

绳索牵引水冷壁磨损检测机器人 控制系统设计

张恒远¹, 马鹏飞¹, 海珊瑜², 吴善强², 王斌锐²

(1. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 中国计量大学 机电工程学院, 杭州 310018)

摘要: 针对表面有防磨梁的复杂锅炉水冷壁外轮廓磨损的检测要求, 提出了一种新型的绳索牵引机器人的水冷壁检测方案, 开发了检测机器人控制系统; 根据模块化设计思路, 以 STM32F407 为控制核心, 研制了基于总线技术的机载控制器, 根据有限状态机方法设计了单片机程序, 以 PI 控制算法实现了机器人平台姿态控制、上下运动速度控制和水平位置控制, 实现了声光报警和通信功能; 上位机基于 LabVIEW 集成环境开发程序, 通过无线串口与下位机通讯, 通过以太网获取激光轮廓仪的水冷壁外轮廓的采集, 开发了机器人的监控界面; 实验测试表明, 该系统能稳定控制机器人运动, 准确采集传感器信息, 最大负载为 100 kg, 平台本身重 60 kg, 最大操作距离为 200 m, 满足复杂水冷壁磨损检测的应用需求。

关键词: 控制系统设计; 结构光检测; 水冷壁检测机器人; STM32F407; LabVIEW

Control System Design of Rope Traction Water-Cooled Wall Wear Detection Robots

ZHANG Hengyuan¹, MA Pengfei¹, HAI Shanyu², WU Shanqiang², WANG Binrui²

(1. Shenhua Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos 017000, China;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: Aiming at detection requirements for the outer contour wear of complex boiler water-cooled walls with anti-wear beam on the surface, a new water-cooled wall detection scheme for rope traction robots is proposed, and a detection robot control system is developed. According to the modular design idea, taking STM32F407 as the control core, an airborne controller based on bus technology is developed. Single-chip computer program is designed according to the finite state machine method. PI control algorithm is used to realize the attitude control, up and down motion speed control and horizontal position control of the robot platform, achieving the sound and light alarm and communication functions. Based on LabVIEW integrated environment development program, The upper computer communicates with the lower computer through wireless serial port, collects the water-cooled outer contour of the laser profilometer through the Ethernet, and develops the monitoring interface of the robot. Experimental test shows that the system can stably control the movement of the robot and accurately collect the information of the sensor. The maximum load is 100 kg, the weight of the platform itself is 60 kg, and the maximum operating distance is 200 m, which meets the application requirements of complex water-cooled wall wear detection.

Keywords: control design; structured light detection; water-cooled wall detection robot; STM32F407; LabVIEW

收稿日期:2024-07-10; 修回日期:2024-08-21。

基金项目:浙江省重点研发计划项目一领雁(2023C03186)。

作者简介:张恒远(1979-),男,在职研究生,高级工程师。

吴善强(1977-),男,博士,副教授。

引用格式:张恒远,马鹏飞,海珊瑜,等. 绳索牵引水冷壁磨损检测机器人控制系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2025, 33(8): 145-151.

0 引言

近年来,锅炉向大容量高参数发展,炉膛水冷壁温度相应升高,因此水冷壁高温腐蚀磨损现象出现得更加频繁^[1-5]。为解决水冷壁的磨损问题,人们开始研究那些自动化程度高、在特殊场合可以代替人完成作业的特种机器人,因此近些年成为国内外学者的研究热点。锅炉自动化维修检测平台包括无人机平台、爬壁机器人和绳索牵引机器人等。随着无人机技术的迅猛发展^[6],无人机被用于高空、高温、有毒有害等高危作业环境的检测任务,但也存在负载能力和续航能力不足、易受气流影响导致悬停精度不足等缺点。爬壁机器人可以代替人完成需要力量的高空危险任务,它不仅要像地面移动机器人那样灵活移动,还要能够利用特殊的吸附技术可靠地吸附在垂直壁上^[7-11]。常见磁力爬壁机器人用于水冷壁检测,这类机器人具有吸附力大,原理简单等优点,但却存在越障和负载综合能力不足等缺点。电厂为了减少锅炉水冷壁的磨损,在水冷壁表面焊接了防磨梁,爬壁机器人较难应用于表面焊接有凸起防磨梁的水冷壁检测。绳索机器人采用柔性绳索代替刚性连杆作为驱动元件的并联结构机器人,结合了并联结构和绳索驱动的优点,既具有并联结构高刚度、高精度、负载/自重比高的优点,又具有绳索机构、结构简单、易于装配/拆卸、成本低、速度快、工作空间大等的优点^[12-14]。绳索牵引的水冷壁检测机器人可以在规定区域做精准的移动,能够满足检测任务对机器人运动能力和负载的要求。

