

引用格式: 吕刚, 刘建友, 赵勇, 等. 京张高铁隧道智能建造技术[J]. 隧道建设(中英文), 2021, 41(8): 1375.

LYU Gang, LIU Jianyou, ZHAO Yong, et al. Key technologies for intelligent construction of tunnels on Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Tunnel Construction, 2021, 41(8): 1375.

## 京张高铁隧道智能建造技术

吕 刚<sup>1</sup>, 刘建友<sup>1</sup>, 赵 勇<sup>2</sup>, 岳 岭<sup>1</sup>

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 川藏铁路有限公司, 四川 成都 610045)

**摘要:** 为实现高速铁路向信息化、智能化方向发展,以京张高铁为背景,介绍京张高铁隧道智能建造采用的关键技术: 1) 清华园隧道建设过程中采用轨下结构全预制拼装技术,利用自研拼装机器人,实现了智能化拼装,极大地节约了人力成本,保证了施工进度及安全要求; 2) 清华园盾构隧道建设过程中,搭建可视化智慧施工管理监控平台,实现对风险的可视化实时预测和分析,保障隧道建设安全; 3) 东花园隧道外包防水采用自动化喷涂防水技术,极大地提升了作业效率,降低了作业人员的危险性; 4) 新八达岭隧道项目和正盘台隧道项目中采用基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理体系,满足了对隧道断面量测进行过程控制和预警处理的需求。

**关键词:** 京张高铁; 隧道; 智能建造; 预制拼装技术; BIM 技术; 自动化施工

DOI: 10.3973/j.issn.2096-4498.2021.08.014

文章编号: 2096-4498(2021)08-1375-10

中图分类号: U 45

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## Key Technologies for Intelligent Construction of Tunnels on Beijing-Zhangjiakou High-speed Railway

LYU Gang<sup>1</sup>, LIU Jianyou<sup>1</sup>, ZHAO Yong<sup>2</sup>, YUE Ling<sup>1</sup>

(1. China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;  
2. Sichuan-Tibet Railway Co., Ltd., Chengdu 610045, Sichuan, China)

**Abstract:** The following key innovative technologies adopted for Beijing-Zhangjiakou high-speed railway are introduced: (1) In the construction of Qinghuayuan tunnel, the prefabrication and assembly technology is adopted for the under-track structure of the tunnel and assembly robots are developed and applied, which ensures the construction schedule, meets the safety requirements, saves labor costs, and has achieved significant economic and social benefits. (2) A visualized and intelligent construction management and monitoring platform is built during the construction of the shield-

收稿日期: 2020-11-12; 修回日期: 2021-03-19

基金项目: 中国国家铁路集团有限公司重大课题(2014G004-C)

第一作者简介: 吕刚(1976—),男,江苏句容人,2004年毕业于北京交通大学,桥梁与隧道工程专业,硕士,正高级工程师,现从事隧道工程的设计和研究工作。E-mail: tzydglg@126.com。

bored Qinghuayuan tunnel, which realizes visualized and real-time prediction and analysis of risks and ensures the safety of tunnel construction. (3) Automatic coating technology is adopted for the outside enveloping waterproofing of Donghuayuan tunnel, which greatly improves the working efficiency and reduces the danger of the operators. (4) Cross-section quality management system based on 3D laser scanning technology is adopted for New Badaling tunnel and Zhengpantai tunnel, which meets the needs of process control and early warning for tunnel cross-section measurement.

**Keywords:** Beijing-Zhangjiakou high-speed railway; tunnel; intelligent construction; prefabrication and assembly technology; BIM technology; automatic construction

## 0 引言

铁路作为重要的交通基础设施,是一个国家综合运输体系的骨干力量,在传统制造业向工业 4.0 时代升级转型的大背景下<sup>[1-5]</sup>,建设高效、绿色、智能化、信息化的铁路工程已成为铁路运输行业发展的必然趋势<sup>[6]</sup>。

2019 年 12 月 30 日全球首条智能化高速铁路京张高铁正式开通运行,京张高铁作为 2022 年北京冬奥会的交通保障线,促进京津冀地区一体化协同发展的经济服务线,中国高铁建设的示范线,在建造过程中充分发扬“智能京张,绿色京张”理念,应用多项智能化关键技术<sup>[7-11]</sup>,保障了京张高铁的顺利开通。

