

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2013.11.011

## 面向服务的云制造系统架构分析

康 玲<sup>1</sup>, 吴 华<sup>2</sup>, 王时龙<sup>1</sup>, 周 杰<sup>1</sup>

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044;  
2. 中核集团中国核电工程有限公司, 北京 100000)

**摘 要:**为了解决当前云制造尚缺应用模式的问题,根据云制造全生命周期智慧制造、按需动态构建及多粒度服务等特点,提出了基于 Agent 的云制造系统 5 层架构。基于面向服务的思想,建立了云制造 OWL-S 本体模型,通过本体映射、推理机、匹配器完成服务请求、发布和绑定流程,提出了一种面向云制造服务的 OWL-S 本体扩展框架和 Web 语义化描述方法,为云制造服务匹配奠定了理论基础。构建了基于 Agent 的云制造服务协商机制,通过 Agent 分工、合作、竞争及协商实现云制造服务动态聚合和运行。分析了复杂、非线性、大动力学特性的云制造系统活动过程,建立了基于 Agent 的云制造系统 IDEF0 视图,并在此基础上分析了其运行模式。

**关键词:**云计算;制造系统;多代理系统;本体

**中图分类号:**TH166

**文献标志码:**A

**文章编号:**1000-582X(2013)11-066-08

## Research on service-oriented system architecture and mechanism for cloud manufacturing

KANG Ling<sup>1</sup>, WU Hua<sup>2</sup>, WANG Shilong<sup>1</sup>, ZHOU Jie<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400044, China;  
2. China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100000, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that current cloud manufacturing is still lack of application mode, a five-layer architecture of cloud manufacturing (CM) system based on Agent is proposed according to the characteristics of life cycle intelligent manufacturing, required dynamic gathering, and services of different granularities in CM. Based on the service-oriented ideology, a web ontology language for services (OWL-S) of CM is proposed to realize service requirement, release, and binding, based on ontology mapping, inference engine and matching box. An expanded framework for OWL-S and semantization description for CM services is put forward, providing the theoretic foundation of match for CM services. The consult mechanism for CM services is built to realize the dynamic gathering and operation by the cooperation, competition and consult of Agents. By analyzing the activity of complex, nonlinear and obvious dynamic CM system, the paper presents the IDEF0 view of CM system based on Agent and the operational mode of CM system is analyzed.

**Key words:** cloud computing; manufacturing systems; multi-agent systems; ontology

**收稿日期:**2013-06-08

**基金项目:**国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51005260);国家杰出青年科学基金资助项目(50925518);国家科技支撑计划资助项目(2012BAF12B09)

**作者简介:**康玲(1982-),重庆大学讲师,博士研究生,主要从事网络化制造的研究。

王时龙(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail)slwang@cqu.edu.cn。

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、安全可靠的及优质廉价的各类制造活动服务<sup>[1-3]</sup>。它是现有云计算和制造业信息化中的网络化制造、应用服务提供商(Application Service Provider, ASP)平台、制造网格等概念和技术的延伸和拓展,是一种面向服务、高效低耗和基于知识的网络化、敏捷化制造新模式和技术手段<sup>[4]</sup>。

云制造与其他网络化制造相比,具备以下显著特点:服务模式变革,不仅体现“分散资源集中使用”思想,还体现“集中资源分散服务”思想,即不仅实现复杂任务协同网络化制造,更为广大中小企业提供了共享资源的平台;全生命周期智慧制造,不仅涵盖设计、仿真、物流、管理服务,还包括生产加工核心服务;按需动态构建,即按照用户需求动态提供云服务;多粒度服务,提供从产品制造、零件制造到设备租赁服务等不同粒度服务;制造服务化,采用租赁资源方式体现软件即服务、加工即服务的思想;协同制造,即产业链协同制造、大规模复杂制造任务协同;敏捷制造,即敏捷、快速组成各类制造服务以响应需求;应用领域广泛,涉及航空航天、汽摩、基础件等不同制造领域。

