

厦金大桥预制墩台后浇孔采用机器人 凿毛的工艺适配性研究及应用

贾会杰^{1,2}, 袁方龙^{1,2*}, 马振龙^{1,2}, 陈立^{1,2}, 李泽^{1,2}

(1. 中交一航局第五工程有限公司, 河北 秦皇岛 066002; 2. 中交第一航务工程局有限公司, 天津 300461)

摘要: 针对超大尺寸预制墩台后浇孔凿毛作业中人工凿毛质量不均、效率低下、安全风险高等难题, 依托厦金大桥墩台预制工程, 开展凿毛机器人的适配性优化与应用研究。通过分体式结构设计、复合式凿毛工艺集成、智能定位与路径规划、人机协同与智能预警等核心技术, 实现了凿毛作业的安全、高效、精准与绿色化。样机试验与工程应用结果表明: 该机器人能够适应潮湿基面、复杂孔形及多变的作业环境, 在-10~50℃、湿度90%以下条件下稳定运行; 单机日均凿毛面积积达150~200 m², 为人工凿毛的8~10倍; 凿毛深度误差控制在±1 mm以内, 单孔凿毛覆盖率达98%以上, 凿深均匀性有效提升; 混凝土浇筑合格率由85%提升至98%以上, 新旧混凝土黏结强度提升40%。该机器人有效解决了受限空间、复杂工况下墩台后浇孔凿毛的适应性难题, 为装配式桥梁下部结构自动化施工提供了可靠技术支撑。

关键词: 墩台后浇孔; 凿毛机器人; 适配性研究; 优化设计

中图分类号: U6; U655; U445.4

文献标志码: B

文章编号: 2095-7874(2026)06-0104-06

doi: 10.7640/zggwjs202606015

Study and application of robotic scabbling process adaptability for post-pouring holes of prefabricated piers of Xiamen-Jinmen Bridge

JIA Hui-jie^{1,2}, YUAN Fang-long^{1,2*}, MA Zhen-long^{1,2}, CHEN Li^{1,2}, LI Ze^{1,2}

(1. No.5 Engineering Co., Ltd. of CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Qinhuangdao, Hebei 066002, China;

2. CCCC First Harbor Engineering Co., Ltd., Tianjin 300461, China)

Abstract: To address the challenges of uneven quality, low efficiency, and high safety risks in manual scabbling of post-pouring holes in ultra-large prefabricated piers, an adaptability optimization and application study of a scabbling robot was carried out based on the prefabrication project of the Xiamen-Jinmen Bridge piers and abutment. Through core technological breakthroughs such as a modular structure design, integration of composite scabbling processes, intelligent positioning and path planning systems, human-machine collaboration, and intelligent early warning, the safety, efficiency, accuracy, and environmental friendliness of scabbling operations were achieved. Prototype testing and engineering application results indicate that the robot can adapt to wet substrates, complex hole shapes, and variable working conditions, operating stably under temperatures ranging from -10 °C to 50 °C and humidity below 90%; the average daily roughened area per machine reaches 150 to 200 square meters, 8 to 10 times that of manual work; the scabbling depth error is controlled within ±1 mm, with single-hole scabbling coverage exceeding 98%, effectively improving the uniformity of troweling depth; the concrete pouring qualified rate has increased from 85% to over 98%, and the bonding strength between new and old concrete has increased by 40%. This robot effectively solves the adaptability problems in scabbling post-pouring holes of piers under constrained spaces and complex conditions, providing reliable technical support for automated construction of prefabricated bridge substructures.

