

文章编号:1006-5911(2010)01-0001-07

云制造——面向服务的网络化制造新模式

李伯虎^{1,2}, 张霖¹⁺, 王时龙³, 陶飞¹, 曹军威⁴, 姜晓丹⁵, 宋晓¹, 柴旭东²

(1. 北京航空航天大学 复杂产品先进制造系统教育部工程研究中心, 北京 100191;

2. 北京仿真中心, 北京 100854; 3. 重庆大学 机械工程学院, 重庆 400044;

4. 清华大学 信息技术研究院, 北京 100084; 5. 北京慧点科技开发有限公司, 北京 100083)

摘要:为求解更加复杂的制造问题和开展更大规模的协同制造,分析了目前应用服务提供商、制造网格等现有网络化制造模式在应用推广等方面遇到的问题,阐述了云计算服务模式、云安全、高性能计算、物联网等理念和新技术对解决网络化制造中运营、安全等问题的契机。在此基础上提出了一种面向服务的网络化制造新模式——云制造。给出了云制造的定义,分析了云制造与应用服务提供商、制造网格等的区别。提出了一种云制造的体系结构,讨论了实施云制造所需攻克的关键技术和所取得的成果。最后,给出了一个云制造的典型应用案例——基于云仿真原型平台的云设计。

关键词:云制造;网络化制造;云计算;云安全;制造模式

中图分类号:TP391;TH166 **文献标识码:**A

Cloud manufacturing: a new service-oriented networked manufacturing model

LI Bo-hu^{1,2}, ZHANG Lin¹⁺, WANG Shi-long³, TAO Fei¹, CAO Jun-wei⁴,
JIANG Xiao-dan⁵, SONG Xiao¹, CHAI Xu-dong²

(1. Engineering Research Center of Advanced Manufacturing System of Complex Product,
Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China;

2. Beijing Simulation Center, Beijing 100854, China;

3. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

4. Research Institute of Information Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

5. Smartdot Technologies Co., Ltd., Beijing 100083, China)

Abstract: To solve more complex manufacturing problems and perform larger-scale collaborative manufacturing, the impediments to practical application and development of Networked Manufacturing (NM) were analyzed. Technologies, such as cloud computing, cloud security, high performance computing, Internet of things which were used to solve the mentioned impediments, were briefly described. Based on it, a new service-oriented networked manufacturing model called Cloud Manufacturing (CMfg) was put forward. Then, the concept of CMfg was defined. And differences among CMfg, application service provider and manufacturing grid were discussed. CMfg architecture was also proposed, key technologies for implementing CMfg were studied and preliminary research results were introduced. Finally, an application prototype of CMfg, i. e., COSIM-SCP, was presented.

Key words: cloud manufacturing; networked manufacturing; cloud computing; cloud security; manufacturing mode

收稿日期:2009-12-01;修订日期:2009-12-15。Received 01 Dec. 2009; accepted 15 Dec. 2009.

基金项目:国家 863 计划资助项目(2007AA04Z153);国家 973 计划资助项目(2007CB310900)。**Foundation items:** Project supported by the National High-Tech. R&D Program, China(No. 2007AA04Z153), and the National Basic Research Program, China(No. 2007CB310900).

作者简介:李伯虎(1938—),男,上海人,中国工程院院士,博导,主要从事网络化建模与仿真系统、虚拟样机工程、网络化、智能化、服务化制造系统等的研究。E-mail:bohuli@moon.bjnet.edu.cn。+张霖(1966—),男,天津人,教授,博导,研究方向:网络化制造、计算机仿真等。通信作者,E-mail:johnlin9999@163.com。

0 引言

21 世纪,制造业的发展更加依赖高新技术应用的推动。以应用服务提供商(Application Service Provider, ASP)^[1-2]、制造网格(MGrid)^[3-4]、敏捷制造^[5-6]、全球化制造(global manufacturing)^[7-8]等为代表的网络化制造模式,成为制造企业为应对知识经济和制造全球化的挑战而实施的、以快速响应市场需求和提高企业(企业群体)竞争力为主要目标的一类先进制造模式。网络化制造将先进的网络技术、信息技术与制造技术相结合,构建面向企业特定需求的基于网络的制造系统,并在系统的支持下,突破空间地域对企业生产经营范围和方式的约束,开展覆盖产品全生命周期全部或部分环节的企业业务活动(如产品设计、制造、销售、采购、管理等),实现企业间的协同和各种社会资源的共享与集成,高效、高质量、低成本地为市场提供所需的产品和服务。

尽管经过十几年的发展,网络化制造在资源服务化建模与封装、资源配置与调度、协同设计、 workflow 管理等领域取得了一定成果,但要进一步扩大并深化应用,从而取得显著的经济效益,当前的网络化制造无论在技术上还是运营模式上还存在着一些瓶颈问题:

