

# 面向数控加工的数字孪生系统\*

肖文磊<sup>1</sup>,曹 宪<sup>1</sup>,赵 罡<sup>1</sup>,夏明桢<sup>1</sup>,邢宏文<sup>2</sup>

(1. 北京航空航天大学机械工程及自动化学院,北京 100191;

(2. 上海飞机制造有限公司,上海 201324)

[摘要] 在智能制造的大背景下,智能化是数控加工的一个重要发展方向,数字孪生的出现为传统数控加工的智能化提供了新思路,如何利用数字孪生技术增强数控加工的智能性,这一点还缺乏深入研究。从感知、理解、推理和服务4个层面详细论述了数字孪生技术在数控加工智能化上的增强作用,并与传统加工过程进行对比,结合自主研发的GrapeSim数字孪生系统,说明数控加工智能化的技术实现路径。该系统已在中国商飞生产线上得到验证,进行了大量针对实际加工零件的测试工作,显示出了对加工智能化的提升效果和数字孪生系统的实用性。

关键词: 数控加工; STEP-NC; 数字孪生; 机床通信; 加工仿真; 加工状态评估

DOI:10.16080/j.issn1671-833x.2020.23/24.046



肖文磊

副教授,博士生导师,主要研究方向为数控系统与现场总线技术、数控内核及底层技术等。主持、参研了工业和信息化部民机预研项目等,成功开发并在中国商飞应用了基于数字孪生的数控加工监控和仿真软件,在国内外刊物上发表论文40余篇,申请与获批发明专利10余项。

## 研究背景及现状

传统的数控加工遵循CAD-CAM-CNC的数据流模式,采用G、M代码(ISO 6983)实现CAD/CAM与CNC系统间的数据传递。G、M代码结构清晰,便于机床执行,但也同时存在各数控系统代码标准不统一,与上游工艺设计阶段难以共享数据等问题,限制了CNC系统的开放性和智能化发展<sup>[1]</sup>。伴随市场需求的变化,制造业正在经历从单件大批量生产到多件小批量生产的转变过程,传统数控机床的诸多弊端显现出来<sup>[2]</sup>。(1)单向传输,反馈闭塞:CAD/CAM到数控系统的信息流动是单向的,加工过程中产生的数据无法直接反馈至工艺设计阶段作为工艺优化的参考。(2)信息缺失,追溯困难:CAD/CAM在后置处理的过程中丢失了许多设计和工艺信息,输入到数控机床的仅是一些运动编码信息,很难对应到具体的工步和加工操

作,造成了信息追溯的困难。(3)静态绑定,硬件依赖:CAM软件在做后置处理时必须指定数控系统的类型,同一份G代码只能运行在同一类型的机床,严重依赖硬件。(4)系统封闭,功能单一:现阶段主流数控系统不易于扩展,同时数控机床只执行切削任务,无法实现刀具选择,加工参数优化等智能任务,不具备自学习自优化功能。总的来说,数控系统的兼容性差和非智能化是目前数控技术发展的主要问题所在。

针对传统数控加工面临的问题,本文提出应用数字孪生技术提升数控系统智能化水平,并从感知、理解、推理和服务4个层面论述实现智能化的具体途径。数字孪生技术作为新型虚实融合方式,能够实现真实加工过程和虚拟仿真环境的同步运行。由于获取到了真实加工过程的数据,虚拟环境中可以实现很多智能化的功能。本文从4个方面阐述智能化功能,包括感知智能、理解智能、推理

\* 基金项目: 国家自然科学基金(51805116)。

智能和服务职能。感知智能指的是对数控机床的数据感知能力,可以通过统一接口获取数控系统的加工过程数据,这是虚实融合的必要条件。理解智能是指获取全要素的加工工艺信息,进而深入理解加工任务,是提升数控加工智能化的数据基础。推理智能指的是基于过程数据,推理出实时的加工状态,包括加工进度,零件几何形状等,在虚拟场景中完成的智能推理可以在任何时刻回溯加工过程的中间状态。服务智能指的是通过加工过程状态的精准追踪和生产指导信息的推理,基于虚拟仿真场景的构建和针对性算法的开发应用,自动化完成面向实际加工车间的服务需求,是一种更高层次的智能化。本文所提出的数字孪生系统中,STEP-NC 标准被应用于实现各项智能化功能。作为更高级的数控加工信息表达方式,STEP-NC 为数字孪生系统提供数据支撑,能够表达全要素加工工艺信息。

基于上述思想,本文将展示自主研发的面向数控加工的数字孪生系统 GrapeSim。该系统以 STEP-NC 作为数据标准,打通了从 CAD/CAM 到数字孪生系统的工艺信息通路,通过机床通信技术打通了从 CNC 到数字孪生系统的过程数据通路。在虚拟环境中,集成了实时加工过程几何仿真,能够根据机床真实的刀具位置计算出被加工零件的几何状态。该系统在商飞的生产线上得到了验证,多个复杂加工件的完整加工流程都通过数字孪生系统实现了虚实同步,因此该系统具有很强的实用性,显著地提升了加工过程的智能化水平。本节从数字孪生和 STEP-NC 标准两方面总结研究现状,论证本文所提出数字孪生系统的创新性。

### 1 数字孪生相关研究现状

数字孪生是在 2002 年由美国密歇根大学 Michael Grieves 教授首次提出的。其核心理念是联通虚拟空

间与真实物理设备,在虚拟空间中构建一个表征该物理设备的虚拟实体,并且虚实之间的连接是双向的。在提出的早期,数字孪生并没有受到关注,但后来的发展是十分快速的。2010 年, NASA 在定义了未来飞行器数字孪生体范例,认为数字孪生是一个集成多物理场、多尺度的非确定性分析框架。利用数字镜像模型模拟真实飞行器实体,通过真实数据驱动孪生飞行器结构变化,指导实际飞行器的操作、运维和优化<sup>[3]</sup>。在随后的发展中,数字孪生被应用在了更多领域中,其中很多智能制造领域的探索是值得研究和参考的,这里列出了几个有代表性的案例。

