

数字孪生驱动的云制造服务平台及其关键技术

陶亚宁

(正德职业技术学院, 江苏 南京 211100)

摘要: 云制造作为一种通过资源协作与服务共享提升供应链韧性并增强企业竞争力的制造模式, 面临着诸多挑战。现有云制造服务平台依赖历史数据进行任务匹配, 难以实时反映企业动态和服务需求变化; 缺乏高效的过程可视化监控方法, 导致服务执行过程中的问题难以及时发现和解决; 此外, 服务能力预测与优化不足, 限制了资源调度与服务质量保障, 无法满足用户对高可靠性与灵活性的需求。本文提出了一种数字孪生驱动的云制造服务平台框架, 详细阐述了其运行机制, 并重点探讨了云制造环境中的数字孪生建模、模型验证与动态可视化监控三项关键技术, 旨在为提升云制造服务平台的服务效率与质量提供理论依据和技术支撑。

关键词: 数字孪生; 云制造; 服务平台; 数字孪生建模; 数字孪生模型验证

中图分类号: TP278 **文献标志码:** A

Digital Twin-Driven Cloud Manufacturing Service Platform and Its Key Technologies

TAO Yaning

(Zhengde Vocational and Technical College, Nanjing 211100, China)

Abstract: Cloud manufacturing, as a collaborative paradigm that enhances supply chain resilience and enterprise competitiveness through resource sharing and service integration, faces significant challenges. Existing cloud manufacturing platforms rely heavily on historical data for task matching, struggling to dynamically adapt to real-time changes in enterprise status and service demands. Additionally, the lack of efficient process visualization and monitoring methods hinders timely issue detection and resolution during service execution. Furthermore, insufficient capability prediction and optimization limit resource scheduling and service quality assurance, failing to meet user requirements for high reliability and flexibility. This study proposes a digital twin-driven cloud manufacturing service platform framework, elaborates its operational mechanism, and focuses on three key technologies: digital twin modeling, model validation, and dynamic visualization monitoring in cloud manufacturing environments. The research aims to provide theoretical foundations and technical support for improving the efficiency and quality of cloud manufacturing services.

Keywords: digital twin; cloud manufacturing; service platform; digital twin modeling; digital twin model validation

1 引言

在多重不确定性因素交织的当下, 制造业供应链面临严峻考验, 包括需求波动、供给失衡、市场竞争激烈、

环境监管趋严及地缘政治局势多变等, 迫使制造企业寻求即时响应、灵活调配的制造服务, 以优化生产效率与成本控制, 强化供应链韧性, 保持并提升企业竞争力。

基金项目: 江苏高校哲学社会科学研究一般项目 (2024SJYB0617)

鉴于此，云制造模式的提出为数字化供应链的创新发展注入了新活力，引领研究热潮，不断深化并取得显著进展。

1.1 研究现状

在云制造模式的研究方面，云制造作为服务导向的网络化制造模式，在近年来得到了广泛的研究和应用。李伯虎^[1-2]等在2010年提出了云制造概念，强调通过云计算、物联网等技术实现制造资源的共享与协同。随着技术的发展，李伯虎^[3]等在2019年提出了云制造3.0模型，强调“智能+”时代的制造模式，进一步拓展了云制造的内涵与应用范围。齐二石^[4]等认为云制造是服务导向的网络化制造模式，以客户为中心，依托知识支持，构建虚拟化、分布式资源分配平台，实现制造资源随时访问，促进产品全生命周期内的协同制造、管理与创新。李强^[5]等基于云制造及大规模个性化定制的特性，提出了一种面向大规模定制的交互式云制造创新模式。在云制造的应用研究中，多个研究者提出了相关的优化方法。例如，王旭亮^[6]等提出了一种跨企业协同生产调度算法，解决了云制造下不同企业间的资源调度和协同生产问题；陈友玲^[7]等则针对并行结构下制造云服务的组合优化问题，提出一种基于协同效应的并行制造云服务组合算法。此外，赵秋云^[8]等针对云制造模式下制造资源的快速选择和离散制造任务的执行问题，提出了一种面向云制造任务的虚拟车间构造方法。

尽管上述研究为云制造的发展做出了重要贡献，但在云制造环境下，制造能力与任务匹配主要依赖于历史数据，这在应对市场动态变化时存在较大局限性。此外，当前云制造服务过程中缺乏动态可视化监控技术，难以及时发现和解决生产过程中的问题。

另一方面，数字孪生技术在近年来的制造业应用中得到了广泛关注。陶飞^[9]等针对物理制造系统与信息系统的交互融合挑战，引入了数字孪生车间的概念，详细解析了其系统构成、运作机理、特征及核心技术。此后，陶飞^[10]等提出了数字孪生五维模型，促进了数字孪生技术在多个领域的深入应用。LU^[11]等深入探讨了数字孪生驱动的智能制造的实质、参考架构、应用场景及研究挑战。另外，江海凡^[12]等提出的数字孪生演进模型，从数字模型到数字孪生的逐步发展，为数字孪生的应用提供了新的视角。数字孪生在车间的应用也取得了显著进展，尤其是在车间的实时监控与预测方面。ZHUANG^[13]等提出了车间数字孪生（SDT）构建和应用的框架，阐述了“SDT

