

分类号: TH122

密 级: 公开

学校代码: 10363

学 号: 2220110128



安徽工程大学

Anhui Polytechnic University

硕士学位论文

题 目 基于数字孪生的机器人多工序
装配系统研究

论 文 作 者 史瑞方

校 内 导 师 钟相强(教授)

校 外 导 师 吴亮发(工程师)

专业学位类别 机械

研究方向(领域) 数字孪生

论文提交日期: 2025 年 5 月 20 日

分类号：TH122

单位代码：10363

密 级：公开

学 号：2220110128

基于数字孪生的机器人多工序装配系统研究

Research on Robotic Multi-Process Assembly System Based on Digital Twins

学 生 姓 名： 史瑞方

校 内 导 师： 钟相强（教授）

校 外 导 师： 吴亮发（工程师）

专 业 学 位 类 别： 机械

研究方向（领域）： 数字孪生

论 文 答 辩 日 期：2025 年 5 月 15 日

安徽工程大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：我恪守学术道德，崇尚严谨学风。所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已明确注明和引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品及成果的内容。论文为本人亲自撰写，我对所写的内容负责，并完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

学位论文作者签名：史瑞芳

日期：2025 年 5 月 20 日

安徽工程大学学位论文版权使用授权书

学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅或借阅。本人授权安徽工程大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密 ☐，在 _____ 年解密后适用本版权书。

本学位论文属于

不保密 ☒。

学位论文作者签名：史瑞芳

指导教师签名：钟相强

日期：2025 年 5 月 20 日

日期：2025 年 5 月 20 日

基于数字孪生的机器人多工序装配系统研究

摘 要

随着智能制造的发展，工业机器人在装配系统中的应用日益广泛。然而传统装配系统在面对复杂、多变的装配任务时，存在装配精度低和轨迹优化困难等问题，难以满足现代制造业对高效、精准和智能化装配的需求。为了提升多工序装配系统的智能化水平和优化装配流程，基于数字孪生技术，构建了一种工业机器人多工序装配系统，以提高装配质量和效率，主要研究内容如下：

设计了机器人多工序装配系统，优化装配流程，确保机器人高效协作。以工业机器人作为多工序装配主要工作对象，设计了快换夹爪和卡扣顶紧机构，使用 Workbench 分析了夹爪的应力和应变，以适应不同零件的装配需求。结合多工序装配特点，优化设备布局，合理安排工业机器人、雕刻机、视觉检测平台和装配工作台的位置，以减少无效移动，提高装配效率。

基于多维数字孪生模型，提出机器人多工序装配数字孪生系统框架，采用 Python 脚本开发方法，构建了传送带、工业机器人、雕刻机、视觉检测平台、气动夹爪和卡扣顶紧机构的数字孪生体，完成了多工序装配虚拟系统的集成。

数据通信方面，提出并行双通道数据交互架构，基于 Siemens S7 协议与 Socket 通信协议搭建了数据交互系统，实现了工业机器人、机床、视觉系统等设备的高效数据传输，保证数字孪生系统的实时性和稳定性。通过虚实联动实验，验证了数字孪生系统在多工序装配任务中的精准映射能力。

针对机器人装配路径优化问题，构建了以“时间—能耗”为优化目标的数学模型，结合工业机器人关节速度、加速度、跃度等运动学约束，确保轨迹的平稳性和可行性。基于灰狼智能优化算法，引入动态收敛因子和自适应权重调整策略，提高算法的全局搜索能力和收敛精度，减少了 38.1% 的装配时间，降低了 34.9% 的运行能耗。

基于数字孪生技术，实现了多工序装配过程的可视化、实时监控及数据采集，并通过改进灰狼优化算法提高了装配效率和轨迹平稳性。研究成果可为机器人装配路径优化提供技术支持，推动数字孪生技术在装配领域的进一步应用。

关键词：数字孪生，工业机器人，多工序装配，虚实交互，路径规划

RESEARCH ON ROBOTIC MULTI-PROCESS ASSEMBLY SYSTEM BASED ON DIGITAL TWINS

ABSTRACT

With the development of intelligent manufacturing, industrial robots have been increasingly applied in assembly systems. However, traditional assembly systems exhibit limitations such as low assembly accuracy and difficulties in trajectory optimization when dealing with complex and variable assembly tasks, making it challenging to meet modern manufacturing demands for efficient, precise, and intelligent assembly. To enhance the intelligence level of multi-process assembly systems and optimize the assembly workflow, a digital twin-based industrial robot multi-process assembly system has been constructed to improve assembly quality and efficiency. The main research work completed is as follows:

A multi-process robotic assembly system has been designed to optimize the assembly workflow and ensure efficient collaboration among robots. Industrial robots have been taken as the primary operating unit for multi-process assembly, with quick-change grippers and buckle pressing mechanisms designed to meet the requirements of different assembly tasks. The stress and strain of the gripper have been analyzed using Workbench. Considering the characteristics of multi-process assembly, the equipment layout has been optimized by reasonably arranging the positions of industrial robots, engraving machines, vision inspection platforms, and assembly workbenches, thereby reducing ineffective movements and improving assembly efficiency.

Based on a five-dimensional digital twin model, a system framework for the digital twin of the multi-process robotic assembly has been proposed. Using Python scripting, digital twins of the conveyor belt, industrial robots, engraving machine, vision inspection platform, pneumatic gripper, and buckle pressing mechanism have been developed, completing the integration of the virtual multi-process assembly system.

In terms of data communication, a parallel dual-channel data interaction architecture has been proposed. A data interaction system has been established based on the Siemens S7 protocol and the Socket communication protocol, enabling efficient data transmission among industrial robots, machine tools, and vision systems, thereby ensuring the real-time performance and stability of the digital twin system. Through virtual-real interaction experiments, the precise mapping capability of the digital twin system in multi-process assembly tasks has been verified.

To address the problem of robot assembly path optimization, a mathematical model with "time–energy consumption" as the optimization objective has been established. Considering kinematic constraints such as joint velocity, acceleration, and jerk, the smoothness and feasibility of the trajectory have been ensured. Based on the Grey Wolf Optimization (GWO) algorithm, dynamic convergence factors and adaptive weight adjustment strategies have been introduced to improve the global search capability and convergence accuracy of the algorithm, resulting in a 38.1% reduction in assembly time and a 34.9% reduction in energy consumption.

Based on digital twin technology, visualization, real-time monitoring, and data acquisition of the multi-process assembly process have been achieved. Furthermore, by improving the Grey Wolf Optimization algorithm, both the assembly efficiency and trajectory smoothness have been enhanced. The research results provide technical support for robot

assembly path optimization and promote the further application of digital twin technology in the field of assembly.

KEY WORDS: digital twin, industrial robot, multi-process assembly, virtual-real interaction, path planning

关键缩略词与符号说明表

序号	缩略词/符号	说明
1	VC	Visual Components
2	PLC	可编程控制器
3	RFID	无线射频识别设备
4	PSO	粒子群算法
5	GWO	灰狼算法
6	IGWO	改进灰狼算法
7	S7	Siemens S7
8	URDF	unified robot description format
9	a_{i-1}	机器人连杆长度
10	α_{i-1}	机器人连杆扭角
11	d_i	机器人连杆偏距
12	θ_i	机器人关节角
13	$\theta_{i,j}$	速度
14	$\dot{\theta}_{i,j}$	加速度
15	$\ddot{\theta}_{i,j}$	跃度
16	N	种群数量
18	T	最大迭代次数
19	w	惯性权重
20	p	加速因子
21	a	初始收敛因子

目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外发展及研究现状.....	2
1.2.1 数字孪生建模研究现状.....	2
1.2.2 机器人装配研究现状.....	4
1.2.3 机器人路径规划研究现状.....	7
1.3 研究内容及章节安排.....	8
第 2 章 机器人多工序装配系统设计.....	10
2.1 机器人多工序装配系统方案.....	10
2.2 系统部件选型与结构设计.....	12
2.2.1 工业机器人选型.....	12
2.2.2 末端执行器设计.....	13
2.2.3 末端执行器仿真.....	15
2.2.4 卡扣顶紧机构.....	16
2.3 本章小结.....	18
第 3 章 机器人多工序装配数字孪生系统构建.....	19
3.1 机器人多工序装配数字孪生系统框架.....	19
3.2 基于数字孪生的虚拟系统构建方法.....	20
3.2.1 组件接口搭建法.....	21
3.2.2 工艺流程搭建法.....	22
3.2.3 Python 脚本搭建法	22
3.3 数字孪生体开发与运动学建模.....	24
3.3.1 机器人数字孪生体开发.....	24
3.3.2 机器人正逆运动学求解.....	29
3.3.3 其它设备数字孪生体开发.....	35
3.4 机器人多工序装配虚拟系统集成.....	36
3.5 本章小结.....	37
第 4 章 机器人多工序装配虚实联动实验.....	38

4.1 数字孪生系统数据交互方案.....	38
4.1.1 基于 S7 协议的数据交互	38
4.1.2 并行双通道数据交互架构.....	39
4.1.3 并行双通道数据交互配置.....	40
4.2 数字孪生实验平台虚实联动.....	42
4.3 本章小结.....	45
第 5 章 机器人多工序装配路径规划.....	46
5.1 基本路径规划.....	46
5.2 智能优化算法.....	48
5.2.1 粒子群算法(PSO).....	48
5.2.2 灰狼算法(GWO)	49
5.2.3 改进灰狼算法(IGWO)	51
5.3 目标函数与运动学约束.....	52
5.4 改进灰狼算法路径规划流程.....	53
5.5 机器人路径规划算法结果分析.....	56
5.6 本章小结.....	60
第 6 章 总结与展望.....	61
6.1 总结.....	61
6.2 展望.....	62
参考文献.....	63
攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果.....	69
致 谢.....	70

第 1 章 绪论

1.1 研究背景及意义

制造业是衡量国家工业发展水平的重要指标,当前我国正处于由制造大国向制造强国转变的关键阶段。工业机器人因其高精度、高效率和可编程的特点,在自动化生产领域得到了广泛应用,尤其在多工序装配任务中,机器人能够替代人工执行复杂的装配操作,提高生产效率和产品质量。传统的多工序装配方式仍然面临诸多挑战,如装配精度不足、生产柔性较差、路径规划优化困难以及能耗较高等问题,难以满足现代制造业对高效生产的需求。如何利用先进技术提升多工序装配系统的智能化水平,优化装配流程,成为当前研究的重点问题。

近年来,随着智能制造技术的快速发展,人工智能、数字孪生、智能优化算法等技术的融合应用,为解决多工序装配系统的挑战提供了新的思路。数字孪生技术最早由美国密歇根大学的 **Grievess** 教授提出,其核心思想是在信息空间中构建物理系统的高精度虚拟模型,并通过虚拟-物理交互,实现实时监测、优化与控制^[1]。

在智能制造领域,数字孪生技术已广泛应用于智能生产线、设备健康管理、柔性制造等多个方面,并在装配系统的优化中展现出了显著的优势。通过数字孪生,装配系统可以在虚拟环境中进行优化仿真,减少物理试验成本,同时基于实时数据驱动,实现装配过程的智能化调整,提高系统的柔性制造能力^[2]。

此外,为进一步优化机器人在多工序装配中的运动路径,智能优化算法得到了广泛应用,能够有效降低机器人运行时间、能耗和冲击等,提高路径规划的精确性和稳定性^[3,4]。然而,当前的研究仍主要集中在装配系统的架构设计和基本优化方法上,如何进一步利用数字孪生技术提高路径规划的验证效率,实现机器人多工序装配流程的快速优化,并增强系统装配过程的稳定性,仍然是当前研究领域的重要方向。

综上所述,为了提升多工序装配系统的智能化水平,优化装配流程,设计并搭建了基于数字孪生技术构建工业机器人多工序装配系统,通过新型工业以太网实现装配过程的虚实映射和实时监控,满足了多工序装配数字孪生系统的数据传输的实时性和高效性。在此基础上,建立了以装配时间和能耗为优化目标的数学

模型，引入改进的智能优化算法优化装配路径，实现了机器人路径的平滑性和高效性，为多工序装配系统的智能优化提供理论支撑和实践指导。

1.2 国内外发展及研究现状

1.2.1 数字孪生建模研究现状

近年来随着制造业向智能化、数字化方向逐步迈进，数字孪生（Digital Twin）技术成为实现物理世界与数字世界融合的关键手段。数字孪生建模作为数字孪生系统的核心，是实现物理实体的精准映射、实时监测、预测分析及优化决策的关键步骤。同时，数字孪生建模的研究在理论体系构建、关键技术探索及实际应用等方面取得了重要进展。

数字孪生建模的核心目标是构建一个高保真、高精度的虚拟模型，使其能够精准反映物理系统的运行状态，并通过数据驱动实现优化控制。陶飞等^[5,6]提出了数字孪生模型的“四化四可八用”构建准则，并从“建一组一融一验一校一管”六个方面建立了数字孪生模型构建的理论体系。此后进一步对数字孪生建模进行了系统性的研究，提出了数字孪生模型需从应用领域、层次结构、学科范畴、维度、通用性和功能性等多个视角进行分析，以确保模型的广泛适用性。

另一方面，Rasheed 等^[7]指出数字孪生不仅是物理实体的数字映射，更是一种计算大模型，涉及人工智能、大数据、物理仿真等多项技术。强调在建模过程中应加强数据融合、模型更新及优化决策的能力，以提高数字孪生的适用性和智能化水平。

Thelen 等^[8]提出，数字孪生的建模方法可以按照数据流向分为“物理到虚拟”和“虚拟到物理”两个主要方向。认为“物理到虚拟”建模关注如何高效地获取物理系统的数据并构建高保真度的数字模型，而“虚拟到物理”建模则致力于通过优化仿真和反馈机制反向指导物理系统的运行。因此，未来研究应更加关注这两种建模模式之间的耦合关系，以实现更高效的虚实协同。

在具体的建模方法方面，当前研究主要集中在基于数据驱动、基于物理模型以及数据-物理融合三种方式。董雷霆等^[9]针对飞机结构数字孪生，提出了一种多尺度、多物理场的高精度建模方法。研究结合在线传感器监测、离线地面检查和运行历史数据，实现了飞机结构全生命周期内的行为预测与健康管理，并提出了

五项关键建模仿真技术，包括数据获取、多尺度建模、裂纹仿真、降阶建模和剩余寿命评估，为高可靠性产品的数字孪生建模提供了理论支撑。数字孪生概念如图 1-1 所示。



图 1-1 数字孪生概念图

在装配工艺建模方面，郭飞燕等^[10]提出了一种基于数字孪生驱动的装配工艺优化方法。研究强调了装配单元划分、孪生工艺模型构建以及装配精度闭环控制的重要性，并提出了三项关键技术，基于面向装配设计（DFA）的装配工艺规划；考虑真实物理拓扑关系的孪生工艺模型动态构建；面向装配现场的优化—反馈—改进环机制，为智能制造中的装配工艺优化提供了理论依据。

此外，Liu 等^[11]提出了一种基于仿生学（Biomimicry）的数字孪生建模方法，能够实现多尺度、多物理场景下的高精度建模。该方法通过多子模型系统的协同工作，使建模更具适应性和智能性，特别适用于航空航天制造领域的高精度加工需求。

为了保证虚拟系统与物理系统的同步，数据交互与模型更新是数字孪生建模中的关键环节。Zhang 等^[12]提出了一种多维度模型更新框架，利用物联网（IoT）技术保持虚拟-物理系统的数据一致性，并通过优化模型参数提高孪生体的自适应能力。

在智能制造领域，肖通等^[13]研究了车间生产过程的数字孪生建模方法，并基于 OPC UA 协议实现了生产过程的实时映射和数据交互，提高了车间管理的智能化水平。柳林燕等^[14]进一步提出了一种基于数字孪生的生产调度优化方法，利用孪生数据分析生产瓶颈，并通过反馈优化机制提升车间生产效率。数字孪生生产数据实时监控示例如图 1-2 所示。



图 1-2 数字孪生生产数据实时监控示例

在复杂系统的数字孪生中，朱庆等^[15]指出，数据融合、建模精度和实时性仍然是主要技术瓶颈，并建议未来研究应重点关注如何在不完备数据条件下提升建模精度，以及利用机器学习实现孪生体的自适应优化。

随着建模方法的不断优化，数字孪生已广泛应用于航空航天、智能制造、基础设施管理等领域。例如，李琳利等^[16]在机床状态监控中，采用了基于几何、逻辑和数据三维度的建模方法，实现了数控机床的实时监测和异常处理，提高了设备维护的智能化水平。

总体而言，当前数字孪生建模研究在理论体系、建模方法、数据交互和应用领域等方面已取得一定进展，但仍然面临诸多挑战。其中，高精度建模依赖大量数据支持，导致计算成本过高，如何在保证建模精度的同时优化计算效率仍是亟待解决的问题。此外，多源异构数据的融合与智能优化仍存在技术瓶颈，需要进一步加强人工智能与数字孪生的深度结合，以提升系统的智能化水平。针对这些问题，本文提出了一种面向机器人多工序装配的数字孪生建模方法，结合多维孪生模型，实现装配过程的精准建模与优化控制，从而为工业机器人智能装配及数字孪生技术的应用提供理论支撑和实践指导。

1.2.2 机器人装配研究现状

机器人装配技术在智能制造、建筑施工、医疗器械等多个领域得到了广泛应用，并且随着人工智能、计算机视觉、数字孪生等技术的融合，装配机器人正朝着高精度、自主化、柔性化、智能化的方向发展。几年来国内外机器人装配技术的主要研究方向包括装配任务规划与优化、装配精度提升、强化学习与智能装配和人机协作装配等。机器人汽车装配线如图 1-3 所示。



图 1-3 机器人汽车装配线

在机器人装配过程中，任务规划和运动优化直接决定了机器人装配的效率和质量。装配任务规划通常涉及装配顺序优化、路径规划、避障优化等多个方面。Gao 等^[17]提出了一种基于建筑信息建模（BIM）的机器人装配任务与运动规划方法，并将其应用于轻型医疗建筑的快速搭建。研究开发了一种任务规划算法和运动规划算法，能够自动计算预制构件的装配顺序和坐标，并生成机器人执行装配任务所需的运动参数。实验结果表明，该方法在合理性、可达性及避障能力方面均表现良好，验证了 BIM 与机器人装配技术结合的可行性。

此外，Johan Wessén 等^[18]研究了双臂多工具装配机器人的调度与布局优化问题，提出了一种基于约束规划的方法，将装配任务的位置、路径规划、调度约束等因素纳入数学模型，并在 MiniZinc 环境下进行求解。实验结果表明，该方法能够快速找到高质量的调度方案，并在 YuMi 机器人平台上进行了测试，证明了其在实际工业装配中的可行性。

机器人装配的精度直接影响产品质量，而误差来源主要包括传感器误差、机械结构误差、装配环境误差等。Jiang 等^[19]研究了装配任务中的搜索策略，指出在定位过程中，由于装配夹具、末端执行器以及驱动机构的误差，选择合适的搜索算法对于提升装配精度至关重要。研究将搜索策略按照传感器数量、类型以及搜索空间的维度进行分类，并分析了力觉与视觉传感融合在提高装配精度方面的应用潜力。

在点云配准技术方面，张鑫淼^[20]研究了基于点云配准的机器人抓取方法，提出了一种基于点线特征匹配的点云配准算法（PL-PPF），能够提高装配机器人对目标物体的定位精度。实验结果表明，该方法在点云初始配准和精配准过程中均

能有效提高精度和计算效率,为机器人装配过程中的目标检测与抓取提供了技术支持。

近年来强化学习在机器人装配领域的应用也逐渐增多,尤其在容差适应、复杂路径规划和自主决策方面展现出良好的前景。Apolinarska 等^[21]提出了基于强化学习的机器人装配方法,并在建筑装配任务中进行了实验验证。研究采用 Ape-X DDPG 算法,使机器人能够在接触丰富、易发生形变的装配过程中自适应调整插入力和运动轨迹,从而提高装配成功率。实验表明,该方法能够有效应对装配过程中的尺寸公差问题,使机器人在现实环境中具备较强的泛化能力。

同样,Fengming 等^[22]采用深度强化学习来实现机器人装配技能的自主学习。研究通过马尔科夫决策过程(MDP)建模装配任务,并使用训练好的分类模型作为奖励函数,使机器人能够在缺乏先验知识的情况下,通过自我学习掌握装配技能。实验结果显示,该方法在低压电器装配任务中的成功率超过 80%,证明了强化学习在复杂装配任务中的可行性。

人机协作装配作为智能制造的重要发展方向,能够结合机器人高精度、高效率的特点和人类的灵活性、认知能力,实现高效协同作业。Arne Bilberg 等^[23]研究了数字孪生驱动的人机协作装配模式,提出了一种事件驱动的数字孪生方法,用于实时优化人机协作装配单元的任务分配和执行。研究通过虚拟仿真模型指导实际装配过程,并结合精益生产方法,使人机协作更加高效灵活。

数字孪生技术在机器人装配中的应用越来越广泛。徐健等^[24]提出了一种基于数字孪生的装配机器人虚实同步及抓取方法,通过 OPC UA 通信协议实现机器人装配过程的实时数据交互,并利用虚拟机器人对卷积神经网络(CNN)进行训练,以提高物料抓取精度。实验表明,该方法能够有效提高机器人在复杂环境中的适应性,并显著提升装配精度。

此外,吴文荣等^[25]针对复杂微器件的高精度柔性装配,提出了一种模块化控制架构,通过自动生成控制文件,实现装配任务的自适应执行,验证了分层控制策略在高精度装配任务中的可行性。

综上所述,机器人装配技术已经在任务规划、精度提升、智能学习、人机协作、数字孪生等方面取得了重要进展,但是当前研究仍存在装配精度与计算复杂度的矛盾、任务规划的智能化水平有限、多工序产品装配要素复杂等问题。针对

这些问题，构建了机器人多工序装配数字孪生平台，结合五维孪生模型，实现机器人装配过程的精准建模和优化控制，为机器人智能装配及数字孪生技术的深入应用提供理论支持和实践指导。

1.2.3 机器人路径规划研究现状

机器人路径规划是机器人自主运动的关键技术，广泛应用于工业制造、无人驾驶、智能物流等领域。路径规划不仅涉及运动轨迹的生成，还需要优化时间、能耗、冲击、平滑性等多个因素，以提高轨迹的执行质量。目前，机器人路径规划的研究主要分为几何学方法、基于学习的方法和目标算法优化等方向。

