

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0047-06

基于 RobotStudio 的数控机床上下料机器人轨迹规划仿真研究

孙守勇, 党世红, 王宇璐

(咸阳职业技术学院 机电学院, 西安 712000)

摘要:为解决工业机器人在数控机床 (computer numerical control, CNC) 自动上下料中路径规划及生产节拍优化问题, 利用 SolidWorks 设计了工业机器人的末端执行器及 CNC 模型, 基于虚拟仿真软件 RobotStudio 搭建了带导轨的工业机器人 CNC 自动上下料生产线仿真平台。根据 CNC 上下料实际任务设计生产线的 Smart 仿真组件并配置相关的 I/O 信号, 设计了生产线的逻辑控制流程。利用区域监控功能实现机器人和 CNC 工作空间的安全互锁, 采用三次多项式插值进行上下料路径的轨迹规划, 分析机器人工具中心点 (tool center point, TCP) 速度对机器人角速率及生产节拍的影响。研究表明, 在仿真平台中通过离线编程及仿真调试实现了机器人上下料路径的优化设计和生产节拍的精准控制, 确定了最优 TCP 速度, 提高了生产效率, 为实际上下料作业提供了重要的理论依据。

关键词: RobotStudio; 工业机器人; 数控机床; 上下料; 轨迹规划; 仿真研究

中图分类号: TP242.2; TH165

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0047-06

Simulation study on trajectory planning of CNC machine tool loading and unloading robots based on RobotStudio

Sun Shouyong, Dang Shihong, Wang Yulu

(School of Mechatronics Engineering, Xianyang Polytechnic Institute, Xi'an 712000, China)

Abstract: To solve the problems of trajectory planning and production cycle optimization for industrial robots in the automatic loading and unloading of computer numerical control (CNC), the end effector and CNC model of industrial robots are designed using SolidWorks. A simulation platform for industrial robot CNC automatic loading and unloading production line with guide rails is built based on RobotStudio. It designs the Smart components based on the actual tasks and configured relevant I/O signals, and designs the logical control process. It utilizes the regional monitoring function to achieve safety interlock between robots and CNC workspaces, uses cubic polynomial interpolation for trajectory planning of loading and unloading paths, and analyzes the impact of robot tool center point (TCP) speed on robot angular rate and production rhythm. The research results show that the optimal design of the robot's loading and unloading path and the precise control of the production cycle are realized through offline programming and simulation debugging on the simulation platform, the optimal TCP speed is determined, improve production efficiency and provide theoretical basis for actual operations.

Keywords: RobotStudio; industrial robots; CNC machine tools; loading and unloading; trajectory planning; simulation research

在现代装备制造业中, 数控加工、模具制造、注塑机成型等生产线存在大量重复运动, 路径轨迹可复制性强, 且工作强度较大, 由工业机器人作业代替人工劳动已成为趋势^[1-2]。随着国内数控加工中心技术的不断发展和成熟, 以及加工任务的精细化、集约化要求越来越高, 在数控加工的上下料工序中应用工业机器人技术可以大幅度提高工件加工的标准化程度, 优化产线的生产节拍^[3]。但在实际生产中需要花费大量的人力和物力来进行产线的布局与调试, 因此利用虚拟仿真软件来进行产线的仿真验证和优化调试, 可以节约企业的生产成本, 提高生产效率^[4]。

本文主要研究在 RobotStudio 软件中通过对两台 CNC 进行布局, 利用 ABB 机器人对 CNC 工位进行上下料, 对运动路径进行轨迹规划, 并对影响工业机器人工作效率的因素进行优化, 实现高效的上下料作业。

1 工作站布局设计

工作站主要由两台并排放置的 CNC 数控机床、ABB 工业机器人、导轨、供料台、储料区、输送链、控制柜和围栏组成。在 SolidWorks 软件中绘制 CNC 数控机床、供料台、工件等模型导入工业机器人虚拟仿真软件 RobotStudio

