

# 高压带电作业双臂机器人系统设计

王康<sup>1</sup>, 刘亮<sup>1</sup>, 李慧杰<sup>1</sup>, 余志森<sup>1</sup>, 龙飞<sup>1</sup>,  
蒋鑫<sup>1</sup>, 陈双叶<sup>2</sup>, 白劲松<sup>2</sup>, 田悦谷<sup>2</sup>

(1. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045;

2. 北京工业大学人工智能与自动化学院, 北京 100124)

**摘要:** 传统带电作业采用人工方式, 但高空、高压危险作业环境与高劳动强度对作业人员人身安全构成一定威胁; 针对 10 kV 配电网带电作业的实际需求, 采用 12 米高液压升降平台和两台协作型六轴机械臂, 设计开发了双臂六轴机器人系统; 采用 ARM 嵌入式处理器, 设计开发了双臂机器人控制器硬件和软件, 根据实际作业应用需求, 给出了机械臂运动路径规划方法, 通过 WiFi 无线通讯方式和 SOCKET 编程实现了对双臂机器人的现场操作控制, 采用 LoRa 无线通讯网络, 设计开发了 LoRa 主站模块和 LoRa 专用工具模块, 采用 LoRa 定点扫描通讯方式, 实现了各工具模块和机器人控制器的相互通讯; 在某培训实验基地 10 kV 配电线路上, 对带电作业机器人系统进行了现场实验, 验证了剥皮、接引流线等各项设计功能, 机器人从接收到剥皮指令开始到剥皮作业完成, 整个过程用时 3 分 20 秒; 完成接引流线作业全程用时 2 分 50 秒。

**关键词:** 10 kV 配电网; 带电作业; 双臂机器人

## Design of Dual-arm Robot System for High Voltage Power Live Working

WANG Kang<sup>1</sup>, LIU Liang<sup>1</sup>, LI Huijie<sup>1</sup>, YU Zhisen<sup>1</sup>, LONG Fei<sup>1</sup>,  
JIANG Xin<sup>1</sup>, CHENG Shuangye<sup>2</sup>, BAI Jinsong<sup>2</sup>, TIAN Yuegu<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China;

2. School of Artificial Intelligence and Automation, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

**Abstract:** Traditional live working adopts in manual mode, but the environments of high altitude, high voltage hazardous working and high labor intensity have a certain threat to the personal safety of operators. Aimed at the actual requirement of live working in 10 kV distribution network, a dual-arm six-axis robot system is designed and developed using a 12 meters high hydraulic lifting platform and two cooperative six-axis mechanical arms. ARM embedded processor is used to develop the hardware and software of the dual arm robot controller. According to the actual operation application requirements, the path planning method of the manipulator is given. The field operation control of the dual arm robot is realized through WiFi wireless communication mode and SOCKET programming. LoRa wireless communication network is used to develop the LoRa master station module and LoRa special tool module. LoRa fixed-point scanning communication mode is adopted to realize the communication between each tool module and robot controller. On the 10 kV power distribution line of certain training and experimental base, the live working robot system was tested on the spot, and various design functions such as peeling and connecting drain lines were verified. The whole process took 3 minutes and 20 seconds from the beginning of the robot receiving the peeling command to the completion of the peeling operation; It took 2 minutes and 50 seconds to complete the whole process of connecting the drainage line.

**Keywords:** 10 kV distribution network; live working; double arm robot

## 0 引言

为保障国民经济和社会持续发展, 提高配电网的供电能力和供电可靠性, 对高压配电网带电作业检修提出了更高的要求。一方面要求电力部门提高检修效率, 减少电力故障带来的损失, 另一方面也要努力降低电力检修成本、减轻检修人员的劳动强度, 更重要是要保障检修人员的生命安全, 防止高压、高空、高劳动强度带来的伤亡事故<sup>[1-3]</sup>。因此如何利用科技手段提高高压配电线路带电作业的自动化水平、减轻带电作业劳动强度、保障操作人员的