目前,中国云制造的理念、技术与应用尚处于起步阶段。国内外学者对云制造基础理论和关键技术进行了研究分析<sup>[3, 5-8]</sup>,提出云制造研究重点、体系结构、应用模式、任务与资源建模、资源服务链构建技术<sup>[9-13]</sup>,对云制造的研究发展具有良好的推动作用,但还需围绕云制造的特点,进一步提出适合该模式的理论研究与应用实践。在网络化制造中,制造资源共享的前提是指利用信息技术、网络技术及计算机技术,实现异地分散及异构环境的制造资源的虚拟化、封装、建模。云制造服务的建模和描述方法是云制造服务平台的关键技术,是实现制造资源共享、协作以及集成的基础。很多学者针对网络化制造环境下的制造资源和制造任务建模展开了不同的研究,文献[14]使用 OWL 建立制造企业内部的信息模型并提出基于本体的语义匹配方法;文献[15]针对加工和装配过程中潜在失效模式分析方法进行研究,使用 OWL 实现基于本体的分布式知识共享和重用;文献[16, 17]采用扩展的 Web 服务本体描述语言对制造服务进行了建模实现;文献[17]建立

了基于本体的复杂零件加工特征、加工工艺、设备资源 P-P-R 模型。上述研究不适用于云制造模式,模型虽然不仅强调于语法实现数据信息访问和传输,还侧重于语义实现近似资源的挖掘和检索,但因系统架构、描述语言、制造工艺解析等问题,不能实现最优的资源发现、匹配和共享。

笔者结合云制造全生命周期智慧制造、按需动态构建、多粒度服务、制造服务化等特点,引入智能体探讨适用于云制造的系统架构和运行模式。从制造系统的角度建立了系统功能视图和服务过程中协商机制。基于面向服务的思想,构建了基于本体服务语言(Web Ontology Language for Services, OWL-S)的云制造服务模型,并提出了其本体扩展框架和 Web 语义化描述方法,是解决目前网络化制造资源和任务建模存在问题的有效途径之一。

## 1 基于 Agent 的云制造系统架构

根据云制造与其他网络化制造的不同和特点,将云制造系统体系架构分为服务应用层、服务门户层、核心功能层、代理层和资源层 5 个层次,如图 1 所示。

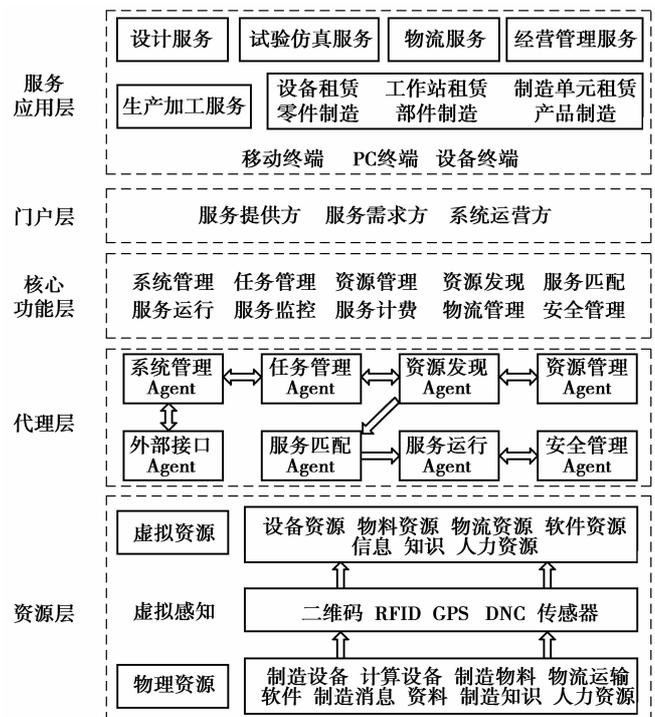


图 1 基于 Agent 的云制造系统架构

1) 服务应用层。云制造系统提供全生命周期、

不同粒度的服务,包括设计服务、试验仿真服务、物流服务、经营管理服务、生产加工服务。设计服务提供计算机辅助设计软件服务、设计知识服务;试验仿真服务通过动态构建虚拟化的试验仿真环境,提供实验分析软件服务、试验设备检测服务、专业仿真软件服务、仿真模型服务等;物流服务提供专业物流管理、物流软件服务;经营管理服务提供生产管理软件、客户关系管理软件、知识服务;生产加工服务包括产品制造、部件制造、零件制造、制造单元租赁、工作站租赁和设备租赁服务。用户与系统交互的接口包括移动终端、PC 终端、设备终端。

2) 门户层。为服务提供方、服务需求方、系统运营方提供登陆门户。云制造系统中,服务需求方与服务提供方存在两种交互模式,即两者通过协商机制确定合同模式,通过系统运营方自动确定合同模式,体现了云的动态性、无需关心服务细节的特点。

