

数字孪生车间——一种未来车间运行新模式

文章由数字孪生体实验室整理，未经允许，禁止商用。

获取更多数字孪生创新研究、行业垂直解决方案以及数字孪生体技术白皮书，欢迎关注“数字孪生体实验室”微信公众号。



作者：陶飞¹，张萌¹，程江峰¹，戚庆林¹

(¹. 北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院，北京 100191)

摘要：

随着新一代信息技术(如云计算、物联网、大数据、移动互联、人工智能等)与制造的融合和落地应用,世界各国相继提出了各自国家层面的制造发展战略。代表性的如工业 4.0、工业互联网、基于 CPS 的制造、中国制造 2025 和互联网+制造、面向服务的制造或服务型制造等。这些战略虽提出的背景不同,但其共同目标之一是实现制造的物理世界和信息世界的互联互通与智能化操作,其共同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。针对这一难题,基于数字孪生(Digital Twin),提出了数字孪生车间(Digital Twin Workshop)的

概念,阐述了数字孪生车间的系统组成、运行机制、特点、关键技术等。在此基础上探讨了基于车间孪生数据的车间物理世界和信息世界的交互与共融理论和实现方法。

关键词：数字孪生车间, 数字孪生,车间孪生数据, 虚拟车间, 关键技术,交互与共融

1.问题的提出

数字孪生 (Digital Twin) 以数字化的方式建立物理实体的多维、多时空尺度、多学科、多物理量的动态虚拟模型来仿真和刻画物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等[1-4,16]。数字孪生的概念最初于 2003 年由 Grieves 教授[17]在美国密歇根大学产品生命周期管理课程上提出 ,早期主要被应用在军工及航空航天领域。如美国空军研究实验室、美国国家航空航天局 (NASA) 基于数字孪生开展了飞行器健康管控应用[18-19] ,美国洛克希德·马丁公司将数字孪生引入到 F-35 战斗机生产过程中 ,用于改进工艺流程 ,提高生产效率与质量[20]。由于数字孪生具备虚实融合与实时交互、迭代运行与优化、以及全要素/全流程/全业务数据驱动等特点[2] ,目前已被应用到产品生命周期各个阶段[3] ,包括产品设计[9]、制造[2,4-5]、服务与运维[8]等。

如何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），建设智能工厂和智能车间，开展智能生产，以满足社会化[1]、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，是当前各国提出的先进制造战略或制造模式（如工业 4.0、工业互联网、基于 CPS（Cyber-Physical Systems）的制造或 Cyber-Manufacturing[2]、中国制造 2025、互联网+制造、面向服务的制造或服务型制造[3-4]、云制造[5-6]等）共同追求目标之一。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[7]。车间是制造活动的执行基础，本文将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来分析和探讨上述瓶颈问题解决新途径。

如图 1 所示，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三个阶段。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，但主要是人为操作实现，缺乏连续、实时的交互和融合。具体分析如下。

(1) 车间生产要素管理 生产要素主要包括人员、设备、物料、半成品和产品等。车间生产要素管理是指为满足车间生产需要,对要素的静态和动态属性、状态、关系、能力等数据进行采集、存储、处理、分析和应用的过程。在车间信息空间出现之前的第一阶段,对生产要素的管理主要依赖人工管理。生产要素信息主要通过人工记录并存储在纸质媒介上,其传递、查询、统计、分析困难,且准确性和使用效率低。随着计算机和信息技术的发展与应用,各种企业和车间信息管理系统应运而生,上述问题得到了一定解决,车间发展进入了第二阶段。通过引入人力资源管理系统、设备管理系统、物料或仓储管理系统、刀具管理系统、产品数据管理系统等,生产要素的管理效率得到了大幅提升。但这些系统的数据主要通过离线的人工方式录入,数据质量低、实时性差、效率低,同时缺乏对要素实时状态的刻画与反映。近年,随着物联网技术的成熟和应用,通过在车间部署 RFID、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[8-9],车间也随之发展进入了第三个阶段。但在第三阶段,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) 车间生产活动计划 车间生产活动是指在生产订单等驱动因素的作用下,车间生产要素按照一定关系和流程组合起来,共同执行并完成特定生产任务的过程。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。在没有信息手段的第一阶段，生产活动计划主要凭借人的经验，通过手工方式完成。这种方式效率和准确性低，对计划制定者的能力及经验要求高、依赖性强，并且编制的计划往往因人而异，获取到的方案单一，考虑的因素和范围局限性大，可选择余地小。针对以上问题，计算机、信息、建模等技术的引入，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[10]。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[11]。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。

(3) 车间生产过程控制 车间生产过程是由生产要素及其衍生的生产活动所构成。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。早期对生产过程的监测往往依靠人的感官来实现，并依据人工经验判断生产过程出现的问题或不足。此外，对生产过程的控制也是靠手动操作进行人工调整与执行。这种方式主观性强、问题发现不及时，且误检问题严重，造成了对生产过程的控制实时性差、作用精度低、偏差大等不

