

# 变电站服务机器人控制系统设计

王德玉 佘松宜 钟翔

(四川大学电气信息学院 成都 610065)

**摘要:** 为了提高变电站工作人员倒闸操作效率,降低人力成本,减少误操作引起的电力事故,研制了一款服务机器人。机器人本地端基于 Android 系统开发,将操作票程序化,采用一种新型扫码定位方式,并设计自适应模糊 PID 控制器,改善电机调速性能,提高机器人行驶过程的稳定性;远程端基于 LabVIEW 控制,对现场进行实时监控。经投入运行,该服务机器人有助于提升工作效率,减少电力事故,促进电网智能化发展,具有一定的应用前景。

**关键词:** 倒闸操作;服务机器人;自适应模糊 PID;Android; LabVIEW

**中图分类号:** TN219;TP242.2 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Design of service robot control system for substation

Wang Deyu Dian Songyi Zhong Xiang

(Institute of Electrical Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to improve the operational efficiency of the substation staff switching, reduce labor costs and reduce the power accident caused by misuse, developed a service robot. The robot local side is based on Android software, combined with operation ticket tasks and an innovative positioning method based on scan code, making sure that it can accurately reach the appropriate workplace and assist staff complete switching operation. The paper takes fuzzy PID control algorithm to ensure the robot run along the predetermined path. Staff can monitor the actual state on remote terminal, which is based on LabVIEW software. After put into operation, the service robot can help to improve work efficiency, reduce power accidents, promote the intelligent development of the power grid, and it has huge application prospects

**Keywords:** switching operation; service robot; fuzzy PID; Android; LabVIEW

## 1 引言

变电站服务机器人属于典型的特征移动机器人,由于其灵活的控制运行方式、不受天气因素影响等优点,逐渐在无人值班或少人值守变电站等方面起到重要作用,是国内外机器人领域的研究热点。

国内在智能机器人用于提高变电站智能化水平方面已有较多的研究。在国内服务机器人实现中,集成了可见光摄像机、红外热成像仪等多种传感器,采用磁导导航定位等许多关键技术,为智能变电站的稳定运行提供保障。目前,电力相关的机器人在高压线路检修、变电站设备巡检等领域应用广泛<sup>[1-2]</sup>,在执行倒闸操作任务这一块,仍遵循传统操作票模式,操作票出票繁琐复杂,需要多人进行监督、操作,始终未能程序化运行。该模式有许多不足,如人力运作成本高、效率低下;设备器件种类多,不易区分;操作员操作失误率高并易导致设备损坏,严重时会发生电力事故。

本文分析传统倒闸操作模式的不足,以提高操作效率,降低电力系统人力成本,避免过多误操作为目的,研制一款变电站倒闸操作机器人,以协助操作人员倒闸操作,为了进一步提高机器人工作效率,设计模糊 PID 控制器,有效提高机器人行驶速度与扫码精度。该机器人集成了嵌入式系统、自动化、人机交互以及智能控制技术。实验证明,机器人能快速平稳运行,可靠性高。

## 2 整体结构设计

经实际考察某变电所地形,在 10 kV 开关室设备区、控制室内有多个需要执行操作的线路,每次拟出的操作票执行顺序也不固定。因此,机器人如何自主行驶到各个线路设备处是整个系统设计的关键。

针对这一问题,提出一种基于扫码定位的倒闸服务机器人解决方案。机器人整体结构如图 1 所示。

机器人主体由履带驱动移动平台、人机交互平台、语音

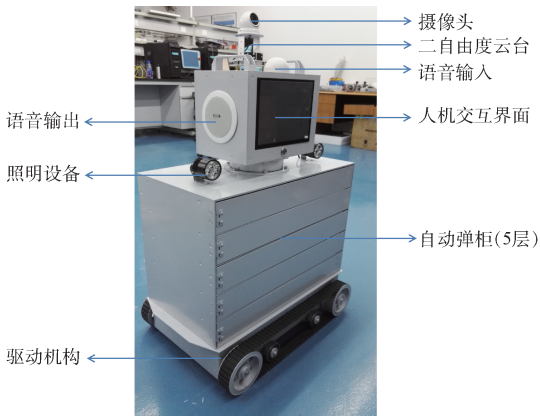


图1 机器人本体机构

交互装置、智能弹柜装置以及二自由度云台摄像头等组成。

### 2.1 移动平台设计

移动平台以 32 bit 的 STM32F103RCT6 芯片作为主控制器,该芯片有强大的数据运算能力,能够进行高精度的数据采集和数据处理。

机器人选用履带式底盘配合大扭矩电机以增大牵引力,两边的主动轮分别由两个直流无刷电机驱动,每个电机带有型号为 56GP168B14D-57BL2460C 的减速器,减速比为 168,通过差速的模式控制机器人转向。

