

轨道式巡检机器人构造与运动控制技术研究

芦建文, 郑淑霞, 刘永利, 吴海峰, 赵楠

(内蒙古新联信息产业有限公司, 内蒙古包头 014010)

摘要:机器人在工业领域有着广泛的应用场景。文章探讨了不同构造巡检机器人的优缺点以及适用场景;主要研究了自行轨道式巡检机器人的构造与运动控制等关键技术;介绍了巡检机器人的框架结构以及组成巡检机器人的主控系统、运动与行走控制装置、视觉与传感器信号采集装置、电源管理(充电装置)、无线通信系统以及辅助功能等模块及相应模块的硬件设计;研究了采用 PID 控制技术的巡检机器人的运动控制方法以及采用人工神经网络技术的巡检机器人运动控制优化方法;论述了基于 RFID 技术的巡检机器人运动轨迹检测方法;最后简要介绍了巡检机器人在工业领域的应用情况。采用文章中所述技术与方法提高了巡检机器人的运动速度与稳定性,有效优化了巡检机器人的运动过程,为巡检机器人在工业领域的应用提供了技术支持。

关键词:巡检机器人;运动控制技术;组成与结构;运动位置;PID 控制;人工神经网络

中图分类号:TD528.1

文献标识码:B

文章编号:1009-5438(2026)02-0064-06

Research on Structure and Motion Control Technology of Orbit Type Inspection Robots

Lu Jianwen, Zheng Shuxia, Liu Yongli, Wu Haifeng, Zhao Nan

(Inner Mongolia Xinlian Information Industry Co., Ltd.,
Baotou 014010, Inner Mongolia Autonomous Region, China)

Abstract: The robot has wide application scenarios in industrial field. In this article, the advantages and disadvantages and applicable scenes for inspection robots with different structures are discussed; structure and such key technologies as motion control of self-propelled orbit type inspection robot are mainly studied; frame structure, such modules of constituting inspection robot as main control system, control device of motion and walking, signal pickup assembly of vision and sensor, power management (charging device), wireless communication system and auxiliary functions and hardware design of corresponding modules are introduced; motion control method with proportion integration differentiation (PID) control technology of inspection robots and motion control optimization method of inspection robot with the technology of artificial neural network are studied; detection method of motion track for inspection robot based on radio frequency identification (RFID) technology is discussed; applications of inspection robot in industrial field are briefly introduced finally. The movement velocity and stability of inspection robot are improved so that its movement process is effectively optimized with the technologies and methods described in the paper, which could provide the technical support for applications of inspection robots in industrial field.

收稿日期:2025-06-18

基金项目:内蒙古自治区应用技术与开发资金计划资助项目(2021GG0356)

作者简介:芦建文(1969-),男,山西省朔州市人,硕士,正高级工程师,现从事计算机与自动化研究工作。

tion robot in industrial field.

Key words: inspection robot; motion control technology; composition and structure; movement position; PID control; artificial neural network

近年来,制造业对工业机器人的需求逐渐增多,尤其是冶金企业的高炉、焦炉、电缆通廊以及高压变电站等作业场景中的 3D (Dirty: 脏, Difficult: 累, Dangerous: 危险) 作业岗位,采用机器人替换岗位操作工人,执行焦炉换气设备状态检查、变电站读表和局放^[1]等巡检与基本操作任务,不仅能够有效节约人工成本,同时也可以减少人身伤害事故。执行室内巡检任务的机器人采用吊轨的方式是一个比较好的选择,既可以保证机器人的视野,又可以最大程度减少与其他设备、人员发生碰撞。吊轨的方式是在巡检作业区域架设金属轨道,巡检机器人搭载红外热成像传感器、气体传感器、音频传感器、视觉系统等多种智能感知设备^[2],下挂在轨道上,并沿着轨道自行运动行走。在运行过程中,自行轨道式巡检机器人采集巡检对象的图像、声音,测量环境温度、空气中有害气体含量等数据,在机器人本体完成图像的分析识别工作,或者将图像实时上传至后台服务器分析识别,并对设备与环境异常数据报警,从而实现设备运行状态的无人智能巡检^[3],达到在高粉尘、高温、危险等恶劣作业环境下机器人自主完成巡检任务的目的。

