

# 基于 RobotStudio 的热水壶冲压生产线仿真及研究<sup>\*</sup>

李国财 章盼梅 邹景豪 胡可 于泽楷  
(广州城市理工学院机械工程学院 广州 510800)

**摘要:**为解决热水壶人工冲压生产线送料强度大、安全系数低、人工成本高及自动化程度低的问题,提出基于 RobotStudio 搭建多机器人智能冲压生产线,进行离线编程及仿真的设计方案。根据热水壶冲压生产工艺要求,构建了工业机器人生产线布局方案,设计了气动夹钳式末端执行器,创建了动态 Smart 组件及生产线仿真运行 I/O 信号,实现了多台工业机器人协同冲压的生产线离线编程及仿真。仿真结果表明,通过传输控制协议(TCP)追踪机器人运动路径结合 Smart 组件将生产节拍提高了 33.3%,仿真结果验证了工艺过程及生产节拍的合理性,采用信号分析监测并将机器人的最大加速度  $a_{\max}$  降低了 43.116 m/s<sup>2</sup>,减少了机器人的轴间磨损。RobotStudio 软件生成的离线程序可减少机器人现场调试时间。

**关键词:** RobotStudio; 冲压生产线; 虚拟仿真; 轴间磨损

**中图分类号:** TP242.2; TN081 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8050

## Simulation and research of hot kettle stamping production line based on RobotStudio

Li Guocai Zhang Panmei Zou Jinghao Hu Ke Yu Zekai

(School of Mechanical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

**Abstract:** Based on RobotStudio, we propose a design for a multi-robot intelligent stamping production line for electric kettle manufacturing. This addresses issues such as high feeding strength, low safety margins, high labor costs, and low automation levels. According to the requirements of hot water kettle stamping production process, this study constructs the industrial robot production line layout scheme, designs the pneumatic clamp end-effector, creates the dynamic Smart components and production line simulation I/O signals, and realises the offline programming and simulation of the production line of multi-robot collaborative stamping. The Simulation results indicate a 33.3% production cycle improvement with TCP tracking of robot motions and Smart components integration. Signal analysis reduced the maximum robot acceleration ( $a_{\max}$ ) by 43.116 m/s<sup>2</sup>, minimizing interaxial wear. RobotStudio-generated offline programs cut down on-site robot debugging time.

**Keywords:** RobotStudio; stamping production line; virtual simulation; interaxial wear

## 0 引言

热水壶是一种极常用的家居消耗品,其壶身需经多道冲压工序压制成型。传统的人工热水壶冲压生产线存在劳动强度大,人工成本高,安全隐患大,噪声大,危害工人健康等问题<sup>[1]</sup>。用工业机器人代替人工进行冲压送料,不仅能稳定冲压产品质量及生产安全,还能持续高强度作业并保持稳定的生产节拍。热水壶冲压生产线由于其生产的壶体产品具有不规则的弧面结构,抓取难度大,因此要求机器人

在搬运过程中必须具有极高的重复定位精度和稳定性,需要花费大量的时间、人力、物力进行调试。工业机器人离线编程软件对机器人冲压生产线进行仿真设计,不仅缩短调试周期,还可提高工业机器人安全性及其使用性能。

近年来,国内学者基于 ABB 公司的机器人仿真软件 RobotStudio 对生产线进行研究。侯仰强等<sup>[2]</sup>针对汽车冲压线人工成本问题,利用建模软件 SolidWorks 对生产线搭建并在 RobotStudio 对汽车冲压线整线装配,通过同步运动和机器人技术(synchronized motion and robot tech-

收稿日期:2024-07-01

<sup>\*</sup> 基金项目:广州城市理工学院大学生创新创业训练计划(SJ230044)项目资助

nology, Smart) 组件实现仿真, 对汽车冲压生产线实现自动化升级。郝建豹等<sup>[3]</sup>针对不锈钢盆人工送料安全问题, 设计机器人手部和打磨抛光工作站, 并在 RobotStudio 动态模拟生产线运行得到验证。耿永秀等<sup>[4]</sup>针对冰箱门壳体冲压生产过程设备安全问题, 利用 RobotStudio 对机器人搬运轨迹进行布局规划和内旋与外旋路径仿真分析, 优化了设备路径。许国强<sup>[5]</sup>针对人工冲压件分拣效率问题, 设计冲压件分拣装置在 RobotStudio 实现仿真, 得出工业机器人与机械装置如何配合工作的结论。