对于水冷壁磨损的无损检测^[15-19],X射线技术是无损检测方法的较早的工业应用,其次是磁粉裂纹检测、液体渗透检测、温度红外测量涡流脉冲热成像、超声波检测、机器视觉检测和结构光检测^[20]等。这些方法各有优缺点,在缺陷检测中都发挥着重要作用。线激光磨损检测^[21-23]就是结构光检测的一种,利用机器视觉方法对激光条纹的中心线进行处理,获得水冷壁轮廓的像素坐标,通过计算得到实际测量的水冷壁轮廓。采用形状配准方法将实测轮廓与标准设计轮廓对齐,实现磨损计算和轮廓分析。结构光无损检测的主要优势有能够提供高分辨率的3D测量、精确的表面轮廓以及测量的效率高、实时性好、环境适应能力强等。

检测任务要求机器人具备快速柔顺跨越防磨梁的运动能力,同时保持大的负载能力,提出一种绳索牵引的新型水冷壁检测机器人,设计了机器人的控制系统设计,通过非接触的线激光测量仪完成水冷壁的外轮廓磨损检测。

1 绳索牵引机器人结构及组成

在实际检测应用中,锅炉水冷壁高上百米,高空

壁面移动机器人的部署须搭载防坠机构和电源供给电缆,防止其高空坠落或因电源耗光滞留在高空壁面,以满足安全运行的基本条件。水冷壁表面有防磨梁的凸起,普通爬壁机器人或飞行机器人难以满足安全高效可靠的负载能力和运动性能。设计的一种绳索牵引高空非接触检测机器人,满足高效快速运动,同时保证负载能力。

检测机器人系统主要包含竖直方向的绳索牵引单元、水平方向的轮式移动单元、线激光测量仪、传感单元、电控单元和机器人框架机构,机器人整体构型如图1所示。绳索牵引单元由直流减速永磁同步电机和抓绳轮等组成,选取高转速比的带自锁功能的减速器保证机器人断电后不发生滑动坠落,通过可调的固定机构连接在机器人框架机构上。水冷壁顶端连接3根绳索,机器人通过3个绳索牵引单元实现上下竖直运动、横滚和俯仰运动。水平运动方向的轮式移动单元由直流减速永磁同步电机和橡胶轮组成,通过滚动橡胶轮在机器人框架上水平运动。线激光轮廓测量仪固定在水平移动平台上,因此可以实现水平 y 轴和竖直 z 轴方向的移动。所有电机通过CAN总线协议连接并控制,距离传感器和姿态传感器分别连接到控制单元的RS485和RS232串行总线上。机器人机构进行了防水防尘和散热设计,保证机器人在恶劣工况下的正常工作。

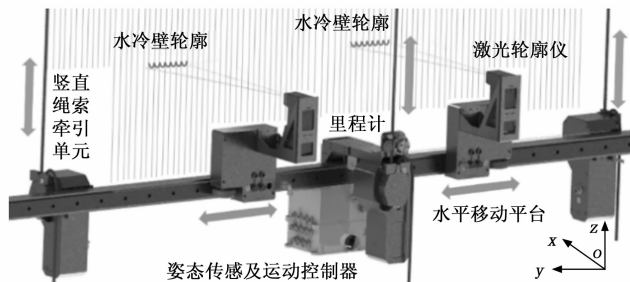


图1 绳索牵引检测机器人机构组成

2 机器人控制系统组成

2.1 功能介绍及系统总体方案

根据功能需求设计检测机器人控制系统部分硬件电路,包含上位机和机载控制器两部分。机载控制器部分以单片机为核心,搭载了数据采集单元(包括测距传感器、接近觉传感器、姿态传感模块和线激光测量仪实现对自身状态信息采集、环境信息采集、水冷壁轮廓数据的采集),高清摄像头无线图传模块、无线通讯单元,基于CAN总线的电机控制单元和电源单元等硬件电路。机载控制器是基于总线的模块化设计,有利于硬件安装和调试,为机器人系统功能的后续升级优化奠定基础。上位机部分以一台X86架构远程遥控终端为核心,

