# 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。

在这种背景之下，“云制造”的概念被适时地提出来并引起了广泛的关注。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。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。

综上所述，本课题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。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。

## 1.2 研究目标和意义

课题目标：研究云制造中制造资源与制造能力的虚拟化、服务化描述方法；研究仿真信息在制造服务模型中的表达方法；研究云服务组合后仿真模型的自动构建方法；建立一个服务发布、服务组合的云制造系统平台，

理论意义：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。

实际应用价值：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 云制造及其研究进展

### 1.3.2 云制造服务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[5-7]。

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[5-9]。

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[10,11]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[12-16]。

具体来讲：制造资源虚拟化使得云制造具有以下优势[17-21]：

A 资源的全面共享——支持各种软硬制造资源的感知和接入。

B. 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。

C. 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。

D. 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。

E. 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。

F. 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[22]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[23]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[24]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[25]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[26]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[27]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[28]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[29]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[30]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[31]、王中杰等[32]和王正成等[33]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[34]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。

### 1.3.3 云制造服务组合的研究进展

## 1.4 论文的主要工作和章节安排

### 1.4.1 论文主要工作

### 1.4.2 论文章节安排

# 第2章 云制造服务的基本概念

## 2.1 云制造理论

## 2.2 语义Web与本体论

### 2.2.1 RDF资源描述语言

### 2.2.2 OWL描述语言

### 2.2.3 OWL-S服务描述语言

## 2.3 图数据库RDF4J

## 2.4 云制造服务的一般流程

# 第3章 云制造服务发布和组合方法分析

## 3.1 制造云服务需求背景分析

### 3.1.1 制造云服务技术背景

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，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。

### 3.1.2 制造云服务面临的问题及仿真的应用

云制造中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。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。

## 3.2 云制造服务分类

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。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。本文主要研究制造生产加工硬设备（如机床）和生产加工能力发布为服务。

## 3.3 制造云服务相关本体构建分析

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。

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提供的包对Protégé生成的OWL文件进行读取和分析，包括类、实例以及属性等。

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。

### 3.3.1 云制造资源服务本体构建

### 3.3.2 云制造制造能力服务的本体构建

## 3.4 云制造服务发布过程分析

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3.1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3.1 云制造服务描述文件的构建方法

## 3.5 云制造服务组合方法分析

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3.1所示。

表3.1 控制构造符

|  |  |
| --- | --- |
| 控制构造符 | 描述 |
| Sequence | 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 | 一组反复执行的过程 |
| Repeat-While，Repeat-Until | 一组在特定条件下反复执行的过程 |

为了方便仿真平台对OWL-S文档的读取，论文对文档有如下约定：

1）构建仿真模型所需的服务组合信息保存在Service Profile当中。

2）构成服务组合的原子服务或者组合服务具有一定的组合顺序，在Service Profile当中，以节点“list:first”描述的服务为前续服务，以节点“list:rest”描述的服务为后续服务，从外层开始，逐级向内层读取。

3）为了便于仿真平台进行解析，将所有“list:first”节点和“list:rest”节点的服务，形成顺序描述，不同的原子服务或者组合服务用“+”连接，存在OWL-S文档的“profile:textDescription”节点中作为节点值，方便仿真平台进行读取。

## 3.6 本章小结

# 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方案

### 4.1.1 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3.2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3.2 服务抽象过程

### 4.1.2 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3.3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3.3 仿真抽象过程

### 4.1.3 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3.4，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3.5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3.4 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3.5 仿真信息的添加

## 4.2 服务组合方案

### 4.2.1 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3.6所示。



图3.6 云制造服务匹配过程

### 4.2.2 基于图数据库的推理检索

## 4.3 云制造组合服务仿真结果分析

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。

### 4.3.1 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。

### 4.3.2 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。

### 4.3.3 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。

## 4.4 本章小结

# 第5章 案例验证