

**硕士学位论文**

**面向仿真的制造云服务发布与组合方法的研究**

姓 名：姜智慧

学 号：1531778

所在院系：电子与信息工程学院

学科门类：工学

学科专业：控制工程

指导教师：陆剑峰 副教授

二〇一八年三月



Candidate: Zhihui Jiang

Student Number: 1531778

School/Department: School of Electronics and Information Engineering

Discipline: Science in Engineering

Major: Control Engineering

Supervisor: Vice Prof.Jianfeng Lu

A dissertation submitted to

Tongji University in conformity with the requirements for

the degree of Master of Science

**Research on Simulation Oriented Publishing and Combination of Cloud Service**

March, 2018

|  |
| --- |
| **面向仿真的制作云服务发布与组合方法的研究**  **姜智慧**  **同济大学** |

**学位论文版权使用授权书**

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版本；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以赢利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日

**同济大学学位论文原创性声明**

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日

摘要

云制造是能够满足现代先进信息化制造要求的制造新模式，能实现资源的优化配置及全面共享。云制造服务平台上集聚了不同种类和特点的制造服务，如何准确的选出最符合用户制造需求的制造服务组合，是一个关键问题。作为服务选择的重要考虑因素，服务质量评价的准确性是其重要的前提与基础。而目前服务质量主要来自于服务提供方的自主发布和服务需求方的反馈，其来源具有很大程度的主观性和不确定性，因此服务质量评价的准确性有待考究。论文将仿真的方法应用到云制造服务组合执行过程的评价当中去，提出在服务发布阶段将仿真信息注入服务描述文档的方法，并在服务组合阶段将原子服务的仿真信息进行组合以得到完整的仿真模型信息，最终以实际运行的仿真模型输出结果转换为服务质量评价指标，以期提高服务评价的准确性。

首先，论文分析了云制造的提出背景，介绍了云制造服务发布、匹配、组合和匹配四个方面的研究现状。此外，对云制造涉及的知识和技术进行了介绍，包括云制造的概念、语义Web和本体论的概念，并对图数据库RDF4J在云制造中的作用进行了说明。

其次，对云制造服务的一般流程进行了分析，并基于此对云制造服务过程中的几个难点进行了分析：服务发布阶段需要本体模型的支持、服务匹配阶段如何提高检索的查全率和查准率、服务组合阶段如何有效地组合原子服务以及如何组合成仿真模型。从云制造服务相关本体的构建展开研究，并基于此建立了面向仿真的云制造服务发布方法，研究了云制造服务的服务抽象方法和仿真抽象方法，并将服务描述模型与仿真模型相结合。同时提出了云制造服务的需求发布与匹配方法、基于Jena的推理检索方法和面向仿真的服务组合方法。

再次，对云制造服务组合评价的指标进行分析，提出了服务需求方和服务提供方各自需要的评价指标体系，并建立了仿真评价指标转换为服务评价指标的转换方法。

最后，设计了原型系统来验证云制造服务的整个流程。以典型的机床加工为背景设计了原型系统案例，对论文的方法进行验证，针对该场景介绍了面向仿真的服务发布和组合方法，实现了Plant Simulation仿真平台对服务组合OWL-S文档的读取，建立了仿真模型并给出相应指标及其转换方法，以XML格式的文件、图片等形式返回给云平台进行分类展示。

论文的工作为云制造服务组合方案的评价提供了一种新的方法，同时拓宽了仿真方法的应用领域，说明了仿真方法能较好地解决云制造服务组合的评价问题。

**关键词：**云制造服务，仿真评价，QoS，OWL-S

ABSTRACT

Cloud manufacturing is a new manufacturing model that meets the requirements of modern advanced information manufacturing. It can optimize the allocation of resources and share it in an all-round way. Cloud manufacturing service platform clusters different types and characteristics of manufacturing services. How to accurately select the most suitable manufacturing service mix for user manufacturing needs is a key issue. As the important consideration factor of service selection, the accuracy of service quality evaluation is the important premise and foundation. At present, the quality of service mainly comes from the feedback from the service providers and the demand side's feedback. Its source has a large degree of subjectivity and uncertainty, so the accuracy of service quality evaluation needs to be further studied. The simulation method is applied to the evaluation of cloud manufacturing service composition execution process to put forward in the service stage will release injection method simulation information service description documents, and in the service composition process of combining simulation information of atomic services to get information about the integrated simulation model, the simulation model of the actual operation in the final output conversion for the service quality evaluation index, in order to improve the accuracy of service evaluation.

First of all, this paper analyzes the background of cloud manufacturing, and introduces the research status of four aspects of cloud manufacturing service publishing, matching, combination and matching. Besides, the knowledge and technology involved in cloud manufacturing are introduced, including the concept of cloud manufacturing, the concept of semantic Web and ontology, and the role of graph database RDF4J in cloud manufacturing is explained.

Secondly, the general process of cloud manufacturing service are analyzed, and based on the analyses of several difficulties in the process of cloud manufacturing service: service release needs support and service ontology model matching stage to improve the recall and precision of service composition, stage how to effectively combine atomic services and how to combine into simulation model. Based on the research of cloud manufacturing service related ontology, a simulation oriented cloud manufacturing service publishing method is built. The service abstraction method and simulation abstraction method of cloud manufacturing service are studied, and the service description model and simulation model are combined. At the same time, it puts forward the method of demand publishing and matching for cloud manufacturing services, Jena based reasoning retrieval method and simulation oriented service combination method.

Thirdly, the index of cloud manufacturing service composition evaluation is analyzed, and the evaluation index system of service demand side and service provider is put forward, and the transformation method of simulation evaluation index to service evaluation index is established.

Finally, a prototype system is designed to verify the whole process of cloud manufacturing services. The background of the prototype system is designed for the typical case in machine processing, to validate the method, the scene is introduced for simulation service release and combination method, the read Plant simulation platform of Simulation service composition of OWL-S document, the establishment of a simulation model and the corresponding index and conversion method, return to the cloud platform the classification shows in XML format files, pictures and other forms.

The work of this paper provides a new method for the evaluation of cloud manufacturing service composition scheme, and broadens the application field of simulation method. It shows that the simulation method can better solve the evaluation problem of cloud manufacturing service composition.

**Key words：**cloud manufacturing service, simulation evaluation, QoS, OWL-S

**目录**

[摘要 4](#_Toc501892783)

[ABSTRACT 6](#_Toc501892784)

[第1章 绪论 9](#_Toc501892785)

[1.1 背景 9](#_Toc501892786)

[1.2 研究目标和意义 10](#_Toc501892787)

[1.3 国内外研究进展 11](#_Toc501892788)

[1.3.1 制造资源和制造能力虚拟化与服务化的研究进展 11](#_Toc501892789)

[1.3.2 云制造服务匹配的研究进展 13](#_Toc501892790)

[1.3.3 云制造服务组合的研究进展 14](#_Toc501892791)

[1.3.3 云制造组合服务评价方法的研究进展 15](#_Toc501892792)

[1.4 论文的主要工作和章节安排 16](#_Toc501892793)

[1.4.1 论文主要工作 16](#_Toc501892794)

[1.4.2 论文章节安排 17](#_Toc501892795)

[第2章 云制造服务的基本概念 18](#_Toc501892796)

[2.1 云制造概念 18](#_Toc501892797)

[2.1.1 云制造概念及其发展 18](#_Toc501892798)

[2.1.2 云制造服务内容分类 20](#_Toc501892799)

[2.2 语义Web中的语言和本体论 21](#_Toc501892800)

[2.2.1 本体论 22](#_Toc501892801)

[2.2.2 资源描述框架模型RDF和RDFS 22](#_Toc501892802)

[2.2.3 OWL描述语言 24](#_Toc501892803)

[2.2.4 OWL-S服务本体描述语言 25](#_Toc501892804)

[2.3 图形数据库RDF4J 27](#_Toc501892805)

[2.4 本章小结 28](#_Toc501892806)

[第3章 云制造服务发布和组合过程分析 29](#_Toc501892807)

[3.1 云制造服务一般流程 29](#_Toc501892808)

[3.2 云制造服务发布过程分析 29](#_Toc501892809)

[3.3 云制造服务匹配过程分析 32](#_Toc501892810)

[3.4 云制造服务组合和评价过程分析 33](#_Toc501892811)

[3.4.1 云制造服务组合方法分析 33](#_Toc501892812)

[3.4.2 组合服务评价过程分析 34](#_Toc501892813)

[3.5 本章小结 35](#_Toc501892814)

[第4章 面向仿真的云制造服务发布和组合方法 36](#_Toc501892815)

[4.1 制造云服务相关本体构建 36](#_Toc501892816)

[4.2 面向仿真的云制造服务发布方法 38](#_Toc501892817)

[4.2.1 云制造服务的服务抽象方法 38](#_Toc501892818)

[4.2.2 云制造服务的仿真抽象方法 39](#_Toc501892819)

[4.2.3 制造服务模型与仿真模型的组合方法 40](#_Toc501892820)

[4.3 云制造服务匹配方法 42](#_Toc501892821)

[4.3.1 需求发布与匹配 42](#_Toc501892822)

[4.3.2 基于Jena的推理检索 43](#_Toc501892823)

[4.4 云制造服务组合方法 44](#_Toc501892824)

[4.5 本章小结 46](#_Toc501892825)

[第5章 基于仿真的云制造组合方案的评价 47](#_Toc501892826)

[5.1 云制造组合服务评价指标分析 47](#_Toc501892827)

[5.1.1 服务需求方评价指标体系 47](#_Toc501892828)

[5.1.2 服务提供方评价指标体系 48](#_Toc501892829)

[5.2 仿真指标的转换 51](#_Toc501892830)

[5.3 仿真平台执行评价 53](#_Toc501892831)

[5.3.1 仿真平台对OWL-S文件的读取 53](#_Toc501892832)

[5.3.2 服务组合评价指标的反馈 53](#_Toc501892833)

[5.4 本章小结 54](#_Toc501892834)

[第6章 原型系统的设计和案例验证 55](#_Toc501892835)

[6.1 云制造服务原型系统的设计 55](#_Toc501892836)

[6.1.1 云制造服务平台一般流程 55](#_Toc501892837)

[6.1.2 原型系统功能设计 57](#_Toc501892838)

[6.1.3 原型系统UI界面设计 58](#_Toc501892839)

[6.2 总体案例背景 58](#_Toc501892840)

[6.2.1 案例工作流程介绍 59](#_Toc501892841)

[6.2.2 典型产品及服务介绍 60](#_Toc501892842)

[6.2.3 服务提供方介绍 61](#_Toc501892843)

[6.2.2 云平台中在案例中的应用 62](#_Toc501892844)

[6.3 组合服务的仿真模型构建 67](#_Toc501892845)

[6.3.1 仿真平台内预置对象说明 67](#_Toc501892846)

[6.3.2 仿真实现总体流程说明 68](#_Toc501892847)

[6.3.3 对服务组合OWL-S文档的读取 69](#_Toc501892848)

[6.3.4 仿真模型的建立与执行 69](#_Toc501892849)

[6.4 服务评价指标 70](#_Toc501892850)

[6.5 本章小结 73](#_Toc501892851)

[第7章 总结与展望 74](#_Toc501892852)

[7.1 结论 74](#_Toc501892853)

[7.2 进一步工作的方向 75](#_Toc501892854)

[致谢 76](#_Toc501892855)

[参考文献 77](#_Toc501892856)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 84](#_Toc501892857)

# 

# 第1章 绪论

## 1.1 背景

当前，智能制造已经成为全球工业发展和世界先进国家产业转型升级的共同目标，各国政府相继提出了一系列以智能制造为主导的工业振兴战略。2008年金融危机后，为了拉动美国经济、重塑美国制造业的全球竞争优势，美国启动了制造业振兴战略，加快发展技术密集型先进制造业，实现再工业化。作为世界最大的多元工业集团，2012年美国通用电气公司（GE）提出了自己的“工业互联网”概念，是数字世界与机器世界的深度融合，其实质也是工业化和信息化的融合。2013年4月，德国政府提出“工业4.0”国家战略，是以智能制造为主导的第四次工业革命，是革命性的生产方法。该战略旨在通过信息物理融合系统（Cyber Physical System, CPS）相结合的手段，将制造业向智能化转型。英国、法国和日本也相继颁布了“英国制造2050”、“工业振兴新计划”以及“2014制造业白皮书”等一系列发展高端装备制造业的战略举措，强化高端装备制造业的竞争力。

在市场应用需求的牵引下，在先进制造技术与迅猛发展的信息技术持续深化融合的推动下，制造业正以前所未有的深度和广度向前发展，呈现出“全球化、精益化、专业化、服务化、绿色化、智能化”的发展趋势。云制造是在制造业应用持续需求牵引以及新兴信息技术与制造技术深度融合的推动下，提出的一种新的制造业信息化模式与技术手段。云制造是一种基于网络的、面向服务的智慧化制造新模式和手段，它将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化，构成制造资源和制造能力的云服务池，并进行统一的集中的优化管理和经营，从而用户只要通过云端就能随时随地按需获取制造资源与能力服务。

云制造是一种面向服务、高效低耗和基于知识的网络化、敏捷化制造新模式。涉及的用户角色主要有三种，即资源提供者、制造云运营者、资源使用者。资源提供者通过对产品制造过程中的制造资源和制造能力进行感知、虚拟化接入，以制造服务的形式提供给云制造运营平台（制造云运营者）；制造云运营者主要实现对云服务池中的制造服务（即云制造服务）的高效管理、运营等，可根据资源使用者的应用请求，动态、灵活地为资源使用者提供服务；资源使用者能够在制造云运营平台的支持下，动态按需地使用各类云制造服务（接出），并能实现多主体的协同交互。

云制造需要解决的一个基本问题是如何对制造资源实现服务化描述，云服务的发布是实现资源共享的前提，制造云服务的形式化描述是云服务选择与语义匹配的基础，也是实现云制造应用的关键。此外，对云服务及其组合进行评价优选也是一个研究热点。对于云平台上制造服务的执行来说，服务组合方案的评价是一个关键问题，系统必须从大量的待选云服务中选择最佳的云服务或组合云服务来执行任务，也就是云服务优选。

## 1.2 研究目标和意义

云制造需要解决的一个基本问题是如何对制造资源实现服务化描述，云服务的发布是实现资源共享的前提，制造云服务的形式化描述是云服务选择与语义匹配的基础，也是实现云制造应用的关键。此外，对云服务及其组合进行评价优选也是一个研究热点。对于云平台上制造服务的执行来说，服务组合方案的评价是一个关键问题。系统必须从大量的待选云服务中选择最佳的云服务或组合云服务来执行任务，也就是云服务优选。面向仿真的制造云服务发布与组合方法，首先需要将制造资源和制造能力服务化，即实现云服务的发布，在这个过程中，利用设计的WSDL2OWL转换工具，将服务发布时创建的WSDL文件转化成OWL-S文件，在各个服务的OWL-S文件中注入对仿真组件的映射。最后，对服务OWL-S文件进行组合，自动生成仿真模型信息，结合仿真结果对制造云服务进行评价。服务需求方通过评价结果可以对云制造服务进行组合和优选，服务提供方可以得到服务执行结果的反馈作为服务改进意见，进而提高企业竞争力。

通过仿真的方法来评价制造服务，避免了使用传统分析方法来描述复杂系统和组合服务的困难性。此外，通过仿真的方法分析服务，可以得到一系列需要的仿真指标，通过仿真指标能够转换为服务评价指标，进而服务需求方能根据服务评价指标选择合适的服务，而服务提供方能够根据服务评价指标改进他们的服务，提高竞争力。对比于传统分析方法，仿真方法能够对制造服务的加工能力做出更准确和可靠的评价。

综上所述，本文主要研究利用仿真技术对云制造组合服务进行评价，同时研究具有仿真对应信息的制造资源和制造能力的服务化描述方法，并且建立一个服务发布、服务组合的云制造系统平台来对研究进行验证。仿真评价方法能够模拟制造云服务执行过程，有效实现云服务优选，并避开了复杂算法。制造云服务的发布与组合是云制造的一个热点研究方向，本文通过在服务描述中注入仿真信息，以仿真的方法对制造云服务进行评价以及执行过程的评估和追踪。为云制造服务平台的服务执行过程的评价提供一种方法，为平台企业接单提供一种实用性的工具，解决供应商发布云服务后对订单的评价问题。

## 1.3 国内外研究进展

### 1.3.1 制造资源和制造能力虚拟化与服务化的研究进展

云制造中的资源是一个广义的概念，是制造行业产品全生命周期过程中涉及到的所有资源和相关企业的一切活动的总称，按照其存在形式可以分成两类：一类是物理存在的、具有静态传输介质的制造资源，另一类是反应制造企业具备的完成制造任务能力的无形的、动态形式的资源，即制造能力[1-3]。

制造能力是云制造中一个非常重要的概念，它反映了人或团队基于自身的专业知识和技能，利用制造资源完成某种制造任务的能力，体现了人在制造过程中的核心作用。由于一些制造资源无法（或不被允许）直接通过网络进行使用，因此往往以制造能力的形式提供给用户。如何将制造能力进行有效全面的描述并进行服务化封装，是实现制造能力按需使用和流通的关键。在云制造模式下，制造能力是在某一具体活动过程中形成的，通过人或团队的知识和技能实现对制造资源的配置和整合，从而完成某一任务并达到预期目标。它包含了制造全生命周期过程中的各类能力，如设计能力、仿真与实验能力、生产加工能力、管理能力、集成能力等[1-5]。

制造资源的虚拟化和服务化可分为制造资源的感知与接入、制造资源的虚拟化、制造资源的服务化三个方面。制造资源的感知是指通过物联网、信息物理系统（Cyber Physical Systems，CPS）等相关技术获取资源的静态或动态信息，进行资源的监控和管理。