设计软件调试界面和机器人监控功能模块，控制系统总体功能架构如图 2 所示。

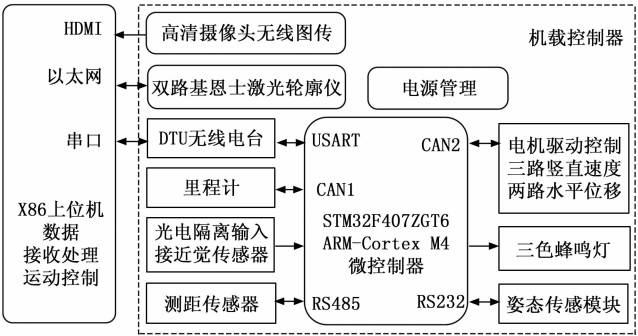


图 2 控制系统总体功能架构

2.2 机载控制器硬件设计

主控制器核心选用高性能 ARM Cortex M4 系列内核的 STM32F407ZGT6，串口读取位姿传感器的横滚角和俯仰角等信息。姿态传感器内置高精度倾角测量单元，通过测量静态重力加速度，转换成倾角变化，从而可以测量传感器输出相对于水平面的倾斜和俯仰角度。卡尔曼滤波算法保证了在高动态环境下稳定的输出角度，全范围精度 0.1°，分辨率 0.01°。采用多圈绝对式编码器的里程计，通过 CAN 总线命令设置编码器的 ID 地址、临电、数据发送模式等参数。编码器输出轴连接摩擦轮与绳索接触，单片机可直接读取圈数值和单圈值等，进行机器人里程的检测，量程范围内的分辨率为 0.08°。通过隔离的 CAN 总线接口连接伺服驱动器，实现 5 台低压直流伺服电机的驱动和状态监控，控制机器人的运动。搭载基于以太网 TCP/IP 通信的线激光测量仪完成对水冷壁的轮廓检测。选取了基恩士公司 LJ-X8000 型号的线激光测量仪，其采样频率最高 16 kHz (63 μs)，最小显示单元为 0.000 01 mm³，通过以太网把检测的水冷壁轮廓数据上传。使用 2.4 G 无线串口模块与上位机的无线电台通讯，在无遮挡情况下，通讯距离超过 2 000 m；为了克服遮挡和电磁干扰引起的通讯异常问题，控制系统设计了基于 CAN 总线的冗余有线通讯链路，其终端电阻 120 Ω，且在 500 kbps 波特率时传输距离为 140 m，通过接收信息的字节数和校验，判断通讯状态，实现稳定信号传输，满足了机器人信号通讯的要求。搭载运动相机和无线图传采集环境信息，SPI 总线连接的存储卡，进行部分重要数据的保存。此外，应用接近觉开关和蜂鸣器三色灯进行防撞保护和声光报警，机器人运行遇到障碍、电机发生错误信息、检测到异常情况时，三色灯和蜂鸣器设置相应状态，操作人员可在较远处看到机器人的异常状况。根据硬件电路连接需求，将主控制器 I/O 引脚进行分配，引脚分配如

表 1 所示。

表 1 主控制器 I/O 引脚和资源分配表

设备名称	设备引脚	STM32 引脚	资源
里程计;ID 为 1	CAN1H CAN1L	PD0 PD1	CAN1
有线通讯;ID 为 5	CAN1H CAN1L	PD0 PD1	CAN1
电机驱动器; ID 为 1,2,3,11,12	CAN2H CAN2L	PB5 PB6	CAN2
无线通讯 DTU	TXD5 RXD5 GND	PC12 PD2	UART5
激光测距仪_1	TXD2 RXD2	PD5 PD6	UART2
激光测距仪_2	TXD4 RXD4	PC10 PC11	UART4
姿态传感器	TXD3 RXD3	PB10 PB11	UART3
串口调试口	TXD1 RXD1	PA9 PA10	UART1
三色灯蜂鸣器	I/O	PG5、PG6 PG7、PG8	I/O
接近觉开关	I/O	PE0 PE1	I/O
SD 卡读写	I/O	PB12、PB13 PB14、PB15	SPI2

2.3 机载控制器软件与算法设计

控制器软件设计部分编译在 Keil 5 的环境下。依据控制需求设计 4 个应用任务包含 7 个状态，4 个任务为：初始化任务、状态采集及处理任务、PI 算法控制机器人平台位姿任务和总线通信任务。

控制系统 7 个状态及功能如图 3 所示。单片机程序以有限状态工作机运行，程序启动后从 A 到 G 依次运行，运行完 G 状态后，跳转到 B 状态，在 B 状态到 G 状态循环，中断程序根据优先级处理中断任务。