以上研究为基于工业机器人冲压生产线的改进仿真奠定了基础, 但在动作仿真及路径规划中未考虑机器人的轴间磨损以及使用寿命问题。本研究以热水壶壶身冲压生产线为研究对象, 采用 Smart 组件完成整线的动态生产仿真并设置智能升级的生产节拍, 利用传输控制协议 (transmission control protocol, TCP) 追踪并优化机器人的运动路径, 降低机器人的轴间磨损, 提高机器人的使用寿命和冲压生产的稳定性。

## 1 热水壶冲压生产线布局设计

此热水壶冲压生产线原有毛坯输送线及成品输送线各 1 条, 3 台冲压机, 5 名工人。工人需要将热水壶毛坯放至毛坯输送线, 取出后经冲压机卷边、收口、冲孔, 再放至成品输送线。通过对生产能力进行分析, 确保满足生产任务需求<sup>[6]</sup>。拟购置 4 台 ABB 工业机器人, 对产线进行智能升级, 将生产节拍 12 s 提高至 8 s。

在三维设计软件 Solidworks 中将生产线的输送线, 冲压机, 热水壶模具及工业机器人末端夹持器仿真模型导入 RobotStudio 中, 生产线布局如图 1 所示。生产线从左往右进行, 线首单元为毛坯输送线, 3 台冲压机串联排列, 4 台工业机器人中心线平齐, 并位于两台压力机的中心线上, 线尾为成品输送线。冲压搬运机器人选用了 RobotStudio 自带的 ABB 机器人模型库中的 IRB2400\_10\_150 机器人。该机器人具有高精度、高速度、高稳定性和高可靠性, 适用于上下料, 搬运等工作。

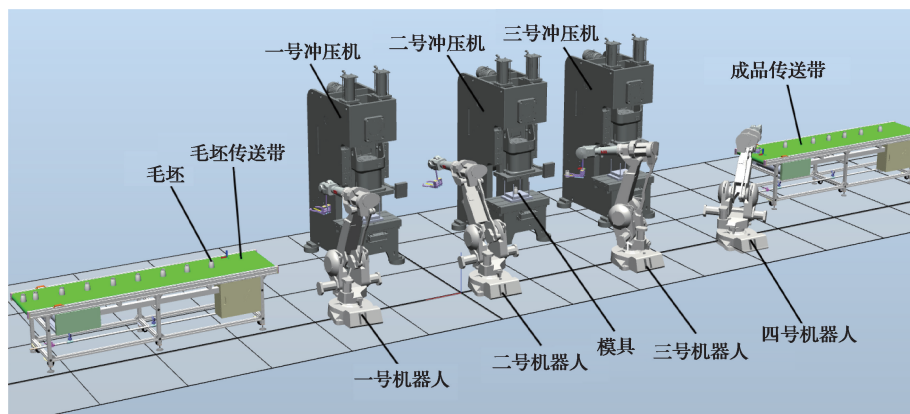


图 1 热水壶冲压生产线布局

Fig. 1 Layout of kettle stamping production line

## 2 工业机器人末端夹持器设计

由于热水壶壶身为圆弧状, 结合冲压搬运特点, 设计工业机器人末端夹持器采用外夹式气动手指方式夹持毛坯。气动手指的左右二指可同进退, 结构简单, 低成本, 易实现稳定控制, 如图 2 所示。法兰轴前端连接工业机器人第六轴的法兰, 末端连接气缸安装板, 安装板上安装双活塞驱动的大口径机械夹。大口径机械夹爪两端安装左右手指, 采用气动控制, 可同开同闭。光电传感器安装在大口径机械夹爪底部, 用于感应末端夹持器是否夹持毛坯。

## 3 生产线控制流程设计

热水壶冲压生产线采用分布式控制系统, 把各设备以控制与通信链路系统 (control & communication link, CC-Link) 开放式现场总线为路径连接起来, 从而实现相互通信。CC-Link 现场总线控制采用单主站结构控制, 主站采用较高性能的 PLC, 使其从整个控制中独立出来, 专

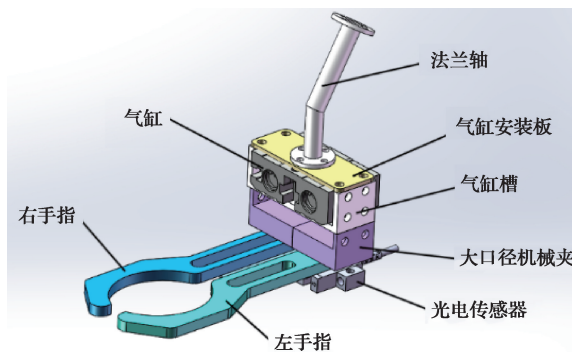


图 2 末端夹持器结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of end holder structure

