

# 基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系与关键技术研究



重庆大学博士学位论文

学生姓名：陈学海

指导教师：鄢 萍 教 授

副 导 师：宋豫川 教 授

专 业：机械制造及其自动化

学科门类：工 学

重庆大学机械工程学院

二〇一四年五月



# **Semantic Gateway Based Manufacturing Execution System Reconfiguration Architecture & Key Technologies Research**



A Thesis Submitted to Chongqing University  
in Partial Fulfillment of the Requirement for the  
Doctor's Degree of Engineering

**By**  
**Chen Xuehai**

**Supervised by Prof. Yan Ping**  
**Assistant Supervised by Prof. Song Yuchuan**  
**Specialty: Mechanical Manufacturing**  
**& its Automation**

College of Mechanical Engineering of  
Chongqing University, Chongqing, China

May, 2014



## 摘 要

随着制造业信息化单元技术的不断成熟和深入实施,制造企业的应用系统越来越多,覆盖面越来越广,同时由于制造业信息化分期实施的特点,造成制造企业信息系统的异构程度加深,使企业目前普遍面临系统之间的集成问题。另外,由于企业不断的发展,要求信息系统能够快速适应企业业务的变化,使得制造企业对信息化系统的快速重构以及灵活集成提出了更高的要求。

面对日益复杂的企业应用需求,语义技术作为当前主要的解决方案被广泛地研究,以期利用语义技术实现异构制造系统间的智能理解和自动执行来降低信息化系统的复杂度和成本并提高系统对制造环境的适应能力,其中主要以本体技术为代表。然而当前本体等语义技术的研究大多从理论方面展开,其理论体系比较复杂,同时也存在不足,如本体结构难以归纳完善、本体定义缺乏统一的行业标准等等因素导致其应用困难,因此对如何将语义技术进行工程实现的研究则较少,难以在企业展开低复杂度的实际应用。

本文在当前集成技术的基础上,结合语义网关的概念,针对当前离散制造执行系统面临的软件重构与集成问题,提出了基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构方法和集成可重构方法,并研究了相关的关键技术,以实现离散制造执行系统软件按企业业务需求动态调整内部业务逻辑,并可松耦合集成企业内外的异构信息系统,满足企业对离散制造执行系统“快速、灵活、松耦合、高柔性、低成本”等综合重构需求,并疏通不同系统间的语义异构。论文主要内容如下:

首先论文提出了基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系,从企业实施、生产方式、业务集成和制造环境等方面研究了重构的驱动来源,从用户界面、业务逻辑、系统集成和系统语义等方面研究了重构的内容,提出了多维的重构目标,并给出了基于语义网关的离散制造执行系统可重构的总体框架。

然后在语义网关的支持下,分别从离散制造执行系统的业务实体、业务接口和业务实现研究了业务可重构。通过业务实体和业务接口的分离,结合配置时编译策略,实现了业务实体定义和业务接口定义的重构;通过业务实体和业务接口和业务实现之间的动态依赖注入,实现了业务逻辑关系的重构;通过对业务实现方法调用的动态代理和拦截,实现了业务实现的重构。

其次针对离散制造执行系统与异构系统间的信息集成需求,提出了一种制造信息可配置集成方法。首先在数据库元数据分析的基础上对数据字段进行语义注释和概念注册,并根据应用系统信息集成需求配置数据监控操作,生成数据变更捕获触发器并部署在制造系统数据库上。然后对语义网关捕获的数据变更消息从数据变更状态上配置集成行为触发条件,并根据不同系统的集成需求配置各自的

数据概念投影关系和数据操作。最后由语义网关针对各自系统进行概念间的语义映射处理并分发信息集成消息，由应用集成代理进行数据同步集成实现。

再次针对离散制造执行系统与异构系统间的服务集成需求，提出了一种制造服务的语义集成方法。首先在语义网关中对多源异构集成接口进行元数据分析和注册，实现制造服务的集中管理；然后针对制造服务参数间的语义异构问题，在集成接口的输入输出参数与语义网关的语义标准间建立语义映射关系，实现参数语义的理解和交换；最后提供一个以 xml 为单一输入参数的制造服务 Web 调用接口，保持服务间接口格式的语义稳定，由集成适配器实现对服务实现的统一访问，并通过对服务多个实现间的柔性调用提高了服务的可靠性。

最后开发了可重构离散制造执行的原型软件系统以及相关的使能工具，并结合重庆市某制造企业的实际业务管理需求和系统集成需求，在该企业进行了应用验证，取得了较好的应用效果。

**关键词：**制造执行系统，系统集成，系统重构，语义网关，语义集成

## ABSTRACT

With the development of information technology and the implementation putting into application firmly, there exist more and more application systems in manufacturing enterprises with wide coverage. Moreover, because of the phased implementation of informatization which deepens the isomerism among information systems, the enterprises are generally faced with issues of information integration among different systems. In addition, the continuous development of enterprises requires information systems to quickly adapt changes in business, which puts forward higher requirements to the flexible integration among systems.

Faced with increasingly complex enterprise application needs, as the current main solution, semantic technology has been extensively studied with a view to leveraging semantic technology to realize intelligent understanding and automating between heterogeneous manufacturing systems, reduce the complexity and cost of information systems, and improve the adaptability, which mainly represented by the ontology. However most current research of ontology is semantic theory, its system is complex, as well as shortcomings, the induction of ontology structure is difficult to draw, ontology definition lacks a common industry standard, so the engineering realization of semantic technology is less, and has trouble in low complexity practical application.

Based on the current integration technologies, aiming at the reconstruction issues facing the current discrete manufacturing execution system, a reconfigurable integrated approach for discrete manufacturing execution system based on semantic gateway is proposed, combined with the concept of semantic gateway, to achieve these goals that discrete manufacturing execution system is able to dynamically adjust the internal logical structure by business demand and integrate a large number of internal and external information systems, thus meeting the comprehensive reconstruction requirements of "fast, flexible, loosely coupled, highly flexible, low cost" and clearing the semantic heterogeneity among different systems.

Firstly, this dissertation presents a discrete manufacturing execution systems integration reconfigurable architecture based on semantic gateway, the reconfiguration source of different enterprises, aspects of the production, business integration and manufacturing environment are studied, the content of the reconfiguration from the user interface, business logic, systems integration and system semantic are studied, put forward the multidimensional reconfiguration target system, and gives an integrated

reconfigurable framework for discrete manufacturing execution system based on semantic gateway.

Secondly, based on semantic gateway, the implementation methods are researched by means of business entities, business logics and systems integration layer. Through the split of business entities and business logics, combined with configuring time compilation strategy, the definitions of business entities and business logics realize integration reconfiguration; through the dynamic injection between business entities and business logic interfaces, the integration relationships between entities and logics are reconfigured; through the interception and proxy of business interface, the business implementations can be reconfigured.

Thirdly, based on the analysis of the database metadata, configure semantic annotations and register data field concepts, configure data monitoring operating according to the application needs of information integration, generate data change capture triggers and deploy them on manufacturing system databases. Then configure trigger conditions of integration behavior for data change messages which captured by semantic gateway by data change status, and configure their data projection and data operating based on the integration needs of different information systems. Finally, the semantic gateway process concept semantic mapping and distribute integration messages to information systems, application integration proxy can realize data synchronization integration.

Fourthly, based on the analysis of services metadata and registration of heterogeneous manufacturing services in semantic gateway, realize centralized management of manufacturing service. And then on semantic heterogeneous problems for manufacturing service parameters, establish semantic mapping relationship between semantic gateway concept standard and integration interface parameters, implement parameters semantic understanding and exchange. Finally, provide a stable Web Service which has a single xml input parameter to call manufacturing services, keep semantic stable for services interfaces, and achieve unified access to service implementations by integration adapters, improve the reliability of services through flexible calling services between multiple implementations.

Finally, developed reconfigurable MES prototype system and related enabling tools, combined with the actual business operations and system integration needs of enterprise, application verification was carried out and achieved good effects.

**Keywords:** Manufacturing Execute System, System Integration, System Reconstruction, Semantic Gateway, Semantic Integration.



## 目 录

中文摘要 .....	I
英文摘要 .....	III
目 录 .....	V
<b>1 绪 论 .....</b>	<b>1</b>
1.1 论文的选题背景 .....	1
1.1.1 制造的内涵与制造业的变革 .....	1
1.1.2 制造业信息化与集成需求 .....	3
1.2 信息化系统集成技术研究现状 .....	7
1.2.1 软件互操作层研究 .....	8
1.2.2 业务互操作层研究 .....	10
1.2.3 业务流程组合层研究 .....	12
1.2.4 语义互操作层研究 .....	13
1.3 制造执行系统及其重构研究现状 .....	15
1.3.1 制造执行系统的概念提出 .....	15
1.3.2 制造执行系统及其重构研究现状 .....	17
1.3.3 制造执行系统的发展趋势 .....	23
1.4 语义网关研究现状 .....	23
1.5 论文的研究目的与意义 .....	24
1.6 论文的课题来源与结构安排 .....	25
1.7 本章小结 .....	26
<b>2 基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系 .....</b>	<b>27</b>
2.1 引言 .....	27
2.2 离散制造执行系统的重构需求 .....	27
2.2.1 企业实施离散制造执行系统带来的重构需求 .....	28
2.2.2 生产方式变化带来的重构需求 .....	29
2.2.3 车间业务集成带来的重构需求 .....	31
2.2.4 制造环境变化带来的重构需求 .....	33
2.3 离散制造执行系统的重构内容 .....	34
2.3.1 离散制造执行系统交互界面重构 .....	34
2.3.2 离散制造执行系统业务逻辑重构 .....	35
2.3.3 离散制造执行系统集成关系重构 .....	36
2.3.4 离散制造执行系统系统语义重构 .....	37

2.4 离散制造执行系统的重构目标 .....	37
2.5 支持离散制造执行系统可重构的语义网关研究 .....	39
2.5.1 语义网关的体系结构 .....	39
2.5.2 基于语义网关的异构系统集成框架 .....	40
2.5.3 基于语义网关的异构系统集成运行模式 .....	44
2.5.4 基于语义网关的语义映射方法 .....	46
2.6 基于语义网关的离散制造执行系统可重构总体框架 .....	49
2.7 本章小结 .....	51
<b>3 基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构研究 .....</b>	<b>53</b>
3.1 引言 .....	53
3.2 基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构框架 .....	53
3.3 基于语义网关的离散制造执行系统业务实体可重构 .....	55
3.3.1 离散制造执行系统业务属性重构 .....	56
3.3.2 离散制造执行系统业务实体重构 .....	61
3.4 基于语义网关的离散制造执行系统业务逻辑可重构 .....	63
3.4.1 离散制造执行系统业务接口重构 .....	64
3.4.2 离散制造执行系统业务实现重构 .....	68
3.5 本章小结 .....	71
<b>4 基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构研究 .....</b>	<b>73</b>
4.1 引言 .....	73
4.2 基于语义网关的离散制造执行系统信息集成可重构 .....	74
4.2.1 离散制造执行系统的制造信息集成需求分析 .....	74
4.2.2 离散制造执行系统与异构系统的数据库元数据语义注册 .....	76
4.2.3 离散制造执行系统与异构系统集成数据变更信息采集 .....	79
4.2.4 离散制造执行系统与异构系统制造信息集成活动实现 .....	82
4.3 基于语义网关的离散制造执行系统服务集成可重构 .....	84
4.3.1 离散制造执行系统的制造服务集成需求分析 .....	84
4.3.2 离散制造执行系统与异构系统集成功能服务统一语义注册 .....	86
4.3.3 离散制造执行系统与异构系统制造服务参数语义映射 .....	88
4.3.4 离散制造执行系统与异构系统制造服务统一访问实现 .....	89
4.4 本章小结 .....	93
<b>5 系统开发与应用案例 .....</b>	<b>95</b>
5.1 引言 .....	95
5.2 企业介绍 .....	95

5.3 基于语义网关的可重构离散制造执行系统设计开发 .....	96
5.3.1 语义网关系统设计 .....	96
5.3.2 可重构离散制造执行系统设计 .....	99
5.4 企业离散制造执行系统重构分析 .....	102
5.4.1 离散制造执行车间业务逻辑重构分析 .....	102
5.4.2 离散制造执行与异构系统集成分析 .....	103
5.5 基于语义网关的可重构离散制造执行系统应用效益 .....	111
5.6 本章小结 .....	112
<b>6 结 论 .....</b>	<b>113</b>
<b>致 谢 .....</b>	<b>115</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>117</b>
<b>附 录 .....</b>	<b>125</b>
A 相关的论文目录 .....	125
B 从事的科研项目 .....	125
C 授权的发明专利 .....	125



# 1 绪 论

## 1.1 论文的选题背景

### 1.1.1 制造的内涵与制造业的变革

制造业是国民经济的支柱产业，是国家创造力、竞争力和综合国力的重要体现，无论是在发达国家，还是在发展中国家，制造业在国民经济中均占据主要地位。它是将可用资源与能源通过制造过程，转化为可供人们使用或利用的工业品或生活消费品的行业。在各个国家的企业生产力构成中，制造业涉及到国民经济的大量行业，如机械、建筑、电子、轻工、食品、军工、航天等，因此制造技术的高低已成为衡量一个国家综合实力的重要标志之一<sup>[1, 2]</sup>。

长期以来，由于设计和工艺的分家，制造被定位于制造工艺。随着社会发展和科技进步，需要综合、融合和复合多种技术去研究和解决问题，特别是集成制造技术的问世，极大地扩展了制造的概念。当前的“制造”概念将设计、工艺和管理紧密联系在一起，形成一个整体，从而使“制造”概念和内涵在“范围”和“过程”两方面大大拓展。在范围方面，制造涉及的工业领域不只局限于机械制造，包括了机械、电子、化工、轻工、食品、军工等国民经济的大量行业。在过程方面，制造不是仅指具体的工艺过程，而是包括市场分析、产品设计、生产工艺过程、装配检验、销售服务等产品整个生命周期过程，如国际生产工程学会 1990 年给“制造”下的定义是：制造是一个设计制造工业中产品设计、物料选择、生产计划、生产过程、质量保证、经营管理、市场销售和服务的一系列相关活动和工作的总称<sup>[3, 4]</sup>。从以上概念可知，制造涵盖了产品全生命周期的各项相关活动和所涉及的范围，与传统的“小制造”概念相比，当前的“大制造”概念得到了极大的发展和丰富。

随着信息时代的来临，网络技术的在全球得到快速发展，知识经济正在成为世界经济的新增长点，全球化浪潮不断冲击世界的经济和社会次序。在日新月异的高新技术发展和客户个性化市场需求等的技术和市场推动下，制造业面临的环境和制造业本身正在发生着深刻变化<sup>[5]</sup>。

#### ①制造业竞争环境的变化

随着经济全球化进程的加快，出现了新的国际分工格局。由于发达国家的劳务成本不断攀升，很多产品的生产制造将向包括中国在内的发展中国家和地区转移。我国由于经济连年高速增长，社会政治稳定，加之有比较便宜且素质较好的人力资源，成为很多跨国公司的首选之地。

国际制造业向中国转移，一方面是因为中国廉价的劳动力，另一方面则主要是因为中国日益增长的经济实力。另外，中国还是一个尚待开发、且充满活力的

大市场。虽然发达国家的企业把一些产品的中间生产过程转移到发展中国家，但仍强有力地控制着产品的研发、设计、工艺和市场，以从中获得最大的经济效益和政治资本，同时又借此控制发展中国家的经济命脉和国家安全，使世界各国的贫富差距越来越悬殊。另一方面，中国引进先进技术的方式，已经从单纯引进先进的机器设备转变为通过吸引国外直接投资来获得外国的资金、先进技术和管理经验。因此，国际化的竞争带给了中国制造业的是机遇和挑战、压力与动力并存，出路只有一条，那就是大力发展制造技术，增强我国制造业的竞争能力，实现由制造大国向制造强国的转变。

### ②制造业发展模式的变化

制造模式的每一次革命都会淘汰一批滞后于模式变革的企业，使另一批适应变革潮流的企业迅猛发展。德国、英国、美国和日本在不同的阶段中都曾创造出适应当时生产力发展的模式，领导了发展的潮流，从而取得了辉煌的经济成就。福特、丰田等公司在不同的发展阶段抓住了机会，新的制造模式使这些公司进入了一流大企业的行列。

信息化提高了生产要素的信息属性，促使企业竞争模式从自然资源和人力资源的竞争转向创新能力和创造高附加值产品的竞争；信息化促进企业管理由金字塔结构向扁平型结构转变，经营思想由粗放型向集约型转变。21 世纪制造企业的竞争焦点将转变为如何抓住机遇，响应市场需求，快速开发出基于知识的新产品。

### ③制造企业运行效率与活动空间的变化

20 世纪六、七十年代以来，信息技术革命使企业的经营环境和运作方式发生了很大的变化，而西方国家经济的长期低增长又使得市场竞争日益激烈，企业面临着严峻挑战。买卖双方关系中的主导权转到了顾客一方，竞争使顾客对商品有了更大的选择余地；另一方面，随着生产水平的不断提高，顾客对各种产品和服务也有了更高的要求。技术进步使竞争的方式和手段不断发展，并发生了根本性的变化。越来越多的公司越出国界，在逐渐走向一体化的全球市场上展开各种形式的竞争。面对这种挑战，企业只有在更高水平上进行一场根本性的改革与创新，才能在低速增长时代增强自身的竞争力。

信息技术对企业在全球化的运行空间中生存和发展起到非常重要的支撑作用。信息技术促进了国际金融市场的快速发展，不仅保障了跨国经济活动的正常运行，而且加快了资金在全球的流动速度，使企业在规模、经济实力和创新能力等方面得到了空前的提高。例如，在波音公司，飞机零部件和其他原材料的采购是一个复杂的、多阶段的管理过程，它涉及到分布在全球各地数万个不同的个人和任务。利用信息技术，可以实现从基于纸介质的采购系统到基于 Web 的采购系统的转变，整个采购过程可以通过物料管理系统进行自动处理。

由于外部环境发生的剧变，使得制造企业传统的生产、营销和管理模式以及设计制造技术已经越来越不能适应时代的要求。制造企业出于对生存和发展的考虑，不得不积极主动地对其制造模式进行变革，引入各种先进的制造战略、制造模式和制造技术，如计算机集成制造、精良生产、企业资源计划、敏捷制造、虚拟制造、绿色制造、网络化制造等。在这些新模式和新技术的影响下，现代制造业及制造技术逐渐表现出全球化、数字化、敏捷化、网络化、虚拟化、智能化、绿色化、集成化以及客户为中心的服务化的发展趋势和特点<sup>[6, 7]</sup>。而以微电子、计算机、通信和网络技术为代表的信息技术，是迄今人类社会技术进步过程中发展最快、渗透性最强、应用最广泛的关键技术，代表着先进生产力的发展方向，从而对制造业带来了巨大的影响和变革。

随着信息技术集成化和信息网络化的不断发展，使企业已经无法回避知识化、数字化、虚拟化、网络化、敏捷化、全球化等全方位的深刻变革，企业的竞争力日益与企业信息化程度密切相关。信息技术、信息系统和信息作为一种资源已不再仅仅是支撑企业战略，信息战略已经成为企业战略不可分割的一部分，企业信息化形成的独特竞争优势——信息优势已逐渐成为企业竞争的优先级竞争优势之一。

### 1.1.2 制造业信息化与集成需求

制造业信息化是将信息技术、自动化技术、现代管理技术与制造技术相结合，带动产品设计方法和工具的创新，企业管理模式的创新，企业间协作关系的创新，实现产品设计制造和企业管理的信息化、生产过程控制的智能化、制造装备的数字化、咨询服务的网络化，全面提升我国制造业的竞争力。

一般而言，制造业可分为离散制造业和流程制造业。离散制造业和流程制造业在产品构成、工艺流程、生产过程等方面有着不同的特点，其信息化的具体内容和侧重点也就各有差别，因此制造业信息化可分为流程制造业信息化和离散制造业信息化，它们的分别包含以下几个的内容：

#### ①离散行业信息化

离散制造行业是对原材料物理形状的改变，组装，成为产品，使其增值的行业。离散制造行业信息化的内容包括产品信息化、设计信息化、生产过程信息化、企业管理信息化、市场经营信息化等内容<sup>[8]</sup>。

1) 产品信息化。产品信息化主要是运用两个技术，一是应用数字技术，增加传统产品的功能，提高产品的附加值。比如，数字控制技术对机床的增值产生了数倍的影响，数字手机在保密性和其它许多性能方面，与以往的模拟手机相比优越性无法估量；二是应用网络技术，网络冰箱通过网络管理中心进行控制，可以向用户通报何时需要添置新的食品，从而产生了新的附加值。

2) 设计信息化。即产品设计、工艺设计方面的信息化。目前应用较为普遍的是计算机辅助设计(CAD)系统,设计信息化还包括计算机辅助工艺规程设计(CAPP)系统应用、计算机辅助装配工艺设计(CRAP)系统应用、计算机辅助工程分析(CAE)系统应用、计算机辅助测试系统应用、网络化计算机辅助开发环境、面向产品全生命周期活动的设计(DFX)系统二次开发与应用与产品建模、模型库管理与模型效应系统开发与应用。

3) 生产过程信息化。即自动化技术在生产过程中的应用,用自动化、智能化手段解决加工过程中的复杂问题,提高生产的质量、精度和规模制造水平。其中主要应用包括数控设备地应用、计算机生产过程自动控制系统应用、生产数据自动收集、生产设备自动控制、产品自动化检测及生产自动化覆盖等。

4) 企业管理信息化。企业通过管理信息系统的集成,提高决策管理水平。主要应用层面包括企业资源规划(ERP)系统、供应链管理(SCM)系统、客户关系管理(CRM)系统和辅助决策支持(DSS)系统。

5) 市场经营信息化。通过实施电子商务,可以大大节约经营成本,提高产品的市场竞争能力,提高经济效益。

## ②流程行业信息化

流程制造行业是通过对原材料进行混合,分离,粉碎,加热等物理或化学方法,使原材料增值的行业。流程制造行业信息化的主要内容包括控制层信息化、执行层信息化、管理信息化和市场经营信息化。

1) 控制层信息化。控制层信息化主要指采用先进控制与软测量及工艺计算等技术软件,利用先进的实时网络、实时数据库的信息集成技术,建立实时数据采集与监控系统、罐区自动化系统、先进控制与优化系统等,全面提升流程工业企业的工艺管理和装置控制水平。包括生产装置、公用工程控制自动化(DCS、PLC等)、生产装置先进过程控制和在线优化(APC & OPT)和工业电视远程监控系统等内容。

2) 执行层信息化。对整个生产过程进行动态优化管理,从根本上解决流程行业生产过程的多变性和不确定性问题。包括生产过程的实时数据管理、物料平衡、油品移动管理、质量信息管理、生产计划和生产调度、流程模拟、实验室信息管理等功能。

3) 管理层信息化。包括与离散制造业信息化类似的企业资源规划(ERP)、供应链管理(SCM)、客户关系管理(CRM)和辅助决策支持(DSS)等内容,但具体内容有所差别,如要求具有配方管理、多计量单位管理、批号管理和跟踪等功能。

配方管理:流程制造行业的生产是根据配方或配比进行,所以配方管理是基石,主生产计划与物料需求计划及资金预算平衡计划都根据它来确定,配方对流程工



厂来说相当于产品结构或者说是。因此定义产品的工艺配方、操作标准、步骤、工序及设备 and 操作过程，完成配方的比较分析就组成了配方管理。

多计量单位的管理：一种物料在同一时刻可能会有不同的计量单位，要求从一种计量单位方便地转化为任何其他计量单位。如：放在库房里的钢胚都是以“个”为单位的，即使每个钢胚的重量会不同，但它们各自的重量在销售和计算成本是却是至关重要的。

批号管理和跟踪：流程制造行业生产工艺过程中，不同生产设备、不同日期生产的产品，其化学成分、质量等级都不一样，因此，对物资的管理需要有严格的批号。如，制药业中的药品生产过程要求有十分严格的批号记录和跟踪，从原材料、供应商、中间品以及销售给用户的产品，都需要记录。一旦出现问题，企业要通过批号反查出是谁的原料、哪个部门、何时生产的，直到查出问题所在。

4) 市场经营信息化。主要指电子商务和客户服务自动化。

制造业信息化的发展历程大致经历了以下几个阶段<sup>[9, 10]</sup>：

制造业信息化始于 70 年代中期，从此时开始，制造型企业便开始构建简单的、独立的 MIS 子系统，以及计算机辅助设计(CAD)和计算机辅助制造(CAM)。当时主要以单机操作为主，功能单一，信息不能共享，成为“信息孤岛”。应该说 70 年代制造型企业在推广 CAD 以及改造窑炉为主的企业信息化建设方面成绩是显著的。但由于大多数制造型企业底子太薄，企业信息系统建设又缺乏整体的思想指导，理论指导不足，实践经验总结不够，在一定意义上说，有一定的盲目性，或者说是探索性。这一时期 MIS 开发应用成功的少，失败的多。

80 年代以 MRPI 工为代表的面向企业过程的局域网系统从 80 年代中期开始。企业对企业内部业务数据共享、协同工作产生了需求。也更加重视企业业务流程的优化。制造型企业开始采用局域网络联接企业各职能部门，发展功能更强大的企业 MIS 和办公自动化系统；生产制造行业在网络化的同时又采用面向企业过程的软件技术，实施制造资源系统(MRP/MRPI 工)。这些系统综合利用了各种信息技术，用网络连接企业各部门，采用客户/服务器(C/S)结构管理公共软件和信息，采用分布式数据库以求得更多的信息数据共享。采用面向企业过程的软件技术以实现企业设计生产服务过程的自动化和信息化。

90 年代中后期，随着全球经济一体化和 Internet 应用迅速普及，新的信息技术和管理模式被应用于制造型企业信息化建设之中，信息化进程进入一个飞速发展的时期。出现了企业资源计划(ERP)和计算机集成制造/管理系统(CIMS)等多种开放式集成化系统。ERP 系统增加了包括财务预测、生产能力、调整资源调度等方面的功能，实现了配合企业实施 JIT 管理、全面质量管理和生产资源调度管理及辅助

决策的功能，成为企业进行生产管理及决策的平台工具。

21 世纪，internet 技术的成熟为企业管理信息系统增加了与客户/供应商实现信息共享和直接进行数据交换的能力，将企业信息化从内部管理推向与外部连接，强化了企业间的联系，形成上下游企业共同发展的生存链，体现了供应链的管理思想。

纵观国内外制造业信息化的发展历程，可以看出，制造业信息化建设从上世纪 70 年代的单机应用开始起步，经历了 80 年代局域网单项应用和 90 年代的企业内部集成应用阶段，发展到了 21 世纪的企业内外流程一体化应用阶段，随着制造业信息化的阶段建设和不断深入的发展，带来了许多问题，表现在：

### ①信息孤岛问题

首先，企业的信息化大多是从单项业务系统开始的，只关注某个业务部门的某个业务环节或管理功能，各系统相互独立运行，整体集成和沟通程度不高，各部门的信息系统最终成为一个个“信息孤岛”，很难与其它系统交换信息。再有，企业即使实施了 ERP，SCM，PDM 等现代管理系统，由于这些系统常常是来自不同时期的不同 IT 厂商，它们的开发方式、开发规范甚至架构平台都有所不同，虽然它们都提供了更好的访问内部数据和商业逻辑的方法，可是这些庞大而复杂的系统的互相访问仍是一个巨大的挑战，“信息孤岛”问题依然存在。

### ②企业内部的集成问题

企业系统是一个从客户—销售—设计—生产—采购—财务—成本的整体系统，各环节之间存在大量信息交换，只有从企业整体和产品生命周期全过程的角度，对已有系统进行全面、高效的集成，形成一个从企业外部到企业内部设计、管理到车间现场装备系统集成运行的企业信息化系统，提高企业的装备制造能力和优化运行能力，才能快速、有效支持企业科学决策，敏捷响应客户需求，适应千变万化的市场和客户定制化的要求。

### ③协作企业间的集成问题

一方面，现阶段企业的竞争，不再仅仅只局限在企业之间的竞争，越来越趋向于产业链和供应链的竞争，社会分工更加专业化，企业更关注的是培养自身的核心竞争力，将不擅长的业务外包，企业不仅关心内部的成本和利润，更关心整个产业链和供应链上的整体最优。因此，提出了整个产业链和供应链的集成和协同需求，以实现企业各个环节的最优化，促进产业链和供应链上各环节信息共享、资源整合，实现产业链和供应链的集成与优化运行，提高产业链的市场竞争力，带动区域经济发展。

另一方面，随着经济全球化的影响，企业间的协作变得越来越重要，这不仅表现在产业链和供应链上企业间的协作，也表现在非产业链和供应链企业之间

的协作，通过全球范围内资源的优化配置和利用，来提高企业的竞争力。

制造全球化、制造敏捷化、制造网络化、制造虚拟化和制造绿色化是现代制造业发展的趋势，当前制造环境下企业制造活动呈现出以下新特点：

1) 制造资源的广泛性。企业所利用的是广泛的跨越时间和空间的制造资源，不局限于本企业的制造资源。

2) 制造活动链的集成协同性。分工协作、共担风险与利益的运作模式是普遍采用的方式，大量的工作协同使企业的产品设计、工程分析、工艺设计、生产制造等制造活动以协作企业的核心优势而分解，在各企业多项任务并行协同地完成，并在各企业内部以产品为主线，形成跨企业的信息系统的集成。

3) 制造信息的分布异构性。由于制造活动分工协同完成，伙伴企业在地域上是分散于各地的，这就造成制造信息的分布性。不同企业有各自的加工制造习惯，有不同的制造操作规范，从而造成制造信息的异构性。

4) 制造活动随市场需求快速重组。随着市场竞争的日益激烈，企业内部以及企业之间经常通过“动态联盟”的方式快速满足市场需求，造成企业内部制造活动需要快速重构，企业与外部企业之间的制造活动也必须快速集成，但是“动态联盟”企业是随机的，根据市场需求建立的，从而需要满足企业在未知条件下实现企业内部和企业之间制造活动的有效集成和协作。

由此可见，在当前的制造环境下，势必大量涉及企业内部的系统集成与企业外部通过 Internet 进行的企业间集成，涉及到产品生命周期全过程的集成，涉及到大量异构制造资源的集成，涉及到不确定企业间的制造活动的快速集成等。

因此，“集成和协同”已经成为了制造业信息化发展面临的主要问题，是制造业信息化建设的一个发展趋势。

## 1.2 信息化系统集成技术研究现状

为了支持企业集成的发展需求，Butler Group 研究机构提出了与企业集成相关的三层框架，如图 1.1，即软件层、业务层和业务流程组合管理架构层，前两者是后者的实现基础。

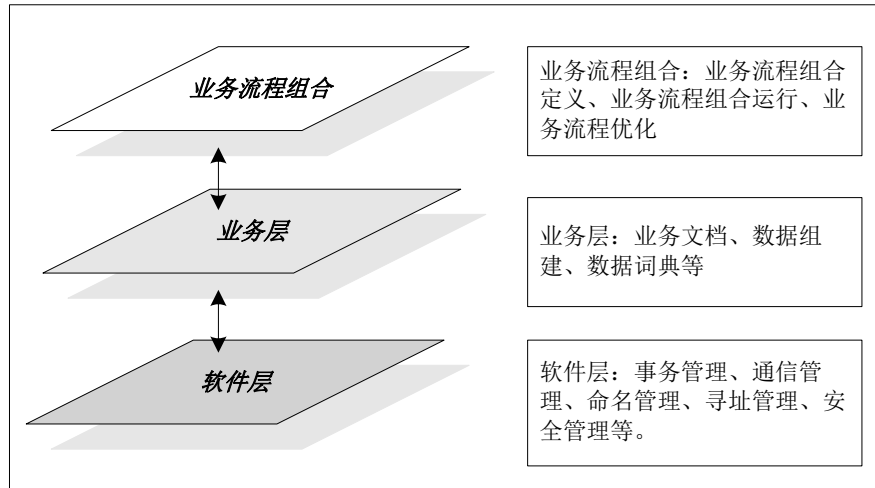


图 1.1 企业集成的三层架构  
Fig.1.1 The three-tier enterprise integration

要实现企业的全面集成，需解决软件系统在软件层的集成、业务层的集成，以及业务流程组合管理架构层实施方法和业务流程组合架构的互操作性。软件层的互操作是解决软件系统间异构编程语言、中间件、网络设施等的异构问题，而业务层是解决软件系统间业务数据格式、结构和语义上的异构问题，而业务流程组合管理结构解决业务流程分析、定义、构建、监控、运行等问题，同时还包括了各业务流程组合管理结构层间的互操作问题。

### 1.2.1 软件互操作层研究

软件层的互操作是解决软件系统间异构编程语言、中间件、网络设施等的异构问题。

①数据共享技术。数据共享指不同信息系统可以互相交换或访问其它信息系统提供的数据库文件，为了在不同信息系统间进行数据交换，人们定义了各种数据交换标准，其中既有数据结构标准，也有数据访问标准，既有通用标准，也有面向特定领域的行业标准。

XML (Extensible Markup Language) 即可扩展标记语言，Xml 是 Internet 环境中跨平台的，不依赖于内容的技术，是当前处理结构化文档信息的有力工具。XML 是一种简单的数据存储语言，使用一系列简单的标记描述数据，而这些标记可以用方便的方式建立，虽然 XML 占用的空间比二进制数据要占用更多的空间，但 XML 极其简单易于掌握和使用。XML 的简单使其易于在任何应用程序中读写数据，这使 XML 很快成为数据交换的公共语言，也成为研究与应用的热点。文献<sup>[11]</sup>利用 XML 对制造过程中设计的信息进行了集成，文献<sup>[12]</sup>讨论了 XML 在多维模型的设计与交互中的应用，文献<sup>[13]</sup>则利用 XML 进行了电能质量数据的跨平台交换。

STEP(Standard for the Exchange of Product Model Data, 产品模型数据交互规范)标准是国际标准化组织制定的描述整个产品生命周期内产品信息的标准, STEP 标准提供了一种不依赖具体系统的中性机制, 旨在实现产品数据的交换和共享。这种描述的性质使得它不仅适合于交换文件, 也适合于作为执行和分享产品数据库和存档的基础。发达国家已经把 STEP 标准推向了工业应用。它的应用显著降低了产品生命周期内的信息交换成本, 提高了产品研发效率, 成为制造业进行国际合作、参与国际竞争的重要基础标准, 是保持企业竞争力的重要工具。文献<sup>[14]</sup>讨论了基于 STEP 的柔性制造资源共享技术, 文献<sup>[15]</sup>研究了基于 STEP 的 CAD/CAPP 集成技术, 文献<sup>[16]</sup>则研究了 STEP 与 XML 的工艺信息集成。

ODBC 指 Open Database Connectivity (开放式数据库互连), 是 Microsoft 引进的一种早期数据库接口技术。ODBC 的基本思想是为用户提供简单、标准、透明的数据库连接的公共编程接口, 开发厂商根据 ODBC 的标准去实现底层的驱动程序, 这个驱动对用户是透明的, 并允许根据不同的 DBMS 采用不同的技术加以优化实现, 这就利于不断吸收新的技术而趋完善。通过 ODBC/JDBC, 很好的解决了异构关系型数据库的互操作问题。

②组件互操作技术。组件是位于平台(硬件和操作系统)和应用之间的通用服务, 这些服务具有标准的程序接口和协议。针对不同的操作系统和硬件平台, 它们可以有符合接口和协议规范的多种实现。组件能够屏蔽操作系统和网络协议的差异, 为应用程序提供多种通讯机制; 并提供相应的平台以满足不同领域的需要。因此, 组件技术为应用程序了一个相对稳定的高层应用环境, 从而很好地解决了系统间的互操作问题。

COM/DCOM 是微软组件对象/分布式组件对象模型, 通过定义对象之间互操作的二进制接口标准来提供集成技术支持, 实现软件复用和信息共享, 文献<sup>[17]</sup>通过 COM/DCOM 对 API 函数进行包装来实现, 使其适应分布式环境, 从而实现 PDM 与 ERP 系统的集成, 文献<sup>[18]</sup>采用基于 COM/DCOM 的建模与仿真工具协同、支持仿真联邦管理的数据库设计和 CORBA 技术开发了虚拟样机多学科协同设计与仿真平台。

CORBA 是由 OMG 提出的描述分布式异构环境中对象互操作的技术规范, 通过将分布式软件开发中的基本服务和功能标准化来实现软件重用, 文献<sup>[19]</sup>采用 CORBA 技术研究了制造执行系统的重构, 文献<sup>[20]</sup>研究了基于 CORBA 和 XML 技术的 PDM/CAPP 系统集成框架, 文献<sup>[21]</sup>采用 CORBA 技术研究了基于 Agent 装配线制造执行系统重构。

EJB 是 SUN 的服务器端组件模型, 设计目标与核心应用是部署分布式应用程序。凭借 Java 跨平台的优势, 用 EJB 技术部署的分布式系统可以不限于特定的平

台。EJB(Enterprise JavaBean)是 J2EE 的一部分,定义了一个用于开发基于组件的企业多重应用程序的标准,文献<sup>[22]</sup>采用 EJB 技术实现了一种基于语义重构的模型映射方法,文献<sup>[23]</sup>基于 EJB 技术研究一种新型企业综合集成应用的解决方案。

COM/DCOM 和 CORBA 以及 EJB 解决的是异构系统之间互操作性问题,它们已经在各种平台上得到了实现,但这些系统不适用于异构的 Internet 环境。

③网络互操作技术。网络互操作技术主要解决 Internet 上异构信息系统的互操作问题,其中主要以 Web Service 为代表。

Web Service 是建立在 HTTP、SOAP、WSDL 和 UDDI 等标准以及 XML 技术之上的,其最大优势是允许在不同平台上以不同语言编写的各种程序以基于标准的方式相互通信。它通过 HTTP 等协议极大地扩展了传统应用软件的服务范围,并通过 SOAP、UDDI 和 XML 等标准技术为应用软件提供了统一的应用标准,屏蔽了应用软件底层具体的实现技术。Web Service 基于一组开放的技术标准,可以解决不同平台上系统之间的互操作性。利用 Web Service 进行集成是一种比较灵活的解决方案。

基于 Web Service 的集成在近几年研究得非常多,它有效的解决了 Internet 环境下信息系统之间的互操作问题。文献<sup>[24]</sup>研究了面向企业信息集成的 Web 服务推荐模型,文献<sup>[25]</sup>针对定制型制造企业对订单全生命周期管理业务流程快速重构的需求,构建了一种基于 Web 服务的定制型产品订单全生命周期管理支持系统,文献<sup>[26]</sup>采用 Web 服务实现网络环境下异构地理模型的利用和共享。

