

基于数字孪生技术的电力设备不间断巡视系统设计

王林,李云伟,任重,徐海龙,翟宇婧,卢伟
(国核电力规划设计研究院有限公司,北京 100095)

摘要:为保障电力设备的安全运行,利用数字孪生技术优化设计电力设备不间断巡视系统。改装巡视工作站与移动终端,使用 S3C2416 内核替换传统 ARM 控制器的核心元件,加设射频识别单元并对系统的部分连接电路进行调整。按照类型分别将电力设备基本信息、巡视任务信息以及巡视结果信息存储到系统数据库中。在硬件设备和数据库的支持下,构建数字孪生全息电力设备工作模型,在该模型下实时采集和传输巡视数据,并通过从基础电力设备信息管理、巡视任务管理、执行巡视任务、电力设备维修与保养管理、远程不间断更新巡视结果等步骤,不间断地规划和控制巡视路线,实现系统的不间断巡视功能。实验结果表明:巡视结果更加接近设置的电力设备实际工作状态,巡视精度更高,且在响应时间和并发数方面具有明显优势。

关键词:数字孪生技术;电力设备;巡视系统;射频识别

中图分类号:TM755 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2022)03-0220-05

Design of Uninterrupted Patrol System for Electric Power Equipment Based on Digital Twin Technology

WANG Lin, LI Yunwei, REN Zhong, XU Hailong, ZHAI Yujing, LU Wei

(National Nuclear Power Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing 100095, China)

Abstract: To ensure the safe operation of power equipment, the continuous inspection system of power equipment is optimized by digital twin technology. The patrol workstation and mobile terminal are modified. The S3C2416 core is used to replace the core components of the traditional arm controller, the RF identification unit is added, and some connecting circuits of the system are adjusted. According to equipment types, the basic information of power equipment, patrol task information and inspection result information are stored in the system database. With the support of hardware equipment and database, the digital twin holographic power equipment working model is constructed, by which patrol data is collected and transmitted in real time. The patrol road, by information management, patrol task management, patrol task implementation, maintenance and maintenance management of power equipment, and with the remote and uninterrupted updated inspection results, is constantly planned and controlled to realize the uninterrupted inspection function of the system. The experimental results show that the inspection results are closer to the actual working state of the power equipment and its inspection accuracy is higher with obvious advantages in response time and concurrency number.

Keywords: digital twin technology; power equipment; equipment inspection system; radio frequency identification

0 引言

作为维护电力系统安全运行的基础工作,电力巡视可以有效地保障设备安全,减少设备故障率。目前的输配电线路巡检和变电所巡检多为手工操作,现场需要人工输入,工作量大,巡检出错概率高^[1]。对此,文献[2]利用移动终端识别二维码实现设备的检验管理,统计分析设备检验率、漏检率、人员到达率、设备异常情况等信息,并对检验人员的工作进行监督检查。文献[3]开发一套 C/S 架构的设备管理系统,检查记录更加规范,人工成本低。但是,上述方法在检测过程中会产生中断,将一段时间的数据传输到 PC 机,从而减少了电力设备不间断检测系统的覆盖范围。

数字孪生技术(digital twin technology)充分利用物理模型、传感器更新等数据,结合仿真过程在虚拟空间中完

成映射,以反映相应物理设备的整个生命周期过程。结构模型分为 5 个维度,包括实体对象、虚拟模型、连接、数据和服务系统。因此,将数字孪生技术应用于电力设备连续巡视系统的设计工作中,可以使电力设备巡视范围扩大,并最大限度地保证巡视精度。

1 电力设备不间断巡视硬件系统设计

1.1 巡视工作站与移动终端

巡视工作站是对巡视资料进行管理的重要工作环境。安装巡视工作站,可对巡视相关工作进行管理、维护记录、查询、巡视任务、下载结果等。手持式巡视终端可采用 PDA 或 EDA,携带方便,使用灵活,可用于移动现场作业,尤其适合野外采集,巡视设备连接采集设备和工作站,进

行有线或无线通信。

1.2 ARM 控制器

S3C2416 是一款基于 ARM9 内核的处理器,其速度可达 667 MHz;内部自带丰富的接口,包括液晶屏接口、USB 接口、UART、SPI、IIC,摄像头和以太网接口等。在 S3C2416 处理器工作时,为了保证处理器正常工作配置相应电路。具体包括时钟电路、存储电路、FLASH 存储器的运行器和基本运行数据;SDRAM 电路,增强了系统的操作能力;RS232 接口电路,完成了系统运行调试;JTAG 调试接口电路,并在调试期间实现了程序烧写等功能。