Key words: post-pouring hole of pier and abutment; scabbling robot; adaptability research; optimized design

收稿日期: 2026-02-10 修回日期: 2026-03-25

基金项目: 天津市科技计划项目 (20JCJC00220)

作者简介: 贾会杰 (1981—), 男, 河北保定人, 高级工程师, 主要从事水运工程、公路桥梁工程施工管理及科研工作。

*通讯作者: 袁方龙, E-mail: 184353256@qq.com

0 引言

近年来,装配式桥梁^[1-2]与预制墩台^[3]施工技术在我国交通基础设施建设中得到广泛推广与应用,凭借工业化生产、现场快速拼装、质量稳定可控等优势,已成为现代桥梁工程绿色化、高效化发展的重要方向^[4-5]。大尺寸预制墩台作为装配式下部结构的核心构件,其现场拼接质量直接决定桥梁整体受力性能与耐久性,而后浇孔湿界面凿毛是实现新旧混凝土有效结合、保证界面抗剪、抗拉及整体工作性能的关键工序。

针对预制构件界面凿毛机械化、自动化需求,很多学者已开展凿毛装备与施工工艺研究,相继研发出手持凿毛机具、液压冲击式凿毛机、轨道式/移动式凿毛机器人等装备,在一定程度上提升了作业效率与质量稳定性^[6-7]。但针对大尺寸预制墩台后浇孔这一特殊作业场景,现有装备普遍存在适配性不足的突出问题:墩台截面形式多样、后浇孔位置与尺寸差异大、内部钢筋密集且操作空间受限,现有机器人难以适应多变的结构边界与施工工况,易出现干涉碰撞、凿毛盲区、粗糙度控制精度不足、行走定位偏差大等,导致设备通用性差、现场调试复杂、实际应用效果受限,缺乏成熟可靠、可规模化推广的适配性凿毛机器人系统^[8-9]。

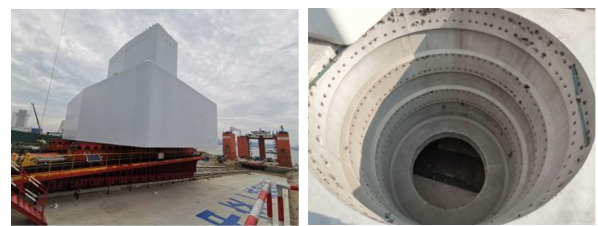
根据工程实际需求,大尺寸预制墩台后浇孔凿毛施工主要面临3方面挑战:1)安全风险高,传统人工凿毛需在高空狭窄空间内作业,坠落风险突出,且手持风镐作业产生大量粉尘,实测浓度常超 500 mg/m^3 ,高于规范限值(150 mg/m^3),对作业人员职业健康构成严重威胁;2)效率与质量控制难,人工凿毛日均面积仅 $15\sim 20\text{ m}^2$,深度误差达 $\pm 3\text{ mm}$,表面粗糙度差异大,导致新旧混凝土黏结质量不稳定,混凝土浇筑合格率仅85%左右;3)环境适应性差,现有设备难以在潮湿基面、复杂孔形及恶劣气候条件下保持稳定作业效果,制约了工程推进效率。

为此,依托厦金大桥跨海桥梁墩台预制施工项目,围绕凿毛机器人对复杂墩台结构、多变后浇孔工况的适配性不足问题,开展执行机构、运动姿态、作业路径及工艺参数的系统性优化研究,并通过样机试验与实际工程应用来验证优化效果。研究成果可有效提升凿毛机器人在预制墩台施工中的通用性、可靠性与作业质量,为装配式

桥梁^[10-11]下部结构自动化施工装备的推广应用提供技术支撑,对推动桥梁工业化建造向智能化、标准化、高效化发展具有重要工程价值与现实意义。

1 工程概况

厦金大桥(厦门段)全长约20 km,其中跨海装配式桥梁段8.5 km,采用工厂化预制、海上安装的施工模式。项目共需预制187个墩台构件,最大构件重量达3 236.46 t、高度26.95 m,创下全国装配式跨海大桥预制墩台之最。墩台预制厂占地 18.3 万 m^2 ,为全国最大的数智化跨海桥梁装配式墩台预制厂。首节预制墩台及内部后浇孔如图1所示。



(a) 首节预制墩台

(b) 内部后浇孔

图1 首节预制墩台及内部后浇孔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the first segment precast pier and internal post-pouring holes

