

智能施工台车在隧道维修加固中的应用

郝金海¹, 卓 仪², 徐文军¹, 张凯旋², 胡跃吉²

(1. 浙江交通集团高速公路宁波管理中心, 浙江 宁波 315100; 2. 北京特希达交通勘察设计院有限公司, 北京市 100068)

摘要: 我国山岭隧道数量庞大, 隧道结构病害普遍存在, 而养护维修投入有限。目前既有隧道养护维修处理措施效率低下、养护维修作业条件下交通难以有效分流, 对车辆通行影响较大, 且带来一定的交通安全隐患。依托甬台温高速公路宁波段麻岙岭隧道养护维修工程, 针对传统山区隧道病害处置技术的弊端, 以保持路网的通行效率为原则、保障行车安全与施工安全为基础, 从保证质量、节约成本、提高效率、降低影响的角度出发, 提出了一种不中断交通的隧道养护加固智能施工台车, 为山岭隧道养护维修施工提供了一种高效、经济的施工方法。

关键词: 公路隧道; 维修加固; 施工台车

中图分类号: U455

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)08-0364-05

Application of Intelligent Construction Trolley in Tunnel Maintenance and Reinforcement

HAO Jinhai¹, ZHUO Yi², XU Wenjun¹, ZHANG Kaixuan², HU Yueji²

(1. Ningbo Management Center of Zhejiang Communications Group Expressway, Ningbo 315100, China; 2. Beijing Teshida Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100068, China)

Abstract: In China, the number of mountain tunnels is huge, the tunnel structure diseases are common, and the maintenance and repair investment is limited. At present, the maintenance and repair measures of the existing tunnels are inefficient, and it is difficult to effectively separate the traffic under the conditions of maintenance and repair operations, which has a great impact on vehicle traffic and brings certain traffic safety hazards. Relying on the maintenance and repair project of Maaoling Tunnel in Ningbo Section of Ningbo-Taizhou-Wenzhou Expressway, aiming at the disadvantages of traditional mountain tunnel disease disposal technology, based on the principle of maintaining the traffic efficiency of the road network and the basis of ensuring the driving safety and construction safety, an intelligent construction trolley for tunnel maintenance and reinforcement without interrupting traffic is proposed from the perspective of ensuring quality, saving cost, improving efficiency and reducing impact, which provides an efficient and economical construction method for the maintenance and repair of mountain tunnels.

Keywords: highway tunnel; maintenance and reinforcement; construction trolley

0 引言

目前, 随着我国公路交通网的不断建成和完善, 大量的公路隧道进入运营及维修阶段, 但长久以来针对隧道的养护作业轻则封闭部分交通, 导致交通的拥堵, 重则直接中断交通, 导致经济收益损失。因此, 在养护施工过程中, 选取合适养护施工装备以减少对隧道时间、空间的占用, 是隧道养护作业需重点关注的问题之一。

欧美等国早已经掌握了传统组装拱架式模板台

车^[1]的设计制造技术, 并且随着隧道施工要求和自动化控制技术发展台车性能也在持续不断改善, Victores等^[2]提出了一套完整的隧道混凝土表面检测与维护移动集成系统, 它可以帮助操作员在地面指挥台完成裂缝识别及环氧树脂注射工作。

国内学者为减少占路时间、提高养护作业安全性、灵活性等, 对移动高空作业平台作业进行深入研究。姚新宇^[3]根据城市地铁系统特殊的隧道环境, 为城市地铁的检修维护工作设计了高空作业车, 并采用有限元方法分析了其整体刚度、强度及稳定性, 验证了其在隧道检修作业中的可行性。汪成兵等^[4]研发了一种移动式隧道加固防护操作平台, 在不中断交通条件下保护作业人员的安全, 具有移动性、稳

收稿日期: 2024-04-09

作者简介: 郝金海(1978—), 男, 本科, 高级工程师, 从事路桥项目投资建设管理工作。

定性好以及可重复使用等特点。叶鹏飞等^[5]针对隧道波纹板隧道加固施工,设计加工了不中断交通智能拼装台车,实现了部分车辆通行的目标,验证了隧道不中断交通养护施工的可行性。

本文依托甬台温高速公路宁波段麻岙岭隧道养护维修工程,成功应用一种隧道养护加固智能施工台车进行施工作业,在不中断交通条件下的隧道全断面养护施工作业,减小占路时间、提高作业平台安全性、灵活性,为其它类似工程提供参考。