制造资源的虚拟化是指将分散的各种物理资源映射为虚拟逻辑资源的过程，通过物联网、CPS、计算机系统虚拟化[6, 7]等技术，实现物理制造资源（硬制造资源和软制造资源）的全面互联、感知与反馈控制，并将物理制造资源转化为逻辑制造资源，解除物理制造资源与制造应用之间的紧耦合依赖关系，以支持资源高利用率、高敏捷性、高可靠、高安全、高可用的虚拟化云制造服务系统[8-12]。

具体来讲：制造资源虚拟化使得云制造具有以下优势[13-17]：

（1）资源的全面共享——支持各种软硬制造资源的感知和接入。

（2）资源按需透明使用和节能降耗——服务系统的构建与运行均根据资源需求动态调度和增减资源，以达到高利用率。

（3）高敏捷性与可伸缩性——虚拟资源与物理资源的松耦合以及模板映射机制，使虚拟资源池的规模能够随云业务量需求的变化敏捷伸缩、内容灵活变更。

（4）高可靠性——通过容错技术，使得单点故障发生时任务环境可动态迁移至其他物理资源继续运行，确保多主体协同运行不受影响。

（5）高安全性——支持对物理制造资源的多层次多粒度安全隔离，一旦遭受到攻击也能够保证任务迁移至其他物理资源继续运行。

（6）高可用性与普适性——支持对制造全生命周期各种用户按需定制个性化的终端设备、运行环境、界面内容、交互方式。

制造资源的服务化是指将物理资源或虚拟资源进行服务化封装，对封装的服务进行建模和描述，以制造云服务的形式发布到云制造服务平台中去。

张霖等[18]概述性地给出了制造资源感知、虚拟化和服务化的技术路线。指出硬资源的感知主要通过物联网相关技术来实现，软资源、制造能力及其他资源主要对静态属性进行感知，有时也需要构建恰当的适配器；分别介绍了基础设施层次的虚拟化方法、映像层次的虚拟化方法和应用层次的虚拟化方法；举例了制造能力的元描述模型来进行制造能力的服务化封装。

**1.在资源的感知与接入方面。**

李瑞芳等[19]从制造装备的状态感知、物联与面向云制造平台的适配接入三个当面研究了云制造装备资源感知与接入技术；黄刚等[20]研究了GPS、无线传感网络、RFID等物联网技术在制造资源感知定位方面的应用，构建了云定位基础数据平台，阐述了云定位技术在透明车间服务的在制品与物料定位、敏捷供应链服务的人员定位等方面的应用；尹超等[21]提出了一种机床装备云制造服务的接入终端，来支持各类机床装备接入云平台，实现机床加工信息的实时采集、传输和监控；YAN J M等[22]研究了制造设备资源感知和接入云平台过程中的设备识别方法、数据采集方法和数据转移协议等问题。

**2.在资源的虚拟化方面。**

任磊[12]提出了云制造资源虚拟化的框架，自底向上依次包括制造资源、物联网/CPS基础设施、物理资源管理、虚拟资源云池、虚拟资源管理等五层内容，并概述了若干虚拟化支持下的云制造关键技术及其优点。

**3.在资源的服务化方面。**

RAUSCHECHER U等[23]提出了一种面向产品定制的制造服务描述语言（MSDL），给出了该云服务模型产品方面的属性描述，指出该模型有助于用户基于制造云（ManuCloud）配置和订购定制产品；李楠等[24]分析了几种制造资源的服务化封装方式；陈琨等提出了一种基于Web服务的云制造软资源封装架构，给出了一种通用的软资源描述模型；吴雪娇等[25]借鉴Web服务本体描述语言（Web Ontology Language for Service，OWL-S）给出了一种基于语义的云服务描述方法；尹胜等[26]、王中杰等[27]和王正成等[28]分别提出了一种外协加工资源、加工云能力服务和设备类资源的描述模型；李向前等[29]建立了面向集团企业云制造的静态知识服务模型和动态知识服务模型。

### 1.3.2 云制造服务匹配的研究进展

云制造服务匹配，是指在云制造环境下，将用户个性化的制造需求与功能多样、种类繁多的云制造服务进行匹配，以寻求最能满足需求的制造服务。云制造服务匹配作为促进云制造资源充分共享、实现制造资源有效利用的关键途径之一，对云制造的实施和开展具有重要的作用[30]。

尹超等[30]针对云制造服务在匹配过程中的多样性、异构性、动态性和多约束性等特点，建立了一种基于Web服务本体描述语言的云制造服务输入、输出、前提、效果匹配模型，结合语义相似度和基于蕴涵关系推理的量化方法及匹配算法研究了参数匹配过程中本体概念参数和约束条件参数的匹配度量化问题。

李慧芳等[31]在对制造云服务进行形式化描述的基础上，提出了一种智能化的制造云服务搜索与匹配方法，该方法主要包括两部分：根据服务的类型和状态信息，快速过滤发布端服务，得到初步的候选服务集合；通过对请求端与发布端服务进行功能属性、非功能属性匹配，从候选服务集合中筛选出具有最高匹配度的制造云服务。

江萍等[32]通过生成和扩展用户需求向量对服务名称、服务功能和服务非功能属性分别进行匹配，提高匹配服务匹配的查全率和查准率。

张金广等[33]面向云制造背景下海量数据处理的效率要求，将基于语义距离的语义相似度算法应用到云制造背景下的服务匹配中，在满足查准率和查全率的同时,通过设置相应的过滤器，减少不必要的匹配过程。

李成海等[34]提出了一种基于属性匹配的云制造资源搜索方法，并建立了其中云制造服务资源属性标准化分类描述模型；设计了服务资源同义词字典集和属性字典集，并以此为基础构造了关键词规范化算法和参数化的属性匹配算法。

盛步云等[35]基于云制造服务模式和思想，开发了一个面向中小企业云制造服务平台的供需智能匹配引擎。采用关键字语义智能搜索，使用制造服务资源本体库，根据需求本体构建形式化的需求匹配模式，进行了制造服务资源的智能匹配算法。

赵金辉等[36]针对云制造服务提供方与需求方给出的短语评价信息，采用云模型将其量化为可计算的数值。利用可变模糊识别方法进行多指标信息的综合满意度计算。以服务提供方和需求方双方服务质量满意度最大为优化求解目标，建立了多目标优化数学模型，并利用隶属度函数的加权和方法将其转化为单目标线性规划模型进行求解。

### 1.3.3 云制造服务组合的研究进展

在云制造系统中，根据用户需求或任务的粒度，可以将用户需求分为单一资源服务需求任务和多资源服务需求任务。针对单一资源服务需求任务，系统必须从大量的待选云服务中选择最佳的云服务来执行该任务，即云服务优选；针对多资源服务需求，系统必须从搜索到的符合各子任务需求的待选云服务集中，各选一个云服务组装成组合云服务，并从所有可能组合中选择最佳的一组组合来协同完成任务，即云服务组合及优选[37]。

云服务及其组合能够形成不同粒度的制造云服务或制造能力，为云制造终端用户提供个性化服务，云服务组合是实现云制造按需分配和使用资源的有效途径。通过对云制造服务平台中已有的适合的云服务进行重用、组合、验证，构成能随大众需求而即时应变的松耦合制造云服务应用。

在实际的制造任务中，单一的云制造服务功能有限，往往难以满足复杂的制造业务需求。因此，云服务组合成为云制造服务的主要表现形式和执行方法，关于云服务组合问题也必然会引起学术界广大的关注和重视，同时也出现了相应的研究成果。

邹德国等[38]提出了一种基于图灵机的云服务组合方法，从云服务架构的中间件层角度出发，提出了一种基于图灵机的云服务模型并且提出了一种基于图灵机的组合算法。该文献提供的方法在云服务功能上有较好的性能，并且其部署有较高的成功率。Fu[39]提出了一种虚拟服务的高级云服务组合的概念，这些服务可以是物理的连接，它们以真实连接方式可以使云服务更加成功的组合。刘卫宁等[40]提出了跨平台的云服务组合方法，并指出SOA架构中的Web服务组合方法用于处理云服务组合问题时受限，并且会导致在云计算环境下会有巨大数量的云服务闲置。该文献为以后向云平台中的服务组合的研究做出了一定的贡献。

倪晚成等[41]在总结了各种Web服务组合方法的基础上，将Web服务组合方法归纳为语义型和过程型。语义型Web服务组合为Web服务描述和请求描述添加能被计算机系统理解的语义，使Web服务组合方案通过推理自动生成。过程型Web服务组合使用流程定义工具和语言对Web服务组合业务过程进行建模，在具体流程执行前根据服务 QoS属性选择具体服务来替代流程模型中的抽象服务以获得可执行的组合服务方案，如AgFlow [82]穷举计算法与进化算法是两种基于服务QoS属性的计算方法，采用穷举计算法存在扩展性差、计算量大的弊端[42]。

Wang等人[43]构造了由具有偏好的目标规划模型和AHP组成的组合模型，并借助优先目标规划法确定供应商的最佳采购量配额。Kulak等[44]运用多目标混合整数线性规划模型与ANP组合的方法进行供应商选择与订单分配。

### 1.3.3 云制造组合服务评价方法的研究进展

对云制造服务资源的评价是云制造资源优选的一个重要过程[45]，目前针对评价方法的研究进展如下:

Nie等[46]提出了云服务的完整的评价指标体系，针对需要计算的服务评价属性的权重，文中利用了层次分析法来确定。Garg等[47]提出了一个框架即“SMICloud”，该框架能够系统地衡量SMI中的所有QoS属性，然后采用层次分析法对云服务进行排名。但是层次分析法对于矩阵的一致性判断还缺乏统一的根据，一致性检验也相对困难并且缺乏科学性。Benouaret等[48]提出了一个考虑用户喜好的Web数据服务自动组合方法，该方法采用模糊集，对用户的喜好进行建模。Wang等[49]提出了一个高效QoS感知服务选择的方法，通过混合整数规划来选择最佳的服务。

在组合法方面，Amid[50]使用模糊集理论与AHP方法，建立了以质量、价格与配送时间为选择标准的加权最大最小模糊多目标供应商选择模型。王尚广等[51]提出将全局约束与局部最优相结合的新算法，该算法首先利用全局QoS约束对时间花销进行分解，以便获取用户的偏好约束。再利用局部最优选取满足用户需求的服务。该算法能够实时地为用户提供服务的需求。刘开等[52]在分析制造云服务组合各类柔性基础上，提出覆盖多类属性的制造云服务组合柔性评价方法，为相关企业构建和运用云制造服务平台提供决策理论和工具。李雪[53]建立了制造云服务组合柔性评价指标体系，并提出了各项评价指标的量化方法；利用层次分析法与熵权法相结合的组合赋权法对逼近理想解法进行改进，提出了制造云服务组合柔性综合评价步骤；最后以实例验证了该制造云服务组合柔性综合评价步骤的科学性和有效性，为企业优选制造云服务组合提供理论依据。董元发和郭刚[54]从云制造服务的分类、服务接口规范和服务质量等方面对云制造服务与云制造服务组合模板进行了形式化描述，提出云制造模式下基于互评机制的云制造服务质量获取方法，建立了云制造服务信任度评价模型；建立了基于服务匹配度与全局信任度的综合优化模型，并运用遗传算法进行求解。李永湘等[55]为解决云制造服务组合建模与形式化验证问题，在Web服务编制演算的基础上提出一种扩展了服务质量信息的进程代数XPC4CMSC，给出了XPC4CMSC的语法、操作语义，建立了顺序组合、并发组合、选择组合的活动图与XPC4CMSC描述模型，给出了服务质量评价算法与服务组合的形式化验证方案。

通过对国内外相关文献对比分析，基于科学性和可靠性、定性与定量，重点突出的原则。目前云制造服务评价方法已经发展到了多种方法相结合的综合评价阶段，更加适合云制造服务系统性、复杂性的特点。

## 1.4 论文的主要工作和章节安排

### 1.4.1 论文主要工作

论文以云制造服务发布和组合方法的研究为主线展开，首先分析和总结了云制造服务发布和组合的研究现状，介绍了云制造服务服务和管理流程中涉及到的概念和理论，在分析现在云制造服务发布方法缺陷的前提提出把仿真的方法应用到云制造服务组合的评价当中去，在服务发布阶段往服务描述文件中注入仿真信息，服务组合阶段组合各个原子服务的仿真信息，在服务评价阶段根据组合服务的仿真信息建立仿真模型，根据仿真结果映射到云制造服务组合的评价指标。论文主要工作如下：

（1）运用本体论知识构建制造资源或制造能力的本体模型，提供对服务发布和服务匹配阶段的支持；运用Java JAX-WS框架将制造资源或制造能力服务化封装，生成WSDL服务描述文件，并创建Web Service接口。

（2）使用Java编写转换器将WSDL文件转换成OWL-S服务描述文档，并在OWL-S文件中注入服务对应仿真模型信息，形成包含仿真信息的云制造服务描述文件。

（3）对图形数据库RDF4J进行调研，将服务描述文件和相关本体知识保存在图数据库中，通过从RDF4J中读取本体模型对服务发布提供支持，通过Jena在RDF4J数据库中实现服务的推理检索。

（4）编写代码实现多个原子服务描述文件的组合以提供对服务组合的支持，同时在服务组合阶段需要读取各个原子服务的仿真模型信息，并进行组合生成对应组合服务的完整仿真模型。

（5）调研仿真平台，通过仿真平台实现对服务描述文件OWL-S的读取和解析，实现仿真模型的自动构建，并将仿真结果以XML文件和图片的形式返回给原型系统展示。

（6）使用Java、JavaScript、SQL等语言，运用Spring、AngularJS、MyBatis等多种框架搭建了云制造服务原型系统，提供服务发布、需求发布与匹配、服务组合、服务仿真评价及展示等功能，从而验证论文的可行性。

### 1.4.2 论文章节安排

论文的各章节安排如图1.1所示。



图1.1 论文架构图

# 第2章 云制造服务的基本概念

## 2.1 云制造概念

### 2.1.1 云制造概念及其发展

近几十年来，在市场应用需求的牵引下，在先进制造技术与迅猛发展的信息技术持续深化融合的推动下，制造业正以前所未有的深度和广度向前发展，云制造是在制造业应用持续需求牵引以及新兴信息技术与制造技术深度融合的推动下，推出的一种新的制造业信息化模式与技术手段。

对于云制造的概念，目前国内外学术界还没有统一的标准化定义。2010年，李伯虎等人[56]首次提出了云制造：即一种面向服务的网络化制造新模式，它融合并发展了现有制造业信息化、制造数字化、云计算、物联网、语义Web、服务计算、效用计算等技术，通过对现有网络化制造与服务技术——制造网格[57, 58]、敏捷制造[59, 60]、计算机集成制造[61, 62]等进行延伸和变革，将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化，构成制造资源和制造能力的云服务池，并进行统一的、集中的优化管理和经营，从而用户只要通过云端就能随时随地按需获取制造资源与能力服务，进而智慧地完成其制造全生命周期的各类活动。2011年，李伯虎等人[63, 64]进一步论述了云制造，认为云制造是建立在云计算所提供服务模式的基础上，对云计算服务模式进行延伸和发展，这些模式包括平台即服务(Platform as a Service，PaaS)、服务基础设施(Infrastructure as a Service，IaaS)和软件即服务(Software as a Service，SaaS)，随后杨海成[65]进一步指出云制造意义在于通过采取云计算、无线射频识别技术（Radio Frequency Identification Devices，简称“RFID”）等当代前沿理念和技术，把“软件即服务”（Software as a Service，简称“SaaS”）的理念拓展至“制造即服务”（Manufacturing as a Service，简称“MaaS”），丰富和拓展了云计算的资源共享内容、服务模式和技术，从此拉开了云制造服务管理研究的序幕，使制造业在海量、复杂的网络资源的支持下，为产品提供低成本、高附加值和全球化的服务。Breiter等[66]指出，作为一种制造服务模式，云制造有其自身的生命周期，包含以下几个阶段：制造任务的提出、制造任务的分解、制造资源（能力）的定义、制造资源（能力）的发布、制造资源（能力）的匹配和选优、制造资源（能力）的组合、制造合作关系的确定（商业合同的签订）、生产制造、物流配送、制造任务的撤销（商业合同的完成）。

云制造是一种基于网络的、面向服务的智慧化制造新模式和手段，它融合发展了现有信息化制造技术与云计算、物联网、服务计算、智能科学、高效能计算等新兴信息技术，将各类制造资源和制造能力虚拟化、服务化，构成制造资源和制造能力的云服务池，并进行统一的、集中的优化管理和经营，从而使用户只要通过云端就能随时随地按需获取制造资源与能力服务，进而完成其制造全生命周期的各类活动[56, 64, 67]。基于云制造模式和手段所构成的系统称为云制造系统或制造云，它是一种基于各类网络（组合）的、人/机/物/环境/信息深度融合的、提供制造资源与能力服务的智慧化制造物联网。云制造服务平台是云制造系统中支持各类制造资源和能力的感知与接入，虚拟化，服务化，以及综合管理和按需使用的支撑环境和工具集，是云制造系统的核心。

云制造中的用户角色主要由三种，即资源提供者、制造云运营者、资源使用者。资源提供者通过对产品全生命周期过程中的制造资源和制造能力进行感知、虚拟化接入，以服务的形式提供给第三方运营平台（制造云运营者）；制造云运营者主要实现对云服务池中的服务的高效管理、运营等，可根据资源使用者的应用请求，动态、灵活地为资源使用者提供服务；资源使用者能够在制造云运营平台的支持下，动态按需地使用各类应用服务（接出），并能实现多主体的协同交互[18, 67]。如下图1.1所示：



