

用于运煤火车车皮清洗的清洗机器人

吴孟欣 陈志辉 曲玉垒 杨俊广 石应豪

南京航空航天大学 江苏南京 211100

摘要：运煤的火车车皮内容易沉积煤渣，影响装运效率。因此火车车皮运煤后通常会进行人工清洗，以准备下次的装运。但是人工清洗煤渣既费时又费力，且存在安全隐患和环境污染问题。为了解决这一问题，本文设计了一种用于运煤火车车皮清洗的清洗机器人。该机器人由结构本体、控制系统和供电系统组成，能够实现自动循迹、高压水射流清洗、左右和上下旋转覆盖、远程控制等功能。本文详细介绍了机器人的设计原理、结构组成、控制算法和软硬件实现，并通过实验验证了机器人的清洗效率和可靠性。该机器人能够代替人工，提高清洗效率、降低成本、保障安全、减少污染，具有较好的应用前景。

关键词：清洗机器人；运煤火车车皮；高压水射流；自动循迹；远程控制

1. 引言

火车是我国运输煤炭的主要方式之一，每年有数亿吨的煤炭通过火车运输到各地。然而，运煤的火车车皮内容易沉积煤渣，不仅影响装运效率，还会造成车皮重量增加、车辆阻力增大、耗能增加等问题。因此，火车车皮运煤后通常需要进行清洗，以准备下次的装运。

目前，我国大部分火车车皮的清洗工作仍然采用人工方式进行。人工清洗的方法主要有两种：一是使用高压水枪对车皮进行冲洗，二是使用拖把对车皮进行擦洗。

2. 机器人的设计原理

机器人由结构本体、控制系统和供电系统组成。结构本体包括清洗机构、左右旋转机构、上下旋转机构、行走机构和支撑机构^[1]。清洗机构由高压水泵、清洗剂储罐、水射流清洗头和喷嘴等组成，能够对车皮进行高压水射流清洗。左右旋转机构和上下旋转机构由伺服电机、减速器、旋转轴和轴承等组成，能够实现清洗头的左右和上下旋转，从而覆盖整个车皮区域^[2]。行走机构由直流电机、减速器、轮胎和编码器等组成，能够实现机器人的自动循迹行走。支撑机构由钢管、铝合金板、紧固件等组成，能够保证机器人的结构稳定和强度。控制系统由控制器、传感器、无线通信模块和显示器等组成，能够实现机器人的运动控制、状态监测、远程控制和信息显示^[3]。供电系统由电池、充电器、电源管理模块等组成，能够为机器人提供稳定的电源。

3. 机器人的结构组成

机器人的尺寸为 $1.5m \times 0.8m \times 1.2m$ ，重量为 150kg，能够适应不同型号的火车车皮的清洗需求。机器人的各个结构模块的功能和参数将在下面的小节中分别介绍。

3.1 清洗机构

清洗机构是机器人的核心部分，负责对车皮进行高压水射流清洗。清洗机构的主要组件有高压水泵、清洗剂储罐、水射流

清洗头和喷嘴等。高压水泵的型号为 XH-30，能够提供 30MPa 的水压，流量为 15L/min，功率为 7.5kW。清洗剂储罐的容量为 100L，能够储存适合清洗煤渣的清洗剂，通过电磁阀控制清洗剂的喷洒。水射流清洗头的直径为 0.1m，能够产生高速的水射流，对车皮表面的煤渣进行剥离和冲洗。喷嘴的型号为 YJ-10，能够根据水压和流量自动调节喷嘴的开度，保证水射流的稳定和均匀。

3.2 左右旋转机构

左右旋转机构是机器人的重要部分，负责实现清洗头的左右旋转，从而覆盖车皮的左右两侧。左右旋转机构的主要组件有伺服电机、减速器、旋转轴和轴承等。伺服电机的型号为 SM-50，能够提供 $50N \cdot m$ 的扭矩，转速为 2000rpm，功率为 1.5kW。减速器的型号为 ZD-10，能够将电机的转速降低 10 倍，提高扭矩 10 倍，输出转速为 200rpm，输出扭矩为 $500N \cdot m$ 。旋转轴的直径为 0.05m，长度为 0.8m，材料为钢，能够承受清洗头的重力和水射流的反作用力。轴承的型号为 SK-20，能够保证旋转轴的平稳旋转，减少摩擦和磨损。

3.3 上下旋转机构

上下旋转机构是机器人的重要部分，负责实现清洗头的上下旋转，从而覆盖车皮的上下两端。上下旋转机构的主要组件有伺服电机、减速器、旋转轴和轴承等。伺服电机的型号为 SM-30，能够提供 $30N \cdot m$ 的扭矩，转速为 1000rpm，功率为 0.75kW。减速器的型号为 ZD-5，能够将电机的转速降低 5 倍，提高扭矩 5 倍，输出转速为 200rpm，输出扭矩为 $150N \cdot m$ 。旋转轴的直径为 0.03m，长度为 0.2m，材料为钢，能够承受清洗头的重力和水射流的反作用力。轴承的型号为 SK-10，能够保证旋转轴的平稳旋转，减少摩擦和磨损。

3.4 行走机构

行走机构是机器人的重要部分，负责实现机器人的自动循迹行走，从而跟随车皮的移动。行走机构的主要组件有直流电机、

减速器、轮胎和编码器等。直流电机的型号为 DM-20，能够提供 $20N \cdot m$ 的扭矩，转速为 1000rpm，功率为 0.5kW。减速器的型号为 ZD-5，能够将电机的转速降低 5 倍，提高扭矩 5 倍，输出转速为 200rpm，输出扭矩为 $100N \cdot m$ 。轮胎的直径为 0.2m，宽度为 0.05m，材料为橡胶，能够适应不同的路面条件，提供良好的抓地力和缓冲性能。编码器的型号为 EC-10，能够测量轮胎的转速和转角，提供精确的位置和速度信息。

