

6-14-2018

Modeling & Simulation Technology in Manufacturing

Zhang Lin

1.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;;2.Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beijing 100191, China;

Longfei Zhou

1.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;;2.Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beijing 100191, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Modeling & Simulation Technology in Manufacturing

Abstract

Abstract: With the continuous deepening of the application of information technology in the manufacturing field, the informatization of manufacturing systems is developing from unit digital manufacturing to integration networked manufacturing, and then to the comprehensive digital, networked and intelligent manufacturing. As a comprehensive information technology integrating computer, model theory, and scientific computing, modeling & simulation technology plays an irreplaceable role during the development of manufacturing informatization and is widely applied in all phases of the whole product lifecycle, such as design, manufacturing, testing, maintenance, purchase, sales and other phase. This paper reviews and summarizes the research and application of modeling and simulation technology in manufacturing, and analyzes typical simulation techniques in manufacturing from aspects of manufacturing unit simulation, manufacturing integrated simulation and manufacturing intelligent simulation.

Keywords

manufacturing, modeling & simulation, simulation for manufacturing

Recommended Citation

Zhang Lin, Zhou Longfei. Modeling & Simulation Technology in Manufacturing[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 1997-2012.



张霖

北京航空航天大学教授、博士生导师。1992年于清华大学获博士学位，2002年~2005年在美国海军研究生院从事研究工作。研究方向包括复杂系统建模仿真、智能制造、云制造、智能物联系统、服务网络等。

曾任国际建模仿真学会(SCS)主席，国家863/CIMS主题办公室主任，北航自动化学院副院长等。现为SCS Fellow，亚洲仿真联盟(ASIASIM) Fellow，中国系统仿真学会常务副理事长，中国人工智能学会理事，中国科协第九届全国委员会委员。国家863主题云制造项目首席专家，北京市云制造平台与服务工程中心学术委员会主任，复杂产品智能制造系统技术国家重点实验室学术委员会委员，航天系统国家级仿真重点实验室学术委员会委员，多个国际期刊编辑及编委。发表论文200余篇，论文总计被引用7000余次，获国家发明专利10余项。获国家863十五周年先进个人和全国优秀科技工作者称号。

制造中的建模仿真技术

张霖^{1,2}，周龙飞^{1,2}

(1.北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院，北京 100191；2.复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心，北京 100191)

摘要：随着信息技术在制造领域应用的不断深入，制造系统的信息化经历着从单元数字化，到集成网络化，再到全面数字化网络化智能化的发展过程。建模仿真技术作为一项融合计算机、模型理论、科学计算等多个学科的综合技术，在制造信息化的发展过程中发挥着不可替代的作用，被广泛应用于设计、生产、测试、维护、采购、销售等产品全生命周期的各个阶段。对制造领域中的仿真技术研究及应用现状进行回顾和总结，分别从制造单元仿真、制造集成仿真和制造智能仿真三个方面对制造中的典型仿真技术进行分析和展望。

关键词：制造；建模仿真；面向制造的仿真

中图分类号：TP391

文献标识码：B

文章编号：1004-731X(2018)06-1997-16

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806001

Modeling & Simulation Technology in Manufacturing

Zhang Lin^{1,2}, Zhou Longfei^{1,2}

(1.School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100191, China;

2.Engineering Research Center of Complex Product Advanced Manufacturing Systems, Ministry of Education, Beijing 100191, China)

Abstract: With the continuous deepening application of information technology in the manufacturing field, the informatization of manufacturing systems is developing from unit digital manufacturing to integration networked manufacturing, and then to the comprehensive digital, networked and intelligent manufacturing. As a comprehensive information technology integrating computer, model theory, and scientific computing, the modeling & simulation technology plays an irreplaceable role during the development of manufacturing

<http://www.china-simulation.com>

• 1997 •

informatization and is widely applied in all phases of the whole product lifecycle, such as design, manufacturing, testing, maintenance, purchase, sales and so on. This paper reviews and summarizes the research and application of modeling and simulation technology in manufacturing, and analyzes typical simulation techniques in manufacturing from aspects of manufacturing unit simulation, manufacturing integrated simulation and manufacturing intelligent simulation.

Keyword: manufacturing; modeling & simulation; simulation for manufacturing

引言

经过六十多年的发展,建模仿真¹技术已成为继理论与实验之外人类认识与改造客观世界的又一种重要手段,其应用范围几乎涵盖科技、经济、社会、军事等各个方面,特别是在关系国家实力和国家安全的关键领域,如航空航天、信息、生物、材料、能源、制造、农业、教育、军事、医疗、交通等,发挥着不可或缺的作用。这些领域的共同特点是研究对象往往具有极高的复杂性、强不确定性和非线性,甚至一个系统同时具有定量与定性、连续与离散等特性,使得采用传统的理论研究方法对系统进行全面深入的研究变得十分困难,而采用仿真手段往往成为一种必然的甚至是唯一的选择,仿真技术在解决实际问题时表现出独特的优势^[1-6]。在制造领域,仿真技术的应用最早可以追溯到上世纪 50 年代,经过几十年的发展,应用范围涉及到产品全生命周期的几乎所有阶段,包括设计、生产、测试、维护、采购、供应、销售、售后服务等。仿真在制造领域发挥着极其重要的作用。

通过与信息技术的融合,制造系统逐渐向着数字化、网络化、协同化、个性化、服务化和智能化的方向发展。制造领域对仿真技术的需求也变得越来越强烈。美国国防部高级研究与计划局(DARPA)、商务部、能源部、国家科学基金会于 2000 年联合发布的集成制造技术路线图(Integrated Manufacturing Technology Roadmapping Project, IMTR)提出了未来制造业面临的 6 个重大挑战,包括:成为精良、高效的企业,提高响应客户的企业,成为全面互联的企业,保持环境可持续性,进行知识管理,善于应用新技术等。同时,MITR 提出了用于应对这些挑战的 4 个技术领域,包括:面向制造的信息系统、建模仿真、制造工艺与装备、企业集成。其中建模仿真被视为应对制造业挑战的关键技术领域之一。

文献[7]将制造信息化的发展归纳为 3 个基本范式,即数字化、数字化网络化、数字化网络化智能化(又称新一代智能制造)。参照这一观点,本文将制造中的建模仿真技术大致分为 3 个阶段,即面向制造单元数字化的仿真技术(简称制造单元仿真技术),面向数字化网络化的集成仿真技术(简称制造集成仿真技术)和面向数字化网络化智能化的智能仿真技术(简称制造智能仿真技术)。制造仿真技术的演化过程见图 1。

本文对仿真技术在制造系统中的应用进行较为系统的回顾,并对相关技术的发展趋势进行展望。

1 制造单元仿真技术

通过运用数字化技术,制造企业可以缩短产品的研发周期和成本,更好地满足用户的个性化定制需求,从而提高产品设计合理性和产品质量,加快企业对市场需求的响应速度^[8-9]。建模仿真技术是制造系统实现数字化的一个非常重要的方面。通过仿真能够帮助决策者和工程师对复杂的制造系统进行全面深入的分析,预测运营策略的变化对系统性能的影响^[10]。仿真在制造中的设计、生产、测试、维护、采购、销售等各个阶段都有应用。由于篇幅所限,本节主要介绍仿真在设计、生产和测试这几个典型环节中的应用情况。

¹ 仿真是基于模型的活动,仿真的概念本身包含建模,但为了突出模型的重要性,国际上通常将建模和仿真并称为“建模仿真(Modeling and Simulation, M&S)”。本文中“仿真”和“建模仿真”具有相同的含义。

