

附件 2

江苏省高等学校
大学生创新创业训练计划项目申报表
(创新训练项目)

推 荐 学 校 : 南京信息工程大学 (盖章)

项 目 名 称 : 五元数智——数字孪生革新者

推 荐 项 目 级 别 : ☐ 国家级
☒ 省级

所属一级学科名称: 工学

所属重点领域:

项 目 负 责 人 : 林啸

联 系 电 话 : 15962981881

指 导 教 师 : 梅润杰

联 系 电 话 : 15268155659

申 报 日 期 : 2024 年 4 月

江苏省教育厅 制

二〇二四年三月

填表说明

一、申报表要按照要求逐项认真填写，填写内容必须实事求是表述准确严谨。空缺项要填“无”。

二、格式要求：表格中的字体采用小四号宋体，单倍行距；需签字部分由相关人员以黑色钢笔或签字笔签名。

三、项目推荐类型为国家级项目、省级项目等。

四、项目来源：1. “A”为学生自主选题，来源于自己对课题的长期积累与兴趣；“B”为学生来源于教师科研项目选题；“C”为学生承担社会、企业委托项目选题。
2. “B”和“C”需填写“来源项目名称”和“来源项目类别”栏；“来源项目类别”栏填写“863 项目”、“973 项目”、“国家自然科学基金项目”、“省级自然科学基金项目”、“教师横向科研项目”、“企业委托项目”、“社会委托项目”以及其他项目标识。

五、所属重点领域：**国家级项目选填**，如果属于重点领域的则填报。具体包括 10 类：泛终端芯片及操作系统应用开发；云计算人、人工智能和无人驾驶；新材料及制造技术；新能源与储能技术；生物技术与生物育种；绿色环保与固废资源化；新一代通信技术、千兆光网技术和新一代 IP 网络通信技术；生物医学工程与精准医学、脑科学和类脑计算；城乡治理与乡村振兴；社会事业与文化遗产。

六、表格栏高不够可增加。

七、填报者须注意页面的排版。

项目名称		五元数智——数字孪生革新者						
项目所属一级学科		工学			项目所属二级学科	电子信息类		
所属重点领域		(国家级项目选填)						
项目来源		A	B	C	来源项目名称	来源项目类别		
			√		基于五维模型下的数字孪生车间	教师横向科研项目		
项目实施时间		起始时间：2024 年 4 月 完成时间：2025 年 4 月						
项目简介 (限 200 字)		<p>致力于打造出基于五维模型理论下的数字孪生车间。利用 Unity 打造了制造业自动化生产线数字孪生平台，对生产线设备进行了孪生建模，建立了设备专业模型库，完成了虚拟生产线的搭建。基于 TCP/IP 通信协议实现了西门子 PLC 与 Unity 平台的数据通信，并完成了物理世界与虚拟世界的数字孪生模型间的数据交互。</p> <p>此外，针对大规模自动化设备当下存在虚实同步传输数据，车间调度、故障检测和运维等方面存在的问题，创新性地提出了三项创新点：基于 EPS32 构建嵌入式 OPC UA 实现多异构数据的采集与解析、基于布谷鸟算法改进粒子群优化算法求解车间调度问题、基于人工智能的大规模自动化车间阵列式故障定位策略软硬件设计。</p> <p>通过搭建数字孪生平台，模拟了生产中制造加工的流程，验证创新点的优越性，切实实现生产线全流程的可视化，方便更好地了解生产线的运行状态，及时发现和解决实际运行中出现的问题。</p>						
申请人或申请团队		姓名	年级	学号	所在院系/专业	联系电话	QQ 邮箱	
	主持人	林啸	2022 级	202283460067	人工智能学院 人工智能专业	15962981881	575624158@qq.com	
		成员	李珺一	2022 级	202283400038	教师教育学 汉语言文学（师范）专业	15895873121	1105717370@qq.com
			赵梓含	2023 级	202383260127	商学院 工商管理类	19895985992	3207145799@qq.com
			王海垠	2023 级	202383250025	自动化院 数据科学与大数据技术专业	18114724875	2993006961@qq.com
			朱逸轩	2023 级	202313090050	人工智能学院 信息工程专业	18851418735	2910268404@qq.com

指 导 教 师	第一指导教师	姓名	梅润杰	单位	校团委
		年龄	31	专业技术职务	控制工程讲师
	主要成果		1. 科研成果：指导老师在科研领域拥有丰富的经历，参与并主持了多项重要科研项目，发表核心期刊以上论文 10 余篇，授权发明专利 7 项，对于数字孪生技术在工程、制造、医疗等领域的应用具有深刻的理解和丰富的实践经验。 2. 竞赛成果：“第 17 届挑战杯全国大学生课外学术科技作品竞赛主赛道省级一等奖”、“第 18 届挑战杯黑科技专项赛道国家级二等奖”、“第 18 届挑战杯揭榜挂帅赛道国家级三等奖”、“第九届互联网+全国大学生国际创新创业大赛主赛道国家级二等奖”等。		

一、申请理由

1. 我深度钻研数字孪生技术。数字孪生技术通过创建物理对象的虚拟副本，实现实时监控和预测。这项技术涉及物理实体、虚拟模型和数据连接三个核心组成部分，确保信息同步，以便于分析和优化。关键技术包括高精度建模、实时数据采集与传输、数据处理、双向映射和智能决策。数字孪生在制造业、医疗等领域提高效率，预测维护需求，促进可持续运营。

2. 我掌握相关的工程软件和仿真工具，能够进行数字建模和数据分析。同时具备良好的团队合作精神，能够与队友有效沟通和协作。有创新意识和解决问题的能力，能够提出新颖的想法和解决方案。基于对数字孪生车间和智能制造有浓厚的兴趣，愿意深入研究和探索新技术。

