

**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，并在服务组合阶段根据服务组合方案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，以期提高对服务组合方案评价的准确性。

首先，论文分析了云制造的提出和发展过程，介绍了云制造服务发布、匹配、组合和评价等方面的基本概念，对云制造涉及的知识表述技术进行了介绍，包括语义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，并基于此设计了面向仿真的云制造服务发布方法，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，结合Plant Simulation仿真平台对制造服务发布和组合的仿真实现方法进行了研究，总结了服务需求方和服务提供方各自需要的评价指标体系，建立仿真评价指标转换为服务评价指标的具体转换方法。

最后，设计并开发了支持云制造服务发布、组合和评价相关流程的原型系统，以典型的机床加工为背景设计了原型系统案例，对论文的相关方法进行验证，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、图片等形式返回给原型系统进行分类展示。

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 composite services 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. 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 releasing stage injecting the simulation information into service description documents, and in the service composition process combining simulation information of atomic services to get information about the integrated simulation model according to the service composition scheme, the output result of the actual simulation model will be converted into the service quality evaluation index, in order to improving the accuracy of the evaluation of service combination scheme.

First, this paper analyzes the emergence and development of cloud manufacturing process, introduces the basic concept of cloud manufacturing in service publishing, matching, combination and evaluation, also the knowledge representation technology, including the concept of semantic web and ontology, and the role of RDF4J in cloud manufacturing are described.

Secondly, the general process of cloud manufacturing service is analyzed, based on which several difficulties in the process of cloud manufacturing service are analyzed: the service publication phase needs the support of the ontology model, how to improve the recall and precision of the retrieval in the service matching phase, how the service composition phase can effectively combine the atomic service and how to combine it into a simulation model. Study the the construction of cloud manufacturing service ontology, and based on which the simulation oriented cloud manufacturing service publishing method is designed, which is combining service description model and simulation model; at the same time put forward the cloud manufacturing service demand publication and matching methods, reasoning retrieval method based on jena and simulation oriented service combination method.

Again, the simulation implementation method of manufacturing service publication and combination is studied in combination with Plant Simulation simulation platform, the evaluation index system of service demand side and service provider is summarized, and the specific conversion method of simulation evaluation index to service evaluation index is established.

Finally, a prototype system is designed and developed to support cloud manufacturing service publishing, combination and evaluation procedures, the background of the prototype system was designed to machine as a typical case. The prototype system case is designed on the basis of typical machine tool processing, and the related methods of the paper are verified. Introducing the implemention of simulation oriented service publishing and combination method, the Plant Simulation simulation platform to read the OWL-S document of the service composition, the establishment of a simulation model and the corresponding index and conversion method, return to the prototype system of classification display in XML file format, images 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 solve the evaluation problem of cloud manufacturing service composition better.

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

**目录**

[摘要 I](#_Toc505349065)

[ABSTRACT III](#_Toc505349066)

[第1章 绪论 1](#_Toc505349067)

[1.1 背景 1](#_Toc505349068)

[1.2 研究目标和意义 2](#_Toc505349069)

[1.3 国内外研究进展 3](#_Toc505349070)

[1.3.1 制造资源和制造能力虚拟化与服务化的研究进展 3](#_Toc505349071)

[1.3.2 云制造服务匹配及组合的研究进展 5](#_Toc505349072)

[1.3.3 云制造组合服务评价方法的研究进展 8](#_Toc505349073)

[1.4 论文的主要工作和章节安排 9](#_Toc505349074)

[1.4.1 论文主要工作 9](#_Toc505349075)

[1.4.2 论文章节安排 10](#_Toc505349076)

[第2章 云制造服务及其相关技术 11](#_Toc505349077)

[2.1 云制造概念 11](#_Toc505349078)

[2.1.1 云制造概念及其发展 11](#_Toc505349079)

[2.1.2 云制造服务组合的概念 13](#_Toc505349080)

[2.1.3 云制造服务组合方案评价的基本概念和指标体系 13](#_Toc505349081)

[2.2 语义Web的基本技术 16](#_Toc505349082)

[2.2.1 本体论的概念 16](#_Toc505349083)

[2.2.2 语义Web中的描述语言 17](#_Toc505349084)

[2.2.3 语义Web的查询与存储 21](#_Toc505349085)

[2.3 本章小结 23](#_Toc505349086)

[第3章 云制造服务发布和组合过程分析 24](#_Toc505349087)

[3.1 云制造服务一般流程 24](#_Toc505349088)

[3.2 云制造服务发布过程分析 25](#_Toc505349089)

[3.2.1 制造云服务相关本体构建 25](#_Toc505349090)

[3.2.2 制造资源或制造能力虚拟化和服务化 27](#_Toc505349091)

[3.3 云制造服务匹配过程分析 31](#_Toc505349092)

[3.3.1 需求发布与匹配 31](#_Toc505349093)

[3.3.2 基于Jena的推理检索 33](#_Toc505349094)

[3.4 云制造服务组合和评价过程分析 34](#_Toc505349095)

[3.4.1 云制造服务组合方法分析 34](#_Toc505349096)

[3.4.2 组合服务评价过程分析 36](#_Toc505349097)

[3.5 本章小结 37](#_Toc505349098)

[第4章 面向仿真的云制造服务发布与组合方法 38](#_Toc505349099)

[4.1 面向仿真的云制造服务发布与组合方法的总体思路 38](#_Toc505349100)

[4.2 面向仿真的云制造服务发布方法 41](#_Toc505349101)

[4.2.1 云制造服务的服务抽象方法 41](#_Toc505349102)

[4.2.2 云制造服务的仿真抽象方法 42](#_Toc505349103)

[4.2.3 制造服务模型与仿真模型的组合方法 44](#_Toc505349104)

[4.3 云制造服务组合方法 46](#_Toc505349105)

[4.4 本章小结 48](#_Toc505349106)

[第5章 基于Plant Simulation仿真平台的制造云服务发布与组合评价的实现 49](#_Toc505349107)

[5.1 基于Plant Simulation的服务发布 49](#_Toc505349108)

[5.1.1 Plant Simulation中建模对象说明 49](#_Toc505349109)

[5.1.2 基于Plant Simulation的仿真抽象实现 50](#_Toc505349110)

[5.2 基于Plant Simulation的仿真模型组合描述 51](#_Toc505349111)

[5.3 基于Plant Simulation 的仿真模型自动构建 53](#_Toc505349112)

[5.3.1 仿真平台内预置对象说明 53](#_Toc505349113)

[5.3.2 仿真实现总体流程说明 55](#_Toc505349114)

[5.3.3 对服务组合OWL-S文档的读取 56](#_Toc505349115)

[5.4 基于Plant Simulation的仿真结果和指标转换 56](#_Toc505349116)

[5.5 基于Plant Simulation的服务组合评价指标的反馈 58](#_Toc505349117)

[5.6 本章小结 59](#_Toc505349118)

[第6章 云制造服务原型系统的设计与开发 60](#_Toc505349119)

[6.1 原型系统设计目标 60](#_Toc505349120)

[6.2 原型系统功能设计 60](#_Toc505349121)

[6.3 原型系统的服务发布和匹配、评价流程 61](#_Toc505349122)

[6.4 原型系统开发实现 62](#_Toc505349123)

[6.5 原型系统运行案例 65](#_Toc505349124)

[6.5.1 服务发布 65](#_Toc505349125)

[6.5.2 需求发布 67](#_Toc505349126)

[6.5.3 服务组合 68](#_Toc505349127)

[6.5.4 仿真评价 71](#_Toc505349128)

[6.5.5 服务指标的展示 73](#_Toc505349129)

[6.6 本章小结 74](#_Toc505349130)

[第7章 总结与展望 75](#_Toc505349131)

[7.1 结论 75](#_Toc505349132)

[7.2 进一步工作的方向 76](#_Toc505349133)

[致谢 77](#_Toc505349134)

[参考文献 78](#_Toc505349135)

[个人简历、在读期间发表的学术论文与研究成果 84](#_Toc505349136)

# 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，从而用户只要连接云端就能随时随地按需获取制造资源与能力服务。

云制造涉及的用户角色主要有三种，即资源提供方、制造云运营者、资源使用者。资源提供方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，动态按需使用各类云制造服务。

对云服务组合方案的评价优选是当前的一个研究热点。对于云平台上制造服务的执行来说，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。仿真方法是评价服务组合方案的一种有效尝试。为了有效地在云制造服务组合评价过程中使用仿真方法，需要解决云服务组合方案和仿真模型的转换问题以及仿真结果和服务组合评价指标的转换问题，为此，本文对云制造服务的发布和组合过程进行了相关的研究。在服务发布阶段，考虑如何对制造资源或制造能力实现服务化描述，将原子服务所映射的仿真模型信息注入到服务描述文档中，仿真信息随着服务一起发布；在服务组合阶段，将各原子服务所对应的仿真模型信息进行组合，生成完整可执行的仿真模型，进行针对服务组合方案的仿真；仿真结束后，将仿真指标通过相关的转换对应关系构建成服务评价指标，反馈给服务提供方和需求方，从而实现对云制造服务组合方案的评价

