

无人智能清舱机系统设计与实现

欧林林^{1,2}, 郭伟¹, 禹鑫焱^{1,2}

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 杭州 310020;

2. 浙江工业大学 信息处理与自动化研究所, 杭州 310020)

摘要: 目前散货港口清舱作业环境恶劣、安全隐患突出、人工下舱作业效率受限, 对无人清舱需求强烈; 针对清舱场景特有的船舱金属屏蔽、煤堆流动带来的定位可靠性差等问题, 自动规划控制复杂、远程交互控制操作繁琐的问题, 对激光 SLAM、路径规划控制和远程驾驶交互控制技术进行了研究, 设计了基于激光雷达的多传感器融合定位模块、基于全覆盖路径规划的自动清舱控制模块和基于 WPF 的远程交互控制平台及清舱机电控系统, 构建了一套无人智能清舱机系统, 实现了在船舱动态复杂环境中进行主动定位、自动规划作业和远程驾驶交互控制; 在测试环境和真实作业场景下进行了功能测试和清舱应用测试; 结果表明, 无人智能清舱机系统能够满足无人作业要求和实际生产应用。

关键词: 无人清舱机; 远程管控; 感知与控制; 智慧港口; 遥操作

Design and Implementation of an Unmanned Intelligent Cabin Sweeping Machine System

OU Linlin^{1,2}, GUO Wei¹, YU Xinyi^{1,2}

(1. Institute of Information Processing and Automation, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310020, China;

2. Engineering of Information, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310020, China)

Abstract: Current bulk cargo ports have the characteristics of harsh cabin sweeping environments, significant safety risks, low efficiency in manual cabin operations, strong requirements for unmanned cabin sweeping solutions. To address specific challenges in cabin sweeping scenarios, such as metallic shielding in ship cabins, poor positioning reliability caused by coal pile fluidity, complex automated planning and control, and complex remote interactive operations, this paper studies laser SLAM, path planning and control, and remote interactive control technologies, designs a multi-sensor fusion positioning system based on LiDAR, an automated cabin sweeping control system based on complete coverage path planning, and a remote interactive control platform based on windows presentation foundation (WPF), develops an electromechanical control system for the cabin sweeper, builds an integrated unmanned intelligent cabin sweeping machine system, and achieves the active positioning, automated operational planning, and remote interactive control in dynamic and complex cabin environments. Functional tests and practical application evaluations are conducted in both testing environments and actual scenarios. The results show that the proposed system meets the requirements of unmanned operations and is suitable for industrial application.

Keywords: unmanned cabin sweeping machine, remote management platform, perception and control, intelligent port, remote operation

收稿日期: 2025-03-27; 修回日期: 2025-04-29。

基金项目: 国家自然科学基金(62373329); 浙江省自然科学基金, 白马湖实验室联合基金(LBMHD24F030002)。

作者简介: 欧林林(1980-), 女, 博士, 教授。

禹鑫焱(1979-), 男, 博士, 教授。

引用格式: 欧林林, 郭伟, 禹鑫焱. 无人智能清舱机系统设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(9): 342-350, 364.

0 引言

卸船清舱是干散货运输的关键环节。以火电散煤码头为例,在货船进港后进入卸船和清舱环节:首先由卸船机对散货进行抓取,直到船舱中央区域的货物抓空见底,然后将清舱机吊入船舱,将甲板下方的货物清理到舱口区域以便卸船机将其抓出,从而清空舱内货物。目前,散货码头的卸船清舱由人工驾驶卸船机和清舱机等清舱装备进行作业。然而人工驾驶清舱车辆的方式存在以下几方面困境:

1) 舱内环境十分恶劣,不仅劳动强度大,而且存在严重的噪声、震动、粉尘和有害气体,严重影响工人的身体健康。

2) 煤堆结构松散,具有一定的流动性,车辆在煤堆上行驶存在倾翻风险。

3) 清舱机与卸船机需要协同作业,高空坠物和碰撞事故风险较大,对作业人员的人身安全构成严重威胁。

4) 人工驾驶的清舱效率受到工人驾驶技术、天气、夜间光线差等因素影响较大,常常因卸船效率降低导致生产秩序紊乱、货船滞港等问题。

随着新能源汽车、移动机器人、自动化等技术的研究和发展,智能化是工程装备散货码头的必然趋势^[1]。然而,智能卸船清舱系统的建设不仅需要卸船装备及清舱车辆进行智能化升级,还要从系统的角度对整个清舱系统进行规划与设计,包括智能清舱机软硬件、通信网络系统、远程管理平台等方面,涉及新能源、自动控制、机器人、应用软件、网络通信等技术^[2],要满足远程控制、监控管理、自动化作业等基本需求,以达到卸船清舱作业的无人化、可视化、智能化安全运行。

近年来,远程驾驶技术和无人车辆系统设计等方面的研究也取得了一些进展。文献[3-4]基于蜂窝网络,实现了汽车的远程驾驶和视频监控。文献[5]设计了一套装载机远程驾驶控制器,基于5G通信技术实现了装载机的远程驾驶。文献[6-8]针对远程驾驶的人机交互技术,设计了多种人机交互界面,提高了远程操作的便捷性。文献[9]提出了一种基于5G的用于自动土方作业的无人推土机,采用RTK-GPS获取车辆位姿,通过物联网设备Tbox建立了基于CAN和5G的通信系统,实现无人推土机与数字云平台之间的实时数据传输,但5G信号容易受到天气和障碍物的影响。文献[10]设计了一种适用于工程机械自主作业的局部路径规划方法,根据环境感知得到的栅格地图,采用D*算法搜索出无碰撞安全行驶路径,实现了工程机械的路径规划。