图1.1 云制造概念模型

在制造产品全生命周期活动中，云制造的服务内容可以分为云制造资源服务及云制造能力服务两类内容。云制造资源服务内容包括软制造资源服务MSRaaS（manufacturing soft resource as a service），如制造过程中的各种模型、（大）数据、软件、信息、知识等及硬制造资源服务MHSaaS（manufacturing hard resource as a service），如制造生产加工硬设备（如机床、机器人、加工中心）、计算设备、仿真试验设备、测试设备等。云制造能力服务内容包括论证能力为服务、设计能力为服务、仿真能力为服务、生产加工能力为服务、试验能力为服务、经营管理能力为服务、运营能力为服务、维修能力为服务、集成能力为服务等。其中，仿真为服务SimaaS（simulation as a service）的具体体现为：产品的虚拟样机仿真和半实物仿真需要大量软硬仿真资源的支持，云制造服务平台可根据仿真任务的需求，动态构建虚拟化的仿真环境，将所需的计算资源、各种专业仿真软件、仿真模型和仿真数据等封装为云仿真服务，支持在广域网范围内和在高效能计算环境内开展联合仿真。对于仿真专用的半实物设备，能够提供远程使用、监控服务，使得用户无需关心设备的具体位置。同上，用户如果对仿真这块业务不是很擅长的话，可以利用制造云中的仿真能力即服务完成产品仿真[2]。

### 2.1.2 云制造服务内容分类

在制造产品全生命周期活动中，云制造的服务内容可以分为云制造资源服务及云制造能力服务两类内容。云制造资源服务内容包括软制造资源服务MSRaaS（manufacturing soft resource as a service），如制造过程中的各种模型、（大）数据、软件、信息、知识等及硬制造资源服务MHSaaS（manufacturing hard resource as a service），如制造生产加工硬设备（如机床、机器人、加工中心）、计算设备、仿真试验设备、测试设备等。云制造能力服务内容包括论证能力为服务、设计能力为服务、仿真能力为服务、生产加工能力为服务、试验能力为服务、经营管理能力为服务、运营能力为服务、维修能力为服务、集成能力为服务等。

（1）论证为服务AaaS

对于产品规划、发展战略等企业论证业务，云制造服务平台将（成本、进度、风险等）决策分析软件等软制造资源封装为云服务，并提供用于辅助决策分析的模型库、知识库、数据库作为支持，帮助制造企业用户对各种概念产品、规划方案的可行性与预期效果进行论证分析。

（2）设计为服务DaaS

对于产品的设计过程，当用户需要计算机辅助设计工具时，云制造用户平台可将各种CAD、CAE软件功能封装为云服务以批作业或者虚拟桌面等方式提供给用户。

（3）仿真为服务SimaaS

云制造服务平台可根据仿真任务的需求，动态构建虚拟化的仿真环境，将所需的计算资源、各种专业仿真软件、仿真模型和仿真数据等封装为云仿真服务，支持在广域网范围内和在高效能计算环境内开展联合仿真。

（4）生产加工为服务FaaS

云制造服务平台能够根据生产加工任务需求快速构建一个虚拟生产单元，其中包括了所需的物料以及机床、加工中心等硬制造设备，也包括了制造执行系统软件、知识库和过程数据库等软制造资源。

（5）试验为服务EaaS

云制造服务平台能够根据实验所需的软硬资源建立一个虚拟实验室，其中封装了各种用于实验分析的软件功能作为云服务，同时也提供了对于部分试制设备、检测设备、试验平台等硬制造资源的远程接入和使用服务。

（6）管理为服务MaaS

在企业的制造全生命周期过程中，对于各项经营管理活动如销售管理、客户关系管理、供应链管理、生产计划管理等业务，云制造服务平台能够提供云端客户关系管理、云端供应链管理、云端企业资源规划等资源和服务能力。

（7）（产品）运营为服务OpaaS

运营为服务属于面向制造产品用户的重要环节，包括产品运输、安装、培训、咨询、改进、应用、金融等增值服务，当然其中既包括资源服务也包括能力服务。

（8）（产品）维修为服务ReaaS

维修为服务包括维护保养、备品备件供应、故障诊断／修理、回收再制造等服务。

（9）集成为服务InaaS

集成为服务分为通用性的集成资源服务和实施系统集成的集成能力服务。经过云化改造以后的企业应用集成、协同仿真支撑、多学科集成优化、数据驱动工作流等资源集成服务可有效支持制造云中各类服务的重构与组合。

## 2.2 语义Web中的语言和本体论

随着人们对网络上信息使用要求的不断提高，对网络上信息内容提出了更高要求。可以这样认为，网络只是给人们提供了一个信息共享和信息浏览的环境，人们可以在网络环境中找到自己想要的信息，而对这些信息的理解还需要人来完成，也就是说，目前网上的信息是人所能理解的信息，而不是机器所能理解的信息。

虽然Internet上分布着海量的信息，但它们主要是面向人类的。由于信息内容没有更好地形式化表示，计算机难以处理这些信息。而互联网上广泛存在的信息格式的异构性、信息语义的多重性以及信息关系的匮乏和非统一，给人们在信息搜索、抽取、表示、解释和维护方面造成极大的不便。正是由于这样，使得网络的深层次应用，如电子商务、电子政务和数字图书馆等智能化服务的开展十分困难。此外，由于计算机拥有对大规模信息处理的能力，因此将网上信息处理和利用尽可能地交给计算机自动完成是解决这些问题的关键。而要达到这样的目的，人们必须让计算机能够“理解”这些信息，并在“理解”的前提下更好地处理和利用这些信息。WWW的发明者Tim Berners-Lee描述了在现有Web的基础上建设下一代Web的蓝图——语义Web (Semantic Web)。

### 2.2.1 本体论

语义Web采用一定的知识表示方法赋予网页信息一定的语义，达到人机和计算机之间基于语义信息的交换和处理。而在Web这样一个巨大的信息资源中，知识库是多种多样的，既包含通用的常用知识库，也包含各个领域中的领域知识库。要保证在网络环境的信息能够被计算机理解和交互，就需要有一种统一的表示语言对Web的信息进行基于语义的统一表示和交互。

本体论为同一应用领域的成员之间提供了统一的术语集，能够将描述对象进行概念化表示。本体（ontology）能够提供对领域知识的共同理解，并从不同层次给出词汇（术语）和词汇间相互关系的明确定义的形式化表述；本体通过对概念、术语及其相关关系的规范化描述，勾画出某一领域的基本知识体系，定义出一套共享的术语和信息表示结构，或者说一个可重用和可扩充的概念库，用来描述和表示特定的问题、领域和约束；本体可以采用一阶谓词、产生式、语义网络和框架等知识表示方法进行描述。语义Web中的本体表示的是人们对特定领域中的概念的统一的、本质认识。对于网络上的应用，重要的是需要定义一种具有统一语法的语言，使得本体能够遵循统一的语法格式进行信息交换。早期的本体描述语言，都是为知识共享目的而设计的知识表述语言，主要有KIF、Ontolingua、OKBC、Loom等。随着语义Web的提出，出现了一系列基于Web的本体表示语言，如SHOE、XOL、RDF、RDFS、OIL、DAML、DAML+OIL、OWL等。

### 2.2.2 资源描述框架模型RDF和RDFS

RDF是处理元数据（元数据是“关于数据的数据”，是用来描述网络资源的数据）的基础，它为在应用程序之间交换机器可理解的网络数据提供了可互操作性。RDF强调让计算机能够灵活方便地自动处理网络资源。RDF可以应用在多个领域，例如：在资源发现中，RDF可以增强搜索引擎语义处理能力；在编目领域中，RDF可以用来描述某个网站、网页之间或者数字图书馆中的内容以及内容之间的关系；采用RDF的智能主体（Agent）能够提高机构之间知识共享和交换的能力。

RDF的设计理念是希望在最低限度的约束之上更为灵活的描述资源信息，并且希望其数据模型能够独立于不同的应用，同时又便于在不同应用间进行数据整合。故而RDF采用了一种简易的描述方式，即用主体(Subject)，谓词(Predicate)，客体(Object)构成的三元组来表示资源。RDF数据通用表示形式为(S，P，O)三元组，一组RDF数据可构成一个RDF有向图[68]，如图2.1所示。

O

P

图2.1 RDF有向图

如图2.2是一个RDF描述资源的实例，其定义了资源Jack。Jack具有属性name（文字类型）、age（整数类型）、gender（文字类型），取值分别为“Jack”，20和“男”。

http://www.tongji.edu.cn/Jack

name

age

gender

图2.2 RDF数据模型实例

资源描述框架模式（RDF Schema）[69]进一步定义了RDF的建模原语。RDF Schema为表达Web资源元数据，提供了定义词汇、结构和约束的机制。RDF Schema能够定义类和性质，性质的domain和range约束、实例关系、子类关系以及子性质关系，是一种简单的建模语言。另外，RDFS建模语言也是由它自己定义的[70]，从而使RDF Schema的一些性质（如rdfs: subCIassOf）既可以用作原语，也可以用作RDF性质的特定实例，如下图2.3所示为RDFS对RDF描述资源的封装范例，其中appl表示面向特定应用的本体论。

rdfs: Resource

rdfs: Class

rdfs: Property

appl: Person

appl: Person

appl: Author

appl: name

appl: age

appl: gender

http://www.tongji.edu.cn/Jack

subClassOf

instanceOf

RDF/RDFS层

和命名空间

应用特定的模式

和命名空间

特定应用的

真实数据

appl: name

appl: age

appl: gender

图2.3 RDFS范例

### 2.2.3 OWL描述语言

为了提高信息的检索率，必须有一个机器可处理的语言，用于描述网络信息的内容，这种需求促成了网络本体描述语言OWL的产生。OWL可以用于帮助应用程序处理包含在文档中信息的内容而不是仅仅关注信息的显示方式。这与传统的由人来直接处理信息内容的方式不同。OWL可以用于显式的表达在词汇表中项的含义和这些项之间的关系。项和它们之间关系的这种表达被称为本体。OWL是在DAML+OIL网络本体语言的基础上改进的。在设计过程中吸取了DAML+OIL的设计和应用经验[71]。

OWL是W3C一系列与语义Web相关的规范之一。OWL建立在XML／RDF等已有标准基础上，通过添加大量的基于描述逻辑的语义原语来描述和构建各种本体。OWL有三个表达能力递增的子语言[71]：OWL Lite、OWL DL和OWL Full。OWL Lite是表达能力最弱的子语言，提供了类分层的能力和简单的约束功能。它支持基数约束，但只容许基数值为0或1。因为表达能力较弱，为OWL Lite开发支持工具要比其他两个子语言容易一些。OWL DL（DL表示描述逻辑）在保持计算完整性（所有的结论可以保证计算出来）和可判定性（所有的计算在有限时间内结束）的前提下，提供了尽可能大的表达能力。OWL DL包含了OWL的全部语言构造成分，但它们的使用受到一些限制（如一个类可以是许多类的子类，但不能是另一个类的实例）。描述逻辑是OWL的形式化基础，OWL DL提供了描述逻辑的推理功能。OWL Full包含OWL的全部语言构造成分并取消了OWL DL中的限制。在OWL Full中，一个类可以看成是个体的集合，也可以看成是一个个体。由于OWL Full取消了OWL DL中的保证可计算性的某些限制，因此不存在完整的推理算法支持OWL Full的全部特性。

### 2.2.4 OWL-S服务本体描述语言

OWL-S使用OWL构建了一个上层本体，描述了与Web服务相关的属性（Properties）、能力（Capabilities）以及执行结构（Execution Structures）等，目的是使计算机对服务可“理解”，以利于服务的发现、调用、互操作、组合、验证以及执行监控等。OWL-S主要定义了Web服务三个方面的语义，如图2.4所示：类Service提供了声明Web服务的基础，每个服务都将对应于Service类的一个实例，presents、described By和supports是Service类的三个属性；类Service Profile、Service Model和Service Grounding分别为上述三个属性的可取值，它们的细节因服务的不同而不同[72]。



图2.4 OWL-S格式的Service本体

OWL-S（Web Ontology Language for Services）早期版本叫做DAML-S（DARPA Agent Markup Language for Service），OWL-S 是在OWL（Web Ontology Language）的基础上提出的一个Web 服务本体描述语言，它建立了一套标记语言，采用无二义性的、计算机可理解的语言标识来描述Web 服务的能力和属性，并试图利用语义描述和逻辑推理使得Web 服务的自动化发现、组合成为可能[73]。

OWL-S的目标时表达高层次的服务能力和约束，是一个通用的Web服务描述本体。OWL-S利用OWL构建的上层本体来进行服务描述，该上层本体结构的三个部分Service Profile、Service Model和Service Grounding分别解释了关于服务的三个问题：服务能为用户提供什么功能？服务如何工作？如何同服务交互？OWL-S 的顶层本体的结构由三个部分三个组成：

**1. Service Profile**

描述服务是干什么的。它向搜寻服务的请求者提供服务的抽象描述，从而使其能够判断该服务是否满足需要，通常作为广告发布在服务目录中；同时，服务请求者也可使用Service Profile描述服务发现条件，即服务需求，从而使得服务发现过程中的匹配能够更加方便。Service Profile 对一个服务的描述包含三方面信息：

（1）服务提供者的黄白页信息，如服务提供者的联系方式、公司名称、地址等。

（2）服务的功能信息。主要是指服务的IOPE：Input、Output、Precondition、Effect。这是OWL-S 中的主要内容之一。

（3）服务的其他特征。包括服务的所属分类、服务Qos信息。

Service Profile最大的特点是双向性，Service Profile 既可以用于描述服务提供者提供的服务的功能，又可以用于描述服务请求者所需的服务的需求。这样服务发现时，匹配模块可以利用这种双向的信息进行匹配。

**2. Service Model**

基于过程描述服务是如何工作的。Service Model 主要是服务提供者用来描述服务的内部流程。描述服务是如何执行的，包括服务执行的先后顺序、过程流程等。这使得搜寻服务的请求者能够：

（1）做进一步深入的分析以判断服务是否满足需求；

（2）把多个服务的描述组合起来完成特定的任务；

（3）在服务执行时协调各参与者的活动；

（4）监控服务的运行；

一个服务通常被称之为一个过程（Process），用于服务的运行、计划、合成和监控等。过程分为三类：原子过程、组合过程、简单过程。原子过程是不可再分的过程，可以被直接调用。简单过程是个抽象概念，既不能被直接调用也不能和服务基点进行绑定。组合过程是由若干院子过程和组合过程构成的过程。

**3. Service Grounding**

Service Profile 和Service Model 都是关于服务的抽象描述，而Service Grounding对应于技术层面，描述如何访问服务，包括网络协议、消息格式、串行化、传输和编址等。在这个层面通过指向WSDL（Web Services Description Language）文档，重用已有的服务描述，实现服务的调用和集成。

OWL-S 与WSDL 实际是互补的，两者覆盖了不同的概念空间，WSDL 表达不了OWL-S 类的语义，而OWL-S 表达不了WSDL 的绑定消息。OWL-S 规范中Service Grounding 不是定义语法来对具体消息进行描述，而是利用WSDL 来对具体消息进行描述，从而将OWL-S 与WSDL 联系在一起。

## 2.3 图形数据库RDF4J

RDF4J（原名Sesame）是一个开源的处理RDF数据的Java框架，包括对RDF数据的解析、存储、推理和数据查询等。它提供了一个易于使用的API，可以连接到所有领先的RDF存储解决方案。通过SPARQL可以连接图数据库，通过创建应用程序可以加强数据和语义Web之间的连接。

RDF4J提供了两种RDF数据库（基于内存存储和基于本地存储），同时支持很多第三方存储解决方案。该框架为开发人员提供了大量的工具，以充分利用RDF和相关标准的能力。RDF4J完全支持SPARQL进行查询和更新操作。并能够在本地远程访问RDF知识库。最后，RDF4J支持所有主流的RDF文件格式，包括RDF/XML，Turtle，N-Triples，N-Quads，JSON-LD，TriG和TriX。

SPARQL是W3C提出的RDF标准查询语言，它的语法同关系数据库查询语言SQL接近。图2.5展示了一个SPARQL语句[68]，该查询语句包含了一个由六个Triple Pattern子句组成Basic Graph Pattern(BGP)。SPARQL语言的特点在于其查询构建在模式匹配上。Triple Pattern是SPARQL中最基本的匹配单元，多个Triple Pattern子句可以组成更为复杂的模式匹配块，如BGP等。常见的SPARQL模式匹配方式除了BGP之外还有如下几种：Group Graph Pattern、Optional Graph Pattern、Alternative Graph Pattern、Pattern on Named Graph。



图 2.5 SPARQL示例

Triple Pattern 作为SPARQL中最基本的匹配单元，其构成与RDF三元组表示形式相对应。RDF数据以(S，P，O)三元组表示，Triple Pattern也由这三部分构成。Triple Pattern对应位置可以是绑定了的值或是未绑定的变量。未绑定变量由问号加变量名组成。多个Triple Pattern子句间共用同一个变量则表示这些子句存在连接关系。Triple Pattern子句的表现形式及语义如表2.1所示。

表2.1 Triple Pattern定义

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
|  | 表达式 | 语义 |
| Q1 | (S P O) | 若存在则返回该三元组否则返回空 |
| Q2 | (S P ?O) | 给定Subject、Predicate，返回对应三元组中Object值 |
| Q3 | (S ?P O) | 给定Subject、Object，返回对应三元组中Predicate值 |
| Q4 | (S ?P ?O) | 给定Subject，返回对应三元组中Predicate与Object值 |
| Q5 | (?S P O) | 给定Predicate、Object，返回对应三元组中Subject值 |
| Q6 | (?S P ?O) | 给定Predicate，返回对应三元组中Subject与Object值 |
| Q7 | (?S ?P O) | 给定Object，返回对应三元组中Subject与Predicate值 |
| Q8 | (?S ?P ?O) | 返回所有的三元组 |

## 2.4 本章小结

本章是论文的研究基础，介绍了云制造的基本概念和内容分类，同时介绍了语义Web和本体论，简述了RDF、RDFS、OWL和OWL-S的基本概念；同时介绍了图数据库RDF4J的基本内容。