人身安全就成为了行业研究热点<sup>[7-15]</sup>。

针对 10 kV 配电网带电作业的实际需求, 设计开发了双臂六轴机器人系统。该机器人系统采用协作型六轴机械臂进行扩展设计, 在 6 轴机械臂末端扩展绝缘臂和作业工具来实现带电作业, 如断、接引流线、更换绝缘子。带电作业机器人包含机械臂、绝缘扩展臂、作业工具、快接装置、视觉定位系统、遥操作控制盘, 带电作业机器人结合了现代的机器人技术、传感器技术、视觉图像处理与定位技术, 通讯技术以及人工智能技术, 是一个集多学科、多

收稿日期: 2022-09-01; 修回日期: 2022-10-20。

作者简介: 王康(1988-), 男, 湖北荆门人, 博士, 高级工程师, 主要从事输配电带电作业方向研究。

引用格式: 王康, 刘亮, 李慧杰, 等. 高压带电作业双臂机器人系统设计[J]. 计算机测量与控制, 2023, 31(5): 243-248, 254.

领域技术的交叉融合的综合智能系统。

机器人系统采用 wifi 和 LoRa 无线通讯网络，通过遥控操作控制盘，可以实现对六轴机械臂和专用作业工具的操作控制，可以代替绝大部分人工带电作业，大大减轻作业人员的劳动强度，同时也有利于保障作业人员的人生安全。

### 1 双臂六轴机器人系统组成

高压带电作业双臂机器人系统结构如图 1 所示，由左、右两台六轴机械臂、深度相机、视觉定位系统、路由器、机器人控制器以及机械臂末端专用作业工具构成。机械臂末端专用作业工具采用快接方式进行换装，不同作业采用不同的专用工具，专用作业工具和机器人本体之间采用 600 mm 长高压绝缘杆连接；两台六轴机械臂和视觉定位系统通过 RJ45 连接到路由器，并一起安装在可升降的移动平台上，机器人控制器通过 WIFI 接入到路由器构成的局域网，深度相机通过 USB 连接到视觉算法计算机，由视觉算法计算机完成目标识别和视觉定位。在该局域网中，两台六轴机械臂，视觉定位系统均作为 TCP SERVER，分别具有不同的 IP 地址和端口号，机器人控制器作为 TCP CLIENT，可随时和服务器端建立连接，实现对双臂六轴机器人的操作控制。

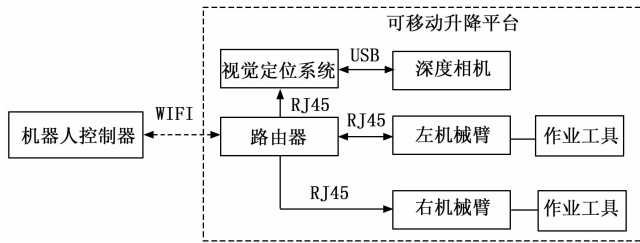


图 1 高压带电作业双臂机器人

#### 1.1 六自由度协作型机械臂

双臂六轴机器人系统采用 6 自由度协作型机械臂，包括左机械臂、右机械臂以及机械臂安装底座，如图 2 所示。

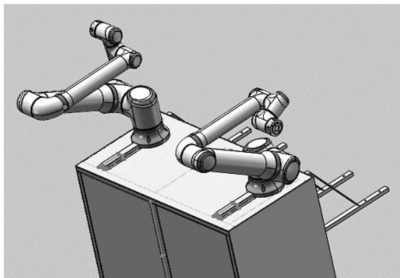


图 2 六轴协作型机械臂

双臂机器人底座安装在可移动式升降机作业平台上，最大升降高度 12 米。六自由度协作型机械臂模仿人的手臂，共有 6 个旋转关节，每个关节表示一个自由度，机械臂关节包括 2 个肩部，一个肘部和 3 个腕部，每个关节之间都采用臂管连接，控制各个关节转动，就可以控制机械臂末端移动到不同的位姿。机械臂大臂长 615 mm，小臂 572.5 mm，腕部 116.5 mm，臂展 1 533 mm。机械臂工作