佐治亚理工学院利用多源信息融合技术,结合 MES 系统相关技术和 MTConnect 协议建立了工厂环境的完整孪生模型,实现了剩余原料数量、刀具状态追踪和加工操作的追踪<sup>[4]</sup>。美国北卡罗来纳州立大学团队提出了一种用于监测数控铣削过程的数字孪生系统,通过传感器检测机床主轴的负载功率,然后按照加工工步将检测数据划分为多个部分,分别分析每个工步所对应的表面粗糙度<sup>[5]</sup>。山东大学也提出了一种应用数字孪生思想的数控机床模型,该模型包含了机械、电子和控制因素,详细介绍了物理空间到数字空间的映射策略<sup>[6]</sup>。

还有一些研究是从概念、思想和总体技术方向的角度对数字孪生进行梳理,起到了指明未来发展方向的重要作用。针对制造过程的特殊性,如何应用数字孪生的思想去提升智能化水平,是当前学术研究中的关注热点。有代表性的研究如下:德国埃兰根-纽伦堡大学和法国萨克雷大学团队联合讨论了数字孪生与仿真技术的关系,提出了一种新颖的虚拟表面模型(Skin Model),该模型上允许附加零件设计信息、加工工艺信息,测量结果等,与制造过程中的实

物零件相关联,可以构建面向制造的数字孪生系统<sup>[7]</sup>。新西兰奥克兰大学的 Lu 等<sup>[8]</sup>详细阐述了数字孪生与 CPS、IoT 的区别与联系,对数字孪生在制造领域的相关研究趋势进行了系统性的综述。清华大学团队重点论述了信号处理技术和物联网技术在数字孪生系统中的重要作用<sup>[9]</sup>。

基于对当前数字孪生的文献调研,作为未来智能制造的重要使能技术,数字孪生的学术研究和工业探索为实现数控系统的智能化提供了重要的研究思路<sup>[3-21]</sup>。随着工业物联网的普及和应用,数字孪生会成为制造过程数据收集与分析的核心机制,提升加工制造的效率和质量<sup>[22]</sup>。

### 2 STEP-NC 标准的发展及智能数控系统

STEP-NC 作为数控机床兼容性探索的产物,比数字孪生概念的提出时间更早。STEP-NC 标准的引入对数字孪生系统中实现完备的数据存储和传输非常重要。早在 20 世纪 80 年代工业界和学术界就开始了数控机床兼容性的探索,首先提出了开放式数控系统的概念,IEEE 对开放式数控系统的定义如下:“开放式数控系统可以有效地运行于不同的平台上,与其他应用系统可以相互操作,且提供统一用户交互的风格,具备可互换性、可伸缩性、可移植性和可扩展性等特点”<sup>[10]</sup>。从 1992 年开始,美国、欧盟、日本等发达国家陆续开展了针对开放式数控系统的研究项目,如美国的 OMAC、欧洲的 OSACA、日本的 OSEC。同时期,我国已有数家研究机构开展了具备自主知识产权的开放式数控系统研发,先后开发出包括航天、中华、蓝天和华中 4 个品牌的基本系统和系列产品。自 20 世纪 90 年代以来,美国国家标准技术研究所(NIST)下属的制造工程实验室(MEL)、辛辛那提-朗姆公司(Cincinnati-Lamb)、瑞士的米克朗(Mikron)、英国汉普郡大学

(New Hampshire) 等机构都对智能机床进行了研究,与此同时世界各知名机床厂商也分别研发了具有智能化功能模块的先进数控机床。

在当前面向数控加工的数字孪生相关研究工作中,很少出现与 STEP-NC 标准相结合的研究案例,这类研究还处于起步阶段,需要更多机构与学者的参与。在本文所提出的数字孪生系统中,STEP-NC 标准提供了完备的加工工艺信息数据结构,可以从 4 个方面提升数控加工的智能化水平,具有广泛的应用前景。

本文依次从 4 个方面论述数字孪生对数控加工智能性的提升,并介绍 GrapeSim 软件系统的具体实现过程;展示 GrapeSim 在高飞生产现场的应用情况,总结研究工作,并展望未来数字孪生在数控加工中更深层次的应用。

## 应用数字孪生实现 数控加工智能化

数控加工智能化的核心是机床智能化。一般认为,智能化机床应该具备有如下行为能力。(1)能够感知自身运行状态并且具备对自身加工能力的评估。(2)能够对自身的运行状态进行监控并且具备对加工行为的优化。(3)能够对加工工件的质量进行预测。(4)具有自主学习的能力<sup>[11-13]</sup>。现有的机床不能完

全具备这些特性,但与数字孪生的结合,提供了一种实现路径。

应用于数控加工,数字孪生系统包含 4 个关键要素:实时连接、数字模型、强悍算力和多态仿真。实时连接保证了物理世界和虚拟场景的同步,数字模型提供了虚拟场景构建的基础,强悍的算力保证了虚拟场景的保真状态,多态式仿真反映了数字孪生的通用性。

上述的数字孪生 4 个关键要素,分别对应着感知、理解、推理和服务 4 个层级的智能。感知智能、理解智能、推理智能和服务智能,可以帮助数控终端实现感知数据、理解语义、推理信息和服务需求的具体智能化功能。实时连接保障加工过程数据的感知,数字模型帮助理解结构化语义信息,强悍的算力支撑信息的推理计算,多态式仿真满足定制化的需求服务。其中,数字孪生的多态式仿真是实现数控机床智能化的重要依据。由运行时决定的多态式仿真可以根据实际需求构建不同的映射物理世界的虚拟场景,充分利用数控终端感知、理解和推理的智能,在无人干预的情况下自主实现各种组合式的需求响应。因此,现阶段构建面向数控加工的数字孪生系统是辅助实现数控机床智能化功能的一个比较切实可行的技术方案。数字孪生系统可以作为数控终端的智能代理帮助数控系统完成智能化功能。数字孪生