3. 已获得第十八届“挑战杯”江苏省大学生课外学术科技作品竞赛黑科技专项赛国赛二等奖

4. 希望基于该项目研究发表一篇软件著作权专利、一篇实用新型专利，一篇发明专利。

二、项目方案

1、研究背景

随着科学技术的不断发展，面向制造行业的计算机和机器人技术也在日益向前迈进，智能制造逐渐成为了全球制造行业转型升级的必经之路，制造产线的智能化也成为世界各大工业强国的首选政策，互联网技术的高速发展与工业制造的转型使得智能制造逐步成为现实。

数字孪生技术在国外的发展相对于国内起步较早。2013 年，德国便通过工业博览会向世界宣布与智能制造相关的“工业 4.0”概念，其目的是摆脱传统制造业桎梏，提升制造业的智能化水平。早在“阿波罗登月计划”中便已经提出了一种关于“数字孪生体”的概念，为登月前进行了一定的装备实验。该“数字孪生体”依然是以实物的方式存在，并不是虚拟化状态，但该孪生体具备了一定的整体性和写实性。从德国提出“工业 4.0”的概念到美国成立其工业互联网的核心框架无不将数字孪生技术作为其架构的核心技术。LMT 公司作为美国国防的承包商，同样将数字孪生技术作为今后美国国防科技发展以及航空工业的重中之重。2013 年，Lee 等通过数字孪生技术实现孪生体在云端和现实中同步运行的过程，同时结合工业大数据信息对制造产线运行过程中的健康状况进行实时监测。德国 SIEMENS 公司运用数字孪生技术来完善以德国“工业 4.0”为概念的工业应用软件，同时于 2017 年正式发布一套完整的关于数字孪生体的工业应用模型。2016 年，美国 GE 公司在数字孪生技术的基础上推出了一款 Predix 软件，该软件面向全球各个不同的工业领域，使用 SaaS 功能层向各个公司或机构提供其数字孪生服务平台。数字孪生技术在一定基础上使得生产制造产品周期处于一个良性循环中，并引导工业领域机构建构出一套完整且不断实现产品创新的流程。美国 ANSYS 公司运用其下各 CAE 仿真软件基础，于 2018 年向全球推出 TwinBuilder 平台，其功能是协助用户实现在设备运行过程中可能会出现故障进行提前诊断以及确定合适的处理方案，从而优化工业设备的性能，并将设备运行过程中的数据传输到工业互联网中，推动工业设备的更新。在数字孪生迅猛发展的时代，各个不同机构或公司对于数字孪生有着不同的释义，表 1 给出了不同时间不同机构对于数字孪生的不同定义。数字孪生本质上是一种高准确性、高融合性的虚实结合技术，以各仿真软件为运行基础，通过建模软件、仿真软件以及编程控制软件对物理世界中的实物进行虚拟化，并实现实物在虚拟段精确和稳定的展现，对实物进行动态监测。而数字孪生技术的框架则是基于真实物理世界与虚拟空间中数据之间的交互，完成两者之间的紧密结合，通过对工业互联网中数据的采集、传输以及真实建模的同时对设备以及产品进行分析与预测，建立一套合适并且能够符合当前环境运行的数字孪生构造系统。

表 1 不同时间不同组织机构对数字孪生的定义

组织机构(时间)	数字孪生的定义
美国 AFRL 实验室(2009 年)	对飞机的机身进行数字孪生构造出的机身孪生体集合了机身信息、机身模型以及机身仿真的平台系统,该系统可以针对飞机机身进行全周期的状态仿真,从而对机身可能存在的故障进行实时检测和实现对飞机状态的预测
美国国家航空航天局 (2012 年)	数字孪生实际是通过对实际的模型构造,采集实物数据以及实物运行状态的过程,是融合了多学科的一种仿真方法,它可以对实物进行全周期的实时仿真
美国通用电气有限公司 (2015 年)	数字孪生实现就是实物在仿真状态下的实时运动过程展示,从而用于工业设备的性能迭代更新
德国 SIEMENS 公司 (2016 年)	数字孪生是对工业制造中产品或者制造产线的模型进行准确虚拟化,可以用来对产品或设备的全生命周期进行模拟仿真,从而达到优化实物的功能
美国 ANSYS 公司(2018 年)	数字孪生是利用安装在真实系统上的传感器数据作为该仿真模型的边界条件,实现真实世界的系统与数字世界的系统运行性能完全一致
安世亚太科技股份有限公司 (2019 年)	存在或者即将出现的实物的三维模型,可以通过测量、仿真以及数据交互从而实现对实物整个周期的感知,以此为基础创建合适优化方式与指令,改进实物的运行逻辑与过程 ^[13]

我们所研究的支持大规模自动化制造场景和孪生数据实时驱动的数字化工厂关键技术。对自动化车间运行过程中对信号进行收集,反馈至虚拟端的工站中,从而实现真实物理世界和数字世界之间的相同映射。在数字孪生生产线中实现检测分析,质量优化,生产制造优化。

五维模型下的智能数字孪生车间实现了电器化产品的个性化定制、智能生产、智能装配、激光打标、包装和仓储等一系列功能。

2、项目研究目标及主要内容

以融合和使用新一代信息技术(如云计算、物联网、大数据、移动互联、人工智能等)为目标,建设智能工厂和智能车间,开展智能生产,以满足社会化、个性化、服务化、智能化、绿色化等制造发展需求和趋势,从而实现真正的智能制造,迎合当前各国提出的先进制造战略和制造模式(如工业 4.0、工业互联网、基于 CPS(cyber-physical systems)的制造和 Cyber-Manufacturing、中国制造 2025、互联网+制造、面向服务的制造或服务型制造、云制造等)。

实现该目标的瓶颈之一是如何实现制造的物理世界和信息世界之间的交互与共融。车间是制造活动的执行基础,从车间的生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等角度分析和探讨解决上述瓶颈问题的新途径。从物理空间和信息空间的维度对车间的生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制进行分析,车间的发展当前主要经历了以下 3 个阶段。第一阶段:车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等仅限于物理空间。第二阶段:随着计算机和信息技术的引入和使用,车间信息空间诞生,使得在信息空间开展车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等成为可能,且其范围、程度、功能等不断增强,但此阶段车间的物理空间和信息空间彼此相对独立,缺少交互。第三阶段:车间物理空间与信息空间开始交互且不断增强,但主要是通过人为操作实现,