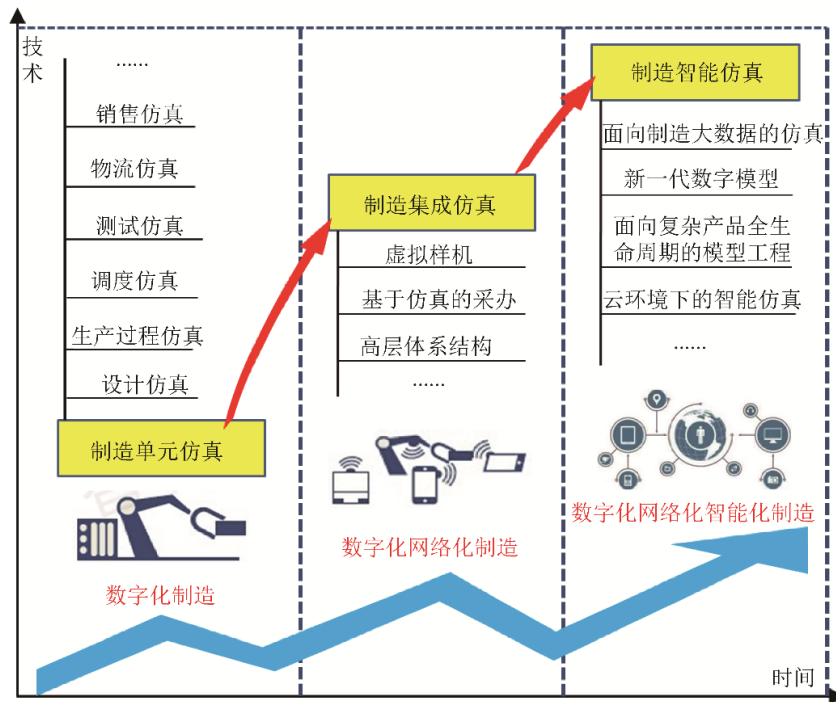


图1 制造系统数字化及仿真技术的演化过程

Fig. 1 Evolution of manufacturing system digitization and simulation technology

1.1 面向设计的仿真技术

设计是产品生命周期中最具创造性的活动，同时也最具不确定性，且容易出现错误。众所周知，越是在产品生命周期的早期出现错误，所造成的损失就越大。因此，在设计阶段采用仿真技术尽可能消除或减少错误，意义十分重大。

复杂产品的设计往往包含多个领域，以机械产品为例，一般包括机械结构、电子、控制、气动、液压等。随着产品种类的不同，产品所包含的领域也有所不同。每个领域的设计方案都需要通过仿真进行完善和优化。不同领域都有各自的专门设计软件和工具^[11-12]。

结构仿真包括静力学仿真、动力学仿真、运动学仿真、流体动力学仿真、热力学仿真等，往往需要与有限元分析等方法相结合。其中，静力学仿真主要对产品稳定载荷下的应力、位移、应变等因素进行分析，主要用于检验产品的强度、刚度和稳定性。动力学仿真则对变化载荷作用下产品的结构进行仿真，包括模态分析、瞬态分析、谱分析、振动分析等内容。运动学仿真用于仿真机构运动轨迹、速度、加速度等。流体动力学仿真用于分析流体流动与热传导等相关的物理现象，分析系统的速度场、压力场等。热力学仿真用于仿真系统内的热流与温度场，对系统的热传导能力等进行分析。

电子电路仿真是使用模型对电子电路的真实行为进行模拟的过程。尤其是对于集成电路，结构非常复杂，在物理上实现电路所需的电子工艺成本很高，所以几乎所有的集成电路设计都采用仿真的方法对电路的功能和性能进行检验和优化。

控制仿真是指利用计算机和相应的物理仿真环境对控制系统、执行器和系统运行环境进行模拟的技术。控制是仿真技术应用最成熟的领域之一。

随着制造系统的网络化和集成化，设计阶段的仿真也向着集成化的方向发展。具体内容将在第2节中介绍。

1.2 面向生产执行过程的仿真技术

生产执行过程是产品全生命周期的重要阶段,也是最复杂的阶段之一。生产执行过程的优劣直接影响最终产品的质量和性能。在生产执行阶段,仿真技术的应用主要包括:制造工艺仿真、面向加工过程的仿真和面向生产任务计划调度的仿真等。

1.2.1 制造工艺仿真

工艺设计是产品生命周期中的重要步骤,连接了产品设计与产品生产两个阶段,是设计与生产之间的纽带。为了保证所规划的工艺方案的可行性与有效性,需要在生产过程执行之前对工艺规划方案进行仿真,尽可能减少方案中的不合理因素,并进行必要的优化。

在数控加工领域,工艺仿真通常包括使用刀具路径轨迹和运动过程干涉检测的运动学仿真(几何仿真),以及预测加工特性和加工精度的动态仿真(物理仿真)^[13-14]。在焊接领域,工艺仿真是在焊接之前通过建模和数值分析技术对焊接过程进行模拟,对焊接过程进行评估,并对工艺参数进行优化^[15]。文献[16]在现有工艺设计系统的基础上集成了仿真模块,可根据规划的工艺方案模拟加工过程,并根据仿真结果来修正原先的工艺方案,从而实现对工艺方案的优化。

面向工艺设计的仿真技术可以降低产品工艺设计的时间和成本,提高工艺方案质量。工艺设计仿真技术仍然需要进一步的研究和探索。

1.2.2 加工过程仿真

加工过程的仿真包括针对单台设备加工过程的仿真和针对生产流程的仿真。单台加工设备的仿真是构建具有运动学和动力学特征的加工实时运行的仿真模型,通过运行模型直观地观察加工过程及其物理特性,如切削轨迹、切屑形成过程、应力场、温度场、变形和振动等连续或瞬间的运动形态和特性参数。数控系统仿真是加工过程仿真的重要内容,常用于数控程序的优化以及对数控操作人员的培训。数控加工仿真技术相对成熟,商业化仿真软件有很多,功能主要包括数控程序验证、机床运动仿真、路径优化、机床特征、实体比较等。通过和虚拟现实(Virtual Reality, VR)等技术的结合,可以构造一个真实的数控操作虚拟环境,模拟真实的控制系统和加工过程,实现虚拟加工,可以使技术人员在实际加工之前,对数控程序进行仿真验证,观察及测量最终的加工结果模型,对加工程序正确性进行验证、评估和优化^[17]。近年来仍有许多关于加工过程仿真的研究,如基于线上仿真的机器人程序优化方法^[18]、基于虚拟仿真的生产过程优化控制^[19]和基于仿真的工作负载及作业释放控制等^[20]。

1.2.3 生产过程仿真

生产过程管理的基本功能是计划、调度和控制,仿真在生产过程中的应用主要也是针对这几个方面。

自20世纪八十年代年以来,基于仿真的制造系统调度一直受到研究者的关注^[21-23],特别是在一些新兴制造行业中得到广泛应用^[24-26]。与其他技术相比,仿真技术可以在更短的时间内产生比较可行、精确的调度方案^[27-28]。实际制造系统具有很强的动态性,调度周期内的干扰会导致调度方案失效,确定性方法难以解决实际制造中的调度问题^[29-31]。仿真技术是解决制造动态调度的有效方法。制造调度仿真一般分为离线仿真和在线仿真两类。

在仿真技术发展的初期,调度仿真主要以离线仿真为主。制造企业利用仿真技术得出特定场景实验的统计分析结果^[32],然而不能观察系统的动态演化过程^[33]。离线仿真包括调度规则与仿真结合的方法、混合逆向调度方法^[34]、基于仿真的设备关键性验证与评估^[35]、设置时间与工序无关情况下的调度规则^[36-37]

等等。在线仿真方法则根据系统实时数据对模型的状态进行更新, 将仿真结果用于真实系统的控制和调度决策。调度系统根据仿真结果周期性地改变实际的任务派发规则以满足调度系统性能指标^[38-40]。仿真结果通过用户终端界面发送给车间操作人员, 可提高工人对干扰事件的响应能力^[41-42]。利用仿真可以把简单的任务优先级规则结合起来, 实现交互式的调度过程^[43-45]。图2所示为根据实际生产制造系统用 Simio 仿真软件建立的调度仿真模型。在线仿真技术在复杂制造系统中的应用仍面临很大的挑战^[46]。

