

doi: 10.7690/bgzdh.2020.10.021

自主配网带电作业机器人软件系统的通用化设计

任书楠^{1,2,3}, 夏益青^{1,2,3}, 徐善军^{1,2,3}, 郭俊龙^{1,2,3}, 张铜^{1,2,3}, 孙霄伟^{1,2,3}

(1. 北京国电富通科技发展有限公司, 北京 100070; 2. 国电南瑞科技股份有限公司, 南京 211000;
3. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 南京 211000)

摘要: 为解决配网带电作业机器人软件系统存在扩展性及适用性不足等问题, 对其进行通用化设计。基于配网带电作业机器人的开发实践经验和硬件组成特点, 梳理软件功能需求和各功能模块间的数据流向, 基于 ROS 开发出通用软件平台的主要功能模块。测试结果表明: 该软件平台适用于多种类型的作业平台和任务, 可为配网带电作业机器人产品化铺平道路。

关键词: 配网带电作业; 机器人; 通用软件平台; 架构

中图分类号: TP24 **文献标志码:** A

Software Architecture of Robot Manipulator for Live Working of Distribution Network

Ren Shu'nan^{1,2,3}, Xia Yiqing^{1,2,3}, Xu Shanjun^{1,2,3}, Guo Junlong^{1,2,3}, Zhang Tong^{1,2,3}, Sun Xiaowei^{1,2,3}

(1. Beijing Guodianfutong Science & Development Co., Ltd., Beijing 100070, China;

2. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211000, China;

3. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211000, China)

Abstract: In the present, the extension and applicability of the software system of live working robot in distribution network are limited. In order to solve these problems, the general design is carried out. The development experience and hardware characteristics of the live working robot in distribution network are both studied with considering the functional requirements of software and data flow between functional modules. The main functional modules of the general software platform are developed based on ROS(Robot Operating System). The test results show that the software platform is suitable for various types of hardware platforms and tasks, and paves the way for the production of distribution network live working robots.

Keywords: live working of distribution network; robot; general software platform; architecture

0 引言

21 世纪以来, 发展半自主或全自主带电作业机器人逐渐成为降低带电作业人员安全风险、提升作业效率与质量的趋势^[1-2]。自主作业方式涉及对多种传感器数据的分析与判断, 从而全流程控制机器人的作业路径和末端工具动作, 又需及时响应来自操作人员和远程控制平台的控制指令, 涉及硬件设备种类多, 作业时处理数据量大^[3], 软件系统开发复杂。前期国内外相关研究成果大多基于主从遥控操作方式^[4-5], 对于配网带电作业机器人软件系统的通用化设计鲜有提及, 软件系统与硬件设备相关度高, 扩展性及适用性不足。笔者在总结前期研究成果的基础上, 结合机器人硬件组成, 对软件平台功能需求和各模块间数据流向进行分析, 提出一种适用于多类型机器人作业平台的通用软件系统设计方案。

1 自主配网带电作业机器人的硬件组成

如图 1 所示, 按照参与作业的机械臂数量划分, 配网带电作业机器人可分为单臂和双/多臂产品。



(a) 单臂机器人



(b) 双臂机器人

图 1 单/双臂配网带电作业机器人

如图 2 所示, 由于自主作业机器人需要实时获取周围环境信息, 同时对机械臂的运动轨迹进行规划, 必要时还要接收来自操作人员的控制指令; 因此, 单臂和双/多臂机器人除必要的机械臂、末端工具外, 均配备有多种传感器、运动部件、主控计算机和手持监控终端等。各硬件设备均与主控系统进

收稿日期: 2020-05-24; 修回日期: 2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51705515)