空间，是一个半径为 1 304 mm 的球体，基座正上方和正下方的圆柱形空间是奇异点区。奇异点是机器人因配置或者轨迹的命令速度导致关节速度超过安全限制而失去自由度的位置。在对机器人进行控制时，应避免出现奇异点，因为奇异点的出现会导致机械臂突然或快速移动，或者中断程序导致其过早停止。6 轴机械臂不能连续旋转，只能在指定的范围内工作，除关节 3 的旋转角度在负 168° 至正 168°，其余关节均可在负 360° 至正 360° 范围内工作。

Denavit-Hartenberg 参数或 D-H 参数是表示机器人正向运动学模型的传统方式，用于在给机器人各关节角度的情况下，在基座坐标系中表示工具中心点的坐标位置，机械臂 D-H 参数模型如表 1 所示。

表 1 D-H 参数模型

关节号	$\theta$	d/m	a/m	$\alpha$
关节 1	$\theta_1$	0.0	0.185	$-\pi/2$
关节 2	$\theta_2$	0.615	0.0	0.0
关节 3	$\theta_3$	0.5725	0.0	0.0
关节 4	$\theta_4$	0.0	0.174	$-\pi/2$
关节 5	$\theta_5$	0.0	0.1165	$-\pi/2$
关节 6	$\theta_6$	0.0	0.103	0.0

机械臂的正解函数可以通过 JSON 协议获得：

```

{" jsonrpc ":" 2.0", " method ":" positiveKinematic", " params ":" { " targetPos ": targetPos }, " id": id },
  
```

通过正解函数，根据机械臂关节角信息得到对应的位姿信息，参数 targetpos 为目标关节角度信息，机械臂返回参数为六轴位姿信息。假设机器人 ip 地址为：192.168.1.200，则通过 SOCKET 编程获取机械臂正解的示例如下：

```

设置机械臂的 ip 地址
robot_ip = "192.168.1.200"
建立和机械臂的通讯连接
conSuc, sock = connectETController(robot_ip)
获取机械臂当前的位置信息
if (conSuc): suc, result, id = sendCMD(sock, "getRobotPos")
  
```

向机械臂发出 JSON 指令，等待机械臂返回由正解函数得到的 6 轴位置信息。

```

suc, result, id = sendCMD(sock, "positiveKinematic", { "targetPos": result })
  
```

获得机械臂的逆解函数的 JSON 协议：

```

{" jsonrpc ":" 2.0", " method ":" inverseKinematic", " params ":" { " targetPose ": targetPose }, " id": id },
  
```

逆解函数根据位姿信息得到对应的机械臂关节角度信息，targetpose 为目标位姿信息，机械臂响应返回关节角度信息。逆解函数通讯示例如下：

```

指定机械臂 ip 地址
robot_ip = "192.168.1.200"
和机械臂建立通讯连接
  
```

```
conSuc, sock = connectETController(robot_ip)
```

获取机器人当前位姿信息

```
if (conSuc):
```

```
suc, result, id = sendCMD(sock, "getRobotPose")
```

向机器人发送 JSON 协议指令,得到机械臂由逆解函数得到的关节角信息。

```
suc, result, id = sendCMD(sock, "inverseKinematic", {"targetPose": result})
```

也可以通过 JSON 协议 {"jsonrpc": "2.0", "method": "inverseKinematic", "params": {"targetPose": targetPose, "referencePos": referencePos}, "id": id} 得到带参考点的位置逆解,可以根据位姿信息得到对应的机械臂关节角信息,参数 targetPose 为目标位姿信息,referencePos 为逆解参考点关节角信息。示例代码如下:

设置机器人 IP 地址

```
robot_ip = "192.168.1.200"
```

指定参考点

```
P000 = [0, ? 90, 90, ? 90, 90, 0, 0, 0]
```

和机械臂建立通讯连接

```
conSuc, sock = connectETController(robot_ip)
```

获取机器人当前位姿信息

```
if (conSuc):
```

```
suc, result, id = sendCMD(sock, "getRobotPose")
```

得到带参考点位置逆解

```
suc, result, id = sendCMD(sock, "inverseKinematic", {"targetPose": result, "referencePos": P000})
```