收稿日期: 2024-10-09; **录用日期:** 2024-12-02

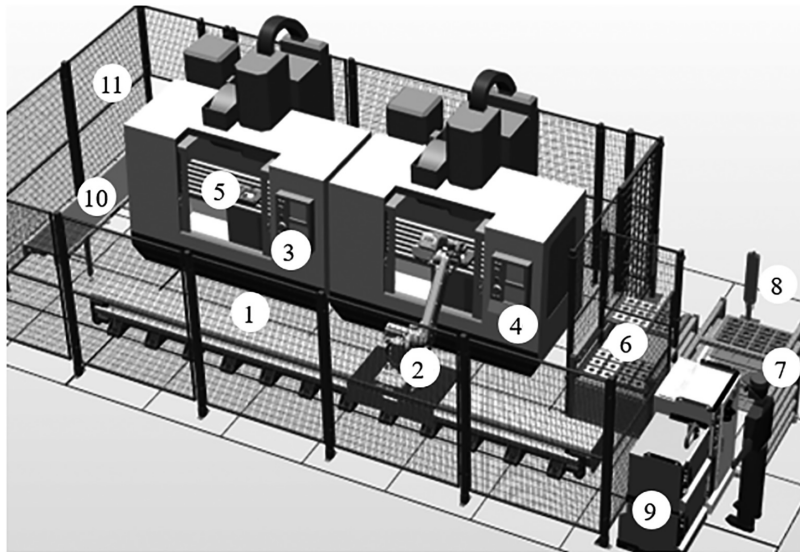
基金项目: 陕西省科技厅重点研发计划项目 (2023-YBGY-217); 咸阳市科技局 2025 年度科学技术研究与发展计划项目 (L2025-CXNL-KJRC-006); 咸阳职业技术学院教育教学改革研究重点项目 (2024JYA01)

作者简介: 孙守勇 (1984—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 智能装备制造及自动化控制。

引用本文: 孙守勇, 党世红, 王宇璐. 基于 RobotStudio 的数控机床上下料机器人轨迹规划仿真研究 [J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6): 47-52. (Sun Shouyong, Dang Shihong, Wang Yulu. Simulation study on trajectory planning of CNC machine tool loading and unloading robots based on RobotStudio [J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6): 47-52.)

中。ABB工业机器人配置了长度为6 m的IRB2005移动导轨,可以增加工业机器人的运动范围,便于在两台CNC之间上下料。供料台分为上下两层,每层放置12个工件。

当其中一层供料台工件供料完毕,该层供料台退回补料,另一层供料台伸出供料。整个工作站布局如图1所示。



1—导轨; 2—机器人; 3—CNC1; 4—CNC2; 5—夹具; 6—供料台; 7—储料区; 8—安全光幕; 9—控制柜; 10—输送带; 11—围栏

图1 工业机器人上下料工作站布局

Fig. 1 Layout of industrial robot loading and unloading workstation

2 流程控制

2.1 工作站初始化

出于安全考虑,机器人工作前需要将机器人姿态复位至安全姿态 J_{home} ^[5]。考虑机器人在上一次停机时可能出现的不安全位置,如果在CNC内部时突然停机,需要将机器人先退出CNC,然后复位至 J_{home} ;如果机器人处在输送链或供料台取放料位置,则需要将机器人先上升一段安全高度然后再回到安全姿态^[6]。

2.2 机器人与CNC信息交互

机器人在供料台完成取料后,开始放置待加工工件至CNC。首先需判断哪台CNC处于空闲状态。若两台CNC都处于空闲状态,则机器人从右往左依次上料。在下次上料前,先判断该台CNC是否工作状态。如果是,则机器人移动至另一台CNC进行上料;如果不是,则在该台CNC先下料再上料。下料完毕后机器人将工件成品搬运至输送链,运送到下一道工序。

2.3 循环上下料逻辑判断

机器人完成上料后则移动至供料台取料准备循环上料。由于CNC机床加工工件需要一定的时间,所以由机器人在两台CNC之间循环上下料来提高产品加工节拍。流程控制如图2所示。

