

DOI:10.19344/j.cnki.issn1671-5276.2025.03.042

升压站挂轨式巡检机器人系统研究

杨天,李志军,张平,方政

(华电电力科学研究院有限公司,浙江 杭州 310013)

摘要:介绍一种挂轨式巡检机器人的控制和监测系统。机器人控制系统以 STM32 微控制器为核心,实时采集电机编码器、轨道限位器、避障传感器等信息,实现准确定位、安全和高效地运行;机器人还可以搭载红外相机、可见光相机、局放放电等监测设备,对升压站内电气设备状态进行监测。利用巡检机器人对站内关键场所和场所内的关键设备进行巡检,能够实现全天候数据快速采集、实时信息传输、智能分析预警、快速决策反馈,有效加强升压站运维管理能力,实现可靠生产与精益管理;还可以节约人力成本,保障人身安全。巡检机器人系统有效改变了传统的设备运维方式,提高了智能化管理水平。

关键词:电力系统;巡检设备;人工智能;巡检机器人

中图分类号:TP242 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2025)03-0216-06

Research on Rail-mounted Inspection Robot System in Substation

YANG Tian, LI Zhijun, ZHANG Ping, FANG Zheng

(Huadian Electric Power Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310013, China)

Abstract: This paper introduces a rail-mounted inspection robot control system. With STM32 microcontroller as the core, informations concerning motor encoder, track limiter, obstacle avoidance sensor are acquired in real time to achieve accurate positioning and safe and highly efficient operation. The robots are equipped with monitoring equipments such as infrared cameras, visible light cameras and partial dischargers to monitor the electrical equipments in substation, where the inspection robots are applied to inspect the key equipments at critical locations on site. The proposed system can realize all-weather rapid data collection, real-time information transmission, intelligent analysis and early warning and quick decision feedback, which not only effectively enhances the operation and maintenance performance of the substation and achieves reliable production and lean management, but also saves labor costs and ensures personal safety. The system makes significant change to the traditional mode of equipment operation and maintenance, and upgrades intelligent management level.

Keywords: power system; inspection equipment; artificial intelligence; inspection robot

0 引言

升压站挂轨式巡检机器人系统是一种应用于电力系统中的智能化巡检设备,旨在解决传统人工巡检方式存在的劳动强度大、工作效率低和安全隐患多等问题^[1]。随着智能电网建设的推广与应用,升压站面临着新的挑战,如何适应新形势下的电网运行成为亟待解决的问题^[2]。

为弥补传统巡检方式的缺陷,研究人员提出了利用机器人进行升压站设备巡检的方案^[3]。巡检机器人通过自动化的作业手段,可以满足升压站新形势下的需求^[4],提高巡检效率,减轻人工巡检的压力^[5]。然而,目前市场上的巡检机器人存在巡检效率不高、导航灵活性较差和避障不及时等问题^[6]。

为了解决这些问题,本文研制出了一种挂轨式巡检机器人控制系统。该系统以 STM32 微控制器为核心,通过轨道和运动机构实现对升压站设备的巡检。在软件上对导航、定位、刹车和避障算法进行了优化,通过远程监控实现机器人的安全、高效作业。该系统在实际运行中表现良好,能够精准地到达指定位置,并且具有较高的巡检效率和工作质量。

1 巡检机器人系统功能方案设计

升压站挂轨式巡检机器人系统是一种以 STM32F103ZET6 微处理器为核心的智能化巡检系统。该系统具备数据采集、自主巡检、信息交互、导航定位、防碰撞、自检、控制和报警功能;可通过摄像机、热红外成像仪和音频设备采集图像、

基金项目:中国华电科技项目(31-SHGS/HD-FXRJ-2023-DKZX01)

