

数字孪生在工艺设计中的应用探讨*

于 勇¹, 胡德雨¹, 戴 晟¹, 赵 昱^{1,2}

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191;

2. 航空高端装备智能制造工信部重点实验室, 北京 100083)

[摘要] 数字孪生作为赛博物理系统的关键技术,能够对物理世界进行数字化描述并有效管控产品全生命周期的数据,为实现产品研发生产中各种活动的优化决策提供了新的思路。对数字孪生的概念和研究进展进行了概述,针对当前 CAPP (计算机辅助工艺设计) 研究中存在的两个问题,引入了实作模型的概念,提出了数字孪生环境下 CAPP 的设计框架,最后探讨了基于实作模型的实时工艺决策和基于数字孪生的工艺知识挖掘技术。

关键词: 数字孪生; CAPP; 实作模型; 工艺决策; 工艺知识挖掘

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2018.18.026



于 勇

博士、讲师,主要专注于产品构型管理、复杂产品数字化设计制造以及产品全生命周期管理等相关数字化技术的研究与应用。长期与航空航天企业和设计院所合作,一直追踪国内外航空航天企业的数字化技术应用情况。

计算机辅助工艺设计(Computer Aided Process Planning, CAPP)是信息技术在产品制造工艺设计领域的应用,是数字化制造技术的核心内容之一,也是连接 CAD 和 CAM 的桥梁和纽带。自 1969 年挪威发布了第一个 CAPP 系统——AUTOPROS 以来,已经产生了众多各式各样的 CAPP 系统^[1],这些 CAPP 系统根据其设计原理主要分为交互型、派生型和创成型 3 种类型。

近年来,随着对 CAPP 研究的不断深入, CAPP 逐渐朝着智能化的方向发展: 欧阳华兵^[2]针对 STEP-NC 非线性工艺规划中加工工序序列的生成问题,提出了一种基于 BP 神经网络的工步序列智能化决策方法; Kang 等^[3]利用本体技术对工艺知识进行建模,建立了基于本体的工艺决策专家系统,实现了加工特征工艺方法的自动选择和排序; 黄瑞等^[4]从

工艺重用的角度出发,以基于内容的模型检索为驱动,实现了零件特征级工艺设计成果的有效重用。

但是,通过对制造企业的调研发现, CAPP 仍存在两个瓶颈问题: 首先是实时性差的问题,即现有 CAPP 系统产生的都是静态加工工艺方案,不能实现对复杂制造环境的动态实时响应; 其次是应用的深度还不够的问题^[5],无法有效地利用产品全生命周期的数据实现对工艺设计的优化以及对工艺知识的总结和积累。

综上所述,工艺设计作为机械产品制造活动的关键环节,其决策、推理和优化过程离不开产品全生命周期的数据,因此迫切需要一种新的技术对产品数字化制造过程中的数据进行有效的管理和利用。数字孪生作为赛博物理系统的关键技术,能够对产品全生命周期中多源异构动态数据进行有效的融合和管理,为产品

* 基金项目: 工信部相关专项科研技术研究资助项目 (MIZ-2016-*)。

研发生产中各种活动的优化决策带来了新的理念,也为实现 CAPP 的深入发展提供了新的思路。

数字孪生与实作模型

2003年, Michael Grieves 教授提出了“与物理产品等价的虚拟数字化表达”的思想,几易其名后,这一思想在 2011 年被 Grieves 正式命名为数字孪生 (Digital Twin)^[6]。美国空军在 2011 年制定未来 30 年的长期愿景时^[7]就吸纳了数字孪生概念,希望未来做到每一架战机交付时一起交付对应的数字孪生。而 2012 年 NASA 对外公布的技术路线图中^[8],将数字孪生列为 2023~2028 年实现基于仿真的系统工程的技术挑战;此外 NASA 也给出了目前积累的研究工作关于数字孪生的定义:是指面向飞行器或系统的,充分利用最佳的物理模型、传感器、运行历史等数据,集成多学科多尺度的概率仿真过程,用以映射它对应实体飞行器的状态。

