

基于 SIMIT 和 MCD 的并联机器人 数字孪生实验系统设计

孟庆森^{1,2}, 张宏伟^{1,2}, 王新环¹

(1. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003;
2. 河南省煤矿装备智能检测与控制重点实验室, 河南 焦作 454003)

摘要: 为有效提高机器人自动化产线设计、调试的效率, 解决实际设备调试风险高、试错成本高等问题, 以三自由度机械手包装生产线为例, 设计一种基于 SIMIT、PLCSIM Advanced 和 MCD (mechatronics concept designer) 的并联机器人数字孪生虚拟调试系统, 采用 MCD 设计并建立机器人包装数字化工作站, 利用 TIA Portal 进行硬件配置、工艺对象组态和 PLC 控制程序设计, 通过 SIMIT 仿真电气部件行为模型和数据通信, 实现了包装工作站的工序流程仿真、优化。结果表明: 该系统能够有效验证并联机器人运动控制, 完成生产线的协同调试。

关键词: 并联机器人; 数字孪生; 机电概念设计模块; PLCSIM Advanced; SIMIT

中图分类号: TP242; G642.423 **文献标识码:** A **文章编号:** 1002-4956(2023)06-0135-07

Design of digital twin experiment system for parallel robot based on SIMIT and MCD

MENG Qingsen^{1,2}, ZHANG Hongwei^{1,2}, WANG Xinhuan¹

(1. School of Electrical Engineering & Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China;
2. Henan Key Laboratory of Intelligent Detection and Control of Coal Mine Equipment, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In order to effectively improve the efficiency of robot automation production line design and commissioning, solve the problems of high commissioning risk and high cost of trial and error of actual equipment. Taking packaging production line of three-degree of freedom manipulator as an example, a virtual commissioning system of parallel robot digital twinning based on SIMIT, PLCSIM Advanced and mechatronics concept designer (MCD) is designed and a digital workstation of robot packaging is built by using MCD. TIA Portal is used for hardware configuration, process object configuration and PLC control program design. Finally, SIMIT is used to simulate the behavior model of electrical components and data communication to realize the process simulation and optimization of packaging workstation. The results show that this system can effectively verify the motion control of parallel robot and complete the collaborative commissioning of the production line.

Key words: parallel robot; digital twins; mechatronics conceptual designer module; PLCSIM Advanced; SIMIT

随着智能制造的不断发展, 机器人的应用越来越广泛。并联机器人具有精度高、速度快、轻负载、灵活性强等优点, 广泛应用在物料搬运、分拣和包装等

环节^[1-3]。由于机器人应用场景具有工艺复杂、控制策略各异的特点, 依赖真实机器人进行实验成本高、灵活性差。

收稿日期: 2022-12-12

基金项目: 河南省高等教育教学改革研究与实践项目 (2021SJGLX1011); 河南省高校科技创新团队项目 (20IRTSTHN019); 本科高校研究性教学改革研究与实践项目 (2022SYJXLX032)

作者简介: 孟庆森 (1999—), 男, 河南周口, 硕士研究生, 主要研究方向为虚拟仿真, 1214864395@qq.com。

通信作者: 张宏伟 (1980—), 男, 安徽宿州, 博士, 教授, 主要研究方向为工业自动化, zhanghw@hpu.edu.cn。

引文格式: 孟庆森, 张宏伟, 王新环. 基于 SIMIT 和 MCD 的并联机器人数字孪生实验系统设计[J]. 实验技术与管理, 2023, 40(6): 135-141.

Cite this article: MENG Q S, ZHANG H W, WANG X H. Design of digital twin experiment system for parallel robot based on SIMIT and MCD[J]. Experimental Technology and Management, 2023, 40(6): 135-141. (in Chinese)

数字孪生是一种基于信息采集与分析技术,将真实世界的物理设备映射到虚拟世界形成数字化的虚拟模型,构建“状态感知—仿真计算—智能控制—决策执行”的闭环系统。通过仿真技术再现物理设备在真实世界中的行为,为控制系统的设计、分析、运行和决策提供支撑。利用虚拟调试技术模拟运行整个或部分生产流程,在生产线投产前对重要功能和性能进行测试,验证产品设计的合理性,检测和消除设计缺陷^[4-6]。

MCD (mechatronics concept designer) 是西门子基于“数字化双胞胎”推出的机电一体化概念设计工具,将系统工程、物理运动模型、知识重用和设计协同融合于一体,其动力学环境采用 NVIDIA PhysX 物理引擎,动态仿真效果逼真,是创建机电产品数字孪生体并进行虚拟调试的重要技术手段^[7]。目前基于 MCD 的机器人虚拟调试较多,如 Trabesinger 等^[8]通过硬件在环的方式验证了一种针对机器人安全反应时间计算方式的设计。赵永信等^[9]利用 TCP/IP (transmission control protocol/Internet protocol) 作为桥梁,实现了工业机器人气动手爪的 MCD 模型与 PLC 的虚拟调试。郑魁敬等^[10]将 RobotStudio 中机器人仿真控制器内的关节数据和 PLCSIM 中的信号映射到 MCD 中,实现机器人磨削系统的集成控制和过程监控。蔡文站等^[11]利用 MCD 仿真序列和 TIA Portal 构

