

引用格式:林瑶瑶,吴炫睿,刘宁,等.炉前多功能机械手遥控系统研究[J].有色设备,2024,38(2):19-23.

LIN Yaoyao, WU Xuanrui, LIU Ning, et al. Research on remote control system of multifunctional manipulator in front of furnace[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2024, 38(2): 19-23.

# 炉前多功能机械手遥控系统研究

林瑶瑶<sup>1</sup>, 吴炫睿<sup>2</sup>, 刘宁<sup>3</sup>, 徐伟<sup>1</sup>

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 东北大学 机械能与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819;  
3. 河南理工大学 机械与动力工程学院, 河南 焦作 454000)

**[摘要]** 针对传统工业冶炼炉耐火砖拆卸作业自动化水平低、危险性高等问题,为炉前多功能机械手研发了一套智能远程遥控系统。采用 Lora 无线通信技术作为遥控器与拆砖机通信的无线协议,研发了无线收发模块,实现了远距离遥控,抗干扰能力强。配置了 18650 锂电池,并设计供电电路为遥控器硬件系统供电,供电电压 3.6 V,可长期稳定输出。以 ARM 架构的 STM32F103RCT 芯片作为遥控器的主控制器,搭建了简洁高效的芯片外围电路,以及指令信号监测和滤波等辅助电路。使用分段算法,将直接摇杆指令转换为既符合低速精确定位,又符合快速响应要求的实际指令信号。该遥控系统已经应用到实际工程项目中,对提高工业冶炼炉耐火砖拆卸自动化水平具有重要意义。

**[关键词]** STM32F103RCT; 机械手; 遥控器; LoRa; 耐火砖; 冶炼炉; 拆卸

**[中图分类号]** TF35 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1003-8884(2024)02-0019-05

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2024.02.004

## 0 引言

在金属火法冶炼的过程中,工业炉内的耐火材料寿命有限,需要定期拆装更换<sup>[1]</sup>,目前主要由操作员携带风镐进行拆除作业。此操作复杂,需要接受过专业培训且经验丰富的工程机械操作员才能操控。并需要在停炉、排料等工作开始后,尽快进行耐材拆除作业。此时炉温相对较高,且由于金属熔体长期对耐材的渗透作用,待拆除部分呈现难度大、黏滞的特点,人工操作劳动强度极大,上述因素综合作用,给相关作业对人员的职业健康造成不利影响<sup>[2]</sup>。为了改善机械设备操作人员的工作环境,需要研发一款远程操作的炉前多功能机械手代替人工来实施该危险操作<sup>[3]</sup>。

工业现场环境复杂,高频大功率用电设备较多,

存在各种电磁干扰。传统遥控器容易受到周围环境的干扰,无法满足工业现场的控制要求<sup>[4]</sup>。传统工业遥控器主要针对无人行车、无人叉车等,通常都在工程机械设备周围实施作业,需要人工目测进行定位和辅助操作,甚至需要操作人员手动辅助定位,操作人员不能远离现场,而且危险性很高。且传统遥控器遥控距离有限,信号易受环境因素影响,功能简单,无法对控制信号实现智能化处理,也无法过滤误差信号,获取真实控制意图<sup>[5-7]</sup>。

本文在对传统工业装备遥控技术广泛调研的基础上,研发了一款适用于炉前多功能机械手的遥控器。

## 1 组成模块

### 1.1 无线通信模块

通过对比当前主流工业无线通信技术优缺点,选择 Lora 技术作为多功能机械手本体和遥控器之间进行无线通信的技术。本文选用 TI 公司的 CC1310(内置双核 ARM)射频芯片作为主芯片,即可实现无线通信,又起到控制数据输出的作用;无线模块工作在全球免许可 ISM431-446.5 MHz 频段(默认 433 MHz),GFSK 调制方法;采用 24 MHz 工业

**[收稿日期]** 2024-01-20

**[第一作者]** 林瑶瑶(1982—),男,山西大同人,高级工程师,博士后,主要研究方向为嵌入式系统开发、硬件电路设计、运动控制技术、智能配电系统及行车控制系统。

**[基金项目]** 国家重点研发计划“循环经济关键技术与装备”(2022YFC3901500)。

级晶振,保证了其能满足工业使用要求,性能稳定可靠。无线通信模块设计为低功耗多功能无线串口通信模式(UART),串口输入输出采用 TTL 电平、3.3 V 的IO 电压。