1.3 射频识别单元

射频识别装置由 1 个读写器、1 个电子标签(即所谓的应答器)和 1 个天线 3 部分组成。安装该射频识别装置是为了识别巡视目标的身份。图 1 为射频识别装置的工作原理。

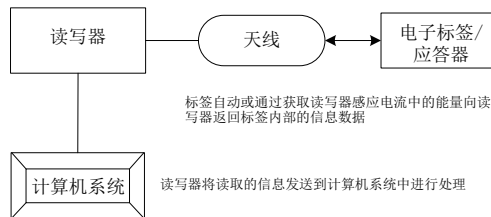


图 1 RFID 射频识别单元工作原理图

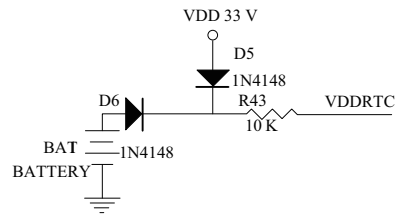
图 1 中,就主动式 RFID 而言,电子标签可主动地将内部信息发送给读写器,读写器按顺序接收读写数据并自动进行处理。对被动式 RFID 而言,电子标签发送信息所需的能量来自读卡器的信号,读卡器从标签上获取能量后,将标签内部的信息数据返回给读卡器。

1.4 系统电路设计

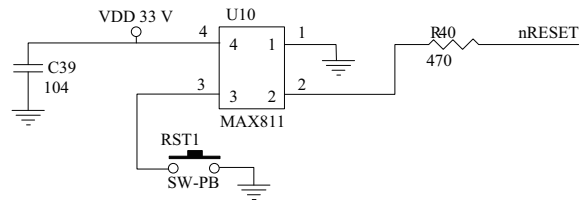
ARM 控制器内部电路,具有 SD 卡存储、RS232 接口、复位、RTC 时钟电源、稳压等功能。设计 SD 卡存储器主要考虑两个方面的功能:一是系统存储器的扩展,如需在智能巡视终端增加小型数据库系统,则原有的 FLASH 存储器不能满足要求;第二,对系统可进行升级。在系统软件升级过程中,可先设置系统从 SD 卡启动,然后由 SD 卡对系统进行升级。在系统开发方案中,这种升级操作避免了采用 JTAG 烧录的升级方式,简化了系统的使用^[4-5]。该系统采用 8 G 的 SD 存储卡设计,在系统功能要求较高的情况下,可增加 SD 卡的存储容量。RS232 接口电路采用了标准的 MAX3232 芯片,这种芯片比较常用,具有很高的性能。利用串口可打印调试程序的相关信息,监控程序的执行位置,方便系统开发。连续巡视系统终端需要提供死机复位按钮。此外,通常会有不同的触发方式,如长时间按复位键,以实现系统程序的升级。尽管这个功能并不常用,但它对于系统的功能完整性是非常重要的。采用 Max811T 芯片设计复位系统电路,抗干扰能力强,能有效地排除误触发动作,避免因干扰而造成误复位。图 2 显示了 RTC 时钟电源电路和复位电路。

此外,ARM 控制器部分和不同 RFID 射频部分的芯片需要采用不同的电压等级。比如 ARM 控制的核心电压

是 1.8 V,接口电压是 3.3 V,USB 接口电压是 5 V 等。而且需要较高的电压精度,采用 RT9701 芯片实现不同等级电压供给;RT9701 是一种 LDO 型的电源芯片,它具有电源精度高、电源波纹小的特点,能够很好地满足各种用电芯片的使用要求。图 3 中显示了其基本的电路。



(a) 时钟电源电路



(b) 复位电路

图 2 RTC 时钟电源和复位电路图

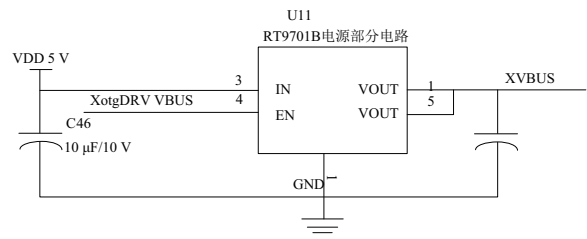


图 3 RT9701 系列芯片应用电路图

2 电力设备不间断巡视系统软件功能设计

电力设备不间断巡视系统软件用于传输检测,主要承载相应的标准化操作规程,指导操作人员进行现场操作、填写设备故障记录、上传现场数据、查询历史数据等,并显示在网页上,其主要功能如表 1 所示。

