

基于云制造的产品协同设计平台架构研究

魏巍, 王宇飞, 陶永

(北京航空航天大学机械工程及自动化学院, 北京 100191)

摘要: 产品设计是提高产品质量和降低制造成本的关键环节, 而云制造作为一种新的制造模式和集成技术正逐渐兴起, 成为先进制造的重要发展方向。为了应对传统制造业向服务型和创新型制造业转变的挑战, 本文在分析协同设计领域现状的基础上, 总结了传统制造模式对海量资源共享和按需使用方面存在的问题。研究提出了一种基于云制造的产品协同设计平台架构, 详细阐述了平台架构的各子层含义, 构建云制造产品协同设计平台的云制造、产品族和产品平台、产品协同设计 3 类关键技术。最后, 以某公司部署的云制造产品协同设计平台系统为例, 分析了系统架构和功能, 比较了云制造模式与传统制造模式在任务分配和任务完成时间上的差异, 验证了云制造产品设计平台系统的有效性和优越性, 并对该系统的实际应用和未来研究方向进行了展望。

关键词: 云制造; 协同设计; 产品平台; 资源封装; 平台架构

中图分类号: TH122 **文献标识码:** A

The Architecture of a Product Collaborative Design Platform Based on Cloud Manufacturing

Wei Wei, Wang Yufei, Tao Yong

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: Product design is crucial to improving product quality and lowering manufacturing costs. Cloud manufacturing is emerging as a new manufacturing model and an integrated technology and has become an important development direction for advanced manufacturing. To adapt to the transformation of traditional manufacturing to service-oriented and innovative manufacturing, this study investigates the current status of collaborative design and summarizes the problems regarding the sharing and on-demand use of massive resources in traditional manufacturing. It also proposes the architecture of a product collaborative design platform based on cloud manufacturing and explains the meaning of each layer in detail. Then three key technologies for building the platform are discussed: cloud manufacturing technology, product family and product platform technology, and product collaborative design technology. Finally, using a cloud-manufacturing-based product collaborative design platform system established by a company as an example, the system architecture and functions of the platform are analyzed, and the differences in task assign and completion time between cloud manufacturing and traditional manufacturing are compared. The effectiveness and superiority of the cloud-manufacturing-based system are verified, and the application and research direction of the system are prospected.

Keywords: cloud manufacturing; collaborative design; product platform; resource encapsulation; platform architecture

收稿日期: 2020-06-05; 修回日期: 2020-06-22

通讯作者: 魏巍, 北京航空航天大学机械工程及自动化学院副教授, 研究方向为产品族设计、数字化设计与制造; E-mail: weiwei@buaa.edu.cn

资助项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFB1104201); 国家自然科学基金资助项目(51675028); 中国工程院咨询项目“‘互联网+'行动计划战略研究(2035)"(2018-ZD-02)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

一、前言

产品设计是影响产品质量和制造成本的重要环节。协同设计方式可以充分利用现有设计资源并发挥最大价值,是一种降低产品设计成本的优化策略。尽管传统的分布式网络系统环境能够完成协同设计工作,但受软硬件系统静态性的限制 [1],设计资源存在一些“信息孤岛”现象致使资源利用不平衡,无法实现对异构、异地、海量资源的共享和按需使用,难以充分满足用户对系统动态性的需求。因此,在产品协同设计时,如何让设计人员充分地访问并利用丰富的设计资源,提高产品设计水平,降低产品设计成本,是一个重要的研究课题。

有效提升产品协同设计效率,突破传统设计模式,一直是国内外学术界和业界的热点。Golightly 等 [2] 讨论了云制造环境中的协作技术。美国麻省理工学院开展了计算机辅助的分布式集成环境 (DICE) 研究项目,建立了一套便于设计人员协同工作的基于云制造的产品设计系统 [3]。美国斯坦福大学开展了并行工程的可扩展框架和方法论 (SHARE) 项目研究,团队成员间通过云技术共享设计知识和设计理念 [4]。美国波音公司采用基于互联网的协作设计来管理分布于全球 40 多个国家和地区的制造公司共同制造波音 787 客机,使开发周期缩短了 30%,成本降低了 50% [5]。Katzmaier 等 [6] 的研究结果表明,基于互联网的设计模式在通用性、多样性和协同性上已超过传统设计模式。国内也有研究团队对云设计和仿真技术进行研究,构建了用于飞行器虚拟样机协同设计的云仿真平