第一作者简介:杨天(1992—),男,河南南阳人,工程师,研究方向为电气设备故障诊断、高电压绝缘,yatian281@163.com。

2.2 运动控制模块

```

graph LR
    subgraph Inputs
        A[数据查询与统计]
        B[实时监视与分析]
        C[安全防护与报警]
        D[巡检任务与管理]
        E[数据采集与分析]
    end
    subgraph MainController [主控制器]
        MC[ ]
    end
    subgraph Outputs
        F[软件配置与设置]
        G[远程通信与网络]
        H[图像处理与识别]
        I[遥控与自主控制]
        J[数据采集与分析]
    end
    A --- MC
    B --- MC
    C --- MC
    D --- MC
    E --- MC
    MC --- F
    MC --- G
    MC --- H
    MC --- I
    MC --- J
  
```

图1 巡检机器人系统功能架构图

2 巡检机器人系统机械特性

2.1 机械结构模块

图3 微控制器与电机驱动器接口电路

2.3 控制算法

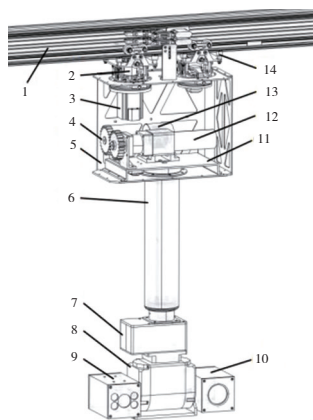
在脉冲计数转换方法中,对编码器的脉冲信号进行计数^[11],且采用连续多次测量的方式,将单位时间内的脉冲数进行累加,得到一段时间内的脉冲数和^[12]。根据脉冲数和的大小和方向,可以计算出机器人当前的运行速度和位置,如式(1)和式(2)所示。

$$s_y = \frac{l_{s,y} \cdot P_y}{4\,000} \quad (1)$$

$$v_y = \frac{l_{s,y}}{4\,000} \cdot \sum_{n=1}^{50} (p_{y,n} - p_{y,n-1}) \quad (2)$$

式中: P_y 为垂直增量式编码器的脉冲输出总量^[13]; $l_{s,y}$ 为垂直电机旋转 1 周对应巡检机器人的实际垂直升降路程, mm; s_y 为巡检机器人实际垂直升降路程, mm; $p_{y,n}$ 为第 n 次单位采样周期内的垂直编码器脉数, n 为整数; $p_{y,n-1}$ 为第 $n-1$ 次单位采样周期内的垂直编码器脉数, n 为整数; v_y 为巡检机器人实际垂直升降速度, mm/s。

位置速度双环串级调控是通过增量式 PID 控制算法实现的^[14]。在巡检机器人的控制系统中,位置环被设定为外环,速度环被设定为内环,其控制系统框图如图 4 所示。



1—三级滑触线;2—联轴器等;3—步进电机;4—齿轮;
5—机架;6—伸缩套管;7—传感采样盒;8—云台;
9—可见光摄像机;10—红外摄影仪;11—安装底板;
12—步进电机;13—绕线轮;14—限位轮。

图 2 巡检机器人机械结构图

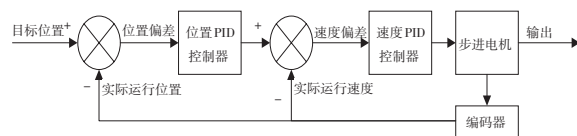


图4 位置速度双环串级调控框图

增量式 PID 控制是一种通过对控制量的增量进行 PID 控制的算法^[15]。控制量的增量 Δu 是连续两个采样时刻的输出值 u 和 $u(n-1)$ 之差。系统采用恒定采样周期进行增量式 PID 计算,在确定比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 后,根据前后 3 次测量的偏差 e 、 $e(n-1)$ 和 $e(n-2)$,可以计算出控制增量 Δu 。根据增量的大小和方向,就可以实现对机器人位置和速度的控制。

2.4 限位检测模块

升压站挂轨式巡检机器人在水平方向上的限位检测主要依赖微型光电传感器;在垂直方向上主要依赖激光测距传感器。在导轨的两个末端都安装有端帽,以阻挡机器人滑出导轨而损坏,限位电路如图 5 所示。