### 1.2.2 业务互操作层研究

业务层是解决软件系统间业务数据格式、结构和语义上的异构问题。

①ESB。ESB 全称为 Enterprise Service Bus,即企业服务总线。它是传统中间件技术与 XML、Web 服务等技术结合的产物。ESB 提供了网络中最基本的连接中枢,是构筑企业神经系统的必要元素。ESB 的出现改变了传统的软件架构,可以提供比传统中间件产品更为廉价的解决方案,同时它还可以消除不同应用之间的技术差异,让不同的应用服务器协调运作,实现了不同服务之间的通信与整合。从功能上看,ESB 提供了事件驱动和文档导向的处理模式,以及分布式的运行管理机制,它支持基于内容的路由和过滤,具备了复杂数据的传输能力,并可以提供一系列的标准接口。ESB 可以减轻应用系统业务模块的耦合,同时又能够很好地支持业务模块的集成,因此得到了广泛的应用,如文献<sup>[27]</sup>研究应用 ESB 简化网络化制造系统应用集成,文献<sup>[28]</sup>采用 ESB 实现配电网运行监控及管理的自动化、信息化和全面的信息集成,文献<sup>[29]</sup>讨论了基于 ESB 的 DICOM 通信机制与工程项目集成应用。

由于 ESB 的设计缺乏统一的公共标准, 因此它只能适用于企业内部系统的集成, 而对于异构程度高、访问限制严格的互联网业务无能为力。针对互联网业务集成的需求, 结合 Web 服务技术的发展, 人们推出了 SOA (service-oriented architecture, SOA)。

②SOA。SOA (面向服务架构) 是采用面向服务的商业建模技术和 WEB 服务技术, 实现系统之间的松耦合, 以及系统之间的整合与协同。SOA 一个组件模型, 它将应用程序的不同功能单元 (称为服务) 通过这些服务之间定义良好的接口和契约联系起来。接口是采用中立的方式进行定义的, 它应该独立于实现服务的硬件平台、操作系统和编程语言。这使得构建在各种这样的系统中的服务可以以一种统一和通用的方式进行交互。在 SOA 领域当前存在大量的标准, 但影响较大的有 SDO 和 SCA, 他们主要着眼于系统间的接口协议与契约的定义。

基于 SOA 和 Web 服务技术的应用集成是业务集成技术上的一次重要的变化, 被认为是新一代的应用集成技术, 基于 SOA 的各种集成技术被广泛地研究和应用, 文献<sup>[30]</sup>研究了面向服务架构的 ERP 系统体系结构, 给出了基于 J2EE 平台的面向服务架构的具体实现技术, 文献<sup>[31]</sup>结合 XML 提出并实现了一种基于 SOA 的中小制造企业业务流程集成架构, 文献<sup>[32]</sup>研究了基于 SOA 环境的软件协同设计, 文献<sup>[33]</sup>提出一种基于 SOA 的数据同步与集成平台。

③ebXML。ebXML (电子商务 XML) 是使用扩展标记语言 (XML) 来对商业数据交换进行标准化的一项方案。ebXML 在三个基本的概念上建立的: ①提供一个基础的底层组织以保证数据通信的协同工作能力; ②提供一个语义框架以保证商业的协同工作能力; ③提供一个可以允许企业之间找到彼此的机制, 同意变为贸易伙伴并且与彼此管理业务。

1999 年 11 月由 OASIS (Organization for Advancement of Structured Information Standard) 与 UN/CEFACT (Center for Trade Facilitation and Electronic Business) 共同成立了 ebXML 研究协会。ebXML 根据 Open-edi 参考模型, 构建了 UMM (UN/CEFACT Modeling Methodology) 建模工具、系统集成运行模式、软件集成支持架构以及业务流程组合语言。

ebXML 在业务层主要是解决跨行业集成问题, 即可实现医药、化工、旅游等行业间的电子数据交互, 如文献<sup>[34]</sup>研究了基于 ebXML 的可信用电子商务系统体系架构。

④RosettaNet。ebXML 是横向 B2B 标准, 是一组用于所有电子商务的规范, 它是通用的而不针对任何特殊部门或行业, RosettaNet 是一个纵向标准, 它关注特定行业的需要 (例如, 电子部件制造商) 以及供应链自动化和优化的业务范畴。

1998 年由 40 个 IT 公司成立了 RosettaNet 协会, 其目的是实现电子行业供应链管理的数字化。RosettaNet 规范包括两个部分: 业务伙伴接口流程 PIPs (Partner

Interface Processes)、数据词典(Dictionaries)、实施框架(RosettaNet Implementation Framework)。

RosettaNet 将企业间的业务流程细分为不能再细分的子业务流程(也称为公共业务流程或者 B2B 合作协议),每一个子业务流程是一个业务伙伴接口流程,根据 Open-edi 参考模型,在 PIPs 中从 BOV、FSV 和 IFV(Implementation Framework View)对企业间的子业务流程进行描述。BOV 描述业务伙伴间交互的数据类型、交互方式(如请求、确认等)、子业务流程触发条件和结束条件、定义业务伙伴(买方角色、卖方角色)、子业务流程控制方式、安全等。FSV 描述支持 BOV 视图的网络组件的通信功能,如:认证、授权、非抵赖性等。IFV 描述业务伙伴间的通信协议格式和通信需求,在以后发展中 IFV 将和 FSV 合并。

数据词典包括技术词典和业务词典,数据词典是对 BOV 和 FSV 中所用到的交互数据进行定义。实施框架描述支持 PIPs 运行的软件架构,包括:通信协议的格式(消息头、消息体和附件)、运输协议(如 HTTP、SMTP)、安全、数字证书、数据打包和解包、同步和异步协调机制等。

RosettaNet 的特点是制定了电子行业供应链管理的业务层规范,并得到了广泛应用,如文献<sup>[35]</sup>在综合 aceXML 和 RosettaNet 协议优点的基础上建立了工程项目伙伴信息交换协议(PIEP)模型。

### 1.2.3 业务流程组合层研究

随着网络技术与企业的发展,企业间流程交互越来越频繁,应此对业务流程的组合与重用提出了需求<sup>[36]</sup>,当前的组合技术主要解决流程间的交互接口及交互协议的标准化,为业界提供一个统一的模板。业务流程组合层主要解决业务流程分析、定义、构建、监控、运行等问题,同时还包括了各业务流程组合管理结构层间的互操作问题。

目前有众多的相关规范如 OASIS 组织开发的 BPEL2.0(Business Process Execution Language)、Hewlett-Packard 公司提出的一种会话语言架构 WSCL(Web Services Conversation Language)等,ebXML 组织开发的 BPSS(Business Process Specification Schema),下面以 BPEL 介绍业务流程组合规范的原理。

在 BPEL 中业务流程组成元素为:基本业务活动,它包括:应用系统调用、信息接收、信息回复等;管理业务流程执行顺序的结构化活动(业务流程的串行、并行等),它包括:条件语句、循环语句、串行语句、并行语句等;支持业务流程中各应用系统数据交换的数据容器,通过数据容器可以实现各应用系统间数据依赖的松耦合,并能够保持运行数据的状态信息等。

作为可执行流程的实现语言,BPEL4WS 的作用是将一组现有的服务整合起来,从而定义一个新的 Web 服务。因此,BPEL4WS 基本上是一种实现这样的整合的语言。与其它任何 Web 服务一样,整合服务的接口也被描述为 WSDL portType 的



集合。整合（称为流程）指明了服务接口与整合的总体执行的配合情况。相对于对象组装技术，服务组装更为复杂。人们必须面对 SOA 环境中异构的、松耦合的、自主的服务。它们间的交互关系是动态的、按需发生的，而且缺少中央控制。因此，BPEL 提供的服务组装模型提供了下列特性：灵活性、嵌套组装、关注点分离、会话状态和生命周期管理、可恢复性。作为当前最重要的业务流程管理语言，众多文献对其进行了研究，如文献<sup>[37]</sup>研究了基于 BPEL 的业务流程管理系统架构及其应用，文献<sup>[38]</sup>采用同步网对 BPEL 进行建模来保证其描述的 Web 服务组合的正确性，文献<sup>[39]</sup>提出了一种基于 Petri 网的 BPEL 语言所对应的组合流程分析方法，文献<sup>[40]</sup>则研究了 BPEL 中 Web 服务业务流程执行语言交互兼容性。

#### 1.2.4 语义互操作层研究

①本体（Ontology）。为了实现企业内部及企业间知识及知识处理系统的共享及互操作，不同的用户、组织和软件系统必须进行有效的通讯，但是由于不同的需求及应用背景，关于同一个基本概念，可能会产生不同的理解，形成概念上的差异，这种差异表现为缺乏可共享的理解，阻碍了互操作及共享，本体论提出的目标就是为了解决这一差异，减少或消除概念及术语的混乱。

Wittgenstein 在 1921 年提出的一种观点认为：任何概念化体系应该具有一组原子的概念，这些概念的含义只能引用真实世界对象才能弄清楚。

本体最早是一个哲学的范畴，后来随着人工智能的发展，被人工智能界给予了新的定义。然而最初人们对 Ontology 的理解并不完善，这些定义也出在不断的发展变化中，比较有代表性的定义如下：在哲学上，本体是对客观存在的一个系统的解释和说明，是客观现实的一个抽象本质；在计算机领域，Neches 在 1991 年认为本体是“给出构成相关领域词汇的基本术语和关系，及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义”<sup>[41]</sup>，Gruber 在 1993 年提出本体是“对某种概念化体系的规范说明”<sup>[42]</sup>，Borst 在 Gruber 等所做的定义的基础上，于 1997 年则提出本体是“共享概念模型的形式化的规范说明”<sup>[43]</sup>，在 1998 年，Studer 在总结前人的基础上认为本体是“共享概念模型的明确的形式化规范说明”<sup>[44]</sup>。

在经过一段时间的发展后，对于本体的一个普遍的定义由如下四层组成：

①概念模型(Cerptualization)：通过抽象出客观世界中一些现象(Phenomenon)的相关概念而得到的模型，其表示的含义独立于具体的环境状态。

②明确 (Explicit)：所使用的概念及使用这些概念的约束都有明确的定义。

③形式化 (Formal)：Ontology 是计算机可读的。

④共享 (Share)：Ontology 中体现的是共同认可的知识，反映的是相关领域中公认的概念集，它所针对的是团体而不是个体。

Ontology 的目标是捕获相关的领域的知识，提供对该领域知识的共同理解，确定该领域内共同认可的词汇，并从不同层次的形式化模式上给出这些词汇（术

语)和词汇之间相互关系的明确定义和关系,以及利用这些术语和关系构成的规定这些词汇外延的规则的定义。本体通过对概念、术语及其相互关系的规范化描述,勾画出某一领域的基本知识体系和描述语言。由于本体对事物的定义规范,描述明确,使其成为语义处理领域的热点,如文献<sup>[45]</sup>采用本体技术实现了紧急模拟数据的集成与共享,文献<sup>[46]</sup>利用本体实现产品寿命周期的管理,文献<sup>[47]</sup>利用本体使智能机械电子柔性制造系统实现可重构,文献<sup>[48]</sup>基于本体实现了产品网络化设计中的数据集成与决策支持。

②语义网(Semantic Web)与语义 Web 服务。语义网是由万维网联盟的蒂姆·伯纳斯-李(Tim Berners-Lee)在 1998 年提出的一个概念,它的核心是通过给万维网上的文档添加能够被计算机所理解的语义(Meta data),从而使整个互联网成为一个通用的信息交换媒介。Tim Berners-Lee 等认为:“语义 web 是当前 web 的扩展。扩展之后,web 上的信息具备良好定义的含义,可以帮助人类和计算机更好地协同工作”<sup>[49]</sup>。W3C 则认为:“语义 web 是创建一个具有丰富元数据的资源 web,这些元数据不仅仅用来描述如何显示(HTML)或者句法结构(XML),而且可以描述这资源的含义”。同时还有观点认为,语义 Web 就是在 web 上表现数据。语义 Web 是 W3C 领导下的协作项目,有大量研究人员和业界伙伴参与,语义网提供了一个通用的框架,允许跨越不同应用程序、企业和团体的边界共享和重用数据。语义网以资源描述框架(RDF)为基础。RDF 集成了大量使用以 XML 为句法和以 URIs 来命名的应用。RDF 使用如下的关键概念:基于图的数据模型、基于 URI 的词汇和节点标识、数据类型、文字、XML 序列化语法、简单事实的 RDF 表达法、蕴涵。语义网的体系结构如图 1.2 所示。

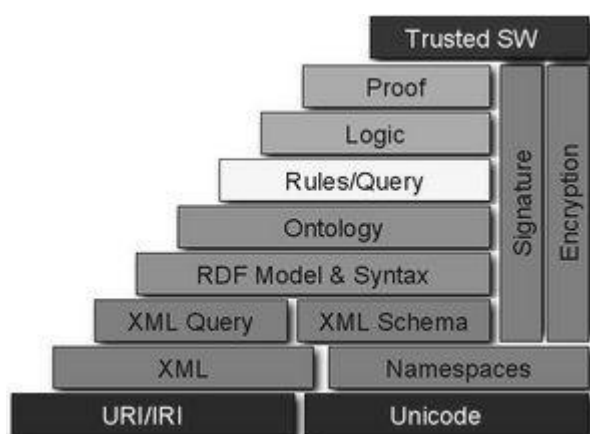


图 1.2 语义网体系结构

Fig.1.2 Architecture of Semantic Web

语义 Web 为集成提供了一种新的途径,尤其是通过与本体技术的结合,语义

Web 具有强大的语义表达处理能力, 因此语义 Web 的研究与应用十分广泛, 如文献<sup>[50]</sup>研究语义 Web 中的本体自动映射, 文献<sup>[51]</sup>研究了面向语义 Web 的领域本体表示、推理与集成, 文献<sup>[52]</sup>将语义 Web 与网络化制造相结合, 使网络化制造领域内的信息具有明确定义的语义, 提出了一种基于语义 Web 的网络化制造模式。

语义 Web 服务则是在传统 Web 服务上增加了语义标注, 从而使 Web 服务具有一定的参与语义处理能力。如文献<sup>[53]</sup>研究了语义 Web 服务框架模型, 文献<sup>[54]</sup>利用语义 Web 服务理论, 研究了供应链中物流资源管理与集成、物流服务与业务协作的架构和实现方法。

总体来说, 当前语义技术大多侧重相关理论的研究, 对如何指导系统开发和进行系统集成的工程实现研究存在明显不足。

## 1.3 制造执行系统及其重构研究现状

### 1.3.1 制造执行系统的概念提出

上世纪 70 年代末, 随着社会和科学技术的发展及物资的日益丰富, 企业面临的压力越来越大, 市场全球化导致竞争日趋激烈, 企业为了求得在下一世纪的生存和发展, 纷纷寻求适合自己的先进的生产管理方式和信息化技术。这时, 工厂内出现了生产调度、工艺管理、质量管理、设备维护、过程控制等相互独立的系统, 这些系统之间相互独立、缺乏数据共享。信息孤岛造成了信息的横向阻断, 制约着工厂内各种系统间的协调。

进入 80 年代, 随着全球市场竞争日趋激烈, 企业上层计划管理系统受市场的影响越来越大, 计划的适应性问题愈来愈突出, 明显感到计划跟不上变化, 面对客户对交货期的苛刻要求, 面对更多产品的改型和订单的不断调整, 企业的决策者逐渐认识到计划的制定和执行受市场和实际的作业执行状态的影响越来越严重, 而由于企业级的业务管理系统无法得到及时准确的生产实绩信息, 无法把握生产现场的真实情况, 使上层计划的制定越来越困难, 准确性和可行性难以得到保证。同时, 由于生产现场人员与设备得不到切实可行的生产计划与生产指示, 使车间调度系统失去了它应有的作用, 一方面造成在制品库存量过多, 使车间管理出现混乱以及资金占用过多, 延误交货期; 另一方面由于设备空闲, 造成资源浪费。信息断层带来了企业生产经营信息在垂直方向的阻断, 削弱了企业迅速响应市场的能力。

同时, 伴随着消费者对产品的需求愈加多样化, 制造业的生产方式开始由大批量的刚性生产转向多品种少批量的柔性生产; 以计算机网络和大型数据库等 IT 技术和先进的通讯技术的发展为依托, 企业的信息系统也开始从局部的、事后处理方式转向全局指向的、实时处理方式。在制造管理领域出现了 JIT、LP、TOC 等

新的理念和方法;在企业级层面上,管理系统软件 MRPII 以及 OPT 系统迅速普及;在过程控制领域 PLC、DCS 得到大量应用,并显著提高了车间的制造能力。随着以 MRPII/ERP 为代表的计划管理系统和以 PLC, DCS 为代表的车间控制系统在企业应用的不断深入,两者之间的鸿沟也日趋明显,在工厂以及企业范围信息集成的过程中,仍然存在难以解决的问题:在计划过程中无法准确及时地把握生产实际状况,在生产过程中无法得到切实可行的作业计划做指导,企业管理人员和车间操作人员难以在生产过程中跟踪产品的状态数据、不能有效地控制在制品库存,而用户在交货之前则无法了解定单的执行状况。产生这些问题的主要原因仍然在于生产管理业务系统与生产过程控制系统的相互分离,计划系统和过程控制系统之间的界限模糊、缺乏紧密的联系。

针对企业车间面临的状况,1990 年美国的 AMR(Advanced Manufacturing Research)提出了制造执行系统(Manufacturing Execution System, MES)的概念,并将 MES 定位于解决生产执行层的生产管理问题,定义为“位于上层的计划管理系统与底层的工业控制之间的面向车间层的管理信息系统”,如图 1.3 所示, MES 集成了车间中生产调度、工艺管理、质量管理、设备维护、过程控制等相互独立的系统,使这些系统之间的数据能够共享,从而解决了信息孤岛状态下的数据重叠和数据矛盾的问题。

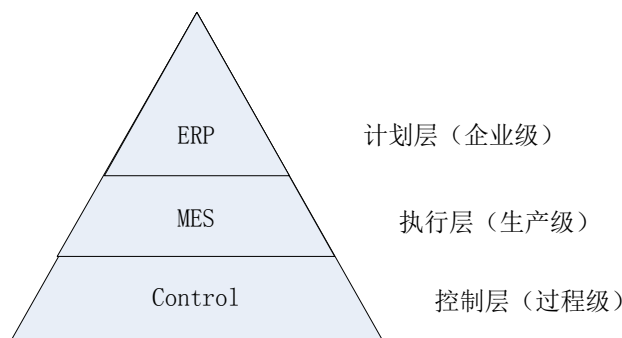


图 1.3 AMR 三层企业集成模型

Fig.1.3 AMR three-tier enterprise integration model

同时, MES 系统收集生产过程中大量的实时数据,对实时事件实现及时处理;同计划层和生产控制层保持双向通信,从上下两层接收相应数据并反馈处理结果和生产指令<sup>[55]</sup>。

目前,国际上 MES 还没有统一的定义,具有代表性的定义主要有两个: MES 国际联合会(Manufacturing Execution System Association, MESA)的定义和美国国家标准技术局(National Institute of Standards and Technology, NIST)的定义。

MESA 认为 MES 能通过信息传递对从订单下达到产品完成的整个生产过程进

行优化管理。当工厂发生实时事件时，MES 能对此及时做出反应、报告，并用当前的准确数据对他们进行指导处理。这种对状态变化的迅速响应使 MES 能够减少企业内部没有附加值的活动，有效地指导工厂的生产运作过程，从而使其既能够提高工厂及时交货能力，改善物料的流通性能，又能提高生产回报率。MES 还通过双向的直接通信在企业内部和整个产品供应链中提供有关产品行为的关键任务信息<sup>[56-61]</sup>。MESA 在 MES 的定义中强调了以下三点：1)MES 是对整个车间制造过程的优化，而不是单一的解决某个生产瓶颈。2)MES 必须提供实时收集生产过程中数据的功能，并做出相应的分析和处理。3)MES 需要与计划层和控制层进行信息交互，通过企业的连续信息流来实现企业信息全集成。

NIST 对 MES 的定义为：制造执行系统是一套硬件或软件组件，这些组件能够使人们对从生产命令下发到产品完成的生产活动进行管理和优化。通过维护实时而精确的数据，当车间有生产活动发生时，制造执行系统能够指导、监控、响应并报告这些活动。制造执行系统在整个企业范围内向决策支持处理系统提供有关生产活动的关键任务信息<sup>[62]</sup>。

从以上的定义中可以看出，MESA 将 MES 定义为相对独立的应用，NIST 将其定义为一个范围，主要关注于定义基于组件的分布式制造执行系统软件接口。虽然两者的侧重点不同，但他们都强调了 MES 对实时生产数据的收集、反馈、分析和控制。由此可以看出 MES 的本质是面向制造过程的集成化车间生产管理与控制系统，它位于计划管理和控制层之间，起到了沟通桥梁的作用并缩小了计划层和控制层之间的鸿沟。MES 系统主要使用来自计划管理系统的生产计划和根据车间层的资源状态信息制定的调度计划，并分发工作单或加工指令到车间层进行加工。在加工过程中，控制层向 MES 系统提供各种状态信息；MES 系统则根据这些信息对在制品(Work In Process, WIP)进行跟踪、控制加工过程，并对车间层所发生的事件进行实时响应。ERP 系统可以查询定单状态、WIP 状态和其它性能数据以便做出符合实际的预测和决策<sup>[63]</sup>。

### 1.3.2 制造执行系统及其重构研究现状

MES 的发展大致经历了专用 MES 系统(Point MES)、集成化 MES 系统(Integrated MES)、可集成的 MES 系统(Integrable MES)、智能化第二代 MES 系统(MES II)、下一代 MES(Next Generation MES)等几个阶段。

最早是专用的 MES 系统，专用 MES 是一种自成一体的应用系统，它针对某个单一的生产问题（如制造周期缺乏竞争力、在制品库存过大、产品质量得不到保证、设备利用率低、缺乏过程控制等）提供有限功能（如作业计划与控制、物料管理、质量管理、设备维护、过程管理等），或适用某种特定的生成环境（如应用于半导体和 MEMS 车间 MES，应用于 FMS 系统的 MES 等）。专用 MES 具有实

施快、投入少等优点，但通用性和可集成性差。

集成化 MES 系统起初是针对特定行业（如航空、装配、半导体、食品和卫生等）特定的规范化环境而设计，目前已拓展到整个工业领域。在功能上它已实现了与上层事务处理和下层实时控制系统的集成。集成化 MES 具有丰富的应用功能、统一的逻辑数据库、产品及过程模型等优点。但该类系统依赖特定的车间环境，柔性差缺少通用性和广泛的集成能力，难于随业务过程变化重新配置。

可集成的 MES 系统将模块化应用组件技术应用于 MES 的系统开发，是前两类 MES 系统的结合：既具有专用 MES 系统的特点，即 I-MES 中的部分功能作为可重用组件单独销售；又具有集成化 MES 的特点，即能实现上下两层之间的集成。I-MES 还具有能实现客户化、可重构、可扩展和互操作等特性，能方便地实现不同厂商之间的集成和遗产系统的保护，以及即插即用等功能。如用于虚拟企业的 NIIP-SMART。它应用面向对象技术和模块化应用组件技术，使系统具有便于客户化、可重构和可扩展等特性<sup>[64]</sup>。

智能化第二代 MES 解决方案的核心目标是通过更精确的过程状态跟踪和更完整的数据记录获取更多的数据来方便的管理，它通过分布在设备中的智能来保证车间生产的自动化<sup>[65]</sup>。

下一代 MES 的显著特点是强调生产同步性(协同)，支持网络化制造。它通过 MES 引擎在一个和几个地点来进行工厂的实时生产信息和过程管理以协同企业所有的生产活动，建立过程化、敏捷化、有效的组织和级别化的管理使企业生产经营达到同步化。

在 MES 技术发展过程中，对象管理组织(Object Management Group, OMG)制造技术委员会中的 MES/MC 工作组一直致力于建立 MES 的参考体系结构。为了使得该参考体系结构具有广泛的代表性，确保其是工业界经验的总结，该工作组发布了一份名为“Manufacturing DTF RFI-3 Manufacturing Executions Systems”的征求意见稿，其中列出了希望得到研究的具体项目。该计划得到了一些研究组织和企业的支持，收到来自美国国家标准和技术研究所(NIST)、Boeing 公司等多家单位的反馈建议<sup>[62]</sup>，这些建议方案包括了航空制造工业、流程工业以及半导体制造业等不同工业类型的研究报告，这些报告有力的推动了 MES 技术的研究和发展。为了提高 MES 的技术规范性、行业适应性，很多研究者在 MES 的接口及功能模块标准化的方向进行了大量研究<sup>[66, 67]</sup>。

随着分布对象计算技术的发展，将 MES 的功能模块、体系结构改造为分布对象运行方式也是 MES 发展的一个重要方向<sup>[68]</sup>，这使得 MES 能够很好地与企业的其它系统更加紧密地集成起来。基于这样的目标，同时针对 MES 开发和成本高、可重构性差、MES 之间不能实现互操作、不能与企业其它信息系统集成等问

题, 美国国家工业信息基础协议组织(National Industrial Information Infrastructure Protocols, NIIP)开展了一个名为 SMART(Solution for MES-Adaptable Replicable Technology)的项目, 旨在开发一个能使 MES 与企业内外的信息系统集成和互操作的信息框架<sup>[69]</sup>。该项目共分两个阶段: 第一阶段主要研究技术间的交互和集成; 第二阶段则集中在满足即插即用、可配置性和可交互性的需求及框架所带来的经济效益。

MES 的标准化对于 MES 的发展至关重要, 国际仪表学会启动编制的 ISASP95 企业控制系统集成标准和 ISASP98 批量控制标准就是其中的重要内容, 至目前, MESA 已经发布了若干白皮书涉及 MES 相关的功能、标准、市场应用以及融合新的计算机技术和创新的生产方式。

日本的制造科学与技术中心受日本信息技术促进局委托, 在电子商业公共基础设施建设项目中, 提出了一个基于 CORBA、与平台无关的 Open MES 框架规范<sup>[70]</sup>。该框架主要是给独立开发应用项目的组织提供一个易于理解的概念性的 Open MES 框架, 但没有包含具体实现的细节。土耳其中东技术大学制造工程系的集成制造研究组采用 Windows DNA 技术实现了一个分布式的制造执行系统原型系统。由于它全部是基于 Microsoft 的技术平台, 系统的可移植性欠佳, 并且原型系统所包括的功能也很有限, 主要是从实现技术上进行了较深入的研究<sup>[71]</sup>。在台湾, 由于半导体产业的竞争需要, 制造执行系统的研究也开展的比较深入。其中台湾成功大学制造工程研究所应用面向对象技术与 CORBA 规范开发了一个集成的制造执行系统框架<sup>[72]</sup>, 及与硬件相关的软件系统用以集成各种独立的自动化设备, 如无轨小车、自动仓储系统、机械臂以及仿真设备等, 使其成为一个适用于半导体制造的计算机集成制造自动化实验工厂。2001 年, 又研究和开发了一个基于 Holon 的制造执行系统<sup>[73]</sup>。

MES 在国外尤其是美国和日本得到了广泛而深入的研究和应用。MES 国际联合会对实施 MES 系统的企业所进行的问卷调查显示: MES 能够缩短制造周期 45% 左右, 降低在制品库存 25% 或更多, 缩短生产提前期 35% 左右<sup>[56]</sup>。由于 MES 在车间生产管理中的特殊作用, MES 产品的研究开发得到了长足的发展, 基于 MES 在车间生产管理中的特殊作用, 国际上一些著名的软件厂商和企业界纷纷响应并加入 MES 国际联合会, 一些厂商也推出自己的 MES 产品, 例如, 国际上著名的 ERP 软件供应商 SAP 公司就在其产品 SAP-R/3 中整合了 MES 的功能。HONEYWELL 也在其协同生产管理解决方案中整合了 MES 的功能。

整体来看, 国内对 MES 的研究开发起步比较晚, 通过“九五”期间 CAD/CAM/CIMS 应用示范和推广应用以及“十五”期间制造业信息化工程的实施, 制造企业已经有了较好的信息化基础。但车间制造过程的信息化相对薄弱, 生产

效率不高。同时全球化的制造环境、制造服务外包、扩展企业的制造协同等新的制造趋势和制造模式对制造业提出了新的挑战，如何提升制造企业的制造执行能力，实现制造过程的可视化和支持网络化的协同制造已经成为新时代制造企业所必须解决的关键问题。我国制造业在“十一五”及“十二五”期间面临由量（生产规模能力）到质（创新能力和快速响应能力）的重大转变，提升数字化制造执行能力已成为我国制造业发展的迫切需求。因此，以制造过程信息化为代表的制造执行系统的研究和实施成为了当前制造业信息化研究和应用的热点。

“十五”期间，MES 被纳入了国家科技规划，在科技部 863 计划的大力支持下，流程工业领域 MES 成为技术研究的突破口。面向钢铁和石化两个典型流程制造行业，开发完成了若干自主知识产权的 MES 系统，如上海宝信 MES、中石化 MES 等。目前 MES 已在钢铁、石化行业得到成功应用，MES 在流程行业应用所产生的效益也得到了大家的一致认可。在“十五”期间我国对离散制造业的 MES 进行了探索性研究，由航天 211 厂、西安飞机公司、华中科技大学、西北工业大学、重庆大学等单位联合承担的国家十五 863 重大专项《数字化制造管理与执行关键技术研究及应用》针对汽车、航空等典型离散行业进行了重点应用开发，取得了初步的成效。“十五”期间，国内的一些高校和软件公司针对典型离散行业进行的 MES 系统研发和应用实践也形成了一些初步的解决方案，如：华中科技大学开发的面向汽车行业混流装配生产的 A2MES 系统，西北工业大学研发的面向航空行业多品种小批量生产的 Workshop Manager 系统，大连华铁海兴科技有限责任公司研发的天为 MES 系统，以及重庆大学面向离散作业车间开发的支持装备集成运行的 eMES 等。“十一五”与“十二五”期间，离散制造业 MES 仍是国家 863 计划 MES 领域研究和应用的重点，并开展了面向离散制造的可配置 MES 产品及行业解决方案的重点项目研究和攻关<sup>[74]</sup>。

当前，在国内在 MES 体系结构及相关关键技术研究方面异常活跃，并取得了一系列的研究成果。在 MES 体系结构方面，同济大学的宋海生等<sup>[75]</sup>提出了网络联盟企业中基于 Web 的 MES 体系结构，指出在分布式 MES 系统中，可以构成一个基于 Web 的 Agent 分布式制造环境，以制造单元协调电子生产经理为网络联盟企业运行的核心软件系统，以应用服务供应商（ASP）为运行模式，以浏览器/服务器为连接网络的方式，以作业计划和调度为核心，完成制造执行系统所要求的功能，实时与其它制造单元、协调电子生产经理通讯，实现异地生产信息的集成。南京航空航天大学的曹江辉等<sup>[76]</sup>基于企业内部网 MRPII、PDM 与 MES 集成以及通信方面，提出了基于 CORBA 的 MES 的实现方法。在车间制造资源建模与集成方面，西安交通大学的周光辉等<sup>[77]</sup>提出了基于移动 Agent 的网络制造资源集成，利用移动 Agent 技术的资源封装和集成方案及框架，实现了在统一的 Web 浏览器



界面下,完成对传统软硬件制造资源的重构和封装,以及网络化集成和信息共享。西北工业大学和延立等<sup>[78, 79]</sup>提出了基于多 Agent 系统的制造资源集成框架,通过建立一个集成制造环境,以实现制造资源的有效利用和配置。四川大学的王玲等<sup>[80]</sup>提出了基于 MRP II 的车间生产管理信息系统(SEW-MIS)的设计思想和建模方法;河北科技大学贾广飞等<sup>[81]</sup>提出了基于 Web 的车间生产管理系统的设想,并给出了系统总体模型;上海交通大学与上海大众联合开发了基于 B/S 架构三层体系的车身车间生产管理系统,该系统对车间管理效率的提高、成本的降低、质量的改进起到了辅助作用<sup>[82]</sup>。华中科技大学饶运清等<sup>[83, 84]</sup>对 MES 敏捷化进行了研究,提出了基于 Multi-Agent 的敏捷化 MES 体系结构以及基于软计算理论的 MES 运行敏捷化机制与方法。刘晓冰等<sup>[85]</sup>基于制造执行系统理论和车间生产业务的构件化设计思想,采用通用对象请求代理结构和多代理技术,提出了适用于制造行业的车间制造执行系统平台的体系结构。李波等<sup>[86]</sup>分析了传统 MES 存在的不足,详细论述了 MES 可重构的适用范围、体系结构、开发阶段和重构粒度等四个方向的维度及层次。最后探讨了可重构 MES 的构建和开发方法,并提出一种基于 CORBA 和 MAS 的可重构 MES 体系结构。房亚东等<sup>[87]</sup>针对网络化制造的特点,对制造执行系统的功能模型、总体体系结构以及软件实现体系展开探讨和研究。李亚白等<sup>[88]</sup>把基于 SOA 的思想引入制造执行系统,将车间资源服务化,提出基于 SOA 的可重构制造执行系统的软件体系结构和实现方法。柴永生等<sup>[89]</sup>针对制造执行系统应用开发的复杂性,提出了一个制造执行系统的柔性应用框架。并通过运用面向过程的对象分析技术、基于规则的事件服务机制和业务工程分析技术,提供可重构的组织结构、可伸缩的业务流程和可定制的业务规则,使得系统开发和实施的柔性得以提高。同时,给出了一个实例进行分析和实现。邹顺享等<sup>[90]</sup>提出了基于 Web 的可重构制造执行系统的系统模型,阐述了基于 Web 的可重构制造执行系统的体系结构和实现技术,介绍了基于 .NET 平台 Web 技术设计与操作的实现方法及应用实例。张凌云<sup>[91]</sup>等分析网络制造环境下 MES 与 CAPP 的新特征,然后研究网络制造环境下的 MES 和 CAPP 集成的必要性和实现集成的关键技术,最后给出基于 Web 系统集成数据库设计。徐云等<sup>[92]</sup>提出了一种网络化制造平台集成的网格模式,以实现大范围资源共享和协同工作。引入了网络化制造平台联邦的概念,提出了一种三维集成框架,并重点介绍了基于应用服务提供商的网络化制造平台联邦集成的体系结构和联邦执行支撑系统。王彬等<sup>[93]</sup>针对离散型制造企业的质量管理,就生产质量管理体系与企业其他应用系统的信息集成问题展开研究,分析了生产质量管理体系与企业其他应用系统的集成需求,提出了实现方法。张士杰等研究一个基于 Windows-DNA 组件的可重构制造执行系统,并在沈阳第一机床厂进行了应用<sup>[94]</sup>。周华等构建基于代理的可重构制造执行系统,将重构划分为实体重

构和实体关系重构,提出了基于代理模型、角色模型和特征模型实现重构的方法,建立了基于代理模型、角色模型和特征模型的可重构制造执行系统<sup>[95]</sup>。程志伦等提出了钢铁企业柔性制造执行系统概念,并介绍了几种常见的组件定义以及设计出柔性制造执行系统组件模型和两种制造执行系统和车间过程控制系统的接口方式<sup>[96]</sup>。刘卫宁等在制造企业内部引入射频识别电子标签跟踪在制品,同时在部分应用中兼容条码技术,实现了制造和质量的可视化和数字化管理<sup>[97]</sup>。闫欢等通过在MES中引入业务规则管理系统(BRMS),利用规则引擎及相应的规则语言,针对企业需求制定业务规则,把程序代码和业务规则分离开来,使企业根据市场需求灵活调整企业生产方针,加快了MES系统的开发、升级、维护过程,增强了MES系统的灵活性和适应能力<sup>[98]</sup>。王琦峰等提出了一种面向服务的离散车间可重构制造执行系统,该系统通过实时数据采集与信息交互平台的构建,实现了与装备的集成化运行,并为操作工人提供了一个实时的信息采集与信息交互的工作平台。然后提出了一个四维的系统模型,通过模型驱动的系统构建方法,实现了系统模型与系统实现的统一,以及系统的跨平台重构;通过基于服务的可重构单元构建方法,构建不同粒度的服务、基于动态服务组合的流程编排,实现了业务功能的重用和动态的流程重构<sup>[99]</sup>。苑明海等设计基于CORBA和多Agent的可重构装配线制造执行系统的体系结构,实现制造执行系统的可重构性和可集成性<sup>[21]</sup>。王琦峰等提出了一种基于知识集成的车间制造系统运行模式,详细分析了该运行模式的实现思路和构成,以及实现该模式的基于制造资源封装的工作中心服务化技术、基于知识集成的制造执行链构建方法等关键技术<sup>[100]</sup>。郝广科等提出了一种模型驱动的工程方法,从全生命周期的角度和较高的抽象层次规划实现制造执行系统的重构。引入可重构资产的概念,设计了可重构资产元模型,构建了面向制造执行系统重构的领域建模语言,以准确描述重构相关的需求和决策信息<sup>[101]</sup>。黄刚等研究了可定制数据集成适配器、可配置的工厂模型、可复用的业务组件以及脚本驱动的事件响应机制等关键技术,设计了一种新的可适应性制造执行系统框架<sup>[102]</sup>。黄毅等提出一套支持跨粒度重构的制造执行系统体系结构。该结构基于重构需求细节,使用领域驱动设计、模块化设计等技术,将制造执行系统解构为职责明确、粒度相异的模块层级<sup>[103]</sup>。张映锋等设计了一种基于物联技术的制造执行系统体系构架,提出了一套使能基于物联技术的制造执行系统关键技术体系和实现框架<sup>[104]</sup>。李亚杰等提出一种基于可重构流程模型和组件技术的流程进化实施方法。对业务流程可变性进行分析,建立了可重构流程模型,并对其可重构性进行了说明。定义了组件模型,使流程模型能以组件的形式封装和部署<sup>[105]</sup>。

当前制造执行系统的重构研究主要侧重于自身体系结构和系统间集成接口定义的研究,对于本身业务逻辑的重构研究则和对于重构中维持系统语义稳定的研

究则较少，难以适应当前制造企业业务发展需求。

### 1.3.3 制造执行系统的发展趋势

制造执行系统从技术架构上经历了从专用 MES 到可集成的 MES，从应用上经历了从局部到整体、从单体向集成的发展历程，目前正朝着下一代 MES 的方向发展。下一代 MES 的技术发展趋势主要表现在以下几个方面<sup>[63, 106]</sup>：

#### ①开放的体系结构

全球化制造、虚拟企业的发展使得 MES 系统难以进行统一的平台部署，随着网络技术的高速发展及其对制造业的重大影响，未来的 MES 系统必然与网络技术相结合，其架构将基于 Web 技术和模块化，从而实现异构系统的跨平台互操作性。