具备的 4 层智能恰好能够对应弥补传统数控的单向传输、反馈闭塞、信息缺失、追溯困难、静态绑定、硬件依赖和缺乏兼容、功能单一的缺陷。

基于上述应用数字孪生实现机床智能化的思路,本文将结合自主研发的数字孪生软件系统 GrapeSim 详细展示 4 层智能的具体表现和实现路径。GrapeSim 旨在验证数控终端智能化的实现方案,通过对数控设备数据通信机制的研究,开发适配器接口实现了多类异构数控系统的数据通信;对设计数据和加工过程数据的融合分析实现了机床在线监控与数据推理;利用 STEP-NC 数控加工全要素语义模型打通了 CAD/CAM 到 CNC 的数据流,建立信息共享模型;通过基于特征的智能选刀和机器人上下料场景模拟验证面向加工现场动态需求服务。GrapeSim 系统通过了大量的零件模型的仿真测试,并且在高飞试验性生产线完成了零件的加工验证。图 1 为 GrapeSim 软件系统与真实机床的连接关系及整体系统结构。

### 1 感知智能

数字孪生系统赋予数控机床的第 1 个层级智能是感知智能。数字孪生的实时连接特性,可以帮助提升数控机床的数据感知能力。传统的数控终端作为单纯的指令执行器,缺少对数据的感知处理模块:一方面,从设计端到加工端存在信息丢失,数

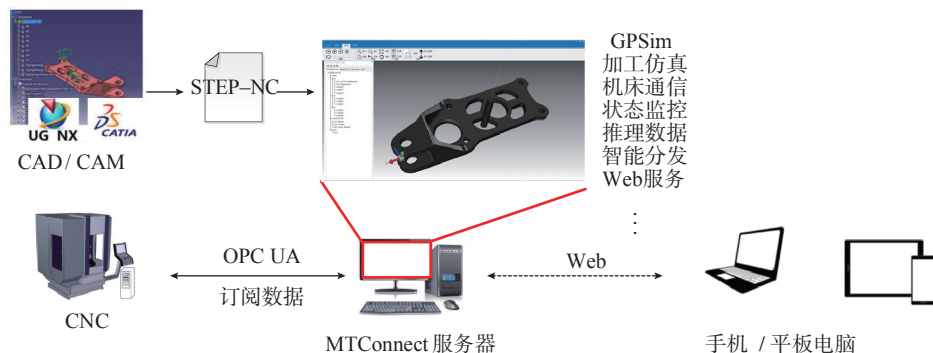


图1 GrapeSim数字孪生系统总体架构图  
Fig.1 Architecture diagram of digital twin system GrapeSim

控系统无法获取完整的工艺信息,缺少对过程数据的分析;另一方面,当前数控系统对过程数据没有有效地存储和利用。在数字孪生系统中,虚拟场景通过连接实际数控设备采集加工过程数据并进行处理,增强了数控机床的数据感知能力,同时也弥补了数控系统本身存储空间和处理能力有限的缺点。

实现感知智能的核心是屏蔽硬件差异统一数据接口,保证在孪生系统中采用统一的数据接口进行转换,可以实现采集接口的硬件隔离。现代数字化车间针对不同的生产需求,往往配备有不同类型的数控设备,数控系统的封闭性导致不同厂商采用不同的数据采集接口,给生产车间的数据采集处理带来诸多不便。如西门子 840D powerline 数控系统和 840D sl 数控系统分别采用 OPC-DA 和 OPC-UA 协议接口, FANUC 0i TD 和 FANUC 30i 采用的是 FOCAS 协议接口。在 GrapeSim 数字孪生系统中,利用了统一的标准协议 MTConnect 传输数据,开发针对性的数据接口适配器,以统一数据获取接口。

MTConnect 协议提供了机床设备互联互通的接口规范,它采用的

互联网协议通过网络传输数据,可以使数控系统和应用软件之间的信息传输技术更具通用性。GrapeSim 系统针对 840D powerline、840D sl、FANUC 0i TD、FANUC 30i、广州数控、TwinCAT CNC 和 GrapeCNC 7 类数控系统开发了数据采集接口适配器。如图 2 展示了不同数控系统所采用的数据采集技术。

基于 MTConnect 和 OPC-UA 技术实现的 CNC 通信技术,虚拟仿真系统和 CNC 之间可以构建起稳定的数据传输通道,进而打通了数字孪生系统和 CNC 系统之间的数据通路。在执行零件加工的过程中, CNC 系统将以一定的频率向虚拟环境发送当前加工状态数据。根据数控系统的型号不同,其支持的加工状态数据类型也不尽相同。但对于当前的数字孪生系统应用,几类重要的过程数据是被 CNC 系统所广泛支持的,包括刀具位置、主轴转速、主轴进给率、系统状态码等。由于本文采用的是一种独立的通信协议,数字孪生系统和 CNC 的数据通路可以应用在多类数控系统上,保证了系统的广泛适应性。在数字孪生系统中,由 CNC 通信技术获取的加工过程数据是调用虚拟加工仿真、加工状态评估

等智能化应用的基础。

## 2 理解智能

数字孪生的模型基础为数控终端提供了第 2 个层级的理解智能,即可以获得完整的加工工艺信息,对加工任务理解更深入,这也是智能化的数据基础。如当机床接收到切削槽的加工任务时,数控系统所能感知的只是 G 代码文件存储的简单运动指令。理解智能的实现基础是需要一套完善的加工工艺描述标准作为信息存储和传输的载体。因此采用 STEP-NC 标准作为描述数控加工全过程信息。STEP-NC 以一种语义化并且符合面向对象思想的组织结构,构建了 CAD 系统间以及 CAM 系统与 CNC 之间的全要素信息共享模型,易于数控系统读取的同时也便于人的理解。通过在数字孪生系统中建立基于 STEP-NC 的加工工艺模型,以树状层级的方式组织加工过程中的所有语义化信息,如加工计划、加工工步、加工特征、加工操作、刀具参数、切削参数等,在数字孪生系统中查询和回溯某一时刻的加工状态时,可以准确地定位到某个加工特征和某一把切削刀具,帮助数控机床以类似于人的角度去理解加工行为,实现了理解意义上的智能;另一方面,