足。随着信息技术的发展，车间逐渐实现了仪表化和局部自动化，改善了以上问题。首先，数字式仪器仪表的应用使车间的检测精度得到了大大提升。其次，利用计算机对检测的数据进行统计、分析和优化决策，增加了结果的科学性和准确性。同时，自动化的执行器提高了生产现场的控制精度[12]。但是，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，造成与实际生产脱节。随着物联网技术的发展及其在制造中的广泛应用，生产过程的实时数据采集能力得到了大大增强。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等[13]，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。

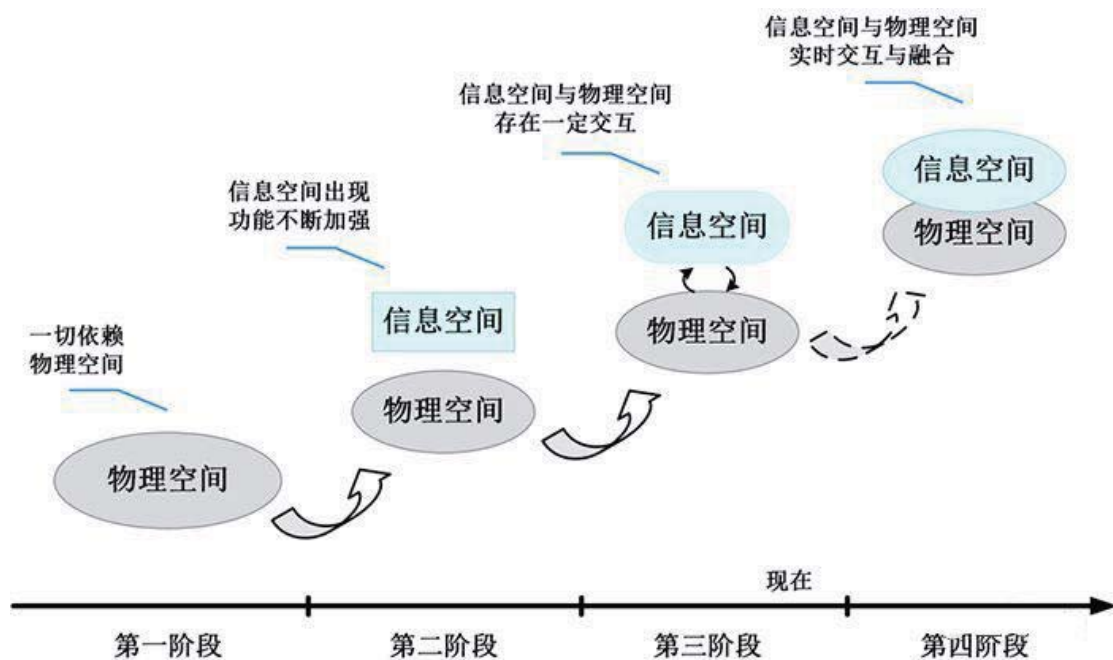


图 1 车间从物理空间到信息物理空间交互与融合的演变过程

从以上对车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制的发展和演变历程分析可知，如何实现相应的物理空间和信息空间的实时交互和进一步融合，是当前

共同面临的难题。如图 1 第四阶段所示，车间在经历了前三个阶段的发展和演变后，车间物理空间与信息空间的实时交互和进一步融合是实现智能制造的迫切需要，是车间未来发展和演变趋势。

而与此同时，数字孪生[14]作为实现物理世界和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。本文将探讨数字孪生在车间中的应用，提出数字孪生车间的概念，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，从而为未来开展基于车间孪生数据的车间物理世界和信息世界交互与共融提供理论和方法参考。

2.数字孪生车间概念与系统组成

2.1 从数字孪生到数字孪生车间

数字孪生（Digital Twin）的概念最早出现于 2003 年，由 Grieves 教授在美国密歇根大学的产品全生命周期管理课程上提出[14]。后来，美国国防部将数字孪生的概念引入到航天飞行器的健康维护等问题中[15]，并将其定义为一个集成了多物理量、多尺度、多概率的仿真过程，基于飞行器的物理模型构建其完整映射的虚拟模型，利用历史数据以及传感器实时更新的数据，刻画和反映物理对象的全生命周期过程[16]。数字孪生具有以下特点[17]：①它对物理对象各类数据进

行集成，是物理对象的忠实映射；②它存在于物理对象的全生命周期，与其共同进化，并不断积累相关知识；③它不仅对物理对象进行描述，而且能够基于模型优化物理对象。当前数字孪生的理念已在部分领域得到了应用和验证。代表性的如 Grieves 等将物理系统与其等效的虚拟系统相结合，研究了基于数字孪生的复杂系统故障预测与消除方法，并在 NASA 相关系统中开展应用验证[18]。美国空军研究实验室结构科学中心通过将超高保真的飞机虚拟模型与影响飞行的结构偏差和温度计算模型相结合，开展了基于数字孪生的飞机结构寿命预测，并总结了数字孪生的技术优势[15]。此外，PTC 公司致力于在虚拟世界与现实世界间建立一个实时的连接，基于数字孪生为客户提供高效的产品售后服务与支持[19]。西门子公司提出了“数字化双胞胎”的概念，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字化[20]。针对复杂产品用户交互需求，达索公司建立了基于数字孪生的 3D 体验平台，利用用户反馈不断改进信息世界的产品设计模型，从而优化物理世界的产品实体，并以飞机雷达为例进行了验证[21]。