机械臂从起始位置运动到目标位需要将其离散成多个中间目标位置,决定中间离散点和离散点之间以何种轨迹运动的方法称为插补方法。常用的插补算法有空间直线插补算法和空间圆弧插补算法,插补算法按插补方式又有脉冲增量插补和数据采样插补<sup>[25]</sup>。采用直线插补算法可以控制机器人末端工具的端点移动路径为直线,而机器人手腕则是根据插补算法得到的插补位置自动变化;圆弧插补可以控制机器人末端工具按指定的圆弧轨迹运动,在圆弧轨迹的运动过程中,机器人腕关节的运动控制由圆弧插补算法确定。

机械臂提供了多个 IO 接口以及网络通讯接口,利用机械臂提供的 IO 接口,可根据应用需求扩展机械臂末端的操作工具,通过网络通讯接口,采用 SOCKET 编程,可实现对机械臂的运动规划和姿态控制。

软件设计上,通过 SOCKET 通讯向机械臂以太网端口发送指定格式的 json 字符串来实现相应的功能,采取客户端/服务器模型,客户端主动发送 json 字符串,服务器端接收 json 串并解析,根据解析结果返回给客户端应答 json 串。json 通讯协议如下。

客户端发送 json 字符串:

```
{"jsonrpc": "2.0", "method": 方法名称, "params": 参数, "id": id}
```

机械臂控制器收 json 字符串,并解析,若结果正常,则向客户端回复 json 串:

```
{"jsonrpc": "2.0", "result": 结果, "id": id}
```

若结果错误,则回复 json 串:

```
{"jsonrpc": "2.0", "error": {"code": 错误代码, "message": 出错信息}, "id": id}
```

发送 json 字符串时的 id 和接收结果时的 id 一致。比如要设置机械臂负载重心,只需要向机械臂发送 json 字符串:

```
{"jsonrpc": "2.0", "method": "cmd_set_payload", "params": {"tool_num": tool_num, "m": m, "point": point}, "id": id}
```

其中:tool\_num:工具号,范围:0~7,m:负载重量,单位 Kg,范围:0~12,point:重心,x,y,z,单位毫米,范围:-5 000~5 000,返回值:成功 true,失败 false。

## 1.2 深度相机与视觉定位

深度相机采用 Intel Realsense D415,由 1 个 RGB 相机,2 个红外线机和 1 个红外投影仪组成,其中红外投影仪负责发射红外结构光,红外相机负责接收物体表面反射回来的结构光图像,根据三角测距原理计算得到物体表面的深度信息。D415 可测量 0.3~3 m 之间的物体,不受环境光影响,测量精度可达 mm 级。视觉定位系统根据深度相机采集到的物体表面的深度信息和 RGB 相机得到像素坐标信息,通过坐标旋转、平移和转换,将像素坐标和深度信息转换为机器人坐标,得到目标物体的三维信息,采用聚类 and 图像分割算法<sup>[11-12]</sup>,实现机器人的视觉目标检测与定位。

## 1.3 双臂机器人控制器

机器人控制器主要实现对机器人系统的现场操作控制,要求操作时使用方便,具有友好的人机交互界面。图 3 是双臂机器人控制器结构框图,由工业平板电脑和机械键盘构成,工业平板电脑主要用于参数显示、设置、通讯协议转换以及机械臂控制指令解析,机械键盘主要用于操作控制,它们之间可以采用 USB 或者无线 wifi 连接。机械键盘采用 ARM 嵌入式处理器设计,由键盘、指示灯接口电路,USB 接口电路,wifi 无线通讯接口电路构成,主要实现键盘扫描、组合按键编码、操作控制、数据帧构造与发送,用户使用机械键盘,可以实现对机器人的操作控制。