现有的无人工程机械主要采用GPS定位,但在港口清舱场景特有的船舱金属屏蔽环境下,GPS的可靠性会大大降低,并且不能直接得到清舱机相对于船舱的位姿,本文采用基于激光雷达和IMU的多传感器融合定位算法,通过对静态的船舱进行语义分割,实现了在船舱复杂环境的高精度鲁棒定位;目前的工程机械轨迹规划算法,主要是点到点的行驶路径规划,而清舱作业的特点要求清舱机进行遍历式的行驶,本文采用了全覆盖路径规划结合点到点的路径规划算法,规划出清舱作业的全覆盖路径,在全覆盖子路径之间采用基于A*算法的点到点轨迹规划,实现遍历轨迹之间的灵活转移。相较于其他无人工程机械普遍采用的5G通信方案,在清舱场景特有的船舱金属屏蔽环境下并不适用,本系统采用了“光纤+无线”混合的通信网络,直接将无线基站部署在船舱上方卸船机上,增强了舱内的无线信号强度和可靠性。最后,与现有的工程机械远程驾驶系统相比,本系统在实现了远程驾驶的基础上,还基于自动清舱规划控制技术和远程交互控制技术,实现了自动清舱和远程驾驶清舱协同的远程控制,大大降低了无人清舱系统的操作复杂度。

本文以卸船清舱作业为应用背景进行研究,构建了一套完整的面向清舱作业的无人智能清舱机系统,实现了无人清舱机的远程驾驶、自主感知和自动作业,改变了传统的清舱作业方式,从根本上改善了工人的作业环境、消除了舱内作业的安全隐患。无人系统的使用降低了雨雪、光线等因素对作业效率的影响,保证了整体的作业效率和稳定的生产秩序。

1 系统整体框架设计

本文所提出的无人清舱机系统的框架结构如图1所示,为降低系统耦合,提高系统的可靠性、稳定性和通用性,采用了分层的分布式控制思想进行架构设计^[11-12],具体分为上层的人机交互层、中层的智能感知与控制层、下层的驱动控制层以及贯穿其中的数据通信层。

远程交互控制平台作为人机交互层的核心,实现了车载画面实时监控、远程驾驶、自动作业管理、车辆状态数据可视化、安全预警等功能,操作人员通过该平台实现无人清舱机的控制管理和作业监控。

无人清舱机端包括了感知与控制层和驱动控制层。在感知与控制层,感知定位系统通过激光雷达实时扫描船舱环境,结合基于多传感器的感知定位算法,获得煤堆分布和自身在船舱中的相对位姿,将这些数据发送到规划控制系统。规划控制系统根据煤堆分布和自身位姿,实时规划清舱作业路线、控制车辆按照所规划的路径进行推、耙作业;在驱动控制层,由车载控制器实现

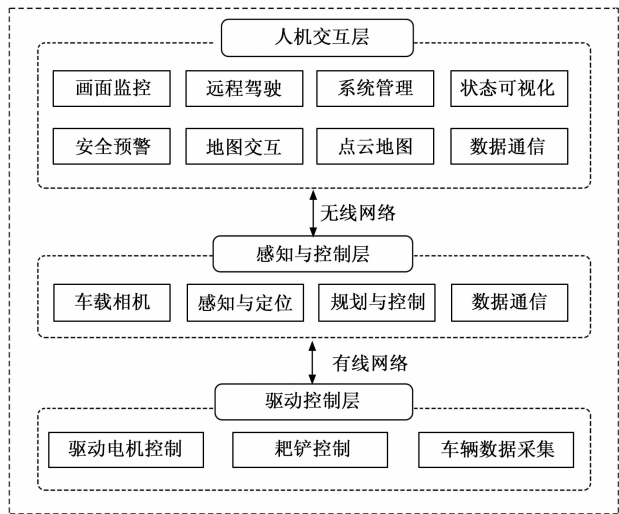


图 1 无人智能清舱机系统框架

驱动电机控制、耙铲控制以及车辆数据采集，构建 Modbus 服务器作为清舱机的控制和状态反馈接口。在数据通信层，无人清舱机通过无线网络与远程交互控制平台进行通信，智能感知与控制层经由车载交换机与驱动控制层通过有线网络进行通信。各层之间的数据交互如图 2 所示，人机交互层通过 Modbus TCP 协议与驱动控制层进行通信，一方面向 Modbus 服务器写入系统控制数据，具体包括运动控制指令数据和系统设置数据，其中，运动控制指令由驱动控制层执行，系统设置数据暂存于寄存器中由智能感知与控制层读取。另一方面，从 Modbus 服务器读取定位数据和车辆状态数据实现状态可视化；人机交互层通过 TCP/IP 协议获取智能感知与控制层上传的点云数据，用于点云地图的可视化；智能感知与控制层通过 Modbus TCP 协议从驱动控制层读取系统设置参数，根据设置参数进行轨迹规划，输出的自动控制指令数据通过 Modbus TCP 写入驱动控制层进行执行。

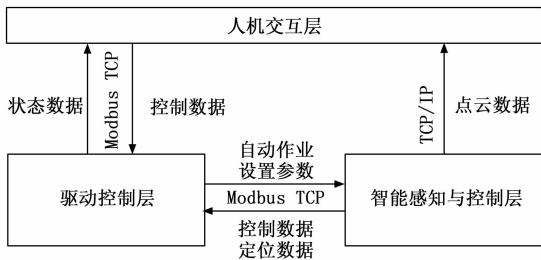


图 2 数据交互流程图

如图 3 所示，是根据所设计的系统框架构建的无人清舱机，车长 6 米，宽 3 米，通过电机驱动履带运动，通过电—液比例阀控制耙铲动作，由磷酸铁锂电池提供整车的电源。



