

基于数字孪生的电机智能车间研究与应用探索

石浩¹, 杨祖伟², 张佳欣³

(1. 上海电科电机科技有限公司, 上海 200063;

2. 上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司, 上海 200063;

3. 上海江衡软件科技有限公司, 上海 201600)

摘要: 随着中国制造智能政策的实施, 电机行业逐步开展智能制造项目, 但在项目实施过程中存在落地难、建设周期长、智能化程度不高等问题。介绍了数字孪生在电机智能车间建设中的应用前景, 探讨了电机智能车间虚拟建模、孪生数据采集与实时驱动、增强现实(AR)孪生交互等仿真技术, 并结合电机嵌线车间智能化建设阐述数字孪生在电机智能制造推进过程中的应用方法、流程和范围等。结果表明: 数字孪生能有效缩减车间的调试周期和生产成本, 提高电机智能车间项目的可靠性和可验证性。

关键词: 智能制造; 电机智能车间; 数字孪生; 增强现实

中图分类号: TM 305 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2021)05-0105-08

doi: 10.12177/emca.2021.010

Research on Intelligent Workshop of Motor Based on Digital Twin

SHI Hao¹, YANG Zuwei², ZHANG Jiaxin³

(1. SEARI Motor Science and Technology Co., Ltd., Shanghai 200063, China;

2. Shanghai Engineering Research Center of Motor System Energy Saving Co., Ltd.,
Shanghai 200063, China;

3. Shanghai JH Simulation System Co., Ltd., Shanghai 201600, China)

Abstract: The motor industry is gradually developing intelligent manufacturing projects with the implementation of the intelligent manufacturing policy in China. However, the problems of difficult implementation, long construction period and low degree of intelligence have become the main bottlenecks in the project construction process. The application of digital twin in the construction of intelligent motor workshops is proposed. The virtual modeling of the motor intelligent workshop, twin data acquisition and real-time drive, augmented reality (AR) twin interaction and other simulation technologies are discussed. The application method, process and scope of digital twin in the process of intelligent motor manufacturing are introduced through the intelligent construction of the motor embedding workshop. The results show that the application of digital twin can effectively reduce the debugging cycle and production cost of the workshop, and improve the reliability and verifiability of the project of the intelligent motor workshop.

Key words: intelligent manufacturing; motor intelligent workshop; digital twin; augmented reality (AR)

收稿日期: 2021-01-09; 收到修改稿日期: 2021-03-03

作者简介: 石浩(1985—), 男, 工程师, 研究方向为电机智能制造及智能电机检测设备。

杨祖伟(1986—), 男, 工程师, 研究方向为电机智能制造技术及应用。

张佳欣(1988—), 女, 工程师, 研究方向为智能制造及MR辅助诱导维修系统应用。

0 引言

近年来,随着“中国制造 2025”和“互联网+”等国家制造业发展战略的推进,智能制造项目在电机企业逐步实施与落地,电机行业在自动化和信息化建设方面有了长足的进步^[1-3]。但是由于电机行业产品的特殊性,如产品个性化定制、小批量多品种生产模式等^[4],使得电机制造智能化项目难以复制与推广,仍然需要大量的定制化设计与研发,项目的建设成功与否取决于设计人员的设计经验与能力。同时,在企业智能制造项目的实施过程中,存在项目落地难、建设周期长、智能化程度不高等问题,已成为电机行业智能制造推进的瓶颈。

数字孪生概念提出时主要用于航空飞行器等复杂结构产品的设计。在此之后,PTC 公司致力于在虚拟世界与现实世界之间建立实时的连接(数字孪生),为客户提供高效的产品售后服务与支持。国外,西门子公司将其用于产品制造过程的分析,致力于帮助制造企业在信息空间构建整合制造流程的生产系统模型,实现物理空间从产品设计到制造执行的全过程数据化^[5]。

国内,陶飞等^[6]提出“数字孪生车间”概念,其应用场景之一是基于数字孪生的车间快速设计,核心是基于实际车间环境、运行数据等进行虚拟三维车间的快速设计、验证与优化,为复杂车间环境下数字化车间的设计与验证指出了一个新的方向。