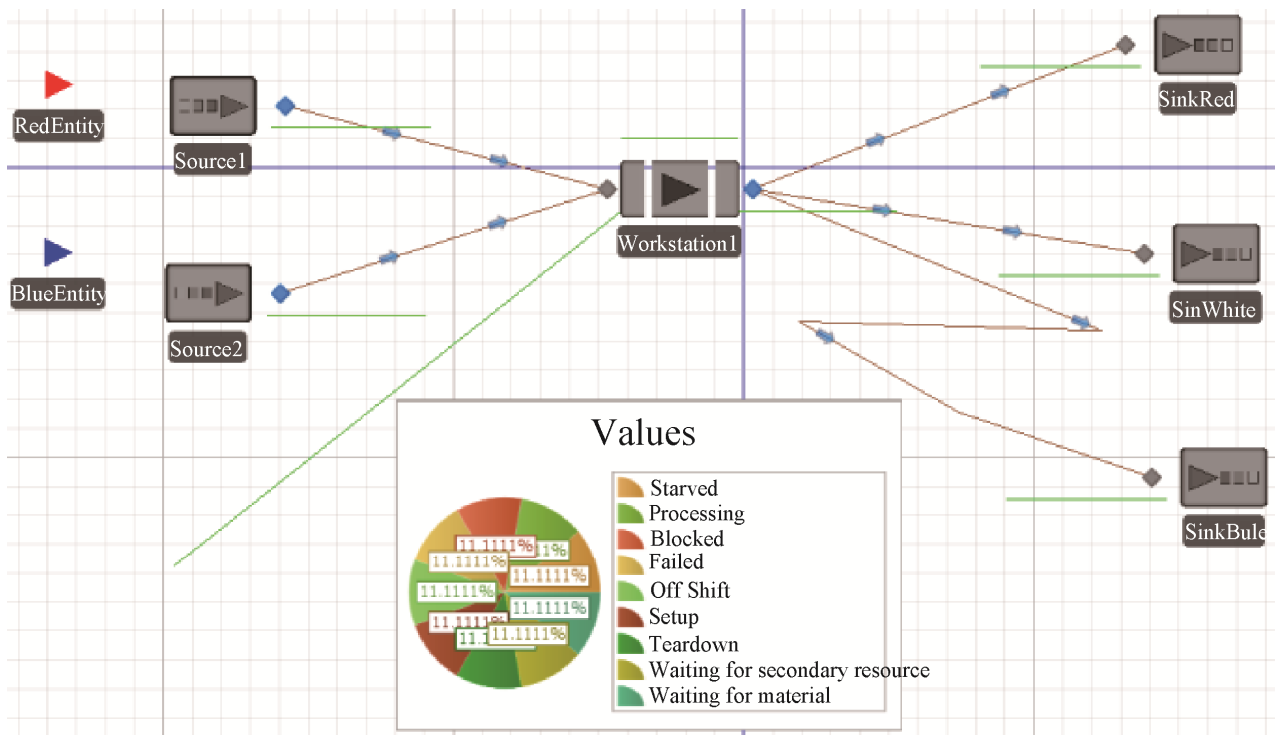


图2 调度仿真模型实例

Fig. 2 Example of scheduling simulation model

在线仿真和离线仿真的结合使用可能产生更好的调度效果。此外, 仿真与智能优化算法的结合^[47-50], 以及仿真与专家系统的结合^[51-53]也被研究和应用于解决制造调度问题。随着计算机技术的迅速发展, 仿真时间大大降低, 为仿真方法在复杂多变系统环境下实时评估和调度创造了条件。

除了上面介绍的几种面向生产过程的仿真技术, 仿真在物流、仓储、供应链管理等方面的应用也非常普遍。这里不再一一赘述。

1.3 面向测试过程的仿真技术

测试技术是产品生命周期中非常重要的环节, 测试过程的质量和效率直接影响产品质量和用户体验。虚拟测试主要包括: 基于虚拟仪器的虚拟测试技术、基于软件仿真的虚拟测试技术和基于虚拟现实的虚拟测试技术。

1.3.1 基于虚拟仪器的虚拟测试

虚拟仪器是具有虚拟仪器面板的个人计算机测量仪器。它将计算机资源与仪器硬件和数字信号处理技术相结合, 共享系统内的软件资源。它将普通仪器的功能与一般仪器中没有的特殊功能相结合, 改变了制造商对仪器功能进行定义的方式, 变为由用户定义的方式。根据测试功能的需要, 用户可以将常用

模块与一个或多个功能组合起来,并调用不同的软件模块来形成不同的仪器功能。当测试需求发生变化时,只需添加或更换仪器硬件和软件模块即可创建新仪器,而无需重新购买整个仪器^[54-55]。文献[56]基于虚拟仪器构建了车辆能源消耗测量系统,对汽车油量消耗进行实时采集和仿真测试。

与传统仪器相比,虚拟仪器具有高效、自动化测量、成本低廉等优势,而且可用于传统仪器难以胜任的测量环境,如有毒、危险、远程环境下的实时检测,因此具有非常广阔的发展前景。

1.3.2 基于软件仿真的虚拟测试

基于软件的虚拟测试通常是指通过软件仿真在开发的早期阶段测试电子组件,特别是集成电路芯片。采用虚拟测试技术,即使在第一块集成电路芯片生产之前,也可以根据产品的规格和要求进行测试。其目的是尽早发现产品电路设计中的错误,缩短产品开发周期,降低开发成本。虚拟测试可以模拟整个测试环境,但是不同产品的复杂性和测试要求可能差别很大^[57-58]。

虚拟测试台是一个集成的软件仿真平台,将不同语言创建的模型进行集成,通过软件仿真为复杂系统提供全面的设计和支持能力,也可用于可测试性分析和电路故障诊断^[59]。这种虚拟测试的关键在于测试软件和支撑硬件以及被测设备的快速准确全面的建模。

1.3.3 基于虚拟现实的虚拟测试

虚拟现实(VR)技术是一种新型仿真技术,它可以让人身临其境地感受预先建立的三维数字模型,并实现人与虚拟场景的实时交互。基于VR的虚拟测试技术是仿真在测试过程的另一个重要研究方向。基于VR的虚拟测试具有一定的灵活性,只需要修改软件中可视化图像相关参数的设置,以模拟现实世界中物理参数的变化。随着任务的变化,现有软件可以对模型进行修改以满足新任务的要求,所以非常灵活方便。在一些特殊的环境约束条件下,可以通过虚拟场景和声音模拟对测试场景进行复制。

基于VR的虚拟测试在国内外已经有许多成功的应用。例如,采用VR技术建立汽车虚拟测试系统,利用信号采集处理、自动控制和计算机在实验室中重现汽车的各种实际工况,从而对汽车的不同性能进行评估^[60]。另外还有基于VR的虚拟测试技术在光学测试中的应用^[61]。基于VR的虚拟测试技术具有广阔的应用前景。

2 制造集成仿真技术

随着制造系统的数字化和网络化,企业中不同的信息系统之间逐步实现集成。为支持制造集成系统的设计、运行与优化,仿真技术也由面向单阶段的单元仿真技术发展为面向跨阶段的集成仿真技术。下面介绍几个典型的集成仿真技术。

2.1 虚拟样机

虚拟样机(又称虚拟原型)(Virtual Prototype, VP)技术是集成仿真技术的典型代表,是CAD/CAE等传统设计和仿真技术与并行工程等先进制造模式以及虚拟现实(VR)等信息技术相结合,而形成的一种支持复杂产品多学科协同设计的集成仿真技术。在CAD的基础上,虚拟样机进一步包含真实产品的所有关键特征,如功能特性、材料特性等,是多领域数字化模型的集合体^[62]。图3为面向汽车制造的虚拟样机模型^[63]。虚拟样机虽然面向设计,但却涉及设计之后的各个阶段,如加工、装配、运行等。虚拟样机分为沉浸式和分析式两种类型。在产品开发过程中,随着并行程度的增加,决策的失误率也随之增加。虚拟样机技术可以看作是在并行工程的基础上,为进一步提高设计并行化程度和设计效率而提出的基于仿真的

先进的设计方法, 它将上下游活动的并行转移到多领域的协同, 是解决多专家协同设计的有效途径^[64-65]。为了利用虚拟样机技术改善产品开发周期、质量和成本, 提高企业市场竞争力, 文献[66]从系统工程的角度对虚拟样机进行分析和描述, 提出了复杂产品虚拟样机工程的概念, 使虚拟样机技术在制造中的应用达到一个新的高度。文献[67]利用虚拟样机技术构建并实现了面向海上起重机设计的建模仿真系统平台。文献[68]提出了基于虚拟样机的仿真平台以实现多处理器系统上的软硬件协同设计和测试。虚拟样机技术在复杂产品研发过程中发挥着越来越重要的作用。