缺乏连续、实时的交互和融合。具体分析如下。

2.1 车间生产要素管理

近年来，随着物联网技术的成熟和应用，通过在车间部署无线射频识别、智能仪表、条形码等，实现了刀具、物料、在制品等生产要素数据的自动采集，实现了上述系统数据的在线录入，同时实现了信息系统数据与生产要素实时有关数据的同步。由于车间信息空间与物理空间的数据缺乏融合，尤其在使用过程中缺少实时交互与融合，导致生产要素管理的智能性、主动性、预测性比较差，无法满足工业 4.0 等先进制造模式对智能生产、智能车间和智能工厂的要求。

2.2 车间生产活动计划

生产活动计划是指在满足时间、成本、质量等指标要求和约束的前提下，综合考虑各要素本身及其能力的限制，对生产活动进行组织、规划与安排。针对以上问题，引入计算机、信息、建模等技术，使得在计算机上开展基于数学模型的生产活动计划成为可能。这种方式借助计算机强大的处理能力，可同时考虑多方因素对生产活动进行多方案的综合性规划，并不断优化得到比较科学的优化方案，大幅度提高了效率，降低了对人的依赖，且能适应逐渐扩大的生产规模。但生产活动计划往往局限于产前阶段，多是静态的，缺乏对实际生产中扰动因素的考虑。近年来，随着车间信息空间与物理空间交互的增强，生产活动计划逐渐以动态方式产生，有效解决了以上问题。它通过实时采集人员、设备、物料等数据，对生产活动计划的实施情况进行动态跟踪，并根据扰动对原有计划及时做出调整。虽然这种方式增强了生产活动计划的适应性及抗扰动性，但是由于缺乏能同时刻画和反映生产要素数据和信息数据的融合数据，生产活动计划的预见性、联动性、智能性等依然较低，无法满足智能生产要求。

2.3 车间生产过程控制

车间生产过程由生产要素及其衍生的生产活动构成。车间生产过程控制是指为了满足产品质量需求（如精度）、客户需求（如交货期）、企业自身需求（如利润）等，对生产过程中的人员、设备、物料、产品等进行监测、分析及优化控制的过程。由于车间物理空间与信息空间数据的不同步，生产过程控制往往存在较大的延迟，造成与实际生产相脱节。随着物联网技术的发展及其在制造业中的广泛应用，大大增强了生产过程的实时数据采集能力。结合物联网对生产过程数据的实时采集能力，制造执行系统能够对实时事件做出及时处理，提高了生产过程控制的实时性，在一定程度上解决了以上问题。但是，当前车间生产过程控制的智能性及全局优化能力依然不足，尚需车间信息空间与物理空间的进一步融合。

数字孪生作为实现物理世界与信息世界实时交互和融合的一种有效方法。近期被提出并被广泛关注。本研究课题设计一套五维数字化车间，并对数字孪生车间的系统组成、

运行机制、特点、关键技术等进行研究和阐述，打造全新的车间孪生数据的车间物理世界和信息世界交互与共融的新一代支持大规模自动化制造场景和孪生数据实时驱动的数字化车间。

3、项目创新特色概述

3.1 基于EPS32 构建嵌入式OPC UA实现多源异构数据的采集与解析

在数字孪生车间中，由于虚拟车间对物理车间高拟真化仿真需求，对车间数据采集的要求也更高。一方面除了对车间制造资源的刻画维度和深度需要更丰富细致的数据；另一方面为实现虚拟车间与物理车间运行同步一致，需要采集大量的车间制造流程数据。从实际应用来看，物联网技术的发展为满足这种需求提供了有效途径。随着物联网技术与先进制造技术相互融合渗透，尤其是（无线）传感器与（无线）传感器网络、数字成像技术、嵌入式系统成套设备、边云网络架构技术等等软硬件技术与设备的发展，衍生出了一种新型的信息化制造服务模式——制造物联，该模式将为数字孪生车间信息感知与融合提供支持。本研究在构建科学高效的数字孪生车间，为后续调度决策提供充分的数据支撑中，制造车间内 $P_i = (p_i^1, p_i^2, \dots, p_i^N)$, $i = 1, 2, \dots, M$ 的信息感知与融合是重要的基础支撑和保障。本章将主要分析数字孪生车间信息感知与融合的需求及相关关键技术，并设计面向数字孪生车间的数据感知融合平台，为后续研究提供数据来源支撑。

3.2 基于布谷鸟算法改进粒子群算法对车间调度问题优化

3.2.1 粒子群算法（PSO）

可以使得群体在问题的求解空间中产生一种从无序到有序的过程，从而获得问题的可行解。将鸟类种群中的每一个个体都当做一个“粒子”，整个鸟类种群看做一个粒子群。假设有 M 个粒子的粒子群在 N 维空间内寻找最优位置，由此可以为每一个粒子赋予一个“位置”。设 $X_i = (x_i^1, x_i^2, \dots, x_i^N)$, $i = 1, 2, \dots, M$ 为第 i 个粒子的 N 维位置矢量，对于每一个例子而言， X_i 是问题的一个潜在解，代表在该位置鸟类能寻找到事物的可能性有多大，根据适应度函数计算 X_i 当前的适应值，可以用来衡量该粒子的优劣程度。在每一次计算的过程中，可以记录下第 i 个粒子当前最好的位置，记为