建模、SDT 三维可视化实时监控、SDT 的车间作业状态预测”三个关键技术。吴鹏兴^[14]等提出了一种基于数字孪生的离散制造车间实时监控方法，解决了车间管理中的透明度与调控效率问题。

在云制造与数字孪生的融合研究方面，尽管云制造与数字孪生各自在制造业中取得了一定的进展，但目前相关研究大多集中在这两者的独立应用上，鲜有探讨两者深度融合的研究。HU^[15]等提出了一种基于云的数字孪生构建方法，旨在将数字孪生技术集成到生产性网络物理云制造系统中，从而降低资源消耗并提高生产效率。然而，这一研究主要集中在数字孪生的构建方法上，未涉及数字孪生与云制造服务过程中的协同工作。聂庆玮^[16]等则通过多智能体技术整合资源并将其动态连接到云制造服务平台，提出了基于数字孪生的企业体系架构。这一方法为云制造和数字孪生的结合提供了新视角，但同样缺乏对服务执行过程的实时监控、预测和优化等关键技术的深入探讨。

1.2 现有研究的不足与本文创新

综上所述，现有研究主要集中在云制造与数字孪生技术的独立应用，而对其深度融合的系统研究较为匮乏。当前的云制造服务平台仍面临如下挑战：①现有的云制造服务平台依赖历史数据进行任务匹配，难以应对市场变化和需求的不确定性；②云制造服务平台在服务执行过程中缺乏高效的动态可视化监控手段，问题难以及时发现和解决；③平台无法准确预测并优化服务提供商的服务能力，导致资源调度与服务质量保障方面的不足。

针对这些问题，本文提出一种数字孪生驱动的云制造服务平台。该平台通过云制造环境下的数字孪生建模、验证及动态可视化监控技术，能够有效解决任务匹配、资源调度和服务质量保障问题。具体而言，本文的创新点在于：①构建了数字孪生驱动的云制造服务平台框架并阐述其运行机制；②提出一种云制造环境下基于制造物联网的数字孪生建模技术；③提出云制造环境下基于模糊层次分析法及高阶奇异值分解方法的数字孪生模型验证技术；④基于数字孪生的动态可视化监控技术，三维呈现虚拟制造过程，即时发现并解决问题。利用动态数据更新，实时调整服务能力，保障云制造服务平台的服务质量。

总体而言，云制造和数字孪生技术在制造业中的应用前景广阔，但两者的融合研究仍处于起步阶段。本文的创新性在于提出了数字孪生驱动的云制造服务平台，

通过解决现有云制造服务平台中的关键问题，提升了平台的服务能力、质量与效率，为云制造的发展提供了新的思路与技术支持。

2 平台框架与运行机制

云制造服务平台将服务提供方所拥有的各类制造资源虚拟化封装为云服务形式的制造能力存放在服务资源池中。服务需求方根据实际需求，从服务资源池中选择功能、

性能、价格、时间和服务质量等满足要求的制造能力，然后按照业务流程进行组合，从而满足制造任务需求。

2.1 数字孪生驱动的云制造服务平台框架

传统云制造服务平台在服务提供方与服务需求方任务匹配、制造任务执行过程中的实时可视化监控、制造服务质量的预测与优化能力等方面还存在不足，因此本文提出数字孪生驱动的云制造服务平台新框架，如图 1 所示。