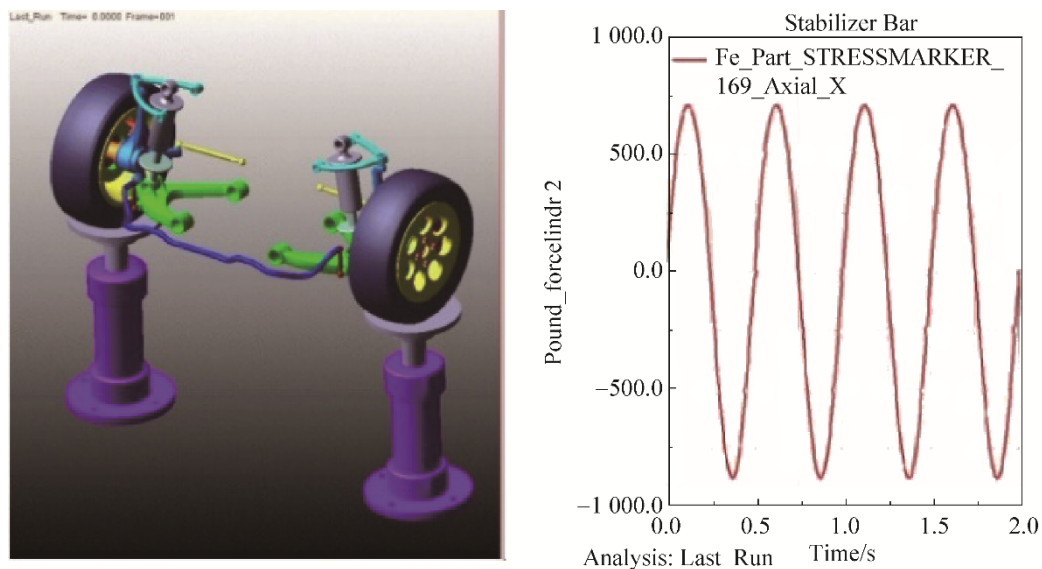


图3 面向汽车制造的虚拟样机案例^[63]

Fig.3 Example of virtual prototype for automotive manufacturing

2.2 基于仿真的采办

基于仿真的采办(Simulation Based Acquisition, SBA)是美国国防部于1997年正式提出一种基于仿真的武器装备发展的新模式。其目的在于促进在跨功能领域、跨采办阶段、跨采办项目中全面使用建模仿真工具和资源, 并且利用建模仿真技术对包括设计、生产、测试、训练、维护、报废等在内的采办全过程提供全方位支持, 从而切实缩短项目开发周期、降低开发成本和风险, 同时提高系统性能。SBA使建模与仿真作为一种资源在采办过程中得到更加有效的管理和应用^[69]。

SBA是基于虚拟样机的建模仿真技术与制造的深度融合, 具有强大生命力。目前我国在复杂产品的研制过程中对SBA的借鉴和应用也在逐步深化。

2.3 高层体系结构(HLA)

高层体系结构(High Level Architecture, HLA)是面向分布仿真提出的一个开放的、支持面向对象的体系结构^[70-71], 采用面向对象的方法建立不同层次的对象模型, 促进了仿真系统和部件的重用。RTI(Run Time Infrastructure)是实现HLA的实时运行平台。HLA/RTI在制造系统中也可发挥重要的作用。

基于HLA的分布式协同虚拟装配系统能够支持不同地点分散的设计人员在虚拟环境中进行实时协同虚拟装配^[72]。文献[73]提出了基于HLA的集成协同设计、仿真和优化平台, 并在列车的开发过程中进行了应用。联邦运营支撑环境提供了一个通用和独立的支持服务计划, 将平台的功能实现、运营管理和底

层通信进行了分离,从而使各个部分能够独立开发并充分利用各自领域的先进技术。文献[74]提出了从一个模型的输出变量映射到另一个模型输入变量的原则和实现方法,以及 HLA 应用层程序框架(如图 4 所示)。文献[75]采用 HLA 架构的方法对月球基地进行了建模和仿真研究,其中不同的小组建立了各自的模块并且相互可以沟通。

对复杂制造系统,特别是多学科协同设计、分布式协同制造系统而言,如何通过 HLA/RTI 的思想和技术提高系统集成的效率,仍需要开展大量的研究。

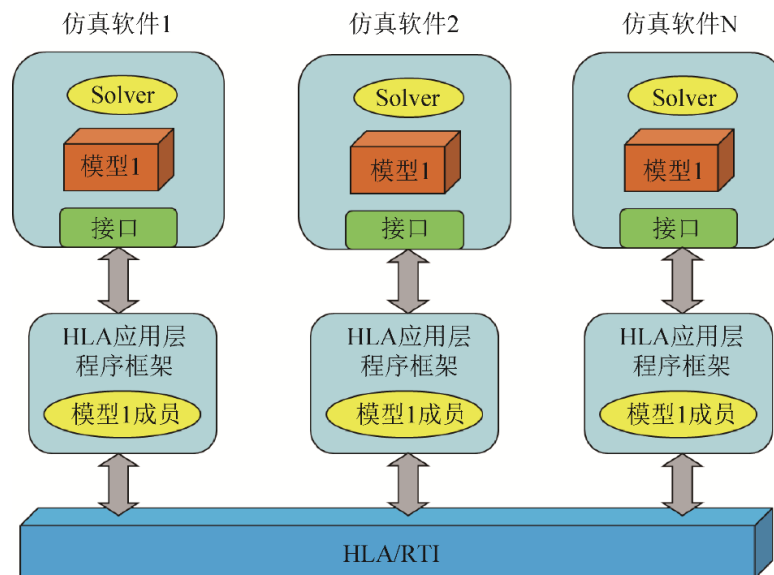
图 4 HLA 应用层程序框架^[74]

Fig. 4 Application layer program framework of HLA

3 制造智能仿真技术

新一代信息技术与人工智能技术在制造系统的深入应用促进了新一代智能制造系统的产生和发展。新一代智能制造更强调人、信息系统、物理系统三者之间的深度融合和高效协同,主要由智能产品、智能生产和智能服务三大功能系统以及工业物联网和智能制造云两大支撑系统集成而成^[7]。在这种新型的制造系统中,要现实人、信息系统、物理系统的协同优化,建模仿真技术将发挥更加重要的作用^[76]。而与此同时,由于智能制造系统的新的特点,对仿真技术提出了更高的要求,需要发展能够支持人、信息、物理相融合的面向制造的新一代建模仿真技术,我们将其称之为制造智能仿真技术。下面对几种典型的制造智能仿真技术进行介绍和展望,包括面向制造大数据的仿真技术、新一代数字模型技术、面向制造全生命周期的模型工程、云环境下的智能仿真技术、边沿仿真与嵌入式仿真技术等。

3.1 面向制造大数据的仿真技术

随着信息技术与制造技术的深度融合,制造系统变得越来越复杂并产生了规模庞大的数据。制造大数据的出现对仿真技术带来了新的机遇^[77],同时仿真技术对制造大数据的获取、处理、管理和使用也将发挥重要作用。

一方面,大数据可以对仿真建模提供新的途径和方法。传统的建模方法包括基于理论分析的机理建模、基于实验和经验的经验建模、基于输入输出数据的统计建模等。由于制造系统结构、机理、不确定

性等方面的高度复杂性, 导致了采用传统对复杂系统的建模非常困难。而利用系统运行产生的大量数据样本, 通过机器学习的方式可以建立系统的“新式模型”。虽然是一种“黑箱”模型, 但是可以通过不断地学习对模型进行优化, 从而使模型逐渐逼近真实系统。制造大数据和机器学习对仿真建模方法体系是一个重要的补充和发展。大数据对于仿真分析方法也将产生重要影响, 仿真将从对因果关系的分析转向对关联关系的分析^[78], 同时大数据为仿真分析也将提供新的资源和手段。无疑, 大数据将为制造仿真技术注入新的活力。

另一方面, 制造大数据也将成为建模仿真的重要研究对象, 借助仿真技术挖掘并发挥大数据在制造各环节中的价值。例如, 通过建立虚拟仿真环境, 对基于大数据所建立的模型进行验证和优化, 从而提高模型的质量和成熟度。此外, 仿真技术还可用于大数据的筛选和预处理, 大数据存储策略、迁移策略以及传输策略的优化等方面^[79]。

