

基于“DeepSeek-盘古”管片厂收面机器人的优化与研究

韩振起

(中交一航局城市交通工程有限公司)

摘要: 针对传统管片收面机器人系统存在的路径规划难、质量参数检测缺失、混凝土材料-机器人控制强耦合等痛点,基于天津地铁管片厂实际场景,提出一种融合 DeepSeek 与盘古工业大模型的双模型协同优化方法。通过构建“材料感知-决策优化-质量自检-数据分析”闭环控制架构,实现混凝土凝结状态与机器人运动的动态匹配,此研究突破静态作业模式,并且通过盘古材料模型动态感知混凝土凝结状态,实现“时变材料-自适应控制”,仿真试验表明,实现收面机器人作业效率提升 66.7%,能耗降低 35.6%,首次实现建筑材料特性与机器人控制的跨模型协同优化,为基建数智化提供可复用的 AI 融合范式。

关键词: 双模型;多模态;数字化;管片生产

0 引言

目前全球地铁建设需求日益增长,而我国作为全球地铁建设的主力,轨道交通总里程约占全球的 27.42%,并正持续扩张。地铁建设对管片的需求量保持极高的比例,占到整个管片市场需求量的 80%以上。而针对管片在生产过程中收面工艺的高度重复性动作,市面上开始出现关于管片收面机器人替代人工收面工艺,随着技术的发展,行业标准的提供等因素,传统收面机器人存在进一步发展的空间。

传统机器人无法自动检测表面质量相关数据,会导致质量波动。因无法检测环境、质量等相关参数,也就无法实现自动调节。为适应环境、材料等因素,每天需要 2 名相关工作人员自主判断是否需要进行机器参数的调节,具有一定的主观性和风险性。

针对盾构管片生产现场记录和质量检测记录等都停留在人为纸质抄写再整理成单一电子文档。此外,由于管片在生产堆放运输过程中存在信息获取、数据再录入、管片跟踪、交付延迟或错误等方面的问题,手动记录的数据不能系统化和结构化,不能有效管理和控制生产过程,导致劳动力和原材料成本的浪费。为解决管片收面效率低、数据不合理等问题,打造“智能化+信息化+数字化”智能机器人系统,解决此类问题^[1]。

此项研究主要以“管片智能收面机器人”展开,同时借助“DeepSeek-盘古”大模型的协同能力,自动检测管片表面缺陷,实现系统自动调整机器人作业参数,采用力-位混合控制技术,实时监测参数变化,并搭建数字孪生系统,采集云端数据,利用数据分析方法,进行数智化管理。

1 系统架构设计与优化

1.1 系统需求分析

本文采用“理论优化→仿真验证→未来实际应用”的递进式研究路径,通过优化算法、机器学习等方法,不断完善理论研究,为未来的实际应用提供有力的理论支撑。技术线路(见图 1)主要分为以下阶段:

1) 数据采集与建模阶段:利用 3D 视觉感知,收集管片表面点云数据,检测管片表面缺陷问题。并建立管片数字孪生模型,用于仿真测试。双模型智能决策阶段,利用 PPO 大模型算法,自主完成缺陷检测与路径规划策略。

2) 仿真试验与测试阶段:在 MATLAB(matrix & laboratory)软件中搭建机器人仿真环境,验证算法在虚拟场景中的可行性。将传统收面机器人系统数据与本文仿真系统数据进行分析对比,从而得出结论。