## 1.2 研究目标和意义

仿真方法是评价云制造组合服务的一种有效方法，使用仿真方法能在云制造服务选择过程中，提高服务选择的定量化和有效性。为了有效地使用仿真方法，需要解决云制造服务组合方案与仿真模型的映射问题。本文重点研究了面向仿真的云制造服务发布与组合方法，并通过将仿真结果信息解析为服务评价信息，从而实现了仿真方法对云制造服务组合方案的评价。

制造云服务的发布与组合是云制造的一个热点研究方向，本课题通过在服务描述中注入仿真映射信息，研究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。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。

同时，论文的研究工作也为仿真的方法提供了一种新的应用对象，拓宽了仿真方法的应用领域，通过实际的实现框架和案例展示，说明了仿真方法对云制造组合服务的评价具有良好的适用性。

## 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[4, 5]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[6-10]。

具体来讲：制造资源虚拟化使得云制造具有以下优势[11-15]：

（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[16]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[17]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[18]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[19]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[20]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[10]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。

周竞涛等[21]提出了基于同态映射的制造资源虚拟化机制：通过在物理资源层和云服务层之间定义抽象的虚拟能力层，在解耦物理资源与云服务之间直接映射的同时，分别定义了制造资源-虚拟能力、虚拟能力-云服务的同态映射函数；采用基于语义相等映射的实现原理，将物理资源的能力及其所需的依赖条件进行同态抽象转换。

关贺等[22]应用拉式理论对云制造中的制造资源进行虚拟化，通过分析资源调度中的成本最小化、时间最小化、可靠度最大化、质量最优化4个目标，建立4个数学模型，通过对模型的分析找到目标中所需要的资源的属性，将属性提出后，再对其建立本体模型。

**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[25]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[26]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[27]、王中杰等[28]和王正成等[29]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[30]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。

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[31, 32]。

罗永亮等[33]在分析国内外对制造能力概念研究现状的前提下，概括了国内外多位专家学者对制造能力概念的理解和界定，给出了制造能力多维信息模型，主要从构成要素维、关联关系维及综合评估维对制造能力进行了建模，在此基础上，借鉴现有资源或服务描述方法，提出了云制造模式下的制造能力描述体系框架。

孙东南等[34]对加工制造能力进行了具体的定义，加工制造能力的主体是加工制造资源的集成，认为加工制造能力是为达成既定的加工目标，针对加工零件的几何特征，完成加工任务的过程中，集成机床资源、刀具资源和人力资源成为一体，这一集合体在资源固有属性的约束下，在生产活动期间发挥出的功能。

当今对制造资源和制造能力的研究中，制造资源的虚拟化服务化描述较为健全，而对制造能力服务化的描述还有待更多的学者进行研究。制造资源的接入方面，本文应用了Web Service技术，提供调用资源的API接口；制造资源虚拟化方面，在分析制造资源特征的基础上，采用Java编程语言将实体的制造资源映射为虚拟资源；制造资源服务化方面，采用OWL-S服务描述语言实现对虚拟资源的服务化封装。本文制造能力的虚拟化服务化技术与制造资源类似，不同点在于，借鉴目前对制造能力的描述方法，由于制造能力包含多种加工资源和人力资源，对制造能力的描述涉及对加工资源和人力资源等的描述。

### 1.3.2 云制造服务匹配及组合的研究进展

**1、云制造服务匹配**

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[35]。

尹超等[35]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[36]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[37]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[38]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[39]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[40]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[41]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。

Chun-mei Wei等[42]实现了一种基于关键词检索的云制造服务匹配系统，通过在云制造系统的首页输入关键词来匹配服务，为了提高匹配的准确性，对输入的关键词进行了扩展，根据同义词增加关键词。

针对服务匹配，本文在调研多种云制造服务匹配模式的基础上，借鉴了基于关键字的语义智能搜索方法和生成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这两种匹配模式，采用对服务名称的关键字模糊匹配的方式进行云制造服务的智能搜索。

**2、服务组合**

在云制造系统中，云制造服务是一种特殊的云服务，一般以Web服务的形式表现。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，云平台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，云平台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[43]。

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，往往难以满足复杂制造业务的需求。因此，云服务组合成为了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。

1）Web服务组合

倪晚成等[44]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[45]。

2）云服务组合

邹德国等[46]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[47]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。

3）制造云服务组合

刘卫宁等[48]提出了跨平台的制造云服务组合方法，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。马文龙等[49]为解决云制造环境下的动态服务组合问题，提出一种基于改进蚁群算法的制造云服务组合优化算法。在分析制造云服务组合流程的基础上，通过子任务服务质量评估模型优选制造云服务，并将服务质量值作为信息素，求解整体最优组合路径。林廷宇等[50]结合航天集团企业应用场景，系统性地提出航天云制造资源/能力应用模式和航天集团企业云制造系统体系结构，并研究云制造资源/能力服务的多视图描述以及组合优选模型。Fuzan Chen等[51]将云制造服务组合问题转换为多目标优化模型，针对QoS性能和QoS风险两个目标，研究出一套多目标优化算法对模型进行求解。Haibo Li等[52]提出了一种资源服务链组合算法，在制造准备阶段和运行阶段分别对服务链组合的可能性进行评估。

针对服务组合，本文的服务组合方法借鉴了语义型Web服务组合方法的思想，利用语义Web技术对云制造服务进行描述，使之成为计算机能够理解的内容，然后编写脚本实现原子服务的组合。

### 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[53]，目前针对评价方法的研究进展如下:

Nie等[54]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[55]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[56]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[57]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。

在多种评价方法结合方面，Amid[58]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[59]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[60]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[61]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[62]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[63]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

仿真方法是评价服务组合方案的一种有效尝试。为了有效地使用仿真方法，需要解决组合方案自动转换成仿真模型的方法。因此，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组合评价方法不足的前提下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加入仿真信息，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；研究制造资源或制造能力的接入方法、虚拟化和服务化方法。

（2）分析了图形数据库RDF4J的基本功能，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，利用Jena在RDF4J数据库中实现服务的推理检索。

（3）研究云制造服务与仿真模型的映射方法，在此基础上研究仿真模型信息的发布方法。采用在服务描述文件中添加仿真对象信息的方法，使仿真信息随服务的发布而发布。

（4）研究面向仿真的服务组合方法。不仅将原子服务描述文件的组合方法脚本化，而且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）基于现有仿真平台进行二次开发，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云平台展示。

（6）使用Web技术搭建了云制造服务云平台原型系统，提供服务发布、需求发布与匹配、服务组合、服务仿真评价及服务指标展示等功能，从而验证论文相关方法的可行性。

### 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 云制造服务及其相关技术

## 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。

2010年，李伯虎等人[64]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[43, 65]、敏捷制造[66, 67]、计算机集成制造[68, 69]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[70, 71]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[72]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[73]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[64, 71, 74]。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，即资源提供方、制造云运营者、资源使用者。资源提供方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[16, 74]。如下图2.1所示：



图2.1 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），MSRaaS如制造过程中的各种模型、（大）数据、软件、信息、知识等，MHSaaS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。

### 2.1.2 云制造服务组合的概念

云制造服务组合是服务选择不断迭代的过程，选择的复杂程度和迭代的次数由子任务的粒度和数量决定。企业级的应用十分复杂，而单个服务的功能有限，无法满足复杂的业务流程的需要，为了解决这样的问题，服务组合问题产生了。云制造服务组合是指为了完成特定的业务目标或复杂的任务，将多个功能有限的原子服务按照一定的逻辑和服务自身之间的关系“封装”起来，实现用户的复杂需求，从而更大程度地复用制造服务，提供更加灵活，强大的能力。

云制造中的服务组合是“分散资源集中使用”和“集中资源分散使用”的结合，它不仅能有效地集中分散资源完成复杂任务，也能有效地为分布在不同地理位置的多用户提供服务。服务组合是云制造的关键技术，依据用户需求组合简单或功能单一的服务，以生成功能复杂的组合云制造服务。目前出现的Web服务组合方法大致可以总结为基于工作流模型和基于人工智能的服务组合方法。前者首先建立经典的工作流模型，并用其来描述组合服务以指导服务组合的实现，它易于编程实现。后者将服务组合问题视为一个规划问题的自动求解或路径规划问题，通过给定一个服务对象的初始状态和目标状态，在服务集合中寻求一条较优的服务组合路径，以实现服务对象从初始状态到目标状态的转化[75]。

### 2.1.3 云制造服务组合方案评价的基本概念和指标体系[76]

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。

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），如表2.1所示：

表2.1 服务需求方关注的指标

|  |  |
| --- | --- |
| 指标名称 | 描述 |
| 时间（Time，T） | 从服务需求方发起调用，到最终得到服务执行结果的时间 |
| 成本（Cost，C） | 服务需求方调用服务必须支付的费用 |
| 质量（Quality，Qua） | 服务的功能性、安全性等 |
| 服务可靠性（Reliability，Rel） | 服务能够正确响应的比率 |
| 服务可用性（Availability，Ava） | Web服务在某段时间内可用的概率 |
| 服务诚信度（Reputation，Rep） | 服务需求方使用服务后，对服务可信程度的反馈评价 |