3 工作站设计

3.1 区域监控创建

在工作过程中,为了保障设备安全,防止机器人和CNC安全门及夹具发生干涉碰撞危险,需为机器人设置区域监控功能 WorldZones,如图3所示,定义了CNC_pos1和CNC_pos2

两个对角点位所限定的空间区域。WorldZones功能在大地坐标系下设定一个监控区域并关联I/O信号,当机器人处于或逼近该区域则触发信号,实现机器人和CNC位置互锁,保障设备安全^[7]。

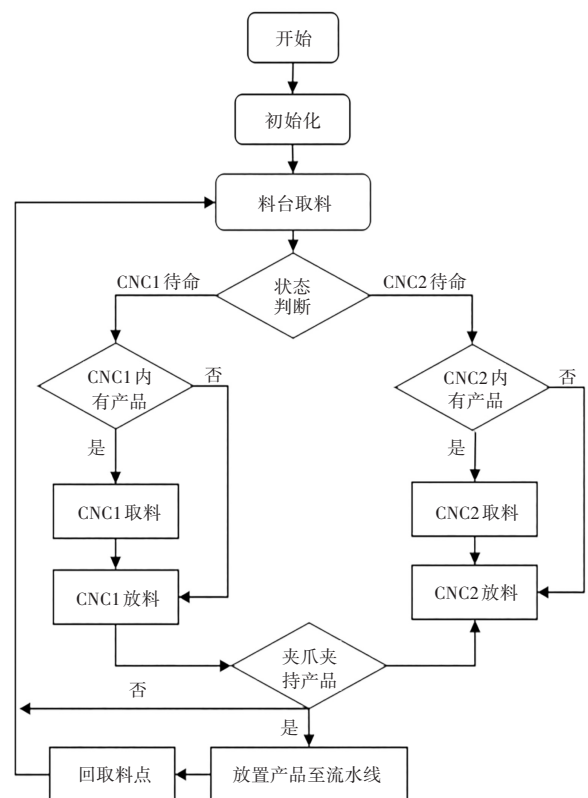


图2 工作站流程控制

Fig. 2 Workstation process control

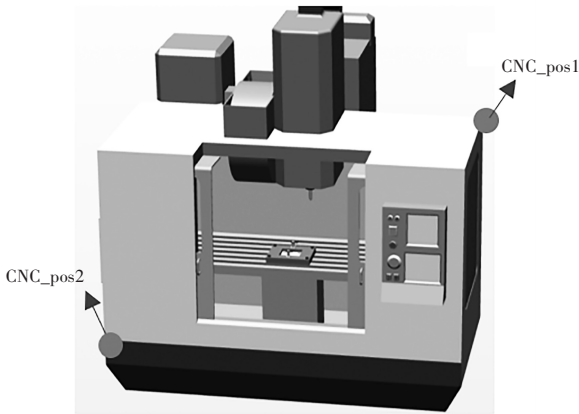


图3 区域监控示意图

Fig. 3 Regional monitoring diagram

3.2 区域监控的启用

通过机器人 Event Rountie 功能启用区域监控。设定当工业机器人接通主电源 (PowerOn) 时即启用设定好的监控区域,这样便于在手动调试程序时(机器人处于自动运行模式之前)也可启用区域监控,提高系统安全性^[8]。

3.3 配置 I/O 信号

配置工作站所需 DI 信号及 DO 信号,所有信号均创建在 DSQC652 标准 I/O 板卡上。DSQC652 提供 16 入、16 出信号接口,满足工作站信号需求^[9]。配置的 DO 信号如表 1 所示。