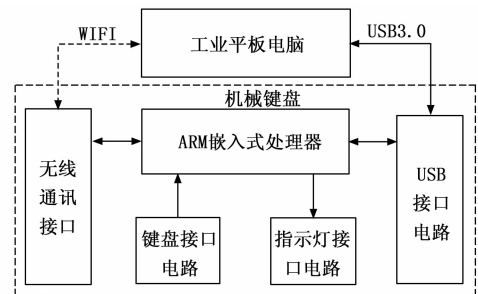


图3 双臂机器人控制器结构框图

键盘软件设计中定义了不同的功能键和组合键的按键编码,只要相应的功能键和组合键按下,处理器就将相应

的按键编码按照通讯协议规范发送给工业平板电脑做进一步的任务处理，按键编码定义在 0x00~0x43 区域内；如：机械臂选择功能键，按键码是 0x03，长按该功能键 5 秒以上，转换选择要操作的机械臂，并有相应的指示灯显示所选择的机械臂；组合按键码 0x11，当选择 1 号位作业工具时，长按工具功能键和加号键，处理器就会产生抓取 1 号位作业工具的按键编码 0x11，并根据操作者的具体操作和机械臂的运行状态形成一帧通讯数据，并将该帧数据通过 USB 或无线通讯接口发送给工业平板电脑，工业平板电脑上的控制软件通过 wifi 控制机械臂执行相应的动作。如通讯数据帧：

0x55, 0xaa, 0x00, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x01, 0x11, 0xaa, 0x55

表示目前的按键键盘没有锁定，选择的是 1 号工具，作业位置是 1 号位置，选择作业的机械臂是 1 号机械臂的第 1 轴关节，扫描舵机是 1 号舵机，当前的按键操作码是 0x11，执行抓取 1 号位作业工具的动作指令。通过键盘通讯协议可以完整地表达操作者的操作意图，并通知工业平板电脑控制机械臂执行相应的操作。当没有按键操作时，键盘控制器会每隔 200 ms 发送一帧心跳包，以保持和工业平板的长连接通讯，保障控制器操作的可靠性。

### 1.4 双臂机器人无线通讯网络

为保障机器人系统和检修人员的生命安全，机器人本体和带电高压线缆之间采用高压绝缘杆隔离。在 2 台 6 轴机械臂末端扩展了长 600 mm 绝缘杆快接头，可以根据操作人员操作指令快接和更换作业工具，完成特定带电作业。绝缘杆快接头和快接作业工具是根据特定带电作业需求专门设计的。国内配电网带电作业主要是带电断、接引流线，带电更换绝缘子<sup>[16-18]</sup>。目前设计的快接作业工具有：自动剥皮器，引线锁紧装置，电动扳手，电动线钳，电动夹具。由于快接作业工具和机械臂本体之间采用绝缘杆隔离，机器人控制器只能通过无线方式和快接作业工具连接，结构图 4 所示。

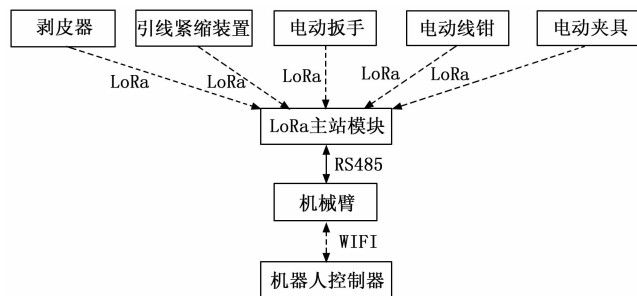


图 4 快接作业工具

机器人控制器通过 WIFI 和机械臂连接，机械臂 RS485 接口和 LoRa 主站模连接，LoRa 主站模块采用定点发送的方式和 LoRa 快接作业工具进行无线通讯<sup>[20-21]</sup>，从而可实现机器人控制器对快接作业工具的通讯控制，操作快接作业工具完成特定的作业任务。

## 2 双臂机器人运动规划与软件设计

### 2.1 双臂机器人运动规划

双臂机器人系统安装在可移动升降平台上，可根据作业需求和现场环境移动到指定工作位置，具体作业实施则依靠机械臂及快接作业工具来完成的。机械臂作业过程中，共有 6 种工作状态 S0~S5。S0 状态是机械臂锁定状态，也是机器人最初开始作业和作业结束返回的状态，S1 状态是机器人复位状态，该种状态是机器人从锁定状态解除到准备就绪，可以开始工作的状态，S2 状态是机器人从复位状态到取完快接作业工具以后的一种预备状态，S3 状态是快接完作业工具到达预设作业点的状态，S4 是目标作业点状态，在该状态下，作业工具已处于就绪状态，机器人系统给作业工具发送操作指令来完成具体作业，如剥皮、夹紧、拧紧螺丝等，S5 是机械臂作业结束状态，在此状态下，机械臂需要回到 S2 状态卸掉作业工具，再回到 S1 复位状态。在 S1 复位状态，可控制机械臂更换其它作业工具，实施其它作业任务，也可以回到 S0 锁定状态，结束作业任务。机械臂运动规划状态机如图 5 所示。