服务提供方需要通过服务评价指标来优化生产线、提高产品质量，从而提高企业竞争力，所需指标如表2.2：

表2.2 服务提供方关注的指标

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 一级指标 | 二级指标 | 描述 |
| 时间指标 | 初始加工时间（Initial Processing Time，IPT） | 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 |
| 生产周期（Cycle Time， CT） | 被加工物料作为在制品的时间 |
| 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 |
| 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 |
| 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 |
| 能力指标 | 完工数量（Number，N） | 在给定的生产周期CT下，整条生产线完成加工的产品数量 |
| 生产线的瓶颈率（Bottleneck Rate，RB） | 瓶颈工位在每单位时间内生产的零件数或完成的任务数 |
| 单位时间生产量（Throughput，TH） | 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 |
| 临界在制品库存（Work in Process，WIP） | 生产过程中生产线的起点和终点之间的库存总和 |
| 工位资源状态（Station Resource Status，SRS） | 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 |
| 工件资源状态（Entity Resource Status，ERS） | 生产、运输、存储等各种状态占整个工件生命周期的比例 |
| 能耗指标 | 能源消耗状态（Energy Consumption Status，ECS） | 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 |
| 能源效率（Energy Efficiency，EE） | 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 |
| 成本指标 | 加工成本（Processing Cost，PC） | 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 |
| 运输成本（Logistics Cost，LC） | 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 |
| 管理成本（Administration Cost，AC） | 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 |
| 质量指标 | 产品质量（Product Quality，PQ） | 产品的好坏 |
| 管理质量（Administration Quality，AQ） | 订单过程中管理人员管理质量的评定 |

## 2.2 语义Web的基本技术

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)。

将语义Web引入制造领域，通过使用语义Web技术来描述制造服务，可以使计算机能够理解服务信息。在服务发现阶段，计算机可以自动完成服务的检索，提取出符合用户需求的服务集。在服务组合阶段，可以实现服务组合自动化，用户只需在前台完成原子服务的选择和顺序定义，系统将自动完成服务的组合。

### 2.2.1 本体论的概念

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 语义Web中的描述语言

**1. 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[77]，如图2.2所示。

O

P

图2.2 RDF有向图

如图2.3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2.3 RDF数据模型实例

资源描述框架模式（RDF Schema）[78]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[79]，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2.4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2.4 RDFS范例

**2. 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[80]。

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[80]：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。

**3. 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2.5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[81]。



图2.5 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[82]。

OWL-S的目标是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组成：

**Service Profile**

描述服务是干什么的。它向搜寻服务的需求方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，服务需求方也可使用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）服务提供方的黄白页信息，如服务提供方的联系方式、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方提供的服务的功能，又可以用于描述服务需求方所需的服务的需求。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。

**Service Model**

基于过程描述服务是如何工作的。Service Model 主要是服务提供方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。这使得搜寻服务的需求方能够：

（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。

**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。

### 2.2.3 语义Web的查询与存储

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2.6展示了一个SPARQL语句[77]，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2.6 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2.3所示。

表2.3 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 |

## 2.3 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语义Web的基本技术，包括本体论、语义Web中的描述语言（RDF、RDFS、OWL和OWL-S）；同时介绍了图数据库RDF4J的查询与存储方法。下一章将对云制造服务的发布过程、匹配过程以及组合评价过程的一般方法进行分析

# 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

云制造运行涉及云制造服务提供方、云制造服务需求方和第三方云制造运营者三类群体。其中，云制造服务提供方拥有制造资源或制造能力，希望以出租或转让的形式获取收益；而云制造服务需求方希望以较低的成本换取服务提供方的资源，从而完成某种制造任务；第三方云制造运营者则通过集成、调配不同云制造服务提供方的资源，为服务需求方提供高质量的制造服务，获取一定的利润。

云制造服务发布和服务匹配的一般工作流程如图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确定最终合作意向。后期云平台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 云制造服务发布和匹配的一般流程

## 3.2 云制造服务发布过程分析

### 3.2.1 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，为了支持逻辑语义推理，需要引入领域本体对资源进行描述。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的研究实现了基于本体的服务描述方法。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生产工艺本体。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3.2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，以便服务需求方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3.3是在Protégé中定义的企业本体例子，企业本体是一个类，其具有一系列的属性信息，包括企业地址、联系方式等基本信息，同时企业能发布产品服务和制造能力服务至云平台。每类产品服务或制造能力服务都具有各自的描述信息，制造能力服务通过一些制造能力基本信息（如加工精度，尺寸等）来描述，产品服务需定义产品基本信息（如产品类型，产品用途，使用范围，生产厂家等）、产品制造工艺（产品可通过哪些制造能力生产出来）、产品装配工艺。定义好本体后可以生成RDF/OWL文件，并保存在图数据库中。



图3.2 企业本体



图3.3 企业本体Protégé导出图

### 3.2.2 制造资源或制造能力虚拟化和服务化

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云制造资源或制造能力虚拟化、服务化和服务的注册与发布。

**1、制造资源或制造能力虚拟化**

虚拟化技术是支撑和构建云制造资源池的核心技术。通过虚拟化技术实现物理资源到虚拟资源的透明化映射，由服务提供方对云制造资源或能力进行统一描述，然后加入到云制造服务池中，可在云制造平台上注册并供服务需求方查询和使用。不同类型的资源或能力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，都是为了后继的服务化和利用率的提升。

云制造的所有资源和能力对客户端来说都是虚拟的，客户端看不到云制造资源或制造能力的实体，因此云制造服务提供方需要有一项虚拟化技术来描述制造资源或制造能力，让云制造服务需求方能够根据自身需要轻易地通过网络来调用云制造资源或能力。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。云制造资源或能力的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或能力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。在制造资源或制造能力的虚拟化过程中，需要对物理制造资源或制造能力进行统一描述，并提供针对物理制造资源或制造能力的目录黄页以及名字解析、查询等服务。

**1）服务虚拟化框架**

本文采用面向对象的方法，主要分析制造服务中的产品提供为服务和制造能力为服务，按人类认识客观世界的思维方式来识别和定义云制造产品服务和制造能力服务的信息实体，将实体定义为对象，而对象的属性表示为资源或能力的特性。服务提供方在发布服务时，需要根据服务虚拟化描述框架来构建服务的信息模型和数据模型，通过标记服务的基本属性、功能属性、使用属性和状态属性，表示服务提供方有能力生产某种产品或提供某种制造能力。服务描述模型如下所示：

其中，Service表示服务提供方发布的制造云服务，由服务基本属性（BaseAttributes），功能属性（FunctionAttributes），使用属性（UseAttributes）和状态属性（StateAttributes）加以描述。

**2）虚拟化案例**

以制造生产加工硬设备为例，资源虚拟化有以下几步：

（1）构建其虚拟化模型如下图3.4所示。



图3.4 制造生产加工硬设备虚拟化模型

（2）根据虚拟化模型构建虚拟化描述模板。

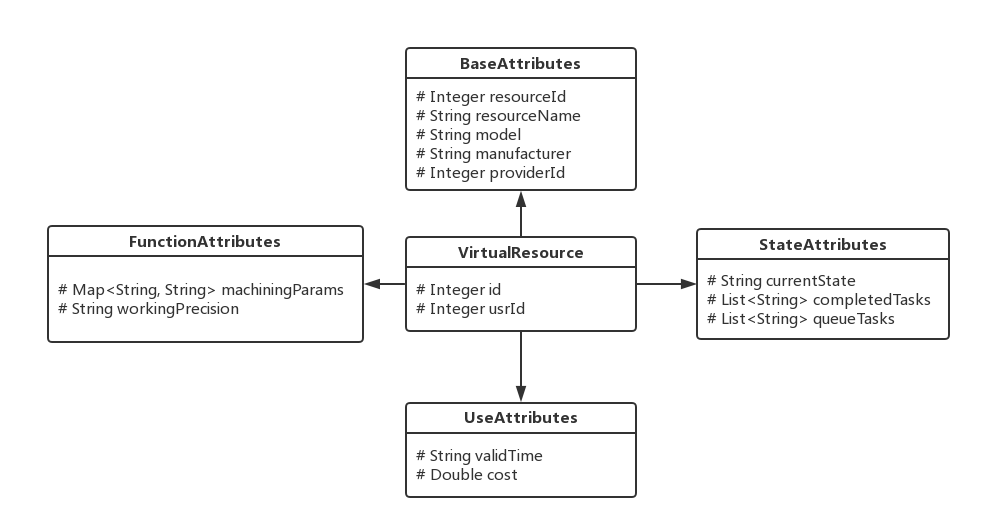


图3.5 制造生产加工硬设备virtual resource类图

图3.5所示的Java类制造生产加工硬设备的虚拟化模板，云制造资源提供方可根据虚拟化模板生成资源实例，并可针对具体功能属性的设备在此模板的基础上进行扩展。

**2、制造资源或制造能力服务化**

云制造服务提供方通过对虚拟化资源进行服务化封装、发布等操作，形成制造云服务；然后将服务发布到服务注册中心，供服务需求方查询和使用。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）。

