

基于 Petri 网的自动钢筋绑扎控制流程设计与优化

王长红^{1,2}, 吴选忠^{1,2}, 李占福^{1,2}

(1. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118;

2. 福建省智能加工技术及装备重点实验室, 福建 福州 350118)

摘要: 针对一种以 PLC 作为控制器搭建的三轴自动钢筋绑扎机器人, 依据绑扎流程及机器人实际情况, 对作业过程进行模块化建模。采用逆模块化优化 Petri 网并建立关联矩阵, 运用 T 不变量判断控制流程的准确性, 从而设计出主体稳定、边界明显、可达性强的自动钢筋绑扎控制程序。该控制程序可以实现三轴绑扎机器人对绑扎点的识别与定位, 有效提高设计效率, 节约调试时间。

关键词: 钢筋绑扎机器人; Petri 网; 可达性分析; 控制流程

中图分类号: TP241.2

文献标志码: A

文章编号: 2097-3853(2024)06-0542-07

Design and optimization of automatic rebar binding control flow based on Petri net

WANG Changhong^{1,2}, WU Xuanzhong^{1,2}, LI Zhanfu^{1,2}

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China;

2. Fujian Key Laboratory of Intelligent Processing Technology and Equipment, Fuzhou 350118, China)

Abstract: Aiming at a three-axis automatic steel bar binding robot built with PLC as the controller, the operation process was modularly modeled according to the binding process and the actual situation of the robot. The correlation matrix was established by using the Petri net which is optimized in an inverse modular way, and the accuracy of the control process was judged by using the T invariant, and the automatic rebar binding control program with a stable body, obvious boundary and strong accessibility was designed. The control program can realize the identification and positioning of the binding point by the three-axis binding robot, which can effectively improve the design efficiency and save the debugging time.

Keywords: rebar binding robot; Petri net; accessibility analysis; control flow

采用 Petri 网建模对机器人装配线模型优化, 改进控制算法, 分析验证模型的可行性, 可以有效提高机器人装配线的平衡率和生产效率^[1-3]。宋运动等^[4]以 Petri 网理论为基础, 验证了模型的活性和可达性, 解决了柴油机装配线复杂的动态系统问题, 提高了生产效率。孙晨峰^[5]提出广义随机 Petri 网络(GSPN)模型, 计算系统的可靠性, 并利用蒙特卡洛的可靠性评价方式, 解决控制系统中冗余系统动态性能影响计算复杂的问题。Yuhai Yang^[6]将网络物理系统(CPS)技术与 Petri 网原理相结合, 建立了解决冲突的控制网络, 解决 Petri 网

冲突的任务分配算法和质量决策算法。庙要^[7]采用包以德循环(OODA)理论, 同时利用 Petri 网工具建立了 OODA 指挥控制模型, 可提升指挥控制效率、优化战场资源分配。石平义^[8]为解决 PLC 控制系统中存在不实用、检查程序设计出错困难等问题, 利用 Petri 网的建模与仿真工具 ExSpect 分析的结果来指导设计 PLC 控制系统的程序, 并确定了 PLC 控制系统可行、可靠性。张孙敏^[9]基于数据 Petri 网将工作流网与案例数据、决策相结合, 从而实现控制流视角和数据视角的交互。

本文采用 Petri 网分析钢筋绑扎机器人控制

收稿日期: 2024-03-13

基金项目: 福州市科技局项目(2020-GX-16)

第一作者简介: 王长红(1997—), 男, 四川遂宁人, 硕士研究生, 研究方向: 人工智能、机器学习

流程,将优化机器人控制系统,并指导 PLC 程序设计,有效提高程序设计效率,缩短调试时间。

1 基于三轴直角桁架钢筋绑扎机器人控制系统

1.1 系统设计

针对预制板生产线特点,设计了一种三轴直角桁架钢筋绑扎机器人,由 PLC 控制模块、双目视觉识别定位模块、自动绑扎模块和钢筋绑扎机器人模块组成,实验平台如图 1 所示。