显而易见,数字孪生概念因其高度的集成性、跨学科性等特点,很难在短时间内达到足够的技术成熟度,因此针对其概念内涵与应用实例的渐进研究显得尤其重要。其中典型成果是美国空军研究实验室 (Air Force Research Laboratory, AFRL) 与 NASA 合作构建的 F-15 战斗机机体数字孪生 (Airframe Digital Twin),目的是对在役飞机机体结构开展健康评估与损伤预测,提供预警并给出维修更换指导^[9],图 1 为美国空军提出的机身数字孪生内涵示例^[10]。此外,通用电气公司计划基于数字孪生实现对发动机的实时监控和预测性维护^[11];达索公司计划通过 3DEXPERIENCE 体验平台实现与产品的数字孪生互动,并以飞机雷达为例进行了验证^[12]。

虽然数字孪生概念起源于航空航天领域,但是因其先进性正逐渐

被其他行业借鉴吸收。Heidari 等^[13]研究了基于 BIM 模型 (Building Information Modelling, 建筑信息模型),构建了建筑行业的数字孪生;Boyle 等^[14]综合讨论了 BIM、数字孪生、增强现实与核能设施的维护;医学研究学者更是参考数字孪生思想,构建“虚拟胎儿”用以筛查家族遗传病^[15]。

与此同时,在“互联网+”和“中国制造 2025”的战略背景下,数字孪生在智能制造中的应用潜力也得到了国内学者的广泛关注。先后探讨了数字孪生体的产生背景、概念内涵、体系结构、实施途径和发展趋势,数字孪生模型在构型管理中的应用,以及提出了数字孪生车间 (Digital Twin Workshop) 的概念,并就如何实现制造物理世界和信息世界的交互共融展开了理论研究和实践探索^[16-19]。2017 年 7 月,在北京航空航天大学召开了“第一届数字孪生与智能制造学术研讨会”,来自全国 20 多所高校的 70 余名学者就数字孪生的理论和应用展开了研讨。在基于数字孪生的工艺规划方面,会议展望了数字孪生将为工艺设计带来的新的转变以及数字孪生驱动的工艺设计亟待解决的难点问题。在此基础上,本文针对机械加

工工艺设计过程,引入实作模型的概念,从系统构建的角度研究了面向数字孪生环境的三维 CAPP 技术,提出了基于实作模型的实时工艺设计方法,为基于数字孪生的工艺设计提供了新的思路。

工艺设计是在一定目标(时间、成本、质量)的驱动下,在实际生产资源(机床设备、刀量夹具、人员配置)的约束下,规划和确定从毛坯到产品的加工路线和工艺参数的决策过程。因此,工艺决策是 CAPP 系统进行工艺设计的关键,是制约 CAPP 系统实用化、通用化、智能化的核心问题^[20]。传统机械加工 CAPP 的决策流程如图 2 所示。

传统 CAPP 接收来自 CAD 系统的产品设计信息,并依托工艺知识库,辅助工艺设计人员做出决策。这虽然在一定程度上提升了工艺设计的效率,但是在实际应用中仍面临着突出的问题:工艺决策主要发生在生产准备阶段,一旦结束工艺文件便固化下来。而工件的加工过程受实际生产中扰动因素的影响,每一步加工后的结果与理想情况均存在偏差。由此,传统的 CAPP 的设计结果是静态的,不能实时响应加工偏差动态做出工艺决策,常会导致工艺文件执行过程中出现异常。

