

李向前, 林恩德, 房宽达, 等. 基于三维激光扫描的隧洞施工数字化系统建设及应用[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(S1): 337-343.

LI Xiangqian, LIN Ende, FANG Kuanda, et al. Construction and application of digital system for tunnel construction based on 3D laser scanning[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(S1): 337-343.

基于三维激光扫描的隧洞施工数字化系统建设及应用

李向前¹, 林恩德¹, 房宽达¹, 陈吉林², 于琦¹, 尚超¹

(1. 中国长江三峡集团有限公司科学技术研究院, 北京 101100;

2. 中国三峡建工(集团)有限公司, 四川 成都 610042)

摘要: 抽蓄工程建设涉及到地下厂房、引水隧洞等地下洞室施工, 建设工期紧、质量要求高。为了提升隧洞工程建设数字化水平, 提高建设效率, 保障工程质量, 构建了基于微服务架构的隧洞施工数字化系统, 基于 cesium 实现了大规模隧洞三维点云数据的轻量化和可视化。系统利用三维激光扫描仪采集的隧洞开挖、支护与衬砌等阶段施工形象的点云数据, 结合隧洞设计参数, 实现对隧洞超欠挖、支护的体型的偏差、喷射混凝土厚度、衬砌厚度与平整度等质量要素的统计与分析。基于三维点云数据对隧洞工程进度进行监控, 对施工强度进行统计分析, 对隧洞开挖及支护的工程量进行计量, 对隧洞变形进行三维可视化查询。系统能够基于分析结果自动化生成隧洞施工质量分析报告及满足工程管理要求的验评表单及签证。系统在某抽水蓄能电站工程的进厂交通洞进行了工程应用, 对工程的建设管理提供了有效支撑。

关键词: 隧洞; 三维激光; 智能建造; 数字化; 点云

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.S1.052

中图分类号: TV523

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)S1-0337-08

Construction and application of digital system for tunnel construction based on 3D laser scanning

LI Xiangqian¹, LIN Ende¹, FANG Kuanda¹, CHEN Jilin², YU Qi¹, SHANG Chao¹

(1. China Three Gorges Corporation Science and Technology Research Institute, Beijing 101100, China;

2. China Three Gorges Construction Engineering Corporation, Chengdu 610042, Sichuan, China)

Abstract: The construction of pumped storage projects involves the construction of underground caverns such as underground powerhouses and diversion tunnels, with tight construction schedules and high quality requirements. In order to improve the digital level of tunnel engineering construction, increase construction efficiency, and ensure project quality, a digital system for tunnel construction based on microservice architecture has been constructed, and lightweight and visualization of large-scale 3D point cloud data for tunnel construction have been achieved based on Cesium. The system utilizes point cloud data collected by 3D laser scanners during tunnel excavation, support, and lining stages, combined with tunnel design parameters, to achieve statistical analysis of quality factors such as tunnel over and under excavation, support deviation, shotcrete and lining thickness

收稿日期: 2024-07-18

基金项目: 中国长江三峡集团有限公司科研项目(WWKY-2021-0483)

通信作者: 李向前(1990—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事水电工程数字化研究工作。E-mail: lxqdyj@qq.com

and flatness. Based on 3D point cloud data, the system monitors the progress of tunnel engineering, analyzes construction intensity, measures the quantities of tunnel excavation and support, and conducts 3D visualization queries on tunnel deformation. The system can automatically generate tunnel construction quality analysis reports based on analysis result and meet the requirements of engineering management for inspection and evaluation forms and visas. The system has been applied in the access tunnel of a pumped storage power station project, providing effective support for the construction management of the project.

Keywords: tunnel; 3D laser scan; intelligent construction; digital; point cloud

0 引言

目前我国正处于抽水蓄能电站建设高峰期, 抽水蓄能电站对构建新型能源体系、实现双碳目标具有重要意义。抽水蓄能电站涉及大规模的地下洞室建设, 是抽蓄工程建设的重要部分, 其施工环境复杂、工程量大、质量要求高。传统的隧洞工程建设管理模式已经难以满足当前抽水蓄能电站建设管理需求, 因此迫切需要更为高效、精准的技术手段进一步提高施工与建设管理水平。

采用信息技术提高隧洞工程建设的过程的数字化、智能化水平是隧洞工程建设的重要发展方向。基于三维激光扫描技术开展隧洞施工阶段的测量与质量检测, 是有效提高隧洞工程建设数字化的重要手段之一^[1], 同时能够支持工程的数字孪生交付^[2-3]。基于三维点云可以对隧洞的超欠挖、支护的形体偏差、衬砌的平整度进行检测, 对开挖的方量进行计算, 对围岩的变形进行监测, 还可以对隧道围岩信息的识别和提取、渗漏水检测^[4], 对支护厚度的检测误差可以控制在厘米级^[5]。

隧洞超欠挖是隧洞开挖质量的重要控制指标之一。基于三维激光点云开展超欠挖检测能够准确识别出各个部位的超欠挖情况, 超欠挖的检测可以基于隧洞设计面参数进行计算^[6]。同时, 基于激光点云高密度特征, 可以实现对超欠挖体积精准计算^[7]。通过构建系统平台, 能够将超欠挖检测数据应用于工程管理过程中, 有效发挥数据价值^[8]。