#### ②集成接口标准化

ISA-95 企业控制系统集成标准的目的是建立企业级和制造级信息系统之间的集成规范。MES 的标准化进程是推动 MES 发展的强大推动力，未来的 MES 在系统架构上更为快捷方便和易于实现，通过制定 MES 系统设计、开发的技术标准，使不同软件供应商的 MES 构件和其他异构的信息化构件可以实现标准化互连与互操作以及即插即用等功能，并能方便地实现对遗留系统的保护。

#### ③系统决策智能化

MES 中所涉及的信息及决策过程非常复杂，由于缺乏智能机制，现有 MES 大多只提供了一个替代经验管理方式的系统平台，通常需要大量的人工干预，难以保证生产过程的高效和优化。未来的 MES 将具备人工智能决策功能，能够根据自定义的决策逻辑和实时数据进行及时的智能辅助决策制定。

#### ④数据采集实时性

MES 应具有更精确的过程状态跟踪和更完整的数据记录功能，可实时获取更多的数据以更准确、更及时、更方便地进行生产过程管理与控制，并具有多源信息的融合及复杂信息处理与快速决策能力。

#### ⑤系统可扩展重构

用户需求与市场的多变性，对信息系统的可扩展性和可重构性提出了更高的要求，未来的 MES 必须具备开放式、客户化、可定制、可扩展等特性，可针对企业规模或者企业业务流程的变更进行快速的系统重构。

制造执行系统的发展趋势表明，提高系统的智能理解和自动化执行能力，实现系统内部松耦合和可配置，维持系统间集成关系的稳定成为急需解决的问题。

## 1.4 语义网关研究现状

语义网关是作者所在的课题组提出的一个用于解决异构系统语义集成问题的基础设施平台。其目的是希望不仅能解决异构系统集成中的互操作问题，也能解

决异构系统集成中的语义集成问题，同时能够像互联网中的网关那样的方便灵活进行不同系统之间的集成，为异构系统间的集成提供一种新的解决方案。

语义网关主要用于解决制造信息系统间业务数据格式、结构上的语义异构问题，实现不同制造信息系统内部标准之间的有效理解和转换。利用语义网关对异构系统的集成信息进行统一表达和解析，规范接口的内容表达，使各种应用系统对集成信息能够正确理解，从而增强异构系统集成的柔性和透明度，促进制造企业信息系统的快速、灵活实施、更新和集成。

在语义网关的研究方面，文献<sup>[107]</sup>提出了网络化制造中支持系统集成的语义网关的六层框架，它由语义描述标准、语义映射标准、语义解析、语义路由机制、语义发布更新机制和使能工具组成。文献<sup>[108]</sup>则具体研究了语义网关的六层框架，建立了语义网关的基本语义处理策略，并针对离散制造企业异构系统间基于语义网关的集成框架进行了初步的探讨。文献<sup>[109]</sup>在语义网关的概念上建立了一种基于语义网关的异构系统集成框架，以疏通系统间的语义异构，动态集成企业的业务流程，建立了语义网关模型，提出了语义映射标准、语义网关数据库适配器和语义网关服务适配器等关键技术。文献<sup>[74]</sup>研究了面向服务的车间制造系统运行模式及支持技术研究，通过引入基于语义网关技术来实现车间制造系统内部各信息系统的协同运行以及车间制造系统与协作伙伴之间的业务协同。文献<sup>[110]</sup>在引入的语义网关基础上，建立了一种网络化制造中基于语义网关的异构系统集成体系结构、运行模式和异构系统集成建模方法。他主要针对当前企业建模过程中未考虑系统集成模型的需求，结合语义网关，从企业建模的角度对异构系统间的集成需求进行了分析定义，提出了语义网关的体系结构和集成运行模式，并研究并解决了包括语义网关的高级语义技术和语义网关的可靠性技术等在内的部分关键技术问题。

上述文献的研究工作主要基于语义网关的概念体系、集成需求模型和集成框架进行展开，对于语义网关本身的语义映射处理原理没有详细探讨，也没有为异构系统基于语义网关的集成提供具体的解决方案，同时对语义网关参与下的制造信息系统设计与与制造企业信息化系统的集成应用也未进行深入研究。

## 1.5 论文的研究目的与意义

信息系统间的集成与协同成为了当前制造企业信息化的两大主题，而协同又以集成为其基础。由于信息化实施的特点，企业的信息系统大多是异构的，它们之间存在严重的语法和语义异构问题，所以制造企业迫切需要一种动态、自适应、柔性的 IT 基础设施来消除异构的鸿沟。

制造执行系统是面向车间层的管理信息系统，它联系着企业的上层计划管理系统和下层工业控制系统，能够及时反映生产现场信息，是实现制造企业信息集

成的纽带。当前制造企业面临的现状要求企业能按需快速调整业务逻辑，同时以松耦合的方式与各种信息系统实现集成。作为企业信息集成的纽带，制造执行系统的业务重构能力与系统集成重构能力关系到整个企业的信息系统能否满足企业业务要求。

面对日益复杂的企业应用需求，语义技术作为当前主要的解决方案被广泛地研究，以期利用语义技术实现异构制造系统间的智能理解和自动执行来降低信息化系统的复杂度和成本并提高系统对制造环境的适应能力，其中主要以本体技术为代表。然而当前本体等语义技术的研究大多从理论方面展开，其理论体系比较复杂，同时也存在不足，如本体结构难以归纳完善、本体定义缺乏统一的行业标准等等因素导致其应用困难，因此对如何将语义技术进行工程实现的研究则较少，难以在企业展开低复杂度的实际应用。

针对当前语义集成技术发展的现状和工程实现的不足，结合离散制造执行系统的重构需求，在课题组语义网关上的前期研究成果上，本文提出了一种基于语义网关的离散制造执行系统可重构设计与集成实现方法，并研究其相关的关键技术，通过在 MES 系统的重构过程中引入语义网关来保持 MES 系统语义的稳定，以支持离散制造执行系统动态、灵活、松耦合的业务逻辑重构和集成关系重构，满足当前制造环境下离散制造执行系统的业务逻辑重构与异构系统集成需求。

## 1.6 论文的课题来源与结构安排

本论文课题来源于国家 863 项目“基于语义网关的异构系统集成模式、体系结构与支撑技术研究”(No.2007AA04Z152)以及国家自然科学基金“基于语义网关的制造企业异构信息系统集成建模方法和实现技术”(No.51075414)。

围绕论文的研究目的，本论文主要在以下方面进行了研究：

第一章分析了论文相关领域的发展研究现状，给出了论文的研究意义与目的以及课题来源，对论文结构进行了安排。

第二章研究了基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构体系结构，体系结构主要由重构需求、重构内容、重构目标、语义网关和重构框架等组成。

第三章研究了基于语义网关的离散制造执行系统业务逻辑可重构，从业务实体结构、业务逻辑接口、业务实现研究了 MES 系统内部的可重构。

第四章研究了基于语义网关的离散制造执行系统系统集成可重构，从信息集成、服务集成研究了 MES 与其它异构系统间基于语义网关的集成实现。

第五章研究了语义网关和 MES 系统的原型，通过原型系统的开发和在企业进行了应用验证，取得了预期的重构与集成效果。

第六章对论文全文进行了总结。

## 1.7 本章小结

本章讨论了论文研究相关领域的发展研究现状，提出了论文的研究目的与意义，并对论文的结构安排进行了安排。

## 2 基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系

### 2.1 引言

离散制造是制造业按照生产方式分类的一种，相对于连续制造，离散制造的产品往往由多个零件经过一系列并不连续的工序的加工最终装配而成。离散制造一般都包含零部件加工、零部件装配成产品等过程，其产品往往由多个零件经过一系列并不连续的工序的加工最终装配而成。

对离散制造过程进行管理的系统则为离散制造执行系统，典型的离散制造执行系统由资源分配以及状态管理、工序级详细生产计划、生产调度管理、文档管理、现场数据采集、人力资源管理、生产质量管理、生产过程管理、生产设备维护管理、产品跟踪和产品数据管理、性能分析等组成。

由于离散制造的复杂性和制造活动的延续性，要求离散制造执行系统能够灵活支持各种多变的制造活动和进行异构系统间的集成，由于不可能实时修改 MES 系统的开发源码，从而给 MES 系统带来非编译的按需而变的重构需求，而对 MES 系统进行重构分析则是指导具体重构活动的前提。

### 2.2 离散制造执行系统的重构需求

制造执行系统专注于把正确的资源，在正确的时间，按照正确的数量、正确的质量和正确的成本配送到企业正确的地点，MES 专注于从车间及时获取正确的生产信息从而更有效迅速地制定生产决策。面对日益复杂的企业协作需求、多变的市场波动以及个性化的客户定制需求等发展趋势，要求制造企业在兼顾效率和质量的同时具备“按需应变”的能力。作为负责车间制造信息化的系统，MES 的重构能力是制造企业在按需应变同时避免生产作业和信息系统脱节，提高生产效率、确保产品质量的关键。MES 的重构需求如图 2.1 所示。

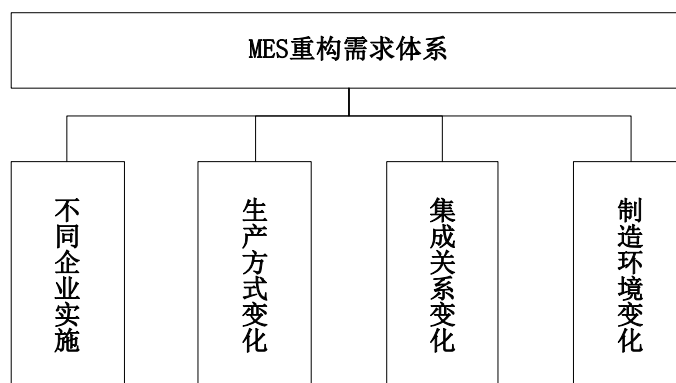


图 2.1 MES 的重构需求

Fig.2.1 MES reconfiguration needs

### 2.2.1 企业实施离散制造执行系统带来的重构需求

不同的离散制造企业具有各自的特征，而 MES 一般基于典型应用设计开发，因此在进行企业实施时必然需要针对企业的具体情况进行调整，同时企业实施 MES 一般从部分的关键点切入，很少一次性同时实施全部模块，从而带来系统实施的重构需求，这种重构需求一方面体现在 MES 系统的专用业务模块与通用业务模块间的动态重组上，另一方面体现在 MES 系统分段实施中前后业务模块间的兼容上，离散制造企业实施 MES 的重构需求如下图 2.2 所示。

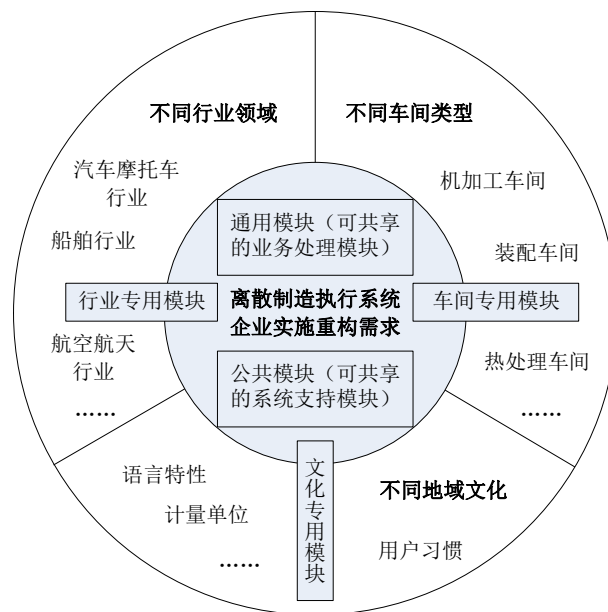


图 2.2 离散制造企业实施 MES 的重构需求

Fig.2.2 Discrete manufacturing enterprises reconfiguration needs of implement MES

#### ①不同制造行业重构需求。

离散制造包含了普通机械加工、装备制造等众多的行业领域，不同的行业对 MES 业务细节大多存在差异，因此对 MES 系统的功能模块带来不同的需求，要求 MES 能够支持系统实施时为不同的行业提供专用的业务模块，并能快速地集成到典型 MES 系统中，实现行业专用业务模块的动态重组，满足不同行业的独特业务需求。

#### ②不同车间类型重构需求。

离散制造企业的车间主要分为两大类，分别是机加工车间和装配车间，其中机加工车间主要关注零件生产过程控制，对在制品的管理，生产任务调度和生产质量等方面比较侧重，装配车间则主要关注装配过程的节拍控制，对产品的装配 BOM 结构维护、零件配送计划、产品部件回溯等方面比较侧重。因此必须针对不



同类型车间的关注点开发对应车间的专用业务模块，满足不同车间制造业务管理需求，从而要求 MES 系统能够针对不同的车间类型进行业务模块重构。

### ③不同地域文化重构需求

在制造全球化的背景下，MES 系统国际化需求越来越明显，针对不同地域文化进行 MES 系统的人机交互界面重构和相关制造行业标准重构对于推广 MES 应用有着重要作用。比如针对系统用户的母语进行本地化重构，为 MES 系统快速提供多语言版本，比如针对公制与英制的计量单位的差异进行重构，满足不同国家的行业标准需求，比如针对用户的习惯进行系统交互界面的重构，满足用户的个性化需求等。

## 2.2.2 生产方式变化带来的重构需求

不同时期，企业的生产方式大多存在变化，生产方式变化导致 MES 系统必须配合车间生产需求进行相关业务逻辑的应需重构，以便能继续支持车间制造过程的管理。不同的生产方式具有不同的特点。

生产方式是指对生产系统的设计、运行和维护过程的管理，包括对生产资源和生产活动的管理。常见的生产方式分类包括：

①按生产批量，分为大规模生产、批量生产、多品种小批量生产和单件生产，特点如下表所示<sup>[111]</sup>。

表 2.1 四种生产方式的特点

Table 2.1 The four kind characteristics of production mode

生产类型 比较项目	大规模生产	批量生产	多品种小批量生产	单件生产
产品特点	品种少，产量大	品种较少，产量较大	品种较多，产量较小	品种多，产量小
设计类型	标准产品	趋于标准产品	非标准产品	定制产品
工作组织	专业化程度高，分工精细	专业化程度较高，分工较细	专业化程度较低，分工较粗	专业化程度低，分工粗略
生产设备	大量专用设备	较多专用设备，少量通用设备	少量专用设备，较多通用设备	大量通用设备
生产管理	生产条件稳定，计划调度简单	生产过程产品转换较多，计划调度有一定复杂性	生产过程产品转换多，计划调度较复杂	生产条件多变，计划调度复杂
生产周期	短	较短	较长	长
单位成本	低	较低	较高	高

其中，采用大规模生产方式的企业，生产条件稳定，生产的重复性高，其以数量优势降低产品单位成本，进而以低价格刺激产量的扩大。这种生产方式的主要应用优点是实现了产品大量、标准、快速地生产，提高了生产过程的工作效率，降低了成本。而缺点主要是生产缺乏柔性，不能快速适应需求变化。

而成批生产的产品一般为定型产品，产品的结构和工艺有一定的相似度，通常采用模块化的方式生产。由于成批生产的工作地专业化程度和生产连续性都比大量生产低，这导致成批生产方式不能完全采用加工流水线的方式组织产品制造。

单件生产与大量生产和成批生产不同，其是完全按照客户的订单来组织产品的设计和制造的。由于单件生产的产品品种多、不稳定，因而加工设备通常按工艺原则或机群式布置，生产流程迂回展开。产品的单件生产周期长，需要对产品的实际成套性进行监控，以保证产品及时交付客户。

多品种小批量生产方式介于单件生产和成批生产之间，因此其同时具备了两种生产方式的一些特点。多品种、小批量生产，以订单为主来组织生产，带有通用件及标准件按预测库存生产，质量要求高，控制过程严格，要求准时供货，生产的复杂性，外界条件的不确定性，生产管理的动态性，生产进度控制困难。

②按生产订单，可分为按订单设计、按订单生产、按订单装配、按库存生产，如下表所示。

表 2.2 订单分类方式的 MES 功能差异

Table 2.2 Orders classification functional differences of MES

订单类型 比较项目	按库存生产	按订单装配	按订单生产	按订单设计
人员管理	简单		复杂	
设备管理	专用		通用	
物料管理	固定物料		全面管理	
工艺管理	固定工艺		复杂工艺	
生产计划	计划可靠		无法预测	
生产调度	工单调度		工票调度	
生产监控	过程监控		设备监控	

不同订单生产方式会导致 MES 系统的功能差异。

③按生产控制，可分为推式和拉式，推式以生产计划为核心，从上游下达详细工作指令，车间人员需严格执行，当前我国大多企业采用推式生产，而拉式以生产控制为核心，通过从下游下达约束性或指导性的控制指标，由现场工人通过

相互协调完成生产任务，拉式生产以 JIT 为代表。

不同生产方式的企业对 MES 的需求差别较大，同种生产方式的企业对 MES 的需求则基本相似。大多企业的生产方式不会轻易改变，一旦改变则需要对 MES 进行大规模重构。

产品生产批量不同主要影响与 MES 产品和物料批量相关的功能模块，如对于大规模生产方式，MES 更关注原材料的准备和投料策略的制定，以便降低生产成本；对于批量生产，批量大小的决策和投料调度成为 MES 的关键。

推式生产的 MES 更关注生产计划在车间层的调度问题，着重生产工单和工步级排程执行的生产流程管理功能，推式生产在机加工车间应用比较多；而拉式生产的 MES 更强调根据生产现场情况进行合理响应，着重基于电子看板的实时事件驱动的生产节拍流程管理功能，其在装配车间应用比较普遍，不同的拉式生产，其反应工作流程、控制目标可能不同，需要根据实际的情况制定相应的 MES 解决方案。

在制造企业的生产运行中，大部分企业都采用一种生产方式为主、多种生产方式并存，或多种生产方式并重灵活地执行生产，一方面是因为有些生产方式存在交集，可相辅相成，另一方面则是企业为了快速响应市场变化而准备多种生产策略。

不同的生产方式有不同的业务处理流程和不同的业务关注点，而开发的典型的 MES 系统必然无法满足所有生产方式的管理需求，同时也不可能针对企业的每种生产方式部署一套专用的 MES 系统，复杂的混合生产方式对 MES 的重构能力提出了迫切的需求和挑战，因此要求 MES 系统必须能够在典型业务模块的支持下根据车间不同的生产方式动态提供不同的业务处理实现方法，从业务处理模块和业务处理方法的角度对 MES 系统进行动态重构，实现基于一套 MES 系统的多种生产方式管理。

### 2.2.3 车间业务集成带来的重构需求

MES 系统不是孤立存在的，企业内外存在大量的信息化系统，不同系统间存在业务间的协作，因此需要 MES 系统参与到系统间的集成。由于企业业务的动态变化，导致 MES 系统与其它系统间的集成关系难以固定，从而带来系统间集成关系的重构。MES 系统与其它信息化系统的集成需求如图 2.3 所示。

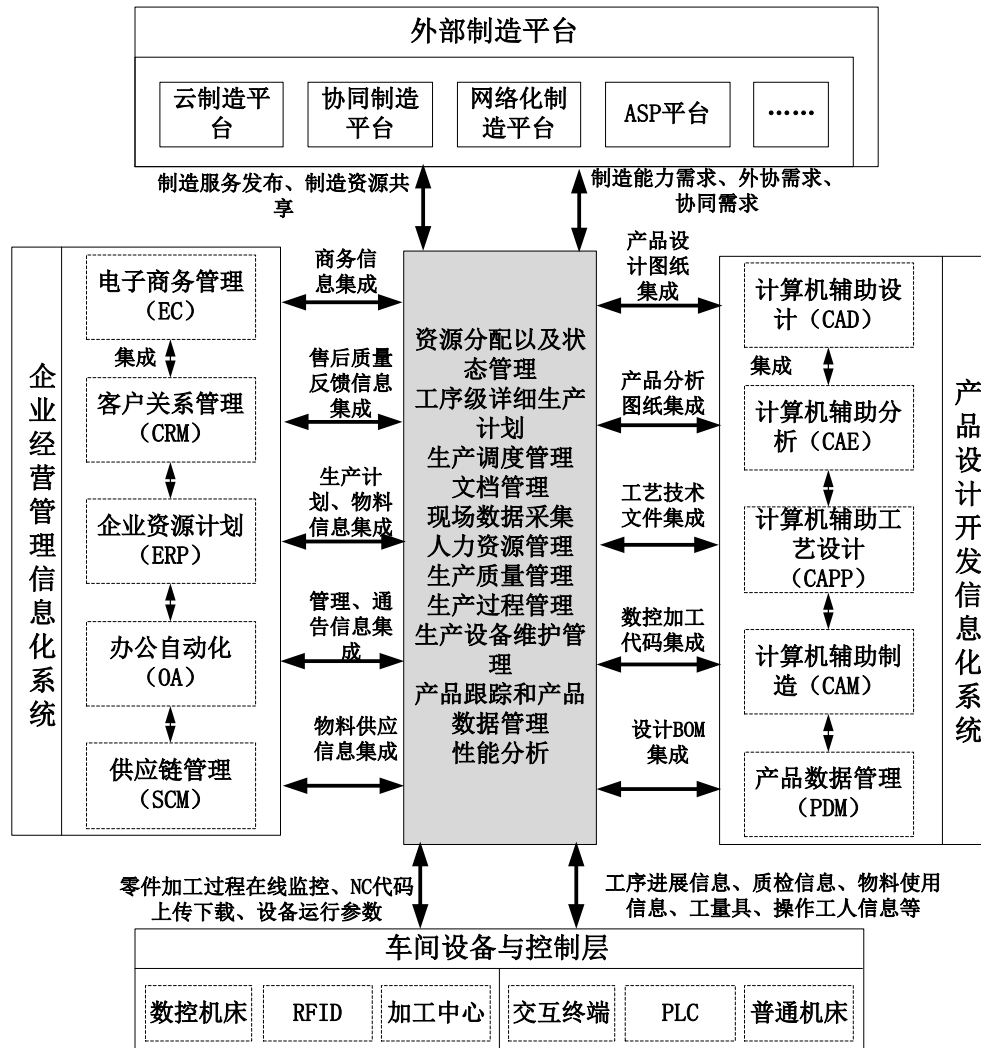


图 2.3 MES 系统集成需求

Fig.2.3 System integration needs of MES

MES系统的集成需求主要分为四类，分别是与经营管理信息化系统的集成需求，与产品设计开发信息化系统的集成需求，与车间设备控制层集成需求和与外部制造平台的集成需求。

MES系统与经营管理信息化系统的集成，能够纵向上支持管理基础数据、业务数据和关键制造流程的一体化集成运行，使企业从经营管理到车间制造摆脱手工纸质业务记录（各种帐表）、业务管理和信息传递，达到降低成本、提高运营管理效率的目的。

MES系统与产品开发信息化系统的集成，能够纵向上支持多样产品设计与制造各环节的数据共享和业务协同，使企业从研发设计到车间制造摆脱手工纸质业

务管理和信息传递（设计图纸和工艺技术文件等），实现车间制造生产无纸化，从而增强产品设计制造能力。

MES 系统与车间设备控制层的集成，能够支持产品加工过程在线监控、NC 代码上传下载、设备运行监测，以及基于多功能交互式信息终端的生产进度信息、质检信息、物料信息和工人信息等的制造过程信息交互。

MES 系统与外部制造平台的集成，能够支持 MES 系统全程深入参与到产业链中去，实现企业空闲制造能力的有效利用，提高企业对外部客户需求的响应速度，满足跨企业的业务协同需求，增大企业在市场竞争中的优势。

随着企业信息化的发展和外部环境的变化，MES 系统一方面要维持与已有信息化系统的集成关系，另一方面还必须具有灵活应对未知集成需求的能力，从而需要 MES 系统的集成实现能够进行动态调整重构，满足异构系统间松耦合的信息集成和服务集成需求，同时维护集成中异构系统间的语义稳定，实现基于语义的集成，这就要求 MES 系统具有灵活的集成重构能力。

#### 2.2.4 制造环境变化带来的重构需求

随着时代的发展，各种新兴的信息技术、制造设备、制造模式等层出不穷，为了能够适应制造环境的变化，MES 系统必须具有重构能力，以便利用先进的生产工具和生产理念提高企业的制造能力。

##### ①信息技术发展。

信息技术是 MES 系统运行的核心基础，信息技术的变化对 MES 系统的运行有着重要的影响，比如并行计算技术、多核处理器等信息技术的发展为 MES 系统带来更高的数据处理能力和更多可用计算能力，从而要求 MES 能够通过系统重构充分利用信息技术发展带来的优势，对如在数据实时分析、车间调度算法等进行动态升级，这要求 MES 系统能够为特定的业务处理方法提供实现重构，满足信息技术进步时相关业务实现方法升级的需求。

##### ②制造设备升级。

车间制造设备层与 MES 系统间存在集成需求，当车间设备进行技术更新时要求 MES 系统能够继续实现设备层的集成，当原有的设备集成实现无法满足时，必然对 MES 系统负责实现设备层集成的模块提出新的需求，从而要求 MES 系统能够进行相关集成模块的重构满足新的集成需求，同时针对未来如新型数控机床等未知设备，MES 系统必须提供充分的重构机制支持与它们的集成。

##### ③制造模式变化。

随着云制造、绿色制造、协同制造、网络化制造等各种制造模式的兴起发展，作为企业负责车间生产制造的具体执行系统，MES 系统必然需要作为不可缺少的一员参与到体系内部，从而带来 MES 系统的业务逻辑和集成重构需求。如云制造

要求 MES 系统按云标准发布和集成制造能力, 要求 MES 的集成关系进行重构, 绿色制造要求 MES 系统全面监控生产过程中的能源消耗、污染排放等数据, 要求对 MES 系统的业务实体和业务处理逻辑进行重构, 这些都对 MES 系统的重构提出了新要求, 要求 MES 的体系结构能够灵活支持各种业务能力的动态扩展和配置, 实现 MES 系统的重构。

## 2.3 离散制造执行系统的重构内容

可重构的内容体系指进行 MES 重构的具体途径和形式, MES 重构主要从系统界面、系统业务、系统集成和系统语义等四大方面展开, 其中系统界面和系统语义的重构伴随系统业务和系统集成的重构同步进行, 如图 2.4 所示。

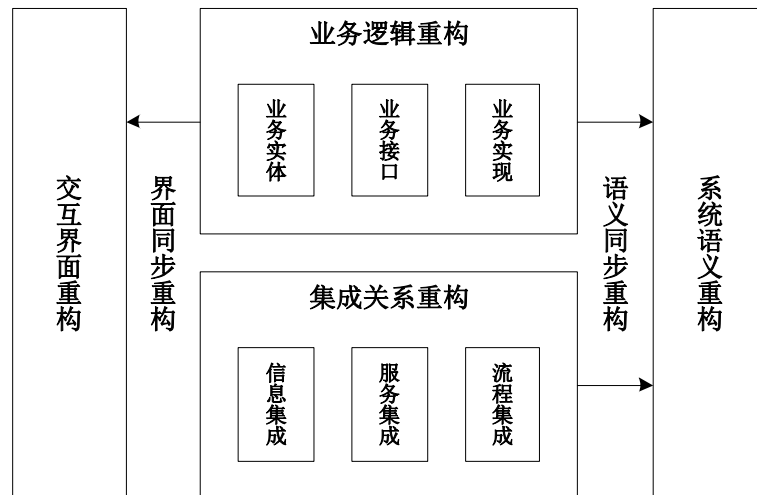


图 2.4 MES 的重构内容与重构关系

Fig.2.4 The reconfiguration context and relationship of MES

### 2.3.1 离散制造执行系统交互界面重构

交互界面是 MES 与用户进行人机交互的接口, 交互界面一方面为用户提供数据信息输入与方法执行界面, 另一方面为用户提供数据信息展示界面。

#### ①用户语言重构。

针对 MES 系统国际化需求, MES 系统必须能够面向不同的用户母语重构出不同的语言版本, 支持用户的多元化。比如能够实现 MES 在中文和英文间进行运行时切换。

#### ②输入控件重构。

针对不同的输入数据类型, MES 能够提供不同的控件支持用户的数据录入, 同时又方便进行控件切换。

#### ③输出控件重构。

能够根据用户数据展示需求调整数据输出格式，实现数据多种形式展示，辅助用户对数据进行高效分析处理。

#### ④数据格式重构。

根据用户需求按不同的格式化条件对数据进行格式化处理，使数据的表达更加符合用户习惯。

#### ⑤界面风格重构。

针对用户需求提供多种界面风格，支持运行时动态重构 UI 界面布局和配色等内容。

#### ⑥方法调用重构。

为 MES 系统的业务方法提供用户执行界面，使用户能够通过界面执行业务逻辑实现方法。

#### ⑦业务界面重构。

根据业务对象的数据信息，动态重构业务信息展示界面，实现不同业务数据与用户界面的优化展示。比如当用户对业务对象的某些属性访问权限不足时，能够自动进行对象属性屏蔽，从而不在界面展示或进行属性的提示处理。

#### ⑧用户习惯重构。

根据用户习惯为每个用户提供不同的用户界面，实现用户界面的个性化，提高 MES 系统与用户交互的效率。

用户界面与 MES 系统的业务逻辑具有紧密的相关性，因此用户界面的重构大多与业务逻辑的重构同步进行。

### 2.3.2 离散制造执行系统业务逻辑重构

业务逻辑是 MES 系统内部运行的核心部分，业务逻辑是车间制造过程在 MES 系统中的信息化实现，因此业务逻辑的重构必然根据车间业务发展需求而产生，业务逻辑重构由业务实体重构、业务接口重构、业务实现重构三部分组成。

#### ①业务实体重构。

业务实体由多个业务属性组成，业务实体的重构则由实体结构重构和业务属性重构组成，实体结构重构主要指为业务实体增加属性、修改属性和删除属性，同时根据业务属性间的组合关系定义业务实体的业务规则逻辑，并为业务实体配置相应的用户界面。

业务属性的重构则由属性的交互界面重构、属性的数据类型重构和属性的业务校验规则重构等组成。交互界面由输入输出控件、编辑显示格式、条件显示格式、界面布局等组成，负责实现与用户的交互。数据类型重构由业务属性在 MES 系统中的数据类型和映射的数据库数据类型重构组成，负责实现数据的存储处理。业务规则重构则负责按业务需求动态配置属性的输入数据预处理规则，保证用户

输入的数据符合业务规范，减少业务数据间的冲突。

### ②业务接口重构。

业务接口定义了 MES 系统的业务处理需求，而业务实体保存了 MES 系统的业务状态数据，业务实现则为业务需求提供了具体功能实现。业务接口重构指动态在业务实体、业务接口和业务实现间建立依赖关系，消除业务实体与业务实现间的紧耦合关系，通过对它们之间依赖关系的配置实现接口重构。接口重构主要业务实体动态替换和业务实现的动态替换组成，同时它还负责为 MES 系统新的业务需求提供发布接口，通过增加接口方法和为方法指定具体实现满足 MES 的业务重构。

### ③业务实现重构。

业务实现是业务接口的具体实现者，业务实现重构主要基于业务实现组件提供的业务处理方法，MES 用户通过对业务方法的配置为业务方法增加业务处理逻辑，由运行平台通过动态代理实现对方法调用的动态拦截，从而实现业务处理方法的增强或替换，满足业务实现的重构需求。业务实现重构为 MES 系统的重构提供了丰富的业务逻辑处理来源，使 MES 系统能够灵活根据业务需求选择不同的业务具体实现。

## 2.3.3 离散制造执行系统集成关系重构

作为企业的生产制造执行系统，MES 与经营管理信息化系统和产品设计开发信息化系统间存在密切的业务联系，同时企业作为整个产业链上一员，要求 MES 系统还必须具有与企业外部系统进行业务协同的能力，因此 MES 与不同系统间的集成重构具有显著的意义。

### ①信息集成重构。

信息集成指 MES 系统与其它信息化系统间的数据库层集成。当前制造企业所采用的制造信息系统普遍采用关系数据库存储各种制造数据，制造信息系统通过访问数据库中的业务表和数据字段来对各项业务数据记录进行 CRUD 操作，因此制造信息系统间的信息集成最终会体现在关系数据库间的数据集成上。同时数据库的模式结构和信息系统实现代码在系统开发时就会被确定，因此制造信息系统与其对应数据库的模式结构具有紧密的耦合性，难以进行灵活调整来满足日益复杂的异构制造系统间信息集成需求，MES 系统的信息集成重构则针对这种现状实现制造信息间的动态松耦集成，满足系统间的信息集成需求。

### ②服务集成重构。

服务集成指 MES 系统与其它信息化系统间功能服务层的集成。由于信息化系统采用静态语言开发，服务间的调用具有严格的语法约束，而 MES 与不同系统服务间的调用过程实现代码被耦合进系统中，导致服务间集成关系的固化，同时系



统间对参数的概念缺乏统一的标准，导致接口参数间还存在语义异构，针对这种情况，MES 的服务集成重构实现系统间服务集成的解耦合，满足服务接口的重构、输入输出参数的重构和服务实现的重构，实现服务间集成关系的稳定，提高服务集成质量。

### 2.3.4 离散制造执行系统系统语义重构

企业的 MES 系统与其它信息系统一般由不同的服务商提供，由于目前信息系统间对信息结构及其交互方式缺乏统一的标准，因此服务商们大多基于自身的业务知识来实现和实施各自的信息系统。服务商们对企业业务模型理解的差异，导致 MES 系统与其它系统在业务实体结构与业务逻辑关系上产生语义异构。

同时当前信息系统间大多采用组件技术和服务技术实现集成，这种集成方式需要接口间语法的严格匹配，从而要求它们提供的接口契约保持长期稳定。当 MES 系统顺应企业业务变化进行重构时，必然涉及到 MES 系统业务模型的调整，这种调整又会具体表现在业务实体与业务逻辑上，进而影响到 MES 系统与其它信息系统间的集成关系。

因此保持 MES 系统业务重构前后语义的稳定、以更灵活的松耦合方式实现系统间的集成对减少 MES 系统重构的复杂度具有重要的意义，而这这就要求制造执行系统除了必须具备传统的可重构能力外，还必须从语义上具有可重构能力和基于语义集成的可重构能力，从而维持 MES 系统重构前后的语义稳定。

MES 系统语义的重构与业务逻辑和系统集成重构同步进行，在语义网关的支持下，MES 用户在重构 MES 系统时同时也重构了 MES 系统语义。

## 2.4 离散制造执行系统的重构目标

MES 系统的重构是为了满足复杂条件下企业车间生产管理的动态需求，为了保证重构的顺利进行，达到预期的重构效果，有必要制定系统重构的目标准则。文献<sup>[112]</sup>提出了模块化(Modularity)、集成化(Integrability)、可转换(Convertibility)、自诊断(Diagnosability)、可定制(Customization)等系统重构目标特征，文献<sup>[113]</sup>将制造系统重构成本最小作为重构目标。结合前述文献的研究，本文在语义网关的基础上借鉴美国麻省理工学院 Chryssolouris 教授提出的制造决策属性中的 TQCF 四面体模型，提出了六维的 MES 系统的重构目标，如图 2.5 所示。

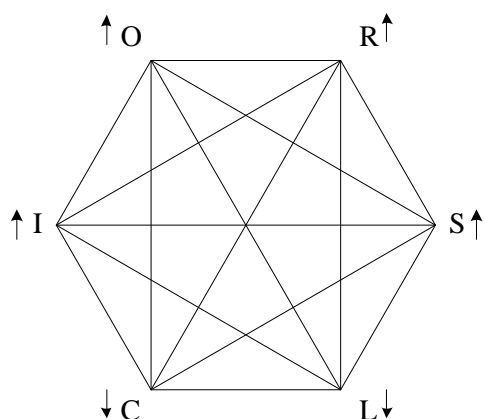


图 2.5 六维 MES 系统的重构目标

Fig.2.5 Six-dimensional reconfiguration targets of MES

以上六维目标的具体描述为：

①开放性（Open, O）

MES 重构的系统具有开放的体系结构，支持当前 MES 系统的国际标准和集成互操作标准，如按 Web 服务规范提供集成服务，外部系统能够通过 MES 系统提供的集成接口方便访问 MES 提供的各种制造资源，同时 MES 系统能够支持调用外部异构的服务，支持 MES 系统功能模块按业务需求动态增减，其它用户按照可重构 MES 标准开发的各种功能模块能够自由加入原有的 MES 系统。

②重用性（Reuse, R）

MES 系统可重构的功能模块应具有重用性，开发人员设计的 MES 功能组件支持 MES 系统按需装配，一方面满足 MES 系统不同时期的业务重构需求，另一方面满足不同企业 MES 系统的组件共享需求，从而提高 MES 系统重构速度，减低重构成本，不断积累面向不同业务环境的共享业务组件，实现业务处理知识的跨企业共享。

③语义性（Semantic, S）

MES 系统重构必须保持系统语义的前后一致，由于 MES 系统的功能模块具有可替换性，模块的实现可由多方提供，因此必须采用统一的语义标准来为 MES 系统内部业务处理定义业务语义，同时还必须从信息语义和服务语义两方面满足跨系统集成重构中的语义稳定，从而使 MES 系统的重构对异构系统间的集成关系影响降到最低，减少 MES 重构中带来的系统间集成复杂度。

④松耦合（Loose Couple, L）

MES 系统重构中涉及的功能模块必须实现解耦合，确保模块间的组合关系依赖于接口而不是依赖于实现，同时异构系统间的集成实现代码必须从 MES 系统的静态代码中剥离，实现系统间松耦合的集成，并通过外部配置系统为数据层、业

务层和界面层建立动态关联关系。

⑤低成本（Cost, C）

MES 的重构过程必须是 MES 系统用户可理解、可管理和可控制的，普通用户通过合格培训后能够理解重构的原理和实现过程，在没有专业技术人员参与下 MES 用户能够随时动态调整 MES 系统的重构实现，无需进行二次开发，从而实现重构的低成本，同时 MES 系统的学习、运行和维护成本必须在企业可接受的成本范围内。

⑥集成性（Integration, I）

重构的 MES 系统内部模块必须满足 MES 系统的集成运行需求，通过各个功能模块间松耦合集成运行，共同高效地实现车间的业务流程处理，同时支持跨系统的制造业务集成，满足企业内外的集成需求。

## 2.5 支持离散制造执行系统可重构的语义网关研究

### 2.5.1 语义网关的体系结构

语义网关通过系统间的语义映射实现信息在系统间理解和转换；通过语义自我更新，实现系统间语义的动态映射；通过信息在网关中的传输和路由，实现网关间系统的解耦合。

语义网关的体系结构主要由 6 个层次组成，如图 2.6 所示：

使能工具
语义发布更新机制
语义路由机制
语义解析
语义映射标准
语义描述标准

图 2.6 语义网关的体系结构

Fig.2.6 The Architecture of Semantic Gateway

①语义描述标准。由于各种异构的信息系统对信息的描述没有统一的标准，会导致在异构系统集成中，由于不同数据格式的存在使系统之间对信息的理解不一致。为此，通过语义网关对系统需要集成的信息进行统一的语义描述，使系统对彼此需要交互的信息有一致的语义理解，从而解决数据的不兼容以及适应不同