表 1 DO 信号配置

Tab. 1 DO signals configuration

信号名称	信号地址	信号说明
do0_up	0	上层料台驱动信号
do1_below	1	下层料台驱动信号
do2_clampact1	2	CNC1 夹具动作信号
do3_clapmact2	3	CNC2 夹具动作信号
do4_door1	4	CNC1 安全门驱动信号
do5_door2	5	CNC2 安全门驱动信号
do6_Y_Gripper	6	黄色夹爪夹紧信号
do7_G_Gripper	7	绿色夹爪夹紧信号
do8_InCNC1	8	机器人在 CNC1 指示信号
do9_InCNC2	9	机器人在 CNC2 指示信号
do10_CycleOn	10	系统循环状态信号
do11_EStop	11	系统急停状态信号

3.4 Smart 组件创建

在 RobotStudio 虚拟仿真软件中可以利用 Smart 组件实现行为对象复杂的动作效果和逻辑关系^[10]。以创建夹爪工具 SC_夹爪为例,添加 JointMover 子组件用于将夹爪关节运动到指定姿态;添加 LineSensor 子组件用于检测工件是否与工具接触;添加 Attacher 子组件用于将工件安装到夹爪工具上并随工具一起运动;添加 Detacher 子组件用于拆除工件;添加 LogicGate 子组件用于信号逻辑运算;添加 LogicSRLatch 子组件用于信号置位、复位及信号锁定。

夹爪的 Smart 组件构成及 JointMover 子组件设置界面如图 4 所示。



图4 夹爪工具 Smart 组件配置

Fig. 4 Smart component configuration of gripper tool

创建两台数控机床 Smart 组件 SC_CNC1、SC_CNC2, 送料台 Smart 组件 SC_送料台, 传输带 Smart 组件 SC_传输带,将各 Smart 组件与机器人控制系统 CNC_STATION 进行信号连接,完成工作站信号逻辑设定,如图 5 所示。

3.5 程序编写

在主程序 main() 中,首先对系统进行初始化,使相关信号复位,机器人姿态复位至安全位置;通过无限循环使系统复位动作和机器人重复上下料动作隔离。在 While 循环体内,通过判断进行上层或下层送料台供料。然后通过 sdi_CNC_Busy 判断哪一台 CNC 处于空闲状态。若处于空闲状态且有工件,则先取料再放料;若处于空闲状态且无工件,则直接上料,依次循环执行。最后将加工好的成品搬运至输送带传输至下一个工位。

主程序 main() 代码如下所示。

```

PROC main()
InitAll; ! 系统初始化
WHILE TRUE DO
IF di0_up_ok = 1 AND di1_low_ok = 0 THEN
pick_UP; ! 上层送料台供料
ELSEIF di0_up_ok = 0 AND di1_low_ok = 1 THEN
pick_low; ! 下层送料台供料
ELSE
TPWrite "Feeder Error, please cheack it!";
Stop; ! 容错处理
ENDIF
again; ! 循环标签
IF sdi1_CNC1_Busy = 0 THEN ! 若 CNC1 空闲
IF di8_CNC1Have = 1 THEN ! 且 CNC1 有工件
take_cnc1; ! 调用 CNC1 取料程序
PUT_CNC1; ! 调用 CNC1 上料程序
ELSE
PUT_CNC1; ! 否则直接调用 CNC1 上料程序

```

```

ENDIF
ELSEIF sdi2_CNC2_Busy=0 THEN! 若 CNC2 空闲
IF di15_CNC2Have=1 THEN! 且 CNC2 有工件
take_cnc2;! 调用 CNC2 取料程序
PUT_CNC2;! 调用 CNC2 上料程序
ELSE
PUT_CNC2;! 否则直接调用 CNC2 上料程序

```

```

ENDIF
ELSE
GOTO again;! 跳转至循环标签处
ENDIF
PUT_BELT;! 调用输送带放料程序
ENDWHILE
ENDPROC