3) 数智化系统集成阶段:开发云端管理平台,支持远程监控与数据分析。

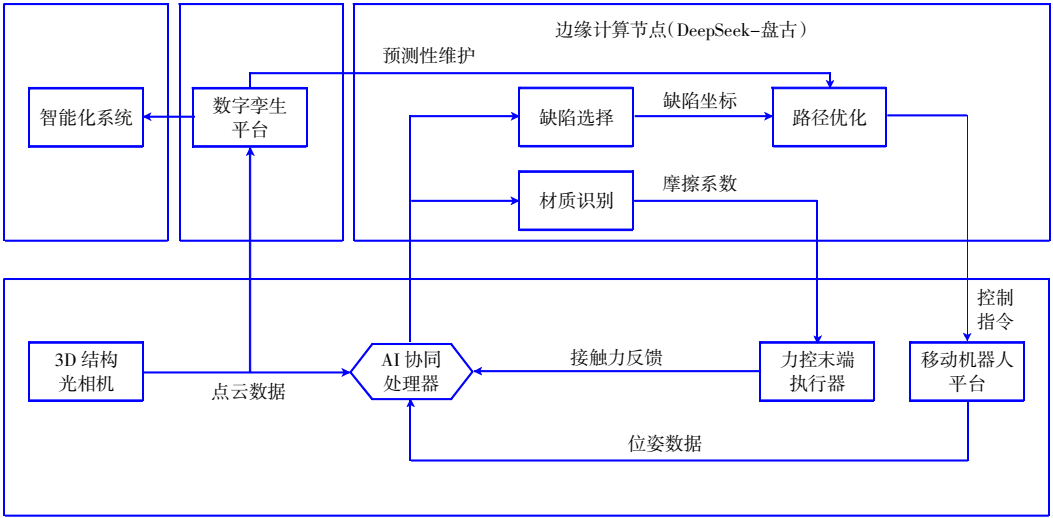


图 1 技术线路图

系统需求主要由环境感知与数字建模、作业决策与路径规划、高精度执行控制、质量在线监测与反馈、数字化扩展组成。

环境感知与数字建模主要功能包括 3D 视觉扫描、多传感器数据融合、数字孪生建模。通过 3D 视觉扫描获取点云数据，结合多传感器融合技术，构建管片表面的数字孪生模型，该模型涵盖了管片表面精准参数，是系统后续实现路径规划、力控调节和质量检测评估的基础底座，确保机器人能够实时感知作业环境，并且做出自适应的决策。

作业决策与路径规划是基于“DeepSeek-盘古”双模型的工艺参数优化，收集并输入管片相关历史数据，如管片类型、作业环境温度、作业空间湿度、工具路径、压力、振动频率、最终表面粗糙度等。通过“DeepSeek-盘古”双模型，分析足够样本量的历史数据，并建立“工艺参数-表面质量”映射关系，最后输出最佳参数组合。

根据 PPO(Proximal Policy Optimization)算法，从状态空间(点云数据+力传感器数据+湿度数据)和动作空间(压实力+振动频率+路径速度)进行学习，参数变化与奖励函数结合，进行参数调整。在动态路径规划时，将 BIM(Building Information Modeling)的预制模型与实时收集的点云数据相结合，通过改进采样策略，采用“DeepSeek-RRT”优化算法，计算相关参数，实现多工具路径耦合优化，生成无碰撞作业轨迹。高精度执行控制根据基于关节扭矩传感器进行数据采样，并通过变阻

抗控制算法实现力-位混合控制。根据管片收面作业标准，执行精度为：定位 $\pm 0.5\text{ mm}$ ，力控 $\pm 1\text{ N}$ 。通过机电一体化设计，自动切末端执行器，支持复杂工艺序列。如在管片收面混凝土抹平阶段，末端执行器为抹刀，到边角强化阶段，末端执行器可自动切换压实轮处理接缝。质量在线检测与反馈基于环境感知建立的数字孪生模型，自动识别管片表面质量检测，如气泡、裂纹等，并通过振动反馈信号频域分析(FFT)评估压实质量，从而实现自助质检功能。

在以上过程完成以后，可进行数智化功能的扩展，利用点云数据和信息化方法，先做数据清洗、数据标准化，通过可视化平台实时映射机器人状态、工艺参数，并形成电子质量检测报告，通过定时任务发送至质检员和管理层，可作为管理层做决策的辅助内容。

1.2 基于“DeepSeek-盘古”的协同框架设计

DeepSeek 采用国产大模型底座与安全算法，还可以轻量化本地部署，在数据处理和管理方面更为安全，可以更放心地接入 DeepSeek^[2]。

本次改良设计采用了“云-边-端”三级协同架构，通过与“DeepSeek-盘古”大模型相融合，实现智能感知与工业现场实时控制需求，完成管片收面工艺智能化决策体系的搭建。基于“DeepSeek-盘古”的协同框架流程图如图 2 所示，该核心在于实现多模态融合应用，此外扩展了数字化应用功能，使作业数据立体化，用户对于工艺的数据对比和分析更加直观化。