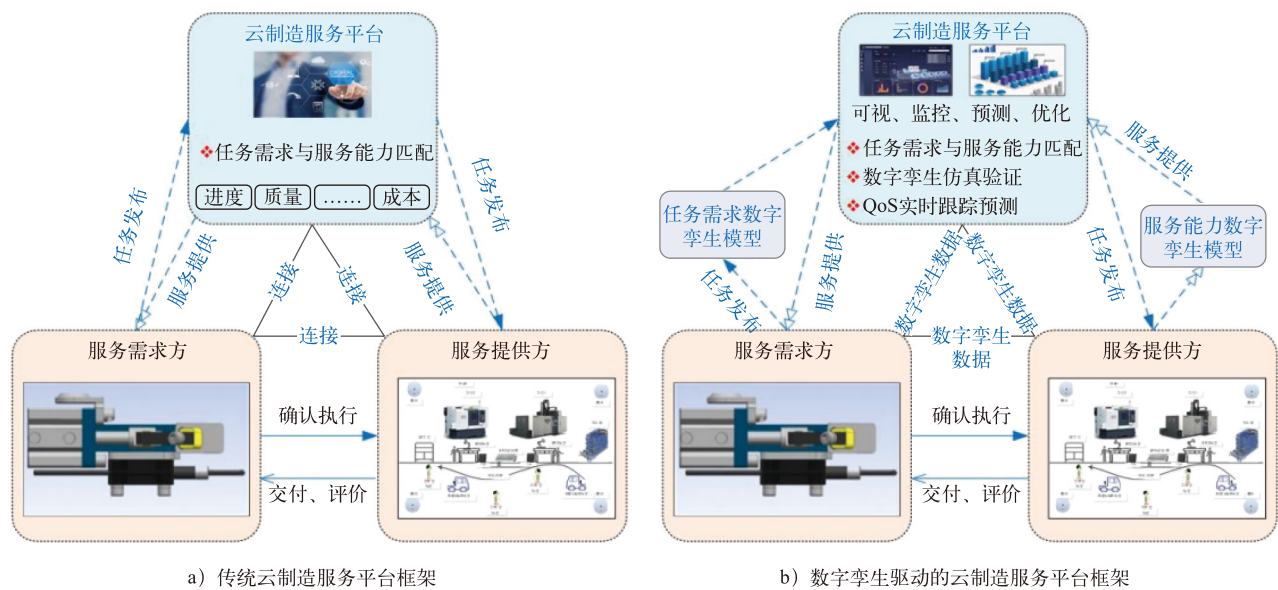


图 1 从传统云制造服务平台框架到数字孪生驱动的云制造服务平台框架

由图 1a 可知，传统云制造服务平台框架中是将服务需求与服务能力的匹配作为关键内容，即找到合适的服务提供方来承接制造任务，匹配的依据包括生产进度、质量和成本等指标，数据多来源于历史生产任务，导致匹配的时效性和动态性不足。图 1b 是数字孪生驱动的云制造服务平台框架，同样由服务需求方、服务提供方和云制造服务平台构成，与传统云制造服务模式不同的是其集成了数字孪生技术对原有的云制造服务模式进行了拓展，组成部分如下：

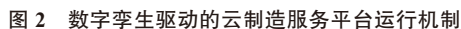
- 1) 服务需求方，需求方通过提交的任务需求到云制造服务平台，云制造服务平台对其进行建模和管理，以及寻找合适的服务提供方；
- 2) 服务提供方，服务供应商将其制造资源和能力发布到云制造服务平台中，同样进行能力建模和管理，以及作为任务需求的候选服务对象；
- 3) 云制造服务平台方，通过分析任务需求和平台中

的实时制造能力，调用优化算法求解最佳服务方案，并进行虚拟生产仿真验证，待通过仿真验证后，下发方案到服务提供方进行执行，并在任务执行过程中进行实时监控，确保任务顺利完成。

2.2 数字孪生驱动的云制造服务平台运行机制

数字孪生驱动的云制造服务平台运行机制，是指通过构建与实际分布式的制造系统一一对应的数字孪生模型，实时监测与分析生产数据，优化资源配置，实现按需服务、灵活调度，从而提升生产效率与服务质量的一种创新服务模式。

数字孪生驱动的云制造服务框架主要由服务需求方、服务提供方和云制造服务平台构成，与传统云制造服务框架不同的是数字孪生驱动的云制造服务集成了数字孪生技术，其本质是一套孪生数据驱动数字孪生体的云制造服务系统，如图 2 所示。



2) 制造资源、制造能力与制造数字孪生体。制造资源包含物理制造资源及配套使用的生产制造相关的信息化系统。物理制造资源^[18]指具有物理载体、运动行为、运行规律的设备、物料和人员等,如加工设备、物流设备、质量检测设备和操作工人等。制造能力是服务提供方的

3) 云制造服务平台基础管理、标准模型库与孪生数据。云制造服务平台基础管理向服务提供方和服务需求方提供云服务,如制造任务发布、制造能力发布、服务匹配、服务优化、服务管理和评价等。标准模型库的模型包括平台方自带的标准模型、需求方发布的产品数字孪生体模型、服务提供方发布的制造数字孪生体模型。标准模型库中的模型可以贯穿云制造的研发、生产、售后等相关阶段,起到较强的支撑作用,降低了各方接入云制造服务平台的难度,提高了孪生模型构建的效率与质量。标准模型库随着云制造服务平台订单动态更新。孪生数据融合物理实体、数字孪生体、服务平台等多源数据,驱动云制造系统优化决策,实现机制为:①数据

采集更新，物联网传感器实时采集物理实体状态，数字孪生体同步更新，数据上传云端；②孪生数据融合，平台整合多源数据，生成统一视图，支持精准任务匹配与资源调度；③智能预测优化，平台分析历史及实时数据，预测执行效果，优化资源调度；④实时监控反馈，平台利用数字孪生体监控服务过程，发现问题及时调整，确保高效高质量制造服务。

3 关键技术

在数字孪生驱动的云制造服务平台中，实现其功能需依托多项技术，其中常规数据采集与平台开发流程等技术本文不再赘述，而着重探讨三大核心技术：数字孪生建模技术、数字孪生模型验证技术及动态可视化监控技术，它们是平台高效运作的关键技术。

3.1 云制造下的数字孪生体建模技术

在数字孪生驱动的云制造服务模式中，产品数字孪生体与制造数字孪生体的模型构建是一项关键核心技术，精准的数字孪生模型可以提高云制造服务平台的监控、预测与仿真分析的准确度，本文提出一种基于制造物联^[19]的数字孪生体建模技术，其实施流程如图3所示。