几何学路径规划方法主要基于多项式插值、S 型曲线和 B 样条曲线等数学工具，生成满足边界条件的轨迹。这类方法计算简单、可控性强，适用于机器人在确定性环境下的运动规划。

B 样条曲线是一种常见的轨迹生成方法，其局部可控性和高阶连续性使其广泛应用于机器人路径规划中。范祺等^[26]提出了一种 B 样条插值优化五次多项式路径规划，在 MATLAB 仿真中表明该方法能够有效减少运动冲击，提高轨迹平滑性，为机器人关节控制提供了优化方案。

近年来，随着深度学习、强化学习和机器学习的发展，机器人路径规划方法逐渐向自适应、智能化方向演进。基于学习的方法能够通过历史数据或强化学习策略，使机器人能够自主调整轨迹，提高路径规划的实时性和泛化能力。Berenson 等^[27]提出了一种基于经验学习的路径规划框架（Lightning），通过路径存储与动态调整，实现路径规划效率的提升。该方法在 PR2 移动机器人和微创手术机器人应用测试中，超过 90% 的任务能够显著加速规划过程。

机器人路径目标算法优化通常涉及时间、能耗、冲击和路径平滑度等多个目标，目前主流的优化算法包括遗传算法（GA）、粒子群优化（PSO）、灰狼优化（GWO）等。

Ding 等^[28]针对 RRT*（快速探索随机树）算法收敛速度慢的问题，提出了路径扩展启发式采样 EP-RRT* 算法。通过结合 RRT-Connect 的贪心策略，该算法能够提高采样效率，优化搜索空间，提高路径的平滑度，并减少不必要的轨迹调整。

此外,张立付^[29]研究了基于 GWO 的机械臂路径优化方法,并通过改进 GWO 算法,提高了路径规划的收敛速度和精度。在茶叶采摘机器人实验中,该方法能够在较短路径上找到更优的运动轨迹,提高采摘效率。

对于复杂系统单一优化策略往往无法兼顾所有性能指标。因此,多目标优化成为路径规划研究的重要方向。吴丹^[30]提出了一种基于 PSO 的时间-冲击最优路径规划方法,其优化目标包括最小化时间和减少运动冲击。研究表明,改进的二阶震荡 PSO 算法能够有效降低机械臂轨迹的振动,提高运动稳定性,为工业机器人提供了更高效的轨迹优化方案。

目前机器人轨迹规划研究在智能制造、自动驾驶、智能物流和医疗等领域得到了广泛应用。但是当前的研究针对复杂系统的机器人装配路径规划过程中,仍然存在路径规划保证高精度的同时,计算复杂度高和开发周期长等问题。针对上述问题,提出了一种改进灰狼算法的机器人路径规划方法,在保证轨迹平滑性的同时,降低机器人运行的时间和能耗,为机器人轨迹优化和工业自动化应用提供新的理论支撑和实践指导。

1.3 研究内容及章节安排

基于数字孪生技术构建了机器人装配系统,针对多工序装配系统规划、数字孪生建模、虚实交互、路径规划及优化方法进行深入研究,从而实现多工序装配系统的装配效率和智能化水平的提高。论文的主要研究内容按章节安排如下:

第 1 章 绪论。首先介绍了文章的研究背景及意义,然后详细阐述了数字孪生建模、机器人装配和机器人路径规划的研究现状。

第 2 章 机器人多工序装配系统设计。针对多工序装配需求,优化装配流程,确保机器人能够高效完成各工位间的协作作业。同时,结合装配工艺要求,设计了可快速更换的末端执行器和卡扣顶紧机构,以提高装配柔性和稳定性。此外,对装配系统的整体布局进行优化,合理安排机器人、雕刻机、视觉检测平台和装配工作台的位置,减少无效运动,提高系统的整体装配效率。

第 3 章 机器人多工序装配数字孪生系统构建。基于数字孪生技术,构建工业机器人多工序装配系统的虚拟模型,并研究其建模方法。采用 VC (Visual Components) 平台,通过 Python 脚本开发,实现机器人、传送带、装配工作台

及其他设备的高精度数字孪生建模。基于 MDH 参数建立机器人运动学模型，确保孪生体的运动精度，并通过与物理系统的对比验证模型的准确性。最终完成完整的多工序装配数字孪生系统，为后续虚实交互提供基础。

第 4 章 机器人多工序装配数字孪生系统虚实联动。研究并提出基于 Siemens S7 PLC 和 Socket 通信的双通道数据交互架构。通过 PLC 和传感器采集装配过程中的实时数据，并映射至数字孪生模型，实现物理系统与虚拟系统的数据同步。采用 TCP/IP 通信技术，优化虚实数据传输流程，提高交互实时性。最终，通过搭建虚实联动实验平台，验证虚拟系统对装配过程的精准映射能力。

第 5 章 机器人多工序装配路径规划。针对机器人装配路径优化问题，建立以装配时间和能耗为目标的数学模型，并考虑关节速度、加速度等运动学约束，以确保轨迹的平稳性。研究并优化粒子群优化（PSO）、灰狼优化（GWO）及改进的灰狼优化（IGWO）等智能优化算法，结合动态收敛因子和自适应权重调整策略，提升路径优化的精度和收敛速度。最后，在 MATLAB 中验证优化算法的有效性，并通过对比不同算法的性能，评估其在多工序装配路径优化中的适用性。

第 6 章，总结与展望。对机器人多工序装配数字孪生系统的研究内容进行归纳总结，并对论文中有进一步研究价值的方向进行展望。

第2章 机器人多工序装配系统设计

工业机器人在智能制造中的应用日益广泛，特别是在多工序装配任务中，能够有效提高生产效率和产品质量，传统的装配方式存在设备布局不合理、协同效率低、路径规划优化困难等问题，难以适应复杂多变的生产需求。构建了机器人多工序装配系统，提出了系统整体架构，选型关键部件，设计了末端执行器和卡扣顶紧机构，提升装配效率和稳定性。

2.1 机器人多工序装配系统方案

为了进行机器人多工序装配系统的构建，以一种纪念币产品为例，对机器人多工序装配系统的工艺装配场景进行设计。

纪念币产品是由纪念币和卡扣组成，其中纪念币需要在装配过程中完成雕刻机加工和视觉检测。在传统的手工装配流程中，需要人工来完成产品零部件在各个设备之间的转运和装配，现在全部通过机器人来实现。为了完成装配任务设计了如下两种装配方案。

方案1：首先纪念币通过机器人使用夹爪将产品托盘上的纪念币抓取并放入准备就绪的雕刻机中进行加工，加工完毕后再由机器人抓取至视觉检测工作台，进行视觉拍照检测，同时机器人抓取托盘上的卡扣放置于装配工作台中，并通过卡扣顶紧机构打开卡扣，再将检测完毕后的纪念币由机器人抓取至装配工作台和卡扣完成组装，最后将装配完成的产品抓取回产品托盘上。

方案2：首先纪念币通过机器人使用夹爪将产品托盘上的纪念币抓取并放入准备就绪的雕刻机中进行加工，同时机器人抓取托盘上的卡扣放置于装配工作台中，并通过卡扣顶紧机构打开卡扣，然后将雕刻机中加工完毕的纪念币抓取至视觉检测工作台，进行视觉拍照检测，检测完毕后再由机器人抓取至装配工作台和卡扣完成组装，最后将装配完成的产品抓取回产品托盘上。

考虑到纪念币产品对美观性的要求，其表面图案具有多样性，因此在不同装配方案中，机器人从托盘抓取卡扣至装配工作台的时间，以及将加工完成的纪念币搬运至视觉检测平台的时间保持一致。然而，由于雕刻机加工时间受纪念币图案复杂度的影响而存在差异，两种装配方案分别将卡扣抓取工序安排在雕刻机加工阶段和视觉检测阶段，以充分利用机器人工作周期，减少空闲时间^[31-34]。通过

优化装配工序顺序，最大化减少机器人待机时间，提高整体装配效率。多工序装配流程如图 2-1 所示。

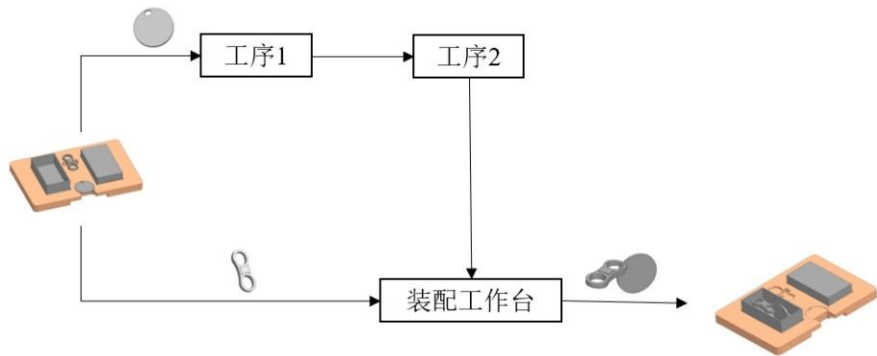


图 2-1 多工序装配流程

对比发现方案一中不论雕刻机加工时间长短，机器人都需要等待加工任务的完成，才能继续进行剩余的装配流程，而且机器人将加工完的纪念币搬运至视觉检测平台的时间要长于机器人抓取钥匙扣至装配工作台的时间，会造成装配时间的进一步增加，因此为了缩短装配时间最终选择方案二作为机器人协作装配系统的装配方案，并根据装配方案二的整体流程来构建纪念币人机多工序装配系统工业场景，多工序装配二维场景布局如图 2-2 所示。

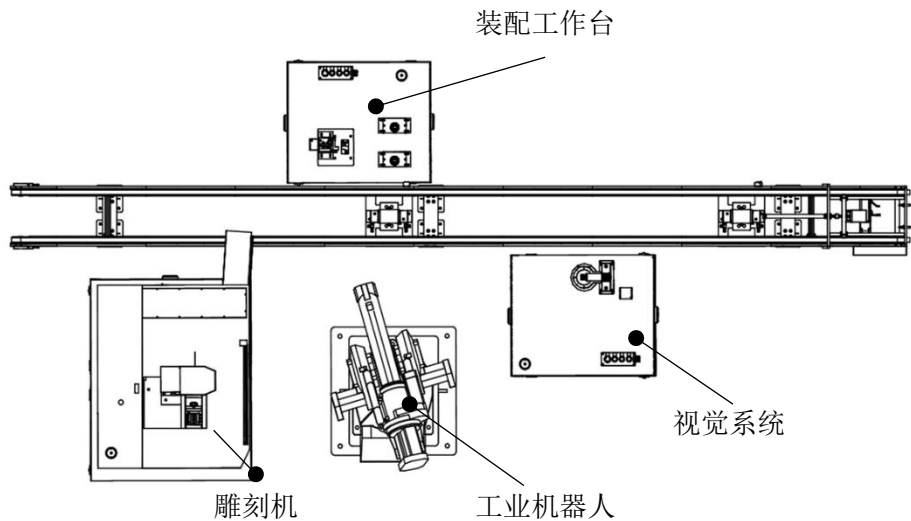


图 2-2 二维场景布局

在装配场景中机器人是整个系统的核心设备，因此以机器人的位置为基础，将雕刻机和视觉检测工作台分别放置于机器人的两边，将装配工作台布置在机器人正向位置，并将产品托盘传送带放置于机器人与装配工作台之间，使机器人和各个工位之间的距离保持相近，多工序装配流程见表 2-1。

表 2-1 多工序装配流程

编号	工序描述	使用设备/工具	条件
1	托盘到达工位，机器人开始工作	传送带、机器人	托盘传感器信号触发
2	工序 1	机器人、纪念币夹爪、雕刻机	纪念币位置稳定，雕刻机就绪
3	卡扣抓取并放置	机器人、卡扣夹爪、卡扣顶紧机构	卡扣位置稳定，辅助装置就绪
4	纪念币抓取	机器人、纪念币夹爪、雕刻机	加工完成，雕刻机床门开启信号
5	工序 2	机器人、纪念币夹爪、视觉检测	纪念币加工完成，视觉检测就绪
6	装配	机器人、纪念币夹爪、卡扣顶紧机构	纪念币已放置，辅助装置工作完成
7	成品放回托盘	机器人、卡扣夹爪、托盘	托盘空闲，产品完好

2.2 系统部件选型与结构设计

2.2.1 工业机器人选型

在纪念币机器人多工序装配系统的设计中，装配任务涉及零件的抓取、搬运、加工、检测和最终装配等多个复杂环节。系统设备包含雕刻机、视觉检测平台、装配工作台和产品托盘传送带等，每个工位均需要较大的安装空间，同时对机器人与各设备之间的操作距离和路径规划提出了严格要求。

多工序装配场景中的设备体积较大，各工位分布范围广，要求机器人具有足够的工作范围和运动灵活性。由于系统需要处理多种任务，包括高精度的零件定位、复杂的装配操作和设备间的协同作业，工业机器人必须具备高精度、高可靠性和高效性能，才能满足自动化装配任务的要求。

系统中纪念币产品包括纪念币和卡扣两个零件，装配过程中需要工业机器人多次切换工作对象，对夹爪的灵活性提出了较高要求；此外雕刻机的加工时间和纪念币图案的复杂性直接影响系统节拍，工业机器人需在等待时间内高效完成其他工序的操作，以缩短系统的整体装配周期；并且装配过程还涉及视觉检测和卡扣顶紧机构的使用，要求工业机器人能够与外部设备无缝集成，以实现多工序的稳定。

基于以上装配系统的特点和需求，选择合适的工业机器人是装配系统设计的关键。IRB 1410 工业机器人以其优秀的性能表现和可靠性，在装配系统中展现出

明显优势，成为最佳选型。为保障安全运行，IRB 1410 内置了故障检测和自动停机功能，并采用模块化设计，便于维护和更换零件，从而减少停机时间和维护成本，延长工业机器人的使用寿命^[35]，IRB 1410 机器人实物如图 2-3 所示。



图 2-3 IRB 1410 工业机器人

IRB 1410 是一款中型工业机器人，具有结构紧凑、性能稳定、操作灵活的特点。它的最大工作半径为 1440 mm，能够覆盖装配系统中所有关键工位的操作范围，无需额外调整设备布局，满足设备体积较大、工位分布广的系统需求。

IRB 1410 的有效负载为 5 Kg，足以轻松应对纪念币和卡扣等轻质零件的搬运和装配任务。装配系统中的末端执行器的安装，也不会对其负载能力造成显著影响。这款工业机器人还拥有 ± 0.05 mm 的重复定位精度，能够满足纪念币视觉检测和高精度装配的需求，特别是在多次抓取和搬运零件时，可以显著减少装配误差，保证了成品的质量稳定性。

2.2.2 末端执行器设计

在现有技术中，气动夹爪更换通常需要拆卸较为复杂的结构，导致更换过程繁琐且浪费时间，且气动夹爪适应性较差，无法应对形状差异较大的物品。在此背景下，设计了一种新型快换气动夹爪机构，专门针对机器人抓取形状各异物品进行优化。旨在实现气动夹爪快速更换，同时保证稳定性和抓取精度^[36]。

机器人末端执行器的设计需要保证抓取过程的稳定性以及准确的定位精度，针对纪念币和卡扣两个零部件，装配系统需要两个不同的气动夹爪工具，为了方便机器人自动更换工具，在机器人法兰安装统一规格的快换主端盘，用 2 个快换副端盘分别装上纪念币气动夹爪和卡扣气动夹爪，夹爪三维结构如图 2-4 所示。

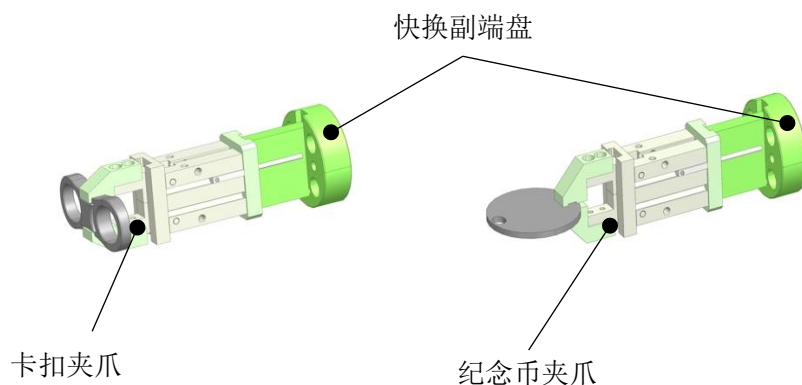


图 2-4 气动夹爪三维结构

如上图所示，气动夹爪采用模块化设计，气动夹爪可通过螺栓快速更换。对于不同尺寸的待抓取物体，可通过重新设计气动夹爪件，来实现机器人配套夹爪的快速构建，这一设计不仅提升了夹爪抓取的稳定性，同时缩短了气动夹爪开发的时间。快速更换气动夹爪件的设计大幅提升了设备的灵活性和装配系统的适应能力，减少了设备维护和更换夹具的时间，从而提升了装配效率，夹爪的夹持力计算如图 2-5 所示。

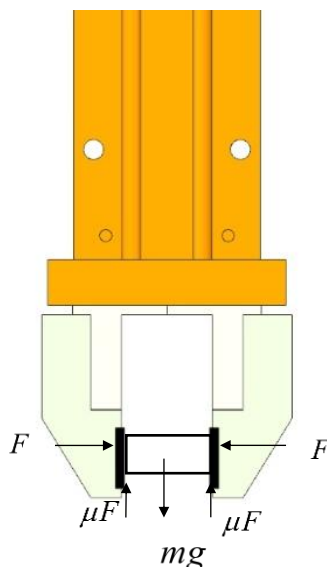


图 2-5 夹持力计算

为了确保末端执行器满足夹取的稳定性，夹取工件时不发生偏移或滑落，即夹爪与工件之间的摩擦力大于工件自身的重力。

$$2 \times \mu F > mg \quad (2-1)$$

$$F > \frac{mg}{2 \times \mu} \quad (2-2)$$

其中， F 为夹持力；

μ 为夹爪与工件之间的摩擦系数；

m 为工件的质量；

g 为重力加速度，取 $9.8m/s^2$ 。

同时为了提高夹爪的稳定性引入安全系数 a ，从而保证夹爪在夹取工件过程中的稳定性。

$$F = \frac{mg}{2 \times \mu} \times a \quad (2-3)$$

卡扣和纪念币的总质量约为 0.12 kg，摩擦系数 μ 的值在 [0.1, 0.5] 之间，安全系数 a 取 2；则可以求出夹持力的范围在 4.704~23.52 N 之间，约为工件自身重量的 2~10 倍。

夹爪工作过程中，如果夹爪与工件的接触面积较小时，即使夹持力是工件重量的 5~10 倍，工件仍然有可能掉落，因此，需要在夹爪的前端加入橡胶材料，来提高摩擦系数，同时也可以避免刚性夹爪在工作中对工件产生损伤。

2.2.3 末端执行器仿真

对夹爪前端进行有限元分析，将前端模型导入至 ANSYS 2021R1 软件，同时建立其有限元模型。除前端橡胶件外，其它构建材料均采用铝合金，网格单元最小尺寸设置为 1 mm，在夹爪固定端添加固定约束，再对夹爪前端橡胶件输入端面，分别施加方向水平、大小为 23.52 N 的力，得到模型的应力和总变形图，如图 2-6、2-7 所示。

B: 最大夹持力

图

类型: 等效 (Von-Mises) 应力

单位: MPa

时间: 1

2025/5/16 15:53

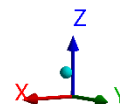
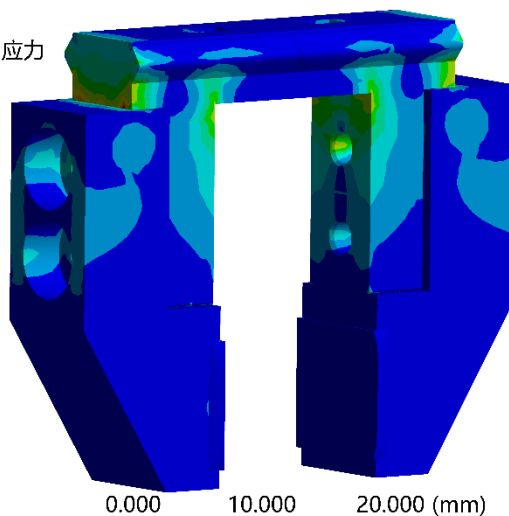
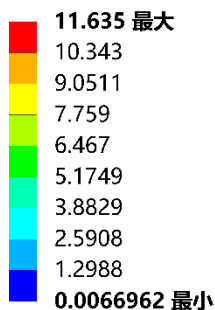


图 2-6 夹爪应力云图

B: 最大夹持力

图

类型: 总变形

单位: mm

时间: 1

2025/5/16 15:54

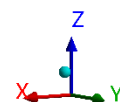
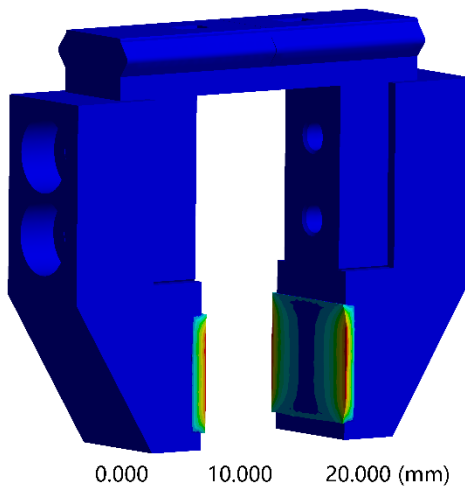
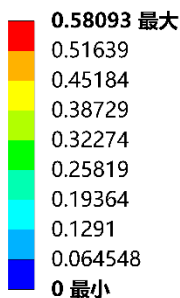


图 2-7 夹爪总变形

夹爪在受到夹持力的作用下最大应力为 11.635 MPa, 远远小于铝合金材料的许用应力 280 MPa; 最大变形位于橡胶件处为 0.58093 mm, 变形较小, 因此夹爪整体的工作运行可靠性很高。