初始化任务主要完成系统的初始化工作，STM32-F407ZGT6 共有 1 MB 的 Flash 程序空间。正常的工作情况下，单片机运行烧写在前 900 kB 地址程序空间的 Flash 中的工作程序，设定后 100 kB 空间用作 Bootloader IAP 升级程序。如果检测到某种程序设定的特定条件，如某个按钮按下触发，或者串口接收到程序升级指令，程序跳转到烧写在 900~1 000 kB 地址的升级跳转程序空间中，运行 Bootloader IAP 升级程序，可通过 SD 卡或者远程以太网等办法进行程序升级。

当上位机采用 RS232 通信方式下发控制指令时，机载系统将等待 USART（通用同步异步收发传输器）的中断回调函数的触发。一旦接收到上位机的指令，

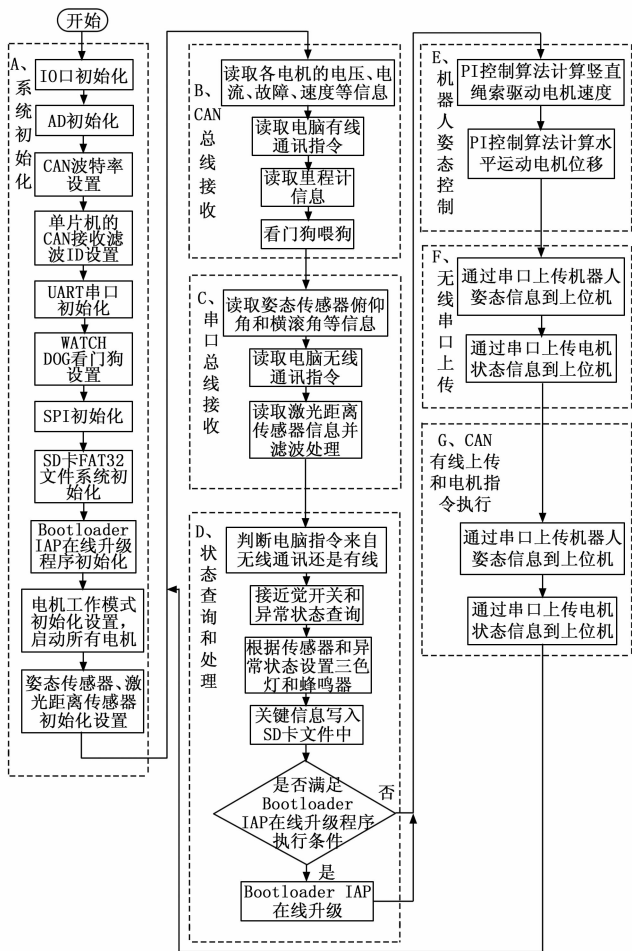


图3 机载控制系统流程图

USART接收中断被激活，并在其回调函数中通知RS232通信任务。如果RS232通信任务未处于就绪状态或未运行，系统将立刻退出中断并进行任务调度，确保RS232通信任务获得主控制器的控制权。随后，主控制器会根据预设的通信协议解析接收到的指令帧，以控制相应的设备。无线通讯采用定长通讯和CRC校验，减少了误码率。

测距传感器用作检测水平移动平台y轴方向的水平位置。通过RS485通信协议，访问测距传感器的寄存器，设置传感器每隔100ms定时上传一次距离信息。根据串口缓存的字节数，判断是否开始读取串口接收距离信息缓存。通过激光单点测距仪的反馈信息，控制水平移动平台电机的输出位置，达到控制移动平台水平方向精确移动进行位置调整的目的。

进行水冷壁轮廓信息采集时，要求机器人平台保持水平姿态，这样线激光测量仪和水冷壁就保持了相互垂直的位置关系。减速电机通过抓绳轮与绳索紧密摩擦，机器人平台通过绳索上下移动。因为多个抓绳轮与绳索的摩擦情况不一，仅通过电机的同步，无法实现机器人

平台姿态的精确控制。所以引入反馈控制，根据姿态传感器反馈信息，调整竖直绳索牵引单元的电机转速，实现机器人平台姿态的平稳控制。其中机器人平台姿态控制调整为位置环外环，位置环的比例和积分PI控制器输出作为低压伺服电机的速度环的输入，低压直流伺服电机速度环为内环。机器人平台对于姿态的稳态性能要求较高，因此位置环和速度环均采用PI控制算法，理论上可实现机器人平台的0静态误差的姿态控制。