1.1 墩台结构与后浇孔特征

预制墩台采用六边形非通航孔结构,标准墩台尺寸为长15.3 m、宽11.6 m、高4.5 m,单体质量约2 300 t。墩台首节设有6个后浇孔,沿墩身竖向轴线对称分布,位于墩台底部与桩基连接的核心受力区,用于现场拼装时穿筋、灌浆并与承台/盖梁连成整体。后浇孔与桩基、承台钢筋精准对位,孔内钢筋布置密集,孔壁表面存在浮浆、脱模剂残留及局部油污等污染物,且孔底常伴有潮湿积水,基面含水率较高。

1.2 凿毛作业环境条件

凿毛作业需在墩台预制场内完成,主要作业环境条件为:

1) 高空和临边作业。墩台最大高度13.4 m,后浇孔位于墩台底部区域,作业时需搭设操作平台与防护设施,属于高空作业,存在坠落风险。

2) 空间受限。孔内钢筋密集、操作空间狭窄,最小作业宽度不足1.2 m,对设备尺寸与机动性形成严格约束。

3) 作业环境恶劣。施工周期紧张,单孔凿毛需与前后工序紧密衔接;现场粉尘控制要求严格,

需满足绿色施工标准；孔壁潮湿、含油污等复杂工况对凿毛工艺的适应性提出较高要求。

上述工程条件对凿毛装备的尺寸适应性、作业效率、安全防护能力与环保性能提出了明确的技术要求，是凿毛机器人设计与优化的直接依据。

2 适配性研究

针对厦金大桥超大尺寸预制墩台后浇孔凿毛作业面临的复杂工况与严苛要求，亟需开展凿毛机器人适配性研究，重点解决传统装备在结构适应性、环境适应性、工艺适应性及安全适应性等方面的不足。本节从适配性需求分析入手，围绕作业空间受限、工况条件复杂、质量要求高、安全风险突出等关键问题，系统阐述凿毛机器人在结构设计、功能集成与控制策略等方面的适配性优化方案。

2.1 适配性需求分析

根据厦金大桥墩台预制工程的实际条件，凿毛机器人需满足以下适配性要求：

1) 结构适配性

后浇孔位于墩台底部核心受力区，孔内钢筋密集、操作空间狭窄，最小作业宽度不足 1.2 m，对设备的尺寸、机动性与拆装便捷性提出严格约束。机器人需具备小型化、模块化特征，便于在受限空间内吊装、组装与作业。

2) 环境适配性

凿毛作业环境复杂，孔壁表面存在浮浆、脱模剂残留及局部油污，孔底常伴有潮湿积水，基面含水率较高；同时，施工区域气候条件多变，要求设备在-10~50℃、湿度 90%以下环境中稳定运行。机器人需具备良好的环境适应能力与表面处理通用性。

3) 工艺适配性

后浇孔新旧混凝土界面黏结质量直接决定墩台整体受力性能，凿毛深度、均匀性及覆盖率需达到较高精度要求。传统人工凿毛深度误差达 ± 3 mm，粗糙度差异大，难以满足质量稳定性要求。机器人需实现精准化、均匀化凿毛，确保凿毛深度误差控制在 ± 1 mm 以内，单孔凿毛覆盖率达 98%以上。

4) 安全适配性

墩台最大高度 13.4 m，后浇孔作业属高空临边作业，传统人工凿毛存在坠落风险，且手持风镐作业产生大量粉尘，实测浓度常超 500 mg/m³，

远超规范限值。机器人需通过远程操控、自动作业与粉尘回收等方法，从源头规避安全风险与职业健康危害。

2.2 结构与功能实现的适配性优化

针对上述适配性需求，从结构形式、功能模块与控制策略 3 方面开展优化设计，使凿毛机器人能够适应复杂墩台结构、多变后浇孔工况及严苛作业环境。

2.2.1 分体式结构设计

针对后浇孔作业空间狭窄、设备运输与吊装困难的问题，凿毛机器人采用分体式结构设计，整机重量控制在 500 kg，可拆解为提升装置、支撑单元和凿毛模块 3 个独立部分，各模块重量均 ≤ 200 kg，便于通过起重机、吊篮等设备吊装至高空作业点或狭小作业空间内，再快速组装，组装时间 ≤ 30 min。