仿真技术与制造大数据相互促进、互为补充, 两者的有机结合将有效地促进制造智能化的发展。

3.2 新一代数字模型技术

随着制造系统智能化程度的提升, 人、信息系统、物理系统的融合更加深入, 对制造数字化提出了新的需求。

新一代数字模型是将传统模型与物理信息系统(CPS)、物联网(IoT)、大数据、云计算、虚拟现实/增强现实、人工智能等技术相结合, 根据特定的需求而构建的伴随被建模的物理实体全生命周期、可持续演化并高度可信的数字化模型。新一代数字模型不仅可以进行离线的分析预测, 还能够在线地与物理系统进行实时互动。新一代数字模型技术将成为支持新一代智能制造的关键技术之一。

数字双胞胎(Digital Twin, DT)(又称数字孪生、数字化双胞胎等)技术是一种典型的新一代数字模型技术。它是传统虚拟样机技术的延伸和发展。美国空军研究实验室结构科学中心采用数字双胞胎技术建立了飞行模型, 并将虚拟模型数据与物理数据相结合, 从而做出更精确的寿命预测^[80]。数字双胞胎技术还被用于建立飞机结构的数字模型用于监测飞机结构的损伤^[81]以及多机器人的协同研究^[82]。另外, 数字双胞胎技术与传感粒子技术相结合实现了对航天器的实时监测、维修和更换^[83]。文献[84]提出了机身数字双胞胎的概念, 以降低飞机维护成本。西门子公司提出的数字双胞胎解决方案包括: 产品数字双胞胎、生产工艺流程数字双胞胎和设备数字双胞胎, 这三者结合将形成基于模型的虚拟企业和基于自动化技术的现实企业镜像, 从而帮助企业在实际投入生产之前即能在虚拟环境中仿真、优化和测试^[85-86]。

由于数字双胞胎本身的模型属性, 它事实上不可能与物理对象完全“相同”, 在应用时应该根据不同的需求建立不同的模型, 以适应不同的场景。

虚拟现实(VR)/增强现实(Augmented Reality, AR)/混合现实(Mixed Reality, MR)技术也是新一代数字模型技术的重要内容。通过 VR 可以增加虚拟模型的沉浸感, 而 AR 及 MR 技术可以实现人、信息系统和物理系统的融合仿真。AR 可将计算机生成的虚拟景象叠加到现实景物上, 实现人与虚拟物体的实时交互^[87]。例如, 在产品装配过程中, 利用基于 AR 技术的光学透视显示装置, 可以将产品装配提示信息显示在操作人员的视野中, 辅助操作人员进行装配操作。文献[88]提出了一种基于 AR 的模型可重构系统用于对设计方案进行评估和修改。其中, 设计师可以对形状、颜色、纹理, 以及用户界面进行交互式地修改。文

献[89]提出了一种基于手势的AR设计环境,设计师可以在AR环境中评估3D模型设计方案,并利用手势对设计方案进行修改。通过综合运用VR/AR/MR技术,可将真实环境与虚拟环境进行融合,以产生新环境,在这个新环境中,虚拟物体与真实物体能够并存和实时交互。

制造过程是一个人、信息、机器、环境高度融合的系统。仿真技术除了建立产品模型以及制造所需要的资源、设备、环境等模型外,还可以建立人员的模型。通过人员模型与设备及环境模型的交互式仿真,实现更真实可信的仿真过程。通过使用仿真技术来验证制造过程中与人相关的因素,例如虚拟装配和人机协同仿真等。就目前的技术水平而言,涉及到人的建模仿真仍是最具挑战性的研究课题。

面向智能制造的新一代数字模型的研究和应用,总体上仍处于起步阶段,还有许多关键技术有待突破。

3.3 面向制造全生命周期的模型工程

要实现制造企业的数字化,数字模型的构建与管理是重要基础。由于制造系统和制造过程的复杂性,导致制造生命周期的模型具有很多新的特点,如(1)模型的组成更加复杂,组成元素多,元素之间的关系复杂,且具有很强的动态性和不确定性。(2)模型的生命周期长。在智能制造系统中,模型将伴随产品的全生命周期并不断演化。而且由于模型组件之间关系的复杂性,导致演化过程十分复杂。(3)模型具有很强的异构性,大量模型来自不同组织、采用不同的平台和架构、使用不同的开发语言和数据库。(4)由于对模型的依赖程度加强,模型可信性问题变得更加突出,而由于模型的复杂性提高,使得对可信性的评估更加困难。(5)为提高模型开发的效率、成本和质量,模型重用的作用和价值也越来越显著。

综上所述,迫切需要一种面向复杂制造过程全生命周期的模型理论和方法。文献[90]系统地提出了模型工程的思想,将模型开发与管理活动由一种自发的、随意性较强的行为变成了一种系统的、规范的行为,保证了模型在不同阶段的可信性,以应对复杂系统模型管理过程中遇到的诸多挑战。模型工程是采用系统化、规范化、可量化的工程化方法对模型的全生命周期所涉及的数据、知识、活动以及过程等进行管理,从而获得可信模型的理论、方法、技术、标准及工具的总称。

模型工程的思想虽是针对复杂系统仿真而提出的,但其方法和技术同样适用于制造过程的其他阶段。模型工程的主要研究内容包括:模型开发过程管理,模型成熟度评估,模型描述及一体化建模语言,统一建模方法,模型可信度及质量的量化分析与评估,模型库管理,模型组合与重用,模型重构与配置,模型演化与一致性管理,模型工程标准等等。

对于新一代智能制造而言,模型是除数据之外企业的又一重要核心资源。对模型的构建、管理和利用能力是提升企业创新能力和竞争能力的重要基础。

3.4 云环境下的智能仿真技术

制造资源/能力的云化逐渐成为一种趋势,也是智能制造的重要内容。基于云平台开展相关制造活动正成为众多制造企业实现升级转型的重要手段。如何在云环境下,通过仿真支持制造全生命周的协同优化,成为仿真技术面临的新的挑战。

关于云环境下的仿真技术,国内外学术界已有一些初步的探索。基于云计算的技术理念,融合虚拟化技术、普适计算技术和高性能计算技术的特点,文献[91]提出云仿真的概念。云仿真通过将仿真资源的

云化实现联邦系统中仿真资源的按需共享与重用, 并支持用户按需协同操作、联邦动态优化调度以及复杂系统的全生命周期活动。文献[92]提出一种面向云制造的云仿真支撑框架。文献[93]结合服务和智能体提出一种面向云制造交易过程的仿真平台。文献[94]采用人工神经网络方法对云制造平台中的仿真任务进行评估。

基于云的仿真技术与智能制造的结合将成为制造系统仿真发展的必然趋势。在这个方向上仍有大量课题需要深入研究^[94-96], 如云环境下复杂制造系统统一建模理论与方法, 服务化模型组合与调度方法, 仿真模型可信度量化评估方法, 仿真模型高效能求解与并行化智能优化算法, 智能化云仿真平台技术, 面向制造领域的仿真计算机等等。

3.5 边沿仿真与嵌入式仿真

新一代智能制造系统是以智能化物联网为基础的, 各种智能化设备、传感器等通过物联网连接到云端, 从而实现实时数据的采集和处理。处于物联系统上端的云平台承载了主要的运算、管理及仿真能力。但是制造系统的执行过程对实时性的要求很高, 单纯依赖云平台进行管理和控制有时难以满足实时性要求。所以, 需要在靠近设备端配置相应的计算和仿真能力, 即边沿仿真²(Edge Simulation), 以应对制造执行过程中对高实时计算和仿真的需求。边沿仿真是对云仿真的补充和加强, 两者相互配合可以对生产过程的管理、调度和优化提供全方位的支持。

嵌入式仿真(Embedded Simulation)是将仿真系统嵌入到真实的系统中并参与系统运行的仿真技术。嵌入式仿真技术最初是根据军事训练的需求提出的, 仿真模块被嵌入到真实的作战装备中, 可以让操作人员在真实的系统中进行模拟和训练, 很大程度地提高了仿真的真实感。在智能制造环境中, 可将仿真系统嵌入到制造系统之中, 用于实时调度、现场监控、质量检验、态势预测等。此外, 嵌入式仿真对复杂制造设备的使用和培训中也可发挥重要作用。嵌入式仿真也可理解为边沿仿真的一种延伸。面向智能制造的边沿仿真和嵌入式仿真是一个相对较新的研究领域, 有许多关键技术有待突破。