通过RS232设置姿态传感器10ms定时上传，根据姿态传感器数据帧头0x5553、帧尾SUM和校验位判断姿态接收的数据是否完整准确。设计系统的机器人平台姿态和上下运动速度控制如图4所示，速度输入经过低通滤波，对姿态控制器输出进行限幅，防止速度环输入信号的剧烈变化，可实现机器人平台竖直方向速度和机器人姿态的多输入多输出控制。

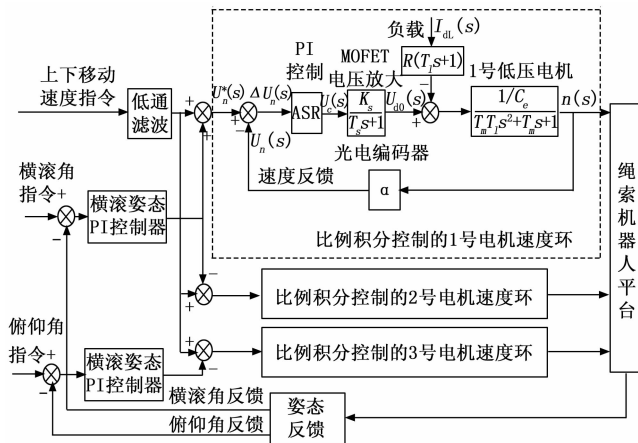


图4 机器人平台姿态和上下运动速度控制方框图

通过CAN总线控制电机转速和转动角度，采用自定义CAN总线协议，协议规定每帧数据以ID，功能码，寄存器地址，数据，每条指令的数据为1个U8功能码、1个U16寄存器地址和1个I16数据，构成一条完整的CAN通讯指令。点对点模式下，定义功能码为0x1A，正确应答功能码0x1B，错误应答功能码0x1C；一对多模式下，定义功能码为0x8A，正确应答功能码0x8B，错误应答功能码0x8C。不同的寄存器地址分别映射电机启停、闭环模式、速度给定、速度增益、位置增益、前馈增益、CAN上传报告等参数。CAN指令格式如表2所示。

表2 CAN指令格式

CAN发送指令			
从机ID	数据域		
预先设定	功能码	寄存器	数据
CAN应答指令			
从机ID	功能码	寄存器	数据

设定电机工作模式、自动上传内容、PI 等参数后启动电机，定时更新速度指令。

3 上位机设计

上位机采用了 NI 公司的 LabVIEW 集成开发环境，不仅优化了控制系统的开发流程，同时也缩短了开发周期。在设计的用户界面当中，系统提供了程序调试和机器人监控两个关键功能，提升了用户的操作体验和系统调试的效率，上位机程序结构如图 5 所示。

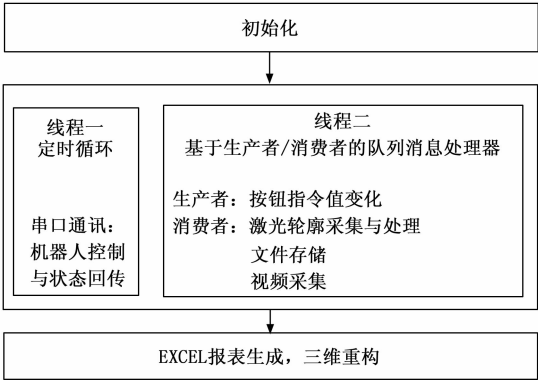


图 5 上位机程序结构框图

程序启动后，首先读取 `cfg.ini` 文件中的数据对系统变量和仪器如摇杆、串口、基恩士激光轮廓仪、摄像头等硬件进行初始化。上位机程序整体采用生产者—消费者的队列消息处理器程序框架，利用队列对不同事件进行处理。事件包含无线图传的摄像头视频采集；基恩士激光轮廓仪的水冷壁轮廓采集和处理；文件系统的数据存储；利用 LabVIEW 程序的并行处理特性，并行处理串口通讯，进行收发信息。

3.1 上位机调试界面设计

在机器人监控界面方面，该界面集合了机器人运动控制和传感器信息分析两部分子界面，运动控制子界面如图 6 左侧中间部分，包括旋钮速度输入和运动使能开关，通过摇杆或运动控制区内的虚拟按钮来实现机器人的基本运动控制，这种设计让操作员能够实时地调整机器人的行进速度，提高了操作的灵活性和便捷性，为了进一步提升系统的实用性。传感器信息分析子界面如图 6 所示，用于记录和展示机器人在不同时刻的状态和各传感器的数据，方便后续的性能分析和调试。机器人速度、里程、位姿数据信息、图像和线激光测量仪数据也能在监控显示区域中得到直观的展示。这不仅为实验提供了重要的数据支持，也为机器人的定位提供了强大的辅助。