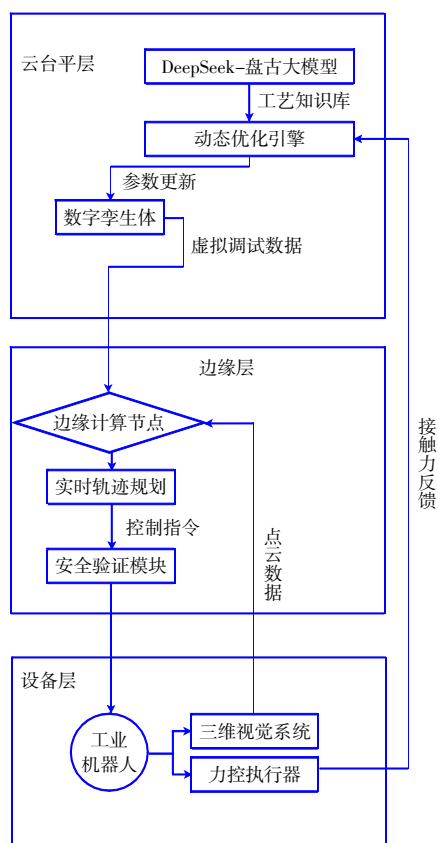


图 2 框架流程图

1.3 硬件系统组成

硬件系统主要由机械结构、传感器网络和执行机构 3 部分组成。机械结构包括六轴工业机械臂(川崎 RS 系列)、末端执行器、移动基座等,该部分为末端驱动,主要完成管片收面的物理动作,其中末端执行器还包含了收面盘、压实轮、快换盘等硬件,主要控制执行器的扭转和换盘。传感器网络的类型、实现功能和安装位置见表 1,其中 3D 线激光扫描和环境传感器组分别实现表面平整度检测和工艺参数的动态纠正,在本研究中尤为重要;六维力传感器和红外测温仪分别控制接触力和监测混凝土表面温度。执行机构包含伺服电机、气电系统、安全装置和防碰撞系统。

表 1 传感器列表

传感器类型	实现功能	安装位置
3D 线激光扫描仪	表面平整度检测	机械臂末端
六维力传感器	接触力闭环控制	刀盘与机械臂之间
红外测温仪	混凝土表面温度监测	AGV 顶部旋转云台
IMU 惯性单元	机器人振动补偿	机器人基座
环境传感器组	工艺参数动态修正	产线立柱

1.4 软件系统架构

软件系统分为智能感知层、智能决策层和智能控制层。智能感知层实现数据采集与建模,通过 3D 视觉点云数据与多传感器耦合技术建立模型,实现表面缺陷检测等功能。智能决策层利用模型核心算法,定期自动从“DeepSeek-盘古”同步新工艺规则,实现参数智能优化与调节,并根据“DeepSeek-盘古”大模型计算最优作业路径。智能控制层包含控制回路设计、通信协议、安全监控系统、数智化平台等,通过软件架构控制机械臂工作方式、工作路径,并实现时间参数自主调节。

2 仿真试验方法与性能评估

利用 MATLAB 内置的 Robotics Toolbox(机器人工具箱)和 Simulink 工具,完成本研究的仿真试验环境的搭建,然后验证主要模块算法,选择最优算法,并进行数据分析与对比。对于本研究算法的选择和力控的测试,利用仿真试验验证最优算法。而对于本研究传统收面机器人的数据对比试验,以天津某地铁项目管片厂为例,分别从机械臂收面效率、能耗、力控稳定性、力控误差、质检等方面,进行试验分析与对比。通过 MATLAB 模拟该管片厂的传统收面机器人工艺,在此基础上与大模型相结合,利用仿真试验,建模并测试本研究系统的优越性和创新性。

2.1 单模块算法验证

单模块算法试验包含了力控稳定性分析和路径规划效率分析,是为了验证本研究对于算法和模型的最优选择。通过模块化验证、系统联调及对比试验,评估收面机器人动态性能。力控稳定性分析可以通过 MATLAB 仿真测试,0~0.4 s,末端接触力处于大幅度震荡表现,0.4~0.8 s,震荡幅度减小,0.8 s 开始,趋于稳定状态,表明末端作业的接触力可以在 1 s 内达到稳定状态,此项测试结果表明测算机器人末端执行器在收面作业时,能够达到力控稳定的作业标准。

在 MATLAB 中,模拟路径规划效率试验过程,创建命令,输入真实数据。通过柱状图的方式对比不同算法下 2 种路径的计算时间(见图 3), μ 为第 1 种路径下算法所需时间, σ 为第 2 种路径下算法所需时间;由图 3 可知,DeepSeek 计算时间分别为 0.69 s、0.04 s,其他 2 种算法时间均超过 DeepSeek,DeepSeek 算法明显快于其他 2 个算法,优势明显。

