

变电站巡检机器人系统设计与实现

郑伶俐

(福建(泉州)哈工大工程技术研究院,福建 泉州 362008)

摘要:针对已投入使用的变电站设备布局紧密,仪器朝向不一的智能化巡检问题,设计一种变电站巡检机器人系统。系统本体采用基于六轴机械臂的复合式结构,极大地提高了检测的灵活性;提出激光雷达和二维码导航融合的复合导航方式,在保证精度的前提下提高了导航系统的稳定性;利用视觉算法进行智能识别,开发远程监控中心进行智能监控。实际测试应用表明:该系统具有较高的精度和灵活性,整体运行效果有效可靠。

关键词:变电站;巡检机器人;机械臂;复合导航;远程监控

中图分类号:TP242.3 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2023)02-0162-04

Design and Implementation of Substation Inspection Robot System

ZHENG Lingjun

(Fujian(Quanzhou) HIT Research Institute of Engineering and Technology, Quanzhou 362008, China)

Abstract: To reduce the disturbance to intelligent inspection of in-service substation equipment due to tight layout with diversely directed instruments, a substation inspection robot system is designed. The system body adopts a composite structure based on a six-axis robotic arm, which greatly improves the flexibility of detection. A composite navigation method combining lidar and two-dimensional code navigation is proposed, which enhances the stability of the navigation system under the premise of ensuring accuracy. The visual algorithm is used for intelligent recognition, and the remote monitoring center is developed for intelligent monitoring. The actual test application shows that the system has high precision and flexibility, and its overall operation effect is effective and reliable.

Keywords: substation; inspection robot; robotic arm; composite navigation; remote monitoring

0 引言

在电力行业中,变电站是其重要的组成部分,对保证变电站设备的正常运行至关重要^[1]。目前变电站巡检主要采用人工巡检的方式,存在巡检强度大,巡检查看不便,巡检人员易发生漏检、误检等情况,且部分巡检工作环境恶劣,易对工作人员造成一定危害。采用智能巡检机器人对变电站进行巡检,可以克服和弥补人工巡检的缺陷和不足,是变电站巡检的发展趋势^[2]。

在工业 4.0 和智能电网的方针引导下,变电站巡检机器人的研究得到快速发展。文献[3]提出一种可升降式变电站室内巡检机器人,其采用轮式结构配套升降云台进行巡检;文献[4]提出一种挂轨式巡检机器人,采用轨道式结构和升降云台设计,解决了变电站狭小空间设备检测问题;文献[5]提出一种全向四驱变电站巡检机器人,采用四驱轮式设计,提高了巡检机器人的越障性。

由当前巡检机器人的研究现状可知,变电站巡检机器人以轨道式和轮式为主。轨道式巡检机器人可按巡检点设置相应轨道路线,可适应大部分狭小空间检测问题,但存在轨道铺设费用高、轨道铺设后难以增加轨道外检测点、检测灵活性不足等问题,同时,如果待检变电站已建好投入使用,铺设轨道要改变现有基建情况,这是不允许的。

轮式巡检机器人无需对变电站基建进行改变,具有机动灵活的优点,但由于待检变电站设备布局紧密、检测空间狭小、仪表部件朝向不一、分布区域较大,在这种环境下,要求巡检机器人检测调节机构具有较高的自由度和空间可达域,显然传统的升降云台检测调节机构难以满足;同时要求巡检机器人导航具有较高的精度,而传统的变电站轮式巡检机器人多使用单导航模式,如采用基于激光雷达的导航方式,激光雷达导航可对特定不变的场景进行导航定位,是常用的导航方式,但激光导航方式存在定位精度不足的问题且对于狭小空间有一定的局限性;采用基于二维码识别的导航方式或磁轨式的导航方式虽然精度较高,但需在所行驶路径预先铺设二维码或磁轨,当导航路线有人走动时,易被损坏或移动,造成导航失败。