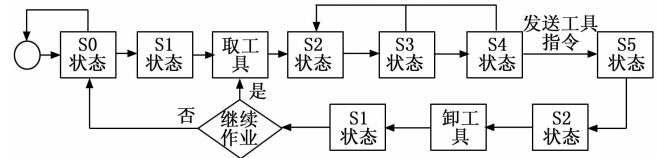


图 5 机械臂运动规划状态机

通讯方面，机器人控制器采用 client/server 方式连接到机械臂，左右 2 台机械臂作为服务器端，它们有各自的 IP 地址和服务器端口号，机器人控制器作为客户端。开机后机械臂处于 S0 锁定状态，通过键盘复位操作，机械臂运行到 S1 复位状态，在 S1 复位状态下，可以根据不同的任务要求，机器人通过快接方式快接不同的专用作业工具，并根据实际作业点和预定的路径规划控制机械臂工具末端到达目标工作点位，通过 LoRa 无线通讯控制专用工具执行相应动作，比如螺丝拧紧装置自动紧固螺丝、剥皮器自动剥皮等。当前作业工具任务完成后，机械臂重新回到 S2 状态，自动卸载掉作业工具，回到 S1 复位状态，若需要进行下一道工序，则可以再次快接其它作业工具进行作业，若已经完成任务，则机械臂自动回到 S0 锁定状态。

### 2.2 双臂机器人控制器软件设计

双臂机器人控制器通过解析键盘发送过来的数据帧或触摸屏操作按钮，经分析计算，构造 JSON 格式控制命令，采用 SOCKET 方式发送给机械臂，机械臂收到命令后执行相应动作，同时将机械臂运动状态信息返回给机器人控制器。双臂机器人软件设计包括 2 部分内容：工业平板电脑上运行的机器人系统控制软件和嵌入式机械键盘软件。嵌入式机械键盘软件主要负责机械键盘的键值获取，按键组合、工作状态获取，并最终构造键盘数据帧，通过 USB 或 wifi 发送给工业平板，工业平板对收到数据帧进行解析，控制机器人进行操作。键盘通讯数据帧协议如表 2 所示。

表 2 键盘数据帧协议

帧格式	帧头高字节	帧头低字节	键盘是否锁	当前选择的工具	当前预备位置	当前选择的机械臂轴	当前选择的舵机	当前选择的机械臂	当前的按键码	帧尾高字节	帧尾低字节
说明	0x55 固定值	0xAA 固定值	0x5A: 锁定; 其他: 开锁状态	1~6 工具编号	1~6 模糊工位编号	1~6 机械臂轴编号	1~2 激光定位舵机编号	1: 左机械臂; 2: 右机械臂	无键按下时为 0x00, 表示心跳	0xAA 固定值	0X55 固定值

定义 0x55, 0xaa 为键盘通讯数据帧帧头的高字节和低字节, 0xaa, 0x55 为帧尾的高字节和低字节, 定义通讯变量: 键盘锁状态, 当前选择的工具, 当前选择的预备位, 当前选定的机械臂轴, 当前选择的激光打点舵机, 当前选择的机械臂, 当前的按键操作码。机器人控制器软件设计流程图如图 6 所示。收到键盘发来的数据帧后, 首先判断数据帧的帧头和帧尾是否正确, 若不正确, 给出数据帧校验错误提示, 然后退出本次接收流程; 若数据帧校验无误, 进一步判断键盘锁定状态, 若键盘锁, 则不响应此次的键盘操作, 退出流程; 若键盘没有锁, 则取出通讯变量, 保存当前要操作的机械臂、机械臂轴、当前操作的工具号, 作业预备位、舵机号以及本次按键操作码。控制器对收到的按键操作码进行判断, 若等于 0, 则表示此次接收到的数据帧是心跳包, 无实际按键操作, 退出此次流程; 若不等于 0, 则查找机器人操作码表, 向对应机械臂发送 SOCKET 控制命令, 控制机械臂执行相应动作。