智能建造技术是当今隧道研究的热点,也是今后发展的方向<sup>[12]</sup>。随着我国川藏铁路的开工建设,受高原缺氧、高寒冻土等因素的影响,同时我国劳动力高龄化并急剧减少,隧道智能化建造成为必然选择。本文将系统地介绍京张高铁隧道建设过程中多项智能建造关键技术的原理、核心技术及应用效果,可为川藏铁路等隧道工程的建设提供参考。

## 1 清华园隧道轨下结构智能拼装技术

目前大直径盾构铁路隧道轨下结构常用的结构形式有全部现浇与部分预制、部分现浇 2 种,但轨下结构采用全预制构件拼装的施工方法尚属空白。清华园隧道的支护结构、轨下结构和附属沟槽均进行预制机械化拼装建造,在国内首次实现了隧道结构全预制拼装施工<sup>[13]</sup>,并针对隧道结构特点,研制了机械化自动拼装机器人,实现了隧道轨下结构建造的标准化、自动化、专业化、智能化,加快了施工进度,节约了工期,避免了大量植筋损坏盾构管片,提高了结构耐久性和可靠性,减少了外界环境对施工作业干扰,改善了作业环境,降低了振动对周边环境的影响。盾构隧道轨下结构全预制工艺,由于其具有施工灵活、效率高等特点,取得了显著的经济效益和社会效益,是国内盾构隧道轨下结构施工的革命性创举。

### 1.1 轨下结构智能化拼装的控制原理

轨下结构由 1 个中箱涵和 2 个边箱涵组成,其拼装智能化的关键在于拼装机器人的研发。拼装机器人主要由车架、行走车轮组、小车供电、横移机构、平衡机构、旋转机构、U 型吊具、箱涵件调整定位机构等组成。隧道箱涵

预制件拼装机如图1所示。该设备可以将箱涵件从运输车吊起,并平移调整后放到指定安装位置,最终将箱涵件精确安装于隧道内,实现箱涵快速机械化拼装。

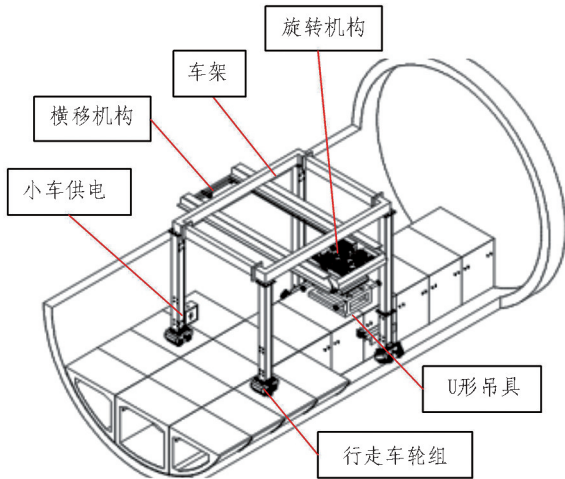


图1 隧道箱涵预制件拼装机

Fig. 1 Assembly machine for under-track structure of tunnel

箱涵件调整定位机构采用2D/3D机器视觉定位技术,通过摄像机采集视觉图像,并传输给中央控制系统进行图像识别分析、利用逆运动学求解得到箱涵位置误差值,并调整箱涵的位置和姿态位姿,消除误差,实现精准定位和调整。

## 1.2 拼装精度控制

轨下结构拼装时先拼集中箱涵,之后拼装两侧边箱涵。由于边箱涵构件与中箱涵采用螺栓连接,其定位以中箱涵为基准,不再单独进行放样,整体拼装精度控制为5 mm以内。当各构件之间螺栓连接并紧固完毕后,即完成整个构件拼装工序。拼装完成后进行嵌缝施工,将箱涵之间的空隙堵住形成密闭空间,然后对预制结构与盾构管片之间的空隙采用M10微膨胀水泥砂浆充填,最后对底部结构进行监测。主要监测内容为构件内部应力应变和构件整体性的位移,包括沉降及沿弧面滑移。