1 工程概况

1.1 隧道概况

麻岙岭隧道位于甬台温高速公路宁波二期段。隧道进口为端墙式洞门,出口为削竹式洞门,洞内为水泥混凝土与沥青混凝土路面。隧道所在路段按山岭重丘区高速公路标准设计,隧道内轮廓线采取单心圆形式,衬砌结构形式为新奥法复合式衬砌。

麻岙岭隧道实景位置见图 1,隧道横断面见图

2,隧道结构特征见表 1。



图 1 麻岙岭隧道实景位置图

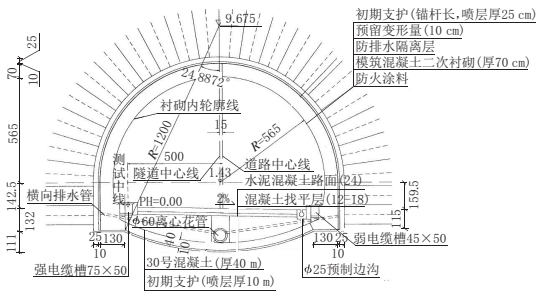


图 2 麻岙岭隧道实景横断面图(单位:cm)

表 1 麻岙岭隧道结构概况

围岩级别	初期支护			二次衬砌	
	锚杆	喷混凝土	钢筋网	拱圈	仰拱
Ⅳ	φ22, 3.0 m	5 cm 钢纤维+15 cm 素混凝土	φ8-15 cm×15 cm	素混凝土 60 cm	素混凝土 40 cm

1.2 衬砌病害概况

通过定期巡检,发现既有隧道结构病害主要包括衬砌厚度不足、脱空、渗水、裂缝、掉块、混凝土破损露筋及承载力不足等。

经地质雷达检测,在麻岙岭隧道衬砌有效厚度小于设计值的 1/2 的衬砌总长度约 286.6 m,其中连续长度大于 1.5m 的有 60 处。厚度不足病害在拱顶最多,拱肩次之,拱腰最少;在麻岙岭隧道 5 条测线处共有 30.4% 的段落衬砌发生脱空,脱空连续长度 0.6 ~ 37m 不等。

隧道脱空及厚度不足雷达图谱见图 3。

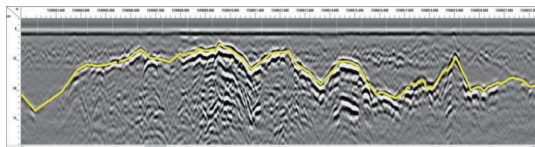


图 3 典型雷达图谱

隧道衬砌裂缝共 1 067 条,总长度 3 719.89 m,主要为纵向裂缝和环向裂缝;裂缝宽度在 0.20 ~ 1.00 mm 之间,均属于微张开裂缝;衬砌混凝土局部露筋: 5 处,面积 1.68 m²。

隧道结构裂缝病害实景见图 4。

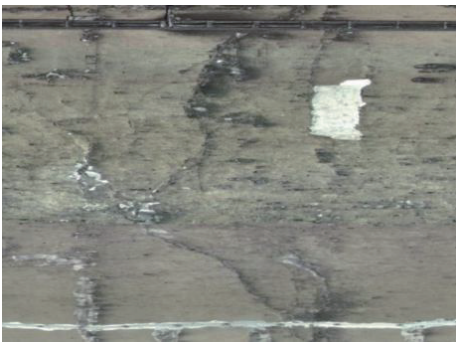


图 4 裂缝病害图

针对以上隧道衬砌结构病害,主要的养护维修措施包括注浆填充加固、粘贴碳布加固、不锈钢钢丝绳网片加固与钢压条加固。

2 智能施工台车

本工程麻岙岭隧道养护、病害处置工作具有以下特点:

- (1)交通导改困难。麻岙岭隧道属于山岭隧道。附近可供导改的路线很少。
- (2)沪杭甬高速交通量大。沪杭甬高速素有“浙江第一路”之称的沪杭甬高速公路,是推动长三角一体化加速融合的“黄金通道”。

(3)治理难度大。隧道脱空面积大,难以采取有效措施一次性治理。

因此,研发出一种不中断交通的隧道养护加固智能施工台车具有较强的必要性。

2.1 施工台车结构

本工程所使用的智能施工台车主要结构参数如下：

(1)台车净宽4.2m,净高5.7m,长10m,能够满足一车道通行需求。

(2)台车材质为碳钢材质 Q235B。

(3) 驱动电机功率为 $2 \times (3 \sim 7.5) \text{ kW}$, 油缸行程为 $300 \sim 1\,000 \text{ mm}$, 液压电机功率为 5.5 kW , 液压系统压力为 $16 \sim 20 \text{ MPa}$ 。