在底层驱动机构的前面装有型号为 YHD-M100 的一维激光扫描条码器,用于扫描引导线和条形码以完成路径定位。

### 2.2 人机互动平台设计

人机交互平台选用 Cotex-A8 系列飞凌 OK335XD 开发板,基于 ARM335X 处理器,运行主频高达 1 G,搭载 Android 操作系统。选用 Android 嵌入式系统并进行功能模块化设计开发,保证系统功能的稳定以及后期维护升级。系统内置的 SQLite 数据库操作简单,可本地端导入、查看、修改操作票,方便了工作人员对操作票数据的管理。

### 2.3 智能弹柜装置

在实际倒闸操作中,操作线路设备的工器具种类较多,运行人员若未能把操作用具放在正确的间隔中,并携带操作工具进入带电间隔,造成误操作,引发恶性事故。为避免工作人员误使用工器具,提高工作专注度,该服务机器人还设计了智能弹柜设备,通过智能式可控储物柜电磁锁弹,柜门可受机器人控制系统的控制自动弹开。

### 2.4 语音交互装置

为严格规范倒闸操作行为,在单人工作时,机器人提供语音唱票,语音识别等功能。每次执行一个操作之前,语音提示装置会详细提示所需执行的操作票任务,而操作人员也需要复诵操作任务,语音识别复诵正确后才会打开对应工具柜门。采用与开发板匹配的非特定人声语音识别模块,该语音模块为 ASR MO8-A,有 TTL 串口,支持 5~12

或 3.3 V 固定电源供电。

### 2.5 电源系统

机器人采用可充电 24V 20Ah 的大容量动力锂电池组,对驱动电机、主板等其他硬件装备负责供电。电量检测模块实时监测当前电池电量,当电池电量过低时提示操作人员进行充电。当机器人系统接收到充电指令时,按照指定路线回到充电点,通过无线充电技术对电池进行充电。

## 3 服务机器人的导航定位问题

目前变电站相关机器人的导航定位有激光、电磁感应巡线、轨道方式等方式,在本文中的倒闸服务机器人的导航定位问题包括如何准确跟踪路径引导线、如何正确停在线路设备旁。

结合现场环境和倒闸服务操作任务,使用一维激光扫码装置完成机器人导航定位功能。同以往巡线所用的多个红外激光扫描器不同,使用一维激光扫描器无需考虑装置的个数、摆放结构位置对扫描精度造成的影响,仅改变黑色引导线宽度或者扫描装置震动频率就可以实现扫描精读的切换。此外,一维激光扫描装置还可以扫描条形码信息,考虑到每项倒闸操作任务都有与对应的线路设备,因此在每个线路旁贴上条形码,将操作票任务和条形码信息关联,这样倒闸服务机器人就可以识别要操作的线路,实现其定位功能。

在 SQLite 数据库的操作票数据表中添加 code 属性,每条任务的 code 值对应其操作线路的条码。在机器人工作前,将操作票任务数据导入到本地端 SQLite 数据库中。点击机器人启动按钮,在机器人行驶过程中,不断检测路面引导线信息并进行位置调整。当检测装置扫取到线路条码,在主控模块的线程中进行一次逻辑判断:当下一次任务 code 与扫描条码一致时,机器人识别出设备并停止。

## 4 控制系统的设计

### 4.1 硬件设计

服务机器人为一机构复杂的电气及机械系统,如图 3 所示,机器人控制系统主要由运动控制模块、主控制模块组成。运动控制模块以 STM32 为控制板,通过串口 232 和 485 接收检测装置反馈的位置信息以及对履带电机发送控制信息。其主控制器是 Cotex-A8 的 OK335XD 系列开发板,通过 I/O、IIC、USB 等串口和外接设备进行交互通信。电源模块给开发板进行供电。

图 3 中,主控模块搭载 Android 操作系统,外接多个功能模块,要通过应用程序控制底层外接硬件设备或者检测模块状态信息,都涉及到对底层硬件进行控制以及串口通信的处理,Android 是基于 Linux 的操作系统,对特定串口控制需要用 C 实现其相关读写、控制,然后通过 JNI 技术<sup>[3]</sup>使 java 调用 C 编写的代码,实现特定的功能。