台 [7]。综上,基于互联网的产品协同设计已具备较好的技术基础,展现出较强的技术优势,如提高设计效率、提升设计通用性与协同性等。然而,对于高精度设备信息、高级专家经验、设计知识资源,亟需采用计算能力更强的制造模式以实现产品设计协同与资源共享,有效组织、管理和配置异构资源,提高资源利用率 [8]。

云制造模式不仅具有云计算的优点,而且还拥有柔性制造和网络化制造等先进制造模式的优势 [9]。云制造模式可以高效共享与协同海量制造资源、具有良好的系统开放性和用户参与度,成为先进制造模式的重要发展方向 (见表 1) [10]。为更好应对传统制造业向服务型和创新型制造业转变的挑战,本文开展基于云制造的产品协同设计平台架构研究,论述相关平台架构的先进制造技术;以某公司部署的云制造产品协同设计系统为例,分析平台系统的架构和功能并验证其有效性和优越性。

二、云制造产品协同设计平台架构

传统的产品平台架构分为资源层、工具层和应用程序层,侧重于集中资源并尽可能独立完成产品开发任务。而事实上,产品开发过程是通过多方合作来完成的,需要进行大量资源计算,而传统产品平台已不能满足当前的应用需求。因此,本文基于云制造技术,提出了云制造产品协同设计平台架构 (见图 1)。该平台是基于其原始架构,融合并扩展了支持分布式企业之间业务协作的云制造产品平台

表 1 云制造模式与其他先进制造模式之间的比较

项目	柔性制造	网络化制造	云制造
系统功能	合作	资源共享 / 合作	资源共享 / 合作
系统开放性	约束多、开放性差	较好开放性	高开放性
资源类型	部门、人、技术等	设备、人、物料、网络、信息等	物料、设备、软件、硬件、逻辑、人、知识等
数据量	吉字节水平	太字节水平	拍字节水平
资源使用	定制	动态配置	按需动态配置
用户参与度	中等	中等	高度
协作范围	少数公司	多个行业的公司	几乎每个行业的公司
关键技术	柔性制造技术、计算机辅助设计、人工智能	服务、动态服务器页面、网络技术	服务、云计算、物联网 (IoT)

来构建的，可以有效共享多种资源，如制造、信息、技术以及与产品开发相关的标准化设计资源等，提高资源利用率。云制造产品协同设计平台架构主要由资源层、云技术层、云服务层、应用层、用户层 5 个层面组成。

1. 资源层

资源层是云制造产品协同设计平台的物理基础。平台中的设计资源集合了产品生命周期中所涉及的计算能力、知识、软件、硬件和相关标准等资源，在云制造环境中用户可灵活选择和利用这些资源。资源层可有效解决设计资源过载或闲置以及软硬件系统静态性限制等问题，提高资源利用率。

2. 云技术层

在云制造产品协同设计平台上，实现产品协同设计的关键是解决云制造环境中设计资源的共享问题。云技术层的目标是高效共享和管理多样性、异构性和特殊性的资源，对各种设计资源和能力实现

智能感知与控制，并对虚拟资源进行监测、发现和快速共享。云技术层主要利用资源虚拟化技术、资源管理技术、资源感知技术和 IoT 技术等对设计资源开展统一标准地描述和封装。

3. 云服务层

云服务层面向设计人员，通过云制造产品协同设计平台为其提供服务。通过抽象产品设计过程，提炼产品设计任务关键进程，得到云服务层的主要内容，为管理用户数据、监控资源服务质量、分配设计任务、消解资源冲突、维护系统安全等提供服务。云服务层是云制造产品协同设计平台的核心层，平台的运行与维护、资源的计算与分配、数据的管理与共享等都可以在本层实现。