(1) 服务模式问题

包括缺乏服务的集中管理和运营,缺乏利益分配机制,服务的效率、质量和及时性难以保证等。

当前的网络化制造模式(如 ASP, MGrid 等)的研究重点是如何使分散的制造资源能够通过网络连接起来,强调的是如何汇聚资源,协同完成一个制造任务。网络化制造模式主要通过共享网络将分布在不同物理位置的大量异构制造资源连接起来,形成虚拟的集中资源,进而为制造企业提供制造能力和资源的共享。在应用时,主要是将一个复杂制造任务分解成若干简单任务,通过调度机制使这些简单任务并行运行在不同制造资源节点上,最后汇集执行结果,体现的是一种“分散资源集中使用”的思想。然而由于缺乏对服务的集中管理和运营,资源服务提供者(Resources Service Provider, RSP)的利益没有得到保障,很多 RSP 不愿意提供本企业的制造资源,也没有动力和机制去促进持续提供高质量的制造服务,从而难以保障网络化制造服务的效率、质量、可靠性等。而由于缺乏连续、稳定、高质量的制造服务,资源服务需求企业(Resources Service Demander, RSD)的制造任务执行质量、及时性等都难

以得到保障,致使 RSP 和 RSD 对现有网络化制造服务模式都不满意,从而阻碍了网络化制造的应用推广。因此,有必要研究网络化制造应用新模式,不仅要体现“分散资源集中使用”的思想,还要有效实现“集中资源分散服务”的思想,即将分散在不同地理位置的制造资源通过大型服务器集中起来,形成物理上的服务中心,进而为分布在不同地理位置的用户提供制造服务。借助市场经济理论,引入第三方(制造服务运营方)对汇聚起来的制造资源服务进行集中运营管理,并提供高质量的服务,从而保障 RSP 和 RSD 双方的利益和积极性,促进网络化制造的推广应用。

(2) 制造资源的共享与分配技术问题

包括资源的动态分配问题、智能化匹配问题、物理设备嵌入式接入与使用问题等技术问题。

当前网络化制造在资源共享和分配上体现的是一个整体的独立系统,是以固定数量的资源或既定的解决方案为用户提供服务,其业务流程相对比较固定。随着网络技术的发展,以及基于服务架构(Service-Oriented Architecture, SOA)思想的提出,资源共享和应用过程应该是基于服务而形成业务链的过程,进而映射成虚拟企业的组织,其解决方案应该是动态生成的,即先有业务流程,后有虚拟企业。当前对网络化制造的研究,就如何发布资源(即实现资源的汇聚)以及如何搜索资源开展了大量的工作,但是如何实现资源和任务在接口、功能、流程、语义、服务质量等方面的智能匹配、寻租、动态组合等,则缺乏有效的解决手段。此外,所发布和封装的制造资源目前还是以“软资源”(如软件应用系统、制造数据等计算和信息资源)为主,而对实现网络化制造终端物理设备的智能嵌入式接入、封装和调用还没有满意的解决方案。正因为目前的网络化制造技术没有很好地解决制造资源的动态共享与智能分配、终端物理设备智能嵌入式接入等问题,使其推广应用和发展受到了限制。

(3) 安全问题

包括系统和平台安全、网络通信安全、企业核心数据安全、用户间信任安全、可信制造、防止第三方的恶意攻击和破坏等技术。

由于网络化制造在推广应用过程中,系统和平台本身存在安全隐患,加上网络通信安全隐患,以及 RSP 和 RSD 在使用过程中缺乏信任、担心企业核心数据泄露等问题,严重阻碍了网络化制造的推广应用。而由于目前网络化制造给企业带来的利润空

间不大,大型 IT 企业针对网络化制造开发的专门安全产品十分匮乏。

综上所述,正是因为当前网络化制造没有良好的运营模式,没有实现动态智能的制造资源共享与分配,没有完全实现终端物理设备智能接入,再加上没有有效的安全解决技术和手段等诸多问题,制约了其应用推广和发展。

近两年来,一种新的服务化计算模式——云计算(cloud computing)^[9-10]正在兴起。云计算的理念是由专业计算机和网络公司(即第三方服务运行商)搭建计算机存储和计算服务中心,把资源虚拟化为“云”后集中存储起来,为用户提供服务。从技术上看,云计算是虚拟化和网格计算等的延伸,但更为重要的是云计算理念本质上带来的是服务模式的转变。云计算使得计算资源成为一种专业服务,并通过信息化的方式提供出来。随着云计算模式的提出和应用上的日趋成熟,企业也看到了云计算服务模式带来的巨大利润空间。因此,许多知名企业如 Google, IBM, Amazon, Yahoo 等相继投入大量人力和物力开展了各自的云计算计划和项目。目前已涌现了一批云计算的应用形式,典型的有软件即服务(Software as a Service, SaaS)、效用计算(utility computing)、网络服务(network service)、平台即服务(Platform as a Service, PaaS)、管理服务提供商(Mange Service Provider, MSP)、商业服务平台、互联网整合^[11]和云仿真平台^[12]等。