4 结论

随着新一代信息技术和人工智能技术的发展, 制造系统从简单的单机制造设备、分布式制造系统, 发展到新一代智能制造系统, 其复杂程度越来越高。建模仿真技术在制造全生命周期中的重要性也越来越突出。本文针对制造信息化的不同阶段, 分别从制造单元仿真技术、制造集成仿真技术和制造智能仿真技术三个方面, 对制造仿真技术的研究应用现状和发展趋势进行了总结、分析和展望。

与发达国家相比, 我国在制造系统建模仿真技术的研究上取得了许多有价值的成果, 在国际学术界具有一定的影响。但仿真技术在制造业应用的深度和广度以及仿真软件产业的发展, 与发达国家相比还有较大差距, 许多关键仿真软件工具仍然依赖国外产品。

建模仿真技术在制造业的应用直接关系到制造企业的设计创新能力、研发及生产成本、产品质量以及企业的整体竞争力, 需要得到各方面的高度重视。

² Edge computing 通常被翻译成“边缘计算”。事实上 edge 还有刀刃的含义, edge computing 应该理解为“将计算放在最需要的地方”, 即“好钢用在刀刃上”。因此本文中将 edge 译为“边沿”, 相应地 edge computing, edge simulation 则称为“边沿计算”、“边沿仿真”。

参考文献:

- [1] Negahban A, & Smith J S. Simulation for manufacturing system design and operation: Literature review and analysis[J]. *Journal of Manufacturing Systems (S0278-6125)*, 2014, 33(2): 241-261.
- [2] Mourtzis D, Papakostas N, Mavrikios D. The role of simulation in digital manufacturing-applications and outlook[J]. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing (S0951-192X)*, 2015, 28(1): 3-24.
- [3] Mirdamadi S, Fontanili, F., & Dupont L. Discrete Event Simulation-Based Real-Time Shop Floor Control[C]// In ECMS 2007 Proceedings edited by: I. Zelinka, Z. Oplatkova, A. Orsoni. 2007: 572-577. ECMS. <https://doi.org/10.7148/2007-0572>
- [4] Mourtzis D, Doukas M, Bernidaki D. Simulation in Manufacturing: Review and Challenges[C]// International Conference on Digital Enterprise Technology-Det, 2014, 25: 213-229.
- [5] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N, et al. Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(5): 451-462.
- [6] 中国科学技术协会. 2009-2010 仿真科学与技术学科发展报告[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
China Association for Science and Technology. 2009-2010 Report on Advances in Simulation Science and Technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.
- [7] Zhou J, Li P, Zhou Y, et al. Toward new-generation intelligent manufacturing[J]. *Engineering*, 2018, 4(1): 11-20.
- [8] Chryssolouris G, Mavrikios D, Papakostas N, et al. Digital manufacturing: history, perspectives, and outlook[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2009, 223(5): 451-462.
- [9] Chen D, Heyer S, Ibbotson S, et al. Direct digital manufacturing: definition, evolution, and sustainability implications[J]. *Journal of Cleaner Production (S0959-6526)*, 2015, 107: 615-625.
- [10] Baldwin L P, Eldabi T, Hlupic V, et al. Enhancing simulation software for use in manufacturing[J]. *Logistics Information Management (S0957-6053)*, 2000, 13(5): 263-270.
- [11] 张厚升. 电力电子电路仿真软件综述[J]. *电源世界*, 2006 (9): 48-50.
Zhang Housheng. The Summary of Power Electronic System Simulation Software[J]. *The World of Power Supply*, 2006 (9): 48-50.
- [12] 杨路明, 李谢华. 网络仿真软件比较分析及仿真过程探讨[J]. *计算技术与自动化*, 2002, 21(4): 65-70.
YANG Luming, LI Xiehua. Comparison & Analysis of Network Simulators and Discussion on Process of Network Simulation[J]. *Computing Technology and Automation*, 2002, 21(4): 65-70.
- [13] 贲可存, 李博, 臧小俊. 雷达产品关键件制造工艺仿真分析综述[J]. *现代雷达*, 2012, 34(2): 81-86.
BEN Kecun, LI Bo, ZANG Xiaojun. Review of Manufacturing Process Simulation Analysis to Critical Parts in Radar Products[J]. *Modern Radar*, 2012, 34(2): 81-86.
- [14] 陈宗民, 盛文斌, 赵而团, 等. 床身铸造工艺设计及仿真模拟[J]. *铸造技术*, 2017(11): 2767-2770.
CHEN Zongmin, SHENG Wenbin, ZHAO Ertuan, et al. Design and Simulation of Casting Process for Lathe Bed[J]. *Foundry Technology*, 2017(11): 2767-2770.
- [15] 宁汝新, 刘检华, 唐承统. 数字化制造中的建模和仿真技术[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(7): 132-137.
NING Ruxin, LIU Jianhua, TANG Chengtong. Modeling and simulation technology in digital manufacturing[J]. *Chinese Journal of Mechanical engineering*, 2006, 42(7): 132-137.
- [16] 姜存学, 蔡力钢, 胡于进. 复杂产品 3D-CAPP 中工艺方案仿真关键技术与平台研究[J]. *计算机应用研究*, 2010, 27(6): 2163-2165.
JIANG Cunxue, CAI Ligang, HU Yujin. Research on Complex Product 3D-CAPP Process Planning Simulation Plat and Key Technology[J]. *Application Research of Computer*, 2010, 27(6): 2163-2165.
- [17] Chryssolouris G, Mavrikios D, Fragos D, et al. A virtual reality-based experimentation environment for the verification of human-related factors in assembly processes[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (S0736-5845)*, 2000, 16(4): 267-276.
- [18] Petschnigg C, Breitenhuber G, Breiling B, et al. Online simulation for flexible robotic manufacturing[C]// International Conference on Industrial Technology and Management. USA: IEEE, 2018: 88-92.
- [19] Lee J, Prabhu V. Simulation modeling for optimal control of additive manufacturing processes[J]. *Additive Manufacturing (S2214-8604)*, 2016, 12: 197-203.