建了机器人打磨联合虚拟调试系统。张月等^[12]为飞灰包装产线提供了全自动智能控制方案,由 MCD 内置的路径规划和运动学功能自动求解取袋姿态;现有研究大多将外部工业机器人控制器参数传至 MCD 中,对机器人本体运动控制系统开发和调试的研究较少。

本文以机器人产品包装系统为研究对象,基于 SIMIT、PLCSIM Advanced 和 MCD 进行机械系统设计和控制系统设计,建立物料包装自动生产线虚拟调试系统,实现虚拟调试。

1 TIA Portal-NX MCD 虚拟调试技术

传统的自动化生产线设计往往需要首先通过 CAD 软件设计图纸,设计制作机器人控制系统、机械装备、生产线等被控对象,然后利用编程软件设计 PLC 控制程序、HMI (human machine interface) 程序,最后对真实设备进行调试,验证控制系统的性能。这种开发周期长、效率低、成本高。

“数字化双胞胎”理念是指在虚拟世界中以数字化的方式拷贝一台设备,并在虚拟世界里对模拟设备各部件之间的相互运动和电气行为进行仿真^[13]。为了能真实再现实际设备,需要借助软件在环或硬件在环的闭环仿真系统。西门子一体化工程数字化平台可以实现软件在环,基于 SIMIT+ PLCSIM Advanced+MCD 的虚拟调试系统如图 1 所示。

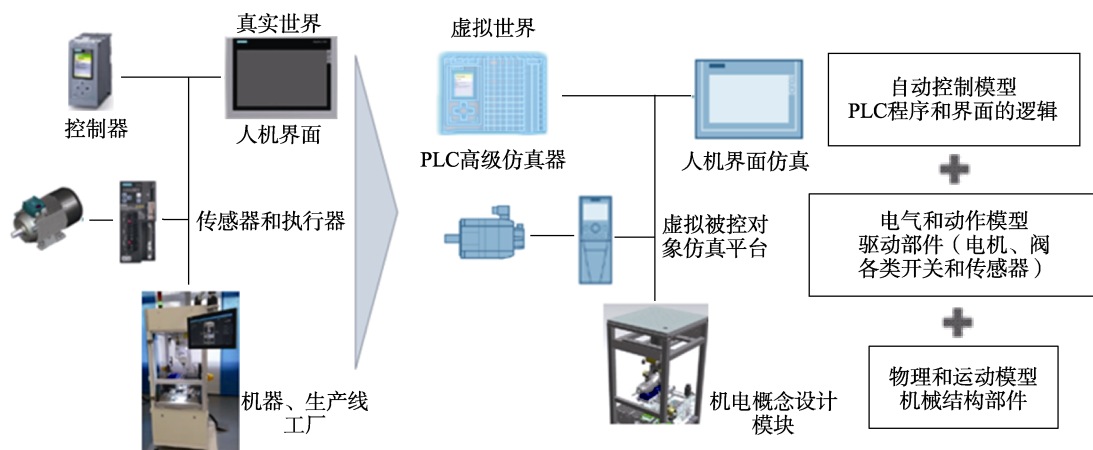


图 1 虚拟调试系统结构图

MCD 用于建立机械结构部件的物理和运动模型^[14], PLCSIM Advanced 用于仿真实际设备中的硬件 PLC 和 HMI, SIMIT 软件用于对开关、传感器、电机、电磁阀等电气元件进行电气行为仿真,同时实现与 MCD 和 PLCSIM Advanced 的信号耦合。通过 PLCSIM Advanced 与 PLC 进行数据交换,发送速度设定、位置设定等信息至 MCD, MCD 根据收到的信息仿真机械部分运动,发送经过计算的真实信息至 SIMIT^[15]。

利用数字化双胞胎孪生进行全过程跟进验证,可以缩短开发周期,降低设计迭代产生的误差,加快机械、电气和软件设计等学科产品的开发速度,缩短新产品从最初的概念构思到后续成品调试的周期。

2 并联机器人运动学建模

2.1 机器人结构分析

采用经典的 3-RSS 型 Delta 并联机器人作为研究对

象, 开展数字孪生虚拟实体的设计, 并联机器人结构如图 2 所示。该机器人由静平台、动平台、中间导向轴、3 条主动臂、3 条从动臂、伺服电机、行星减速机等组成。主动臂受安装于静平台中的电机驱动而上扬下摆, 从动臂通过鱼眼球铰链与主动臂、动平台相连, 从动支链的 4 个球副构成平行四边形机构, 实现末端执行器的三维平动。