的应用系统之间进行信息交换的需要。

对于一个整体的制造系统（如一个企业的 ERP、PDM、SCM 系统等）而言，需要集成的信息必须建立一套统一的语义描述标准。由于语义涉及的范围太广，除了可以建立社会统一的语义描述外，更多的可能是一个制造系统建立其内部的统一的语义描述，因此不同的制造系统可能会有自身的语义描述。

②语义映射标准。在统一的语义描述标准的基础上，通过语义的映射技术，建立各种不同应用系统中的集成信息与语义描述之间的对应连接关系，使异构系统的信息方便的转换为标准的语义描述。

语义的映射主要分为两个方面：一是由于不同的制造系统中可能具有自身的语义描述，必须解决不同制造系统语义描述标准的映射。二是在同样的制造系统中具有统一的语义描述标准，但是具体的如 ERP、PDM 等应用系统中由于开发商的不同，存在语义描述的歧义，因此还必须解决制造系统内部统一语义描述和具体应用系统中的语义映射。

③语义解析。利用语义网关的语义解析机制对经过语义网关进行集成的消息、信息进行解析，使各种异构系统之间能够正确理解语义，从而进行正确的集成活动。

④语义路由机制。由于一个制造系统（例如一个企业的信息系统）具有自己的语义网关，如何有效利用该网关与其它多个具有语义网关的制造系统进行集成，因此采用类似路由器技术建立语义路由机制，在语义网关中建立各种网关的列表和之间的连接路由关系，使需要集成的多个语义网关之间能够快速连接。

⑤语义发布更新机制。由于制造系统在集成过程中信息的变化较大，造成语义的描述一直在不断变化，包括根据集成需求，需要描述的语义不断增加，或者对语义的描述由于系统的变换而发生的可能变化，这种语义描述的变化对语义映射机制的影响非常大，因为语义映射不仅存在于本地的语义网关中，而且还存在于与之集成的其它语义网关中，因此建立语义发布更新机制将会有效对所有语义网关中的映射关系进行同步。

⑥使能工具。在语义网关的构建中涉及的使能工具研究，包括语义网关语义软件系统、语义网关集成建模工具等。

## 2.5.2 基于语义网关的异构系统集成框架

随着制造业信息化单元技术的不断成熟和深入实施，制造企业的应用系统越来越多，覆盖面越来越广，同时由于制造业信息化分期实施的特点，造成制造企业信息系统的异构程度加深，使企业目前普遍面临系统之间的集成问题。另外，由于企业不断的发展，要求信息系统能够快速适应企业业务的变化，使得制造企业对系统的快速重构以及灵活集成提出了更高的要求。

因此，为了对企业存在的大量分布、异构甚至是未知应用服务系统进行集成，本论文建立了一种基于语义网关的异构系统集成模型，包括独立于各种应用服务系统的集成框架，和一套与集成框架相适应的异构系统集成运行模式，实现对不同企业异构应用系统的运行管理和集成。

在将语义网关引入集成框架后，形成的企业异构系统集成框架模型如图 2.7 所示。

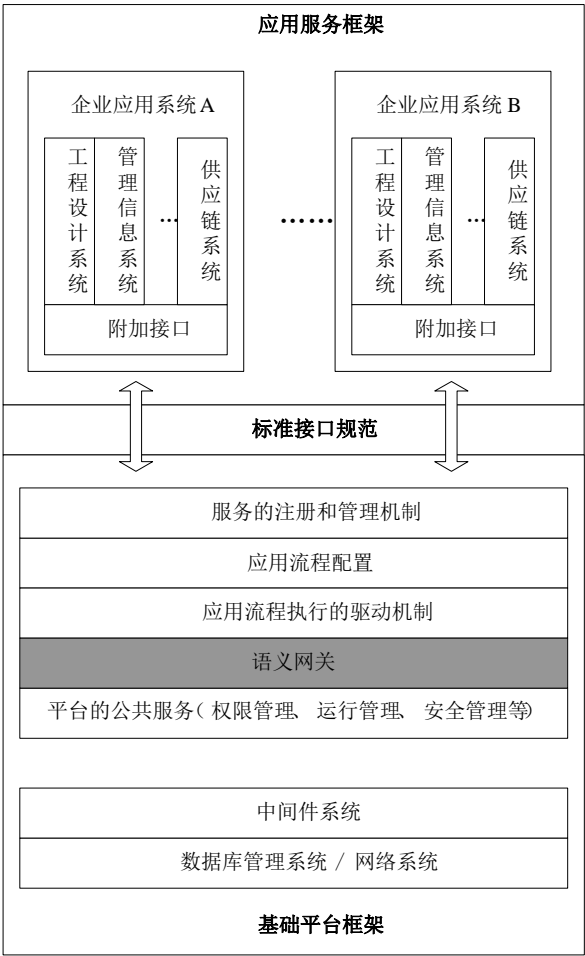


图 2.7 基于语义网关的企业异构系统集成框架模型

Fig.2.7 The Enterprise Integration Framework Model for Heterogeneous Systems Based on Semantic Gateway

①基础平台框架

由于集成框架寻求一种独立于应用服务系统的架构，希望将应用服务系统集成的影响降至最低，基础平台框架是整个集成框架的核心和重点，它主要负责应用服务系统的管理、驱动和集成。整个基础平台框架模型如图 2.8 所示，从上至下由七个层面的内容构成：

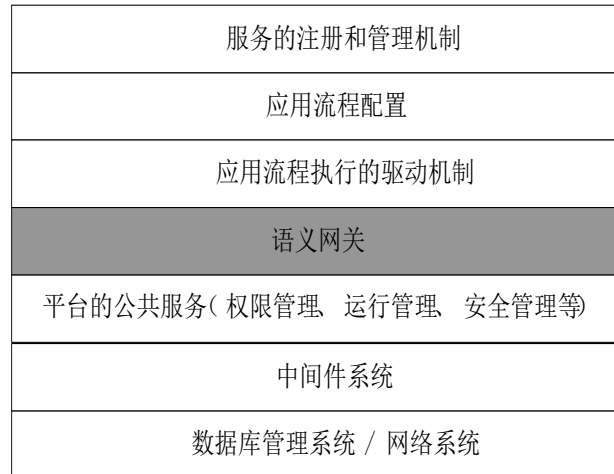


图 2.8 基础平台框架

Fig.2.8 Basic platform framework

#### 1) 服务的注册和管理机制

该机制将位于本地和异地的各种服务系统进行逻辑上统一的管理和应用。根据应用服务系统分布部署的位置差别，主要分为三种不同的处理方式：

第一种：应用服务系统位于本地，包括各种应用服务系统部署在与网络化制造平台相通的局域网络内部，考虑到运算速度，数据解析和应用服务系统调用的效率，可以采用 CORBA 或 COM+ 技术进行注册和管理；

第二种：分布在异地的应用服务系统，必须通过 Internet 进行管理。在已知应用服务系统部署位置的情况下，基础框架负责采用 Web Services 技术通过 WSDL 接口描述对应用服务系统进行注册，并且采用 SOAP 方式进行直接管理和调用；

第三种：分布在异地的应用服务系统，如果不清楚其部署的情况下，采用 Web Services 的 UDDI 和 SOAP 技术联合进行注册和管理。

#### 2) 应用流程配置

通过基础平台框架注册和管理的应用服务系统是独立的、离散的，但是由于企业专业化分工越来越明显，企业需要一系列的应用服务系统共同协同来完成某项制造活动，因此，制造企业需要将注册的各种应用服务系统根据企业某项合同的要求进行动态、合理的配置，进行商务活动，满足企业对网络化制造的需求。通过应用流程的配置，同时可以描述离散的应用服务系统进行集成的过程。

#### 3) 应用流程执行的驱动机制

应用流程的驱动机制用于驱动企业按照预先根据流程配置完成的流程进行商务活动。即根据企业商务过程的需求，动态地组织分布在本地或异地的应用服务系统，按照企业流程的配置进行合理地驱动。

#### 4) 公共服务

基础框架的公共服务主要为各种应用服务系统的顺利运行提供基础、共性的服务支持。例如权限管理服务，用于根据不同的企业在不同的项目合作中具有的不同权限；消息管理服务，用于建立企业在集成过程中信息传递系统，方便企业在合作中的信息传递的有效性等。

#### 5) 语义网关

语义网关主要用于解决应用系统间业务数据格式、结构上的异构问题。利用语义网关对异构系统的集成信息进行统一表达和解析，规范接口的内容表达，使各种应用系统对集成信息能够正确理解，从而增强异构系统集成的柔性和透明度，促进网络化制造环境下制造企业信息系统的快速、灵活实施、更新和集成。

#### 6) 中间件系统

中间件系统采用了目前大量商用的产品，例如 WebLogic、Websphere、Tomcat、Jboss 等。它位于整个基础平台框架的底层，主要作为应用服务系统实际具体部署的管理工具，用于应用服务系统具体的事务管理、消息管理等，即中间件系统是所有具体的应用服务的部署容器。在中间件层中，还涉及到具体应用服务系统的运行管理，各种异构系统之间的交互等。例如，首先可以在异构系统之间通过 WEB Services 的方式对应用服务系统进行跨平台的直接调用，或者采用桥接的方式对 J2EE 环境和 MS 环境中不同应用服务系统之间的调用等。

#### 7) 数据库管理系统和网络系统

该层的系统为基础平台框架的运行提供基础条件，根据集成框架的要求，支持分布式的数据库管理系统，以及支持服务之间通过局域网络、宽带网络、专用网络等多种网络方式进行访问。

### ②服务平台框架

服务平台框架容纳各种企业应用服务系统，支持本地或者分布在异地的应用服务系统运行。由于集成框架定义为与具体应用服务系统的无关性，同时考虑到面向对象技术的不断成熟发展，二进制兼容的开发体系日益完善，因此集成框架对应用服务系统本身的功能开发和实现没有特定要求，即二者之间是松耦合的关系。只要符合平台标准和协议的应用服务系统都能够通过应用服务平台进行部署，然后通过基础平台框架进行应用和集成。

服务平台框架模型如图 2.9 所示，它由一系列的中间件系统、语义描述规范、统一的服务接口转化等组成。首先，应用服务平台框架根据语义网关中对语义描述规范和接口转换工具对具体的企业应用系统接口转换，使企业的应用服务系统具有符合语义网关的要求。然后，将符合其通过中间件系统部署到容器中。最后通过基础平台的框架对服务进行注册投入运行。

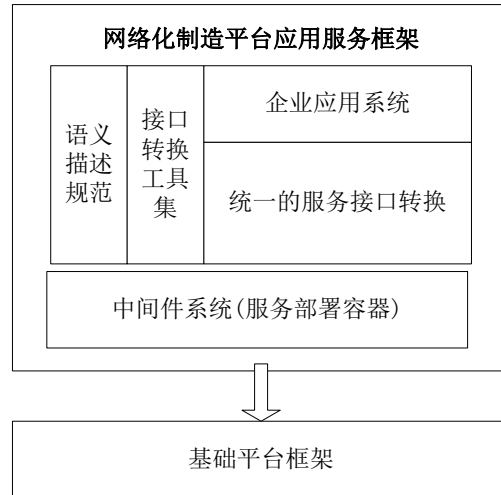


图 2.9 服务平台框架

Fig.2.9 Service platform framework

在服务平台框架模型中，根据松耦合的原则，可以采用任何的开发工具完成应用服务系统的功能开发，然后在符合语义网关的要求进行接口转换后部署到相应的中间件系统（这里的中间件系统与基础平台框架中的中间件系统是一致的），最后通过注册纳入到基础平台框架中统一进行管理和应用。

### 2.5.3 基于语义网关的异构系统集成运行模式

从大的层面来说，企业异构系统的集成分为信息集成、服务和流程集成两种集成模式，将语义网关引入到异构系统集成中，形成的基于语义网关的异构系统集成运行模式分别如图 2.10 和图 2.11 所示。

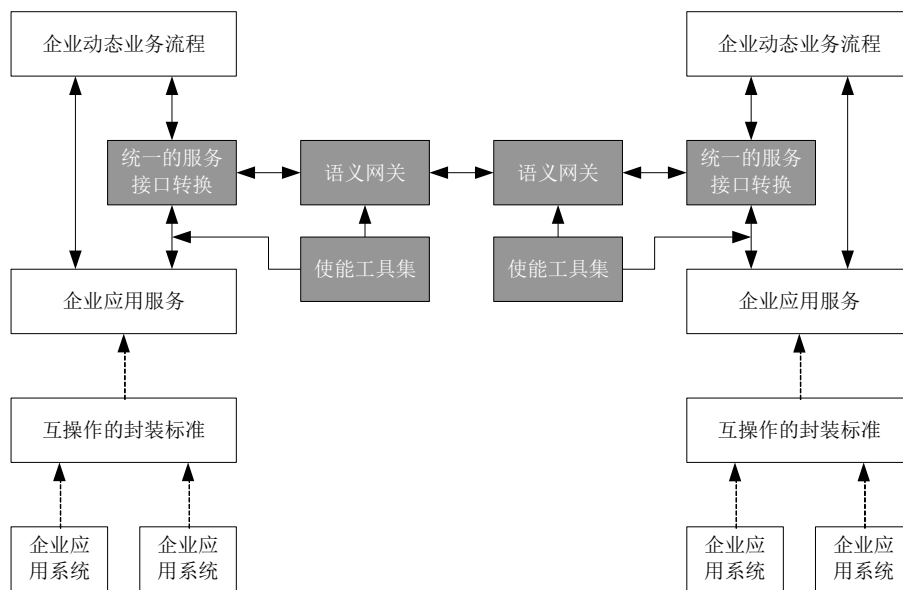


图 2.10 基于语义网关的异构系统集成运行模式（1）

Fig.2.10 Integration mode of heterogeneous system based on semantic gateway（1）



### ①服务和流程集成

首先,企业的应用系统可以按照 SOA 的思路进行改进,在国际有关互操作封装标准的基础上建立企业的应用服务,定义完成各种服务的接口。然后将这些服务在中间件系统中进行部署。然后,如果按照目前的 SOA 架构,企业通过消息总线按照企业的业务过程将部署好的企业服务重新组合起来,一般来说再通过 BPEL 等手段对服务进行调用,从而构建完成企业的系统。

然而,在这个过程中对服务的调用必须要清楚服务的接口定义,而且一般来说会通过一定的二次开发过程来解决。考虑到如果企业的业务发生变化,可能会造成服务的接口发生变化,这样会涉及到信息系统源代码级别的调整,会对整个集成产生较大障碍。并且如果构建的企业系统要和其他企业的信息进行集成的时候,必须将服务的接口完全通知其他企业,才能做到较好的集成,这样其实加大了企业之间系统集成的难度。

因此,我们引入语义网关技术。首先建立企业的语义网关,包括企业系统的语义描述、语义映射标准、语义解析工具等;然后在部署完成应用服务后,将服务接口进行转换,形成一个与服务无关的、统一的接口。

由于转换后的接口具备了服务的无关性,而原来接口的内容则通过语义网关进行表达和解析。这样由于对语义进行了定义,并且对接口进行了转换,企业的动态流程则通过这样的统一接口对转换服务进行调用,而转换服务再根据语义网关进行实际服务的调用。这样,屏蔽了异构系统之间由于语义不一致产生的集成困难。

同样,正是由于引入了语义网关,企业之间的集成也不再存在前面的问题。因为虽然企业的业务发生变化,造成服务的接口也发生变化,但是由于对接口进行了转换,服务对集成几乎没有影响,而是通过语义网关的配置调整和对转换服务的修改进行适应的,大大加强了企业内部、企业之间的各种异构系统集成的灵活性,使集成变得快速,并且适应性大大提高。

### ②信息集成

从国内集成技术的实际应用情况来看,其主要集成方式是各种应用系统之间进行点对点的互相数据库级别的操作,这种操作一般是在信息系统的源代码中写入相互的数据库操作语句来达到目的,然而这种方式会产生两个比较大的问题,一是企业存在  $N$  个系统,则每个系统都会与其他  $N-1$  个系统进行源代码级别的二次开发,工作量非常大,并且一旦企业实施了新的信息系统后,原来的每个系统又会继续开发与新系统的集成,造成信息系统一直不断在进行二次开发,为企业带来较大的负担。二是,一旦企业不断的发展,技术和管理模式都可能发生不断的变化,必然会要求信息系统不断升级来满足这种变化,这样就又会对系统中

关集成的部分进行更新。

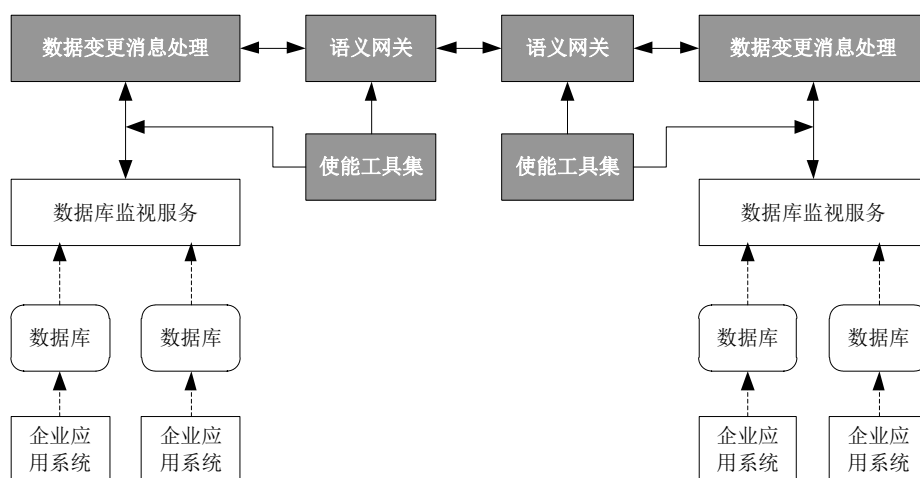


图 2.11 基于语义网关的异构系统集成运行模式 (2)

Fig.2.11 Integration mode of heterogeneous system based on semantic gateway (2)

引入语义网关技术后，基于语义网关的异构系统集成运行模式如下。

首先，构建企业的语义网关，包括企业系统的语义描述、语义映射标准、语义解析工具等；其次，在现有企业应用系统的数据库上建立数据库监视服务，监视数据库的数据变动，并获取发生变动的数据，将数据交由语义网关进行处理。

这种模式下，对每一个企业应用系统对应的数据库，都需要封装一层数据库监视服务，为了给数据库监视服务和企业语义网关之间进行解耦，在两者之间建立统一接口转换，将数据库服务的接口转化为统一的、服务无关的接口。

为了方便语义网关的建立和部署，可以开发一系列使能工具，如语义定义和映射工具，通过使能工具抓取数据库语义，定义语义描述标准，建立数据库语义和标准语义以及语义网关之间的语义映射。

引入语义网关技术后，企业应用系统间的信息集成，不再是通过修改源代码操作数据库来实现，而且数据库发生变更后，可以快速修改语义网关的语义映射来快速适应变更，从而实现企业异构系统快速、灵活的信息集成。

#### 2.5.4 基于语义网关的语义映射方法

##### ①信息的形式化定义

从信息组成的角度，信息在制造企业信息化系统中可视为名值对的集合。基于信息的这种特点，将一个概念和一个数据组成的名值对称为原子信息(Atomic Information,  $i$ )，

$$i := (\text{concept}, \text{data}),$$

其对应的概念称为原子概念(Atomic Concept,  $c$ )，对应的数据称为原子数据

(Atomic Data,  $d$ ), 对应的语义称为原子语义(Atomic Semantic,  $s$ )。原子信息是不可分割的, 在源信息系统中它也是原子语义, 即原子语义由原子信息的概念和数据组成,

$$s := (c, d),$$

同时也表示数据  $d$  的语义依赖于概念  $c$  的语义。因此, 信息可以视为原子信息的集合, 信息包含的语义可以视为原子语义的集合。要实现信息在不同系统间的语义集成, 就是要将信息包含的原子信息在原子语义的指导下在不同系统间进行转换, 从而成为目标系统可理解的信息, 实现语义集成。

定义 1: 语义网关中的语义(Semantic Gateway,  $SG$ )为 5 元组,

$$SG := (AS, ES, PS, M_{EA}, M_{EP}),$$

其中  $AS$  为企业信息系统语义(application semantic,  $as$ )的集合,  $ES$  为企业语义网关语义(enterprise semantic,  $es$ )的集合,  $PS$  为外部语义网关的语义(public semantic,  $ps$ )的集合, 并且

$$es := (ec, ed), ps := (pc, pd)。$$

$M_{EA} := ES \xrightarrow{\quad} AS$ , 为企业语义网关与企业信息系统的语义映射关系  $m_{ea}$  集合, 如果  $(es, as) \in M_{EA}$ , 则表示  $es$  和  $as$  间存在语义映射;

$M_{EP} := ES \xrightarrow{\quad} PS$ , 为企业语义网关与外部语义网关的映射关系  $m_{ep}$  集合, 如果  $(es, ps) \in M_{EP}$ , 则表示  $es$  和  $ps$  间存在语义映射。

由于语义包含概念和数据两个部分, 故语义映射由两部分组成, 首先是概念间的语义映射, 其次是数据间的语义映射。

概念间的映射关系分为两种:

1) 概念间存在可计算的映射函数, 概念所对应的数据可以由语义网关通过映射函数自动计算得出, 无需在指定数据间的映射关系。

2) 概念间不存在可计算的映射函数, 因此还必须在数据间指定映射关系。数据间的映射关系只有一种, 就是数据间的语义等价关系, 通过指定数据的等价语义来建立数据映射关系。

## ②语义映射的实现方法

为了从语义的角度实现信息在不同系统间的集成, 基于上文对信息及其语义信息的形式化定义, 语义网关提出并实现了一种语义映射机制, 其语义映射关系如图所示。信息的语义来自于它所对应的应用系统, 为了实现企业内部系统间的语义交换, 必须将其语义从应用系统转换为一种中间语义——企业私有语义, 从而通过企业语义网关将源系统信息的语义转换为目标应用系统的语义, 实现企业内部的语义集成。如果信息需要与外部企业进行语义交换, 则必须将信息所对应的企业私有语义转换为外部目标语义网关的语义, 从而实现语义在不同企业间的

交换，实现信息的语义集成，如图 2.12 所示。

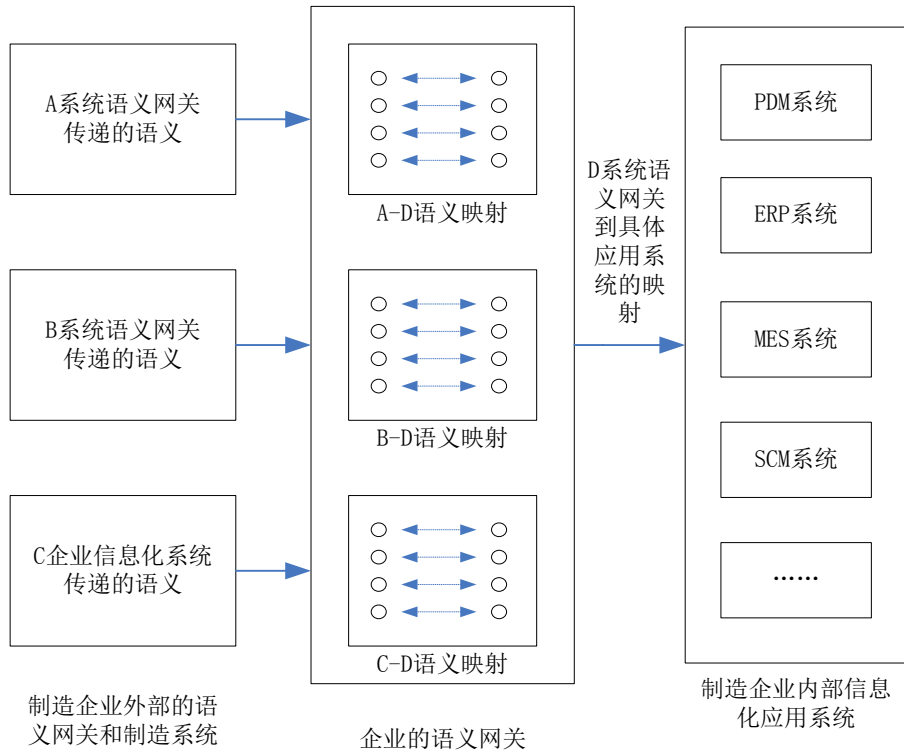


图 2.12 系统间的语义映射关系

Fig.2.12 Semantic Mapping Relationships

信息在语义网关中的语义处理流程如下：

- 1) 将应用系统信息  $Info$  分解为原子信息的集合，即

$$Info := \{ai_1, ai_2, \dots, ai_n\}.$$

- 2) 对于  $Info$  中的任意一个原子信息  $ai$ ，取其相应的原子语义

$$as := (ac, ad),$$

再从语义网关的语义映射关系集合  $M_{EA}$  中找到对应的语义映射关系

$$m_{ea} := (es, as), m_{ea} \in M_{EA}.$$

3) 根据  $m_{ea}$  中定义的映射关系，将  $as$  中的  $ac$  映射为  $es$  中的  $ec$ ， $ad$  映射为  $ed$ 。如果  $ac$  与  $ec$  的映射关系为类型 1，则通过映射函数自动将  $ad$  转换为  $ed$ 。如果  $ac$  与  $ec$  的映射关系为类型 2，则通过  $m_{ea}$  中建立的数据映射关系将  $ad$  映射为  $ed$ 。

4) 通过步骤 3，可将  $as$  解析为  $es$ ，重复步骤 2 和 3，对  $Info$  中的每个  $ai$  执行原子语义映射，可将应用系统信息和语义转换为企业语义网关的信息和语义。

- 5) 基于类似的步骤，可以将企业语义网关的信息和语义转换为企业其它应用

系统所对应的信息和语义，也可以将其转换为外部语义网关所对应的信息和语义。

信息系统间的集成可以分为两类，一类是数据的集成，另一类是功能服务的集成。通过语义网关可以实现信息在不同系统间的语义转换，从而使信息包含的语义在不同的系统中得到一致的理解，这为数据的语义集成提供了基础。由于信息名值对的特点，信息系统大多通过索引获取数据，因此原子信息间的组织方式比较自由。信息系统提供的服务则与其有所不同，服务有严格的调用契约，服务间的集成要求严格的语法匹配，因此服务间集成时除了考虑语义异构外还要考虑语法异构。信息系统通过在语义网关中注册服务来暴露服务接口，利用语义网关提供的语义处理能力实现服务间的解耦合和基于语义的集成。

## 2.6 基于语义网关的离散制造执行系统可重构总体框架

针对离散制造执行系统的重构需求，结合语义网关技术，本文提出了其可重构总体框架，如图 2.13 所示。

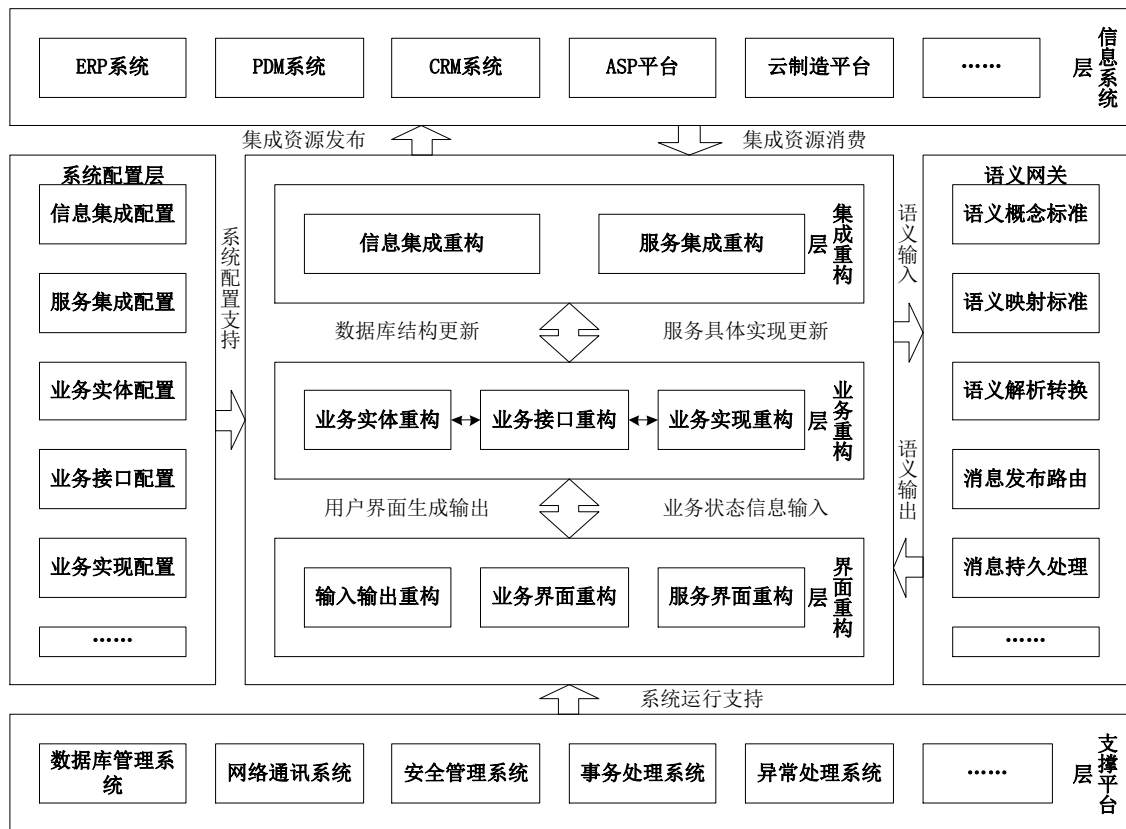


图 2.13 基于语义网关的离散制造执行系统可重构总体框架

Fig.2.13 The overall reconfiguration framework of semantic gateway based MES

基于语义网关的离散制造执行系统可重构总体框架主要由支撑平台层、系统配置层、语义网关、界面重构层、业务重构层、集成重构层和信息系统层等组成。

### ①支撑平台层

支撑平台层负责为 MES 系统提供公共的基础设施,从而使 MES 系统专注与车间业务逻辑处理和系统集成处理。如数据库管理系统为 MES 提供业务数据的持久化服务,网络通讯系统为 MES 与其它信息系统的集成交互提供消息传输通道,安全管理系统负责多系统间的单点登录和权限控制,事务处理系统实现 MES 系统业务处理的一致性,异常处理则统一维护 MES 的异常记录和异常处理规则。

### ②系统配置层

系统配置层为用户重构 MES 系统提供人机交互接口,它主要实现 MES 系统概念语义的注释和网关注册,并将 MES 的集成服务接口进行发布注册,建立服务与实现间的映射,同时针对车间业务发展需求,定义业务实体结构、业务接口和业务实现的动态依赖关系。在配置使能工具的支持下,用户通过从外部配置来重构 MES 系统。

### ③语义网关

语义网关是 MES 系统维护系统语义的独立平台,MES 系统通过概念注册和数据注册向语义网关提交自己的私有语义标准,并与语义网关的中立语义标准建立语义映射关系,从而实现 MES 系统语义在语义网关中的理解,并由语义网关负责 MES 系统语义与其它信息系统语义间的转换。通过语义网关提供的消息发布、路由和持久化等机制,MES 系统能够实现集成消息在异构系统间的可靠传输,通过语义网关提供的信息集成和服务集成机制,MES 系统能够实现异构系统间的语义集成。

### ④界面重构层

界面重构层负责构建 MES 系统的用户交互和业务处理界面,在配置信息的支持下,通过界面生成引擎,界面重构层能够为 MES 系统提供运行界面,满足人机交互的需要。界面重构层一方面要为业务实体提供数据展示界面和数据输入界面,另一方面要为功能服务提供用户调用界面和参数输入输出界面,同时针对不同的业务数据状态还要能够实现业务对象的条件化显示,满足多样化的业务交互处理需求和个性化的用户习惯需求。

### ⑤业务重构层

业务重构层是 MES 系统重构的核心实现层,它为 MES 系统业务实体的重构、业务接口的重构和业务实现的重构提供了技术实现,通过配置时业务实体编译实现实体结构的重构,通过动态依赖注入实现业务实体与业务实现间的松耦合关联,通过动态代理和调用拦截实现业务实现的重构。在业务重构层的支持下,MES 系统能够以基于接口而非实现的松耦合方式实现系统内部各个独立模块的集成运行,满足 MES 系统的业务重构需求。

### ⑥集成重构层

集成重构层负责 MES 系统与其它信息系统集成关系的动态松耦合重构, 针对当前异构系统集成中面临的问题, 从数据库监控业务状态变更详细信息, 通过对集成规则的动态配置和集成内容的投影配置, 在语义网关的帮助下实现 MES 系统的信息集成重构, 同时通过调整 MES 集成服务在语义网关中注册的语义关系和服务实现映射关系, 实现服务集成的重构。集成重构层实现 MES 系统与其它异构系统间的重构需求, 并且在 MES 系统进行重构时维持原有集成关系的稳定。

### ⑦信息系统层

信息系统层指与 MES 系统互相存在集成需求的各种信息化系统。一方面它包含了企业内部的经营管理信息化系统和产品设计开发信息化系统, 另一方面它还包含了外部的各种制造信息化平台。信息系统层是 MES 系统参与业务集成与业务协同的对象, MES 系统在提供自有制造资源的同时也能够使用它们提供的各种资源, 从而增强了 MES 系统制造环境适应能力和制造资源利用能力。

## 2.7 本章小结

本章讨论了基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系结构, 分析了对离散制造执行系统可重构的需求体系、内容体系、目标体系和语义网关的语义映射方法, 给出了对离散制造执行系统可重构总体框架。





### 3 基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构研究

#### 3.1 引言

由于离散制造行业的传统特点，不同产品的加工工艺和制造流程有较大的差异，产品品种又较多，生产批量各异，物料供应复杂，计划调度困难。随着制造环境的变化，制造企业的应用越来越复杂，各种应用的异构程度不断加深，尤其是企业间越来越多的制造协作活动，要求制造执行系统能够同时与不同企业的异构信息系统实现松耦合的集成。

然而企业的 MES 系统与其它信息系统一般由不同的服务商提供，由于目前信息系统间对信息结构及其交互方式缺乏统一的标准，因此服务商们大多基于自身的业务知识来实现和实施各自的信息系统。服务商们对企业业务模型理解的差异，导致 MES 系统与其它系统在业务实体结构与业务逻辑关系上产生语义异构。同时当前信息系统间大多采用组件技术和服务技术实现集成，这种集成方式需要接口间语法的严格匹配，从而要求它们提供的接口契约保持长期稳定。当 MES 系统顺应企业业务变化进行重构时，必然涉及到 MES 系统业务模型的调整，这种调整又会具体表现在业务实体与业务逻辑上，进而影响到 MES 系统与其它信息系统间的集成关系。因此保持 MES 系统业务重构前后语义的稳定、以更灵活的松耦合方式实现系统间的集成对减少 MES 系统重构的复杂度具有重要的意义，而这这就要求制造执行系统除了必须具备传统的可重构能力外，还必须从语义上具有可重构能力和基于语义集成的可重构能力。基于前述的需求，本文在语义网关的支持下通过对 MES 系统业务语义的管理和业务实体与业务逻辑的动态集成以及可配置的系统间集成方法，为 MES 系统的重构与集成提供了一种新的途径。

#### 3.2 基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构框架

为了满足离散车间当前对制造执行系统的集成可重构需求，本文提出了基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构框架，如图 3.1 所示。



图 3.1 基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构框架

Fig.3.1 Business reconfiguration framework of semantic gateway based MES

基于语义网关的离散制造执行业务可重构框架主要由基础平台与框架层、系统业务层、集成配置层、语义集成代理和语义网关等组成。

**基础平台与框架层：**在配置信息的支持下，为系统提供用户界面从而展示业务实体和提供执行业务方法的入口；创建业务实体并实现实体和数据库间的对象关系映射；在业务实体和业务逻辑接口间提供动态注入，实现接口方法的调用拦截和具体方法的调用；执行系统业务规则和业务流程等。

**系统业务层：**系统业务是车间活动在计算机系统上的定义，他们在系统中主要体现在业务实体、业务逻辑和业务流程上。车间业务决定了如何定义系统的业务实体、业务逻辑、业务流程的组合关系以及业务功能实现代码。

**集成配置层：**在配置使能工具的支持下，定制系统的运行界面，定义业务实体和业务逻辑接口，指定业务实体和业务逻辑的关系，配置业务流程。定制运行界面指定了系统以何种具体方式展现数据；对业务实体的定义则建立了实体属性和实体间的继承组合关系；通过配置为业务实体指定业务逻辑；业务流程的配置指定了功能和流程间的组合关系。

**语义集成代理：**语义集成代理负责与语义网关间的集成信息交互，包括消息通讯，信息封装与解析，按语义网关的要求执行MES系统的功能服务，响应语义数据集成，更新MES业务实体的状态等。

**语义网关：**语义网关是MES系统与其它异构系统实现语义集成的平台。通过语义网关提供的语义和服务注册、语义转换和服务驱动能力以及消息订阅和发布等机制，MES系统只需与语义网关建立集成关系就能够利用语义网关提供的集成

能力实现与其它系统的语义集成。

业务可重构框架描述了支持制造执行系统运行和业务可重构的各部分间的关系，MES 系统的业务实体、业务逻辑作为框架内的组成部分，框架为它们的可重构提供了基础。

### 3.3 基于语义网关的离散制造执行系统业务实体可重构

业务实体是车间各种对象在计算机中的定义，它们是制造执行系统的运行和集成的基础，各种数据的加载显示，业务逻辑的执行都依托于业务实体之上。由于不同车间或同一车间在不同阶段面临的制造环境各不相同，其在不同条件下对业务实体的定义也各不相同，因此满足业务实体的集成重构需求就具有显著的意义。

当前的制造执行系统大都是采用静态的高级程序设计语言开发的，这类语言具有严格的类型约束，因此制造执行系统的业务实体在开发过程中就被严格定义，同时与其相关的业务逻辑也被紧密地耦合在一起，经过编译后成为制造执行系统的部件。在这种模式下，业务实体的集成重构主要面临如下困难：

- (1)业务实体被编译为二进制代码，用户无法从系统中获取详细的定义。
- (2)用户没有与实体相关的完整源代码，无法重新定义和编译强类型的业务实体。
- (3)重构成功后的业务实体依旧执行重构前的业务逻辑，无法体现实体重构的意义。
- (4)业务实体重构后的语义无法被其它信息系统理解，必须为每个系统重新定义集成关系。