图 3 清舱机实物图

2 系统硬件设计

车端硬件系统的结构如图 4 所示，车载相机获取车端实时画面，通过车载交换机和车载无线终端回传到远程交互控制平台进行显示，为操作人员提供环境视觉信息，相机采用了海康威视的广角双摄筒型摄像机，水平视场角高达 180°，多分辨率码流切换，最高 3 040 × 1 368，具有红外补光夜视功能，提高了夜间作业的视觉感知能力；激光雷达采用了览沃 MID-360，其视场角水平 360°、竖直 59°，量程达 70 m，实时扫描船舱环境，将点云传输给车载计算机通过多传感器融合定位算法，得到定位和地图信息。车载计算机通过全覆盖路径规划算法进行作业轨迹规划，由清舱机运动控制算法进行自动作业控制，控制指令发给车辆控制器执行。

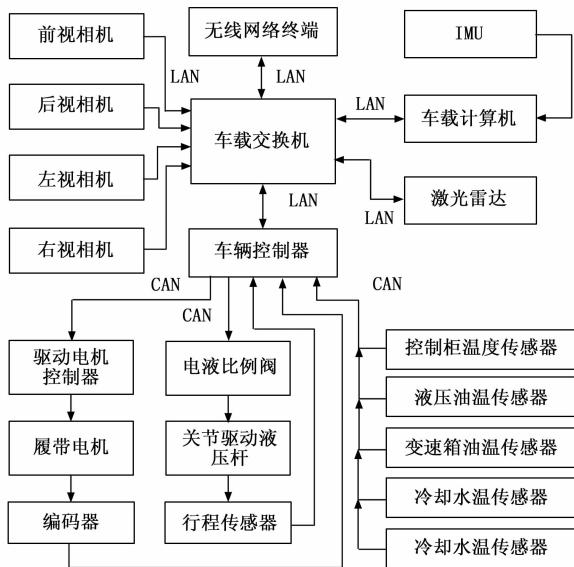


图 4 清舱机硬件系统设计

车辆控制器作为驱动控制的核心部件，采用了硕博电子的 SPL0602 嵌入式控制器进行开发，其具有 3 路 CAN 总线、1 路以太网和 66 路高度复用的 I/O 端口，

通讯资源丰富, 防护等级高, 能够在恶劣环境下稳定工作。车辆控制器中部署了 Modbus 服务器, 通过 Modbus TCP 协议与上层的远程交互控制平台、车载计算机进行数据通信, 通过 CAN 总线与电机驱动控制器、电液比例阀、状态传感系统进行通信, 控制执行部件动作、获取车辆状态数据。

清舱系统的控制模式由车辆控制器进行切换执行, 系统设计了远程驾驶和自动驾驶两种控制模式, 远程驾驶由远程交互控制平台控制, 而自动驾驶由以车载计算机为载体的智能控制器控制, 采用 Modbus 寄存器分区的方式将来自两个控制系统的数据进行隔离, 并设置权限控制寄存器实现控制权限管理, 避免了“数据混乱”的发生。具体分区如表 1 所示, 其中“远程交互控制平台控制段”按照业务逻辑分为“运动控制区”“系统控制区”和“参数设置区”; “智能控制器控制段”划分为“运动控制区”、和“导航定位区”; “车辆状态段”为车辆状态数据寄存器, 对其他设备为只读。

表 1 Modbus 寄存器分区表

分段	分区	地址范围
远程交互控制平台控制段	运动控制区	40201—40205
	系统控制区	40220—40230
	参数设置区	40250—40270
智能控制器控制段	运动控制区	40300—40305
	导航定位区	40320—40350
车辆状态段	—	30001—30050

在 Modbus 寄存器分区表“远程交互控制平台控制段”的“系统控制区”中定义了作业模式寄存器, 由远程交互控制平台进行设置。作业模式切换控制逻辑如图 5 所示, 车辆控制器对作业模式寄存器进行轮询读取, 当模式为自动模式时, 则执行“智能控制器控制段”中“运动控制区”的控制指令, 否则默认为远程控制模式, 车辆控制器执行“远程交互控制平台控制段”中“运动控制区”的控制指令。由于船舱四周的金属结构会对无线信号有较强的屏蔽作用, 尤其对 4G、5G 等高频段更为严重^[13-14]。因此采用了如图 6 所示的“光纤+无线”的方案部署通信网络, 在卸船机悬臂上部署无线网基站, 作业时舱盖不会关闭, 因此无线信号可以直接覆盖到船舱内部, 并且距离短, 信号强度衰减小。无线基站与远程交互控制平台之间通过光纤连接, 可以在较长距离无中继传输, 并且提供了极高的传输带宽。