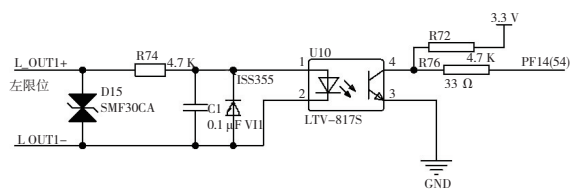


图5 限位检测电路图

当机器人移动到轨道的起始或终点限制位置时,光电传感器被触发,此时微控制器发出制动指令,及时制止机器人继续行进。同时,机器人的底部配备了激光雷达传感器 SKP40。该传感器可以照射到局放盒上层板,通过检测激光雷达传感器与局放盒上层板的距离,机器人可以判断是否到达了垂直限位位置,确保机器人在巡检过程中不会超出规定的范围。

2.5 运行灯带、风扇等控制模块

机器人本体控制部分的散热功能,主要是通过安装在两侧的工业风扇模块来实现,确保机器人控制部分工作在正常的温度区间内,避免过热导致系统故障或损坏。运行灯带可显示红色、绿色、黄色 3 种颜色,分别提示机器人处于故障、正常、告警等运行工况。上述灯带、风扇等模块通过 MOSFET 管作为硬开关进行控制,如图 6 所示。

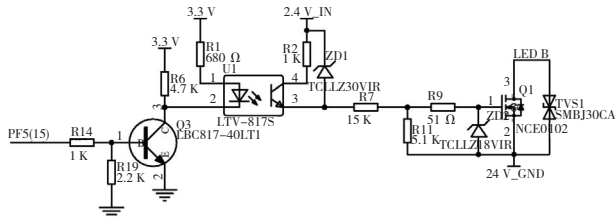


图6 灯带/风扇控制电路图

3 巡检机器人系统软件设计

3.1 自主导航定位软件设计

升压站挂轨式巡检机器人的自动导航定位是指机器人能够自主进行导航和定位,以实现自动化的巡检任务,确保机器人能够准确地沿着预定的轨道进行移动,并在需要时能够精确定位到指定的位置,其流程如图 7 所示。

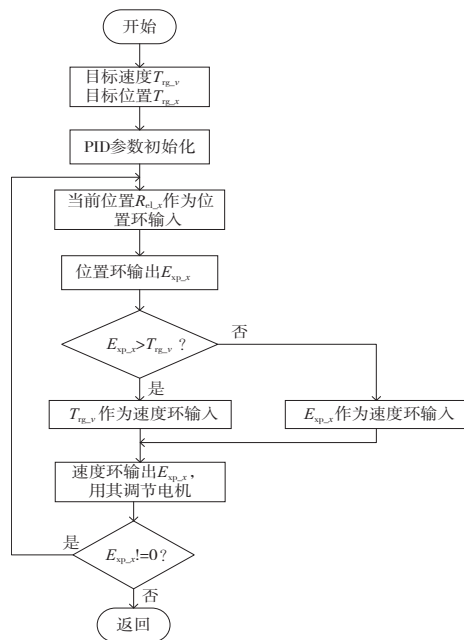


图7 巡检机器人定位导航流程图

系统主要通过 PID 算法进行位置的导航,初始化完成后,将当前的位置 $R_{e,l,x}$ 作为位置输入,通过位置和速度差值比较的方法,不断地更新地图和位置信息,实现机器人的自主导航和定位^[16]。

3.2 图像识别

升压站挂轨式巡检机器人可以自动完成表计数据的读取工作,并将结果自动生成巡视报表。机器人通过自身搭载的高清可见光摄像机,配合全向旋转云台,实时捕捉表计设备的高清图像,采用智能识别技术对图像数据进行算法处理,可实

现对站所内指针类、数字类、行程类、分合指示类等所有表计的自动识别功能。相对于人工巡检,巡检机器人系统具有全天候运行、对恶劣环境的适应性更强和避免人为因素的影响等优势,系统流程如图 8 所示。