3.2 调试界面与上位机通信协议

上位机与机载控制器之间的通信支持多种方式，包括机器人控制的 RS232 串行无线通信、CAN 通信，传

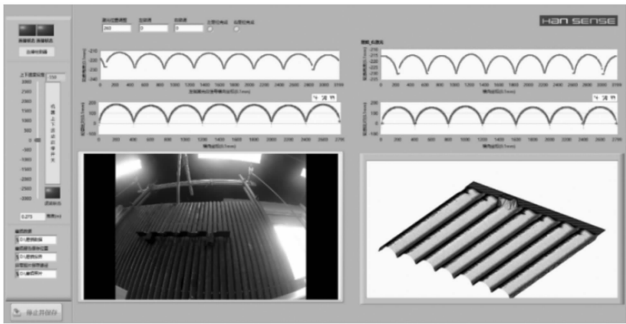


图 6 机器人监控界面

感器信息采集的以太网通信和 HDMI 图像无线采集。在这些通信方式中，无线 DTU 模块扮演着重要角色，它实现了上位机与单片机间的远程双向通信。在程序测试调试界面方面，利用 VISA 函数的强大功能，实现了串口的自动识别，极大地简化了用户配置过程。此外，用户还可以根据需要设置常见的波特率（例如 9 600、115 200），以及自定义校验位、数据位和停止位，满足不同的通信需求。该界面支持 ASCII 码和十六进制两种数据帧发送方式，为调试过程提供了极大的便利。界面的设计，包括串口设置区、数据显示区和数据发送区，这些功能区块不仅使得发送指令帧至机器人的机载控制器变得简单快捷，还能实时反映机器人的运动状态、各传感器数据以及电机的运行状态，使得调试工作更加高效和直观，指令格式如表 3 所示。

表 3 上位机串口通讯指令格式

发送指令格式				
U16	U16	U16	I16	U16
帧头 0X55FF	左侧激光水平位置指令	右侧激光水平位置指令	平台上下移动速度指令	CRC 校验
接收返回指令格式				
U16	U16	U16	I16	I32
帧头 0X66AA	左侧激光水平位置反馈	右侧激光水平位置反馈	平台上下移动速度反馈	平台上下移动位移反馈
U8				U16
机器人状态位:左侧激光定位完成标志、右侧激光定位完成标志、单片机指令正确接收握手信号标志、检测状态正常标志等				CRC 校验

该系统的设计充分考虑了用户在实际操作和调试过程中的需求，通过创建 3 个功能明确、设计周到的用户界面，为绳索牵引机器人平台的开发与维护提供了有效的支持。系统在程序调试和运动控制方面表现出了稳定性和易用性。

4 实验验证和分析

为了确保控制系统的有效性，本研究采取了分步骤的验证方法。首先，对系统中的各个功能模块进行了细

致的调试工作，以确保每个部分都能正常运行。接着，通过正确连接控制器、各种传感器以及上位机的硬件电路，对整个系统进行了全面的测试。随后，进行了上位机与下位机的系统联合调试，确保两者之间的通信和协作无误。最终，将绳索牵引水冷壁检测机器人进行了实验测试，以评估系统在实际应用场景中的表现，相关的实验过程和结果如图 7 所示，机器人测试性能参数如表 4 所示。

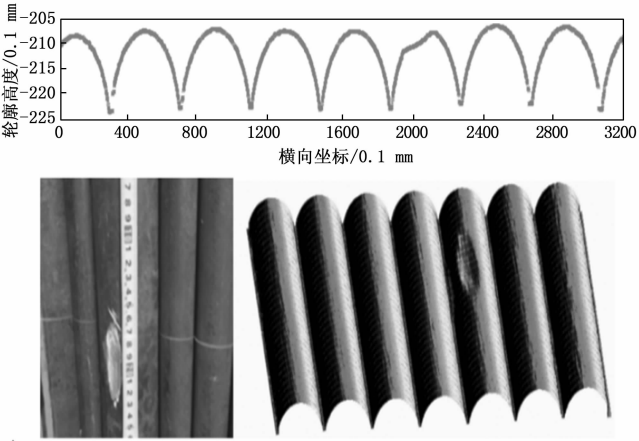


图 7 检测结果

表 4 机器人主要参数

参数	参数值	说明
绳索直径/mm	8~12	常用绳索直径
爬行速度/(m/min)	5	标称机器人工作效率
攀爬最大角度/(°)	90	适用于立面检测及作业
负载能力/kg	100	满足作业需求负载
本体质量/kg	60	设计重量
连续工作时间/h	4	24 V 30 Ah 电池供电
传输距离/m	200	适用于大部分工作