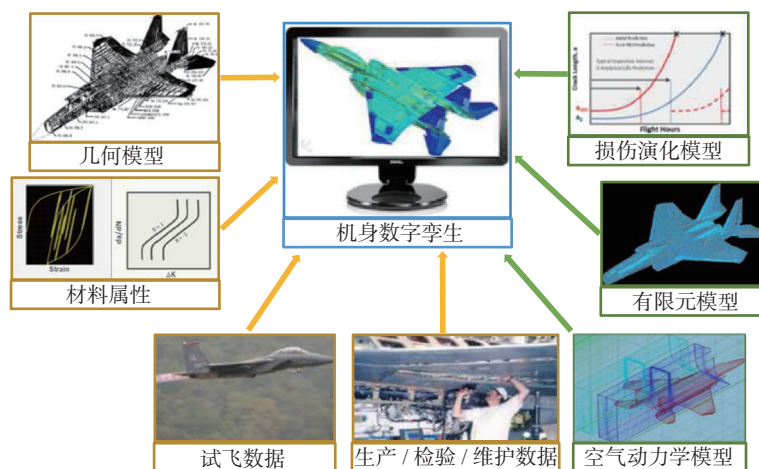


图1 美国空军提出机身数字孪生内涵示例
Fig.1 Example of airframe digital twin proposed by U.S. Air Force