在此基础上,本文针对电机行业智能制造的瓶颈问题,结合数字孪生车间的相关理论,开展基于数字孪生的电机数字化车间工艺、装备等模型的研究,探索基于数字孪生的电机数字化车间快速设计、电机数字化生产线的虚拟调试与智能监测等应用,以提升电机数字化车间设计的可靠性和可验证性,降低车间运行调试周期和成本,实现电机制造车间的数字化、可视化与智能化。

1 数字孪生车间介绍

数字孪生车间是在新一代信息技术和制造技术驱动下,通过物理车间与虚拟车间的双向真实映射与实施互动,实现物理车间、虚拟车间、车间服务系统的全要素、全流程、全业务数据的集成和

融合^[7-8]。

数字孪生车间系统主要由物理车间、虚拟车间、车间服务系统和车间孪生数据 4 部分组成,如图 1 所示^[5]。在车间孪生数据的驱动下,生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等在物理车间、虚拟车间、车间服务系统之间迭代优化,在满足特定目标和约束的前提下,达到车间生产和管控的最优^[5-9]。

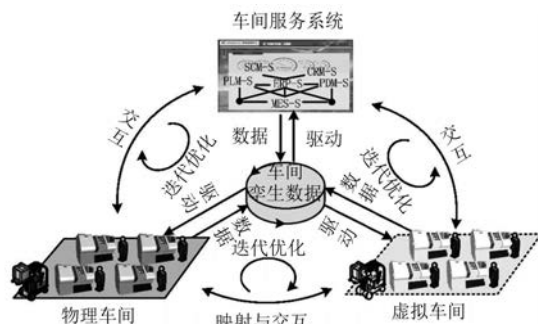


图 1 数字孪生车间系统组成

2 基于数字孪生的电机智能车间系统

2.1 基于数字孪生的电机智能车间系统架构

基于数字孪生的电机智能车间系统的系统架构和运行流程如图 2 所示,主要包括信息系统、仿真系统和智能展示系统。其中,信息系统包括制造执行系统(MES)、分布式数字控制(DNC)过程控制系统、现场监控与数据采集(SCADA)系统,用于车间生产指令的下达和现场数据的采集;仿真系统为实际车间的孪生建模,包括生产要素功能建模和孪生数据驱动建模,用于生产指令的仿真与优化;智能展示系统包括虚拟现实(VR)和增强现实(AR)系统,用于虚拟信息在实际车间环境的可视化展示。

通过实物设备与虚拟模型之间的虚实互动、指令与信息的同时同步、虚拟车间与实际车间环境的可视化融合,形成一个支持实物设备连线的数字化车间设计、调试与验证平台。该平台在数字化车间建设的不同阶段应具备的特征如下。