基于三维激光点云开展隧洞变形分析, 多采用断面拟合的方法进行变形检测^[9]。李理等^[10]基于激光点云的隧道断面构建和断面叠加形变分析方法, 建立了提取隧道任意位置断面的算法模型以及全方位整体形变分析方法。在断面提取过程中, 周人飞等^[11]采用了深度学习方法将隧道管片进行分割提取, 再进行变形计算。赵强等^[12]提出了隧道点云降维后的网格化形变分析法, 将三维隧洞点云映射到参考基准面, 计算不同时期点云到同一参考基准的距离的差值计算, 从而获得隧道整体变形数据。

基于三维点云可以对隧洞平整度实现全面检测, 检测方法主要通过点云空间中建立虚拟靠尺计算点到靠尺的距离^[13], 或对点云进行平面拟合计算凹凸点到拟合平面的距离^[14], 基于点云的平整度检测效率高, 能够实现结构物表面的全面检测。李海波等^[15]利用三维点云对地下洞室衬砌体型偏差进行了检测, 认为衬砌浇筑和前期围岩开挖质量均会对衬砌体型偏差有一定影响。三维激光测量除在隧洞相关质量检测中应用外, 还可以在地质编录^[16], 危岩体识别^[17]以及运行期的隧洞缺陷检测^[18-19]等方面进行应用。基于三维激光扫描构建的结构物模型还可用于数字孪生体的构建^[20-21], 为工程后期的运维提供数据支撑。

综上所述, 三维激光扫描技术在隧洞工程中应用越来越广泛, 包括质量检测、安全检测与分析、工程计量等方面。其中以超欠挖为主的质量检测应用最广泛, 但同时也存在应用方式单一、缺乏系统化应用, 应用成果对工程建设管理环节提供支撑不足等问题, 需要基于三维激光扫描技术开展系统化应用研究, 实现三维激光扫描技术采集—分析—应用—管理的全流程联通, 同时形成超欠挖、平整度、体型偏差、支护厚度、方量计算等多成果类型的处理与分析, 最大化实现三维激光点云模型的价值。本文通过构建隧洞施工数字化系统, 与隧洞点云终端处理软件实现数据交互, 承接隧洞点云检测成果数据, 实现了基于三维点云的隧洞施工质量分析、变形分析及工程量计算, 并能够生成满足施工管理要求的相关签证及表单, 系统分析结果能够深度支撑隧洞工程的建设管理。

1 总体方案与系统概况

1.1 隧洞三维激光扫描技术应用方案

如图1所示, 针对钻爆法开挖隧洞的建设质量与安全管理问题与需求, 构建了基于三维激光扫描的隧洞施工数字化系统, 并以系统为核心, 形成包含隧洞三维点云采集、处理、分析、应用全流程的隧洞工程数字化方案。隧洞三维点云采集主要利用设站式三维激光扫描仪进行采集, 获取高精度的隧洞点云模型,

也可以采用便携式扫描仪或通过基于图像重建的方式获取隧洞点云模型。其中设站式扫描仪采集的数据模型精度最高。采用终端点云处理软件对采集的原始隧洞点云进行降噪、坐标转换、偏差检测等处理,形成初步的成果点云数据。将成果点云数据上传到数字化系统,系统对点云数据进行深度处理与分析,生成隧洞工程质量、工程量等相关报表及报告,同时实现隧洞三维点云的可视化。参建单位人员利用系统在线查询隧洞施工质量、进度等成果信息,自动生成系列质量验收表单与工程量计算书等,降低施工单位内业工作量,实现扫描数据成果的共享,实现三维激光扫描测量成果的深度应用。

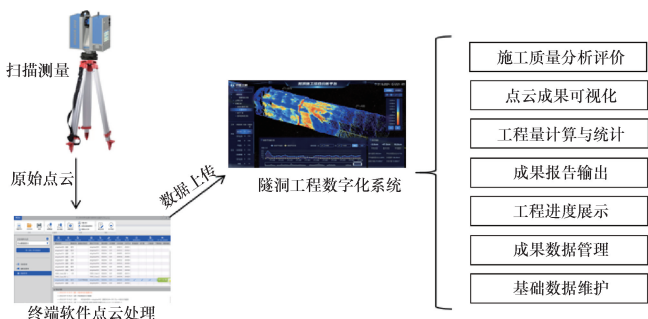


图1 隧洞三维激光扫描应用流程

1.2 系统业务及功能架构

如图2所示,基于三维激光扫描的隧洞工程数字化建设以隧洞施工阶段的三维点云为核心,结合三维可视化技术构建隧洞施工综合分析系统,实现对隧洞超欠挖、衬砌体型偏差、支护厚度与平整度等要素的可视化与分析评价,对开挖及支护的工程量进行计量,对隧洞围岩变形进行分析。基于检测结果实现工程签证及报表的生成,深度支撑工程建设管理。

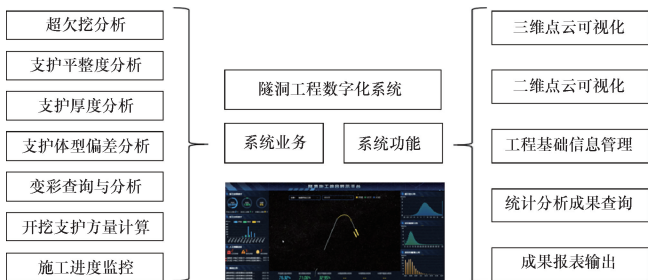


图2 系统业务及功能架构

系统基于 Cesium 实现三维点云可视化,能够直观地展示隧洞施工过程中各项质量成果,并基于三维点云到隧洞设计轮廓表面映射关系实现隧洞点云的二维可视化。系统通过构建工程信息管理模块,实现工