继云计算概念后,云安全的理念也被提出。一些大型的信息安全公司,如瑞星、趋势科技等已投入巨资从事专业云安全产品的开发,目前已有较成熟的安全产品。如国际信息安全厂商——趋势科技为实现云安全架构,投入了 4 亿美元,在全球建立了五个大型云端数据中心,安装了 34 000 台云端服务器^[13]。瑞星公司提供的云安全杀毒软件目前已投入使用,据称其用户已超过 8 000 多万^[14]。

由以上分析可知,云计算为解决当前网络化制造存在的问题提供了新的思路和契机,云安全模式和相应商业化云安全产品对解决网络化制造中的安全问题提供了新的技术手段,再加上当前嵌入式系统和技术的快速发展,为未来实现终端物理设备智能嵌入式接入提供了使能技术。

目前物联网技术在无线射频识别(Radio Frequency IDentification, RFID)、传感器、智能技术和纳米技术等支持下快速发展,有望促进各类物与物之间的互联。引入物联网技术必将有助于构建一个能互联各类制造资源的平台。另外,高性能计算机

的应用和高性能计算技术的发展也为求解更加复杂的制造问题和开展大规模协同制造提供了可能。

因此,本文提出了一种面向服务的网络化制造新模式——云制造(Cloud Manufacturing, CMfg)。

1 云制造的基本概念

1.1 云制造的定义

结合网络化制造、云计算等技术和相关研究成果,本文对云制造的概念定义如下。

定义 1 云制造是一种利用网络和云制造服务平台,按用户需求组织网上制造资源(制造云),为用户提供各类按需制造服务的一种网络化制造新模式。

云制造技术将现有网络化制造和服务技术同云计算、云安全、高性能计算、物联网等技术融合,实现各类制造资源(制造硬设备、计算系统、软件、模型、数据、知识等)统一的、集中的智能化管理和经营,为制造全生命周期过程提供可随时获取的、按需使用的、安全可靠的、优质廉价的各类制造活动服务。

1.2 云制造与已有制造模式的区别

云制造与已有的网络化制造、ASP、制造网格、云计算等相比,具有以下异同点:

(1)当前的网络化制造虽然促进了企业基于网络技术的业务协同,但其体现的主要是一个独立系统,是以固定数量的资源或既定的解决方案为用户提供服务,缺乏动态性,同时缺乏智能化的客户端和有效的商业运营模式。另外,网络化制造只实现了局部应用,亟需借助云制造等技术实现更大范围的推广和应用。

(2)ASP 技术的远程服务租赁模式,可以较好地解决中小企业应用系统等的信息化软件成本问题,但由于用户端智能性和数据安全性的不足,导致进一步推广和应用比较困难。不过 ASP 技术的已有研究基础和推广经验是实施云制造可借鉴的关键之一。

(3)制造网格强调的是分布式资源服务的汇聚、发现、优化配置等,主要体现的是“分散资源集中使用”的思想,其服务模式主要是“多对一”的形式,即多个分布式资源为一个用户或任务服务,因此同样缺乏商业运营空间。而云制造不仅体现了“分散资源集中使用”的思想,还体现了“集中资源分散服务”的思想,即其服务模式不仅有“多对一”的形式,同时更强调“多对多”,即汇聚分布式资源服务进行集中管理,为多个用户同时提供服务。

(4)云计算以计算资源的服务为中心,它不解决制造企业中各类制造设备的虚拟化和服务化,而云制造主要面向制造业,把企业产品制造所需的软硬件制

造资源整合成为云制造服务中心。所有连接到此中心的用户均可向云制造中心提出产品设计、制造、试验、管理等制造全生命周期过程各类活动的业务请求,云制造服务平台将在云层中进行高效智能匹配、查找、推荐和执行服务,并透明地将各类制造资源以服务的方式提供给用户,其中必须加进一些物联网技术。

2 云制造平台及其体系架构

2.1 云制造系统

本文给出了一个面向多用户、基于服务、能商业

运行的云制造系统,如图 1 所示。云制造系统由云提供端(云制造服务提供者)(Cloud Service Provider, CSP)、云请求端(云制造服务使用者)(Cloud Service Demander, CSD)和云制造服务平台(中间件)组成。云提供端通过云制造服务平台提供相应的制造资源和制造能力服务;云请求端通过云制造服务平台提出服务请求;云制造服务平台根据用户提交的任务请求,在云端化技术、云服务的综合管理技术、云制造安全技术和云制造业务管理模式与技术等(详见下节内容)支持下寻找符合用户需要的服务,并为云请求端提供按需服务。