支撑单元采用可调节式设计，通过液压支腿与孔壁紧密贴合，形成稳定的作业平台，可适配不同孔径(3 500~4 500 mm)的后浇孔，确保凿毛机器人在作业过程中不发生偏移、晃动。提升装置具备自动升降功能，可根据孔深实时调整凿毛模块的作业高度，实现全孔深范围内的均匀凿毛，有效解决人工凿毛难以控制孔深方向及作业质量的问题。

2.2.2 复合式凿毛工艺集成

针对传统凿毛工艺粉尘污染严重、工艺适应性差的问题，凿毛机器人创新采用复合式凿毛工艺集成方案，实现了高效、清洁、通用的凿毛作业。

如图 2 所示，在凿毛工艺上，突破传统单一冲击模式，采用“机械冲击+旋转打磨”复合工艺。通过高速旋转的合金刷头进行精细化打磨，清除孔壁浮浆与污染物，同时配合高频机械冲击形成



图 2 凿毛机器人后浇孔作业示意图

Fig. 2 Schematic diagram of scabbling robot operating in post-pouring holes

均匀粗糙面;同步集成真空吸尘系统,在凿毛作业过程中实时回收废渣与粉尘,实现“边凿毛、边清理”,使作业环境粉尘浓度降至 50 mg/m^3 以下,远低于国家标准限值,从源头有效控制粉尘污染问题。

在工艺适配性方面,采用模块化工具快换设计,支持冲击凿头、旋转刷头、砂纸盘等多种工具的快速切换,换刀时间 $<3\text{ min}$ 。不同工具可适配C20—C80不同强度等级的混凝土,以及干结砂浆、脱模剂、油污等多种残留类型,有效打破传统设备“一机一用”的局限,大幅提升了设备的通用性与适用范围。

2.2.3 智能定位与路径规划系统

针对传统人工凿毛定位不准、路径无序导致的质量不均问题,机器人创新集成了智能定位与路径规划^[12]系统,实现了凿毛作业的精准化控制。

如图3所示,在三维感知方面,采用激光雷达与视觉传感器融合的3D扫描建模技术,能够快速获取后浇孔的孔深、孔径、孔形及内壁缺陷(如裂缝、浮浆厚度)等关键参数,构建高精度三维数字模型,建模误差 $\leq 0.1\text{ mm}$,为路径规划提供精准的数据支撑。

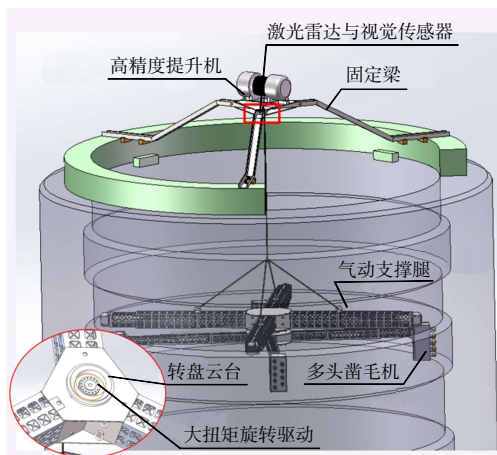


图3 后浇孔凿毛机器人定位构件及作业路径示意图

Fig. 3 Schematic diagram of positioning components and operation path of the post-pouring hole scabbling robot

2.2.4 人机协同与智能预警系统

针对高空作业风险高、人工干预不便的问题,凿毛机器人构建了完善的人机协同与智能预警^[13]系统,实现了安全高效的作业模式。

在操控模式上,支持“预设程序自主运行+5G

远程操控”双模式作业。对于标准孔形的批量作业,可通过预设参数实现凿毛机器人自主运行,无需人工干预;对于复杂工况或突发情况,操作人员可通过5G网络连接凿毛机器人,借助VR眼镜实时查看孔内作业画面,远程调整凿毛角度、深度、速度等参数,或直接干预作业流程,实现“人在地面、机在高空”的安全作业模式^[14],显著降低高空坠落风险。