```

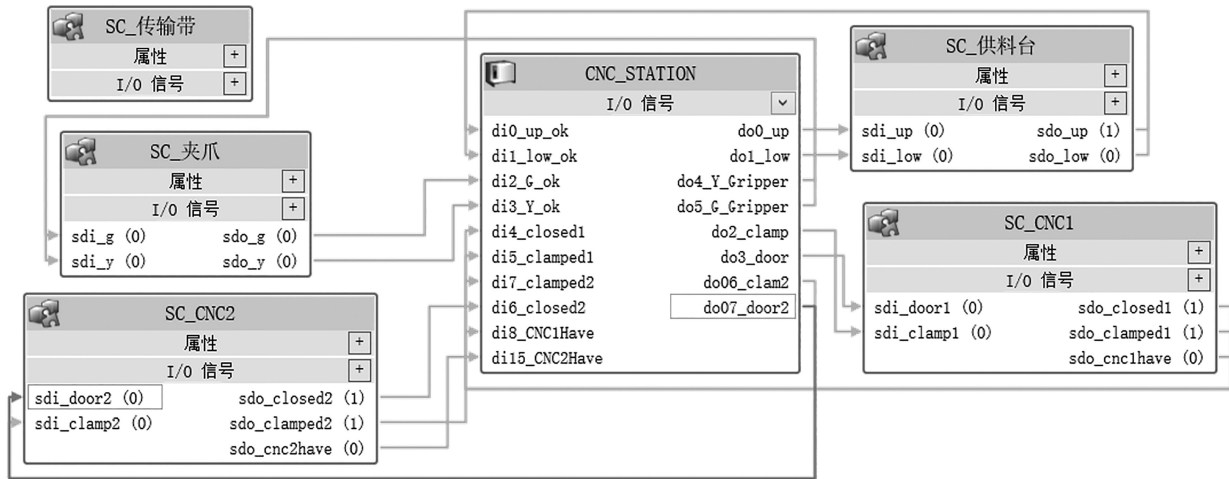


图5 工作站信号逻辑设定

Fig. 5 Workstation signal logic setting

3.6 程序关键目标点示教

在程序中创建例行程序 Teache_point() 用于示教各个关键目标点的坐标。

1) 目标点 p_below_pick 和 p_up_pick: 下层及上层供料台拾取工件基准点, 如图 6(a) 所示。

2) 目标点 p_put_cnc1、p_take_cnc1、p_put_cnc2、p_take_cnc2 分别为 CNC1 和 CNC2 的上料点和下料点, 如图

6(b) 所示。

3) p_put_belt 为工件成品在输送带上的放置点, 如图 6(c) 所示。

4) 工业机器人工作原点位置 Jhome, 该位置机器人各轴的角度值为 (0, -60, 60, 0, 30, 0), 导轨 (行走轴) 位于 4 000 mm 处, 如图 6(d) 所示。