2.2.4 卡扣顶紧机构

在机器人多工序装配系统中, 完成了机器人和夹爪的选型和设计之后, 为了实现产品的装配, 还需要根据装配需求设计卡扣顶紧机构, 来辅助机器人完成产品的装配^[37-39]。以纪念币装配为例, 在装配过程中, 不仅要固定卡扣, 同时需要

保证卡扣一直属于打开状态，为此纪念币卡扣顶紧机构必须满足这 2 点要求。卡扣顶紧机构三维结构如图 2-8 所示。

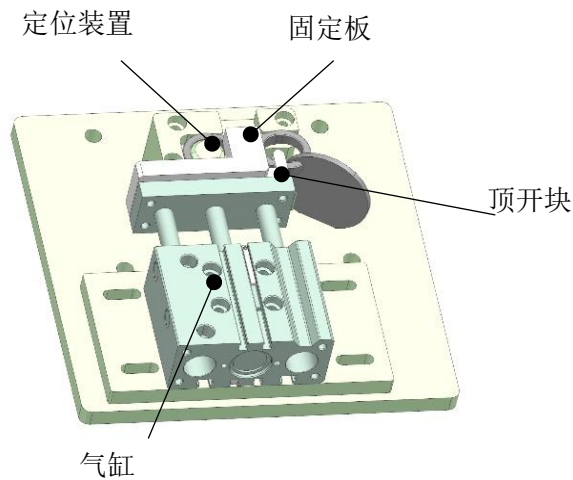


图 2-8 卡扣顶紧机构

纪念币卡扣顶紧机构只要包括定位装置、固定板、顶开块和气缸，其中定位装置可以保持机器人抓取至装配工作台的卡扣状态，固定板和顶开块通过螺栓固定在气缸导杆上，顶紧机构气缸主要参数见表 2-2。

表 2-2 顶紧机构气缸主要参数

参数名称	规格
使用压力范围	0.2~0.7 MPa
缸径	20 mm
行程	20 mm
最小理论输出力	90 N

由于卡扣的体积小，因此顶紧机构气缸在工作过程中的最小理论输出力的值和最小实际输出力的值之间的误差可以忽略不计，气缸工作时卡扣的反弹力主要由卡扣的弹簧产生，约为 40 N，小于气缸的最小理论输出力，因此在装配过程中，能够保证卡扣的稳定打开状态。

当机器人将卡扣抓取放置于定位装置上，气缸工作伸出导杆，将固定块和顶开块推出，固定块可以盖住卡扣放置发生位置变化，同时顶开块打开卡扣，直到机器人完成装配，气缸复位使卡扣恢复原状。

2.3 本章小结

（1）通过优化多工序装配工艺流程，减少了机器人在换夹爪、取放零件等环节的等待时间，提升整体装配效率，并为后续的数字孪生建模提供了标准化流程依据。

（2）完成了关键部件的设计与选型，基于有限元分析软件以最大夹持力校核气动夹爪，得到最大应力 11.635 MPa，最大形变 0.58093 mm，均满足可靠性要求；分析卡扣顶紧机构气缸最小理论输出力 90 N，满足辅助装配正常工作要求。

第3章 机器人多工序装配数字孪生系统构建

提出了机器人多工序装配数字孪生框架，基于 MDH 参数法，完成机器人正逆运动学模型构建，为数字孪生体构建以及轨迹规划提供理论基础，使用 Python 脚本搭建法，构建高精度的数字孪生模型，实现对物理系统的真实映射。

3.1 机器人多工序装配数字孪生系统框架

数字孪生体的构建是实现物理系统与虚拟系统实时交互的基础，在机器人多工序装配数字孪生系统中，孪生模型的构建不仅仅是对物理装配系统的简单复刻，而是一个涉及多层次、多维度的信息融合和动态映射过程。基于数字孪生五维模型框架，该系统的构建涵盖物理层、虚拟层、数据交互层、数据存储层和应用层五个核心部分，以确保数字孪生系统能够精准反映物理装配环境，并实现高效的数据传输、存储、分析与控制优化^[40-43]。系统架构如图 3-1 所示。

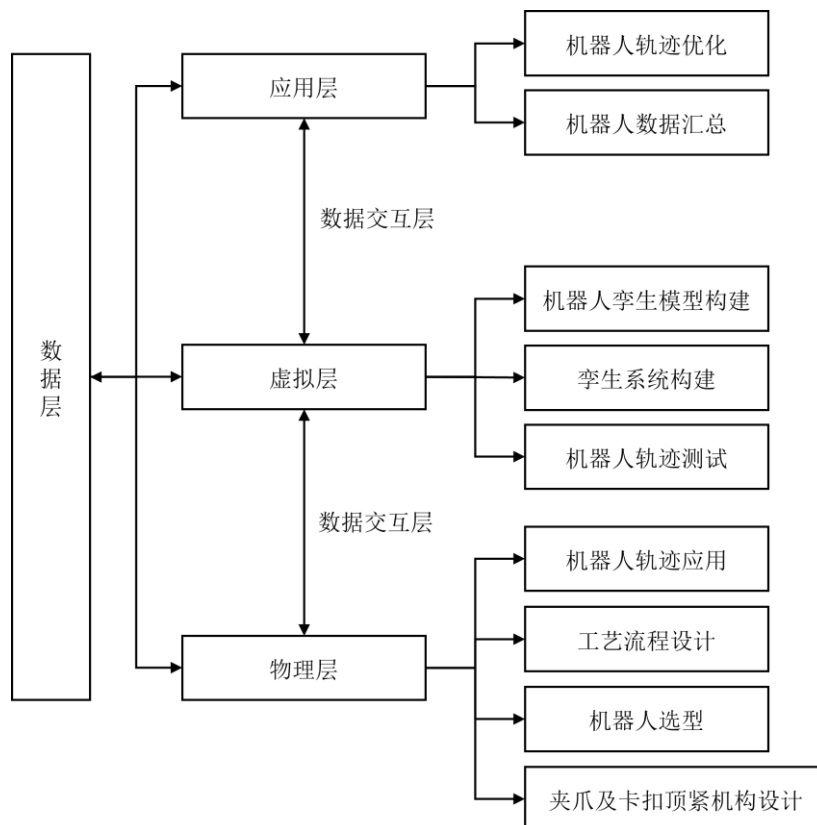


图 3-1 机器人多工序装配数字孪生系统架构

物理层主要包括机器人、夹爪、装配工作台、传感器及雕刻机等实体设备，负责执行装配任务并提供实时数据支持。利用 RFID、光电传感器和工业摄像头

等设备，采集机器人运动状态、装配精度、工序运行时间等信息，并将数据标准化处理后传输至上层系统。

虚拟层构建数字孪生模型，对物理装配系统进行几何建模、运动学建模和行为建模，实现机器人装配任务的可视化和仿真分析。基于 VC 软件，搭建与物理系统一致的虚拟环境，并通过 MDH 参数定义机器人运动模型，使其具备模拟、预测和优化能力。

数据交互层负责物理层与虚拟层之间的数据同步与指令传输。通过 Siemens S7 通信协议，将物理设备采集的实时数据传输至虚拟层，并基于优化算法调整装配策略，使虚拟模型与实际运行保持一致。该层确保了虚拟装配过程的实时性，为系统优化提供数据支撑。

数据层用于记录和管理装配过程中的历史数据，包括机器人运行状态、工序时间、装配精度等关键信息。利用统计方法对数据进行分析，提取影响装配效率的关键因素，为装配策略优化提供依据。

应用层基于数据存储层的分析结果，采用优化算法对装配流程进行调整。结合智能优化算法，对机器人路径、装配顺序等进行调整，以提高生产效率并降低能耗。该层确保了系统具备自适应调整能力，使装配任务更加智能化和高效。

机器人多工序装配数字孪生系统的构建，实现物理装配系统的高精度映射和智能优化。物理层提供数据采集和实时监测，虚拟层完成仿真建模与装配流程优化，数据交互层实现实时数据传输和运行调整，数据存储层负责数据管理与分析，应用层实现优化计算与智能决策，使机器人多工序装配过程具备更高的智能化水平和自适应能力。

3.2 基于数字孪生的虚拟系统构建方法

VC (Visual Components) 是一款智能制造数字化仿真软件，适用于各种制造系统和设备的设计、模拟和优化，用户可以在场景中引入不同的物体、零件和设备来建立完整的数字化模型，同时能够为设备添加自定义应用程序逻辑，以便在不同条件下对其进行操作，可以帮助用户快速设计并构建任意复杂的制造系统，VC 支持可定制的实时 3D 视图，支持用户越过虚拟示图，更直观的了解设备和流程运行表现。

VC 配备大量预定义的组件库，组件涵盖了来自不同厂商包括数控机床、机器人、AGV 自动导引小车、传送带、仓库等众多设备类型。

工业机器人数字孪生系统孪生体开发中最重要的一步就是对工业机器人的开发，在 VC 中需要根据工业机器人轴运动之间的关系，定义各个轴之间的运动关系，同时还需要使用 Python 脚本定义装配工作台，以及及机器人抓手等移动部位的运动以及与机器人的连接，最后实现工业机器人装配数字孪生系统的搭建。

3.2.1 组件接口搭建法

VC 自带的 ecat 组件库（网络组件库）中，有包括机器人、传送带、CNC 加工机床、龙门架和人机协作元素等超过 2000 多种自动化生产元素的成熟组件，且大部分组件都是参数化的组件，可根据布局的不同，通过参数设置可调整组件的尺寸或其他特性，对组件进行轻量化处理，开发示例如图 3-2 所示。

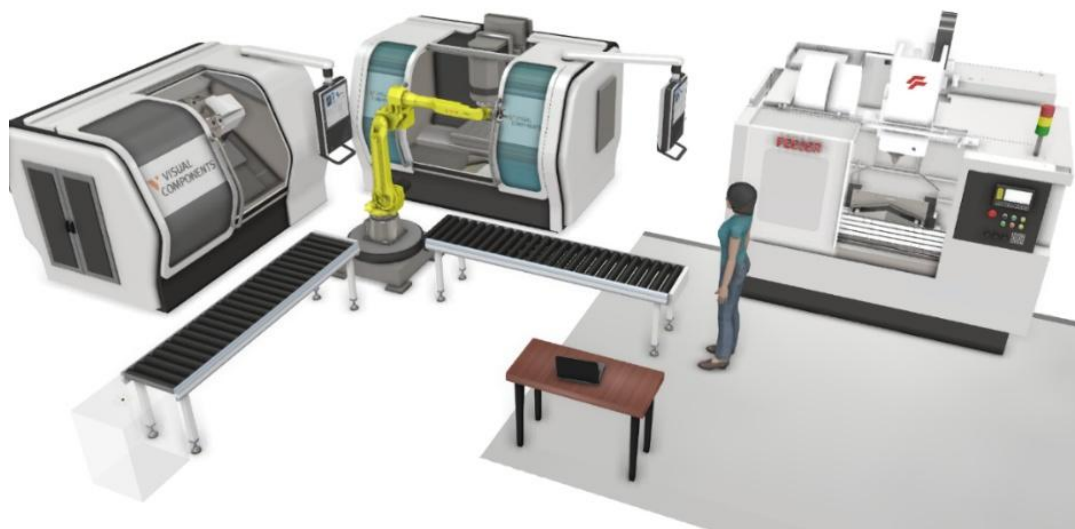


图 3-2 人机协同生产场景

人机协同制造场景，包括传送带、机床和机器人等模块。机器人通过机器人底座进行控制，各个加工组件之间通过接口进行连接，实现各个加工单元的接驳，从而在各个生产单元之间的加工、流转。

3.2.2 工艺流程搭建法

VC 的工艺模块通过“可视化建模”，使用户能够轻松定义和设计复杂的生产工艺流程，支持将实际工厂的布局、设备和物料流动路径数字化模拟，快速搭建精准的数字化生产场景。用户无需编程技能，即可拖放组件，构建完整的工艺模型。

“Process Modelling”是 VC 中一系列适配工艺流程建模的模型，可以直接从组件库中拖拽使用。PM 组件库具有一百多种组件，同时支持与现有组件库中模型连接使用，通过流程管理器可以添加 40 多种命令语句，具有低代码，高适应性的特点，生产场景示例见图 3-3。

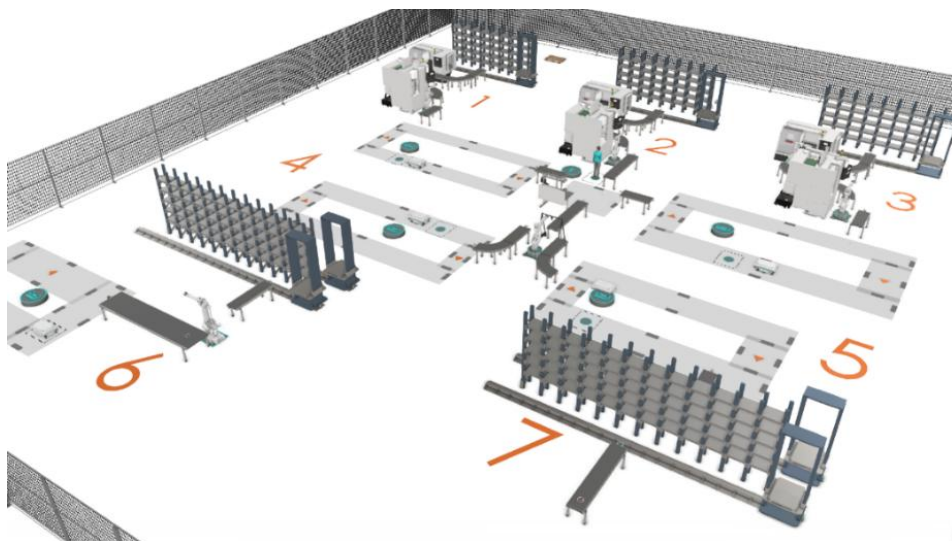


图 3-3 车间生产孪生场景

生产场景中包括了立体仓库、数控机床、机器人和 AGV 等模块。通过 PM 组件来实现对各个生产单元的控制，来实现产品从加工、装配到存储的一系列流程。

工艺模块具有离散事件仿真（DES）功能，可以模拟和跟踪生产线中每个步骤的执行过程、设备的工作状态和资源利用率，帮助用户识别瓶颈和优化任务调度。实时数据分析让用户在虚拟环境中精确评估生产效率和性能表现。

3.2.3 Python 脚本搭建法

VC 的组件库中所有模型理论上都是通过 Python 脚本搭建法完成的，通过模型处理和 Python 脚本控制的方式可以完成几乎所有工业场景的数字孪生体设计，

可以根据物理系统进行高度拟合的数字孪生体构建，但是难度较大，相对于工艺流程搭建法所需步骤也更加繁琐。

脚本搭建法主要有以下几个步骤：

（1）几何建模：几何建模是数字孪生系统构建的基础，主要用于建立虚拟环境中的设备模型，使其能够准确反映物理系统的结构和尺寸。可以使用三维建模软件建立关键部件的 1:1 模型，以确保虚拟模型在几何精度、装配关系及结构约束上与真实系统保持一致。此外，数字孪生平台也提供了内置建模工具，能够直接绘制基本几何特征，并对导入的外部模型进行优化调整，使得模型能够根据需求进行灵活修改和扩展。

（2）模型处理：将三维模型导入后，需要依据物理系统的工作方式对其进行拆分和优化，以适应仿真需求。首先，需要将具有独立运动功能的部件进行分离，使其能够在仿真环境中独立运行。对于不需要运动的部件，应当进行合并处理，以减少计算量，提高仿真效率。在模型处理过程中，还需去除冗余细节，以降低计算复杂度，提高仿真运行的流畅性。此外，为了保证后续物理属性的添加，运动部件应当按照实际工艺需求划分成合理的子组件，使其能够准确模拟现实中的装配过程。

（3）属性添加：为运动部件添加物理属性，以使其具备真实的运动和交互能力。数字孪生平台提供了多种属性定义方式，包括链接属性、物理属性和信号属性。链接属性用于定义部件的运动方式，并通过设定运动轴、旋转中心和位移范围，使虚拟模型的运动方式与实际系统匹配。物理属性用于赋予部件质量、摩擦力、重力等参数，以增强仿真系统的真实感。信号属性用于实现设备之间的联动控制，使得机器人和装配设备能够按照预定的工作逻辑协同作业。通过信号交互，能够构建完整的自动化装配逻辑，实现设备之间的协同工作。

（4）脚本开发：利用数字孪生平台内置的脚本功能进行二次开发，以实现复杂的运动控制和逻辑判断。在脚本开发过程中，首先需要初始化模型变量，定义各部件的名称、运动模式和初始状态，以确保仿真启动时的状态正确。然后，根据装配工艺需求，编写运动控制逻辑，使机器人能够按照设定的流程执行抓取、装配、检测等操作。通过脚本开发，能够大幅提升数字孪生系统的灵活性和智能化水平。

3.3 数字孪生体开发与运动学建模

3.3.1 机器人数字孪生体开发

IRB 1410 工业机器人由连杆和 6 个转动关节串联而成,通过 MDH 法在各连杆近端建立关节坐标系,并采用连杆长度 a 、连杆转角 α 、连杆偏距 d 和关节转角 θ 这 4 个参数构建各连杆间的位姿方程。MDH 参数法建立关节坐标系如图 3-4 所示。

MDH 参数及其含义如下:

- (1) a_{i-1} 为连杆长度,表示关节轴 Axis $i-1$ 和关节轴 Axis i 之间的公垂线长度;
- (2) α_{i-1} 为连杆扭角,表示关节轴 Axis $i-1$ 和关节轴 Axis i 之间的夹角;
- (3) d_i 为连杆偏距,表示沿两个相邻连杆公轴线方向的距离;
- (4) θ_i 为关节角,表示两个相邻连杆绕公共轴线旋转的夹角。

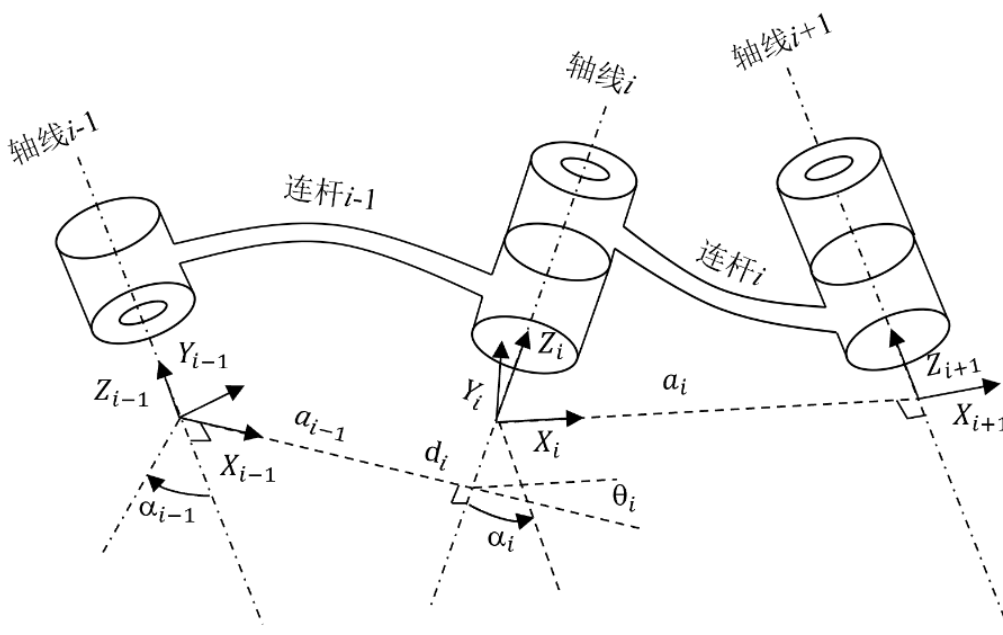


图 3-4 MDH 法关节坐标系

将坐标系 $\{i-1\}$ 绕 X_{i-1} 旋转 α_{i-1} 并沿 X_{i-1} 平移 a_{i-1} , 再绕 Z_i 旋转 θ_i 并沿着 Z_i 平移 d_i 后得到坐标系 $\{i\}$ 相对于坐标系 $\{i-1\}$ 的齐次变换矩阵 ${}^{i-1}_iT$ 。

$$\begin{aligned}
 T_i^{i-1} &= R_{X_{i-1}}(\alpha_{i-1}) D_{X_{i-1}}(a_{i-1}) R_{Z_i}(\theta_i) D_{Z_i}(d_i) \\
 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & a_{i-1} \\ \sin \theta_i \cos \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & -d_i \sin \alpha_{i-1} \\ \sin \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \theta_i \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & d_i \cos \alpha_{i-1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-1)
 \end{aligned}$$

式中， $R_{X_{i-1}}(\alpha_{i-1})$ 、 $D_{X_{i-1}}(a_{i-1})$ 均为旋转变换矩阵， $R_{Z_i}(\theta_i)$ 、 $D_{Z_i}(d_i)$ 均为平移变换矩阵，矩阵表达式为。

$$R_{X_{i-1}}(\alpha_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_{i-1} & -\sin \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & \sin \alpha_{i-1} & \cos \alpha_{i-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-2)$$

$$R_{Z_i}(\theta_i) = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i & 0 & 0 \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-3)$$

$$D_{X_{i-1}}(a_{i-1}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_{i-1} \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-4)$$

$$D_{Z_i}(d_i) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-5)$$

IRB 1410 采用六自由度的关节结构，包含底座旋转、肩关节、肘关节和手腕三个关节轴。底座旋转关节允许机器人在基座上旋转，为整体运动提供基本方向；肩关节和肘关节分别赋予机器人上下和前后摆动的能力，增强了运动的灵活性，使其能够到达不同高度和深度的工作区域。手腕部分由三个关节组成，包括手腕旋转、手腕摆动和手腕扭转，这些关节使机器人能够实现末端工具的灵活调整，确保末端执行器在空间中精确定位和方向控制，IRB 1410 机器人的 6 个关节均为旋转副，采用 MDH 法并根据机器人结构尺寸建立连杆坐标系^[44-48]。机器人尺寸及连杆坐标系如图 3-5、3-6 所示，IRB 1410 机器人 MDH 参数见表 3-1。