清华园隧道轨下结构拼装时,为了加快拼装进度,中箱涵随盾构掘进先拼装,而边箱涵滞后很长时间才

开始拼装,这种先后拼装的模式无法实现中箱涵和边箱涵的同步精调,导致后期边箱涵拼装的错台较大。因此,后续工程建议中箱涵和边箱涵同步拼装。

## 2 清华园隧道可视化施工技术

清华园隧道搭建了基于三维BIM模型、VR技术和GIS漫游的可视化、信息化的智慧施工管理监控平台<sup>[14]</sup>,实现对掘进、拼装、注浆等施工环节的全过程管理和监控,同时实现了对风险的可视化实时预测和分析。

### 2.1 盾构可视化施工监控系统

盾构施工监控系统是一个集施工监测数据、施工信息以及施工管理信息于一体,能对海量施工数据进行处理分析,并通过数字化、可视化技术实现不同功能的智慧施工监控系统。

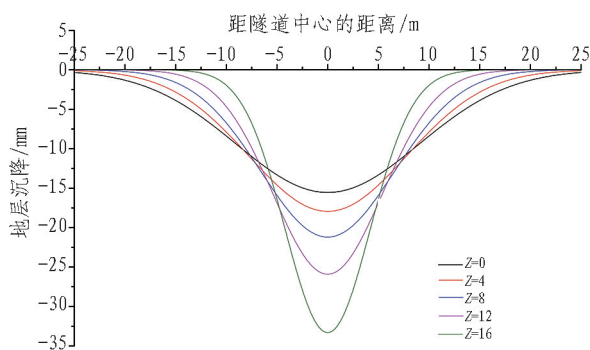
智慧施工监控系统共包括首页、工程GIS、盾构监控、监测数据、预测预警、系统管理以及信息上传7大模块。不同模块可以实现不同的系统功能,各模块之间也存在相互联系和数据交换,共同作用构成智慧施工系统。工程GIS模块包含了工程的卫星地图,详细显示区间线路的地理位置关系以及和周边建筑物、市政道路和地铁的毗邻关系,同时还详细显示线路附近重要的风险源信息。盾构监测模块详细显示隧道掘进当前环的隧道详情、注浆管道、注浆压力和速度与位移信息,可实现对盾构掘进姿态和重要参数的实时监控,同时还显示了施工进度管理图,包括盾构预设与实际进度比较曲线图和盾构完成进度饼状图,可以方便管理人员直观地看到隧道掘进的完成情况以及与预设进度的差别,帮助及时进行调整施工进度。

预测预警模块中展示了详细的周边建筑物、市政道路以及地铁线路的地质信息,同时详细列举了线路施工过程中遇到的重要风险源信息,还可对盾构隧道施工引起的地层响应和周边建筑物响应进行分析预测。风险信息列表详细列出了风险源的位置、风险等级以及沉降预测值和控制值,并据此判别安全状态,实现了重要建(构)筑物和主要风险源危险性的实时预测预报功能。

## 2.2 可视化施工关键技术

1)搭建了基于 BIM、GIS 和互联网技术的隧道施工可视化管理平台,采用盾构施工全过程智能化、可视化动态监控与管理,实现对临近建(构)筑物危险性的实时预测预报。

2)采用经验方法(如基于 Peck 理论的经验方法)和人工智能(ANN、GEP 及 WPM)等方法多角度综合实时预测地表及施工影响范围内的建(构)筑物的沉降及水平变形,推导出不同地层条件和隧道几何参数对应的最优盾构施工参数指导施工。Peck 预测模型横断面沉降槽如图 2 所示。Peck 预测模型三维视图如图 3 所示。



Z 为隧道开挖方向与掌子面的距离。

图 2 Peck 预测模型横断面沉降槽

Fig. 2 Settlement trough obtained by Peck prediction model

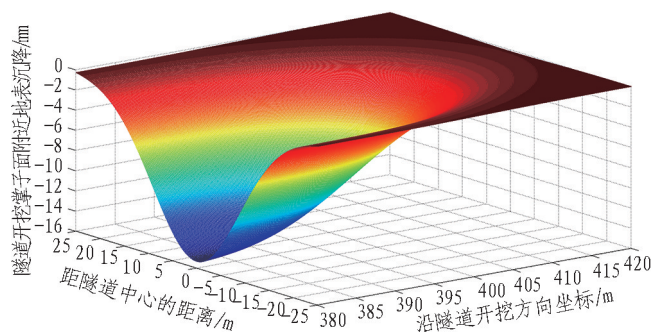


图 3 Peck 预测模型三维视图

Fig. 3 3D view of settlement trough obtained by Peck prediction model

3)盾构监控平台要求将盾构掘进中的地质条件、周边建筑物、工程措施等信息数字化,并且能够从盾构的传感设备中自动采集盾构的姿态参数、压力参数、进出浆和注浆量参数等,实现各种信息的数字化处理。