1 巡检机器人技术路线的选择

不同的应用场景对巡检机器人有不同的需求,不同的巡检机器人适用于不同的应用场景。研究制造成本低、性能稳定、能够适用于多种工业生产领域的自行轨道式巡检机器人有很好的前景。本文按照巡检机器人本体是否内置集成 GPU 处理器与图像分析识别处理软件,将巡检机器人分为本体即时处理图像的边缘计算服务器类巡检机器人与采集并实时上传图像的轻量化信号采集器类两种类型。

1.1 边缘计算服务器方式

边缘计算服务器类巡检机器人是在机器人本体内集成 GPU 处理器,并将图像分析模型软件下载安装至巡检机器人中,将自动巡检机器人设计成为一个能够独立完成巡检任务的边缘计算装置。在巡检过程中,由巡检装置的 GPU 处理器分析摄像机采集到的图像数据,并将分析识别结果传递回集中控制系统平台。边缘计算服务器方式的优点是设备状态

识别响应快,对网络数据上行能力要求不高,对服务器的算力要求不高;缺点是巡检装置结构复杂,机器人本体造价高,对作业环境适应性差。比较适用于环境良好的电力行业配电室等场景。

1.2 轻量化信号采集器方式

轻量化信号采集器类巡检机器人没有内置 GPU 处理器,只有自动巡检与数据采集功能。巡检过程中,巡检机器人将摄像机、红外热成像传感器、气体传感器、音频传感器等设备采集的图像与数据,通过有线或无线网络实时上传至服务器,服务器集中处理采集的各类信号。轻量化信号采集器类巡检机器人的优点是结构简单、造价低,能够适应高温、高粉尘等比较恶劣的作业环境;缺点是对网络上行速度有一定的要求,对服务器算力要求较高,对前端巡检设备数量有一定限制。比较适合运输散装物料的皮带通廊、焦炉、高炉等工业环境,具有相对广泛的适用行业与领域。

钢铁、煤炭、化工等行业是我国的基础工业,同时也是 3D 工作岗位集中的行业。本文面向环境较恶劣的巡检作业场景,研究了信号采集器类自行轨道式巡检机器人的整体硬件结构及高粉尘环境下的运动控制优化等关键技术问题。

2 巡检机器人结构组成

本文研究的自行轨道式巡检机器人本体由主控系统、巡检机器人运动与行走控制装置、视觉与传感器信号采集装置、电源管理(充电装置)、无线通信系统以及辅助功能模块组成^[4]。具备视觉感知、数据采集、运动控制、电源管理与远程通信能力,机器人本体各子系统(模块)能够高效协同完成机器人沿轨道运行过程中的视频图像、温度、有害气体等数据采集及实时上传后台服务器的任务。系统框架图如图 1 所示。

2.1 主控系统(中央控制单元)

位于自动巡检机器人系统核心位置,是所有模块的数据汇聚和指令调度中心。负责接收并处理视觉及环境参数检测模块、辅助功能模块传来的数据,下发控制命令到运动控制模块、辅助功能模块,发送系统状态、电源状态、控制响应至无线通信模块。