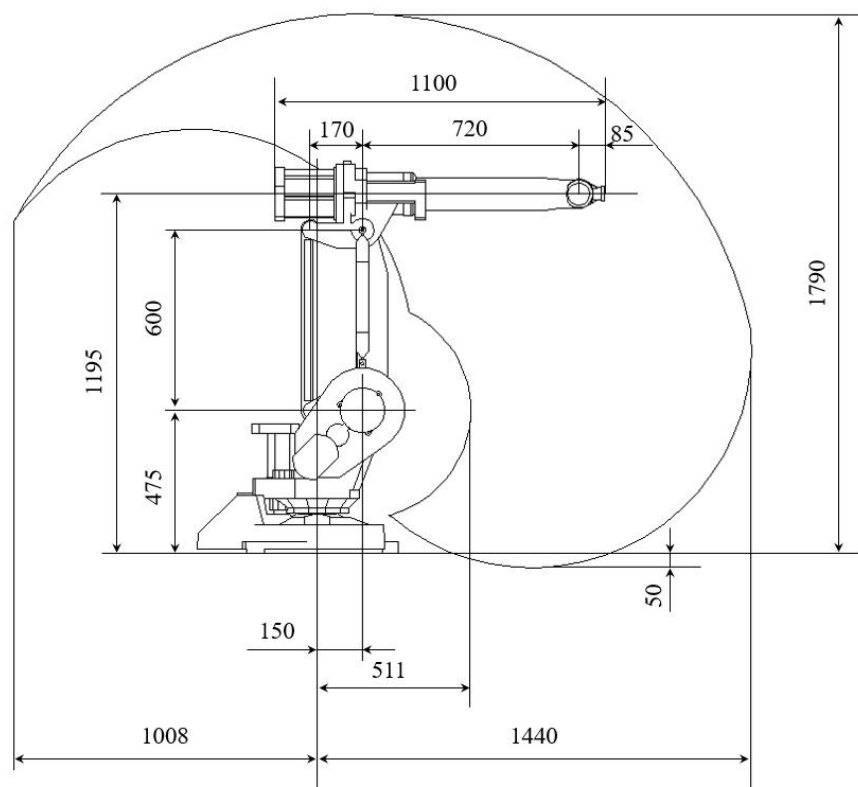


图 3-5 IRB 1410 机器人尺寸(单位: mm)

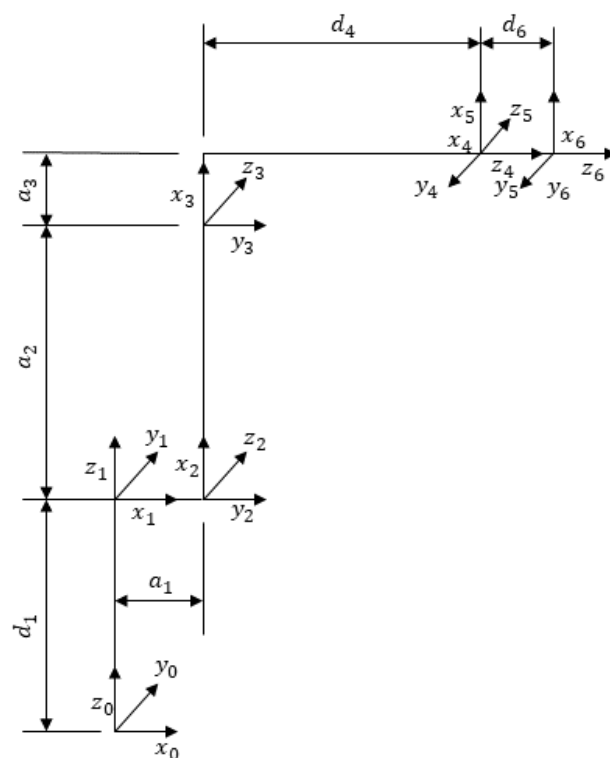


图 3-6 IRB 1410 机器人连杆坐标系

表 3-1 IRB1410 机器人 MDH 参数

关节 i	$\theta_i /(^{\circ})$	$d_i /(\text{mm})$	$a_{i-1} /(\text{mm})$	$\alpha_{i-1} /(^{\circ})$	活动范围/ $(^{\circ})$
1	θ_1	475	0	0	$\pm 170^{\circ}$
2	θ_2	0	170	-90	$\pm 70^{\circ}$
3	θ_3	0	600	0	-65° 至 70°
4	θ_4	890	120	-90	$\pm 150^{\circ}$
5	θ_5	0	0	90	$\pm 115^{\circ}$
6	θ_6	85	0	-90	$\pm 300^{\circ}$

通过对机器人 MDH 计算来确定机器人关节运动学参数,建立机器人的数字孪生体模型,运用机器人的运动学进行位姿分析,并添加机器人控制器可通过虚拟空间对机器人的运动进行虚拟编程以及信号控制,验证机器人数字孪生体构建的精准性,对末端执行器进行行为属性设置,基于脚本编译完成机器人数字孪生体精准建模。具体实施流程如下:

首先,通过机器人的基本结构、尺寸、运动学和外观信息,构建 IRB 1410 机器人的三维模型。运用 UG NX 12 构建机器人的 URDF(unified robot description format)模型文件^[49-52]。虚拟机器人采用 URDF 模型来描述机器人基台、连杆、关节、末端执行器之间的相对位置。

最后,通过将机器人三维模型导入 VC 中,使用过滤器将细小孔洞过滤,减少 VC 运行负载。对导入的几何元进行属性设置,保存完整的特征树,为下一步的拆分处理做准备,VC 将机器人形状、材质、纹理等添加到机器人的 URDF 模型文件中进行显示应用,机器人三维模型和导入几何元结构如图 3-7、3-8 所示。



图 3-7 机器人三维模型



图 3-8 VC 机器人几何元导入

对于导入后的 URDF 模型，通常是一个整体几何元，虽然拥有完整的特征树，但是各个运动部件不能实现与物理系统相同的运动，需要使用建模模块的对模型及逆行处理，将机器人的各轴分开，并重新绑定各个轴基坐标。此处设置的运动轴和坐标系作为机器人各个轴 Joint Type、Axis 和 Off Set 等属性的重要参考。对于分开的轴使用提取链接的方法使其具备运动能力，通过链接的父子级关系来确定机器人 1-6 轴以及从动件之间的运动关系，如图 3-9 所示。

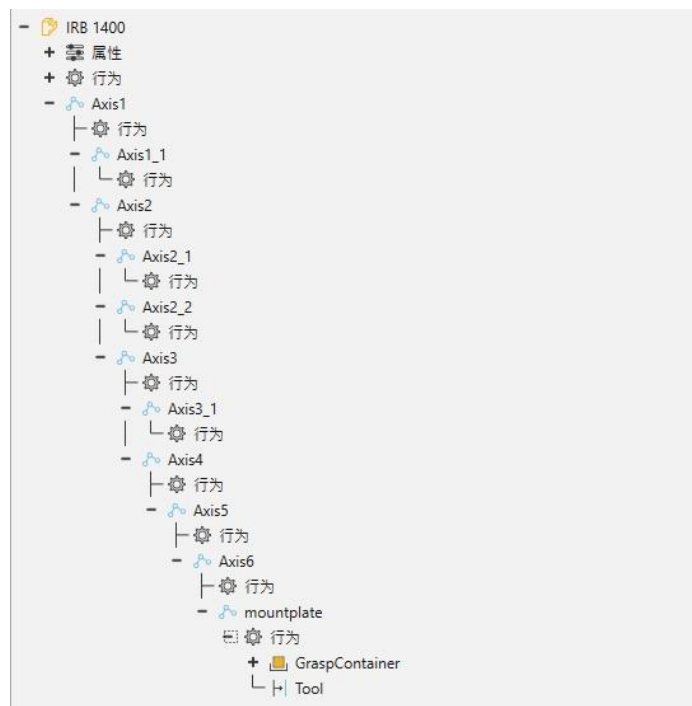


图 3-9 机器人链接提取及父子级关系嵌套

完成链接的提取以及父子级关系的定义后，机器人各轴之间拥有了单独的活方式，但是机器人整体还无法实现联动，需要结合 MDH 参数表为机器人添加控制器和关节运动学，关节运动学参数表见表 3-2。

表 3-2 关节运动学参数

参数名称	功能
L01X/Y/Z~L56X/Y/Z	定义相邻轴之间的原点距离
A45	定义第四轴与第五轴之间角度
关节零偏移 1~6	定义各轴与原点坐标系的角度
关节手势 1~6	定义各轴的转动正方形
联轴器 2-3	定义第二轴和第三轴是否耦合
配置名称 1~N	定义机器人各轴的配置名称

完成了运动学和机器人控制器的添加，为了实现虚拟机器人与实际机器人外观与运动状态的一致，还需要通过工具指定机器人的物理材料，并基于 VC 的关节链接定义从动连杆的关节属性，关节属性参数如表 3-3 所示。

表 3-3 关节属性参数

关节属性名称	功能
驱动器	从动轴角度值基准轴
值表达式	从动轴角度值

完成机器人定义后,可在 VC 机器人程序中,通过点动观察机器人末端中心点变化来进行机器人末端位姿对比,机器人末端点动中心点在位姿变化过程中随着机器人位姿变换而变换,并始终保持在第六轴法兰中心位置,如图 3-10 所示。

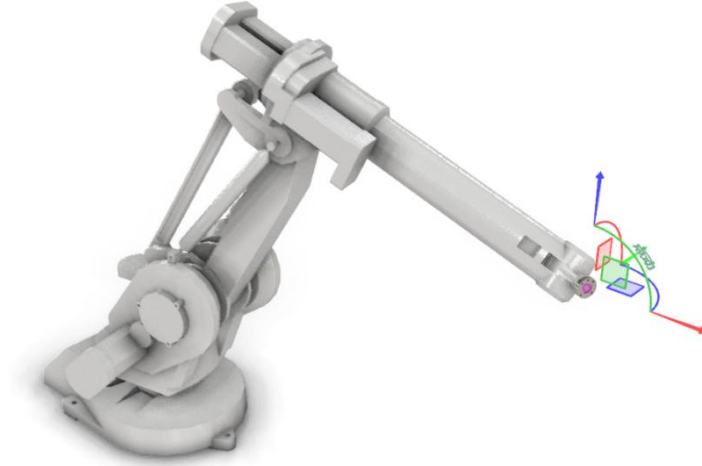


图 3-10 机器人位姿变换

由位姿变换可知,机器人各个关节运动学参数正确,从动轴关节属性定义正确,将各关节与机器人控制器进行绑定即完成机器人本体的模型处理。

3.3.2 机器人正逆运动学求解

工业机器人数字孪生体的构建完成之后,为了在机器人多工序装配系统中准确地描述并控制机器人末端的空间位置、姿态以及运动轨迹,并进一步通过理论验证机器人孪生构建的合理性,进行 IRB 1410 工业机器人的正逆运动学求解。

在运动学计算中,IRB 1410 的关节参数遵循 MDH 参数法,使得其正逆运动学得以简化。工业机器人正运动学分析目的是通过关节转角或关节移动参数来求解机器人的末端位姿。将 IRB 1410 机器人的 MDH 参数代入式(3-1),求得相邻两杆坐标系之间的变换矩阵。

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & -\sin \theta_1 & 0 & 0 \\ \sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & -\sin \theta_2 & 0 & a_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_2 & -\cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
 T_3^2 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_3 & -\sin \theta_3 & 0 & a_2 \\ \sin \theta_3 & \cos \theta_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_4^3 = \begin{bmatrix} \cos \theta_4 & -\sin \theta_4 & 0 & a_3 \\ 0 & 0 & 1 & d_4 \\ -\sin \theta_4 & -\cos \theta_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 T_5^4 &= \begin{bmatrix} \cos \theta_5 & -\sin \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ \sin \theta_5 & \cos \theta_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad T_6^5 = \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & -\sin \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ -\sin \theta_6 & -\cos \theta_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (3-6)$$

从而得到机器人末端坐标系对于基坐标系的变换矩阵。

$$T_6^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 T_6^5 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-7)$$

为了简便计算取 s_i 为 $\sin \theta_i$ ， c_i 为 $\cos \theta_i$ ； $s_{i,i+1}$ 为 $\sin(\theta_i + \theta_{i+1})$ ； $c_{i,i+1}$ 为 $\cos(\theta_i + \theta_{i+1})$ 得，

$$\begin{aligned}
 n_x &= s_6 (c_4 s_1 + s_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)) + c_6 (c_5 (s_1 s_4 - c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)) - s_5 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2)) \\
 n_y &= -s_6 (c_1 c_4 - s_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)) - c_6 (c_5 (c_1 s_4 + c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)) + s_5 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2)) \\
 n_z &= s_{23} s_4 s_6 - c_6 (c_{23} c_4 c_4) \\
 o_x &= c_6 (c_4 s_1 + s_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)) - s_6 (c_5 (s_1 s_4 - c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)) - s_5 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2)) \\
 o_y &= s_6 (c_5 (c_1 s_4 + c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)) + s_5 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2)) - c_6 (c_1 c_4 - s_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)) \\
 o_z &= s_6 (c_{23} s_5 + s_{23} c_4 c_5) + s_{23} c_6 s_4 \\
 a_x &= -s_5 (s_1 s_4 - c_4 (c_1 s_2 s_3 - c_1 c_2 c_3)) - c_5 (c_1 c_2 s_3 + c_1 c_3 s_2) \\
 a_y &= s_5 (c_1 s_4 + c_4 (s_1 s_2 s_3 - c_2 c_3 s_1)) - c_5 (c_2 s_1 s_3 + c_3 s_1 s_2) \\
 a_z &= s_{23} c_4 s_5 - c_{23} c_5 \\
 p_x &= a_1 c_1 + a_3 c_{23} c_1 - d_4 s_{23} c_1 + a_2 c_1 c_2 - d_6 s_{23} c_1 c_5 - d_6 s_1 s_4 s_5 - d_6 c_1 c_2 c_3 c_4 s_5 + d_6 c_1 c_4 s_2 s_3 s_5 \\
 p_y &= a_1 s_1 + a_3 c_{23} s_1 - d_4 s_{23} s_1 + a_2 c_2 s_1 - d_6 s_{23} c_5 s_1 + d_6 c_1 s_4 s_5 - d_6 c_2 c_3 c_4 s_1 s_5 + d_6 c_4 s_1 s_2 s_3 s_5 \\
 p_z &= d_1 - a_3 (c_2 s_3 + c_3 s_2) - d_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3) - a_2 s_2 - d_6 (c_5 (c_2 c_3 - s_2 s_3) - c_4 s_5 (c_4 s_5 + c_3 s_2))
 \end{aligned}$$

至此完成 IRB 1410 工业机器人的正运动学的求解，在已知 MDH 参数的前提下，可以通过机器人各关节的旋转角度，计算出机器人末端位置。

逆向运动学是实现机器人精确位置控制、路径规划与作业任务的关键技术。IRB 1410 机器人作为典型的六轴工业机器人，其前三关节多用于末端执行器的空间定位，后三关节则主要负责姿态调节。常用的求解方法为数值法和解析法。

数值法：通过定义一个目标函数，使末端姿态和位置与期望值之差最小，然后通过迭代来寻找相应关节角。数值法的收敛速度与最终求解的精度受初值以及机器人本身的奇异性影响较大。

解析法：利用机器人几何特性直接推导出闭形式解，为实时控制和离线编程提供了高效且可解释的算法支撑，下面是解析法详细求解过程。

首先对式 (3-7) 作如下变换，

$$T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [T_6^5]^{-1} \quad (3-8)$$

$$T_5^0 = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta_6 & 0 & -\sin \theta_6 & 0 \\ -\sin \theta_6 & 0 & -\cos \theta_6 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-9)$$

由式 (3-9) 可得，

$$p_x - a_x d_6 = c_1 (a_1 + a_3 c_{23} - d_4 c_{23} + a_2 c_2) \quad (3-10)$$

$$p_y - a_y d_6 = s_1 (a_1 + a_3 c_{23} - d_4 c_{23} + a_2 c_2) \quad (3-11)$$

进而求得，

$$\frac{p_y - a_y d_6}{p_x - a_x d_6} = \frac{s_1}{c_1} = \tan \theta_1 \quad (3-12)$$

$$\theta_1 = \arctan \frac{p_y - a_y d_6}{p_x - a_x d_6} \quad (3-13)$$

再次对式 (3-7) 进行变换得到，

$$T_2^1 T_3^2 T_4^3 T_5^4 = [T_1^0]^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} [T_6^5]^{-1} \quad (3-14)$$

令矩阵元素一行四列及三行四列分别对应相等可得，

$$a_3 c_{23} - d_4 c_{23} + a_2 c_2 = -(c_1 a_x + s_1 a_y) d_6 + c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 \quad (3-15)$$

$$-a_3 c_{23} - d_4 c_{23} - a_2 c_2 = -d_6 a_z + p_z - d_1 \quad (3-16)$$

取 $H = -(c_1 a_x + s_1 a_y) d_6 + c_1 p_x + s_1 p_y - a_1$ ， $F = -d_6 a_z + p_z - d_1$ ，前面已经求得关

机角 θ_1 ，因此 H 、 F 均为已知量，将式 3-15、3-16 平方和相加可得，

$$a_3 c_{23} - d_4 c_{23} = \frac{H^2 + F^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a} \quad (3-17)$$

这里取，

$$G = a_3 c_{23} - d_4 c_{23} = \frac{H^2 + F^2 - a_2^2 - a_3^2 - d_4^2}{2a} \quad (3-18)$$

由三角函数可得，

$$\theta_3 = \arctan \frac{d_4}{a_3} - \arctan \left(\sqrt{(a_3)^2 - (d_4)^2 - G^2} \right) \quad (3-19)$$

观察式(3-15)和(3-16)可知，关节角 θ_1 和关节角 θ_3 均已求出，可以联立求关节角

θ_2 ，对其化简后可得，

$$\begin{cases} a_3 c_{23} - d_4 c_{23} + a_2 c_2 = -(c_1 a_x + s_1 a_y) d_6 + c_1 p_x + s_1 p_y - a_1 = H \\ -a_3 c_{23} - d_4 c_{23} - a_2 c_2 = -d_6 a_z + p_z - d_1 = F \end{cases} \quad (3-20)$$

展开式 (3-20) 可得，

$$\begin{cases} a_3 (c_2 c_3 - s_2 s_3) - d_4 (c_2 s_3 + c_3 s_2) + a_2 c_2 = H \\ a_3 (c_2 s_3 + c_3 s_2) + d_4 (c_2 c_3 - s_2 s_3) + a_2 c_2 = -F \end{cases} \quad (3-21)$$

进一步得到，

$$\begin{cases} (a_3 c_3 - d_4 s_3 + a_2) c_2 - (a_3 s_3 - d_4 c_3) s_2 = H \\ (a_3 c_3 - d_4 s_3 + a_2) s_2 + (a_3 s_3 - d_4 c_3) c_2 = -F \end{cases} \quad (3-22)$$

取 $D = (a_3 c_3 - d_4 s_3 + a_2)$ 、 $E = (a_3 s_3 - d_4 c_3)$ 可得，

$$\theta_2 = \arctan \frac{-FE + HD}{-FD - HE} \quad (3-23)$$

再由式 (3-7) 可得,

$$T_4^3 T_5^4 T_6^5 = [T_3^2]^{-1} [T_2^1]^{-1} [T_1^0]^{-1} \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-24)$$

前面已经求得了关节角 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 , 因此等式(3-24)的右边为已知量, 对其化简可得

$$\begin{bmatrix} c_4 c_5 c_6 - s_4 s_6 & -c_4 c_5 s_6 - s_4 c_6 & -c_4 s_5 & -c_4 s_5 d_6 + a_3 \\ s_5 c_6 & -s_5 s_6 & c_5 & c_5 d_6 + d_4 \\ -s_4 c_5 c_6 - c_4 s_6 & s_4 c_5 s_6 - c_4 c_6 & s_4 s_5 & s_4 s_5 d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} n_{x1} & o_{x1} & a_{x1} & p_{x1} \\ n_{y1} & o_{y1} & a_{y1} & p_{y1} \\ n_{z1} & o_{z1} & a_{z1} & p_{z1} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-25)$$

通过式 (3-25) 可得,

$$c_5 = a_{y1} \quad (3-26)$$

根据三角函数可得,

$$s_5 = \sqrt{1 - (a_{y1})^2} \quad (3-27)$$

$$\theta_5 = \arctan \frac{\sqrt{1 - (a_{y1})^2}}{a_{y1}} \quad (3-28)$$

再由式 (3-25) 可得,

$$\begin{cases} -c_4 s_5 = a_{x1} \\ s_4 s_5 = a_{z1} \end{cases} \quad (3-29)$$

进一步可得,

$$\theta_4 = -\arctan \frac{a_{z1}}{a_{x1}} \quad (3-30)$$

再由式 (3-25) 可得,

$$\begin{cases} s_5 c_6 = n_{y1} \\ -s_5 s_6 = o_{y1} \end{cases} \quad (3-31)$$

进一步可得,

$$\theta_6 = -\arctan \frac{n_{y1}}{o_{y1}} \quad (3-32)$$

至此完成了 IRB 1410 机器人的逆运动学求解。在已知 MDH 参数的前提下，可以通过机器人末端的位姿，计算出机器人各关节的旋转角度。机器人的关节角在相应的极限运动范围，因此运动学逆解出的若干组关节角中有些组不满足条件，需要对得到的每组关节角进行筛选，保留满足机器人各关节角极限运动范围限制的可行组关节角。

针对 IRB 1410 机器人的正逆运动学计算，验证两者结果的一致性，以确保运动学建模的正确性，在已知机器人的 MDH 参数的条件下，设定一组关节角度。

$$\theta_{1-6} = [18.13; 22.18; 39.75; 0.00; 50.25; 15.11] \quad (3-33)$$

代入正运动学模型，计算得到末端执行器的位姿变化矩阵。

$$T_6^0 = \begin{bmatrix} -0.26526 & 0.39394 & 0.88003 & 1132.6 \\ -0.36114 & -0.88687 & 0.28815 & 370.83 \\ 0.89399 & -0.24138 & 0.37752 & 860.23 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3-34)$$

得到机器人末端的位置坐标 (1132.6, 370.83, 860.23) 和旋转矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} -0.26526 & 0.39394 & 0.88003 \\ -0.36114 & -0.88687 & 0.28815 \\ 0.89399 & -0.24138 & 0.37752 \end{bmatrix} \quad (3-35)$$