## 2.3 可视化施工技术的应用及其效果

目前该系统在京张高铁清华园隧道的应用十分可靠,基于信息化、智能化、可视化等现代先进技术成功实现了科学化、精细化的施工目标。在盾构穿越多个风险源的时候,通过 3D 模型提前展示隧道与周边环境的关系,并且能够通过软件模拟分析盾构掘进过程对周边环境的影响值进而推荐刀盘转速、土舱压力、油缸推力、螺旋输送机转速等盾构掘进参数;在盾构推进过程中结合地面测量数据,及时反馈地面沉降量提前预警盾构操作人员,动态调整掘进参数。传统的盾构掘进参数和监测数据的统计,大部分需要人为分析数据并进行相应的对策处理。盾构可视化施工监控系统大大地简化了人为干预的流程,不仅能够预警信息并进行自动判别,加快了应对风险的响应速度和处理效率,降低了安全事故的概率,提高了隧道施工的风险管控能力,初步实现了盾构施工全过程的可视化动态管理。



### 3 东花园隧道自动化喷涂防水技术

东花园隧道是国内首次采用速凝橡胶沥青喷涂防水材料的强富水深基坑明挖隧道<sup>[15]</sup>,新型喷涂速凝橡胶沥青防水材料<sup>[16]</sup>是一种绿色环保的水性涂料,从生产到使用均不产生有害物质,具有无缝搭接、完美贴合、工作环境要求低、施工效率高、附着力强、耐穿刺、抗酸碱盐、节能降耗等突出优势,能解决边角、裂缝、不规则结构的连接处渗漏等技术难题。东花园隧道专门研制了自动喷涂机器人,有效提高了喷涂施工的质量、效率和智能程度。该机器人能精确地按照设定轨迹自动准确喷涂,使材料与基面全面高强粘附、喷层均一平整。有效减小了损耗量,极大地提高了工效,大幅度提升了施工的安全可靠性。

#### 3.1 自动化喷涂的智控系统

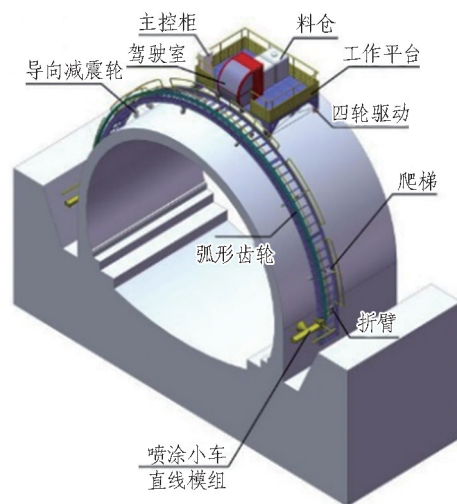
新型速凝橡胶沥青防水材料的自动化喷涂系统包括工作平台、控制系统、供料系统、支撑系统、走行系统和喷涂小车6部分,如图4所示。

1)工作平台。根据结构外观尺寸进行定制,是存放控制系统和供料系统的操作平台,周围设置护栏。

2)控制系统。主要包括主控制器、主电控制柜和变频器控制柜,主控制器采用PLC控制器控制,设置触摸屏+按钮2种控制,触摸屏可以实时输入数值进行设备基本参数设置,一键启动功能,自动运行喷涂、爬升、回位,支撑系统行走电动控制,自带纠偏功能。

PLC控制器是自动化喷涂的智控中心,其内置的

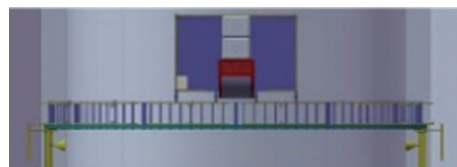
微处理芯片可以计算分析并控制行走系统的速度和供料系统的供应量,以及喷涂小车上喷枪的喷速,从而精准控制喷层厚度。



(a) 三维视图



(b) 剖面图



(c) 顶视图

图4 速凝橡胶沥青防水自动化喷涂系统

Fig. 4 Automatic coating system for quick-setting rubber asphalt waterproofing material