门控制整条生产线控制, 从站每台 PLC 与控制模块独立控制各自的压机与机器人, 运行效率大大提高。

热水壶冲压生产线以三菱可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 为控制核心, 其控制流

程如图3所示。PLC上电后,PLC程序运行初始化程序,主站PLC发送初始化信息给机器人从站PLC,机器人PLC内部程序开始运行初始化,当接收到主站PLC回原点信号后,开始运行回原点程序并持续判断机器人是否已回到原点,机器人回原点后,等待下一步指令。同时,毛坯输送线启动,末端的光电传感器检测到热水壶毛坯到位后,一号工业机器人抓取热水壶毛坯至一号冲压机的模具中,放下热水壶毛坯后移出一号冲压机,一号冲压机接收到热水壶毛坯就位信号后开始冲压,完成冲压后,将信号反馈给主站PLC,主站PLC接收到一号冲压机完成冲压信号后,发出指令到2号工业机器人搬运。3台冲压机运行程序基本相同,配合工业机器人和主站PLC共同完成生产线加工流程。

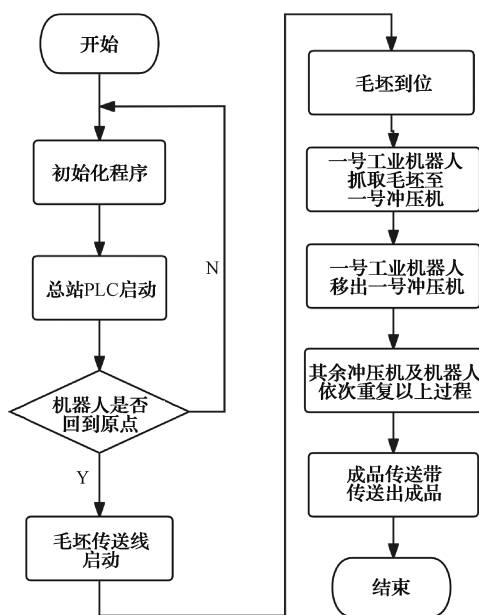


图3 热水壶冲压生产线控制流程

Fig. 3 Control process of kettle stamping production line

#### 4 生产节拍设计

依据标准 GB/T 12642—2013《工业机器人性能规范及其试验方法》,位置稳定时间是从首次进入允许误差范围内到最终稳定所需时间。在整个生产流程中,均需要严格控制机器人上下料允许进入的工作区间<sup>[7-8]</sup>,依此对热水壶冲压生产线中的工业机器人换料及生产时间进行分析设计,如表1所示。

工业机器人从初始位置进入冲压机对应位置,其末端夹持器通过气缸控制左右手指夹紧热水壶壶身后移出冲床,并移动到下一台冲压机,将热水壶壶身放到冲压机下模的对应位置,末端夹持器通过气缸控制左右手指松开热水壶壶身后移出该冲压机,工业机器人移动至上一台冲压机,重复前述动作。其中气缸夹紧或松开壶身需要1 s,工业机器人在同一台冲压机上完成移动动作需要0.5 s,移

表1 工业机器人换料生产节拍

Table 1 The production cycle of industrial robot refueling

| 步骤 | 动作描述           | 时间/s |
|----|----------------|------|
| 1  | 工业机器人进入冲压机     | 0.5  |
| 2  | 气缸夹紧热水壶壶身      | 1    |
| 3  | 工业机器人移出冲压机     | 0.5  |
| 4  | 工业机器人移动到下一台冲压机 | 1    |
| 5  | 工业机器人将热水壶壶身放到位 | 0.5  |
| 6  | 气缸松开热水壶壶身      | 1    |
| 7  | 工业机器人移出冲压机     | 0.5  |
| 8  | 工业机器人移动到上一台冲压机 | 1    |

动至相邻冲压机需要1 s,因此,工业机器人完成换料的生产节拍需要6 s。由于冲压机冲压热水壶壶身需要2 s,因此整个生产线的节拍设计为8 s,基于以上的时间设计在对应动作的Smart组件可进行设置。