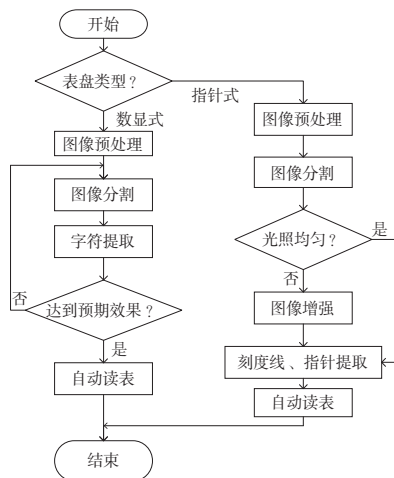


图 8 图像识别流程图

数显式和指针式仪表采用不同智能识别算法。当采集到数显式仪表图像后,首先要对图像进行倾斜校正,简化图像数据,除去腐蚀、膨胀等不相关结构,再将图像分割为背景和目标两部分,即二值化处理^[17],然后提取图像特征(如形状、颜色和亮度等)和定位分割,就可以提取到数字特征,最后采用最小二乘支持向量机(LSSVM)算法识别读数^[18]。当采集到指针式仪表图像后,通过灰度化和二值化标记出表盘刻度线和指针的连通域,找准表盘中心圆的圆心,根据连通域提取指针并细化,然后对刻度线和表盘数字进行分割,利用基于深度学习的卷积神经网络 Faster-RCNN 算法^[19]识别表盘刻度值,结合刻度线的处理和刻度值的确定,计算出分度值。

3.3 远程通信与控制

机器人巡检平台和控制系统之间采用无线网桥或电力线载波的通信方式^[20],构建起稳定的数据传输通道。这一通道确保了机器人控制系统与外部网络的高效互联。机器人控制系统内部,采用以太网或 RS485 通信协议^[21],对平台上的各类传感设备实施精确控制,如图 9 所示(本刊为黑白印刷,相关疑问请咨询作者)。

4 巡检机器人系统测试

4.1 定位导航测试

为验证增量式 PID 位置速度双闭环控制算法

及整定参数的应用效果,对巡检机器人水平和垂直方向运动进行测试。

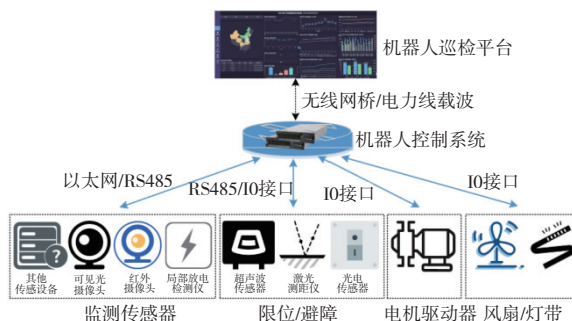


图 9 机器人系统通信/控制拓扑图

水平方向:目标位置为水平原点+1 000 cm 处,机器人分别以 10 cm/s、20 cm/s、30 cm/s、40 cm/s 的速度从原点向目标运动,速度、位置时间变化曲线如图 10 所示。

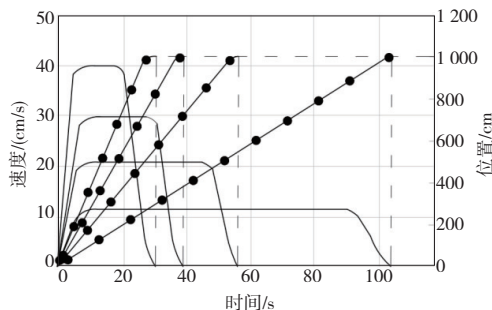


图 10 水平移动时速度、位置随时间变化的曲线

垂直方向:目标位置为垂直原点-260 cm 处,机器人分别以 3 cm/s、5 cm/s、7 cm/s、10 cm/s 的速度从初始位向目标运动,曲线如图 11 所示。

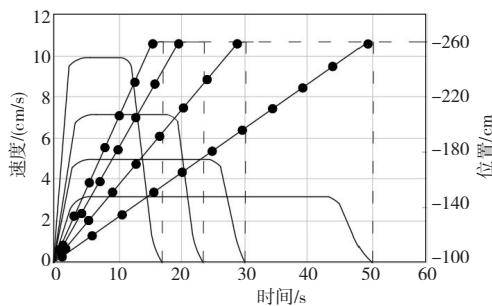


图 11 垂直移动时速度、位置随时间变化的曲线

从运动特性曲线可知,水平和垂直运动均有启动加速、匀速运行、制动减速三阶段,调速性能良好,可防止电机堵转、失步和超步,使机器人平稳运行,满足系统稳定性和可靠性要求。