3) 核心功能层。包括任务管理、资源管理、资源发现、服务匹配、服务运行、服务监控、服务计费、物流管理、安全管理。提供共性功能引擎、管理工具、接口、规范和开发工具等支撑资源,主要包括云服务管理与支撑引擎、交易协同逻辑引擎、业务流程管理引擎、知识集聚与分类引擎、运营管理、运维管理、平台应用工具、平台开发工具等。

4) 代理层。该层包括系统管理 Agent、任务管理 Agent、资源管理 Agent、资源发现 Agent、服务匹配 Agent、服务运行 Agent、服务监控 Agent、安全管理 Agent、外部接口 Agent。其中系统管理 Agent 负责管理系统中所有 Agent 个体及个体之间通信、用户管理、权限管理、数据库管理;任务管理 Agent 包括任务定义、发布、分析、注销;资源管理 Agent 包括资源定义、发布、注销;资源发现 Agent 包括资源聚类、检索;服务匹配 Agent 包括工艺管理、服务聚合、多目标调度优化;服务运行 Agent 包括服务运行、计费、监控、反馈;安全管理 Agent 包括用户身份认证、网络传输安全、访问控制;外部接口 Agent 实现与自愿加入云端的企业交互,如与企业层 ERP、车间层 MES 等接口。

5) 资源层。包括物理资源和虚拟资源。物理资源指产品全生命周期过程中所涉及到的各类资源,

如硬资源(制造设备、计算设备、制造物料、物流运输)、软资源(软件、制造资料、制造消息、制造知识、人力资源)等。制造设备指全生命周期中所需的加工、试验、维护等制造设备,如毛坯制备设备(锻压机、铸造设备、切割机)、机械加工设备(机床、加工中心、切削工具、夹具)、储运设备(立体仓库、中央刀库、托盘、夹具库、自动运输小车)、装配设备(工业机器人)、辅助设备(排屑机、清洗机、冷却系统、涂装机器人、包装机)、热处理设备(退火炉、淬火炉、感应加热设备)、质量控制设备(测量仪、测试台、传感器)、系统控制设备(物联设备、故障诊断仪、工业摄像机);计算设备是全生命周期中所需的设计、仿真、加工、试验、维护、销售、采购、管理等计算设备,如服务器、计算机;制造物料是指在制造过程中所需的原材料、毛坯、半成品、成品;物流运输是支撑跨地域的航空、铁路、船运、汽车物流;软件指全生命周期中所需软件,如 CAD、CAM、CAPP、CAE、PDM、PLM、MES、ERP、生产管理、CM、OA、SCM、CRM;制造资料是云制造系统中状态、过程与控制的静态记录,如图纸、手册、文档、图片、数据库;制造消息是云制造系统中状态、过程与控制的实时记录,如用户需求、加工状态;制造知识指云制造系统中状态、过程与控制的规律性信息,如经验、工艺、专利、版权等;人力资源指设计开发人员、技术人员、管理人员和营销人员等。向上通过二维码标签、射频识别标签(RFID)、识读器、全球定位系统(GPS)、分布式控制系统(DNC)、传感器、接口等技术,对物理资源进行感知、识别,采集、分类、虚拟化,形成虚拟资源池。

## 2 基于 OWL-S 的云制造服务信息流动机制

在基于 Agent 的云制造系统架构中,不同层次之间的信息流动需要以标准的信息格式进行,云服务发布和请求也需要统一的表现形式,为此在 OWL-S 的标准框架支持下,提出一种适用于云制造服务的本体扩展框架,其顶层由云服务轮廓(ServiceProfile)、云服务模型(ServiceModel)和云服务基点(ServiceGrounding)<sup>3</sup>部分组成,具体结构如图 2 所示。