基于上述问题,本文设计一种变电站巡检机器人系统。系统采用灵活性更高的轮式底盘加六轴机械臂的结构形式,并设计能兼顾精度和稳定性的复合导航方式实现对已投入使用、存在空间狭小的变电站的智能巡检。

1 系统需求分析及技术指标

1.1 系统需求分析

根据对变电站的现场勘察,现场情况如下:

1)室内环境,变电站已投入使用,不可对基建进行二次施工;

2)设备具有高电压,不可触碰;设备交错布置,布局紧密,仪表部件朝向不一,高度分布在0.5 m~2.8 m之间;

3)现场主干道大部分宽约1.4 m,最窄处宽约0.8 m,高度最低处高约1.8 m;分支路段最窄处约0.7 m;地面高低不平,障碍高度低于10 mm,现场坡度低于3°。

根据对变电站的巡检需求分析,巡检系统主要功能需求如下:

1)待检测设备约150个,主要包括压力表、避雷针表、分合开关、指示灯、旋钮、压板等;

2)现场主干道有运维人员往来,需确保人员安全,巡检机器人需具备自动避障能力;

3)具备移动灵活能力,可自动定位,能适应现场环境;

4)具备较长续航能力和自动充电功能;

5)具备远程监控功能,巡检机器人可实时与远程监控中心数据交互。

1.2 系统主要技术指标

根据变电站现场需求,巡检机器人设计的主要技术指标如表1所示。

表1 系统主要技术指标

类别	指标
机械参数	外形尺寸(750×590×1 650) mm 质量:180 kg 机械臂自由度:6自由度 机械臂工作半径:1 350 mm
运动参数	最大移动速度:0.75 m/s 爬坡角度:3° 越障/跨越:10 mm/10 mm 定位精度:±10 mm
电气参数	电池电压与容量:48 V,60 Ah 充电/续航时间:4 h/8 h
视觉摄像机参数	分辨率:1 920×1 080 变焦倍数:30

2 系统设计

系统主要由巡检机器人、充电桩、远程监控中心组成。巡检机器人与远程监控中心通过无线局域网连接,可实时通信,系统组成如图1所示。

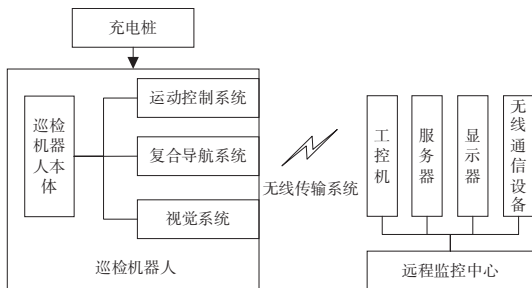


图1 巡检机器人系统组成图

2.1 巡检机器人本体

根据现场环境特点,巡检机器人采用地面走行动力底盘加6轴机械臂结构形式,其外形如图2所示。其中,动力底盘采用双轮差速设计,底板采用钢板一体加工,精度高且稳定;驱动轮系左右对称布置,驱动电机采用200 W直流伺服电机,并配1:50减速器,车轮直径250 mm,设计速度可达0.75 m/s,动力底盘外形结构如图3所示;6轴机械臂采用遨博i10协作机器人,机器人重复定位精度±0.03 mm,末端负载10 kg,工作半径1 350 mm,可实现工作域内多种位姿的调整。

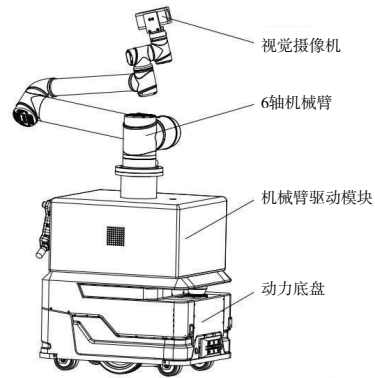


图2 机器人整体结构图

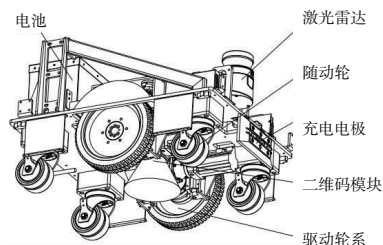


图3 机器人动力底盘主要结构图

2.2 运动控制系统

运动控制系统主要由STM32主板、工控机、驱动轮电机模块、机械臂模块、12路超声波模块、陀螺仪模块、库仑计模块、红外接收板、指示灯条等组成,其系统组成如图4所示。