程结构的分解及成果数据与管理结构的关联。系统通过构建设计参数管理模块实现对隧洞设计参数以及质量控制指标进行管理,进一步支持系统对相关质量及工程量的自动化统计与分析。同时基于点云数据提取隧洞进度信息,实现隧洞施工进度的跟踪及施工强度的分析。系统结合报表工具,利用基于点云的检测及计量结果,自动化生成满足工程要求的相关签证及表单,能实现表单的快速定制开发,同时大大提高内业处理效率。

1.3 系统技术架构

项目采用微服务架构研发了基于三维激光扫描技术的隧洞施工数字化系统(见图3)。系统具备跨平台兼容性,能够在 Windows 和 Linux 服务器上运行。系统前端采用 Vue 构建的动态用户界面,提供响应式设计 and 丰富的交互体验。系统基于 Cesium 和 3DTiles 实现三维点云可视化大规模洞室点云的轻量化加载。系统报表页面基于报表工具开发,能够实现各类报表需求的快速迭代。系统后端使用 Java 语言并结合 springboot 框架,保障系统的安全性及高效性,JAVA 运行时 jdk 版本为 1.8。系统数据库主要使用了 MySQL、MongoDB、Clickhouse 来存储数据,并结合 Redis 实现高性能,高持久化的缓存服务,其中 Clickhouse 数据库用于存储隧洞变形分析数据,支持大规模变形数据的快速检索。系统接口采用 RESTful API 设计,方便与其他系统集成。

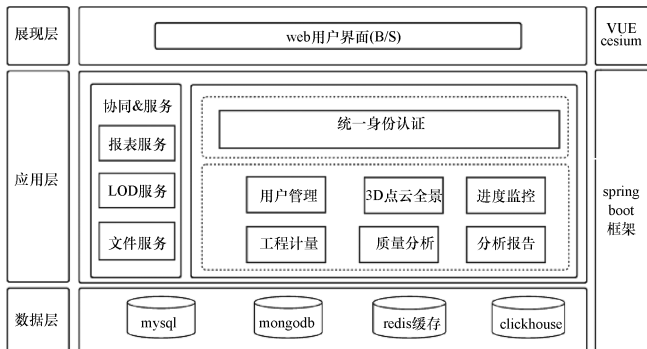


图3 系统技术架构

1.4 系统数据结构

系统采用数据结构及流程如图4所示。利用三维激光扫描仪取得原始点云数据,项目采用的点云处理终端软件支持 las、zfs、xyz 等常用三维点云数据格式。采用点云终端软件对点云进行坐标转换、偏差检测等处理,将检测成果叠加到点云数据中形成附加检测结果的点云文件,当进行变形检测时,同时生成变形统计数据存储到 Clickhouse 数据库中。附加检测结果的点云文件传输至系统,系统进行轻量化处理,生

成用于可视化的瓦片文件 3dtiles。系统对检测结果进行统计分析、方量计算等,统计计算结果存储到 Mysql 数据库中,用于支持动态查询与分析、报表生成等。系统基于各类数据的应用场景及特点采用了不同的存储方式,实现了数据的高效应用。

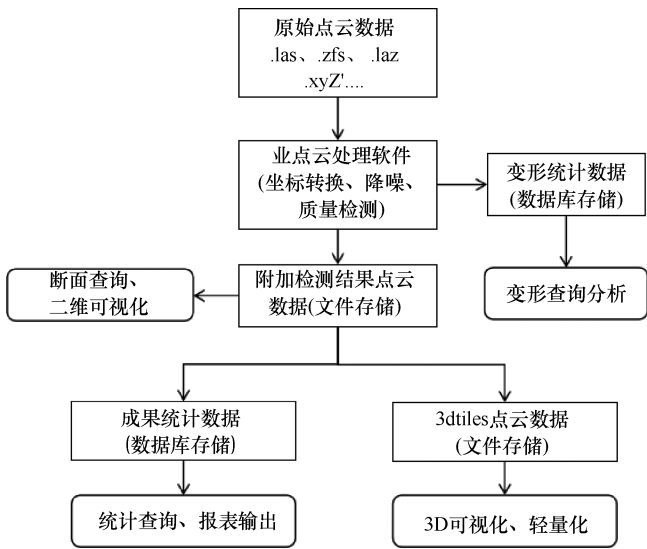


图4 系统数据流

2 隧洞点云成果分析与工程应用

2.1 试点应用工程概况

系统在安徽某抽蓄电站地下厂房进厂交通洞开展了工程应用。交通洞全长约 1 700 m, 围岩等级以 II 类和 III 类围岩为主, 采用钻爆法开挖, 设计喷锚支护厚度为 10 cm。隧洞断面为城门洞形, 开挖宽度 8.0 m, 开挖高度 8.4 m。利用三维激光扫描技术采集了隧洞开挖和锚喷支护阶段的隧洞点云数据, 采集过程以设站式三维激光扫描仪为主, 利用棱镜标靶球和全站仪辅助定位, 累计采集隧洞开挖及支护点云数据约 600 m。采用系统对隧洞进行了开挖及支护质量分析、工程量计量等, 并输出相关成果报告。