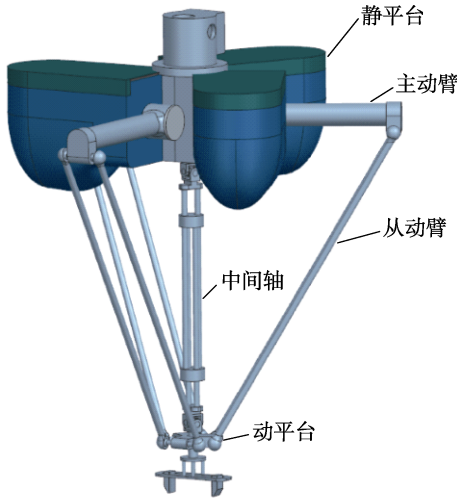


图 2 并联机器人结构

2.2 数学模型

并联机器人的主要机构为顶部的定平台、底部的移动平台和 3 条对称支链, 中间导向轴对运动学模型的建立和分析没有影响, 其简化机构如图 3 所示。

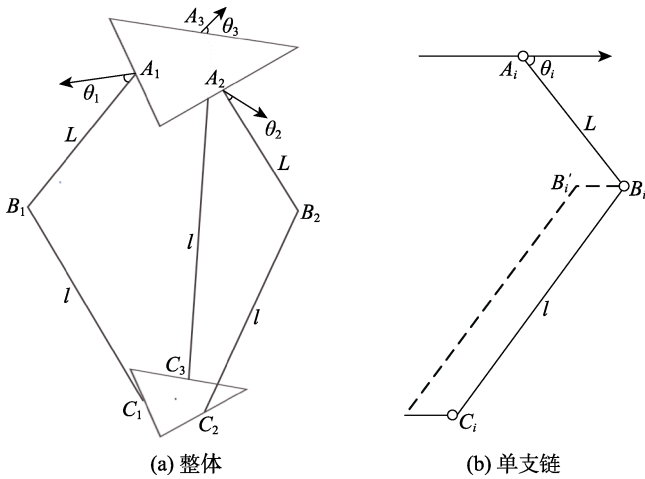


图 3 机构简图

记铰链副在定平台安装节点为 $A_i (i=1,2,3)$, 主、从动杆球铰连接处的控制点为 $B_i (i=1,2,3)$; 从动杆与移动平台球铰连接处的控制点为 $C_i (i=1,2,3)$ 。遵循右手定则, 以机构简图中上、下三角形中心为原点, 建立动平台坐标系 $\{C\}$ 和定平台坐标系 $\{A\}$, 如图 4 所示。

关节变量记为 $\theta_i (i=1,2,3)$, 末端位置 ${}^A C_C = [x, y, z]^T$, 主动臂、从动臂长度分别记为 L, l 。

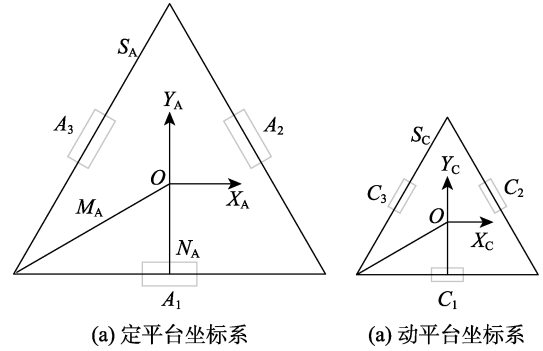


图 4 定、动平台坐标系

A_i 在 $\{A\}$ 坐标系的坐标 ${}^A A_i (i=1,2,3)$ 恒定, 可表示为:

$${}^A A_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -N_{A_1} \\ 0 \end{bmatrix}, {}^A A_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} N_{A_2} \\ \frac{1}{2} N_{A_2} \\ 0 \end{bmatrix}, {}^A A_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} N_{A_3} \\ \frac{1}{2} N_{A_3} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, N_{A_i} 为 $\{A\}$ 坐标系原点 O 到 A_i 的距离。 C_i 在 $\{C\}$ 坐标系的参数配置 ${}^C C_i (i=1,2,3)$ 与之类似, 不再赘述。

根据图 3 所示某条支链的闭环结构特征, 建立矢量环方程, $\{A\}$ 坐标系下向量 $B_i C_i$ 的坐标 ${}^A L_i (i=1,2,3)$ 表示如下:

$${}^A L_i = {}^A C_C + {}^C C_i - {}^A A_i - {}^A L_i \quad (2)$$

式中: 向量 ${}^C C_i$ 和 ${}^A A_i$ 为常量, $\{A\}$ 坐标系下向量 $A_i B_i$ 的坐标 ${}^A L_i (i=1,2,3)$ 取决于 θ_i 。

$${}^A L_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -L \cos \theta_1 \\ -L \sin \theta_1 \end{bmatrix}, {}^A L_2 = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_2 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_2 \\ -L \sin \theta_2 \end{bmatrix}, {}^A L_3 = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{2} L \cos \theta_3 \\ \frac{1}{2} L \cos \theta_3 \\ -L \sin \theta_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

将式 (1) 和 (3) 代入式 (2), 整理得到

$${}^A L_1 = \begin{bmatrix} x \\ y + L \cos \theta_1 + d \\ z + L \sin \theta_1 \end{bmatrix}$$

$${}^A I_2 = \begin{bmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2}(L \cos \theta_2 + d) \\ y - \frac{1}{2}(L \cos \theta_2 + d) \\ z + L \sin \theta_2 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$${}^A I_3 = \begin{bmatrix} x + \frac{\sqrt{3}}{2}(L \cos \theta_3 + d) \\ y - \frac{1}{2}(L \cos \theta_3 + d) \\ z + L \sin \theta_3 \end{bmatrix}$$