在安全预警方面,集成振动传感器、电流监测模块、温度传感器等多个监测单元,实时监测凿头运行状态、电机负载、设备温度等关键参数。当检测到凿头卡阻、电机过载时,系统自动停机并发出声光报警,避免设备损坏;当检测到作业区域温度、湿度超出设备适应范围时,及时提醒操作人员调整作业方案;当支撑单元贴合不牢固时,禁止设备启动,确保作业过程的安全性与稳定性。

通过上述结构设计与功能实现的适配性优化,凿毛机器人全面构建了“智能化感知—精准化执行—协同化控制—安全化保障”的技术架构,有效解决了传统装备在受限空间、复杂工况、严苛质量要求与高空作业安全等方面的适配性不足,为后续现场应用奠定了技术基础。

3 应用及效果

3.1 应用背景

凿毛机器人已在厦金大桥(厦门段)墩台预制项目中成功应用。本项目跨海装配式桥梁段长 8.5 km ,共预制墩台187件,单件墩台首节设有6个同尺寸后浇孔,根据墩台尺寸不同,后浇孔设计尺寸分3种($\phi 3\ 600\text{ mm} \times 4\ 500\text{ mm}$ 、 $\phi 3\ 600\text{ mm} \times 5\ 000\text{ mm}$ 、 $\phi 4\ 100\text{ mm} \times 5\ 400\text{ mm}$),项目投入凿毛机器人1台,单台作业时间 8 h/d ,搭配1台排气量 $10\text{ m}^3/\text{min}$ 、压力 0.8 MPa 空压机作业。该凿毛机器人主要承担大型装配式预制墩台凿毛任务,对凿毛作业的质量、效率和安全性要求较高。

3.2 适配性指标实现

1) 凿毛机器人的分体式设计使其在最小作业宽度不足 1.2 m 的后浇孔内实现了快速组装($\leq 30\text{ min}$),支撑单元稳定适配 $3\ 500\sim 4\ 500\text{ mm}$ 孔径范围,作业过程中未发生设备偏移或晃动,有效满足了受限空间作业要求。

2) 凿毛机器人在 $-10\sim 50\text{ }^\circ\text{C}$ 、湿度 90% 以下环境中稳定运行,可直接在带油污、浮浆及潮湿

积水的孔壁基面上作业。针对椭圆孔、带肋孔等复杂孔形，通过智能路径规划实现一次性凿毛，复杂孔形作业效率较人工提升60%以上。

3) 凿毛机器人凿毛深度误差控制在±1 mm以内，表面粗糙度 $Ra \leq 3.2 \mu m$ ，单孔凿毛覆盖率达98%以上。采用机器人凿毛后，凿毛深度合格率由人工凿毛的约85%提升至98%以上，新旧混凝土黏结强度提升40%。

4) 凿毛机器人通过分体式吊装与5G远程操控，实现了“人在地面、机在高空”的作业模式，项目应用期间未发生高空安全事故。真空吸尘系统使作业环境粉尘浓度从 500 mg/m^3 降至 50 mg/m^3 以下，职业病发生风险降低90%以上。

3.3 综合效益

如表1所示，在适配性指标全面实现的基础上，凿毛机器人作业效率显著提升：单机日均凿毛面积 $150 \sim 200 \text{ m}^2$ ，是人工凿毛的8~10倍，单孔作业时间由10 h缩短至1 h，本项目400余个后浇孔累计缩短工期40%。经济性方面，单台机器人初期投资20万~30万元，通过减少人力投入、缩短工期与降低维护成本，6~12个月可收回投资，年节约人工成本超80万元。

表1 机器人凿毛与传统人工凿毛性能对比

Table 1 Performance comparison between robot scabbling and traditional manual scabbling