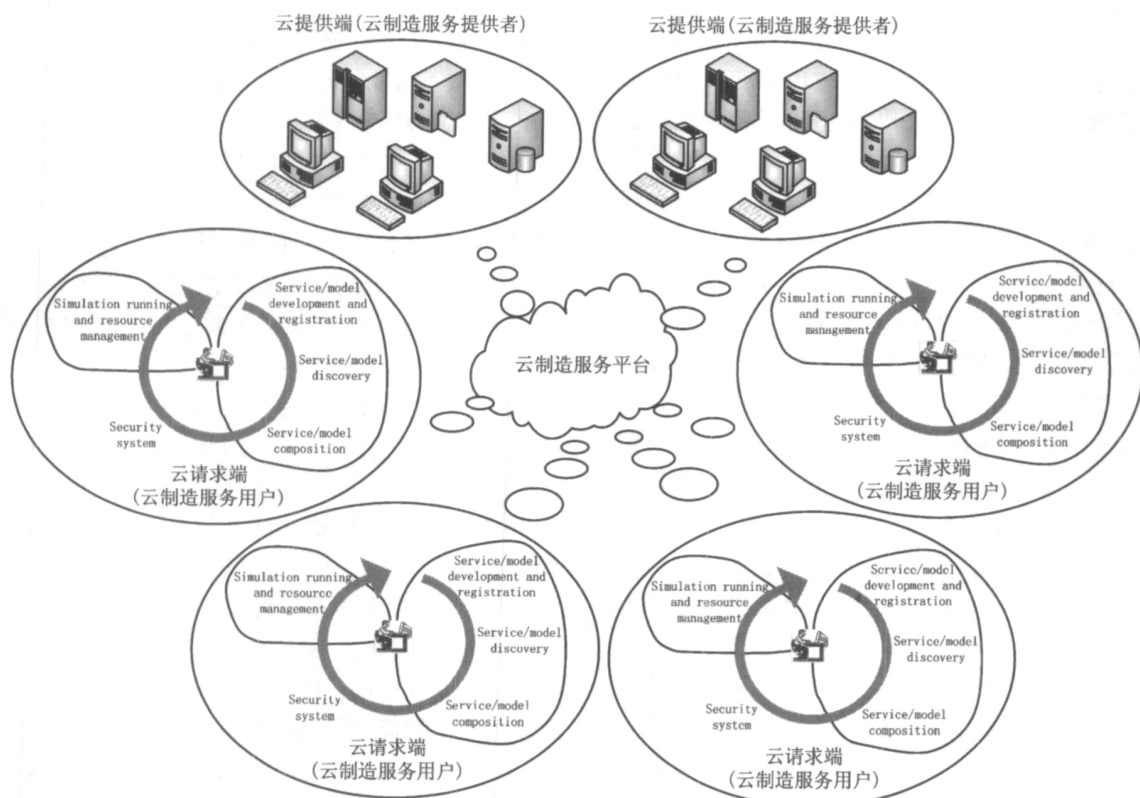


图1 云制造平台示意图

2.2 云制造系统体系架构

为实现上述云制造系统,提出如图 2 所示的云制造系统体系架构。该架构主要包括以下六个层次:

(1)物理资源层(P-Layer) P-Layer 为物理制造资源层,该物理层资源通过嵌入式云终端技术、物联网技术等,将各类物理资源接入到网络中,实现制造物理资源的全面互联,为云制造虚拟资源封装和云制造资源调用提供接口支持。

(2)云制造虚拟资源层(R-Layer) 该层主要是将接入到网络中的各类制造资源汇聚成虚拟制造资源,并通过云制造服务定义工具、虚拟化工具等,将虚

拟制造资源封装成云服务,发布到云层中的云制造服务中心。该层提供的主要功能包括云端接入技术、云端服务定义、虚拟化、云端服务发布管理、资源质量管理、资源提供商定价与结算管理和资源分割管理等。

(3)云制造核心服务层(S-Layer) 该层主要面向云制造三类用户(云提供端、云请求端、云服务运行商),为制造云服务的综合管理提供各种核心服务和功能,包括面向云提供端提供云服务标准化与测试管理、接口管理等服务;面向云服务运行商提供用户管理、系统管理、云服务管理、数据管理、云服务发布管理服务;面向云请求端提供云任务管理、高性能

搜索与调度管理等服务。

(4)应用接口层(A-Layer) A-Layer 为云制造应用接口层,该层主要面向特定制造应用领域,提供不同的专业应用接口以及用户注册、验证等通用管理接口。

(5)云制造应用层(U-Layer) 该层面向制造业的各个领域和行业。不同行业用户只需要通过云制造门户网站、各种用户界面(包括移动终端、PC终端、专用终端等),就可以访问和使用云制造系统的各类云服务。