<http://www.china-simulation.com>

• 2008 •

- [20] Urayama K, Fu M C, Marcus S I. Simulation-based work load and job release control for semiconductor manufacturing[C]// Decision and Control. USA: IEEE, 2016: 7329-7334.
- [21] Harmonosky C M, Barrick D C. Simulation in a CIM environment: structure for analysis and real-time control[C]// Proceedings of the 20th Conference on Winter Simulation. USA: WSC, 1988: 704-711.
- [22] Harmonosky C M. Implementation issues using simulation for real-time scheduling, control, and monitoring[C]// Winter Simulation Conference. USA: WSC, 1990: 595-598.
- [23] Smith J S, Wysk R A, Sturrock D T, et al. Discrete event simulation for shop floor control[C]// Winter Simulation Conference, USA: WSC, 1994: 962-969.
- [24] Baudouin M, Ruberti C, Arekion J, et al. A decision support system based on a factory wide information integrated system and discrete event simulation to help solve scheduling problems in a semiconductor manufacturing environment[C]// IEEE Symposium on Emerging Technologies and Factory Automation. USA: IEEE, 1995, 2: 437-445.
- [25] Kim Y D, Shim S O, Choi B, et al. Simplification methods for accelerating simulation-based real-time scheduling in a semiconductor wafer fabrication facility[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing (S0894-6507), 2003, 16(2): 290-298.
- [26] Li L, Qiao F. A modular simulation system for semiconductor manufacturing scheduling[J]. Przegląd Elektrotechniczny (S0033-2097), 2012, 88(1):12-18.
- [27] Mazziotti B W, Home R E. Creating a flexible, simulation-based finite scheduling tool[C]// Winter Simulation Conference, USA: WSC, 1997: 853-860.
- [28] Kiran A S. Simulation and scheduling[K]. Handbook of Simulation: Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice. USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 677-717.
- [29] Wu S Y D, Wysk R. An application of discrete-event simulation to on-line control and scheduling in flexible manufacturing[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 1989, 27(9): 1603-1623.
- [30] Jones A, Rabelo L, Yih Y. A hybrid approach for real-time sequencing and scheduling[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (S0951-192X), 1995, 8(2): 145-154.
- [31] Selladurai V, Aravindan P, Ponnambalam S G, et al. Dynamic simulation of job shop scheduling for optimal performance[J]. International Journal of Operations and Production Management (S0144-3577), 1995, 15(7): 106-120.
- [32] Hurrión R D. An investigation of visual interactive simulation methods using the job-shop scheduling problem[J]. Journal of the Operational Research Society (S0160-5682), 1978, 29(11): 1085-1093.
- [33] Gupta A K, Sivakumar A I. Simulation based multiobjective schedule optimization in semiconductor manufacturing[C]// Winter Simulation Conference Proceedings. USA: WSC, 2002, 2: 1862-1870.
- [34] Lalas C, Mourtzis D, Papakostas N, et al. A simulation-based hybrid backwards scheduling framework for manufacturing systems[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (S0951-192X), 2006, 19(8): 762-774.
- [35] Mönch L, Zimmermann J. Simulation-based assessment of machine criticality measures for a shifting bottleneck scheduling approach in complex manufacturing systems[J]. Computers in Industry (S0166-3615), 2007, 58(7): 644-655.
- [36] V Vinod, R Sridharan. Simulation-based metamodels for scheduling a dynamic job shop with sequence-dependent setup times[J]. International Journal of Production Research (S0020-7543), 2009, 47(6): 1425-1447.
- [37] Vinod V, Sridharan R. Simulation modeling and analysis of due-date assignment methods and scheduling decision rules in a dynamic job shop production system[J]. International Journal of Production Economics (S0925-5273), 2011, 129(1): 127-146.
- [38] Davis W J. On-line simulation: Need and evolving research requirements[K]. Handbook of Simulation, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1998: 465-516.
- [39] Chong C S, Appa Iyer S, Gay R. Simulation-based scheduling for dynamic discrete manufacturing[C]// Winter Simulation Conference. USA: WSC, 2003: 1465-1473.
- [40] Frantzén M A, Ng H C, Moore P. A simulation-based scheduling system for real-time optimization and decision making support[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing (S0736-5845), 2011, 27(4): 696-705.
- [41] Kiran A S, Smith M L. Simulation studies in job shop scheduling—II[J]. Computers & Industrial Engineering (S0360-8352), 1984, 8(2): 95-105.
- [42] Morito S, Lee K H. Efficient simulation/optimization of dispatching priority with “fake” processing time[C]. Winter

- Simulation Conference, USA: WSC, 1997: 872-879.
- [43] Shannon R E, Mayer R, Adelsberger H H. Expert systems and simulation[J]. Simulation (S0037-5497), 1985, 44: 275-284.
- [44] Fisher H, Thompson G L. Probabilistic learning combinations of local job-shop scheduling rules[M]. Industrial scheduling, 1963: 225-251.
- [45] Sabuncuoglu I, Bayız M. Analysis of reactive scheduling problems in a job shop environment[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2000, 126(3):567-586.
- [46] Davis W J, Chen X, Brook A. Implementing on-line simulation upon the World-Wide Web[C]// Simulation Conference Proceedings. USA: IEEE, 1998: 87-96.
- [47] Ma Y M, Fan L Q, Zhang W M, et al. Optimization of job-shop scheduling based on simulation[J]. Journal of System Simulation (S1004-731X), 2007, 19: 4548-4552.
- [48] Zhang R. A simulation-based genetic algorithm for job shop scheduling with assembly operations[J]. International Journal of Advancements in Computing Technology (S2005-8039), 2011, 3(10): 132-139.
- [49] Manupati V K, Revanth A S, Srikanth K S S L, et al. Real-Time Rule-Based Scheduling System for Integrated Delivery in a Semiconductor Manufacturing Using Evolutionary Algorithm-Based Simulation Approach[M]// Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems, 2016, Springer, India.
- [50] 龙建宇, 郑忠, 徐兆俊, 等. 基于仿真与遗传算法的炼钢包周转调度方法[C]// 中国系统工程学会学术年会, 北京: 中国系统工程学会, 2016.
LONG Jianyu, ZHENG Zhong, XU Zhaojun, et al. Iron and steel ladle turnover scheduling method based on simulation and genetic algorithm[C]// China Society of Systems Engineering Academic Annual Meeting, Beijing: China Society of Systems Engineering, 2016.
- [51] Li H, Li Z, Li L X, et al. A production rescheduling expert simulation system[J]. European Journal of Operational Research (S0377-2217), 2000, 124(2): 283-293.
- [52] Kovács G L, Mezgár I, Nacsá J, et al. A Hybrid Simulation-Scheduler-Quality Control System to Assist the Design of Flexible Manufacturing Systems[J]. Computational Mechanics (S0178-7675), 1994, 41(3): 92-95.
- [53] Chan F T S, Chan H K. Design of a PCB plant with expert system and simulation approach[J]. Expert Systems with Applications (S0957-4174), 2005, 28(3): 409-423.
- [54] 张潇雪. 虚拟仪器及其在电工电子实验中的应用[D]. 长沙: 中南大学, 2001.
ZHANG Xiaoxue. Virtual Instrument and Its Application in Electrical and Electronic Experiments[D]. Shanghai: Central South University, 2001.
- [55] 武睿. 虚拟仪器软件 Labview 和数据采集[J]. 现代经济信息, 2017(13): 77-79.
WU Rui. Virtual Instrument Software Labview and Data Acquisition[J]. Microcomputer Development, 2017(13): 77-79.
- [56] Gao M. Research on virtual test system for instant fuel rate of commercial vehicle[J]. Agricultural Equipment & Vehicle Engineering, 2017, 55(7): 72-77.
- [57] 滕俊元, 徐忠宾, 高猛. 基于全数字仿真的虚拟软件测试环境[J]. 机电一体化, 2017 (9): 23-27.
TENG Junyuan, XU Zhongbin, GAO Meng. Virtual Software Testing Environment Based on All-digital Simulation[J]. Mechatronics, 2017 (9): 23-27.
- [58] 曲明成, 崔乃刚, 吴翔虎, 等. 嵌入式软件虚拟化测试技术标准框架研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(5): 49-55.
QU Mingcheng, CUI Naigang, WU Xianghu, et al. Research on general framework of virtual testing for embedded software[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2017, 49(5): 49-55.
- [59] 王伦发. 多功能虚拟测试平台的研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2004.
WANG Lunfa. Research on Multifunctional Virtual Test Platform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology, 2004.
- [60] 郭天太. 基于 VR 的虚拟测试技术及其应用基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.
GUO Tiantai. Research on Virtual Test Technology Based on VR and Its Application Foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2005.
- [61] 乔波, 牟同升, 李俊凯, 等. VR/AR 技术及虚拟图像的光学测试方法[J]. 信息技术与标准化, 2017(6): 17-20.
QIAO Bo, MU Tongsheng, LI Junkai, et al. Optical Test Method for VR/AR and Virtual Image[J]. Information Technology