(1) 在数字化产线设计阶段,实现虚拟产线加工运动的近物理仿真,以及实际车间环境下虚拟产线与实际设备之间的融合调试与仿真。

(2) 在数字化车间运行调试阶段,支持虚拟产线与 MES、仓储管理系统(WMS)等车间制造执

行系统之间的对接,实现数字化车间方案的可视化验证与优化分析。

(3) 在数字化车间应用阶段,支持车间自适

应调度、VR/AR 辅助的人机交互,实现车间智能调度以及复杂工艺的可视化指导与人员的快速培训。

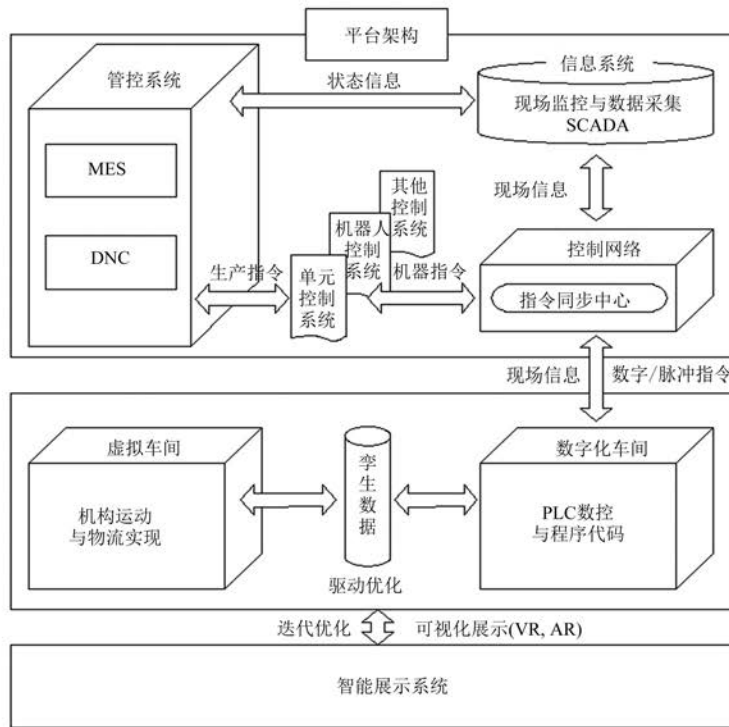


图2 基于数字孪生的电机智能车间系统架构

2.2 基于数字孪生的电机数字化车间建模

2.2.1 电机异构设备功能建模

电机异构设备功能建模是指建立不同类型、不同结构的电机设备运动副、控制参数(运动参数、非运动参数)和驱动接口的建模。电机设备执行机构运动副的运动通过控制参数控制,控制参数通过驱动接口与可编程逻辑控制器(PLC)控制信号连接,从而在虚拟环境中实现异构设备的近物理仿真,如图3所示。

其中,运动副建模是指建立执行机构各运动组件的逻辑关系,包括相对/绝对运动关系、运动类型等,如机器人6关节均相对上一关节做旋转运动。

控制参数包括运动参数和控制信号,其中运动参数主要包括速度、转速、上下限位置等,控制信号主要包括起停信号、运动持续时间、夹持/释放等控制信号。

以七轴机器人为例,其运动功能建模过程设计如下。

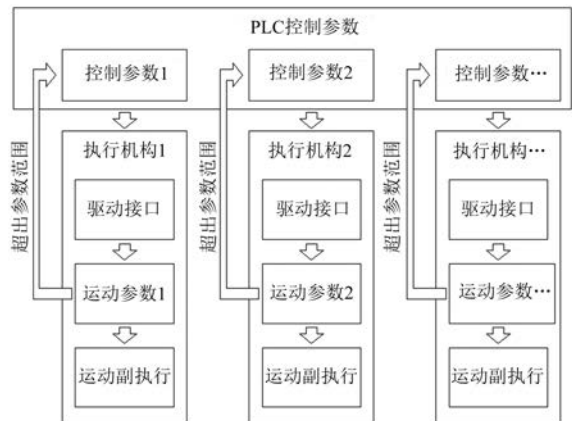


图3 异构设备控制原理图

(1) 建立各执行机构的运动副,包括底座与地轨之间的直线往复运动副、各关节之间的旋转运动副和抓手夹持运动副。

(2) 建立各运动副的控制参数,包括底座直线移动速度、上下限位置,关节1~6的转速、转角范围、初始位置,起停信号,持续时间,抓手抓取、

释放信号等。

(3) 通过将 PLC 控制信号转换为时间驱动和速度驱动 2 种模式,将控制信号转为运动副的控制参数以驱动运动副的运动;当控制信号的控制参数超出位置/速度上下限值时,予以反馈示警。