在本次搜寻过程中,记录下所有粒子中最好的位置的最优解,并将此解作为本次搜寻过程中的全局最优解,记为

$$G_i = (g_i^1, g_i^2, \dots, g_i^N), i = 1, 2, \dots, M$$

鸟类进行沟通之后,会反复寻找最佳位置,由此,粒子群算法经过不断地迭代,会不断地逼近整个算法的全局最优解,在每一次迭代过程中,需要对每个的速度和位置进行更新,将第*i*个粒子的速度记为 $V_i = (v_i^1, v_i^2, \dots, v_i^N), i = 1, 2, \dots, M$ 此时,粒子将根据公式 (3.1) 对其速度和位置进行更新.

$$\begin{cases} v_i^d = wv_i^d + c_1r_1(p_i^d - x_i^d) + c_2r_2(p_g^d - x_i^d) \\ x_i^d = x_i^d + \vartheta v_i^d \end{cases} \quad (3.1)$$

其中, $i = 1, 2, \dots, M; d = 1, 2, \dots, N$, w 是惯性因子,对算法起收敛作用,用于平衡局部搜索和全局搜索, p_i 和 p_g 分别是局部最优位置和全局最优位置, r_1 和 r_2 是 (0, 1) 之间的随机数,用于保持种群的随机性, c_1 和 c_2 是非负常数,用于调整局部最优值和全局最优值权重,若 c_1 为 0,则说明搜索过程中只有粒子自身的经验而没有来自环境的社会经验,容易陷入局部最优解,若 c_2 为 0,则说明在搜索过程中没有粒子自身的经验而只有来自环境的社会经验,代表粒子之间陷入局部最优解之后无法跳出局部最优解. 一般情况下,需要对粒子的速度进行限制, $v_i^d \in [-v_{max}^d, v_{max}^d]$, 若粒子的速度在更新之后超过最大速度,则需要根据不同的情况对优化问题进行不同的设定。

一般而言,PSO 算法是一种基于自身经验和社会经验不断学习的算法,它具有较强的通用性,且群体在进行搜索时具有记忆能力,粒子间联系紧密,学习能力较强,也可以根据问题的规模自动调整学习速度,搜索速度较快,原理较为简单,但其局部搜索能力较差,搜索的精度有待提高,而且容易因为参数的设置问题而陷入局部最优解,所以针对粒子群算法的特点,将遗传算法中的遗传算子引入粒子群算法中,在粒子陷入局部最优解的过程中对粒子进行交叉变异,从而可以使得 PSO 算法跳出局部最优解。

3.2.2 基于布谷鸟算法的改进的粒子群寻优

本研究主要采用改进粒子群算法对 FJSP 问题进行求解,针对粒子群算法中的惯性因子进行自适应调整,在算法运行过程中,将遗传算法中的遗传算子引入粒子群算法中,提高算法的深度寻优能力。

3.2.3 惯性因子调整策略

首先针对惯性因子采取自适应调整策略,基本的粒子群算法的惯性因子是固定的,在 PSO 算法中,一个较大的惯性因子有利于全局搜索^[25];反之,适合局部搜索,所以固定的惯性因子并不适合复杂的 FJSP 问题^[26]。此时,需要将惯性因子调整为自适应改变自身大小,在需要全局搜索时自动增加其大小。以式(3.2)对惯性因子进行更新:

$$w_i^d = \begin{cases} w_{min} + (w_{max} - w_{min}) \frac{f(x_i^d) - f_{min}^d}{f_{avg}^d - f_{min}^d}, & f(x_i^d) \leq f_{avg}^d \\ w_{max}, & f(x_i^d) > f_{avg}^d \end{cases} \quad (3.2)$$

其中, w_{min} 和 w_{max} 是预设的最小与最大惯性因子,一般 w_{min} 取 0.4,而 w_{max} 取 0.9, f_{avg}^d 为第d次迭代时所有粒子的平均适应度,即为第d次迭代时所有粒子的最小适应度。

3.2.4 粒子速度和位置自适应更新策略

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1 \left(\frac{pbest_{id} + gbest_d}{2} - x_{id}(t) \right) + c_2r_2 \left(\frac{pbest_{id} - gbest_d}{2} - x_{id}(t) \right) \\ x_{id}(t+1) = wx_{id}(t) + v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (3.3)$$

$$\begin{cases} v_{id}(t+1) = wv_{id}(t) + c_1r_1 \left(\frac{pbest_{id} + gbest_d}{2} - x_{id}(t) \right) + c_2r_2 \left(\frac{pbest_{id} - gbest_d}{2} - x_{id}(t) \right) \\ x_{id}(t+1) = wx_{id}(t) + Levy(\lambda) v_{id}(t+1) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Levy: \mu = t^{-\lambda}, 1 \leq \lambda \leq 3 \quad (3.5)$$

利用个体最优和群体最优的线性组合 $\frac{pbest_{id} + gbest_d}{2}$ 和 $\frac{pbest_{id} - gbest_d}{2}$ 分别替换粒子群原本公式中的 $pbest_{id}$ 和 $gbest_d$ 得到新的粒子速度更新公式为式(3.3)和(3.4)。在速度更新项中引入个体最优和群体最优的线性组合,能够使粒子的搜索空间更广,从而提高算法搜索到全局最优解的可能性。同时将所有粒子中的 30%粒子按照式(3.4)进行位置迭代,其引入布谷鸟算法,将粒子位置更新采用莱维飞行机制,其行走的步长满足一个重尾的稳定分布,而随机步长为 $Levy(\lambda)$ 分布,如上式(3.4)和下图1所示。

