DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)07-0081-06

基于 RobotStudio 空调压缩机装配产线仿真与优化

罗 璇[1], 秦兴红[1,2], 官 文[1], 洪志勇[3]

(1.江西环境工程职业学院,江西 赣州 341000;2.赣州市林业机器视觉重点实验室,江西 赣州 341000;
3.格力电器(赣州)有限公司,江西 赣州 341000)

摘 要:针对空调外机生产线中空调压缩机装配工序存在的劳动强度高、机器人示教效率低下以及运动精度难以保证等瓶颈问题,提出一种基于工业机器人仿真(RobotStudio)的协同优化方案。通过构建高精度三维生产线模型,集成 Smart 组件技术实现工作站动态逻辑设计,涵盖传送带控制、夹具交互及外机底板定位等核心功能。结合工具坐标(tool center point,TCP)速度参数化分析,量化机器人运动轨迹、功率及能耗特性,建立多目标优化模型,形成"仿真优化-参数迁移-产线验证"的闭环技术体系。实验应用表明,通过将 TCP 速度优化至 1 000 mm/s,优化后装配节拍缩短至 6.5 s,单次作业能耗降低至 2 000 J,综合效率提升 35%。该虚拟仿真优化方案为格力电器智能制造产线调试提供技术支撑,具有显著的工程推广价值。

关键词:工业机器人;RobotStudio;空调压缩机;仿真优化;能耗分析;虚拟调试

中图分类号:TP242.2;TP391.9;TB652;TN805 **文献标志码**:A **文章编号**:1003-7241(2026)07-0081-06

Simulation and optimization of the assembly production line of air conditioning compressors based on RobotStudio

Luo Xuan[1], Qin Xinghong[1,2], Guan Wen[1], Hong Zhiyong[3]

(1. Jiangxi Environmental Engineering Vocational College, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
2. Ganzhou Key Laboratory of Forestry Machine Vision, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;
3. Gree Electric Appliances (Ganzhou) Co, Ltd., Ganzhou 341000, Jiangxi, China)

Abstract: To address the bottleneck problems in the air conditioner compressor assembly process on the outdoor unit production line, such as high labor intensity, low robot teaching efficiency, and difficulty in ensuring motion accuracy, a collaborative optimization scheme based on industrial robot simulation (RobotStudio) is proposed. A high-precision 3D production line model is constructed, and Smart component technology is integrated to achieve dynamic logic design of the workstation, covering core functions such as conveyor control, fixture interaction, and outdoor unit baseplate positioning. Combined with parameterized analysis of tool center point (TCP) velocity, the robot's motion trajectory, power, and energy consumption characteristics are quantified, and a multi-objective optimization model is established, forming a closed-loop technical system of " simulation optimization-parameter migration-production line verification." Experimental application shows that by optimizing the TCP speed to 1 000 mm/s, the optimized assembly cycle time is reduced to 6.5 seconds, energy consumption per operation is reduced to 2 000 J, and overall efficiency is improved by 35%. This virtual simulation optimization scheme provides technical support for the commissioning of gree electric appliances' intelligent manufacturing production line and has significant engineering promotion value.

Keywords: industrial robot; RobotStudio; air conditioning compressor; simulation optimization; energy consumption analysis; virtual commissioning

国外(如德国、日本)在工业机器人虚拟仿真与视觉引导领域起步较早,在虚拟仿真方面技术成熟度高,但在空调压缩机装配方面未见相关文件[1-4]。国内学者吴安成正积极将机器人视觉引导系统与 RobotStudio 虚拟仿真结合,应用于空调压缩机装配线。重点解决精确定位(如手眼标定、图像识别算法)与多机器人协同控制问题,以提升装配精度和智能化水平,国内对空调压缩机装配产线仿真没有学者进行深入仿真研究[5-8]。

空调压缩机装配作为外机生产核心重要环节,因空调压缩机重量大(≥15 kg)、重复性高,易引发工人疲劳且制约生产效率[9]。目前,格力电器企业在空调外机空调压缩机装配环节,利用工业机器人代替人工装配能稳定提升压