4. 应用层

应用层具有多个统一的功能调用接口，用于实现云制造产品协同设计平台的基本功能。基于实际业务情况，通过运用组合各个基本功能接口的方法，应用层可最大程度满足设计任务需求，实现包括

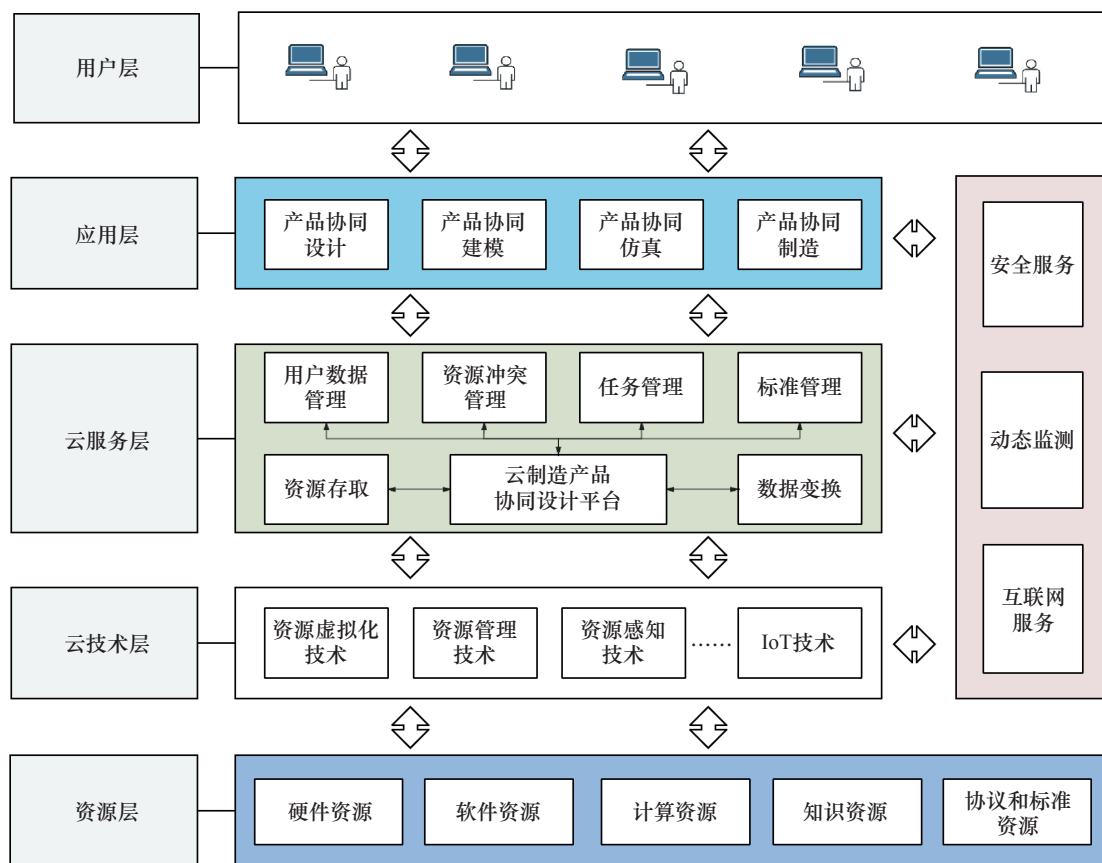


图 1 云制造产品协同设计平台架构

产品协同设计、建模、仿真、制造在内的多项关键功能。

5. 用户层

用户层基于交互界面通过网络进行访问，直接面向用户的应用环境，便于用户对云制造产品协同设计平台的各项功能进行访问与调用。本层是平台各项功能在操作系统中的直观表现层，将系统环境与系统用户相融合，实现了人与平台的共融。

三、云制造产品协同设计平台关键技术

云制造产品协同设计平台是一个复杂的系统，关键技术体系涉及云制造、产品族和产品平台、产品协同设计等方面（见图 2）。

（一）云制造关键技术

1. 物联网技术

IoT 技术在云制造中的应用有 3 个层次：使用传感装置和技术对各种制造设备、互联网连接、自动控制等进行感知；促使制造系统中的物流和能源智能化，并支持服务的智能运行，如服务之间的智能交互和协作；支持云制造用户的通信 [11]。