从以上应用分析可知，数字孪生是实现物理与信息融合的一种有效手段。而车间的物理世界与信息世界的交互与融合是实现工业 4.0、中国制造 2025、工业互联网、基于 CPS 的制造等的瓶颈之一。因此本文基于数字孪生技术探讨提出数字孪生车间的概念。

数字孪生车间 (Digital Twin Workshop: DTW) 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时交互，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，在车间孪生数据的驱动下，实现车间生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制等在物理车间、虚拟车间、车间服务系统间迭代运行，从而在满足特定目标和约束前提下，达到车间生产和管控最优的一种车间运行新模式。数字孪生车间主要由物理车间（Physical Workshop）、虚拟车间（CyberWorkshop）、车间服务系统（Workshop Service System: WSS）、车间孪生数据（Workshop Digital Twin Data）四部分组成。

2.2 数字孪生车间主要系统组成

如图 2 所示，数字孪生车间主要由四部分组成：物理车间、虚拟车间、车间服务系统、车间孪生数据。其中，物理车间是车间客观存在的实体集合，主要负责接收 WSS 下达的生产任务，并严格按照虚拟车间仿真优化后的预定义的生产指令，执行生产活动并完成生产任务。虚拟车间是物理车间的忠实的、完全数字化镜像，主要负责对生产计划 / 活动进行仿真、评估及优化，并对生产过程进行实时监测、预测与调控等。WSS 是数据驱动的各类服务系统功能的集合或总称，主要负责在车间孪生数据驱动下对车间智能化管控提供系统支持和服务，如对生产要素、生产计划/活动、生产过程等的管控与优化服务等。车间孪生数据是物理车间、虚拟车间和 WSS 相关的数据，以及三者数据融合后产生的衍生数据的集合，是物理车间、虚拟车间和 WSS 运行及交互的驱动。

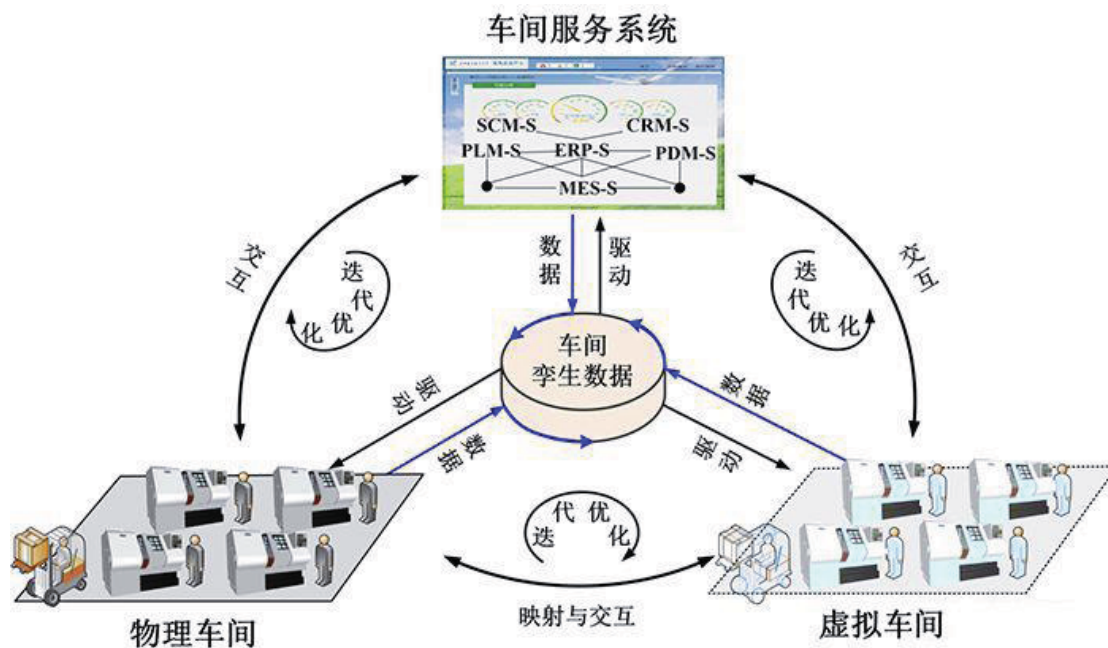


图 2 数字孪生车间主要系统组成

2.2.1 物理车间

为实现数字孪生车间，与传统车间相比，除传统车间所具备的功能和作用外，物理车间还需具备异构多源实时数据的感知接入与融合能力，以及车间“人-机-物-环境”要素共融的能力。

在实现异构多源数据的感知接入与融合方面，需要一套标准的数据通信与转换装置。它实现对生产要素不同通讯接口及通讯协议的统一转换以及对数据的统一封装，在此基础上，采用基于服务的统一规范化协议将车间实时数据上传至虚拟车间和 WSS。该装置对多类型、多尺度、多粒度的物理车间数据进行规划、清洗