分别对不同的被控水平速度和被控垂直速度进行 20 次测试,测试结果如表 1 所示。测试结果

表明,巡检机器人能以设定的目标速度朝着目标位置移动,加速用时和减速用时均符合巡检机器人系统的要求。

表 1 被控水平速度和被控垂直速度的测试结果

测试项目	目标速度/(cm/s)	平均加速用时/s	平均减速用时/s	平均速度/(cm/s)	结论
水平速度	10	4.30	6.25	10.004	达标
	20	4.65	6.65	20.011	
	30	5.15	6.90	29.975	
	40	5.40	7.15	40.027	
垂直速度	3	3.50	4.55	3.002	达标
	5	3.85	5.20	5.009	
	7	4.20	5.75	6.993	
	10	4.45	6.45	9.998	

分别对被控水平位置和被控垂直位置进行 20 次测试,测试结果如表 2 所示。测试结果表明,巡检机器人的水平定位精度和垂直定位精度均符合系统的要求。

表 2 被控水平位置和被控垂直位置的测试结果

测试项目	目标位置/cm	停止位置范围/cm	平均绝对误差/mm	平均相对误差/%	结论
水平	1 000	999.80~1 000.17	1.3	0.01	达标
垂直	-260	-260.91~-259.10	0.6	0.03	达标

表 4 图像识别漏识率的测试结果

样本总数/张	无效样本数/张	漏识样本数/张		正常样本数/张		漏识率/%	
		指针式	数显式	指针式	数显式	指针式	数显式
736	17	12	6	398	303	2.93	1.94

由表 4 可知,该图像识别算法在仪表定位与分割方面具有较好的鲁棒性^[22],可以较好地适应光照环境、拍摄角度和光学变倍等因素带来的影响。

5 结语

本文介绍了升压站挂轨式巡检机器人的设计与实现,系统以 STM32 微控制器为核心,集成了

4.2 避障测试

为了测试巡检机器人突遇远距离障碍物时的反应,人为在巡检机器人运动的前方 100 cm 处放置一个障碍物,然后令巡检机器人朝着该方向运动,记录巡检机器人从遇到障碍物到停止运动的相关数据,循环操作 5 次后得到的测试结果如表 3 所示。

表 3 巡检机器人突遇远距离障碍物的测试结果

测试序号	实际报警距离/cm	报警距离误差/cm	停机用时/s	制动距离/cm	结论
1	102.79	2.79	5.08	9.40	达标
2	99.92	-0.08	5.21	9.20	达标
3	101.66	1.66	4.88	8.28	达标
4	103.14	3.14	5.26	8.71	达标
5	98.66	-1.34	5.10	8.25	达标

测试结果表明:巡检机器人突遇远距离障碍物时,能及时探测出障碍物的位置并制动。另外,其在突遇近距离障碍物时,也能立即紧急停止,符合系统对于安全性和可靠性的要求。

4.3 图像识别测试

测试图像样本库中共有 736 张样本图像,其中无效样本图像 17 张,指针式仪表样本图像 410 张(包括正确识别和漏识别),数显式仪表样本图像 309 张(包括正确识别和漏识别)。对测试图像样本库中的样本图像进行图像识别测试,并将识别结果进行分类和统计,得到图像识别漏识率的测试结果如表 4 所示。

可见光摄像机、红外摄像仪、局放检测仪和拾音器装置等设备,并通过局域网与监控中心建立连接,实现了升压站室内设备的遥控或自主巡检。实际运行结果表明,该控制系统在导航、定位、刹车和避障方面表现良好,能够安全、稳定、高效地对升压站室内设备进行全覆盖巡检。同时,巡检机器人的应用也极大程度上减轻了人工巡检的压力,提高了升压站的自动化水平。

• 221 •