该实验平台的伺服驱动系统采用三菱 PLC 作为主控制器分别设计了电源电路部分与控制电路部分。其中,电源电路为伺服放大器、伺服电机、绑扎枪、降热风扇、PLC 和相机等提供电源,并且充分考虑电路中的过载保护,电控箱内部如图 2(a)所示。通过 PLC 的输入和输出端子,将控制电路与各执行机构连接,分别实施控制。绑扎枪自主设计如图 2(b)所示,此绑扎枪只需电源通断即可执行绑扎动作。整体系统网络拓扑图如图 2(c)所示。系统主要硬件如表 1 所示。

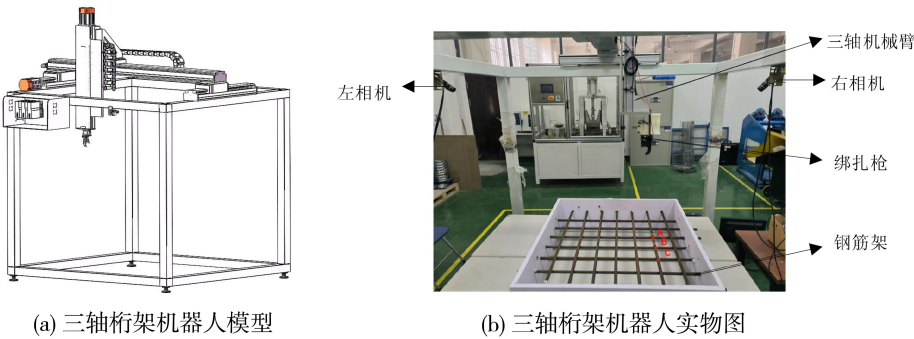


图 1 钢筋绑扎机器人实验平台
Fig.1 Rebar binding robot experiment platform

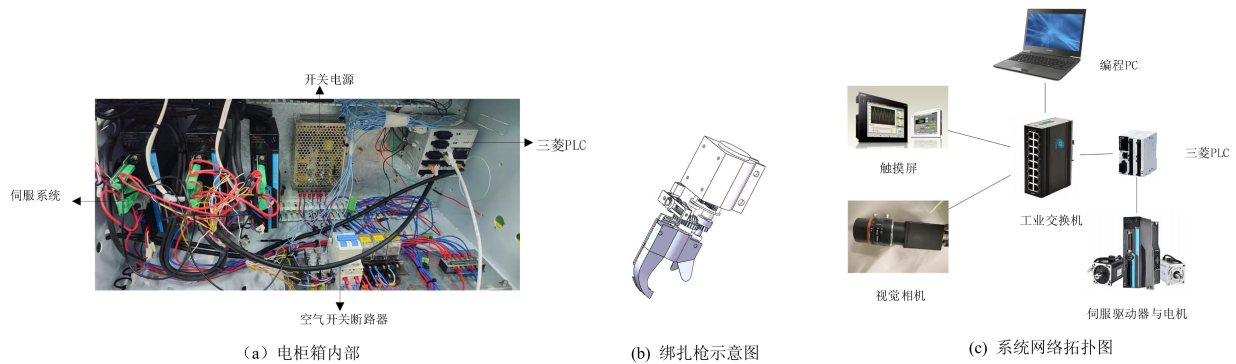


图 2 系统主要硬件图
Fig.2 Main hardware diagram of system

表 1 系统主要硬件
Tab.1 Main hardware of system

仪器名称	型号规格	备注
工业自动控制仪表系统,可编程控制器	FX5UC-64MT/D	配合 FX5-485ADP 模块使用
三菱人机界面触摸屏	8.4 英寸 GT27085-VTND	配合三菱 PLC 使用
海康彩色相机	MV-CA020-10GC 彩色	配合两台补光灯使用
排风扇	220V 供电源	无
日川科技伺服驱动器	NS2-R1-PA2P8	配合伺服电机 NM2-TH-0830A-532 使用
绑扎枪	8~34 mm 绑扎枪	无