3)供料系统。新型喷涂速凝橡胶沥青防水材料为双组份涂料,防水涂料主剂A组份为棕褐色黏稠状的水性橡胶沥青乳液,固化剂B组份为无色透明的破乳剂,分别装入操作平台的2个容器中。通过增压泵泵送涂料,增压泵由主控制器进行控制,在支撑系统上设置坦克链对管道进行保护,直达喷涂小车,并跟随小车采用回卷式移动。

4) 支撑系统。根据结构外观尺寸进行定制,采用爬梯形式,可供工作人员行走,并设置护栏。外侧采用上、下双层 U 型槽钢,在下层 U 型槽钢上设置 2 道齿槽作为喷涂小车的行走轨道,上层 U 型槽钢作为坦克链的行走轨道。

5) 走行系统。在工作平台下设置 4 个驱动轮,每个驱动轮由 1 个电机驱动,在主控制器控制下行走,并可进行纠偏,在支撑系统下设置可调节单向减震轮随工作平台的驱动轮进行移动。

6) 喷涂小车。在支撑系统上设悬挑梁,设置 4 个齿轮与支撑系统的 2 道齿槽进行连接,在悬挑梁上安装传动链和喷枪,设置 2 个电机进行驱动,1 个电机驱动喷涂小车沿支撑系统行走,1 个电机驱动喷枪沿悬挑梁行走。

自动化喷涂系统实现了新型速凝橡胶沥青防水施工的智能化管理。

### 3.2 自动化喷涂关键技术及创新

1) 根据防水材料双组份液体喷涂方式的特性和结构物的外轮廓结构尺寸一致的特点,创新提出了按照结构物的几何尺寸采用钢结构定制喷涂机器人,该机器人自动上料、自动喷涂、自动行走,填补了铁路明挖隧道自动喷涂防水施工的行业空白。

2) 新型速凝橡胶沥青防水自动化喷涂对喷涂厚度的控制,是本智能化设备的核心技术,通过理论计算,固定喷涂压力,控制喷枪移动速率,实现设计喷涂厚度。喷涂机器人现场作业如图 5 所示。



图 5 喷涂机器人现场作业

Fig. 5 Coating robot in operation

### 3.3 自动化喷涂技术应用效果

东花园隧道采用了自动化喷涂技术,自动化喷涂机器人的施工工效是人工喷涂施工工效的 4 倍。按照东花园隧道喷涂  $22\,000\text{ m}^2$  进行计算,人工喷涂每日喷涂  $500\text{ m}^2$ ,需要 44 d; 机器人喷涂每日喷涂  $2\,000\text{ m}^2$ ,需要 11 d,节约工期 33 d。自动化喷涂机器人只需 2 人 1 组,人工喷涂需要 6 人 1 组,减少现场作业人员 66.7%。

传统人工喷涂需要人工手持喷枪进行作业,在倒弧形上高空作业,作业人员危险性极高,属于高危作业;自动化喷涂采用自动喷枪,无需作业人员高空作业,有效降低了作业人员的危险性。

自动化喷涂机器人能够精确地控制喷涂用量,操作简单,喷涂厚度完美均一,有效地避免了人工喷涂存在的喷涂厚度不一、搭接面处理不到位等(合格率为 100%),对防水涂料的使用量控制更好。而传统人工喷涂误差较大,使用量低于设计量达不到防水效果;使用量高于设计量喷涂材料成本增加。采用自动化喷涂机器人,有效避免了隧道渗漏水情况的发生,降低了洞内渗漏水对洞内设备和运营车辆产生破坏和影响的程度,同时减少了后期对隧道渗漏水进行处理产生的高额费用。

自动化喷涂机器人的应用有效地降低了现场管理

人员的工作量,按照验收标准采用针测法测厚仪对喷涂防水层进行实时监测,每 $100\text{ m}^2$ 抽查1处。而传统人工喷涂施工单位为了控制喷涂质量都是进行加密监测,同时需要对不合格部位进行加强处理,处理完成后还需要进行监测。