作者简介: 任书楠(1988—), 男, 河北人, 博士, 从事机器人及制造自动化研究。E-mail: 18911029176@126.com。

行通信，通信方式及数据量如表 1 所示。

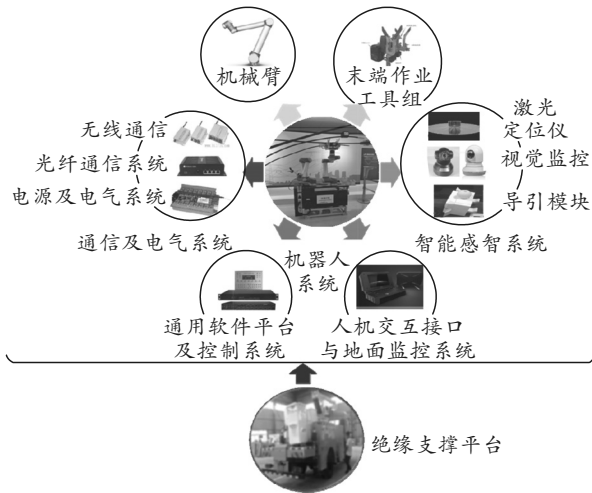


图 2 配网带电作业机器人的硬件组成

表 1 配网带电作业机器人通信方式和数据量

硬件设备	通信方式	数据量
机械臂/(kb/s)	网络通信	≈400
末端工具/(kb/s)	WiFi	≈40
激光雷达/(Mb/s)	网络通信	≈3
深度相机/(Mb/s)	网络通信	≈30
摄像机/(Mb/s)	网络通信	≈5
运动部件(滑台、转台等)/(kb/s)	总线(CAN/485)	≈50
主控计算机/(Mb/s)	网络、总线	≤100

在产品研发过程中，随时可能根据用户需求和研发进展，升级或更换硬件设备品牌、型号、数量，其访问方式和数据通信协议往往随之发生变化。同时，环境感知、路径规划、任务决策等算法内容也会不断完善。若将所有功能耦合在一起进行系统软件的开发，必然导致后期系统迭代维护困难；因此，软件平台设计的模块化、通用化成为必由之路。

2 通用软件平台功能需求分析

自主配网带电作业机器人需要具备对复杂作业环境的感知能力、对机械臂的路径规划能力、对硬件设备的管理能力、对作业任务文件的管理能力、与现场操作人员和远程监控中心的数据交互通道。

2.1 自主感知

全自主作业方式，需要实现机器人对作业环境和作业目标的精准感知与定位已完成自主路径规划。由于带电作业多在室外环境下进行，感知模块应具备多传感器适时调度与数据融合能力，从而对强烈阳光照射、雾霾、复杂背景等恶劣客观环境具备良好的适应性。

2.2 自主路径规划

在获取作业环境和作业目标原始数据后，软件

平台应对相关障碍物和作业目标在统一的操作空间坐标系下进行 3 维建模。根据机械臂初始位姿、目标位姿和作业任务，设定路径规划目标与约束条件，生成时间最优的无碰机械臂运动路径，以充分发挥机械臂的运动效能，优化作业效率。

2.3 自主硬件管理

由于配网作业的复杂性，需要针对不同的作业项目和作业线型更换适合的传感器、末端作业工具甚至机械臂，软件平台需在作业前或作业过程中实现对若干类型硬件设备的无缝切换和衔接。同时，在作业前和作业过程中需对启用设备的类型、型号、工作状态等进行自我辨识，在设备发生故障时，启用冗余设备继续完成作业或无害化处置并提示操作人员检修。

2.4 自主作业管理

配网带电作业共有 4 大类 33 项，每一项作业的目标、流程和要点均有所不同；因此，软件平台需具备作业管理功能。根据工作票下达的作业任务，读取对应作业文件，适时调度、组织相关硬件设备和软件模块，执行目标作业任务。其中，作业文件为针对特定作业任务编写的作业流程与要点的描述文件，应与硬件无关，能表达全部启用硬件和软件模块的正确动作时序。

2.5 人机交互接口

尽管在多数场合下机器人可以自主完成作业，但为使地面操作人员及时获取机器人作业执行状态，避免可能发生的操作风险，处置异常状况或设备故障，需要设置人机交互接口，并为作业文件的编辑与管理预留接口。

2.6 远程云端连接

随着泛在物联网和 5G 网络建设的加速推进，将机器人终端与供服平台、全网带电作业数据中心及辅控中心进行连接成为可能。每台机器人成为泛在物联网中的一个节点和数据来源，同时又是动作执行和数据共享终端。与云端的连接，可以实现机器人作业的自动派工、远程监控与辅助操作，缩短机器人作业能力迭代周期，提高机器人作业一体化、标准化水平。

3 各功能模块间数据流向

在实际作业过程中，远程云端向机器人下达作业工作票，经现场人员确认后，自主作业管理模块

启动,调用自主感知模块获取作业环境和作业目标信息,经过处理后输入自主路径规划模块生成机械臂运动路径,同时自主作业模块根据作业文件,控制各硬件设备作业时序。在整个作业过程中,自主硬件管理与硬件设备保持通信,根据上层控制模块的指令适时调度硬件设备执行相关功能,同时向操作人员和远程云端反馈硬件设备的状态信息。操作人员和远程云端可实时监视系统作业状态,并及时发送辅控指令,处置异常状况。整套系统数据流如图 3 所示。