基于以上的分析，为了实现业务实体的集成可重构，本文提出了一种基于语义网关的 MES 业务实体可重构模型，如图 3.2 所示。

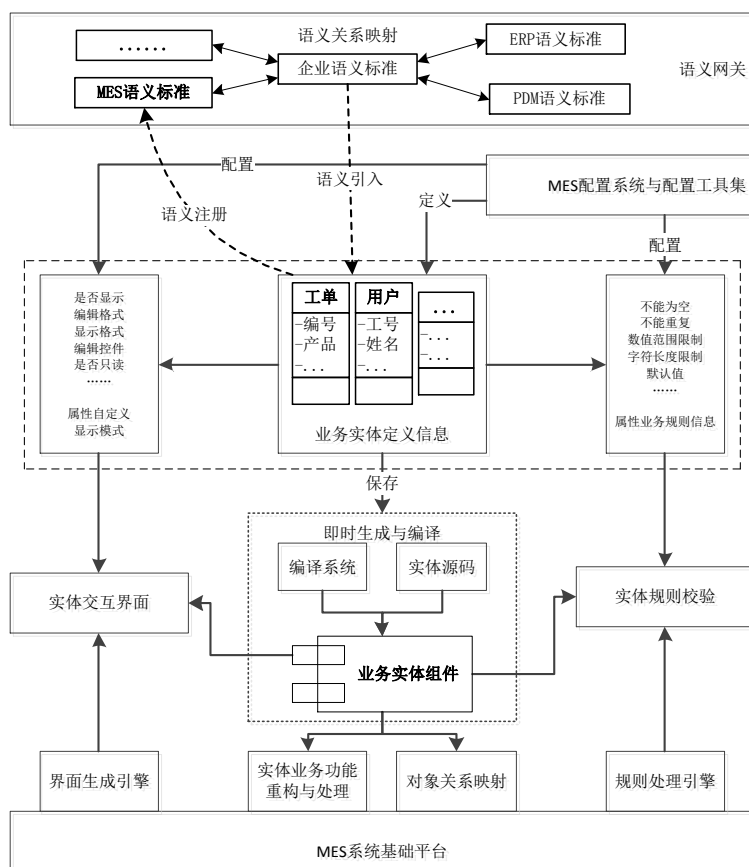


图 3.2 基于语义网关的 MES 业务实体可重构模型

Fig.3.2 Business entities reconfigurable model of semantic gateway based MES

要实现业务实体的可重构，业务实体必须从逻辑和物理上作为 MES 系统的独立组件。业务实体的定义信息由 MES 配置系统维护，用户可以通过配置工具以可视化的界面创建或编辑业务实体，在业务实体中增加或移除属性定义；同时用户可以按需定义属性的交互显示模式，如格式化显示，指定编辑控件等；也可以对属性建立业务校验规则，如属性值必须在指定的范围内，属性值不能为空和属性值必须唯一等。当用户保存业务实体的定义信息时，配置系统自动根据实体的定义信息生成业务实体的源码，同时将源码编译为 DLL 组件。由于业务实体是独立的组件，因此对它的编译可以独立进行而不影响系统的其它模块。

### 3.3.1 离散制造执行系统业务属性重构

#### ①属性数据类型重构

属性数据类型重构指 MES 系统业务属性能够调整其在数据库中映射的字段结构。随着企业业务的发展和 MES 系统数据处理能力的提高，MES 系统初始设计的数据库数据结构很难持续满足数据存储需求，有必要支持业务属性调整其映射的数据库字段结构，然而当前 MES 系统对业务属性数据的数据库操作代码与数据库结构间存在紧耦合，这些数据库操作代码大多被写进业务处理逻辑中，重构业务

属性的数据类型必然涉及到源代码的调整,因此必须将数据库的 CRUD 代码从 MES 系统的业务逻辑中分离,使 MES 系统专注于业务处理而不用关心数据层的操作。

数据类型重构主要体现在两个方面。

#### 1) 字段结构的调整。

字段结构的调整分为两种类型,一种是扩大字段存储内容,满足属性的数据内容不断增加需求,比如将工单编号在数据库中映射的字段结构从 10 个字符的“varchar(10)”调整为 20 个字符的“varchar(20)”,另一种则为改变字段的数据类型,满足数据存储的规范化和处理需求,比如将主要存储中文信息的工单描述属性由单字节的“varchar”类型调整为双字节的“nvarchar”,从而使其在数据库中获得更快的处理速度,同时还可以针对具体的数据库进行优化存储,如随着数据库技术的发展,数据库系统对 xml 格式的支持进行了优化,可以将 xml 格式的属性能容从映射的“varchar(max)”字段格式调整为专用的“xml”字段格式,从而支持基于 xml 的数据优化查询。

在进行字段结构调整后,新的字段结构信息同步由配置系统提交给语义网关,语义网关则自动更新字段元数据信息,保证在语义网关中涉及到该字段的系统集成需求能够保持正确的实现。

#### 2) 字段重新映射。

字段的重新映射指 MES 系统在数据库中为业务属性重新建立数据字段并配置映射关系,字段重新映射主要适用于无法进行字段结构调整的情况,在底层 ORM 系统的支持下,字段重构过程如图 3.3 所示。

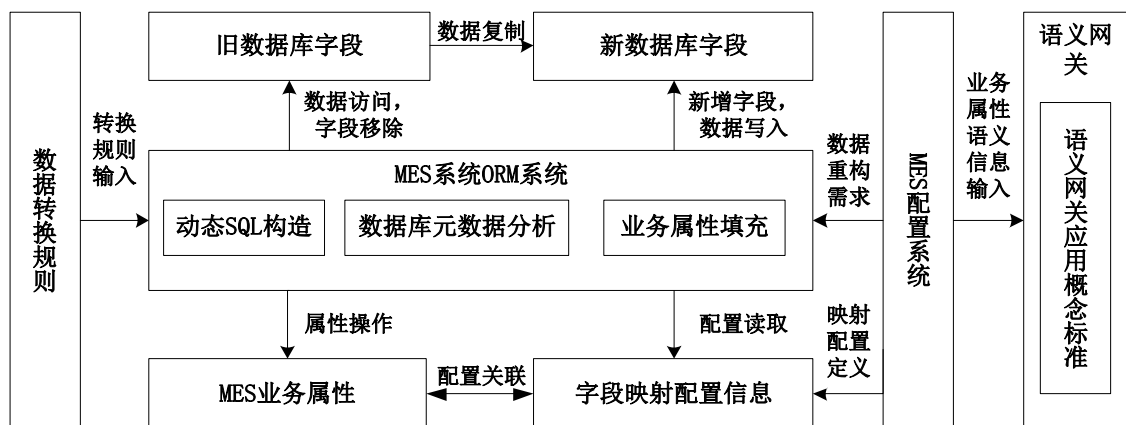


图 3.3 数据映射重构过程图

Fig.3.3 Data mapping reconfiguration process diagram

在与 MES 系统的业务处理逻辑互相独立的 ORM 系统支持下,业务属性重构

过程如下：在 MES 配置系统完成对业务属性的映射配置，并且定义数据转换规则后，配置系统触发 ORM 进行属性数据映射重构，ORM 系统从字段映射配置信息中获取新映射的数据库字段，在数据库中对应的用户表上按配置建立字段，然后根据新旧映射的字段数据转换规则将数据内容从旧字段中读取并转换后写入新字段中，保证业务数据的完整性，最后从数据库中移除无效的旧字段。

ORM 系统能够根据字段映射配置信息准确地实现数据在 MES 业务实体和 MES 数据库中的持久化处理，由于 ORM 系统与 MES 的业务处理系统互相隔离，保证了业务属性的数据重构不会影响原有业务逻辑的处理。

字段的重新映射涉及到 MES 系统中数据存储结构的变化，必然会导致传统模式下已有的系统间数据集成实现无法正确进行，为了使字段重新映射后继续保持原有的集成实现，必须将字段的新映射信息在语义网关中注册，注册中将被新字段替换的旧字段在语义网关中与网关语义标准的映射关系重新移植，同时移除旧字段的语义映射关系，同时当语义网关的语义标准中存在具有新字段语义内涵的概念时，则可以直接从语义网关中引入该概念，减轻 MES 系统与网关语义标准间的语义异构。

在语义网关的支持下，其它系统与 MES 间的数据集成通过访问语义网关的语义标准来获取 MES 系统发布的数据，并由语义网关对 MES 系统的集成需求进行语义分析，语义网关通过对 MES 系统注册概念映射关系的反求可以获得映射的 MES 系统数据存储字段，从而从 MES 系统中获取所需的集成信息。由于外部系统并不直接与 MES 系统数据字段进行集成，而是通过访问 MES 在语义网关中公开的且建立语义映射关系的概念标准进行系统间的集成，因此只要语义网关能够保持字段调整后映射关系的正确就能实现预期的集成效果。

## ②属性业务规则重构

在 MES 系统的业务逻辑处理中，必然涉及到业务属性数据的内容约束。属性业务规则重构则将这种数据约束从业务逻辑代码中分离，以可配置的方式将数据约束检查提前到业务处理之前，同时支持 MES 用户按业务需求进行灵活配置，提高 MES 系统的柔性，部分典型的属性业务规则如表 3.1 所示。

表 3.1 MES 系统部分可重构业务规则表

Table 3.1 Partially reconfigurable business rules of MES

业务规则	业务规则描述	业务规则示例
不能为空	属性内容不能为空，必须有数据内容	必须为工单指定产品编号
取值唯一	属性内容不能和其它记录重复	系统的工单编号必须唯一
范围取值	属性必须在指定的范围内取值	工单的优先级取值范围有限
数值比较	属性与规则值进行大小比较	工单的生产数量必须大于 0
长度限制	属性内容必须在规定的长度内	工单编号长度小于等于 20 字符
内容匹配	属性内容必须符合匹配规则	工单编号必须以 WS 开头
条件显示	根据数据内容进行界面条件显示	工单的报废数量大于 0 时红色显示
正则表达	属性内容必须符合正则表达式规范	工人邮箱必须符合 Email 规范
内容过滤	属性内容不得包含非法字符	防止 SQL 注入等安全防护
类型转换	属性内容必须能够进行数据类型转换	用户输入的字符串能转换为数值

MES 系统的每个业务属性可以配置一到多个业务属性规则进行属性内容检查，确保进行业务逻辑运算的属性内容符合当前业务需求，将系统可能发生的异常和错误尽量提前消除，提高系统的可靠性。

### ③属性交互界面重构

业务属性是 MES 系统用来存储业务数据的原子结构，业务属性在 MES 系统处理车间业务过程中必然会与用户进行人机交互，因此业务属性需要根据用户需求提供数据交互处理接口，这种接口就是交互界面。然而在传统的系统软件开发中，属性的交互界面一般在系统设计时就固定生成，用户在运行时必须完全按照系统设计时提供的交互接口进行属性交互操作，用户无法修改其接口，当需要调整交互接口时则必然需要系统开发商提供二次开发支持。MES 系统的属性交互界面重构则针对这种紧耦合的界面开发设计而提出，满足 MES 系统进行界面重构时无需重新编译系统的需求，同时支持用户按需动态调整界面需求。

从 MES 属性交互界面重构范围来看，其主要支持两种类型的重构类型。

#### 1) 单个业务属性的界面重构。

单个属性的界面重构指针对特定的某个业务属性调整其交互接口，实现交互接口的精细化定制。比如工单优先级属性接口重构，采用星级界面替换数字枚举界面。

#### 2) 同一数据类型的界面重构。

对 MES 系统的业务属性中属于同一种数据类型的所有属性进行交互界面重构，实现属性交互界面的统一重构处理。比如随着 MES 系统的不断发展，当属性编辑

控件进行升级更新重构时可以采用这种方式，如图 3.4 所示的 MES 系统日期时间交互界面重构，原有的界面不支持时间输入，重构后的界面则支持时间输入。

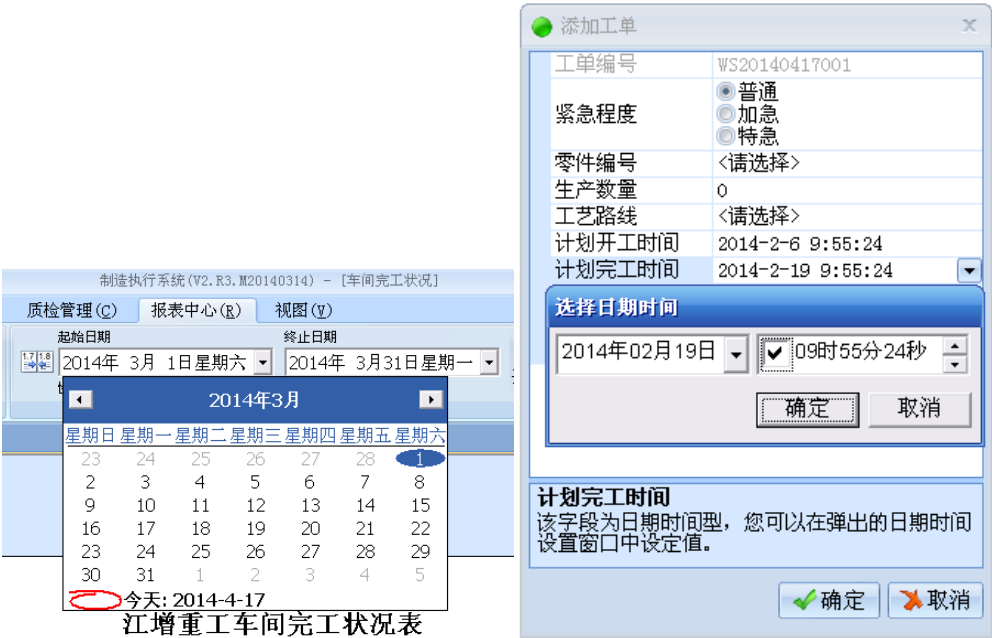


图 3.4 日期时间类型交互界面重构

Fig.3.4 Datetime UI reconfiguration

从 MES 系统属性交互界面重构内容来看，除了能够进行属性界面控件的重构外，界面交互重构还支持数据的输入输出格式重构，格式重构主要针对特定的业务属性进行数据条件显示，满足不同条件下的数据展示需求。比如货币的显示格式重构，以价格属性包含的数值“12.30”为例，为了满足货币的区分显示，人民币的显示格式为“¥12.30”，英镑的显示格式“£12.30”，美元的显示格式为“\$12.30”。

为了保证业务属性交互界面的重构，业务属性的数据类型与业务属性的交互控件间必须满足重构兼容性，基本兼容表如下表 3.2 所示。

表 3.2 业务属性基本控件重构兼容表

Table 3.2 Basic controls reconfiguration compatibility of business properties

数据类型 控件类型	字符串	数值	布尔	日期	图片
文本编辑器	●	●	●	●	
数值编辑器	○	●			
时间编辑器	○			●	
图片编辑器					●
选择编辑器	○		●		



重构兼容表用于指导用户进行 MES 的属性界面重构, MES 的配置系统在重构需求提交后将进行兼容性检查, 确保属性的数据类型和接口界面能够正确匹配, 保证业务属性交互界面的顺利创建。

### 3.3.2 离散制造执行系统业务实体重构

#### ①业务实体结构重构

业务实体结构重构指动态为业务实体增加和移除扩展的业务属性, 扩展的业务属性指不是从业务实体接口中继承得来的业务属性, 这样对业务实体结构的重构可以避免影响原有的基于业务实体接口实现的 MES 业务处理模块, 从而实现实体结构的重构, 业务实体结构重构如图 3.5 所示。

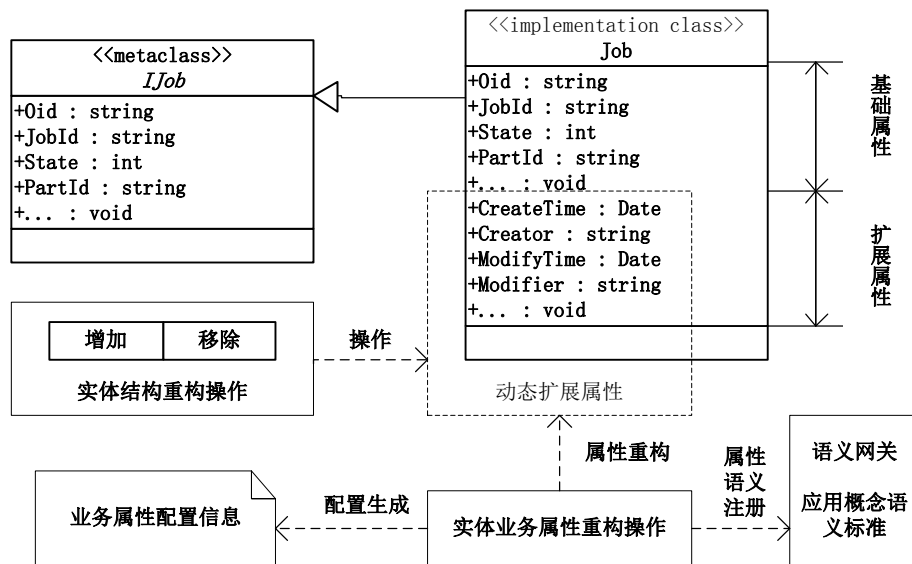


图 3.5 业务实体结构重构

Fig.3.5 Structural remodeling of business entities

在业务实体的重构中, 为了提高 MES 系统与语义网关的语义吻合度, 必须尽量从语义网关中引入网关概念作为扩展属性的概念, 同时对于语义网关中不存在的扩展属性, 则必须将其在语义网关中进行概念注册, 而移除的扩展属性则必须在语义网关中将其屏蔽, 使语义网关能够保持语义映射关系的同步更新, 维护系统语义的可靠, 保证系统间基于语义网关集成的有效。

在完成业务实体结构重构后, MES 用户则可以按业务属性重构方法对新增的扩展业务属性进行属性重构, 使其能够参与 MES 系统的人机交互和进行持久化, 而对其对应业务数据的处理则由 MES 系统的业务逻辑提供实现, 具体的处理方法在后续章节中深入讨论。

#### ②业务实体规则重构

业务实体规则的重构指针对业务实体动态构建业务约束规则和实体展示规则,一方面在业务处理前对业务数据进行组合校验,另一方面根据业务状态提供不同的交互界面。

#### 1) 业务约束规则重构。

业务属性规则能够针对单个的业务属性进行数据校验,业务实体的业务约束规则是对实体中多个业务属性进行组合校验,满足 MES 业务处理需求。

约束规则一方面可以进行单个实体内部属性间的逻辑处理,如属性内容比较规则,可以对两个属性的内容进行大小比较,例如工单的开工日期必须小于完工日期。另一方面则可以在多个业务实体间进行规则检查,如属性内容组合规则,单个实体中多个属性的组合内容必须在记录集中保持唯一,例如以多个属性的组合作为数据记录索引的情况。

#### 2) 业务界面规则重构。

业务界面规则重构指根据不同的业务数据状态控制业务实体交互界面的生成,一方面动态控制可用的人机交互接口,另一方面进行业务数据的多维展示。

在 MES 业务处理过程中,业务实体的数据是会动态进行变化的,比如在工单成功启动后,工单状态属性变为“已启动”,为了业务数据的安全性和完整性,MES 系统必须立刻禁止用户修改工单的关键属性信息,用户界面则必须将属性编辑器由可编辑模式调整为只读模式。为了保持交互界面与业务实体的数据状态进行同步更新,传统的 MES 系统通过业务代码来控制交互接口的同步,可重构 MES 则通过构建基于业务数据状态的界面规则实现数据与界面的同步,通过为工单状态属性创建关键属性可编辑规则能够自动实现关键属性的只读。业务实体的界面由 MES 系统的界面引擎生成,界面引擎通过对业务实体数据和业务规则间的关系分析,能够自动实时调整用户界面,使用户界面与业务状态匹配。业务数据的多维展示指为业务实体下的集合业务属性提供多种数据展示方式,对于集合属性来说,大多情况下以行表格的方式进行展示,同时 MES 系统也能够为其列表格展示提供支持,针对一些特殊的数据,还可以提供图形化的交互方式以方便用户对数据进行快速分析。

MES 系统要实现语义集成,必须向语义网关注册自己的私有语义,通过语义网关拥有的企业语义标准和其它系统在平台注册的语义标准之间的映射处理,与其它系统实现语义交换。业务实体是属性的集合,每个属性都有自己的语义。在重构业务实体时,必然会涉及到属性及其语义的变更。由于语义网关拥有一套企业的语义标准,当 MES 系统的语义发生变化时,引入语义网关的企业语义标准无疑能够降低 MES 系统与语义网关间的语义集成复杂度,提高实体重构和系统集成效率。当实体需要增加属性时,如果企业语义标准中存在该属性的等价语义,则可以直接将该语义定义为属性的语义;如果不存在等价语义,则可建立 MES 系

统的私有语义，并将该语义在语义网关中注册，成为语义网关的企业语义标准；当修改了属性的语义时，则只需重新定义该语义与企业语义标准的映射关系就可保持与其它系统间的语义集成关系。

当 MES 系统运行时，系统基础平台首先加载业务实体组件，获得业务实体类型信息，并通过对对象关系映射系统将业务实体定义的变化更新到对应的数据库系统中，然后加载自定义显示信息和业务规则信息，并在 MES 系统基础平台的支持下按配置信息创建业务实体交互界面和校验业务实体数据。

通过业务实体分离和配置时编译，实现了业务实体结构的可重构；通过业务校验规则的配置，实现了约束规则的可重构；通过配置显示模式，实现了交互方式的可重构；通过语义的引入、注册和映射关系的定义，保持了实体语义的一致。由于业务实体是 MES 系统的独立组件，并且没有相关业务逻辑的定义，因此重构后的业务实体可以方便地扩展其业务逻辑。

### 3.4 基于语义网关的离散制造执行系统业务逻辑可重构

业务实体的集成可重构为业务逻辑的集成可重构提供了基础，业务逻辑主要从以下几个方面进行集成重构：

- (1) 动态为业务接口关联业务实体。
- (2) 动态为业务接口提供业务实现。
- (3) 动态调整业务具体实现过程。

为了实现业务逻辑的可重构，本文提出了一种基于语义网关的业务逻辑可重构实现模型，如图 3.6 所示。

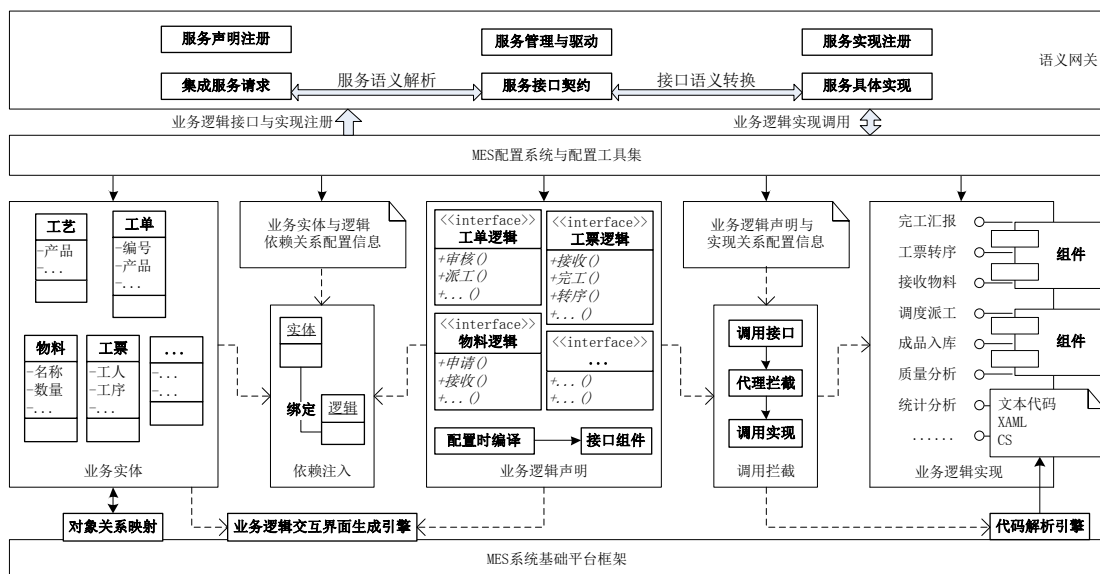


图 3.6 基于语义网关的业务逻辑可重构实现模型

Fig.3.6 Semantic gateway based reconfigurable implementation model of business logic

业务逻辑在 MES 系统中由业务逻辑的接口声明和业务逻辑接口方法的实现两部分组成。业务接口是一系列抽象方法的集合，它们定义了业务实体具有那些功能，可以执行那些业务流程，以及方法的契约，但是不提供具体的实现。业务逻辑的实现则是具体的可执行代码，能真实地改变业务实体的状态。

由于业务实体和业务逻辑的分离，业务实体和业务逻辑实现了解耦合，同时也切断了它们之间的联系。为了在运行时建立业务实体和逻辑接口间的关系，MES 系统平台的依赖注入框架在运行时根据配置文件中的定义动态注入业务逻辑接口，从而实现业务实体和业务逻辑的松耦合关联和动态集成。

MES 系统的开发采用的是强类型的静态语言，业务逻辑接口的可重构必然会涉及源码层的修改。业务逻辑接口的独立定义，为源码层的修改提供了条件，结合配置时编译策略，可以实现业务接口的重构。其具体步骤如下：首先用户通过 MES 配置系统定义业务逻辑接口，并为接口增加方法和指定方法的参数等调用契约信息。然后用户保存所有的配置信息，配置系统根据用户的配置信息自动生成接口的源码，并在编译系统的支持下即时编译源码，生成强类型的业务逻辑接口组件。由于这些工作都由配置系统在后台自动完成，对用户的配置过程完全透明，用户在界面友好的配置系统中就可即时完成接口的重构。

业务逻辑接口没有提供方法的实现，因此当 MES 系统调用接口方法时，并不能执行预期的业务逻辑。为了能够真实地实现业务功能，必须在接口方法和具体实现代码间建立调用联系。MES 系统平台通过拦截对接口方法的调用，然后根据接口方法的配置信息，由拦截代理执行实际的业务逻辑代码，并将结果返回给接口方法。业务逻辑的实现由两类代码组成，第一类是编译好的可执行代码，可以被拦截代理直接调用，这类代码存在于已编译好的典型 MES 系统业务实现组件中；第二类是动态的文本代码，这类代码必须被平台引擎解析处理后才能与拦截代理交互。业务逻辑实现重构的主要基于第二类的动态文本代码，用户通过配置系统对文本代码的动态编辑来满足其重构需求。

语义网关作为维护 MES 系统语义稳定的平台负责 MES 系统语义信息的处理和集成过程的代理。

### 3.4.1 离散制造执行系统业务接口重构

#### ①业务接口与业务实体重构

业务接口是 MES 系统对车间业务需求的定义，业务实体是 MES 系统对车间对象的定义，为了能够支持车间业务的动态处理，实现业务实体与业务接口间的解耦合，有必要对当前的 MES 系统设计模式进行改进，从传统的基于具体对象类型的设计进化为基于接口的设计，从而实现 MES 系统功能模块间的解耦合，满足动态的业务接口与业务实体间集成关系的重构。基于接口的业务实体设计如图 3.7 所

示。

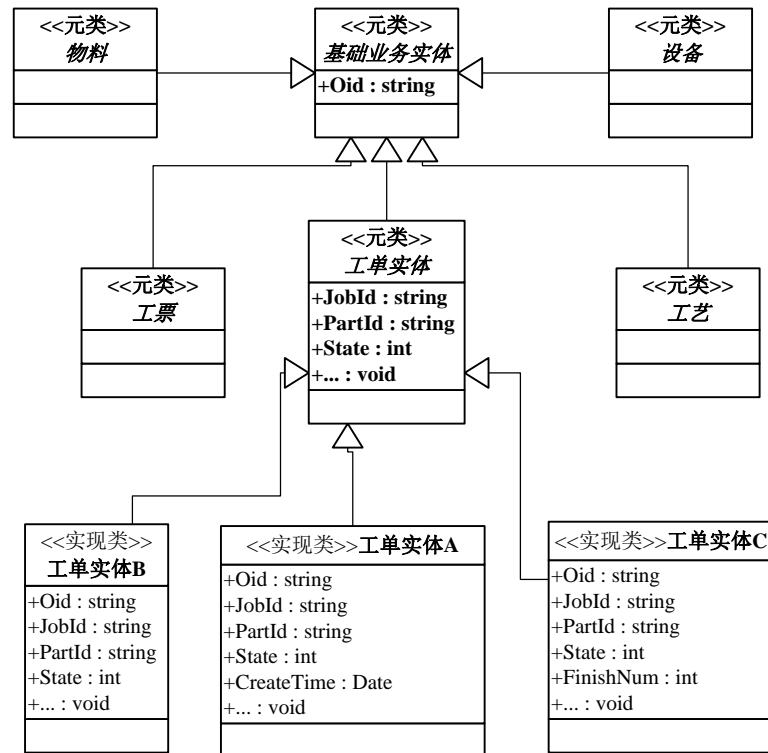


图 3.7 业务实体类图

Fig.3.7 Business entity class diagram

首先 MES 系统为所有的业务实体提供了一个公共的基类，这个基类提供了所有实体都必须具有的公共业务属性接口申明，如用来标识每个对象的 Oid 属性，该属性采用 GUID 生成的字符串表达，基类提供属性申明而不提供具体实现，对于如何生成 Oid 由继承的实现类决定。

其次 MES 系统的业务实体原型也由接口类提供原型申明，该业务实体原型是 MES 系统进行业务处理的主要依据，MES 系统通过实体原型来进行标准的业务逻辑处理，由于业务处理基于接口进行，对于业务实体的具体实现类型则无需关心，从而可以通过配置实体接口与实体的实现类间的映射关系实现业务实体的动态重构。MES 工单实体的重构配置与处理代码如下。

MES 系统外部业务实体映射配置内容：

```
<container>
  <register type="IJob" mapTo="CQMI.MES.Jobs.Job" />
</container>
```

MES 系统内部业务实体生成代码：

```
{
```

```

IMESContainer mesContainer = new MESContainer();

IJob job = mesContainer.Resolve<IJob>();

//工单实体处理

.....

}

```

在 MES 系统的内部业务处理过程中，程序代码并不指定具体的实现类，而是通过 MES 系统容器对接口的反求来获得具体的实现类，而实现类与接口的映射关系由外部文档维护，用户通过修改接口的映射关系就可以实现业务实体的重构。

对于语义网关而言，当业务实体的实现发生重构时，在未增加扩展属性的情况下，原有的语义映射关系可以保持稳定，当增加了扩展属性时，则必须将增加的扩展属性进行语义注册，通过语义网关按需向外部提供集成资源。

## ②业务接口与业务实现重构

针对 MES 系统的业务接口，MES 系统可以提供多种业务处理实现，为了能够实现接口与实现之间集成关系的重构，满足业务处理按需配置需求，同样采用基于接口的设计和动态依赖注入方法来实现。业务接口与业务实现间的继承实现关系如图 3.8 所示。

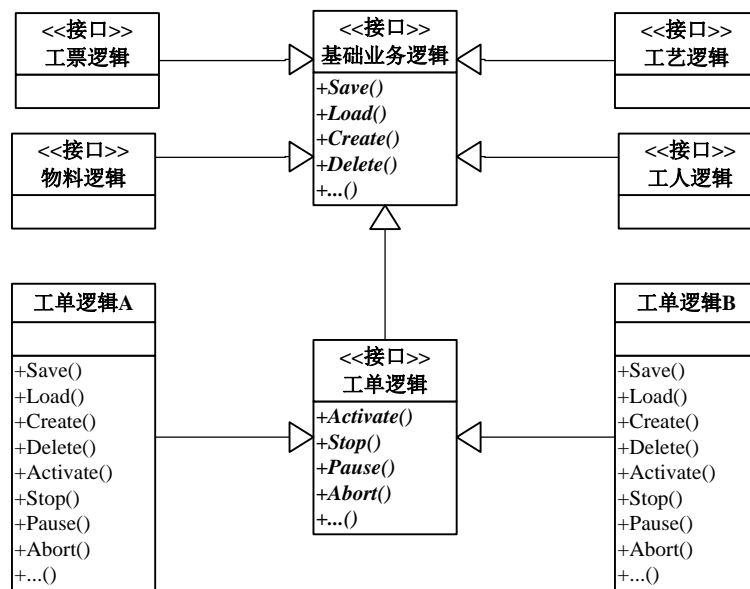


图 3.8 业务接口继承关系

Fig.3.8 Business interface inheritance

首先 MES 系统为所有的业务逻辑提供了公共的根接口，其中包含了如 Save、Load、Create、Delete 等接口方法，其次针对不同的业务逻辑，在继承根接口的同时设计业务逻辑接口，用于 MES 系统进行具体的业务逻辑处理，最后则由 MES

系统提供的业务接口实现类提供业务实现过程，而 MES 业务接口和业务实现的集成关系由外部配置信息维护。MES 业务接口与业务实现的重构实现如下。

MES 系统外部依赖注入映射配置内容：

```
<container>
    <register type="IJob" mapTo="CQMI.MES.Jobs.Job" />
    <register type="IJobLogic" mapTo="CQMI.MES.Jobs.JobLogic" />
</container>
```

MES 系统内部业务处理代码：

```
{
    IMESContainer mesContainer = new MESContainer();
    IJob job = mesContainer.Resolve<IJob>();
    IJobLogic jobLogic = mesContainer.Resolve<IJobLogic>();
    //工单业务处理
    ....
    jobLogic.Save(job);
}
```

在工单业务处理过程中，工单实体和工单逻辑的生成都由 MES 系统容器根据外部配置信息完成，MES 业务只用关系内部业务逻辑即可，从而可以实现业务系统模块的解耦合，支持用户进行动态重构。

MES 系统定义的业务接口一方面用于支持系统业务流程的处理，另一方面还作为 MES 与其它系统进行集成的接口。对具有接口重构需求的 MES 系统而言，直接向其它系统提供业务接口供外部调用来实现系统间的集成具有很大的脆弱性，因为 MES 业务接口的重构很容易带来其它系统与 MES 集成实现的失效。为了降低 MES 业务接口重构给集成带来的影响，必须将集成的实现与具体的业务接口解耦合，语义网关则提供这样的平台与实现。

MES 系统业务接口的重构必然影响到 MES 系统向外部提供的集成服务，从而导致外部系统必须重新设计和编译其与 MES 系统实现互操作的组件，基于语义网关的业务接口重构则将这种不良影响降到了最低。在设计 MES 系统的业务处理逻辑时，同时将业务处理逻辑的接口方法和接口契约在语义网关中注册，保证 MES 系统的接口语义能被语义网关理解，接口信息的注册同时也为外部系统与 MES 系统的服务集成提供了途径。

当 MES 系统接口契约发生修改时，由于业务接口并不提供方法的实现，因此不需修改该契约在语义网关中的注册信息，只要按修改后契约信息在网关重新注册一个新的服务即可。由于接口是抽象的定义，为了让语义网关能够确定其对应

的具体实现方法，需要将其实现方法在语义网关中进行路径注册和参数语义注册。在 MES 配置系统的支持下，用户通过少量的工作就可以完成业务逻辑在语义网中的注册和重构活动。

MES 系统的业务逻辑在语义网关中注册后，MES 系统与外部异构系统的服务集成行为就可以被语义网关代理，当外部有服务集成请求时，语义网关首先对系统的请求信息进行语义解析，将其请求语义转换为符合接口契约的语义，然后将其映射为具体方法的参数语法和语义，再将符合该方法语义的请求信息交由 MES 系统的语义集成代理，由它负责调用方法并返回信息。语义网关则将返回的信息进行语义逆向处理，得到符合服务请求系统语义的信息，并将最后的信息返回给目标系统。

通过语义网关对服务请求信息的语义解析转换以及服务调用的代理，使 MES 系统与外部系统实现了解耦合，MES 系统业务重构的影响被语义网关消除，外部系统与 MES 系统的集成关系可以保持稳定。

### 3.4.2 离散制造执行系统业务实现重构

业务接口的重构实现了业务模块间的解耦合，支持 MES 系统业务模块级的重构，然而模块级的重构对 MES 系统的业务实现调整一般比较大，虽然模块级的重构能比较彻底地解决 MES 系统业务处理过程中的差异需求，但是业务模块的设计开发成本比较高，在面对小范围的业务重构需求时便显得灵活性不足，因此针对业务实现模块中部分实现方法进行动态重构就具有特殊的应用价值。业务实现方法的重构主要分为两类，分别是业务实现增强和业务实现替换。

#### ①业务实现增强

业务实现增强指对已有的业务实现进行功能完善，使现有的业务实现无需修改代码而适应当前 MES 系统对车间业务方法实现的变更需求，通过在原有的业务实现调用中动态增加业务强化方法进行业务实现的重构。

业务增强主要有前置增强和后置增强，分别对应前置方法和后置方法。前置方法在原始的业务方法之前执行，它们能够通过修改输入的方法调用参数信息来实现业务修改，并在原始方法执行前处理其它的业务逻辑，比如进行用户调用权限校验等，同时控制是否继续执行原始方法。后置方法在原始的业务方法执行之后再运行，它们能够修改原始的业务方法执行结果来实现业务处理的增强，同时可以在方法执行后处理其它的业务逻辑，比如将工单已开工消息发送给相关的人员，MES 系统通过对业务方法的增强配置就可以实现对业务处理前后逻辑的修改，实现业务逻辑的按需实现调整，业务增强处理过程如图 3.9 所示。