3 系统软件设计

3.1 智能控制系统软件设计

智能控制系统的软件基于 ROS 进行开发实现, 由 3 个模块组成, 具体包括感知定位模块、规划控制模块和数据通信模块。3 个模块之间通过 ROS 话题机制进

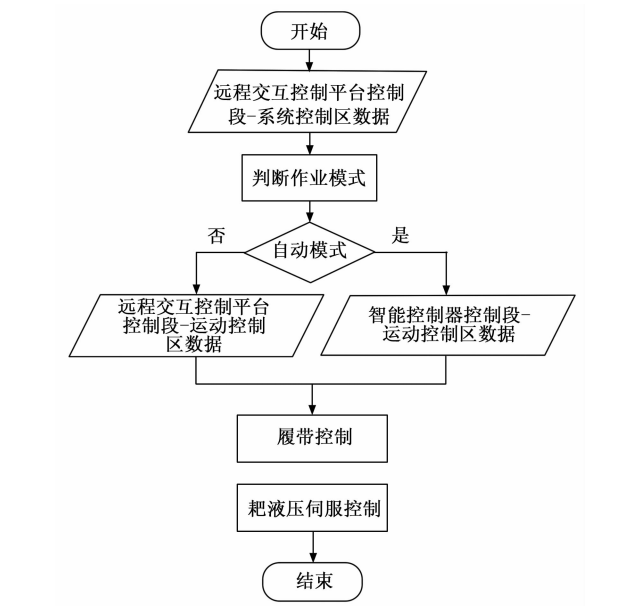


图 5 控制模式管理流程

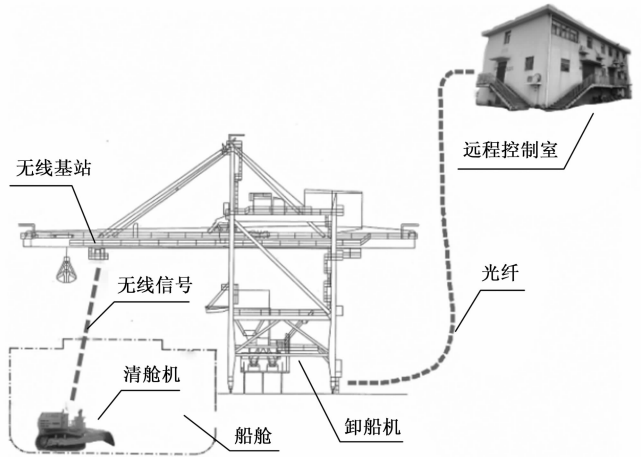


图 6 “光纤+无线”通信网络

行系统内部通信, 对外则由数据通信模块通过 Modbus TCP 协议和 Socket 技术分别与车辆控制器和远程交互控制平台进行通信。

1) 感知与定位模块:

在船舱中, 受到船舱壁和甲板遮挡的影响, 定位精度和鲁棒性会大大降低, 而即时定位与建图 (SLAM, simultaneous localization and mapping) 通过实时扫描环境信息, 自主建立地图, 并通过位姿估计实现自主定位和导航, 不依赖于无线信号, 在船舱环境下具有较强的适应性和鲁棒性。在本系统中, 采用了一种基于多传感器的清舱机感知定位方法, 为清舱机的无人化作业提供了可靠的基础。

感知与定位模块的算法流程如图 7 所示, 首先, 在系统启动时清舱机静止, 扫描的前几帧点云作为初始点云地图。然后, 在系统运行阶段, 将实时点云数据通过

IMU 插值去除点云运动畸变,采用 VertexMap 地图将点云进行转换和存储。基于煤堆存在一定休止角,而舱壁垂直于地面的特点,分别采用 DB-SCAN 聚类算法和地面滤波算法分割出舱壁和煤料的点云,实现煤料和舱壁点云的语义标记。

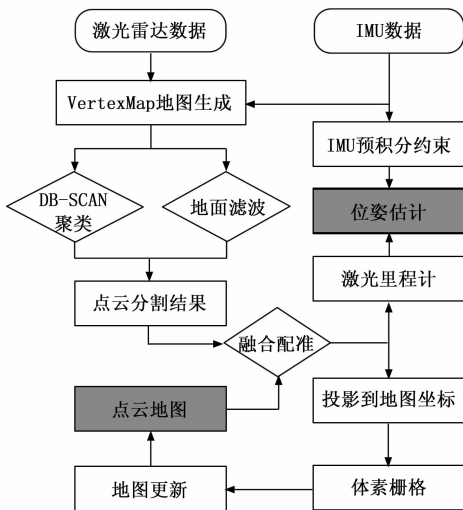


图 7 清舱机感知与定位方法

为了将语义标记后得到的观测点云与地图点云进行配准,求得两组点云的坐标变换矩阵,进而计算激光里程计,采用了正态分布变换(NDT, normal distributions transform)与最近邻迭代(ICP, iterative closest points)算法融合的配准方法。NDT 算法通过将点云划分为体素,对每个体素内的点云拟合正态分布,通过优化概率分布参数实现配准。ICP 算法通过迭代搜索最近点对应关系,最小化点对距离实现配准。具体实现步骤为,首先将地图点云降噪后通过设置栅格进行体素化并计算栅格点云的正态分布,通过优化变换参数,最大化观测点云在地图点云分布中的概率得分,得到初步对齐的变换矩阵。然后将此变换矩阵作为 ICP 的初始变换,对每个观测点云在地图点云中寻找最近点,通过 SVD 等方法计算最优的变换矩阵。最后,通过最优变换矩阵更新清舱机位姿,得到激光里程计。其中高频稳定的 NDT 配准为低频精准的 ICP 配准提供一个初值,避免 ICP 配准陷入局部最优。点云进行融合匹配后,更新激光里程计,并采用因子图优化的方法将激光里程计和 IMU 预积分进行联合优化,对车辆在船舱中的位姿进行准确的估计,得到清舱机的定位数据,并通过 ROS 话题发布。

最后,将经过配准后的点云投影到点云地图坐标系下,通过八叉树结构生成体素栅格,作为体素观测值,并与点云地图的体素栅格占用概率比较得到栅格占用差异,将占用属性发生变换的栅格反馈到点云地图中实现点云地图的更新,并发布更新后的点云地图话题。

2) 规划与控制模块:

清舱机的工作任务是将甲板下方的煤堆耙到船舱中央区域,根据人工驾驶清舱机作业的经验,需要清舱机在目标区域进行多次循环遍历式地耙煤,然后再变更目标区域,直至甲板下方大部分的煤被耙拢到舱口下方区域。因此,在自动作业的轨迹规划中,采用了全覆盖的遍历路径规划策略。

全覆盖路径的规划过程如算法 1 所示,首先,将点云地图栅格化得到包含煤料高度信息的栅格地图,根据远程交互控制平台指定的作业区域,生成耙取目标点序列,再根据耙取目标点序列,对应地在舱口下方区域生成堆放点序列,然后从耙取目标点序列和堆放点序列中取出对应的两个点作为一组点集,为每组点集生成一条路径,得到全覆盖的路径。全覆盖路径为耙煤路径,清舱机沿该路径倒退行驶。