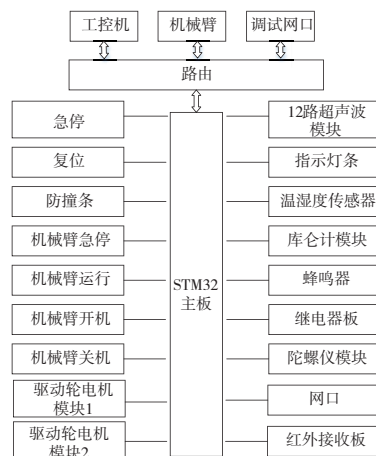


图4 运动控制系统组成

运动控制系统主要实现巡检机器人的运动控制,其工作流程如图 5 所示。

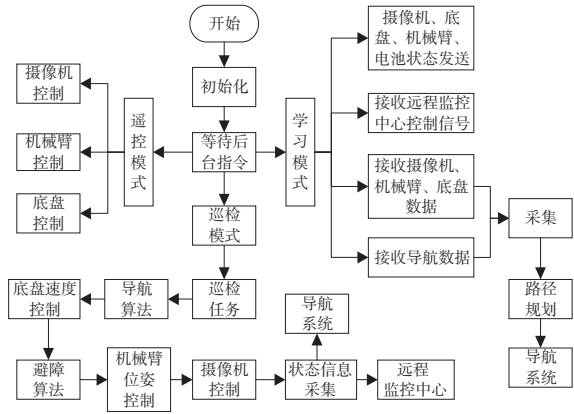


图 5 运动控制系统工作流程示意

同时为提高走行速度及位置的控制精度和响应速度,驱动轮控制采用增量式 PID 算法进行^[6],极大地保证了控制的可靠性;令 $A = k_p + k_i + k_d$, $B = k_p + 2k_d$, $C = k_d$, E 为允差,其控制流程如图 6 所示。

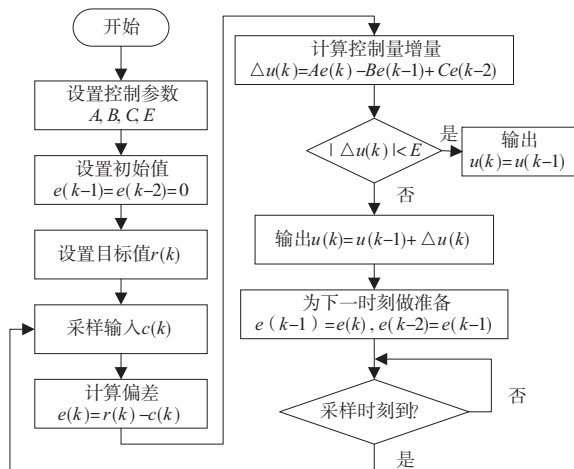


图 6 增量式 PID 控制流程图

2.3 复合导航系统

根据现场的特点,考虑运维人员走动的情况和系统检测有较高的定位精度需求,导航系统采用激光自主导航加二维码导航的复合方式进行;在狭小路段或有高精度定位要求的位置采用二维码导航,其他地方则采用激光自主导航,通过两种导航方式互补的方法保证系统的精度和可靠性。复合导航系统控制流程如图 7 所示。其中激光自主导航采用 SICK 公司的 LMS111 系列激光雷达,二维码导航采用倍加福公司的 PGV100-F200A-R4 系列二维码模块。