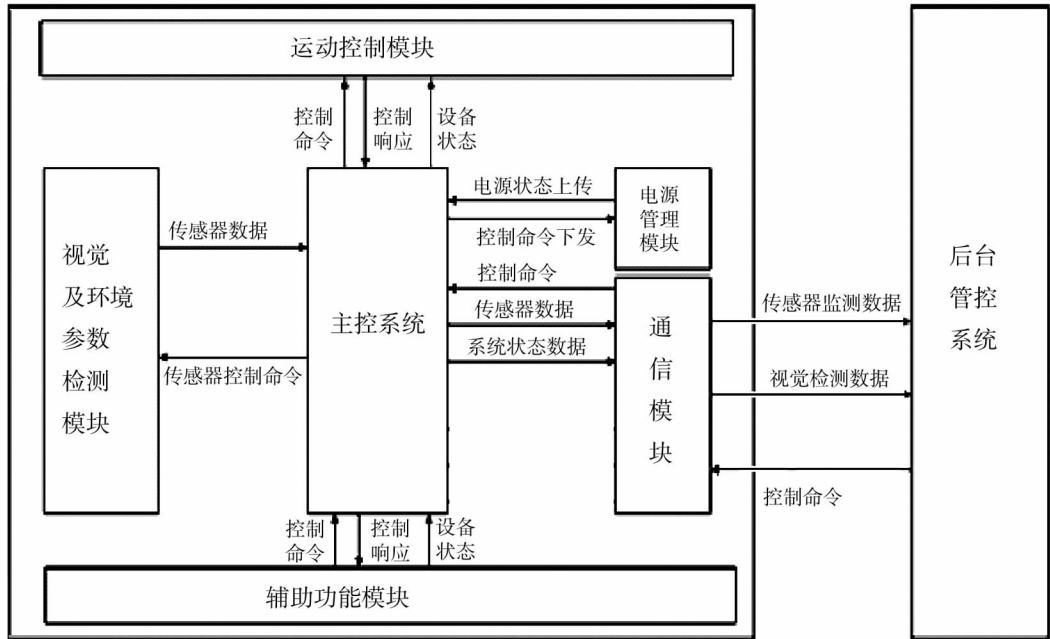


图 1 巡检机器人系统设计框图

2.2 运动控制模块

控制机器人轮组、电机等运动部件,主要职责是接收主控系统下发的运动控制命令以及回传控制响应和设备运行状态。

2.3 视觉及环境参数检测模块

包含摄像头、传感器等视觉、环境类感知装置,功能是向主控系统发送视觉及环境传感器数据,同时接收主控下发的控制命令(如拍照、启停)。

2.4 辅助功能模块

包括照明、声光报警等功能性设备,具备接收主控系统下发的任务命令、反馈执行状态和控制响应的功能。

2.5 电源管理模块

实时监控和管理整个系统的电源运行状态,向主控系统汇报电源状态(如电量、电压、报警)和接收控制指令执行供电启停、切换等动作。

2.6 无线通信模块

负责巡检机器人本体与后台管控系统之间的数据交互,向后台系统上传检测数据、系统状态,以及接收后台下发的控制命令与任务指令,向主控系统回传响应并获取状态信息。

3 巡检机器人硬件设计

按照巡检机器人结构设计,巡检机器人各功能

模块硬件分别由 ARM 主控板、云台控制板、运动控制板、通讯控制模块以及电源管理板组成,各主要模块板卡之间通过 CAN 总线、RJ45 网口及串口进行通讯,实现信息反馈与命令发送。

整体结构中,ARM 主控板负责巡检机器人整体控制管理;云台控制板负责控制云台运动,实现前端图像的采集;运动控制板承担巡检机器人滚轮组等运动系统的驱动;电源管理板负责电源的分配任务,实现对 12 V、5 V 等不同子系统的供电适配;采用 RS485 通信接口实现传感器与设备的通信,采用 CAN 总线实现高速数据稳定交换。系统通过 ARM 主控板处理视频输入输出、RS485 传感器数据输入,实现视频图像以及传感器采集的有害气体浓度、温度等环境参数以及控制命令等数据的无线传输。

3.1 巡检机器人 ARM 控制板

ARM 控制板是机器人的主控大脑,与云台板、运控板、传感器参数采集板、电源管理板等连接进行通讯,实现一氧化碳、温度等环境参数的采集和命令发送以及机器人功能的整体实现。本文研究采用轻量化数据采集式的巡检机器人,不需要内置 GPU 处理器,选择了 ROM-5780 作为控制主板。操作系统采用 Linux 的 Ubuntu。板卡的 2 路 CAN FD 能够连接 STM32 电机控制板,可用于滚轮组和云台的运动控制;MIPI-CSI 接口可以直接连接摄像头模组,实

现巡检机器人可见光摄像机与热成像仪视频信号的采集;2路千兆以太网与后台管控系统连接,能够实现实时视频、参数回传以及巡检任务命令下达等功能;4G LTE/5G 实现远程无线通信。

3.2 巡检机器人运动控制板

巡检机器人运动控制板以 STM32 芯片为核心。主要功能是作为底层实时运动控制模块,与 ARM 主板协同工作,实现巡检机器人滚轮组等运动系统的驱动,以及与云台控制板共同控制云台相机的位置调整,以达到在不同角度采集巡检对象的目的。本文设计选择了 STMicroelectronics 公司的 NUCLEO - H743ZI 运动控制板。其微控制器 MCU 为 STM32H743ZIT6 芯片,驱动芯片为 DRV8305,具有 CAN 总线,用于连接电机控制器等。能够实现巡检机器人滚轮组电机运动与云台相机角度调整等功能。