2. 云服务技术

云服务技术采用 IoT、虚拟化等技术封装基于知识的分布式设计资源和制造能力，使资源（如产品全生命周期中涉及的软件、硬件、计算能力、专

家知识和相关标准）高度虚拟化，并以云服务的形式为用户提供制造全生命周期的应用。用户灵活访问这些应用，实现对相关设计资源和能力的共享和调用。云服务的形成过程是云制造资源和能力服务化的过程 [1]。云制造系统中的用户、资源和云服务之间关系如图 3 所示。

3. 资源管理技术

资源管理是云制造产品协同设计平台对异构、异地的设计资源进行描述、封装、搜索与推送的关键和难点。资源管理技术主要围绕资源统一分类和描述、资源虚拟化、资源发现、资源绑定策略 4 个方面展开。

（1）资源统一分类和描述。根据云服务环境下设计资源的分布、异构、自治、量大、类多等特点，采用相关技术对各类资源进行统一分类和描述，便于资源的集成、共享和管理。例如，运用可扩展标记语言（XML）、Web 服务本体语言（OWL-S）和统一建模语言（UML），建立相应的可扩展描述模板。在建立资源描述的过程中，应充分考虑资源发现、整合和匹配的要求，尽可能地完整描述资源。

（2）资源虚拟化。为解决资源多地分布和异构性问题，需要将部署在云制造系统中的资源进行虚拟化，方便在网络上进行统一访问。资源虚拟化主要有虚拟描述和服务封装两个阶段：虚拟描述旨在建立一个资源描述规范，以统一的虚拟资源数