式中, d 表示 N_{A_i} 与 N_{C_i} 的差值, N_{C_i} 为 $\{C\}$ 坐标系原点 O 到 C_i 的距离。

从动臂长度限制为 l , 即

$$\| {}^A I_i \| = l, i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

将式 (4) 代入式 (5), 等式两边取平方, 展开后得到并联机器人的约束方程组:

$$\begin{cases} 2L(y+d)\cos\theta_1 + 2zL\sin\theta_1 + x^2 + y^2 + z^2 + d^2 + L^2 + 2yd - l^2 = 0 \\ L(2d - y - \sqrt{3}x)\cos\theta_2 + 2zL\sin\theta_2 + x^2 + y^2 + z^2 + d^2 + L^2 - d(y + \sqrt{3}x) - l^2 = 0 \\ L(2d - y + \sqrt{3}x)\cos\theta_3 + 2zL\sin\theta_3 + x^2 + y^2 + z^2 + d^2 + L^2 - d(y + \sqrt{3}x) - l^2 = 0 \end{cases} \quad (6)$$

3 并联机器人 MCD 数字孪生系统设计

3.1 并联机器人数字孪生虚拟调试系统总体架构

并联机器人的数字孪生虚拟调试系统总体架构如图 5 所示, 该系统主要包括机械臂模型层、运动控制层和 SIMIT 仿真测试层。整个系统在一台工作站上完成, 凭借计算硬件资源, 真实地还原了实际运动控制器循环扫描、处理器对装置状态进行监控的工作方式, 控制器从主周期任务的程序开始逐条执行用户任务, 直到所有任务结束, 再次返回。

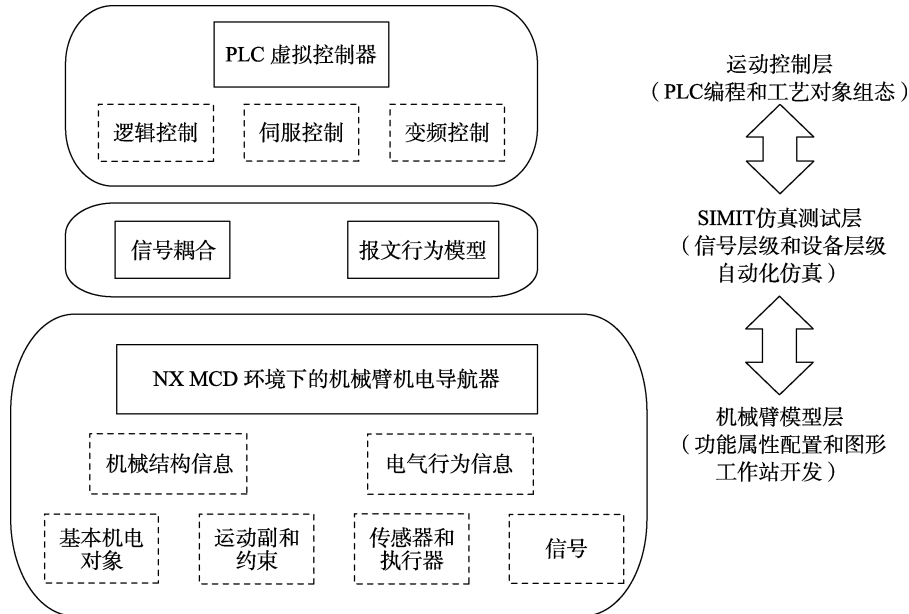


图 5 并联机器人虚拟调试系统总体架构

3.2 并联机器人 MCD 模型建立

使用机械手和夹具等比尺寸作为建模标准, 装配约束各部位的空间位置, 建立机器人的三维模型, 为实现仿真控制, 采用依附性指令对三维几何模型进行广义的机电一体化描述。设置模型组件的物理属性、运动副、执行器、传感器等, 如图 6 所示。

物理属性赋予了各部件在 MCD 物理场中运动的能力, 包括刚体、碰撞体属性的定义; 运动副是限制接触部件间运动自由度的活动联结, 包括铰链副、球副、滑动副、固定副; 执行机构是运动副的驱动装置, 包括对主动臂铰链副的速度控制器、夹爪滑动副的位

置控制器; 传感器负责实时采集机器人位置变量和关节变量等动态信息^[16]。

4 并联机器人包装工作站设计

MCD 模型的建立以车间的实际产线构成与分布为设计依据, 基于 Delta 并联机器人虚拟模型建立仿真食品包装工作站, 如图 7 所示。该工作站主要由机器人、传送带、包装盒、物料、光电传感器等组成。将与装置对应的 MCD 组件放置在工作站对应位置, 可使用 NX 坐标系工具确定并验证场景对象的相对位姿关系, 实现工作站总体布局的数字化映射。