2.2.2 电机数字化车间工艺流程建模

工艺流程建模是在数字化车间资源建模的基础上,将设备功能模型与产品工艺路线相结合,完成电机产品基于虚拟化设备的工艺流程建模与仿真,具体如图 4 所示。

工艺流程建模包括工序建模和工艺流程建模。通过工艺流程建模将生产要素建模的各要素相关联,实现工艺流程的可视化设计。

工序建模针对工艺流程的一个节点,依赖于某个工位或设备,包括输入物料表、各缓冲区物料表和输出对象、物料处理过程的时序和动作内容。

工艺流程建模建立起由一个或多个工序组成的完成某个零件加工、部件制造或产品制造过程

的逻辑模型。工艺流程采用倒树状结构设计,一个工序可以有多个前驱工序,但只有一个后继工序。

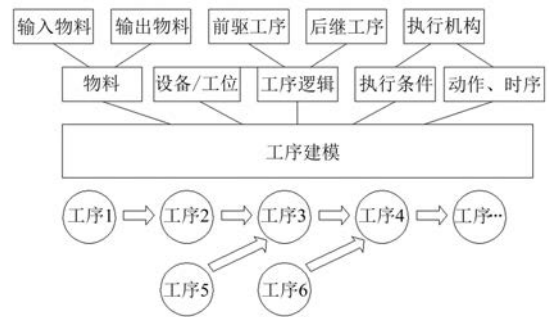


图 4 数字化车间工艺流程建模

2.2.3 电机数字化车间系统建模

数字化车间资源建模是指建立数字化车间的三维布局及组成数字化车间布局的各资源(人、机、料、环)之间的逻辑关系,包括工位规划、生产系统规划和数字化车间规划,如图 5 所示。