及封装等，实现数据的可操作、可溯源的统一规范化处理；并通过数据的分类、关联、组合等操作，实现物理车间多源多模态数据的集成与融合。

此外，物理车间异构生产要素需实现共融以适应复杂多变的环境。生产要素个体既可以根据生产计划数据、工艺数据以及扰动数据等规划自身的反应机制，也能够根据其它个体的请求作出响应，或者请求其它个体作出响应，并在全局最优的目标下对各自行为进行协同控制与优化。与传统的以人的决策为中心的车间相比，“人 - 机 - 物 - 环境”要素共融的物理车间具有更强的灵活性、适应性、鲁棒性与智能性。

2.2.2 虚拟车间

虚拟车间本质上是模型的集合，这些模型包括要素、行为、规则三个层面。在要素层面，虚拟车间主要包括了对人、机、物、环境等车间生产要素进行数字化/虚拟化的几何模型和对物理属性进行刻画的物理模型。在行为层面，主要包括在驱动（如生产计划）及扰动（如紧急插单）作用下，对车间行为的顺序性、并行性、联动性等特征进行刻画的行为模型。在规则层面，主要包括依据车间繁多的运行及演化规律建立的评估、优化、预测、溯源等规则模型。

在生产前，虚拟车间基于与物理车间实体高度逼近的模型，对 WSS 的生产计划进行迭代仿真分析，真实模拟生产的全过程，从而及时发现生产计划中可能存在的问题，实时调整和优化。在生产中，虚拟车间不断积累物理车间的实时数据与知识，在对物理车间高度保真的前提下，对其运行过程进行连续的调控与优化。同时，虚拟车间逼真的三维可视化效果，可使用户产生沉浸感与交互感，有利于激发灵感，提升效率；且虚拟车间模型及相关信息可与物理车间进行叠加与实时交互，实现虚拟车间与物理车间的无缝集成、实时交互与融合。

2.2.3 车间服务系统 (WSS)

WSS 是数据驱动的各类服务系统功能的集合或总称，主要负责在车间孪生数据驱动下对车间智能化管控提供系统支持和服务，如对生产要素、生产计划/活动、生产过程等的管控与优化服务等。例如，在接收到某个生产任务后，WSS 在车间孪生数据的驱动下，生成满足任务需求及约束条件的资源配置方案以及初始生产计划。在生产开始之前，WSS 基于虚拟车间对生产计划的仿真、评估及优化数据对生产计划做出修正及优化。在生产过程中，物理车间的生产状态和虚拟车间对生产任务的仿真、验证与优化结果被不断反馈到 WSS，WSS 实时调整生产计划以适应实际生产需求的变化。数字孪生车间有效集成了 WSS 的多层次管理功能，实现了对车间资源的优化配置及管理、生产计划的优化以及生产要素的协同运行，以最少的耗费创造最大的效益，从而在整体上提高了数字孪生车间的效率。

2.2.4 车间孪生数据

车间孪生数据主要由四部分构成：物理车间相关的数据、虚拟车间相关的数据、WSS 相关的数据以及三者融合产生的数据。

物理车间相关的数据主要包括生产要素数据、生产活动数据及生产过程数据等。生产要素数据主要包括人、机、物、环境等要素的属性、状态、关系等数据。生产活动数据主要包括与生产要素行为相关的数据，如设备加工参数，人员操作数据，刀具轨迹数据等。生产过程数据主要包括人员、设备、物料等协同作用完成产品生产的过程数据，如工况数据、工艺数据、生产进度数据等。虚拟车间相关的数据主要包括虚拟车间运行的数据以及运行所需的数据，如模型数据、仿真数据及评估、优化、预测等数据。WSS 相关的数据包括了从企业顶层管理到底层生产控制的数据，如供应链管理数据，企业资源管理数据，销售 / 服务管理数据，生产管理数据，产品管理数据等。以上三者融合产生的数据是指对物理车间、虚拟车间及 WSS 的数据进行综合、统计、关联、聚类、演化、回归及泛化等操作下的衍生数据。