# 第3章 云制造服务发布和组合过程分析

## 3.1 云制造服务一般流程

云制造服务过程及其评价的工作流程如图3.1所示。服务提供方首先在云平台中发布制造服务资源信息，发布后的服务资源进入云服务资源池；服务需求方在云平台上发布任务需求，通过供需智能匹配引擎，在资源池中找到服务能力匹配的服务提供方，给出一定的候选服务集合；服务供需双方根据各自关注的指标敲定最终合作意向。后期云平台会对订单进行跟踪和管理，引导供需双方按照业务流程规则完成在线支付、进度反馈、交货验收和交易评价等交易全过程。



图3.1 云制造服务一般流程

## 3.2 云制造服务发布过程分析

云制造强调各种制造资源的服务化应用，通过各种云制造服务的调用来实现海量制造资源的共享。云制造的服务发布过程主要包括制造资源虚拟化、制造资源服务化和服务的注册与发布。

1、制造资源虚拟化

云制造资源虚拟化技术是支撑和构建云制造资源池的核心技术。所谓云制造资源虚拟化，就是通过物联网、信息物理系统（Cyber-Physical System，CPS）、计算系统虚拟化等技术，实现物理制造资源（硬制造资源和软制造资源）的全面互联、感知与反馈控制，并将物理制造资源转化为逻辑制造资源，解除物理制造资源与制造应用之间的紧耦合依赖关系，以支持资源高利用率、高敏捷性、高可靠、高安全、高可用的虚拟云制造服务环境。简单来说，是指通过虚拟化技术来实现物理资源到虚拟资源的透明化映射，由服务提供者对云制造资源进行统一描述，然后加入到云制造资源池中，可在云制造平台上注册并供服务使用者查询和使用。不同类型的资源采用的虚拟化方法有所不同，但是其虚拟化的目的是一样的，都是为了后继的资源服务化和资源利用率的提升。

云制造的所有资源对客户端来说都是虚拟的，客户端看不到云制造资源的实体，因此云制造服务提供者需要有一项虚拟化技术来描述云制造资源，让云制造资源使用者能够根据自身需要轻易地通过网络来调用云制造资源。在计算机与网络中，虚拟化是指计算机相关模块在虚拟的基础上而不是真实的独立的物理硬件基础上运行，是一种为了简化管理、优化资源的解决方案。云制造资源虚拟化是指针对所建模型进行分析和研究，有选择地抽取关键的要素，建立能够直观反映云制造资源结构层次的信息模型以及便于计算机存储与处理的数据模型。在制造资源虚拟化过程中，需要对物理制造资源进行统一描述，并提供针对物理制造资源的目录黄页以及名字解析、查询等服务。

本文采用面向对象的方法，按人类认识客观世界的思维方式来识别和定义云制造资源信息实体，将资源实体定义为对象，而对象的属性表示为资源的性质。如下图3.2所示为制造生产加工硬设备的虚拟化模型。



图3.2 制造生产加工硬设备虚拟化模型

2、制造资源服务化

云制造资源提供者通过对虚拟化资源进行服务化封装、发布等操作，形成云服务；然后将云服务发布到服务注册中心，供服务请求者查询和使用。目前较为流行的服务化方法是将制造服务资源发布成Web Service服务，然后统一注册。通常Web Service由WSDL（Web Service Description Language）进行描述，WSDL是一种标准的Web服务描述语言，它从句法层面对Web服务的功能进行描述，包括4个不同的粒度：数据类型（Data type）、消息（Message）、方法（Operation）和访问端口（Port type）。但是WSDL只是提供了Web服务的接口描述，对服务的行为约束和属性描述缺乏进一步的支持。OWL-S（Web Ontology Language for Service）是一种语义Web服务标记语言的标准，它比WSDL更能向用户提供可理解的服务资源的描述形式，提高服务选取与推荐的准确性。OWL-S是利用本体来描述Web服务，然后通过这些带有语义信息的描述实现服务的自动发现、调用和组合。因此，在服务发布阶段需要将服务的WSDL描述形式转换为标准的OWL-S描述形式。

一般地，传统企业在设计生产线时，会同时构建仿真模型，通过仿真模型来发现生产线设计中隐藏的一些问题，并且能得出该种设计方案所能得到的产能，即通过仿真优化生产线设计。同理，仿真方法应用到云制造环境中，能对服务组合方案进行仿真，通过仿真得到仿真指标，进而转化为服务提供者和服务请求者需要的服务评价指标。通过评价指标，服务提供者能够用于优化滋生的服务，提高企业竞争力，而服务请求者能参考评价指标选择出适合的组合服务方案。要把仿真应用到云制造环境中，需要在服务发布阶段将服务所对应的仿真模型信息注入到服务描述文件中。

除此之外，为了支持服务匹配阶段更有效地检索到符合的服务，服务的发布需要服务所对应的实体资源本体的支持。企业用户在发布一个服务前，云制造服务平台需要构建服务的本体，规范化服务所包含的具体模块，确保企业用户在发布服务时能完整地说明服务所包含的各个子模块的属性，以提高服务匹配时的准确率。

## 3.3 云制造服务匹配过程分析

当前，有关服务发现与匹配的研究主要围绕由计算机软件资源形成的Web服务展开，具体包括：

**1、支持服务发现与匹配的描述语言和工具**，如Web服务描述语言（Web Service Description Language，WSDL），统一描述、发现和集成协议（Universal Description, Discovery and Integration，UDDI）注册中心，Web服务本体描述语言（Web Ontology Language for Service，OWL-S）等；

**2、服务发现与匹配框架**，如基于国防高级研究计划局服务代理标记语言(DARPA Agent Markup Language for Service, DAML-S)的服务语义发现框架、基于Agent的服务发现框架、基于语义Web服务端到端管理的服务发现框架（Managing End-To-End Operation for Semantic Web Service, METEOR-S）等；

**3、服务匹配方法**，如基于逻辑推理的服务匹配、基于语义距离的服务匹配、基于语义相似度的服务匹配、基于语义向量的服务匹配、基于粗糙集的服务匹配等。

本文在研究过程中使用OWL-S本体描述语言来对服务资源进行描述，因此在服务匹配过程中，采用了基于Web服务本体描述语言和基于逻辑推理的服务匹配相结合的方式。

在服务发布阶段，OWL-S的Service Profile部分可添加对服务功能信息的描述。服务的功能信息主要是指服务的IOPE：Input、Output、Precondition、Effect，详见2.2.4节。基于OWL-S描述语言的服务匹配方法就是对服务IOPE的匹配。通过服务Input可以对服务的输入参数个数和类型进行匹配，Output对服务的输出类型进行匹配，Precondition对服务执行的前提条件进行匹配，Effect是对服务执行后预期的结果进行匹配。

基于逻辑推理的服务匹配使用了Apache Jena API。Jena是一款开源的Java框架，用来构建语义Web和相应的数据应用，通过Jena的通用规则引擎可自定义规则和逻辑，并根据已有的规则和逻辑实现在OWL文件中的推理式检索。它支持RDFS和OWL等语言，能从实例数据和类型描述中推断出更多的事实内容。Jena推理引擎的总体框架如下图3.3所示。

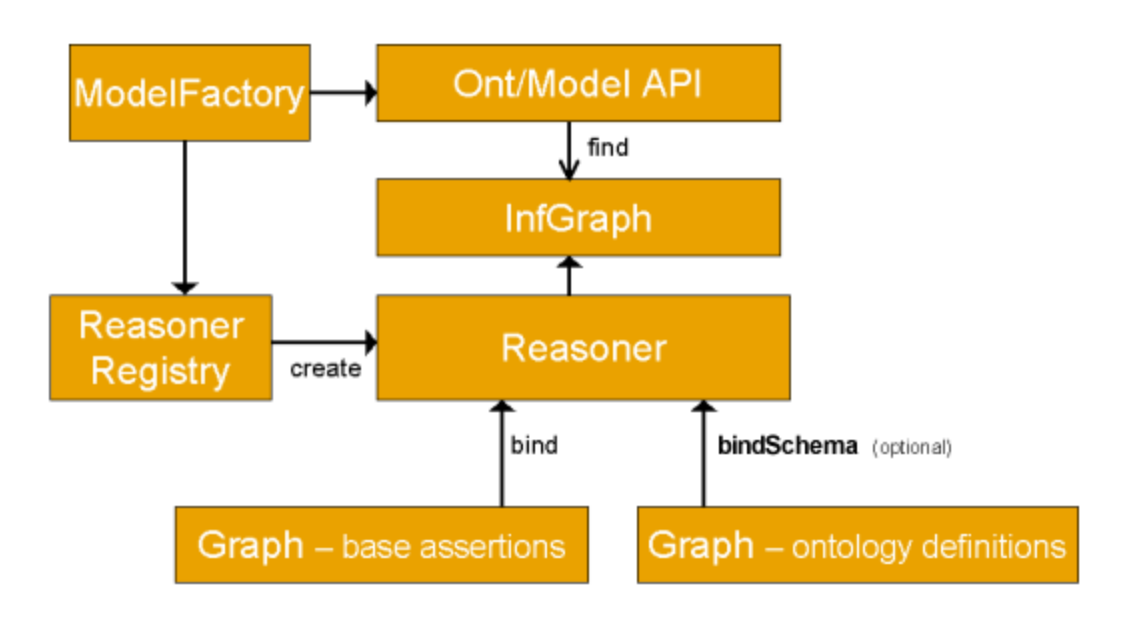


图3.3 推理机总体框架图

App应用通常使用ModelFactory类将数据集和推理机相关联，从而创建一个新的模型。查询新创建的模型不仅会返回原始数据中已有的陈述，而且能得到通过规则额外推导出的陈述。

## 3.4 云制造服务组合和评价过程分析

### 3.4.1 云制造服务组合方法分析

服务组合是按照一定的业务逻辑对现有的服务进行集成。云制造环境下的制造资源服务组合主要包括串联结构（Sequence）、循环结构（Iterate、Repeat-While、Repeat-Until）、选择结构（Choice、If-Then-Else）、并联结构（Split、Split + Join）和无序结构（Any-Order：只要求服务全部执行完，服务与服务之间没有关联关系）五种基本结构，如图3.4所示，其中Si（i=0,1,…,n+1）表示第i个原子服务。



图3.4 云制造环境下的制造资源服务组合基本结构

### 3.4.2 组合服务评价过程分析

在云制造服务组合过程中，各个原子服务都有其对应的OWL-S描述文档，服务组合后会形成一个组合服务的OWL-S描述文档，在该文档中，包含了组成服务组合的原子服务以及其他组合服务的基本信息，同时包含了组合的逻辑控制结构，该文档能够完整描述相应的云制造服务组合。除此之外，在该阶段仿真平台需要读取各个原子服务描述文档中有关仿真模型的内容以及仿真模型各个工位的执行过程，生成组合服务的仿真模型实例。仿真指标将通过特定的公式转换为服务评价指标，这些评价指标会和仿真所得图片一起保存在数据库中，最后云制造服务平台读取评价指标和图片展示给用户。

## 3.5 本章小结

本章主要介绍了云制造服务的一般流程，对本文比较关心的服务发布、服务匹配和服务组合三个过程做了进一步的分析，并提出了面向仿真的服务发布和组合方法。

# 第4章 面向仿真的云制造服务发布和组合方法

## 4.1 制造云服务相关本体构建

信息检索过程中，为了能够更加全面、准确地将检索到的结果信息反馈给用户，在信息检索的时候就需要对检索词进行一定的逻辑语义推理。领域本体的作用是通过已经定义好的本体领域概念结构，来描述领域中各个概念之间存在的各种关系，从而不仅能够结构化服务发布模型和需求模型，而且在检索匹配阶段能够根据概念 之间的关系实现推理式检索。

本文通过对本体语言OWL和建模工具Protégé的研究实现了一个基于本体的查询。Protégé软件是Stanford大学基于Java语言开发的本体编辑和知识获取软件，用于语义网中的本体创建，其提供了本体概念类、关系、属性以及实例的创建，并且屏蔽了具体的本体描述语言。使用Protégé创建本体，首先应该明确领域内概念的定义，清楚领域中包括的基本信息和分类。一个领域中的最基本概念应分别对应于各个分类层次数的根。要定义特定领域的根类，只需将它们声明为一个具名类（named class）即可。分析模块主要借助Jena对Protégé生成的OWL文件进行读取和分析，包括类、实例以及属性等。

云服务本体构建过程主要包括：

（1）明确云服务本体建模的目的、范围。对云服务供需双方进行描述，使服务提供企业更好地展现其资源拥有能力，使服务需求企业详实地描述其需求和约束。

（2）选择云服务本体建模方法。

（3）云服务的合理分类。结合相关国家标准和社会公认的准则对云服务进行合理分类，并统一描述。

（4）云服务的本体元语要素的确定。确定云服务本体的属性、关系、函数、公理、实例等语义表示元素。

（5）云服务本体建模工具选择。采用斯坦福大学开发的Protégé可视化本体建模工具和插件Graphviz来实现。

（6）云服务OWL形式化描述。通过Protégé工具将建立的本体转化为OWL形式化描述语言，并以OWL格式保存本体信息。

对于制造生产加工硬设备，需要构建设备的本体，也就是建立设备及其组成部件之间的关系；对于不可拆分的部件，则需要建立部件及其生产加工能力之间的本体。本体构建完成后保存在RDF4J数据库中，下文的服务发布、需求发布与分解都需要按照统一的本体来执行。

本文所建立的企业本体如下图4.1所示。首先，企业本体需要具有一些基本信息，如该企业所处地址、企业的联系方式等，以便服务请求者能找到该企业并建立联系；其次企业本体中定义了企业所具有的制造能力和产品，它们分别定义了基本信息。产品具有制造工艺和装配工艺，制造工艺是指加工生产出这个产品所需的工艺步骤，产品的制造工艺由部分制造能力组合而成，而装配工艺是指由其它产品或零件组装成该产品所需的工艺步骤。下图4.2是在Protégé中定义的企业本体，定义好本体后可以生成RDF/OWL文件，并保存在图数据库中。



图4.1 企业本体



图4.2 企业本体Protégé导出图

## 4.2 面向仿真的云制造服务发布方法

资源提供者为了向云制造运营平台（制造云运营者）发布服务（即公开自己所能共享的制造资源服务或制造能力服务），需要以某种标准的形式来对云制造服务进行描述。目前常用的一种标准格式就是符合OWL-S规范的服务描述方法。云制造服务的发布就是资源提供者把自己的制造服务按照某种标准格式，形成云制造服务描述文件，把这个文件传输给云制造运营平台，由云制造运营平台进行发布的过程。

本论文中，云制造服务描述文件中包含了仿真信息，图4.3展示了包含仿真信息的云制造服务描述文件的构建方法，该方法包括以下步骤：

1）将实体制造资源或制造能力进行服务抽象，获得制造服务模型；

2）将实体制造资源或制造能力进行仿真抽象，获得仿真模型；

3）将仿真模型与制造服务模型进行结合，形成包含仿真信息的云制造服务描述文件。

资源仿真模型

包含仿真信息的云制造服务描述文件（基于扩展的OWL-S规范）

服务发布/仿真信息添加

制造服务模型

实体制造资源或制造能力

服务抽象

仿真抽象

图4.3 云制造服务描述文件的构建方法

### 4.2.1 云制造服务的服务抽象方法

云制造服务的服务抽象就是将物理的制造资源抽象化成符合Web Service表示规范的过程。如图4.4为云制造服务的服务抽象过程，首先需要明确实体制造资源或制造能力的概念，用对应的数据结构将实体资源数据化表示；其次，通过面向对象的思想将实体制造资源或制造能力封装成类；最后，通过JAX-WS框架，根据类信息生成WSDL文档，WSDL（Web服务描述语言）对制造资源与制造能力进行描述，形成制造资源或制造能力的一个WSDL文件。

分析实体资源特征

将实体资源数据化表示

将实体资源封装成类

使用JAX-WS，根据类的信息生成WSDL文档

制造服务模型（基于WSDL规范的描述文件）

图4.4 服务抽象过程

### 4.2.2 云制造服务的仿真抽象方法

云制造服务的仿真抽象是通过传统仿真建模的方法将制造资源映射为仿真平台的仿真模型。一般而言，对于制造资源或制造能力，用基于离散事件仿真的思想构建仿真模型是比较常见的。该阶段将制造资源划分为加工工位粒度、生产线粒度、车间粒度，不同粒度的制造资源映射为相应的仿真对象。企业需要在发布服务的同时，会根据服务特征将制造云服务映射为仿真对象，并提供包含所有服务的仿真对象库。制造云平台运营者会抽取仿真对象信息并构建资源仿真模型。这个过程就是把制造资源或制造能力抽象成仿真模型的过程，如图4.5所示。

分析制造资源或制造能力特征

根据仿真平台特点，建立制造资源或制造能力对应的仿真对象

选择合适的仿真平台，如Plant Simulation

资源仿真模型（基于XML规范的描述文件）

抽取仿真对象要素，构建XML格式的描述文件

图4.5 仿真抽象过程

### 4.2.3 制造服务模型与仿真模型的组合方法

服务发布，是把制造服务模型和仿真模型组合起来，形成云制造服务平台上统一的云制造服务描述文件的过程，如图4.6，其主要包括两步：

1）将制造服务模型（一般为基于WSDL规范的描述文件）转换为更利于扩展和推理的OWL-S描述，提取WSDL文件中各服务的名称、参数、数据类型等信息，并以此为基础构建基于OWL-S规范的描述文件。

2）将仿真模型加入到对应服务的OWL-S描述文件中，可在OWL-S的grounding节点中扩展一个名为“SimInfo”的节点用于记录仿真模型信息。形成包含仿真信息的云制造服务描述文件（基于扩展OWL-S规范的描述文件）。具体步骤如图4.7所示，主要包含以下步骤：

