

隧道防水板挂布台车机器人设计及应用

程波², 乌伟², 贾家银¹, 刘绿友¹, 邓传伟¹, 谢辉³, 何国田^{2,3}, 赵炜^{3*}

1. 重庆巨能建设集团有限公司, 重庆 400700

2. 西京学院, 陕西 西安 710123

3. 重庆鲁班机器人技术研究所有限公司, 重庆 400700

DOI:10.61369/ME.2026070027

摘 要 : 针对隧道防水板人工铺挂劳动强度大、安全风险高、质量不稳定等问题, 研发集行走、放卷、铺挂与压贴于一体的挂布台车机器人。该设备采用门型框架与弧形轨道结构, 配置液压驱动与遥控系统, 通过机械臂沿隧道断面环向运动实现机械化铺挂。应用表明, 作业人员由6至8人减至2至3人, 效率提升约40%, 密封度与合格率显著提高, 为隧道防水施工机械化提供支撑。

关 键 词 : 隧道工程; 防水板; 挂布台车; 机器人; 机械化施工

Design and Application of Tunnel Waterproof Board Hanging Cloth Trolley Robot

Cheng Bo², Wu Wei², Jia Jiayin¹, Liu Lvyu¹, Deng Chuanwei¹, Xie Hui³, He Guotian^{2,3}, Zhao Wei^{3*}

1. Chongqing Juneng Construction Group Co., Ltd., Chongqing 400700

2. Xijing University, Xi'an, Shaanxi 710123

3. Chongqing Luban Robot Technology Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400700

Abstract : In response to the problems of high labor intensity, high safety risks, and unstable quality in manual laying and hanging of tunnel waterproof boards, a hanging trolley robot integrating walking, unwinding, laying, and pressing has been developed. The equipment adopts a portal frame and curved track structure, equipped with hydraulic drive and remote control system, and achieves mechanized laying and hanging through the circular movement of the mechanical arm along the tunnel section. The application shows that the number of operators has been reduced from 6 to 8 to 2 to 3, with an efficiency increase of about 40%. The density and qualification rate have been significantly improved, providing support for the mechanization of tunnel waterproofing construction.

Keywords : tunnel engineering; waterproof board; hanging cloth trolley; robot; mechanized construction

前言

隧道防水工程是衬砌耐久性与运营安全的关键保障, 防水板铺挂质量直接决定渗漏水控制效果。长期以来, 国内隧道防水板铺设多依赖人工登高作业, 人员在简易台架上手持卷材沿拱部展开并热熔垫圈固定, 作业面狭窄、高空坠落风险突出, 受操作水平影响, 张紧不均、搭接偏差过大等通病难以根除。随着建设规模扩大, 工期压缩与品质工程标准提升对铺挂效率和质量提出更高要求, 传统人工作业已难以适应现代化施工需要。研发自主行走与自动铺挂的挂布台车机器人, 对降低安全风险、提高质量、推进机械化转型具有重要价值。

一、隧道防水板挂布台车机器人现实需求分析

(一) 传统人工铺挂工艺的安全与质量困境

隧道防水板铺挂处于初期支护与二次衬砌间狭小弧形环向空间, 作业面随掘进持续前移, 传统人工铺挂工艺存在诸多短板^[1]。作业组织上, 单循环需6-8人配合作业, 人员分散于不同作业平台, 协调难度大, 交叉作业风险高^[2]。简易拼装台架稳定性差,

通讯作者: 赵炜。

加之隧道作业环境恶劣, 高空坠落隐患突出。质量方面, 人工把控张紧度易造成卷材变薄或脱空, 焊缝、固定点施工偏差隐患隐蔽, 浇筑后难以检测修复, 是隧道渗漏水重要诱因。

(二) 隧道施工机械化转型的政策与市场驱动

近年来国内建筑行业劳动力结构发生深刻变化, 愿意从事隧道高空高危作业的技术工人数量逐年减少, 人工成本持续上升, 施工企业普遍面临用工短缺与成本压力的双重挑战。与此同时,