收稿日期:2025-06-03;**录用日期**:2025-08-13

基金项目:江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2405511);江西省职业教育与成人教育教学改革研究课题(JXJG-24-57-18);江西省教育厅科学技术研究项目(GJJ2505412);江西高校科技服务"进园入企"专项行动项目

作者简介:罗 璇(1988—),男,硕士,副教授,研究方向为智能制造生产线柔性化装备应用研究。

引用本文:罗璇, 秦兴红, 官文, 等. 基于 RobotStudio 空调压缩机装配产线仿真与优化[J]. 自动化技术与应用, 2026,45(7):81-86. (Luo Xuan, Qin Xinghong, Guan Wen, et al. Simulation and optimization of the assembly production line of air conditioning compressors based on RobotStudio[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026,45(7):81-86.)

缩机装配可靠性和大幅提高生产效率。机器人实现压缩机自动装配主要通过示教再现方式完成编程任务,但由于工业机器人需集成周边较多设备,存在着示教过程复杂、机器人运动精度差以及无法及时修正运动错误等弊端,需要花费大量的时间[10]。传统示教编程方式存在调试周期长、运动精度不足等问题[11-13]。近年来,ABB 工业机器人 RobotStudio 虚拟仿真技术为生产线优化提供了新思路,能有效降低试错成本,具有调试周期短、效率高、安全性好等特点[14]。本文以格力电器空调压缩机装配为研究对象,通过 RobotStudio 构建虚拟生产线模型,结合动态逻辑设计与多目标优化,提出兼顾效率、能耗与设备寿命的协同优化方案,为格力电器企业智能制造产线快速部署提供实践依据[15]。

1 工作站模型搭建及布局设计

基于 SolidWorks 设计空调压缩机装配线三维模型,导入 RobotStudio 实现 1∶1 虚拟复现。产线布局如图 1 所示,包含 IRB 4600 工业机器人、传送带、气动夹具及定位传感器等关键组件,布局与实际车间一致,确保仿真环境真实性。通过 ABB 工业机器人 RobotStudio 仿真平台完成末端夹具抓取空调压缩机、传送带输送外机底板,通过该工业机器人与外围设备、传感检查、通讯工作站,实现系统的自动化运行,实现空调压缩机生产线的上下料、搬运、装配、检测、输送、码垛等全流程自动化生产[16]。

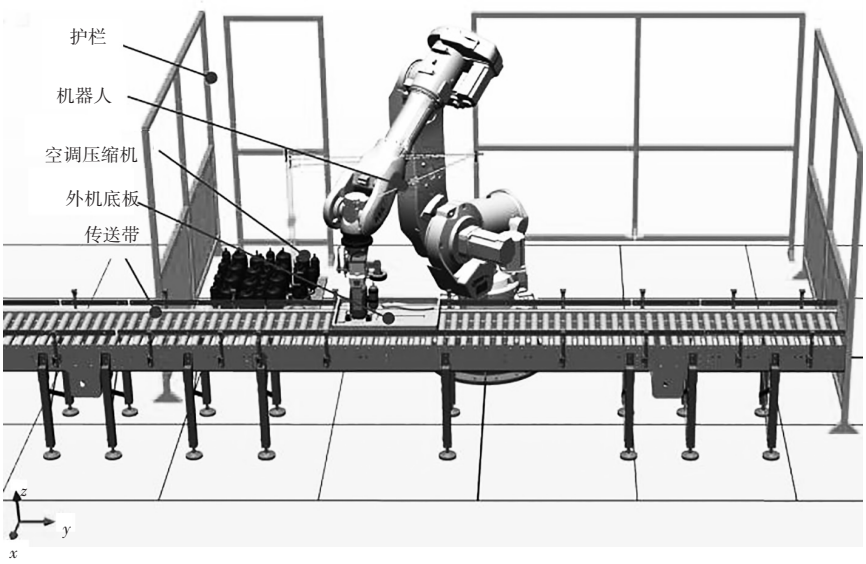


图 1 空调压缩机装配布局图

Fig. 1 Air conditioner compressor assembly layout

2 动态组件仿真逻辑设计

2.1 工作站逻辑

在 RobotStudio 软件中搭建机器人模型,分别组建传送带、夹具、外机底板等部件的 Smart 组件。为了实现机器人和各单元的整体动态效果,RobotStudio 的 Smart 组件可以模拟真实场景下 ABB 工业机器人装配空调压缩机过程,需要创建工作站逻辑[17]。工作站逻辑是通过机器人系统设置信号,连接组件等属性来设计仿真逻辑,工作站动态逻辑设计如图 2 所示。