① 根据OWL-S文件的规范，找到OWL-S文件的<grounding:WsdlGrounding>节点

② 在该节点下，添加<grounding:SimInfo>节点，即一个<grounding:SimInfo> </grounding:SimInfo>标记对。

③ 在<grounding:SimInfo>和</grounding:SimInfo>标记中间，插入该服务对应的仿真模型，即符合XML格式的描述文件内容。

制造服务模型（基于WSDL规范的描述文件）

将WSDL描述文件转换为OWL-S描述文件

基于OWL-S规范的描述文件

仿真信息加入到OWL-S描述文件

资源仿真模型（基于XML规范的描述文件）

包含仿真信息的云制造服务描述文件（基于扩展OWL-S规范的描述文件）

图4.6 服务发布步骤图

在基于OWL-S描述文件中找到<grounding:WsdlGrounding>节点

完成，形成包含了仿真信息的云制造服务OWL-S文档

在该节点下，添加一个<grounding:SimInfo>节点

把该对象对应的仿真模型，即XML描述文件，添加到<grounding:SimInfo>节点中。

图4.7 仿真信息的添加

## 4.3 云制造服务匹配方法

### 4.3.1 需求发布与匹配

需求发布，就是资源使用者发布自己的云制造服务需求，将制造服务需求通过统一描述模板发布至云制造运营平台。例如，加工某批产品、需要完成某个设计等等。

服务匹配，是根据资源使用者发布的服务需求，找到某个服务，为其提供云制造服务的过程。

在云制造系统中，根据用户需求或任务粒度，可以将用户需求分为单一资源服务需求任务和多资源服务需求任务。由于制造活动一般需要多个步骤来完成，因此在云制造服务执行过程中，更多的是多资源需求任务。多资源服务需求是指要完成一个制造加工任务，需要多种云制造服务按照一定的组合次序，依次执行共同完成。

由于云制造平台上服务众多，需要在海量的服务中选择符合客户需求的服务，形成服务组合。这个过程一般是用户在（云制造服务平台上）发布需求之后。用户的需求一般为制造生产加工硬设备或生产加工能力。若需求为制造生产加工硬设备，则需进行一下几步匹配操作：

1）根据用户在云平台上发布的需求设备类型和参数进行匹配；

2）若第一步没有匹配项则根据该设备的本体对发布的需求进行分解，得到多个部件需求（这些部件能装配成制造生产加工设备）；

3）针对每个部件需求分别在云平台中进行匹配操作；

4）若第三步中某部件没有匹配项，则根据部件的加工工艺本体，将该部件需求分解为多个生产加工能力需求（这些生产加工能力能生产出该部件）；

5）根据每次匹配操作的结果得到各个候选集合，完成匹配操作；

具体流程如图4.8所示。



图4.8 云制造服务匹配过程

### 4.3.2 基于Jena的推理检索

企业发布的服务存储在图数据库RDF4J中，使用Jena API可以通过编写SPARQL语句查询RDF4J中的数据。此外，通过建立本体规则库可以实现推理检索。

本体的推理规则库是有一条条规则组成的。每条规则由主体（body）和头（head）组成，一条规则可以有一个主体和一个头。如以下语句定义了一条规则：

[rule1:(?a fa:canMachining ?b)(?b fa:containPart ?c)->

(?b fa: canMachining ?c)]

其中规则的主体为：?P fa:canMachining ?b，?P fa: containPart ?c，头为：?P fa:canMachining ?c，也就是说有由主体可以推导出头。标准的本体规则库如下所示：

|  |
| --- |
| @prefix fa: <http://www.semanticweb.org/ontologies/2010/0/family.owl#>.@include <RDFS>.@include <OWL>.  [rule1: (?P fa:canMachining ?c1)(?P fa:contains ?c2)->(?P fa:canMachining ?c2)]  [rule2: (?P fa:hasProduct ?p1)(?P fa:containPart ?p2)->(?P fa:hasProduct ?p2)] |

规则1表示企业P能提供加工能力c1，加工能力c1包含加工能力c2，则能推导出企业P能提供加工能力c2；规则2表示企业P能生产产品p1，而产品p1包含部件p2，则能推导出企业P能生产产品p2。

## 4.4 云制造服务组合方法

在经过云制造服务的供需匹配之后，根据制造加工的次序，可以从每个子任务的待选云制造服务集合中选择一个服务，形成能完成这个加工需求的服务组合。本文中使用OWL-S来描述组合服务。

OWL-S文档结构的Service Model中定义了三种过程，其中：

原子过程是不可再分的过程，即其没有子过程，并可以被直接调用。类似数据库中的事务，原子过程要么全部执行，要么全部不执行。当服务过程为该类型过程时，必须给其提供Service Grounding信息。

简单过程不能被直接调用，也不与某个Service Grounding相关联。简单过程可以被用来提供原子过程的视图，或者对复合过程进行简化表示。

组合过程是可以被拆分为其他原子或组合过程的过程。组合过程的定制主要通过OWL-S的控制构造（如Sequence，Split等），将被组合的制造服务有序地封装起来，形成一个逻辑上的整体。OWL-S本体模型中的控制结构主要包括：Sequence，Split，Split + Join，Any-Order，Choice，If-Then-Else，Iterate，Repeat-While，Repeat-Until。此类结构可以用来控制服务的组合过程，如Split表示一个分离过程的所有子过程组成一个需要同时执行的过程包，一旦所有子过程都执行完毕，该分离过程也完成，它主要用于定义需要同步执行的子过程。

控制构造符（Control Constructs）如表4.1所示。

表4.1 控制构造符

|  |  |
| --- | --- |
| 控制构造符 | 描述 |
| Sequence | 一组顺序执行的过程 |
| Split | 一组可以同时执行的过程 |
| Split + Join | 一组存在部分同步的过程 |
| Any-Order | 一组不指定执行顺序，但是必须全部执行完毕的过程 |
| Choice | 一组可以在其中选取若干过程进行执行的过程 |
| If-Then-Else | 一组根据条件选择执行的过程 |
| Iterate | 一组迭代执行的过程 |
| Repeat-While，Repeat-Until | 一组在特定条件下反复执行的过程 |

服务组合步骤如图4.10所示，包括以下几步：

1）首先读取各个原子服务的OWL-S描述文件以待后续组合。创建基本的OWL-S文件结构，生成OWL-S的Service、Profile、Composite Process、Grounding节点。

2）选择合适的组合服务执行过程（顺序、循环、选择、并行等）组合原子服务，创建组合服务执行过程的输入输出。

3）根据组合服务执行过程设置Profile（将组合过程的输入输出信息添加到Profile），并往Profile中添加对该组合服务的描述信息。

4）读取各原子服务的Grounding节点信息，并添加到组合服务的Grounding节点中。

读取各原子服务OWL-S描述文件

创建OWL-S基本模块（Service、Composite Process、 Profile、Grounding）

往process节点写入组合服务的Composite Process信息

往profile节点写入组合服务的Profile信息

往grounding节点写入组合服务的Grounding信息

组合服务的OWL-S描述文件

图4.10 服务组合步骤

## 4.5 本章小结

本章首先对制作云服务中的相关本体进行建模。本体是后续服务发布和服务匹配的基础。同时重点介绍了面向仿真的云制造服务发布方法，以及基于推理的服务匹配方法，并对服务组合步骤进行了详细说明。

# 第5章 基于仿真的云制造组合方案的评价

## 5.1 云制造组合服务评价指标分析

在服务组合阶段，用户可能会选择形成多个服务组合，然后用某种评价方法对待选的服务组合进行评价，根据评价指标的优劣选择一个最佳的服务组合，作为自己的服务优选。

### 5.1.1 服务需求方评价指标体系

服务需求方希望从众多的云制造资源中选择出最佳的服务，这就需要综合全面的考虑QoS性能指标。QoS属性值可以通过实时用户反馈、历史数据分析来得到，一般为服务需求方关注的指标。论文借鉴国内外现有对QoS的研究成果，将QoS指标定义为：（成本，时间，质量 ，服务可靠性，服务可用性，服务诚信度），解释如下：

**1. 时间（Time，T）**

服务的执行时间T，即从服务请求者发起调用，到最终得到服务执行结果的时间，反映的是服务的及时性、响应性、有效性。T由三部分构成：准备时间Tp、生产制造时间Tm和物流运输时间Tl， 即T = Tp + Tm + Tl，该值应表示为精确数值型。

**2. 成本（Cost，C）**

服务的成本C，即服务请求者调用服务必须支付的费用，C由两部分构成：生产制造成本Cm和物流运输成本Cl， 即C = Cm + Cl，该值应表示为精确数值型。

**3. 质量（Quality，Qua）**

服务的质量Qua，反应的是服务的功能性（功能完备性、功能充分性）、安全性（完整性、保密性）等。该值表示为语言型数值，是集合S = {绝对好，很好，好，较好，中好，一般，中差，较差，差，很差，绝对差}中的一个元素。

**4. 服务可靠性（Reliability ，Rel）**

服务可靠性Rel，指服务能够正确响应的比率，Rel = l/p，其中，l表示成功执行的次数，p表示一共执行的次数。由于网络具有动态性和执行环境的不确定性，该值表示为区间型数值。Rel = ［RelL，RelU］，RelL（Reliability Lower Limit）为可靠性的下限，RelU（Reliability Upper Limit）为可靠性的上限。

**5. 服务可用性（Availability，Ava）**

服务可用性Ava，即Web服务在某段时间内可用的概率，Ava = m/n，其中，m为在一段时间内服务可用的次数，n为访问的总次数，该属性的类型为精确数值型。

**6. 服务诚信度（Reputation，Rep）**

服务信誉度Rep，该值为服务需求方使用服务后，对服务可信程度的反馈评价。该值表示为语言型数值，是集合S = {绝对好，很好，好，较好，中好，一般，中差，较差，差，很差，绝对差}中的一个元素。

### 5.1.2 服务提供方评价指标体系

**1. 时间指标**

论文将时间指标定义为：（初始加工时间，生产周期，完工时间 ，准备时间，物流时间），解释如下：

**（1）初始加工时间（Initial Processing Time，IPT）**

一条生产线的初始加工时间IPT，是该生产线中，每个加工工位在稳定工作状态下完成一项加工任务的加工时间总和。即在生产线处于稳定状态以及无等待的情况下，待加工的原材料从进入生产线到成为成品离开生产线这个过程的所用的时间，IPT = Pn - P0，其中，P0表示在生产线处于稳定状态以及无等待的情况下，某待加工原材料进入生产线的时间，Pn表示改该原材料成为成品离开生产线的时间，该值为精确数值型。

**（2）生产周期（Cycle Time，CT）**

一条给定生产线的生产周期CT，是指一个生产任务从该生产线的第一个站点进入开始加工，到从该生产线的最后一个站点被加工完以后退出的整个过程的平均加工时间，也就是被加工物料作为在制品的这段时间。CT = N/TOT，其中，N表示给定生产线的完工数量，TOT表示给定生产线的完工时间，该值为精确数值型。

**（3）完工时间（Total Completion Time，TCT）**

在给定的完工数量N下，整条生产线完成加工的时间TCT，该值为精确数值型。

**（4）准备时间（Set-up Time，ST）**

生产线开始运行之前，材料、人工、设备等需要的准备时间总和（ST），该值为精确数值型。

**（5）物流时间（Logistics Time，LT）**

在制品以及成品从初始地点运输到目的地点的物流时间总和（LT）。LT = LTWIP + LTFP，其中，LTWIP表示给定生产线所有在制品物流时间总和，LTFP表示给定生产线所有成品的物流时间总和，该值为精确数值型。

**2. 能力指标**

论文将能力指标定义为：（完工数量，生产线瓶颈率，单位时间生产量，临界在制品库存，资源状态，资源效率，资源产能，资源负荷，资源类型），解释如下：

**（1）完工数量（Number，N）**

完工数量N，是指在给定的生产周期CT下，整条生产线完成加工的产品数量，该值为精确数值型。

**（2）生产线的瓶颈率（Bottleneck Rate，RB）**

一条生产线的瓶颈率RB，是指该生产线中长时间处于最高利用率的工位（瓶颈工位），每单位时间所生产的零件数或完成的任务数M，该值为精确数值型。

**（3）单位时间生产量（Throughput，TH）**

单位时间生产量TH，是指一个生产系统机器、站点、生产线等在一个单位时间的平均产出，该值为精确数值型。在一个由许多站点组成的流水生产线上，所有产品都经过每一个站点只有一次，所以每个站点的生产量是相同的。

**（4）临界在制品库存（Work in Process，WIP0）**

在制品库存WIP，是指生产过程中，生产线的起点和终点之间的库存总和。由于生产线的起点和终点都是存储点，所以在制品库存是生产线起点和终点之间所有待加工和正在加工的产品的总和。一条生产线的临界在制品库存（WIP0）是指在确定的生产线瓶颈率和初始加工时间的基础上，在没有可变性的条件下，生产线所能达到的最大的生产量。WIP0 = RB \* IPT，其中，RB为生产线瓶颈率，IPT为初始加工时间。

**（5）资源状态（Resource Status，RS）**

资源状态RS分为工位资源状态和工件资源状态。

①.工位资源状态（Station Resource Status，SRS）

工位资源状态SRS，是指某个工位在给定的生产周期下，工作、等待、阻塞、失败等各种状态占整个工位工作时间的比例。

②.工件资源状态（Entity Resource Status，ERS）

工件资源状态ERS，是指某个工件从该生产线的第一个站点进入开始加工到从该生产线的最后一个站点被加工完以后退出的整个过程中，生产、运输、存储等各种状态占整个工件生命周期的比例。

**3. 能耗指标**

论文将成本指标定义为：（能源消耗状态，能源效率），解释如下：

**（1）能源消耗状态（Energy Consumption Status，ECS）**

能耗状态ECS的评估，是对制造系统消耗的能量种类、数量及层次结构状态进行分析，李先广等[88]建立了基于Petri网的机床制造过程碳排放模型。朱理等[89]提出了流程行业制造执行系统的KPI概念定义和评价体系，以石化行业能源消耗的应用实例，对流程行业的综合能耗进行有效评估。

**（2）能源效率（Energy Efficiency，EE）**

能源效率EE的评估，是考察制造系统的有效能量产出与总能量输入之间的比例关系。Dahmus和Gutowski[90]通过在加工中心、自动铣床和手工铣床等不同类型机床上的能耗实验，提出材料切削消耗的能量实际上可能占整个机床运行能耗很小一部分。Rajemi等[91]以车削为例，单个车削加工工艺的能量消耗由准备能耗、切削能耗、换刀能耗和刀具内含能耗四部分组成。

**4. 成本指标**

论文将成本指标定义为：（加工成本，运输成本，管理成本），解释如下：

**（1）加工成本（Processing Cost，PC）**

加工成本PC，是指产品从开始生产到完成加工的整个过程涉及到的材料成本、机器成本等的总和，该值为精确数值型。

**（2）运输成本（Logistics Cost，LC）**

运输成本LC，是指在制品以及完工之后的成品从初始地点运输到目的地点的物流成本，该值为精确数值型。

**（3）管理成本（Administration Cost，AC）**

管理成本AC，是指从开始接单到产品完整运输到目的地点的整个过程涉及到的人力成本等的总和，该值为精确数值型。

**5. 质量指标**

论文将质量指标定义为：（产品质量，管理质量），解释如下：

**（1）产品质量（Product Quality，PQ）**

产品质量PQ，反应的是产品的好坏。该值表示为语言型数值，是集合S = {绝对好，很好，好，较好，中好，一般，中差，较差，差，很差，绝对差}中的一个元素。

**（2）管理质量（Administration Quality，AQ）**

管理质量AQ，是对订单过程中管理人员管理质量的评定。该值表示为语言型数值，是集合S = {绝对好，很好，好，较好，中好，一般，中差，较差，差，很差，绝对差}中的一个元素。

## 5.2 仿真指标的转换

仿真指标是指服务组合的仿真模型建立并在仿真平台内执行后得到的结果指标，该指标与服务提供方关注的指标很大程度上是一样的，同时对于服务需求方来说，仿真得到的指标需要进行一定转换才能形成其需要的指标体系。论文建立不同指标之间的转换关系如表3.2，表中斜线部分表示无对应的指标转换关系。

表3.2 指标转换关系表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 仿真得到的指标 | 服务提供方关注的指标 | 服务需求方关注的指标 |
| 完工时间TCT | 完工时间TCT | 时间T  T = TCT + ST + LT |
| 准备时间ST | 准备时间ST |
| 物流时间LT | 物流时间LT |
| 完工数量N | 完工数量N |  |
| 某原材料进入生产线时间P0 | 初始加工时间IPT  IPT = Pn - P0 |
| 某原材料退出生产线时间Pn |
| 完工时间TCT | 生产周期CT  CT = TCT /N |
| 完工数量N |
| 瓶颈工位完成的任务数M | 生产线的瓶颈率RB  RB = M/TCT |
| 完工时间TCT |
| 完工数量N | 单位时间生产量TH  TH = N/TCT |
| 完工时间TCT |
| 瓶颈工位完成的任务数M | 临界在制品库存WIP0  WIP0 =RB \* IPT  = （M/TCT）\*（Pn - P0） |
| 完工时间TCT |
| 某原材料进入生产线时间P0 |
| 某原材料退出生产线时间Pn |
| 工位资源状态SRS | 工位资源状态SRS |
| 工件资源状态ERS | 工件资源状态ERS |
| 能源消耗状态ECS | 能源消耗状态ECS |
| 能源效率EE | 能源效率EE |
| 完工时间TCT | 加工成本PC=TCT\*PCU | 成本C  C = PC + LC + AC |
| 物流时间ST | 运输成本LC=ST\*LCU |
| 完工时间TCT | 管理成本AC=TCT\*ACU |
|  | 产品质量PQ | 质量Qua  Qua = PQ + AQ |
| 管理质量AQ |
|  | 服务可靠性Rel |
| 服务可用性Ava |
| 服务诚信度Rep |