国家交通运输部与国家铁路集团相继出台隧道施工机械化、智能化发展指导意见,明确提出要在隧道衬砌防水环节推广自动化铺挂设备,减少高危岗位人工投入,提升防水层施工质量稳定性。在品质工程创建活动推动下,各建设单位对防水板铺设的密贴度、搭接宽度、固定点间距等指标提出了量化验收标准,人工操作的离散性难以满足精细化质量管控要求。从施工生产效率来看,人工铺挂单循环作业时间通常为3至4小时,且受人员体力持续衰减影响,后半程作业速度明显下降、质量波动增大,在长大隧道快速施工组织中往往成为制约衬砌循环进度的关键瓶颈^[3]。此外,现有简易台架多为单个项目定制加工,转场适应性差,设备周转率低,造成材料与人工的重复投入^[4]。综合施工安全保障、工程质量控制、生产效率提升与行业技术发展趋势等多方面因素,传统人工铺挂工艺已无法满足现代隧道工程建设的高标准要求,研发和应用集机械行走、自动放卷、环向铺挂与压贴固定于一体的防水板挂布台车机器人,成为隧道防水施工技术升级的必然选择和迫切需求。

二、隧道防水板挂布台车机器人的设计

(一) 整机结构与行走系统设计

防水板挂布台车机器人采用门型框架主体结构,门架由两根立柱与顶部横梁焊接而成,立柱采用H型钢截面以保证抗弯刚度,门架主材单线隧道采用200×200H型钢,双线隧道采用350×350H型钢或以上规格,以满足不同跨度下的强度与刚度要求,横梁根据隧道净空尺寸设计为可伸缩形式以适应不同断面宽度。门架底部设置行走系统,提供轨行式与轮胎式两种方案:轨行式方案配置4对钢轮,其中2对为主动轮由行走电机驱动,运行速度约6.7米每分钟,牵引力可达39千牛,适用于已铺设轨道的标准化隧道施工;轮胎式方案采用液压马达驱动橡胶轮胎,无需预设轨道,转场灵活性更高,适用于多工作面交替作业的隧道项目。门架纵向长度根据防水板单幅宽度设计为6至10米,确保一次铺挂循环覆盖标准卷材幅宽。门架两侧设置弧形轨道,轨道沿隧道断面轮廓布置,距初期支护面预留约300毫米操作间隙,为铺挂机械臂提供环向运动导向。整机配置4个液压支腿,施工状态下支腿伸出撑紧地面以提高整机稳定性,行走状态下支腿收回。门架中部预留不小于3米宽、4.2米高的通行净空,满足隧道内出渣车辆与混凝土罐车的通行需求,实现铺挂作业与洞内运输的并行组织。整机实物如图1所示。



图1 防水板挂布台车机器人整机结构

(二) 环向铺挂机械臂与放卷机构设计

环向铺挂机械臂是实现防水板自动铺挂的核心执行机构,由基座、大臂、小臂与末端铺挂头组成,整体安装于门架顶部的弧形轨道滑车上。大臂与小臂均采用液压油缸驱动的铰接式结构,大臂回转角度覆盖0至180度,小臂伸缩行程为1300毫米,可适应不同隧道半径的拱部轮廓。末端铺挂头集成放卷芯轴、压辊与热熔焊接辅助装置,放卷芯轴用于安装防水板卷材,芯轴配备张力制动器以控制卷材释放速度,防止铺挂过程中卷材松弛下垂;压辊采用圆柱形橡胶辊,在弹簧力作用下将防水板压贴于初期支护面,针对初支表面凹凸不平的工况,部分机型设置圆柱形气囊压紧装置,通过充气气囊使防水板服贴于不规则工作面,适应不同地质条件下的支护表面状态^[5]。铺挂机械臂沿弧形轨道由一侧拱脚经拱顶运动至另一侧拱脚,运动过程中放卷机构同步释放防水板,压辊将卷材连续压贴于岩壁,施工人员跟随机械臂以气动铆钉枪将热熔垫圈固定于初支面,完成单幅防水板的环向铺挂^[6]。机械臂末端配备距离传感器,实时检测铺挂头与岩壁的间距,通过闭环控制保持压贴力恒定,避免防水板局部过张拉或脱空,确保铺设质量的均匀性与稳定性。