2.4 视觉系统

为进一步提高巡检机器人的可视视野,扩大检测范围,巡检机器人视觉检测选用海康威视 DS-2ZCN 系列可见光摄像机,其像素达 300 万,分辨率为 1 920×1 080,光

学倍数达 30 倍,具备自动调焦功能,可对检测对象进行高清摄像。

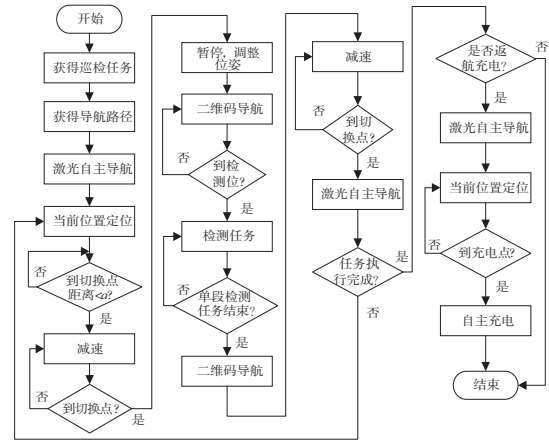


图 7 复合导航系统控制流程图

现场检测内容主要包含指针式仪表、数显式仪表、分合开关、指示灯、旋钮开关、压板等的状态检测。针对不同的检测对象,往往需要选择不同的视觉检测算法^[7-8]。视觉检测算法检测流程包含图像预处理、目标识别定位、目标状态识别(仪表读数或开关分合状态识别)等。以指针仪表检测为例,巡检机器人的视觉检测流程如图 8 所示。

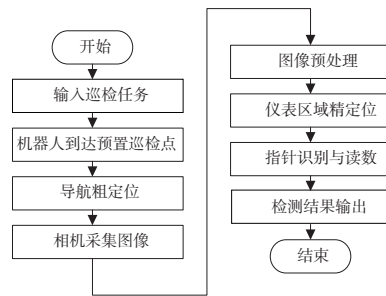


图 8 指针仪表检测流程图

2.5 远程监控中心

远程监控中心主要包括工控机、服务器、显示器、无线通信设备、监控软件等。远程监控中心软件采用 C++ 语言开发,软件界面如图 9 所示。

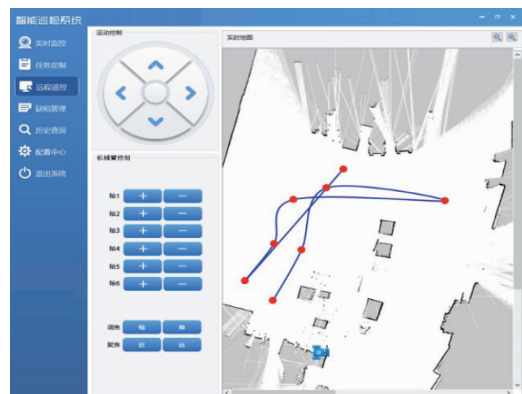


图 9 远程监控中心软件界面

远程监控中心主要有以下功能模块:

- 1) 远程遥控模块可以远程遥控巡检机器人进行各种动作,包括动力底盘移动、6轴机械臂位姿调整、摄像机调焦等;
- 2) 任务定制模块可设定巡检内容各参数信息,支持多巡检任务定制;
- 3) 缺陷管理模块能够记录巡检机器人巡检过程中的数据异常信息,并可生成异常报表;
- 4) 历史查询模块可查询的数据包括图片信息、视频信息、检测报表等多项数据;
- 5) 实时监控模块可将采集的检测对象状态数据及巡检机器人状态数据实时显示在界面窗口上,便于管理人员

实时掌握巡检状态;

- 6) 配置中心模块可配置巡检机器人的相关参数,包括报警上下限阈值、报警级别、用户信息、智能检测算法及参数等。

3 测试应用

巡检机器人走行功能在入现场前进行测试,其他功能在入现场后进行测试,测试应用主要包括以下方面:

- 1) 巡检机器人走行功能测试:入现场前主要对其速度、越障能力、爬坡能力等关键性能进行测试,测试结果如表 2 所示。

表 2 走行功能测试表

测试项目	测试步骤	测试结果
最大速度	① 选空旷水泥地面,长度约 40m,在 10m 处标记为记录点 1,在 30m 处标记为记录点 2 ② 机器人从 0m 处加速至最大速度并保持,记录下其经过记录点 1 和记录点 2 的时间 ③ 测试 5 次,取平均速度	最大速度 0.77 m/s
爬坡测试	① 使用长 3m,宽 1m 的平板,一端接触地面,一端通过垫块调节高度,并用数显水平尺测量,调节坡度从 0° 逐步增加,每次增加量为 1° ② 每次测试时,将机器人置于平板下端,控制其开到上端 ③ 每种坡度,重复测试 3 次,均成功则满足	最大爬坡能力 7°,满足爬坡能力 ≥ 3° 要求
跨越测试	① 准备长 1m,宽 1m,厚度 10mm 平板两块 ② 用 60mm 垫块将两平板垫离地面,调节两平板间距,从 10mm 开始,先每次 10mm 增加间距并测试,直到跨越失败时,以最后成功间距为基础,再每次 2mm 增加间距直至跨越失败 ③ 将机器人置于一平板上,控制其开到另一平板上,每种间距测试 3 次,均通过则满足	最大可跨过 58mm 宽沟槽,满足跨过 10mm 宽沟槽要求
越障测试	① 准备长 1m,宽 50mm,厚度分别为 10mm、5mm、2mm、1mm 平板各 3 块 ② 从 10mm 开始测试,每次增加 1mm,测试时平板两侧固定 ③ 测试时将机器人置于平板一侧,控制其越过平板,每种高度测试 3 次,均通过则满足	最大可越过 21mm 高障碍,满足越障 10mm 高要求

2) 巡检机器人导航精度测试:如表 3 所示,在现场建图完成后对导航精度进行测试,测试结果导航精度

为 ±8 mm,可满足巡检精度的要求。

表 3 复合导航精度测试表

测试项目	测试步骤	测试结果
复合导航精度	① 在检测点和狭小路段贴上二维码,二维码采用 5×5 矩阵码,两码间隔 0.6m ② 根据现场环境建图;在车身上用指针贴纸标记检测位 ③ 在激光自主导航段选取 3 处直线位置(宽度分别 1.4m、1.3m、1.2m 各 1 处)和 2 处 90° 转弯位置,用刻度贴纸做好标记 ④ 在二维码导航段选择压力表检测位、指示灯检测位、压板检测位和宽 0.7m 狭小路段各 1 处,用刻度贴纸做好标记 ⑤ 分别以 0.3m/s、0.7m/s 速度巡检,并在标记点停止,重复测试 5 次,记录各处误差	① 激光自主导航段精度 ±25 mm;② 二维码导航段精度 ±8 mm

3) 系统适用性和稳定性测试:在变电站现场进行为期 30d 的现场测试应用,测试期间巡检机器人在现场各路段和检测点运行与采集数据,现场测试图如图 10 所示。

现场测试情况如表 4 所示。结果表明,整个系统的适用性和稳定性满足巡检要求。



图 10 现场测试图

(下转第 188 页)