3.3 巡检机器人云台控制板

云台部分是机器人实现可见光与热成像图像采集的核心配件,主要由云台和可见光摄像机、热成像摄像机三部分组成。云台控制系统是实现云台控制的核心,主要实现控制云台旋转、接入视觉传感器及必要的辅助功能。云台控制系统设置了多种接口用于通讯,其中 2 路 RJ45 作为可见光和热成像相机的接入,4 路 IO 实现到位传感器接入,CAN 接口实现水平及俯仰电机接入。同时,为实现各设备的供电,加入电源管理电路,分别输出 DC24 V、DC12 V 和 DC5 V 电源接口。云台控制板整体通过 1 路 RJ45 网口及 1 路 DC24 V 接口与 ARM 主控板连接,实现云台控制板与机器人本体的通讯和电源接入。

3.4 巡检机器人电源管理板

电源管理模块由锂电池组和电源管理板两部分组成,其中锂电池组为机器人提供电力供给,电源管理板实现各模块、设备的电源分配,同时负责电源安全、充电控制、电能检测等功能。电源系统以单片机为核心,通过外围接口和驱动控制等电路实现状态检测、电源输出及充电过程控制信息交互等功能。通过串口通信实现与后台管控系统命令执行及状态反馈的交互。本文选择的是固定电子公司的 PMU - 3000 电源管理板。

3.5 巡检机器人无线通讯板

无线通讯板通过标准化 LAN 接口与主控板互联,为机器人提供自组网通讯方式。其无线网桥模块与外部无线 AP 进行无线桥接,构建局域网中继

链路,从而实现机器人本体与外部无线网的通讯,完成信息的交互。最终实现视频信号及传感器信号、控制命令的信息传输功能。

4 巡检机器人运动定位

对于巡检机器人定位问题,主要是利用 RFID 标签的已知位置信息去纠正电机反馈的位置信息。RFID 是一种无线射频识别技术,系统由 RFID 读取装置以及 RFID 标签组成,常规的 RFID 技术是利用射频信号的传输特性,实现对附有 RFID 标签的物体自动识别,以进行无接触式的资料辨识与存取,可实现身份及物品识别或信息存储的功能。

本文在安装巡检机器人巡检轨道时,将 RFID 标签固定在轨道吊架处,详细记录每个 RFID 标签 ID 号对应轨道起始段的真实距离信息。在机器人本体上安装了 RFID 读取器,当机器人在轨道上运行并通过 RFID 标签时,RFID 读取器感应到 RFID 标签,识别 ID 号,并获取到该标签对应的真实位置信息,后台管控系统将该实际位置信息与目标位置信息进行比较获得位置差 Δ ,将该位置差转换成电机脉冲数后即可完成对电机的进一步控制。基于位置信息的控制,主要目的是使轨道式巡检机器人能够精准的到达目标位置,这是实现精准检测的前提和基础,也是机器人运动控制的重点部分。

通过后台的管控系统给巡检机器人设定机器人巡检目标位置信息。在调试配置阶段,控制机器人低速、平稳地沿着轨道由起点运动至终点,这个过程中机器人的驱动电机反馈位置信息^[5],结合机器人后端管控系统的可视化展示,可以生成巡检机器人运行轨道电子地图,地图中的每个点都对应了电机在实际轨道中在该点的位置信息。在巡检过程中,后台管控系统通知机器人运控系统,运控系统控制电机转动相应的圈数前往目标位置,执行规定的巡检动作,如高清可见光拍照、红外热成像测温等。