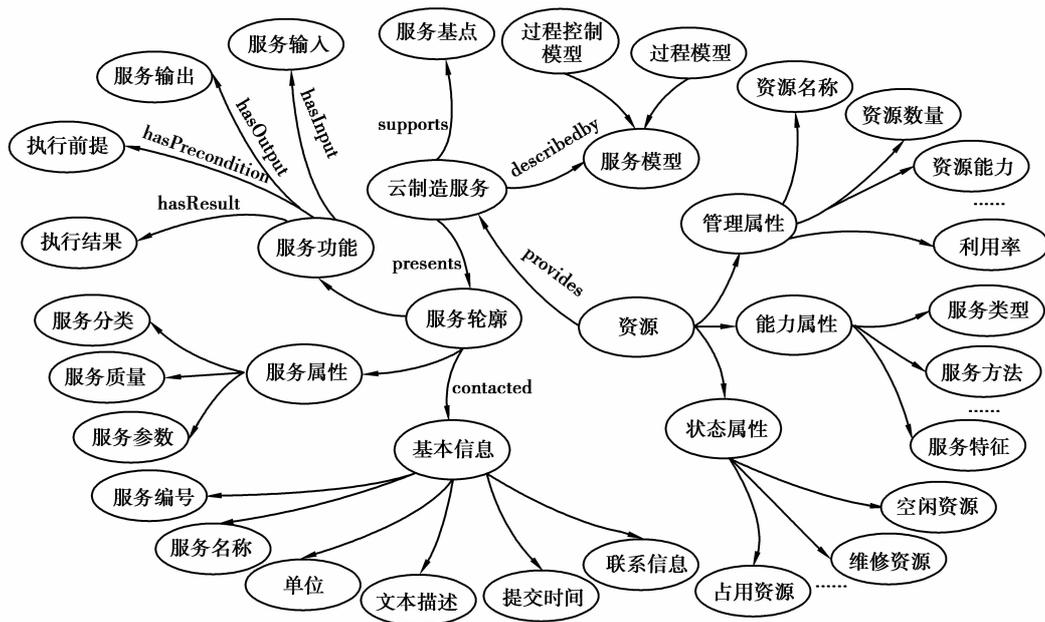


图 2 基于 OWL-S 的云制造服务本体扩展框架

云服务轮廓描述服务目标,包括服务基本信息、服务功能、服务属性。其中服务基本信息包括服务名称、提供方、文本描述、联系信息;服务功能采用 IOPE(Input, Output, Precondition, Effect)方法,即 IOPE(服务输入、服务输出、执行前提、执行结果)法,从信息流角度(输入信息 I 和输出信息 O)、状态流角度(执行前提 P 和执行结果 E)表达。服务质量为扩展属性,包括精度、可靠性、时间、成本、满意度。服务轮廓是双向的,服务提供者可以描述服务功能,服务请求者也可以描述服务需求。服务属性提供云端还需知道的信息,如服务分类、服务参数、服务质量。云服务模型描述服务过程,包括原子过程(AtomicProcess)、简单过程(SimpleProcess)及组合过程(CompositeProcess)。原子过程为云服务单元,不可再拆分;复合过程为云服务单元组合成更粗粒度的服务,可实现粒度较大的云服务。云服务基点描述服务访问,提供通讯协议、消息格式、序列化、传输以及寻址,实现访问服务。

在基于 OWL-S 的云制造服务本体扩展框架中,资源提供了云制造服务,包括管理属性、能力属性、状态属性等。其中管理属性包括提供方、资源名称、资源类型、资源数量、资源能力、利用率、维护信息、使用寿命;能力属性包括服务类型、资源参数、服务方法、服务特征、时域要求、服务价格;状态属性包括空闲资源、维修资源、占用资源。其中在加工服务中,服务特征包括形状特征(平面特征、曲面特征、孔

特征)、材料特征(规格、型号、性能)、约束特征(尺寸约束、精度等级、粗糙度、形位公差)。

信息通过客户端软件以可扩展标记语言 XML(Extensible Markup Language)的形式发布,对源 XML 文档进行解析,用 XPath 查找和定位 XML 文档中的匹配节点,应用 XSLT 模板将 XML 文档转换为统一的资源描述框架 RDF(Resource Description Framework),通过领域分析、领域框架、本体生成工具、本体编辑工具等生成本体服务语言 OWL-S(Web Ontology Language for Services)。资源本体模型管理包括资源的识别与抽取、资源状态迁移、资源状态约束的本体建模。任务本体模型管理包括任务概念的识别与抽取、任务本体推理、任务约束规则部分的本体建模等。

云制造服务提供方通过 OWL-S Editor 对发布云服务进行语义描述,包括服务目标、服务过程和服务质量需求解析,利用服务的 3 个上层本体类(ServiceProfile, ServiceModel, ServiceGrounding)解析出服务具体需求,生成 OWL-S 发布服务描述文档,传给 OWL-S/UDDI 转换器,接收 OWL-S 语言描述的 Web 服务,存储到 UDDI 注册中心;OWL-S/UDDI 转换器再把 OWL-S 描述传送到 OWL-S 匹配器中,包括服务目标匹配、服务过程匹配和服务质量匹配,计算发布云服务描述与请求云服务描述之间的相似度。