#### 5 生产线组件及仿真逻辑设计

在RobotStudio软件中,用户可创建自定义的Smart组件,通过定义属性和连接信号,实现逻辑控制功能。同时Smart组件可以连接真实或虚拟的I/O信号,对工业机器人与工件之间的动作进行交互仿真,从而可在实际设备投产前验证工业机器人的路径和动作的可行性。

##### 5.1 冲压机组件及仿真逻辑设计

冲压机采用模块化方式进行编程,将冲压机滑块下压及抬起动作集成后定义为冲压机的运动,其中一号冲压机组件设计如图4所示。其中,PlaneSensor组件为面传感器,通过检测设定面(即下模上表面)有无工件发送下一个信号。这是一种保护安全冲压的机制,即检测到冲压毛坯放置到位信号的同时,面传感器也需要检测到工件冲压机才能进行下压动作。PoseMover分为下压姿态(down)和基础姿态(home)两种。Logicgate为逻辑门非门,配合线移动

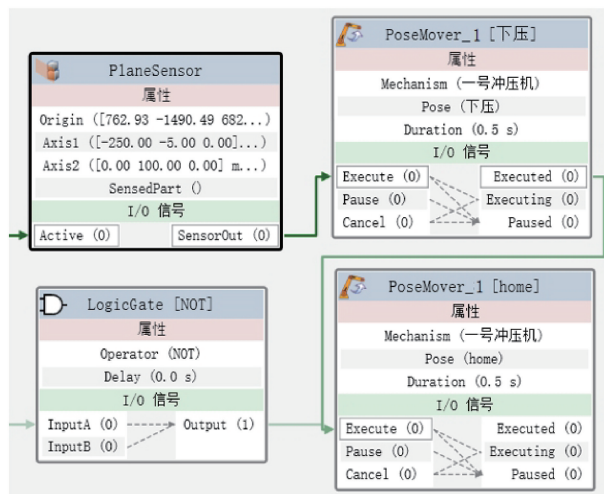


图4 一号冲压机组件设计

Fig. 4 Design drawing of the first press components



组件实现,毛坯移动到设定位置则停止。在启用逻辑门的情况下,冲压机进行下压后将下压运动维持到基础姿态。

对冲压机进行仿真前,对各工位上的冲压机建立 I/O 信号逻辑搭建,一号冲压机仿真 I/O 信号如表 2 所示。在 Smart 组件中设计仿真逻辑顺序如下:一号冲压机(No1\_punch)受源信号 StampStart 输入,执行非门 LogicGate [NOT],此时滑块抬升。Output 信号输出后,PoseMover\_1 [home]设置起始位点。热水壶毛坯放置于面传感器上时,SensorOut 信号输入,PoseMover\_1[下压]执行下压动作。下压到位后,源信号 Executed 启动,PoseMover\_1 [home]回归原位置,工业机器人取出成型毛坯。

表 2 一号冲压机仿真 I/O 信号

| Table 2 Simulated I/O signals of the first press |              |             |         |
|--------------------------------------------------|--------------|-------------|---------|
| 源对象                                              | 源信号          | 目标对象        | 目标信号    |
| LogicGate                                        | Output       | PoseMover_1 | Execute |
| PoseMover                                        | Executed     | LogicGate   | Execute |
| No1_punch                                        | StampStart   | PoseMover_1 | InputA  |
| No1_punch                                        | Stamp_Finish | PoseMover_1 | Execute |

基于上述 I/O 信号建立后,在 RobotStudio 中的 RAPID 程序对冲压机功能程序进行设计,该程序可接收工件外部信号,执行冲压机的逻辑控制。

冲压机程序设计如下:

```
Waitdi _planesensor2,1; //等待冲压机面传感器检测到工件
if (di _planesensor2==1)// 判断是否检测到工件
{
set do _3;//如果检测到工件则发出 do _3 信号
set di _4;// 实施冲压
TPWrite"Stamping start";//并输出冲压开始字样
WaitTime 0.5;//等待 0.5 秒后,冲压结束
reset di _4;//复位 di _4
reset do _3;//复位 do _3
TPWrite"Stamping over";//并输出冲压结束字样
else//如果未检测到工件
TPWrite"Warning:Missing workpiece";//则直接输出“警告:未检测到工件”字样
}
WaitTime 0.1;//等待 0.1 秒
ENDPROC //结束当前的过程或函数
```

5.2 末端夹持器组件及仿真逻辑设计

末端夹持器在不同工况下有不同的运动方式和结构方案,以满足其使用需求<sup>[9]</sup>。此冲压生产线的末端夹持器为外夹式气动手指,一号末端夹持器组件设计图如图 5 所示。