2.2 隧洞超欠挖分析

采用爆破施工工艺的隧洞, 其工艺特点导致开挖后的隧洞表面不平整, 与设计断面相比难免存在超挖和欠挖的部分。利用三维激光扫描技术构建的隧洞三维模型可以准确的分析隧洞的超挖和欠挖情况, 保障隧洞的开挖质量。采用三维点云进行超欠挖检测, 可以基于点云重建三维实体模型并与设计模型比较的方法^[22], 或基于断面参数进行偏差计算^[23]。断面参数法具有计算效率高、计算过程不会引入计算误差等优点, 系统对接的点云终端处理软件均采用该方法进行超欠挖检测。

2.2.1 超欠挖的可视化分析

系统通过承接终端点云处理软件的超欠挖检测数据, 并在系统中建立基于工程质量控制要求的欠挖控制标准, 实现对隧洞开挖合格率统计。通过三维云图的方式在三维场景中直观展示隧道的“超挖”和“欠挖”区域及超欠挖程度, 并基于 cesium 实现云图的动态渲染, 如图 5 所示。同时, 项目基于三维激光扫描测点高精度高密度优势, 结合点云数据的高效存储与提取技术实现了隧洞测量断面提取, 并基于工程开挖质量控制标准实现断面质量的快速评价, 如图 6 所示。具体实现方法为在三维点云可视化场景中点击点云模型, 通过点击位置计算待查询断面的数据的里程桩号信息。根据获取的里程桩号信息, 在点云数据存储文件中采用二分法进行快速检索, 提取断面点云的断面坐标数据和超欠挖数据, 并基于设定的超欠挖控制标准进行开挖合格率、平均超欠挖等质量参数的动态计算。

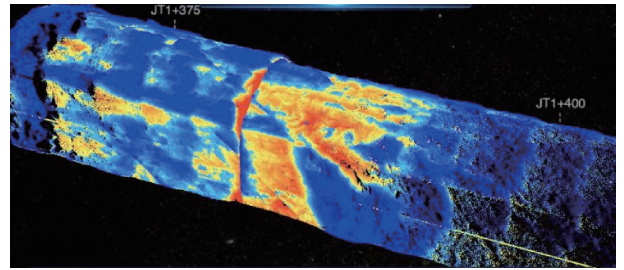


图5 隧洞超欠挖特征云图

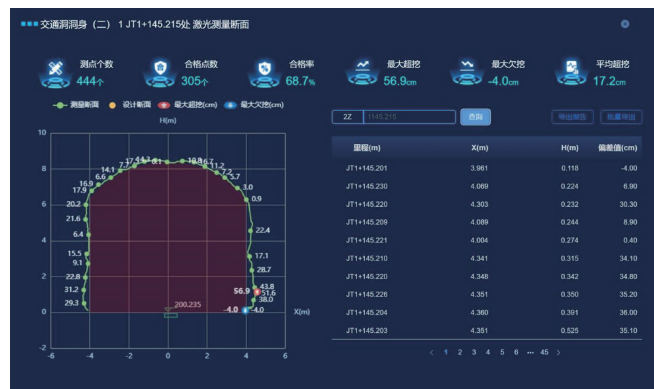


图6 隧洞断面超欠挖分析

对进场交通洞的超欠挖进行检测分析, 其三维超欠挖特征云图如图 5 所示, 蓝色区域为超挖区域, 颜色越深超挖值越大, 暖色区域为欠挖区域。对隧洞断面的超欠挖详细查询结果如图 6 所示, 显示了桩号为 JT1+145.215 处的实际断面情况, 并在断面图中标注了一系列点位的超欠挖值, 同时统计出该断面的超欠挖合格率为 68.7%。

2.2.2 隧洞开挖质量统计分析

建立隧洞区段范围内超欠挖信息统计与评估方

法, 能够从全局的角度的评价隧洞的开挖质量, 为隧洞开挖质量管理提供数据支撑。项目基于三维激光点云数据对开挖质量进行统计分析, 以隧洞里程桩号作为划分维度, 每延米为一个计算单元进行超欠挖相关数据统计计算, 统计结果存储在 Mysql 数据库, 用以支持各类查询与输出。每延米范围内的统计结果用里程上限值索引。统计的开挖质量要素包括平均超挖值、平均欠挖值、综合超欠挖值、开挖合格率、超挖区域占比、欠挖区域占比、超欠挖分布等参数, 能够全面反映隧洞的开挖质量情况。项目基于报表工具提供统计结果查询与输出。

系统对交通洞的超欠挖统计界面如图 7 所示, 图中曲线分别表示了隧洞的最大超挖、最大欠挖、平均超欠挖值随隧洞轴线桩号的变化情况, 由图可知, 隧洞的综合超欠挖在 0~10 cm 波动, 隧洞总体以超挖为主。图 7(b) 为系统对隧洞超欠挖分布统计的成果界面, 由图可知, 隧洞的超欠挖分布呈正态分布特征, 该开挖区间的超欠挖分布峰值为 8~9 cm, 这与钻爆法施工的特点相一致, 为了保持开挖净空满足设计要求, 避免隧洞欠挖的情况, 通过控制周边孔位置等爆破参数, 允许产生一定量的超挖。统计结果同时表明, 局部欠挖在隧洞中也是普遍存在并难以避免的, 通过三维激光扫描能够准确的发现欠挖的位置, 避免工程质量隐患。