物联感知系统实时获取制造物理资源信息、产品（半成品、成品）信息、制造过程信息等各类动态变化的信息并通过网络层上传给云制造服务平台的数据层，数据层分为制造数据处理与产品数据处理，在数字孪生体建模过程中分别负责制造数据与产品数据的建模规划与数据交互传输处理。

在云制造服务平台发布制造能力时，服务提供方构建制造能力的数据模型，制造能力的数据模型随着实时数据的获取不断完善。数据模型是对物理实体的设计、提取和抽象，能够将复杂的信息和数据归纳形成一个清晰简单的轮廓，通过早期的数据建模能初步完成虚拟模型的快速构建。首先，数据模型构建后，将制造物理实体中相关要素作为制造数字孪生体的几何参数与物理属性进行属性提取；其次，制造实体在实际生产过程中根据生产规则发生的生产行为构建基于事件驱动的状态模型；最后，在几何模型、物理属性、生产行为的基础上，建立制造系统逻辑模型^[20]，即得到制造数字孪生体模型。

在云制造服务平台发布制造任务时，服务需求方构建制造任务的数据模型，制造任务的数据模型中主要以

产品的几何模型和工艺模型为主，结合智能制造过程的产品制造/装配模型，形成产品数字孪生体模型。由服务提供方所生产的产品物理实体，从物料到半成品、再到成品是一个动态的过程，与其对应的产品数字孪生体的模型是一个动态模型，随着实际智能制造过程获得实时的生产数据不断演化。在制造执行过程中，云制造服务平台通过产品虚拟模型的生产实测数据和生产过程实时监控，对任务进度、完工期、服务质量等进行预测与分析。

3.2 云制造下的数字孪生模型验证技术

数字孪生驱动的云制造服务模式中构建的产品孪生模型与制造孪生模型需进行虚实一致性验证，从而保证模型的有效、正确及精准性。数字孪生模型验证技术是指以物理实体的静态数据（如产品三维模型、产品任务数据、制造资源三维模型和制造能力数据等）与制造物联的实时动态数据为基础，通过显性和隐性两个方面的特征来进行模型的验证，验证孪生模型能否准确地映射生产制造的物理实体。孪生模型验证的意义是考察虚拟制造模型能否准确地代表物理实体执行制造任务的能力。

1) 显性特征评价内容、指标及验证流程。显性特征的评价关注模型相似度和位置相似度两个方面。模型与位置相似度的评价内容主要关注虚拟制造三维模型（如产品、关键设备、物料及AGV等三维模型）与云制造环境中对应制造实体的相似度，以及制造实体（如在制品、关键物料、AGV等）在虚拟与现实环境中空间位置的一致性。评价指标上，模型与位置相似度均采用二元指标（0或1），分别表示完全不相似/不符、完全相似/相符。但实际应用中，可能需要更细致的量化指标（如相似度百分比）来精确描述。在验证显性特征（模型与位置相似度）时，可采用模糊层次分析法（FAHP）^[21]等定量与定性结合的方法。显性特征的验证流程为：①构建评价体系，根据评价方面，构建包含多个指标的层次结构模型；②确定权重，利用FAHP等方法，结合专家经验和数据，确定各指标权重；③收集数据，对比虚拟与现实环境，收集相关数据；④计算评价结果，根据数据和权重，计算各指标取值，并综合得出整体评价结果；⑤验证与调整，将结果与实际情况对比，验证准确性，必要时调整优化评价体系。