在清舱机要从任意位置到某一目标点,或从当前全覆盖子路径到下一条全覆盖子路径时,需要点到点的路径引导,因此基于 A* 算法实现了清舱机点到点的路径规划。首先,基于传统 A* 算法在栅格地图上搜索路径,采用基于轴对齐包围盒(AABB, axis-aligned bounding box)的快速碰撞检测算法,将清舱机和障碍物简化为与坐标轴对齐的立方体,在节点扩展时计算清舱机在当前节点位置的 AABB 坐标范围,遍历所有障碍物的 AABB,检查坐标重叠,若存在重叠,则舍弃该节点。最后,再采用共轭梯度下降法对 A* 生成的离散点路径进行平滑优化,得到点到点的目标路径。

算法 1:全覆盖路径规划算法

输入:指定的作业区域顶点坐标 Top_Points[2],清舱机宽度 W(单位 m)

输出:全覆盖路径 Coverage_Path_List<Path>

```

1 //根据指定区域和车宽度计算目标点个数
2 int n = |Top_Point[1].x - Top_Point[0].x| / W
3 //生成耙取目标点集 PQ_Point_List
4 for (i = 0 to n - 1)
5     x = W/2 + i * W
6     for (j = Top_Point[1].y to Top_Point[0].y)
7         if (height(x, j) > 0.5) //煤堆高度>0.5
8             PQ_Point_List.Add(x, j)
9         break
10    else continue
11    end for
12    end for
13 //生成堆放目标点集 DF_Point_List
14 for point in PQ_Point_List
15     DF_Point_List.Add(point.x, o)
16    end for
17 //生成全覆盖路径序列
18 for (i=0 to length(DF_Point_List)-1)

```

```
19 Path = GetPath(DF_Point_List[i],
20 PQ_Point_List[i])
21 Coverage_Path_List.Add(Path)
22 end for
23 return Coverage_Path_List
```

其中, 共轭梯度下降法对 A^* 生成的离散点路径进行平滑优化过程如下: 首先, 构建目标函数, 定义包含路径长度与曲率的优化目标:

$$J = \sum_{i=2}^{n-1} \|p_i - p_{i-1}\|^2 + \lambda \sum_{i=2}^{n-1} \|p_{i+1} - 2p_i + p_{i-1}\|^2 \quad (1)$$

其中: 第一项为路径总长度, 第二项为通过二阶差分近似曲率变化, λ 为平滑权重。

采用最大偏移约束每个点相对于原始路径的偏移距离, 防止平滑后路径偏离 A^* 的避障结果。将 A^* 输出的离散路径点作为初始解, 对每个中间点 p_i 计算目标函数对其坐标的偏导数:

$$\frac{\partial J}{\partial x_i} = 2(x_i - x_{i-1}) - 2(x_{i+1} - x_i) + 2\lambda(x_{i+1} - 2x_i + x_{i-1}) \quad (2)$$

$$\frac{\partial J}{\partial y_i} = 2(y_i - y_{i-1}) - 2(y_{i+1} - y_i) + 2\lambda(y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}) \quad (3)$$

根据当前梯度和前一步的搜索方向, 生成共轭方向, 沿此方向更新路径点坐标。更新后, 约束检查, 若新坐标超出允许偏移范围则保留原值, 确保路径安全性。当所有路径点的坐标调整量累计值小于预设容忍误差, 或达到最大迭代次数时停止优化。最后, 对优化后的离散点进行贝塞尔曲线插值, 生成连续可导的轨迹。

在进行点对点路径跟踪的过程中, 需要实时控制清舱机沿着规划的路径向前行驶, 基于清舱机惯性大的特点, 需要避免高频调整控制量, 以减少车辆抖动, 并且在安全的前提下并不需要清舱机严格跟踪规划的路径, 因此, 采用了基于梯形速度的纵向控制方法和基于模糊跟踪的横向控制方法。

在基于梯形速度的纵向控制中, 对所跟踪的路径按照加速到匀速再到减速的多个阶段, 为路径的每个节点规划相应的速度。由于清舱机的行驶速度为离散的 3 个挡位, 所以在跟踪控制时, 将规划的速度离散化映射到清舱机的 3 个速度挡位中实现纵向速度控制。

在基于模糊跟踪的横向控制中, 将清舱机当前位姿与目标点的距离 $L = [0, 40]$ 和航向角偏差 $\alpha = [-180, 180]$ 作为模糊控制器的输入变量, 将左转、直行和右转控制指令作为输出变量, 在如表 2 所示的清舱机模糊控制规则表中, 表示了输入和输出之间的模糊控制关系, 其中转向指令根据航向偏差的正负判断右转和左转, 航向偏差和距离取值区间通过梯形隶属度函数进行映射。输出的转向指令通过数据通信模块写入车辆

控制器实现运动控制。

表 2 清舱机模糊控制规则表

航向偏差	距目标点距离 L/m		
	近距离	中距离	远距离
偏差不多	直行	直行	直行
偏差较大	转向	转向	直行
偏差大	转向	转向	转向

对于耙铲的控制, 在点到点移动时, 将耙铲抬起固定高度, 当行驶到耙取目标点时, 先调整清舱机朝向与当前全覆盖子路径方向一致后, 将耙铲放下, 在后退耙煤的过程中, 随着距离堆放目标点距离的减小逐渐抬升耙铲, 防止形成大垛煤堆阻碍清舱机运动。

3.2 远程交互控制平台软件设计

清舱机远程交互控制平台是基于 Windows 用户界面框架技术 (WPF, windows presentation foundation), 采用 MVVM 架构进行设计与开发^[15-16]。WPF 是微软推出的一个用于开发桌面应用程序的用户界面技术框架, 具有现代感、交互性强且视觉效果出色的特点^[17-18]。远程交互控制平台主要实现了车载画面实时监控、车辆状态数据可视化、远程管理与控制和船舱地图等功能。所设计的主界面如图 8 所示, 分为 3 大块区域, 从左到右分别为系统设置与状态显示区、车端画面显示区和电子地图交互区。分别实现了无人清舱机的系统设置与状态数据可视化、车端画面显示、船舱地图显示与交互。