指标	人工凿毛	机器人凿毛
凿毛效率/($\text{m}^2 \cdot \text{d}^{-1}$)	15~20	150~200
后浇孔单孔凿毛用时/h	10	1
安全风险/职业病发生概率/%	1.0	0.1
凿毛深度合格率/%	85.0	98.5
操作人员配置/人	2	1

4 结语

1) 针对后浇孔等典型受限空间作业场景，将凿毛机器人设计为可独立吊装、快速组装的模块化单元，各模块重量控制在200 kg以内，可在不足1.2 m的作业宽度内实现≤30 min的快速部署。该设计思路突破了传统一体化设备“进不去、搬不动、调不了”的工程瓶颈，为桥梁、隧道、高层建筑等狭窄空间自动化施工装备的研发提供了可复用的结构设计范式。

2) 通过“机械冲击+旋转打磨”复合工艺，结合模块化工具快换设计，实现了对不同强度等级

混凝土及多种表面污染物的通用化处理；同步集成真空吸尘系统，使作业粉尘浓度从 500 mg/m^3 降至 50 mg/m^3 以下。在此基础上，融合激光雷达与视觉传感器的三维建模技术，实现了高精度孔内结构感知与±1 mm凿毛深度误差控制。上述“工艺-感知”协同设计，有效解决了传统设备“一机一用”、环境适应性差的突出问题，为复杂工况下自动化装备的工艺通用性与环境鲁棒性设计提供了技术参考。

3) 通过“预设程序自主运行+5G远程操控”双模式作业，配合VR实时画面交互，实现了“人在地面、机在高空”的作业模式，将高空坠落等重大安全风险从源头隔离；同时建立多源传感融合的实时预警与自保护机制，在设备异常、环境超限或支撑失效等工况下实现自动停机与声光报警。该安全设计理念对高空、临边、密闭空间等高危作业场景的装备研发具有普遍借鉴意义。

4) 以厦金大桥墩台工程的实际作业条件为依据，逐项开展结构适配、工况适配、工艺适配与安全适配分析，并据此进行针对性设计与现场验证，最终实现单机日均凿毛面积 $150 \sim 200 \text{ m}^2$ 、混凝土浇筑合格率从85%提升至98%以上的应用效果。该研发路径表明，重大工程场景下的装备创新须以实际工况为起点，将适配性作为核心设计维度，方能实现装备性能与工程需求的有效匹配。

综上，全自动后浇孔凿毛机器人在厦金大桥的成功应用，不仅验证了其在安全、质量、效率及环保等方面的显著优势，更重要的是通过模块化结构设计、复合工艺集成、多源感知控制与人机协同安全机制等系统性创新，形成了面向复杂工程场景的凿毛作业成套技术方案。后续可围绕不同类型预制构件、不同结构形式后浇孔及湿接缝开展系列化装备研发，进一步完善相关设计标准与施工工法，推动该技术成果在跨海桥梁、城市高架、装配式建筑等领域的规模化推广，为交通基础设施建造向智能化、绿色化转型提供装备支撑。

参考文献：

[1] 战家旺, 阳云明, 许鑫祥, 等. 公路装配式简支梁桥支座状态在线评估方法[J/OL]. 中国公路学报, 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20251204.0934.006>.
ZHAN Jia-wang, YANG Yun-ming, XU Xin-xiang, et al. Online assessment method for working condition of bearings in highway prefabricated simply-supported girder bridges[J/OL]. China Journal