在逆运动学求解过程中，已知末端执行器的位姿矩阵 (3-34)，通过运动学反解求得各个关节角度。

$$\dot{\theta}_{1-6} = [18.11; 22.21; 39.73; 0.00; 50.22; 15.07] \quad (3-36)$$

该结果与正运动学计算时的输入角度基本一致，但由于逆运动学求解过程中涉及三角函数、反正切、反余弦等运算，数值误差通常在 $\pm 0.1^\circ$ 以内。证明在已知末端执行器的位姿情况下，能够准确地反求出关节角度，使机器人恢复到原始的运动状态。

3.3.3 其它设备数字孪生体开发

多工序装配系统中，各个零部件的构建和协同工作是确保整个装配过程高效、精确的关键^[53]。机器人多工序装配系统主要设备包括传送带、产品托盘、夹爪和卡扣顶紧机构等设备，其它设备数字孪生体如图 3-11 所示。

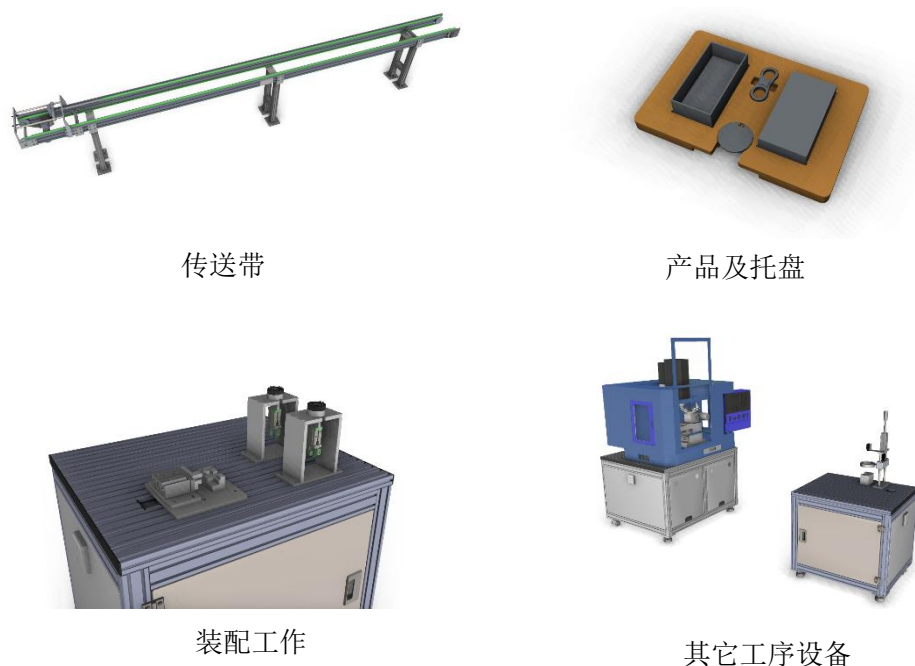


图 3-11 其它设备数字孪生体

(1) 传送带：在多工序装配系统中承担着重要的物料运输任务。为了确保传送带在系统中与其他设备的协同作用，通过虚拟信号和物理学属性进行控制和优化。将传送带上与托盘有接触的虚拟模型，在“建模”窗口下通过特征功能模块构建与模型高度拟合的碰撞体。

由于传送带与物体的接触比较简单，因此将其的碰撞器设置为“Box”，对于接触模型比较复杂例如机床夹具等模型的碰撞器选择需使用“Precise”。碰撞体的建立，可以使模型在孪生空间中具有和现实中相同的实体特性。使得托盘能够在传送带上平稳地流动，而不会出现卡顿或过度摩擦的现象。

通过虚拟信号控制，实现了传送带的启动、停止及速度调节，确保其能够与机器人夹爪的抓取、装配动作无缝衔接。

(2) 产品及托盘：通过传送带传输到各个工作站，在优化产品和托盘属性时，确保其物理属性与传送带及夹爪的协同作用是至关重要的。产品及托盘设置了质

量、密度、物理学、摩擦系数等物理属性，确保托盘能够在传送带上平稳流动，产品和托盘能够通过重力自然接触，并且在机器人抓取时保持稳定。

(3) 装配工作台：末端执行器和卡扣顶紧机构等机器人装配的核心配件，不仅会影响机器人与逆行的轨迹还会直接影响多工序装配孪生效果。对于与产品及零部件接触的部分，需要添加包括密度、质量、摩擦系数、阻尼等“物理学”，从而保证数字孪生体的高保证性。

首先需要给夹爪定义一个“连接”并在夹爪中心添加字段“Hierachy”使其能够与夹爪末端成功连接。然后我们需要给夹爪的末端添加一个组件容器，使机器人夹爪能够捕捉工件。为了使夹爪有开合的动作还需要对夹爪的两个手爪进行定义，由于手爪的动作是同时及进行的，只需要一个布尔信号来控制即可。脚本中的连接到机器人输出的端口号 (Action Signal)，为了使夹爪能够实时获取到机器人的动作信号，需要在属性中添加定义“整数”。

(4) 其它工序设备：其它工序设备是多工序装配系统的重要组成部分之一。因此在进行数字孪生体的构建时，需要考虑到孪生体对装配效果的影响，所以对于雕刻机主轴、雕刻机门、刀头、拍照光源和气缸等部件需要进行复杂建模。

首先通过“链接”提取以及父子级关系的嵌套，确保所有的运动部分具有合理的运动关系，然后通过构建控制脚本或虚拟的“伺服控制器”用来和物理信号连接，对于接触部分也需要添加“物理学”，从而实现对部件的控制与精确建模。

3.4 机器人多工序装配虚拟系统集成

完成了所有设备的数字孪生体的构建与开发之后，根据物理系统中的设备和组建的位置，对机器人多工序装配虚拟系统进行集成。由于机器人作为整个装配任务的主要执行设备，因此，首先在空间中将机器人的位置进行确定，然后以机器人的位置为基准对其它设备和组件的虚拟模型进行定位和调整。多工序装配虚拟场景如图 3-12 所示。

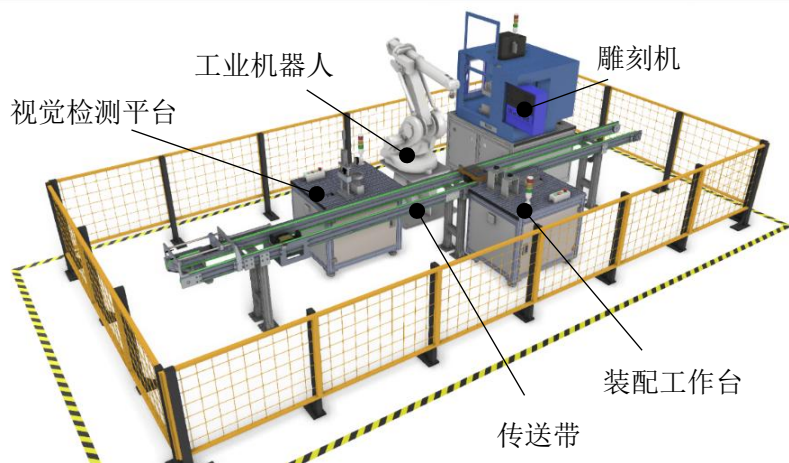


图 3-12 机器人多工序装配虚拟系统

虚拟系统的构建是一个动态的过程。这里完成了虚拟系统的基本构建，对于数字孪生系统而言，虚拟系统模型的构建，需要结合物理系统和虚拟系统的实时交互效果来进行调整，通过与物理系统之间装配过程数据的汇总和处理，不断的优化虚拟系统模型，来提高整个虚拟系统中模型的高保真性^[54-58]。

3.5 本章小结

（1）基于五维数字孪生模型，提出了机器人多工序装配数字孪生系统模型；提出了数字孪生虚拟系统的三种构建方法。

（2）基于 MDH 参数法，构建了工业机器人正逆运动学模型，验证了机器人数字孪生体的位姿；采用 Python 脚本搭建法，构建了传送带、工业机器人、雕刻机、视觉检测机构等的数字孪生体，通过属性添加、脚本编译和规则定义，实现了数字孪生体的高精度建模，完成了虚拟系统的整体建模。

第 4 章 机器人多工序装配虚实联动实验

数字孪生系统的核心在于虚实同步，即如何通过数据交互实现虚拟模型与物理系统的实时映射，基于 Siemens S7 协议的多通道数据交互架构，分析如何实现机器人、雕刻机、传感器等设备的数据采集、传输和反馈，提出了并行双通道数据交互方案，以确保装配系统虚实联动的实时性和稳定性。

4.1 数字孪生系统数据交互方案

在多工序装配生产环境中，工业机器人、雕刻机、传感器等多种工业设备往往需要协同工作，以实现高效率的自动化生产。随着数字孪生技术的发展，如何将物理世界中的各种实时数据准确而快速地映射到虚拟仿真环境成为关键问题^[59-61]。

4.1.1 基于 S7 协议的数据交互

Siemens S7 通信协议是一种高效、可靠的工业通信协议。通过优化的数据传输机制，确保了通信过程的高效性，并具备强大的错误检测和纠正功能，从而保证了数据传输的可靠性。该协议广泛应用于工业自动化领域，支持设备间的数据交换和控制命令传输。

S7 协议支持多种通信方式，包括以太网、MPI（多点接口）和 Profibus 等，能够满足不同规模和复杂度的自动化系统需求。其实时性和安全性也备受认可，能够满足工业自动化系统对实时性的高要求，并提供多种安全机制以防止未经授权的访问和数据篡改。

TCP/IP 模型是互联网通信的基石，通过分层设计将复杂问题模块化。对于同一台设备上的进程间通信，有很多种方式，比如有管道、消息队列、共享内存、信号等方式，而对于不同设备上的进程间通信，就需要网络通信，而设备是多样性的，为了兼容多种多样的设备，协商出了一套通用的网络协议^[62]，见表 4-1。

在机器人多工序装配数字孪生系统中，各物理设备（机器人、夹爪、传感器等）与 PLC 之间主要借助以太网进行连接。PLC 通过其内部程序实时采集并处理来自现场各设备的输入信号，再通过 Siemens S7 协议将系统运行数据传递至上位机，即运行 VC 软件的客户端。

表 4-1 TCP/IP 四层分类结构

模型层	功能	代表协议
应用层	提供用户应用服务，处理数据格式、加密等	HTTP、HTTPS、Siemens S7、Modbus、OPC UA
传输层	端到端数据传输，确保数据完整性	TCP、UDP、Socket
网络层	数据寻址与路由，确保数据包传输到正确的设备	IP、ICMP、ARP、NAT
网络接口层	物理数据传输，负责 MAC 寻址和帧封装	Ethernet、Wi-Fi、Profinet、Profibus

4.1.2 并行双通道数据交互架构

数字孪生机器人多工序装配系统通过以太网将各类设备与可编程控制器（PLC）连接，并采用无线网或以太网实现 PLC 与上位机的互通。在此基础上，为了满足机器人关节角度等高频数据的实时性需求，系统并行引入了基于 Socket 的数据直传模式，从而形成了一种并行双通道的数据交互方案，为数字孪生系统提供了良好的实时性与可扩展性，并行双通道数据传输结构如图 4-1 所示。

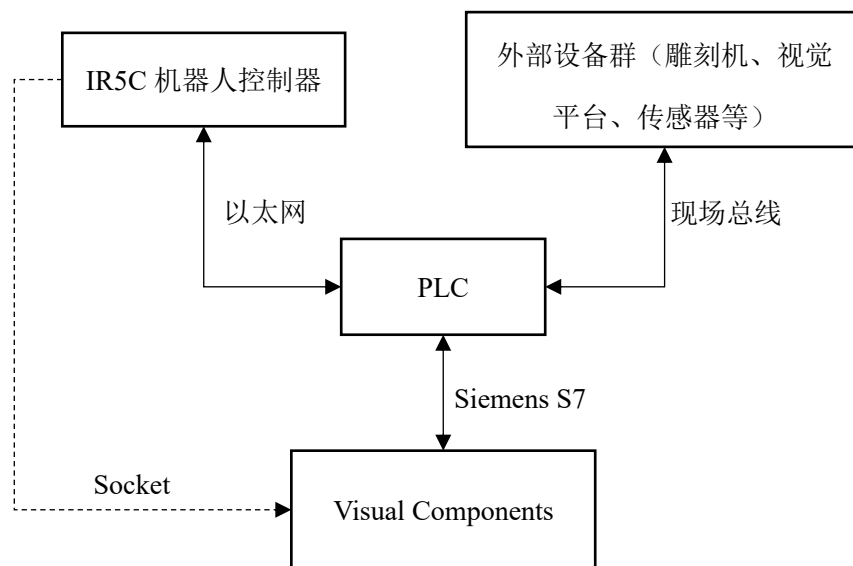


图 4-1 并行双通道数据交互架构

IR5C 机器人控制器：能够采集机器人的运行数据，如位置、速度、力矩等，同时支持多种通信协议，便于与其他设备和系统集成，实现数据交换和远程控制，通过工业以太网或现场总线与 PLC 建立通信。

PLC：数据实时采集与控制中心，负责统一管理机器人、传感器、雕刻机等设备的状态，并通过 Siemens S7 协议将相应信号上传至 VC 客户端。

外部设备群（雕刻机、传感器等）：与 PLC 处在同一工业网络环境下，将各自的数据或状态信息实时上报，由 PLC 进行处理和转发。

Visual Components: 在上位机端运行，用于构建数字孪生模型，通过 SiemensS7 协议与 PLC 进行 I/O 监测和物理设备状态映射，实现机器人多工序装配系统物理布局和设备工况的仿真与监控。

机器人多工序装配系统的主要数据流向，既有以 PLC 为中心的设备管理与信号交互，又有针对机器人数据的 Socket 高频传输，实现了针对多工序装配的兼顾统一调度与高频实时两种需求的融合式网络结构。这种多通道并行的数据交互方式具有如下优势：

（1）高效性：PLC 能够统一管理低频或辅助信号，而 Socket 则专门针对机器人高频数据，确保关键关节值的实时更新与仿真同步。

（2）稳定性：当无线网络出现抖动时，PLC 通道依旧能够维持基础控制与状态监测；Socket 通道在断连后可迅速重连，具有较好的容错性。

（3）可扩展性：通过对 TCP/IP 模型的分层理解，可方便地在物理层与应用层间扩充其它协议或自定义数据结构，以适应更多设备类型与场景需求。

（4）可视化与协同：数字孪生系统可将从 PLC 与机器人控制器中获取的实时数据进行可视化展现，使得操作人员及研发工程师能够在虚拟环境中观察多工序协同效果，并对生产流程的优化与故障预警提供支持。

4.1.3 并行双通道数据交互配置

VC 在软件层面通过其“连通性”功能配置了对 Siemens S7 协议的支持，首先通过构建虚拟 Siemens S7 服务器，然后将 PLC 的 IP 地址输入虚拟服务器中，最后将 VC 中构建的虚拟信号与 PLC 中的物理控制信号配对成为变量组，虚实联动部分变量组如图 4-2 所示。

已连接变量							
结构	模拟变量	...	模拟值	预留值	最新值	服务器变量	服务器类型
192.168.50.7视觉检测台							
模拟至服务器							
光源平台上下	视觉设备台.光源平台上下	✖	FALSE			① 拍照位气缸电磁阀	BOOL
YellowSignal	三色灯 #2.YellowSignal	✖	FALSE			② 复位指示灯	BOOL
RedSignal	三色灯 #2.RedSignal	✖	FALSE			③ 故障指示灯	BOOL
GreenSignal	三色灯 #2.GreenSignal	✖	FALSE			④ 运行指示灯	BOOL
192.168.50.8卡扣装配台							
模拟至服务器							
卡扣顶紧机构	JX23002-02-00+-14.卡扣顶紧机构	✖	FALSE			① 夹具电磁阀	BOOL
RedSignal	三色灯 #3.RedSignal	✖	FALSE			② 故障指示灯	BOOL
YellowSignal	三色灯 #3.YellowSignal	✖	FALSE			③ 复位指示灯	BOOL
GreenSignal	三色灯 #3.GreenSignal	✖	FALSE			④ 运行指示灯	BOOL
Axis1	IRB 1400.IRC5.Axis1	✖	15.937720...			⑤ J1POS	REAL
Axis2	IRB 1400.IRC5.Axis2	✖	-33.455982...			⑥ J2POS	REAL
Axis3	IRB 1400.IRC5.Axis3	✖	15.094551...			⑦ J3POS	REAL
Axis4	IRB 1400.IRC5.Axis4	✖	0.0003094...			⑧ J4POS	REAL
Axis5	IRB 1400.IRC5.Axis5	✖	74.901748...			⑨ J5POS	REAL
Axis6	IRB 1400.IRC5.Axis6	✖	13.070651...			⑩ J6POS	REAL
快换	IRB 1400.快换	✔	TRUE			⑪ 快换夹具	BOOL
夹爪	IRB 1400.夹爪	✔	FALSE			⑫ 机器人夹爪	BOOL

图 4-2 虚实联动变量组配对

Socket 的配置首先要在服务器端（IR5C）事先配置的 IP 地址与端口，此端口始终保持侦听状态（listen），当客户端（VC）发起连接请求时，服务器端接受请求（accept）同时建立起一个 Connection Socket 和客户端进行通信，TCP Socket 通信开发流程如图 4-3 所示。

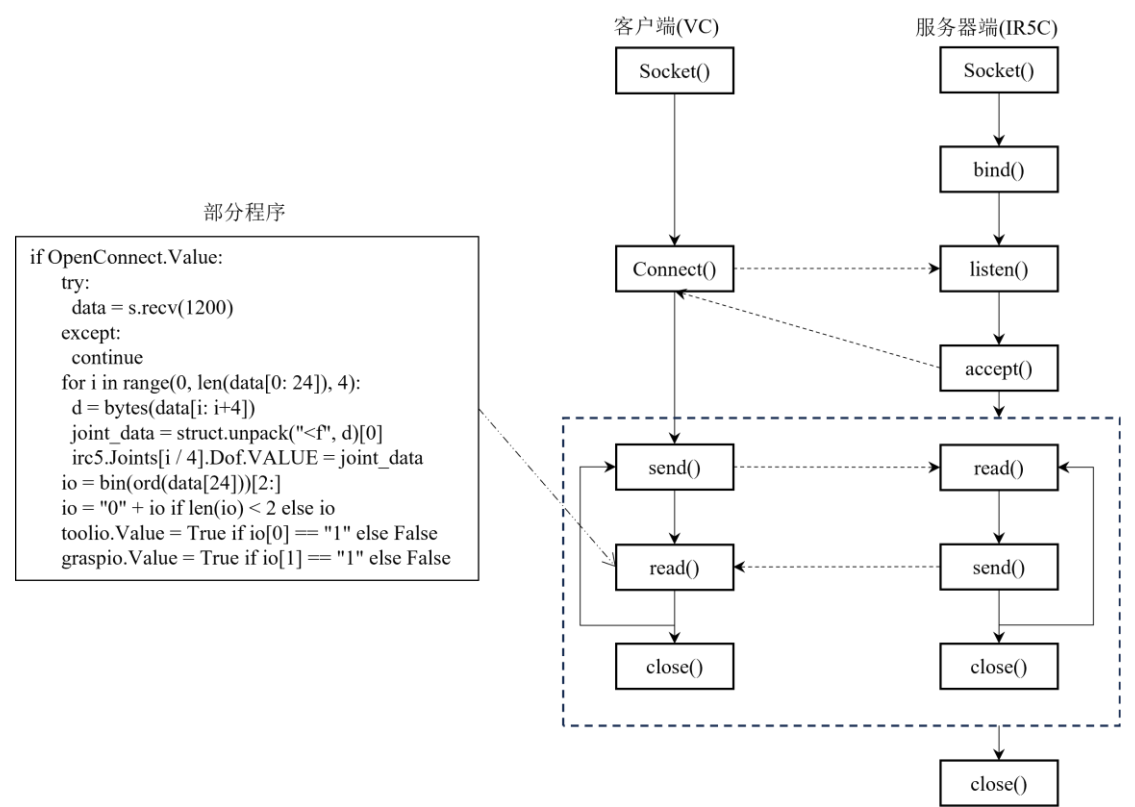


图 4-3 TCP Socket 通信开发流程

以客户端部分程序为例，通信成功建立连接后，通过 `recv()` 方法定期拉取服务器端数据包。数据包的解析包括对浮点型关节数据、夹爪或工具快换等状态的识

别。用于高频传输六轴机器人关节角度、夹爪和工具快换等关键运动数据，确保数字孪生环境中装配机器人动作的实时同步。当出现超时或异常时，Python 脚本会主动关闭连接并尝试重连，保证在网络不稳定的环境中依旧能维持较长时间的高效通信。

这种基于 TCP 套接字的通信适应工业以太网和无线网络场景，与 PLC 的数据通道并行互补，既能充分利用 PLC 在现场级别上的统筹管理功能，也能满足高频数据传输对实时性的较高要求。

4.2 数字孪生实验平台虚实联动

完成了对多工序装配系统物理层、虚拟层和信息融合层的构建，为了进一步验证多工序装配数字孪生系统的虚实联动效果，首先通过局域网与 PLC 及进行连接，然后启动前面搭建好的虚拟 Siemens S7 服务器，并启动虚拟场景的仿真运行，虚拟系统就能够实时读取 PLC 采集到的机器人多工序装配系统的运行数据，实时数据采集如图 4-4 所示。



图 4-4 实时数据采集

通过连通性不仅可以查看多工序装配过程中数据的实时变化情况，同时还可以监控数据的更新时间，其中数据的平均更新时间为 16.4 ms，最大更新时间为 24.2 ms，系统的通信状态良好，远远小于 Siemens S7 虚拟服务器的延迟阈值 100 ms，并且无错误数据对和运行错误，数字孪生系统运行正常。