3.5 支撑机构

支撑机构是机器人的基础部分，负责保证机器人的结构稳定和强度。支撑机构的主要组件有钢管、铝合金板、紧固件等。钢管的直径为 0.05m，长度为 1.5m，材料为钢，能够承受机器人的重量和外力。铝合金板的厚度为 0.01m，面积为 $0.8m \times 1.2m$ ，材料为铝合金，能够保护机器人的内部元件，同时减轻机器人的重量。紧固件的型号为 M10，能够将钢管和铝合金板牢固地连接在一起，防止松动和脱落。

4. 机器人的控制系统

机器人的控制系统是机器人的智能部分，负责实现机器人的运动控制、状态监测、远程控制和信息显示。机器人的控制系统的主要组件有控制器、传感器、无线通信模块和显示器等。控制器的型号为 STM32F103，能够提供 32 位的处理能力，内置 512KB 的闪存和 64KB 的 RAM，支持多种外部接口，如 UART、SPI、I2C、CAN 等。控制器的主要功能有：

(1) 接收无线通信模块的指令，解析指令的内容，根据指令的类型，执行相应的动作，如启动或停止清洗、调节清洗参数、切换清洗模式等^[4]。(2) 读取传感器的数据，根据数据的类型，进行相应的处理，如计算机器人的位置和速度、检测车皮的形状和尺寸、判断车皮的清洗状态等^[5]。(3) 控制各个电机的运动，根据预设的算法，生成相应的控制信号，如 PWM 波、方向信号、使能信号等，通过驱动器驱动电机的转动，实现机器人的自动循迹、高压水射流清洗、左右和上下旋转等功能。(4) 发送机器人的状态信息，通过无线通信模块，将机器人的状态信息，如位置、速度、清洗参数、清洗模式、清洗进度等，发送给远程控制端，方便操作人员监控和调节机器人的工作状态。(5) 显示机器人的状态信息，通过显示器，将机器人的状态信息，如位置、速度、清洗参数、清洗模式、清洗进度等，以图形或文字的形式，显示在机器人的面板上，方便操作人员查看和调节机器人的工作状态。

传感器的主要功能有：(1) 循迹传感器，能够识别轨道的位置和方向，输出相应的电平信号，用于指导机器人的行走方向。(2) 超声波传感器，能够测量机器人与车皮的距离，输出相应的电压信号，用于调节机器人的行走速度和清洗头的旋转角度。(3) 压力传感器，能够测量清洗机构的水压，输出相应的电压信号，用于调节清洗机构的水流量和清洗剂的喷洒量。(4) 温度传感器，

能够测量机器人的内部温度，输出相应的电压信号，用于监测机器人的工作状态和故障诊断。

无线通信模块的主要功能有：(1) 接收远程控制端的指令，通过无线网络，接收远程控制端发送的指令，将指令的内容转换为串口信号，传递给控制器，用于实现远程控制功能。(2) 发送机器人的状态信息，通过无线网络，发送机器人的状态信息，将状态信息的内容转换为网络信号，传递给远程控制端，用于实现远程监控功能。

显示器的主要功能有：显示机器人的状态信息，通过液晶屏，显示机器人的状态信息，将状态信息的内容转换为图形或文字，显示在机器人的面板上，用于实现本地查看功能。

5. 机器人的组装调试

机器人的组装调试是机器人的实践部分，负责将机器人的各个结构模块和控制系统安装集成，形成清洗机器人的样机，并通过实验验证机器人的清洗效率和可靠性。机器人的组装调试的主要步骤有：

(1) 将钢管和铝合金板用紧固件连接在一起，形成支撑机构的框架。(2) 将高压水泵、清洗剂储罐、水射流清洗头和喷嘴等安装在支撑机构的前端，形成清洗机构。(3) 将伺服电机、减速器、旋转轴和轴承等安装在支撑机构的两侧，形成左右旋转机构。(4) 将伺服电机、减速器、旋转轴和轴承等安装在支撑机构的顶端，形成上下旋转机构。(5) 将直流电机、减速器、轮胎和编码器等安装在支撑机构的底部，形成行走机构。(6) 将控制器、传感器、无线通信模块和显示器等安装在支撑机构的中部，形成控制系统。(7) 将电池、充电器、电源管理模块等安装在支撑机构的后端，形成供电系统。(8) 将各个结构模块和控制系统之间的电气连接线和管路连接好，完成机器人的组装。(9) 对机器人进行调试，检查各个部件的工作状态，排除故障，优化参数，提高性能。(10) 在实际的轨道和车皮上进行实验，验证机器人的清洗效率和可靠性。

参考文献

- [1] 耿玲,王宣,乔金锋.一种爬壁清洗机器人系统[J].工业控制计算机,2023,36(10):16-17,19.
- [2] 史时喜,杨树旺,朱健伟.地铁车辆轮对清洗机器人三维定位方法研究[J].制造业自动化,2023,45(9):99-103.
- [3] 梁志龙,黄辉,吴建强,等.绝缘子清洗机器人静磁场分析及优化[J].机电工程技术,2023,52(3):232-235.
- [4] 李磊,杨幸,秦绪杰,等.爬壁清洗机器人研究现状及发展趋势[J].机械制造与自动化,2023,52(1):1-6.
- [5] 陈羿宗,李建,王生海,等.一种绳驱动并联清洗机器人的控制策略研究[J].机床与液压,2023,51(11):1-6.