东花园隧道在自动化喷涂实现的过程中设计了专门的喷涂机器人及相应的控制系统,对装备的要求较高,在后续的推广过程中可能存在一定的困难。

#### 4 基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系统

基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系统是以BIM为核心,面向铁路工程隧道建设的新一代信息化管理平台。该系统通过三维激光扫描自动采集终端,利用专业分析软件对点云数据的平整度按照相应规范要求进行分析,分析结果自动上传至预警平台进行展示和预警发布处置,方便铁路工程施工单位及监理单位在平台上对隧道施工断面质量进行管理,提高了工程质量管理水平与效率,达到了“快速辨识风险、及时预报风险、形象展示风险、有效控制风险”的目标。

##### 4.1 三维激光扫描隧道断面质量管理系统

基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系统功能架构包括现场数据采集端、前端处理和系统分析端。

1)数据采集端。通过利用三维激光扫描仪与全自动全站仪相结合的新技术,突破了传统测量中由点到线、再由线到面的单点作业模式,通过高速激光扫描测量的方法,能快速获取被扫描物表面的海量三维点云数据,实现了从点测量到面测量的跨越,从而能快速建立物体的三维模型。

2)前端处理。将收集而来的点云数据进行清理、优化,实现超欠挖、平整度、直圆度、断面、变形、方量、中线偏差等指标的分析计算。对点云数据进行处理,形成实体的工程模拟影像,并通过运用点云数据中所包含的色彩、反射强度等信息,分析隧道的渗水、裂缝等情况,实现隧道质量的可视化管理,推动隧道工程的质量管理。

3)系统分析端。系统分析端是隧道断面质量管理系统的核心,通过对点云数据进行处理,并与隧道BIM模型进行关联比对,实现断面步距对开挖、初期支护和二次衬砌超欠挖分析、平整度计算、断面分析、变形计算、方量计算、真圆度计算、中线偏差计算等功能;并能根据超欠挖分析数据、平整度分析数据、方量对比数据、变形数据等信息,综合分析每段里程内的施工过程数据、成型质量数据,形成综合评判指标。既能对已完工程进行质量评判,又能对后续施工提出改进措施,避免出现超欠挖、平整度超限的情况。基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系统功能架构如图6所示。

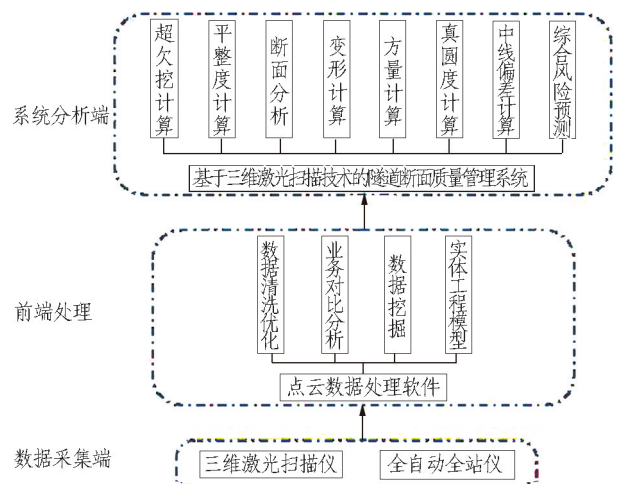


图6 基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系统功能架构  
Fig. 6 Function structure of tunnel cross-section quality management system based on 3D laser scanning technology



## 4.2 隧道断面质量管理体系关键技术及创新

1)通过三维激光扫描技术全自动、高精度、立体扫描手段,短时间、远距离、高精度地获得扫描目标的表面三维坐标,高效、完整地记录施工现场的复杂情况,与设计 BIM 模型进行对比关联,为工程质量检查、工程验收带来巨大帮助。

2)三维激光扫描技术处理软件与 BIM 模型属于不同元数据,本系统实现两者的自动和实时传输,把所有异类数据“同化”为统一类型数据,存储在云端数据库。不同元数据传输完成之后,按需求里程段进行不同数据的实时解析,提供断面图打包下载、分析结果及报告下载等功能,实现整体多元数据的同步和高效协同。

3)首次实现隧道三维激光扫描技术生成的控制点点云数据与 BIM 模型编码数据数字化集成,实现动态重构点云模型与 BIM 模型实时关联,实时掌握施工状态,进一步实现对隧道进行施工作业过程开挖、初期支护、二次衬砌的超欠挖分析、隧道净空计算、隧道空洞监测等,实现基于 BIM 的隧道超欠挖、净空及空洞方量等三维可视化质量管控。