图 2 工作站动态逻辑设计图

Fig. 2 Workstation dynamic logic design

通过组件 Smart 模拟 PLC 与机器人 I/O 通信,建立信号关联(表 1)。本工作站机器人通过 DSQC652 板卡配置,输出 DO9 连接夹具 DOJZ 信号,控制夹具夹紧。当工业机器人把空调压缩机精准放置到传送带安装位置,输出 DO10 连接传送带输入端 GO,控制传送带的启动运行,进行下块空调外机底板输送。当传送带输送空调压缩机底板到达安装位置,传送带上运行就位信号就位输出反馈给工业机器人输入端 DI0,工业机器人抓取空调压缩机进行装配。

表 1 工作站部件 I/O 信号逻辑关系

Tab. 1 I/O signal logical relationships of workstation components

源对象	源信号	目标对象	目标信号
System11	DO9	夹具	DOJZ
System11	DO10	传送带	Set
传送带	juiwei	System11	DI0

2.2 传送带动态逻辑设计

传送带 SMART 组件逻辑设计主要是控制两个空调外机底板的移动和信号的输出,传送带动态逻辑设计如图 3 所示。传送带移动需要满足工业机器人输出 DO10 给到传送带输入端 GO,当传送带 GO 输入端获得信号,控制传送带的移动,采用 PlaneSensor 检测底板到位状态,通过 LogicSRLatch 实现启停逻辑(图 3)。设定传送带速度与生产节拍匹配,避免空载等待[18]。传送带属性连接关系如表 2 所示。