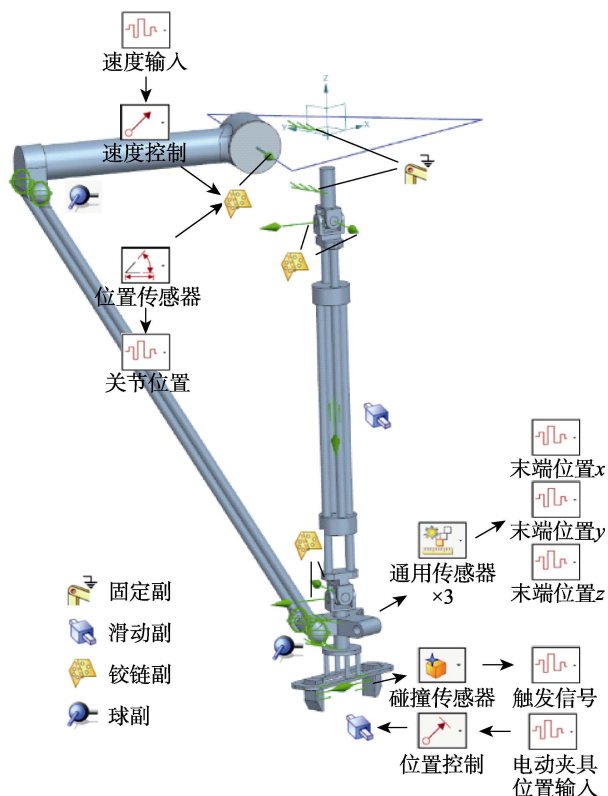


图6 并联机器人单条支链的机电概念模型

在 MCD 中创建生产线工作站的过程中, 场景对象的功能属性对整个工作站的动态仿真效果发挥重要

作用。为实现虚拟模型的机电融合, 以参数化的方式赋予各组件和实际产线相同的物理属性和行为特性, 如刚体、碰撞体、物料源、传输面等。

机器人包装任务是逐个将产品从主传送带上拾取并放置到副传送带的包装盒中, 且需设置一定的避障高度, 该操作可采用典型的“门”字型轨迹^[17], 运动路径如图 8(a)所示。采用圆弧插补和直线插补进行拟合插值, 确定运动路径上各点坐标。

为实现机器人包装工作站的 PLC 电气控制, 先设计其工艺流程, 对包装工作站中各模块的动作逻辑进行系统规划, 机器人包装工作站的工作流程如图 8(b)所示。

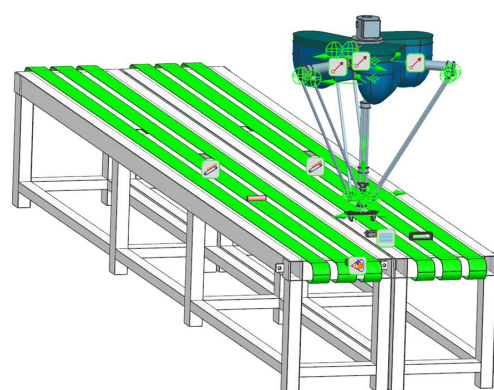
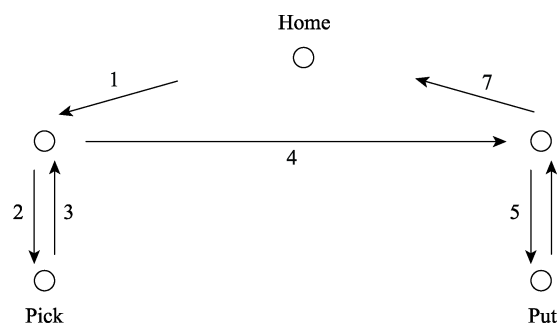
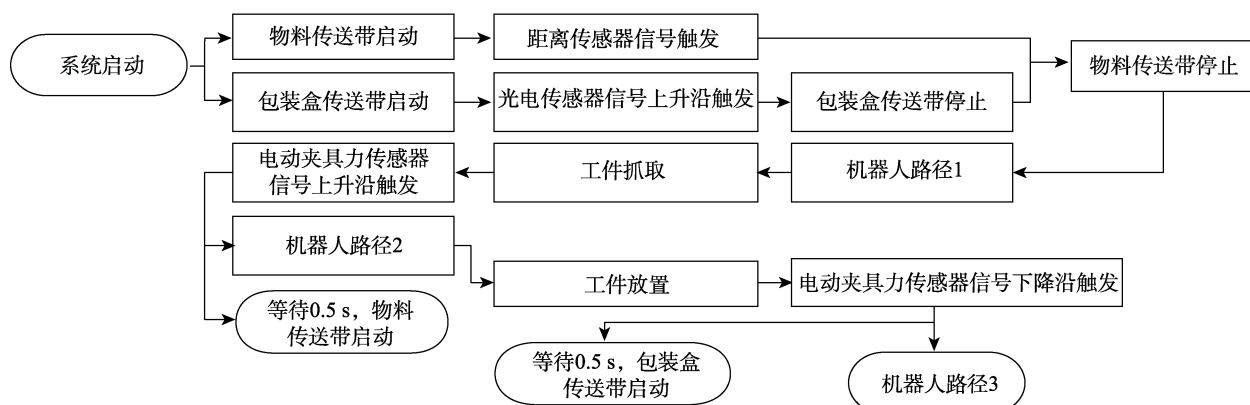