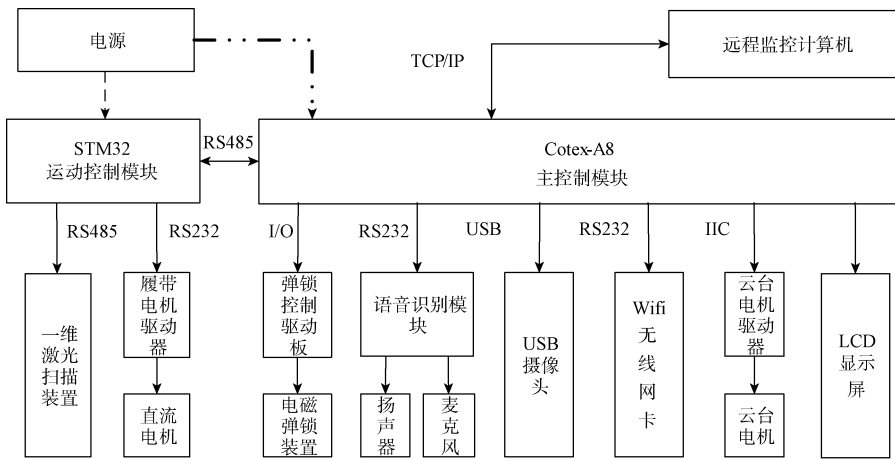


图 3 硬件结构设计

#### 4.2 软件设计

机器人的软件设计主要包括 PC 端监控软件、移动平台定位控制程序设计、Android 平台软件设计。机器人循迹及定位程序开发于 VC++ 环境下,由 keil4-MDK 编译。Android 人机交互及控制软件开发基于 Eclipse 平台,并安装 java 开发工具包 JDK、运行环境 JRE 以及 Android 软件开发包 Android SDK 和 ADT 插件<sup>[4-6]</sup>。PC 端是基于 LabVIEW 软件进行监控界面的设计。

该服务机器人软件程序设计以操作票任务作为其主线,机器人的定位、语音唱票、柜门智能弹开等功能都以此为基准。软件部分流程如图 4 所示。

服务机器人的工作流程如下:首先打开电源开关,工作人员在机器人本地端将要执行的操作票任务数据导入 SQLite 数据库中,然后点击开始按钮,机器人开始工作。该机器人底部移动平台上装有一维激光扫描装置,该装置用于检测跟踪地面引导线并反馈机器人位置信息。当机器人行驶过程中扫描到条码信息就进行判断,如果扫描的信息和将要执行的线路 code 值相同,机器人停止前进,并对工作人员进行操作语音指示、监控以及智能提供对应操作的工具。PC 端监控人员则可根据摄像头传输的视频对本地端进行监控。

为解决远程监控的配置和操作的稳定性问题,在 PC 端通过 LabVIEW 进行软件开发,将 PC 端作为服务器,服务器端系统与机器人客户端的远程数据传输主要利用 Remote Panel 技术,在 LabVIEW 中通过使用 TCP 节点实现基于 TCP/IP 协议的局域网通信<sup>[6-9]</sup>。

在设计倒闸服务机器人系统上配置 WiFi 模块,USB 摄像头采集的视频通过 WiFi 模块传给远程 PC 控制终端。云台控制采用 TCP/IP 技术,通过一个独立线程对云台实现远程调节控制。上位机利用无线网卡通过 Socket 发送数据到 WiFi 模块,通过控制模块执行相关操作。其监控画面如图 5 所示。

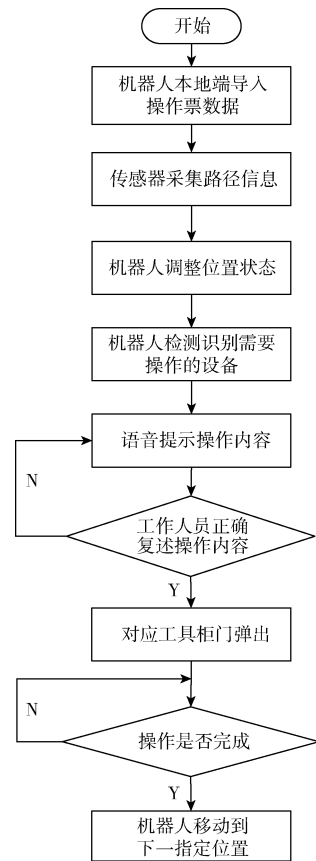


图 4 服务机器人控制程序流程

基于此,可实现上下行控制以及双向的通信,远程控制室内监控人员可以实时了解机器人周围情况以及工作人员的操作情况,并发送指令实现交互式操作。

#### 5 机器人电机调速系统的优化

为了保证机器人的跟随引导线,并能在引导线上准确识别条码信息,需要对其跟随精读有较高要求。传统的定



图5 监控画面图

参数PID方法控制电机转速虽然可以提高电机响应速度,但会出现超调现象,转速控制性能上难以保证,这也直接导致机器人行进过程中会扫描不到条码信息甚至偏出引导线。

为解决响应速度、超调等问题,在PID控制的基础上,结合专家经验设计的模糊规则<sup>[10]</sup>,对直流电机控制系统进行了仿真研究,并对PID控制和模糊PID控制仿真结果进行对比分析。