服务虚拟化后会通过Java接口和类的方式来对服务进行描述，本文通过JAX-WS（Java API for XML Web Services）框架，根据Java类的信息发布服务并生成WSDL文档。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。

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。

### 3.3.1 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。而基于Web服务本体描述语言的服务匹配，可通过服务名称、服务功能性描述和服务非功能性描述分别进行匹配。在服务发布阶段，OWL-S的Service Profile部分可添加对服务功能性信息和非功能性信息的描述。服务的功能信息主要是指服务的IOPE（Input、Output、Precondition、Effect）。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。服务的非功能性描述主要是服务提供方在Service Profile的description节点下自行添加的服务描述信息。

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3.6所示。



图3.6 云制造服务匹配过程

### 3.3.2 基于Jena的推理检索

本文在基于逻辑推理的服务匹配过程中使用了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。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，Jena的通用规则引擎可自定义规则和逻辑，通过建立本体规则库并根据已有的规则和逻辑可实现在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。



图3.7 推理机总体框架图

Jena推理引擎的总体框架如图3.7所示。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。推理机制实际上是在Graph SPI的水平之上执行的，任何不同的Model接口都可以被构造成一个推理Graph。Ontology API提供了便利的方法来将适当的推理机和OntModels联系起来。作为一般RDF API的一部分，Jena也提供了一个InfModel，它是提供额外控制和访问底层推理图的模型接口的扩展。Reasoner API支持这样的概念：通过将推理机绑定到一组schema上来制定一个专用的推理机，或使用bindSchema调用本体数据将一个推理机专用化。然后通过调用bind方法，这个专用化的推理机就可以附属于不同的实例数据集合。在与不同的实例数据多次使用同一个schema信息这种情况下，这个技术就允许重用推理。在RDF中，没有明显的区分schema数据和实例数据，类或相关的实例都可以通过bind或bindSchema调用。为了使这种设计尽可能的开放，Jena也包含了一个ReasonerRegistry。它是一个静态类，通过这个类可以检测到目前可用的推理机。可以注册一个新的推理机，也可以动态的查找一个给定类型的推理机。

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，每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。

## 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，它是一个排列组合的结果。如下图3.8所示，某制造任务需要A和B两个加工环节，甲厂和乙厂都能提供A、B两个制造任务，则共能生成4种组合方案。



图3.8 服务组合方案

云制造环境下的制造资源服务组合主要包括串联结构、循环结构选择结构和并联结构四种基本结构[83]，如图3.9所示，其中Si（i=0,1,…,n+1）表示第i个原子服务。

串联结构指服务之间按照顺序过程执行，例如“主轴加工”可细分为按照顺序执行加工的“主轴毛坯加工”、“主轴粗加工”、“主轴精加工”和“主轴检验达标”。循环结构指服务在特定条件下会重复执行，例如汽车加工链中的“打磨工位”和“动平衡工位”，零件经过“打磨工位”后执行动平衡，若动平衡结果不合格则重复执行打磨。选择结构是指根据若干条件选择部分过程进行执行，如有两个相同的“加热工位”，零件可以选择一个空闲的工位执行加工作业。并联结构指服务之间可以同步进行，没有先后顺序的约束，如混凝土预制件所需要的钢筋和水泥分别由钢筋厂水泥厂生产，两者可同步进行加工，互不影响。



图3.9 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

在实际应用中，需选择较高服务质量的服务聚合形成更大粒度的服务。作为服务选择的重要考量，服务质量评价的准确性显得尤为重要。传统QoS评价指标的数据来源主要有：

（1）服务提供方发布的QoS数据（例如“可用性”等）[84]；

（2）服务需求方反馈的QoS数据（例如“用户评价”等）[85]。

早期研究中，大多假定服务提供方和服务需求方给出的 QoS 数据都是真实可信的[86]，因而在进行服务选择时，直接使用以上两种数据，这时的服务选择主要关注如何从多维QoS中选取多目标优化的服务，而对服务的可信性考虑不足[87]。但是对QoS数据真实性的假设往往很难保证：一方面，服务提供方可能为达到某种目的，发布虚假的QoS数据，以欺骗用户；另一方面，服务需求方也有可能出于某种目的，从而给出虚假反馈的QoS数据，或者受到自身因素的影响，反馈的QoS数据往往与真实情况不符合[87, 88]。这些不可信的QoS数据将直接影响QoS评价的准确性和可靠性。同时，虽然有些评价指标可以通过解析公式计算得到，但在较为复杂的服务组合中，解析公式很难计算出最终指标。因此，需要利用一些新的方法对服务组合进行评价，本文采用的是仿真方法，通过执行仿真模型得到服务组合的仿真指标，并将之转换为服务指标对服务组合作出评价。

## 3.5 本章小结

本章主要介绍了云制造服务的一般流程，首先对云制造服务的发布过程进行分析，包括本体构建技术、虚拟化和服务化技术；其次对云制造服务匹配过程进行分析，研究了需求的发布和匹配以及基于Jena的推理检索方法；最后对服务组合和评价过程进行分析，介绍了一般的服务组合方法和评价方法。下一章将着重介绍面向仿真的云制造服务发布与组合方法及其实现步骤，分析面向仿真的方法与一般方法的主要区别。

# 第4章 面向仿真的云制造服务发布与组合方法

## 4.1 面向仿真的云制造服务发布与组合方法的总体思路

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。将仿真的方法应用到云制造服务组合方案的评价中去，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，能够提高服务评价的准确性。同时，仿真评价方法能很好地应用于复杂生产环境中，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。

面向仿真的云制造服务发布与组合方法的工作流程如图4.1所示。服务提供方首先在云平台中发布云制造服务资源信息，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，服务需求方选中的意向服务组合输出OWL-S格式的描述文档，该文档提供给仿真平台；仿真平台基于已有的仿真模型库以及读取到的OWL-S文档，组成仿真模型，执行仿真，并将仿真结果指标返还给云平台进行相应的展示；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。

本文工作围绕图4.1中灰色底内容的标号①~⑥进行展开，其中：

①：改进服务发布方法，在OWL-S服务描述文档中添加仿真对象信息，使仿真信息随服务一起发布至云平台。

②：在服务组合阶段，根据组合服务内容，读取原子服务对应的仿真信息，并根据服务执行过程生成完整的仿真模型信息。

③：基于特定的仿真平台以及意向服务组合背景，建立仿真模型库，为后期仿真模型的建立奠定基础。

④：服务提供方和服务需求方确定的意向服务组合会形成OWL-S格式的服务组合文档，仿真平台采用特定方法对该文档进行读取和解析，提炼出有效信息，以构建仿真模型。

⑤：基于③和④，在仿真平台内，构建仿真模型。

⑥：运行构建好的仿真模型，并输出相应的评价指标，采用特定方法，反馈给平台进行展示，给服务提供方和服务需求方提供决策支持。

本章和第五章将对以上内容进行详细展开。



图4.1 云制造服务过程及其评价的工作流程图

## 4.2 面向仿真的云制造服务发布方法

资源提供方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方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4.2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。



图4.2 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

**1、服务抽象过程**

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4.3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（Java API for XML Web Services）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4.3 服务抽象过程

JAX-WS规范是一组XML形式Web Service的[Java API](https://baike.baidu.com/item/JAVA%20API)，其允许开发者选择RPC-oriented或者message-oriented两种通信方式来实现自己的Web Service。使用JAX-WS规范开发WebService需要以下几个步骤。

（1）写接口和实现。接口和实现类需要注明@WebService，把暴露给客户端的方法注明为@WebMethod；

（2）发布。包括两种方式：基于Web服务器或调用Endpoint.publish(url, Class)；

（3）生成测试或供使用的客户端（代码）。

**2、服务抽象案例实现**

（1）以针对产品“主轴”的询价服务为例，定义主轴询价服务类的接口如下：

|  |
| --- |
| @WebService  @SOAPBinding(style = SOAPBinding.Style.RPC)  public interface AxisPriceService{  @WebMethod  Integer getAxisPrice();  } |

（2）客户端对应主轴询价接口的实现类如下所示：

|  |
| --- |
| @WebService(endpointInterface = "service. AxisPriceService ")  @SOAPBinding(style = SOAPBinding.Style.RPC)  public class AxisPriceServiceImpl implements AxisPriceService {  @Override  public Integer getAxisPrice() {  return 100;  }  } |