表 1 电力设备不间断巡视系统软件功能

功能字段	功能名称	数据类型	键	空值
JOB_ID	匹配巡视标识	VARCHAR(16)	PK	否
road_name	指定巡视路线	Varchar(50)	—	否
XUN_DIAN	确定巡视地点	VARCHAR(16)	—	否
JOB_STATUS	获取工作状态	CHAR(2)	—	否
JOB_CONTENT	获取工作内容	VARCHAR(400)	—	否
JOB_BEGIN_TIME	判断工作开始时间	DATETIME(8)	—	否
JOB_END_TIME	预测工作结束时间	DATETIME(8)	—	否
USER_ID	定位用户标识	VARCHAR(16)	—	否
EXEC_RESULT	上传执行结果	CHAR(8)	—	否

表1中各个功能字段代表不同的功能,值得注意的是,需要定期刻录数据光盘,将其备份。

2.1 构建数字孪生全息电力设备工作模型

数字孪生技术为变电站的模拟巡视提供了设计依据和理论依据,但变电站安全隐患仍时有发生。采用数字孪生技术建立虚拟变电站三维模型,接入变电站主控、辅控、安防等设备检测点,实时采集各种状态信息,无需运检人员前往变电站现场,即可掌握变电站运行状态,为变电站实现“连续设备巡视”提供可靠支持,并对设备异常及时报警,延长设备使用寿命。结合目前电力设备的运行情况,给出了数字孪生线的运行原理,如图4所示。

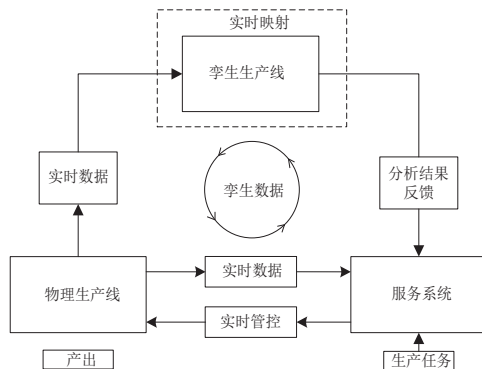


图4 数字孪生运行原理图

图4中电力设备运行时,服务系统根据生产计划控制实体生产线进行实际生产活动;同时,孪生生产线实时映射生产作业实时数据;分析计算的结果可以反馈给以后的服务系统,用于生产过程的报警、控制优化和预测分析。根据数字双全息电源设备的工作模式,将电源设备的数字空间与物理空间的映射分为设备、环境和系统3个部分。电气设备实时测绘生产线机器人、AGV、加工设备等设备的动作、空间位置、工作状态,完成各工位的加工过程。

2.2 不间断巡视路线规划与控制

以建立的数字孪生全息电力设备工作模型为基础,采用单源最短路径算法不间断规划和控制巡视线路。对最优子结构的性质进行描述:

$$P(m, n) = \{V_m \cdots V_i \cdots V_j \cdots V_n\} \quad (1)$$

式(1)表示 m 到顶点 n 的最短路径, i 和 j 表示该路径上的中点,那么 $P(i, j)$ 一定是 i 到 j 的最短路径。按照最优子结构思想,设 G 为有权重的有向图,具体可表示为

$$G = (V, E) \quad (2)$$

式(2)所表示的有向图权值都 >0 。对未确定最短路径顶点的集合,按最短路径长度的递增顺序,添加到当前路线中,经过更新迭代得出巡视路径的最终规划结果。

巡视路线控制程序要求按直线行驶。用 P1、P2 两点间连线作为机器人直线参考轨迹,即期望路径。移动控制算法是指根据机器人当前的位置和航向信息,对机器人进行实时调整,实现机器人在预定路线上的直线运动轨迹跟踪控制机器人的当前位置与期望运动轨迹偏离距离 S 和机器人行驶方向与期望运动轨迹方向的航向偏差 θ 可通