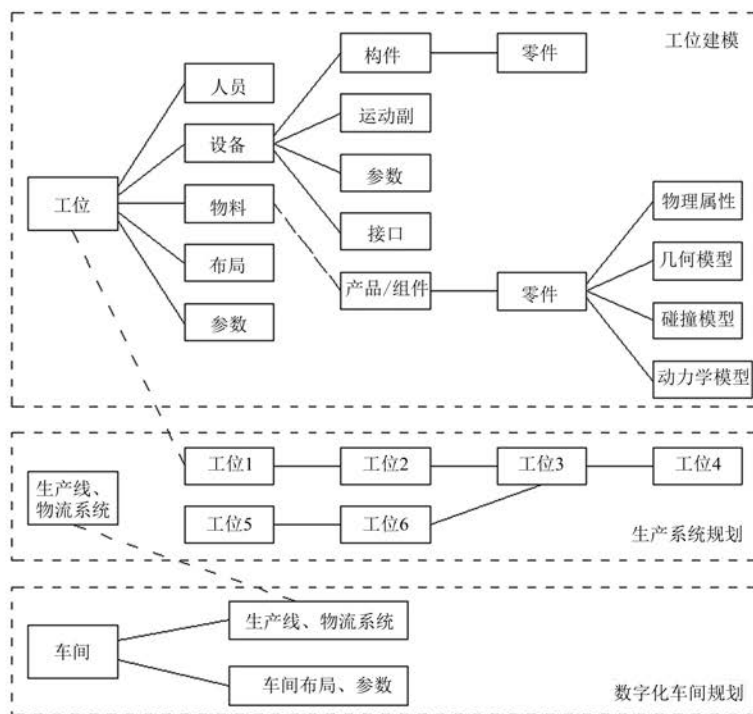


图 5 数字化车间资源建模

在工位建模中,需将人员、设备、物料等资源信息与工位进行关联,并进行布局建模,其中输送系统中的输送线为输送工位。

将各工位以图形化的方式进行连接,形成生

产线的逻辑模型,其中一个节点为一个工位,工位与工位之间的连接线为物流路线。

将生产线、物流系统、线边库等系统按逻辑结构和布局进行组合,形成数字化车间,并完成相关

参数设置。

2.3 基于数字孪生的虚拟仿真系统

基于数字孪生的虚拟仿真系统在设备功能建

模、工艺流程建模的基础上,采集实际数据驱动工艺仿真模型运转。数据驱动的虚拟仿真系统架构如图 6 所示。

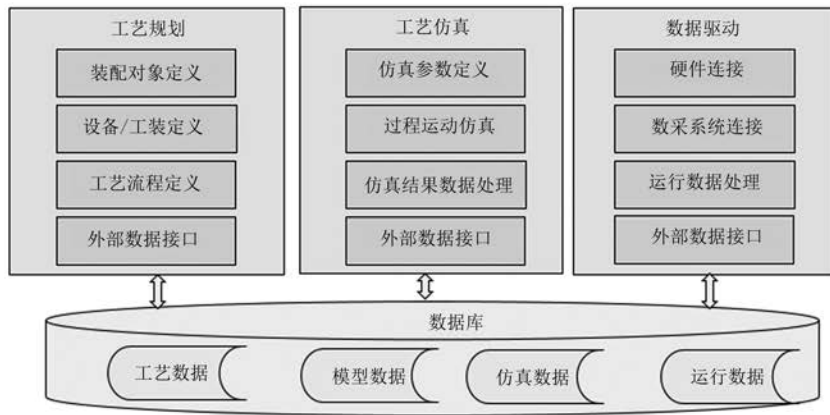


图 6 基于数字孪生的虚拟仿真系统架构

2.3.1 监控数据采集

监控数据通过数据属性和数据值 2 种结构来表达。数据属性包含了该数据的 ID、名称、类型、单位、所属设备、最大值、最小值等,数据值包含了该数据关联的数据类型 ID、数据的产生时间、数值。两者通过数据类型 ID 进行对应。数据表达方式如图 7 所示。



图 7 监控数据结构图

数据采集模块将采集到的不同类型的数据通过统一的输出接口输出,提供给仿真模块。输出接口采用 TCP 协议实现,可支持局域网内任意位置的仿真模块连接,并且支持多个客户端的连接,最大连接数可达 64 个。

输出接口由数据调度线程进行整体控制,在指定 TCP 端口进行监听,当有仿真客户端连接时,动态创建一个数据传输线程与仿真客户端连接,并一直保持到客户端退出为止。当数据处理线程有数据推送到连接与调度线程时,根据客户端数量复制数据到每个数据传输线程,由数据传

输线程传输到各自对应的仿真客户端。具体的工作模式如图 8 所示。

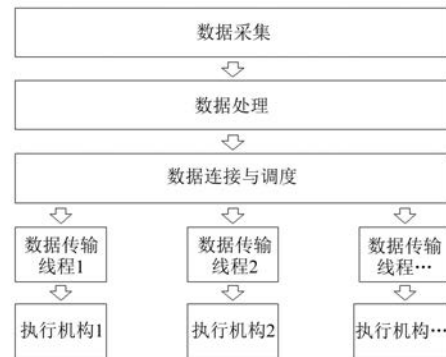


图 8 数据采集与孪生驱动流程图

2.3.2 实时数据驱动

根据数据采集系统采集到的工艺数据,对工艺模型进行驱动,主要包含以下步骤。

(1) 实时数据接口:在实际生产过程中读取设备的实时运行参数、订单参数等数据输入仿真系统,作为实际输入参数。

(2) 建立参数对应关系:建立实际采集到的参数与仿真模型中对应参数的对应关系,进行设备驱动。

(3) 运动学解算:根据设备驱动参数以及定义的设备运动副参数,计算设备中各个机构的实时位置及相关工件、环境模型等的位置。

2.4 基于数字孪生的 AR 可视化系统

电机车间可视化验证是在虚拟车间数据融合

的基础上,将虚拟车间运行模型与车间的实时运行环境融合,并通过 VR/AR 技术进行可视化展示。其关键在于通过实际车间空间坐标与虚拟车间空间坐标的映射,实现虚拟运行模型在实际车间环境和场景中全方位的精确对准。虚实融合实现过程如图 9 所示。

2.4.1 基于数字孪生的 AR 可视化系统架构

系统的组成主要包括 3D 数字化生产系统模型、AR 注册/定位/显示、VR 显示、MES 及数据采集系统通信接口。AR 显示又分为固定视角的 AR 显示和基于光学透视 AR 眼镜的移动式 AR