5 巡检机器人运动控制与优化

本文选用 STM32F4 微控制器(MCU),采用 C 语言编程开发轨道式巡检机器人运动控制系统。通过控制电机的运动,实现机器人沿轨道自行行走巡检的目的。

5.1 运动控制模块的组成

组成巡检机器人运动控制的有 STM32F4 微控制器、电机驱动器、电机、反馈传感器以及相应的控

制算法。其中 ARM Cortex - M 核心 (STM32F4) 负责执行控制算法、处理传感器数据、做出决策、生成精确的控制信号;电机驱动器连接在 STM32 和电机之间,接收来自 STM32 的低功率控制信号,将其放大并转换为能控制电机电压/电流、方向和启停的功率信号,本文选择 DRV8305 作为电机驱动器。电机负责将电能转换为机械能,驱动轨道式巡检机器人的车轮;反馈传感器提供关于电机/车轮实际状态(速度、位置),用于实现闭环控制;运行在 STM32 上的 PID 控制算法软件,根据目标指令和传感器反馈计算所需的电机控制信号。

5.2 运动控制组件的硬件连接

将 STM32F4 的通用输入、输出引脚连接到电机

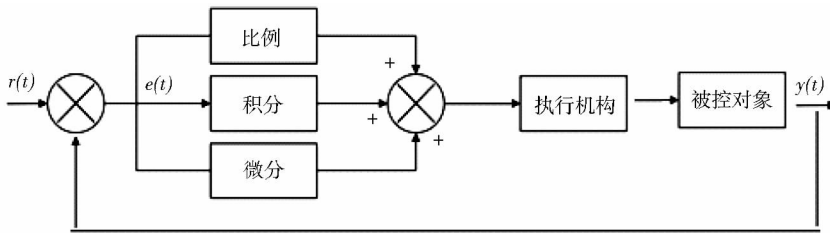


图 2 PID 原理图

由图 2 可以看出,PID 控制器即比例、积分、微分控制器,该算法以误差作为输入量,经过比例、积分、微分三项加权求和后得到输出量,具体公式如下:

$$u_i = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (1)$$

式中: u_i 为控制器的输出, k_p 为比例系数、 T_I 为积分时间常数、 T_D 为微分时间常数, $e(t)$ 为差值。

6 采用 BP 神经网络优化巡检机器人的运动控制

电机驱动系统存在非线性、时变、干扰等问题,传统的 PID 控制运动很难达到最好的控制效果,电机易失步,产生累积误差,导致机器人运行不稳定。针对自动巡检机器人运动控制,本文采用基于 BP 神经网络的模糊 PID 控制器来提升电机驱动系统的控制性能。

BP 神经网络是目前应用比较广泛的神经网络结构,具有很好的逼近非线性映射能力^[6]。BP 神经

驱动器的控制引脚,定时器连接到电机驱动器的 PWM 输入引脚,控制电机转速;将 STM32 通信接口连接到编码器;将电机驱动器的输出连接到电机绕组;最后连接上电源。就可以实现 MCU 控制电机的转动。

5.3 运动控制的软件

软件主要完成外设的初始化、传感器数据读取与处理、PID 运动控制算法以及与中央调度系统通信的功能开发。通过以上功能,实现接收后台管控系统下达的巡检任务,驱动电机按照巡检任务下达的速度、目标位置等参数实现自行巡检。

在驱动控制方面,机器人驱动主要采用 PID 算法实现对电机的运动控制,如图 2 所示。

网络算法分为正向传播和反向传播两部分。BP 神经网络的结构如图 3 所示。BP - PID 控制器是在传统 PID 的基础上再加入 BP 神经网络,在这个控制器中,PID 的作用是实现对被控对象的闭环控制,BP 神经网络是为了实现对 PID 参数的在线调节,如图 4 所示。