- and Standardization, 2017(6): 17-20.
- [62] 熊光楞, 李伯虎, 柴旭东. 虚拟样机技术[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(1): 114-117.
XIONG Guangleng, LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual Prototyping Technology[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(1): 114-117.
- [63] MSC 软件公司. 面向汽车制造的虚拟样机案例[EB/OL]. 2018-05-14. <http://www.mscsoftware.com/product/adams>.
- [64] 王玲, 铁鸣, 王建林, 等. 飞行器虚拟样机总体技术研究[J]. 计算机仿真, 2017, 34(9): 51-53.
WANG Lin, TIE Ming, WANG Jianlin, et al. Virtual Prototyping Platform for Integrated Performance of Aircraft[J]. Computer Simulation, 2017, 34(9): 51-53.
- [65] 陈海霞, 刘霞. 虚拟样机技术在数控机床设计中的应用[J]. 机械制造与自动化, 2011(3): 121-122.
CHEN Haixia, LIU Xia. Modern Design Method of NC Machine Based on Concept of Virtual Prototype Technology[J]. Machinery Manufacturing and Automation, 2011(3): 121-122.
- [66] 李伯虎, 柴旭东. 复杂产品虚拟样机工程[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(9): 678-683.
LI Bohu, CHAI Xudong. Virtual Prototyping Engineering for Complex Product[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002, 8(9): 678-683.
- [67] Chu Y, Hatledal L I, Zhang H, et al. Virtual prototyping for maritime crane design and operations[J]. Journal of Marine Science & Technology (S0948-4280), 2018. doi: 10.1007/s00773-017-0509-z
- [68] Choi S H, Chan A. A virtual prototyping system for rapid product development[J]. Computer-Aided Design, 2004, 36(5):401-412.
- [69] 段红, 黄柯棣. 基于仿真的采办体系结构[J]. 系统仿真学报, 2001, 13(2): 247-250.
DUAN Hong, HUANG Kedi. Simulation-based Acquisition Architecture[J]. Journal of System Simulation, 2001, 13(2): 247-250.
- [70] 柴旭东, 李伯虎. 高层体系结构 HLA/RTI 及其实现综述[J]. 系统仿真学报, 1999, 11(2): 92-96.
CHAI Xudong, LI Bohu. An Overview of HLA/RTI and Its Implementation[J]. Journal of System Simulation, 1999, 11(2): 92-96.
- [71] Inukai T, Hibino H, Fukuda Y. Efficient Design and Evaluation for Manufacturing Systems Using Distributed Real Simulation(Manufacturing systems and Scheduling)[J]. The Japan Society of Mechanical Engineers (S2424-3086), 2017, 2005: 397-402.
- [72] 韦乃琨, 范秀敏, 武殿梁, 等. 基于 HLA 的分布式协同虚拟装配系统研究[J]. 机械设计与制造, 2008(12): 94-96.
WEI Naikun, FAN Xiumin, WU Dianliang, et al. Distributed and collaborative virtual assembly environment based on HLA[J]. Mechanical Design & Manufacturing, 2008(12): 94-96.
- [73] 肖田元, 范文慧. 基于 HLA 的一体化协同设计、仿真、优化平台[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(13): 3542-3547.
XIAO Tianyuan, FAN Wenhui. HLA based Integrated Platform for Collaborative Design, Simulation and Optimization[J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(13): 3542-3547.
- [74] 陈晓波, 熊光楞, 郭斌, 等. 基于 HLA 的多领域建模研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(11): 1537-1542.
CHEN Xiaobo, XIONG Guangleng, GUO Bin, et al. Research on Multi-disciplinary Modeling Based on HLA[J]. Journal of System Simulation, 2003, 15(11): 1537-1542.
- [75] Gorecki S, Zacharewicz G, Perry N. Using high level architecture in the see project for industrial context [M]. 2018.
- [76] 李伯虎, 柴旭东, 张霖, 等. 面向新型人工智能系统的建模与仿真技术初步研究[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(2): 349.
LI Bohu, CHAI Xudong, ZHANG Lin, et al. Preliminary Study of Modeling and Simulation Technology Oriented to Neo-type Artificial Intelligent System[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(2): 349.
- [77] 胡晓峰. 大数据时代对建模仿真的挑战与思考[J]. 军事运筹与系统工程, 2013, 27(4): 5-12.
HU Xiaofeng. Challenges and Reflections on Modeling and Simulation in the Era of Big Data[J]. Military Operations Research and Systems Engineering, 2013, 27(4): 5-12.
- [78] 李军, 李文, 彭耀, 等. 大数据科学仿真实理论、方法、平台及其技术[J]. 系统仿真技术及其应用, 2014, 15: 2-6.
LI Jun, LI Wen, PENG Yao, et al. Big Data Science Simulation Theory, Methods, Platforms And Technology[J]. System Simulation Technology and Application, 2014, 15: 2-6.
- [79] 严伟中. 关于大数据下动态数据安全传输仿真[J]. 计算机仿真, 2018, 35(2): 153-156.
YAN Weizhong. Simulation of Dynamic Data Security Transmission under Big Data[J]. Computer Simulation, 2018,

- 35(2):153-156.
- [80] 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* (S2333-9721), 2011: 154798.
- [81] Bielefeldt B, Hochhalter J, Hartl D. Computationally Efficient Analysis of SMA Sensory Particles Embedded in Complex Aerostructures Using a Substructure Approach[C]// *ASME 2015 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems*, 2015: V001T02A007.
- [82] Koenig N, Howard A. Design and use paradigms for gazebo, an open-source multi-robot simulator[C]// *Intelligent Robots and Systems*, 2004. (IROS 2004), *Proceedings. 2004 IEEE/RSJ International Conference on*. USA: IEEE, 2004, 3: 2149-2154.
- [83] Hochhalter J, Leser W P, Newman J A, et al. Coupling Damage-Sensing Particles to the Digital Twin Concept[R]// *NASA/TM-2014-218257*. USA: NASA, 2014.
- [84] Tuegel E. The airframe digital twin: some challenges to realization[C]// *53rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference 20th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference 14th AIAA*. USA: AIAA, 2013: 1812.
- [85] 李祥敬. 数字化双胞胎与 MindSphere 让我们谈谈西门子的数字化企业理念 [EB/OL]. [2018-05-14]. <http://server.zhiding.cn/server/2017/0613/3094343.shtml>
- [86] 朱建芸. 西门子“数字化双胞胎”入选“世界智能制造十大科技进展”[J]. *轻工机械*, 2018(1): 78.
ZHU Jianyun. Siemens "Digital Twins" Selected in "Top Ten Progress in Intelligent Manufacturing in the World"[J]. *Light Industry Machinery*, 2018(1): 78.
- [87] Azuma R T. A survey of augmented reality[J]. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* (S1054-7460), 1997, 6(4): 355-385.
- [88] Park J. Augmented reality based re-formable mock-up for design evaluation[C]// *Ubiquitous Virtual Reality*, 2008, *ISUVR 2008, International Symposium on*. USA: IEEE, 2008: 17-20.
- [89] Ng L X, Oon S W, Ong S K, et al. GARDE: a gesture-based augmented reality design evaluation system[J]. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)* (S1955-2513), 2011, 5(2): 85.
- [90] Lin Zhang. Model Engineering for complex system simulation[C]// *Proceedings of 58th Forum on New Academic Views*, Oct. 15, 2011, Lijiang, Yunnan, China. Beijing, China: China Science and Technology Press, 2011.
- [91] 李伯虎, 柴旭东, 侯宝存, 等. 一种基于云计算理念的网络化建模与仿真平台——“云仿真平台”[J]. *系统仿真学报*, 2009, 21(17): 5292-5299.
LI Bohu, CHAI Xudong, HOU Baocun, et al. Networked Modeling & Simulation Platform Based on Concept of Cloud Computing—Cloud Simulation Platform[J]. *Journal of System Simulation*, 2009, 21(17): 5292-5299.
- [92] 杨晨, 李伯虎, 柴旭东, 等. 面向云制造的云仿真支撑框架及应用过程模型[J]. *计算机集成制造系统*, 2012, 18(7): 1444-1452.
YANG Chen, LI Bohu, CHAI Xudong, et al. Cloud manufacturing oriented cloud simulation supporting framework and its application process model[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2012, 18(7): 1444-1452.
- [93] 赵淳, 张霖, 任磊, 等. 面向云制造交易过程的仿真平台[J]. *计算机集成制造系统*, 2016, 22(1): 25-32.
ZHAO Chun, ZHANG Lin, REN Lei, et al. Simulation platform for transaction processes in cloud manufacturing[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2016, 22(1): 25-32.
- [94] Chen T, Wang Y C. Estimating simulation workload in cloud manufacturing using a classifying artificial neural network ensemble approach[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (S0736-5845), 2016, 38: 42-51.
- [95] Shekhar S, Abdel-Aziz H, Walker M, et al. A simulation as a service cloud middleware[J]. *Annals of Telecommunications* (S0003-4347), 2016, 71(3/4): 93-108.
- [96] Higashino W A, Capretz M A M, Bittencourt L F. Cepsim: modelling and simulation of complex event processing systems in cloud environments[J]. *Future Generation Computer Systems* (S0167-739X), 2016, 65: 122-139.