计,缩短生产准备周期。(3)功能层。系统功能层是数字孪生环境下三维工艺设计系统可以实现的功能,包

括实时工艺修正与优化、工艺过程优化、工艺知识提炼与总结、沉浸式工艺设计等。其中,借助实时工艺修

正与优化和工艺知识提炼与总结,数字孪生环境下的工艺设计系统可以解决传统系统实时性差和应用深

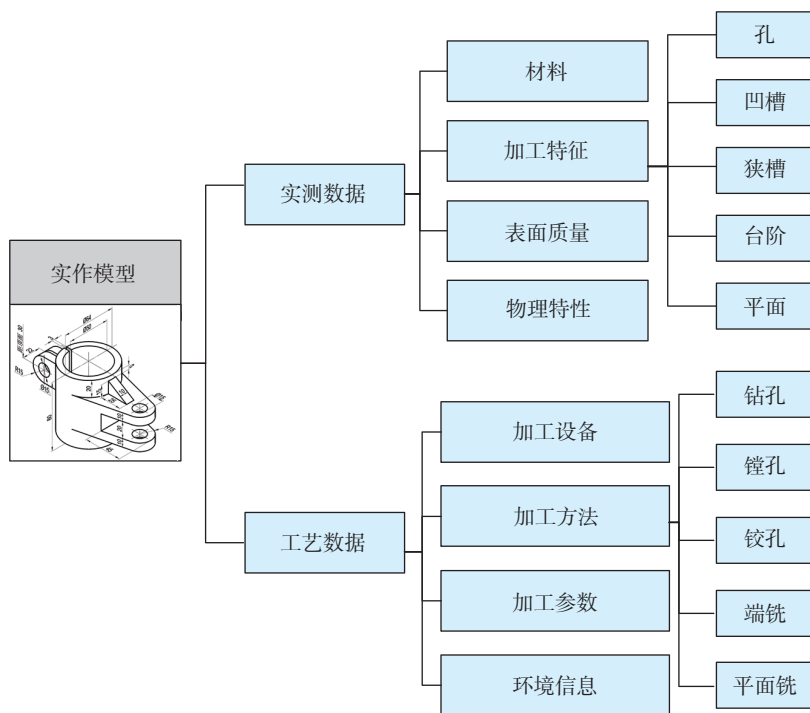


图3 实作模型的本体结构

Fig.3 Ontology structure of as-built model

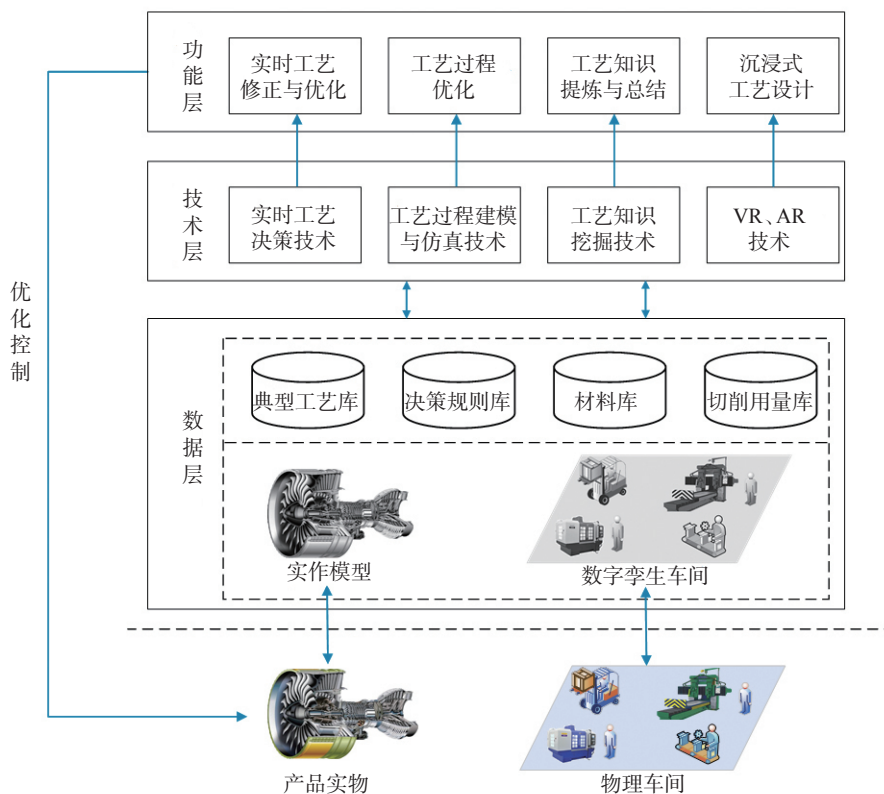


图4 数字孪生环境下三维CAPP系统整体框架

Fig.4 Design framework of CAPP under the digital twin

度不够的问题。

基于实作模型的实时工艺设计

基于实作模型的实时工艺设计是数字孪生环境下工艺设计的核心技术,它由工艺初步设计和工艺实时修正两个阶段构成,整个实时工艺设计过程如图5所示。

工艺初步设计阶段的工作过程与传统CAPP相似,系统根据输入的MBD设计模型,先后完成制造特征识别、加工方法选择、机床和刀量夹具选择、加工操作优化排序、切削参数确定等工作,并完成MBD工序模型的构建。其中,MBD工序模型

是在三维机加工工艺设计过程中,利用MBD技术建立的包含本工序所有加工工艺信息的三维数字化实体模型,表现该工序的加工结果^[23]。可以将

MBD 工序模型表示为:

$$IPM_i \text{ Geo}_i \cup \sum_{j=1}^m E_{ij} \cup \sum_{k=1}^n A_{ik} \quad (1)$$

式中,IPM_i为第*i*道工序的工序模型,

表1 实作模型与产品数字孪生体对比

Table 1 Comparison between as-built model and product digital twin

项目	产品数字孪生体	实作模型
形成过程	基于产品设计模型,通过与产品物理实体之间数据和信息交互形成	基于产品的实时加工状态建模形成
数据来源	产品设计、制造、维护等全生命周期	产品制造阶段
数据内容	物理实体的工作进展和工作状态	工艺数据和实测数据
实质	仿真模型	数据集合
作用	模拟、监控、诊断、预测和控制产品的现实过程和行为	记录状态数据,辅助工艺决策并提供可追溯性