（3）通过Endpoint进行服务发布：

|  |
| --- |
| public class Main {  public static void main(String[] args) {  Endpoint.publish("http://localhost:8080/testjws/service/getAxisPrice", new AxisPriceServiceImpl());  }  } |

若使用Tomcat等Web服务器进行发布，需要添加相应的jar架包并改写配置文件。

（4）生成服务代理

客户端的生成可使用Java JDK自带的工具wsimport。若配置了Java JDK并将JDK添加到系统环境变量下，则可在计算机任意位置打开命令行工具，使用如下命令生成可调用的服务代理类。

|  |
| --- |
| wsimport -keep –d .\src –p testjws.client http://localhost:8080/testjws/service/getAxisPrice?wsdl |

（5）编写客户端执行服务

|  |
| --- |
| public class Main {  public static void main(String[] args) throws DatatypeConfigurationException {  // 获取service  AxisPriceService service = new AxisPriceServiceImplService().getAxisPriceServiceImplPort();  // 调用服务  Integer axisPrice = (Integer) service.getAxisPrice();  System.out.println(“主轴价格为：” + axisPrice);  }  } |

### 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4.4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4.4 仿真抽象过程

在仿真抽象过程中，按照所映射的仿真对象所需参数提取实体制造资源或制造能力的属性，也就是抽取仿真对象要素。仿真对象要素主要包括：对象UUID，对象类型，对象名称，对象属性名及其属性值的键值对，对象方法名及其方法值的键值对。

对于一个特定的仿真软件平台来说，都有系统自带的仿真模型库，以便操作人员可以根据任务需求，通过拖入或者点击等方式，将模型库的仿真对象加入到当前的仿真窗口界面当中，并通过属性、参数设定等方法，对该对象进行重命名、标签备注以及其他参数的定义。对于论文工作来说，需要针对特定的服务，在仿真平台内，建立自定义的、和云平台服务适应的仿真模型库，以便仿真平台在读取服务组合文档时，能够通过相关查找方式，找到与原子服务或者组合服务对应的仿真对象，并在当前仿真窗口中自动添加，完成仿真模型的构建。仿真模型库是服务组合的仿真模型建立的基础。

仿真模型库有两个来源：

（1）服务提供方在云平台上发布制造服务资源的同时，提交服务相关的仿真对象库，仿真平台读取后根据文档自动建立平台内的仿真模型库。

（2）服务提供方在云平台上发布制造服务资源的同时，未提交服务相关的仿真对象库，此时需要在特定的仿真平台内部，根据云制造服务的特点和应用场景，手动建立仿真模型库。

这里需要说明，仿真平台不同，特定服务组合的仿真模型库有所差异。但是总体原则相同：

（1）对于云平台上的原子服务类型，对应于仿真平台内的基本类型的对象。

（2）对于云平台上的组合服务类型，对应于仿真平台内的耦合类型的对象。

### 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4.5，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，本论文在OWL-S的grounding节点中扩展了一个名为“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4.6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4.5 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4.6 仿真信息的添加

## 4.3 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4.7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。

在服务发布阶段，原子服务对应的仿真对象信息保存在Grounding节点下的“SimInfo”节点中，因此在第4步读取grounding节点信息时，需要获取到“SimInfo”节点中的仿真信息，根据组合服务执行过程生成仿真模型的执行过程并保存在组合服务grounding节点下的“SimInfo”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4.7 服务组合步骤

## 4.4 本章小结

本章首先介绍了面向仿真的云制造服务发布与组合方法的总体思路，然后对云制造服务发布方法和组合方法分别展开介绍。面向仿真的服务发布方法相比于一般的服务发布方法多了仿真抽象的步骤，在服务发布阶段将仿真信息一起发布。而面向仿真的服务组合方法重点在于根据服务执行过程，构建仿真模型，生成包含完整仿真模型的组合服务描述文档。下一章将基于Plant Simulation仿真平台，实现本章价绍的面向仿真的服务评价与组合方法，并给出仿真平台的自动构建和执行方法以及仿真结果的转换和导出方法。

# 第5章 基于Plant Simulation仿真平台的制造云服务发布与组合评价的实现

## 5.1 基于Plant Simulation的服务发布

### 5.1.1 Plant Simulation仿真软件介绍

西门子公司的软件工具Tecnomatix Plant Simulation，是一个面向生产系统、物流工程设计和运行过程的仿真软件，它是面向对象的、图形化的、集成建模的仿真工具，系统结构和实施都满足面向对象的要求。从学术上归类，Plant simulation是一类典型的离散事件仿真软件工具。

Plant Simulation主要应用于生产物流系统仿真和复杂物流系统的仿真，同时还能对混合流程型生产进行仿真，它利用SimTalk语言对仿真过程进行程序编写，具有很强的灵活性。因此，论文在众多的生产制造系统物流仿真软件中，选择了Plant Simulation作为仿真工具。

### 5.1.2 Plant Simulation中建模对象说明

在Plant Simulation中，所有基本建模对象都会在Frame对象中构建仿真流程，Frame可看作是一条生产线或一个生产车间等。Plant Simulation具有丰富的建模对象，以下主要对Plant Simulation常用的基本建模对象作简要介绍。

1. Source和Drain

Source对象和Drain对象是仿真中最常用的对象，负责移动对象等的生成及回收。Source对象创建MU（移动对象）的方式主要有四种：

按照指定的时间间隔（Interval Adjustable）生成MU、按照指定的数目（Number Adjustable）生成MU、根据生成表（Delivery Table）生成MU以及采用触发器（Trigger）生成MU。模型中的移动对象经过各个流程（工艺），最终到达Drain对象对其进行回收。

2. SingleProc和ParallelProc

SingleProc对象和ParallelProc对象用于表示机器和设备，两者区别之处在于，SingleProc对象用于表示一次只能处理一个MU的设备或设施，而ParallelProc对象用于表示同时处理多个MU的设施或设备。

3. Buffer和PlaceBuffer

Buffer对象和PlaceBuffer对象用于表示缓冲区。PlaceBuffer对象是一个主动物流对象，它的内部可以看作有n个单元，每个单元都是一个SingleProc对象，这些单元纵向排列。MU依次通过PlaceBuffer对象内部的这些单元，然后离开PlaceBuffer对象，PlaceBuffer对象中的单元可以通过程序语句来访问。Buffer对象是PlaceBuffer对象的简化，它和PlaceBuffer对象的不同之处在于其内部没有类似SingleProc对象的单元，所以不能指定MU进入Buffer对象中的特定位置，然而当需要容纳很多MU，又不需要访问其内部单元时，使用Buffer对象比使用PlaceBuffer对象更方便。

4. Method

Method对象内包含着许多SimTalk语句，可以被其他Method调用，也可以被建模对象调用，相当于C++、Basic或者Pascal等程序语言中的一个过程函数或功能函数。SimTalk是Plant Simulation专用的仿真程序语言，SimTalk语言的使用可以提高模型的灵活自主性。SimTalk编写的方法函数被其他函数或模型对象调用，可以实现对生产流程的控制等细节操作。

此外，EventController对象、Connector对象、Store对象、Line对象、Track对象、Work对象、Container对象、TableFile对象等基本对象也是比较常用的。

### 5.1.3 基于Plant Simulation的生产单元仿真抽象实现

**1、实体对象与仿真对象的映射关系**

根据4.2节面向仿真的云制造服务发布方法，在图4.1服务注册与发布阶段，需要将实体资源进行仿真抽象，不同粒度的资源根据自身特征将映射成不同的仿真对象。表5.1表示在不同的情况下，实体对象与仿真对象的映射规则。企业、车间、生产线和工位根据其提供的资源或能力可映射成多种仿真对象，包括Source、Frame、SingleProc等。

表5.1 实体对象与仿真对象映射关系

|  |  |
| --- | --- |
| **仿真对象** | **情况描述** |
| Source | 作为资源提供对象，不关注内部细节 |
| Frame | 需要仿真内部细节 |
| SingleProc/ParallelProc/Assembly | 提供的制造能力服务作为服务组合中的一步，且不关注内部细节 |
| Buffer/PlaceBuffer/Store | 提供缓存或仓储服务 |
| Drain | 生产加工结束 |

确定实体对象需要映射的仿真对象类型后，按照仿真对象建模所需参数提取实体对象属性，构建基于XML格式的仿真对象描述模型如下所示。详细步骤见4.2.2小节。其中，“SimInfo”节点位于“grounding”节点下，记录了所有的仿真相关信息；“simobj”节点记录某仿真对象的所有参数信息，一个“SimInfo”节点下可包含多个“simobj”节点；“name”表示仿真对象名称；“class”表示仿真对象在Plant Simulation中的对象类型；“property”存储了仿真对象所有的属性参数；“method”一般存储仿真对象方法参数的路径。

|  |
| --- |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid=UUID> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>stationName</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |

**2、实现案例**

例如，对于主轴来说，企业若发布主轴这一产品为服务，可对应于Plant Simulation仿真平台内的“Source”对象；“主轴粗加工”若作为云平台上某一原子服务，可对应于Plant Simulation仿真平台内的“SingleProc”仿真对象；“主轴加工”作为云平台上的某一组合服务，包括各个原子服务，如主轴毛坯加工、主轴粗加工、主轴精加工、主轴检验打标等，可对应于Plant Simulation仿真平台内的“Frame”仿真对象。

以“主轴粗加工”映射为“SingleProc”仿真对象为例，构建基于XML格式的仿真对象描述模型如下所示。

|  |
| --- |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid="84521d41-1f63-4s1a-54ss-1532sl84w2i8"> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>主轴粗加工</name> <!—工位名称-->  <class>SingleProc</class> <!—工位对应的仿真对象类型-->  <property name="ProcTime">200</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>  </grounding:SimInfo> |

## 5.2 基于Plant Simulation的仿真模型组合描述

**1、仿真模型的组合**

在图4.1中的服务注册与发布阶段，原子服务的服务描述文件的“grounding”节点中已经包含了仿真对象信息。在服务/任务组合阶段，需要读取各原子服务的描述文档，从“grounding”节点中的“SimInfo”节点读取仿真对象信息，并根据组合服务执行过程生成仿真模型的执行过程。

制造服务X由制造服务A，制造服务B，制造服务C和制造服务D组合而成。读取制造服务ABCD的“SimInfo”节点中的仿真对象信息如下所示：

|  |
| --- |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid=“b30b9baf-251d-4ad0-85ad-8fc780570f3f”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务A</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid=“90ece4fb-ef20-49da-8a00-7e8c28b02a8b”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务B</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid=“fbbed7d0-8d2f-4946-9c4c-8c2f0211e897”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务C</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |
| <grounding:SimInfo>  <simobj uuid=“2403721a-b8dc-42bb-aeac-5fbb9b20565b”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务D</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |

将这四个原子服务的仿真对象部分进行组合操作，生成组合服务的仿真模型信息并存入组合服务描述文件“grounding”节点下的“SimInfo”节点中。若制造服务之间是顺序结构，则生成仿真模型执行过程如下所示，通过UUID来表示某一个仿真对象。

|  |
| --- |
| <sequence> <!--定义组合服务的执行流程为顺序结构-->  <item> b30b9baf-251d-4ad0-85ad-8fc780570f3f </item> <!--对应制造服务A-->  <item>90ece4fb-ef20-49da-8a00-7e8c28b02a8b </item> <!--对应制造服务B-->  <item> fbbed7d0-8d2f-4946-9c4c-8c2f0211e897 </item> <!--对应制造服务C-->  <item>2403721a-b8dc-42bb-aeac-5fbb9b20565b </item> <!--对应制造服务D-->  </sequence> |

组合服务完整的仿真模型如下所示：

|  |
| --- |
| <grounding:SimInfo>  <sequence> <!--定义组合服务的执行流程为顺序结构-->  <item> b30b9baf-251d-4ad0-85ad-8fc780570f3f </item> <!--对应制造服务A-->  <item>90ece4fb-ef20-49da-8a00-7e8c28b02a8b </item> <!--对应制造服务B-->  <item> fbbed7d0-8d2f-4946-9c4c-8c2f0211e897 </item> <!--对应制造服务C-->  <item>2403721a-b8dc-42bb-aeac-5fbb9b20565b </item> <!--对应制造服务D-->  </sequence>  <simobj uuid=“b30b9baf-251d-4ad0-85ad-8fc780570f3f”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务A</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  <simobj uuid=“90ece4fb-ef20-49da-8a00-7e8c28b02a8b”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务B</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  <simobj uuid=“fbbed7d0-8d2f-4946-9c4c-8c2f0211e897”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务C</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  <simobj uuid=“2403721a-b8dc-42bb-aeac-5fbb9b20565b”> <!—各仿真对象具有不同的uuid-->  <name>制造服务D</name> <!—仿真对象名称-->  <class>stationType</class> <!—仿真对象类型-->  <property name=propertyName>propertyValue</property> <!—仿真对象属性-->  <method name=methodName>methodValue</property> <!—仿真对象的方法-->  </simobj>  </grounding:SimInfo> |

至此，组合服务的仿真模型信息构建完成，Plant Simulation可以通过接口读取仿真模型信息，并自动构建仿真模型。

## 5.3 基于Plant Simulation的仿真模型自动构建

### 5.3.1 仿真模型的自动生成

服务/任务组合完成后会生成包含仿真模型信息的组合服务描述文件，如图4.1所示，仿真平台需要读取组合服务文档并进行解析，将各个仿真对象及其属性信息存放到仿真平台的表格中并根据仿真模型的执行顺序为各个仿真对象生成位置信息，即组成仿真模型。若仿真对象没有映射为Source和Drain，则需要仿真平台自行生成。如图5.1展示了Plant Simulation仿真平台自动构建仿真模型的流程信息，主要包含以下几步：

（1）XMLInterface读入OWL-S服务描述文件；

（2）解析服务描述文件，将仿真对象信息存入表格；

（3）根据仿真模型执行顺序，生成各对象位置信息；

（4）检测映射成的仿真对象中是否含有Source对象，若没有则在初始位置生成Source对象；

（5）按序生成各个仿真对象；

（6）检测是否存在Drain对象，若没有则在末尾添加Drain对象；

（7）各个对象间按照执行顺序生成connector进行连接。



图5.1 仿真模型自动构建流程

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MySQL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“simobj”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 仿真模型的自动执行

Plant Simulation仿真平台提供了C#的驱动接口，通过C#编写客户端可以执行打开/关闭仿真模型、启动/停止仿真模型、新建/加载仿真模型等常用操作。由于本论文中采用了Java语言编写后端逻辑，故在仿真模型执行中，编写Java客户端加载C#编译后的DLL文件，通过调用native方法来驱动Plant Simulation，实现了仿真模型的自动构建、仿真模型的自动运行以及最后仿真指标结果的导出。下表5.2展示了驱动Plant Simulation的主要方法及其描述。

表5.2 Plant Simulation驱动方法

|  |  |
| --- | --- |
| **方法** | **作用描述** |
| void NewModel() | 新建仿真模型。 |
| void LoadModel(String) | 加载已存在的仿真模型。 |
| void SaveModel(String) | 保存仿真模型。 |
| void CloseModel() | 模型执行完后，关闭仿真模型。 |
| void StartSimulation(String) | 启动仿真模型。 |
| void StopSimulation() | 停止仿真模型。 |
| void ResetSimulation() | 重置仿真模型。 |
| void IsSimulationRunning() | 检测仿真模型是否运行结束。 |
| void ExecuteSimTalk(String) | 执行SimTalk语句。 |
| void Quit() | 退出仿真平台。 |
| void QuitAfterTime(Integer) | 定时退出仿真平台。 |
| void SetLicenseType() | 设置权限认证。 |

## 5.4 基于Plant Simulation的仿真结果和指标转换

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服务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服务指标体系。论文建立不同指标之间的转换关系如表5.1，表中斜线部分表示无对应的指标转换关系。

在仿真平台中，仿真指标会通过以下转换关系转换为服务指标，并将服务指标存入到关系数据库中。云平台中的服务评价模块会调用服务指标信息并展示给企业用户。

表5.1 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。

## 5.5 基于Plant Simulation的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，云平台中服务指标的展示需要通过读取数据库获得数据，因此，论文选择数据库的方式，将仿真的结果指标信息转换为服务指标信息后存入MySQL数据库中，供云平台读取展示。

## 5.6 本章小结

本章结合Plant Simulation仿真平台，对第4章所述的面向仿真的云制造服务发布与组合方法加以说明，详述了制造服务抽象成Plant Simulation仿真对象的方法，并对仿真模型组合方法进行描述。此外，本章对Plant Simulation仿真平台模型的自动构建、仿真指标向服务指标的转换以及服务指标的输出进行了介绍。下一章将介绍云制造服务原型系统的开发，并设计案例验证论文所提的面向仿真的云制造服务发布与组合方法。

# 第6章 云制造服务原型系统的设计与开发

## 6.1 原型系统设计目标

云制造环境下资源服务的管理需要一个高效的信息系统。系统需要实现产品和制造能力服务的注册与发布、检索与匹配、组合与评价，服务请求方和服务提供方的注册和管理等功能。

基于前面章节提出的面向仿真的服务发布方法、检索与匹配方法及组合与评价方案，本章给出系统实现的功能结构、功能设计、应用流程及系统开发实现的若干关键技术，包括系统的各功能模块设计、面向仿真的服务描述模板的设计与实现方法、面向仿真的服务组合方法的实现以及基于仿真的服务评价方法的实现，将前面章节的思想落实到实际的云制造业务过程中。

云制造服务原型系统基于B/S网络体系架构，为今后开发具备一定规模的面向行业的公共服务平台提供理论支持与原型系统参考。

## 6.2 原型系统功能设计

原型系统总体功能设计如下图6.1所示。



图6.1 原型系统功能框架

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，服务提供方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，服务需求方会选择合适的原子服务，若单个原子服务无法满足服务需求方的需求，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，注册用户在登陆原型系统时，会根据用户注册权限显示不同内容，比如注册用户为服务需求方，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。