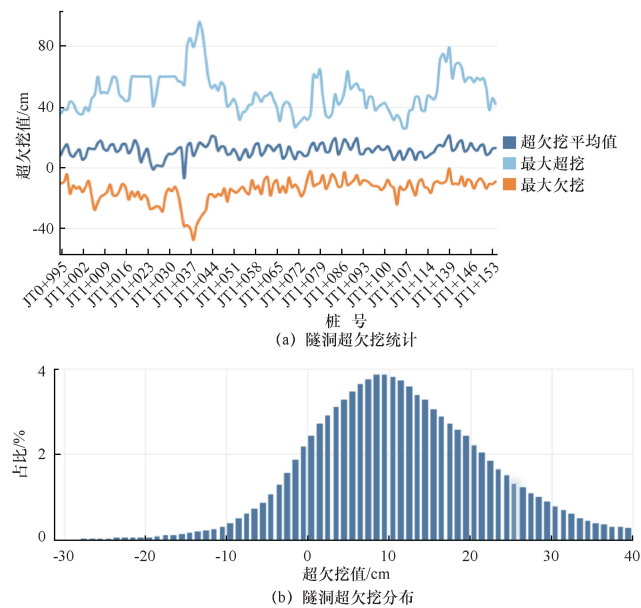


图 7 隧洞超欠挖统计分析

2.3 初支及衬砌施工质量分析

2.3.1 支护厚度分析

基于三维激光点云开展厚度检测, 可以利用开挖

阶段获取的隧洞开挖点云模型及锚喷支护完成后采集锚喷支护点云模型进行叠加, 完成隧洞支护厚度检测。具体方法为将内外两层点云按照法线投影的方法映射到支护设计轮廓表面, 实现内外层点云的匹配并进行厚度计算。由于点云的随机性, 内外层点云的映射值难以精确匹配, 可采用固定间隔进行划分, 计算间隔单元内内外侧点云的平均厚度值, 最终实现隧洞三维激光点云模型的厚度检测。基于锚喷支护的隧洞点云数据和衬砌设计轮廓进行偏差计算可以得到隧洞衬砌预测厚度信息。对衬砌厚度的预测, 做到了施工前的质量预判, 可以有效避免衬砌厚度不足等质量问题的出现, 减少因潜在质量问题导致的返工, 提升工程的整体质量和施工效率。基于系统搭建的可视化场景, 将含有隧洞支护厚度信息的三维点云进行可视化。

如图 8 所示, 图中展示了交通洞桩号 JT 0+945 前后的支护厚三维云图, 蓝色区域表示支护厚度大于设计要求的 10 cm, 颜色越深厚度越大; 暖色区域表示支护厚度不足 10 cm 的区域, 颜色越深则厚度越薄。基于三维点云实现了隧洞支护厚度的可视化、透明化, 同时也实现了支护厚度检测的全覆盖。

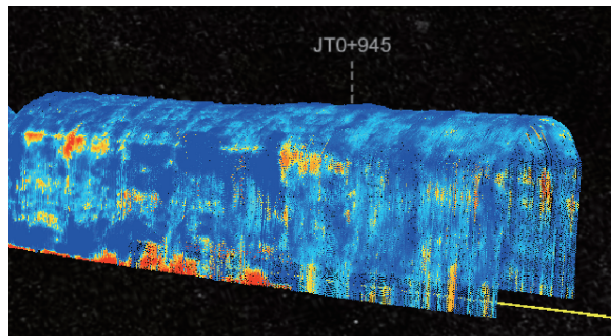


图 8 隧洞支护厚度三维云图

系统对隧洞支护厚度进行了统计分析, 包括平均厚度、最大厚度、超厚区域占比、欠厚区域占比、厚度合格率以及厚度分布特征。统计单元按照隧洞桩号划分, 每延米为一个统计单元, 与超欠挖统计模式相似。支护厚度的合格率判定标准基于规范要求或工程的质量控制要求, 实现支护厚度的自动化分析与评价。系统对进厂交通洞 JT 0+945 前后锚喷支护厚度统计分析如图 9 所示, 由图可知, 隧洞支护的平均厚度在 10 cm 左右, 表明隧洞的锚喷支护基本满足设计要求, 部分区间锚喷支护平均厚度不足 10 cm, 与三维云图的厚度特征一致。