需要说明以下参数：

1. 每小时加工成本（Processing Cost Unit，简称“PCU”），PCU=1000元/H。

2. 每小时物流成本（Logistics Cost Unit，简称“LCU”），LCU=1000元/H。

3. 每小时管理成本（Administration Cost Unit，简称“ACU”），ACU=100元/H。

4. 物流速度（Logistics Speed，简称“LS”）LS=50KM/H。

5. 物流距离（Logistics Distance，简称“LD”）视服务供需双方的具体距离而定。

## 5.3 仿真平台执行评价

### 5.3.1 仿真平台对OWL-S文件的读取

云平台上的云制造服务组合由OWL-S文档描述，建立仿真平台内的仿真模型，需要实现OWL-S格式的语义模型到仿真模型的转换，对于OWL-S文档读取到仿真系统中，可以采用以下方法：

1. 利用仿真平台的XML解析器直接读取。由于OWL-S文档本质上是XML格式的文档，而很多仿真平台为了仿真数据读取与仿真结果的输出等操作，会自带XML的解析器，此时可以通过该解析器获取OWL-S文档，并取得包含构建仿真模型所需信息的节点值，从而实现模型的自动构建。

2. 利用.net、Java或者其他语言将OWL-S文档转换为仿真平台能够读取的中间格式。如果仿真平台没有自带XML解析器，可以根据平台特点，利用某种特定的语言，将文档转换成仿真平台能够读取的某种中间格式。例如，可以通过特定语言将OWL-S文档中的服务组合信息存入SQLite数据库或者ODBC数据库等，仿真平台再通过数据库接口获取信息，从而实现模型的自动构建。

在OWL-S文档中，构建仿真模型所需的服务组合信息都保存在Service Grounding下的SimInfo节点中，该节点下的Sequence节点中保存了组合服务方案中各个原子服务的执行顺序，SimInfo节点下的SimObject节点中保存的是各个原子服务的名字、类、属性、方法等信息。通过读取这些信息，仿真平台可以自动构建仿真模型。

### 5.3.2 服务组合评价指标的反馈

所谓指标的反馈，即仿真平台完成生产线的建模与仿真，将得到的仿真指标结果转换成服务组合的指标结果之后，需要将其返回给云平台展示，以供服务提供方和服务需求方分别查看各自关注的指标。关于评价指标返回的形式，需要考虑一下几点：

1. 所选用的仿真平台能够输出该种返回格式；

2. 云平台能够解析该种格式并进行正确展示；

3. 指标的展示形式可能是文字、数值、表格、图片等类型，所选格式应能够表示以上类型。

综上考虑，由以下中间形式可以实现：

1. **XML文件格式**

仿真平台可以将仿真的各类指标进行转换后，写入一份XML格式的文档中，云平台利用Java、JavaScript、PHP等语言可以直接读取并操作该文档，解析出所需要的数据并进行归类展示。

1. **数据库格式**

仿真平台可以将仿真的各类指标结果存入SQLite、ODBC等数据库中，云平台可以直接从数据中读取数据并进行归类展示。

1. **Excel表格形式**

仿真平台可以将仿真的各类指标结果存入外部Excel表格中，云平台可以直接从指定路径下的表格中读取数据并进行归类展示。

考虑云平台是基于Web开发的软件，[Web服务](https://www.baidu.com/s?wd=Web%E6%9C%8D%E5%8A%A1&tn=44039180_cpr&fenlei=mv6quAkxTZn0IZRqIHckPjm4nH00T1Y3nHfYnvN-PWuWnh7bmyD10ZwV5Hcvrjm3rH6sPfKWUMw85HfYnjn4nH6sgvPsT6KdThsqpZwYTjCEQLGCpyw9Uz4Bmy-bIi4WUvYETgN-TLwGUv3EPHmsnWmsrjRsrjnsnjDdnWfY)能让使用不同系统和不同编程语言的人们能够相互交流和分享数据，其基础在于[Web服务](https://www.baidu.com/s?wd=Web%E6%9C%8D%E5%8A%A1&tn=44039180_cpr&fenlei=mv6quAkxTZn0IZRqIHckPjm4nH00T1Y3nHfYnvN-PWuWnh7bmyD10ZwV5Hcvrjm3rH6sPfKWUMw85HfYnjn4nH6sgvPsT6KdThsqpZwYTjCEQLGCpyw9Uz4Bmy-bIi4WUvYETgN-TLwGUv3EPHmsnWmsrjRsrjnsnjDdnWfY)器用XML在系统之间交换数据。因此XML格式对云平台来说使用更加友好，因此，论文选择第一种方法，即将仿真的结果指标信息导出为外部的XML格式的文件，供云平台解析使用。

## 5.4 本章小结

本章首先对服务提供方和服务需求方所需的评价指标进行分析，进而给出了仿真指标转换位服务评价指标的具体算法。同时介绍了仿真平台读取OWL-S服务描述文件的方法以及服务组合评价指标输出的方法。

# 第6章 原型系统的设计和案例验证

## 6.1 云制造服务原型系统的设计

### 6.1.1 云制造服务平台一般流程

云制造服务平台的设计思想是：在云平台中把复杂的企业需求转变为企业订单服务和流程管理服务，即使企业用户访问不同企业的制造服务资源，也只需登录一次，就可以对所有已发布的制造服务资源进行搜索匹配，从而进行无缝访问，最终获取所需要的制造服务资源。

云制造服务平台的一般工作流程如下：

1. 企业用户初次访问云制造服务平台，提交企业用户信息进行注册，同时根据注册信息对企业信用进行初始评估。

2. 身份验证。如果成功注册，则返回用户账号，进入云制造系统；如果失败，则回转至注册页面重新注册。

3. 登录后企业用户首先在云平台中发布制造服务资源信息（服务提供方信息）或者需求信息（服务需求方信息），同时定制本企业参与云制造服务的业务流程。

4. 服务需求方通过关键字进行制造服务资源搜索，通过供需智能匹配引擎找到服务能力匹配、报价合理、交通方便、信用较高的服务提供方。

5. 服务需求方提交订单到云制造系统，并与服务需求方签订线下合同；云制造系统接受订单。

6. 云制造系统对订单进行跟踪和管理，引导供需双方按照业务流程规则完成在线支付、进度反馈、交货验收和交易评价等交易全过程。企业用户可随时登录系统，查询交易进度和订单状态，并根据提示处理未完成订单。

云制造服务平台的服务资源发布流程和服务需求检索流程如图6.1所示。无论是服务需求方，还是服务提供方，都需要在云平台上完成企业的注册与验证工作。由于在初始状态下，没有历史数据能够体现企业的信用，所以由云平台完成对企业的身份审核和初始信用评估。通过以上审核的企业能够在云平台上发布制造资源服务或者通过检索来使用服务，服务的发布和检索通过云平台的智能匹配引擎实现功能供需匹配，进入交易任务流程管理。服务执行完成后，服务供需双方可以在云平台上完成对服务执行过程的评价工作，至此，服务执行结束。



图6.1 服务需求检索流程和服务资源发布流程图

### 6.1.2 原型系统功能设计

原型系统总体功能设计如下图6.2所示。

用户层的作用是由企业用户发布服务需求。交易层描述了云平台的主要执行流程，包括服务检索、服务组合、服务提交、服务执行跟踪和信用评价。

平台模块层由云平台主要功能模块组成。服务发布模块包括产品发布为服务和制作能力发布为服务，主要负责上传Web Service URI，结构化服务发布内容，服务提供者通过该模块将制造资源或制造能力进行发布。服务匹配模块包括基于OWL-S本体描述语言的服务检索和基于Jena的推理检索，此外若用户当前需求没有匹配项，服务匹配模块会对需求进行分解，分别检索需求子任务。服务组合模块是对服务匹配的结果的优选和组合，服务请求者会选择合适的原子服务，若单个原子服务无法满足服务请求者的需求，可从多个候选服务集中各选取出一个原子服务进行组合，组合服务方案同样由OWL-S描述。仿真平台可以读取组合服务的OWL-S文档，解析出其中的仿真信息并构建仿真模型，仿真模型执行后产生的仿真指标保存在MySQL数据库中。服务评价模块会读取MySQL中的仿真指标信息并将其转换为服务评价指标展示在云制造服务平台中。权限管理模块主要是针对不同的企业用户而设计，注册用户在登陆云平台时，会根据用户注册权限显示不同内容，比如注册用户为服务请求者，则无法进行服务发布操作。用户注册信息管理模块主要是负责管理企业用户注册时的相关信息，这些信息保存于MySQL数据库中。

数据库采用了图数据库RDF4J和关系数据库MySQL。服务发布模块、服务匹配模块和服务组合模块对接到RDF4J数据库，即将OWL-S描述的服务信息保存在图数据库RDF4J中，而用户信息、评价指标信息、权限信息则保存在关系数据库MySQL中。将数据分两类数据库进行存储主要是考虑到RDF4J数据库基于NoSQL进行设计，在文档的存储方面较为便捷，同时可支持基于Jena的推理检索。

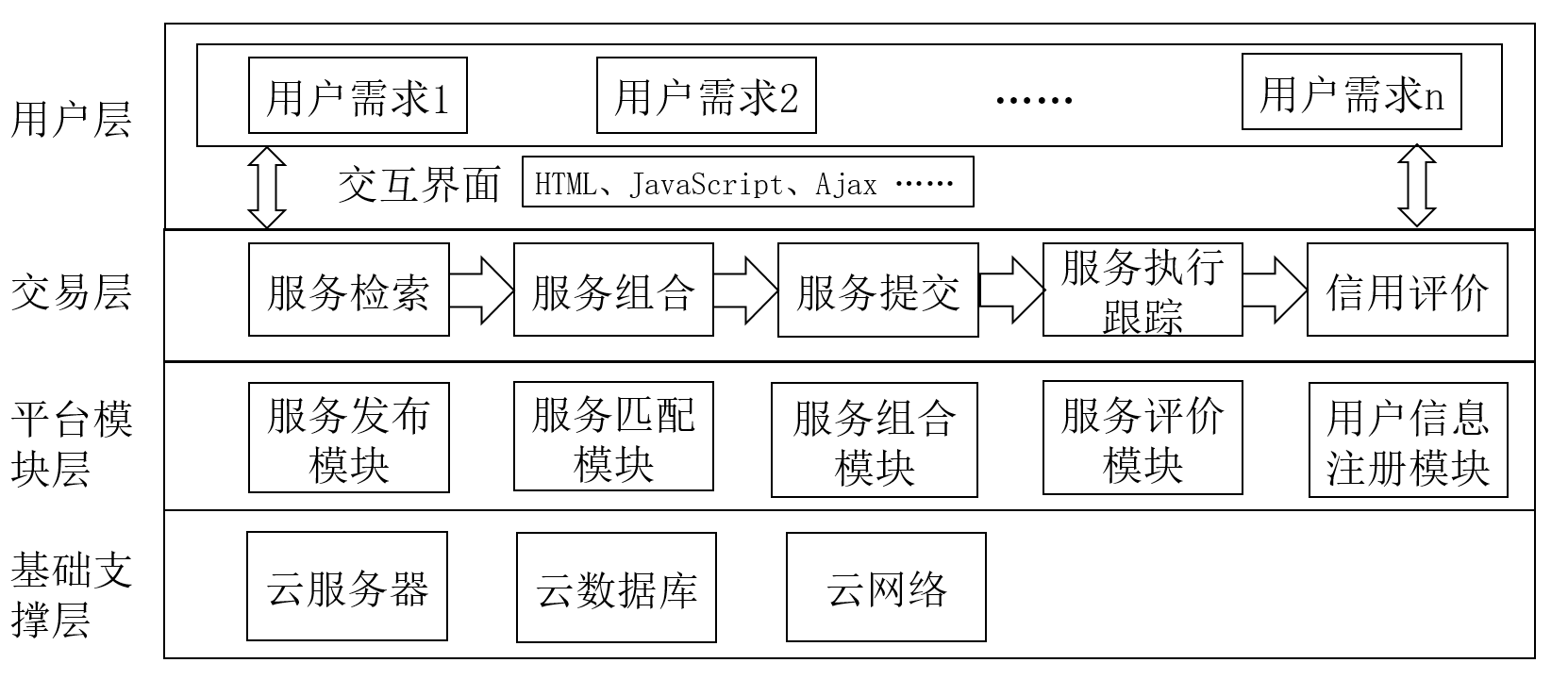


图6.2 原型系统功能框架

## 6.2 总体案例背景

案例以某数控机床产品加工为背景，介绍基于Plant Simulation的云制造服务组合执行过程评价的仿真实现方法，并针对整体流程中的关键步骤进行详细介绍，旨在验证仿真的方法对云制造服务组合执行过程评价的有效性和适用性。

案例中，在云平台上，有多家服务提供方，例如上海机床加工厂、杭州机床加工厂等，提供方可以在云平台上发布所能提供的产品服务及能力服务；案例中涉及到的产品均为机床加工相关的零部件，例如床身、床鞍、床头箱等；作为服务需求方的企业，可以在该平台上进行服务需求的发布来检索相关的服务，匹配后的服务形成列表供服务需求方选择并进行组合；组合后的意向方案会在仿真平台内建立生产线模型，仿真执行后将仿真结果返回给云平台展示，以供服务提供方和服务需求方查看，作为是否确定最终合作意向的参考。

### 6.2.1 案例工作流程介绍

论文设计案例工作流程如图6.3所示，其中包含三个阶段：供需匹配阶段、服务组合阶段、意向服务组合评价阶段，其中：

供需匹配阶段：供需匹配阶段包括服务发布和需求发布。服务提供方在服务发布页面，发布以下七种产品服务：主轴、床身、床头箱、床鞍、三座、尾座、滑板。包括生成包含仿真信息的OWL-S服务描述文档以及提供服务的Web Service接口。服务需求方在服务检索组合页面发布任务需求，通过云平台的智能匹配引擎，给出功能匹配的服务列表。

服务组合阶段：服务需求方在待选列表中，手动选择服务并按需形成意向服务组合，组合后的服务 形成OWL-S描述文档并进入待仿真列表。

意向服务组合评价阶段：仿真平台读取待仿真列表中组合服务的描述文档，解析形成仿真模型，执行并给出仿真指标以及转换后的云服务组合评价指标，该指标返还给云平台进行展示，作为服务供需双方是否确定最终合作意向的决策支持。

该案例以数控机床产品的加工为背景，而数控机床主要由主轴、床身、床头箱、床鞍、三座、尾座、滑板等组成，因此案例中包含以上七种产品。

图6.3 案例工作流程图

### 6.2.2 典型产品及服务介绍

案例中定义七种典型产品：主轴、床身、床头箱、床鞍、三座、尾座、滑板，每种产品基本包含毛坯加工环节、粗加工环节、精加工环节、检验打标环节等，其具体的工艺流程如表6.1所示。

表6.1 产品加工生产线工艺流程表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **产品生产线** | **加工环节** | **具体工艺流程** |
| 主轴加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->正火->铣->钻 |
| 粗加工 | 粗车小外圆->粗车大外圆->钻深孔->调质->粗磨外圆基准->粗镗内孔 |
| 精加工 | 半精车外圆->半精车锥孔->高频淬火->精车外圆基准->精磨孔口->精车切槽->镗通孔->热处理->精车螺纹->精磨锥面 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 床身加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->时效->划线 |
| 粗加工 | 粗铣->时效 |
| 精加工 | 精铣底面及背面->半精铣导轨面->自然时效->精铣导轨面->钳工 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 床头箱加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->时效->划线 |
| 粗加工 | 粗铣->粗镗->时效 |
| 精加工 | 精铣底面->精镗孔->钳工 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 床鞍加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->时效->划线 |
| 粗加工 | 粗铣底面->粗铣顶面->粗镗->时效 |
| 精加工 | 精铣顶面->精铣底面->精镗->钳工 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 三座加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造 |
| 粗加工 | 铣及钻->镗及钻 |
| 精加工 | 精镗->锪孔 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 尾座加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->划线 |
| 粗加工 | 粗铣->粗镗->时效 |
| 精加工 | 精铣及钻及攻->精镗及钻及攻->钻及钳->珩磨 |
| 检验打标 | 检验打标 |
| 滑板加工  生产线 | 毛坯加工 | 锻造->时效->划线 |
| 粗加工 | 粗铣->粗镗->时效 |
| 精加工 | 半精车->磨->精铣及钻攻->镗及精铣及钻攻->钳工 |
| 检验打标 | 检验打标 |

### 6.2.3 服务提供方介绍

案例中服务提供方划分为两个区域：华东地区和东北地区，每个区域有三个机床加工厂家，分别定义如下：

1. 华东地区：上海机床加工厂、南京机床加工厂、杭州机床加工厂。

2. 东北地区：沈阳机床加工厂、大连机床加工厂、长春机床加工厂。

说明：以上厂家均可以加工相同的产品、提供相同的加工原子服务和组合服务，区别在于设备选型、生产效率、成本以及物流距离等方面，并且论文假设以上机床加工厂家均已在云平台上注册通过验证并发布服务，在该案例中，不同厂家的准备时间ST和距离服务需求方的物流距离LD因厂家生产能力和地域等原因有所不同，定义如表6.2所示，但各厂家的物流速度LS默认统一，LS=50KM/H。

表6.2 不同厂家在案例中的准备时间ST和物流距离LD

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **厂家地区** | **厂家名称** | **准备时间ST（H）** | **物流距离LD（KM）** |
| 华东  地区 | 上海机床加工厂 | 4 | 50 |
| 南京机床加工厂 | 6 | 300 |
| 杭州机床加工厂 | 7 | 180 |
| 东北  地区 | 沈阳机床加工厂 | 3 | 1730 |
| 大连机床加工厂 | 5 | 1070 |
| 长春机床加工厂 | 3 | 2030 |

### 6.2.2 云平台中在案例中的应用

**1、服务发布**

（1）服务抽象

以6.1节案例背景中的上海机床加工厂和杭州机床加工厂为例，简称为企业A（上海机床加工厂）和企业B（杭州机床加工厂），这些企业可以把自己的制造能力封装成WSDL描述的制造服务模型。以主轴为例，分别形成有：主轴毛坯A.WSDL、主轴粗加工A.WSDL、主轴精加工A.WSDL、主轴检验打标A.WSDL、主轴毛坯B.WSDL、主轴粗加工B.WSDL、主轴精加工B.WSDL、主轴检验打标B.WSDL八个描述文件。其中，主轴毛坯A.WSDL文件是企业A提供针对主轴毛坯加工制造服务能力的服务模型。