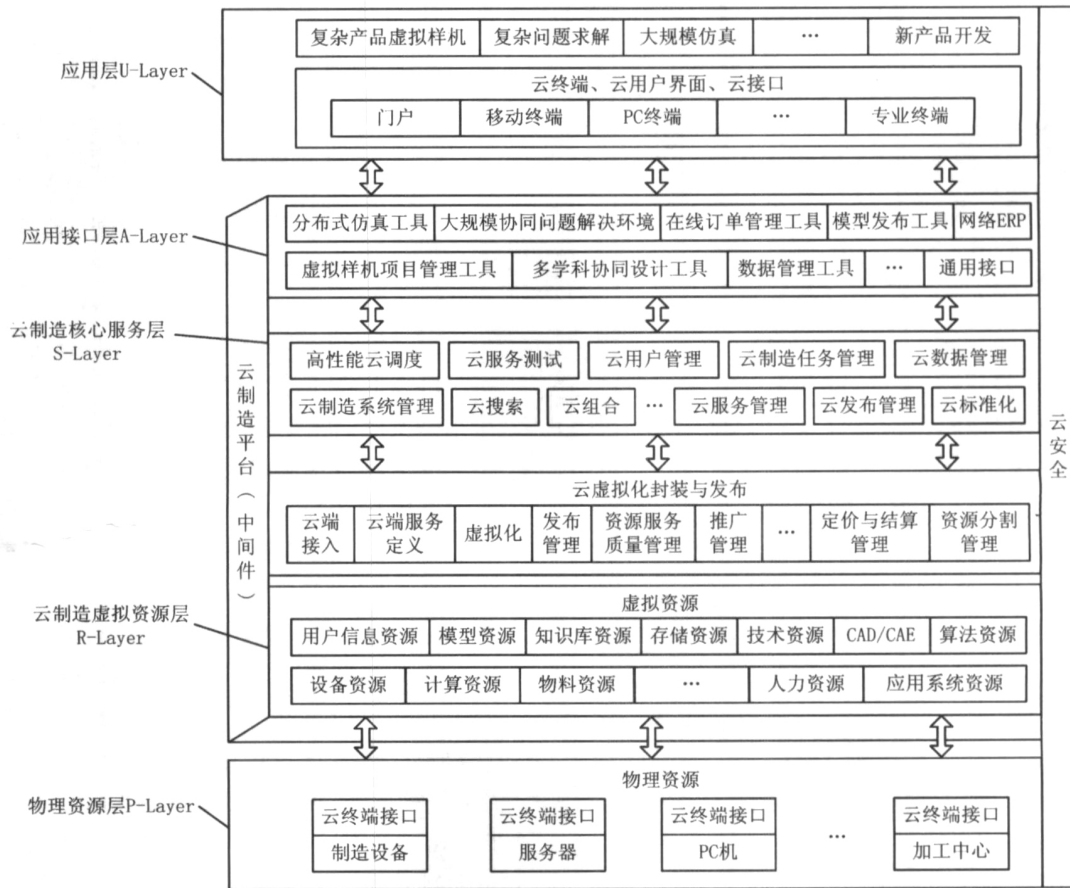


图2 云制造系统体系架构

3 云制造涉及的关键技术

云制造涉及的关键技术大致可以分为:①模式、体系架构、标准和规范;②云端化技术;③云服务的综合管理技术;④云制造安全技术;⑤云制造业务管理模式与技术。图3给出了云制造涉及的关键技术的分类,以及每个技术大类的含义与主要内容。

(1)云制造模式、体系架构、相关标准及规范 主要是从系统的角度出发,研究云制造系统的结构、组织与运行模式等方面的技术,同时研究支持实施云制造的相关标准和规范。包括:①支持多用户的、商业运行的、面向服务的云制造体系架构;②云制造模式下制造资源的交易、共享、互操作模式;③云制造相关标准、协议、规范等,如云服务接入标准、云服务描述规范、云服务访问协议等。

(2)云端化技术 主要研究云制造服务提供端各类制造资源的嵌入式云终端封装、接入、调用等技术,并研究云制造服务请求端接入云制造平台、访问和调用云制造平台中服务的的技术,包括:①支持参与云制造的底层终端物理设备智能嵌入式接入技术、云计算互接入技术等;②云终端资源服务定义封装、发布、虚拟化技术及相应工具的开发;③云请求端接入和访问云制造平台技术,以及支持平台用户使用云制造服务的的技术;④物联网实现技术等。

(3)云服务综合管理技术 主要研究和支持云服务运营商对云端服务进行接入、发布、组织与聚合、管理与调度等综合管理操作,包括:①云提供端资源和服务的接入管理,如统一接口定义与管理、认证管理等;②高效、动态的云服务组建、聚合、存储方法;③高效能、智能化云制造服务搜索与动态匹配技术;④云