1.2 钢筋绑扎机器人的控制流程

钢筋绑扎机器人控制流程主要包括:相机拍摄图片获取 RGB 彩色图片和深度信息、双目视觉识别与定位、确定绑扎点三维坐标和获取定位信息。通过路径规划,经 PLC 控制直线轴移动,完成绑扎动作。绑扎点经智能视觉相机触发拍照识别,获得位置信息,并将其发送给 PLC,PLC 根据获得的坐标信息驱使电机动作,到达指定位置后向绑扎枪发送指令,完成绑扎动作,如图 3 所示。

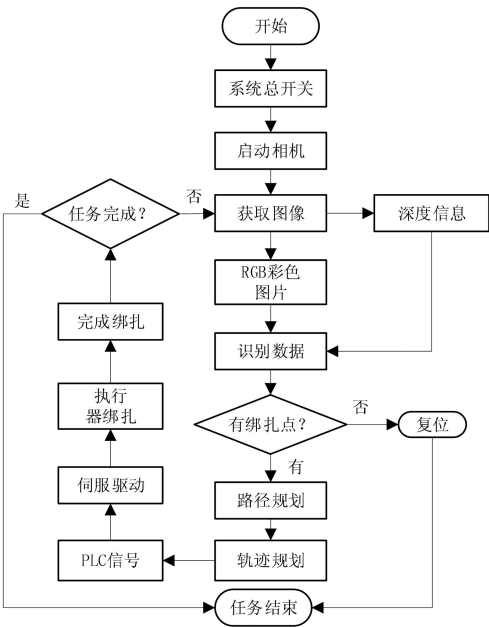


图 3 钢筋绑扎机器人控制流程图

Fig.3 Control flow chart of rebar binding robot

运动控制采用 PID 算法,通过 PLC 发布脉冲方向信号给伺服放大器,驱使伺服电机直线运动,到达定位点后,执行自动绑扎动作。视觉系统是实现机器人自动绑扎关键部分之一,主要获取绑扎点在相机坐标系下的空间信息,再将位置坐标变换到 PLC 下,引导机器人完成绑扎。

2 基于 Petri 网的控制流程分析

2.1 控制流程建模

基于 Petri 网控制流程建模,网图结构使用以下表述:

以“○”表示库所,当库所中有令牌(资源),则在“○”内存在黑点形式“⊙”;变迁规则设置为:实心矩形框表示变迁激发时间是正数;空心矩形框表示瞬时变迁激发时间为零。其中有向弧“→”连接库所和变迁。控制流模块进行 Petri 网

建模如图 4 所示。

图 4 主要描述了图像照片经过霍夫直线法优化骨架算法处理实现以 PLC 控制器通讯的控制流,经过一系列预处理(去除噪音,去除阴影,图片剪切等),进行深度学习辅助检测目标,使用骨架法判断出绑扎点的二维坐标,搜索到目标进行信息融合汇聚为三维坐标发布给 PLC。具体过程包括双目标定、双目校正,利用视差法求解绑扎点空间坐标,分析深度值误差,最后完成对绑扎点的定位。通过设置 PLC 控制器与 PC 以太网的通信方式,为绑扎定位提供三维坐标信息。最后将相机识别出来的数据信息经过 Python 与 PLC 之间的通讯,写入并读取数据到 PLC,对视觉检测结果和数据进行传输。

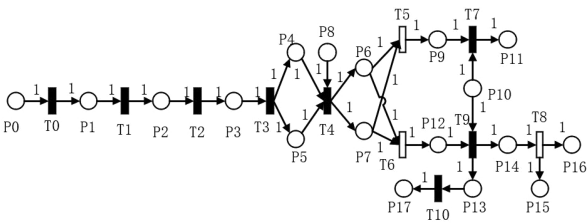


图 4 钢筋绑扎机器人控制流程模型

Fig.4 Control flow model of rebar binding robot

图 4 中每个库所定义及状态如表 2 所示,每个变迁及状态变化如表 3 所示。

表 2 绑扎机器人控制模块库所定义及状态

Tab.2 Definition and status of binding robot control module library

库所序号	库所定义	库所状态
P0	图片 RGB 颜色信息	等待去噪处理
P1	去除噪音的图片信息	等待去阴影处理
P2	去除阴影的图片信息	等待归一化处理
P3	图片归一化处理后的数据	目标识别的深度学习
P4	已识别绑扎点的平面坐标	$4 \times N_1$ 矩阵
P5	已识别成功绑扎点的平面坐标	$4 \times N_2$ 矩阵
P6	已识别绑扎点的三维坐标	$3 \times N_1$ 矩阵
P7	已识别成功绑扎点的三维坐标	$3 \times N_2$ 矩阵
P8	图像的深度数据	深度数据
P9	需要绑定信号。	等待 PLC 指令