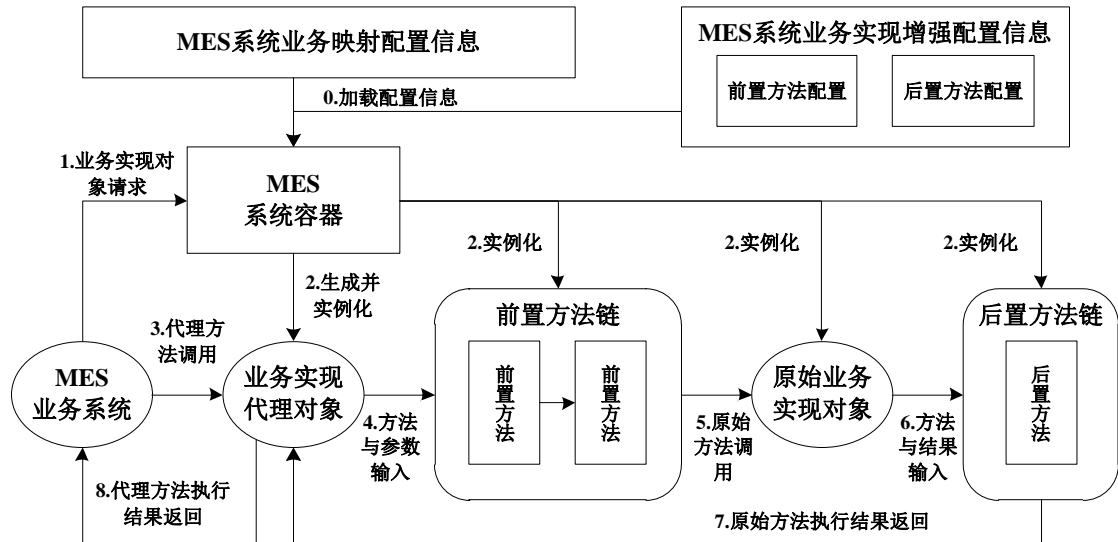


图 3.9 业务实现增强图

Fig.3.9 Business implement enhance

MES 系统业务实现增强的主要处理过程如下：

- 1) MES 业务系统通过 MES 系统容器提交获取映射的具体业务实现对象需求。
- 2) MES 容器根据接口映射信息创建业务实现的代理对象，实例化原始业务实现对象，并将配置的增强方法按优先级和类型分别织入前置方法链和后置方法链。
- 3) MES 业务系统按默认流程提供输入参数调用反求对象的实现方法，MES 容器则拦截该调用信息，将调用信息提交给代理对象，由代理对象进行方法调用。
- 4) 代理对象依此调用前置方法链中的方法后，在调用原始方法，最后调用后置方法链中的方法。
- 5) 最后的后置方法将方法执行和处理结果返回给代理对象，代理对象再将结果返回给 MES 业务系统，完成方法的增强调用。

业务实现方法的增强能够增加业务处理能力，对业务实现的输入输出信息进行修改，并实现业务能力的扩展，但是业务的具体实现必须由原始的业务处理代码负责，故只适合业务实现在重构中需求变化不多情况，在业务实现需要进行大量的变动时则显得难以为继，而业务实现替换则可以实现业务方法的整体替换，同时又无需编译整个业务逻辑模块。

## ②业务实现替换

业务实现替换采用业务方法覆盖重写的方式进行业务实现重构，为了能够支持 MES 系统进行业务实现方法的替换，原始方法必须采用虚方法等支持重写的方式实现，业务实现替换如图 3.10 所示。

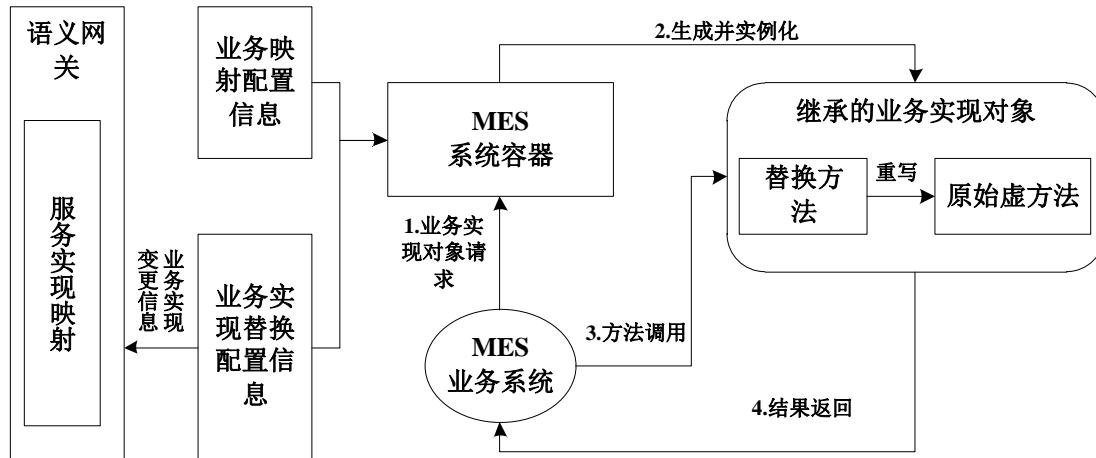


图 3.10 业务实现替换图

Fig.3.10 Business implement replace

与业务实现增强相比，业务实现替换的过程更简洁，但是其对实现方法的原型约束复杂，业务实现替换的过程如下：

1) MES 业务系统向 MES 系统容器提交对象请求。

2) MES 容器根据接口映射配置信息获得原始业务对象类型，然后生成并实例化该类型的子类，并在子类中用配置的替换方法重写父类方法，实现方法的替换。

3) MES 业务系统按原始的业务流程调用子类的方法并获得返回结果。

由于方法替换采用继承的原理实现，故 MES 容器动态生成的子对象完全具有父对象的所有功能属性，可以实现良好的系统重构兼容性。

在业务实现重构过程中，业务实现增强和业务实现替换可以进行组合使用，从而极大地增加了业务实现重构能力。

MES 系统与其它系统间的集成主要通过语义网关中发布代理接口来进行，由语义网关负责 MES 系统中实际方法的调用。业务实现的增强主要体现在 MES 内部业务逻辑的处理上，由于通过 MES 系统能够正确进行增强处理，故外部系统通过语义网关获得的集成结果可以与 MES 保持一致。而业务实现替换后，由语义网关负责的 MES 系统集成的实现必须进行同步更新，配置系统必须将替换的实现注册在语义网关中，使语义网关清楚替换后接口的具体实现元数据信息，通过重新配置语义网关中的接口契约映射关系维护替换前后的接口语义内涵一致，保证原有的基于语义网关的系统集成继续有效，从而使 MES 接口实现的重构不影响 MES 与其它系统已有的集成关系，提高集成实现的柔性。

### ③业务实现重构规则

为了能够对业务实现重构进行精细化管理，使 MES 系统能够准确地进行业务实现重构，必须为其建立重构规则，用于定义为哪些方法进行重构，采用什么方式重构，同时为用户重构 MES 系统的业务实现提供配置接口。业务实现重构规则

主要由表 3.3 中的拦截规则组成。

表 3.3 主要的 MES 系统业务实现重构拦截规则

Table 3.3 Intercept rules of MES business implement reconfiguration

规则名称	规则描述
AssemblyMatchingRule	业务实现对象来自于指定的被拦截组件
NamespaceMatchingRule	业务实现对象属于指定被拦截的命名空间
TypeMatchingRule	业务对象类型为指定的拦截对象类型
MemberNameMatchingRule	业务方法名称符合指定的拦截名称
ParameterTypeMatchingRule	方法输入参数符合指定的拦截类型
ReturnTypeMatchingRule	方法返回参数符合指定的拦截类型

通过为业务方法配置业务实现调用拦截规则，MES 系统容器能够对符合拦截规则的业务方法自动进行调用拦截，并依据方法重构的配置信息实现方法实现过程重构，支持 MES 业务逻辑的重构，同时一个方法的拦截规则可由一到多个规则组合而成，拦截规则配置示例如下。

```
<policy>
  <matchingRules>
    <matchingRule match="CQMI.MES.Jobs.JobLogic"
      type="TypeMatchingRule"/>
    <matchingRule match="Activate"
      type="MemberNameMatchingRule"/>
  </matchingRules>
  <handlers>
    <handler type="CQMI.MES.Jobs.JobLogic.ActivateHandler"
      behavior="Before" priority="1"/>
  </handlers>
</policy>
```

企业的业务经常变化，因此其业务逻辑也在不断调整，通过业务逻辑的独立声明和实现，企业可以在不同的阶段定义不同的业务逻辑，使 MES 系统可以对业务逻辑进行积累，并可按需进行动态注入和调用拦截，实现业务逻辑的集成重构。语义网关使 MES 系统与其它系统实现了解耦合，并保持了服务契约的稳定，最小化了 MES 的业务逻辑重构对系统集成活动的影响。

### 3.5 本章小结

为了实现离散制造执行系统的可重构，在语义网关系统支持下，提出了业务实体、业务逻辑接口和业务逻辑实现的分离定义和配置时编译策略，通过业务实体与业务逻辑间动态注入和业务实现方法的调用拦截，实现了业务实体和业务逻辑的可重构。



## 4 基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构研究

### 4.1 引言

MES 系统不是孤立地运行的,它必然存在与其它信息系统集成的需求。语义网关作为系统间语义集成的平台,能够从语义上支持 MES 系统的信息集成和服务集成。基于语义网关的可重构集成就是要充分利用 MES 系统与语义网关在语义集成上的优势,通过对系统集成关系的重构,满足与不同系统的语义集成需求。MES 的集成分为信息集成和服务集成,信息集成实现制造数据在异构系统间的共享,服务集成实现异构系统间功能服务的语义互操作,并且所有的集成活动都在语义网关的支持下进行。MES 系统的集成行为是通过配置来定义,而不是编码的形式,因此通过对集成配置信息的修改就可以重构 MES 系统与其它信息系统的集成行为。

随着制造业信息化的不断深入,信息化技术在制造企业的业务活动中发挥着越来越重要的作用。一方面制造企业各个业务环节对信息化系统的依赖日益加深,企业内部的设计活动、工艺活动、管理活动和制造活动都在相应的信息系统支持下开展;另一方面制造业信息化分期实施和信息技术不断发展等因素,使制造企业内部存在大量的信息化系统,由于制造信息系统的开发与实施缺乏统一的行业标准,这些信息系统大都由不同的服务商基于自己对业务的理解来开发与实施,因此,制造企业信息系统间普遍存在异构,为了发挥信息系统的整体效益,制造企业迫切需要通过实现信息系统间的集成<sup>[114]</sup>。同时面对复杂多变的市场环境,企业必须能够随时调整制造业务活动以满足市场的需求,这些业务活动的执行离不开信息化系统的支持,这都对信息系统间集成与协同能力提出了更高的要求。

伴随着计算机集成制造的发展,系统间的集成技术也被广泛地研究,文献<sup>[17]</sup>研究了基于 COM/DCOM 的 PDM 与 ERP 分布式信息集成方法,文献<sup>[20]</sup>提出了基于 CORBA 和 XML 技术的 PDM/CAPP 系统集成框架,文献<sup>[115]</sup>提出了一种基于 Web 服务的流程工业遗留系统信息集成模型,这些传统的互操作技术较好地解决系统间的互联互通,但是由于它们通过严格契约规范集成接口和集成实现,因此系统间的集成关系必须保持长时间的稳定。面对现代制造企业复杂的业务集成需求,要求制造信息系统也必须能够支持企业业务调整,因而传统的紧耦合集成方式已难以满足企业需求。针对目前企业面临的集成难题,学术界进行了大量的研究,如文献<sup>[116]</sup>提出了基于事件的中间件的智能物件集成方法,文献<sup>[117]</sup>提出了面向业务流程的服务访问代理集成方法,文献<sup>[118]</sup>则研究了模型驱动与面向服务架构间的集成方法。同时,基于语义的集成、面向服务架构是当前的热点研究领域,如文献<sup>[119]</sup>研究了面向对等语义网格的柔性、自适应的集成方法,文献<sup>[120]</sup>研究了基于本体映射的企业语义集成方法,文献<sup>[121]</sup>对面向服务架构进行了语义扩展来进行资

源和服务的集成，文献<sup>[122, 123]</sup>研究了面向服务架构的集成应用与技术，文献<sup>[124]</sup>提出了支持语义互操作的中间件技术与多视图—嵌套本体映射的高层体系结构。综合以上文献，可以发现当前研究内容或侧重于系统的集成架构，或基于集成架构进行语义扩展，对于解决不同系统间的语义问题主要依靠本体技术。然而本体的结构定义复杂，其构建具有较强的专业性，一般用户难以建立合理的本体，同时不同人员构建的本体间依然存在语义异构问题，这些都是采用本体技术进行系统集成不可忽视的难题。

## 4.2 基于语义网关的离散制造执行系统信息集成可重构

### 4.2.1 离散制造执行系统的制造信息集成需求分析

当前制造企业所采用的制造信息系统普遍采用关系数据库存储各种制造数据，制造信息系统通过访问数据库中的业务表和数据字段来对各项业务数据记录进行 CRUD 操作，因此制造信息系统间的信息集成最终会体现在关系数据库间的数据集成上。同时数据库的模式结构和信息系统实现代码在系统开发时就会被确定，因此制造信息系统与其对应数据库的模式结构具有紧密的耦合性，难以进行灵活调整来满足日益复杂的异构制造系统间信息集成需求。

针对 MES 与不同制造信息系统间的数据信息集成需求，当前集成实现主要采用两类方法，一类是采用制造信息系统本身提供的集成接口进行信息间的集成，另一类则是通过数据库间的数据导入导出来进行信息的集成，这两类信息集成方法能够在一定程度上解决制造企业面临的信息集成需求，但在日益复杂的制造系统集成环境下依然存在如下问题：

#### ① 制造信息系统提供的有效集成接口不足。

由于系统的集成接口在设计时就已确定，必然难以全面考虑到系统未来的集成需求，当面临新的集成需求时，则大多需要软件开发商进行二次定制开发，从而增加系统集成成本，另外对于某些遗留的系统而言，甚至无法通过二次开发来提供集成接口。

#### ② 制造信息系统集成接口间存在互操作异构。

当不同的制造信息系统基于不同的技术平台来开发实现时，必然会带来接口间互操作的异构问题，如采用 Java 技术开发的系统无法直接访问基于 DCOM 技术实现的系统，必须在它们之间额外建立一层集成层，集成层的建立则增加它们之间的耦合性和复杂度。

#### ③ 导入导出的数据时效性无法得到即时保证。

数据库间的数据导入导出一般采用专门定制的工具实现，这类工具大多通过周期性地定时访问目标数据库来进行数据库间的数据信息集成。这种数据库操作

一般在系统空闲或维护等特定时间段进行,因此难以实时进行数据间的同步集成。

④ 制造信息系统间的信息集成关系缺乏柔性。

系统间集成过程的实现依赖于专业技术人员开发的各种组件和工具,这些组件和工具大多是针对特定的集成需求开发的,这导致它们只能解决特定的集成问题,静态代码的实现则又阻止了系统用户对信息集成关系的调整,从而无法按需进行集成关系的重新定义。

⑤ 制造信息系统间存在信息语义异构问题。

制造企业的信息系统大多由不同的开发商提供,由于系统的设计缺乏统一的标准,开发商一般按自己的业务理解定义信息系统的结构,导致信息系统在数据的交换上存在语义的异构,从数据库的角度来看则表现为用户表名和字段名称的差异,从业务的角度来看则表现在数据内涵上的差异。

针对上述集成面临的问题,有必要探索一种无需对制造信息系统进行专业技术性强的额外开发即可实现 MES 与异构系统间基于语义的松耦合、动态的可配置集成方法。

结合上文对制造系统信息集成需求的分析,论文提出了一种基于语义网关的制造信息可配置集成方法,通过系统用户的可视化配置就实现 MES 系统与异构系统间基于语义的信息集成,其集成框架如下图 4.1 所示。



图 4.1 基于语义网关的异构系统制造信息可配置集成框架

Fig.4.1 Manufacturing information reconfiguration integration framework of semantic gateway based heterogeneous systems

基于语义网关的制造信息可配置集成框架主要由应用系统层、数据监控配置

层、应用系统集成代理、集成活动配置层、语义网关、公共平台层和配置使能工具等组成。

**企业应用系统层：**应用系统层由制造企业内部参与集成的各种制造信息系统组成，它们一方面是集成资源的提供者，同时又是集成资源的消费者，应用系统通过向应用集成代理开放自有的数据库来实现制造信息在不同系统间的集成，它们由 MES 与其它异构系统组成。

**数据监控配置层：**数据监控配置层负责对数据库的元数据进行识别，配置应用系统向外部提供的集成资源，并为数据字段对应的元数据配置语义描述从而为元数据建立语义信息，同时根据应用系统的集成需求实时动态配置数据操作监控需求，针对数据库系统配置数据捕获触发器脚本。

**应用系统集成代理：**应用系统集成代理是部署在制造企业应用系统上负责实现与制造信息系统数据库互操作的中间代理，它从数据库中分析提取模式元数据后交由数据监控配置层进行配置处理，并将它们注册到语义网关，通过对消息目录的监控实时获取被捕获的数据变更消息进行预处理并发送给语义网关，对语义网关发布的集成消息进行操作响应。

**集成活动配置层：**集成活动配置层实现对集成活动的具体定义，通过配置数据状态转移条件和定义条件逻辑运算关系建立集成活动的触发条件，针对不同系统集成需求配置输入数据概念的内容投影定义集成需求的内容，并配置当前投影内容在目标数据库上的数据操作，为集成触发条件、集成操作和集成活动建立关联关系。

**语义网关：**语义网关负责概念的语义注册和语义关系维护，通过语义解析与转换实现不同系统间概念的语义理解，同时实现与应用集成代理的消息通讯，并维护消息的持久化，通过对接受消息的分析处理触发配置的对应集成活动，并在按配置内容封装数据集成消息后分发给目标应用集成代理。

可配置集成框架描述了各个部分的组成关系，在语义网关的支持下，通过应用集成代理层、数据监控配置层、集成活动配置层等部分的配合实现制造信息的可配置集成。

#### 4.2.2 离散制造执行系统与异构系统的数据库元数据语义注册

MES 与制造信息系统的运行离不开数据库系统的数据持久化支持，在不同系统间进行可配置的制造数据信息集成则离不开对应用数据库模式结构的分析。

由于制造信息系统的数据库用来存储制造业务数据，因此其数据库的模式结构与制造业务对象具有紧密的相关性，制造业务对象与数据库中的用户表和字段大多存在对应关系，元数据分析就是从数据库中分析表单和字段与制造业务对象的对应关系。



对于 MES 系统而言,元数据分析主要有两种方法,它们依据 MES 系统的开发模式确定。对于基于语义网关开发的可重构 MES 系统,由于其业务系统的元数据在系统配置就被注册在语义网关中,故其数据库的元数据可以直接从语义网关中获取,无需访问其对应的数据库。对于采用传统模式开发的 MES 系统,由于语义网关预先没有维护其元数据语义,则必须进行数据库层的分析。

通过应用集成代理对制造信息系统数据库的元数据分析,配置系统可以获得信息系统存储数据的用户表及其包含的字段等详细信息,然而数据库中元数据的表单与字段名称等定义大多与业务对象的概念存在差异,数据库从系统开发的角度来考虑元数据定义,比如有的 ERP 采用无明显意义的编码“MOCTA”、“TA006”等来定义表单和字段名称,而业务对象则从系统用户的角度来考虑业务定义。在信息系统开发商提供的数据字典和帮助文档等资料辅助下,配置用户可以识别出每个表单和字段对应的制造业务概念,从而能够准确地进行语义标注,使 MES 系统与异构系统间的集成工作基于普通用户更易于理解的业务概念,为 MES 数据进行系统间的可配置集成可行性打下基础。除了进行语义标注外,还要进行是否公开信息配置,公开信息表示当前配置项可以参与系统间的集成,元数据则会被提交到语义网关进行注册。在配置使能工具的支持下,应用集成代理对 MES 等系统数据库元数据的分析和语义标注结果如图 4.2 与 4.3 所示。

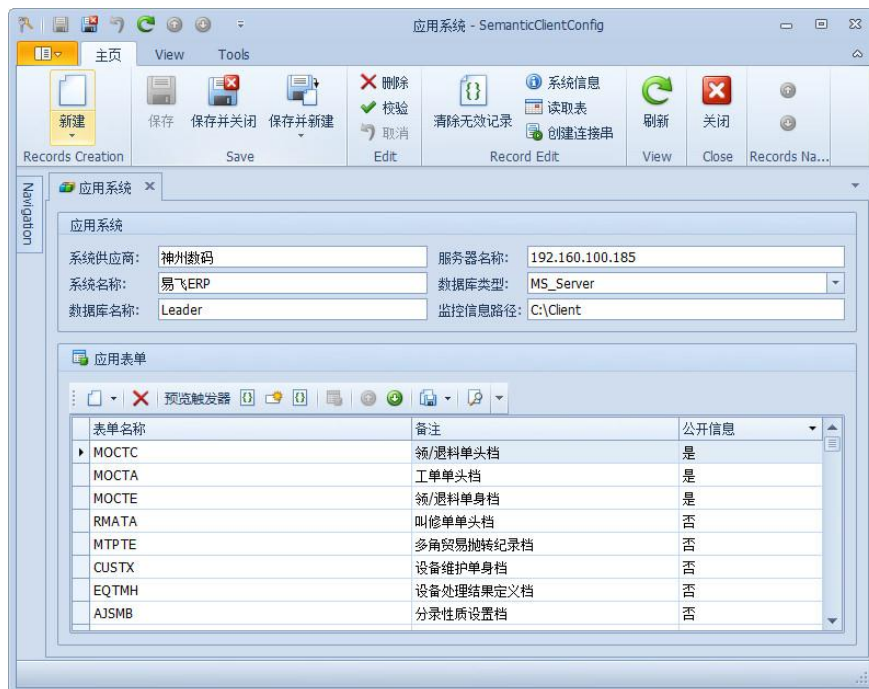


图 4.2 制造信息系统数据库结构元数据分析与语义标注 (1)

Fig.4.2 Structural analysis and semantic annotation of database metadata (1)

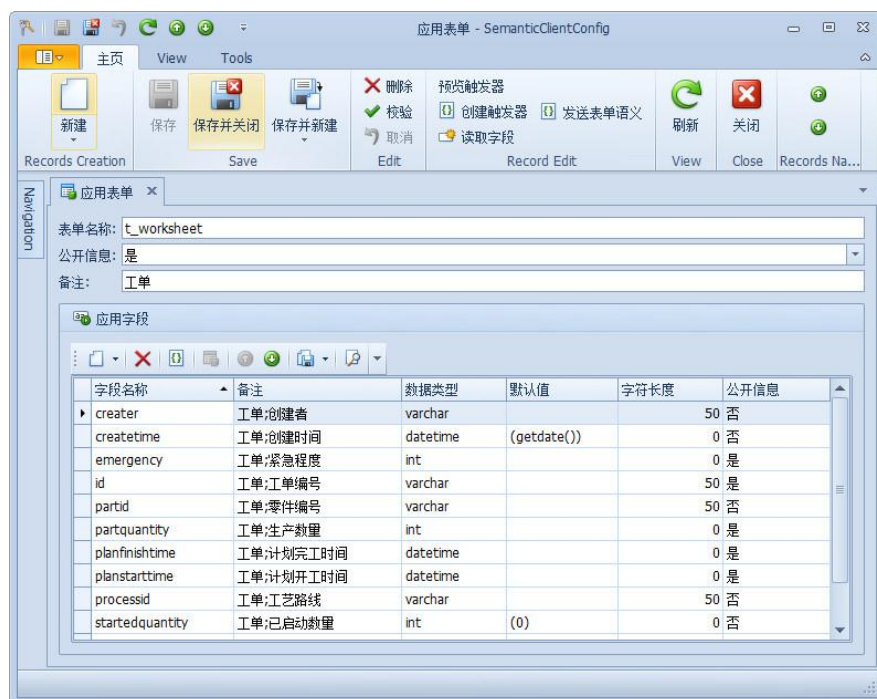


图 4.3 制造信息系统数据库结构元数据分析与语义标注 (2)

Fig.4.3 Structural analysis and semantic annotation of database metadata (2)

元数据的每个表中包含的数据字段称为数据概念，通过数据库元数据分析得到的制造信息系统数据概念可以分为三类，分别是关键概念、一般概念和私有概念。关键概念指能够唯一地识别业务对象的概念，如工单中的“工单编号”概念，它们必须被注册到语义网关中，语义网关通过关键概念与信息系统的特定数据记录建立语义联系；一般概念指被注册到语义网关中的非关键数据概念，它们一般描述数据记录的具体状态，如工单中的“生产数量”概念；而私有概念指未被注册到语义网关的业务概念，仅能被所属的信息系统自己理解，如工单中的“创建时间”概念。

为了在 MES 与其它系统间能够进行基于语义的信息集成，必须在 MES 与异构系统的数据概念间建立语义联系。语义网关提供的语义概念则为不同制造系统提供了一种语义交换标准，制造信息系统的数据概念可通过分别与语义概念建立语义映射关系来实现不同系统数据概念间的理解与交换，MES 与异构系统的语义配置过程如图 4.4 所示。

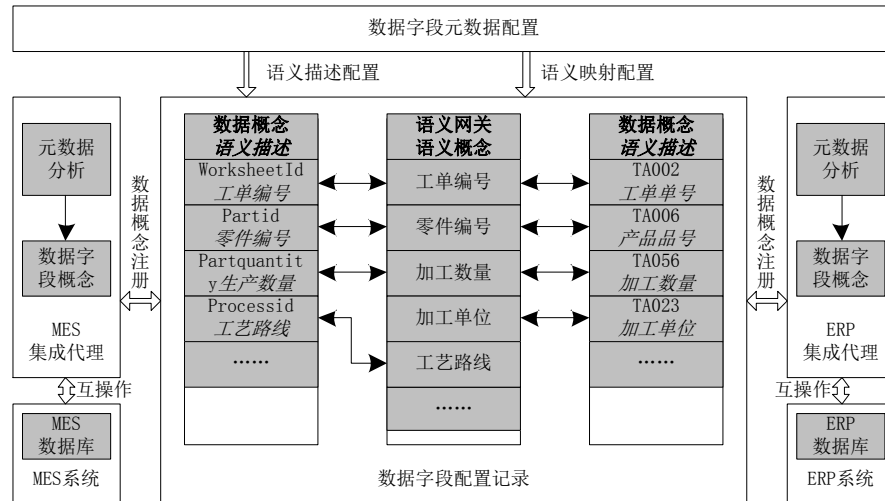


图 4.4 MES 与异构系统数据概念的注册与语义映射

Fig.4.4 Data concept registration &amp; semantic mapping of MES &amp; heterogeneous systems

依据信息系统数据概念在网关中注册的分类，语义网关的概念分为关键概念和一般概念两类，分别对应了所有信息系统注册的关键概念和一般概念。对具有数据集成需求的不同信息系统而言，它们的关键概念必然存在语义联系，而一般概念则大多存在语义联系。

在数据库元数据的分析基础上，应用集成代理对元数据的是否公开信息配置可以控制应用系统的集成资源对信息集成的参与意愿，在语义标注的基础上配置数据概念间语义联系，为 MES 与异构系统间的语义集成提供了语义解析与转换基础。

#### 4.2.3 离散制造执行系统与异构系统集成数据变更信息采集

由于传统的 MES 等制造信息系统一般在设计时就确定了自己的集成接口规范和集成实现，当系统面临新的信息集成需求而系统原有接口又无法满足时，此时制造信息系统间的信息集成则主要依赖于二次开发来定制集成接口和集成实现，从而在不同的系统间加深了集成的耦合性，同时这种信息集成实现依赖于专业开发人员的技术支持，生成的硬编码二进制实现代码只能解决当前的集成个案。面对越来越复杂的 MES 系统与其它异构信息系统的信息集成需求，这种集成方式难以应需而变，无法实现集成的柔性动态性。同时集成的实现过程依赖于信息系统用户无法接触的程序代码，导致系统用户对集成的过程缺乏详细的了解，为系统集成的后续调整增加了复杂度。

MES 等制造信息系统主要由应用程序和数据库两大部分组成，当通过应用系统的二次开发来实现信息集成的途径难以满足当前的集成需求时，从应用数据库的角度来考虑信息集成则提供了另外一种思路。当前用户对主流数据库的业务

数据处理扩展主要采用两种途径，一种是为数据库定制开发各类 DLL 组件，通过注入数据库系统来改变业务数据处理的逻辑，如在 .Net 平台的支持下可以为 SQL Server 编写数据库处理 DLL 进行注入，另一种则是创建触发器（存储过程）来处理业务数据，这种实现方法具有较好的数据库通用性。

由于注入数据库的 DLL 模块为预编译的静态代码，其对数据处理缺乏柔性，是一种只适合特定数据库且必须长期保持稳定的业务数据处理方法，而数据库的触发器则可以在运行时灵活修改，并且可以通过 SQL 语句实时部署到数据表上，因此采用触发器实现业务数据的处理具有更加优良的动态集成适应性，通过对触发器的配置就能实现对数据库数据处理的控制，基于触发器的数据变更可配置监控与捕获处理如图 4.5 所示。

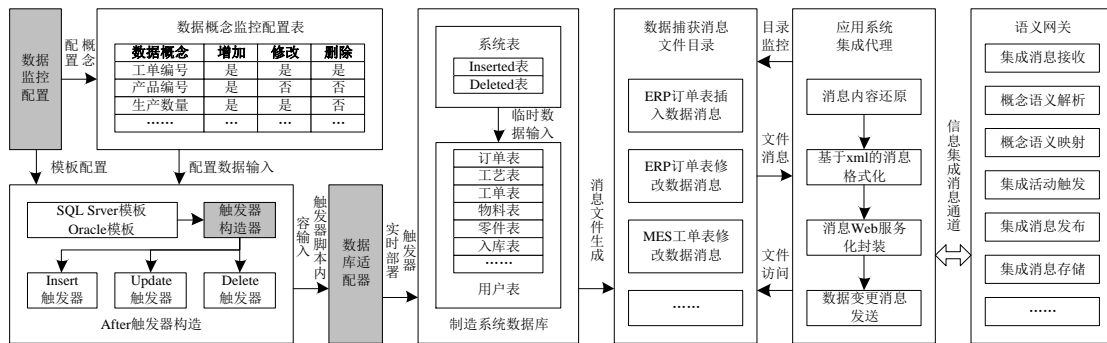


图 4.5 可配置的触发器构造与数据监控捕获处理

Fig.4.5 Reconfigurable Triggers construction & data capture monitoring and processing

首先系统用户根据业务需求从数据概念表中确定需要参与集成的概念，然后从数据的增加、修改与删除三个方面定义数据记录状态变更时是否需要进行数据监控，被选中的概念将包含到被对应的监控触发器中去，如关键概念“工单编号”必须监控其所有数据变更操作，则必须分别配置其增加、修改和删除操作，从而使其变更内容被该工单表上所有监控触发器生成的消息所包含。

对于数据库而言，当数据记录进行变更操作时，该操作的详细信息会被当前数据库系统的内部机制临时存储，而这种机制则为触发器获取数据操作信息提供了内置支持。以当前制造企业采用的主流数据库 SQL Server 和 Oracle 为例，SQL Server 提供了 Inserted 表和 Deleted 表，Inserted 表内包含了当前记录变更后的新数据内容，Deleted 表包含了当前记录变更前的旧数据内容，因此插入操作的数据内容可从 Inserted 表获取，修改操作的数据内容可从 Inserted 表和 Deleted 表获取，删除操作的数据内容可从 Deleted 表获取，类似的，Oracle 则提供了 old 和 new 两个对象存储记录变更前后的临时数据。由于数据库系统的原生支持，采用触发器捕获数据变更内容则成为了现实。

根据数据库触发器运行在数据变更前后的顺序, 触发器可以分为 Before 和 After 两类, Before 表示发生在数据变更前, After 表示发生在数据变更后, 由于信息的集成必须不得干扰应用系统业务的执行, 故触发器必须采用 After 类型, 在数据记录已经完成变更过程后再采集数据内容, 保证内容的有效性。根据概念监控表的集成配置信息, 在数据库触发器模板支持下, 触发器构造器能够自动针对目标用户表按需生成 After Insert、After Update 和 After Delete 三个触发器的脚本内容, 分别对应数据库的增加、修改和删除操作, 这些触发器脚本由应用集成代理的数据库适配器自动部署到应用数据库上, 从而实现数据变更内容的实时捕获。

应用数据库中部署的触发器能够对数据变更信息实时采集, 由于应用数据库系统与语义网关分别为互相独立的系统, 为了将这种数据变更的实时通知给语义网关, 则有必要对采集得到的数据信息进行实时监控, 保证数据信息的时效性。

当数据变更发生后, 数据采集触发器自动执行并获取数据变更内容, 然后进行特殊字符替换等内容预处理, 保证采集得到的数据内容符合数据输出规范后, 再根据配置的、被应用集成代理监控的消息文件目录中生成包含当前采集内容的数据文件, 当数据文件成功创建后, 应用集成代理能接受到包含当前文件名的文件创建消息, 然后根据文件名访问该数据变更内容文件, 从而获得文件中的输出内容。由于文件内容经过数据库系统的预处理, 因此必须采用相同规则对内容进行还原, 再根据 xml 消息模板进行消息格式化, xml 模板格式如下所示。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  elementFormDefault="qualified" attributeFormDefault="unqualified">
  <xs:element name="Message">
    <xs:complexType>
      <xs:sequence>
        <xs:element name="Part" maxOccurs="unbounded">
          <xs:complexType>
            <xs:attribute name="Key" use="required"/>
            <xs:attribute name="NewValue" use="required"/>
            <xs:attribute name="OldValue" use="required"/>
          </xs:complexType>
        </xs:element>
      </xs:sequence>
    </xs:complexType>
  </xs:element>
  <xs:attribute name="Id" use="required"/>
</xs:schema>
```