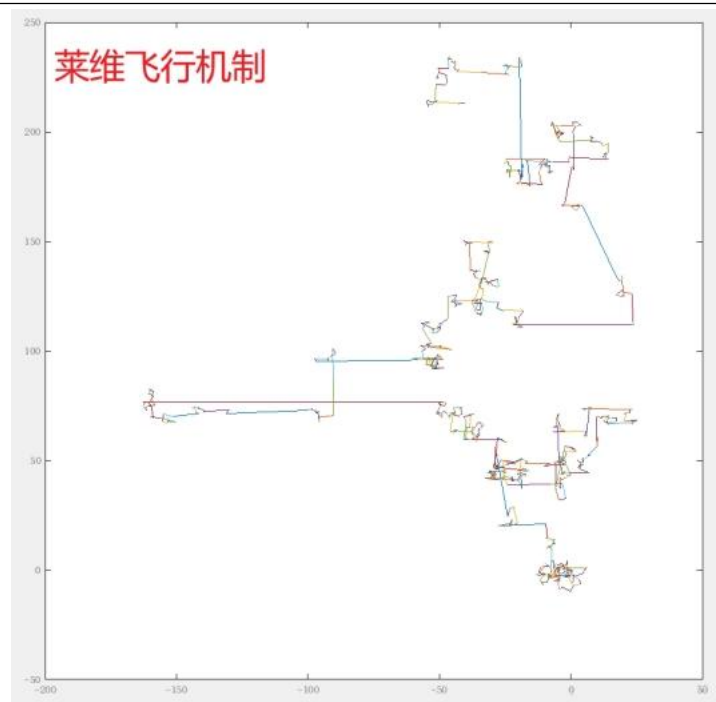


图 1 布谷鸟算法——莱维飞行机制

保证算法全部勘探能力，防止算法在求解复杂多峰函数时陷入局部最优。而将布谷鸟算法速度更新公式中，同时也提高算法的收敛速度。其中 c_1 和 c_2 选取 2。

3.3 基于人工智能的大规模自动化车间阵列式故障定位策略软硬件设计

随着工业自动化技术的不断发展和企业信息化水平的不断提高，数据采集设备、加工设备、检测设备、控制设备等在车间层的应用越来越广泛；然而这些不同类型接口的设备组合在一起，构成一个十分繁杂的工业网络。在这样的网络环境下，对各种设备如何进行有效的网络管理显得尤为重要，因为一旦网络中某一局部设备发生故障，势必影响到与之相连但还在正常运行的其他设备，更严重的会导致整个网络的停滞和崩溃，生产线每停滞一分钟都将会造成巨大的经济损失。因此需要有一种可靠的管理系统来对整个车间层设备进行有效的管理，即在生产系统运行状态下，对生产现场的设备进行监测、运行诊断、故障恢复和维护记录。

另一方面，随着工业信息化程度的不断提高，信息技术已经广泛应用于从工厂的现场设备层到控制、管理等各个层次。在生产计划的实施及生产数据采集等环节中，以太网的应用也已经到达现场设备层这一底层环境，因而利用网络管理系统来对车间设备层进行管理是切实可行的。

本文针对大规模自动化车间大规模采用的驱动装置电机运行状态进行检测，研发了一套全新的性价比高的硬件检测装置进行故障检测，并结合五维模型的数据管理模块对电机控制部分进行编码实时监测、定位、排除运行车间的硬件故障问题，避免车间运行

堵塞造成的车间加工时间增加，甚至瘫痪。

4、项目研究技术路线

本项目设计的和构建五维智能制造数字孪生车间模型，总体架构图如下。

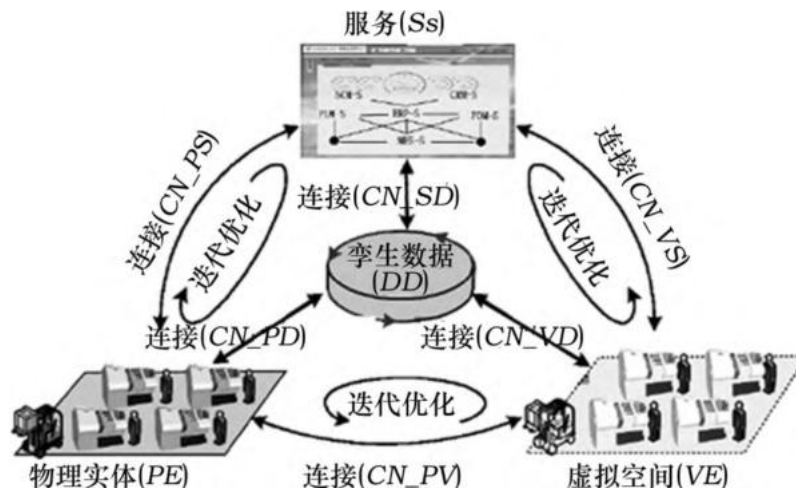


图 2 五维智能制造数字孪生车间模型

孪生数据DD 将信息数据和物理数据融合在一起，使物理实体和虚拟空间保持同步；服务Ss可以针对不同领域、不同对象的各类数据提供统一化的标准封装，并以多种形式提供给客户；连接CN 作为各个模块的信息通道，具有标准化和普适性的特点使得五维模型更容易在各领域进行适配；虚拟空间VE是对物理实体多属性、全要素的描述。整个五维模型可用式(1)表示，即：

$$M_{DT} = (PE, VE, Ss, DD, CN) \quad (4.1)$$

式中：M_{DT}、PE、VE、Ss、DD 和CN 分别为数字孪生模型、物理实体、虚拟空间、服务、孪生数据和各部分之间的连接。

数字车间提供了全要素、全流程、全业务的数据集成与共享平台，消除了信息孤岛。在集成的基础上，车间孪生数据进行深度的数据融合， 并不断对自身的数据进行更新与扩充，是实现物理车间、虚拟车间、服务的运行及两两交互的驱动。

4.1 数字化车间

智能制造产线分为生产单元、加工单元、仓储单元、AGV小车、管理人员 5 个部分，各个单元内的工站及设备各司其职，生产、加工和仓储利用 AGV 小车实现各个单元之间的连接，管理人员实现生产互动和管理。生产单元内包含数控机床、机械臂、原料库和传送带，原料经过加工工艺区粗加工，再由机械臂抓取至传送带，传送给 AGV 运送

至加工单元；加工单元中包含智能装配工站、激光打标工站和包装工站。同时由相互连接的传送带串联 3 个工站，由传送带传送至 AGV，之后由 AGV 运输至仓储单元工站中，由码垛机对已加工完成的产品进行仓储化，如图 3 所示。