续表		
库所 序号	库所定义	库所状态
P10	三维空间中机械臂末端执行器 的位置信息	三维坐标 (x_j, y_j, z_j)
P11	机械臂的移动轨迹记录	矩阵信息 ($3\times G$ 矩阵)
P12	进行复位信号	脉冲信号已就绪, 等待路径规划开始
P13	轨迹路线信息	轨迹路径点坐标 矩阵信息($3\times G$ 矩阵)
P14	机械臂进行复位信号	等待任务的结束信号
P15	复位信号成功	等待任务的结束信号
P16	钢筋绑扎任务完成	任务完成
P17	机械臂的移动轨迹记录	矩阵信息($3\times G$ 矩阵)

表 3 绑扎机器人控制模块变迁定义及状态变化

Tab.3 Transition definition and state change of control
module of binding robot

变迁序号	变迁定义	状态变化
T0	图像降噪处理	采用图像处理技术去 除噪音
T1	图像阴影处理	采用图像处理技术清 除阴影
T2	图片归一化	深度学习预处理
T3	骨架算 法 目 标 识别	通过霍夫直线法优化 的骨架算法处理进行 目标识别
T4	信息融合	通过二维坐标与深度数 据构建三维空间坐标
T5	识 别 绑 扎 的 绑 扎点	$Size(N_1, 1) \geq 1$, 需要 绑扎的绑扎点
T6	绑扎的绑扎点	$Size(N_1, 1) = 0$, 不需要 绑扎的绑扎点
T7	路径规划	排序数据集
T8	任务完成	完成信号
T9	路径规划	减少进程时间
T10	轨迹优化规划	接收目标和当前坐标

2.2 可达性分析

为确保 Petri 网模型构建的准确性,T 不变量
提供了一种有效的手段,用于分析 Petri 网模型的

可达性、有界性、活性等关键属性。定义行向量 J
满足 $J_{1\times m}\times C_{m\times n}=0$,且所有项均为零或正整数,则
称行向量 J 是网系统 Σ 的 T 不变量。T 不变量算
法步骤如下。

- (1) $A=C_{m\times n};B=I_{m\times m};$
- (2)重复设 $I=1\sim m;$
- (3)对矩阵 $[A|B]$ 中的任意两行 r_1 和 r_2 应
用非负线性消元。若能确定正数 k_1,k_2 ,它们的线
性组合能够将矩阵 $[A|B]$ 中的 A 行置为零向量,
则矩阵 $[A|B]$ 将被转换为 $(A'|B')$, A' 和 B' 是消
元后的 A 和 B 矩阵。
- (4)删除矩阵 $(A'|B')$ 中 A' 部分所有的非零
行,那么 B' 部分的行向量将构成 Σ 的 T 不变量。

建立 Petri 网模型得到输入矩阵 $I_{18\times 11}$ 、输出
矩阵 $O_{18\times 11}$,通过公式(1)计算关联矩阵 $C_{18\times 11}$,关
联矩阵如式(2)所示。

$$C_{18\times 11}=O_{18\times 11}-I_{18\times 11}$$
$$C_{18\times 11}=$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

(2)

通过公式(3)进行非负线性消解,计算得
 $A_{18\times 18}$ 矩阵为关联矩阵 $C_{18\times 11}$ 的 T 不变量集合矩
阵。其中, $E_{18\times 18}$ 为单位矩阵; $B_{18\times 11}$ 为变化后存在
几行全为 0 的矩阵。

$$G_{18\times 29}=[C_{18\times 11}|E_{18\times 18}]=[B_{18\times 11}|A_{18\times 18}]$$

(3)