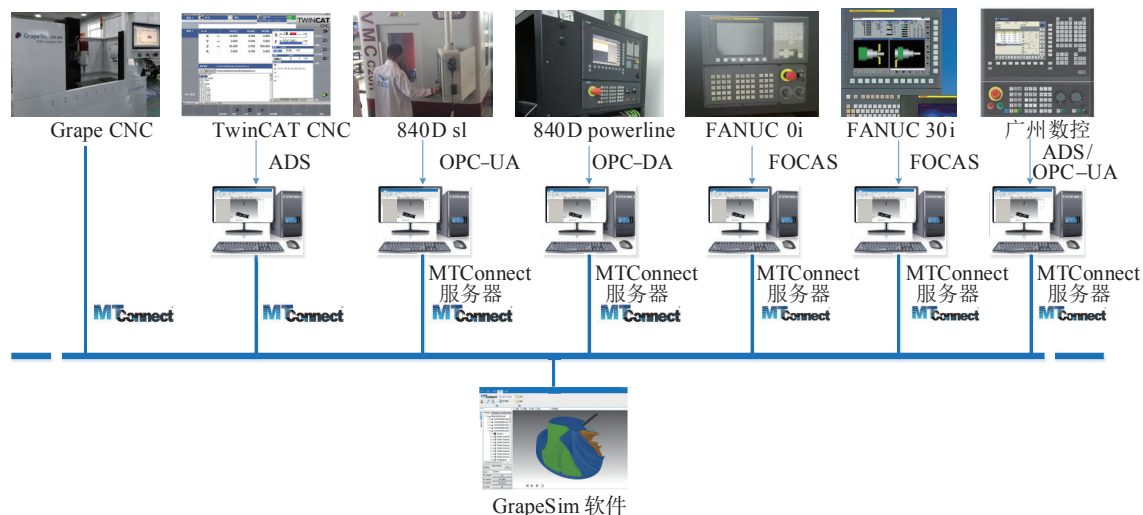


图2 采用MTConnect实现的异构系统数据统一接口

Fig.2 Unified data interface of heterogeneous system implemented by MTConnect

STEP-NC 模型包含的刀轨信息,可以通过后置处理生成针对不同数控设备的 G\M 代码驱动数控机床的运行,STEP-NC 作为中性文件不依赖于具体的硬件,为实现和不同的数控系统兼容提供了统一的标准。

在 GrapeSim 具体实现中,为获取统一结构的 STEP-NC 文件,屏蔽不同 CAD/CAM 系统和数控设备的差异,开发了 CAD/CAM 系统插件,实现了 STEP-NC 文件的自动导出,并针对不同厂商的数控设备开发基于 STEP-NC 文件的后置处理程序。刀轨信息是提取 CAD/CAM 导出的通用 APT 文件实现的,而其他工艺信息需要通过二次开发技术获取。本文针对 CATIA 和 UG 开发了工艺信息导出软件,并结合刀轨信息建立了 CAD/CAM 工艺模型与 STEP-NC 模型间的工艺信息映射。最后,运用 STEP-NC 文件解析与生成技术导出表达完整加工信息的 STEP-NC 文件,作为 GrapeSim 软件的输入。这种 STEP-NC 文件包含了完整的加工工艺信息。而对于零件的几何模型,采用了同属于 STEP 标准的 AP203/AP214,实现了直接从 CAD/CAM 软件导出零件的几何模型, GrapeSim 读取该几何模型文件可以生成其三维模型,用于可视化显示,STEP-NC 文件生成的整体技术路线如图 3 所示。

以全要素工艺信息为基础,构建良好的软件界面可以增强数控加工过程中的人机交互的功能,便于操作人员浏览工艺信息,规范了工艺设计部门的交流形式,降低沟通成本,同时实现人与机器高效信息交流。在 GrapeSim 系统中,STEP-NC 文件的工艺信息以树形结构展示,并开发了工艺信息展示界面,方便操作人员查看,图 4 展示了结构化工艺信息展示界面。

### 3 推理智能

数字孪生协助数控终端实现的

感知智能和理解智能为推理智能的实现提供了数据基础和模型基础。推理智能指的是通过过程数据,推理出实时的加工状态,包括加工进度、零件几何形状等。因此,运行时的虚拟仿真和加工过程中的信息推理是数字孪生推理智能的两个主要体现。在虚拟场景中完成的智能推理可以在任何时刻回溯加工过程的中间状态,为加工工艺的改进和分析提供了更高层次的手段。

实现推理智能的第 1 步是建立虚拟仿真环境,该虚拟环境也是数字孪生系统的核心。以全要素工艺信息为基础,虚拟仿真环境中可以综合

加工过程数据和工艺信息,实现两方面的加工过程推理:一是基于仿真的工件状态推理;二是加工状态参数评估。GrapeSim 数字孪生系统中实现了这两类的加工状态推理。

虚拟环境中集成了零件切削、机床运动和工业机器人等多种仿真功能,其中零件切削是仿真功能的核心,以 AP203/AP214 和 STEP-NC 文件为数据模型,虚拟仿真中实现了刀具几何模型、刀轨、零件和机床模型的三维可视化效果。采用了基于 tri-dexel 模型的几何仿真算法<sup>[23]</sup>构建了实时的动态切削过程仿真,并应用了 Marching Cube 算法实现三角网