图7 工作站的总体布局和功能属性



(a) 路径规划



(b) 工作流程

图8 机器人包装系统设计

MCD 包装工作站主要实现进料搬运、拾取和放置,以及出料搬运。首先启动 2 条传送带,当包装盒到位,停止副传送带。再等待物料到达机器人工作空间,停止主传送带,通过距离传感器计算物料中心点(Pick 点),机器人初始位置位于 Home 点,经过 1→2→3 将物料从 Pick 点抓起,然后经过 3→4→5 放置在 Put 点,放置结束后通过 6→7 返回原点,完成物料的单个周期装盒作业。在该过程中,当物料抓取完成时,进料传送带重新启动,当物料放置完成时,包装盒传送带重新启动。

5 TIA Portal PLC 控制程序设计

机器人包装生产线控制系统设计使用西门子 TIA Portal V17 开发环境,该工程平台将所有自动化设计工具集成统一的软件架构,不但支持硬件网络及驱动产品的组态,还能够进行控制编程和上位监控组态,使项目管理便捷统一。对于运动性能要求较高的机器人自动化系统,选择西门子 S7-1500T PLC 作为控制器,控制系统硬件架构如图 9 所示。该控制系统采用 PROFINET 工业以太网对 G120 变频器、S120 伺服驱动器进行信息交互。

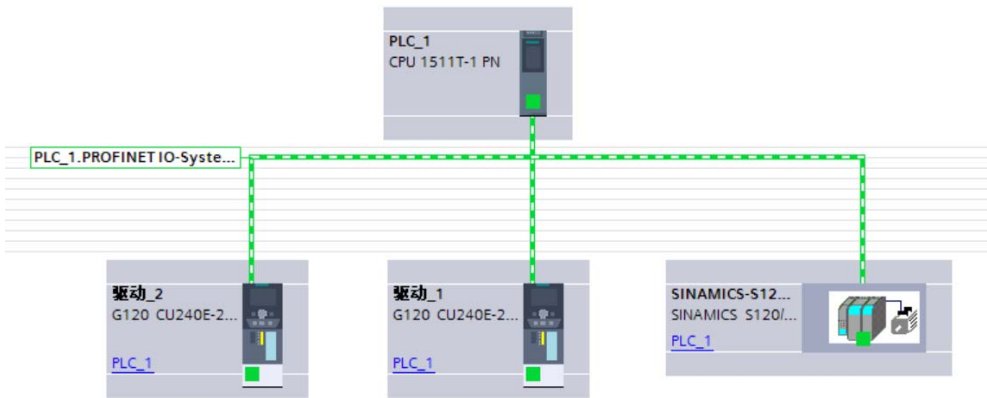


图 9 控制系统硬件配置

根据工艺要求,整个系统分为运动控制和逻辑控制两部分。运动控制以所建立的轴工艺对象为控制核心,PLC 轴编程主要通过西门子 LAxisCtrl 和 LKinCtrl 运动控制库搭建轴和并联机构的运动功能模块,通过系统变量向下位驱动器发送指令,由驱动器自行完成速度环、位置环的计算,实现主副传送带和机器人驱动系统的独立运行。PLC 逻辑控制主要是设定传送带启停、机器人路径规划,以及装盒运动执行的信号控制程序。输入信号包括位置传感器信号、电机状态反

馈信号、夹具碰撞传感器信号,输出信号包括电动夹具位置信号、电机速度控制信号。通过程序模块的相互调用,保证传送带包装作业的连续运行。

6 虚拟调试

根据工艺流程设计和驱动器配置,项目中共组态了 5 个轴工艺对象,并搭建增量拾取器 3D 运动机构对 3 个伺服轴进行协同运动控制,其分配情况及相关属性如表 1 和图 10 所示。

表 1 轴工艺对象分配

名称	工艺	连接驱动	编码器类型	报文
主传送带驱动轴	速度轴	主传送带驱动电机	增量型编码器	标准报文 1
副传送带驱动轴	速度轴	副传送带驱动电机	增量型编码器	标准报文 1
主动臂驱动轴 1	位置轴	伺服电机 1	增量型编码器	西门子报文 105
主动臂驱动轴 2	位置轴	伺服电机 2	增量型编码器	西门子报文 105
主动臂驱动轴 3	位置轴	伺服电机 3	增量型编码器	西门子报文 105

将开发的 PLC 程序和包装系统关联起来,利用 SIMIT 平台模拟 I/O 站、电机等实际现场被控设备,协同 PLCSIM Advanced 和 TIA Portal 进行虚拟调试。

在 MCD 集成的 SHM (shared memory) 外部信号配置中填写共享内存名称,选中 SHM 数据中的输入、输出信号,建立与 SIMIT 软件的信号交换关系。利用

SIMIT 自动创建的虚拟 PLC 实例,在 S7-PLCSIM Advanced 中运行 PLC 程序,基于数据逻辑处理,驱动 MCD 中的包装工作站实现仿真运动。产线整体运行结果如图 11 所示。可以看出,该产线可以在 PLC 程序控制下完成包装工作,能够满足全自动产品包装的工艺需求。