2.3.2 支护体型偏差分析

支护体型偏差分析主要包括锚喷支护的体型偏差

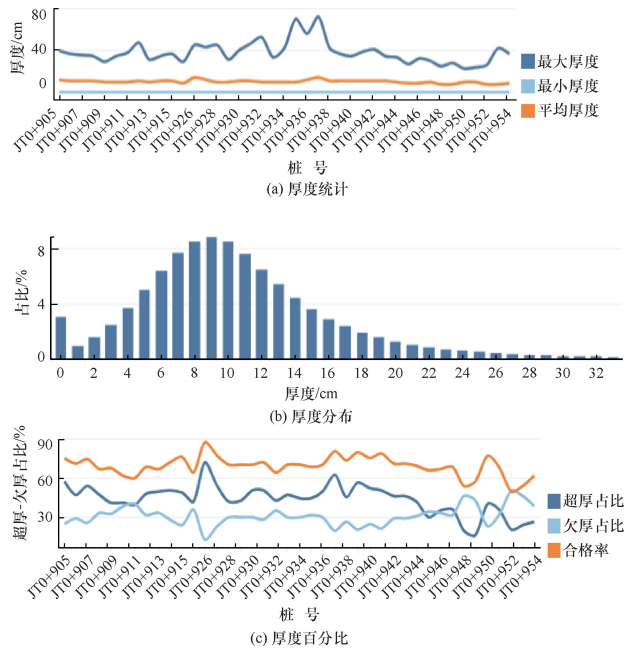


图9 隧洞支护厚度统计分析成果界面

以及隧洞混凝土衬砌的体型偏差, 其中混凝土衬砌的体型偏差是工程质量检测的重要指标, 且对偏差的控制标准要求高。本文支护体型偏差检测方法均采用断面参数法, 利用支护的设计轮廓参数、轴线参数进行断面偏差计算^[23], 得到偏差值, 包括支护的侵限值和超限值。项目基于三维激光点云构建的隧洞支护模型实现了对支护体型的全面、精准检测与分析评价, 包括体型偏差的三维、二维可视化, 延隧洞轴线每延米的超侵限平均值、面积等要素。

2.3.3 支护平整度分析

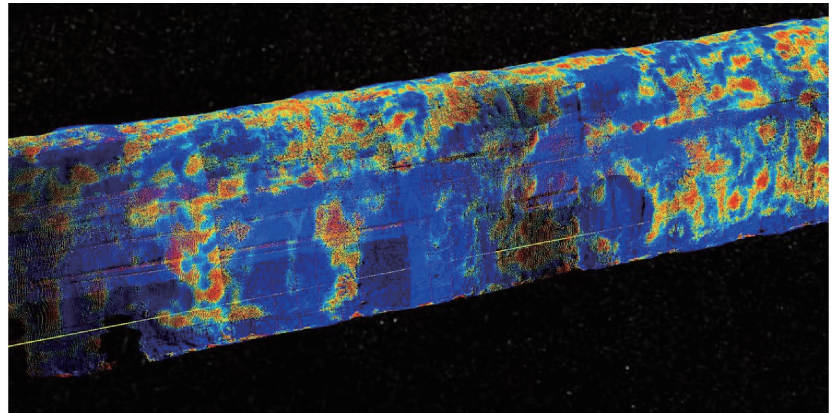
本文的平整度检测采用米字型靠尺遍历点云的方法, 通过在点云表面设定虚拟的平整度检测靠尺, 计算点云到靠尺距离与靠尺长度的比值即深长比(矢弦比)作为该点位的平整度值^[24]。系统主要对支护平整度进行分析与评价, 基于规范及工程质量控制要求对隧洞的平整度进行统计, 生成平整度分布特征、平整度合格率等统计结果, 同时基于可视化框架实现平整度的可视化展示, 能够直观、全面、准确的判定隧洞平整度质量情况, 平整度统计结果如图 10 所示。

2.4 开挖量与支护工程量分析

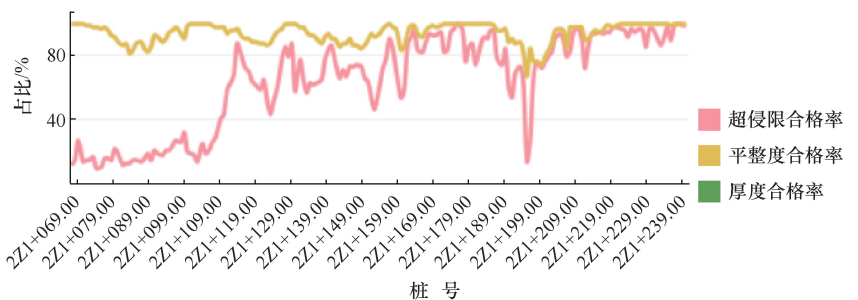
系统能够基于隧洞三维点云和设计参数对隧洞开挖及支护方量进行计算, 包括超欠挖方量、开挖方量、支护及衬砌混凝土浇筑方量。超挖方量、欠挖方量的计算通过积分法进行计算, 首先按照特定间隔对点云进行切片, 计算切片点云的超挖面积和欠挖面积, 再结合切片的厚度得到相应的超欠挖体积。最后对应的体积求和即可得到隧洞的超欠挖体积。

其中开挖方量通过间接计算得出, 首先计算隧洞的超挖方量、欠挖方量、设计方量, 设计方量减去开挖方量加上超挖方量即可得到实际开挖方量。其中设计开挖方量基于标准设计断面面积乘以统计单元的轴线长度即可得到隧洞设计方量, 是一种通用的设计方量计算方法。

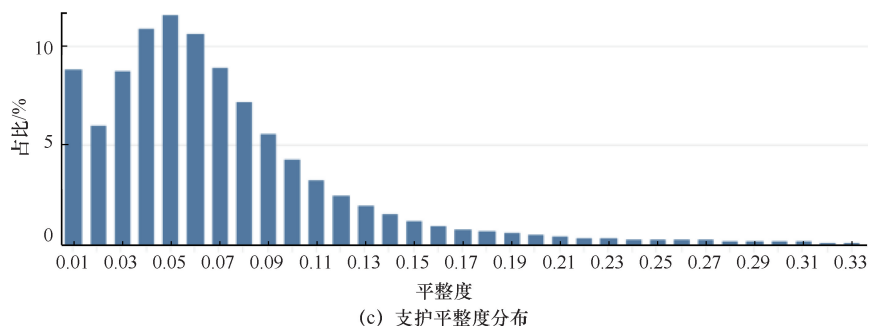
工程中其中硐室开挖设计方量、锚喷支护方量、衬砌混凝土方量主要基于设计参数得出, 开挖完工方