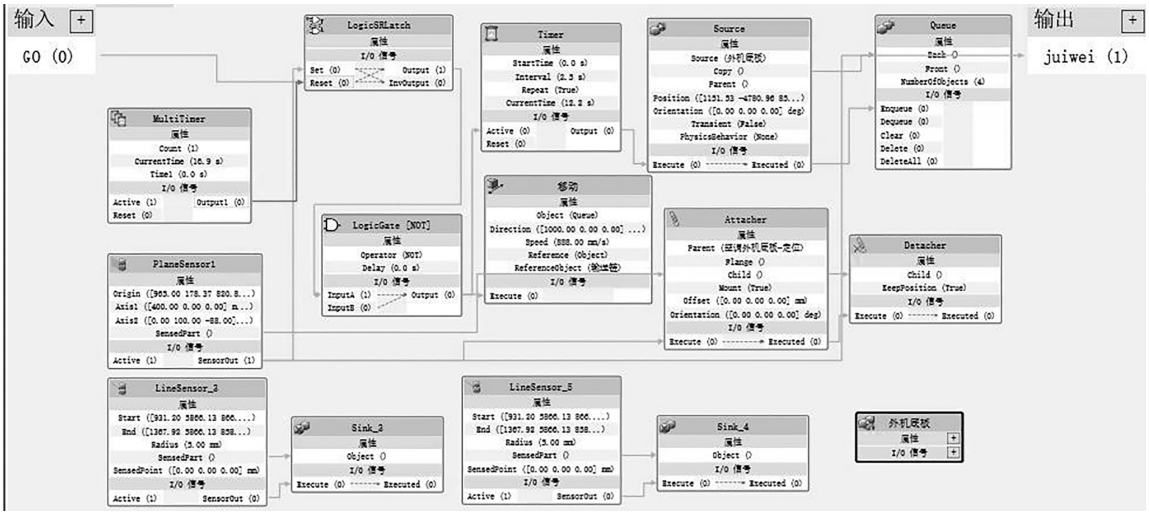


图 3 传送带动态逻辑设计图

Fig. 3 Conveyor belt dynamic logic design

表 2 传送带属性连接关系

Tab. 2 Attribute connection relationships of the conveyor belt

源对象	源信号	目标对象	目标信号
Timer	Output	Source	Execute
LogicGate[NOT]	Output	Timer	Active
LogicGate[NOT]	Output	Linearmover	Execute
Source	Executed	Queue	Enqueue
Attacher	Executed	Detacher	Execute
PlaneSensorl	SensorOut	Attacher	Execute
LogicSRLatch	Output	LogicGate[NOT]	InputA
PlaneSensorl	SensorOut	LogicSRLatch	Set
传送带	GO	LogicSRLatch	Reset
MultiTimer	Output1	LogicSRLatch	Reset
PlaneSensor	SensorOut	传送带	Juiwei
LineSeneor_3	SensorOut	Sink_3	Execute
LineSeneor_5	SensorOut	Sink_4	Execute

2.3 夹具动态逻辑设计

夹具 SMART 组件逻辑设计主要是控制夹具对压缩机的抓取和放置,基于 LineSensor 检测工件位置,通过 Attacher/Detacher 组件实现抓取与释放,如图 4 所示,确保装配精度±0.1 mm。当工业机器人给夹具 DOJZ 信号,经过 LineSensor 传感器检测到空调压缩机,完成 Attacher 安装压缩机到空调外机底板上[19]。当 DOJZ 信号经过 LogicGate[NOT]取反,将通过 Detacher 组件拆除空调压缩机,具体夹具属性连接关系如表 3 所示。

表 3 夹具属性连接关系

Tab. 3 Attribute connection relationships of the fixture

源对象	源信号	目标对象	目标信号
夹具	DOJZ	LineSensor	Active
夹具	DOJZ	LogicGate[NOT]	InputA
LogicGate[NOT]	Output	Detacher	Execute
LineSensor	SensorOut	Attacher	Execute

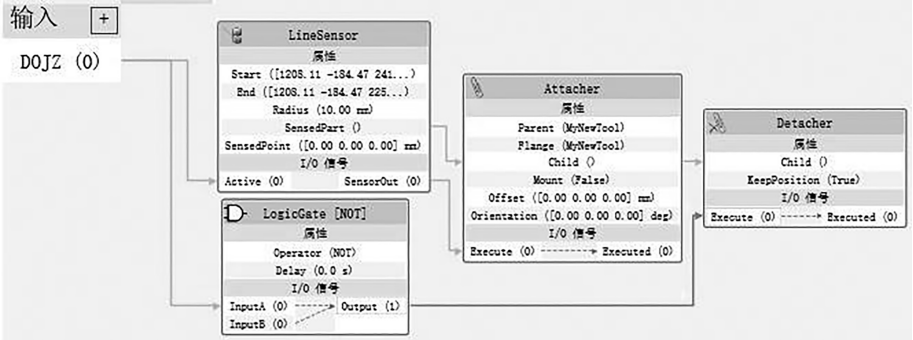


图 4 夹具动态逻辑设计图

Fig. 4 Fixture dynamic logic design

2.4 外机底板动态逻辑设计

外机底板 SMART 组件逻辑设计主要是控制压缩机安装(图 5),通过定时器 Timer,应用 LineSensor 传感器每隔 1 s 检测一次,如果检测到空调压缩机,将其安装到地板上完成整个安装过程,外机底板属性连接关系如表 4。

表 4 外机底板属性连接关系

Tab. 4 Attribute connection relationships of the outer machine base

源对象	源信号	目标对象	目标信号
Attacher	Output	LineSensor	Active
LineSensor	SensorOut	Attacher	Execute
Timer	Output	LineSensor	Active