显示。VR 显示包括基于大屏幕的 VR 显示和基于 HTC VIVE 的移动式 VR 显示。系统组成如图 10 所示。

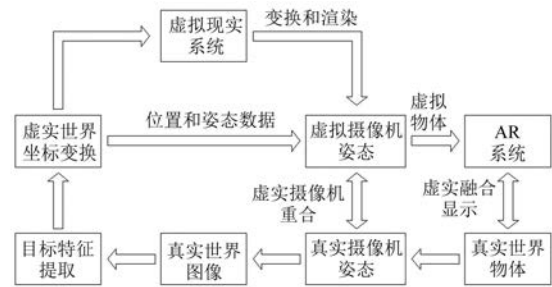


图 9 基于数字孪生的 AR 可视化系统实现过程

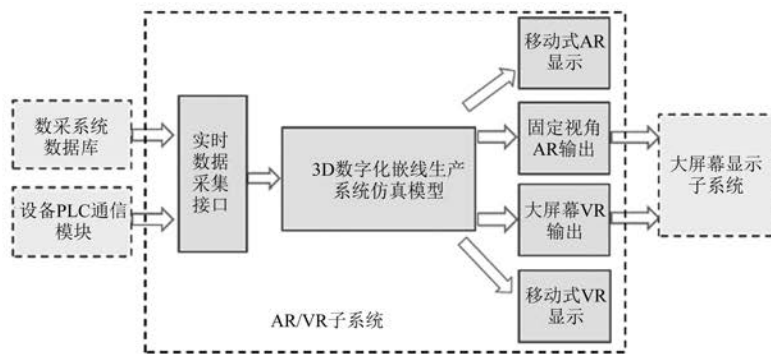


图 10 基于数字孪生的 AR 可视化系统

2.4.2 基于数字孪生的 AR 可视化系统功能

基于数字孪生的 AR 可视化系统通过 TCP 协议与虚拟仿真系统进行数据交换,接收仿真系统计算的各物体状态数据,结合摄像头的图像,进行虚实融合。其中,摄像头采集的图像为实物实际状态,虚拟仿真系统输出的仿真物体的位置为虚拟物体图像,AR 输出模块将二者通过 3D 注册、视点跟踪以及虚实融合显示在同一画面中,并输出到大屏投影系统或 AR 眼镜。

AR 输出模块的 3D 注册、视点跟踪和虚实融合功能介绍如下。

(1) 3D 注册指建立世界坐标系,通过 AR 识别方式建立起各个虚拟物体在世界坐标系中的位置。实现 3D 注册的过程涉及一系列坐标系统的相互转换,还涉及到用数学模型描述的摄像机模型,通过摄像机模型可以将 3D 空间中的点与 2D 图像点建立联系。

(2) 3D 注册过程中,通过二维码 Marker 标定各个物体的实际位置和世界坐标系的位置,通

过摄像头识别物体上二维码 Marker 在相机坐标系下的坐标值、世界坐标系二维码在相机坐标系下的坐标值,通过这 2 个坐标值解出物体在世界坐标系下的位姿矩阵。

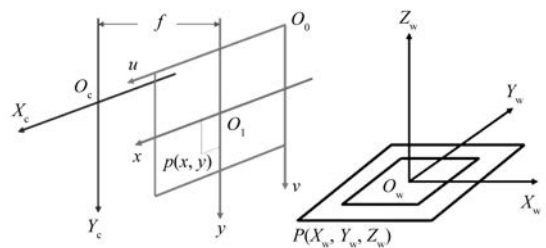


图 11 世界坐标系和标定的物体坐标系

视点跟踪主要指用户使用便携式 AR 背包时,跟踪头戴摄像头的位置,实现正确的虚实叠加。系统采用 ARToolKit SDK 进行二维码 Marker 标记的识别,从而计算出相机坐标系在世界坐标系下的实时位置,实现视点跟踪功能。具体流程包括如下步骤。

(1) 相机标定:通过二维码标定相机的内参

矩阵以及畸变参数,形成相机标定文件。

(2) 图像校正:将摄像头采集到的画面进行校正,通过相机标定得到的畸变参数将图像边缘进行处理,尽量消除相机镜头带来的畸变。

(3) 图像二值化:将采集到的彩色图像由 RGB 颜色空间转换到 HLS 颜色空间,并通过亮度值以及阈值将图像二值化。

(4) 识别二值化图像中的 Marker 标记点,提取出各个标记点的轮廓,并根据 2D 到 3D 的空间变换,计算出各个 Marker 标记点在相机坐标系下的位置。