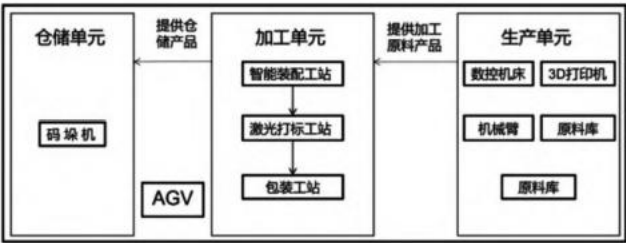


图 3 智能产线总概图

4.2 数字孪生系统框架

智能制造产线主要分为 3 个部分：生产部分、加工部分和仓储部分。智能制造产线的数字孪生系统框架由真实的物理世界、数字世界以及两者之间的通信三部分组成。生产部分有数控机床、机械臂等设备，其中的各项控制数据通过一个 PLC 控制柜实现数据的传输。加工部分中有 3 个 PLC 和 6 个电机，PLC 负责收集加工工站中的状态信息反馈至虚拟产线，同时也将控制信号通过 PLC 传达给电机。仓储部分有 2 个 PLC 和 4 个电机，由 PLC 实现对数据的传输，电机收到 PLC 的信号后，带动仓储工站机构的运动实现产品的仓储化。真实的产线将生产计划数据和生产线的实时数据通过 PLC 信号传输到数字世界的虚拟产线中，实现虚实同步，可以更直观地展示产线的状态。而虚拟产线也将模拟分析数据和实时控制指令发送给 PLC 等控制设备从而控制现实产线，实现数字孪生的目标。

4.3 数字化制造产线

4.3.1 制造产线数字化建模

实现从真实的物理空间到虚拟空间中的第一步便是创建智能制造产线的三维模型，借助C4D对车间各个部分进行建模。在机械建模阶段能够最高程度地创建设备数字模型，创建的三维模型是数字孪生与物理实体的“形”。“形”包含各个工站的外观、尺寸以及各个设备之间的相对安装位置等参数。

通过对智能制造产线加工、装配、打标、包装、仓储等各个工站的实际形状、尺寸、位置等信息进行收集，完善该智能制造产线各模块的数据采集。按照采集的信息对产线实物进行物理三维建模，建立基于数字孪生的制造车间模型。

完成设备孪生模型的建立后，将具有父子层级关系及信号交互的设备通过所建立的通信接口和连接脚本进行连接，形成生产单元；进一步连接形成虚拟车间，以模拟整个物理车间生产活动。虚拟车间中孪生设备间的信息交互和联动，可对生产加工过程进行

仿真，且根据孪生设备布局的不同，虚拟车间可以模拟不同的加工策略、布局规划，得到生产仿真数据和生产效率数据等。下图 4 为生产产线功能分工图。

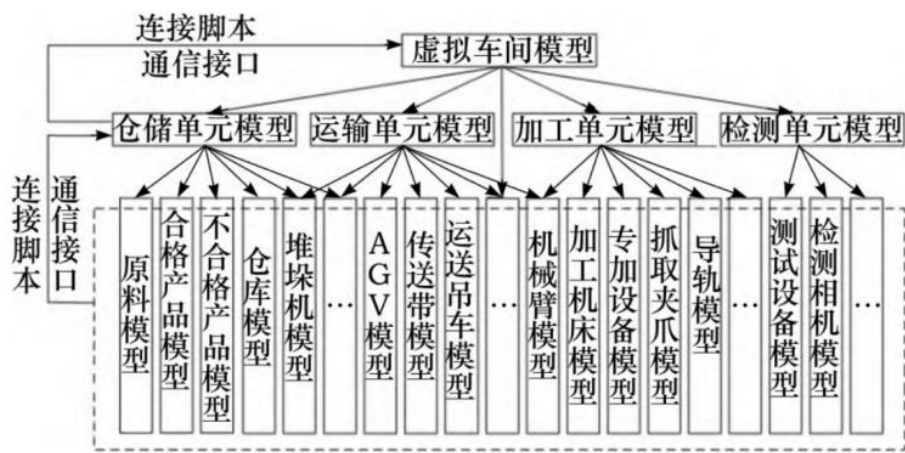


图 4 生产产线功能分工图

产线虚拟三维模型建立后，将其中存在运动实体实时变动的数据通过构建对应的模型映射库，将运动轨迹记录入库，实现生产线工站、资源和系统由物理空间到虚拟空间的多维度、多粒度自动映射。

本文使用的智能制造产线由于其产线复杂，导致其三维建模较为复杂。传统的实物建模方法都是针对产线中的某一个或者单一形态进行观察与测量，取该观测时段的位置信息数据，运用三维软件对其进行建模，实际仿真出来的结果只能依照观察达到的单一形态进行仿真，与预想取得的效果相差较大。使用数字孪生技术可以通过真实物理世界与虚拟世界之间的大量数据交互，采集实时模型数据反馈至虚拟端，修正理论模型的差值，并将仿真数据同步反馈至实物端，使设备能够按照最优路径运行，提高产品质量以及设备运行寿命。

4.3.2 虚实产线运动逻辑定义与构建

智能制造产线的运行需要创建虚拟信号，设置虚拟信号定义其运动轨迹及对范围限制、移动方向、速度、位移以及旋转角度等，这是数字孪生与物理实体的“态”，保证数字孪生体与现实设备的各运动姿态实现步调一致。在计算机上模拟整个产品的生产过程，包括各个设备生产加工产线、仓储单元、机械臂、PLC、电机、AGV 等各个单元，将C4D软件建好的三维模型通过格式转换切换成Unity软件可识别的C4D模型格式导入，从而实现整体产线在虚拟端的完整再现。