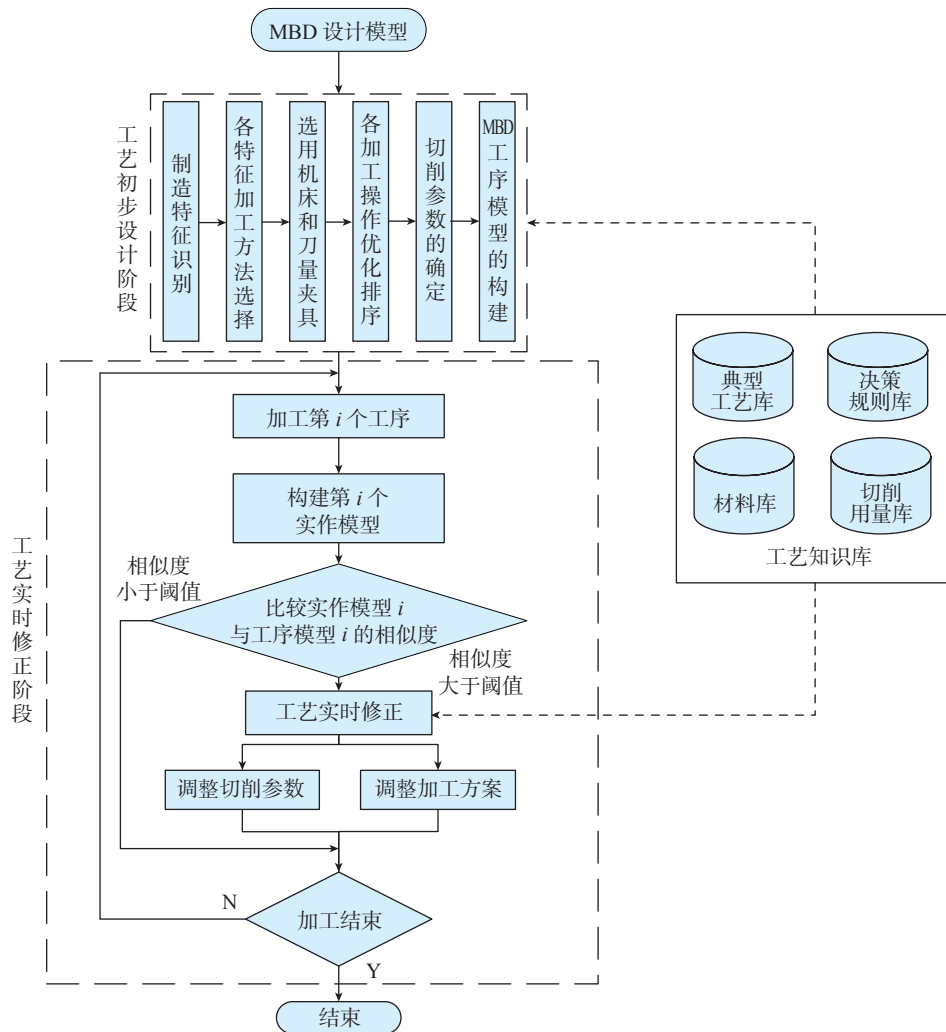


图5 基于实作模型的实时工艺设计过程

Fig.5 Process of a real-time process decision-making method based on digital twin

Geo_i 为第 i 个工序模型的几何信息, E_{ij} 表示第 i 个工序所使用的设备、刀具等工艺装备信息, A_{ik} 表示第 i 个工序模型上的粗糙度等工艺标注信息, m_i 表示第 i 个工序所使用的工艺装备个数, n_i 表示第 i 个工序模型上的工艺标注个数。

在工艺修正阶段,首先按照每一步的工序模型进行加工,加工完毕后,根据实测数据完成实作模型的构建,实作模型可以表示为:

$$ASM_i = Geo'_i \cup \sum_{j=1}^{m_i} E'_{ij} \cup \sum_{k=1}^{n_i} A'_{ik} \quad (2)$$

式中, ASM_i 为第 i 道工序的实作模型, Geo'_i 为第 i 个实作模型的实测几何信息, E'_{ij} 表示加工第 i 个工序所实际使用的设备、刀具等工艺装备信息, A'_{ik} 表示第 i 个实作模型上的粗糙度等工艺标注信息, m_i 表示第 i 个工序所实际使用的工艺装备个数, n_i 表示第 i 个实作模型上的工艺标注个数。

在实作模型构建完毕后,计算实

作模型和工序模型的相似度:

$$\text{Sim}(IPM_i, ASM_i) = \alpha(Geo_i - Geo'_i) + \sum_{j=1}^{m_i} \beta_j(E_{ij} - E'_{ij}) + \sum_{k=1}^{n_i} \gamma_k(A_{ik} - A'_{ik}) \quad (3)$$

式中, $\text{Sim}(IPM_i, ASM_i)$ 表示实作模型和工序模型的相似度, α, β, γ 表示几何信息、工艺装备信息、工艺标注信息在实作模型和工序模型相似度计算中所占的权重。 $\text{Sim}(IPM_i, ASM_i)$ 值越小,表示实作模型和工序模型越接近,实际加工出来的工件与工艺设计时所预想的情况越接近,工艺方案不需要进行调整。当 $\text{Sim}(IPM_i, ASM_i)$ 的值超过某一个预设的阈值 δ 的时候,则认为实际加工的工件偏差不可忽略,此时系统自动在工艺知识库的支持下,调整工艺方案,实现工艺方案的实时调整。