无线 Lora 收发模块,最大发射功率为 25 mW,通信距离可达 1.5 km。配置有 2 048(字节)byte 的缓存用于存储发送接收的数据,采用点对点发送和连续透传模式,可以有效提高收发效率,屏蔽干扰。

遥控器采集到的控制指令被处理为串口数据快速传送到无线发送模块中,无线发送模块收到数据,直接转发出去,无线模块采用透传模式,无线接收模块则将无线数据转为 TTL 电平的 RS232 串口数据,以 115200 波特率发送给多功能机械手控制器。控制器将数据保存并进行智能化处理。遥控器与控制器无线通信结构如图 1 所示。



图 1 遥控器与机械手控制器无线通信结构

Fig.1 Wireless system between remote controland manipulator controller

## 1.2 遥控手持模块

遥控器作为遥控系统的主体,由外壳、面板、嵌入式检测控制系统和无线发送模块组成。遥控器外壳主要用来装载嵌入式系统硬件、充电储能模块和无线模块。遥控器面板用于安装 2 个四方向霍尔摇杆、电源开关、7 个两位拨子开关、1 个三位拨子开关、1 个电阻型旋钮开关和 1 个急停按钮。并在面板上雕刻文字和符号,其可以固定所有元件并标识每个元件所代表的功能。

### 1.2.1 充电储能模块

遥控器属于无线设备,需要为其持续提供电能。系统搭建了以 18650 锂电池为核心的充电/供电模块,单节锂电池 18650 在充满电状态下可以为遥控系统提供 3.6 V 的电源,这完全符合主控制器 STM32F103RCT6 和摇杆等其他元器件对电源的要求。为充电储能系统配置了一个两位的旋钮开关,当该开关打到“电源关闭”位置时可以给锂电池充电,并关闭遥控系统的电源;当该开关打到“电源打开”位置时,锂电池可以给遥控系统供电,但外部电源无法给电池充电。外部充电电源选择的是 4.2 V

开关电源。充电储能模块电路原理如图 2 所示。

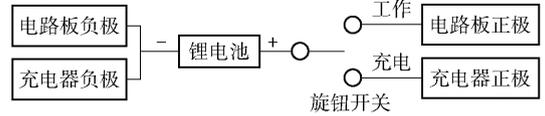


图 2 充电储能模块电路原理

Fig.2 Charging energy storage circuit

### 1.2.2 摇杆信号检测系统

摇杆选用的是四方向霍尔原理摇杆,此类摇杆利用霍尔原理将摇杆位置转换为电压输出信号。所选摇杆会产生两路独立的电压模拟量输出信号,上下方向为一组输出信号,左右方向为一组输出信号,信号输出电压范围为 0 ~ 3.3 V,输出电压与摇杆位置成线性关系。遥控器面板功能如图 3 所示,6 号位置就是 2 个摇杆。

2 个摇杆根据图中 2 号拨子开关选择不同控制模式分时复用。在工作模式下,控制大臂、二臂、三臂和辅助,即机械手原地不动进行拆砖操作;在行走模式下,控制正反旋转,左右前进后退,摆缸,即机械手行走时,跟行走无关的设备不能动作;在维护模式下,所有液压设备不能动作。摇杆的信号经过信号放大滤波电路被送到主控器 STM32 的 ADC 引脚。

### 1.2.3 旋钮和拨子开关信号检测系统

遥控器面板上的旋钮和拨子开关的位置和功能如图 3 所示。

遥控器内部电路如图 4 所示,电源 LED 灯直接连到电源电路中,只要电源开关 P2 接通,电路有电,则 D1 点亮。急停开关、控制电源、照明开关、冷却器、油泵、总体速度、行走速度、破碎锤以常闭模式设计电路。当开关打开时为高电平,开关闭合时为低电平。三位置拨子开关以行走模式为常闭触点,另外 2 个模式分别接主控器两路 IO 口。这些信号送到主控制板,经过电压跟随器和信号过滤器送到嵌入式控制器的数字量输入引脚。

振打速度旋钮是一个线性调压设备,输出电压与旋钮位置成正比,输出电压低则振打频率低,输出电压高则振打频率高。旋钮输出经过信号放大滤波电路被送到主控器的 ADC 引脚。