- 2020,26(12):3302-3312.
- [6] 汤兆平,余时钧,宫素萍,等. 基于优先权的铁路多事故点应急资源调度多目标优化研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2022,41(1):29-37.
- [7] 孙子文,叶乔. 利用震荡环频率特性提取多位可靠信息熵的物理不可克隆函数研究[J]. 电子与信息学报,2021,43(1):234-241.
- [8] 刘剑锋,孙力帆,普杰信,等. 基于刚性约束的双移动机器人协同定位[J]. 电子学报,2020,48(9):1777-1785.
- [9] 刘香香,孙凤. 基于蚁群算法的装配式建筑施工工序多目标优化模型[J]. 土木工程与管理学报,2021,38(3):113-118.
- [10] 张飞,石琴,陈一锴,等. 基于敏感性分析的悬架多目标优化函数构建方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2020,43(1):14-19,25.
- [11] 高源,方丽,薛贵香. 建筑生命周期碳排放评价函数多目标优化算法[J]. 计算机仿真,2021,38(2):240-243,405.
- [12] 冯芬玲,石昕. 基于 Heston 模型和遗传算法优化的铁路货运期权定价模型[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(5):1295-1301.
- [13] 杨练兵,郑宏伟,罗格平,等. 基于遗传算法优化 BP 神经网络的土壤盐渍化反演[J]. 地理与地理信息科学,2021,37(2):12-21,37.

收稿日期:2022-04-08

(上接第 165 页)

表 4 系统适用性和稳定性测试表

测试项目	测试内容	测试结果
底盘通过性能	分别以 0.1 m/s、0.4 m/s、0.7 m/s 速度测试底盘通过性;通过性包括底盘爬坡、跨越、越障等能力	底盘通过性满足现场要求
狭小空间通过性	按正常巡检速度巡检,记录现场 0.7 m~0.8 m 宽度处车身与障碍的间距	间距保持 35 mm 以上
电池续航	将电池充满电后测试续航,测试 3 次取平均值	续航 9 h
工作空间	在各检测点利用六轴机械臂和摄像机配合,检测目标	满足高度 0.5 m~2.8 m 目标的检测
视觉算法	检测视觉图片 9 650 张	准确率 95.2%
监控中心功能	测试监控中心各功能	满足使用要求

4 结语

本文根据变电站现场特点,设计了轮式底盘加六轴机械臂的结构形式,增加了检测机构的运动空间和姿态调节角度,有效地解决了现场狭小空间的检测问题;设计了基于任务的运动控制策略并配套增量式 PID 控制算法,保证了运动控制的精度;提出了激光自主导航加二维码导航的复合导航方式,在特定位置使用二维码导航,其他位置使用激光自主导航,充分利用了二维码导航的精度,并有效地减少了大量贴码的工作量和二维码被移动风险;进一步地进行视觉系统设计,实现对检测对象的分类识别;进行远程监控中心设计,通过实时与巡检机器人信息交互,保障了整个系统的稳定运行。

通过现场的实际测试应用,结果表明:系统各项指标符合预期,可有效地对现场特有环境进行智能巡检,提高了变电站的巡检效率、巡检质量和智能化水平,具有良好应用推广前景。

参考文献:

- [1] 彭向阳,金亮,王锐,等. 变电站机器人智能巡检技术及应用效果[J]. 高压电器,2019,55(4):223-232.
- [2] 黄山,吴振升,任志刚,等. 电力智能巡检机器人研究综述[J]. 电测与仪表,2020,57(2):26-38.
- [3] 姚楚阳,刘爽. 一种可升降式变电站室内巡检机器人控制系统设计[J]. 华东理工大学学报(自然科学版),2021,47(1):116-122.
- [4] 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.
- [5] 李荣,栾贻青,王海鹏,等. 全向四驱变电站巡检机器人运动控制系统设计[J]. 机床与液压,2020,48(8):112-116.
- [6] 朱嵘涛,武洪涛. 基于增量式 PID 算法的直流电机调速系统[J]. 仪表技术与传感器,2017(7):121-126.
- [7] 张柯,朱永宏,陆进宇,等. 一种基于机器视觉的水表检定装置的研制[J]. 机械制造与自动化,2020,49(2):225-228.
- [8] 李记花,李鹤喜,李威龙. 一种改进的卷积神经网络的数显仪表识别方法[J]. 计算机科学与应用,2021(2):257-265.

收稿日期:2022-04-13