过下式得出:

$$\begin{cases} \Delta S = \frac{(y_2 - y_1) \cdot x_0 - (x_2 - x_1) \cdot y_0 + (y_1 \cdot x_2 - y_2 \cdot x_1)}{\sqrt{(y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2}} \\ \Delta \theta = \theta_0 - \arctan\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) \end{cases} \quad (3)$$

定义被控对象为机器人左右两轮的轮速差 ΔV 。因为巡视机器人采用差速驱动,所以在理想情况下可以忽略车轮的侧滑和车轮与转轴的摩擦,通过速度差来确定左右轮的轮速。假定速度差 ΔV 、 ΔS 和 $\Delta \theta$ 均为线性关系,且线性系数分别为 $K_{\Delta S}$ 、 $K_{\Delta \theta}$ 。控制器的控制量的输出 ΔV 为

$$\Delta V = K_{\Delta S} \cdot \Delta S + K_{\Delta \theta} \cdot \Delta \theta \quad (4)$$

结合控制器增益自调节特性,对巡视设备左右两轮速度差 ΔV 进行控制,控制模型为

$$\Delta V = k_0 r + k_1 \Delta S + k_2 \Delta \theta \quad (5)$$

式中: k_i 为非负的自适应参数; ΔS 和 $\Delta \theta$ 分别为巡视机器人与期望路径之间的偏离距离和角度。

2.3 电力设备运行数据不间断采集与传输

巡视设备到达待检设备后,利用移动终端上的设备对电力设备标签进行自动识别,获取电子标签所包含的设备/编号信息。不间断采集的运行数据包括电力设备编号和参数。对连续采集的电力设备运行数据进行分组整理,利用 GPRS 无线通信网络在硬件系统中实现数据传输。移动终端上无中断的电力设备巡视数据产生的 PDU 数据包经 SNDC 层与 LLC 层处理后通过空中接口和在 GSM 网络中的 SGSN 传输到 GGSN。GGSN 先解装接收到的消息,然后转换成可用的格式,例如 PSPDN,以便公共数据网传送。数据采集与传输流程如下:

首先,引用隧道技术,封装其他协议的运行数据报文于自己的传输协议的运行数据报文内,并在其网络中进行传输。也就是在一种网络协议内对另一种网络协议进行传输,一边实施封装,一边实施解封装。在整个传输过程中,隧道表示被封装的数据包在网络上传输时经过的逻辑路径。其次,隧道技术是虚拟的点对点连接路径,其两端需分别封装及解封装数据,运行数据报文。最后,将生产的运行数据报文进行封装、传输及解封装的全过程是隧道技术的主要内容,其结构模型如图5所示。

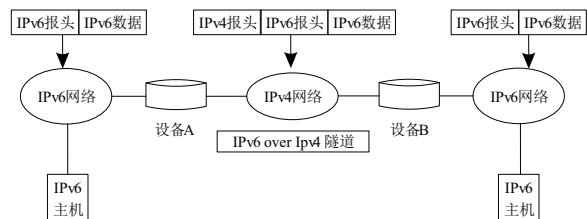


图5 隧道技术结构模型

设备 A 和设备 B 必须支持 IPv4/IPv6 双协议栈。IPv6 over IPv4 技术可以在原 IPv4 报头前封装上相应的 IPv6 报头,实现在 IPv4 网络中对 IPv6 运行数据报文进行传输,完成相互隔离的 IPv6 网络通信。

2.4 实现电力设备不间断巡视功能

按照所发出的巡视任务,选择相应的巡视路线,在填写巡视信息时,系统将判断所选巡视的设备是否已经巡视。如果已经巡视,则重新选择;如果没有巡视的保存路线,则由系统管理员将新的巡视路线分配给巡视员;如果需要修改巡视路线,则需要先取消分配,然后修改巡视路线信息,再分配巡视员。若系统管理指派的巡视员有其他安排,则系统管理需先查询巡视员指派,然后取消指派,再将巡视员指派给其他巡视员。若要删除该线路,则需要先取消分配人员,然后再向该线路分配巡视员。巡视人员通过自己的用户登录系统后,查询到已分配给自己的巡视路线,按巡视路线逐条巡视电力设备,找出需要检查的设备,根据地理信息图上的线路和设备说明,查看设备情况,登记缺陷信息,然后将缺陷信息以文字和图片的形式发送到服务器端,进行下一台设备的检测。图6为执行巡视任务的整个设计流程。