按照 T 不变量算法步骤解得:

$$J_1=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 1 \ 1 \ 0$$

$$1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

$$J_2=[0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0$$

$$0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$$

$I \quad I \quad I \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad I]$

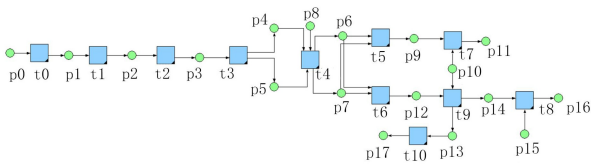
$J_3 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1$

$1 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1]$

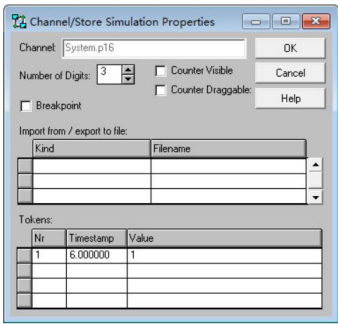
由矩阵相乘得 $J_1 \times C_{18 \times 11} = 0, J_2 \times C_{18 \times 11} = 0, J_3 \times C_{18 \times 11} = 0$ 均满足 T 不变量条件,因此钢筋绑扎机器人 Petri 网系统模型存在 T 不变量,从而验证了控制流程的可达性。

2.3 可靠性分析

将钢筋绑扎机器人控制流程的 Petri 网模型进行仿真,控制流程的仿真模型如图 5(a)所示,在设计界面建立执行程序时,设置库所的 Type 类型定义为 num。设置 P0、P8、P10、P15 的初始托肯状态数为 1。同时设置变迁条件,以变迁 t6 为例,设置的程序执行语言如下:if p6=1 and p7=1 then p12<-p6 delay 1.0 fi;该程序含义为库所 6 和库所 7 同时得到托肯,并推迟 1 s 激发库所 P12 得到托肯。



(a) 控制系统的仿真模型



(b) 控制系统的仿真结果

图 5 控制系统仿真过程图

Fig.5 Control system simulation process diagram

通过上述仿真参数界面图 5(b) 仿真结果中 Timestamp 可以看到,任务完成库所 P16 的所需运行时间为 6 s。基于系统的过程模拟与执行结果比较直观地得出结论,建立的可执行模型中的托肯能够按照规定的规则运行和流动,并在设定时间内到达指定的库所。证明基于 Petri 网模型建立的钢筋绑扎机器人控制流程准确,具有边界和可达性,其可靠性得到验证。

3 控制系统设计

3.1 PLC 程序设计

三轴桁架机器人控制器采用 PLC,利用 Petri 网理论分析库所和变迁之间的因果关系,结合控制流程以及工艺制作流程,采用梯形图的编程方法设计程序,创建主程序 main,由主程序调用子程序,包括原点回归、手动模式、Auto 模式、覆盖绑扎模式、单点绑扎模式、中断模式等子程序。PC 与 PLC 之间的通讯采用以太网直联的通讯方式。机器臂的电机启停信号及钢筋绑扎点位置坐标数据以变量的形式存储,具体数值通过 Python 与 PLC 通讯读取与发送进行赋值。

PLC 逻辑控制模块主要功能是处理系统接收的 IO 信号,此类信号不需要通过插补、坐标变换等算法处理,直接控制相关硬件完成动作,传输与转换迅速。表 4 为已有的控制信号。

表 4 系统控制信号
Tab.4 System control signals

分类	功能描述	执行部件
系统	系统电源、系统断电、急停、复位、手动模式、Auto 模式	可编程控制器
视觉检测	相机得电、相机断电、开始检测、取消检测	彩色相机
伺服功能	伺服上电、伺服断电、伺服使能、取消伺服	伺服驱动器
绑扎功能	绑扎上电、绑扎断电、绑扎使能、取消绑扎	自动绑扎枪
限位功能	控制行程、限位保护	限位传感器
辅助功能	照明、报警	照明灯、报警灯

Petri 网模型包括顺序、并发、循环等控制,既有独立部分,又有联系和竞争部分,建立图 6(a)所示的基于 Petri 网的 PLC 程序模型,并将图 6(a)建立的 Petri 网模型进行拆分、删除、合并、保留等优化,采用逆模块化的方式优化组合 Petri 网模型,得到图 6(b)。表 5 为部分 PLC 程序 Petri 网模型库所和变迁定义。