```

<xs:attribute name="Action" use="required"/>
<xs:attribute name="Time" use="required"/>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>

```

模板中根节点 **Message** 的 **Id** 表示当前消息的唯一编号，**Action** 表示数据变更中的操作，**Time** 表示消息生成时间，子节点 **Part** 表示一个数据概念，其中 **Key** 表示概念的唯一编号，**NewValue** 表示变更后的数据，**OldValue** 表示变更前的数据。经过格式化后的消息再按 Web 服务通讯要求进行消息封装，封装的数据变更消息由应用集成代理通过消息通道发送给语义网关进行数据集成的后续处理。

#### 4.2.4 离散制造执行系统与异构系统制造信息集成活动实现

应用集成代理负责 MES 与异构系统的数据变更信息的捕获采集，语义网关则负责数据信息与其它制造信息系统的集成处理。由应用集成代理发送给语义网关的数据消息中包含了数据变更的操作类型和数据变更前后的信息内容，同时应用集成代理提供的数据信息由应用信息系统自己独有的语义表示，由于不同系统间的语义异构，它们不能直接被用来进行信息集成处理，必须先由语义网关根据数据概念与网关概念间的映射关系进行语义映射转换，将应用系统独有的语义解析转换为基于语义网关概念的标准语义，从而支持在不同系统间实现语义的自由等价转换。

当应用系统的业务数据发生变更时，语义网关能够自动接收到数据变更信息，该信息包含了应用集成代理配置的所有数据概念，然而不同信息系统对集成的需求大多不同，并非所有的数据概念都需要进行系统间的数据集成，因此必须建立一种集成控制机制来满足不同系统集成活动的按需配置。由于数据变更消息包含了数据变更前后各个数据概念的详细数据信息，因此采用基于数据概念状态的集成条件控制则具有可行性，通过为特定的数据概念配置集成条件则可以有效地对集成活动的进行实现触发控制。

基于数据概念的集成条件主要分为范围条件、枚举条件、断言条件和转移条件等。范围条件定义了数据概念的取值区间，用于描述连续变化的数据状态，比如完工数量：大于 0；枚举条件定义了数据概念的有限取值集合，用于描述具有固定取值特征的数据状态，比如工单状态：属于“未下发、已下发、已开工、已完工”；断言条件对数据概念进行等价判定，用于描述各种数据当前状态，比如审核状态：等于已核；转移条件定义数据概念的取值状态变化，描述了数据概念从一种状态到另一种状态的过程，比如审核状态：未核变为已核。

通过集成条件的建立，语义网关可以基于数据变更消息包含的数据信息进行

条件逻辑运算处理。集成条件的基本逻辑处理主要分为单一条件的符合（Equal）与不符合（Not）运算，两个条件间的或（Or）、加（And）、减（Sub），以及基于它们的多个条件间的复合逻辑运算。“Equal”表示满足条件，“Not”表示不符合条件，“Or”表示满足两个条件之一，“And”表示同时满足两个条件，“Sub”表示满足前条件而同时不满足后条件，默认的单一条件为 Equal 运算。

基于语义网关可配置的信息集成活动实现如图 4.6 所示，信息集成活动实现的可配置主要从信息集成活动声明配置、信息集成触发条件配置、信息集成操作定义配置和信息集成活动关联配置等几个方面展开。

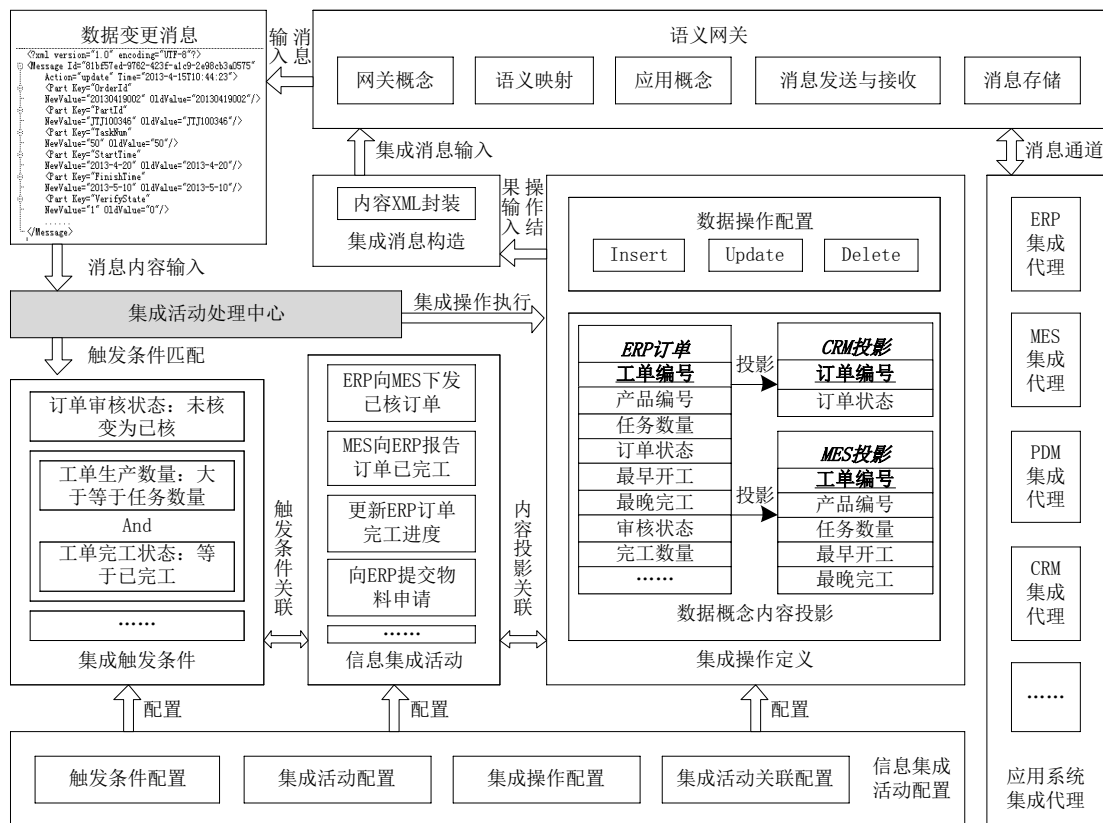


图 4.6 基于语义网关的制造信息集成活动可配置实现

Fig.4.6 Semantic gateway based reconfigurable manufacturing information integration activities

信息集成活动的声明是对异构系统间信息集成需求的定义，每个集成活动都对应了一种系统集成需求，通过集成活动的新增配置可以在异构系统间建立集成联系，通过对集成活动运行的允许与禁止配置可以实现对集成关系的同步控制。语义网关从应用集成代理接收的消息内容各异，为了能够根据语义网关输入的不同数据变更消息来正确地执行不同信息集成活动，必须为信息集成活动的触发运行配置适当的触发条件，触发条件由一或多条数据概念状态条件组成，触发条件

进行逻辑运算后的结果将决定是否进行与当前活动关联的后续集成操作行为。

集成操作定义则是针对不同信息系统各异的集成内容需求,通过为每个信息系统进行特定的数据概念投影配置和集成操作映射来实现。概念内容投影过程就是从被语义网关进行语义处理后的数据变更消息内容中选择所需的数据概念以及对应的信息变更前后数据内容,组成各自的数据集成内容,同时配置结果还可以对输入的消息进行数据完整性检查,确保被投影的概念存在。由于变更信息中的数据概念由关键数据概念和一般数据概念组成,而关键数据概念能够唯一地区分数据记录,因此数据属性投影必须包含有关键数据概念,一般数据概念则可以按需组合,从而满足面向不同信息系统集成内容的可配置。如来自 ERP 系统的订单变更消息中“工单编号”为关键概念,“产品编号、任务数量、审核状态”等为一般概念,故“工单编号”必须投影在所有的应用系统集成内容中,其它的一般概念则可以按需自由组合,从而生成不同的概念投影结构来满足各异的系统集成需求。数据操作配置则是指定当前集成消息在目标应用系统的处理方法,分别对应目标系统数据库表上的 Insert、Update 和 Delete 操作。

当语义网关收到数据变更消息并进行语义处理后,集成活动处理中心会收到该消息,然后根据当前消息的内容逐一进行触发条件匹配,一旦存在满足当前消息的触发条件,则通过触发条件关联配置找到需要运行的集成活动,然后执行该集成活动所关联的集成操作,最后对获取的数据概念和数据操作等集成内容进行封装,生成集成消息提交给语义网关,由语义网关负责集成消息的语义处理与发布。

### 4.3 基于语义网关的离散制造执行系统服务集成可重构

#### 4.3.1 离散制造执行系统的制造服务集成需求分析

随着制造业信息化单元技术的不断成熟和深入实施,制造企业的应用系统越来越多,覆盖面越来越广,同时由于制造业信息化分期实施的特点,造成制造企业信息系统的异构程度加深,使 MES 等制造系统普遍面临集成问题。另外,由于企业不断的发展,要求信息系统能快速地适应企业业务的变化,使得制造企业对系统的灵活集成提出了更高的要求,同时制造业的专业化分工越来越明显,服务化已成为制造业的发展趋势之一<sup>[125]</sup>,制造企业间对制造业务的协作需求不断深入。

制造信息系统是制造企业进行各项业务活动的载体,信息系统间的集成是制造企业发挥系统集成效应,进行业务协同的前提,因此信息系统间的集成一直是国内外关注的重点<sup>[126]</sup>。当前,信息系统间的服务集成主要基于中间件技术与 Web 服务技术,如文献<sup>[20]</sup>基于 CORBA 和 XML 技术实现 PDM/CAPP 系统的集成,文献<sup>[17]</sup>通过 COM/DCOM 技术实现 PDM 与 ERP 系统集成,文献<sup>[115]</sup>提出了一种基于



Web 服务的流程工业遗留系统信息集成方法, 面对越来越复杂的集成需求, 语义技术也开始引入系统间的集成<sup>[127]</sup>, 因此大多信息系统集成研究工作围绕 Web 制造服务或语义 Web 制造服务的发现、匹配与组合而开展。如文献<sup>[24]</sup>提出了一种基于服务质量与用户推荐的服务推荐模型从而选出最优的 Web 制造服务, 文献<sup>[128]</sup>研究了基于 Chord 的带有 QoS 的语义 Web 服务发现方法。如文献<sup>[129]</sup>在形式化的基础上研究了制造云服务的智能搜索与匹配, 文献<sup>[130]</sup>通过计算服务属性的语义相似度进行 Web 服务的匹配, 文献<sup>[131]</sup>则在匹配模型的基础上分别从参数、属性与综合三个阶段考察云制造服务的语义匹配, 文献<sup>[132]</sup>提出一种基于语义匹配关系确定组合结构的方法, 文献<sup>[133]</sup>提出一种基于有限状态自动机的 Web 服务组合兼容性分析及修正方法, 文献<sup>[134]</sup>采用语义 Petri 网验证 Web 服务组合语义一致性, 文献<sup>[135]</sup>应用动态描述逻辑的推理机制研究了语义 Web 服务的自动发现和自动组合, 文献<sup>[136]</sup>提出一种半自动化的遗留系统的服务识别方法。围绕信息系统间的集成, 当前的研究工作虽然对制造服务间的互操作问题、服务的语义发现、匹配与组合等进行了大量的探索, 并取得了较多的成果, 但是制造信息系统间的服务集成需求依然没有得到很好的解决。

①MES 服务与企业内外来源分散的制造服务集中管理的需求。

MES 等系统面临的制造服务由企业内外众多的信息系统提供, 这些系统提供的服务集成接口只由系统本身公开, 当用户需要进行系统集成时, 则必须从分散的系统中查询符合集成需求的接口, 难以实现服务的快速检索和访问。同时制造信息系统一般只能将 Web 服务接口进行注册发布, 而采用其它技术实现的集成接口则被系统隔离, 从而减少了系统间可用集成资源。

②MES 服务与其它制造服务间消除集成中的语法和语义异构需求。

制造企业的 MES 与其它信息系统一般由不同的服务商提供, 由于服务商们对制造业务的理解和定义缺乏统一的标准, 因此它们大多基于自己的业务知识来设计制造信息系统, 从而带来系统间的服务集成接口的异构, 这种异构除了体现在接口的语法上, 更加体现在参数的语义内涵上, 然而当前的研究主要侧重于接口结构与参数词汇间的文本匹配, 对于参数内涵间的语义处理则缺乏深入探讨。

③MES 服务与技术平台异构的制造服务统一调用的需求。

MES 与企业的异构信息系统大多采用不同的技术平台实现, 平台的异构导致它们提供的集成接口间不能直接实现互操作, 为了进行系统集成, 大多针对每种平台开发专用的接口转换设施或对接口进行二次封装, 从而增加了集成的复杂度, 因此需要提供一种无需二次开发又能够以一致的方式访问这些制造服务集成资源的途径。

④MES 服务与其它制造服务集成的高可靠性需求。

当前 MES 等制造服务间的集成大多采用一对一的集成过程实现，每个制造服务只有一种集成实现，当该集成实现发生故障时则会导致制造服务的失效，因此在日益复杂的集成条件下有必要提供制造服务的多种功能等价集成实现，从而使制造服务具有更好的集成可靠性。

#### 4.3.2 离散制造执行系统与异构系统集成功能服务统一语义注册

除了 MES 系统外，制造企业内外还存在大量支持制造业务运作的信息系统，为了进行系统间的集成，这些信息系统提供了大量的集成接口，由于这些集成接口的提供与实现来自不同的信息系统，每当 MES 系统存在集成需求时，MES 用户都必须从众多分散的系统中查询分析可用的集成接口，这种集成接口的分散来源大大增加了系统间的集成接口的获取成本，同时这些集成接口均按它们来源系统的接口规范生成，风格各异的集成规范则增加了 MES 用户的集成实现时间，因此有必要提供一种集成服务的集中管理方法，支持各种系统的用户从统一的服务来源中按一致的风格获取集成服务。

在语义网关的支持下，制造服务的语义注册则为 MES 与制造企业内外的各类功能服务的集成接口提供了统一的注册发布平台，并为它们与制造服务建立服务映射关系，从而支持了 MES 等企业内外制造信息系统对各种功能服务的统一访问，增加了系统间的可集成服务资源，为后续的服务语义处理提供了信息基础，按传统模式开发的 MES 等各种系统的制造服务在语义网关中的注册如图 4.7 所示，基于语义网关开发的可重构 MES 系统由于业务接口已被语义网关维护而无需二次提取接口元数据。

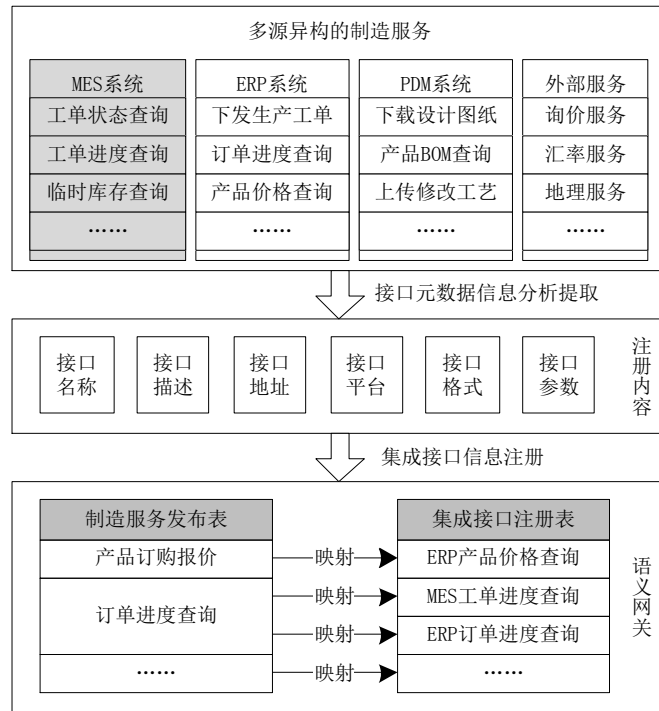


图 4.7 MES 与多源异构集成接口在语义网关中的注册

Fig.4.7 Registration of MES &amp; multi-source heterogeneous integrated interface in Semantic gateway

为了能够进行服务注册，信息系统必须向语义网关提供可访问的参与集成的接口，通过对集成接口的元数据分析，语义网关可以获得集成接口需要在语义网关中注册的详细内容，主要由服务名称、服务描述、服务地址、服务类型、接口格式与接口参数等信息组成。接口元数据的获取可分为两种，一种由语义网关通过组件分析技术从接口组件中提取，如 .Net 组件接口可以通过反射技术获取元数据信息，Web 服务则可以通过 WSDL 文件获取元数据信息，另一种则由用户依据信息系统支持资料手动配置接口生成，这种方法适用于无法由语义网关进行自动分析的组件接口，比如一些遗留的系统接口。分析得到的元数据中，服务名称是服务在实现组件中的完整命名，包括了接口的命名空间等信息；服务描述详细解释服务的功能与适用条件；服务地址定义服务具体实现的访问地址或路径；服务类型定义服务的实现技术平台，用来指导组件访问方式；接口格式定义了服务的输入与输出语法规则，主要是参数的数据类型与参数位置等信息；接口参数定义各个参数的在其来源系统中的概念语义内涵，这些信息是对集成接口进行正确调用与语义处理的基础。

在语义网关集成接口注册表中注册了参与系统间集成的接口元数据详细内容后，还需在语义网关中为其建立对应的制造服务发布接口，并在它们间建立服务映射关系。由于企业内外存在多个信息系统，它们可能对某些制造服务都提供了

类似的实现，故网关发布的制造服务可由多个系统提供具体实现，因此当新注册的集成接口在语义网关中已存在相同功能的制造服务发布接口时，只需在它们之间建立服务映射关系即可，同时这些等价的制造服务实现又大多具有类似的输入输出参数，这为它们基于语义网关输入参数间的同步执行提供了条件。

系统集成用户通过查询制造服务发布表来获取需要集成的制造服务，同时集成接口注册表对系统集成用户不可见。由于所有的制造服务都是通过语义网关来发布的，因此对参与集成的应用系统而言，制造服务的来源一致，系统集成用户无需关心该服务的具体实现细节，从而实现服务接口与服务实现的隔离。

#### 4.3.3 离散制造执行系统与异构系统制造服务参数语义映射

制造服务的注册提供了多源异构服务的统一发布和查询引用方法，当制造信息系统进行制造服务集成时，必然会涉及到该服务输入输出参数的处理。然而制造服务接口参数的语义由服务提供方定义，由于不同系统对制造业务理解的语义差异，这些参数的语义内涵在不同系统中很难保持一致，比如不同系统间计量单位的差异，报价采用的货币差异等，故当服务调用方无法按照自己的语义进行制造服务调用时，则必须进行参数间的语义转换。

当前制造服务的集成调用过程采用编译的静态代码实现，这种参数语义间的转换过程在编写集成代码时就被固定下来，当被集成接口的参数发生语义变化时，必然会导致集成关系的破坏，从而需要修改并编译集成处理代码，但是当前系统的开发普遍由专业开发商负责，集成关系的调整需要它们提供昂贵的专业技术支持，这必然增加企业信息化的成本。同时集成接口大多不止被一个系统调用，接口参数语义的变化涉及到所有调用该接口的系统，由于提供集成接口的系统很难知道具体哪些系统使用了该集成接口，故无法把这种接口变更通知到所有相关系统，这就会带来系统间错误的集成实现，造成制造业务的混乱。

为了处理这种参数语义间的异构带来的集成问题，有必要建立一种中立的语义标准作为所有系统的接口参数语义标准，故语义网关提供了参数语义概念标准，集成接口参数通过与语义网关概念标准间的语义映射来实现不同系统间参数语义的理解和转换。参数间语义映射方法如图 4.8 所示。

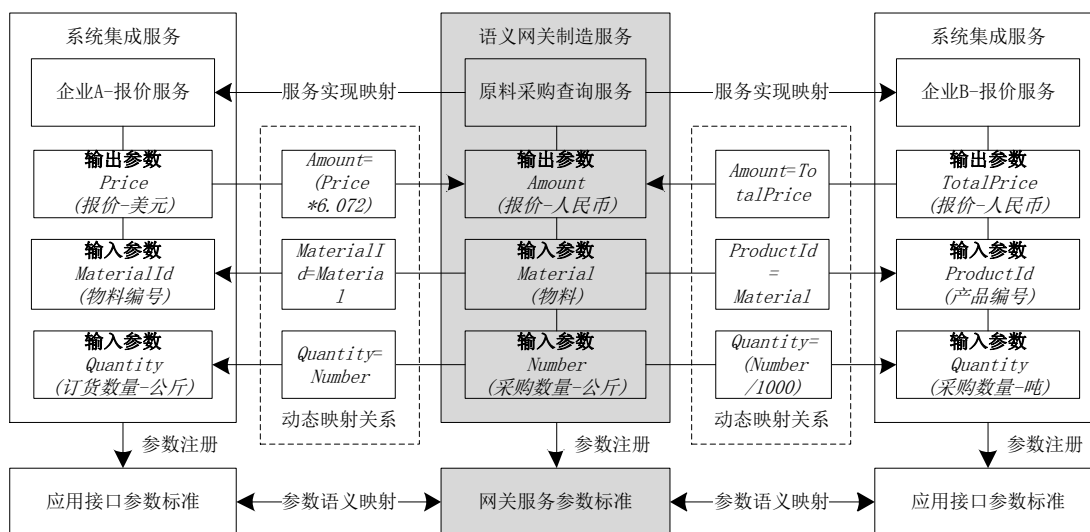


Fig.4.8 Semantic mapping of method parameters for manufacturing services

首先在语义网关中为制造服务的接口参数建立网关语义标准和应用语义标准, 参数的语义标准由四部分组成, 分别是决定参数间的语义映射方向的参数输入输出类型, 用于进行参数赋值的变量名称和描述参数具体语义内涵的语义解释, 用于进行参数语义补全的默认值等。然后在网关参数语义标准和应用参数间建立语义映射处理函数, 映射方向分为两类, 分别是输入参数从网关语义到应用语义的映射和输出参数从应用语义到网关语义的映射, 映射函数的内容由动态脚本实现, 并由语义网关负责脚本的动态编译与运行, 从而实现不同参数间的语义交换, 其中最基本的映射关系为等价赋值映射。

由于参数间的语义映射采用动态脚本实现,并由语义网关进行维护,从而将参数间的语义处理过程从信息系统的集成关系实现代码中分离出来,并可支持语义映射关系按制造业务的需求动态调整,以及实现部分业务逻辑处理。

当制造信息系统需要进行服务集成时，其只需按照语义网关提供的制造服务参数语义构造输入参数和处理返回值即可，无需考虑集成实现接口的参数语义，由语义网关负责输入输出参数与接口实现参数间语义的后续处理，这样只要语义网关提供的制造服务的参数语义维持稳定，调用该制造服务的集成实现代码就可相同地保持稳定。当制造服务关联的集成接口参数语义发生变化时，只需通过语义网关修改该接口的网关参数与应用参数间的语义映射处理逻辑就可实现参数间的语义转换，维持网关参数语义的前后一致，从而不影响外部系统对该服务的正确调用。

#### 4.3.4 离散制造执行系统与异构系统制造服务统一访问实现

当前制造服务普遍由强类型的静态语言实现，这类语言具有严格的语法约束，

只有完全通过软件系统的语法检查才能进行系统编译和执行代码，因此服务间的集成调用必须完全符合接口规范，与由用户约定的参数语义约束不同，语法约束由软件系统负责保证。

为了能够进行服务间的调用，服务调用方必须引用被调用的服务来获得服务的访问接口，同时基于静态代码实现的调用过程则被耦合进集成关系中去，导致服务地址和服务接口被固定下来难以进行后续按需调整。

由于采用的信息技术平台不同和各个制造企业与信息系统服务商对制造业务的理解与定义的差异，制造服务的设计没有统一的标准，因此不同的制造服务在技术平台与接口格式上大多存在异构。异构的技术平台和异构的接口规范导致系统间制造服务的集成带来众多集成问题。

①技术平台的异构。基于不同技术平台实现的集成接口无法互联互通，如采用 RPC 协议的 DCOM 服务与采用 HTTP 协议的 Web 服务之间无法实现直接的互相访问，为了进行服务的集成，它们必须对服务进行二次封装处理。

②接口变化的异构。接口名称的变化：由于在调用集成服务时必须指定服务的接口名称，因此对服务的调用关系与服务的接口名称自然会建立强耦合的联系，当目标集成服务发生变化时，必然需要修改服务调用实现代码来替换服务的接口名称。接口参数的变化：接口参数的变化主要表现为参数的个数不同和参数的位置不同，当接口的参数结构发生变化时必然也会影响系统间的集成关系，从而需要修改服务的集成实现。

③服务部署变化的异构。对集成服务的引用需要指定服务的实现地址，然而当服务的部署地址发生变化时，则必须更新服务的实现地址，从而需要修改服务的集成实现或重新配置服务描述文档。

由于服务间的集成由强类型的静态语言实现，这些变化必然带来集成关系的变更。

服务接口规范变化带来的异构问题主要产生于服务接口缺乏统一的标准，因此定义一个简洁而稳定的服务访问标准规范对减轻接口异构具有重要的意义，为此语义网关建立了一个名为 CallService 的 Web 服务，采用 Web 服务技术保证了该服务具有较好的可访问性，该服务接口原型为 `Public String CallService(String xml)`，服务只有一个输入参数和输出参数，其参数类型均为适应性好的字符串类型，输入参数的内容采用 xml 格式表达，xml 的 schema 如下所示。

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
<xs:schema xmlns:xs="http://www.w3.org/2001/XMLSchema"
  elementFormDefault="qualified" attributeFormDefault="unqualified">
  <xs:element name="CallService">
```

```

<xs:complexType>
  <xs:sequence>
    <xs:element name="Para" maxOccurs="unbounded">
      <xs:complexType>
        <xs:attribute name="Name" use="required"/>
        <xs:attribute name="Value" use="required"/>
      </xs:complexType>
    </xs:element>
  </xs:sequence>
  <xs:attribute name="ServiceId" use="required"/>
</xs:complexType>
</xs:element>
</xs:schema>

```

其中根属性 **ServiceId** 为服务在语义网关中生成的唯一编号，子节点 **Para** 为输入的参数，**Name** 为参数的名称，**Value** 为参数的值，当用户需要访问制造服务时，用户先从服务列表中获取集成服务的服务编号，再根据服务接口的参数在语义网关中的描述信息提供输入数据，然后构造符合 xml 格式模板的字符串作为输入参数，通过调用 **CallService** 服务提交对真实服务的访问请求。

参与集成的信息系统对所有制造服务的访问都通过 Web 服务 **CallService** 进行，它们并不直接访问被注册在语义网关服务列表的多源异构集成接口，因此采用 Web 服务的 HTTP 协议即可间接调用所用的服务，实现按 Web 服务方式访问内部组件服务，对集成接口实现组件的调用由语义网关负责，从而解决服务间技术平台的异构。同时，在服务集成的实现代码中，由于从部署地址固定的语义网关中引用固定的服务接口名称 **CallService** 和输入唯一的 xml 接口参数，因此不管服务的具体实现接口未来如何发生变化，服务集成调用代码在语法层次均可以保持稳定，而通过在语义网关中重新配置服务关联关系和参数语义映射关系就可实现其在网关发布服务的语义稳定中，从语法和语义角度均可保证采用 **CallService** 接口的集成实现代码长时间的稳定。

语义网关通过定义一个固定的 Web 服务接口解决了接口规范的异构问题，在此基础上对于具体服务调用实现的方法则如图 4.9 所示。

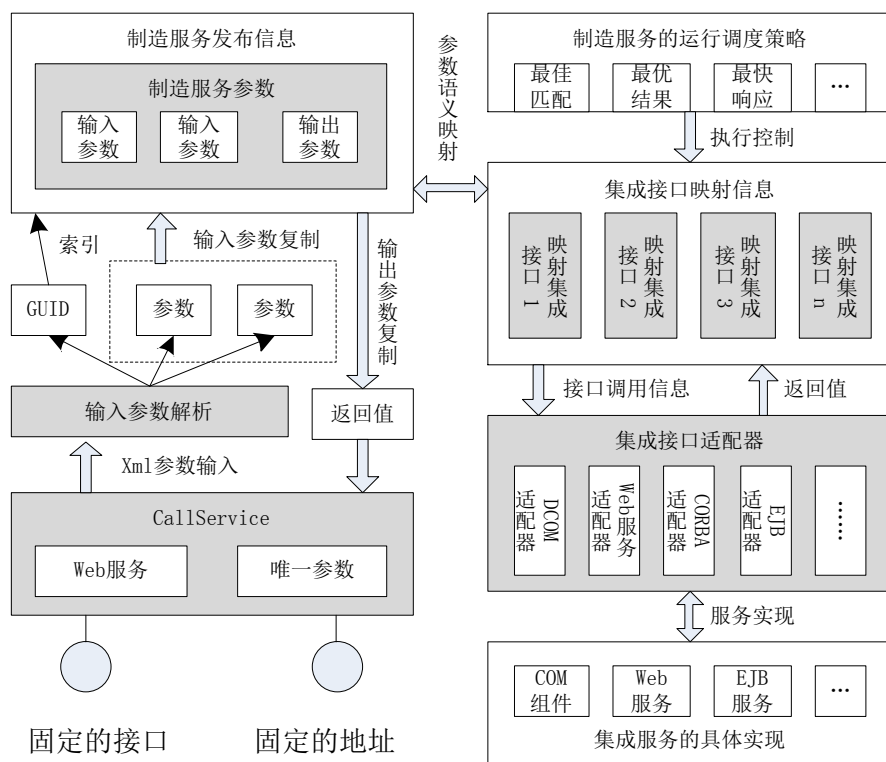


图 4.9 制造服务的统一访问实现方法

Fig.4.9 Unified access method of manufacturing services

首先由语义网关对 **CallService** 服务获取的输入参数进行解析，从 **ServiceId** 中获得集成所需的制造服务，然后将输入的参数值复制给该服务在语义网关中注册的输入参数，在获得输入参数后，语义网关再根据当前制造服务的关联接口信息获取该服务对应的实现接口，并在网关服务参数与接口实现参数间进行语义映射，使输入的调用参数语义由网关语义转换为接口所在的应用系统语义。

语义处理完成后，根据该接口所注册的实现技术平台类型，由语义网关中对应的集成接口适配器负责构造接口调用代码，实现对接口方法的调用，在获得返回值并经由语义映射处理后返回给服务调用方，完成对制造服务的调用。由于采用了集成接口适配器的接口调用模式，故无需对每个接口进行二次封装，也无需进行异构技术平台间集成转换，只需为每种技术平台提供一个适配器就可实现所有接口的访问，从而减少了集成实现的复杂度。

语义网关提供的制造服务可由映射的一到多个集成接口提供服务具体实现，在语义网关的支持下，通过对服务实现的同步并行执行或串行执行，能够极大提高服务的集成运行质量，因此与传统的制造服务与服务实现间的一对一关系相比较，基于语义网关的制造服务集成方法具有更好的集成适应性。

①更优秀的制造服务兼容能力。



根据调用服务的输入参数信息, 语义网关从服务映射的集成接口参数中进行参数的匹配, 从中识别出与服务输入参数语义最匹配的集成接口, 然后将该接口交由系统执行。当该集成接口无法按时返回执行结果时, 则由系统从服务映射的接口中重新选择与输入参数语义差距最小的集成接口来重新进行服务实现的调用, 接口调用的语义不足则由语义网关根据参数配置信息补全, 直到所有接口都被调用过或获得有效返回值后结束, 使服务调用具有更好的接口兼容能力。

#### ②更可靠的制造服务执行结果。

在面对服务的多个实现时, 从多个系统中获取服务执行结果显然比单一系统的执行结果具有更好的应用价值。语义网关系统能够同时执行制造服务映射的所有集成实现接口, 在服务超时前获得所有的有效结果后对接口返回结果进行处理, 对于所有服务返回的结果可以取它们的最大值、最小值、平均值等作为服务执行结果返回, 从而使制造服务具有更好的应用价值。

#### ③更快的制造服务响应速度。

在以服务响应速度作为关键因素的条件下, 语义网关同时执行服务所有映射的集成实现后, 获得首个接口返回的有效返回值后则完成对该服务的调用, 与单一服务实现相比显然具有更短的响应时间。

通过提供稳定的集成接口, 语义网关消除了服务集成中面临的接口规范异构, 通过集成接口适配器则实现了对服务具体实现的调用, 从而消除了传统服务集成中紧耦合的调用实现代码, 服务调用方无需关注服务的具体实现, 实现服务调用的松耦合, 并通过服务实现的多重映射提高了服务集成能力。

## 4.4 本章小结

本章对离散制造执行系统与其它异构信息系统间集成面临的问题进行了分析, 提出了基于语义网关的对离散制造执行系统与异构信息系统间的制造信息集成方法与制造服务集成方法, 实现了对离散制造执行与异构系统间基于语义的可重构集成。



## 5 系统开发与应用案例

### 5.1 引言

在研究了基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构与集成可重构及其实现技术后，为了进一步验证本文所研究技术的可行性，开发了语义网关和可重构离散制造执行系统，并在实际的企业中进行了集成应用验证。

### 5.2 企业介绍

本应用案例来自于某增压器厂，该厂隶属于中国船舶重工集团公司，是国有大型二档工业企业，国家一级企业。是目前国内规模最大、工艺装备先进的专业废气涡轮增压器生产厂，是全国船舶动力配套的骨干企业。

该厂长期以来从自身发展的迫切需求出发，非常重视信息化工程建设，具有很好的信息化建设基础。具体表现在以下几个方面：

#### ①建立了企业信息化组织机构，开展了总体规划和总体设计

成立了由工厂党政主要领导、具体业务部门的领导和工作人员以及技术依托单位人员为主体的领导小组和联合设计组；成立了专门的办公室负责工作的具体组织和协调，使企业信息化应用工程成为了真正的“一把手工程”。

进行了企业信息化建设的总体规划和设计工作，包括企业的需求分析、确定企业信息化建设的目标和具体内容。同时确定了应用项目的总体实施方案和基本策略，很好的指导了企业在后续信息化建设工作地开展。

#### ②开展了 CAD/CAE/CAM 设计信息化应用

在企业的设计过程方面，二维设计达到了 100% 的出图率；其次，企业逐步建立了三维产品的设计能力，根据企业产品设计的需求，投入了 UG、Solid edge 等中高端的三维设计系统，提高了三维 CAD 系统在产品中的覆盖率，目前新产品已经采用三维设计，促进了新产品的研究和开发；再次，企业将 CAD 设计过程和 CAM 过程进行了集成，对于复杂的关键零件实现了从设计到加工的集成。例如，产品的关键零件压气叶轮从三维设计到 NC 加工代码进行集成；最后，为了提高企业的技术创新能力，构建企业具有自主知识产权产品的设计能力，巨资投入了如 NREC、Nastran、CFD 等专业性很强的 CAE 系统，用于产品的性能分析，积累设计经验和各种参数。

因此，通过信息化的建设，系统、有效、深入地推动了工厂在产品设计信息化和现代化方面的建设，并取得了良好的应用效果，为建立企业自主产品的研究和开发体系打下了坚实的基础。

#### ③开展了以 ERP 为核心的企业管理信息化应用

在管理信息化方面，企业实施了神州数码的易飞 ERP 系统，主要包括产品数据管理中的物料基本属性的维护、产品 BOM 的维护、产品特征与选项的维护；库存管理中的出入库管理、出入库数据的统计分析、使与生产有关的仓库实现了人工甩帐；在销售管理中的订单维护、统计，客户档案的维护；在车间制造管理中的车间作业任务的维护、任务的完工汇报、任务的统计分析，并且制定了企业的质量管理模式，逐步开始在全厂范围内进行 6 $\sigma$  和 TS16949 的实施。在工厂的财务系统方面，从应收帐、应付账、总账到固定资产，从工资管理到原始凭证，全部实现财务电算化，并通过了上级中国船舶重工集团公司财务甩帐表的验收。同时，工厂还在管理系统中实施了人力资源管理系统，实现了工厂所有人员的基本信息、家庭人员的信息的维护、查询、统计、打印，实现了工厂在职人员的培训信息的维护、查询、统计等。

④企业信息化建设已取得明显效益，并在区域和同行业起到了良好的示范作用

工程设计系统的应用，增加了新产品的数量，提高了产品的设计效率，降低了设计成本，缩短了新产品的设计周期；管理信息系统的应用，提高了企业的装备制造能力，降低了废品率，降低办公、管理费用等，降低原材料库存，降低半成品库存，节约工厂的流动资金，使企业的产值增加、财务的管理费用下降；同时，企业对分支机构的管理比较薄弱，需要不定期派专人去进行检查和管理，通过该项目实现了企业对异地分支机构实时、有效的监控和管理。

### 5.3 基于语义网关的可重构离散制造执行系统设计开发

基于语义网关的可重构离散制造执行系统主要由两大部分组成，分别是语义网关系统和可重构离散制造执行系统。语义网关系统负责 MES 系统与异构系统间的语义处理和集成可重构，可重构离散制造执行系统负责按车间业务需求进行业务逻辑的重构处理。

#### 5.3.1 语义网关系统设计

##### ①语义网关系统设计

语义网关系统是语义网关在进行异构系统集成运行过程当中所需要的一系列功能模块的总称，包括语义网关运行引擎、语义网关数据库适配器、语义网关服务适配器、语义网关配置工具、语义网关管理工具等，如图 5.1 所示。

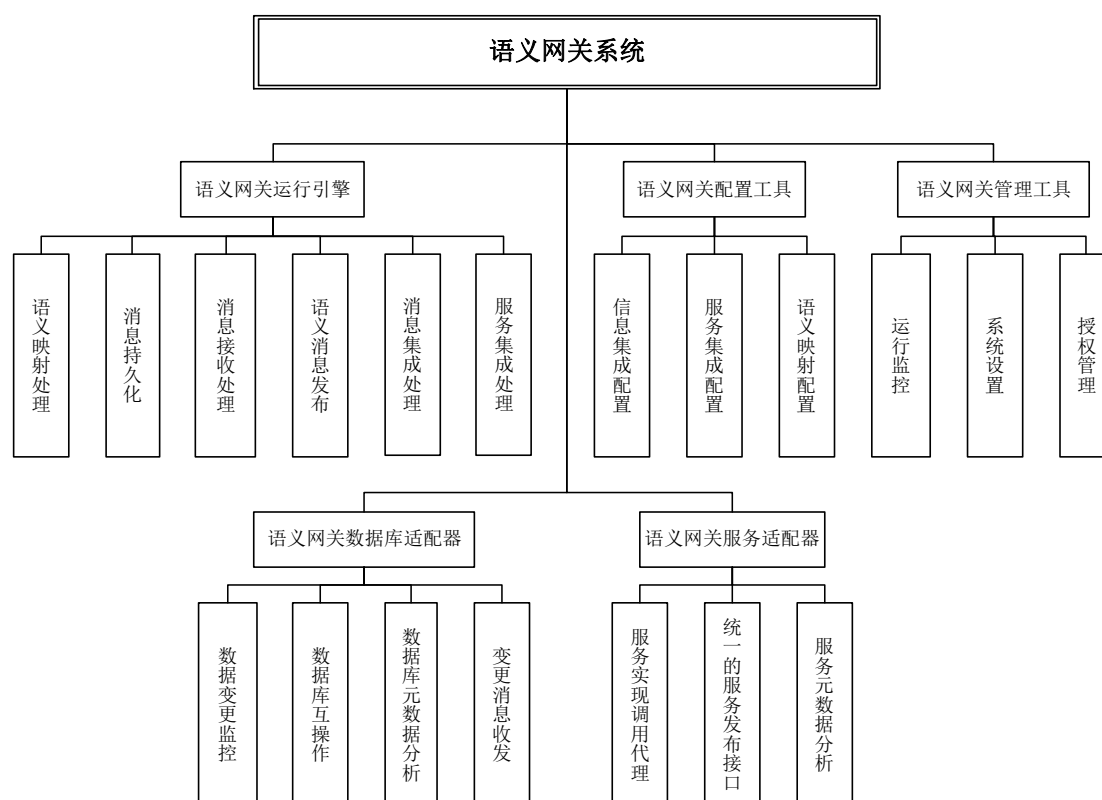


图 5.1 语义网关系统

Fig.5.1 System of semantic gateway

### 1) 语义网关运行引擎

语义网关运行引擎是语义网关进行语义解析和转换的场所，它负责异构信息系统间进行信息集成和服务集成中的语义处理。语义网关运行引擎可以分解为语义映射处理、消息接收处理、消息持久化、语义消息发布、消息集成处理、服务集成处理等部分。

### 2) 语义网关数据库适配器

语义网关数据库适配器用于适配不同的数据库系统，并接入语义网关运行引擎，主要工作包括两个方面：一是监视数据库的数据变更，并将数据变更发布到语义网关中；二是订阅语义网关中来自其它系统的数据变更，并同步到本地数据库中。语义网关数据库适配器可以分解为数据库元数据分析、数据变更监控、数据库互操作以及变更消息收发等部分。

### 3) 语义网关服务适配器

语义网关服务适配器用于适配不同类型的服务接口，并将它们注册于语义网关。主要工作包括：一是隔离现有服务接口的语义差异，为语义网关和其他系统提供语义一致的调用接口；二是消除服务接口的规范差异，为服务的调用提供统一格式的接口规范，三是为制造服务提供多种映射实现。语义网关服务适配器可

以分解为异构服务元数据分析、服务实现调用代理与语义一致的服务发布接口等部分。

#### 4) 语义网关管理工具

通过可视化界面对语义网关运行引擎、语义网关数据库适配器、语义网关服务适配器提供授权、监控和配置管理。语义网关管理工具可以分解为授权管理组件、运行监控组件和系统配置组件三个部分。

#### 5) 语义网关配置工具

通过可视化的界面对语义网关的概念和数据建立语义映射关系，配置映射函数，详细定义信息集成活动和服务集成的映射实现。语义网关配置工具主要由信息集成配置、服务集成配置和语义映射配置等组成。

#### ②语义网关系统工具的开发

开发技术选型及系统实现：

开发环境：Windows 7 操作系统系统、.NET Framework 4 平台、SQL Server 2008 数据库。

开发工具及语言：Visual Studio 2010 集成开发环境、C#程序设计语言。

采用以上选型结果，论文作者及其所在的团队已经开发完成了语义网关系统的原型版本，开发的语义网关系统部分界面如图 5.2 所示。

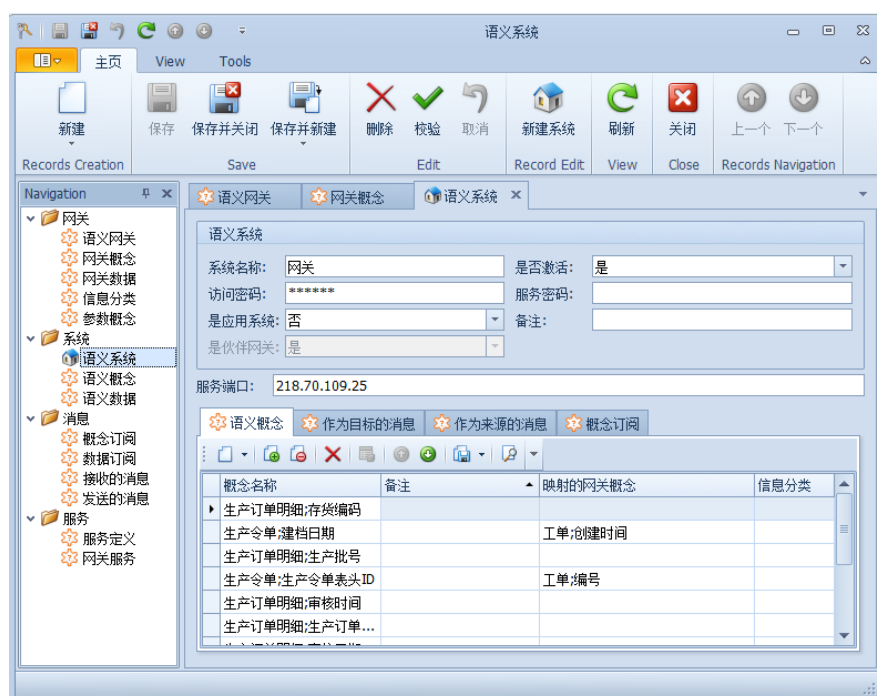


图 5.2 语义网关配置工具

Fig.5.2 Configuration tool of semantic gateway

需要说明的是，语义网关系统工具并不是一步到位的，需要根据实际需求和应用情况不断地改进和升级，目前的版本肯定还存在许多不足之处，也许并不能满足前文所述的语义网关的全部功能。这将在以后的开发中逐步完善。