## 1.3 主控制器系统

主控制系统是整个遥控器的核心,选用 ARM 架构的微控制器 STM32F103RCT6 LQFP64 作为主控制器。STM32F103RCT6 是当前中小型嵌入式系

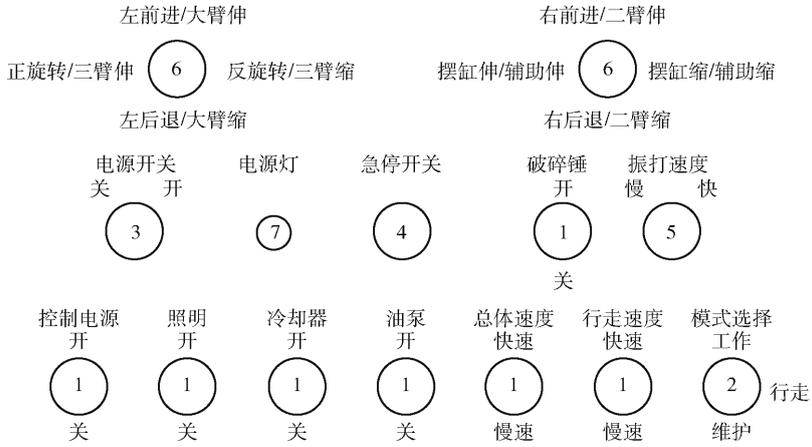


图3 遥控器面板功能

Fig.3 The function of the remote control panel

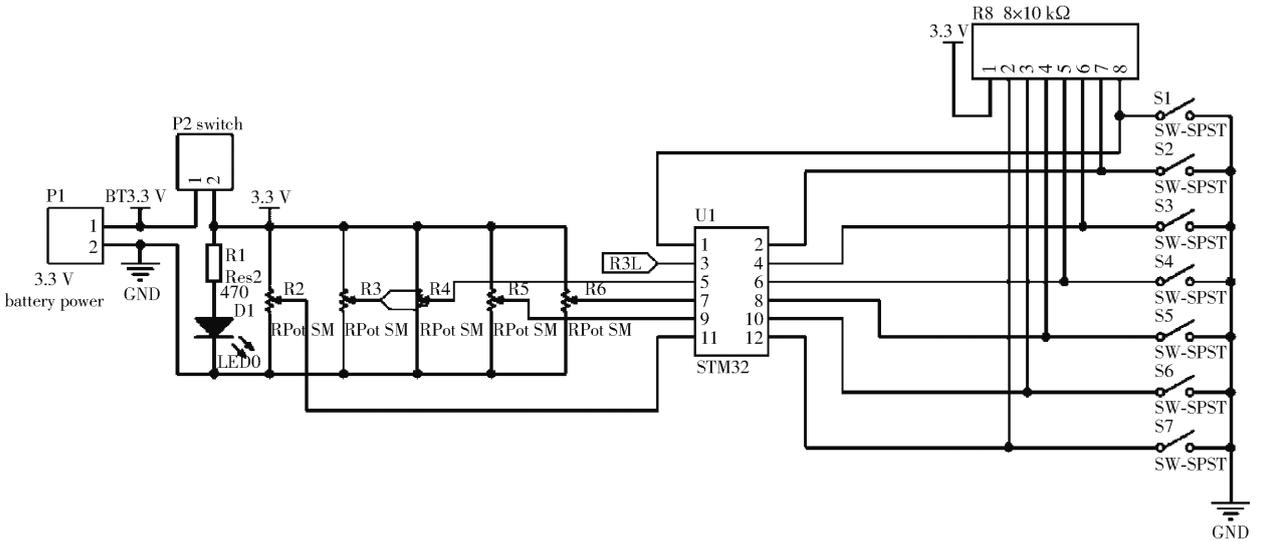


图4 面板元件与嵌入式系统连接

Fig.4 Circuit diagram of embedded system

统中常用的一款 32 位控制芯片,该芯片有多个带复用功能的数字量输入输出端口、12 位精度的模拟量输入端口、标准 USART 通信端口和 72 MHz 的 CPU 主频,完全可以满足遥控器对系统资源的要求。

该控制器需要搭建外围硬件电路系统。硬件电路系统的作用是搭建可以使芯片正常工作的最简单外围电路,包括电源滤波电路、芯片电源连接电路、按键复位与自复位电路、USART 串口输出驱动电路、JTAG/SWD 调试编程电路、LED 驱动电路、高频和低频晶振电路。晶振电路中高频采用 8 MHz 外部晶体振荡器为芯片提供时钟频率,经过内部倍频芯片工作于 72 MHz,低频则采用 32.768 KHz 为看门