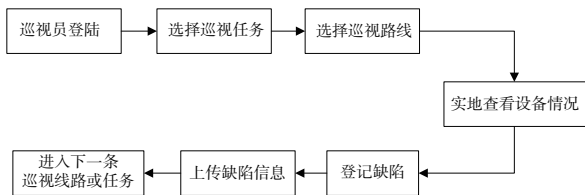


图6 巡视任务执行流程图

将实时、不间断生产电力设备的检测结果输入系统数据库,用检测时域表示。在无线通信网络的支持下,检测信息自动读取和更新,通过监听器发送到系统移动端,提示用户更新巡视任务,巡视标识等信息,实现自动化巡视更新。对电力设备进行远程更新的巡视更新内容包括电力设备的运行状态、位置等,并且在远程不间断更新过程中,控制更新时间不少于0.5 s。

3 系统测试

以数字孪生技术为基础的电力设备连续巡视系统的测试任务,主要是验证系统中的所有功能需求是否完全实现,并验证电力设备智能巡视系统是否满足需求分析所描述的内容以及各功能模块的输入、输出是否正确。从需求分析阶段就开始系统的测试准备工作,系统中的设备管理模块、巡视路线管理模块、报修管理模块、统计分析模块、系统管理模块等模块都已编制好测试计划,针对各个模块的功能编写了测试用例,完成了两步工作之后就可以对系统进行测试。方案和用例是测试的基础和方法。试验过程中不仅要有测试人员参与,还要有系统开发人员、用户共同参与,共同完成试验工作,确保系统正常、有效地运行。

采用数字孪生技术,在win7操作系统上开发了一套电力设备连续监测系统。利用EclipseJeeOxygen、Oracle数据库、PL/SQL、Tomcat开发工具。Spring、Struct2、Mybatis框架、Oracle数据库以及BaiduMap的API实现与Java结

合使用JavaWeb。表2为系统测试环境中PC端和服务器的具体配置。

表2 系统测试环境配置表

指标	PC端	服务器端
CPU	Intel(R) Core(TM) i5-7500@ 3.40 GHz	Intel(R) Xeon ES-2630@ 2.30 GHz
内存	8 G	36 G
硬盘	500 G	1 T
显示卡	NVIDA GeForce GTX 1050	NVIDA GeForce GTX 1080Ti
操作系统	Windows 7 Service Pack 1 64bit	Windows Server 2008 R2

将所设计的基于数字孪生技术的电力设备不间断巡视系统导入到系统测试环境中,得出系统的运行界面,如图7所示。

变电站	作业项目	设备名称	巡视内容	缺陷描述
孟良变电站	一次设备	30kV开关室	电站锅炉	不稳定
			蒸汽轮机	不稳定
			室内照明	不稳定
	二次设备	控制室	燃气轮机	不稳定
			防火状况	设备过期
			变压器	不稳定
三峡变电站	一次设备	主变本体	水轮机	漏水
			高压侧	偏高
	二次设备	调压装置	空调设备	不达标
			油位变化	偏低
			检查变压器本体	超标
			油层温度	偏低

图7 电力设备不间断巡视系统运行界面

选择某电力生产企业作为系统测试的数据来源,并结合电力设备的运行情况,提交巡视任务。

实验分别从功能和性能两个方面进行量化测试,其中系统功能测试就是设计系统在电力设备运行环境中的巡视情况,在待检测环境下设置电力设备的运行状态,并将输出的巡视结果与设置状态进行比对,从而得出巡视功能的测试结果。而系统性能测试主要从响应时间、每秒最大并发数两个方面进行。其中响应时间可以直接反映出系统的不间断巡视能力,响应时间越长,说明不间断性能越弱。另外,为了充分体现出设计系统的运行优势,还设置了文献[2]电力设备巡视系统和文献[3]中提出的基于移动终端的电力设备巡视系统作为实验的两个对比系统。经过系统的运行以及相关数据的分析,得出系统巡视功能的测试对比结果,如表3所示。

从表3中的输出结果可以直观地看出,本文设计的电力设备巡视系统输出的结果更加接近设置的电力设备运行状态,即设计系统的巡视功能更优。同理可以得出巡视系统运行性能的量化测试结果,如表4所示。