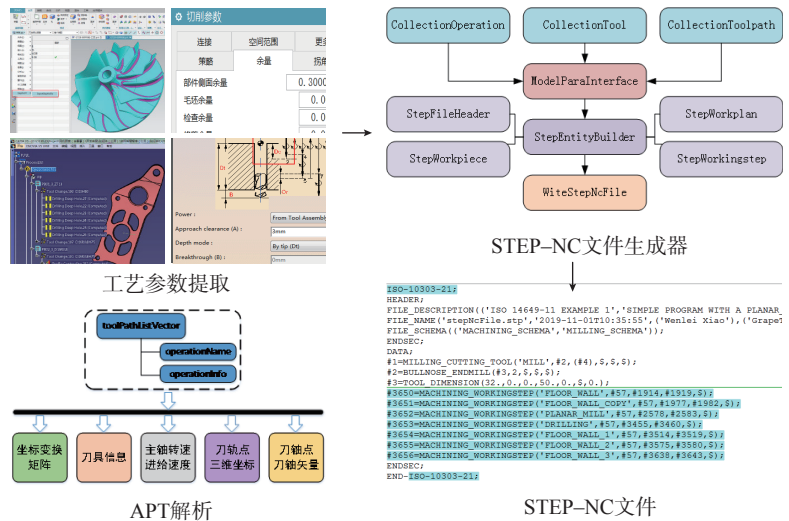


图3 STEP-NC工艺模型构建  
Fig.3 STEP-NC process model construction

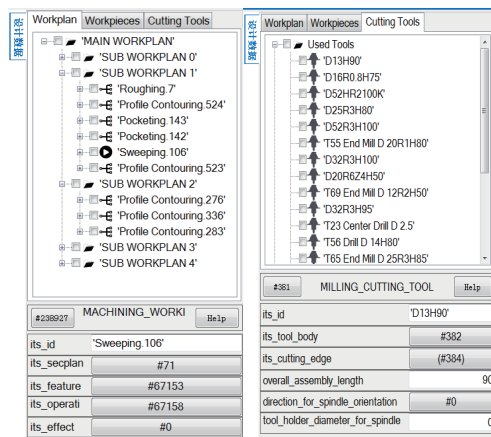


图4 工艺信息展示界面  
Fig.4 User interface for process information display

格的动态生成,实现了毛坯被刀具切削后的三维可交互仿真效果。切削仿真由数控系统输出的真实刀具位置数据驱动的,随着加工过程而动态变化,因此仿真可以完全展现被加工毛坯的几何状态。图5展示了系统的运行时仿真切削原理,支持三轴加工和五轴材料去除仿真。

虚拟场景还可提供加工状态参数评估,诸如切削力预测、颤振预测,刀具磨损预测等。几何仿真结合工艺数据和实时过程数据,使得虚拟场景形成了一个丰富的数据分析平台,基于理论分析和推导,不同层次的加工工艺指导信息可以被推理出来。如刀具磨损量与主轴功率有关,结合切深、切宽、进给率、刀具等切削条件构建预测模型计算刀具磨损量<sup>[24]</sup>;通过经验公式: $Q=a_p \times v_f$  ( $a_p$ 为切深; $a_e$ 为切宽; $v_f$ 为进给率)估算材料去除率;表面粗糙度通过加工过程中的主轴电流和Z轴加速度对理论值进行修正<sup>[25]</sup>;实时获取刀具当前位置,通过K-D Tree算法寻找当前点在理论刀轨中的位置,并利用进给率数据预估剩余加工时间。图6给出了GrapeSim系统信息推理模型。

传统数控系统在界面端以显示工件坐标的形式表达加工状态,而数字孪生系统可以通过虚拟仿真直观地展示加工过程的状态演变。全要素工艺信息和推理信息的融合,为数控加工智能化提供了更多可能性,催化数控加工新模式。如可以结合工艺数据、加工时间和刀具磨损量等,构建面向真实加工过程的成本估算系统,或通过对虚拟刀具的全生命周期的追踪实现刀具寿命管理,增强数控系统的开放性。

#### 4 服务智能

数字孪生系统的服务智能是指能够自动化应对来自于机器或者人的定制化需求。数字孪生驱动的智能服务区别于传统的制造服务,构建的是一种数控加工微服务群,通过加

工过程状态的精准追踪和生产指导信息的推理,基于虚拟仿真场景的构建和针对性算法的开发应用,自动化完成面向实际加工车间的服务需求。这种智能服务具备以下3个特征。一是自主响应决策。传统的制造服务需要人来主导或者干预,数字孪生驱动下的服务通过虚拟仿真自主响

应运行状态的变化,如开始加工或结束加工时的工业机器人辅助上下料。二是动态绑定服务。数字孪生系统利用自身丰富的信息资源,针对工业机器人、数控系统、工件和刀具等对象建立面向数控加工的微服务集群,在运行过程中动态绑定具体的服务对象。三是虚实迭代优化。虚拟场