## 6.3 原型系统的服务发布和匹配、评价流程

云制造服务平台的设计思想是：在原型系统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原型系统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。

无论是服务需求方，还是服务提供方，都需要在原型系统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，所以由原型系统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原型系统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原型系统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原型系统上完成对服务执行过程的评价工作，至此，服务执行结束。

## 6.4 原型系统开发实现

原型系统前端页面使用JavaScript语言进行开发，后端业务逻辑使用Java语言开发。整个系统使用主流的Java IDE工具Intellij IDEA进行开发，集合了SpringMVC（后端业务逻辑）、Mybatis（数据库操作）和AngularJS（前端界面和逻辑）这三个主流的网页开发框架。后端架构主要由以下几部分组成：

（1）Entity层：通过创建实体类来实现创建数据库中表的功能；

（2）Dao层：对数据库中表的具体操作功能的实现；

（3）Service层：进行逻辑业务处理的一层，是Controller层的一个功能延伸，可以代替Controller层来实现业务处理方面的具体功能的实现；

（4）Controller层：是SpringMVC框架中的控制器的一部分，由前端控制器和动作处理器组成，从浏览器发出的请求先到它这边来进行相应处理。

原型系统与仿真平台以及数据库层的关系如下图6.2所示。具体解释如下：

①服务发布。用户在原型系统上填写服务发布信息，将制造云服务发布至RDF4J数据库中；

②服务匹配。服务匹配阶段从RDF4J数据库中推理查询所需服务，生成候选服务集；

③存储组合服务文档。由于仿真平台不支持RDF4J接口，需要原型系统将组合服务描述文档以OWL-S文档的形式进行保存；

④驱动仿真平台。原型系统通过加载C#编译的DLL仿真平台接口文件驱动仿真平台，实现模型的自动构建和运行以及服务指标的导出；

⑤读取组合服务文档。仿真平台通过XML接口读取OWL-S服务描述文档，并解析文档中的仿真信息自动构建仿真模型并执行；

⑥存储服务指标。仿真模型执行完成后，将仿真指标转换为服务提供方和需求方关注的服务指标并存储在MySQL数据库中；

⑦读取服务指标。原型系统从MySQL数据库中读取服务指标信息并展示在网页中供服务提供方和服务需求方查看；



图6.2 原型系统数据库关系图

原型系统数据库由文档存储、关系数据库MySQL和图数据库RDF4J三种形式组成。文档形式的存储主要是OWL-S形式的组合服务描述文档，仿真平台通过XML接口读取文档后自动构建仿真模型。MySQL数据库存储注册用户信息、待仿真服务信息、仿真完成的服务指标信息。RDF4J数据库存储制造云服务的OWL-S服务描述文档，从RDF4J数据库中可以拿到服务的所有信息。

如表6.1所示，MySQL数据库包含“UserInfo”、“SimulationWaitedInfo”和“SimulationEvaluationInfo”三个表格。其中“UserInfo”表格存放企业注册用户的基本信息，包括企业名称、原型系统登陆密码、联系方式、权限信息等；“SimulationWaitedInfo”是待仿真服务信息，包括该仿真任务所属的制造云服务、制造云服务所属的企业用户ID、服务名称以及服务的基本介绍；“SimulationEvaluationInfo”是仿真结果指标转换为服务评价指标后的信息。

表6.1 原型系统数据库表格信息

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **数据库表名** | **数据库列名** | **描述** |
| UserInfo | UserID | 平台用户（服务提供方、服务需求方、平台运营者）的注册信息。 |
| UserName |
| Password |
| Email |
| Phone |
| Address |
| Authority |
| SimulationWaitedInfo | SimulationID | 等待仿真的组合服务信息。 |
| ServiceName |
| UserID |
| Description |
| SimulationEvaluationInfo | SimulationID | 仿真完成后，仿真指标转换成的服务评价信息 |
| TCT |
| ST |
| LT |
| T |
| N |
| IPT |
| CT |
| RB |
| TH |
| WIP0 |
| SRS |
| ERS |
| ECS |
| EE |
| PC |
| LC |
| AC |
| C |

RDF4J中存储了制造云服务的OWL-S服务描述文档，数据库内容由三元组陈述构成。如下图6.4所示是数据库Web Console端的操作界面，使用server值和ID值就可以通过接口来对数据库进行增删改查操作，服务的检索就是通过检索RDF4J中的服务内容数据，并实现基于逻辑的推理。

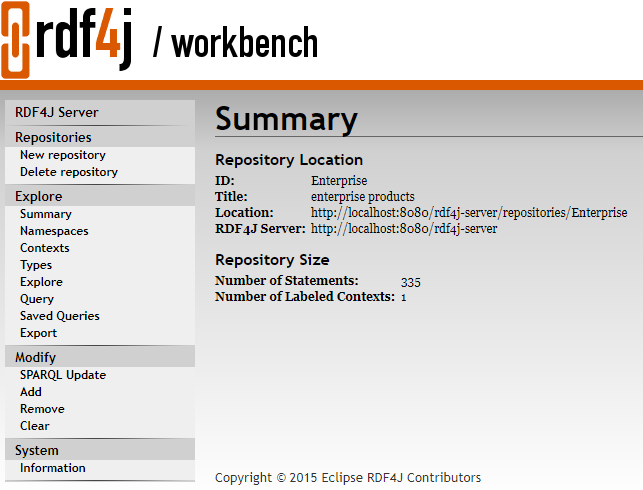


图6.4 RDF4J数据库概览

图6.5展示了图数据库中存储的部分数据，可见RDF4J中存储的都是三元组类型数据。三元组存储具有几项优点：（1）在复杂查询、规则处理和推理方面比关系型数据库具有更优的性能；（2）存储更为灵活，容易添加新的谓词（类似关系型数据库的列），便于扩展；（3）通过压缩可以大大节省稀疏矩阵的内存代价。



图6.5 RDF4J数据库内容

## 6.5 原型系统运行案例

### 6.5.1 服务发布

（1）服务抽象

企业A和企业B能提供主轴的制造能力服务，企业C能提供主轴产品服务，制造主轴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。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。不同于企业A和B，企业C直接发布主轴C.WSDL表示企业C能提供产品服务。

（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。

企业C由于提供的是产品服务，主轴产品可在plant simulation上对应为一个Source仿真对象，构建XML文档为主轴仿真C.XML。

（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；

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”文件发布到原型系统上。

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6.6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。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6.6 原型系统服务发布界面

### 6.5.2 需求发布

企业D需要在规定时间内购买1000个主轴产品，在原型系统上发布产品需求信息。在服务检索时，建立检索规则，只要企业能提供主轴制造能力则认为能够提供主轴产品。检索规则如下，该规则rule1表示若某企业能提供主轴加工能力并且主轴成品由主轴加工能力制造而成，则认为该企业能提供主轴成品。

|  |
| --- |
| @prefix fa: <http://www.semanticweb.org/ontologies/2010/0/family.owl#>.@include <RDFS>.@include <OWL>.  [rule1: (?P fa:canMachining 主轴加工能力)(主轴成品 fa:manuBy 主轴加工能力)->(?P fa: hasProduct 主轴)] |

建立好检索规则后使用SPARQL检索语句查询出所有能提供主轴产品的企业。SPARQL语句如下所示：

|  |
| --- |
| SELECT ?p WHERE{ ?p fa:hasProduct 主轴} |

检索的结果包括能够提供主轴产品服务的企业C，以及能提供主轴加工能力的企业A和企业B。根据企业A、企业B和企业C的主轴产品的评价指标，优先选择企业C的主轴产品服务，但企业C由于产能限制最多只能接受600个主轴的订单，而企业A和企业B的制造能力产能充足，于是原型系统会自动将企业D的需求进行分解，需求1是600个主轴产品由企业C提供，需求2是400个主轴的制造任务由企业A和企业B共同制造完成。

原型系统需求发布界面如下图6.7所示。



图6.7 原型系统需求发布界面

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方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。

### 6.5.3 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AABB，从服务组合过程可以得到主轴毛坯A.OWL、主轴粗加工A.OWL、主轴精加工B.OWL、主轴检验打标B.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）。组合方案AABB对应的组合服务仿真模型信息见如下文档：

|  |
| --- |
| <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">OnEntrane1</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit1</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">OnEntrane2</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit2</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">OnEntrane3</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit3</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">OnEntrane4</property>  <method name="ExitCtrl">OnExit4</property>  </simobj>  </grounding:SimInfo> |

原型系统中服务组合界面如下图6.8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6.9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6.8 原型系统服务组合界面