车间孪生数据为数字孪生车间提供全要素、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

不断对自身数据进行更新与扩充，是实现物理车间、虚拟车间、WSS 的运行及两两交互的驱动。

3.数字孪生车间运行机制

如图 3 所示，本节将从数字孪生车间的生产要素管理、生产活动计划、生产过程控制三个方面阐述数字孪生车间的运行机制。

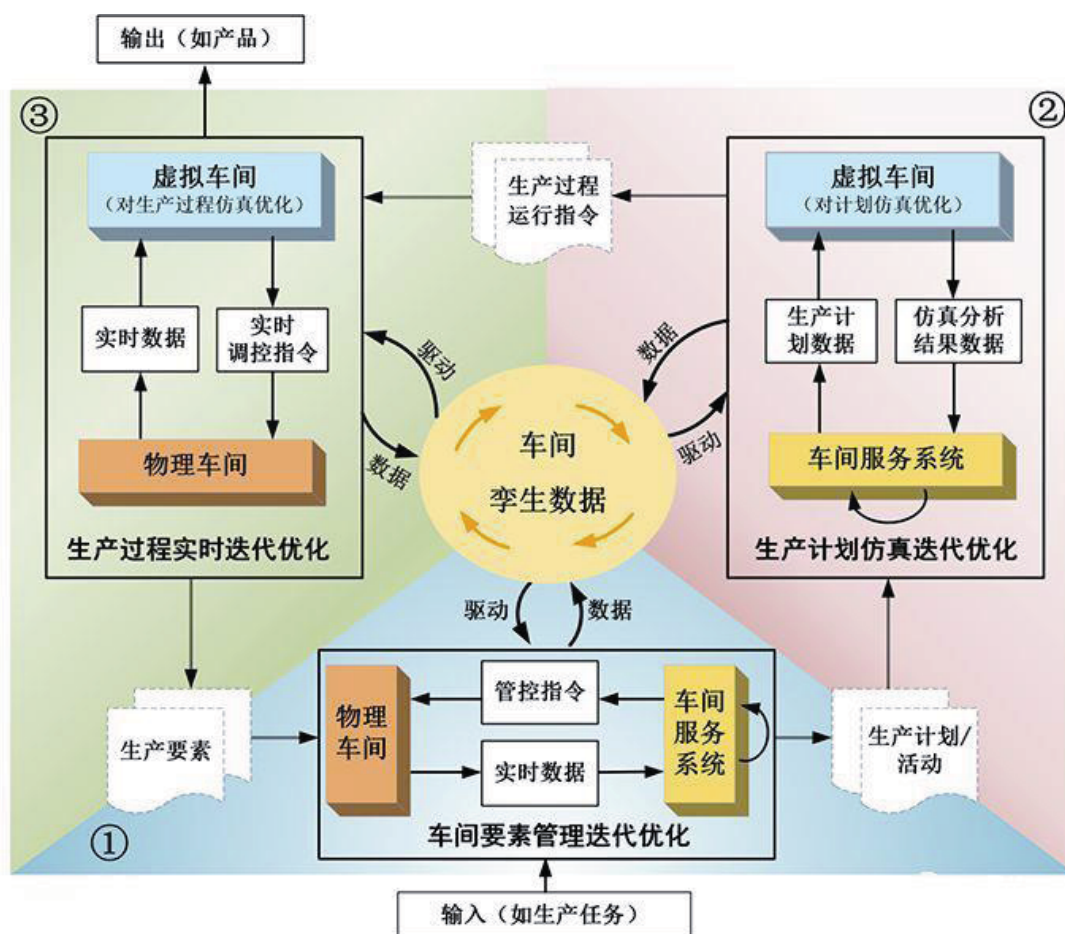


图 3 数字孪生车间运行机制

图 3 中阶段①是对生产要素管理的迭代优化过程,同时反映了数字孪生车间中物理车间与 WSS 的交互过程,其中 WSS 起主导作用。当数字孪生车间接到一个输入(如生产任务)时,WSS 中的各类服务系统在车间孪生数据中的生产要素管理的历史数据及其它关联数据的驱动下,根据生产任务对生产要素进行管理及配置,得到满足任务需求及约束条件并与其它相关环节关联的初始资源配置方案。WSS 获取物理车间的人员、设备、物料等生产要素的实时数据,对要素的状态进行分析、评估及预测,并据此对初始资源配置方案进行修正与优化,将方案以管控指令的形式下达至物理车间。物理车间在管控指令的作用下,将各生产要素调整到适合的状态,并在此过程中不断的将实时数据发送至 WSS 进行评估及预测,当实时数据与方案有冲突时,WSS 再次对方案进行修正,并下达相应的管控指令。如此反复迭代,直至对生产要素的管理最优。基于以上过程,阶段①最终得到初始的生产计划/活动。阶段①产生的数据全部存入车间孪生数据库,并与现有的数据融合,作为后续阶段的数据基础与驱动。

图 3 中阶段②是对生产计划的迭代优化过程,同时反映了数字孪生车间中 WSS 与虚拟车间的交互过程,在该过程中,虚拟车间起主导作用。虚拟车间接收阶段①生成的初始的生产计划/活动,在车间孪生数据中的生产计划及仿真分析结果的历史数据、生产的实时数据以及其它关联数据的驱动下,基于要素、行为及规则模型等对生产计划进行仿真、分析及优化,保证生产计划能够与产品全生命周期各环节及企业各层相关联,并且能够对车间内部及外部的扰动具有一定的预见性。虚拟车间将以上过程中产生的仿真分析结果反馈至 WSS,WSS 基于这些数

据对生产计划做出修正及优化，并再次传至虚拟车间。如此反复迭代，直至生产计划最优。基于以上过程，阶段②得到优化后的预定义的生产计划，并基于该计划生成生产过程运行指令。阶段②中产生的数据全部存入车间孪生数据库，与现有数据融合后作为后续阶段的驱动。

图 3 中阶段③是对生产过程的实时迭代优化过程，同时反映了数字孪生车间中物理车间与虚拟车间的交互过程，其中物理车间起主导作用。物理车间接收阶段②的生产过程运行指令，按照指令组织生产。在实际生产过程中，物理车间将实时数据传至虚拟车间，虚拟车间根据物理车间的实时状态对自身进行状态更新，并将物理车间的实际运行数据与预定义的生产计划数据进行对比。若二者数据不一致，虚拟车间对物理车间的扰动因素进行辨识，并在扰动因素的作用下，对生产过程进行仿真。虚拟车间基于实时仿真数据、实时生产数据、历史生产数据等车间孪生数据从全要素、全流程、全业务的角度对生产过程进行评估、优化及预测等，并以实时调控指令的形式作用于物理车间，对生产过程进行优化控制。如此反复迭代，实现生产过程最优。该阶段产生的数据存入车间孪生数据库，与现有数据融合后作为后续阶段的驱动。

