020,16(07):187-190.  
[7] 侯宇飞,杨斌,吴明杰,等.BIM+GIS 数据集成技术在铁路桥梁施工管理的应用[J].铁路技术创新,2020(03):29-33.  
[8] 韩自力.高速铁路隧道智能建造关键技术与发展趋势[J].铁道建筑,2020,60(04):9-16.  
[9] 王志伟,马伟斌,王子洪,等.基于轻量化 BIM、RFID 技术与 ERP 系统的预制装配式隧道结构智能建造系统[J].中国铁路,2020(01):16-21.  
[10] 王可飞,郝蕊,卢文龙,等.智能建造技术在铁路工程建设中的研究与应用[J].中国铁路,2019(11):45-50.  
[11] 张裕超,曾绍武,杜文忠,等.基于 BENTLEY 的桥梁快速智能建造 BIM 系统解决方案研究[J].公路工程,2019,44(04):140-148.  
[12] 傅战工,郭衡,张锐.BIM 技术在常泰长江大桥主航道桥设计阶段的应用[J].桥梁建设,2020,50(05):90-95.

Research on the Informatization Application of the Railway Suspension Bridge in Plateau Mountainous Area

LI Yanzhe<sup>1,2</sup>, WANG Xiongjue<sup>1,2\*</sup>, WANG Bo<sup>1,2</sup>

(1 China Railway Major Bridge Engineering Group Co., Ltd. Wuhan 430034, China ;

2 National Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction , Wuhan 430034, China )

**Abstract:** With the continuous development of bridge construction technology in China, the intelligent bridge construction system represented by BIM, IoT, artificial intelligence, big data and other new generation of information technology is constantly exploring and improving. These technologies have promoted the innovation and transformation of bridge construction mode in China. Based on the analysis of the development background of intelligent construction at domestic and international, combined with the practice of the Dadu River bridge project of The Sichuan-Tibet Railway. The system framework, main contents and expected results of the intelligent construction system of long-span suspension bridge under complex geological conditions in plateau mountainous areas are further elaborated. Furthermore, the paper puts forward the development direction of intelligent bridge construction technology. The research contents and achievements can provide reference for the popularization and application of intelligent bridge construction technology in the bridge field in China.

**Keywords:** railway bridge; virtual construction; intelligent construction; bim technology; digital twinning

[责任编辑: 裴 琴]