云制造服务需求方利用 OWL-S Editor 对请求

云服务进行语义描述,包括服务目标、服务过程和服务质量需求解析,生成 OWL-S 请求服务描述文档,传给 OWL-S 匹配器,通过推理机、本体映射模块,对请求服务解析文本进行服务推理,分解为粒度更小的云服务或云服务单元,在匹配规则、领域本体和服务本体的支持下,由匹配器对推理后的云服务和云服务单元进行语义匹配,实现 Web 服务描述的匹配;向 UDDI 注册中心提出服务请求查询,根据服务需求方提供的信息进行语义匹配,返回匹配结果集,根据服务匹配,实现服务绑定。

### 3 基于 Agent 的云制造服务协商机制

在云制造系统中,存在服务提供方、服务需求方、系统运营方三方。服务提供方提供全生命周期、不同粒度的服务,服务需求方。云制造服务具有多粒度性、多耦合性,对于产品制造服务等粗粒度的服务,任务管理更为复杂;对于设备租赁等细粒度的服

务,与其他基本服务之间的耦合性更为复杂。云制造系统是一个复杂、非线性、大动力学系统,动态地流通着物流、资金流、劳务流、信息流、知识流和能量流等资源,其信息传递较传统的车间级、企业级制造系统模式更为复杂。

基于 Agent 的云制造系统架构采用面向服务的组织结构,把云制造系统分解为多个相互作用、相互通信的 Agent,每个 Agent 都有特定的功能。由于 Agent 所具有的自治性、反应性、主动性、社会性和进化性,不同功能的 Agent 通过分工、合作、竞争、协商能够实现云制造服务动态聚合和运行。通过基于 Agent 的云制造服务协商机制,云制造平台可以提供从产业链协同制造到某一单独需求的多粒度、全生命周期的服务,并满足复杂任务管理的需求。不同功能的 Agent 之间的信息交换方式遵循图 3 所示的信息流动机制。

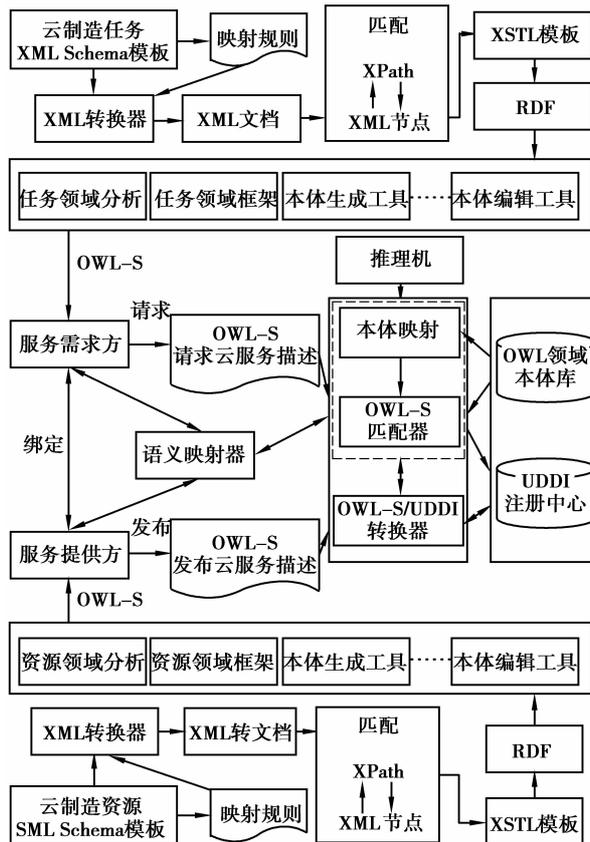


图 3 云制造环境下基于 OWL-S 的服务信息流动机制

任务分析 Agent 负责解析隶属不同阶段生命周期的云服务、隶属不同粒度的云服务。服务运行 Agent 包括服务运行、计费、监控、反馈。其中服务监控负责监控企业层制造服务信息,如生产管理、生