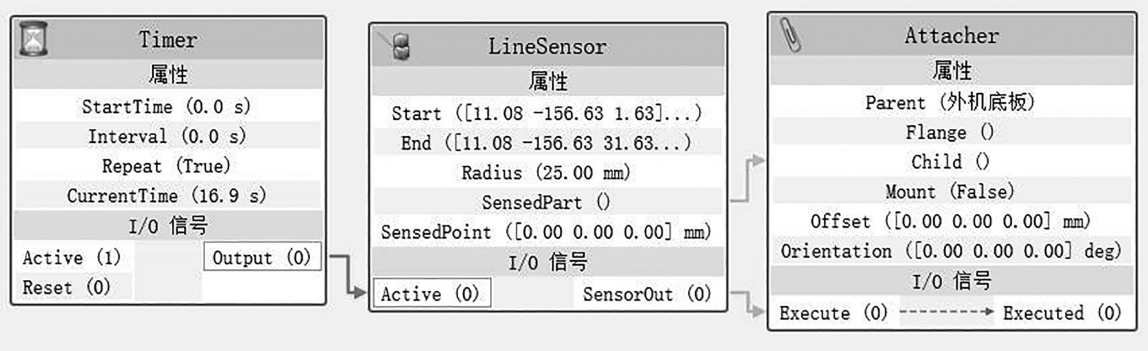


图 5 外机底板动态逻辑设计图

Fig. 5 Outdoor unit basep dynamic logic design

3 仿真程序开发

基于 RAPID 语言编写装配程序(图 6),采用基本指令规划轨迹,通过 FOR 嵌套循环实现多工位装配[20]。

关键代码逻辑如下:

```
PROC main( )
FOR i FROM 0 TO 3 DO ! 码垛纵向循环
FOR j FROM 0 TO 3 DO ! 码垛横向循环
MoveJ home, v1000, fine, Tooldata_4 \ WObj: = wobj0;
MoveJ Target_20, v1000, fine, Tooldata_4\WObj:=wobj0;! 移动到码垛上方
Quzhaquyasuoji;! 去抓取空调压缩机程序
WaitTime 1; ! 等待 1 s
Set DO9; ! 夹紧空调压缩机
WaitTime 1; ! 等待 1 s
MoveL Target_20, v1000, fine, Tooldata_5 \ WObj: = wobj0; ! 移动到码垛上方
MoveJhome, v1000, fine, Tooldata_5 \ WObj: = wobj0; ! WaitDI DI0,1;! 机器人等待底板到位信号
Quzhuangpeiyasuoji;! 机器人装配压缩机
WaitTime 1; ! 等待 1 s
Reset DO9; ! 松开空调压缩机
WaitTime 1;! 等待 1 s
MoveL Target_40, v1000, fine, Tooldata_4 \ WObj: = wobj0; SetDO DO10,1; ! 发信号给传送带下个循环
WaitTime 2;! 等待 1 s
Reset DO10;! 复位信号
MoveJhome, v1000, fine, Tooldata_4\WObj:=wobj0;
ENDFOR
ENDFOR
ENDPROC
ENDMODULE
```

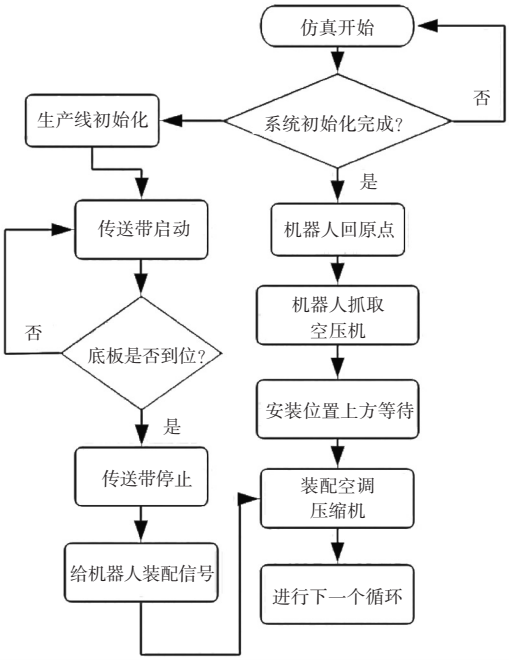


图 6 空调压缩机装配流程

Fig. 6 Air conditioner compressor assembly flowchart

根据空调压缩机装配工艺流程,规划工业机器人搬运空调压缩机运行轨迹,示教各目标点位置[21]。在 RobotStudio 仿真软件中编写工业机器人的程序,在仿真软件中打开当前工作站 RAPID 功能离线编程中 Modulel 程序,在 main 主函数根据功能进行逻辑控制和功能函数的调用等,完成程序的编写[22-23]。通过仿真调试验证机器人运动轨迹的准确性和实现最优装配运动轨迹功能。