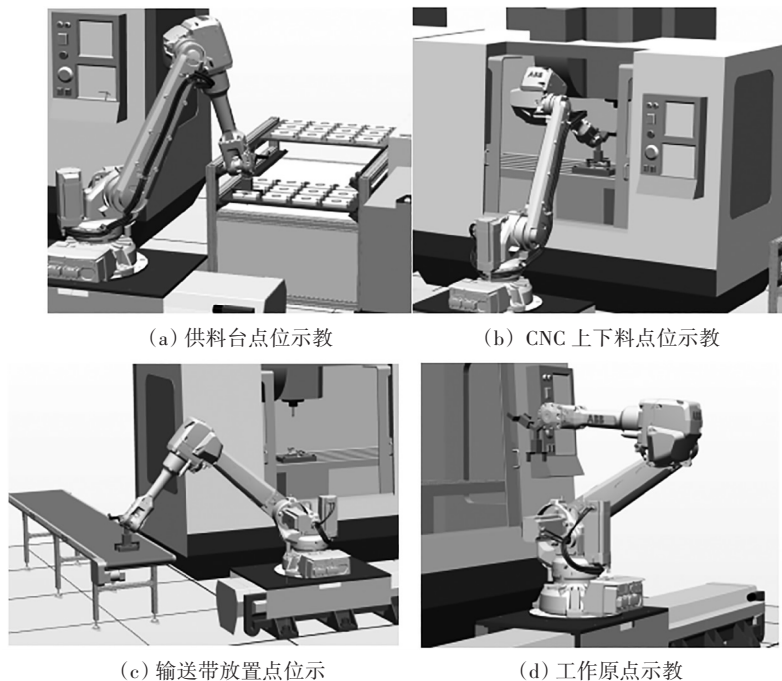


图6 机器人关键点位示教

Fig. 6 Teaching of key points for robots

4 仿真与优化

4.1 机器人轨迹规划

工业机器人在上下料过程中,其关键点位的运动轨迹可以转换为关节坐标系中的各轴关节角的变化,通过三次多项插值法对关节角进行轨迹规划^[13-14],利用机器人逆运动学把路径点位转换为关节点位,并将其拟合光滑函数 $\theta(t)$ 。 $\theta(t)$ 描述了机器人的关节点位从起始点到达目标点的姿态状态^[15]。起始点关节角度为 θ_0 ,目标点位关节角度为 θ_f ,即

$$\begin{cases} \theta(0) = \theta_0 \\ \theta(t_f) = \theta_f \end{cases} \quad (1)$$

为满足关节运动的连续性,设定起始点和目标点的关节角速度为0,即

$$\begin{cases} \dot{\theta}(0) = 0 \\ \dot{\theta}(t_f) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

通过上述约束条件确定工业机器人在上下料过程中关节角位置的三次多项式为

$$\theta(t) = \varphi_0 + \varphi_1 t + \varphi_2 t^2 + \varphi_3 t^3 \quad (3)$$

对应角速度和角加速度为

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = \varphi_1 + 2\varphi_2 t + 3\varphi_3 t^2 \\ \ddot{\theta}(t) = 2\varphi_2 + 6\varphi_3 t \end{cases} \quad (4)$$

将关节平稳连续运行的约束条件 $\theta(t)$ 在 $t=0$ 的值等于起始关节角度 θ_0 ,在终止时刻 t_f 的终止关节角度 θ_f 代入式(3)和式(4)可得

$$\begin{cases} \varphi_0 = \theta_0 \\ \varphi_1 = 0 \\ \varphi_2 = \frac{3}{t_f^2}(\theta_f - \theta_0) \\ \varphi_3 = -\frac{2}{t_f^3}(\theta_f - \theta_0) \end{cases} \quad (5)$$

以首次上下料过程为例,获取机器人起始点TCP的坐标值及终止点位TCP的坐标值,通过运动学逆运算可以得到起始点和终止点各关节的角度值为 $(-10.76, 38.72, 28.56, 0, 64.48, 80.81)$ 和 $(102.75, -32.24, 60.85, 0, 30.02, -89.75)$ 。通过三次多项式插值求解出机器人各关节的角度值、角速度值和角加速度值的曲线图,如图7所示。