2) 隐性特征评价内容、指标及验证流程。隐性特征的评价主要关注两个核心方面：一是孪生模型是否能够

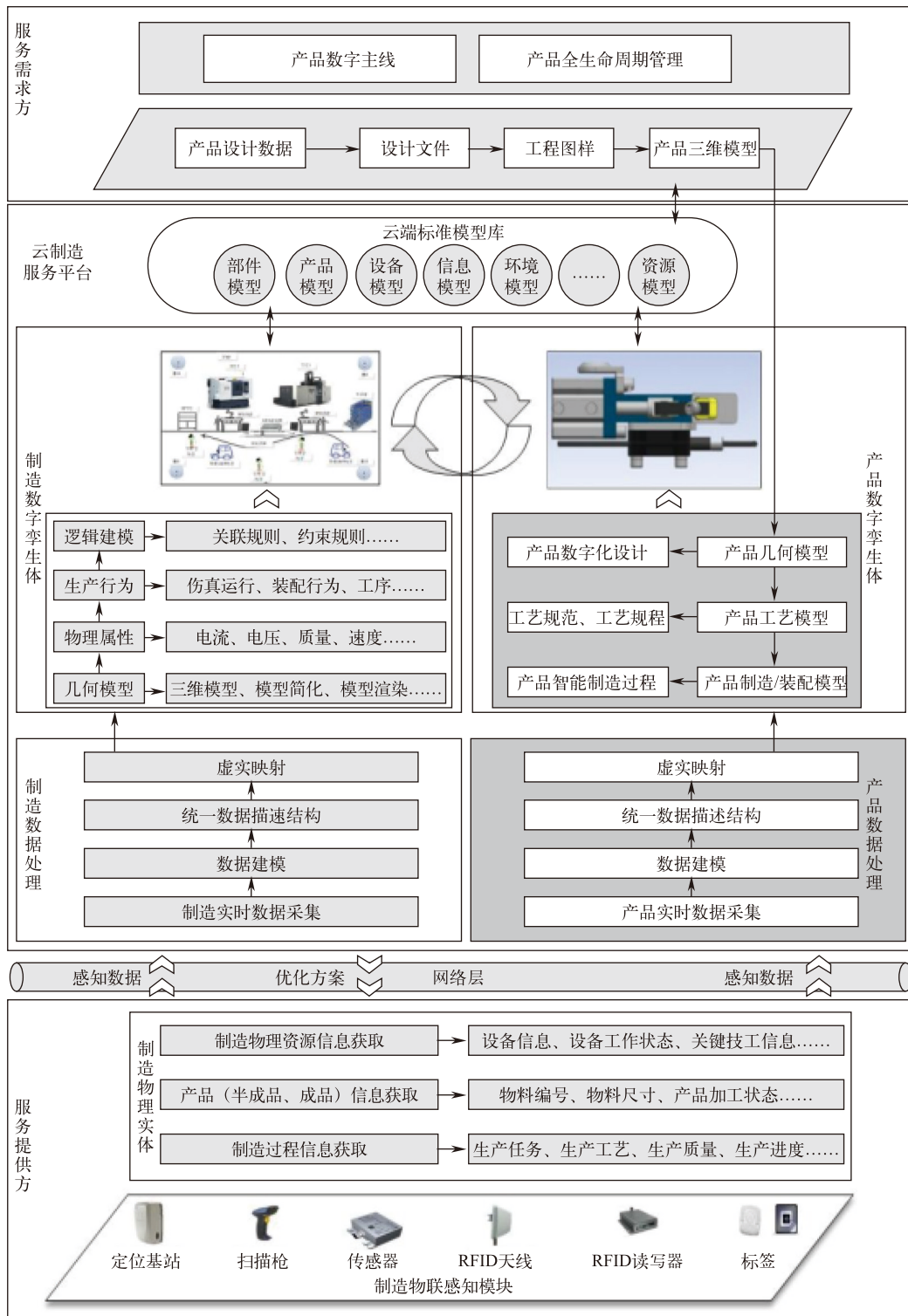


图3 基于制造物联的数字孪生体建模实施流程

准确反映物理制造系统的工序、工艺等行为特性；二是孪生模型中实时数据与物理制造系统中关键设备实时参数、产品质量实时参数、任务进度实时参数等数据的相

似程度。行为特性匹配度的评价指标：评估孪生模型输出的工序、工艺等行为特性与实际物理制造系统的匹配程度。这可以通过对比两者在相同条件下的输出结果，

以及分析输出结果之间的差异来实现。实时数据相似度的评价指标：衡量孪生模型中实时数据与物理制造系统中实时数据的相似程度。这可以通过计算两者之间的误差、相关性系数等指标来评估。隐性特征的判别可以采用基于高阶奇异值分解方法进行验证^[22]。验证流程：①数据收集，收集物理制造系统实际数据及孪生模型输出数据；②高阶奇异值分解，用高阶奇异值分解处理数据，

提取特征矩阵及权重；③特征评估，计算F范数评估特征重要性，截取不重要特征；④验证截取效果，对比截取前后孪生模型与实际数据差异；⑤综合评估，结合行为特性匹配度与实时数据相似度，评估孪生模型隐性特征表现。