4 装配工作站仿真优化分析

4.1 TCP 速度轨迹分析

空调外机压缩机和底盘组件装配是工业机器人完成空调外机生产过程中的复杂高难的工序。空调压缩机自动装配需要根据空调外机总装线生产节拍进行规划设计,

在实际空调压缩机装配过程中,工业机器人 TCP 速度影响节拍的一个重要因素,在生产节拍要求方面,自动化生产线需要满足整个生产系统的加工节拍,提高劳动生产效率[24]。

在 Robotstudio 软件中打开虚拟示教器,工业机器人根据空调压缩机产线实际装配重量,设置有效载荷和空负载状态下工具坐标系原点,重心、重心偏移值等参数,进入 Rapid 对程序 TCP 速度进行修改,分别为 500、1 000、1 500、2 000 mm/s,打开 Robotstudio 软件仿真中信号分析,调出不同速度变化轨迹曲线,如图 7 所示。TCP 速度为 500 mm/s 时,机器人生产节拍大概为 7 s;速度为 1 000 mm/s 时,机器人生产节拍大概为 6.5 s;速度为 1 500 mm/s 时,机器人生产节拍为 4.1 s,速度为 2 000 mm/s 时,机器人生产节拍为 3.2 s。TCP 速度越大,工业机器人装配空调压缩机运行速度越快,生产节拍时长越快;TCP 速度越小,工业机器人装配空调压缩机运行速度越慢,生产节拍时长越久。由于格力电器空调外机总装线生产节拍时间最少需要 6 s 时间,速度控制在 1 000 mm/s 以内能满足生产节拍要求,但速度太小会影响产线生产效率不利于企业生产要求,通过图 7 速度轨迹曲线发现速度越小轨迹曲线更加平滑,动作更加柔顺。由于空调压缩机重量近 15 kg,合理控制机器人 TCP 速度可以大大提高工业机器人使用寿命[25]。

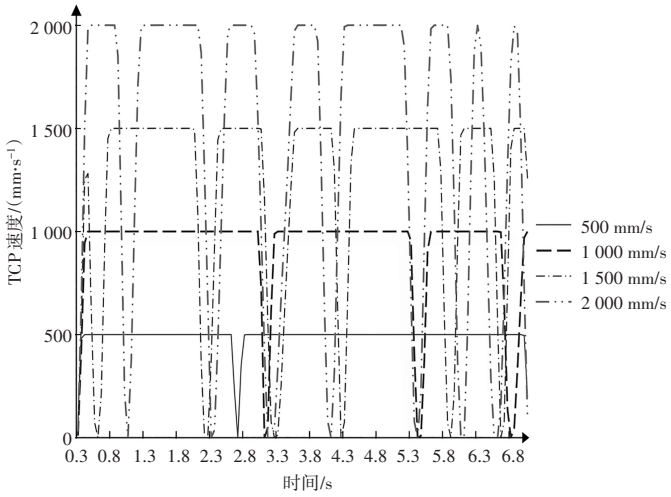


图 7 TCP 速度轨迹曲线

Fig. 7 TCP speed trajectory curve

4.2 机器人电机功率轨迹分析

通过 Robotstudio 软件的信号分析功能,工业机器人不同运行速度下电机功率曲线如图 8 所示,速度为 500 mm/s 时电机最大功率约 1 000 W;速度为 1 000 mm/s 时电机最大功率约 5 000 W;速度为 1 500 mm/s 时电机最大功率约 9 000 W;速度为 2 000 mm/s 时电机最大功率约 12 000 W。根据图 8 功率轨迹曲线发现,工业机器人运行速度越低总体工业机器人功率越小,运行速度越高总体功率越大,工业机器人运行速度和电机功率成正比关系。

4.3 机器人能耗轨迹分析

工业机器人生产时能耗影响企业生产成本和机器人使用寿命,因此选择合适能耗可以提升工业机器人作业性能[25]。工业机器人能耗和功率成正比。根据图 7 机器人能耗曲线可以看出,当工业机器人运行到 5 s 时间后,速度为 500 mm/s 时机器人能耗约 1000 J;速度为 1 000 mm/s 时机器人能耗约 2 000 J;速度为 1 500 mm/s 时机器人能耗约 5 000 J;速度为 2 000 mm/s 时机器人能耗约 10 000 J。