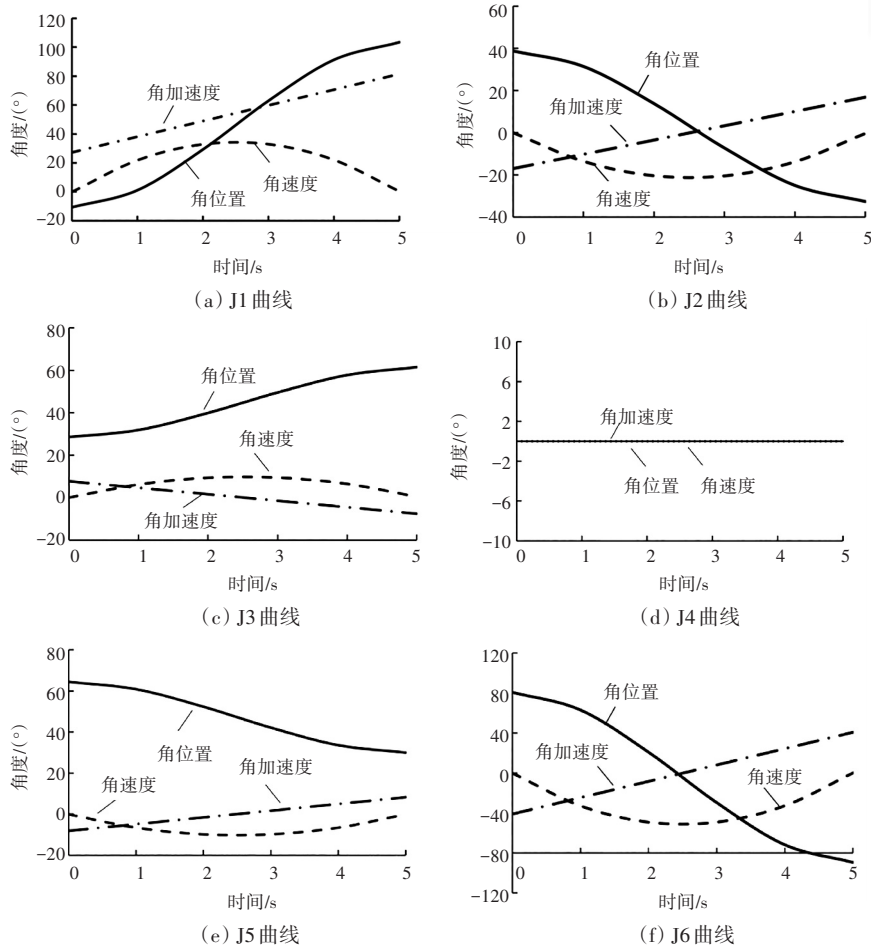


图7 机器人各关节角位置、角速度和角加速度曲线

Fig.7 Curves of robot joint positions, angular velocities, and angular accelerations

4.2 机器人TCP速度优化

工业机器人的TCP速度是影响CNC上下料效率和产

品加工节拍的重要因素。提高机器人TCP速度可以节省上下料时间,但同时机器人的6个关节角速度提高,机械

臂会有较大震荡冲击,减少机器人使用寿命^[16];降低机器人运行速度可以降低机器人各关节轴的角速率,提高机器人使用寿命,但会延长机器人上下料时间,降低加工效率。本文从循环上下料中截取一段有代表性的加工工序,将机

器人的 TCP 速度分别设为 2 000 mm/s、2 500 mm/s、3 000 mm/s、4 000 mm/s,机器人 6 个关节轴的接点随时间变化曲线如图 8 所示。