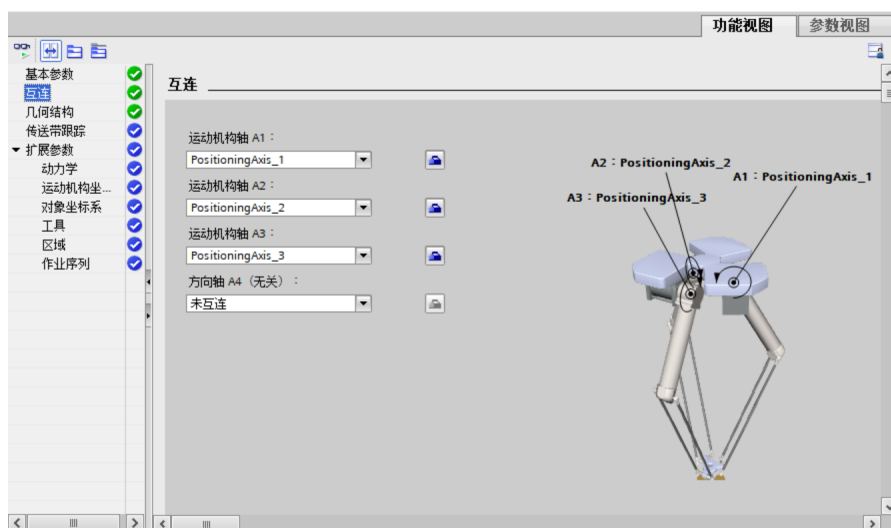


图 10 运动机构工艺对象配置

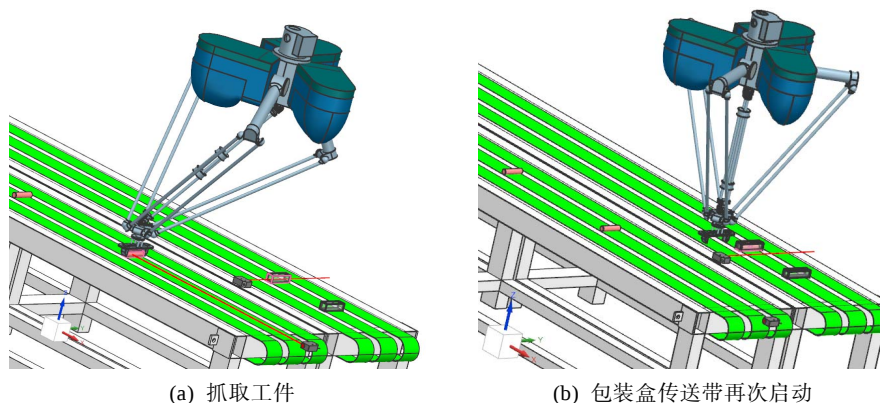


图 11 MCD 机器人运动过程仿真

6 结语

本文基于 NX MCD 仿真平台设计了一种并联机器人物料装盒的虚拟调试系统, 包括数字化生产线设计、运动控制系统模型建立、PLC 软件编程与硬件组态等, 最终在 SIMIT 平台的基础上实现了“PLC 控制程序—SIMIT 被控设备—MCD 机械模型”的机电一体化联合仿真与调试。

(1) 本文方法将机器人的机械设计、控制系统、动力学仿真融合在 NX 软件下, 为机器人的概念设计和仿真验证提供了统一的框架, 便于嵌入复杂生产系统的数字孪生系统中。

(2) 通过虚拟调试, 可以优化工艺流程, 使机器人运动高效可靠, 大大缩短了自动化项目的调试周期, 降低了碰撞事故和安全风险。

本文研究了并联机械手运动控制系统的开发与物料包装工作站的协同控制设计, 可用于相关产品线的前期仿真、验证和优化, 也可用于本科生及研究生相关课程的实验教学, 具有一定的实用意义和参考价值。

参考文献 (References)

- [1] 葛连正, 赵立军. 基于 V-REP 的机器人仿真实验系统及教学[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(3): 132-135.
- [2] 仲朝亮, 吕强, 张波涛, 等. 移动机器人虚拟仿真平台及其在实验教学中的实践应用[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 145-148.
- [3] 叶鹏达, 尤晶晶, 仇鑫, 等. 并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J]. 南京航空航天大学学报, 2020, 52(3): 363-377.
- [4] 李琳利, 李浩, 顾复, 等. 基于数字孪生的复杂机械产品多学科协同设计建模技术[J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25(6): 1307-1319.
- [5] 李浩, 王昊琪, 刘根, 等. 工业数字孪生系统的概念、系统结构与运行模式[J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27(12): 3373-3390.
- [6] 柯志胜, 赵巍, 王太勇, 等. 面向数字孪生的智能虚拟生产线与调试系统设计[J]. 工具技术, 2022, 56(9): 86-91.
- [7] 王俊杰, 戴春祥, 秦荣康, 等. 基于 NX MCD 的机电概念设计与虚拟验证协同的研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40(7): 31-33.