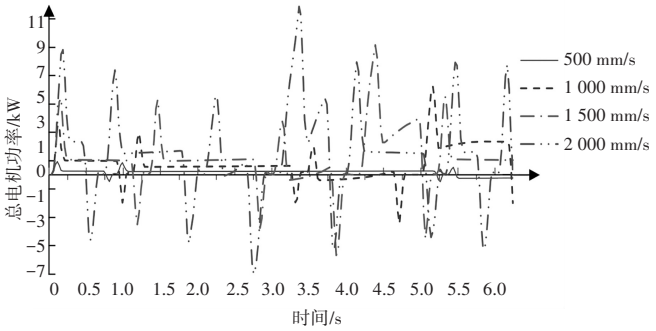


图 8 机器人电机功率轨迹曲线

Fig. 8 Robot motor power trajectory curve figure

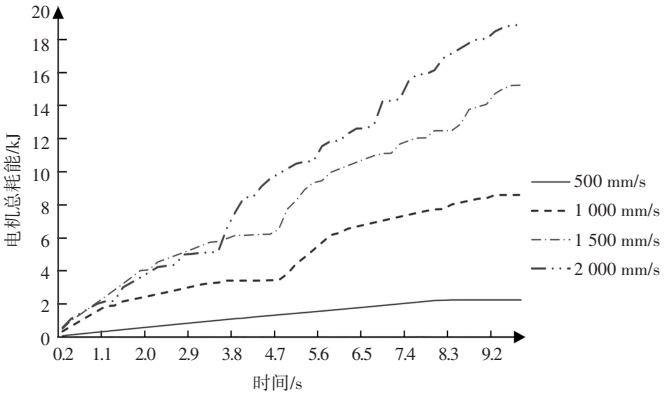


图 9 机器人能耗曲线

Fig. 9 Robot energy consumption curve

4.4 多目标优化分析

在考虑工业机器人 TCP 速度、电机功率、机器人作业能耗和生产线节拍多种因素情况。通过表 5 的不同 TCP 速度性能对比,对多目标进行分析。

1) TCP 速度与节拍关系分析(图 7):速度由 500 mm/s 提升至 2 000 mm/s 时,节拍由 7 s 缩短至 3.2 s,但速度>1 000 mm/s 后电机功率非线性增长(图 8),且能耗陡增(图 9)。

2) 生产线能耗经济性分析:当速度=1 000 mm/s 时,能耗为 2 000 J,功率 5 000 W,综合性价比最优(表 5),满足总装线节拍要求(≥ 6 s)。

表 5 不同 TCP 速度性能对比

Tab. 5 Comparison of performance at different TCP speeds

TCP 速度/(mm·s⁻¹)	节拍/s	峰值功率/W	能耗/J
500	7.0	1 000	1 000
1 000	6.5	5 000	2 000
1 500	4.1	9 000	5 000
2 000	3.2	12 000	10 000

5 实验验证与应用分析

为验证工业机器人装配工艺仿真模型的准确性,本研究搭建了生产线实验验证平台(图10),通过在格力电器空调外机产线开展为期三个月的实证应用记录。基于Robotstudio软件构建的虚拟仿真系统,对比分析机器人装配空调压缩机的仿真轨迹与实际运行数据,结果显示两者轨迹重合度达98.2%,证实了数字孪生模型的精确性。实验平台的应用成效显著:首先,通过轨迹优化生成的最优装配路径使单工位装配效率提升35%,较传统人工示教方式缩短调试周期60%(企业生产记录);其次,动态负载均衡技术使关节电机峰值扭矩降低18%,基于寿命预测模型估算电机使用寿命可延长20%;最后,建立的工艺参数数据能为企业同类工位产品线调试提供参考,平均减少现场调试工时45%。



图10 机器人生产线测试应用

Fig. 10 Robot production line test application

6 结论

本研究基于Robotstudio的空调压缩机装配仿真优化研究取得了良好的效果,为空调压缩机装配过程的优化提供了新的思路和方法。仿真结果表明,通过提出的优化方法可以显著减少装配时间和成本,提高装配精度和稳定性,为空调压缩机的生产提供了有效的参考。未来,将继续深入研究,进一步完善优化算法,提高装配效率和质量,为空调压缩机生产的智能化发展作出更大的贡献。