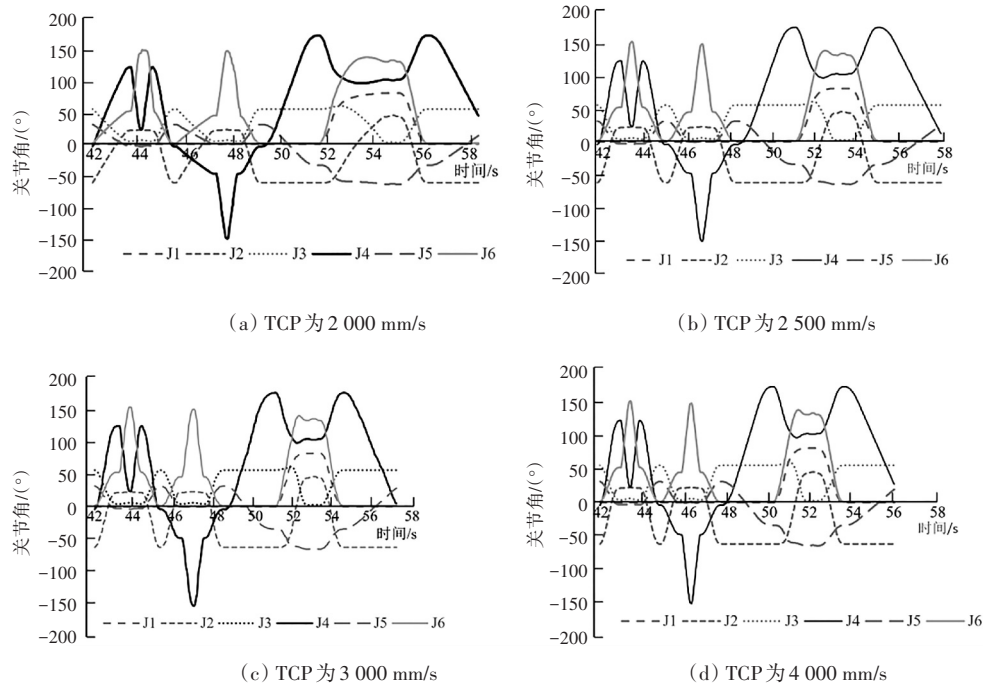


图 8 不同 TCP 速度下机器人各轴运动速率

Fig. 8 Motion rates of each axis of the robot under different TCP speeds

由上图分析可知,在 42 s 至 58 s 的加工时序内,TCP 速度为 2 000 mm/s 时机机器人的各关节运行更加平稳,但加工时间也最长,TCP 速度为 4 000 mm/s 时机器人各关节角度突变较多,但加工时间较短。综合分析当工业机器人 TCP 速度设定为 2 500 mm/s 时,上下料工作站的既能够在平稳有序的状态下工作,又能够保证工作效率,优化生产节拍。

5 结论

本研究提出了基于 Smart 组件的数控机床上下料机器人工作站仿真设计方法,并通过三项式插值法对工业机器人的轨迹进行规划,分析 TCP 速度对工业机器人角速率的影响,优化了机器人工作速度,在平稳有序工作状态下提高了上下料机器人的生产节拍。同时,本研究对企业实际上下料产线智能化升级改造具有很好的借鉴意义。

参考文献

[1] 李娜,蒋鹏. 切削加工智能制造系统中工业机器人的应用[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(7):71-73,98.
 [2] 宋海鹰,叶锐锋,岑健,等. 智能化生产线的数字孪生设计[J]. 制造业自动化, 2024, 46(2):38-41.
 [3] 徐博洋,杜恒,李萍,等. 基于虚拟数字化的铁路信号设备电路仿真平台的设计[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(3):108-114.
 [4] 孙守勇,崔慧娟,刘小英. 基于 RobotStudio 的 Delta 机器人双输送链跟踪分拣仿真研究[J]. 机械设计与制造工程, 2022, 51(6):

65-69.
 [5] 许波,郝杰,李佳俊. 基于数字化工厂的车门自动化焊装线设计与仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2022, (4):111-114.
 [6] 陈志澜,唐昊阳. 机床上下料系统的数字化孪生设计与仿真[J]. 机械设计与研究, 2024, 40(2):7-14.
 [7] 廖志青,韩伟,魏文锋,等. 视觉控制数控机床机器人上下料 PLC 编程及研究[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(4):69-73.
 [8] 张琛,黑晨菲,李晶. 自动上下料系统的数字孪生模型构建与虚拟仿真调试方法[J]. 制造业自动化, 2024, 46(1):45-50.
 [9] 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.
 [10] 赵伟博,李琳杰. 基于机器视觉的工业机器人装配工作站架构设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):14-18.
 [11] 庞党锋,崔世钢,田丽萍. 包装生产线码垛机器人工作站虚拟仿真研究[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(4):68-72.
 [12] 周文俊,徐艺敏,曹毅,等. 基于多点分布式储能协调控制的配电网时序承载力优化仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):103-107.
 [13] 张元峰,孟欣,于春风. 基于 Multisim 飞机纵向操纵系统力臂自动调节电路仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5):15-18,34.
 [14] 齐海军,曾波锋,罗毅智,等. 基于物联网的柚果分级交易数字化管理系统设计与开发[J]. 农机化研究, 2025, 47(8):251-258,285.
 [15] 李松林. 基于工业机器人的数控机床自动上下料系统研究与设计[D]. 长春:吉林大学, 2023.
 [16] 蔡玉强,范祺,贾思楠. 基于 RobotStudio 的牛奶箱搬运生产线仿真[J]. 包装与食品机械, 2023, 41(2):107-112.