产调度、质量控制等;或监控车间层制造服务信息,如工序调度、生产资源分配、状态管理等;或监控设备层制造服务信息,如设备加工时间、加工参数。

基于 Agent 的云制造服务协商机制在实际运行

的制造服务中非常重要。与云计算、云设计服务不同,云加工服务更需要服务提供方、服务需求方双方

关于制造工艺、技术要求进行交流,通过协商机制确定标书,具体流程如图 4 所示。

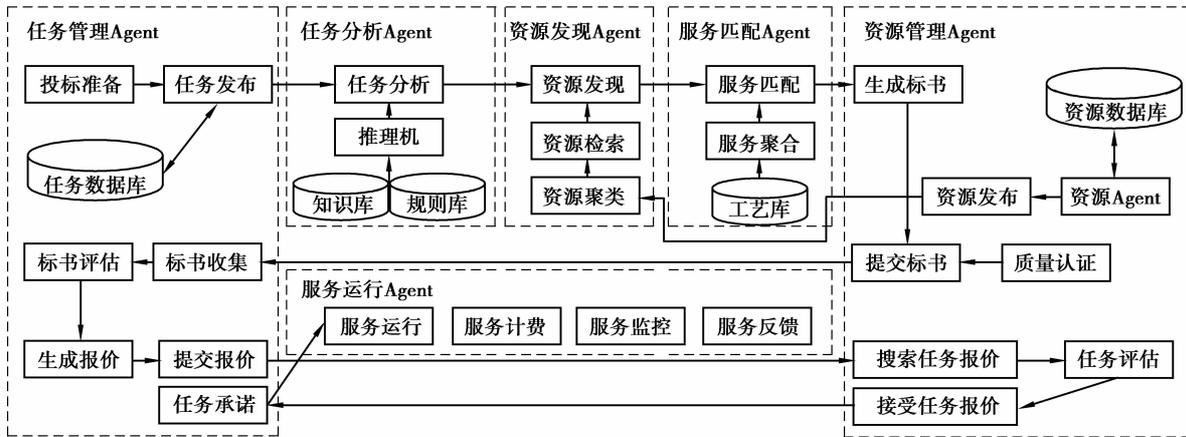


图 4 基于 Agent 的云制造服务协商机制

### 4 基于 Agent 的云制造系统运行模式

在云制造这个复杂、非线性、大动力学系统中,系统是一个减熵、增加信息含量的过程。因云制造系统跨企业、面向区域或全球,打破传统企业组织架

构,图 5 建立了基于 Agent 的云制造系统 IDEF0 视图,输入为任务需求、资源信息、资金、制造物料,通过任务管理、资源管理、资源发现、服务匹配、服务运行模块,最终输出为服务、产品、各类报表。

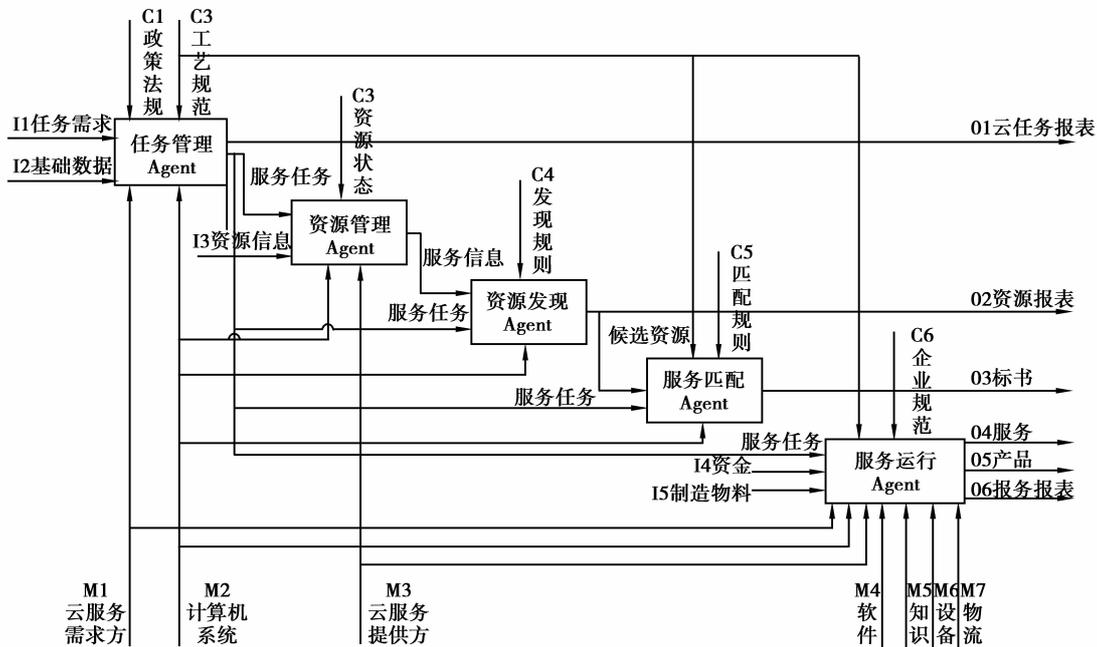


图 5 基于 Agent 的云制造系统 IDEF0 视图

基于 Agent 的云制造系统运行模式如图 6 所示。云制造服务提供方的粒度维包括企业间层、企业层、车间层、单元层、工作站层和设备层,提供不同粒度服务。在企业间层粒度,服务提供方提供产品