通过以上三个阶段，车间完成生产任务，并得到生产结果（产品），生产要素相关信息存入 WSS 中，开始下一轮生产任务。通过阶段①②③的迭代优化，车间孪生数据被不断更新与扩充，数字孪生车间也在不断的进化和完善。

4.数字孪生车间的特点

4.1 虚实融合

数字孪生车间虚实融合的特点主要体现在两个方面。（1）物理车间与虚拟车间是双向真实映射的。首先，虚拟车间是对物理车间高度真实的刻画和模拟。通过虚拟现实、增强现实、建模与仿真等技术，虚拟车间对物理车间中的要素、行为、规则等多维元素进行建模，得到对应的几何模型、行为模型和规则模型等，从而真实地还原物理车间。通过不断积累物理车间的实时数据，虚拟车间真实地记录了物理车间的进化过程。反之，物理车间忠实地再现虚拟车间定义的生产过程，严格按照虚拟车间定义的生产过程以及仿真和优化的结果进行生产，使得生产过程不断得到优化。物理车间与虚拟车间并行存在，一一对应，共同进化。（2）物理车间与虚拟车间是实时交互的。在数字孪生车间运行过程中，物理车间的所有数据会被实时感知并传送给虚拟车间。虚拟车间根据实时数据对物理车间的运行状态进行仿真优化分析，并对物理车间进行实时的调控。通过物理车间与虚拟车间的实时交互，二者能够及时地掌握彼此的动态变化并实时地做出响应，生产过程不断地得到优化。

4.2 数据驱动

WSS、物理车间和虚拟车间以车间孪生数据为基础，通过数据驱动实现自身的运行以及两两之间的交互。（1）对于 WSS：首先，物理车间的实时状态数据驱动 WSS 对生产要素配置进行优化，并生成初始的生产计划。随后，初始的生产计划交给虚拟车间进行仿真和验证。在虚拟车间仿真数据的驱动下，WSS 反复地调整、优化生产计划直至最优。（2）对于物理车间：WSS 生成最优生产计划后，将计划以生产过程运行指令的形式下达至物理车间。物理车间的各要素在指令数据的驱动下，将各自的参数调整到适合的状态，并开始生产。在生产过程中，虚拟车间实时地监控物理车间的运行状态，并将状态数据经过快速处理后反馈至生产过程中。在虚拟车间反馈数据的驱动下，物理车间及时动作，优化生产过程。（3）对于虚拟车间：在产前阶段，虚拟车间接收来自 WSS 的生产计划数据，并在生产计划数据的驱动下仿真并优化整个生产过程，实现对资源的最优利用。在生产过程中，在物理车间实时运行数据的驱动下，虚拟车间通过实时的仿真分析及关联、预测及调控等，使得生产能够高效进行。数字孪生车间在车间孪生数据的驱动下，不断地被完善和优化。

4.3 全要素、全流程、全业务集成与融合

数字孪生车间的集成与融合主要体现在以下三个方面。（1）车间全要素的集成与融合：在数字孪生车间中，通过物联网、互联网、务联网等信息手段，物理车间的人、机、物、环境等各种生产要素被全面接入信息世界，实现了彼此间的互联互通和数据共享。由于生产要素的集成和融合，实现了对各要素合理的配置和优化组合，保证了生产的顺利进行。（2）车间全流程的集成与融合：在生产过

程中,虚拟车间实时监控生产过程的所有环节。在数字孪生车间的机制下,通过关联、组合等作用,物理车间的实时生产状态数据在一定准则下被加以自动分析、综合,从而及时挖掘出潜在的规律规则,最大化地发挥了车间的性能和优势。(3) 车间全业务的集成与融合:由于数字孪生车间中 WSS、虚拟车间和物理车间之间通过数据交互形成了一个整体,因此,车间中的各种业务(如,物料配给与跟踪、工艺分析与优化、能耗分析与管理等)被有效集成,实现数据共享,消除信息孤岛,从而在整体上提高了数字孪生车间的效率。全要素、全流程、全业务的集成与融合为数字孪生车间的运行提供了全面的数据支持与高质量的信息服务。

4.4 迭代运行与优化

在数字孪生车间中,物理车间、虚拟车间以及 WSS 两两之间不断交互,迭代优化。(1) WSS 与物理车间之间通过数据双向驱动、迭代运行,使得生产要素管理最优。WSS 根据生产任务产生资源配置方案,并根据物理车间生产要素的实时状态对其进行优化与调整。在此迭代过程中,生产要素得到最优的管理及配置,并生成初始生产计划。(2) WSS 和虚拟车间之间通过循环验证、迭代优化,达到生产计划最优。在生产执行之前,WSS 将生产任务和生产计划交给虚拟车间进行仿真和优化。然后,虚拟车间将仿真和优化的结果反馈至 WSS,WSS 对生产计划进行修正及优化。此过程不断迭代,直至生产计划达到最优。(3) 物理车间与虚拟车间之间通过虚实映射、实时交互,使得生产过程最优。在生产过程中,虚拟车间实时地监控物理车间的运行,根据物理车间的实时状态生成优化方