同时对产线中包含的成品立体仓库进行建模，并将其模型的格式进行转换，利用Unity软件构建其数字孪生体。使用C4D软件运动仿真功能，设定机械中的运动结构 3 个运动机构不同的 3 个方向运动轨迹及运动距离限值，并将 3 个运动机构的运动方向分别设为 x、y、z 轴。将 3 个运动机构独立出来，从而对其机构的运动设定更简便并让实际运动效果更为明显。在软件中利用Bullet功能模块，用Connector以及Motor连接各组件，并使用Force驱动物体运动，使运动结构更具真实性。

4.3.3 虚实产线控制信息调试与模型验证实验

数字孪生的产线仿真优化框架中，基于生产工艺和业务流程构建基本的数字孪生模型，根据综合评价指标对所得模型进行评估、筛选和优化，可以将实时生产数据输入到优化后的模型中得到系统生产控制的最优解，从而反馈到工业控制系统实现对产线的控制。

本文的智能制造产线可以通过孪生体对物理产线实现实时控制，虚拟和现实间预留了通信协议。如OPC UA通信协议、Socket通信、串口通信等，本文以物理产线与虚拟产线之间以 PLC 信号为交互信息接口，同时预留了大量的可扩展通信接口。两者通过PLC 端口信号实现互通互联，所以产线的实时控制延迟处于PLC的反应时间之内。同时由于信号通道数、内存和网速等因素的影响，产线控制的实时性会有所延迟。由于所使用的 PLC 均为西门子同型号，所以也可以更好地实现信号的传输与转换，降低实时控制的反应时间。对西门子 PLC 的控制均使用博图系列软件，TIA Portal 软件是西门子公司针对旗下各种类PLC 的一款编程软件，同时该软件也是西门子公司工业软件的组成之一，通过 TIA Portal 软件可对 PLC 与设备进行连接，同时构建设备与 PLC 之间的通信以及数据共享等多种不同的 PLC 处理器模式，对移动机构方向与距离设定完成，利用博图软件对成品仓库工站的 PLC 进行配置项目与地址，并将 PLC 中的信号传递至Unity软件中，实现虚拟端与现实端的实时同步。

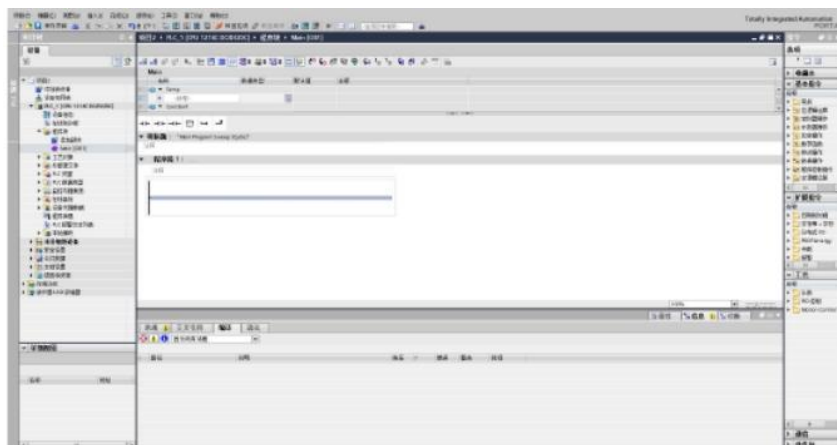


图5 PLC控制软件TIA Portal 界面

在软件中可以控制输入运动的信号，通过软件反馈给 PLC，实现对成品立体仓库中码垛机的控制通过工站的 PLC与S7-PLCSIM Advanced V2.0 软件的联通，实现成品立体仓库的数字孪生。在工站中，当工站接收到AGV从加工单元送过来的成品后，通过传送带运输至码垛机托盘上。仓库检查库内的空余位置，并发送具体位置指令给 PLC,PLC 通过电机控制码垛机在 x、y、z 轴上不同距离的运动，将成品运送至指定空余位置中，再将托盘与成品一同放进该位置。同时在虚拟端，S7-PLCSIM Advanced V2.0 中的仓库孪生体接收到来自 PLC 指定位置信号后，将该信号反馈至虚拟端模型中，并通过 lnk 模块定义运动限值，将在实际情境下码垛机的运行轨迹在S7-PLCSIM Advanced V2.0 中实时

反映出来，实现码垛机工作轨迹虚实同步。

基于 PLC 的虚拟仿真功能，将 PLC 程序中的 I/O 信号与虚拟信号进行连接，运行 PLC 程序，结合上位机的控制界面，对发出的虚拟信号进行逐一校核；此时 PLC 的连接包含软连接和硬连接两个部分，软连接是利用 PLC 本身的仿真模型功能实现实时通信，同时要求有实际硬件 PLC 时，基于以太网 TCP/IP 等网络协议可以实现硬对软的通信。

PLC 是真实物理世界与虚拟世界的交互“窗口”，通过 PLC 将产线的实时数据发往数字世界，同时也将实时控制指令从虚拟端发往物理产线，通过 PLC 来控制电机的运转，从而实现数字孪生的目标。

通过前面虚实交互数据的实验，在虚拟软件端实现码垛机堆垛实验，同时在现实世界中成品仓库工站实现对电气产品的储存，由 AGV 小车将包装完的电器产品送至成品立体仓库工站的输送平台上。再由码垛机运动机构将产品放入规定的仓储位置中，实现仓储的功能。

4.3.4 数据可视化监测

通过实时通信和监测实际车间的生产速率和工作效率以及故障诊断和报错设计并开发了基于数字孪生的车间建模与监控系统，有效提高了机床虚实交互能力、数据可视化程度和状态监控效率，本团队通过研究数控加工过程多源异构数据的可视化监控技术、机床数字孪生物理规则的融合方法，进行了深度学习的机床数字孪生模型物理仿真研究，并完成了系统界面的开发和测试。