末端夹持器抓取热水壶壶身时序仿真之前,对各工位上的末端夹持器建立 I/O 信号逻辑搭建,为一号末端夹持器仿真立 I/O 信号如表 3 所示。

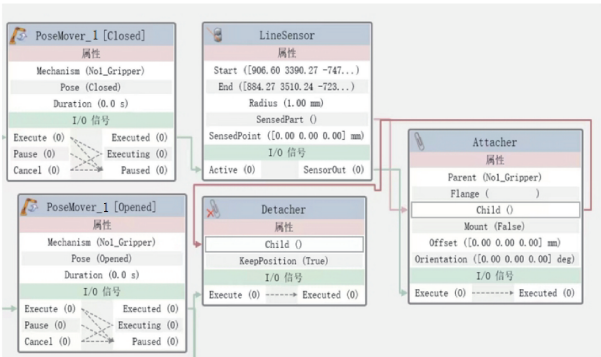


图 5 末端夹持器组件设计

Fig. 5 Design drawing of the end gripper assembly

表 3 一号末端夹持器仿真 I/O 信号

| Table 3 Simulated I/O signal of the first end gripper |           |             |         |
|-------------------------------------------------------|-----------|-------------|---------|
| 源对象                                                   | 源信号       | 目标对象        | 目标信号    |
| PoseMover_1                                           | Executed  | Detacher    | Execute |
| LineSensor                                            | SensorOut | Attacher    | Execute |
| No1_Gripper                                           | Start     | PoseMover_1 | Execute |
| PoseMover_1                                           | Executed  | LineSensor  | Active  |
| No1_Gripper                                           | End       | PoseMover_1 | Execute |

其中 PoseMover\_1 分为抓取姿态和松开姿态两种,在启用逻辑门的情况下,可与线传感器配合实现自动抓取。LineSensor 为线传感器,可识别是否有工件与线传感器相交,此处用于“拆除”与“拾取”组件的配合以实现抓取工件搬运的功能<sup>[10]</sup>。Attacher 用于将末端夹持器和热水壶毛坯配合一起移动。Detacher 用于取消末端夹持器和热水壶毛坯的配合状态,使其分开。

在 Smart 组件,对末端夹持器进行仿真逻辑顺序设计。末端夹持器的面传感器检测到 Start 源信号后,源对象气动手指张开,并通过 Attacher 信号对末端夹持器执行 PoseMover\_1 [Closed]对热水壶毛坯进行夹取。进行预定目标路径移动到相关指定位置,接着应用逻辑门中非门 LogicGate [NOT]信号对气动手指先维持原先的闭合状态,后承接上状态在 PoseMover\_1 [Opened]源对象进行 PoseMover\_1[Opened],气动手指张开,目标对象 Detacher 执行后,将热水壶毛坯放下,完成单个末端夹持器的全部 I/O 信号逻辑运作。

5.3 生产线仿真逻辑设计

热水壶冲压生产线的 CC-Link 与 PLC 通过三菱 FX-L-M 模块连接,与 ABB 机器人通过 DSQC37 通信板连接。RobotStudio 软件中的 Smart 组件能展示搬运场景动画,模拟 PLC 与 ABB 机器人的通信功能。RobotStudio 软件中的 Smart 组件能体现出搬运场景的动画效果,Smart 组件与 PLC 的功能相同,可模拟 PLC 与 ABB 机器人的通信<sup>[11]</sup>。在仿真系统中,通过 Smart 组件创建工业机器人、末端夹持器、冲压机及传送带的模型,并利用 I/O 信号连接整线设备的输入和输出,如图 6 所示。这些 I/O

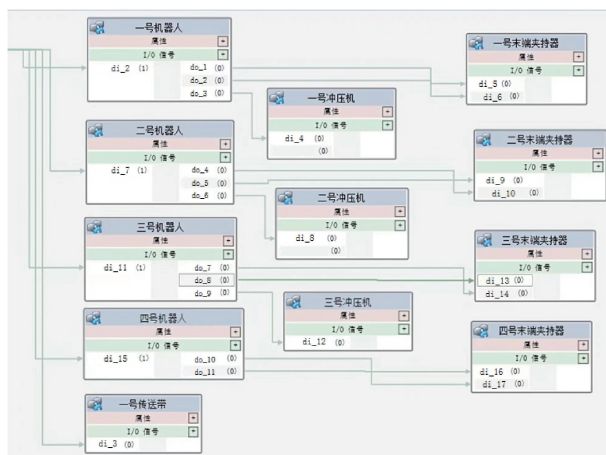


图6 冲压生产线 I/O 信号设计

Fig. 6 I/O signal design of stamping production line

信号用于协调各设备的动作,确保生产线的高效运行。Smart 组件不仅提供动画效果,还能模拟实际生产中的设备交互和通信,帮助优化生产线设计和运行。

生产线各个设备间通过建立 PoseMover 传感器实现工件生产的协同配合,其中一号工业机器人及其末端夹持器,毛坯输送线,一号冲压机所在的 1 号工位生产线仿真 I/O 信号如表 4 所示。