理, 退出键盘扫描; 若是组合键按下, 则查表得到机械臂操作码并构造数据帧, 通过 wifi 或 USB 发送给机器人控制器, 完成此次键盘扫描。

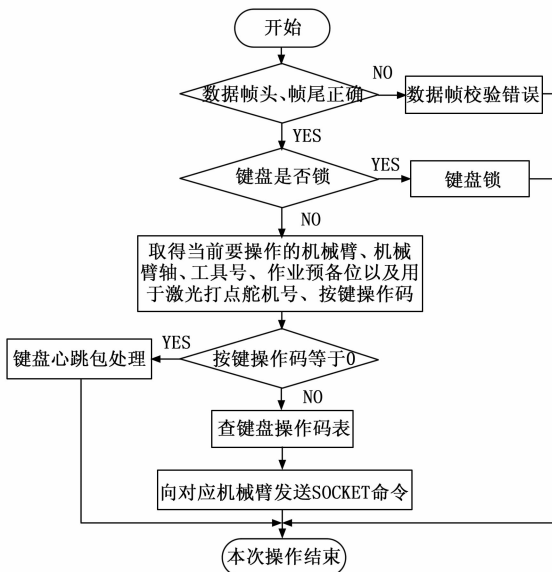


图 6 机器人控制软件流程图

键盘软件设计流程图如图 7 所示。CPU 每隔 100 ms 扫描 1 次键盘, 检测是否有按键按下, 若没有按键按下则构造键盘心跳包, 并通过 wifi 或 USB 发送给机器人控制器, 然后结束本次扫描。若有按键按下, 读取键值判断是否是功能键按下, 若是功能键按下则设置功能键变量, 构造键盘数据帧并通过 wifi 或 USB 发送给控制器; 若不是功能键按下, 则判断是否是选择键和组合键按下, 若不是则不做处

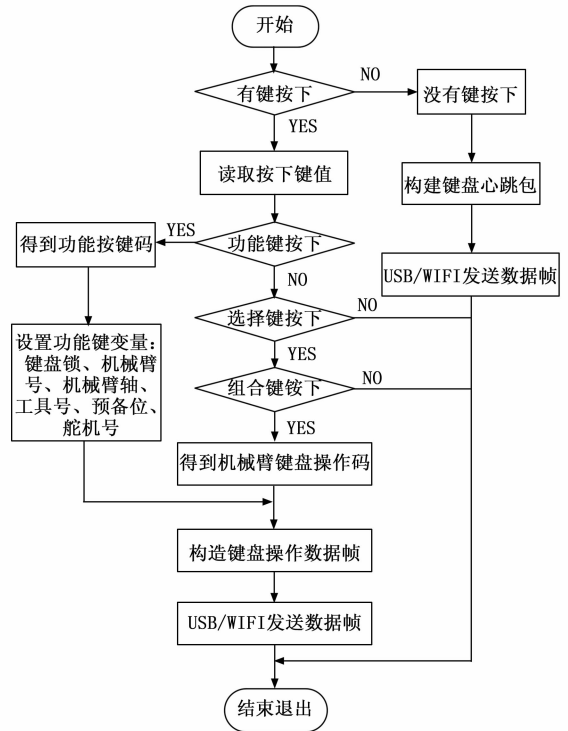


图 7 键盘服务程序流程图

### 3 调试与试验

对高压带电作业双臂机器人系统进行了综合试验。



图 8 机器人系统实验现场

在实验现场, 测试了工业平板和左右两台 6 轴机械臂的网络通讯功能, 通过 SOCKET 通讯, 实现了对 6 轴机械臂的运动规划与姿态控制功能; 测试双臂机器人控制器的



图 9 机器人系统功能测试

按键操作、网络通讯功能，通过键盘操作，可以实现对机器人 6 轴机械臂的操作控制；测试了 LoRa 主站模块和 LoRa 工具模块，LoRa 主站模块通过 RS485 和机械臂通讯，通过 LoRa 定点方式和工具模块通讯，最终通过脚本变量可以实现全部工具模块的通讯控制。