强化制造业设备监控，当制造业设备发生故障时，传统方法主要是依靠人的经验来判断，且难以对即将发生的设备失效进行预测。数字孪生凭借其对于非线性问题良好的处理能力以及数据驱动的特性，为装备、生产制造等提供了故障诊断与预警的新模式。当设备出现失效、关键零部件磨损等故障时，利用数字孪生技术可以实时定位到问题发生的位置，并根据传感器采集到的数据初步判断问题类型。应用数字孪生技术还可以对关键零部件和易损部件进行全天候监控，结合零/部件历史数据分析出即将发生失效的部件，实现对设备的主动干预与维护，减少因故障定位和设备维修带来的工时损失等。

5、研究进度安排

第一阶段：准备与设计（1-3 月）（已完成）

文献回顾：收集和分析数字孪生技术相关文献。

技术准备：熟悉 Unity 平台和西门子 PLC 的操作。

初步设计：设计数字孪生车间的基本框架。

第二阶段：开发与实现（4-6 月）

模型开发：在 Unity 中开发制造业自动化生产线的数字孪生模型。

数据通信：实现西门子 PLC 与 Unity 平台的 TCP/IP 通信。

功能测试：测试虚拟生产线的基本功能。

第三阶段：优化与创新（7-9 月）

嵌入式系统：基于 ESP32 构建 OPC UA，实现多异构数据采集。

算法开发：改进粒子群优化算法，解决车间调度问题。

故障检测：设计阵列式故障定位策略。

第四阶段：测试与评估（10-12 月）

系统集成：整合所有开发的模块和功能。

性能评估：评估数字孪生模型的性能和准确性。

新点验证：验证创新点的优越性和实用性。

第五阶段：总结与申报（次年 1-3 月）

文档编写：撰写研究报告和项目总结。

成果展示：准备展示材料，演示项目成果。

项目申报：提交项目成果，申请相关专利或发表论文。

6、项目组成员分工

项目主持人：作为团队的管理者，不仅有着丰富的科学知识和创新思维，还在多个科普展览和科研活动中展示了卓越的领导才能。并且负责对项目进行技术指导和进度跟

进。

成员 1：团队的项目核心成员，能高效协调团队成员的工作和资源分配。擅长制定详细的项目计划和时间表，在项目中展现了出色的规划和人际交往能力。

成员 2：具备扎实的科学理论知识，了解科普领域的最新研究动态和科学传播方式，懂得如何编写富有吸引力和启发性的科普文本。

成员 3：在设计和操作方面具备优秀的技能，擅长运用各种软件和工具，并能准确地记录和分析，为团队的科普项目提供实证支持。

成员 4：主要负责团队的美术工作，能使用多种视觉设计工具和软件将抽象的科学概念转化为视觉呈现的形式，通过图像和图表清晰地传达科学信息。

根据每个成员所具备的不同技能分配相对应的工作内容，从而使得团队分工明确，科学高效地完成各自负责的部分。同时，在实施调查的过程中，各个环节的负责人轮流监督督促以确保调研过程的顺利开展。具体的工作安排如下表所示。

表 2 工作分工说明

团队成员	具体内容
项目主持人 林啸	搭建五维智能制造数字孪生车间模型，改进粒子群算法（PSO）
成员 1 李珺一	统筹研究思路，调查进度安排，研究目的意义，总结展望
成员 2 朱逸轩	基于 EPS32 构建嵌入式 OPC UA，数据可视化监测
成员 3 王海垠	阵列式故障定位策略的软硬件系统设计，场景分析
成员 4 赵梓含	美术设计，文案的排版、修改与完善，视频拍摄与剪辑

三、学校提供条件（包括项目开展所需的实验实训情况、配套经费、相关扶持政策等）
经费支持：

项目经费用于购置实验设备、软件许可、材料采购等，预计总经费需求为 20000 元。
我们将严格按照专款专用原则使用经费，确保项目的顺利开展。

实验实训设施：

我们将自行联系学校相关学院适用于数字孪生技术研究的实验室、计算机、仿真软件等设施，以搭建一个高度仿真的数字孪生平台，从而详细展现自动化线自动化。

展示交流平台：

希望学校搭建展示和交流平台，让我们有机会与其他研究者、企业、投资者分享项目成果和经验，有助于项目的宣传、合作和进一步发展。

四、预期成果

- 1. 省级刊及以上论文至少一篇
- 2. 获专利授权至少一项
- 3. I 类竞赛取得省赛第三等级以上奖项

五、经费预算

总经费（元）	6000	财政拨款/企业资助（元）	0	学校拨款（元）	6000
--------	------	--------------	---	---------	------

注：总经费、财政拨款、学校拨款按照规定金额填写。

具体包括：

- 1、 计算、分析、测试费 1000.00 元，进行创新点技术的第三方检测和技术查新；
- 2、 会议、差旅费 500.00 元，用于团队前往西门子数字孪生工厂等相关技术场地进行实地考察和交流学习；
- 3、 文献检索费 300.00 元，用于充值知网等文献查阅平台查阅相关文献；
- 4、 论文出版费 2000.00 元，预计用于申请一篇发明专利、一篇软件著作权专利和一篇实用新型专利；
- 5、 实验装置试制费 1000.00 元，用于试搭建低复杂度的数字孪车间模型；
- 6、 材料费 1000.00 用于设备硬件设备购买、文件打印等。

六、导师推荐意见

项目团队成员对所涉及问题的核心研究内容与技术路线调研充分，有明确的项目工作开展思路；所在团队前期有一定积累，任务设置与进度安排较为合理，同意申报，望领导批准首肯。

签名：梅润杰

2024 年 6 月 5 日

七、院系推荐意见

该项目选题新颖，研究目标明确，技术路线清晰，研究内容与专业结合度高，研究方案可行，人员结构合理，市场前景广阔，是一个较好的培养大学生创新创业能力的训练计划。

指导教师科研能力较强、创业项目指导经验丰富，能够指导学生团队顺利完成项目。
同意推荐申报。

院系负责人签名：李春彪

学院盖章：

2024 年 6 月 5 日

八、学校推荐意见：

同意推荐申报，学校将提供经费及各方面支持！

学校负责人签名：

学校公章

2024 年 6 月 5 日