（2）仿真抽象

根据企业A和企业B的制造资源特点，分别构建企业A和企业B的制造资源或制造能力的仿真模型。

企业A进行主轴毛坯加工的为毛坯工位，在plant simulation软件(以下简称PSim软件)上对应为一个SingleProc仿真对象；然后根据其仿真对象的特点，构建XML文档，为主轴毛坯加工仿真A.XML。文档内容如下所示：

|  |
| --- |
| <simobj uuid="89901d68-1f9d-4e3c-bf14-57c873e7468e"> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>主轴毛坯工位</name> <!—工位名称-->  <class>SingleProc</class> <!—工位对应的仿真对象类型-->  <property name="ProcTime">600</property> <!—工位加工时长-->  <method name="EntranceCtrl">OnEntrane</property> <!—加工零件进入工位触发的方法-->  <method name="ExitCtrl">OnExit</property> <!—加工零件离开工位触发的方法-->  </simobj>。 |

依次类推，形成主轴粗加工仿真A.XML，主轴精加工仿真A.XML，主轴检验打标仿真A.XML等文件。

企业B也类似形成有主轴毛坯加工仿真B.XML，主轴粗加工仿真B.XML，主轴精加工仿真B.XML，主轴检验打标仿真B.XML文件。

（3）服务发布/仿真信息添加

该阶段主要是将仿真抽象环节生成的仿真模型文档注入到服务描述文档中。具体包括以下步骤：

①把WSDL文件转换成OWL-S文件；如把主轴毛坯A.WSDL转换成符合OWL-S规范的主轴毛坯A.OWL文件，具体实现方法已在4.2节中做过说明；

②以人工仿真信息添加为例，用编辑软件如windows系统自带的“记事本”软件，打开主轴毛坯A.OWL，找到<grounding:WsdlGrounding>节点，添加<grounding:SimInfo> 节点，在<grounding:SimInfo>和 </grounding:SimInfo>标记中间，添加主轴毛坯加工仿真A.XML文件的内容；

③保存文档。并且把“主轴毛坯A.OWL”文件发布到云制造服务平台上。

④依次转换、添加其它服务的文件，并进行发布。

服务发布界面如下图6.4所示，高级发布选项中，WSDL路径用来生成服务调用的Web Service接口，上传的OWL-S文件用于将企业服务添加到云服务池。案例以RDF4J图数据库作为存储服务的云服务池，该OWL-S文件已包含仿真模型信息。初级发布选项用于格式化发布内容。



图6.4 云平台服务发布界面

**2、需求发布**

企业C需要制造一批主轴。在云制造服务平台上发布需求信息。需求发布也是服务的检索，云平台需求发布界面如下图6.5所示。



图6.5 云平台需求发布界面

检索产品时，若产品不存在，则检索出产品的各个部件产品（包括总装配能力），若该产品没有子部件，则检索出生产该产品的制造能力（包括部件装配能力）。若检索出产品有库存无需制造加工，则企业用户可以和产品提供者协商后直接下单购买；若检索出产品无库存需要加工制造，则需要选择合适的原子服务，并且将加工成产品的各项原子服务进行组合。

**3、服务组合**

根据主轴生产的特点，把制造主轴的任务分解成毛坯-粗加工-精加工-检验打标四个子任务。

由于企业A和企业B都能提供主轴毛坯加工等子任务的制造服务，因此，每个子任务都有2个企业备选。

2个企业备选，可以形成16种不同的服务组合：

AAAA, AAAB, AABA, AABB, ABAA, ABBA, ABBB, BAAA, BBAA, BBBA, BBBB, BABB, BAAB, BABA, BABB, BBAB

其中，AAAA表示毛坯、粗加工、精加工、检验都选择企业A的服务；BABA表示毛坯加工选择企业B，粗加工选择企业A，精加工选择企业B，检验选择企业A。依次类推；

根据每种组合，构建仿真模型。例如，针对BABA，从服务组合过程可以得到主轴毛坯B.OWL、主轴粗加工A.OWL、主轴精加工B.OWL、主轴检验打标A.OWL四个服务描述文件。每个服务描述文件中都包含对应的仿真对象信息（XML格式的）。具体服务组合步骤见图4.10。组合方案BABA对应的组合服务描述文件见如下文档：

|  |
| --- |
| <grounding:SimInfo>  <sequence> <!--定义组合服务的执行流程为顺序结构-->  <item>89901d68-1f9d-4e3c-bf14-57c873e7468e </item> <!--对应于主轴毛坯工位-->  <item>e4783184-a827-4a00-8326-fbe072a2a4bc </item> <!--对应于主轴粗加工工位-->  <item>e1fcd89c-ad6f-4d60-90f6-8ba04e6651eb </item> <!--对应于主轴精加工工位-->  <item>5b218050-df47-452c-8f9a-816f149d9401 </item> <!--对应于主轴检验打标工位-->  </sequence>  <simobj id="89901d68-1f9d-4e3c-bf14-57c873e7468e "> <!--读入毛坯工位的内容-->  <name>主轴毛坯工位</name>  <class>SingleProc</class>  <property name="ProcTime">600</property>  <method name="EntranceCtrl">OnEntrane</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit</property>  </simobj>  <simobj id=" e4783184-a827-4a00-8326-fbe072a2a4bc "> <!--读入粗加工工位的内容-->  <name>主轴粗加工工位</name>  <class>SingleProc</class>  <property name="ProcTime">900</property>  <method name="EntranceCtrl">OnEntrane</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit</property>  </simobj>  <simobj id=" e1fcd89c-ad6f-4d60-90f6-8ba04e6651eb "> <!--读入精加工工位的内容-->  <name>主轴精加工工位</name>  <class>SingleProc</class>  <property name="ProcTime">1200</property>  <method name="EntranceCtrl">OnEntrane</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit</property>  </simobj>  <simobj id="5b218050-df47-452c-8f9a-816f149d9401"> <!--读入检验打标工位的内容-->  <name>主轴检验打标工位</name>  <class>SingleProc</class>  <property name="ProcTime">300</property>  <method name="EntranceCtrl">OnEntrane</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit</property>  </simobj>  </grounding:SimInfo>。 |

云平台中服务组合界面如下图6.6所示，企业用户可以根据多个候选子服务集选择合适的原子服务并组合。点击组合服务按钮将生成组合服务的OWL-S文档。完成组合后的服务会进入组合服务列表，如图6.7示，并且可以对组合后的服务进行“仿真”或者“删除”操作。点击仿真按钮后组合服务被添加到待仿真列表中，仿真之后得到的服务评价指标可通过点击已仿真列表中的组合服务名称拿到。



图6.6 云平台服务组合界面



图6.7 云平台组合服务列表

## 6.3 组合服务的仿真模型构建

### 6.3.1 仿真平台内预置对象说明

为了实现外部OWL-S文件的读取、自动构建模型等功能，需要在模型内预制相关的对象，论文案例所需的预置对象如图6.8所示。

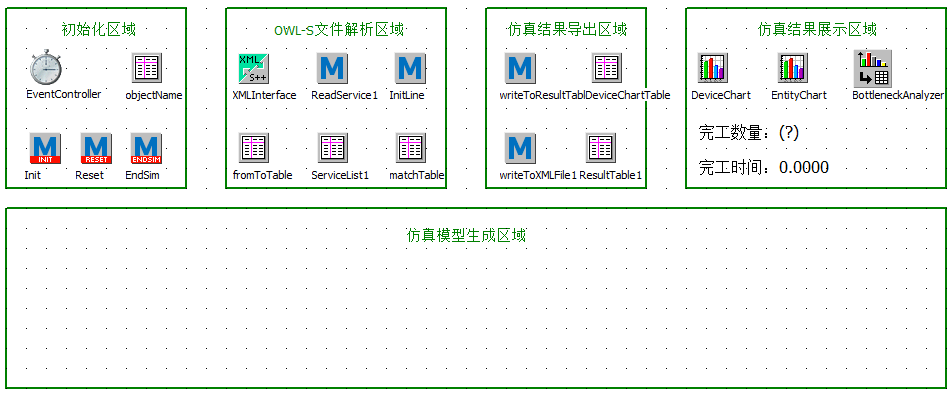


图6.8 Plant Simulation仿真模型内预置对象截图

模型框架内主要分为五个区域，下面分别针对五个区域及内部对象进行解释说明：

**1. 初始化区域**

（1）EventController：模型的时钟控制。

（2）objectName：TableFile对象，保存所有模型库对象的名称。

（3）Init：Method对象，模型开始运行时自动执行，调用InitLine。

（4）Reset：Method对象，模型重置时执行，删除过期数据和对象。

（5）EndSim：Method对象，模型运行结束时执行，将结果导出到外部XML格式的文件中。

**2. OWL-S文件解析区域**

（1）XMLInterface：读写XML格式文件的接口。

（2）ReadService1：Method对象，读取XML格式的OWL-S文件并解析，解析结果写入ServiceList1。

（3）InitLine：Method对象，用于生成目标生产线。

（4）ServiceList1：TableFile对象，保存XML文件解析后的有用信息。

（5）fromToTable：TableFile对象，保存目标生产线的从至信息。

（6）matchTable：TableFile对象，保存典型服务在OWL-S文档中的名称和Plant Simulation内对应仿真对象的名称对应信息。

**3. 仿真结果导出区域**

（1）writeToResultTable1：Method对象，将有效结果、指标写入ResultTable1。

（2）writeToXMLFile1：Method对象，将ResultTable1中的信息导出至外部XML格式的文件。

（3）ResultTable1：TableFile对象，保存有效的结果、指标信息。

**4. 仿真结果展示区域**

（1）DeviceChart：Chart对象，用于展示各个工位、设备的资源利用信息。

（2）EntityChart：Chart对象，用于展示各个工件的状态信息。

（3）BottleneckAnalyzer：瓶颈分析对象，用于分析生产线模型的瓶颈。

（4）完工数量：Display对象，用于展示模型的完工数量。

（5）完工时间：Display对象，用于展示模型的完工时间。

**5. 仿真模型生成区域**

该区域是目标生产线的生成区域。

### 6.3.2 仿真实现总体流程说明

1. Plant Simulation通过对象XMLInterface，得到外部的XML形式的OWL-S文件。

2. 模型内预制Method对象“ReadService1”设置XMLInterface接口的文件路径，并解析该文件内的组合服务，顺序写入模型内预制TableFile对象“SeviceList1”。这里写入的内容是构成Web组合服务的原子服务名称。

3. 模型内预置Method对象“InitLine”完成以下五项工作：

（1）定义初始位置，生成Source对象。

（2）按序读取SeviceList1中的Web服务名称，依此到模型内预制TableFile对象“matchTable”中，查询对应于Plant Simulation内部的对象，按序生成；如有自定义参数，对应设置。

（3）生成Drain对象。

（4）在以上过程中，按序填充TableFile对象“fromToTable”从至表。

（5）遍历fromToTable，生成connector对象进行相应连接。

4. 根据案例设计，将所有可能出现的设备对象名称手动写入TableFile对象“objectName”，便于模型在重置时进行遍历检查：如果该对象存在于当前模型窗口内，即删除。

5. 以上过程完成模型的建立，模型运行之后，Method对象“writeToResultTable1”将仿真结果、仿真指标写入TableFile对象“ResultTable1”，Method对象“writeToXMLFile1”将ResultTable1导出到外部XML格式的文件保存，以供云平台解析读取，并进行展示。

6. 模型内的“仿真结果展示区域”可以查看相应的结果和指标。

### 6.3.3 对服务组合OWL-S文档的读取

本节基于6.3.1中介绍的仿真平台内的第二个区域“OWL-S文件解析区域”来进行。模型内预制Method对象“ReadService1”通过XMLInterface 的“File name”参数设置该OWL-S文档的接口路径，以供查询读取。同时解析该文件内的组合服务，顺序写入模型内预制TableFile对象“SeviceList1”。这里写入的内容是构成Web组合服务的原子服务或者组合服务名称。至此，服务组合信息已经存在仿真平台内，随时可以调取使用。

### 6.3.4 仿真模型的建立与执行

首先需要确定模型的初始位置，即Source的位置，该工作由模型内预置Method “InitLine”完成，为了模型统一化操作，默认Source初始位置是（100,300）。

“InitLine”下一步工作是按序读取SeviceList1中的原子服务或者组合服务名称，依次到“matchTable”中查询对应于Plant Simulation内部的对象，按序生成；如有自定义参数，对应设置。

基本对象生成后，“InitLine”生成Drain对象。在以上解析过程中，按序将Plant Simulation内对应的仿真对象填充到“fromToTable”当中，以能够遍历fromToTable，生成connector对象进行相应连接。至此，服务组合对应的仿真模型建立完成。

模型建立完成后，在Source对象中，会根据服务需求方的任务数需求，设置其参数“Amount”，通过仿真控制器对象“EventController”的“Start”按钮，开始执行模型。模型按照Source中定义的生产计划完成仿真时候，会自动计算仿真能够直接得到的指标参数（例如完工时间、完工数量）和间接得到的指标的参数（例如加工成本、物流成本等）。

案例中，服务需求方根据自身需求，选择：上海厂的主轴、床身、床头箱、床鞍加工服务；杭州厂的三座、尾座、滑板加工服务；自身完成装配。相应的OWL-S文档见附录A所示。模型建立如图6.9所示。

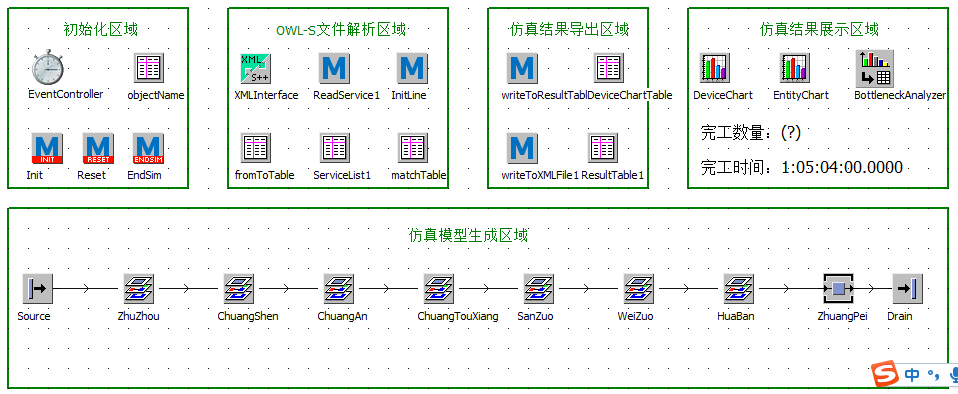


图6.9 案例仿真模型截图

## 6.4 服务评价指标

通过节6.3.4中的模型运行之后，可以得到仿真指标值如下：

**1、完工时间TCT**

完工时间以仿真模型内的时钟控制对象EventController的参数simTime得到，为1:05:04:00.0000，即TCT=29.07H。

**2、完工数量N**

由于所有完工的成品均会进入仿真对象Drain，因此该指标通过Drain的参数statNumIn得到，为100，即N=100。

**3、瓶颈工位及其任务数**

以“工作中”为评分准则，得到的瓶颈工位是：root.ZhuZhou.ZhuZhouMaoPi.DZ，即上海加工厂的主轴毛坯加工环节中的锻造工位。任务数通过该工位的参数statNumIn得到，M = 100。

**4、物流时间LT**

物流时间包括上海厂到服务需求方的物流时间和杭州厂到服务需求方的物流时间，即LT=50/50+180/50=4.6H。

**5、工位资源状态SRS**

以上海厂主轴加工为例，模型执行完成后，各个工位资源状态如图6.10所示。

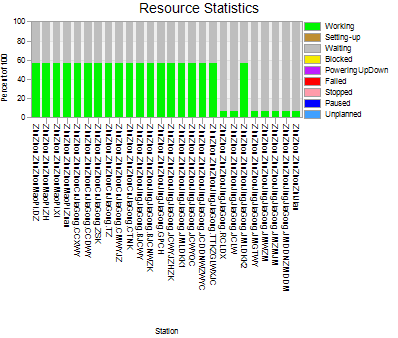


图6.10 工位资源状态图

**6、工件资源状态ERS**

由于整条生产线的产品只有机床这一类成品，因此其资源状态如图6.11所示。

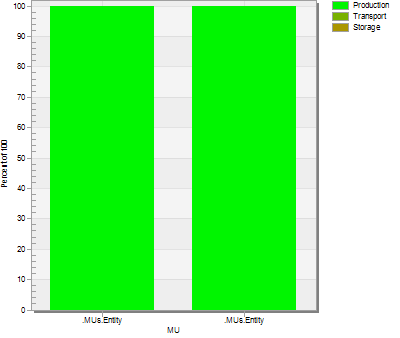


图6.11 工件资源状态图

根据以上得到的仿真指标及默认参数，可以转换得到服务供需双方各自关注的指标如表6.3所示。通过仿真平台内部预置的仿真结果导出区域的对象，将服务供需双方的评价指标体系导出为外部XML格式的文件。

表6.3 典型案例指标体系表

|  |  |
| --- | --- |
| **服务提供方关注的指标** | **服务需求方关注的指标** |
| 完工时间TCT，TCT=29.07H | 时间T  T = TCT + ST + LT  =29.07+11+4.6=44.67H |
| 准备时间ST包括上海厂的准备时间和杭州厂的准备时间， ST=4H+7H=11H |
| 物流时间TT，LT=LD/LS=(50+180)/50=4.6H |
| 完工数量N，N=100 |  |
| 生产周期CT，CT=TCT/N=29.07H/100=0.2907H |
| 生产线的瓶颈率RB，RB=TCT/N=100/29.07=3.44 |
| 单位时间生产量TH，TH=N/TCT=100/29.07=3.44 |
| 工位资源状态SRS，表示为路径：F:\SRS.jpg |
| 工件资源状态ERS，表示为路径：F:\ERS.jpg |
| 加工成本PC，PC=TCT\*PCU=29.07\*1000=29070元 | 成本C  C = PC + LC + AC  =29070+4600+2907=36577元 |
| 运输成本LC，LC=LT\*LCU=4.6\*1000=4600元 |
| 管理成本AC，AC=TCT\*ACU=29.07\*100=2907元 |