数字孪生实验平台主要由工业机器人、雕刻机、视觉检测平台、传送带、装配工作台、上位机和数字孪生大屏构成，运行效果如图 4-5 所示。

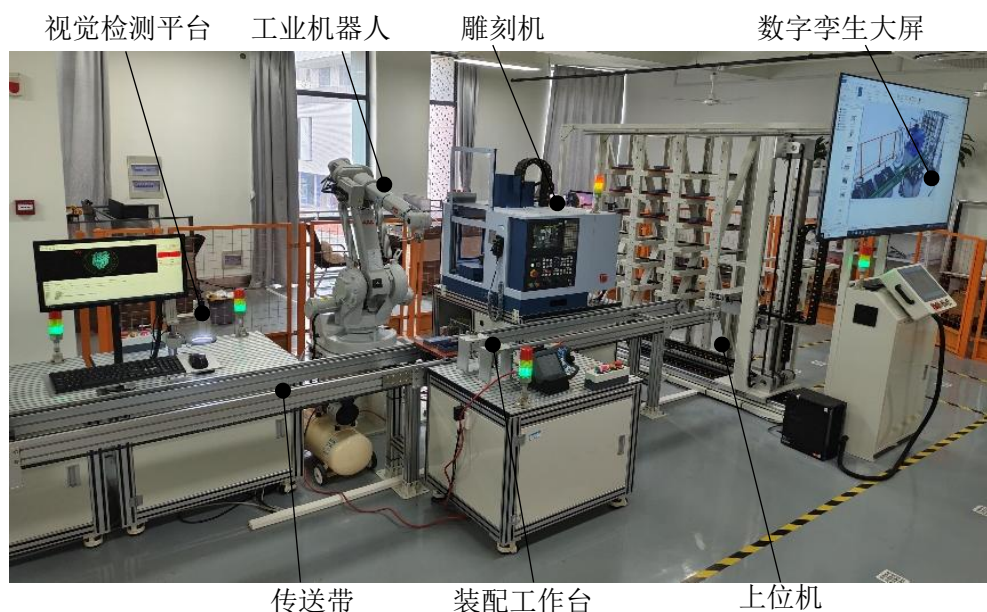


图 4-5 数字孪生实验平台

机器人多工序装配数字孪生系统通过局域网，能够在任何一台计算机上实现与物理系统的虚实联动。机器人控制器、工序 1（雕刻机）、工序 2（视觉检测）和上位机等，通过局域网与 PLC 进行连接，就可以读取 PLC 的数据，实现上位机对多工序装配系统的实时监控，通过数字孪生大屏快速了解系统中各个设备的运行状态。

在虚拟系统中，通过标本编译实时生成夹爪在虚拟系统中的运动轨迹，夹爪轨迹变化如图 4-6 示。

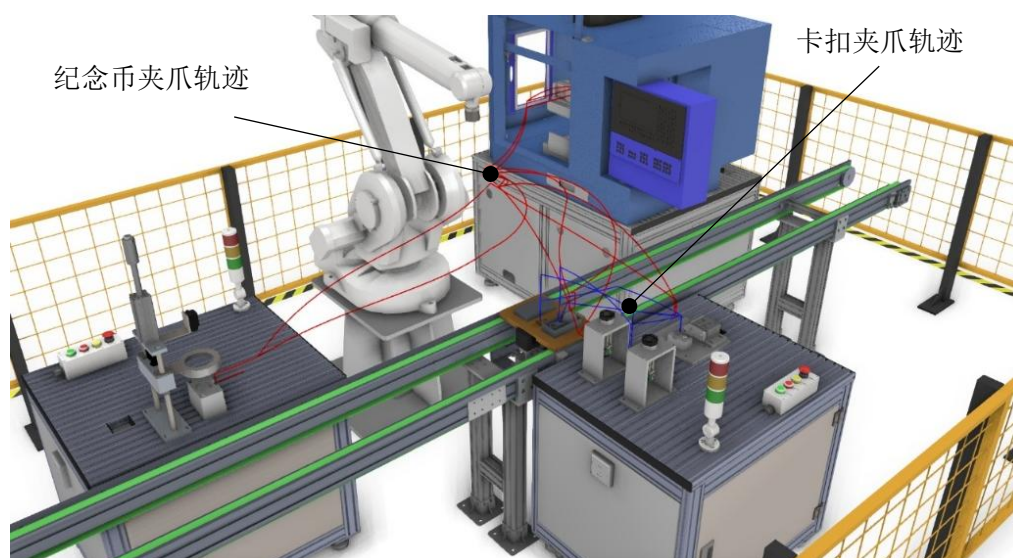


图 4-6 机器人多工序装配夹爪路径展示

通过对机器人夹爪的轨迹跟踪，可以直观的监测到多工序装配过程中夹爪的运动状态，从而快速分析机器人运行轨迹。

为了全面分析多工序装配系统中工业机器人的运动特性，对装配过程中工业机器人各关节角度随时间的变化进行详细统计，生成工业机器人“角度-时间”变化如图 4-7 所示。

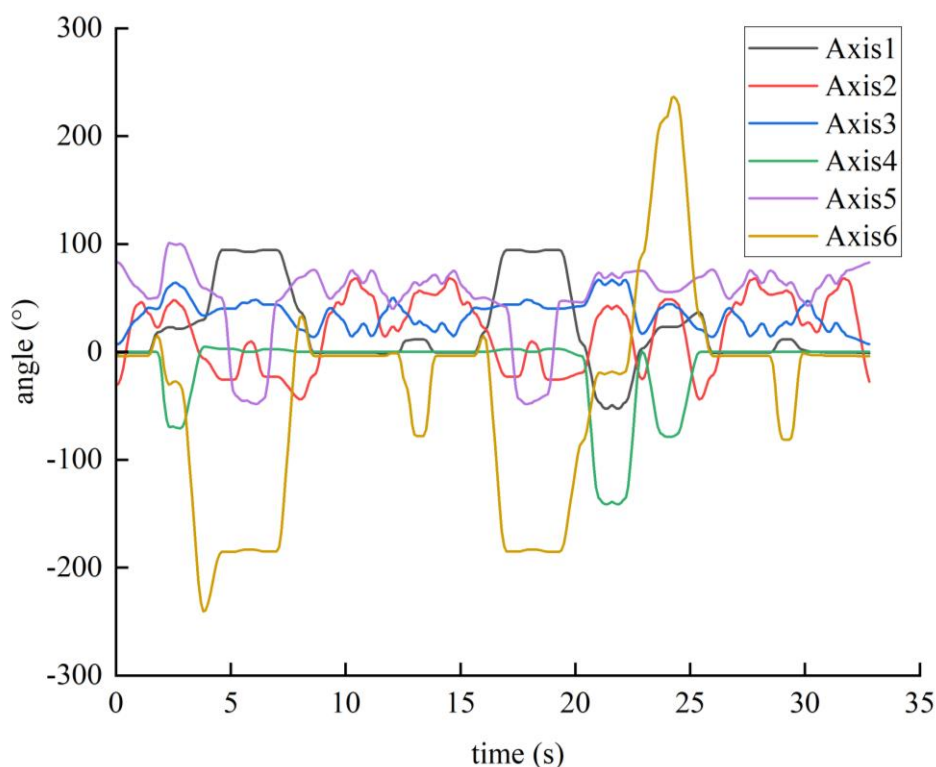


图 4-7 虚拟系统机器人各轴实时变化

通过机器人各轴角度-时间曲线图，可以观察到各个关节的运动趋势、角速度及加速度变化情况，以识别可能的轨迹突变或不稳定情况，可利用这些数据分析不同优化路径对装配效率的影响。

机器人多工序装配数字孪生系统，不仅能够实现对物理系统的映射，同时还可以在虚拟系统中，对机器人的轨迹进行离线编程，数字孪生系统模型具有高保真的特点，因此这种编程方式，既具有传统在线示教编程的精确，又具有离线编程的便捷，可以大大减少机器人多工序装配系统的开发周期。

4.3 本章小结

(1) 构建了基于 Siemens S7 协议的双通道数据交互架构, 并结合 Socket 通信技术, 实现了虚拟装配系统与物理设备之间的实时数据传输。确保了机器人装配过程中的关键状态参数能够准确映射至数字孪生系统。

(2) 通过虚实交互实验, 测得系统的数据传输平均延迟约为 16.4 ms, 验证了数据交互的稳定性和实时性, 系统能够在较短时间内完成状态更新, 满足装配过程的实时性需求。

(3) 构建了机器人统计学, 实时监测机器人运动过程中的轨迹变化, 并生成各轴角度-时间曲线图, 实现机器人多工序装配系统运行状态回溯。

第 5 章 机器人多工序装配路径规划

传统路径规划方法在复杂装配任务中存在优化能力不足、计算量大等问题。使用五次 B 样条参数法生成平滑连续的路径，构建了以时间和能耗为目标的优化数学模型，提出了改进灰狼优化算法，优化了机器人装配效率，减少了机器人运行时间，降低了机器人运行能耗。

5.1 基本路径规划

5.1.1 五次 B 样条插值

在机器人路径规划领域，B 样条曲线由于其平滑性、局部可调性和高阶连续性，被广泛应用于轨迹优化。相比于传统的三次 B 样条，五次 B 样条具备更高阶的光滑性，能够保证轨迹的一阶至四阶导数连续，从而减少机器人运动中的冲击，提高轨迹的可控性和稳定性^[63]。

B 样条曲线是一种基于基函数的参数化曲线，能够通过一系列控制点生成平滑的路径。五次 B 样条曲线相比于低阶曲线，能够保证至少二阶及以上的导数连续性，从而满足机器人路径规划中的平滑性要求。其数学表达式为：

$$P(s) = \sum_{i=0}^5 B_i^5(s) P_i \quad (5-1)$$

其中， $B_i^5(s)$ 为五次 B 样条基函数， P_i 为控制顶点， s 为路径控制函数。B 样条基函数可以通过递归公式计算，从而得到一条满足高阶连续性的平滑曲线。

$$B_{i,0}(s) = \begin{cases} 1, & s_i \leq s < s_{i+1} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \quad (5-2)$$

$$B_{i,k}(s) = \left(\frac{s - s_i}{s_{i+k-1} - s_i} B_{i,k-1}(s) \right) + \left(\frac{s_{i+k} - s}{s_{i+k} - s_{i+1}} B_{i+1,k-1}(s) \right)$$

其中 $k=5$ 即为五次 B 样条曲线，可通过调整关键点的位置，优化局部轨迹形状，不影响整体轨迹，同时每个关键点处，轨迹的位置、速度、加速度和冲击均连续，能够提升机器人运行平稳性。

首先通过机器人示教编程，来实现机器人多工序装配过程的初始路径，并提取关节的坐标数据与位姿，并通过前面建立的运动学函数来求取机器人在关节空间的角度值，获得一组关键点见表 5-1。

表 5-1 机器人关键点关节角度值

关键点	关节角度					
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6
q_1	1.20	-35.93	3.33	0.00	86.67	52.00
q_2	-0.59	43.49	29.95	0.00	60.05	-3.61
q_3	18.13	22.18	39.75	0.00	50.25	15.11
q_4	94.52	-22.91	43.87	2.48	42.08	-184.93
q_5	94.52	-22.91	43.87	2.48	-43.90	-184.93
q_6	92.78	9.94	47.60	-0.03	-47.60	-183.13
q_7	92.78	8.08	45.09	-0.03	-45.09	-183.13
q_8	94.52	-25.60	40.12	2.67	-40.15	-185.19
q_9	94.52	-25.60	40.12	2.67	47.40	-185.19
q_{10}	-52.44	43.17	63.50	-141.39	69.41	-19.50
q_{11}	23.11	49.03	44.00	-78.53	55.53	217.18

为了保证轨迹的均匀化,采用累积弦长法计算各关键点的时间参数,首先计算各关键点之间的距离。

$$d_i = \|q_i - q_{i-1}\|, i = 2, 3, \dots, n \quad (5-3)$$

然后令 $S_0 = 0$, 计算累计弦长。

$$S_i = S_{i-1} + d_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (5-4)$$

最后将累积弦长归一化到区间[0,1]:

$$u_i = \frac{S_i - S_0}{S_n - S_0}, u_0 = 0, u_n = 1 \quad (5-5)$$

归一化不仅有助于后续 B 样条基函数的计算,也保证了再不同路径下长度参数分布的一致性。

为了满足机器人运动平滑性的要求,不仅需要生成位置轨迹,还需要计算其一阶、二阶和三阶导数,分别表示机器人轨迹的速度、加速度和跃度。

$$\begin{cases} v(s) = \frac{dP(s)}{ds} = \sum_{i=0}^5 P_i \frac{dB_i^5(s)}{ds} \\ a(s) = \frac{d^2P(s)}{ds^2} = \sum_{i=0}^5 P_i \frac{d^2B_i^5(s)}{ds^2} \\ j(s) = \frac{d^3P(s)}{ds^3} = \sum_{i=0}^5 P_i \frac{d^3B_i^5(s)}{ds^3} \end{cases} \quad (5-6)$$

$v(s)$ 、 $a(s)$ 、 $j(s)$ 在规划过程中起到关键作用，可用于检测轨迹是否满足机器人运动的动态约束，从而保证机器人运行的安全性和稳定性。B样条曲线可以提高算法的高阶连续性，使轨迹变得平滑，为了提高机器人的运动能效，还需要针对特定目标进一步优化路径。

5.2 智能优化算法

5.2.1 粒子群算法(PSO)

粒子群算法(PSO)是一种源于群体智能的优化方法，其核心思想是模拟鸟群、鱼群等群体在自然环境中的群体行为，从而实现对最优解的搜索。在该算法中，每一个粒子都对应着待求解空间中的一个可能解，其具体位置则表示解空间中的某个特定解。每个粒子都有相应的适应度值，即优化目标函数的具体数值。粒子通过个体自身的经验和群体共享的信息，不断地调整自身的位置和运动速度，从而实现逐渐向最优解的靠近。

PSO算法首先随机生成一组粒子群，然后通过反复的迭代过程，更新每个粒子的速度与位置，使得粒子们在解空间中逐步逼近群体中最优粒子的方向，最终获得全局最优解，寻找最优解^[64]。

在优化的过程中，粒子通过不断比较自身和其他粒子的适应值来调整自己的运动轨迹，以此逐步趋近全局最优解。粒子群算法的关键点在于粒子们通过持续的速度与位置更新，逐步地接近最佳解，从而实现优化目标。该算法以其优良的全局搜索能力、高效的计算效率和易实现的特点，广泛应用于函数优化、机器学习、神经网络训练和组合优化等多个领域，基本原理如下：

每个粒子可以被视作解空间中的一个点，并具有对应的速度和位置。这些粒子的速度与位置更新方式见公式。

$$\begin{aligned} v_i(d+1) &= w \cdot v_i(d) + p_1 \cdot k_1 \cdot (p_i(d) - x_i(d)) + p_2 \cdot k_2 \cdot (g_i(d) - x_i(d)) \\ x_i(d+1) &= x_i(d) + v_i(d+1) \end{aligned} \quad (5-7)$$

其中， i ：第 i 个粒子，粒子总数为 N ；

p_1 、 p_2 ： p_1 为粒子个体加速因子， p_2 为社会加速因子，这两个参数控制着粒子在个体学习和群体学习过程中的信息反馈机制，从而指导粒子向局部或全局最优位置前进；

k_1 、 k_2 ：[0,1]范围内变化的随机数，以增强粒子搜索过程的多样性和鲁棒性；

w ：速度惯性权重用于控制粒子继承前一次速度的影响程度；

$x_i(d)$ ：在 d 次迭代时，第 i 个粒子的坐标；

$v_i(d)$ ：在 d 次迭代时，第 i 个粒子的速度；

$p_i(d)$ ：在 d 次迭代时，第 i 个粒子经过的最佳位置；

$g_i(d)$ ：在 d 次迭代时，所有粒子经过的最佳位置。

上述公式可以看出，每个粒子速度的更新由以下三个部分组成：首先，是粒子在前一次迭代中的速度惯性，即粒子本身原有的运动趋势。其次，是粒子的“认知”因素，这部分体现了粒子自身历史经验的作用，即粒子将会朝着自己曾经发现的最优位置方向移动，以确保搜索路径逐步逼近更优解。这部分强调了粒子个体经验对优化效果的重要性。最后的部分则体现了粒子的“社会”因素，这个因素主要表现为粒子向群体已知的最优解靠近的趋势。通过与群体最优位置之间的差距来调整粒子的移动方向，使粒子更加有可能接近全局最优解。这种机制有效避免了算法陷入局部最优情况，增强了粒子群算法的整体搜索能力。

5.2.2 灰狼算法(GWO)

灰狼优化算法（GWO）是一种由米尔斯和拉夫扎尼提出的群体智能优化算法，该算法通过模拟灰狼群体的社会等级结构与捕猎行为，实现对优化问题的高效求解。灰狼算法具有结构简单、参数调节便捷以及收敛速度快等优势。

在 GWO 算法中，每个解对应群体中的一只灰狼。在算法开始时，随机生成初始灰狼种群，每只灰狼均代表解空间中的一个潜在解，其位置和适应度分别表示对应解的坐标与优化目标的数值。在每轮迭代过程中，灰狼根据当前的位置和适应度，采用个体运动、群体运动和随机运动三种机制更新自身位置。灰狼算法具备计算效率高的特点，在处理各类优化问题时能够迅速找到较好的解，尤其适用于连续型优化问题，展现出良好的性能。

在灰狼算法中，狼群存在明确的社会等级划分， α 为级别最高的头狼，代表当前种群的最优解； β 仅次于 α ，代表次优解； δ 为排名第三的灰狼，代表第三优解； ω 为种群中等级最低的普通灰狼；种群中除 α 狼、 β 狼、 δ 狼外，其余都是 ω 狼。灰狼算法通过等级制度赋予各等级灰狼不同权重，以引导狼群向适应度更高的区

域搜索，并有效避免陷入局部最优。在优化过程中，高等级灰狼起到“领袖”作用，引导整个狼群逐步向全局最优方向逼近，从而增强算法的全局搜索能力与效率力[66-68]。

灰狼优化算法的数学模型如下：

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (5-8)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{A}_p(t+1) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (5-9)$$

式中： t 为迭代次数， $\vec{X}(t)$ 为第 t 次迭代时位置， $\vec{X}(t+1)$ 为第 $t+1$ 次迭代时位置， D 为灰狼与目标之间的距离， A 、 C 为向量系数，由公式给出：

$$\vec{A} = 2a\vec{r}_1 - \vec{a} \quad (5-10)$$

$$\vec{C} = 2\vec{r}_2 \quad (5-11)$$

式中： $\vec{r}_1$ 和 $\vec{r}_2$ 均为随机向量， $\vec{r}_1, \vec{r}_2 \in [0,1]$ ， $\vec{a}$ 与算法性能有关。收敛因子 a_i 表示如下：

$$a_i = 2 \left(1 - \frac{t}{T} \right) \quad (5-12)$$

灰狼群体根据 α 狼、 β 狼、 δ 狼的位置 $\vec{X}_\alpha$ 、 $\vec{X}_\beta$ 、 $\vec{X}_\delta$ 更新下一步位置，位置更新表达式如下：

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{cases} \quad (5-13)$$

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{cases} \quad (5-14)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1(t) + \vec{X}_2(t) + \vec{X}_3(t)}{3} \quad (5-15)$$

其中， $\vec{X}_\alpha$ 、 $\vec{X}_\beta$ 、 $\vec{X}_\delta$ 分别表示 α 、 β 、 δ 狼的位置， $\vec{A}_1$ 、 $\vec{A}_2$ 、 $\vec{A}_3$ 则为三个随机数，用于调节灰狼群体的搜索范围与位置更新。灰狼通过不断调整位置、随机改

变参数 A 和 C，以实现对全局或次优解的有效搜索。在整个优化过程中，算法反复执行上述步骤，即根据不同等级的灰狼的位置协同更新整个种群的位置，从而快速、高效地实现对最优解的搜索，当达到终止条件时，算法即终止并输出最终获得的最优解。

5.2.3 改进灰狼算法(IGWO)

改进灰狼算法（IGWO）的核心思想是通过引入非线性因子、局部搜索策略、混合优化策略和自适应权重调整来提升算法的全局搜索能力、精确度和收敛速度。

灰狼算法中，收敛因子 a_i 控制灰狼的搜索半径呈线性衰减，改进后采用预先衰减函数来代替线性衰减：

$$a_i = a_i \cdot \cos\left(\frac{\pi t}{2T}\right) \quad (5-16)$$

收敛因子反映了灰狼算法中灰狼的搜索范围，在算法初期 a_i 的值较大，灰狼的搜索空间有较大的搜索半径，有助于避免早期收敛。同时随着迭代的进行， a_i 的值逐渐减小，灰狼的搜索范围逐步缩小，使得算法能够集中搜索到更小的区域，提升局部搜索能力。其次余弦衰减函数的引入使得收敛更加平滑，避免了线性衰减的急剧变化，从而提高了算法的稳定性和收敛精度。

传统灰狼优化算法在解决高维复杂问题时在搜索初期由于缺乏全局搜索的能力，灰狼群体可能会迅速收敛到局部最优解，从而错过全局最优解；其次灰狼的搜索过程依赖于当前最优解（头狼）的引导，在初期阶段种群可能集中在较小的搜索区域，缺乏广泛的解空间探索。

为了避免上述问题，将粒子群算法和灰狼算法相结合，借助粒子群算法的全局搜索能力以及速度与位置更新机制，使用粒子群算法在解空间中进行初步的全局搜索，生成多样化的初始种群。这些粒子通过全局最优解的引导，能够有效避免灰狼算法初期搜索过于集中，从而为灰狼算法提供更为广泛的搜索区域，同时在初始阶段粒子群算法生成的种群提供了更多的初始解，从而扩展了搜索范围，避免了灰狼算法过早的局部收敛。在后续的迭代中，灰狼算法根据头狼、次优狼和第三狼的位置更新搜索方向，同时结合 PSO 的全局信息，进一步加强了群体的搜索能力。

初始化种群：使用 PSO 对初始种群进行优化，得到多样化的解集 $X_1, X_2, \dots, X_n$ 。

种群优化过程：在 PSO 生成的初始种群的基础上，使用 GWO 的搜索机制对每个个体进行优化，更新其位置：

$$X_i(t+1) = X_i(t) + A \cdot D_\alpha(t) + B \cdot D_\beta(t) + C \cdot D_\delta(t) \quad (5-17)$$