(a) 隧洞支护平整度可视化云图



(b) 平整度合格率统计



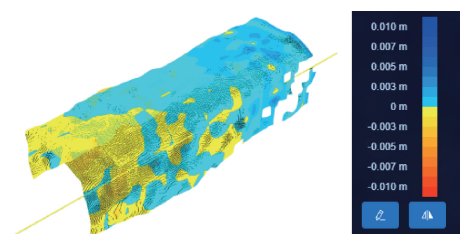
(c) 支护平整度分布

图 10 隧洞支护平整度统计与分析

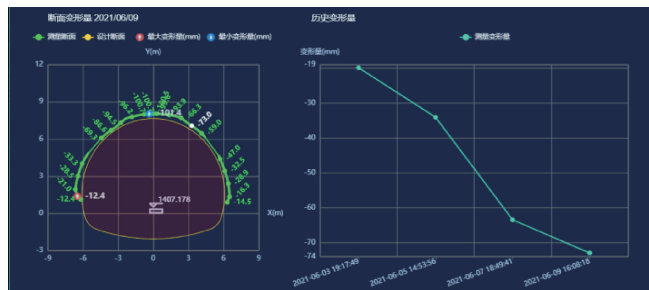
量基于固定间隔(一般为 5 m)的断面面积乘测量间隔得到。传统基于测量断面的开挖完工方量计量方法增加了外业测量工作, 计算过程依靠人工完成, 测点和断面稀少, 计算偏差较大, 锚喷支护及衬砌混凝土实际方量缺少有效的计量方法。三维激光扫描技术在工程量计算方面具有显著优势, 能够准确的对开挖方量、衬砌混凝土方量进行计量。

2.5 隧洞变形分析

采用三维激光点云进行隧洞变形分析, 需要获取不同时间的隧洞三维点云数据, 并进行不同期的点云叠加匹配计算出隧洞围岩的变形^[25]。采用三维扫描技术进行隧洞变形测量具有非接触、不受光线影响、无需布设测点等优势, 同时能够反映出隧洞的整体变形趋势。系统能够对不同时期的隧洞变形点云数据进行三维可视化, 包括对隧洞的收敛变形和沉降变形分别展示。基于设计数据和实测数据动态绘制隧洞断面变形图, 在断面变形图内, 提供任一点的历史变形数据查询, 绘制变形量随时间变化的曲线。如图 11(b)所示的隧洞断面的沉降变形数据, 拱顶沉降量最大, 约为 10 cm。同时查询了一点位历史沉降信息, 沉降量从 19 mm 逐渐增加到 75 mm。三维点云数据本身具有数量规模大的特点, 用于三维变形分析时, 叠加不同时期的点云数据, 最终获得的隧洞变形数据规模庞大, 因此需要解决变形数据高效查询问题。系统使用了列式数据库 Clickhouse 存储隧洞变形分析数据, 同时将点云数据按照变形单元采样存储, 降低数据规模, 从而实现隧洞变形数据的高效查询与分析。



(a) 隧洞三维变形可视化



(b) 隧洞沉降变形断面及时程曲线

图 11 隧洞变形查询与分析

2.6 工程签证表单

施工过程中产生的各类质量验评及签证表单是评价或记录施工过程的主要资料, 也是支撑工程管理重要手段, 开展工程验收结算的重要依据。实践中需要投入大量精力的整理相关的表单和签证, 并要求内容客观、准确、可靠。为了实现三维光扫描技术的深入应用, 提高成果数据的应用范围和对工程建设管理支撑作用, 系统基于三维点云数据可自动生成相关表单和签证。

系统基于三维点云数据开展成果统计, 并将统计结果存储在关系数据库中, 根据签证表的数据要求动态生成相应表单, 包括开挖单元工程质量等级评定表、喷射混凝土单元工程厚度及外观检测记录表、断面测量成果表、工程量计算表、地质缺陷签工程量证表等。其中断面测量成果表数据从点云模型文件中按照断面桩号快速提取, 生成成果表单。在基础信息管理模块, 系统支持基于桩号的单元工程定义, 因此可通过定义好的单元工程范围, 输出需要的表单。

3 结论

本项目通过构建 B/S 架构的隧洞施工数字化系统, 对隧洞三维激光点云数据进行了统计分析, 通过可视化引擎实现了大规模隧洞点云数据的轻量化、可视化以及动态渲染。通过系统的实施应用改变了传统的隧洞施工质量检测、围岩变形监测与工程量计量的工作模式, 可提高隧洞施工测量自动化水平, 减少外业测量与内业统计工作量, 能够保障测量与检测成果的客观、准确、可靠, 全面提升隧洞施工质量、安全与计量管理水平。

(1) 构建了基于三维激光扫描的隧洞施工信息系统, 集成了前沿的超欠挖、支护质量、工程计量、变形监测等隧洞三维激光扫描分析技术, 实现了对隧洞工程多维度信息的统计分析与查询展示, 施工、监理、建设等参建单位均可以通过平台及时获取工程质量、进度等信息。