案并反馈指导物理车间的生产。在此迭代优化中，生产过程以最优的方案进行直至生产结束。数字孪生车间在以上三种迭代优化中得到持续的优化与完善。

4.5 数字孪生车间关键技术

如图 4 所示，数字孪生车间的关键技术依据其主要系统组成，主要分为 5 大类：

①物理车间“人-机-物-环境”互联与共融技术，②虚拟车间建模、仿真运行及验证技术，③车间孪生数据构建及管理技术，④数字孪生车间运行技术，⑤基于数字孪生车间的智能生产与精准服务技术。

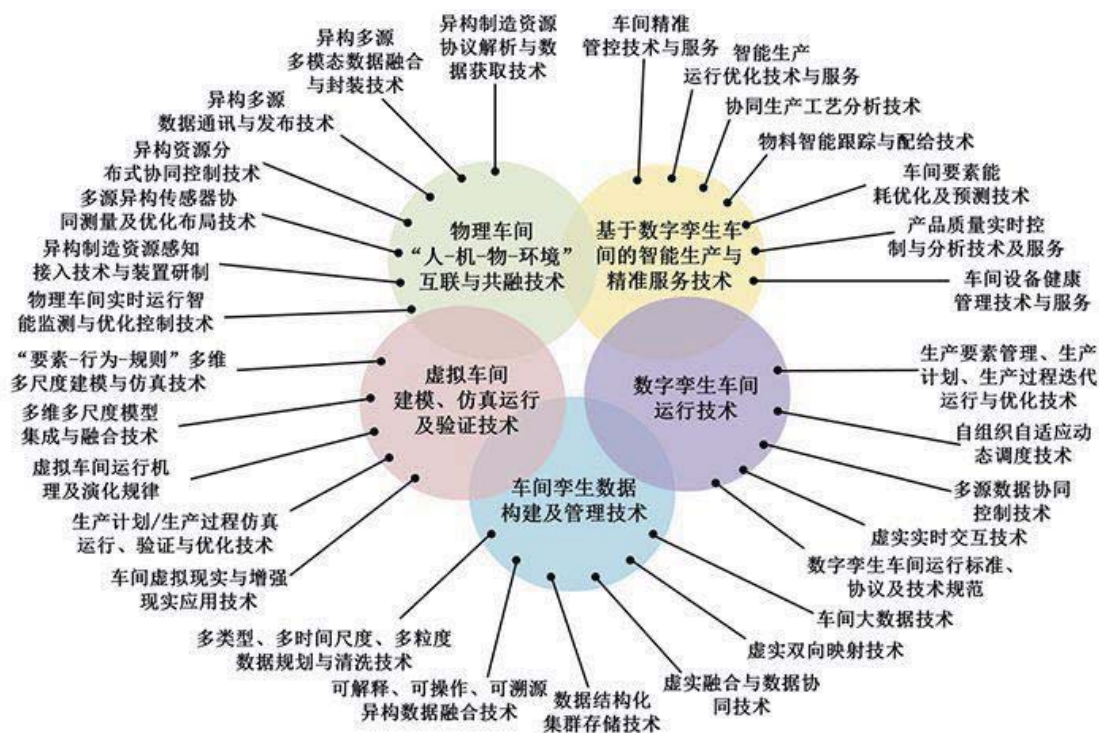


图 4 数字孪生车间关键技术

(1) 物理车间“人-机-物-环境”互联与共融技术。主要包括：

- ①异构制造资源协议解析与数据获取技术；
- ②异构多源多模态数据融合与封装技术；
- ③多源异构传感器协同测量及优化布局技术；
- ④异构多源数据通讯与发布技术；
- ⑤异构资源分布式协同控制技术；
- ⑥异构制造资源感知接入技术与装置研制；
- ⑦物理车间实时运行智能监测与优化控制技术。

(2) 虚拟车间构建、仿真运行与验证技术。主要包括：

- ①虚拟车间建模技术,如车间“要素-行为-规则”多维多尺度建模与仿真技术；
- ②多维多尺度模型集成与融合技术；
- ③虚拟车间运行机理及演化规律；
- ④生产计划/生产过程仿真运行、验证与优化技术；
- ⑤车间虚拟现实和增强现实应用技术等。

(3) 车间孪生数据构建及管理技术。主要包括：

- ①多类型、多时间尺度、多粒度数据规划与清洗技术；
- ②可解释、可操作、可溯源异构数据融合技术；
- ③数据结构化集群存储技术；
- ④数字孪生车间虚实融合与数据协同技术；
- ⑤数字孪生车间虚实双向映射技术；
- ⑥车间大数据技术[22]等。

(4) 数字孪生车间运行技术。主要包括：

- ①数字孪生车间虚实实时交互技术；
- ②多源数据协同控制技术；
- ③自组织自适应动态调度技术；
- ④生产要素管理、生产计划、生产过程等迭代运行与优化技术；⑤数字孪生车间运行标准、协议及技术规范等。