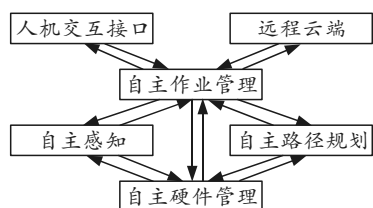


图 3 配网带电作业机器人软件体系数据流

4 软件平台通用化设计方案

4.1 ROS 简介

ROS (robot operating system) 于 2010 年正式推出,是适用于机器人开发的模块化开源系统^[6],其主要目标就是为机器人的研发提供“轮子”。

ROS 系统中的最小功能单元是“节点”。节点既可以是硬件驱动,又可以是算法执行单元,还可以是交互模块^[7]。“节点”与“节点”间呈现松耦合式的构造状态,其既可以部署于同一套计算单元中,也可以分别部署于多个计算单元,这为机器人系统的灵活构建带来了极大的方便。

ROS 为节点间的数据交换提供了完备的通信封装。编程人员根据节点数量、通信的数据量、通信的实时性要求等,无需考虑具体的通信实现方式,便可通过消息的“订阅\发布”、服务的“请求\回应”模式实现节点间一对多和一对一的通信。

ROS 系统提供的软件架构和通信机制,使系统开发人员在增加系统功能或对个别功能模块进行修改时,仅需对单个节点及有关通信接口进行增改,不涉及系统架构和多节点的关联调整,其较高的可靠性和扩展性使系统开发人员可以专注于算法和应用,不必过多关注底层处理,提高了机器人软件系统的迭代效率。

4.2 基于 ROS 的软件平台架构设计

如图 4 所示,配网带电作业机器人通用软件平台基于 ROS 框架开发,根据前述功能需求分析和数

据流向,设置有硬件层、驱动层、中间层、主控层和数据交互层,每一层中以节点作为最小开发单元。

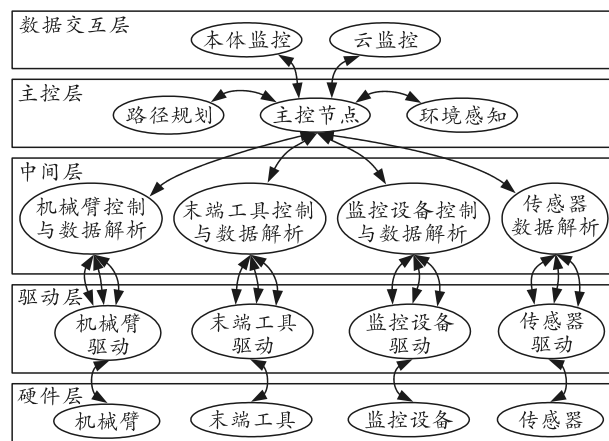


图 4 配网带电作业机器人软件架构

1) 硬件层。

作为软件的操作对象,包括系统执行器和传感器,可以接收指令或发出状态数据。

2) 驱动层。

根据各硬件设备的通信协议编写,完成硬件设备的指令下发与状态采集。作为与硬件设备的直接通信组件,此层中各节点与硬件设备严格对应。

3) 中间层。

为实现模块化设计,满足机器人研发过程中硬件设备选型测试和快速更换的需要,在通用软件平台中设置中间层。根据对设备类型的划分,设置机械臂控制与数据解析等节点,对上统一功能协议,对下兼容多种同类型硬件设备。在更换设备时,只需针对该种型号硬件,增加对应的驱动层节点,同时对中间层该类型节点做增量式修改即可,对其他节点没有影响。

4) 主控层。

主控节点对相关作业文件进行分段解析,根据指令内容需求分段下发对应作业文件内容,同时调用环境感知和路径规划节点,实现机器人自主感知、自主路径规划和自主作业管理。同时对接数据交互层,向上传输系统状态,接收控制指令,为自动作业或人机协同操作过程中出现的异常情况提供处置接口。

5) 数据交互层。

与监控设备和云端相连,提供本体 HMI 和远程访问机器人数据的通用接口。

4.3 关键设计

1) 中间层硬件通信接口设计。

配网带电作业机器人涉及硬件种类、品牌、型号众多，通信协议也有所不同。文中增加中间层硬件通信接口，对上根据各类型硬件设备功能特点设计统一的数据接口，对下根据各设备通信协议设计数据接口，以实现上层应用与硬件设备的隔离。

例如，机械臂所涉及的通用控制指令包括线性移动和节移动。其中：线性移动涉及的指令参数包括目标位姿、运动坐标系定义、工具坐标系定义、末端负载、速度定义和加速度定义等；关节移动涉及机械臂的关节角参数，但不同品牌的机械臂针对上述指令参数的脚本指令有所不同。中间层机械臂的通信接口定义如图 5 所示。