当 di\_1 信号发出时,激活工作站,进而发出信号激活机器人和传送带。以一号机器人为例,当一号机器人接收到由工作站发出的 di\_2 信号后,将根据内置组件位点进行移动。到达设定位置后,进行姿态运动并输出 do\_2 信号激活末端夹持器,夹持器产生 di\_6 信号实现抓取。机器人到达放置位置时输出 do\_1 信号,激活夹持器产生 di\_5 信号松开气动手指。夹持器移出冲压机后,输出 do\_3 信号使冲压机下压,产生 di\_4 信号。其余设备 I/O 信号

表 4 一号工位生产线仿真 I/O 信号

Table 4 Simulated I/O signals of the first station production line

| 序号 | 信号名称 | 信号含义               | 类型 | 信号来源    |
|----|------|--------------------|----|---------|
| 1  | di_1 | 启动整个工作站            | 输入 | 冲压仿真生产线 |
| 2  | di_2 | 启动一号机器人            | 输入 | 一号机器人   |
| 3  | di_3 | 启动传送带              | 输入 | 毛坯输送线   |
| 4  | do_1 | 发送松开气动手指指令         | 输出 | 一号机器人   |
| 5  | do_2 | 发送闭合气动手指指令         | 输出 | 一号机器人   |
| 6  | do_3 | 发送一号冲压机下压指令        | 输出 | 一号机器人   |
| 7  | di_4 | 接收一号冲压机冲压信号        | 输入 | 一号冲压机   |
| 8  | di_5 | 接收一号机器人的姿态信号松开气动手指 | 输入 | 一号末端夹持器 |
| 9  | di_6 | 接收一号机器人的姿态信号闭合手指   | 输入 | 一号末端夹持器 |

设计类似,不再赘述。

## 6 热水壶冲压生产线仿真分析

热水壶冲压生产线组件的 I/O 信号搭建完毕后,用 RobotStudio 仿真功能选项卡中的控制功能,可启动动态传送带的动画仿真。然后在 Smart 组件信号中输出指令,启动所有传感器,即可进行仿真平台工作流程的仿真测试。

### 6.1 干涉分析

为观察搬运机器人效果,选择夹持器与机器人连接处为运动路径目标点。在仿真系统中设定夹持器坐标,通过示教器编程 4 台机器人的运动路径。完成目标点设置后,启动仿真运行热水壶冲压生产线,并用 I/O 仿真器监测信号,同时利用 TCP 跟踪功能观察机器人运动轨迹。

在 RobotStudio 中选择仿真选项卡的“信号分析器”,经过信号设置后可直观看到工作站仿真后各个数据量的变化趋势<sup>[12]</sup>。图 7 所示为一号工业机器人轴速度信号分析结果,其中不同颜色所指曲线依次对应一号工业机器人的第 1 轴至第 6 轴,6 条曲线没有出现断点(即奇异位置),因此冲压机机器人系统工作状态正常,搬运过程中无急

剧变化过程,无碰撞及干涉现象。

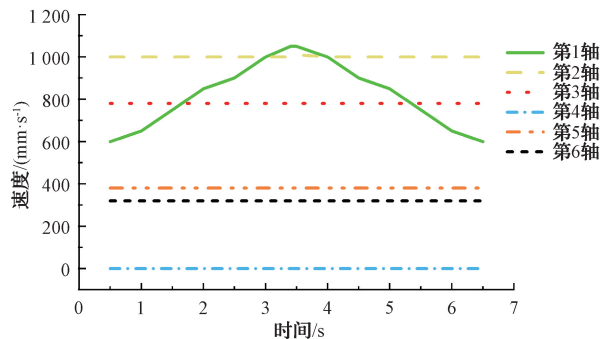


图7 一号工业机器人轴速度

Fig. 7 Axis velocity diagram of the first industrial robot

### 6.2 机器人速度及位姿路径分析

在 RobotStudio 中进行机器人运动路径仿真时,发现生产线节拍关键影响因素之一为上下料机器人的 TCP 速度,改变 TCP 速度也可改变节拍<sup>[13]</sup>。为提高生产安全性和效率,仿真过程中,通过预先捕捉进行路径优化前后的机械臂前端定向(轴)速度,如图 8 所示。发现优化前其在