图6.9 原型系统组合服务列表

### 6.5.4 仿真评价

以AABB的服务组合方案为例，根据服务组合后的仿真模型信息，在plant simulation平台构建仿真模型，如下图6.10所示。

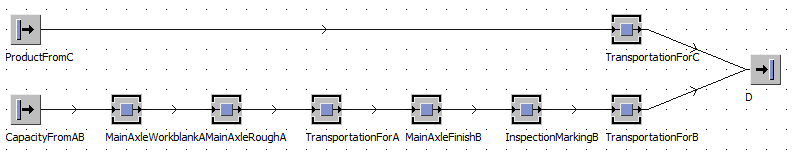


图6.10 仿真模型

仿真模型运行之后，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，TCT=86.07H。

**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1000，即N=1000。

**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.MainAxle.MainAxleWorkblank，即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 = 400。

**4、物流时间LT**

物流时间包括企业C到服务需求方企业D的物流时间，企业A到企业B的物流和企业B到服务需求方企业D的物流时间，即LT=50/50+60/50+180/50=5.8H。

**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6.11所示。

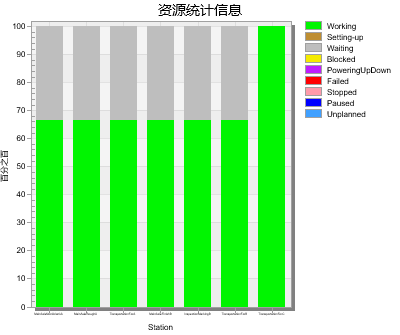


图6.11 工位资源状态图

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6.1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6.1 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=86.07H | 时间T  T = TCT + ST + LT  =86.07+16+5.8=107.87H |
| 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+5H+7H=16H |
| 物流时间TT，LT=LD/LS=(50+60+180)/50=5.8H |
| 完工数量N，N=1000 |  |
| 生产周期CT，CT=TCT/N=86.07H/1000=0.8607H |
| 生产线的瓶颈率RB，RB=TCT/N=86.07/1000=0.08607 |
| 单位时间生产量TH，TH=N/TCT=1000/86.07=11.62 |
| 工位资源状态SRS，表示为路径：F:\SRS.jpg |
| 加工成本PC，PC=TCT\*PCU=86.07\*500=43035元 | 成本C  C = PC + LC + AC  =43035+2900+4303.5=50238.5元 |
| 运输成本LC，LC=LT\*LCU=5.8\*500=2900元 |
| 管理成本AC，AC=TCT\*ACU=86.07\*50=4303.5元 |

表6.1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6.1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。

### 6.5.5 服务指标的展示

仿真评价结果转换为服务评价指标后会以XML形式的文件导出，原型系统通过XML解析工具读取供需双方关注的服务指标并展示在界面中。原型系统服务指标展示界面如下图6.12所示。用户可在界面左侧根据组合服务名称进行检索，若组合服务已仿真完毕，则会显示出页面右侧所示的服务指标信息，包括计算值和图片。通过对各种服务组合方案的对比，便能选择出满足需求方要求的最优服务组合方案。



图6.12 服务指标展示界面

## 6.6 本章小结

本章主要介绍了云制造服务原型系统的设计与开发，通过原型系统对本论文提出的面向仿真的云制造服务的发布与组合方法加以验证，并结合具体的运行案例对论文方法加以说明。下一章将对论文工作做一个总结，并分析进一步的工作方向。

# 第7章 总结与展望

## 7.1 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原型系统，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. 实现了用仿真方法评价云制造组合服务，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文件的形式返回给原型系统进行归类展示。

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方制造服务的输入标准和输出标准进行统一。

2. 论文所用的基于离散事件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. 论文只是将原型系统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]. Education, Management and Social Science. 2012:38-43.

[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]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013, 69(5-8): 961-975.

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

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

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

[7] 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.

[8] Ren L, Zhang L, Zhao C, et al. Cloud Manufacturing Platform: Operating Paradigm, Functional Requirements, and Architecture Design[C]. Manufacturing Science and Engineering Conference. 2013.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Hu C, Xu C, Cao X, et al. Study on the Multi-Granularity Virtualization of Manufacturing Resources [C]. Manufacturing Science and Engineering Conference. 2013.

[12] Ren L. Cloud Manufacturing platform architecture[J]. European Modeling and Simulation Symposium. 2012: 373-378.

[13] Ren L, Zhang L, Zhang Y, et al. Key issues in cloud simulation platform based on cloud computing[J]. 2011: 502–507.

[14] Wang X V, Xu X W. Virtualize Manufacturing Capabilities in the Cloud: Requirements and Architecture[C]. Manufacturing Science and Engineering Conference. 2013.

[15] 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.

[16] 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.

[17] 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.

[18] 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.

[19] 尹超，李孝斌，尹翰坤，等. 一种机床装备云制造服务接入终端:中国，CN201210139362.X[P]. 2012-08-29.

[20] Yan J, Guo Z, Shi R. Perception of Manufacturing Resources in Cloud-Manufacturing System: International Conference on Computer Science and Service System[C]. [Computer Science & Service System](http://ieeexplore.ieee.org/xpl/mostRecentIssue.jsp?punumber=6392590). 2012: 1993-1996.

[21] 周竞涛，杨海成. 基于同态映射的制造资源虚拟化机制[J]. 计算机辅助设计与图形学学报. 2014, 26(9): 1528-1535.

[22] 关贺，石宇强. 基于拉式理论的云制造资源虚拟化研究[J]. 西南科技大学学报. 2015, 30(3): 85-88.

[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[C]. 2012: 1-10.

[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] 陈琨，王东勃，王颖慧，等. 云制造软资源封装研究[J]. 机械设计与制造工程. 2012, 41(5): 58-63.

[26] 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.

[27] 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.

[28] 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.

[29] 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.

[30] 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.

[31] 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.

[32] Luo Y L, Zhang L, Tao F, et al. Study on the servilization of simulation capability[J]. European Modeling and Simulation Symposium. 2011.

[33] 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, 18(7): 0-0.

[34] 孙东南. 网络化制造环境下加工制造能力的建模与匹配[D]. 哈尔滨理工大学, 2016.

[35] 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.

[36] 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.

[37] 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.

[38] 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.

[39] 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.

[40] 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.

[41] 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.

[42] Wei C M, Zhang C L, Song T X, et al. A Cloud Manufacturing Service Management Model and Its Implementation: International Conference on Service Sciences[C]. 2013: 60-63.

[43] 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.

[44] 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.

[45] 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.

[46] 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.

[47] Fu J, Hao W, Tu M, et al. Virtual Services in Cloud Computing: World Congress on Services[C]. 2010: 467-472.

[48] 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.

[49] 马文龙，王铮，赵燕伟. 基于改进蚁群算法的制造云服务组合优化[J]. 计算机集成制造系统. 2016, 22(1): 113-121.

[50] 林廷宇，杨晨，谷牧，等. 面向航天复杂产品的云制造应用技术[J]. 计算机集成制造系统. 2016, 22(4): 884-898.

[51] Chen F, Dou R, Li M, et al. A flexible QoS-aware Web service composition method by multi-objective optimization in cloud manufacturing[J]. Computers & Industrial Engineering. 2016, 99.

[52] Li H, Chan K C C, Liang M, et al. Composition of Resource-Service Chain for Cloud Manufacturing[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics. 2016, 12(1): 211-219.

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

[54] Nie G, She Q, Chen D. Evaluation Index System of Cloud Service and the Purchase Decision- Making Process Based on AHP[J]. Springer Berlin Heidelberg, 2011, 112: 345-352.

[55] 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.

[56] Benouaret K, Benslimane D, Hadjali A, et al. Top-k Web Service Compositions Using Fuzzy Dominance Relationship: IEEE International Conference on Services Computing[C]. 2011: 144-151.

[57] Wang S, Zheng Z, Sun Q, et al. Cloud model for service selection: Computer Communications Workshops[C]. 2011: 666-671.

[58] 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.

[59] 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.

[60] 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.

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

[62] 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.

[63] 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.

[64] 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.

[65] 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.

[66] 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.

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

[68] 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.

[69] 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.

[70] 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.

[71] 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.

[72] 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.

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

[74] 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.

[75] 范韬. 基于扩展HTN的制造云服务组合研究[D]. 重庆大学, 2012.

[76] 刘艳娇. 基于仿真的云制造服务执行过程评价方法的研究与应用[D]. 同济大学，2017.

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

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

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

[80] 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.

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

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

[83] 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.

[84] 何秀青，王映辉. 物联网服务动态评价选择方法研究[J]. 电子学报. 2013, 41(1): 117-122.

[85] 蔡坦，刘卫宁，刘波. 一种新的基于直觉模糊集的制造云服务优选方法[J]. 中国机械工程. 2014, 25(3).

[86] 熊永华，许虎，吴敏，等. 一种烧结生产过程控制云制造仿真实验平台[J]. 计算机集成制造系统. 2012, 18(7): 1627-1636.

[87] 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, 18(7): 1527-1535.

[88] 魏乐，赵秋云，舒红平. 云制造环境下基于可信评价的云服务选择[J]. 计算机应用. 2013, 33(1): 23-27.

# 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.