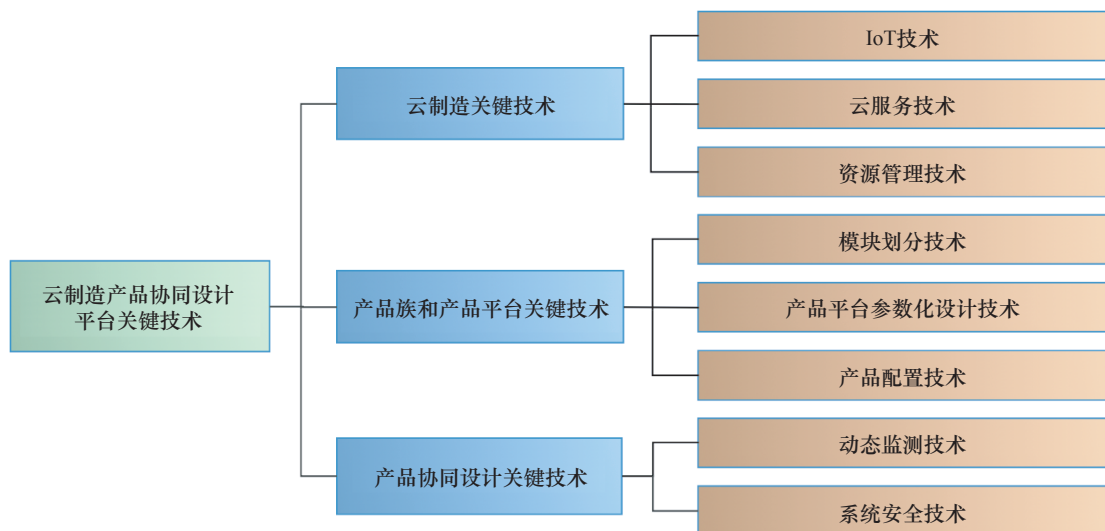


图 2 云制造产品协同设计平台关键技术

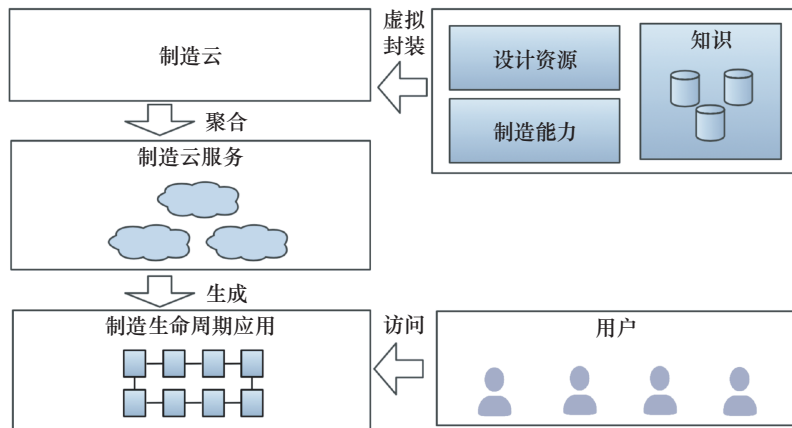


图3 用户、资源和云服务的关系

据模型全面表示制造资源信息；服务封装从虚拟资源数据模型中提取设计资源的功能特征并将其封装为云服务，在统一界面中与云平台进行互操作 [12]。

（二）产品族和产品平台关键技术

1. 模块划分技术

模块划分技术在云制造产品平台中的应用主要有两类：以功能和结构为划分依据，通过算法对产品进行单元模块划分，构建产品模块，通过模块的选择和组合形成不同的产品，满足市场需求 [13]；将复杂任务快速分解为多个可调度的子任务，在云制造环境中创建完成任务的映射关系，协调每个子任务用户完成任务。

2. 产品平台参数化设计技术

参数化设计技术是典型的产品平台技术，处理从用户交互界面接收的参数化设计数据，根据参数传递关系生成结构模型的驱动参数；将新生成的模块参数输入相应的模型数据库，修改生成新产品的三维（3D）模型和平面（2D）工程图。

3. 产品配置技术

云制造产品配置技术由可视化引擎、用户界面、产品评估、配置引擎、云制造服务 5 个主要模块组成 [14]。产品配置与云制造服务之间的关系如图 4 所示。在响应系统请求之后，云制造服务将所需的产品相关数据发送到系统，以支持产品进行配置，随后提交产品的最终规格及相关信息进行下一步处理。配置引擎参考强制配置规则和约束，根据用户

输入要求生成有效的产品规格。可视化引擎提供基于 Web 的动态产品可视化，查看和操作 3D 产品模型以支持产品配置。用户与系统的交互主要用于接收用户需求并查看配置反馈。

（三）产品协同设计关键技术

1. 动态监控技术

在云制造服务的产品协同设计平台中，动态监控技术可以全面监控资源的服务状态，确保云制造服务的平稳高效运行。动态监控技术主要进行的检测有：①协作过程监测，为保证复杂设计任务高效、快速地完成，运用云制造环境的智能冲突检测模型，实时监测协同设计过程中的数据、过程、权限等冲突，快速调用冲突消解服务，提升协作效率；②资源动态监测，采用高效的资源监测策略，对资源分配和调用过程进行实时动态监测，及时发现和处理资源故障，最大限度地降低资源分配和调用对系统硬件的需求，提升监测效率；③系统故障监测，对系统的软件和硬件进行实时监测，对系统故障采用紧急预案进行处理，避免系统彻底崩溃对设计任务和设计资源造成损失。

2. 系统安全技术

在高度开放性的云制造产品协同设计平台中，安全性是保障系统顺利运行的关键。系统安全技术主要解决的问题有：平台安全性测试，主要体现为平台在执行任务过程中可以动态添加和删除用户；平台用户权限授予，即平台在任务协调过程中，对用户权限进行合理适度的授予以保证用户

既能完成设计任务，又不会对设计权限以外的事务造成干扰。

四、云制造产品协同设计平台系统实例分析

产品需求变化迅速，良好的产品设计模型至关重要。本文在研究产品协同设计平台体系架构的基础上，以某公司部署的云制造产品协同设计平台系统（见图 5）为例，描述云制造产品协同设计平台的应用情况，对系统功能进行介绍和分析。该公司平台系统的性能在产品全生命周期中均表现良好。