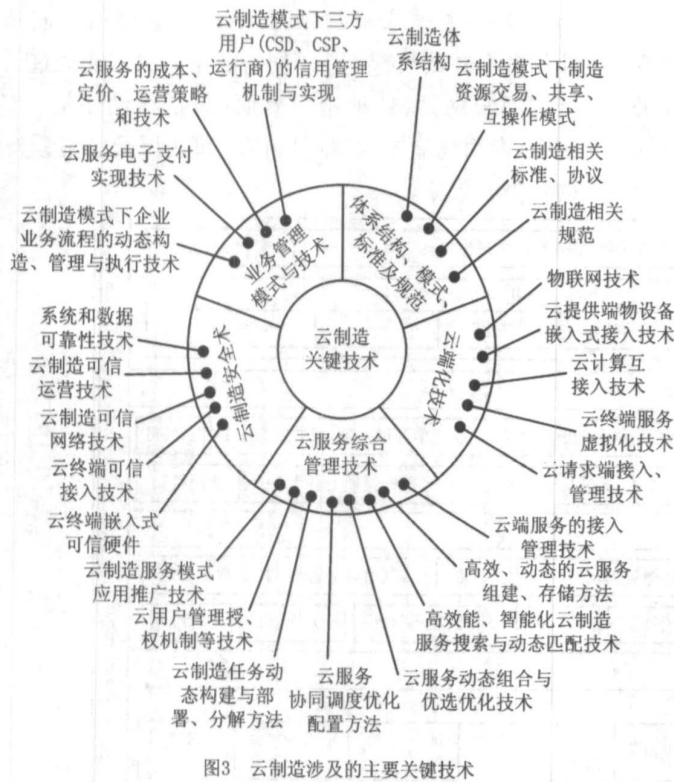


图3 云制造涉及的主要关键技术

制造任务动态构建与部署、分解、资源服务协同调度优化配置方法；⑤云制造服务提供模式及推广，云用户(包括云提供端和云请求端)管理、授权机制等。

(4)云制造安全技术 主要研究和支持如何实施安全、可靠的云制造技术，包括：①云制造终端嵌入式可信硬件；②云制造终端可信接入、发布技术；③云制造可信网络技术；④云制造可信运营技术等；⑤系统和数据可靠性技术等。

(5)云制造业务管理模式与技术 主要研究云制造模式下企业业务流程管理的相关技术，包括：①云制造模式下企业业务流程的动态构造、管理与执行技术；②云服务的成本构成、定价、议价和运营策略，以及相应的电子支付技术等；③云制造模式各方(云提供端、云请求端、运行商)的信用管理机制与实现技术等。

4 初步的研究成果和典型应用

为验证所提出的云制造模式和理念，笔者在网络化制造、制造网格、仿真网格等相关领域的研究基础上，已初步开发了一个云制造的典型应用，即基于云仿真原型平台(COSIM-CSP)的云设计应用。其中，云仿真原型平台(COSIM-CSP)的部分界面如图4所示。COSIM-CSP已实现的关键技术在笔者发表的文献[12]中有详细介绍。目前，所研发的CO-

SIM-CSP已在多学科虚拟样机协同设计领域开展了初步应用^[12]。

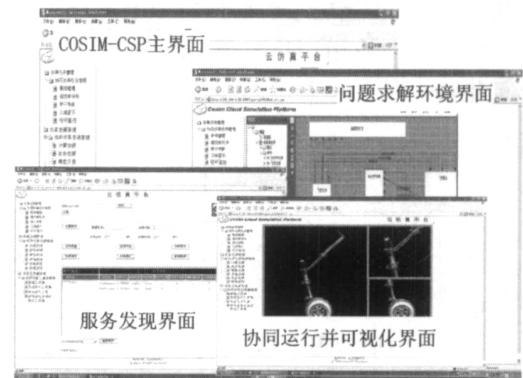


图4 COSIM-CSP部分界面

笔者团队的初步研究成果可应用于云制造服务平台，包括：①普适化门户技术；②复杂产品项目管理技术；③支持语义的资源服务匹配技术；④资源服务智能化优选技术；⑤资源服务信任评估技术；⑥资源服务质量(Quality of Service, QoS)管理技术；⑦资源服务自动组合技术；⑧容错管理技术等。简要介绍如下：

(1)普适化门户技术 为摆脱目前“以计算机为中心”的访问模式和基于“桌面计算”的使用模式，为云制造提供更加普适的访问和使用模式，结合普适计算研究成果，综合运用上下文感知、智能 Agent、语义网等技术，研究提出了蕴涵式服务访问框架，初步实现了服务访问过程的智能化、自动化管理，并在COSIM-CSP^[12]中得到了应用。

(2)复杂产品项目管理技术 目前的项目管理工具很难满足复杂项目管理的需求，因此在云制造平台原型中将其作为一项关键技术，研究了复杂项目管理生命周期中涉及到的项目规划建模技术、调度建模和分析技术、调度仿真和优化技术等^[15]，并在COSIM-CSP中进行了应用验证^[12]。

(3)支持语义的资源服务匹配技术 针对资源服务数字化描述特点，将资源服务描述信息分为文字概念、句子、数值、实体四类，分别提出了资源服务文字概念相似度匹配算法、句子相似度匹配算法、数值相似度匹配算法、实体类概念相似度匹配算法。在此基础上提出了基于基本匹配、输入输出匹配、QoS匹配、综合匹配的四步骤资源服务匹配与搜索机制与实现算法^[16]。

(4)资源服务智能化优选技术 为解决资源服务优选问题，在分析当前对资源服务非功能 QoS 评

估没有考虑用户感受和体验、时间衰退、专家对 QoS 属性重要程度评估的语义差异性不足后,结合直觉模糊集(Intuitionistic Fuzzy Sets, IFS)理论及其相应运算法则,研究提出了基于直觉模糊集的资源服务非功能 QoS 评估方法和资源服务优选算法^[17]。此外,针对多目标资源服务调度问题,研究提出了基于改进粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)和量子多智能体进化算法(Quantum Multi-Agent Evolutionary Algorithm, QMAEA)的资源服务组合优选算法^[18]。