(5) 根据识别到的 Marker 3D 空间位置以及 3D 注册的结果,计算出当前相机的视点矩阵。识别结果如图 12 所示。

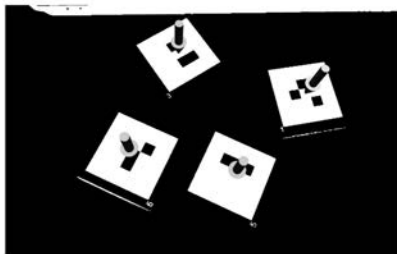


图 12 Marker 识别与相机视点追踪

虚实融合指系统通过图像识别计算 Marker 标记点对应的物体位置,并通过其 3D 几何模型逐像素计算该点在 3D 空间中的深度值。算法流程图如图 13 所示。

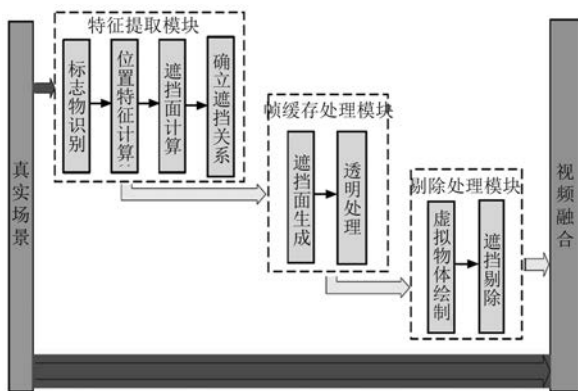


图 13 虚实遮挡算法流程图

在 AR 输出模块处理物体与物体之间的遮挡时,比较像素点之间的深度,如果虚拟物体上点的深度值小于模板缓存中的像素深度值,则表明虚拟物体离视点更近,绘制该像素值;反之则仍使用

原来的像素值。

使用固定摄像头与使用透视眼镜模式下的处理略有不同。前者帧缓存使用摄像头采集的图像,每次采集到摄像头的画面时,更新帧缓存中的背景图像。后者将虚拟物体与透视眼镜中看到的实际物体进行虚实遮挡,帧缓存中无需绘制摄像头采集的图像,而使用纯黑色的图像,因此最终渲染的图像中,物体被遮挡部分显示成纯黑色。

3 应用与分析

在以上研究的基础上,针对电机的关键车间——电加工车间——进行了电机嵌线生产线虚实融合调试应用,通过虚拟物料和实物物料、虚拟设备和实物设备之间的深度融合,实现电机嵌线生产线的快速规划、调试与验证优化。

3.1 电机嵌线生产线快速规划与仿真验证

电机嵌线生产线主要用于有绕组铁心的制造,主要包括输送线、插纸机、绕嵌一体机、绑线机和机器人等。按照有绕组铁心的生产工艺,在仿真平台中快速构建电机嵌线生产线的布局模型和工艺物流路线。

电机嵌线生产线的数字化工序规划内容如表 1 所示,主要包含插纸机工序、绕嵌一体机工序、绑线机工序、机器人工序等 4 个工序,其中绕嵌一体机工艺过程根据设备的实际工艺,分为定子推入(嵌线)过程、绕线过程以及转盘转动过程 3 个子工序。

表 1 电机嵌线生产线数字化工序规划内容

工序及内容	关联设备
插纸加工	插纸机
嵌线	绕嵌一体机嵌线机构
绕线	绕嵌一体机绕线机构
转盘转动	绕嵌一体机转盘机构
绑线机加工	绑线机
抓手 1 抓取/释放	机器人
抓手 2 抓取/释放	机器人