在某培训实验基地 10 kV 配电线路上，对带电作业机器人系统进行了实验验证，能够完成断、接引流线、更换绝缘子等作业任务。

图 10 为机器人 10 kV 绝缘导线剥皮实验，导线标称截面为  $1 \times 120 \text{ mm}^2$ ，绝缘标称厚度 3.4 mm，电缆计算外径 21.3 mm。机器人从接收到剥皮指令开始到剥皮完成，整个过程用时 3 分 20 秒。

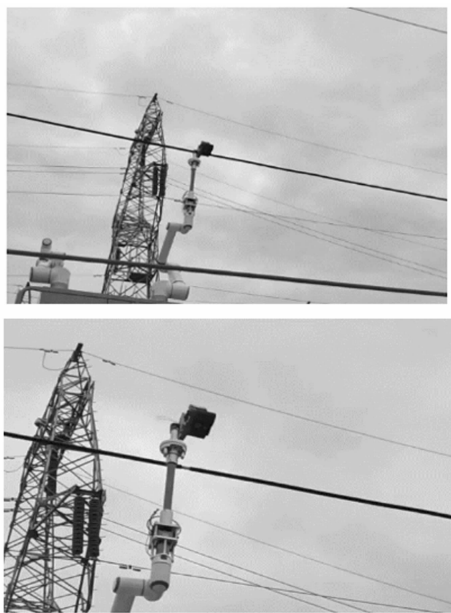


图 10 机器人电缆线剥皮实验

图 11 为机器人接引流线实验，整个过程用时 2 分 50 秒。

机器人系统现场实验运行情况表明，带电作业机器人系统操作方便、性能稳定，依靠 LoRa 无线通讯，不仅实现了前端操作工具和机器人本体的高压绝缘隔离，而且实现了作业工具的操作控制，可代替人工完成相应的作业任务。



图 11 机器人接引流线实验

#### 4 结束语

高压带电作业机器人系统主体由 12 米高液压升降平台，左右两台 6 轴机械臂构成。设计开发了双臂机器人控制器硬件、软件和机械臂运动路径规划方法，通过机械键盘或触摸屏可以实现对 2 台机械臂的有效控制；采用 LoRa 通讯和组网方式，对 6 轴机械臂进行了末端扩展，实现机器人控制器对任意专用工具模块进行装卸；设计开发了 LoRa 主站模块和 LoRa 专用工具模块，采用 LoRa 定点扫描通讯方式，实现了各工具模块和机器人控制器的相互通讯；通过现场试验，验证了机器人系统的各项设计功能。

#### 参考文献：

- [1] 徐善军, 任书楠, 杜婧, 等. 协作机器人在高压带电作业中的应用研究 [J]. 制造业自动化, 2021, 43 (9): 106-110.
- [2] 吴轲, 张建伟, 华栋, 等. 高压带电作业机器人的现状和发展 [J]. 电子技术与软件工程, 2018 (9): 97-98.
- [3] 马孝林. 高压带电作业机器人作业机械臂的设计及优化 [D]. 济南: 山东建筑大学, 2014.
- [4] 刘宏萍, 赵玉良, 崔向阳. 高压带电作业机器人系统的研制 [J]. 微型机与应用, 2011, 30 (5): 109-110.
- [5] 鲁守银, 傅孟潮, 厉秉强, 等. DWR-I 遥操作高压带电作业机器人 [J]. 上海交通大学学报, 2005 (6): 910-913.
- [6] 龙樟, 李显涛, 帅涛, 等. 工业机器人轨迹规划研究现状综述 [J]. 机械科学与技术, 2021, 40 (6): 853-862.
- [7] 饶志强, 韩昊一, 郭毓, 等. 带电作业机器人三维环境重建与监控系统设计 [J]. 计算机仿真, 2021, 37 (11): 334-338.
- [8] 张静, 黄国方, 刘晓铭, 等. 配网带电作业机器人精准作业定位方法 [J]. 电网技术, 2022, 46 (2): 812-819.
- [9] 刘一涵, 纪坤华, 傅晓飞, 等. 配网带电作业机器人技术发展现状述评 [J]. 电力与能源, 2019, 40 (4): 446-451.

(下转第 254 页)