(5)资源服务信任评估技术 针对当前制造系统中资源管理和调度与资源服务信任相分离的缺陷,阐述了资源服务 Trust-QoS 概念,分析了资源供需双方在进行资源服务交易时存在的信任问题。建立了包括域内和域间资源服务 Trust-QoS 评估的两层结构的资源服务 Trust-QoS 评估模型,并提出了该模型中 Trust-QoS 评估的具体实现量化算法、信任值的实时动态更新算法,设计了基于 Trust-QoS 的资源服务调度机制^[19]。

(6)资源服务 QoS 管理技术 为了给用户和系统选择最佳资源服务提供量化的参考依据,研究建立了包括通用 QoS 评价指标、特有评价指标、个性化评价指标的资源服务评估指标体系。从 QoS 全生命周期管理、资源服务 QoS 属性参数等角度对资源服务 QoS 进行了分类和建模,并设计了相应的 QoS 评估模型。此外,还设计了 QoSExtraction, QoSSearch, QoSEvaluation, QoSComparison, QoS-Mointor, QoSUpdating 等 QoS 管理核心服务^[20]。

(7)资源服务自动组合技术 为实现制造服务的增值,研究提出了支持全生命周期的资源服务组合实现框架,对资源服务组合全生命周期涉及到的任务描述、任务分解/需求解析、功能需求匹配、流程需求匹配、服务聚合、服务质量综合处理、组合服务优选、组合资源服务执行引擎等关键技术进行了研究^[21]。

(8)容错管理技术 针对资源服务调度过程中可能出现的故障,研究了相应的容错管理机制、各类故障的检测方法、基于 ECA(event-condition-action)的故障消解策略^[22],以及任务迁移技术,并应用在 COSIM-CSP 中^[12]。

5 结束语

鉴于当前网络化制造存在的种种问题,本文提出了将现有网络化制造及服务技术与云计算、云安

全、高性能计算、物联网等技术融合的一种面向服务的网络化制造新模式——云制造。围绕云制造提出的背景、云制造概念、云制造系统和体系架构、实施云制造需要攻克的关键技术等问题,进行了初步探讨和研究。云制造技术的实现还需在应用需求牵引及相关技术的推动下开展大量的工作。但是,云制造技术的研究和应用将进一步促进制造业向“网络化、智能化、服务化”方向发展,从而将制造业信息化程度提高到一个新的水平。

致谢

本文相关内容由北京航空航天大学、北京仿真中心、重庆大学、清华大学、北京慧点科技开发有限公司共同研讨完成。除所列作者外,北京慧点科技开发有限公司的戴宇升博士、王双博士,重庆大学机械工程学院的康玲博士,北京航空航天大学自动化学院的罗永亮博士生、李潭博士生也参与了讨论,在此一并表示感谢。

参考文献:

- [1] FLAMMIA G. Application service providers: challenges and opportunities[J]. IEEE Intelligent Systems and Their Applications, 2001, 16(1): 22-23.
- [2] SMITH A D, RUPP W T. Application service providers (ASP): moving downstream to enhance competitive advantage[J]. Information Management and Computer Security, 2002, 10(2/3): 64-72.
- [3] TAO Fei, HU Yefa, ZHOU Zude. Study on manufacturing grid & its resource service optimal-selection system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 37(9/10): 1022-1041.
- [4] FAN Y S, ZHAO D Z, ZHANG L Q, et al. Manufacturing grid needs, concept, and architecture[C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Grid and Cooperative Computing(GCC 2003). Berlin, Germany: Springer, 2003: 653-656.
- [5] PREISS K. Agile manufacturing[J]. Computer-Aided Design, 1994, 26(2): 83-84.
- [6] YUSUF Y Y, SARHADI M, GUNASEKARAN A. Agile manufacturing: the drivers, concepts and attributes[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 62(1/2): 33-43.
- [7] ULIERU M, NORRIE D, KREMER R, et al. A multi-resolution collaborative architecture for Web-centric global manufacturing[J]. Information Sciences, 2000, 127(1/2): 3-21.
- [8] NEWMAN S T, NASSEHI A, XU X W, et al. Strategic advantages of interoperability for global manufacturing using CNC technology[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2008, 24(6): 699-708.

(下转第 0016 页)