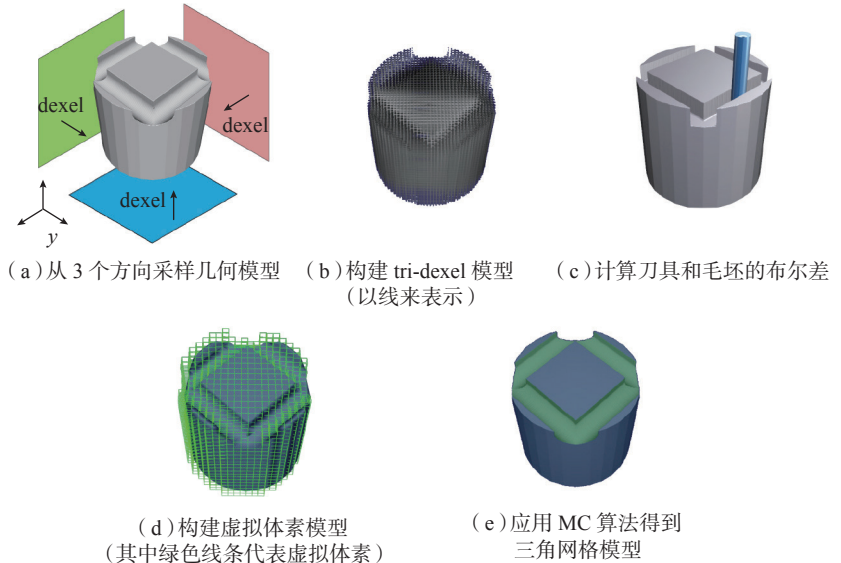


图5 切削仿真原理

Fig.5 Schematic diagram of machining simulation principle

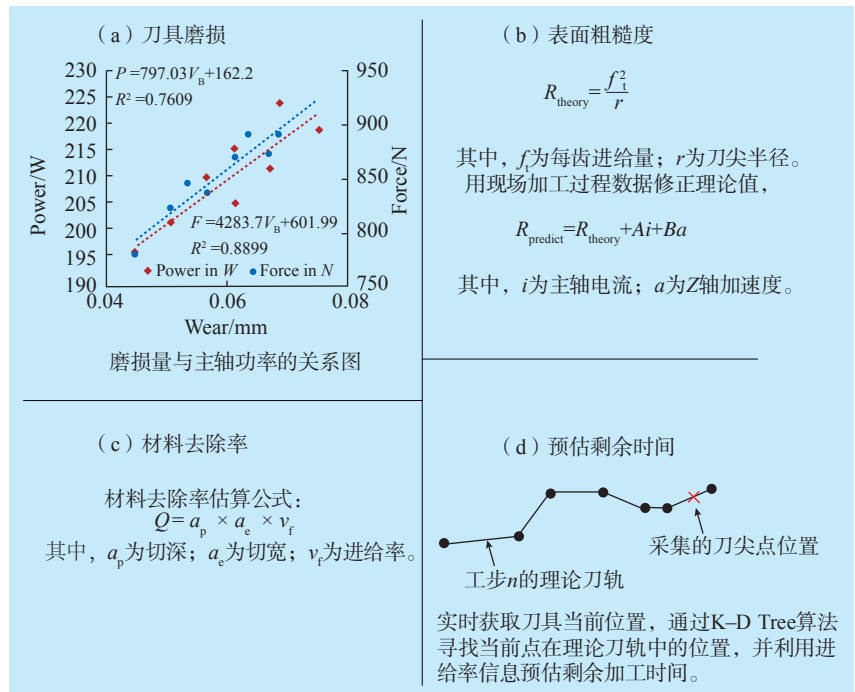


图6 工艺信息推理模型

Fig.6 Schematic diagram of process information inference model

景和物理世界同步运行,通过实时数据双向互连,物理世界返回的数据提升虚拟场景的仿真精度,虚拟场景的仿真数据反馈给物理世界优化加工工艺,不断迭代提高服务质量<sup>[26]</sup>。

服务智能的实现依赖具体的应用场景。这里结合数控加工中的刀具选择和机器人辅助机床上下料的场景构建服务案例,论述 CAD/CAM 和数控机床的需求服务。

(1)在 STEP-NC 文件统一加工资源的模式下,基于加工工艺的刀具选择更加依赖系统本身而非工艺人员,在设计端面临的第 1 个需求就是自动选刀。GrapeSim 系统作为数控系统的代理,依靠结构化工艺模型管理刀具,为机床提供动态刀库服务,同步刀具数据库。车间云服务器端

存储刀具数据库,内置刀具推荐算法,结合不同的推荐指标,提供刀具微服务,自动推荐最优的刀具。基于 CATIA 开发的智能刀具推荐模块,从 CATIA 中提取几何特征、工件材料等参数并且传输到云端服务器,GrapeSim 提供加工现场的动态刀具信息,云端服务器结合刀具数据库和推荐算法,返回优化后的刀具,自动将刀具参数写入到 CATIA 中<sup>[27-28]</sup>,图 7 展示了 GrapeSim 辅助刀具智能选择的流程。

(2)在机器人辅助机床上下料的应用场景中,上下料动作多由人工试教或离线编程实现,因而每次机床更换了加工零件种类后,都需要操作人员重新试教或编程:一方面,增加人工成本;另一方面,这种开环的控

制方式机器人缺乏控制灵活性,必须等到机床停机后才能自动执行上下料动作,这也增加了时间成本。在 GrapeSim 中构建工业机器人的数字孪生模型配合数字孪生的加工仿真和工步分析监测功能,自动分析机床加工状态,机床完成/开始加工后/前,自动向机器人发送上下料指令并为机器人自动规划轨迹,控制机器人执行上下料动作,整个环节免除人工编程同时自主决策使机器人具备对不同工况的适应性,节约了人工和时间成本。图 8 展示了机器人辅助的机床上下料案例。

GrapeSim 系统通过数控机床通信、工艺信息表达、运行过程仿真以及状态监控与信息推理实现了数控终端的感知数据、理解语义和推理

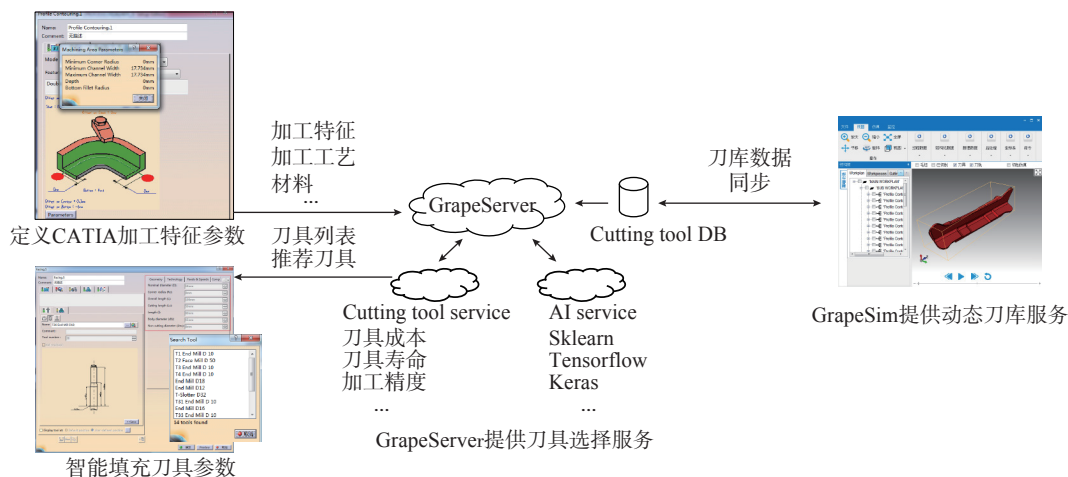


图7 智能化刀具选择案例  
Fig.7 Experimental case: intelligent tool selection

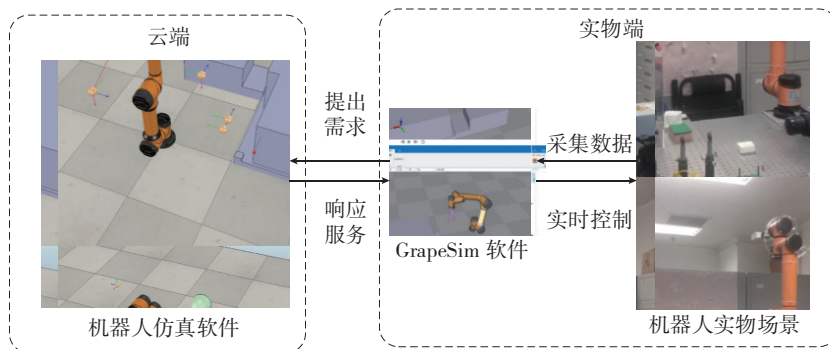


图8 机器人辅助的机床上下料案例  
Fig.8 Experimental case: intelligent tool selection

信息3个层级的智能,通过智能刀具推荐和辅助机器人上下料两个案例验证了第4个层级的智能服务需求。感知、理解和推理作为基础,为服务智能创造了无限可能。全要素工艺信息模型和机床实时通信可以构建不同的虚拟应用场景,运行时仿真可以模拟实际加工现场的加工状态变化,工艺数据和加工现场的实时过程数据以及虚拟场景中的仿真数据形成一个综合的信息推理平台。GrapeSim 的运行仿真和信息推理平台,结合加工现场的实际需求,通过针对性的智能算法,可以组合式产生尽可能多的自主化服务,辅助实现数控系统的智能化。