其中 $X_i(t)$ 是由 PSO 优化后的初始位置，继续进行灰狼优化的迭代。

在传统灰狼算法中，参数 A 和 C 通过固定公式更新，缺乏自适应性。为了更好地适应不同阶段的搜索需求，提高收敛精度和寻优精度，引入自适应机制来调整这些参数：

在初期阶段，为增强搜索多样性，A 和 C 的值变化较大；

在后期阶段，当算法趋向收敛时，逐渐减小 A 和 C，增强局部搜索能力，使得狼群逐渐集中到最优解附近，提升局部优化的精度。

$$\vec{A} = \vec{ar}_1 - 0.5\vec{a} \quad (5-18)$$

$$\vec{C} = 1 + 0.5\vec{r}_2 \quad (5-19)$$

自适应调整能够根据算法的进展来改变搜索策略，使得灰狼在探索阶段保持较大的搜索范围，而在收敛阶段可以更精细地探索解空间的局部。通过动态调整权重，避免了固定参数可能导致的过早收敛或者搜索不充分的问题。

5.3 目标函数与运动学约束

在机器人多工序装配系统中，机器人在工作时的运行时间越短，机器人的作业效率越高；运行过程中机器人各轴的角度值变化越小，能源损耗越低，关节磨损也越小使用寿命就越久^[69,70]。因此本文以时间—能耗为机器人优化目标，以缩短机器人运行时间和减少能耗为目的建立的优化目标函数如下：

$$F = \omega_1 \cdot T(X) + \omega_2 \cdot E(X) = \omega_1 \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{d_i}{v_i} \right) + \omega_2 \cdot \left(\sum_{i=1}^n P_i \cdot t_i \right) \quad (5-20)$$

其中 F 为机器人轨迹优化的目标函数； ω_1 和 ω_2 为时间和能耗的权重，用于调节这两个目标的重要性，这里均取 1； $T(X)$ 为机器人工作过程的总时间； $E(X)$

为机器人在轨迹规划过程中消耗的总能量； d_i 为机器人第 i 个点到第 $i+1$ 个点的距离； v_i 为机器人在该段轨迹上的速度； t_i 为机器人第 i 个点到第 $i+1$ 点的运动时间； P_i 为机器人在第 i 个点的功率消耗； n 为轨迹上的点数，为了便于计算这里忽略机器人的功率损耗。

为了确保机器人路径规划的物理可行性和轨迹平滑性，需要考虑为机器人添加运动学限制。

$$\begin{cases} |\theta_{i,j}| \leq \theta_{\max,j} \\ |\dot{\theta}_{i,j}| \leq \dot{\theta}_{\max,j} \\ |\ddot{\theta}_{i,j}| \leq \ddot{\theta}_{\max,j} \end{cases}, \quad j=1,2,\dots,6 \quad (5-21)$$

其中， $\theta_{i,j}$ 、 $\dot{\theta}_{i,j}$ 和 $\ddot{\theta}_{i,j}$ 分别为第 i 个路径点处第 j 个关节的速度、加速度和跃度； $\theta_{\max,j}$ 、 $\dot{\theta}_{\max,j}$ 和 $\ddot{\theta}_{\max,j}$ 分别为第 j 个关节最大速度、最大加速度和最大跃度。机器人运动学约束见表 5-2。

表 5-2 机器人运动学约束

关节 m	速度($^{\circ}/s$)	加速度($^{\circ}/s^2$)	跃度($^{\circ}/s^3$)
1	120	300	600
2	120	300	600
3	120	300	600
4	280	600	1200
5	280	600	1200
6	280	600	1200

运动学限制是机器人轨迹优化中的重要约束条件，确保生成的轨迹既符合机器人硬件性能，又满足实际应用的安全性和可行性。通过对机器人各轴速度、加速度和跃度的限制不仅可以提高机器人运行会记得平稳性和安全性，还可以减少对电机和各轴的冲击。

5.4 改进灰狼算法路径规划流程

基于改进灰狼算法对机器人装配路径的时间和能耗优化流程如图 5-1 所示。

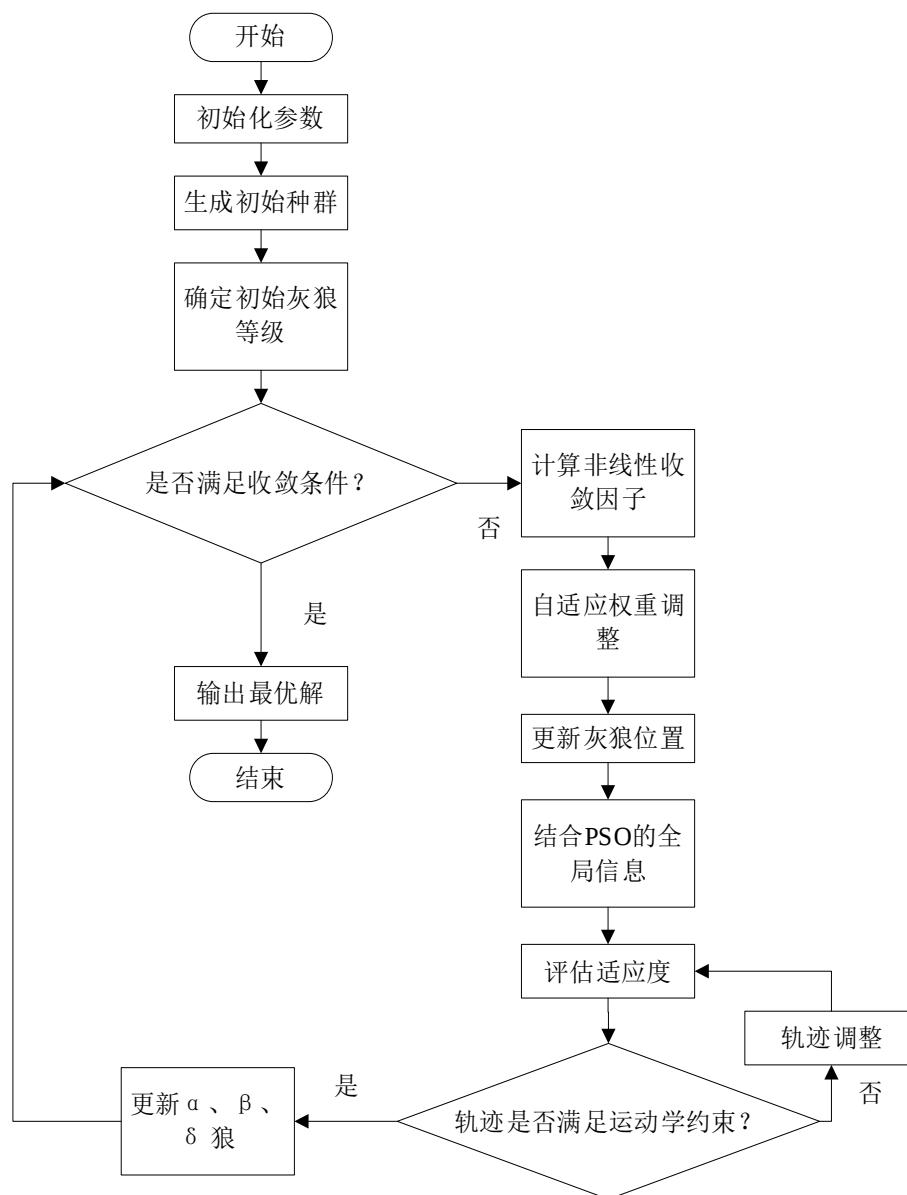


图 5-1 改进灰狼算法路径规划流程

(1) 初始化参数

首先初始化改进灰狼算法的初始参数，包括时间权重 ω_1 和能耗权重 ω_2 ，以及灰狼算法的核心参数例如种群数量 N 、最大迭代次数 T 、初始收敛因子 a 等，同时明确机器人运动学限制，例如关节角度变化的最大值、角速度范围、加速度范围等。这些参数确保了路径规划的约束条件在优化过程中得到有效应用。

(2) 生成初始种群

为了增强初始解的多样性和全局搜索能力,使用粒子群算法生成初始种群。在解空间中随机初始化各个候选轨迹,同时计算每个解的适应度值;并记录每个粒子的个体最优解和全局最优解。最终,生成改进灰狼算法的多样化初始解。

(3) 确定初始狼群的等级

基于粒子群算法生成的初始种群,选择适应度最优的三只个体作为 α 、 β 、 δ 狼,其余个体为 ω 狼。这三只灰狼分别代表当前解的最优解、次优解和第三优解,引导整个狼群进行探索优化。

(4) 判断是否达到终止条件

在每次迭代中,检查当前迭代是否达到最大迭代次数或者是否满足收敛条件。如果满足收敛条件,则停止迭代并输出最优轨迹;否则,进入下一步优化。

(5) 计算非线性收敛因子

为了平衡全局搜索与局部搜索能力,引入非线性收敛因子,通过公式(5-16)使得初期较大的收敛因子允许更广的搜索范围,而后期逐渐减小的收敛因子可以精确搜索局部解,提升机器人装配路径规划的精度。

(6) 自适应权重调整

在每次迭代中,通过公式(5-18)和(5-19),根据当前阶段动态调整参数A和C,增强种群多样性和避免陷入局部最优。

(7) 更新灰狼位置

根据 α 狼、 β 狼、 δ 狼的引导,不断更新每只狼的位置,使得整个种群向最优解靠近。

(8) 结合 PSO 的全局信息

在灰狼位置更新的基础上,进一步结合 PSO 的速度与位置更新机制,增强狼群的全局搜索能力。PSO 的速度更新机制使种群能够更好地在解空间中跳跃式搜索,从而避免早期收敛到局部最优解。

(9) 评估适应度

计算每只灰狼的适应度值,适应度值越低,代表轨迹越优。

(10) 判断是否满足运动学约束

验证灰狼更新后的轨迹是否满足机器人运动学约束,如果不满足约束,对对应解进行轨迹调整,并重新评估适应度,再次进行运动学约束判断;如果满足要求,

则根据最新适应度值，重新选择适应度最优的个体作为新的 α 狼、 β 狼、 δ 狼，引导下一轮的搜索优化和结果导出。

5.5 机器人路径规划算法结果分析

为了进一步分析三种算法对于机器人装配轨迹的优化效果，取初始种群规模 N 均为 100，最大迭代次数为 100，惯性权重 w 取 1，个体加速因子和社会加速因子 p_1 、 p_2 均取 2，初始收敛因子均取 2，算法适应度如图 5-2 所示。

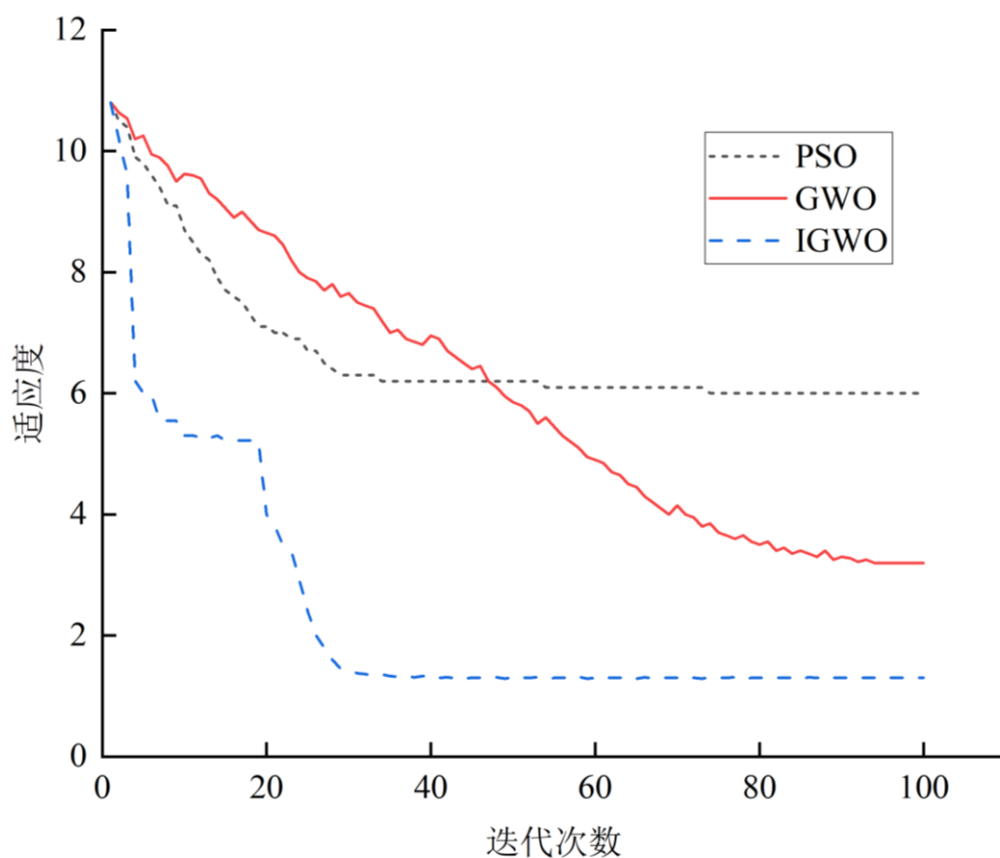


图 5-2 各算法平均迭代过程

改进灰狼算法求解该规划方案时收敛速度最快大约在 35 次时接近迭代最优值，粒子群算法求解速度很快，但是大约在 37 次迭代时陷入局部最优解，灰狼算法求解精度较高，但是收敛速度较慢。粒子群算法和灰狼算法在求解精度和求解速度上均落后于改进的灰狼算法。

为了验证求得的算法对机器人轨迹的时间-能耗优化结果，分别取示教路径、五次 B 样条曲线规划路径和改进灰狼算法结果进一步分析，得到能耗时间变化表如图 5-3 所示。

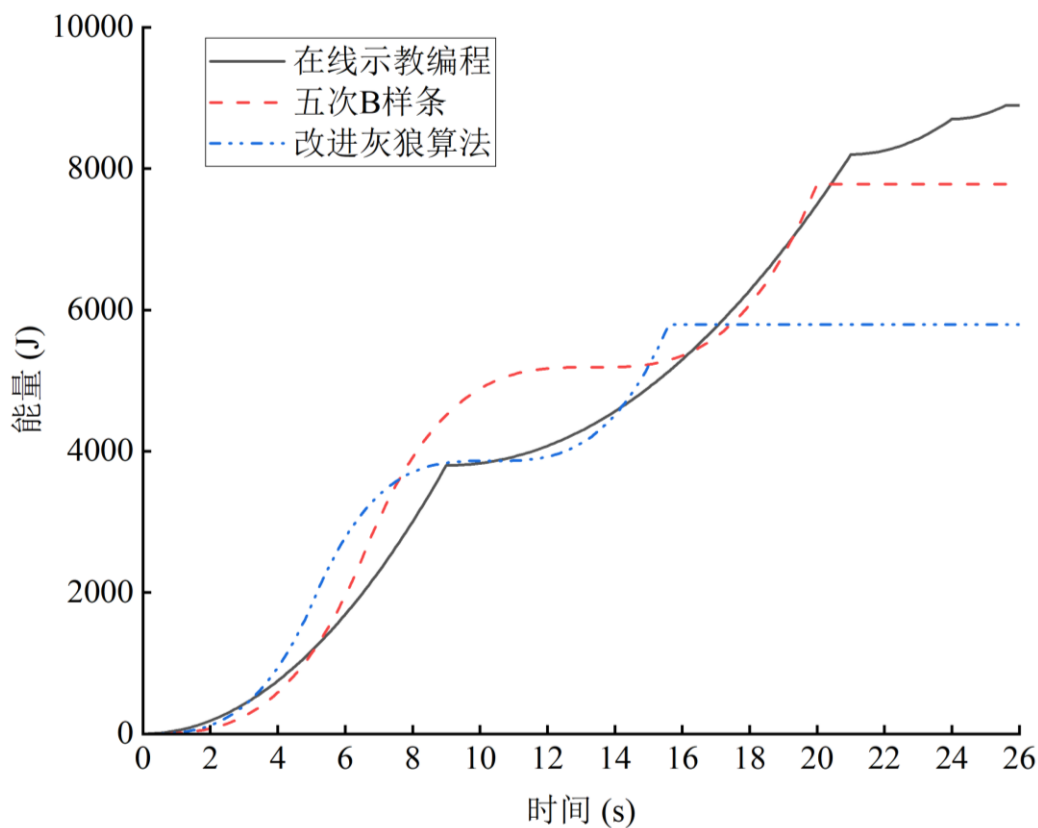


图 5-3 机器人时间能耗变化

由图可知在机器人负载 0.8Kg 下，机器人装配运行时间分别为 25.2s、20.0s、15.6s，总能耗分别为 8897.6J、7782.9J、5795.2J。改进灰狼算法优化后的路径相比于在线示教编程和五次 B 样条路径装配用时分别减少了 38.1%和 22.0%，路径能耗分别降低 34.9%和 25.5%。