表6.3给出了服务供需双方关注的指标，双方可各自根据时间、成本等主要评价参数来决定合作意向，同时可以通过论文中的仿真方法得到其他服务组合相应的评价参数，从而进行意向服务组合之间的比较，选出合适的订单。

需要说明，表6.3中的指标并不完全覆盖服务组合选择的评价指标，只给出了仿真能够得到的部分，质量、服务可靠性等指标可以通过其他方法得到，论文不作展开。

## 6.5 本章小结

本章给出了案例验证，设计了典型的加工场景，详细说明了面向仿真的服务发布方法的细节以及包含仿真信息的服务组合文档的生成方法，并针对该场景建立相应的仿真模型，实现了Plant Simulation读取OWL-S文档，建立仿真模型并给出相应指标。

# 第7章 总结与展望

## 结论

论文以面向仿真的制造云服务发布与组合方法的研究为主线展开，首先分析和总结了云制造服务发布、匹配和组合方法的研究现状，然后提出把仿真的方法应用到云制造服务组合执行过程的评价当中去，即需要在服务发布阶段将仿真信息注入到服务描述文档中，在服务组合之后，可以构建仿真模型，给出评价指标并反馈给云平台，得到如下结论：

1. 基于对企业制造资源和制造能力的分析，构建了制造资源和制造能力的虚拟化模型和Web Service形式的服务化发布方法，进而构建了制造资源和制造能力的本体模型。

2. 分析Web Service描述语言WSDL的特点，并实现转换器将其转换为更适合用户理解和扩展的OWL-S语言。结合图数据库RDF4J，实现了服务描述文档在RDF4J中的读写操作。通过Apache Jena研究在RDF4J数据库中，基于逻辑推理能力的检索功能。

3. 分析了语义Web服务描述语言OWL-S的基本描述能力及其扩展能力，实现在服务描述文档中加入仿真信息的方法和服务组合阶段包含仿真信息的组合方法，并能够提供给仿真平台进行解析使用；并结合具体的仿真平台Plant Simulation建立通用的仿真模型库，给出了基于语义的Web服务组合结果描述文档到仿真模型的总体实现方法。

4. 把仿真的方法引入到对云制造服务及其组合的评价中，研究了服务组合和仿真模型之间的关系，讨论了仿真平台针对不同类型的OWL-S文档进行解析的方法。以此得出，仿真的方法对云制造服务组合的评价具有一定的适用性，该方法较传统方法能够给出更加精确、直观的评价指标。

5. 结合案例并设计了云制造服务原型系统验证了论文方法的可行性，设计了典型的以数控机床为基础的加工服务场景，实现了服务的发布、需求发布与匹配、服务组合与评价等功能，并基于Plant Simulation软件，针对该场景建立相应的仿真模型库，实现了OWL-S文档的读取，建立仿真模型并给出相应指标，以XML文件的形式返回给云平台进行归类展示。

6. 仿真方法只能得到云制造服务组合执行过程的部分评价指标，全面综合的评价还需要结合其它方法，例如整数规划方法、建立信任度模型的方法等。

## 7.2 进一步工作的方向

云制造服务的研究方面有很多，本文仅对服务发布与组合方法进行了研究，取得了一定的进展，还存在许多不足之处，很多问题有待进一步研究和改进。主要包括以下几个方面：

1. 对云制造环节中服务匹配和服务组合方法做进一步研究，一方面提高服务的查全率和查准率，另一方面需要研究原子服务是否可组合判断，对此比较重要的一点是需要对各服务提供者制造服务的输入标准和输出标准进行统一。

2. 论文所用的仿真方法仅适用于云制造服务中的制造环节，对于询价环节、交易环节等商务性的环节，无法进行合适的仿真描述。应对云制造服务的多个环节进行全面的研究，探索适用于多方面的仿真方法和仿真软件，以期实现云制造服务完整而全面的仿真与评价。同时，文中的仿真方法仅能够得到部分评价指标，应探索能够得到更加全面的指标的实现方法。

3. 论文只是将云平台上的意向服务组合方案进行基于Plant Simulation软件的实际化建模与仿真，给出该组合的评价指标，并未对生产线模型进行优化处理，给出更加有效益的生产组合方案，因此可在这方面进一步研究，探索在此基础上进行生产线优化的方法。

4. 论文中的仿真模型库是基于特定的制造环境和仿真平台来定义的，因此，制造环境的改变和仿真平台的不同，即要求重新定义仿真模型库，这一工作较为繁琐，因此可在这方面进行更加细致和全面的改进，以实现仿真模型库的通用性

# 致谢

回想读书生活，不禁使人感慨万千。在论文即将完成之际，对所有在项目研究和论文撰写过程中给予我帮助的老师、朋友、同学表示深深的感谢。

首先感谢我的导师陆剑峰副教授。在攻读硕士研究生期间，导师对我的学业给予了无微不至的关怀与指导。导师渊博的学识、敏锐的学术眼光、严谨的治学态度和勤奋踏实的工作作风，乐观豁达，积极向上的工作态度，必将使我受益终身，是我学习的榜样。值此论文完成之际，向导师表示深深的谢意，并致以诚挚的敬意。

其次我还要感谢我在硕士研究生阶段教导过我和关心过我的系统工程专业的各位老师。是你们的悉心教导使我们的视野得到开阔，让我们的知识更渊博。

我还要感谢陪伴了我研究生生涯的好友汪辉，在两年多的学习和生活中，大家互相帮助，建立了深厚的友谊，和他们一起学习的日子将是我一生宝贵的精神财富。感谢师兄师姐、师弟师妹，平日里对我的关心与帮助。

深深感谢在我读研阶段期间一直默默支持我的家人，因为有了他们的理解、支持、鼓励，我才能够一次次地克服难关，才能够安心地进行学习、研究，从而顺利完成学业。

最后，感谢各位专家在百忙之中评阅指导我的论文。

2018年3月

# 参考文献

[1] Luo Y, Zhang L, Tao F, et al. Study on the description method of manufacturing capability based on description logics in cloud manufacturing[J]. 2012.

[2] Luo Y, Zhang L, Tao F, et al. A modeling and description method of multidimensional information for manufacturing capability in cloud manufacturing system[J]. 2013.

[3] 罗永亮，张霖，陶飞，等. 云制造模式下制造能力建模关键技术[J]. 计算机集成制造系统. 2012(07): 1357-1367.

[4] Luo Y L, Zhang L, Tao F, et al. Study on the servilization of simulation capability[J]. 2011.

[5] Luo Y L, Zhang L, Zhang K P, et al. Research on the Knowledge-Based Multi-Dimensional Information Model of Manufacturing Capability in CMfg[J]. Advanced Materials Research. 2012, 472-475: 2592-2595.

[6] Anderson T, Peterson L, Shenker S, et al. Overcoming the Internet Impasse through Virtualization[J]. Computer. 2005, 38(4): 34-41.

[7] 金海. 计算系统虚拟化:原理与应用[Z]. 清华大学出版社, 2008.

[8] Ren L, Zhang L, Tao F, et al. Cloud manufacturing: from concept to practice[J]. Enterprise Information Systems. 2015, 9(2): 186-209.

[9] Ren L, Zhang L, Wang L, et al. Cloud manufacturing: key characteristics and applications[J]. International Journal of Computer Integrated Manufacturing. 2017, 30(6): 501-515.

[10] Ren L, Zhang L, Zhao C, et al. Cloud Manufacturing Platform: Operating Paradigm, Functional Requirements, and Architecture Design: ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the North American Manufacturing Research Conference[Z]. 2013V2T.

[11] Tao F. A methodology towards virtualisation-based high performance simulation platform supporting multidisciplinary design of complex products[J]. Enterprise Information Systems. 2012, 6(3): 267-290.

[12] 任磊，张霖，张雅彬，等. 云制造资源虚拟化研究[J]. 计算机集成制造系统. 2011, 17(3): 511-518.

[13] Hu C, Xu C, Cao X, et al. Study on the Multi-Granularity Virtualization of Manufacturing Resources: ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the North American Manufacturing Research Conference[Z]. 2013V2T.

[14] Ren L. Cloud Manufacturing platform architecture[J]. 2012.

[15] Ren L, Zhang L, Zhang Y, et al. Key issues in cloud simulation platform based on cloud computing[J]. 2011.

[16] Wang X V, Xu X W. Virtualize Manufacturing Capabilities in the Cloud: Requirements and Architecture: ASME 2013 International Manufacturing Science and Engineering Conference Collocated with the North American Manufacturing Research Conference[Z]. 2013V2T.

[17] 曹啸博，许承东，胡春生. 云制造环境中的虚拟制造单元[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(7): 1415-1425.

[18] 张霖，罗永亮，陶飞，等. 制造云构建关键技术研究[J]. 计算机集成制造系统. 2010(11): 2510-2520.

[19] 李瑞芳，刘泉，徐文君. 云制造装备资源感知与接入适配技术[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(7): 1547-1553.

[20] 黄刚，钟小勇，龙渊铭，等. 基于数据云与应用云分离模式的制造资源云定位服务平台[J]. 计算机集成制造系统. 2011, 17(3): 519-524.

[21] 尹超，李孝斌，尹翰坤，等. 一种机床装备云制造服务接入终端[Z].

[22] Yan J, Guo Z, Shi R. Perception of Manufacturing Resources in Cloud-Manufacturing System: International Conference on Computer Science and Service System[Z]. 20121993-1996.

[23] Rauschecker U, Stöhr M. Using manufacturing service descriptions for flexible integration of production facilities to manufacturing clouds: International Ice Conference on Engineering, Technology and Innovation[Z]. 20121-10.

[24] 李楠，徐文胜，孔令军. 基于SOOA的制造资源服务化封装与部署机制[J]. 机械设计与制造. 2012(11): 123-125.

[25] 吴雪娇，柳先辉. 基于语义的云制造服务描述[J]. 计算机与现代化. 2012(1): 40-43.

[26] 尹胜，尹超，刘飞，等. 云制造环境下外协加工资源集成服务模式及语义描述[J]. 计算机集成制造系统. 2011, 17(3): 525-532.

[27] 王中杰，杨琛，张新，等. 云制造环境下生产加工云能力服务[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(7): 1453-1460.

[28] 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.

[29] 李向前，杨海成，敬石开，等. 面向集团企业云制造的知识服务建模[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(8): 1869-1880.

[30] 尹超，夏卿，黎振武. 基于OWL-S的云制造服务语义匹配方法[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(7): 1494-1502.

[31] 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.

[32] 江萍，王力，王士凯，等. 基于本体描述逻辑的云制造服务匹配方案[J]. 计算机技术与发展. 2013(3): 49-52.

[33] 张金广，李锋刚，张磊. 云制造背景下的服务匹配算法[J]. 计算机技术与发展. 2013(3): 41-44.

[34] 李成海，黄必清. 基于属性描述匹配的云制造服务资源搜索方法[J]. 计算机集成制造系统. 2014, 20(6): 1499-1507.

[35] 盛步云，张成雷，卢其兵，等. 云制造服务平台供需智能匹配的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统. 2015, 21(3): 822-830.

[36] 赵金辉，王学慧. 基于服务质量的云制造服务双向匹配模型[J]. 计算机集成制造系统. 2016, 22(1): 104-112.

[37] Tao F, Zhao D, Hu Y, et al. Resource Service Composition and Its Optimal-Selection Based on Particle Swarm Optimization in Manufacturing Grid System[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2009, 4(4): 315-327.

[38] 邹德国，朱荣鑫. 基于图灵机的云服务组合方法研究[J]. 中国电子商情·通信市场. 2013(1): 139-143.

[39] Fu J, Hao W, Tu M, et al. Virtual Services in Cloud Computing: World Congress on Services[Z]. 2010467-472.

[40] 刘卫宁，刘波，孙棣华. 面向多任务的制造云服务组合[J]. 计算机集成制造系统. 2013, 19(1): 199-209.

[41] 倪晚成，刘连臣，吴澄. Web服务组合方法综述[J]. 计算机工程. 2008, 34(4): 79-81.

[42] Fan X, Jiang C, Fang X, et al. Dynamic Web Service Selection Based on Discrete Particle Swarm Optimization[J]. Journal of Computer Research & Development. 2010, 47(1): 147-156.

[43] Wang G, Huang S H, Dismukes J P. Product-driven supply chain selection using integrated multi-criteria decision-making methodology[J]. International Journal of Production Economics. 2004, 91(1): 1-15.

[44] Kulak, Osman, Kahraman, et al. Fuzzy multi-attribute selection among transportation companies using axiomatic design and analytic hierarchy process[J]. Information Sciences. 2005, 170(2–4): 191-210.

[45] 罗大海. 面向云制造的服务资源优选建模及仿真研究[Z]. 南昌大学, 2015.

[46] Nie G, She Q, Chen D. Evaluation Index System of Cloud Service and the Purchase Decision- Making Process Based on AHP[Z]. Springer Berlin Heidelberg, 2011345-352.

[47] Garg S K, Versteeg S, Buyya R. A framework for ranking of cloud computing services[J]. Future Generation Computer Systems. 2013, 29(4): 1012-1023.

[48] Benouaret K, Benslimane D, Hadjali A, et al. Top-k Web Service Compositions Using Fuzzy Dominance Relationship: IEEE International Conference on Services Computing[Z]. 2011144-151.

[49] Wang S, Zheng Z, Sun Q, et al. Cloud model for service selection: Computer Communications Workshops[Z]. 2011666-671.

[50] Amid A, Ghodsypour S H, O Brien C. A weighted max–min model for fuzzy multi-objective supplier selection in a supply chain[J]. International Journal of Production Economics. 2011, 131(1): 139-145.

[51] 王尚广，孙其博，杨放春. 基于全局QoS约束分解的Web服务动态选择[J]. 软件学报. 2011, 22(7): 1426-1439.

[52] 刘开，李正义，范磊. 制造云服务组合柔性的多属性评价方法[J]. 江苏科技大学学报(社会科学版). 2015(3): 89-93.

[53] 李雪. 制造云服务组合柔性评价研究[Z]. 沈阳工业大学, 2015.

[54] 董元发，郭钢. 基于模板与全局信任度的云制造服务评价与选择方法[J]. 计算机集成制造系统. 2014, 20(1): 207-214.

[55] 李永湘，姚锡凡，徐川，等. 基于扩展进程代数的云制造服务组合建模与QoS评价[J]. 计算机集成制造系统. 2014, 20(3): 689-700.

[56] 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(01): 1-7.

[57] Shi S, Yang H, Liu H, et al. A resource allocation method based on competitiveness equilibrium for manufacturing grid[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2009, 41(9-10): 997-1002.

[58] Tao F, Zhao D, Hu Y, et al. Resource Service Composition and Its Optimal-Selection Based on Particle Swarm Optimization in Manufacturing Grid System[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2009, 4(4): 315-327.

[59] Elkins D A, Huang N, Alden J M. Agile manufacturing systems in the automotive industry[J]. International Journal of Production Economics. 2004, 91(3): 201-214.

[60] Gao L, Zhang J, Li P. XML-based resource integration method for agile manufacturing[J]. China Mechanical Engineering. 2002, 13(1): 57-59.

[61] Kahraman C, Beskese A, Da R. Measuring flexibility of computer integrated manufacturing systems using fuzzy cash flow analysis[J]. Information Sciences. 2004, 168(1): 77-94.

[62] 蒋新松. 21世纪企业的主要模式──敏捷制造企业[J]. 计算机集成制造系统. 1996, 2(4): 3-8.

[63] 李伯虎，张霖，柴旭东. 云制造概论[J]. 中兴通讯技术. 2010, 16(4): 5-8.

[64] 李伯虎，张霖，任磊，等. 再论云制造[J]. 计算机集成制造系统. 2011, 17(3): 449-457.

[65] 杨海成. 云制造是一种制造服务[J]. 机械设计与制造工程. 2010, 39(6): 22-23.

[66] Breiter G, Behrendt M. Life cycle and characteristics of services in the world of cloud computing[J]. 2009, 53(4): 1-3.

[67] 李伯虎，张霖，任磊，等. 云制造典型特征、关键技术与应用[J]. 计算机集成制造系统. 2012(07): 1345-1356.

[68] 金强. 基于HBase的RDF存储系统的研究与设计[Z]. 浙江大学, 2011.

[69] Brickiey D G R V. RDF Vocabulary Description Language 1. 0：RDF Schema[Z]. 2004.

[70] Brikiey D G R V. Resource Description Framework(RDF) Schema Specification 1.0[Z]. 2000.

[71] 胡鹤，刘大有，王生生. Web本体语言OWL[J]. 计算机工程. 2004, 30(12): 1-2.

[72] 田雪莹，吉锋. 语义Web技术与网络化制造[Z]. 经济管理出版社, 2013.

[73] David Martin M B. OWL-S: Semantic markup for web services[Z]. 2004.

# 个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果

**个人简历：**

姜智慧，男，1992年10月生。

2011年7月毕业于杭州电子科技大学 电气工程与自动化 获学士学位。

2015年9月入同济大学读硕士研究生。

**已发表论文：**

[1] 姜智慧,陆剑峰,余涛. 基于Jena的仿真模型的云端交互[J]. 制造业自动化,2016,38(11):25-27.

[2] Zhihui Jiang, Jianfeng Lu, Hui Wang, etc. Simulation Oriented OWL-S Extension and Cloud Interaction[C]. INTERNATIONAL CONFERENCE ON COMPUTER NETWORKS AND COMMUNICATION TECHNOLOGY, 2016.