4)首次采用三维激光扫描技术、BIM 可视化技术以及移动互联技术等信息化新技术手段,对现有高铁隧道工程平整度计算规则 and 标准进行优化提升,制定的铁路隧道工程平整度计算原理和数学分析模型,形成高铁隧道工程平整度新的技术标准,能够提高平整度分析的速度和精度,并可以及时在预警系统进行展示和预警发布,实现问题及时反馈和闭环处置。

## 4.3 隧道断面质量管理体系技术应用效果

在新八达岭隧道项目和正盘台隧道项目中,通过应用基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理系

统,极大地提高了隧道断面质量管理准确性与及时性,较大程度提高了参建各方的工作效率<sup>[17]</sup>。在数据采集端,据不完全统计,该系统的应用已节省人工成本 20%,提高采集效率 30%,提高准确率 25%。在前端分析中,通过对点云数据进行断面切分、超欠挖、平整度、方量、变形等指标的专业分析,自动生成 BIM 模型、分析报表和断面图实时指导现场作业人员。与此同时,各类分析结果能够实时传输到预警系统中进行预警管控,实现监测物联传输、集中存储、专业分析、预警发布,实现对隧道工程建设过程关键部位、关键质量问题的有效管控,全面提升所建隧道项目施工全过程的精益管理,提高了建设管理人员的管理效率及准确性,便于及时消除施工安全隐患。

通过应用该系统,解决了数据采集、处理、反馈、预警的及时性和准确性问题,实现了数据传输、处理、反馈和预警自动化,同时具有溯源监管功能,起到了检查和指导的作用。与传统方法相比,应用基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理体系,满足了对隧道断面量测进行过程控制和预警处理的需求,加强了对现场作业行为的监管力度,保证隧道施工及周边环境施工安全的及时性、真实性,实现对变形异常及时、快速地响应和处理,及时消除安全隐患,降低了安全事故的概率,提升了隧道施工风险管控能力,得到了多家使用单位的良好反馈。

## 5 结论与讨论

1)清华园隧道轨下结构采用全预制拼装技术,并研发了拼装机器人,实现了智能化拼装,极大地提高了施工效率与拼装精度。

2)清华园盾构隧道应用可视化施工系统施工,能够实时展示盾构工作情况,并能根据盾构实时状态自



动分析风险情况并给予推进参数建议,有效地提升了施工质量和效率。

3)东花园隧道防水工程创新性地采用了自动化喷涂防水技术,利用钢结构定制自动喷涂机器人,实现了防水材料的自动上料、自动定位、自动喷涂。与人工喷涂技术相比,在施工质量、安全、工效和进度上有显著优势。

4)新八达岭隧道和正盘台隧道在建设过程中应用了基于三维激光扫描技术的隧道断面质量管理体系,将BIM精细化模型与三维激光扫描点云模型进行深度融合,进一步实现对隧道施工作业过程的可视化。

在京张高铁隧道智能技术应用的过程中仍存在一些不足需要改进,例如采用全预制拼装技术进行施工时不可避免会产生拼接误差,同时拼装机也存在适应性不强的问题;在可视化施工系统应用的过程中需要进一步加深人机互动的便利性,优化系统界面,同时加强推广,提高从业人员的素质。