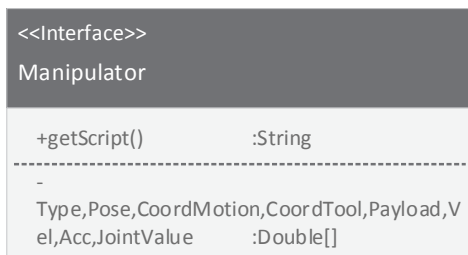


图 5 机械臂通信接口定义

对于其他的硬件设备，根据硬件功能，所定义的通用参数如表 2 所示。

表 2 硬件设备通用参数

设备名称	通用参数
机械臂	目标位姿、运动坐标系定义、工具坐标系定义、末端负载、速度定义、加速度定义
末端工具	作动器 1、作动器 2...作动器 n
激光雷达	扫描范围、扫描频率、目标距离
深度相机	分辨率、目标 ROI (region of interest)
运动部件 (滑台、转台等)	控制方式、绝对目标位置、相对目标位置

2) 作业文件设计。

为满足配网带电作业机器人对多种硬件配置、作业类型、作业环境的适用性，笔者用作业文件对作业流程进行记录和管理。将作业过程中对机械臂、运动部件、传感器数据和末端工具的操作等描述为若干操作指令和对应参数的集合，使作业内容与软件平台本身相互独立，从而达到快速编程的目的。

根据前期操作经验，作业指令分为机械臂运动类、滑台控制类、检测定位类、计算类、过程类和工具类 6 大类。每一大类根据具体操作对象的不同和作业任务的需要设置若干指令，配合不同的参数设置，可实现多种作业流程的快速编辑和管理。

将若干作业指令集合在一起，组成作业文件，用以描述机械臂运动、作业目标定位与末端工具动作。作业文件格式如图 6 所示。

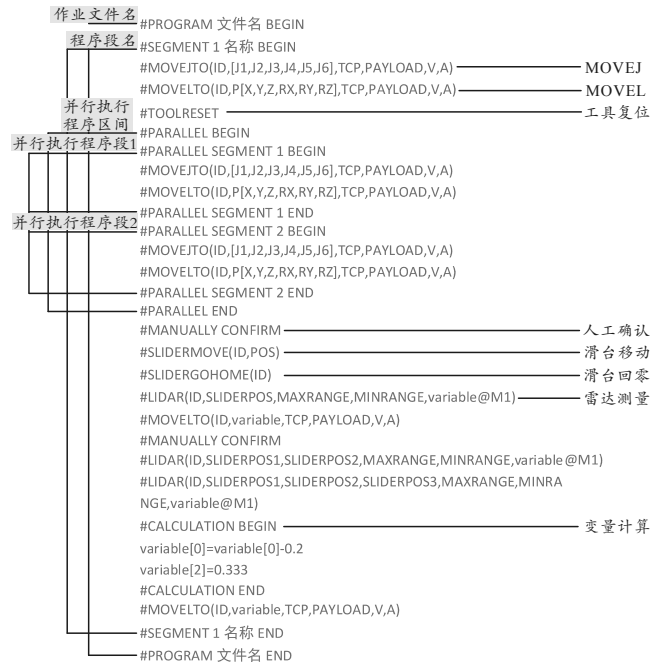


图 6 作业文件格式定义

5 结束语

机器人带电作业的试点应用结果表明：以上软件平台适用于单臂、双臂等多类型的配网带电作业机器人产品，并可根据硬件配置快速部署。对硬件设备改型或更换时，仅需增加驱动层模块和对中间层节点做增量式修改，可降低系统开发过程中的软件迭代与维护成本。同时，通过数据交互层预留与本地监控站和云端供服平台的数据接口，可为推进全网带电作业机器人数据共享、远程辅助作业等提供参考。

参考文献：

- [1] 李实, 刘波, 韩刚, 等. 电力系统配电网带电作业机器人[J]. 自动化博览, 2018(3): 68-70.
- [2] 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, 470.
- [3] 童翔威. 多机械手的配网带电作业机器人的研究与设计[J]. 通信电源技术, 2018, 35(12): 62-63, 65.
- [4] 朱曦萌, 王杨, 李文胜. 面向配网带电作业的主从遥操作机器人系统设计[J]. 工业控制计算机, 2019, 32(10): 35-38.
- [5] 刘金存. 带电作业机器人主从控制的研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2014: 4-6.
- [6] ROS.org. Distributions[EB/OL]. <http://wiki.ros.org/Distributions>, 2019-06-26.
- [7] 刘乃军, 鲁涛, 席宝, 等. 基于 ROS 的 UR 机器人遥操作系统设计[J]. 兵工自动化, 2018, 37(3): 88-90.