制造、零部件制造、全生命周期服务,云制造系统与企业产业链协同管理集成;在企业层粒度,服务提供方提供产品制造、零部件制造、全生命周期服务,与企业内部计划管理层如 ERP 集成,提供调用生产控

制(主生产计划、物料需求计划、能力需求计划、车间控制、制造标准)、物流管理(分销、采购、库存管理)、财务管理(会计核算、财务管理)、人力资源管理(人力资源规划、招聘管理、工资核算、工时管理、差旅核算)模块接口;在车间层粒度,服务提供方提供零部件制造服务,与企业车间制造执行层如 MES 集成,提供调用车间生产计划、生产监视、实时调度、数据

采集、过程管理、质量管理、文档管理、薪资管理模块接口;在单元层粒度,服务提供方提供制造单元服务,提供与制造单元物联接口;在工作站层粒度,服务提供方提供工作站服务,提供与工作站物联接口;在设备层粒度,服务提供方提供设备服务,提供制造设备嵌入式接口,以实现服务实时监控。

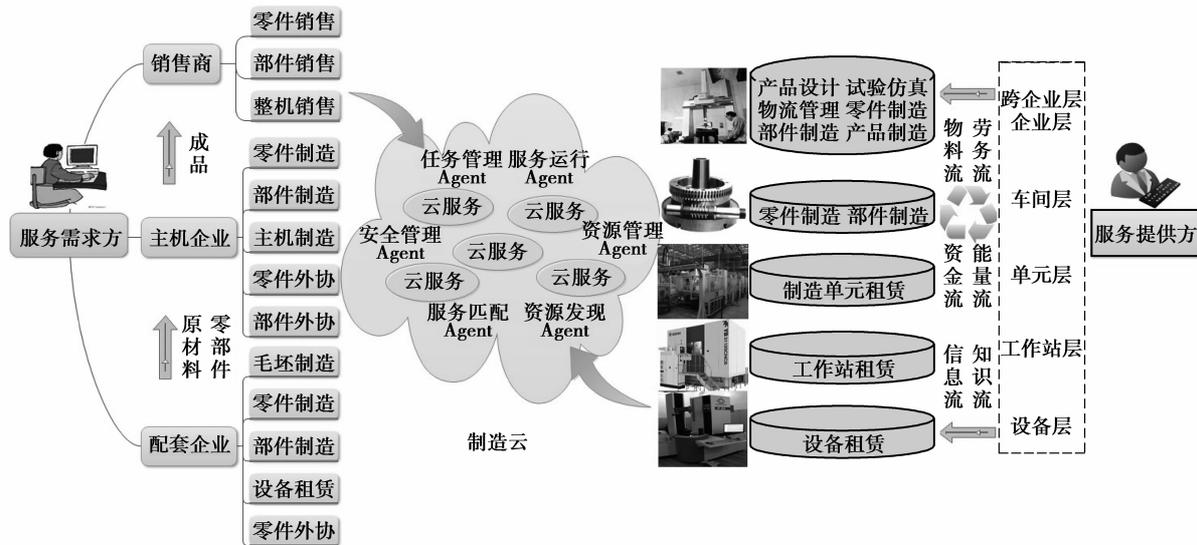


图 6 基于 Agent 的云制造系统运行模式

## 5 结 语

云制造作为一种面向服务、高效低耗和基于知识的网络化、敏捷化制造新模式,是实现生产型企业向服务型企业转型、制造资源的优化配置、资源增值与增效的有效手段。笔者提出了基于 Agent 的云制造系统 5 层架构,在此基础上建立了云制造 OWL-S 本体模型,进而构建了一种基于 Agent 的云制造服务协商机制,并从制造系统的角度建立了基于 Agent 的云制造系统 IDEF0 视图,从应用实践角度给出了基于 Agent 的云制造系统运行模式。下一步将围绕上述系统机构设计原型系统总体框架,建立基于本体模型的知识库,开发基于 agent 的智能体,为云制造模式落地提供一种可实施的途径。

### 参考文献:

- [1] XU X. From cloud computing to cloud manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2012, 28(1):75-86.
- [2] 李伯虎,张霖,王时龙,等. 云制造:面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 6(1):1-7,16.  
LI Bohu, ZHANG Lin, WANG Shilong, et al. Cloud

manufacturing; a new service-oriented networked manufacturing model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 6(1):1-7,16.