参考文献

[1]陈波, 张虎, 张超鹏, 等. 基于ROBOTSTUDIO的柔性加工单元离线轨迹仿真研究[J]. 机床与液压, 2025, 53(17):92-100.
[2]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.
[3]Mubula Y, Yu M, Gu H, et al. Recovery of rare earths from rare earth molten salt electrolytic slag using alkali phase reconstruction method with the aid of external electric field[J]. Journal of Rare Earths, 2025, 43(10): 2285-2287.
[4]方忠诚, 黄沈杰, 鱼剑琳, 等. 电子膨胀阀的分段式变增益PID控制研究——以环境试验箱为案例[J]. 制冷学报, 2022, 43(6):33-40.
[5]凌旭, 邹冲, 戴俊良, 等. 基于RobotStudio的物料分拣装置数字孪生系统研究[J]. 自动化应用, 2025, 66(1):224-227.
[6]刘华锋, 许东霞. 基于RobotStudio的码垛工作站物料输送链的设计与仿真[J]. 锻压装备与制造技术, 2024, 59(2):76-78.
[7]唐振宇, 戴祝坚, 唐伦, 等. 基于RobotStudio水槽打磨机器人工作站仿真设计[J]. 机床与液压, 2023, 51(21):78-83.
[8]罗璇, 肖美芳, 杨文龙, 等. 外骨骼机器人处于摆动相后期系统模型仿真[J]. 机床与液压, 2017, 45(3):99-102.
[9]吕世霞, 冯志新. 混合动力机器人加工动力学模型设计研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(11):76-83.
[10]邓华军, 段月红, 左伟平, 等. 基于RobotStudio的机器人涂胶路径仿真研究[J]. 装备制造技术, 2022(10):72-75.
[11]刘斌, 耿士江, 王子星, 等. 一种用于数据中心冷却的空气换热器的设计与模拟[J]. 制冷学报, 2023, 44(3): 150-157.
[12]王红雨, 郭宪民, 徐泽鹏, 等. 空气制冷机的研究和发展[J]. 制冷学报, 2022, 43(4): 44-58.
[13]李麒, 吴文凯, 赵寒涛, 等. 一种多尺寸地砖薄贴建筑机器人设计[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(7):49-53.
[14]张新娟, 刘向勇. 基于RobotStudio的工业机器人压铸工作站仿真设计[J]. 机电工程技术, 2025, 54(13):161-168.
[15]郑武略, 郑扬亮, 张鑫, 等. 复杂环境输电线路巡检机器人协同路径规划[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2): 13-16.
[16]凌旭, 邹冲, 戴俊良, 等. 基于RobotStudio的相机仿真研究[J]. 机械工程与自动化, 2025, 54(3):9-11.
[17]周小浩, 张莺莺. 基于RobotStudio的自动上板机器人的追随控制仿真研究[J]. 机电工程技术, 2025, 54(13):174-178.
[18]王传浩, 孙秀阁, 罗杨, 等. 基于RobotStudio的ABB IRB660码垛机器人虚拟工作站的建立与应用[J]. 纯碱工业, 2025(5): 20-22.
[19]王超, 王朋静, 盛国军, 等. 工业智能作业感知平台的探索与应用[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1):1-4.
[20]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.
[21]周大志, 赵寒涛, 赵明宇, 等. PLC中基于字运算的大批量设备控制方法的研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(12):183-186.
[22]吴珊丹, 杨珍, 辛春花. 新型插秧机的三维虚拟仿真设计[J]. 农机化研究, 2025, 47(5):186-190.
[23]郝明, 孙凯明, 张建平, 等. 基于FACTORY IO的工业场景仿真虚拟调试[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(1):139-142.
[24]彭昊, 刘显晖, 李建强, 等. 基于PLC的钢支撑智能伺服控制系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(4):53-56.
[25]陆茂鑫, 蒋申晨, 王昭夏. 基于物联网技术的绝缘涂敷机器人工作状态远程监测研究[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(2):62-65.