基于实作模型的实时工艺设计,体现了数字孪生“虚实融合、以虚控实”的理念,使得工艺设计的阶段从传统的生产准备阶段扩展到了整个

加工制造周期,可以实现工艺方案随工件制造状态的动态调整,为提高工艺设计的实时性和自适应性提供了一个新的思路。

面向数字孪生的工艺知识挖掘

如何有效地总结、沉淀企业的工艺设计知识,提高工艺设计水平,是 CAPP 应用和发展的重要方向^[24]。然而,工艺知识具有隐含性^[25],其隐含在大量的数据和事实当中,很难以显性的方式表现出来,必须采用一定的知识挖掘手段和工具进行知识发现,以便不断产生新知识。当前已有许多学者针对工艺知识挖掘问题展开研究^[26-27],但是这些研究所挖掘的数据仅仅来源于企业积累的工艺设计文件,并未扩展到产品全生命周期的数据,因此挖掘出的工艺知识非常有限。在产品的整个生命周期,除了工艺设计数据外,产品设计、生产制造、质量检验、运行维护甚至报废

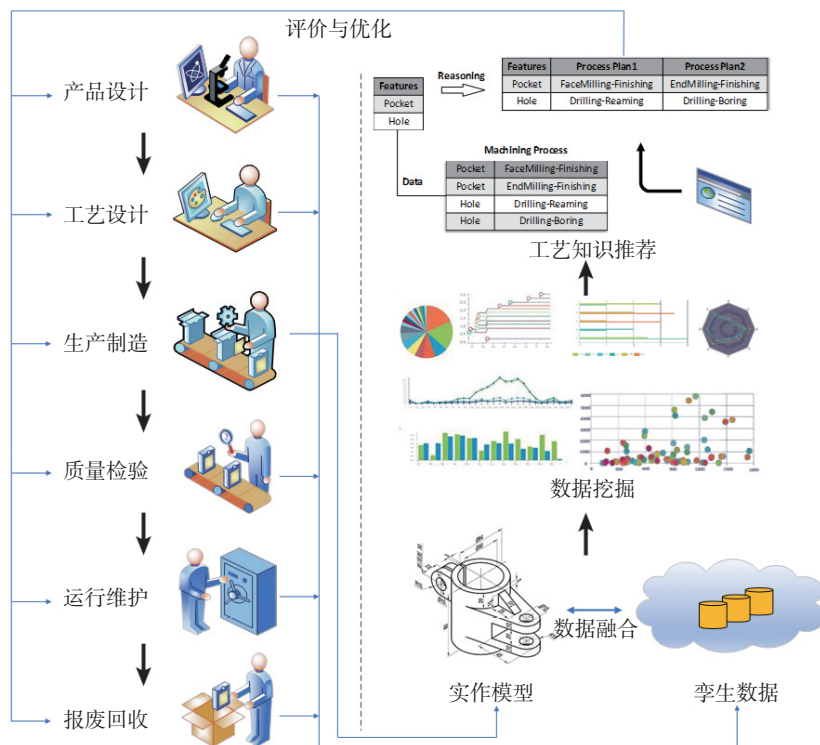


图6 基于数字孪生的工艺知识挖掘

Fig.6 Process knowledge mining method based on digital twin

回收等阶段同样产生了大量的数据,目前由于缺乏对这些数据的有效管理手段,导致这些数据的存储多是离散的、缺失的、非结构化的,从而给工艺知识的挖掘带来了困难。

数字孪生作为能够对物理产品进行数字化描述并有效管理产品全生命周期数据信息的技术,可以为工艺知识挖掘提供有力的数据支撑。基于数字孪生的工艺知识挖掘流程如图6所示,借助于实作模型和产品数字孪生体,可以将产品全生命周期的数据反馈到虚拟空间,在此基础上,可以通过数据挖掘技术挖掘出隐含的工艺知识,并利用数字线索技术回溯到物理空间对产品的生产制造全过程进行指导。