- 基于客户的大规模定制产品的协同设计研究[J]. 计算机集成制造系统, 2002, 8(12): 936-940.]
- [9] TANG Wenxian, LI Limin, GUAN Ruiliang. Product development model for knowledge driven collaborative innovation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2005, 11(6): 757-761(in Chinese). [唐文献, 李莉敏, 管瑞良. 知识驱动协同创新的产品开发模型[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(6): 757-761.]
- [10] SONG Huijun, LIN Zhihang. Generation of mechanical product conceptual design schemes based on domains structure template [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2001, 37(9): 24-29(in Chinese). [宋慧军, 林志航. 基于域结构模板的机械产品概念设计方案生成[J]. 机械工程学报, 2001, 37(9): 24-29.]
- [11] GLOOR A P, LAUBACHER R, SCOTT B C, et al. Visualization of communication patterns in collaborative innovation networks analysis of some W3C working groups [C]//Proceedings of ACM CIKM 2003. New York, N. Y., USA: ACM, 2003: 208-216.
- [12] CHEN S L, TSENG M M. Defining specifications for custom products; a multi-attribute negotiation approach [J]. CIRP Annals, 2005, 54(1): 159-162.
- [13] BÜYÜKÖZKAN G, FEYZIOGLU O. Group decision making to better respond customer needs in software development [J]. Computers & Industrial Engineering, 2005, 48(2): 427-441.
- [14] SAVRANSKY S D. Engineering of creativity: introduction to TRIZ methodology of inventive problem solving [M]. Boca Raton, Fla., USA: CRC Press, 2000.
- [15] LIU Xiaomin, TAN Runhua, YAO Ligang. Application research on integrated process model for the conceptual design of product innovation [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(9): 154-162 (in Chinese). [刘晓敏, 檀润华, 姚立纲. 产品创新概念设计集成过程模型应用研究[J]. 机械工程学报, 2008, 44(9): 154-162.]
-
- (上接第 0007 页)
- [9] IBM. Cloud computing; access IT resource anywhere anytime [EB/OL]. [2009-11-30]. <http://www-01.ibm.com/software/cn/tivoli/solution/cloudcomputing> (in Chinese). [IBM. 云计算: 随时随地访问 IT 资源 [EB/OL]. [2009-11-30]. <http://www-01.ibm.com/software/cn/tivoli/solution/cloudcomputing>.]
- [10] CHEN Kang, ZHENG Weimin. Cloud computing; system instances and current research [J]. Journal of Software, 2009, 20(5): 1337-1348(in Chinese). [陈康, 郑纬民. 云计算: 系统实例与研究现状 [J]. 软件学报, 2009, 20(5): 1337-1348.]
- [11] ChinaByte.com. Understanding cloud computing; concept [EB/OL]. (2006-06-12) [2009-11-13]. <http://server.chinabyte.com/454/8160954.shtml> (in Chinese). [ChinaByte.com. 了解“云计算”——概念 [EB/OL]. (2006-06-12) [2009-11-13]. <http://server.chinabyte.com/454/8160954.shtml>.]
- [12] 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 (in Chinese). [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.]
- [13] ChinaByte.com. Solving the puzzle of cloud security and cloud computing [EB/OL]. (2009-07-16) [2009-10-16]. <http://datacenter.chinabyte.com/168/9003168.shtml> (in Chinese). [ChinaByte.com. 云安全云计算: 迷团大揭幕 [EB/OL]. (2009-07-16) [2009-10-16]. <http://datacenter.chinabyte.com/168/9003168.shtml>.]
- [14] LI Jun. Group power of 80 million; one-year review of rising cloud computing [EB/OL]. (2009-07-28). http://security.zdnet.com.cn/security_zone/2009/0728/1419875.shtml (in Chinese). [李钧. 8000 万的群体力量 瑞星云安全一年回顾 [EB/OL]. (2009-07-28). http://security.zdnet.com.cn/security_zone/2009/0728/1419875.shtml.]
- [15] SHI Guoqiang, ZHU Yaoqin, LI Bohu, et al. Project management technology of complex virtual prototype engineering [J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(8): 1905-1908 (in Chinese). [施国强, 朱耀琴, 李伯虎, 等. 复杂虚拟样机工程的项目管理技术研究 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(8): 1905-1908.]
- [16] TAO Fei, HU Yefa, ZHAO Dongming, et al. Study on resource service match and search in manufacturing grid system [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 43(3/4): 379-399.
- [17] TAO Fei, ZHAO Dongming, ZHANG Lin. Resource service optimal-selection based on intuitionistic fuzzy set and non-functionality QoS in manufacturing grid system [J]. Knowledge and Information System, 2009, Doi: 10. 1007/s10115-009-0263-6.
- [18] ZHAO Dongming, TAO Fei. A new idea for addressing multi-objective combinatorial optimization; quantum multi-Agent evolutionary algorithms [C]//Proceedings of the 43rd Annual Conference on Information Sciences and Systems. Washington, D. C., USA: IEEE, 2009: 28-31.
- [19] TAO Fei, HU Yefa, ZHOU Zude. Application and modeling of resource service trust-QoS evaluation in manufacturing grid system [J]. International Journal of Production Research, 2009, 47(6): 1521-1550.
- [20] TAO Fei, HU Yefa, ZHAO Dongming, et al. Study on manufacturing grid resource service modeling and evaluation [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(9/10): 1034-1042.
- [21] TAO Fei, ZHAO Dongming, HU Yefa, et al. Resource service composition and its optimal-selection based on particle swarm optimization in manufacturing grid system [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2008, 4(4): 315-327.
- [22] TAO Fei, ZHAO Dongming, HU Yefa, et al. Study of failure detection and recovery in manufacturing grid resource service scheduling [J]. International Journal of Production Research, 2010, 48(1): 69-94.