经过显性特征和隐性特征的验证，两项均通过，则表明孪生模型验证通过。其验证流程如图4所示。

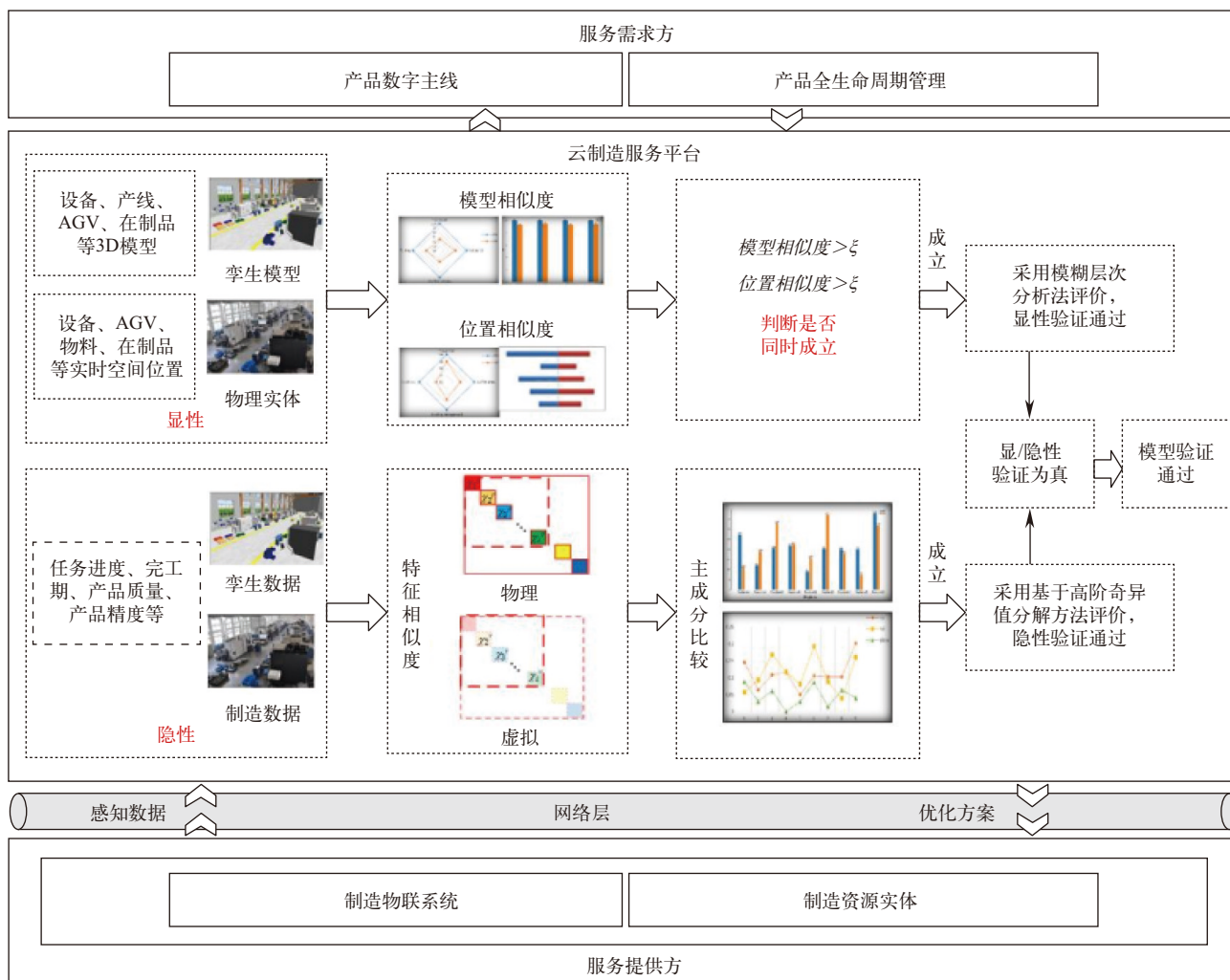


图4 基于制造物联的数字孪生模型验证流程

3.3 云制造服务可视化监控技术

云制造环境下的生产过程具有显著的不确定性和复杂性，以往依赖报表、二维图表及组态软件的监控手段已难以适应当前的监控需求，导致服务需求方难以及时获取制造任务执行的精准信息，进而无法迅速应对异常情况、调整任务规划及指导服务提供商生产。前端展示构成了数字孪生驱动的云制造服务模式的重要展示维度，

所有监控内容均在此维度上得以直观呈现。鉴于此，本节提出了一种以三维虚拟场景与实时状态看板为核心的可视化手段。云制造服务过程可视化监控如图5所示。

1) 虚拟场景，以数字孪生的虚拟场景模块作为主要监控方式，从云制造任务进度、产品质量、关键设备等对线下实际制造过程实现可视化管控。首先，平台利用CAD/CAM软件和三维建模技术，对云制造中制造实

体的物理布局、设备模型及工艺流程进行精确建模，形成高度逼真的虚拟环境。其次，通过集成制造物联技术和数据接口，实现虚拟场景与线下实际制造过程的实时数据同步。这包括但不限于云制造任务的进度信息、产品质量检测数据及关键设备的运行状态参数。在虚拟场景中，平台设计了直观的可视化元素，如动态进度条、色彩编码的质量指示器及关键指标的三维动画展示，以实时反映制造过程的各项关键指标。这些可视化元素不仅提升了监控的直观性，还有助于快速识别潜在问题和风险。

2) 状态看板^[14]，状态看板虽然在可视化效果上存在不足，但是在统计信息属性（时间、文字、数量等）方面具有不可替代的作用，可详细展示制造任务的实时和统计分析信息。平台设计了一套灵活的状态看板系统，

能够根据不同的岗位角色和生产状况，动态展示制造任务的实时数据和统计分析信息。这些信息包括但不限于任务完成时间、产品合格率等关键绩效指标。状态看板采用了易于理解的图表和仪表盘设计，如柱状图、折线图和饼图等，以直观展示数据趋势和对比关系。同时，平台还实现了数据推送功能，能够根据不同的预警规则和数据变化，及时向相关岗位角色发送数据报告和通知，确保信息的及时性和有效性。

此外，平台集成了智能决策支持系统，对进度、质量、完工期等关键指标进行实时验证和分析。一旦检测到异常状态或潜在风险，系统将立即触发虚拟仿真分析流程，利用历史数据和实时数据对制造过程进行模拟和优化。通过算法分析和数据挖掘技术，系统能够自动生成优化方案，并发送给服务提供方进行参考和处理。