基于数字孪生的工艺知识挖掘可全面有效地挖掘和总结行业工艺“设计经验”和“设计知识”,使CAPP的应用不断深化^[5]。数字孪生技术可将产品运维阶段的质量状况、使用状况、技术状态等反映产品实际功能和性能的数据在虚拟空间记录下来,并实时将产品的运维数据回溯到产品的工艺过程,从产品功能实现的角度对产品研制阶段采用的工艺方法进行评价和比较;还可通过人工智能、机器学习等手段,基于产品全生命周期的孪生数据提炼和挖掘出有意义的工艺知识,为产品工艺设计的优化和改进提供知识支持。

结论

本文对数字孪生技术在计算机辅助工艺设计方面的应用进行了探讨和展望。产品数字孪生技术通过不断持续积累产品设计、制造和检验全生命周期过程的相关数据和知识,实现赛博和物理空间的虚实映射,为计算机辅助工艺设计技术的发展和瓶颈问题的解决提供了有效的途径。借助实作模型和数字孪生车间,基于数字孪生的实时工艺决策,可以实现对各生产要素实时状

态的刻画与响应,提高工艺决策技术的实时性和预测性。基于数字孪生的工艺知识挖掘可以实现对产品全生命周期的数据进行工艺知识挖掘,全面而高效地实现工艺知识的不断迭代积累。由此,基于数字孪生技术,在计算机辅助工艺设计方面提供了新的思路,可以实现工艺设计过程中的实时决策和离线分析优化,驱动和引领计算机辅助工艺设计的智能化发展。

参考文献

- [1] YUSOF Y, LATIF K. Survey on computer-aided process planning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 75(1-4): 77-89.
- [2] 欧阳华兵. 面向STEP-NC基于BP神经网络的加工工步序列生成[J]. 计算机集成制造系统, 2014, 21(7): 1810-1819.
- [3] OUYANG Huabing. STEP-NC oriented generation of workingsteps sequence based on BP neural networks[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 21(7): 1810-1819.
- [4] KANG M, KIM G, LEE T, et al. Selection and sequencing of machining processes for prismatic parts using process ontology model[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2016, 17(3): 387-394.
- [5] 黄瑞, 张树生, 白晓亮, 等. 三维CAD模型检索驱动的快速数控编程方法[J]. 机械工程学报, 2014, 50(3): 191-198.
- [6] HUANG Rui, ZHANG Shusheng, BAI Xiaoliang, et al. 3D CAD model retrieval driven rapid NC programming method for NC process reuse[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(3): 191-198.
- [7] 彭义兵, 马辉民, 陈万领. CAPP深化应用存在的问题及发展趋势[J]. CAD/CAM与制造业信息化, 2006(2-3): 20-21
- [8] PENG Yibing, MA Huimin, CHEN Wanling. The problems and development trends of deepening application of CAPP[J]. Digital Manufacturing Industry, 2006(2-3):

20-21.

[6] GRIEVES M. Virtually perfect: driving innovative and lean products through product lifecycle management[M]. Cocoa Beach: Space Coast Press, 2011.

[7] TUEGEL E J, INGRAFFEA 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.

[8] SHAFTO M, CONROY M, DOYLE R, et al. NASA technology roadmap: Modeling, simulation, information technology & processing roadmap technology area 11[EB/OL]. [2017-08-13]. https://www.nasa.gov/pdf/501321main_TA11-ID_rev4_NRC-wTASR.pdf.

[9] TUEGEL E J, KOBRYN P, ZWEBER J V, et al. Digital thread and twin for systems engineering: EMD to disposal[C]// Proceedings of the 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA Press, 2017.

[10] KRAFT E M. The US air force digital thread/digital twin-life cycle integration and use of computational and experimental knowledge[C]// Proceedings of the 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting. Reston: AIAA Press, 2016.

[11] WARWICK G. GE advances analytical maintenance with digital twins[N]. Aviation Week & Space Technology, 2015-10-19.