通过对表4中数据的计算,3种巡视系统的平均响应时间分别为0.68 s、0.47 s和0.19 s,从每秒最大并发数方面来看,3个系统的平均并发数分别为157.1、174.4和217.7,即所设计的基于数字孪生技术的电力设备不间断巡视系统在运行性能上具有更明显的优势。

表3 系统巡视功能测试结果

待巡视电力设备名称	设置运行状态	文献[2]电力设备巡视系统输出结果	文献[3]提出电力设备巡视系统输出结果	本文电力设备巡视系统输出结果
发电机	正常	正常	正常	正常
变压器	异常	异常	正常	异常
断路器	故障	正常	故障	故障
电缆	正常	正常	正常	正常
电压互感器	正常	正常	正常	正常
电流互感器	故障	故障	异常	故障
限流电抗器	异常	正常	异常	异常
隔离开关	故障	异常	故障	故障

表4 系统运行性能测试结果

线路编号	文献[2]系统		文献[3]系统		本文设计系统	
	响应时间/s	每秒最大并发数(个/s)	响应时间/s	每秒最大并发数(个/s)	响应时间/s	每秒最大并发数(个/s)
1	0.63	155	0.44	187	0.23	211
2	0.75	169	0.52	184	0.19	207
3	0.68	174	0.46	152	0.22	234
4	0.64	158	0.48	177	0.18	228
5	0.62	152	0.41	168	0.16	212
6	0.66	162	0.45	169	0.15	208
7	0.73	154	0.52	175	0.21	209
8	0.71	133	0.47	183	0.17	233

4 结语

将信息处理技术手段和电力设施的巡视工作结合在一起,引入数字孪生技术,完成对电力设备不间断巡视系统优化设计,其平均响应时间为0.19s,平均并发数为217.7,系统输出的结果更加接近设置的电力设备运行状态,有较高的巡视功能和应用价值,可以有效地减轻人员巡视的工作量,提高电力设备巡视工作的信息化管理水平。

参考文献:

[1] 李更生,刘海涛,陈立明,等. 基于3D-GIS的数字孪生技术在

供热系统的应用[J]. 区域供热,2020(6):135-145,149.

[2] 王川保. 基于移动终端的电力设备巡检系统设计[J]. 电子世界,2020(16):128-129.

[3] 李佑群,向道豪,丁德红. 基于二维码的电力设备巡检管理系统[J]. 现代计算机,2020(2):103-108.

[4] 张帆,李闯,李昊,等. 面向智能矿山与新工科的数字孪生技术研究[J]. 工矿自动化,2020,46(5):15-20.

[5] 焦威. 数字双胞胎技术介绍[J]. 数字化用户,2019,25(17):191-193.

收稿日期:2021-03-30

(上接第186页)

[6] 黄加俊,卿兆波,张珠耀,等. 基于激光SLAM的全方位移动机器人控制系统设计[J]. 科技通报,2020,36(7):81-85.

[7] 谷玉之,瞿畅,徐魏魏,等. 光伏组件自动清扫机器人系统设计[J]. 机械设计,2020,37(9):49-55.

[8] 沈彤,王琪,陈言恺,等. 基于电磁导引的自平衡机器人控制系统的设计[J]. 工业控制计算机,2020,33(7):45-47.

[9] 钱平,马建圆,李子龙,等. 基于语音识别的机器人动作控制系统设计[J]. 电脑知识与技术,2020,16(17):170-172.

[10] 何英武,梅江平,黄绍生,等. 基于密码技术的数控系统和工业机器人控制系统安全解决方案[J]. 机电产品开发与创新,2020,33(4):61-63.

[11] 张亮,赵飞跃. 基于STM32-PCA9685的四足机器人控制系统设计[J]. 南方农机,2020,51(14):117-119.

[12] 李满. PLC技术在工业机器人控制系统中的应用研究[J]. 产业与科技论坛,2020,19(18):38-39.

[13] 赵亮. 工业机器人控制系统中PLC技术的应用分析[J]. 工业加热,2020,49(8):28-29,34.

[14] 曹德严. 基于PLC的ABB工业焊接机器人控制系统设计[J]. 内燃机与配件,2020(15):100-102.

[15] 张硕,刘天悦,张鑫宇,等. 盆栽转移竞赛机器人控制系统设计[J]. 机电工程技术,2020,49(8):115-118.

收稿日期:2021-01-06