- of Highway and Transport, 1-19. <https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20251204.0934.006>.
- [2] 吴锦伟,何炳泉,黄知元. 双拱肋中承式拱桥双机抬吊施工技术[J]. 广东土木与建筑, 2015, 22(8): 46-48.
WU Jin-wei, HE Bing-quan, HUANG Zhi-yuan. Construction technology of double crane lifting for half-through arch bridge with double arch rib[J]. Guangdong Architecture Civil Engineering, 2015, 22(8): 46-48.
- [3] 林路宇. 跨海桥梁装配式墩台预制场设计及应用[J]. 公路, 2022, 67(11): 262-267.
LIN Lu-yu. Design and application of precast yard for assembled piers of cross-sea bridges[J]. Highway, 2022, 67(11): 262-267.
- [4] 严杰,于国军,杜成斌,等. 桩柱式桥墩的墩柱直径对船-桥撞击力影响的模型研究[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(11): 9-15.
YAN Jie, YU Guo-jun, DU Cheng-bin, et al. Model study on the impact of pier diameter in pile-column bridge piers on ship-bridge collision force[J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(11): 9-15.
- [5] 刘益锋,许骏,郝聂冰,等. 厦金大桥沉井基底换填不散混凝土施工技术研究及应用[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(8): 97-102.
LIU Yi-feng, XU Jun, HAO Nie-bing, et al. Research and application of non-dispersible concrete construction technology for replacing the caisson foundation of Xiajin Bridge[J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(8): 97-102.
- [6] 张菊辉,盘奕彤,云辉. 新老混凝土结合面的黏结性能试验研究[J]. 混凝土, 2025(8): 90-95, 103.
ZHANG Ju-hui, PAN Yi-tong, YUN Hui. Experimental study of bonding properties on old and new concrete interface[J]. Concrete, 2025(8): 90-95, 103.
- [7] 王昊,徐军,崔冰. 狮子洋大桥锚碇及基础设计方案研究[J]. 公路, 2026, 71(2): 160-166.
WANG Hao, XU Jun, CUI Bing. Study on design scheme of anchorage and foundation for Shiziyang Bridge[J]. Highway, 2026, 71(2): 160-166.
- [8] 王金宝. 预制空心板腹板凿毛机器人施工技术[J]. 工程建设, 2024, 56(5): 59-62.
WANG Jin-bao. Construction technology of scabbling robot for prefabricated hollow slab sternum[J]. Engineering Construction, 2024, 56(5): 59-62.
- [9] 魏俊能,谭延军. 机器人在桥隧加固工程中大显身手[J]. 交通世界(建养·机械), 2010(12): 118-120.
WEI Jun-neng, TAN Yan-jun. Robots have demonstrated outstanding performance in bridge and tunnel reinforcement engineering[J]. TranspoWorld, 2010(12): 118-120.
- [10] 宁华宇,史虎彬,刘军其,等. 跨海桥梁基础多因素影响下的波浪耦合试验及工程应用研究[J]. 中国港湾建设, 2025, 45(1): 8-15.
NING Hua-yu, SHI Hu-bin, LIU Jun-qi, et al. Research on wave current coupling test and engineering application of cross sea bridge foundation under the influence of multiple factors[J]. China Harbour Engineering, 2025, 45(1): 8-15.
- [11] 王欣,薄睿彦,徐昊,等. MRPC-NC 界面黏结性能的斜剪试验研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2026(2): 6-10.
WANG Xin, BO Rui-yan, XU Hao, et al. Oblique shear test study of the bonding performance of MRPC-NC interface[J]. China Concrete and Cement Products, 2026(2): 6-10.
- [12] 韩晓龙. 集装箱港口龙门吊的最优路径问题[J]. 上海海事大学学报, 2005, 26(2): 39-41.
HAN Xiao-long. Routing problem of transfer crane at container terminals[J]. Journal of Shanghai Maritime University, 2005, 26(2): 39-41.
- [13] 雷尚彬,刘良志,程林,等. 多传感器信息融合技术在防波堤状态检测中的应用[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(3): 1-5.
LEI Shang-bin, LIU Liang-zhi, CHENG Lin, et al. Application of multi-sensor information fusion technology in breakwater detection[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(3): 1-5.
- [14] 刘振纲. 基于运动补偿的工业机器人取放轨迹控制方法[J]. 自动化应用, 2024, 65(11): 61-63.
LIU Zhen-gang. Control method for picking and discharging track of industrial robots based on motion compensation[J]. Automation Application, 2024, 65(11): 61-63.



欢 迎 订 阅