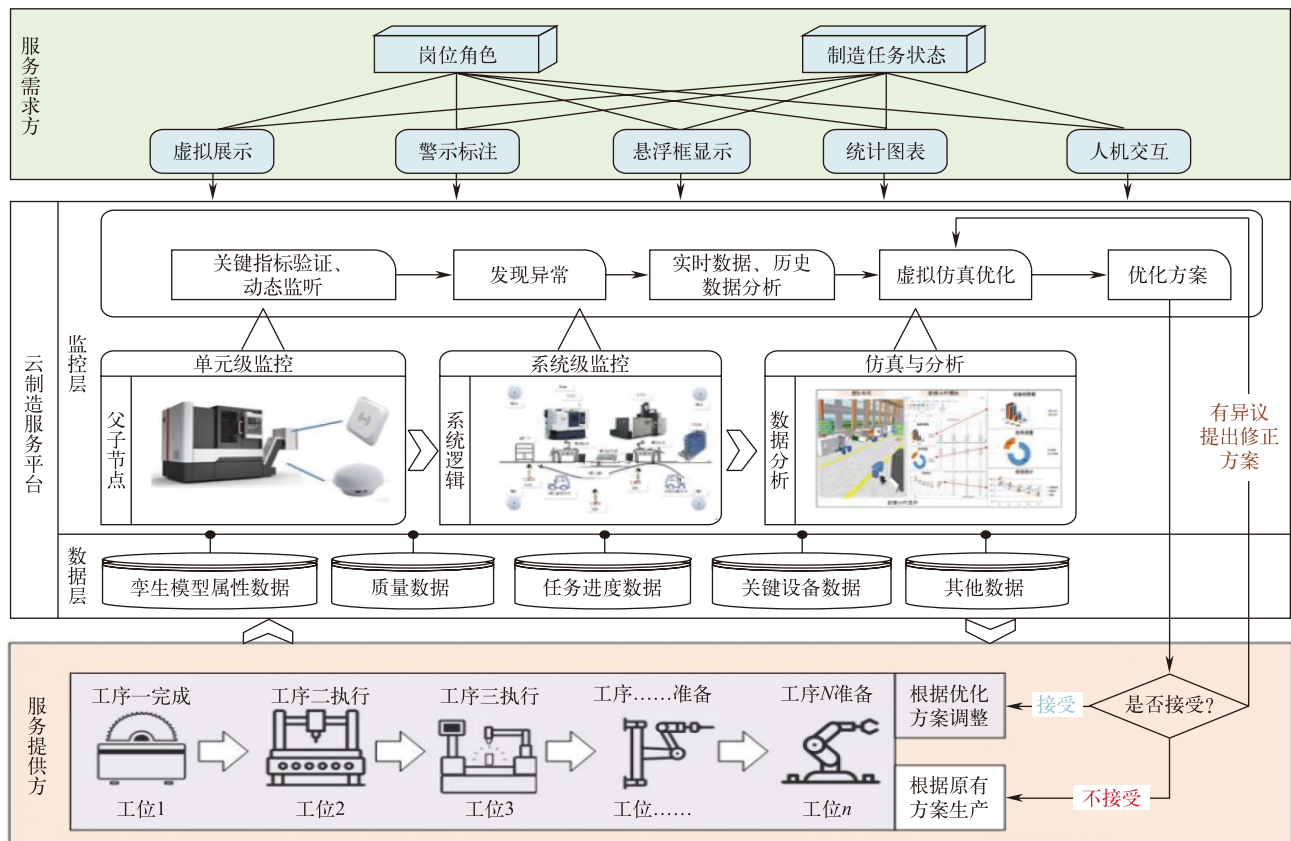


图5 云制造服务过程可视化监控图

4 数字孪生驱动的云制造服务模式的优势

与传统的云制造服务平台相比，数字孪生驱动的云制造服务平台具备以下四个优势：第一，精准判断制造能力对制造任务的适应性及未来的可持续性；第二，实

现制造服务的过程实时可视化监控；第三，对服务执行效果、质量实时评价、预测与优化；第四，实现服务关键要素与关键流程的云边协同。如图6所示。

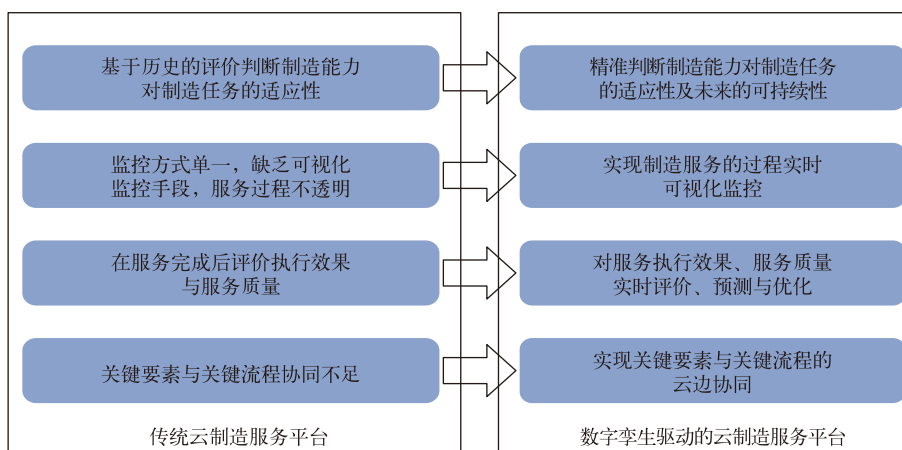


图6 数字孪生驱动的云制造服务平台优势

5 结束语

本文将数字孪生技术与云制造相结合，提出一种数字孪生驱动的云制造服务平台，主要贡献：通过分析传统云制造服务平台框架的不足，提出一种数字孪生驱动的云制造服务平台框架，阐述了数字孪生驱动的云制造服务平台的运行机制；给出了数字孪生驱动的云制造服务平台中的三项关键技术，云制造环境下的数字孪生模型构建技术、孪生模型验证技术及可视化监控技术。后续将围绕数字孪生驱动的云制造服务平台的关键技术开展更加深入研究，并推进落地应用及持续迭代优化，以便进一步提升云制造服务水平与服务质量。

参考文献

- [1] 李伯虎, 张霖, 王时龙, 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): 3-9.
- [2] 李伯虎, 张霖, 任磊, 等. 云制造典型特征、关键技术与应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18 (7): 1345-1356.
- [3] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 云制造系统 3.0——一种“智能+”时代的新智能制造系统 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (12): 2997-3012.
- [4] 齐二石, 李天博, 刘亮, 等. 云制造理论、技术及相关应用研究综述 [J]. 工业工程与管理, 2015, 20 (1): 8-14.
- [5] 李强, 汝渴, 刘计良, 等. 面向大规模个性化的交互式云制造模式 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (7): 788-796.
- [6] 王旭亮, 柴旭东, 张程, 等. 云制造环境下跨企业协同生产调度算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (2): 412-420.
- [7] 陈友玲, 刘舰, 凌磊, 等. 基于协同效应的并行制造云服务组合算法 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 137-146.
- [8] 赵秋云, 魏乐, 舒红平. 面向制造任务的云制造虚拟车间构造方法 [J]. 计算机应用, 2021, 41 (7): 2003-2011.
- [9] 陶飞, 张萌, 程江峰, 等. 数字孪生车间——一种未来车间运行新模式 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (1): 1-9.
- [10] 陶飞, 刘蔚然, 张萌, 等. 数字孪生五维模型及十大领域应用 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 25 (1): 1-18.
- [11] LU Y Q, LIU C H, WANG K I, et al. Digital Twin-driven smart manufacturing: Connotation, reference model, applications and research issues [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61 (2): 1-14.