五次 B 样条曲线与改进灰狼算法优化后机器人各轴角度值、速度、加速度和跃度变化如图 5-4、5-5、5-6 和 5-7 所示。

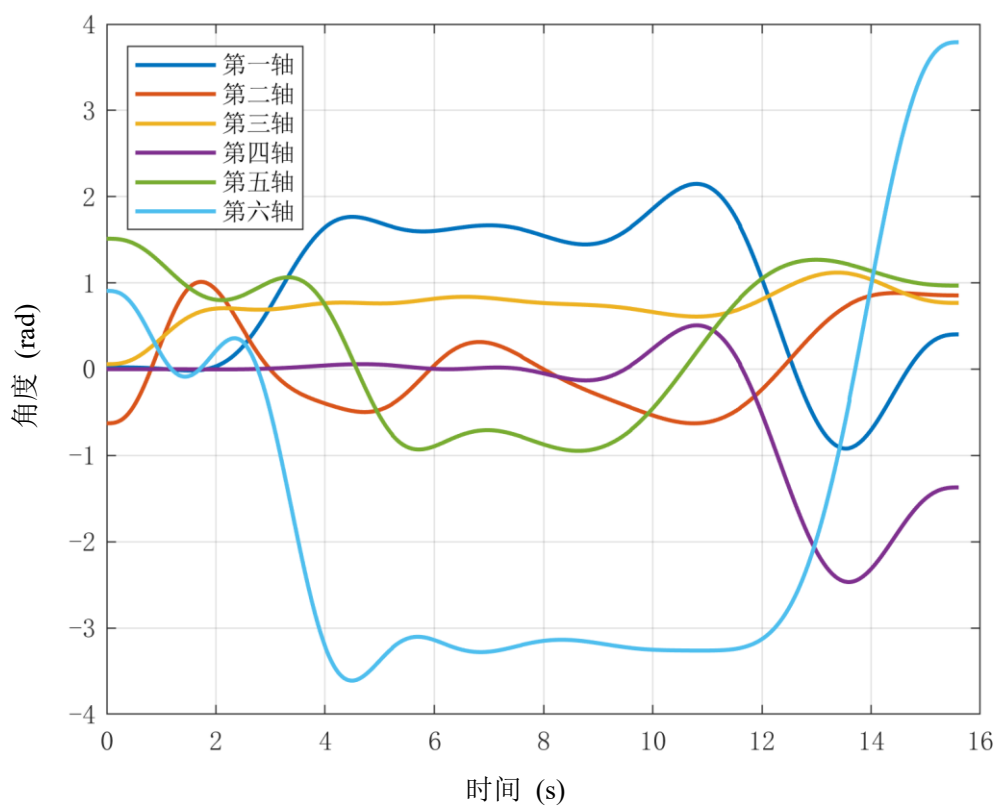


图 5-4 各轴角度值变化

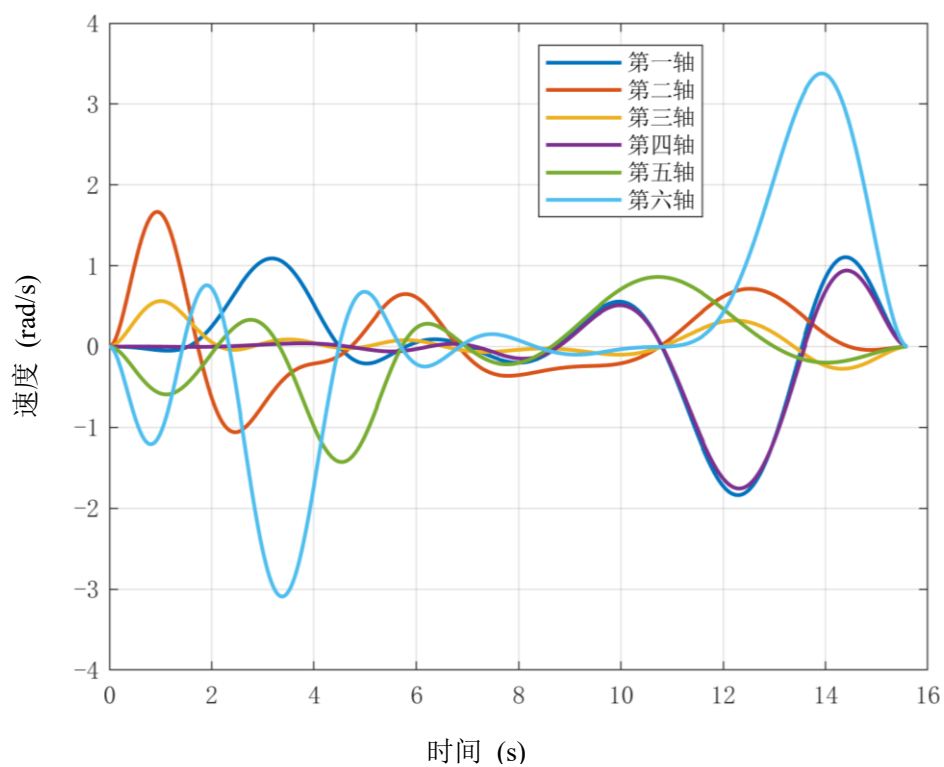


图 5-5 各轴速度变化

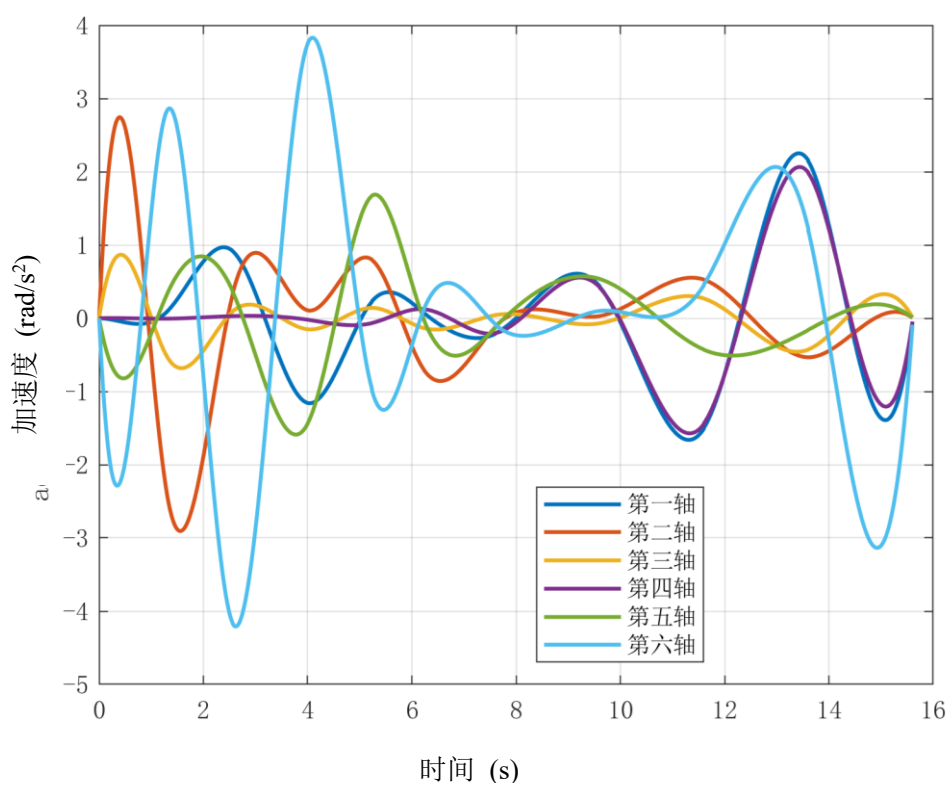


图 5-6 各轴加速度变化

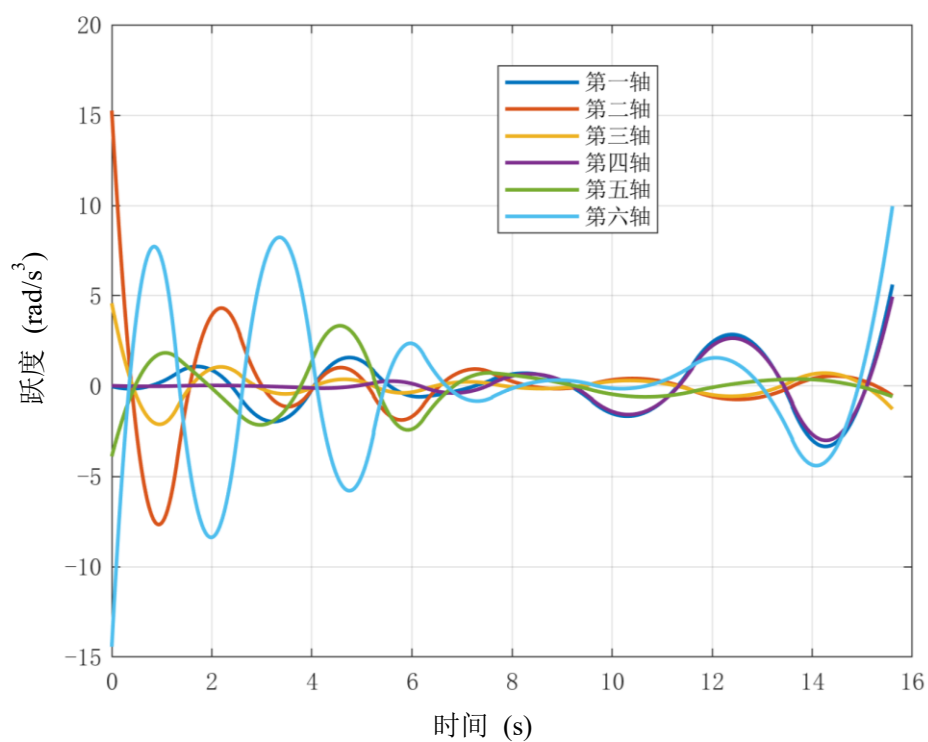


图 5-7 各轴跃度变化

由机器人各轴运动数据可知，通过五次 B 样条和改进灰狼算法对机器人进行路径规划，不仅减少了运行时间和能耗，同时机器人各个关节的轨迹平稳连贯，对机器人关节冲击较小。

5.6 本章小结

（1）基于五次 B 样条曲线，实现了机器人装配路径的基本轨迹规划，提高机器人轨迹的平滑性。

（2）建立了以装配时间和能耗为优化目标的数学模型，并结合机器人运动学约束，确保了规划路径的可行性和运动的平稳性。

（3）采用改进灰狼优化算法，结合动态参数调整和自我适应权重策略，以提升算法的全局搜索能力和收敛速度，优化后机器人运行时间减少 38.1%，能耗降低 34.9%。

第 6 章 总结与展望

6.1 总结

围绕机器人在多工序装配场景中的实际应用需求,从装配系统设计、数字孪生系统构建、虚实数据交互到路径规划优化,开展了系统性研究,建立了一个具有装配流程协同能力与装配路径智能优化能力的工业机器人装配系统。主要研究成果如下:

1. 针对多工序装配任务需求,设计了机器人装配系统的整体架构,完成了关键部件的选型与结构设计。通过工艺流程对比选择更高效的方案,减少机器人待机时间;针对纪念币与卡扣分别设计夹爪,进行了有限元分析,夹持力范围为 4.704-23.52 N,最大应力 11.635 MPa,最大形变 0.58093 mm,满足抓取稳定性要求;设计了卡扣顶紧机构,气缸的最小理论输出力为 90 N,验证其能够稳定固定卡扣并确保装配顺利进行。

2. 基于五维数字孪生系统架构,构建了机器人多工序装配虚拟系统。虚拟系统开发采用 Python 脚本建模,构建了机器人、传送带、夹具等核心设备的数字孪生体,以 MDH 方法建立工业机器人的运动学模型,验证机器人正逆运动学求解一致性,末端位姿位置误差在 $\pm 0.1^\circ$ 范围内,确保数字模型在装配空间中的准确性,支撑虚拟装配流程构建与轨迹验证。

3. 搭建了多工序装配系统的虚实交互平台,提出基于 Siemens S7 协议与 Socket 通讯协议的双通道数据交互架构,实现虚拟设备与物理设备的信号同步、运动状态映射与控制指令响应,系统最大通信延迟为 24.2 ms,实现装配过程状态的高效同步;通过虚实联动验证虚拟模型的映射效果,实时获取工业机器人三维空间运行轨迹和机器人运行角度值变化,为装配路径的优化实验提供了有效平台支撑。

4. 针对机器人装配路径规划问题,提出以装配时间和能耗的双目标函数的优化模型,结合机器人关节速度、加速度和跃度等运动学约束,确保机器人轨迹的物理可行性,引入改进灰狼优化算法,加入动态收敛因子和自适应权重调整策略,以提升算法收敛速度与全局寻优能力,改进灰狼优化算法在多工序装配场景下能在更少迭代次数内收敛至优解,相比于传统在线示教编程装配路径运行时间减少 38.1%,能耗降低 34.9%。

6.2 展望

目前的工作在数字孪生和工业机器人路径优化方面取得了一定的研究成果，但仍存在进一步优化和改进的空间。未来的研究可以在以下两个方面进行深入探索：

1. 当前的数字孪生系统主要用于装配过程的仿真与优化，未来可结合机器学习和大数据分析，进一步拓展其功能，使系统具备自我学习、故障预测和智能优化能力，推动智能制造向更高层次发展。
2. 当前工作针对纪念币产品进行分析，后续将进一步应用于更多工业产品装配，对装配系统的普适性、稳定性和应用可行性进行深入验证，以推动数字孪生装配系统的实际落地应用。

参考文献

- [1] 罗瑞平,盛步云,黄宇哲,等.基于数字孪生的生产系统仿真软件关键技术与发展趋势[J].计算机集成制造系统, 2023,29(06):1965-1982.
- [2] 徐朋月,刘攀,郑肖飞.数字孪生在制造业中的应用研究综述[J].现代制造工程, 2023(02):128-136.
- [3] 杨一帆,邹军,石明明,等.数字孪生技术的研究现状分析[J].应用技术学报, 2022,22(02):176-184+188.
- [4] 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(09):137-145.
- [5] 陶飞,张贺,戚庆林,等.数字孪生模型构建理论及应用[J].计算机集成制造系统, 2021,27(01):1-15.
- [6] Tao F, Xiao B, Qi Q, et al. Digital twin modeling[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2022, 64: 372-389.
- [7] Rasheed A, San O, Kvamsdal T. Digital twin: Values, challenges and enablers from a modeling perspective[J]. IEEE access, 2020, 8: 21980-22012.
- [8] Thelen A, Zhang X, Fink O, et al. A comprehensive review of digital twin—part 1: modeling and twinning enabling technologies[J]. Structural and Multidisciplinary Optimization, 2022, 65(12): 354.
- [9] 董雷霆,周轩,赵福斌,等.飞机结构数字孪生关键建模仿真技术[J].航空学报, 2021,42(03):113-141.
- [10] 郭飞燕,刘检华,邹方,等.数字孪生驱动的装配工艺设计现状及关键实现技术研究[J].机械工程学报, 2019,55(17):110-132.
- [11] Liu S, Bao J, Lu Y, et al. Digital twin modeling method based on biomimicry for machining aerospace components[J]. Journal of manufacturing systems, 2021, 58: 180-195.
- [12] Zhang H, Qi Q, Ji W, et al. An update method for digital twin multi-dimension models[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2023, 80: 102481.
- [13] 肖通,江海凡,丁国富,等.五轴磨床数字孪生建模与监控研究[J].系统仿真报, 2021,33(12):2880-2890.

- [14] 柳林燕,杜宏祥,汪惠芬,等.车间生产过程数字孪生系统构建及应用[J].计算机集成制造系统, 2019,25(06):1536-1545.
- [15] 朱庆,张利国,丁雨淋,等.从实景三维建模到数字孪生建模[J].测绘学报, 2022,51(06):1040-1049.
- [16] 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(06):1307-1319.
- [17] Gao Y, Meng J, Shu J, et al. BIM-based task and motion planning prototype for robotic assembly of COVID-19 hospitalisation light weight structures[J]. Automation in Construction, 2022, 140: 104370.
- [18] Johan Wessén, Mats Carlsson, Christian Schulte, et al. A constraint programming model for the scheduling and workspace layout design of a dual-arm multi-tool assembly robot[J]. Constraints, 2023, 28: 71-104.
- [19] Jiang J, Yao L, Huang Z, et al. The state of the art of search strategies in robotic assembly[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2022, 26: 100259.
- [20] 张鑫淼.面向装配机器人抓取的点云配准技术研究[D].唐山:华北理工大学, 2024.
- [21] Apolinarska A A, Pacher M, Li H, et al. Robotic assembly of timber joints using reinforcement learning[J]. Automation in Construction, 2021, 125: 103569.
- [22] Fengming Li, Qi Jiang, Sisi Zhang, et al. Robot skill acquisition in assembly process using deep reinforcement learning[J]. Neurocomputing, 2019, 345: 92-102.
- [23] Arne Bilberg, Ali Ahmad Malik. Digital twin driven human-robot collaborative assembly[J]. Cirp Annals, 2019, 68: 499-502.
- [24] 徐健,刘高峰,赵一剑,等.装配机器人的数字孪生虚实同步及抓取方法[J].系统仿真学报, 2024, 36 (09):2181-2192.
- [25] 吴文荣,胡益玮,杨毅.复杂微器件柔性装配机器人控制系统设计与实现[J].机械设计与研究, 2024(02):79-84.
- [26] 范祺,蔡玉强,贾思楠.多种方法的工业机器人路径规划与仿真[J].华北理工大学学报(自然科学版), 2022, 44(04):60-67.

-
- [27] Berenson D, Abbeel P, Goldberg K. A robot path planning framework that learns from experience[C]. International Conference on Robotics and Automation. New York: IEEE, 2012: 3671-3678.
 - [28] Ding J, Zhou Y, Huang X, et al. An improved RRT* algorithm for robot path planning based on path expansion heuristic sampling[J]. Journal of computational science, 2023, 67: 101937.
 - [29] 张立付.基于灰狼优化算法的茶叶采摘机械臂路径规划研究[D].合肥:安徽农业大学, 2023.
 - [30] 吴丹.工业六轴机械臂路径规划与轨迹优化研究[D].赣州:江西理工大学, 2023.
 - [31] 詹博文,郭瑞科,龚宇莲,等.面向轴孔装配任务的双臂机器人控制策略[J].空间控制技术与应用, 2025,51(01):85-95.
 - [32] 王战玺,张益铭,张邦海,等.双机器人协作轴孔装配力柔顺控制技术研究[J].机械工程学报, 2024,60(03):20-33.
 - [33] 陈书清,李铁民.基于自适应柔顺控制的航天器部件装配[J].清华大学学报(自然科学版), 2023,63(11):1808-1819.
 - [34] 王耀南,江一鸣,姜娇,等.机器人感知与控制关键技术及其智能制造应用[J].自动化学报, 2023,49(03):494-513.
 - [35] 陈瞭,肖步崧,肖辉.ABB 工业机器人二次开发与应用[M].北京:电子工业出版社, 2021:12-54.
 - [36] 杨代静.流程型生产线可视化管控系统研究与应用[D].成都:西南交通大学, 2022.
 - [37] Levitin G, Rubinovitz J, Shnits B. A genetic algorithm for robotic assembly line balancing[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168(3): 811-825.
 - [38] Kousi N, Gkournelos C, Aivaliotis S, et al. Digital twin for adaptation of robots' behavior in flexible robotic assembly lines[J]. Procedia manufacturing, 2019, 28: 121-126.
 - [39] Ji Z, Liu G, Xu W, et al. Deep reinforcement learning on variable stiffness compliant control for programming-free robotic assembly in smart manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2024, 62(19): 7073-7095.

- [40] 刘娟,雷翔霄,袁佳俊,等.基于数字孪生的智能分拣装配生产线设计[J].电子制作, 2024,32(19):64-67.
- [41] 左文娟,宁萌,王琨,等.基于数字孪生的机器人工程专业虚拟仿真实践平台设计[J].实验室研究与探索, 2024,43(03):6-11.
- [42] 苏建,慕存强,任善剑,等.基于 NX MCD 的工业机器人视觉分拣数字孪生系统设计[J].机床与液压, 2023,51(23):73-79.
- [43] 邵林昌.基于数字孪生的双臂机器人目标抓取与协作系统[D].西安:西安理工大学, 2023.
- [44] 王辰阳.工业机器人数字孪生系统的设计与实现[D].南京:南京信息工程大学, 2023.
- [45] 王磊.基于数字孪生的机械臂状态监测技术研究[D].济南:齐鲁工业大学, 2023.
- [46] 孙学民,刘世民,申兴旺,等.数字孪生驱动的高精密产品智能化装配方法[J].计算机集成制造系统, 2022,28(06):1704-1716.
- [47] 王建军,向永清,何正文.基于数字孪生的航天器系统工程模型与实现[J].计算机集成制造系统, 2019,25(06):1348-1360.
- [48] Matulis M, Harvey C. A robot arm digital twin utilising reinforcement learning[J]. Computers & Graphics, 2021, 95: 106-114.
- [49] Maruyama T, Ueshiba T, Tada M, et al. Digital twin-driven human robot collaboration using a digital human[J]. Sensors, 2021, 21(24): 8266.
- [50] Hu X, Assaad R H. A BIM-enabled digital twin framework for real-time indoor environment monitoring and visualization by integrating autonomous robotics, LiDAR-based 3D mobile mapping, IoT sensing, and indoor positioning technologies[J]. Journal of building engineering, 2024, 86: 108901.
- [51] Müller M, Ruppert T, Jazdi N, et al. Self-improving situation awareness for human-robot-collaboration using intelligent Digital Twin[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35(5): 2045-2063.
- [52] 吴腾,刘金杰.基于 PINNs 的欧拉梁数字孪生模型构建[J].数字制造科学, 2024, 22(04):305-309.

-
- [53] Hananto A L, Tirta A, Herawan S G, et al. Digital twin and 3D digital twin: concepts, applications, and challenges in industry 4.0 for digital twin[J]. Computers, 2024, 13(4): 100.
 - [54] 梅乐,黄华,支晓波,等.基于数字孪生模型的轮廓误差估计和预补偿方法[J].计算机集成制造系统, 2024, 30(11):3825-3835.
 - [55] 任彬,汪小雨.基于点云配准的航空发动机数字孪生模型构建[J].机械设计与制造, 2024(03):234-238.
 - [56] 闫纪红,姬思阳.大数据驱动的车间数字孪生模型构建方法[J].机械工程学报, 2023,59(12):62-77.
 - [57] 谢洁瑜.指尖陀螺生产线数字孪生模型构建与集成交互研究[D].广州:华南理工大学, 2023.
 - [58] 张春霖,周婷婷,胡天亮,等.刀具切削变工况数字孪生模型构建方法[J].计算机集成制造系统, 2023,29(06):1852-1866.
 - [59] 陆剑峰,徐煜昊,夏路遥,等.数字孪生支持下的设备故障预测与健康管理办法综述[J].自动化仪表, 2022,43(06):1-7+12.
 - [60] 闫深义.焊接机器人数字孪生模型构建与演化[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2021.
 - [61] 杜莹莹,罗映,彭义兵,等.基于数字孪生的工业机器人三维可视化监控[J].计算机集成制造系统, 2023,29(06):2130-2138.
 - [62] 耿琦琦.基于数字孪生仿真建模的机器人状态监测技术研究[D].重庆:重庆邮电大学, 2019.
 - [63] Choudhary R, Singh S, Das P, et al. A higher order stable numerical approximation for time - fractional non - linear Kuramoto - Sivashinsky equation based on quintic B - spline[J]. Mathematical Methods in the Applied Sciences, 2024, 47(15): 11953-11975.
 - [64] Zhu C, Zhang J, Yang J. Grain condition inspection: one improved grey wolf algorithm for nodes deployment optimization combining with path planning of multi-inspection robots[J]. Soft Computing, 2024, 28(20): 11971-11986.

- [65] Najm H T, Ahmad N S, Al-Araji A S. Enhanced path planning algorithm via hybrid WOA-PSO for differential wheeled mobile robots[J]. Systems Science & Control Engineering, 2024, 12(1): 2334301.
- [66] 孙波,周健康,赵玉清,等.基于改进灰狼优化算法的机器人全局路径规划[J].科学技术与工程, 2024,24(33):14287-14297.
- [67] 刘晴晴.灰狼算法的改进及在机器人路径规划中的应用[D].郑州:河南大学, 2022.
- [68] 巫光福,万路萍.粒子群算法优化机器人路径规划的研究[J].机械科学与技术, 2022,41(11):1759-1764.
- [69] 支金柱,黄姣茹,郭婧,等.基于改进粒子群优化算法的路径规划[J].自动化与仪表, 2020,35(04):34-38.
- [70] Cui J, Wu L, Huang X, et al. Multi-strategy adaptable ant colony optimization algorithm and its application in robot path planning[J]. Knowledge-Based Systems, 2024, 288: 111459.

攻读硕士学位期间发表的学术论文及成果

学术论文：

史瑞方,钟相强,谢云飞,等.航空相机位移稳像机构设计与算法控制[J].安徽工程大学学报.(录用)

专利：

- [1] 谢云飞,孙开亮,史瑞方,等.一种优化 4 自由度并联机器人奇异性的方法[P].中国专利: CN116713975A.2023-09-08.(发明在审)
- [2] 谢云飞,孙开亮,史瑞方,等.一种脚踝康复机器人及其控制系统[P].中国专利:CN117598884A.2024-02-27.(发明在审)
- [3] 谢云飞,孙开亮,史瑞方,等.一种可实时重力补偿的肩肘关节康复训练装置[P].中国专利:CN118526769A.2024-08-23.(发明在审)
- [4] 魏旌源,钟相强,史瑞方,等.一种三轴装饰盒组装设备[P].中国专利:CN117718712A.2024-03-19.(发明在审)
- [5] 史瑞方,钟相强,孙开亮,等.一种金币、钥匙扣抓取用快换夹爪机构[P].中国专利:CN221850216U.2024-10-18.(实用新型)
- [6] 谢云飞,孙开亮,史瑞方.一种脚踝康复机器人[P].中国专利:CN221787188U.2024-20-01.(实用新型)

获奖情况：

- [1] 第二十五届中国机器人及人工智能大赛 国赛二等奖（第一负责人）；
- [2] 第十七届“西门子杯”中国智能制造挑战赛 省赛一等奖（第一负责人）；
- [3] 第十八届挑战杯黑科技展示活动 省赛二等奖（第一负责人）；
- [4] 第九届安徽省“互联网+”大学生创新创业大赛 铜奖（第一负责人）；
- [5] 第十八届“西门子杯”中国智能制造挑战赛 国赛一等奖（第一负责人）。

致 谢

行文至此，意味着我的硕士求学生涯即将画上句点。回首这段充满挑战与成长的旅程，无数感激涌上心头。

首先，谨以最诚挚的敬意感谢我的导师钟相强教授。钟老师渊博的学术造诣、严谨的治学态度和敏锐的科研洞察力，为我树立了终身学习的榜样。从论文选题的反复推敲到实验设计的层层把关，从数据分析的耐心指导到文稿修改的逐字批阅，您倾注的心血让我深刻体会到“师者如光”的真谛。生活中，您谦和包容的处世哲学和乐观豁达的人生态度，更让我领悟到为学与为人的平衡之道。

衷心感谢课题组的师兄师姐和同窗挚友们。难忘组会上激烈的学术争鸣，更怀念深夜实验室里互相鼓励的温暖时光。你们既是学术道路上的同行者，更是我青春记忆里最明亮的星辰。感谢漫漫求学路上，每一位给予我帮助的人，越过风雨无数，陪伴我走过这段路程。

最深沉的谢意献给我的家人。感谢父母数十年如一日毫无条件的支持，你们用朴实的爱为我筑起追逐梦想的堡垒；感谢长辈给予我的关心和爱护，帮助我不断提高自己。

最后，向所有参与论文评审及答辩的专家教授致以谢意，感谢你们宝贵的建议与指正。

求学之路虽暂告段落，但师友亲恩必将长存心间。惟愿以此为起点，继续探索学术与人生的无限可能。

尚德敏学 唯实惟新