左右两侧激光轮廓仪的水平位置定位通过两个单点激光传感器实现测距。试验测试中发现，RS485 串口接收的测距传感器信息存在抖动脉冲信号，原始的距离信号中有局部的特别大或特别小的值。常用的低通或平均值滤波器无法消除这种不正常的信号。通过对距离信息数组进行大小排序，得到最大和最小值，去除最大和最小的距离信息数据后进行求和平均。距离传感器防抖滤波前后对比如图 8 所示。

处理的测距传感器信息串口缓存数量越大，处理后的距离精度越高，但同时测距传感器延时就越大，因此设置的串口缓存空间不宜过大，根据调试实际情况设置了 5 个距离信息数据的缓存。这种滤波算法很好的解决了距离误报的问题，检测延迟 0.5 s，满足系统对测距的要求。

图 4 中的 PI 控制器的传递函数为：

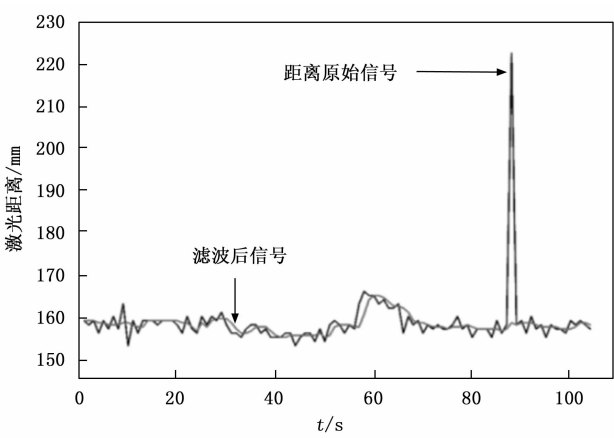


图 8 距离传感器噪声去除

$$ASR = KP \left(\frac{\tau_i s + 1}{\tau_i s} \right) = 23.31 \left(1 + \frac{14}{s} \right) \quad (1)$$

图 9 为机器人平台启动后的姿态调整过程。

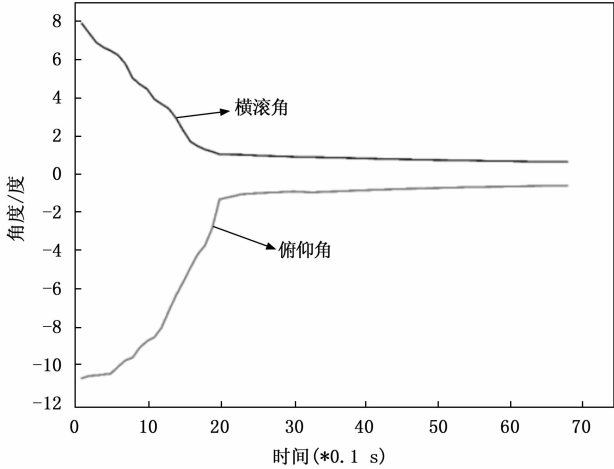


图 9 机器人启动后的姿态调整

在进行实验测试时，系统展现了良好的性能，特别是在稳定性和精确度方面。系统能够有效地完成既定的任务，展示了其设计和实现的有效性。然而，也存在一些需要改进的方面。例如，系统在极端环境下的适应性可能需要增强，以确保在不同的工作条件下都能保持高效的运行。此外，用户界面的友好性和交互设计也有提升的空间，以使用户能够更加直观、便捷地操作系统。还有，系统的能耗管理也是一个改进的方向，通过优化算法和硬件选择，进一步降低能耗，提高系统的环境适应性和经济效益。总的来说，虽然系统的基本性能已经达到了较高的标准，但通过对这些方面的改进，可以使系统更加完善，能更好地满足实际应用的需求。

5 结束语

本研究旨在满足带防磨梁的水冷壁磨损检测的需求，对机器人的控制系统进行了设计、开发和实验验证。

证。该系统的下位机核心采用了基于 ARM Cortex-M4 内核的 STM32F407 芯片,围绕核心功能需求进行了综合的硬件和软件设计。在软件方面,系统利用有限状态机进行模块化编程,这不仅提升了微控制单元资源的使用效率,还增强了对事件的实时响应能力。此外,系统采纳了总线模块化设计理念,使得根据不同的检测需求可以灵活搭载各类传感器,这样既解决了单一数据采集方式的局限,也便于系统后期的维护和功能升级。对于上位机,研究中使用了 LabVIEW 集成开发环境来设计监控终端,这大大缩短了控制系统的程序调试周期,并提高了开发效率。通过实验测试,证明了所设计的控制系统在通信可靠性、实时性、工作性能稳定性以及上位机终端控制效果方面均达到了理想的标准。