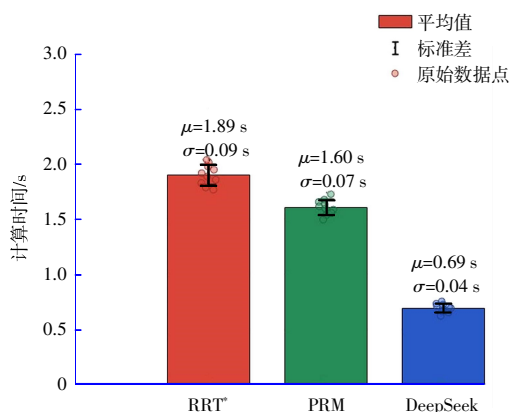


图3 3种算法计算效率分析

2.2 对比试验分析

本次仿真试验围绕作业效率、表面平整度误差、力控稳定性、能耗、缺陷检测等核心性能指标进行试验与分析，不仅与传统收面机器人数据进行对比，从自身角度出发，对于不同模型不同算法也进行仿真试验对比。收面机器人示意图见图4，通过模拟收面场景，机械臂在X轴、Y轴方面运动，进行收面工作。此次试验通过数据分析与对比，验证本研究工艺对于收面作业效率的提升，以及在能耗、稳定性等方面带来的突破。

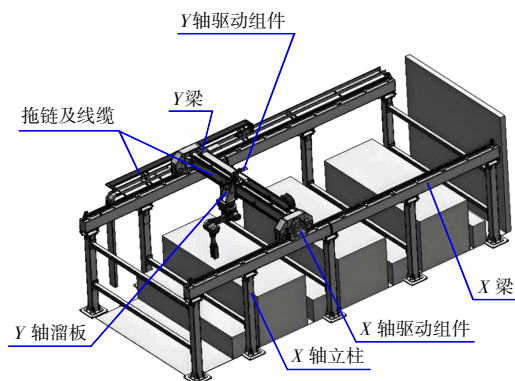


图4 管片厂收面机器人场景

1) 作业效率与能耗对比

对于“DeepSeek-盘古”双模型系统和传统系统的作业效率和能耗方面，在MATLAB中利用柱状复合图对数据进行分析。传统系统并未接入大模型的概念，而本研究采用了市面上最先进的大模型算法，从作业效率和能耗方面分析见图5。本研究系统与传统PID控制系统在作业效率方面提高 $1.4 \text{ m}^2/\text{min}$ ，而能耗方面，本文模型比传统系统节约 $0.16 \text{ kWh}/\text{m}^2$ ，由此可见，本研究系统采用的双模型表现较突出。

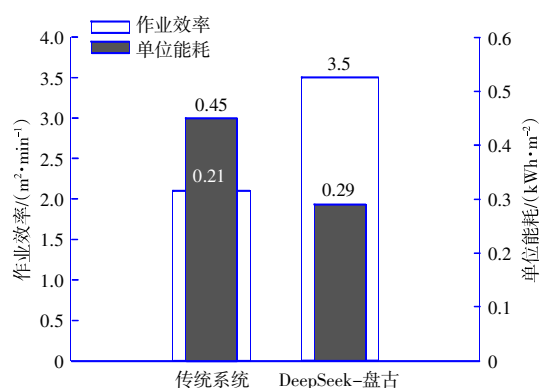


图5 两系统作业效率与能耗对比

2) 力控稳定性和误差分析对比

利用MATLAB仿真，模拟3种算法，比较在力控稳定和误差方面表现较好的模型。力控稳定性对比见图6，力控误差对比见图7。从图中可以得出，传统PID力控稳定波动比双模型阻抗控制波动较大，力控误差方面也与双模型控制有一定差距。试验表明，该算法能取得较好的接触力/位控制效果。进行了机器人自主抹面作业试验，分析不同抹面工艺参数对抹面质量的影响，并得出了最佳抹面控制参数^[3]。试验结果验证了本文的盾构管片抹面作业机器人设计的可行性与合理性。