(4)施工台车行走速度为6 m/min,运料台车行走速度为18 m/min,机器升高范围50 cm。

智能施工台车结构见图5、图6,台车实物见图7。

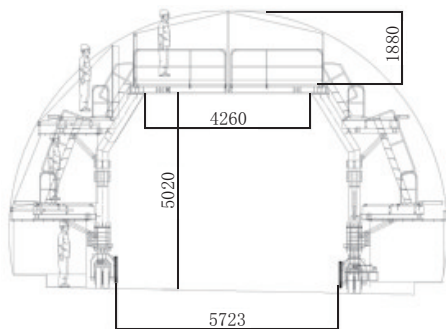


图5 智能施工台车结构横断面图(单位:mm)

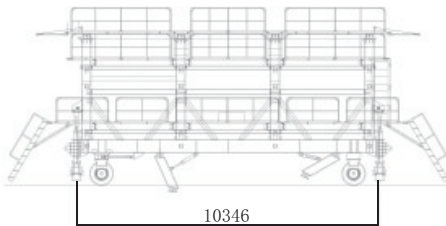


图6 智能施工台车结构纵断面图(单位:mm)



图7 智能施工台车设备图

2.2 施工台车拼装

本工程所使用的智能施工台车拼装主要分为如下:(1)行走轮支撑好,拼装底梁,支腿;(2)拼装立

柱,平移支腿;(3)拼装横梁、立柱斜撑;(4)拼装平台、走梯;(5)拼装护栏、围挡;(6)拼装发动机组、液压电箱组线、警示标志安装、照明装置放置。

智能施工台车拼装流程见图8~图12。

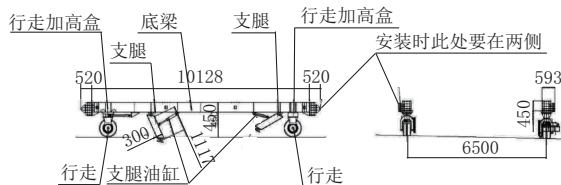


图8 拼装行走轮、底梁与支腿示意图(单位:mm)

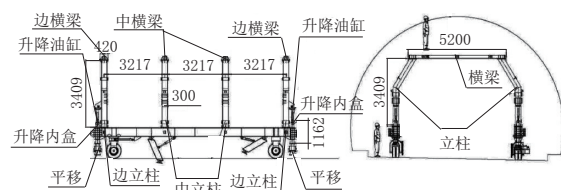


图9 拼装立柱与平移支腿示意图(单位:mm)

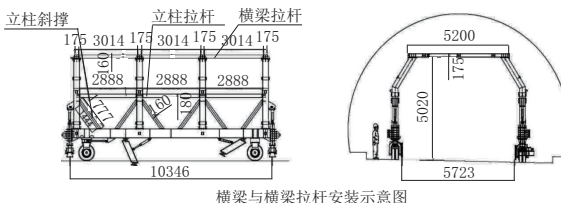


图 10 拼装横梁与立柱斜撑示意图(单位:mm)

顶层翻转护栏,使用铁链连接。配蝴蝶扣固定,链条长度 $L=2800$ 建议先穿翻转护栏,然后放倒护栏根据实际找固定位置。

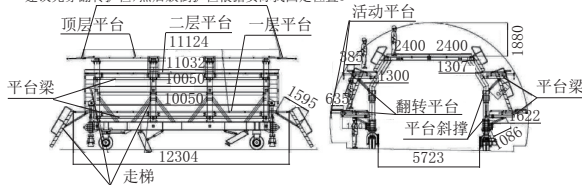


图 11 拼装平台与走梯示意图(单位:mm)

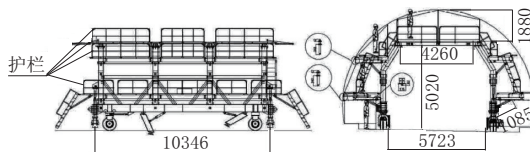


图 12 拼装护栏与围挡示意图(单位:mm)