（一）系统功能介绍

某公司部署的云制造产品协同设计平台系统主页由 5 个功能模块组成（见图 6）。①用户数据管理服务，用于用户的权限授权和管理，不同角色的用户被授予严格的权限级别，确保任务安全顺利完成；②产品管理服务，用于产品生命周期管理，包括协同设计、协同建模、协同仿真和协同生产；③资源管理服务，用于描述、封装、管理和应用资源，使用户能够快速有效地利用资源；④冲突消解服务，用于制定检测分类、解决策略，解决任务分配以及智能处理系统运行期间的冲突

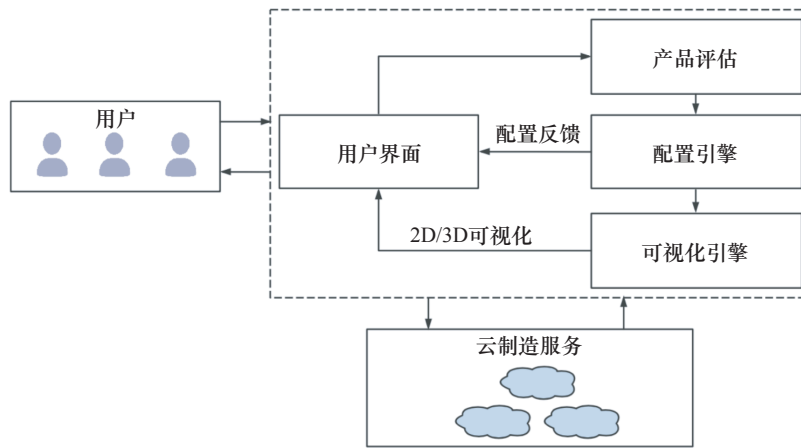


图 4 产品配置和云制造服务的关系

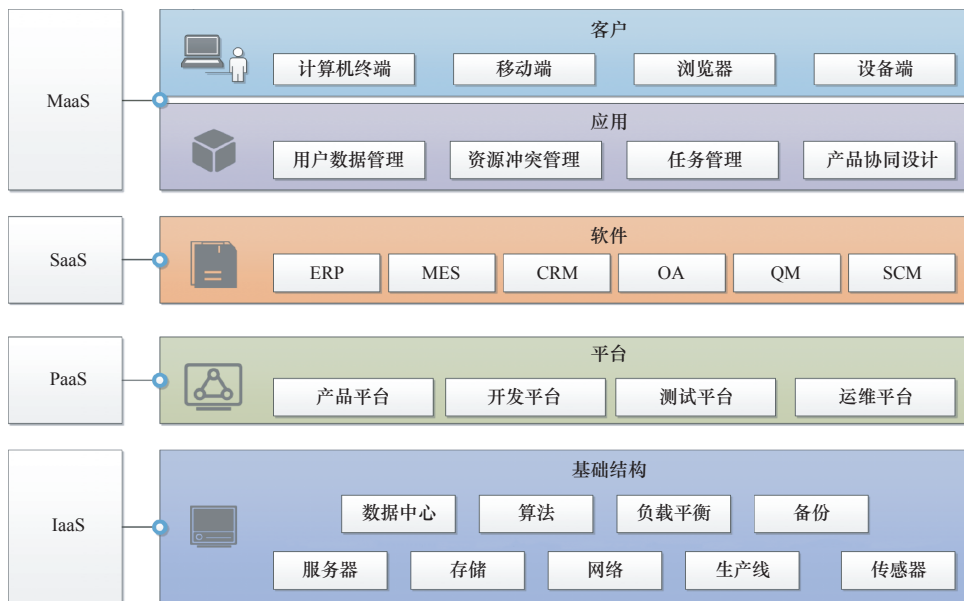


图 5 云制造产品协同设计平台系统

注：Maas 表示制造即服务；SaaS 表示软件即服务；PaaS 表示平台即服务；IaaS 表示基础设施即服务；ERP 表示企业资源计划；MES 表示制造企业生产过程执行管理系统；CRM 表示客户关系管理；OA 表示办公自动化；QM 表示质量管理；SCM 表示软件配置管理。