### GrapeSim 系统应用与未来发展趋势

为了验证数字孪生系统 GrapeSim 对数控加工辅助智能的可行性以及在未来推进更深入的研发工作,该系统在商飞生产车间进行了验证。软件系统安装在车间数控机床配套的电脑上,通过网线与数控系统建立通信,成功将 GrapeSim

系统部署在商飞数控车间,并进行了如下应用测试。机床运行前,在 GrapeSim 中打开零件的 STEP-NC 文件加载零件几何模型和工艺模型,配置数控系统的 IP 地址建立数据通信,当数控机床开始按照指令运行,实时采集回来的数据驱动刀具同步进行切削仿真,通过推理信息展示界面可以查看当前刀具磨损、材料去除、表面粗糙度、剩余加工时间等信息。如图 9 所示,展示了测试零件的实时仿真效果以及过程推理信息。GrapeSim 系统各项功能在商飞车间的成功测试验证了数字孪生系统对数控加工辅助智能方案的可行性,也预示着未来对数控加工模式的革新。

GrapeSim 系统对传统数控加工的智能化提升效果主要体现在两点。(1)打通了数字孪生系统与 CAD/CAM 之间的数据流,可以在软件中集成完整的加工工艺信息,同时应用机床通信技术构建了与 CNC 系统的数据通路,可以获取加工过程数据。这使得数字孪生系统成为数控加工中唯一集成了完整工艺信息、加工过

程数据、仿真推理信息的环节。所有信息都可以在软件界面上调出并查看。(2)虚拟环境和真实加工环境的同步性提供了对被加工毛坯状态的直观展示,通过推理算法实时计算得到当前状态下的成本、刀具磨损、剩余加工时间、能耗、材料去除率等数据,为工艺人员评估当前加工状态提供更多的数据依据,为后续的工艺优化提供支持。尤其是根据刀具累计使用时间的计算结果可以更准确地预估出更换刀具的时机。

GrapeSim 目前只是初步实现了数字孪生系统的 4 层智能,接下来将会进一步提升系统的智能化程度,同时致力于实现孪生系统对数控加工经济效益的提升。未来关于 GrapeSim 系统的研发将会集中在在以下几个方面:开发云孪生系统,利用云制造的技术优势共享制造资源,构建边缘计算和云计算的协同开放式软件架构;构建包含加工设备、刀具、工件和夹具的更加全面的几何物理模型库,加入切削力和颤振的预测模型,实现孪生系统的物理仿真功能;研究泛在感知和数据融合技术,

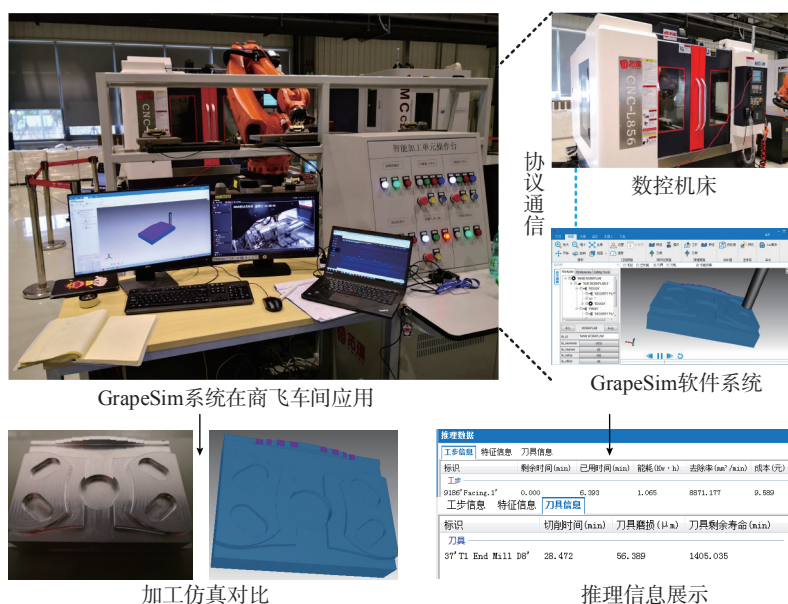


图9 GrapeSim系统在商飞的应用情况  
Fig.9 Application of GrapeSim system in COMAC

实现对刀具状态和工件质量的监测与预测;引入机器学习算法和大数据处理技术,对加工过程中的海量数据进行分析,形成对工艺参数的迭代优化。

## 结论与展望

本文提出了一种面向数控加工的数字孪生系统 GrapeSim,该系统集合了 STEP-NC 标准、机床通信、加工仿真、云服务、加工状态智能推理算法等多项功能,实现了虚拟环境和真实加工过程的同步运行以及机床加工状态实时评估,提升了传统数控加工的智能化水平,并从感知智能、理解智能、推理智能和服务智能 4 个方面阐述了数字孪生系统的独特作用。在商飞生产车间开展了 GrapeSim 系统的验证工作,针对复杂零件的加工过程,系统的机床数据获取、虚实加工状态同步、加工仿真、加工状态评估功能得到了成功验证,说明该系统具有很强的实用性。

GrapeSim 数字孪生系统运行于数控系统之外,通过辅助的方式赋予了数控系统更多智能化功能,可以看作是数控系统的智能代理。但当前的数字孪生系统不能控制机床运行,而未来的发展方向是实现真正意义的智能数控系统,即以内存交换的方式物理集成智能化模块,通过智能数控系统替代机床终端,并在其中实现更高级别的数字孪生系统,由智能监控过渡到智能控制,发挥数字孪生系统的更大作用。