3 智能施工台车结构验算

3.1 计算荷载

人员及设备荷载取 7 000 N (100 kg/人 $\times$ 7 人) 下压力;智能施工台车自重由结构的体积与材料密度的乘积求得。结构体积由有限元结构验算根据模型尺寸自动计算,材料密度取 $\gamma=7\ 850\text{ kg/m}^3$ 。

模型结构验算荷载如下:

计算荷载=1.2×结构自重+1.4×人员、设备荷载。

3.2 结构验算

建立的有限元模型主要包括平台、门架总成、底梁等主要结构体系,对整个模型施加水平位移约束,

计算荷载采用压力的形式施加到模型单元节点上,单元节点采用刚性连接,不考虑偏载效应。建立的有限元模型见图 13。按照台车结构强度及结构刚度两种工况进行计算,计算结果如下。

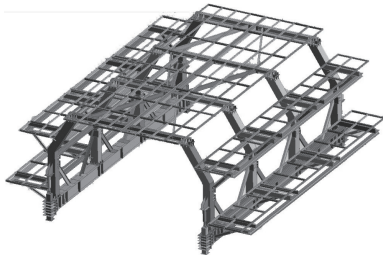


图 13 施工台车结构验算模型

工况一:结构强度计算

台车结构强度计算云图见图 14 ~ 图 18。

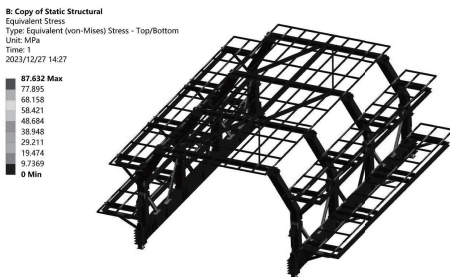


图 14 施工台车结构应力云图

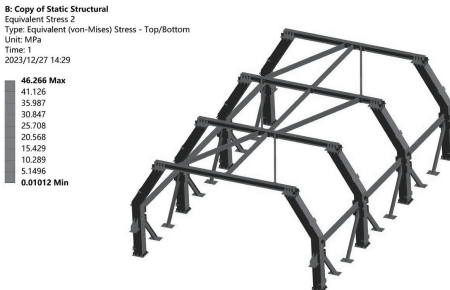


图 15 施工台车门架应力云图

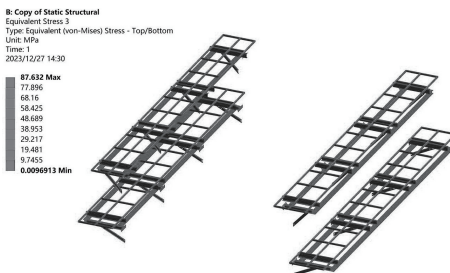


图 16 施工台车侧平台应力云图

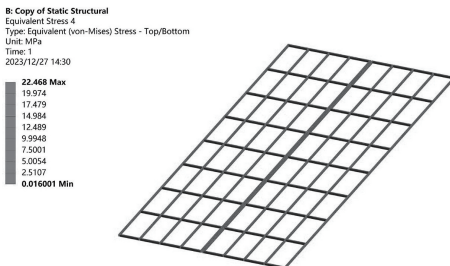


图 17 施工台车顶平台应力云图



图 18 施工台车底梁应力云图

通过应力计算云图可以看出,应力最大值为 87.632 MPa,位于一层桁架斜撑铰接处的局部应力。各处应力均远小于材料的许用应力 215 MPa,因此台车整体应力强度满足要求。