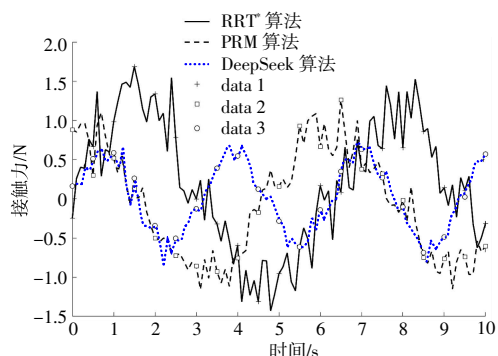


图6 力控稳定性对比

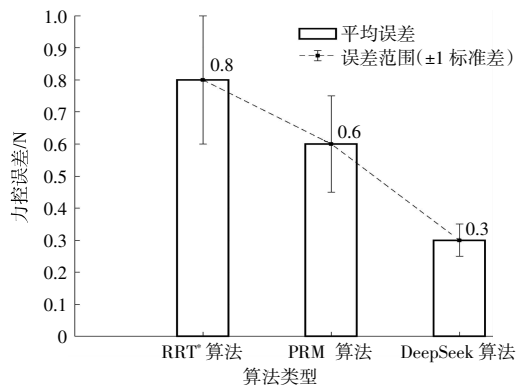


图7 力控误差对比

3 结论与创新

3.1 结论

在机器人系统性能对比中, DeepSeek-盘古系统展现出全方位的技术优势, 如表 2 所示。传统机器人的作业效率为 $2.1 \text{ m}^2/\text{min}$, 而 DeepSeek 系统达到 $3.5 \text{ m}^2/\text{min}$, 提升幅度高达 66.7%, 这得益于其动态路径优化算法和自适应速度控制技术。在加工精度方面, 传统系统的表面平整度误差为 $\pm 3.2 \text{ mm}$, DeepSeek 系统则控制在 $\pm 1.5 \text{ mm}$, 精度提升 53%, 这主要归功于其创新的阻抗控制与在线误差补偿技术。

表 2 机器人系统性能对比表

对比项目	传统机器人	DeepSeek-盘古系统
作业效率/($\text{m}^2 \cdot \text{min}^{-1}$)	2.1	3.5
表面平整度误差/mm	± 3.2	± 1.5
力控稳定性(RMSE)/N	8.6	3.2
能耗/($\text{kWh} \cdot \text{m}^{-2}$)	0.45	0.29
缺陷检出率	82%(人工复检)	98.7%(AI 预测)
动态避障成功率	70%(固定阈值)	95%(DeepSeek-RRT*)
系统响应延迟/ms	120	35

力控稳定性方面, DeepSeek 系统将均方根误差从传统系统的 8.6 N 降至 3.2 N, 降幅达 62.8%, 这源于其 50 Hz 带宽的闭环自适应力控系统。能耗表现同样出色, 每平方米能耗从 0.45 kWh 降至 0.29 kWh, 节能 35.6%, 这是强化学习能耗优化策略的成果。

在质量检测方面, 传统收面机器人无法智能识别工作路径, 并且无法自动质检; 人工质检效率较低: 收面质量检测用时 6.5 min, 发现质量缺陷调节机器参数用时 30 min, 修正管片缺陷需要 20 min; 本研究使用大模型可以自动检测质量缺陷, 并自动计算作业路径和调节作业参数, 大量减少人工辅助成本。

安全性能方面, DeepSeek 的动态避障成功率从 70% 提升至 95%, 这得益于深度 Q 网络与 RRT* 算法的协同工作。系统响应速度获得显著改善, 系统响应延迟从 120 ms 大幅降低至 35 ms, 降幅 70.8%, 这依靠边缘计算和 FPGA 加速技术的

应用。

整体来看, DeepSeek 系统在保持高精度的同时, 实现了效率的大幅提升和能耗的显著降低, 展现了新一代智能机器人系统的技术优势。

3.2 创新与优势

采用多传感器阵列, 通过时空对齐算法实现亚毫米级精度融合。嵌入式边缘计算模块实现实时点云处理^[4], 利用“DeepSeek-RRT*”算法处理全局路径, 盘古模型基于阻抗控制实现收面机器人自适应, 解决传统 PLC 机器人存在的力控与路径耦合的问题。

基于智能感知和多传感器耦合技术, 实现数字孪生驱动的参数自优化, 通过 ROS 2(新一代机器人操作系统)实时反馈调整模型参数。与传统收面机器人相比, 本研究增加自主检测管片收面质量数据, 并通过机器学习, 自动调节作业参数, 建立工艺-质量反馈闭环, 实现模型周期自动迭代更新。

4 结语

该系统只针对不同型号混凝土管片收面进行开发, 对于跨材料工艺还未曾介入, 后续研究方向可以在跨材料适应方面有所突破, 研究沥青、砂浆等材料的收面控制策略, 实现工艺集成。对于数字孪生模型的数据进行收集和储存, 创建数字化应用系统与本文双模系统对接, 从云端获取大量结构化数据, 通过信息化方法, 分析系统作业数据、质量, 建立数字驾驶舱, 使非专业用户也可以了解系统运作情况; 同时结合大模型, 定期自动发送分析报告给管理层, 为管理层决策提供数据支撑。

参考文献:

- [1] 顾洋, 白佳琦. 数字化技术在盾构管片生产企业中的研究应用[J]. 建筑机械, 2023(10): 20-24.
- [2] 曾润喜. DeepSeek 崛起与人工智能技术创新想象[J]. 电子政务, 2025(10): 28-31.
- [3] 段志琴. 盾构管片抹面机器人设计及控制算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2023.
- [4] 华为技术有限公司. 盘古大模型工业应用技术手册[Z]. 深圳: 华为内部技术文档, 2023.