#### 参考文献(References):

- [1] 王喜文. 工业4.0、互联网+、中国制造2025 中国制造业转型升级的未来方向[J]. 国家治理, 2015(23): 12.
- WANG Xiwen. Industry 4.0, Internet +, Made in China 2025, The future direction of China's manufacturing transformation and upgrading [J]. Governance, 2015(23): 12.
- [2] 贾根良. 第三次工业革命与工业智能化[J]. 中国社会科学, 2016(6): 87.
- JIA Genliang. The third industrial revolution and industrial intelligentization [J]. Social Sciences in China, 2016(6): 87.
- [3] 刘姣姣, 黄膺旭, 徐晓林. 日本人工智能战略: 机构、路线及生态系统[J]. 科技管理研究, 2020, 40(12): 39.
- LIU Jiaojiao, HUANG Yingxu, XU Xiaolin. Japanese artificial intelligence strategy: Institutions, routes and eco systems [J]. Science and Technology Management Research, 2020, 40(12): 39.
- [4] 李金华. 德国“工业4.0”与“中国制造2025”的比较及启示[J]. 中国地质大学学报(社会科学版), 2015, 15(5): 71.
- LI Jinhua. Comparison and inspiration between Germany's "Industry 4.0" and "Made in China 2025" [J]. Journal of China University of Geosciences (Social Sciences Edition), 2015, 15(5): 71.
- [5] 周济. 智能制造: “中国制造2025”的主攻方向[J]. 中国机械工程, 2015, 26(17): 2273.
- ZHOU Ji. Intelligent manufacturing: Main direction of "Made in China 2025" [J]. China Mechanical Engineering, 2015, 26(17): 2273.
- [6] 王同军. 中国智能高铁发展战略研究[J]. 中国铁路, 2019(1): 9.
- WANG Tongjun. Study on the development strategy of China intelligent high speed railway[J]. Chinese Railways, 2019(1): 9.
- [7] 赵勇, 俞祖法, 蔡珏, 等. 京张高铁八达岭长城地下站设计理念及实现路径[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(7): 929.
- ZHAO Yong, YU Zufu, CAI Jue, et al. Design concept and implementation path for Badaling Great Wall station of Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J]. Tunnel Construction, 2020, 40(7): 929.
- [8] 欧宁. 京张高铁清河站站房绿色设计研究[J]. 铁道勘察, 2020, 46(1): 1.
- OU Ning. Research on green building design of Qinghe station in Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J].

- Railway Investigation and Surveying, 2020, 46(1): 1.
- [9] 封海舰, 白锡彬. 京张高铁智能辅助监控系统应用[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(7): 95.
- FENG Haijian, BAI Xibin. Application of intelligent auxiliary monitoring system for Beijing-Zhangjiakou high speed railway[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(7): 95.
- [10] 王洪雨. 智能京张高速铁路总体创新设计[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 7.
- WANG Hongyu. The overall innovative design of the intelligent high-speed railway from Beijing to Zhangjiakou [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 7.
- [11] 周国华, 王燕. 高速铁路建设项目管理信息化实践与展望: 以京张高铁为例[J]. 项目管理技术, 2020, 18(3): 86.
- ZHOU Guohua, WANG Yan. Practice and prospect of informationization of high-speed railway construction project management: Taking Beijing-Zhangjiakou high-speed railway as an example [J]. Project Management Technology, 2020, 18(3): 86.
- [12] 王峰. 我国高速铁路智能建造技术发展实践与展望[J]. 中国铁路, 2019(4): 1.
- WANG Feng. Development of China's intelligent HSR building technology and its future[J]. Chinese Railways, 2019(4): 1.
- [13] 赵勇, 吕刚, 刘建友, 等. 京张高铁清华园隧道建造关键技术创新与应用[J]. 铁道标准设计, 2020, 64(1): 109.
- ZHAO Yong, LYU Gang, LIU Jianyou, et al. Key technology innovation and application of Tsinghuayuan tunnel construction in Beijing-Zhangjiakou high-speed railway [J]. Railway Standard Design, 2020, 64(1): 109.
- [14] 赵琳, 张轩, 陈鹏飞, 等. 京张高铁八达岭地下车站 BIM 设计应用[J]. 铁道勘察, 2020, 46(1): 111.
- ZHAO Lin, ZHANG Xuan, CHEN Pengfei, et al. BIM design and application of Badaling Great Wall underground station of the Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Railway Investigation and Surveying, 2020, 46(1): 111.
- [15] 吕刚, 王婷, 刘建友, 等. 京张高铁东花园隧道喷涂式防水设计施工技术[J]. 隧道建设(中英文), 2020, 40(12): 1757.
- LYU Gang, WANG Ting, LIU Jianyou, et al. Coating-type waterproofing design and construction technology of Donghuayuan tunnel on Beijing-Zhangjiakou high-speed railway[J]. Tunnel Construction, 2020, 40(12): 1757.
- [16] 李藏哲, 陈少静. 新型双橡胶喷涂速凝防水涂料的研发[J]. 中国建筑防水, 2019(5): 9.
- LI Zangzhe, CHEN Shaojing. Development of new type doublerubber quick-setting spraying waterproofing coating [J]. China Building Waterproofing, 2019(5): 9.
- [17] 周晓磊. BIM 技术在新八达岭隧道及长城站的应用[J]. 工程建设与设计, 2019(13): 179.
- ZHOU Xiaolei. The application of BIM technology in New Badaling tunnel and Great Wall station [J]. Construction & Design for Project, 2019(13): 179.