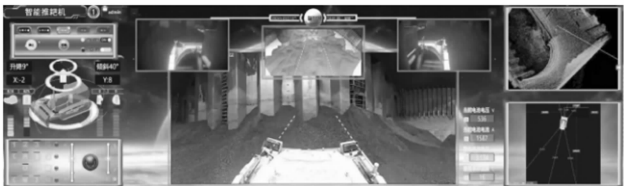


图 8 清舱机远程交互控制平台界面

1) 车端画面显示区设计:

实时画面监控模块对车端回传的视频数据进行解码和显示, 车端分别在前、后、左前、右前安装了四台相机, 在清舱作业中, 清舱机频繁切换前进和倒车实现耙拢物料, 车前和车后的环境信息是驾驶员控制车辆行驶的主要依据。在需要精细化操作时, 要从两侧观察耙铲与物料的交互情况。因此将前、后视相机为主视角, 左、右为辅助视角。

车端搭载的是海康威视 IP 相机, 远程交互控制平台的画面传输程序使用 HCNetSDK 开发工具包进行开发, 实现对网络相机的远程访问、视频流处理、实时码流显示和报警事件管理等。画面显示模块的视频流传输和处理程序流程如图 9 所示, 首先, 对 HCNetSDK 进

行初始化并注册设备, 在用户界面实例化完成后, 对 HCNetSDK 进行初始化、根据配置的 IP 地址、端口、用户名和密码等信息向车载相机注册并发送连接请求信息。成功连接相机后, 设置数据传输通道、连接模式, 其中, 传输模式选择 UDP 方式^[19-20]。在客户端设置画面渲染对象句柄 PictureBox.Name 字段, 设置解码回调函数之后启动启动预览, 实时接收视频流数据并进行解码, 解码后的 YUV 数据渲染到 PictureBox 控件显示画面。

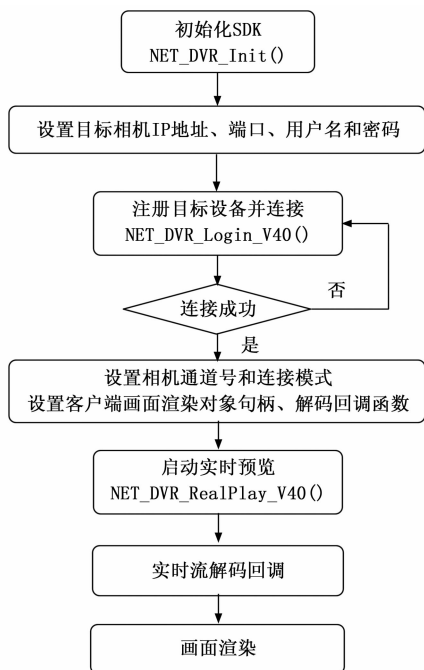


图9 图像获取流程

2) 系统控制与状态显示区设计:

系统控制与状态显示区的布置如图 10 所示, 从上到下分别是系统设置模块, 主要用于对系统参数和作业模式进行设置; 状态可视化模块, 主要显示车辆的位姿、车速、电量和二自由度耙铲的角度数据; 最后是控制面板模块, 作为操作手柄的冗余设置, 用于远程控制车辆运动、耙铲动作以及挡位切换。

在系统设置模块包括如图 11 所示的 4 个子菜单, 分别为“系统设置”“运行数据”“自动清舱”和“远程驾驶”。其中, “系统设置”菜单设计了“操作解锁”开关、“高压上电”开关、“强制启动”按钮和“定位重启”按钮, 实现对远端车辆的启停控制; 在“运行数据”菜单设计了“船舱扫描”“车辆运行数据”和“历史数据查询”按钮, 点击按钮弹出对应的信息窗口; 在“自动清舱”菜单设计了“自动启动”“自动暂停”和“作业区域设置”按钮, 用于自动作业的启停管理; 在“远程驾驶”菜单设计了“驱动电机启停”开关、“碰撞预警”开关和“转速挡位”选择按钮, 用于远程驾驶模



图 10 系统设置与状态显示区

式下的电机启停控制和行驶挡位控制。

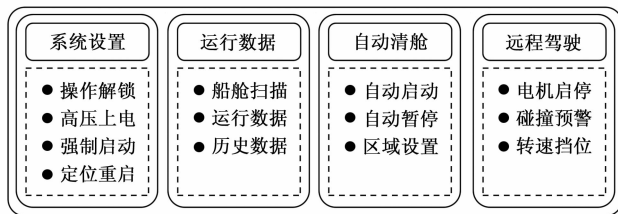


图 11 系统设置菜单栏功能

状态可视化模块的作用是将清舱机的状态数据以动画、进度条等可视化的方式显示在界面中, 为操作人员提供车辆状态的反馈^[21], 可视化的状态包括车速、电池电量、车身三维姿态、耙铲二自由度关节位置等。其中, 车身姿态数据通过清舱机三维模型在设定坐标系中的姿态来实时呈现, 车辆状态直观明了。在这里使用了 WPF 的绑定技术实现了视图与视图模型之间交互的核心机制, 当远端车辆的状态数据变化时, 界面也将立即自动刷新。

3) 电子地图交互区设计:

电子地图交互区包括船舱二维地图和三维点云地图。船舱二维地图如图 12 所示, 用于动态显示清舱机的位姿和碰撞安全预警, 并且在自动模式时可通过二维地图向远程清舱机下达目标作业区域。二维地图的实现过程包括获取数据、处理数据、可视化显示与交互逻辑。