(下转第 161 页)

- 题、思考与探索[J]. 科学通报, 2022, 67(16): 1729–1743.
- [2] 李景广. 中国室内环境与健康研究进展报告 2015—2017[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2017.
- [3] 樊娜, 刘聪, 黄衍, 等. 我国健康建筑中 VOC 污染控制研究进展及思考[J]. 科学通报, 2020, 65(4): 263–273.
- [4] 周超斌. 自然通风对高层住宅空气质量影响的研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- [5] 张莉萍, 倪骏, 郑毅鸣, 等. 上海市大型展会部分室内空气污染物分布特征与健康风险评价[J]. 环境与职业医学, 2021, 38(5): 489–493.
- [6] 张展源, 何润堃, 张宝杰. 室内空气污染物及净化技术研究[J]. 环境科学与管理, 2017, 42(3): 93–96.
- [7] ZHANG G X, LIU Y Y, ZHENG S L, et al. Adsorption of volatile organic compounds onto natural porous minerals[J]. Journal of Hazardous Materials, 2018, 364(2): 317–324.
- [8] 孙也, 侯诗宇, 刘宇松, 等. 碳基吸附剂选择性吸附甲苯和萘综合实验教学设计[J]. 实验技术与管理, 2022, 39(7): 159–165.
- [9] 崔维怡, 丁国敏, 谭乃迪. 二氧化钛基催化剂催化氧化甲醛的研究进展[J]. 化工进展, 2022, 41(12): 6310–6318.
- [10] 樊灏, 沈振兴, 逯佳琪, 等. 常温除甲醛催化剂 $\text{Mn}_2\text{Ce}_2/\text{HZSM-5}$ 的活性位点与性能分析[J]. 环境工程, 2021, 39(6): 99–105.
- [11] 张士轩, 李智勇, 周汉邦, 等. 等离子空气净化技术在广州地铁广佛线增购车中的运用研究[J]. 机电信息, 2020(35): 78–79.
- [12] 曹翔. 低温等离子体结合锰基催化剂去除 VOCs 的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- [13] 许宁. 大气污染控制工程实验[M]. 北京: 化学工业出版社, 2018.
- [14] 陆建刚. 大气污染控制工程实验[M]. 2 版. 北京: 化学工业出版社, 2016.
- [15] HONG W, LIU Y, ZHU T L, et al. Promoting the catalytic ozonation of toluene by introducing SO_4^{2-} into the $\alpha\text{-MnO}_2/\text{ZSM-5}$ catalyst to tune both oxygen vacancies and acid sites[J]. Environment Science & Technology, 2022, 56(22), 15695–15704.
- [16] 李盛, 任晓卫, 王金玉, 等. 兰州市小学生家庭室内空气甲苯浓度及其影响因素[J]. 环境与职业医学, 2020, 37(9): 872–876.
- [17] TAKAHASHI A, YANG F H, YANG R T. Aromatics/aliphatics separation by adsorption: New sorbents for selective aromatics adsorption by π -complexation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2000, 39(10): 3856–3867.
- [18] ZENG X, LI B, LIU R, et al. Investigation of promotion effect of Cu doped MnO_2 catalysts on ketone-type VOCs degradation in a one-stage plasma-catalysis system[J]. Chemical Engineering Journal, 2019, 384(3): 123362.

(编辑: 孙浩)

(上接第 141 页)

- [8] TRABESINGER S, PICHLER R, PICHLER M, et al. Hardware-in-the-Loop based simulation of safety reaction times at the example of a stäubli robot cell[J]. Procedia CIRP, 2020, 93: 1067–1072.
- [9] 赵永信, 度国旭, 吴坚, 等. 基于 TCP 的气动手爪 MCD 模型虚拟调试的研究[J]. 机床与液压, 2022, 50(3): 70–72.
- [10] 郑魁敬, 代方园, 廉磊. 基于 NX MCD 的机器人磨削系统虚拟调试[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019(12): 57–60, 64.
- [11] 蔡文站, 田建艳, 王书宇, 等. 基于 NX MCD 与 TIA 的机器人打磨联合虚拟调试研究[J]. 现代制造工程, 2022, 502(7): 37–42, 120.
- [12] 张月, 方成刚. 飞灰包装智能产线设计与虚拟调试[J]. 包装工程, 2022, 43(11): 226–235.
- [13] 吴雁, 王晓军, 何勇, 等. 数字孪生在制造业中的关键技术及应用研究综述[J]. 现代制造工程, 2021(9): 137–145.
- [14] SCHAMP M, GINSTE L V D, HOEDT S, et al. Virtual commissioning of industrial control systems-a 3D digital model approach[J]. Procedia Manufacturing, 2019, 39: 66–73.
- [15] 张珏, 董爱华, 齐洁, 等. 基于 CPS 和数字孪生技术的智能制造课程建设: 自动化专业实践课程教改探索[J]. 实验室研究与探索, 2021, 40(7): 190–194.
- [16] 林裕程, 韩勇. 基于 NX MCD 的数控机床虚拟调试[J]. 制造技术与机床, 2021, 704(2): 151–156.
- [17] 张续冲, 张瑞秋, 陈亮, 张宪民. Delta 机器人产品分拣轨迹规划仿真[J]. 计算机仿真, 2019, 36(11): 295–299, 364.

(编辑: 张利芳)