2.8~3 s 出现急速变化,并且其前端(轴)速度峰值处在  $39^\circ/\text{s}$ ,由此可见未优化前动作急剧变化,会对机器人电机和减速器产生损耗,卡顿的减速器由于转动时会出现卡塞,导致运动过程不流畅,设备输出速度下降,使其使用寿命衰减,且其运动速率较慢,工作效率较低<sup>[14]</sup>。

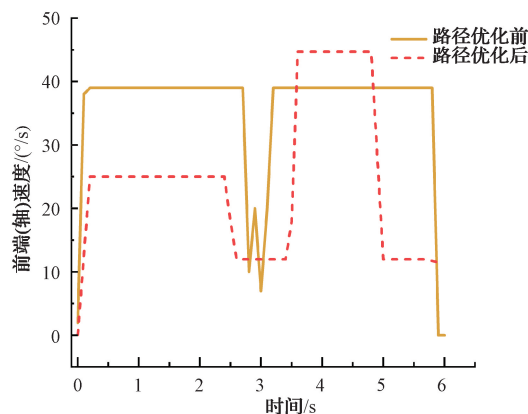


图8 一号机器人前端(轴)速度

Fig. 8 The first robot front-end axis speed

利用虚拟示教器可完成坐标点示教,程序设计和调试<sup>[15]</sup>。本文对虚拟示教器采用分离式路径优化,将单台机器人路径拆分为详细的子路径,对每个子路径的运动轨迹和速度进行优化,仅观测 TCP 目标点位置,不涉及末端夹持器的夹取和冲压机操作。即对急剧变化的 3 s 时段点位进行减缓或延长动作时间,减缓急剧动作变化。经过多次信号分析后,路径优化后,机器人前端(轴)速度曲线较为平缓,未出现急剧变化,且在 3.5~5 s 得到速度提升。

利用信号分析器对搬运机器人的加速度  $a$  进行监测,观察优化前后的变化,据分析显示,优化前的最大加速度  $a_{\max} = 270.16475 \text{ m/s}^2$ ,而优化后的最大加速度  $a_{\max} = 227.04861 \text{ m/s}^2$ ,相较于优化前降低约  $43.116 \text{ m/s}^2$ ,说明其轴间急剧变化情况有所下降。由此可见,通过 TCP 路径捕捉以及信号分析,不但可优化机器人速度及位姿路径,还可降低轴间磨损,延长机器人使用寿命。

## 7 结 论

本文以热水壶冲压生产为研究对象,对生产线布局及工业机器人末端夹持器进行设计,分析设计了产线自动化控制流程及其仿真程序,完成了产线的智能化改造方案设计,对企业提高产能及市场竞争力有着重要的参考意义。作者结合 Solidworks 与 RobotStudio 建立了热水壶冲压生产线仿真模型,创建了动态 Smart 组件,模拟 PLC 与生产线、机器人、冲床等设备的 I/O 信号进行通信,实现了机器人的离线编程和仿真调试,根据仿真结果,检查设备干涉,利用虚拟示教器对机器人运动轨迹进行优化,减少其急剧变化的动作,降低了轴间磨损,延长其使用寿命。生产线仿真视频及工业机器人离线程序可用于指导设备