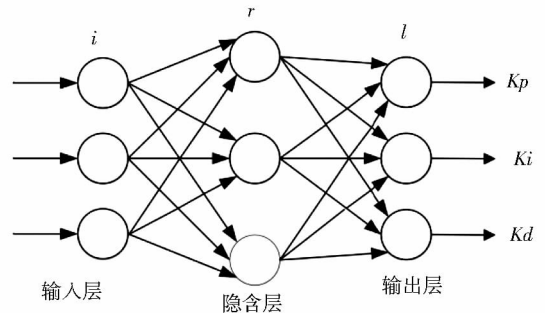


图 3 BP 神经网络结构图

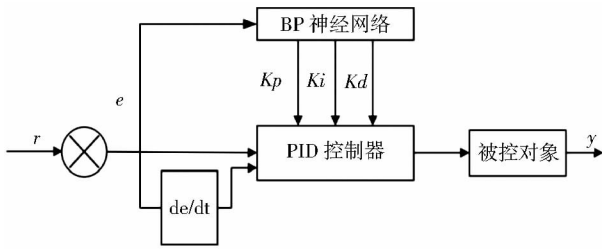


图4 BP神经网络控制器结构图

确定BP网络的结构,确定输入层的节点数 M 、隐含层节点数 Q ,给出各层加权系数 ω_{ij} 和 ω_{li} ,选定学习速率 η 和 α 为惯性系数;采样得到输入和输出,计算此时的误差值error;计算神经网络各层神经元的输入、输出,输出层的输出就是PID控制器的三个参数;根据PID控制器计算系统的输出 $u(k)$;进行神经网络的学习,在线调整加权系数,实现PID控制器的自适应调整。

7 结束语

本文研制的自行轨道式巡检机器人已经在钢铁企业的焦炉地下室、变电站等工业场景上线运行。自行轨道式巡检机器人在作业过程中能够克服焦炉煤气交换区域的高粉尘、高温等影响,呈现出稳定运行、故障率低等特点。巡检机器人在变电站与焦炉巡检作业过程中,能够按照指定的时间、速度完成巡检任务,并且能准确地定位焦炉换气盖板、变电站表盘等巡检对象,满足了工业化应用的要求。

巡检机器人的上线运行,有效地避免了巡检作业人员长期或频繁进入高危、高温区域,降低了人员的工作强度,改善了现场作业人员的工作环境,达到了危险作业区3D岗位机器人换人的目的,取得了良好的效果,具有较高的社会与经济效益。本文研究的自行轨道式巡检机器人造价低,场景适应性强,能够满足不同的巡检要求,具有较高的实用价值,在冶金、煤化工、矿山等领域具有极强的推广应用价值。

参考文献

- [1] 李新海,徐宝军,肖星,等. 变电站挂轨机器人智能巡检系统技术研究[J]. 电气传动,2021,51(19):43-49.
- [2] 张晖,廖俊蓉,付建美,等. 隧道智能巡检机器人应用研究[J]. 科技创新与生产力,2022,43(9):98-100,104.
- [3] 田雨洁,王中昊,徐锦,等. 小型城市轨道智能巡检机器人机械结构设计研究[J]. 电子制作,2020(22):81-82,44.
- [4] 芦建文,王宏,代东明,等. 焦炉换气设备智能巡检系统的研究[J]. 洁净煤技术,2021,27(2):392-396.
- [5] 芦建文,郑淑霞,吴海峰. 复合机器人工业搬运系统的研究与应用[J]. 包钢科技,2023,49(4):73-76.
- [6] 芦建文,赵楠. 声音识别技术在设备故障检测中的应用研究[J]. 包钢科技,2022,48(3):86-89.

(上接第46页)

参考文献

- [1] 史术华,脱臣德,梁文洲,等. 显微组织对460 MPa级特厚海工钢强韧性的影响[J]. 金属热处理,2025,50(10):45-53.
- [2] 阎军,苏琦,许琦,等. 海洋工程典型装备智能化研究进展[J]. 科技导报,2024,42(13):16-26.
- [3] 曹胜利,张庆军,张彩军. 焊接热输入对EH420海工钢热影响区组织和性能的影响[J]. 中国冶金,2025,35(4):58-66,90.
- [4] 罗登,朱拓,高海亮,等. 控制轧制对直接淬火EH500海工钢的组织与性能影响[J]. 钢铁,2025,60(3):104-116.
- [5] 宋继强,白学飞,马林,等. 厚规格海工钢组织调控与力学性能研究[J]. 轧钢,2025,42(2):115-121.
- [6] 李家安,赵坦,李文斌,等. 开冷温度对420 MPa级海洋工程用钢延伸性能的影响[J]. 轧钢,2024,41(3):21-28.
- [7] 郭随华. 中国建材总院科技在行动:“十三五”国家重点研发计划“海洋工程高抗蚀水泥基材料关键技术”项目进展与阶段成果介绍[J]. 中国建材,2018(10):124-126.
- [8] 李红涛. 新兴海洋工程装备发展动向[J]. 中国船检,2024(9):43-48.