(三) 液压驱动与遥控控制系统设计

液压系统为台车机器人的行走、支腿、机械臂运动与铺挂压贴提供动力,主泵站采用5.5千瓦液压电机驱动,系统额定工作压力为16兆帕,配置多路换向阀分别控制各执行元件动作。升降油缸工作行程为600毫米,运行速度不超过10毫米每秒,用于门架整体高度微调;伸缩平台油缸工作行程为1700毫米,运行速度不超过30毫米每秒,用于作业平台的侧向伸展。液压系统设置过载保护与液压锁回路,在管路破裂或泵站停机时可锁定执行元件位置,防止机械臂意外下落造成安全事故。控制系统采用可编程逻辑控制器为主控单元,配置无线遥控手柄,操作人员可在地面安全区域遥控台车行走、机械臂环向运动与铺挂作业,无需登高操作^[7]。遥控系统设置急停按钮、过载限位与限载保护功能,当机械臂运动至极限位置或负载超过额定值时自动停机并发出声光报警^[8]。部分智能化机型搭载工业相机与机器视觉模块,采集隧道内防水板铺挂区域图像,经透视变换获取正射视角作业图像,通过高斯模糊、对比度增强与亮度归一化等预处理后,基于局部信息熵构建方向性熵梯度场识别铺挂路径边界,实现铺挂轨迹的自动规划与偏差修正,进一步提升铺挂精度与自动化水平,减少人工干预环节。

(四) 机器人打钉系统设计及打钉算法

机器人打钉系统由1号、2号机械臂及气动打钉枪组成,机械臂安装于台车弧形轨道,可沿隧道断面环向运动并旋转180°切换作业方向。打钉算法采用双臂协同分区模式:1号臂从弧面左下角起始,2号臂从同一水平线中间起始,两臂沿横向同步推进,横向间距与纵向间距可根据设计要求参数化设定,逐行完成整个弧面打钉。顺时针区段完成后人工切断布料,台车前移7米,伸缩臂逆时针铺布,机械臂旋转180°从右下角起始重复上述流程。若伸缩臂装载两种材料,1号臂专司打钉、2号臂专司热铆,台车每次前移3.5米即可连续作业。机械臂打钉-热铆运动示意图见图2。



图2机械臂打钉-热铆运动示意图

(五) 机器人热融焊接系统及工艺

机器人热融焊接系统由机械臂末端热铆焊枪、CCD 视觉定位模块及控制软件组成。热铆工艺采用视觉引导定位：台车后退7米与挂布端重合，人工挂设首段防水板后，1号机械臂 CCD 相机对钉位拍照，软件根据图像信息解算机械臂作业坐标，指令焊枪从左下角起始热铆，2号臂从同一水平线中间起始，两臂沿弧面环向同步推进，逐行完成整幅热铆。顺时针区段完成后人工切断，台车前移7米，伸缩臂逆时针铺板，机械臂旋转180°从右下角起始，重复热铆循环。双材料工艺下2号臂专司热铆，与1号臂打钉同步作业，台车每次前移3.5米，实现打钉与热铆并行施工。

三、隧道防水板挂布台车机器人的应用

(一) 工程应用

在某隧道施工中，FSB-6.7型防水板机械化铺挂台车完成安装调试并投入使用，该设备设有无线遥控装置，具备过载限位与限载安全保护功能，配置扭力弹簧和伸缩摆臂扶贴装置，使防水板自动密贴于隧道壁面，便于后续焊接施工开展。在某高速公路№5标隧道施工中，液压自行式挂布台车替代传统需装载机牵引的笨重台架，通过行走电机实现自行移动，移动过程中左右侧同步，施工时台车可进行液压锁定，人员与设备安全得到有效保障；作业时通过手柄控制液压油缸伸缩调节台车高度，将土工布及防水板顶伸至离工作面较近处再进行固定，显著降低了作业人员劳动强度。在某隧道建设中，防水板自动铺挂台车的投入使用不仅减少了施工人员数量，有效降低了施工人员受伤风险，还可对隧道建设的精度与质量进行实时监控和调整。此外，某隧道应用的多功能钢筋防水板台车将防水板铺挂与衬砌钢筋布设两道工序深度融合，机械臂可自由旋转伸缩适应不同隧道断面，仅需5人即可完成以往需8至10人的作业量，设备可重复利用于多个隧道项目，减少了资源浪费。智能二衬钢筋防水板一体化台车也在某公司完成试机，以集成化、智能化、标准化为核心定位，打破传