模糊PID控制在PID控制的基础上,通过不断对误差 $e$ 和误差变化率 $ec$ 的状态进行判断,根据模糊控制规则来对 $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 三个参数进行在线修改,以保证被控对象有良好的动态性能。

### 5.1 模糊化

控制器以偏差 $e$ 和偏差变化率 $ec$ 作为输入,以修正后的 $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 为输出。将 $e/ec$ 的模糊论域取为 $[-5, 5]$ ,  $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 的各自论域为 $[-2.2]$ 。本文对于输入和输出语言变量均设定为 $\{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB\}$ 。

### 5.2 模糊控制规则表

模糊规则是模糊控制的核心,生成模糊控制规则的方法大体有两种:一种是根据操作人员或专家对系统进行实际的操作经验和知识,归纳总结得出;另一种是对系统进行测试实验,从分析输入-输出数据中,归纳总结得出。表1是 $\Delta K_P$ 的模糊控制规则。

表1  $\Delta K_P$  模糊控制规则表

| $e/ec$ | NB | NM | NS | ZO | PS | PM | PB |
|--------|----|----|----|----|----|----|----|
| NB     | PB | PB | PM | PM | PS | ZO | ZO |
| NM     | PB | PB | PM | PS | PS | ZO | NS |
| NS     | PM | PM | PM | PS | PS | NS | NS |
| ZO     | PM | PM | PS | ZO | PS | NS | NS |
| PS     | PS | PS | ZO | NS | PS | NS | NS |
| PM     | PS | ZO | NS | NS | PS | NB | NB |
| PB     | PS | ZO | NM | NM | NM | NB | NB |

### 5.3 输出参数控制论域的确定

在建立 $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 论域时,在PID控制器基础上,通过固定其中两组参数,调整需要确定的参数,利用连续型随机变量的正态分布曲线确定整个输出变量的论域范围。

### 5.4 清晰化

通过清晰化将模糊推理出的集合转化为清晰的数值。本文采用“面积平分法”,设论域 $U$ 上 $F$ 集合 $A$ 的隶属函数为 $A(u)$ ,  $u \in U$ 。设隶属函数曲线和横坐标包围区域的面积平分线对应的横坐标为 $u_i$ , 设 $u \in [a, b]$ , 则 $u_i$ 的取值可由下式算出:

$$\int_a^{u_i} A(u) du = \int_{u_i}^b A(u) du = \frac{1}{2} \int_a^b A(u) du \quad (1)$$

由此可得出模糊控制的精确量 $\{e, ec\}$ , 代入下式计算:

$$\begin{aligned} K_P &= K_{P0} + K_1 \{e, ec\}_P; \\ K_I &= K_{I0} + K_2 \{e, ec\}_I; \\ K_D &= K_{D0} + K_3 \{e, ec\}_D \end{aligned} \quad (2)$$

式中: $K_{P0}$ 、 $K_{I0}$ 、 $K_{D0}$ 为3个参数值的初始值, $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 为 $\{e, ec\}_P$ 、 $\{e, ec\}_I$ 、 $\{e, ec\}_D$ 的比例系数。

在运行过程中,系统不断检测误差和误差变换率,将两个变量代入模糊控制规则表中,得到 $\Delta K_P$ 、 $\Delta K_I$ 、 $\Delta K_D$ 的模糊集,再进行清晰化,将模糊集量化成清晰量,进而完成 $K_P$ 、 $K_I$ 、 $K_D$ 三个参数的调整。

### 5.5 仿真结果及分析

基于MATLAB对直流电机建立速度环模糊控制仿真,图6所示为系统在采用传统PID控制和模糊PID控制下电机转速响应曲线,由此可以比较两种方法转速控制性能的差异。

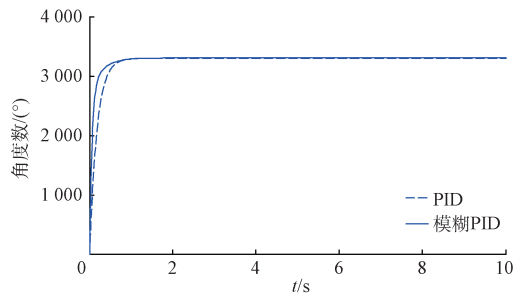


图6 电机转速控制仿真

## 6 结 论

该倒闸服务机器人自投入试运行以来,能够持续稳定运行,减轻作业人员工作强度,有效减少误操作、误入间隔等操作事故,大大提高倒闸操作的可靠性,为保障城市电网安全、工业生产起到了较好的促进作用。而该服务机器人的成功运行,进一步推进变电站的智能化、信息化发展,一定程度上推进了智能电网的建设进程。

(下转第22页)