狗或者 RTC 提供时钟频率。控制器系统硬件电路与按键、旋钮、摇杆的信号接口相连,共同组成了遥控器硬件电路。

## 2 遥控器控制算法

遥控器主控制芯片 STM32F103 的软件将输入的数字量和模拟量信号进行处理并转换为 1 组编码,通过 USART 口和光耦隔离电路发送给无线发送模块。

遥控器面板上的数字量元器件产生的信号送入主控制器的 IO 口上,在信号产生和传输的过程中难免会出现一些杂波信号,除了前面提到的硬件滤波

电路,还要对这些信号进行软件滤波,采用限幅滤波算法,滤除那些突然产生的冲击信号,防止机械手误动作。采用一阶低通滤波算法对遥控器模拟信号进行处理,使输入信号更稳定,有效减少信号杂波对系统控制的影响。

每个摇杆会产生 2 路独立的 0 ~ 3.3 V 模拟信号,其中一路代表从上到下的摇杆路径,另一路代表从左到右的摇杆路径。输出电压信号与摇杆位置成线性正比关系。

### 3 摇杆的应用

在实际中,摇杆的使用分为 3 种情况。

1) 如图 5 所示,摇杆处于中间位置周围时,为了防止模数转换温漂或者误动作对输出信号产生影响,将摇杆周围的  $[-0.5 \text{ V}, 0.5 \text{ V}]$  区间设置为死区。此时微控制器即使收到摇杆的电压指令信号,但给拆砖机发出的实际驱动指令信号为 0,拆砖机不做相应的动作。该区域的设置是为了防止摇杆在长期使用之后在中间位置产生机械疲劳,而给拆砖机发出错误的指令信号;同时也可以防止操作员在操作过程中,误触了该摇杆导致拆砖机的误动作。



图 5 遥控器面板

Fig. 5 Remote control panel

2) 如图 6 所示,摇杆指令电压在  $[0.5 \text{ V}, 2.5 \text{ V}]$  区间内时,其变化量远大于实际液压驱动指令。这样摇杆位置变化,实际驱动指令变化较小,拆砖机的液压设备动作缓慢,方便操作员精细操作,实现精确定位。

3) 摇杆指令电压在  $[2.5 \text{ V}, 3.3 \text{ V}]$  区间内时,对应的实际驱动指令变化都比较大,因而摇杆位置变化,实际驱动指令变化较大,拆砖机的液压设备动作响应很快,方便操作人员快速地操作拆砖机实现动作,用于拆砖机各关节快速运行,快速抵达目标位置。

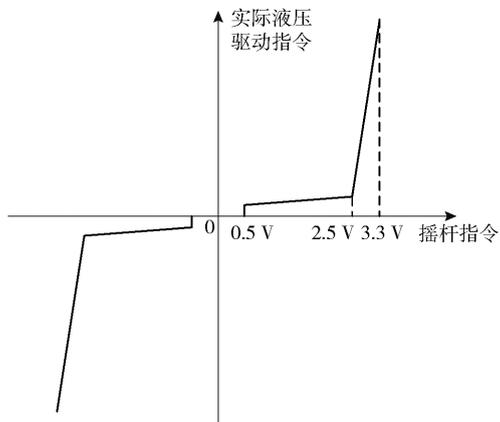


图 6 摇杆指令与实际驱动指令关系

Fig. 6 The relationship of rocker arminstruction and practical means

需要将遥控器各按键、旋钮、摇杆的指令信号转换为 1 组 16 进制的数据才能通过嵌入式微控制器的串口发送给无线信号发射模块。遥控器的指令设置为 9 字节的数据组,分别为:02 00 11 80 87 7F 7E 80 80,前 2 个字节是 can 总线传输数据的存储地址,用于 EPEC 控制存储指令信号,之后的 3 个字节分别代表急停按钮状态、振打锤的工作状态和各拨子开关当前的状态,最后 4 个字节是 2 个摇杆给出的控制指令。

为了适应无线模块的性能,保证 USART 口发送的信号正确性,同时满足主机控制器对信号的要求,确定主控制器串口发送指令数据组的频率为 30 Hz,这个频率完全可以满足大型工程机械对遥控器信号的要求。