图6 云制造产品协同设计平台系统主页

等；⑤系统安全服务，在系统运行过程中对系统的所有参数进行动态监控，保障产品平台中的产品实时设计数据、历史设计案例、各类设计资源的安全性。

针对云制造产品协同设计平台系统的产品管理服务，以1台数控铣床为例，说明产品协同设计、产品协同建模、产品协同仿真的应用情况。

(1) 产品协同设计应用可通过云服务器调用计算机辅助设计软件(CAD)，读取所选部件的3D结构图和2D工程图，实现参数驱动的产品设计。通过读取3D模型获取产品模型的相关参数，以参数驱动的方法实现对3D结构模型的尺寸修改，并更新其模型存储数据库。

(2) 产品协同建模应用的步骤为：根据用户的需求情况，确定数控铣床系列；确定数控铣床每个模块中的参数、结构和辅助结构特性，并选择不同的结构模块代码；对各模块进行组合选择，快速设计出新的数控铣床产品；对数控铣床的主要结构模块进行修改和保存，将结构模块组装成符合客户需求的数控铣床。

(3) 在产品协同仿真应用中，数控铣床模型的导入，载荷、约束的施加以及后期处理都可以通过命令流来实现。用户可以编辑任务编号、任务名称等信息，也可以设置任务的结束时间。系统将根据任务结束时间动态调用相关资源，如计算过程中服务器使用的中央处理器(CPU)数量，确保任务按时完成。仿真分析结果将显示在界面上，可以超文本标记语言(HTML)格式文件输出。

(二) 系统分析

以任务分配时间、任务完成时间作为衡量传统制造模型效率和云制造模型效率的指标，选择位于北京市的3家制造企业(代号为A、B、C)作为研究对象。经许可，研究团队进入企业的MES系统和数据库，分别采集了3家企业在应用云制造产品协同设计平台系统前后关于分配任务所需时间和完成任务所需时间的相关数据，以3家企业任务时间的平均值作为评估指标。限于数据量过大，通过选取关键节点数据绘制图表的方式来比较两种制造模式。

基于两种制造模式分配和完成任务的时间差异如图7所示，图7a是3家企业任务分配时间的平均值；图7b中的虚线是通过3家企业任务完成时间的散点坐标得到的拟合线，显示了企业在两种制造模式下完成任务所需的时间差异。在初始阶段，由于云制造模式的运行机制复杂，其响应速度不如传统制造模式，当任务量达到一定值时，云制造模式的计算优势将得到显现。

五、结语

在对协同设计领域现状和传统制造模式的资源使用与共享情况进行调查分析的基础上，本文提出了面向云制造的产品协同设计平台5层架构，将云制造技术、产品族和产品平台技术、产品协同设计技术进行有机结合，建立了云制造产品协同设计平台原型系统，在相关制造企业中完成了应用验证。与传统制造模式进行综合比较，分析了基于两种制造模式分配任务和完成任务的时间差异，验证了云制造模式的有效性和优越性。

基于云制造的产品协同设计平台在今后相关制造企业的应用中，应结合工程实际情况，利用云制造模式敏捷化、智能化特点，在产品生产全生命周期内充分发挥云制造模式的优势，实现设计人员、客户需求方、产品供应商等多个主体协同交互完成产品的设计制造过程，提高产品设计效率和产品质量。

云制造技术持续发展，受技术和时间所限，文中研究仍有许多未尽之处。未来可从以下方面开展进一步研究：比较各种云服务架构的有效性，对资源封装、动态监测等云技术进行优化，完善产品协