(2) 基于可视化引擎和 3dtiles 格式点云数据, 实现了大规模隧洞点云数据的轻量化加载, 及动态渲染。通过三维云图可以准确直观的展示隧洞的超欠挖、支护质量、变形等工程信息。

(3) 系统使用了列式数据库 Clickhouse, 解决了超大规模隧洞变形数据的存储与高效查询问题, 同时基于固定单元采样存储变形数据, 降低数据规模, 实现了隧洞变形断面分析数据及断面任一点变形历史数据的快速查询, 能够为隧洞的安全分析与评价提供有

效支撑。

(4)系统基于三维点云进行质量、工程量等数据的统计,并将统计结果进行存储,实现统计成果的在线查询与展示。同时基于系统单元工程的定义范围和应用工程的标准化表格要求,实现工程相关签证及表单的自动化生成,能够有效提高工程内业资料整理效率,提升工程的数字化管理水平。

参考文献:

[1] 王志坚,童建军. 钻爆法隧道智能建造技术研究综述与展望[J]. 隧道建设(中英文), 2023, 43(4): 529-548.

[2] 丁志广,饶帅雄,王田芳,等. 激光扫描与无人机空地一体融合测量应用[J]. 测绘通报, 2023(1): 179-183.

[3] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障[J]. 水利发展研究, 2024, 24(3): 1-3.

[4] 鲍艳, BOM K I, 张东亮, 等. 基于三维激光扫描技术的竣工盾构隧道渗漏水检测[J]. 测绘通报, 2024(4): 101-106.

[5] 杨成, 吴勇, 姜文涛, 等. 多种方法隧道二衬厚度检测试验研究[J]. 工程质量, 2022, 40(3): 47-50.

[6] 张豪, 谢明君, 韦征, 等. 基于隧道点云数据的超欠挖检测应用研究[J]. 浙江工业大学学报, 2021, 49(5): 539-545.

[7] 李徐然, 施富强, 廖学燕. 基于激光点云的隧道超欠挖自动计算方法研究[J]. 工程爆破, 2017, 23(6): 17-21.

[8] 魏新元, 杨翻, 司明伟. 隧道三维激光扫描超欠挖数据管理平台在高速铁路建设中的应用[J]. 交通世界, 2021(23): 23-24.

[9] XIE Xiongyao, LU Xiaozhi. Development of a 3D modeling algorithm for tunnel deformation monitoring based on terrestrial laser scanning[J]. Underground Space, 2017, 2(1): 16-29.

[10] 李理, 卢小平, 朱宁宇, 等. 基于激光点云的隧道断面连续提取与形变分析方法[J]. 测绘学报, 2015, 44(9): 1056-1062.

[11] 周人飞, 赵青, 胡斌, 等. 基于深度学习和激光点云的隧洞纵向变形检测[J]. 云南水力发电, 2023, 39(8): 45-51.

[12] 赵强, 王涛. 一种三维激光扫描技术隧道整体变形分析方法[J]. 测绘科学, 2021, 46(2): 99-105.

[13] 齐成龙. 基于三维激光扫描的矿山法隧道超欠挖及平整度智能化检测[J]. 铁路技术创新, 2024(2): 99-105.

[14] 陶建军, 陈星澎, 于长海, 等. 基于空间模型配准的节段梁表面平整度检查方法[J]. 建筑结构, 2022, 52(S1): 1962-1967.

[15] 李海波, 杨兴国, 赵伟, 等. 基于三维激光扫描的隧洞开挖衬砌质量检测技术及其工程应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2017, 36(S1): 3456-3463.

[16] 董秀军, 戚万权. 徕卡 ScanStation2 激光扫描仪在水电工程地质编录中的应用[J]. 测绘通报, 2011(6): 84-85.

[17] 雷世兵, 徐俊, 张必勇, 等. 基于 3DE 平台的危岩体结构面识别及块体分析: 以房县抽水蓄能电站为例[J]. 水利水电快报, 2023, 44(S2): 21-23.

[18] 张柏楠, 韩勃, 李宁博, 等. 长距离水工隧洞运营期无人检测技术及病害识别方法研究进展[J]. 应用基础与工程科学学报, 2021, 29(5): 1245-1264.

[19] LI Pei, WANG Qiusheng, LI Jiahao, et al. Automated extraction of tunnel leakage location and area from 3D laser scanning point clouds[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2024, 178: 108217.

[20] 熊明, 古丽, 吴志锋, 等. 在役油气管道数字孪生体的构建及应用[J]. 油气储运, 2019, 38(5): 503-509.

[21] LI Yanyi, XIAO Zhihua, LI Jintao, et al. Integrating vision and laser point cloud data for shield tunnel digital twin modeling[J]. Automation in Construction, 2024, 157: 105180.

[22] 阳军生, 张宇, 祝志恒, 等. 基于图像三维重建的隧道超欠挖检测方法研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2020, 51(3): 714-723.

[23] 李向前, 林恩德, 严忠奎, 等. 一种隧洞超欠挖检测方法、装置、计算机设备及存储介质: 中国, CN202310511946.3[P]. 2023.

[24] 梁策, 徐世东, 程云建, 等. 米字型靠尺遍历离散点云检测隧道初支平整度[J]. 铁道工程学报, 2024, 41(3): 86-90.

[25] 段清超, 刘涛. 软岩隧道三维扫描变形监测技术的试验研究[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(S1): 180-187.

(责任编辑 王璐)