参考文献:

- [1] 赵虹,魏勇. 燃煤锅炉水冷壁烟侧高温腐蚀的机理及影响因素[J]. 动力工程, 2002 (2): 1700-1704.
- [2] KHAN A A, DE JONG W, JANSSENS P J, et al. Biomass combustion in fluidized bed boilers: potential problems and remedies [J]. Fuel Processing Technology, 2009, 90 (1): 21-50.
- [3] SADEGHI E, MARKOCSAN N, JOSHI S. Advances in corrosion-resistant thermal spray coatings for renewable energy power plants. part I: effect of composition and microstructure [J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2019, 28 (8): 1749-1788.
- [4] ASGHAR U, RAFIQ S, ANWAR A, et al. Review on the progress in emission control technologies for the abatement of CO₂, SO_x and NO_x from fuel combustion [J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2021, 9 (5): 14.
- [5] 陈鸿伟,李永华,梁化忠. 锅炉高温腐蚀实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003 (1): 168-171.
- [6] LU H M, LI Y J, MU S L, et al. Motor anomaly detection for unmanned aerial vehicles using reinforcement learning [J]. IEEE Internet of Things Journal, 2018, 5 (4): 2315-2322.
- [7] ZHOU Q, XIN L. Experimental investigation on climbing robot using rotation-flow adsorption unit [J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 105: 112-120.
- [8] LI S, CALDERON A D. Review of the current research status and constraints of wall-climbing robots [C] // Proceedings of the 2023 6th International Conference on Robotics, Control and Automation Engineering (RCAE), Suzhou, 2023: 44-49.
- [9] KOH K H, SREEKUMAR M, PONNAMBALAM S G. Hybrid electrostatic and elastomer adhesion mechanism for wall climbing robot [J]. Mechatronics, 2016, 35: 122-135.
- [10] MURPHY M P, SITTI M. Waalbot: an agile small-scale wall-climbing robot utilizing dry elastomer adhesives [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2007, 12 (3): 330-338.
- [11] LAM T L, XU Y. A flexible tree climbing robot: treebot-design and implementation [C] // Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Shanghai, 2011: 5849-5854.
- [12] XIAO Y W, LIN Q, ZHENG Y Q, et al. Model aerodynamic tests with a wire-driven parallel suspension system in low-speed wind tunnel [J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2010, 23 (4): 393-400.
- [13] 刘欣. 两种并联机器人的机构性能分析与运动控制研究[D]. 西安: 西安电子科技大学, 2009.
- [14] 姚蕊,唐晓强,李铁民,等. 大型射电望远镜馈源定位3T索牵引并联机构分析与设计[J]. 机械工程学报, 2007 (11): 105-109.
- [15] 杨铁滨. 基于机器视觉的陶瓷球表面缺陷自动检测技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [16] USAMENTIAGA R, VENEGAS P, GUEREDIAGA J, et al. Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing [J]. Sensors, 2014, 14 (7): 12305-12348.
- [17] GAO B, BAI L B, WOO W L, et al. Automatic defect identification of eddy current pulsed thermography using single channel blind source separation [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2014, 63 (4): 913-922.
- [18] EDWARDS R S, HOLMES C, FAN Y, et al. Ultrasonic detection of surface-breaking railhead defects [J]. Insight, 2008, 50 (7): 369-373.
- [19] HU Z X, ZHU H T, HU M, et al. Rail surface spalling detection based on visual saliency [J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13 (3): 505-509.
- [20] WANG S C, WANG H, ZHOU Y L, et al. Automatic laser profile recognition and fast tracking for structured light measurement using deep learning and template matching [J]. Measurement, 2021, 169: 14.
- [21] LUO Q L, CHEN Z Y, ZHANG S B, et al. Image-based rail surface defect detection of line-structured light data [C] // Proceedings of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC) - Rising Above Covid-19, Kuala Lumpur, 2023: 1-5.
- [22] WANG B, ZHONG S C, LEE T L, et al. Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: a state-of-the-art review [J]. Advances in Mechanical Engineering, 2020, 12 (4): 28.
- [23] 苏显渝,张启灿,陈文静. 结构光三维成像技术[J]. 中国激光, 2014, 41 (2): 9-18.