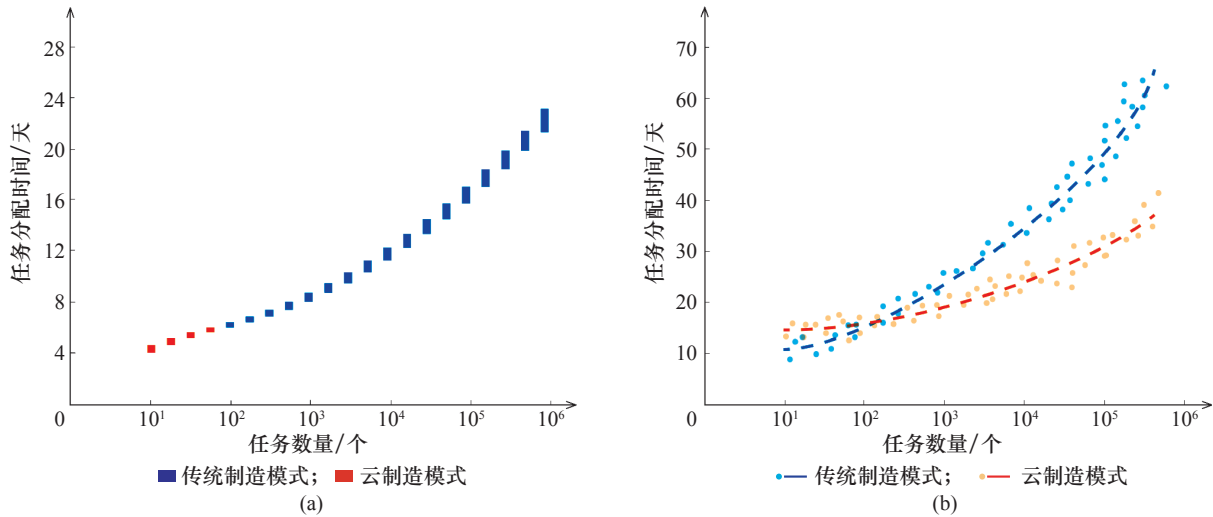


图 7 基于两种制造模式分配和完成任务的时间差异

同设计平台；以支持增材制造和大数据分析为目标，改进基于云制造的产品协同设计平台的系统功能，实现产品快速制造和市场需求预测等功能。

参考文献

- [1] Tao F, Laili Y J, Xu L, et al. FC-PACO-RM: A parallel method for service composition optimal-selection in cloud manufacturing system [J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2012, 9(4): 2023–2033.
- [2] Golightly D, Sharples S, Patel H, et al. Manufacturing in the cloud: A human factors perspective [J]. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2016, 55: 12–21.
- [3] Wei Y, Blake M B. Service-oriented computing and cloud computing: Challenges and opportunities [J]. *IEEE Internet Computing*, 2010, 14(6): 72–75.
- [4] Armbrust M, Fox A, Griffith R, et al. A view of cloud computing [J]. *Communications of the ACM*, 2010, 53(4): 50–58.
- [5] Ding B, Yu X Y, Sun L J. A cloud-based collaborative manufacturing resource sharing services [J]. *Information Technology Journal*, 2012, 11(9): 1258–1264.
- [6] Katzmaier A, Hanneghan M. Design pattern evaluation of mobile and web based application frameworks [C]. Abu Dhabi: 2013 International Conference on Developments in eSystems Engineering, 2013.
- [7] 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 B H, Chai X D, Hou B C, 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.
- [8] Gu P, Hashemian M, Nee A Y C. Adaptable design [J]. *CIRP Annals*, 2004, 53(2): 539–557.
- [9] 张霖, 罗永亮, 范文慧, 等. 云制造及相关先进制造模式分析 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(3): 458–468.
Zhang L, Luo Y L, Fan W H, et al. Analyses of cloud manufacturing and related advanced manufacturing models [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(3): 458–468.
- [10] 陶飞, 张霖, 郭华, 等. 云制造特征及云服务组合关键问题研究 [J]. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(3): 477–486.
Tao F, Zhang L, Guo H, et al. Typical characteristics of cloud manufacturing and several key issues of cloud service composition [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2011, 17(3): 477–486.
- [11] 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.
- [12] Liu N, Li X, Wang Q. A resource & capability virtualization method for cloud manufacturing systems [C]. Anchorage: 2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, 2011.
- [13] 魏巍, 梁赫, 许少鹏. 基于人工免疫改进算法的稳健产品平台模块划分 [J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(4): 885–893.
Wei W, Liang H, Xu S P. Module division of robust product platform based on improved artificial immune algorithms [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21 (4): 885–893.
- [14] Yip A L K, Corney J R, Jagadeesan A P, et al. A product configurator for cloud manufacturing [C]. Madison: ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the 41st North American Manufacturing Research Conference, 2013.