(5) 基于数字孪生车间的智能生产与精准服务技术。主要包括：

- ①车间设备健康管理技术与服务；
- ②产品质量实时控制与分析技术及服务；
- ③车间能耗优化及预测技术及服务[23-24]；
- ④物料智能跟踪与配给技术；
- ⑤协同生产工艺分析技术；
- ⑥智能生产运行优化技术与服务；
- ⑦车间精准管控技术与服务等。

5.结束语

数字孪生车间作为一种未来车间运行新模式，对实现工业 4.0、工业互联网、基于 CPS 的制造、中国制造 2025、互联网+制造、云制造、面向服务的制造等先进制造模式和战略具有重大潜在推动作用。本文针对实现上述先进制造模式和战略所共同面对的制造物理世界和信息世界之间的交互与共融这一难题，提出了数字孪生车间的概念，阐述了数字孪生车间系统组成、运行机制、特点、关键技术体系等。后续研究将围绕如何实现数字孪生车间的落地应用涉及到的理论、关键技术、运行机制等展开深入研究。

参考文献：

- [1] Tao F, Cheng Y, Zhang L, et al. Advanced manufacturing systems: socialization characteristics and trends[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2017, 28(5): 1079-1094.
- [2] NSF. Cybermanufacturing[EB/OL]. (2015-10-02).
https://www.nsf.gov/news/news_summ.jsp?cntnid=136466&WT.mcid=USNSF_51&WT.mc_ev=click.html.
- [3] Tao F, Zhang L, Hu Y. Resource service management in manufacturing grid system[M]. Hoboken, N. J., USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [4] Tao F, Zhang L, Laili Y. Configurable intelligent optimization algorithm[M]. New York, N. Y., USA: SPRINGER INTERNATIONAL PU, 2016.
- [5] Li B H, Zhang L, Wang S L, et al. Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer integrated manufacturing systems, 2010, 16(1):1-7. (in Chinese) [李伯虎, 张霖, 王时龙, 陶飞, 等.云制造—面向服务的网络化制造新模式[J].计算机集成制造系统, 2010, 16(1):1-7]

[6] Tao F, Zhang L, Venkatesh V C, et al. Cloud manufacturing: a computing and service-oriented manufacturing model[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2011, 225(10): 1969-1976.

[7] Tao F, Cheng Y, Da Xu L, et al. CCIoT-CMfg: cloud computing and internet of things-based cloud manufacturing service system[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1435-1442.

[8] Tao F, Zuo Y, Da Xu L, et al. IoT-based intelligent perception and access of manufacturing resource toward cloud manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1547-1557.

[9] Brintrup A, Ranasinghe D, McFarlane D. RFID opportunity analysis for lean manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(9): 2745-2764.

[10] Pinedo M, Yen B P C. On the design and development of object-oriented scheduling systems[J]. Annals of Operations Research, 1997, 70: 359-378.

[11] Nejad H T N, Sugimura N, Iwamura K. Agent-based dynamic integrated process planning and scheduling in flexible manufacturing systems[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(5): 1373-1389.

[12] FU Jingqi. Actuator and its application[M]. Beijing: China Machine Press, 2009 (in Chinese). [付敬奇. 执行器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2009.]

[13] Tao F, Zuo Y, Da Xu L, et al. Internet of things and BOM-based life cycle assessment of energy-saving and emission-reduction of products[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(2): 1252-1261.

[14] Grieves M. Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication[J]. White paper, 2014: 1-7.[EB/OL]. (2014-05-06). <http://www.aprison.com>.

[15] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering, 2011, DOI:10.1155/2011/154798

[16] Glaessgen E, Stargel D. The digital twin paradigm for future NASA and US Air Force vehicles[C]//53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA. 2012: 1818.

[17] Boschert S, Rosen R. Digital twin—the simulation aspect[M]//Mechatronic Futures. Springer, Cham, 2016: 59-74.

- [18] Grieves M, Vickers J. Digital twin: Mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[M]//Transdisciplinary perspectives on complex systems. Springer, Cham, 2017: 85-113.
- [19] Pardo N. Digital and physical come together at PTC live global[EB/OL]. (2015-06-08).
<http://blogs.ptc.com/2015/06/08/digital-and-physical-come-together-at-ptc-live-global/>
- [20] SIEMENS. The digital twin [EB/OL]. (2015-11-17).
<http://www.siemens.com/customer-magazine/en/home/industry/digital-ization-in-machine-building/the-digital-twin.html>.
- [21] Fourgeau E, Gomez E, Adli H, et al. System engineering workbench for multi-views systems methodology with 3DEXPERIENCE Platform. the aircraft radar use case[M]//Complex Systems Design & Management Asia. Springer, Cham, 2016: 269-270.
- [22] Li J, Tao F, Cheng Y, et al. Big data in product lifecycle management[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81(1-4):667-684.

[23] Tao F, Bi LN, Zuo Y, et al. A hybrid group leader algorithm for green material selection with energy consideration in product design[J]. CIRP Annals, 2016, 65(1): 9-12.

[24] Tao F, Wang Y, Zuo Y, et al. Internet of Things in product life-cycle energy management[J]. Journal of Industrial Information Integration, 2016, 1: 26-39.

文章由数字孪生体实验室整理，未经允许，禁止商用。

获取更多数字孪生创新研究、行业垂直解决方案以及数字孪生体技术白皮书，欢迎关注“数字孪生体实验室”微信公众号。