的安装及调试,减少了现场调试成本,提高了工作效率,为自动化产线提供应用依据。

## 参 考 文 献

- [1] 郝建豹,彭桂峰,罗钊颖. 基于气吸手部的壶体生产线仿真设计与轨迹规划[J]. 机床与液压, 2021, 49(11): 118-122.  
HAO J B, PENG G F, LUO ZH Y. Simulation design and trajectory planning of pot production line based on air suction hand [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2021, 49(11): 118-122.
- [2] 侯仰强,龙洋. 基于 RobotStudio 的自动冲压生产线仿真与优化[J]. 中国重型装备, 2017, 41(3), 6-8.  
HOU Y Q, LONG Y. Simulation and optimization of automatic stamping production line based on robotstudio [J]. China Heavy Equipment, 2017, 41(3): 6-8.
- [3] 郝建豹,黄世光,李进阳,等. 基于多机器人的不锈钢盆生产线仿真设计[J]. 机械研究与应用, 2021, 34(2): 200-203.  
HAO J B, HUANG SH G, LI J Y, et al. Simulation design of stainless steel basin production line based on multi-robot [J]. Mechanical Research & Application, 2021, 34(2): 200-203.
- [4] 耿永秀,陈森,戎丹,等. 基于 RobotStudio 对冲压生产线的研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2021, 56(5): 44-46.  
GENG Y X, CHEN S, RONG D, et al. Research on stamping production line based on RobotStudio [J]. Forging Equipment & Manufacturing Technology, 2021, 56(5): 44-46.
- [5] 许国强. 基于 RobotStudio 的冲压件自动分拣装置设计与仿真[J]. 机械工程与自动化, 2021, 53(2): 31-33.  
XU G Q. Design and simulation of automatic sorting device for stamping parts based on RobotStudio [J]. Mechanical Engineering & Automation, 2021, 53(2): 31-33.
- [6] 庞党锋,王虎. 基于 SCARA 机器人的包装工作站仿真设计[J]. 国外电子测量技术, 2023, 42(4): 96-102.  
PANG D F, WANG H. Simulation design of packaging workstation based on SCARA robot [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2023, 42(4): 96-102.
- [7] 张昌尧,吴清锋,张秋怡,等. 工业机器人位置稳定时间不确定度的研究分析[J]. 电子测量技术, 2023, 46(8): 148-153.  
ZHANG CH Y, WU Q F, ZHANG Q Y, et al. Research and analysis on the uncertainty of position

- stabilization time of industrial robots[J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(8): 148-153.
- [8] 赵兵,杨龙成,王传英. 机器人冲压生产线节拍仿真评估研究[J]. 锻压装备与制造技术, 2022, 57(6): 15-19.
- ZHAO B, YANG L CH, WANG CH Y. Research on beat simulation evaluation of robot stamping production line [J]. Forging Equipment & Manufacturing technology, 2022, 57(6): 15-19.
- [9] 周玉明,秦伟,伍驭美. 冲压生产线自动送料装置设计与仿真分析[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.
- ZHOU Y M, QIN W, WU Y M. Design and simulation analysis of automatic feeding device for stamping production line [D]. Chongqing: Chongqing University, 2016.
- [10] 陈磊,朱斌,罗国虎,等. 基于的 Robot Studio 的多机器人冲压生产线仿真及研究[J]. 国外电子测量技术, 2020, 39(10): 67-71.
- CHEN L, ZHU B, LUO G H, et al. Simulation and research of multi robot stamping production line based on robot studio [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2020, 39(10): 67-71.
- [11] 白蕾,侯伟,张小洁. 基于 RobotStudio 的机器人搬运工作站设计与仿真[J]. 国外电子测量技术, 2018, 37(0): 114-118.
- BAI L, HOU W, ZHANG X J. Design and simulation of robot handling workstation based on RobotStudio [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2018, 37(6): 114-118.
- [12] 霍炳杰. 卫生陶瓷修坯机械手的构型设计[D]. 唐山: 华北理工大学, 2020.
- HUO B J. Configuration design of sanitary ceramics billet dressing manipulator [D]. Tangshan: North China University of Science and Technology, 2020.
- [13] 郝建豹,许焕彬,林炯南. 基于 RobotStudio 的多机器人柔性制造生产线虚拟仿真设计[J]. 机床与液压, 2018, 46(11): 54-57, 81.
- HAO J B, XU H B, LIN J N. Virtual simulation design of multi-robot flexible manufacturing production line based on RobotStudio [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(11): 54-57, 81.
- [14] 陈仁祥,张旭,徐向阳,等. 噪声标签下注意力特征混合的旋转机械故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2023, 44(9): 257-264.
- CHEN R X, ZHANG X, XU X Y, et al. Fault diagnosis of rotating machinery based on attention feature mixing under noise label [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(9): 257-264.
- [15] 程昊,王红军,杨俊峰,等. 面向生产线全生命周期的数字孪生模型应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2023, 37(4): 115-121.
- CHENG H, WANG H J, YANG J F, et al. Application of digital twin model for the whole life cycle of production line [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2023, 37(4): 115-121.

#### 作者简介

李国财,本科,主要研究方向为智能装备设计及其自动化。

E-mail: 864872169@qq.com

章盼梅(通信作者),硕士研究生,高级实验师,主要研究方向为工业控制。

E-mail: 389011482@qq.com