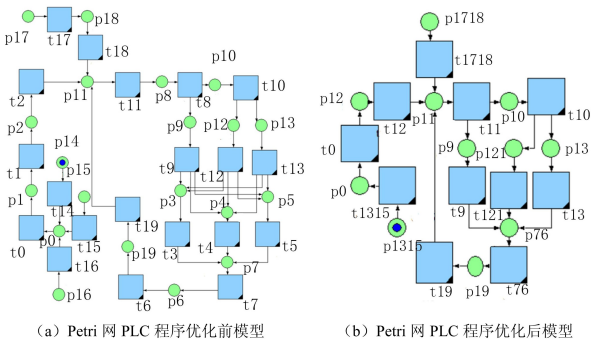


图 6 Petri 网 PLC 程序模型

Fig.6 PLC program model based on Petri net

表 5 部分 PLC 程序 Petri 网模型库所和变迁定义

Tab.5 Part of PLC program Petri net model library and transition definition

库所	库所定义	变迁	变迁定义
P0	三轴是否回到原点	T0	进行原点回归模式
P1	是否检测到绑扎点	T1	进行视觉检测绑扎点
P2	绑扎枪开关是否打开	T2	绑扎枪开关打开
P3	X 轴是否运行到位	T3	X 轴伺服驱动
P4	Y 轴是否运行到位	T4	Y 轴伺服驱动
P5	Z 轴是否运行到位	T5	Z 轴伺服驱动
P6	绑扎枪是否绑扎	T6	绑扎枪执行绑扎
P7	是否绑扎模式	T7	绑扎模式
P8	开始	T8	模式选择
P9	是否手动模式	T9	手动模式
P10	是否自动模式	T10	自动模式
P11	系统是否准备完毕	T11	系统准备完毕
P12	是否覆盖绑扎模式	T12	覆盖绑扎模式
P13	是否单点绑扎模式	T13	单点绑扎模式
P14	X 轴运行到限位	T14	X 伺服电机停止信号
P15	Y 轴运行到限位	T15	Y 伺服电机停止信号
P16	Z 轴运行到限位	T16	Z 伺服电机停止信号
P17	系统故障	T17	中断模式
P18	是否复位	T18	确认复位信号
P19	任务完成	T19	任务完成确认信号

图 6(a)描述的是机械臂运动到限位后经过原点回归、系统复原后进行绑扎的一个任务流程,通过图 6(a)与图 6(b)模型对比可知,优化后保留控制流程中关键库所与变迁,将使得 PLC 程序