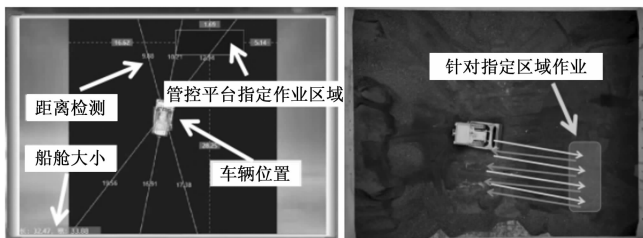


图 12 船舱二维地图

首先, 远端清舱机通过感知与定位模块在船舱中进

行扫描, 计算出船舱大小并对船舱中的散煤进行数据处理生成栅格地图, 通过车端数据地图信息发送到远程交互控制平台; 然后远程交互控制平台根据地图信息按比例绘制地图区域, 设置安全边界提醒阈值; 最后, 根据来自远端清舱机的定位数据和感知数据, 实时刷新车辆在地图中的位姿和车到舱壁距离的显示。当距舱壁有任意距离小于设定的预警阈值时, 二维地图发出碰撞安全预警, 提醒操作人员注意车辆距舱壁距离以避免碰撞。

在自动模式下, 操作人员通过二维地图实现指定清舱机的自动作业区域, 使用鼠标在二维地图中绘制矩形区域, 该区域坐标值将变换到实际船舱坐标, 写入车辆控制器, 由规划与控制模块根据目标作业区域, 规划作业路径, 并针对指定区域进行自动清舱作业。

点云地图模块实现了将车端感知与建图模块建立的船舱点云地图进行可视化显示。首先, 使用 WPF 中的 3D 视图控件 Viewport3D 创建用于显示 3D 点云的三维坐标系, 并在该坐标系下定义相机位置和方向; 然后, 遍历收到的点云, 为每个点生成 GeometryModel3D 对象, 将该模型作为子控件添加到模型集合 Model3DGroup 中, 界面将自动刷新显示, 得到船舱三维点云地图; 最后, 用户在三维地图中通过滚动鼠标滚轮缩放相机视野和距离实现地图的缩放控制, 在三维地图中拖动鼠标时, 程序将鼠标的二维运动映射到三维地图中相机位姿的运动, 实现任意地图视角的调整。

4) 远程驾驶模块设计:

在实际的清舱作业中, 自动作业仍不能完全覆盖所有作业区域, 处于舱壁或边角的煤需要驾驶经验丰富的操作人员采用远程驾驶的方式进行作业。在远程驾驶模式下, 操作人员通过远程交互控制平台显示的车端画面, 使用如图 13 所示的操作手柄对清舱机进行控制。远程操作手柄由左右两个摇杆和中间的小键盘组成, 遵循 HID 协议标准, 通过 Microsoft DirectX API 进行开发, 实现手柄操作信息的读取。



图 13 清舱机远程操作手柄

清舱机通过单边制动的方式以单边履带中心为圆心进行转向, 可以将清舱机的运动方向分解为 6 种: 向前、向后、左前转、右前转、左后转和右后转。将这六种运动方式映射到操作手柄的左摇杆动作上, 将左摇杆在极坐标系下划分成六个扇区, 程序实时获取手柄数据, 并判断扇区位置, 在远程驾驶模式时, 将控制指令

通过 Modbus TCP 写入车辆控制器, 实现清舱机的远程移动控制。

清舱机耙铲为二连杆机械臂, 大臂关节控制耙铲升降, 铲刀关节控制耙铲角度, 各关节由液压杆驱动, 通过控制各关节的电液比例阀开度进而控制关节动作。在远程驾驶模式下, 通过手柄的右边摇杆对耙铲进行关节空间控制, 将右摇杆动作位置在 x 、 y 方向上的分量映射到对应关节 “-100~+100” 的比例阀开度, 将开度值通过 Modbus TCP 写入车辆控制器。实现清舱机耙铲的运动控制。

4 系统测试与应用

4.1 视频传输测试

在本系统中, 图像回传显示用于操作人员获取车辆周围环境的视觉信息。在自动模式下, 视频画面起到监控清舱机运行的作用, 对视频传输的端到端要求并不高。但是, 在远程驾驶模式下, 操作人员需要及时的画面反馈来实时调整自己的操作, 画面的端到端延迟对于远程驾驶非常重要。因此对本系统的视频端到端延迟进行了测试。采用高速计时器法进行测试, 首先使用高刷新率屏幕 (144 Hz) 显示毫秒计时器, 被测相机对准计时器, 并将画面实时显示在通过光纤连接到无线基站的笔记本电脑中, 笔记本电脑与毫秒计时器屏幕放置在一起, 设置相机快门时间为 1/1 000 s, 同框拍摄计时器屏幕和笔记本显示的画面, 记录两个计时器的差值, 得到画面的延迟, 每组拍摄 20 次并计算平均值。在同一网络环境下, 分别对单台和四台相机传输子码流 (720 P)、主码流 (1 080 P) 进行测试, 对画面延迟进行统计并计算平均延时, 结果如表 3 所示。

表 3 画面端到端平均延时

数量(台)	分辨率	帧率/fps	延迟/ms
1	720 P	25	142
1	1 080 P	25	165
4	720 P	25	158
4	1 080 P	25	184

画面的端到端延迟对远程驾驶安全性的最大影响程度与车辆行驶的最高速度有关, 最大速度越大的车辆, 对画面延迟的要求越高, 通常采用纵向误差和航向误差来评估画面延迟带来的影响。纵向误差由式 (4) 进行计算:

$$\Delta L_e = v * \Delta t \tag{4}$$

其中: v 为车辆最大速度 (m/s), Δt 为平均画面延时 (秒)。按清舱机的最高时速为 11 km/h (约 3 m/s) 进行计算, 在最高平均延迟 184 ms 的情况下, 纵向误差约为 ± 0.56 m。