遥控器无线信号将操作员指令以 9 600 bit/s 的速度发送出去,拆砖机车身上安装有 Lora 无线接收模块,实时循环接收来自遥控器的指令。随后该指令被转换为 can 总线信号发送给 EPEC 控制器。EPEC 控制器是拆砖机的主控制器,根据遥控器的指令驱动液压系统工作,实现拆砖机的不同关节伸展收缩,车身前进、后退和旋转,以及控制振打锤工作。通过在拆砖机测试现场的大量试验,拆砖机遥控器可以很好地控制拆砖机工作,操控的及时性和稳定性较好,可以兼顾低速精确定位和高速响应运行的要求。

### 4 结论

为了提高工业冶炼企业的自动化水平,减轻冶

炼炉拆砖工人的劳动强度,降低拆砖工作的危险性,在对国内外工业遥控技术进行广泛调研的基础上,研发了一套拆砖机智能遥控系统。

1)采用 Lora 无线通信技术作为遥控器和拆砖机之间的通信协议,该无线技术信号传输距离远,信号抗干扰能力强,可以有效满足工业现场复杂电磁环境对无线通信技术的要求。

2)遥控器面板由 2 个摇杆、1 个紧急开关、1 个旋钮和若干拨子开关组成,操作员拨动不同开关和旋钮来控制遥控器。采用 18650 锂电池为遥控器供电,使用定期外部充电的模式给遥控器充电。遥控器配置了 ARM 架构的 STM32F103 系列芯片作为主控制器,并搭建了相关辅助电路实现指令监测功能。

3)现场试验证明,该遥控系统可以配合拆砖机有效工作,发挥拆砖机的最大功效,有效降低拆砖工作的危险性,对提高拆砖工作自动化水平具有重要

意义。

#### [参考文献]

- [1] 周志鸿, 马飞, 郑利霞. 遥控拆砖机在水泥干法回转窑维修中的应用[J]. 凿岩机械气动工具, 2011(3): 61-64.
- [2] 杨永华. 工业遥控器应用及故障维修[J]. 设备管理与维修, 2022(17): 73-75.
- [3] 赵树行, 戚彬, 王莉, 等. 基于 AHP/FCA/TRIZ 的植保无人机遥控器人机评价与优化[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2022(6): 46-51.
- [4] 贾振东, 周坤良. 工业遥控器在全自动挖泥中的应用[J]. 中国设备工程, 2021(1): 262-263.
- [5] 刘德林. 摇杆式工业遥控器在大吨位起重机上的应用[J]. 设备管理与维修, 2021(18): 68-70.
- [6] 刘旭辉, 黄瑞坤, 王刚. 炉前板坯宽度校核模型开发与应用[J]. 冶金自动化, 2018, 42(5): 52-55+60.
- [7] 王斌. 250T 阳极炉燃烧系统及搅拌系统的改造[J]. 有色矿冶, 2022, 38(1): 40-42.

## Research on remote control system of multifunctional manipulator in front of furnace

LIN Yaoyao<sup>1</sup>, WU Xuanrui<sup>2</sup>, LIU Ning<sup>3</sup>, XU Wei<sup>1</sup>

(1. China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China;

2. School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

3. School of Mechanical and Power Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Aiming at the problems of low automation level and high risk of firebrick disassembly in traditional industrial smelting furnace, a set of intelligent remote-control system was developed for multifunctional manipulator in front of furnace. Using Lora wireless communication technology as the wireless protocol for the communication between the remote control and the brick remover, the wireless transceiver module is developed, which realizes the remote control and has strong anti-interference ability. Equipped with 18650 lithium battery, and designed the power supply circuit for the remote-control hardware system power supply voltage 3.6 V, can be long-term stable output. STM32F103RCT chip of ARM architecture is used as the main controller of the remote control, and simple and efficient peripheral circuit of the chip, auxiliary circuit such as instruction signal monitoring and filtering are built. By means of segmental algorithm, the direct rocker instruction is transformed into actual instruction signal which meets the requirements of low speed accurate positioning and fast response. The remote control system has been applied to practical projects and is of great significance to improve the automatic level of firebrick disassembly in industrial smelting furnace.

**Key words:** STM32F103RCT; robot manipulator; remote-control unit; LoRa; firebrick; smelting furnace; disassembly