工况二:结构刚度计算

台车结构刚度计算云图见图 19 ~ 图 23。

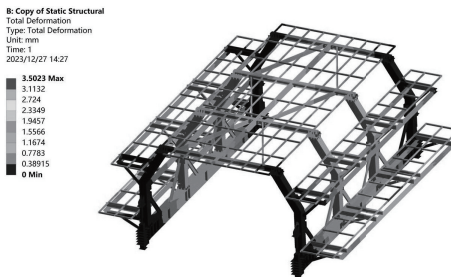


图 19 施工台车结构刚度验算云图

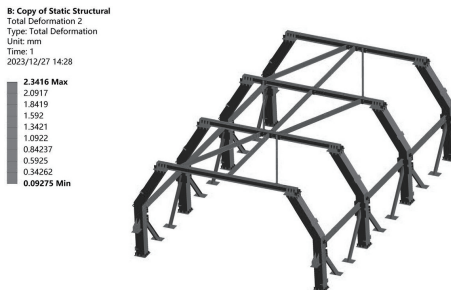


图 20 施工台车门架刚度验算云图

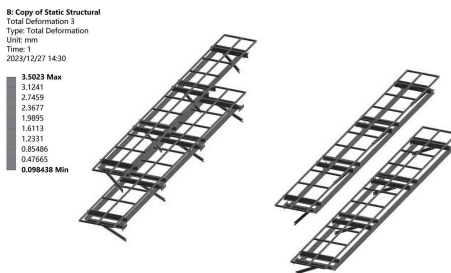


图 21 施工台车侧平台刚度验算云图

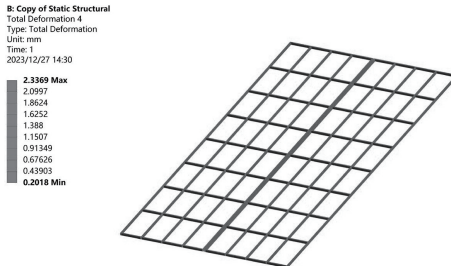


图 22 施工台车顶平台刚度验算云图

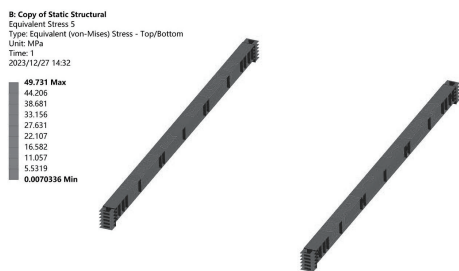


图23 施工台车底梁刚度验算云图

通过刚度验算云图可以看出,位移最大值为3.50 mm,发生在一层平台中部。门架位移最大值为2.34 mm,小于横梁拉杆计算长度7.45 mm。侧平台最大位移3.50 mm,小于计算长度30.21 mm。顶平台最大位移2.34 mm,小于计算长度27.5 mm。底梁最大位移1.20 mm,小于底梁计算长度26.75 mm。因此台车结构刚度满足要求。

4 智能施工台车工程应用

甬台温高速公路宁波段麻岙岭隧道养护维修工程采用智能施工台车进行施工。由于台车加工周期较长,为确保工期,拟在台车制作完成并运抵现场前,采用单幅边通车边施工方案,对部分病害先行处置,待台车进场后,进行全面养护维修加固作业。主要施工安排如下:

第一阶段:采用单幅边通车边施工方案,按照先行车道后超车道的顺序,分别进行两侧锚杆打孔注浆。

第二阶段:台车进场后,先行在隧道外广场进行拼装,预计拼装可3~5 d完成。待拼装完成后,需中断交通1 d左右,以便台车行走至隧道。

智能施工台车转运行走实景见图24。



图24 平台转运行走图

第三阶段:台车行走到位后,车辆可从台车中间位置通行,用3 d时间将拱顶锚杆全部施工完毕,然后进行二次衬砌脱空灌浆、钢丝绳网片+钢带、碳纤维布粘贴等作业。此项工作计划总计约20 d完成。

智能施工台车施工作业实景见图25。



图25 平台施工作业图

5 结 语

本文依托甬台温高速公路宁波段麻岙岭隧道养护维修工程,成功应用一种智能施工台车。相对于传统养护维修施工措施,智能施工台车极大减小对隧道运营时间以及空间的影响,同时可以保障在不中断交通条件下的隧道大断面施工作业。本工程的实际应用表明该智能台车在隧道维修加固领域的可行性,为类似隧道病害治理提供了重要的参考价值。

参考文献:

- [1] Peng W P, Huang Y T, Wang D M. Finite Element Analysis of Universal-Rod Steel-Shuttering Jumbo for Tunnel Lining[J]. Applied Mechanics and Materials, 2011(71): 3443-3447.
- [2] Victores J G, Martínez S, Jardón A, et al. Robot-aided tunnel inspection and maintenance system by vision and proximity sensor integration[J]. Automation in Construction, 2011, 20(5): 629-636.
- [3] 姚新宇. 地铁检修高空作业平台设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
- [4] 汪成兵, 李雪峰, 王华牢, 等. 不中断交通情况下的移动组装式隧道加固防护操作平台: CN201620114740.2[P].
- [5] 叶鹏飞, 毛国辉, 梁国卿, 等. 不中断交通的波纹钢板加固隧道坍塌衬砌方案[J]. 有色冶金设计与研究, 2022, 43(5): 44-49.