在智能制造浪潮的推动下,智能化数控技术作为制造业水平衡量的重要标志,已成为国内外数控企业及相关科研机构的重点关注对象。探索研究智能化数控的发展趋势和实现方案,有助于提升我国在智能化高端装备研制过程中的技术储备,切实提高我国完全自主高档数控装备的国内和国外市场的竞争力,践行智能制造的宏伟目标。

## 参考文献

- [1] 方晨曦,叶佩青.面向高速高精加工的高性能数控系统展望[J].航空制造技术,2014,57(3):44-47.
- [2] 王勃,杜宝瑞,王碧玲.智能数控机床及其技术体系框架[J].航空制造技术,2016,59(9):55-61.
- [3] WANG BO, DU Baorui, WANG Biling. Smart CNC machine 1100I and its technological system frame[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2016, 59(9): 55-61.
- [4] 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, 2011: 1-14.
- [5] URBINA CORONADO P D, LYNN R, LOUHICHI W, et al. Part data integration in the shop floor digital twin: mobile and cloud technologies to enable a manufacturing execution system[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 48: 25-33.
- [6] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 1031-1042.
- [7] LUO W C, HU T L, ZHANG C R, et al. Digital twin for CNC machine tool: modeling and using strategy[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019, 10(3): 1129-1140.
- [8] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals, 2017, 66(1): 141-144.
- [9] LU Y Q, LIU C, WANG K I K, et al. Digital twin-driven smart manufacturing: connotation, reference model, applications and research issues[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 61: 101837.
- [10] HE Y, GUO J C, ZHENG X L. From surveillance to digital twin: challenges and recent advances of signal processing for industrial internet of things[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2018, 35(5): 120-129.
- [11] 于东,毕俊雪,刘劲松,等.开放式、智能化“蓝天数控”系统及应用实践[J].航空制造技术,2019,62(6):22-29.
- [12] YU Dong, BI Xiaoxue, LIU Jinsong, et al. Development and application of open and smart Lantian CNC system[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2019, 62(6): 22-29.
- [13] ATLURU S, HUANG S H, SNYDER J P. A smart machine supervisory system framework[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5-8): 563-572.
- [14] FLYNN J M, SHOKRANI A, NEWMAN S T, et al. Hybrid additive and subtractive machine tools-Research and industrial developments[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2016, 101: 79-101.
- [15] HUANG J, ZHOU Z D, LIU M Y, et al. Real-time measurement of temperature field in heavy-duty machine tools using fiber Bragg grating sensors and analysis of thermal shift errors[J]. Mechatronics, 2015, 31: 16-21.
- [16] ROSEN R, VON WICHERT G, LO G, et al. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing[J]. IFAC-Papers Online, 2015, 48(3): 567-572.
- [17] LU Y Q, XU X. Resource virtualization: a core technology for developing cyber-physical production systems[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2018, 47: 128-140.
- [18] ZHUANG C B, LIU J H, XIONG H. Digital twin-based smart production management and control framework for the complex product assembly shop-floor[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018, 96(1-4): 1149-1163.
- [19] MUKHERJEE T, DEBROY T. A digital twin for rapid qualification of 3D printed metallic components[J]. Applied Materials Today, 2019, 14: 59-65.
- [20] LIU J F, ZHOU H G, TIAN G Z, et al. Digital twin-based process reuse and evaluation approach for smart process planning[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 100(5-8): 1619-1634.

- [19] WANG J J, YE L K, GAO R X, et al. Digital twin for rotating machinery fault diagnosis in smart manufacturing[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(12): 3920–3934.
- [20] BAO J S, GUO D S, LI J, et al. The modelling and operations for the digital twin in the context of manufacturing[J]. Enterprise Information Systems, 2019, 13(4): 534–556.
- [21] NIKOLAKIS N, ALEXOPOULOS K, XANTHAKIS E, et al. The digital twin implementation for linking the virtual representation of human-based production tasks to their physical counterpart in the factory-floor[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2019, 32(1): 1–12.
- [22] 孟松鹤, 叶雨玫, 杨强, 等. 数字孪生及其在航空航天中的应用[J]. 航空学报, 2020, 41(9): 1–12.
- MENG Songhe, YE Yumei, YANG Qiang, et al. Digital twin and its aerospace applications[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2020, 41(9): 1–12.
- [23] LEE S W, NESTLER A. Virtual workpiece: workpiece representation for material removal process[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5–8):443–463.
- [24] CORNE R, NATH C, ELMANSORI M, et al. Enhancing spindle power data application with neural network for real-time tool wear/breakage prediction during inconel drilling[J]. Procedia Manufacturing, 2016, 5:1–14.
- [25] CAI Y, STARLY B, COHEN P, et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 10: 1031–1042.
- [26] JI W. An enriched machining feature based approach to cutting tool selection[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 2017, 31(1): 1–10.
- [27] 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.
- [28] ZHOU G H. Learning enabled cutting tool selection for special-shaped machining features of complex products[J]. Advances in Engineering Software, 2019, 133: 1–11.

通讯作者: 赵罡, 教授、博士生导师, 主要研究方向为数字化设计制造、复杂曲面的造型及数控加工、飞行器数字化装配等, E-mail: zhaog@buaa.edu.cn.

## Digital Twin System for CNC Machining

XIAO Wenlei<sup>1</sup>, CAO Xian<sup>1</sup>, ZHAO Gang<sup>1</sup>, XIA Mingzhen<sup>1</sup>, XING Hongwen<sup>2</sup>

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

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai 201324, China)

**[ABSTRACT]** Under the circumstance of intelligent manufacturing, CNC technology is developing towards more intelligent. The appearance of digital twin provides a new idea for the intellectualization of traditional NC machining. It is still lack of in-depth research that using digital twin to enhance the intelligence of NC machining. This paper discusses in detail the enhancement of digital twin technology in the intellectualization of NC machining from four aspects of perception, understanding, reasoning and service, and compares it with the traditional machining process. Through the introduction of independently developed digital twin system GrapeSim, the realization method of intelligent NC machining technology is described in detail. This system has been verified in COMAC, and a large number of tests have been carried out for actual machining parts, showing the improvement of machining intelligence and the practicability of digital twin system.

**Keywords:** CNC machining; STEP-NC; Digital twin; Machine tool communication; Machining simulation; Machining status assessment

(责编 古京)