[12] 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. Berlin: Springer International Publishing 2016: 269-270.

[13] HEIDARI M, ALLAMEH E, VRIES B D, et al. Smart-BIM virtual prototype implementation[J]. Automation in Construction, 2014, 39: 134-144.

[14] BOYLE J, ROBINSON J. BIM approach to a nuclear project: sellafield maintenance facility[J]. Project Focus, the Structural Engineer, 2013, 91(11): 96-97.

[15] LANGE C D. Meet your unborn

child before it's conceived[J]. *New Scientist*, 2014, 222(2964): 8-9.

[16] 于勇, 范胜廷, 彭关伟, 等. 数字孪生模型在产品构型管理中应用探讨[J]. *航空制造技术*, 2017, 60(7): 41-45.

YU Yong, FAN Shengting, PENG Guanwei, et al. Study on application of digital twin model in product configuration management[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 60(7): 41-45.

[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.

ZHUANG Cunbo, LIU Jianhua, XIONG Hui, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(4): 753-768.

[18] 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.

TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2017, 23(1): 1-9.

[19] 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): 1-18.

TAO Fei, LIU Weiran, LIU Jianhua, et al. Digital twin and its potential application exploration[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2018, 24(1): 1-18.

[20] 邵新宇, 蔡力刚. 现代CAPP技术与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

SHAO Xinyu, CAI Ligang. Technology and application of modern computer aided process planning[M]. Beijing: China Machine Press, 2004.

[21] MAS F, MENÉNDEZ J L, OLIVA M, et al. Collaborative engineering: an airbus case study[J]. *Procedia Engineering*, 2013, 63: 336-345.

[22] 刘雅星. 航空制造业数字化协同技术综述[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(18): 66-71.

LIU Yaxing. Review of digital cooperative technology in aeronautical manufacturing industry[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2015, 58(18): 66-71.

[23] 辛宇鹏, 田锡天, 黄利江, 等. 面向MBD环境的三维CAPP技术研究[J]. *航空制造技术*, 2015, 58(6): 60-63.

XIN Yupeng, TIAN Xitian, HUANG Lijiang, et al. Research on MBD-oriented three-dimensional CAPP technology[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*,

2015, 58(6): 60-63.

[24] 蒋帅, 朱鹏超, 唐志勇. 计算机辅助工艺设计——开目CAPP教程[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2014.

JIANG Shuai, ZHU Pengchao, TANG Zhiyong. KaiMu tutorial of computer aided process planning[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2014.

[25] 孙丽. 工艺知识管理及其若干关键技术研究[D]. 大连: 大连交通大学, 2004.

SUN Li. Research on process knowledge management and some key techniques[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2004.

[26] LIU S, ZHANG Z, TIAN X. A typical process route discovery method based on clustering analysis[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2007, 35(1-2): 186-194.

[27] 高伟, 殷国富, 成尔京. 机械制造工艺序列中的知识发现方法研究[J]. *机械工程学报*, 2004, 40(5): 121-125

GAO Wei, YIN Guofu, CHENG Erjing. Research on method of knowledge discovery in manufacture process sequence[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5): 121-125.

通讯作者: 于勇, E-mail: yuyong@buaa.edu.cn.

Study on Application of Digital Twin in Process Planning

YU Yong¹, HU Deyu¹, DAI Sheng¹, ZHAO Gang^{1,2}

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. China Key Laboratory of Aeronautics Smart Manufacturing, Ministry of Industry and Information Technology, Beijing 100083, China)

[ABSTRACT] Digital twin, as the key technology of cyber-physical system, can digitally describe the physical world and effectively manage and control the data of the entire product lifecycle, and provide new ideas to optimize the various activities in product research and development. The concept and research progress of digital twin is discussed, aiming at the two problems existing in the current CAPP (Computer Aided Process Planning) research, the concept of as-built model is introduced, the design framework of CAPP under the digital twin is proposed, and finally a real-time process decision-making method based on digital twin and a process knowledge mining method based on digital twin are discussed.

Keywords: Digital twin; CAPP; As-built model; Process decision; Process knowledge mining

(责编 海山)