- [12] 江海凡, 丁国富, 肖通, 等. 数字孪生演进模型及其在智能制造中的应用 [J]. 西南交通大学学报, 2022, 57 (6): 1386-1394.
- [13] ZHUANG C B, MIAO T, LIU J H, et al. The connotation of digital twin, and the construction and

- application method of shop-floor digital twin[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2021, 68 (4): 1-16.
- [14] 吴鹏兴, 郭宇, 黄少华, 等. 基于数字孪生的离散制造车间可视化实时监控方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 27 (6): 1605-1616.
- [15] HU L W, NGOC-TU N, TAO W J, et al. Modeling of cloud-based digital twins for smart manufacturing with MT Connect[J]. Procedia Manufacturing, 2018, 26: 1193-1203.
- [16] 聂庆玮, 朱海华, 唐敦兵, 等. 在云制造背景下用架构驱动的建模方法探讨数字孪生企业 (英文) [J]. Transactions of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2023, 40(1): 106-114.
- [17] 庄存波, 刘检华, 熊辉, 等. 产品数字孪生体的内涵、体系结构及其发展趋势 [J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23 (4): 753-768.
- [18] 张海军, 闫琼, 张国辉, 等. 基于数字孪生的制造资源动态优化决策 [J]. 计算机集成制造系统, 2021, 2 (27): 521-535.
- [19] 黄少华, 郭宇, 查珊珊, 等. 离散车间制造物联网及其关键技术研究与应用综述 [J]. 计算机集成制造系统, 2019, 2 (25): 284-302.
- [20] 施佳宏, 刘晓军, 刘庭煜, 等. 面向生产线仿真的数字孪生逻辑模型构建方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2022, 28 (2): 442-454.
- [21] KHORRAMA S. A novel approach for ports' container terminals' risk management based on formal safety assessment: FAHP-entropy measure-VIKOR model[J]. Natural Hazards, 2020, 2 (103): 1709.
- [22] QIAN W W, GUO Y, CUI K, et al. Multidimensional data modeling and model validation for digital twin workshop[J]. Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2021, 21 (3): 1-12.
-
- 作者简介: 陶亚宁 (1978—), 男, 博士, 江苏省产业教授, 主要研究方向为云制造、数字孪生、数字化供应链。
- 收稿日期: 2024-11-18