- [3] LAI LI Y J, TAO F, ZHANG L, et al. A study of optimal allocation of computing resources in cloud manufacturing systems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5-8): 671-690.
- [4] 郭钢,杨娟,张毅,等. 服务型制造模式下资源服务共享模型设计与分析[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(9): 48-55.  
GUO Gang, YANG Juan, ZHANG Yi, et al. Design and analysis of the manufacturing resource service sharing model based on the service-oriented manufacturing paradigm [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(9):48-55.
- [5] 曹军,尹超,刘飞,等. 机械加工车间数字化制造描述模型及总体框架[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(9):8-15.  
CAO Jun, YIN Chao, LIU Fei, et al. Descriptive model and general framework of machining workshop digital manufacturing [J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(9):8-15.
- [6] 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 Lin, LUO Yongliang, FAN Wenhui, et al. Analyses of cloud manufacturing and related advanced manufacturing models [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3):458-468.
- [7] 王正成,黄洋. 面向服务链构建的云制造资源集成共享技术研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(11):1324-1331.
- WANG Zhengcheng, HUANG Yang. Research on integration sharing technology of cloud manufacturing resource oriented to service chain construction [J]. China Mechanical Engineering, 2012, 23(11):1324-1331.
- [8] 甘佳,段桂江. 云制造服务信任评估技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 7(7):1527-1535.
- GAN Jia, DUAN Guijiang. Method of cloud manufacturing service trust evaluation [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 7(7):1527-1535.
- [9] LIU W N, SU J M. A solution of dynamic manufacturing resource aggregation in CPS [C] // Proceedings of the 6th IEEE Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference, August 20-22, 2011, Chongqing, China. Piscataway:IEEE Press, 2013,2:65-71.
- [10] 唐燕,李健,张吉辉. 面向再制造的闭环供应链云制造服务平台设计[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1554-1562.
- TANG Yan, LI Jian, HANG Jihui. Cloud manufacturing service platform design of closed-loop supply chain oriented to remanufacturing[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7):1554-1562.
- [11] 李慧芳,董训,宋长刚. 制造云服务智能搜索与匹配方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(7):1485-1493.
- LI Huifang, DONG Xun, SONG Changgang. Intelligent searching and matching approach for cloud manufacturing service [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(7):1485-1493.
- [12] 刘士军,曲本科,武蕾,等. 自组织云制造资源聚集框架与多维属性区间搜索方法研究[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2012, 24(3):299-307.
- LIU Shijun, QU Benke, WU Lei, et al. Self-organizing resource integration framework and multi-dimensional range search of cloud manufacturing [J]. Journal of Computer-Aided Design & Computer Graphics, 2012, 24(3):299-307.
- [13] ZHU L N, ZHAO Y W, WANG W L. A bilayer resource model for cloud manufacturing services [J]. Mathematical Problems in Engineering, 2013, 2013:1-10.
- [14] LIN H K. A manufacturing system engineering ontology model on the semantic web for inter-enterprise collaboration [J]. Computers in Industry, 2007, 58(5):428-437.
- [15] MIKOS W L, FERREIRA J C E, BOTURA P E A, et al. A system for distributed sharing and reuse of design and manufacturing knowledge in the PFMEA domain using a description logics-based ontology [J]. Journal of Manufacturing Systems, 2011, 30(3):133-143.
- [16] 王琦峰,刘飞. 基于语义的虚拟企业制造服务建模技术研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5):861-867.
- WANG Qifeng, LIU Fei. Semantic-based virtual enterprise manufacturing services modeling technology [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(5):861-867.
- [17] 孙卫红,冯毅雄. 基于本体的制造能力 P-P-R 建模及其映射 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2):214-218.
- SUN Weihong, FENG Yixiong. Manufacturing capability of P-P-R modeling and mapping based on ontology [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2):214-218.

(编辑 张 苹)