统施工工序壁垒，实现钢筋定位绑扎与防水板铺设同步作业。

(二) 应用效能与技术经济分析

从实际应用效果来看，防水板挂布台车机器人在施工安全、工程质量与生产效率三个维度均表现出显著优势。安全方面，作业人员无需攀爬至拱部高空作业面，主要在地面或低矮平台进行遥控操作与辅助固定，高空坠落风险大幅降低，台车液压锁定与支腿支撑结构也消除了传统台架倾覆的隐患，作业环境本质安全水平得到提升^[9]。质量方面，机械臂沿弧形轨道匀速环向运动，放卷张力与压贴力由液压系统恒定控制，防水板张紧度均匀一致，与初支面密贴度明显提高，搭接宽度偏差可控制在5毫米以内，热熔垫圈固定点间距均匀可控，焊接合格率由人工铺挂的约85%提升至95%以上，有效减少了后期渗漏水缺陷。效率方面，单循环铺挂作业时间由人工的3至4小时缩短至1.5至2小时，作业人员由6至8人减少至2至3人，综合施工效率提升约40%，在长大隧道快速施工中有效缓解了衬砌循环进度瓶颈。经济性方面，虽然台车设备一次性购置成本较高，但可周转使用于多个隧道项目，按设备全寿命周期摊销，结合人工成本节约与后期渗漏水缺陷修复费用降低，综合施工成本可降低约15%至20%^[10]。在环境效益方面，机械化铺挂减少了因质量缺陷导致的后期注浆堵漏材料消耗，降低了隧道全寿命周期的维护投入。该设备的推广应用为隧道防水施工从劳动密集型向技术密集型转变提供了成熟的装备方案，对推动隧道智能建造发展具有积极意义。

结语：防水板挂布台车机器人针对人工铺挂安全风险高、质量稳定性差、生产效率低等问题，通过门型框架、环向铺挂机械臂、液压驱动与无线遥控的集成设计，实现了铺挂作业的机械化与半自动化。工程实践表明，该设备有效减少了高空作业人员，降低了安全事故发生率，提高了防水板密贴度与搭接质量，缩短了单循环作业时间，具有良好的技术经济效益与推广价值。未来随着机器视觉与智能焊接技术融合，该设备将向全自动化方向发展，为隧道智能建造提供装备支撑。

参考文献

- [1] 薛彩云. 四川仿生四足机器人穿梭隧道工地 [N]. 中国交通报, 2026-06-25(005).
- [2] 蔡为益, 李晓升, 戴筱流, 袁晓洪. 新质生产力下智慧监理实践: 隧道量测机器人实证研究 [J]. 建设监理, 2026, (6): 152-156.
- [3] 陈尧, 李莹, 张磊, 靳彦彪, 唐汉琦. 隧道环境下基于 RFID 定位的智能巡检机器人路径规划研究 [J]. 公路, 2026, 71(6): 322-329.
- [4] 夏子贤. 隧道电缆缺陷巡检机器人设计与实现 [D]. 安徽理工大学, 2026.
- [5] 李建琪. 基于多传感器融合的隧道巡检机器人定位方法 [J]. 自动化应用, 2026, 67(10): 118-121.
- [6] 刘云锴, 赵隼, 张志鹏, 邵学君. 隧道开挖面安全智能监测预警机器人研发与应用 [J]. 中国铁路, 2026, (4): 60-67.
- [7] 刘继文. 轨道式智能机器人在薛公岭隧道安全监控中的应用 [J]. 交通世界, 2026, (10): 13-15.
- [8] 杨志勇, 李丹雄, 张旭波, 万里, 龙海舟, 张君杰, 蔡艺远, 宋均平, 吴桐. 高速公路隧道巡检机器人应用与管理 [J]. 交通企业管理, 2026, 41(2): 72-75.
- [9] 赵祥峰. 面向高风险封闭空间的隧道消防机器人喷头结构优化设计 [J]. 机械管理开发, 2026, 41(2): 191-193.
- [10] 唐建宏, 康海波. 自行式自动卷铺防水板挂布台车在隧道施工中的运用 [J]. 建筑技术开发, 2018, 45(2): 55-57.