航向误差由式 (5) 进行计算:

$$\omega_e = \frac{v_r - v_l}{D} * \Delta t \quad (5)$$

其中： v_r 为右履带线速度， v_l 为左履带线速度， D 为两侧履带中心距离。按照单边制动转向清舱机两侧履带最高速度差 3 m/s 进行计算，两侧履带中心距离为 1.925 米，在最高平均延迟 184 ms 的情况下，最大航向误差为 $\pm 16.43^\circ$ ，清舱机通常不会以最高速度转向，因此正常驾驶时的航向误差会远低于最大航向误差。

4.2 数据传输测试

远程交互控制平台与清舱机控制器之间数据通信的实时性和可靠性对本系统的正常运行起着关键作用，远程交互控制平台与清舱机控制器之间通过 Modbus TCP 协议通信，远程交互控制平台作为客户端，车辆控制器为服务端，两者之间进行通信，需要客户端发送请求，服务端响应请求，客户端收到响应报文才能完成通信，借助这一特性，我们通过记录完成一次数据请求的延迟来测试两者之间的通信，客户端以 10 Hz 的频率与清舱机车辆控制器进行通信测试，在远程交互控制平台端 Modbus TCP 通信程序中设置数据请求超时时间为 100 ms，一次请求报文在 100 ms 内没有得到响应则为通信超时，并跳过这次请求，在日志文件中记录延时为 -1，通信成功则把从发送请求报文到收到响应报文之间的延时记录到日志。为能够展示较长一段时间的延时情况，将每一千次数据请求分为一组，截取连续时间的一百组数据得到下图，纵坐标的正半轴表示每组测试的平均延时，负半轴表示该组测试中出现超时的次数，结果如图 14 所示。

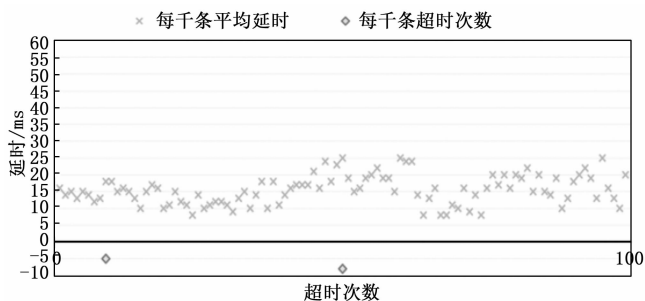


图 14 数据传输延时

从统计结果得出，在十万次通信测试中有两组数据分别出现了 5 次和 8 次超时，平均延时 15.47 ms，可以满足系统数据传输需求。

4.3 系统实地测试

为进一步测试系统在清舱作业中的表现，在实际舱中对自动作业和远程驾驶作业进行了测试，测试在嘉兴电厂三期码头进行，货船总长 199.95 米，宽 32.26 米，满载散煤 5 万吨，共有 5 个舱室，该实验在三号舱室进行，舱室的长宽高分别约为 34 米、31 米和 15 米，

在开始清舱阶段时，煤堆分布如图 15 (b) 所示，舱口下方区域的煤已经被清空，但甲板下还有大量煤料，卸船机无法进行抓取。

在清舱前期阶段，先使用自动模式作业，通过操作人员向清舱机指定作业区域进行自动耙煤，并变换作业区域，将大部分的煤耙拢到舱口下方，效果如图 15 (c)，甲板下方大部分煤被耙拢到中央区域。剩余角落的散煤无法使用自动模式耙取，切换到如图 15 (d) 的远程驾驶模式由操作人员控制作业，最终等待卸船机抓取，并由远程驾驶模式完成最后的收尾工作如图 15 (e) 为一轮清舱结束，船舱边角部分见底，等待卸船机抓取。

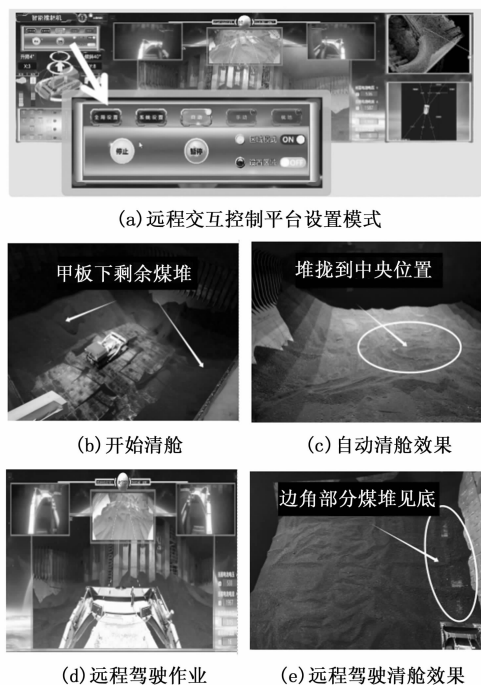


图 15 无人清舱作业实验

通过实地实验，验证了使用远程交互控制平台对清舱机进行自动作业的管理和控制、远程驾驶清舱作业，整个作业过程无需人工下舱即可完成清舱任务，并且，通过使用自动驾驶模式和远程驾驶切换作业的方式，不仅降低了无人清舱机的操作复杂度，减轻了操作人员的工作强度，还保证了清舱作业的质量。

5 结束语

本文针对人工驾驶清舱机清舱作业存在工作环境恶劣、有较大安全风险的问题，提出了面向清舱作业的无人智能清舱机系统。设计了无人清舱机电控制系统和用于控制、管理无人清舱机的远程交互控制平台，并将所提出的无人清舱机清舱系统进行了实地运行测试。测试结果表明，本系统实现了清舱机的电气化控制、远程监

(下转第 364 页)