通过对电机嵌线车间的 3D 工艺流程规划与仿真建模,对工序、工艺流程的合理性进行验证分析,具体如图 14 所示。

3.2 电机嵌线生产线虚实融合调试与仿真验证

在电机嵌线生产线规划与工艺仿真模型的基

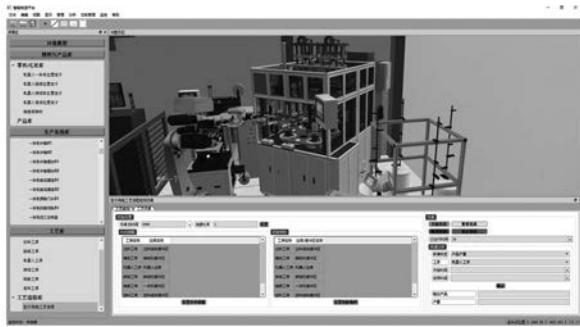


图 14 电机嵌线生产线规划与工艺仿真图

基础上,结合实际车间环境、实际设备和物料进行虚实融合调试,具体如图 15 所示。

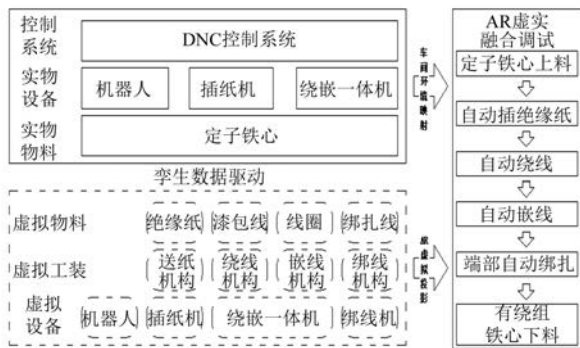


图 15 电机嵌线生产线虚实融合调试

在电机嵌线生产中,由于电机型号、规格的不同,相应的工装模具均不相同。通过将虚拟工装模具、虚拟物料和虚拟设备与插纸机、绕嵌一体机等实物设备进行融合调试,可在设计阶段实现电机嵌线生产线的半实物调试与运行。嵌线生产线设备数据采集与驱动包括机器人各关节实时坐标、机器人抓手控制信号、绕嵌一体机控制信号和生产调度信息等。

3.3 效果分析

通过 VR 和数字化仿真技术模拟电机嵌线设备的运动结构和功能,对电机嵌线生产线的物料、工艺路线进行仿真分析与运行监测,解决了如下问题:(1)通过对电机数字化车间人机料法环等资源的孪生建模,为电机智能车间设计和运行等活动提供信息载体以及统一的全生命周期模型;

(2)基于产品对电机智能装备进行运动功能、控制参数和驱动接口建模与工艺仿真,部分实现了电机智能装备的虚拟样机设计与半实物调试,有效减少后续实物调试的时间与成本;(3)通过 AR 虚拟仿真技术将数字化车间实时信息进行可视化展示,可实现人工作业实时纠偏与智能培训、人机协同智能交互作业等功能。

4 结 语

数字孪生技术通过虚拟模型仿真技术探讨和预测未知世界^[2],为智能车间设计、运维提供了一个新的方向。本文针对电机智能车间方案验证困难、装备研制周期长等瓶颈问题,探讨了电机智能车间虚拟建模、孪生数据采集与实时驱动、AR 孪生交互等仿真技术,同时结合电机嵌线产线进行虚实融合调试,为电机智能车间设计规划、仿真验证提供了新的解决方案。

【参考文献】

[1] 李云生, 简金权, 龙罡, 等. 大中型电机智能工厂建设研究[J]. 中国设备工程, 2020(20): 18.

[2] 三菱电机自动化(中国)有限公司. 面向智能制造的数字化转型[J]. 电气时代, 2020(7): 21.

[3] 顾德军, 陈翔, 马莉. 电机轴智能制造方案[J]. 电机与控制应用, 2020, 47(10): 74.

[4] 孟凡生, 赵刚. 传统制造向智能制造发展影响因素研究[J]. 科技进步与对策, 2018, 35(1): 66.

[5] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生——一种未来车间运行信息模式[J]. 计算机集成制造系统 2017, 23(1): 1.

[6] 陶飞, 刘蔚然, 刘检华, 等. 数字孪生及其应用探索[J]. 计算机集成制造系统, 2018, 24(1): 1.

[7] 张政, 赵旭宇. 数字孪生驱动数字化转型与创新[J]. 通信企业管理, 2020(11): 56.

[8] 常笑, 贾晓亮, 刘括. 数字孪生与设计知识库驱动的飞机装配生产线设计及应用[J]. 航空制造技术, 2020, 63(20): 20.

[9] 刘震. 数字孪生:企业数字化未来之门[J]. 软件和集成电路, 2020(11): 10.