设计分析更简洁,有界且可达。由图 7(a)和图 7(b)仿真结果可知,优化后将有效提高 PLC 程序设计效率,节约调试时间。图 8 为原点回归部分程序。

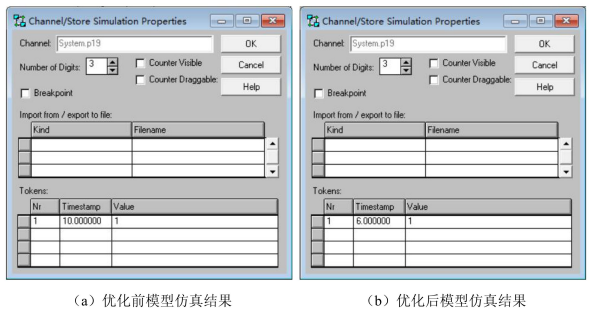


图 7 基于 Petri 网 PLC 程序模型仿真结果

Fig.7 Simulation results of PLC control model based on Petri net

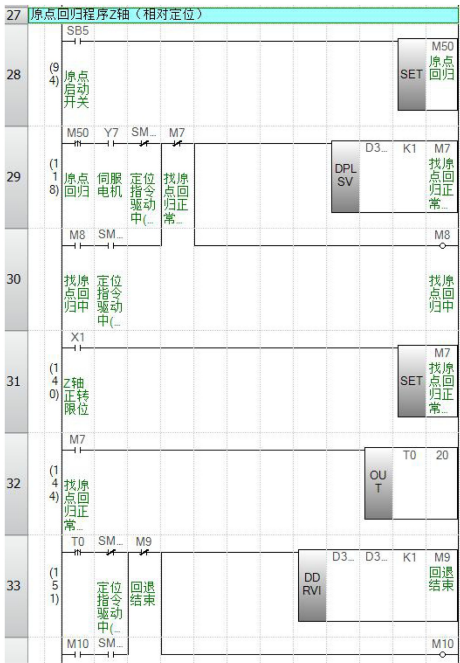


图 8 部分控制程序

Fig.8 Part of control program

3.2 人机交互界面设计

系统调试运行后可脱离电脑 PC,以触摸屏 HMI 控制系统的基本运行与状态。设置系统的单机、联机模式,控制电机运行、伺服电机的正反转、点动与停止、手动模式、Auto 模式、覆盖绑扎模式、单点绑扎模式、中断模式、状态监控等,将 PLC 的输出变量及中间变量通过“按钮”组件进行设定;通过基本控件的外观颜色显示限位传感器及自动绑扎的状态,如绑扎点、位置坐标。人机

交互界面设计如图 9 所示。

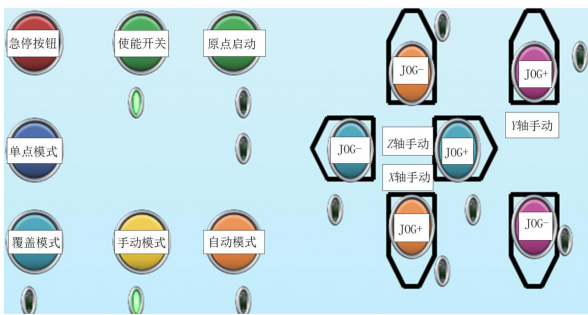


图 9 人机交互界面

Fig.9 Human-computer interaction interface

4 结论

- 1)设计的控制程序可以实现三轴绑扎机器人对绑扎点的识别与定位,有效提高设计效率,节约调试时间。
- 2)使用 ExSpect 建立 Petri 网仿真的可靠性分析系统,可以实现模型可视化,直观发现设计的逻辑错误,以 PLC 控制程序验证,实验效果良好。
- 3) 基于 Petri 网控制流程设计的控制程序,为工业应用提供一种新的样本,具有一定的工程参考价值。

参考文献:

[1] BLAGA F S,POP A,HULE V,et al. The efficiency of modeling and simulation of manufacturing systems using Petri nets [J]. IOP Conference Series:Materials Science and Engineering,2021,1169(1):012005.

[2] 郭艳红,李建伟. 自控网络 Petri 模型下机器人装配线多目标平衡 1[J]. 机械设计与制造,2021(9):168-171,176.

[3] 郑金来,张猛,熊昌秀,等. 基于 Petri 网模型的自动线流程设计与分析[J]. 组合机床与自动化加工技术,2018(1):60-63,68.

[4] 宋运动,张接信. 基于 Petri 网的柴油机装配线建模分析与研究[J]. 机械研究与应用,2018,31(4):13-15,19.

[5] 孙晨峰,吕卫民,丛林虎,等. 基于广义随机 Petri 网的混合冗余系统可靠性建模[J]. 兵工学报,2022,43(8):2007-2016.

[6] YANG Y H,LIU X D,LU W. A cyber-physical systems-based double-layer mapping petri net model for factory process flow control[J]. Applied Sciences,2023,13(15):8975.

[7] 庙要要,王楠,王建华,等. 基于 Petri 网的多无人平台协同指挥控制建模与分析[J]. 战术导弹技术,2022(6):103-110.

[8] 石平义,方宁,邓建胜,等. 基于 Petri 网的耳机部件自动装配设备 PLC 控制系统研究[J]. 电子器件,2018,41(2):501-506.

[9] 张孙敏,方欢. 基于数据 Petri 网的车险理赔流程建模和分析[J]. 黑龙江工程学院学报,2023,37(6):23-28.

(责任编辑:陈雯)