### 5.3.2 可重构离散制造执行系统设计

#### ①可重构离散制造执行系统设计

可重构MES系统是指支持车间业务逻辑重构的一系列功能模块和支撑技术的总称，在可重构MES系统的支持下，MES业务逻辑可以随企业业务需求实现松耦合的动态重构，支持企业车间生产的顺利进行，可重构离散制造执行系统的功能体系如图5.3所示。

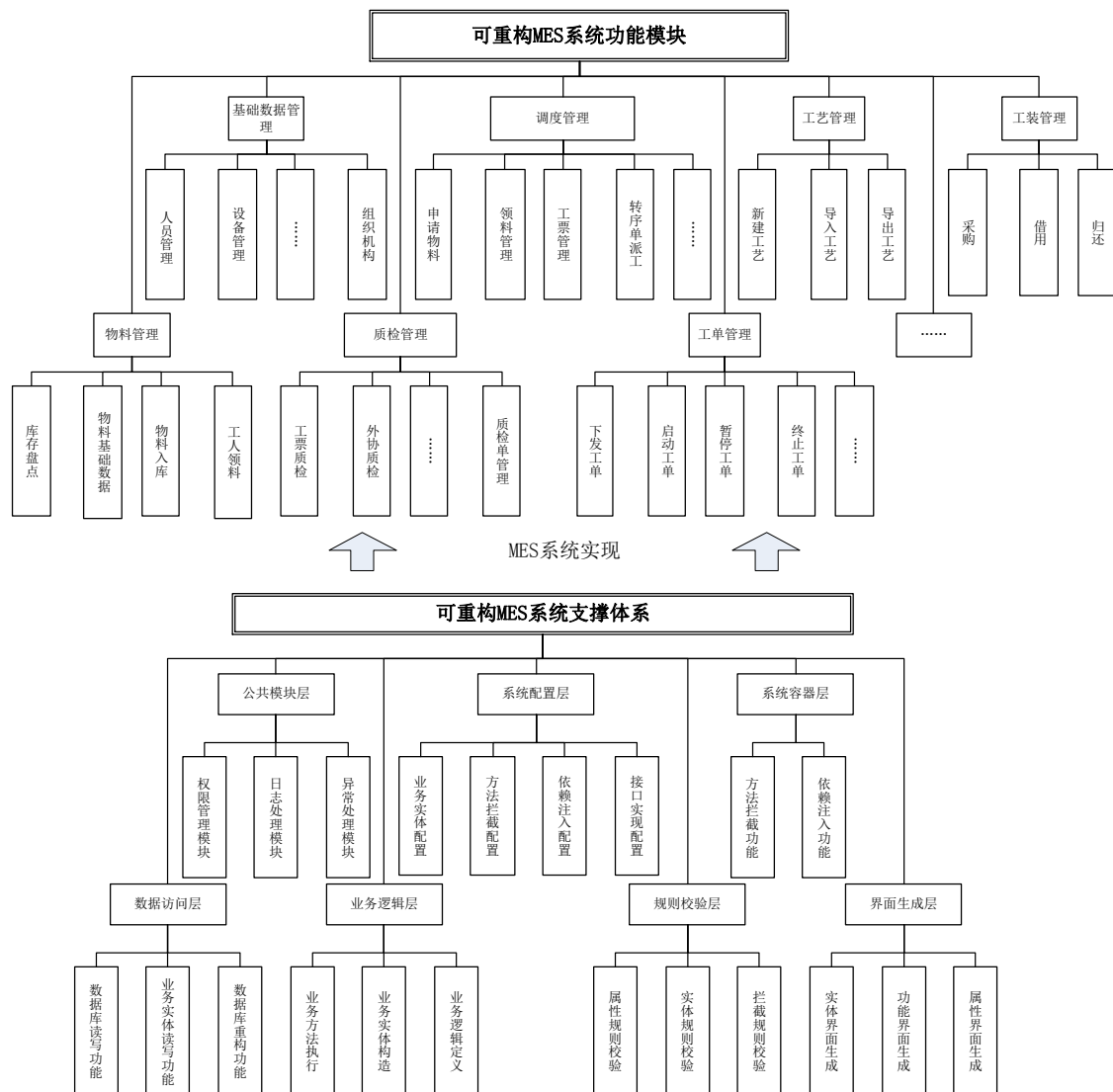


图 5.3 可重构离散制造执行系统的软件功能体系

Fig.5.3 Reconfigurable discrete MES functional system

支持离散制造执行系统可重构的功能体系由支撑体系和功能模块组成，其中支撑体系主要由系统配置层、系统容器层、界面生成层、业务逻辑层、数据访问层、规则校验层、公共模块层等组成。

#### 1) 系统配置层

系统配置层是用户对 MES 系统进行重构配置的人机接口，主要配置业务实体的重构、方法拦截的详细定义、接口间依赖关系信息和接口实现映射信息。

#### 2) 系统容器层

MES 系统容器层负责为依赖注入和方法拦截提供实现，它能够根据配置信息返回业务系统请求的业务实体对象和业务实现对象的实例，通过运行时的动态代理技术实现方法的重构。

#### 3) 界面生成层

界面生成层负责为 MES 系统动态提供用户界面，通过运行时根据配置信息和业务规则为业务属性、业务实体和业务接口提供人机交互接口实现用户界面的重构。

#### 4) 业务逻辑层

业务逻辑层负责车间具体业务的处理，通过业务实体存储车间业务状态数据，通过业务接口提供业务处理需求，通过具体业务方法实现业务数据的处理和业务流程的执行，满足车间制造业务管理的需求。

#### 5) 数据访问层

数据访问层为 MES 业务层与 MES 数据库间的数据交换提供支持，同时能够对数据库结构进行按需重构，它主要负责从数据库中获取指定对象的数据记录并填充到业务实体中，同时又负责将业务实体持久化到数据库中，从而使业务层无需考虑与数据库的交互，实现它们之间的解耦合。

#### 6) 规则校验层

规则校验层负责对业务属性和业务实体定义的各类规则进行规则逻辑运算，确保它们的数据符合业务处理需求规范，同时根据业务状态实时通知界面生成层更新用户界面，并为方法重构中的拦截定义提供规则检查。

#### 7) 公共模块层

公共模块层指各种能够增强系统能力又与具体业务系统无关，可降低耦合性的各种通用公共模块，如权限管理模块、日志管理模块和异常管理模块等，在其它系统模块的支持下，它们能够为系统的某个特定领域提供解决方法。

离散制造执行系统的功能模块则由基础数据管理、调度管理、工单管理、工艺管理、工装管理、物料管理、质检管理等组成。

### ②可重构离散制造执行系统的开发



由于对 MES 系统提出了灵活的可重构需求,故其对开发所采用的技术平台有一定的限制,主要在于平台必须支持运行时动态生成代码,结合目前信息技术的发展,只有 Java 平台和 .Net 平台提供了实现,原因在于他们采用的是运行时动态编译技术, MES 系统开发技术选型及系统实现:

开发环境: Windows 7 操作系统系统、.NET Framework 4 平台、SQL Server 2008 数据库。

开发工具及语言: Visual Studio 2010 集成开发环境、C#程序设计语言。

系统配置层采用 XML 技术维护配置信息,系统容器层采用反射技术进行对象的反求和构建,界面生成层采用运行时动态生成技术进行业务交互界面的创建,业务逻辑层采用接口代理技术和方法拦截技术实现业务逻辑的重构,数据访问层采用对象关系映射和反射技术进行数据的持久化,规则校验层通过前置检查完成业务规则校验,公共模块通过全局拦截配置进行方法的自动加载运行。

采用以上的技术方案,作者及其所在的团队已经开发完成了可重构的 MES 系统的,并在重庆江增企业的生产环境进行了实际应用,开发的 MES 系统部分界面如图 5.4 和 5.5 所示。



图 5.4 可重构 MES 系统运行界面

Fig.5.4 Reconfigurable MES system operation interface

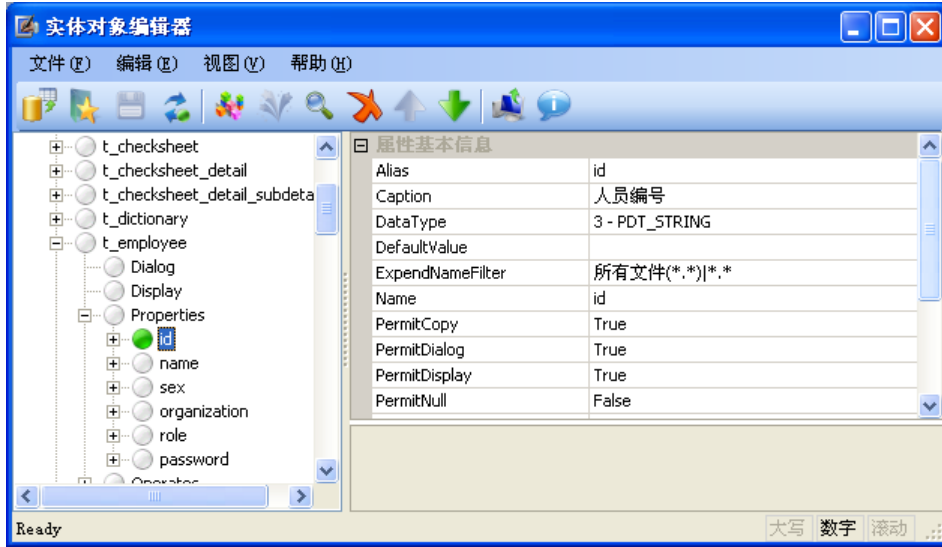


图 5.5 业务属性结构配置界面

Fig.5.5 The property structure configuration interface

## 5.4 企业离散制造执行系统重构分析

### 5.4.1 离散制造执行车间业务逻辑重构分析

由于企业产品增压器是柴油机的配套产品，故企业的产品主要是为某种特定规格的柴油机进行匹配，其生产方式属于典型的订单驱动的多品种、少批量生产，生产过程以机械加工为主，生产组织方式为面向订单。同时产品关键零件的加工工艺复杂、加工周期长，为了快速满足市场对产品的需求，企业同时对部分重要零件维持了适量的库存，因此从这种意义上来说，企业的生产方式有一部分是面向库存来组织的。

总的来说，该企业的生产模式是以面向订单为主，面向订单、面向库存和小规模重复制造相结合的混合生产方式，这些复杂的生产组织方式对企业实施的MES系统提出了能够支持企业车间生产方式动态变化的要求。

随着该企业“船舶柴油机关键系统绿色制造技术与集成应用工程”项目的成功申请，对企业的绿色生产技术提出了新的要求，生产过程中的绿色指标作为一项重要内容必须进行维护，生产过程中的设备能耗数据、机加工中的固体废弃物排放数据、车间噪音数据等信息必须进行采集，主要由自动化监控设备和工人手动输入两种方式实现，同时还必须提供能够进行生产过程绿色数据分析的功能模块，以便能够通过绿色指标的分析来支持工艺路线的改进和生产调度优化，实现降低产品的原材料消耗减少、提高能源利用效率、改善生产环境等目标。

针对企业生产方式变化的需求，可重构MES系统在典型业务逻辑上为企业提供了面向不同生产模式的标准业务处理组件，当企业的生产组织方式发生变化

时，则根据新的生产方式重构对应的业务模块，实现 MES 系统业务执行的无缝衔接，满足企业业务逻辑重构需求，当企业的业务处理方法与标准方法存在差异时，则由 MES 系统用户对标准方法进行重构，企业的技术人员无需了解整个 MES 系统的内部逻辑就可为特定的业务方法编写处理脚本，由 MES 系统进行方法实现重构，实现方法执行的企业定制。

针对企业生产过程中的绿色指标需求，可重构 MES 系统无需进行大量的二次开发即可实现对车间制造中的绿色信息处理。首先对涉及绿色指标的工票等业务实体进行配置重构，为它们扩展实体结构来存储生产过程中的绿色指标数据，并为扩展的属性在数据库中自动建立映射关系，扩展属性的持久化由 ORM 层自动完成，新的属性语义信息同步注册到语义网关进行语义维护。同时为绿色数据监控采集设备提供满足可重构 MES 系统集成标准的集成模块，通过外部的配置加入 MES 系统中，通过对业务实体持久化方法的增强重构实现采集数据到业务实体结构的自动填充，完成业务实体的绿色数据正确获取。通过开发专门的绿色指标分析模块，MES 系统能够对系统的生产过程进行绿色分析，找出各种生产设备、工艺路线、产品零件的资源消耗数据，为后续产品的设计、生产提供指导，从而提高企业的绿色效益。在 MES 系统的重构中，MES 系统无需重新编译已有的代码，只需对新增的业务处理模块进行独立编译和配置就可满足企业对生产中绿色指标维护需求，极大提高了 MES 系统对新需求的响应速度和实现柔性。

#### 5.4.2 离散制造执行与异构系统集成分析

企业通过长期的企业信息化建设，初步建立了覆盖企业内部和外部的，支持企业各种业务开展的信息化系统，包括工程设计系统、管理信息系统、制造信息系统、办公自动化系统等。具体包括：

公司在产品设计方面购买了 AutoCAD 等二维设计软件及 UG、SolidEdge 等中高端的三维设计系统，投入了如 NREC、NASTRON、CFD 等专业性很强的 CAE 系统，实施了 SmarTeam（PDM）系统；在经营管理方面，实施了神州数码的易飞 ERP 系统及重庆宏声新思维公司为其定制开发的 OA 系统；在生产制造方面，实施了由重庆制造业生产力促进中心为其开发的可重构 MES 系统，如表 5.1 所示。初步实现了产品设计、经营管理和生产制造方面的信息化应用，并取得了比较明显的效果。

表 5.1 企业现有信息系统

Table 5.1 Enterprise information systems of X Company

序号	系统	版本	数据库
1	ERP	神州数码 易飞 7.0	Sql Server 2000
2	PDM	UGS Smarteam	Oracle 8i
3	MES	重庆制造业信息化生产力促进中心	Sql Server 2008
4	OA	重庆宏声新思维公司	Sql Server 2000

然而，随着企业的不断发展，现有的信息化系统已经不能满足企业的需求，并逐渐暴露出许多缺点和不足，主要表现在：ERP、PDM、MES 和 OA 系统间的信息共享通过专门点对点开发的数据导入导出接口来实现，部分数据需要进行转抄和重复录入，造成信息集成的效率低、实时性差、信息的一致性无法得到保证；系统间的耦合性强，当信息系统发生变更或有新的信息系统加入时，原来开发的接口将无法使用，而需要重新进行点对点二次开发。

因此，为了支撑企业的进一步发展，该企业迫切需要寻找一种强耦合的、柔性的异构系统集成方式，实现 ERP、PDM、MES 和 OA 等信息系统的全面集成。

#### ①企业内部集成业务流程分析

企业的主要业务流程及各系统间的集成关系分析如下：

首先，市场部销售人员进行市场开发，获取客户订单，并录入到 ERP 系统中，对于新产品，往往需要进行新产品评审，而工作流性质的业务最适合在 OA 中开展，因此在希望实现，当销售人员在 ERP 中录入订单及相关需求时，这些信息能自动进入 OA 系统，在 OA 中自动生成一个新产品评审流程。

其次，技术部对新产品进行产品设计和工艺设计，并向 PDM 系统提交产品设计数据和工艺设计数据，由 PDM 统一管理，同时，在 ERP 中，计划人员依次进行销售计划、生产计划及工单的制定，其中销售计划的主数据来源于 ERP 中新录入的订单，而生产计划和工单则需要根据物料清单和工艺路线进行分解。因此 ERP 的计划模块需要集成 PDM 的产品数据。

接着，将 ERP 中生成的工单下发到车间，作为车间的生产指令。而 MES 系统比 ERP 更适合制造过程管理，因此在 ERP 中下发工单的同时，需要实现工单数据自动进入到 MES 系统中。

然后，生产制造的一系列活动将由 MES 系统进行管理，主要有工单排产、生产领料、派工管理、刀辅夹具领料管理、加工汇报、质量检验、完工入库等业务处理。

其中，生产领料指向库房的领料，而库房的管理更适合放在 ERP 中，因此，

MES 中生产领料生成的领料单要能 ERP 的出库管理模块中显示出来；工序的加工工艺中描述了供需加工所需要的刀辅夹具信息、加工的技术文件及质量检验指标等信息，因此 MES 的刀辅夹具领料管理、加工汇报、质量检验处理需要集成

PDM 中的工艺信息。在 MES 系统的质量检验过程中，可能会发生一些质量争议事件，这时需要在 OA 中启动一个待定品评审流程来处理这些争议，因此希望当质检员在 MES 质量检验模块中填写待定品审理单后，待定品审理单数据自动进入到 OA 系统中，并触发 OA 中的待定品评审流程。

最后，当生产完工后，要进行入库处理，入库的信息来源是 MES 中已完工工单，而入库的业务处理则是在 ERP 的入库管理模块中，因此需要实现在 MES 中产生入库单的同时，入库单信息自动集成到 ERP 中。

### ②企业内部集成内容体系分析

通过以上分析可知，该企业 MES 与 ERP、PDM 和 OA 系统间集成的主要内容包括：物料清单、工艺路线、工单、领料单、待定品审理单、入库单。MES 与其它系统间集成的具体内容如下：

与 ERP 的物料清单集成：物料清单主要包括两部分的内容。一是物料的基本信息，如物料编号、名称、规格等信息；二是产品接口信息，及构成产品的各种物料的层次关系。

与 PDM 的工艺路线集成：工艺路线的主要内容包括工艺路线编号、名称、零件编号、名称，以及构成工艺路线的各道工序的名称、顺序等信息，包括工序使用的刀夹辅量具、质量控制指标，以及关联的技术图纸等信息。

与 ERP 的工单集成：工单的主要内容包括工单编号、零件编号、零件名称、计划加工数量和实际完工数量、计划开工和完工日期，以及工单关联的工艺和工艺下每道工序的实际完工数量、完工日期、报废数量等信息。

与 ERP 的领料单集成：领料单的主要内容包括领料单的基本信息，如领料单号、审核者、审核日、仓库、经办人等，以及领料的明细清单，即物料编号、物料名称、计划领料数和实际领料数等信息。

与 OA 的待定品审理单集成：待定品审理单的内容包括待定品件号、名称、数量，以及待定件审理事由等信息。

与 ERP 的入库单集成：入库单的主要内容包括入库单的基本信息，如入库单号，审核者、审核日、入库仓库、经办人等，以及入库的明细清单，即零件编号、零件名称、入库数量等信息。

### ③企业内部信息集成过程

根据以上分析，以该企业部署的 ERP 系统与 MES 系统间的生产工单自动下发集成为例，在未实施可配置信息集成方法前，为了能够从 ERP 系统中获得新的已

核工单，MES 开发人员专门为此开发了一个独立的工单数据集成程序，每天早上由 MES 用户手动执行一次该程序从 ERP 中读取匹配的工单信息并写入到 MES 数据库中，而在实施可配置信息集成方法后，只需一次性完成工单下发集成活动的配置，MES 用户以后无需额外的操作就能实时获得新通过审核的工单信息，使系统间的集成运行效率得到明显提升，其工单下发的可配置信息集成实现过程如下。

首先分别在该企业的 ERP 系统与 MES 系统上部署应用集成代理，由应用集成代理的数据库适配器对 ERP 和 MES 的数据库元数据进行分析 and 提取，在各自数据库数据字典的帮助分别找出工单数据存储涉及的数据表以及表中的数据字段进行语义标注的配置，方便系统用户进行后续集成处理，如表 5.2 和 5.3 所示。在分别从 ERP 和 MES 系统中分辨出工单对应的数据表和字段后，根据数据概念的分类策略，将它们的关键概念和一般概念在语义网关中进行语义注册，并在语义网关中配置好它们与语义网关概念的语义映射关系，如图 5.10 所示，从而使语义网关能够理解它们的语义内涵而能够进行语义解析转换处理。

表 5.2 MES 的工单表部分字段语义信息  
Table5.2 Semantic of partly MES job concept

GUID	字段名称	备注	数据类型	字符长度
732451a6-bd46-44e9-b281-9242c97eb682	creator	工单;创建者	varchar	50
d01f19f6-c807-4614-9399-2f07e4ca3a49	createtime	工单;创建时间	datetime	0
af298801-a61d-48ea-9fec-a3078ff2a7aa	emergency	工单;紧急程度	int	0
883e3bf5-cb55-4439-8368-2c737b16e14c	id	工单;工单编号	varchar	50
a1bb4413-f7e8-4654-8761-22302cf87b88	partid	工单;零件编号	varchar	50
5af32515-3c83-497a-bd5f-08270b21bada	partquantity	工单;生产数量	int	0
fd661f07-c1a7-49bd-af0c-f987274eecd3	planfinishtime	工单;计划完工时间	datetime	0
2ca888ab-42a3-4052-af07-626ca0ff7fc2	planstarttime	工单;计划开工时间	datetime	0
ca22bb82-502b-40ac-9373-93c088b35c9b	processid	工单;工艺路线	varchar	50
34399e74-9c3c-43b1-8281-a7a73f2003fd	startedquantity	工单;已启动数量	int	0
f4fb7738-3913-4e86-8c5d-c7162714fe46	state	工单;状态	int	0

表 5.3 ERP 工单表部分字段语义信息

Table5.3 Semantic of partly ERP workorder concept

GUID	字段名称	备注	数据类型	字符长度
3b2b2802-39e4-43e3-a537-f3483923d47f	TA001	工单单头档;工单单别	char	4
8cc94977-02dd-419f-882a-0a11d59574da	TA002	工单单头档;工单单号	char	11
7deb9023-7688-4c4e-adf0-5afb54590ed3	TA006	工单单头档;产品品号	char	20
29d7eec7-7e1f-42f0-8b7b-0c1befe5d1d9	TA009	工单单头档;预计开工	char	8
628db080-2bf7-4187-9272-752c5a377cc2	TA010	工单单头档;预计完工	char	8
be4018e6-dd47-4dc5-8d29-b00ec42ce75e	TA011	工单单头档;状态码	char	0
7b007f41-68d0-47cf-bfc5-19d75e7164f1	TA012	工单单头档;实际开工	char	8
6cae4c57-d9d0-421a-aa2a-7c1f1631cf86	TA013	工单单头档;审核码	char	0
51e05080-6bf4-4295-9818-2eb1ed7bf0ce	TA014	工单单头档;实际完工	char	8
1f0a71ac-674c-4832-8030-e949727863f4	TA015	工单单头档;预计产量	numeric	0
ee4d07d8-9229-4fe2-8585-13afe0969944	TA016	工单单头档;已领套数	numeric	0
f686b02d-c870-4aee-b13f-95ba9efb839b	TA017	工单单头档;已生产量	numeric	0

然后对 ERP 系统工单表的关键数据概念和一般数据概念建立增加和修改变更监控，通过对数据概念的操作监控的配置，配置系统能够自动生成数据变更捕获触发器，当 ERP 工单表中的数据记录发生变化时，ERP 的集成代理可以通过触发器生成的消息文件实时获得工单表的数据变更内容并及时提交给语义网关。

其次针对工单集成声明集成活动“ERP 向 MES 下发已核工单”，并为该集成活动配置集成条件，集成条件由状态转移条件“审核状态：未核变为已核”、断言条件“工单编号：不为空”。其中条件“审核状态：未核变为已核”表示工单刚被审核通过而能够下发给 MES 系统，条件“工单编号：不为空”用来保证集成内容的有效性。

最后为工单集成活动配置集成操作，由于 ERP 的工单概念项多于 MES 的工单概念项，概念投影配置则可以让 MES 系统从中选择集成所需要的数据概念，同时由于是新下发的工单，故必须为投影得到的数据概念配置数据增加操作，指示 MES 集成代理以 Insert 方法处理集成内容，信息集成配置与集成结果如图 5.6 到图 5.9 所示。



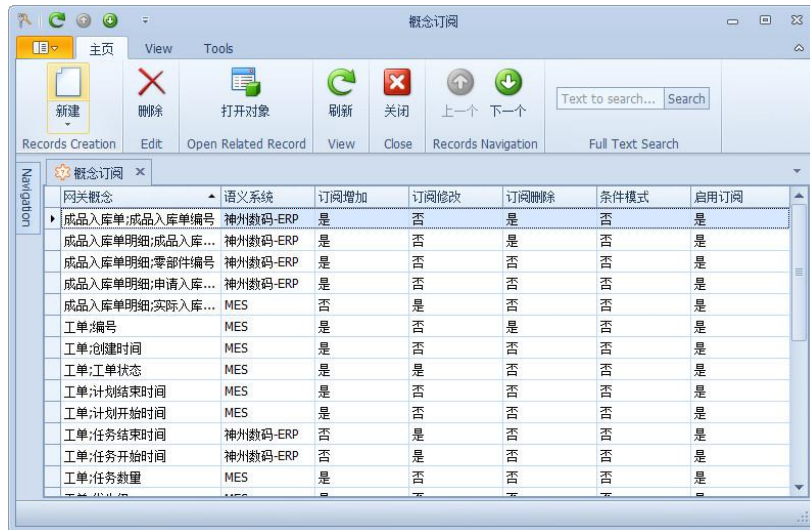


图 5.6 语义概念订阅  
Fig.5.6 Subscription of semantic concepts

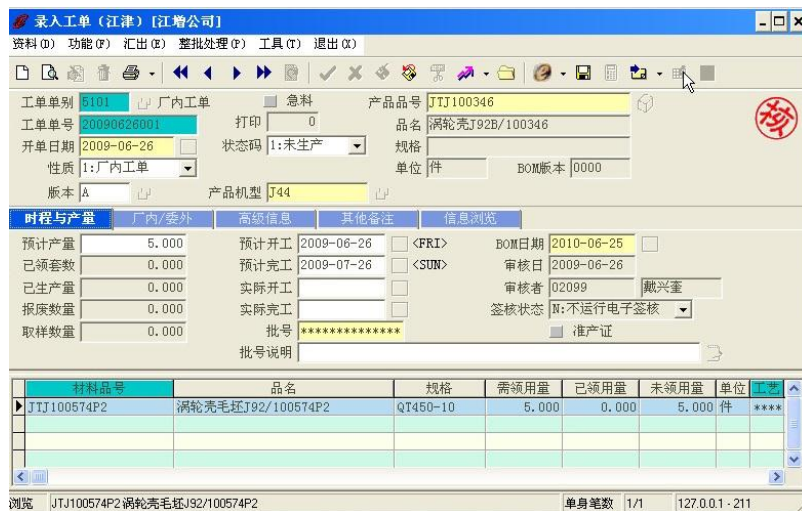


图 5.7 ERP 中的生产订单  
Fig.5.7 Work Order in ERP

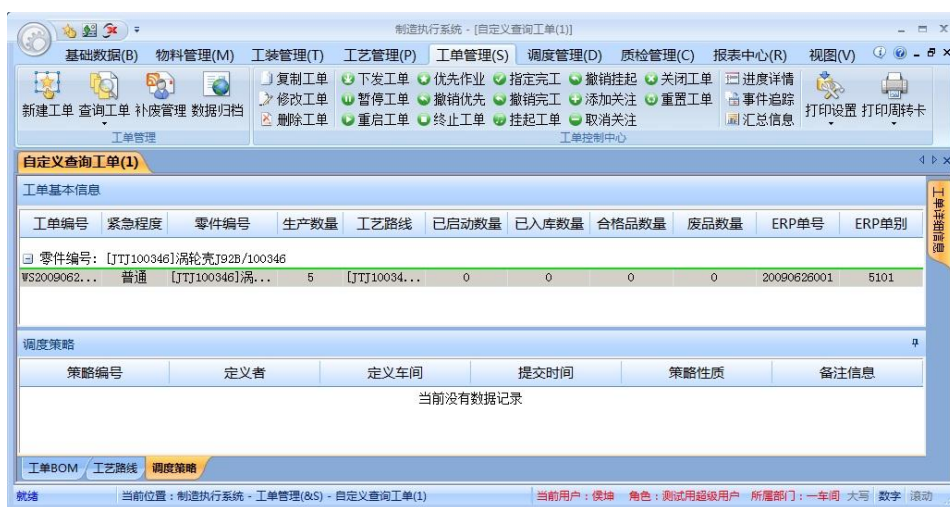


图 5.8 MES 中的工单信息  
Fig.5.8 Job information in MES





图 5.9 概念投影配置

Fig.5.9 Configuration of concept projection



图 5.10 MES 系统的语义映射配置

Fig.5.10 MES semantic mapping configuration

当 ERP 系统中的工单通过审核时，其“审核状态”概念的数据将发生转移，从而满足集成条件并自动触发集成活动，实现工单在 ERP 系统和 MES 系统间的自动下发集成。与先前的工单集成方法相比，新方法能够实时进行工单下发信息的集成，便于 MES 系统更好地安排生产计划，同时还可以随着未来工单集成需求的变化对集成内容进行灵活的调整，从而具有更好的集成适应能力。

#### ④跨企业的制造服务集成过程

以该企业向外部发布的订单进度查询为例，在企业的 ERP 系统中存在一个集成接口用来查询指定订单的当前已生产数量，该接口只有一个输入参数“订单编号”用于提供订单编号数据，在 MES 系统中则存在一个集成接口用来查询指定工单的完工数量，由于 MES 系统维护了工单历史完工进度信息，因此该接口可以实现按指定日期查询工单历史完工数据，故该接口的输入参数由“工单编号”和“查询日期”两个参数组成。由于该企业的 MES 工单信息来自于 ERP 系统，其“工单

编号”与“订单编号”存在语义等价关系，故这两个接口都能够实现按“订单编号”进行订单生产进度查询服务，因此在将它们注册在语义网关后同时与语义网关中发布的“订单进度查询”服务建立服务映射关系，根据该服务所映射的集成实现接口参数信息，在语义网关中为“订单进度查询”服务建立两个参数语义标准“订单编号”和“查询日期”，分别与 ERP 和 MES 提供的接口参数建立语义映射，并为“查询日期”指定默认值为 DateTime.Now，这样当语义网关需要进行语义补全处理时会自动为参数“查询日期”赋予当前系统时间，制造服务在语义网关系统中的运行与映射配置如图 5.10 到图 5.12 所示。

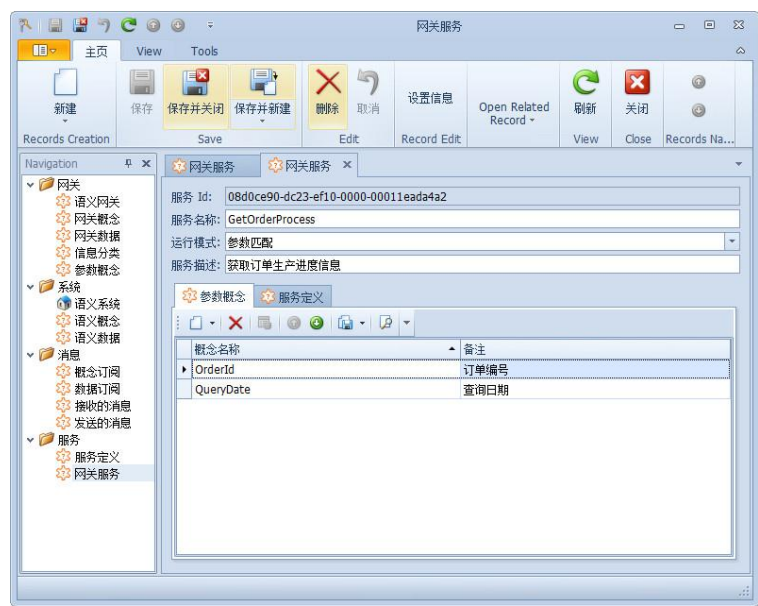


图 5.11 网关服务的定义  
Fig.5.11 Definition of semantic gateway service

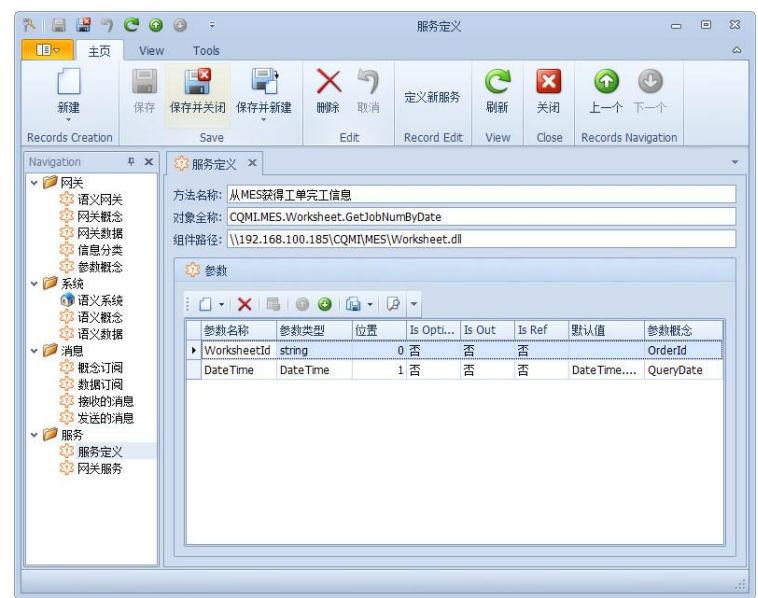


图 5.12 应用服务的定义  
Fig.5.12 Definition of application service

在配置完订单进度查询服务后，其它系统则可以通过语义网关提供的 CallService 服务调用发布的订单进度查询服务，由于该服务提供了两种集成实现，因此语义网关根据用户调用时输入参数信息进行最佳调用匹配，当用户只提供一个输入参数“订单编号”时调用 ERP 系统提供的集成实现，当用户同时提供参数“订单编号”和“查询日期”时则调用 MES 系统提供的集成实现。当 ERP 系统由于维护等原因临时无法提供集成实现时，则由语义网关根据配置信息用当前系统时间补全用户缺失的“查询日期”参数，构造符合 MES 系统集成接口的调用信息，将原本匹配 ERP 系统的调用交由 MES 系统实现，从而确保制造服务持续有效，同样当 MES 无法提供服务实现时则由语义网关负责将服务的实现交由 ERP 系统完成。由于通过语义网关对订单进度查询服务的具体实现接口进行柔性调用，故语义网关发布的该制造服务在面临映射的服务实现故障时依旧可以保持服务的运行，从而有效提高了服务间的集成可靠性。

## 5.5 基于语义网关的可重构离散制造执行系统应用效益

①实现了 MES 系统业务逻辑的动态重构。

在企业复杂的混合生产方式下，MES 系统以可配置的方式支持重构系统面向不同生产方式的业务逻辑组件，支持企业不同生产方式的制造管理；通过用户对动态脚本的编写和 MES 系统的代码织入，支持了企业特定业务处理方法的重构；通过对业务实体结构的扩展和业务模块的增量部署，支持了企业全新的绿色制造过程管理需求。

②实现了 MES 系统与异构系统的集成运行。

ERP 中的工单数据能自动集成到 MES 系统中；MES 这种的领料单、入库单数据能自动集成到 ERP 系统中；PDM 中的加工工艺数据能自动集成到 MES 系统中；MES 中产生的待成品审理单能自动集成到 OA 系统中。

MES 通过与 ERP、PDM、OA 系统的集成运行，消除了信息孤岛，保证了数据的共享和一致性；同时，减少了数据的转抄、重复录入，从而提高了信息传递效率，并消除了重复录入所带来的容易出错、更新不及时等一系列的问题。实现了 MES 与 ERP、PDM、OA 系统间的松耦合和柔性集成。

基于语义网关的可重构离散制造执行系统有以下优点：

1) 能够针对用户界面、业务实体和业务逻辑进行全面重构而无需重新编译已有的系统模块，MES 系统以可配置的方式组织内部业务处理，用户可以业务需求动态进行业务处理逻辑的配置，由于业务模块互相隔离，并且采用统一的标准进行开发，MES 能够充分利用不断积累的各种业务模块来完善系统的业务处理功能。

2) 通过可配置的方式实现 MES 与异构系统间的集成，语义网关提供的各种

使能工具能快速、方便的实现语义定义、语义映射等配置，从而实现基于语义网关的集成。同时无需对原有信息系统做二次开发，通过语义网关与应用系统间的集成代理能够实现 MES 集成信息的主动交互，能够快速适应应用系统变更和新系统的加入到 MES 的集成体系中，一个系统的变更只需修改该系统和语义网关的配置，而对其他系统与语义网关的配置不产生影响。

综上所述，论文的研究成果在企业进行了具体的实施应用验证，取得了很好的效果，实现了 MES 业务系统的动态重构，加强了系统之间集成的松耦合和灵活性，使分布式资源之间的集成更为有效。

## 5.6 本章小结

本章以重庆某企业为应用对象，介绍了企业概况和信息化基础，分析了该企业的集成应用需求，并把论文研究内容应用于企业的信息化建设中，阐述了论文研究内容在该企业的实际应用实施情况和取得的应用效益，验证了基于语义网关的离散制造执行系统可重构的有效性。

## 6 结 论

当前对语义集成技术的理论研究较多而工程实现则较少,结合当前制造环境下离散制造企业车间制造执行系统的软件重构需求和与异构系统间的语义集成需求,本文提出了基于语义网关的可重构离散制造执行系统,研究了支持离散制造执行系统业务可重构的关键技术及其与异构系统间的集成可重构关键技术,为语义技术从理论研究到工程实现提供了一种有效的方法和探索,本文的主要研究成果及创新点包括:

### ①提出了基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系。

基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系由重构需求、重构内容、重构目标、语义网关和总体框架组成。重构需求由不同企业实施、生产方式变化、业务集成需求和制造环境变化组成,它们是驱动 MES 系统进行重构的动力来源;重构内容由用户界面、业务逻辑、系统集成和系统语义组成,它们是 MES 系统重构的具体体现;重构的目标由开放性、重用性、语义性、松耦合、低成本和集成性组成,它们是 MES 重构中追求的准则;语义网关负责不同系统间异构语义的处理;总体框架定义了可重构 MES 系统中各个组成部分的关系。

### ②提出了基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构方法。

基于语义网关的离散制造执行系统业务可重构由业务实体重构、业务接口重构和业务实现重构组成。业务实体重构由业务属性的界面重构、数据重构和业务规则重构以及业务实体结构重构和业务实体规则重构组成,它们实现 MES 业务对象的动态重构;业务接口重构由基于接口的业务实体与业务接口依赖关系的重构和业务实现与业务接口依赖关系的重构组成,它们实现 MES 业务模块级的重构;业务实现的重构由基于方法拦截的业务实现增强、业务实现替换和方法拦截规则组成,它们实现 MES 业务方法执行层的重构。

### ③提出了基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构方法。

基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构由信息集成重构和服务集成重构组成。信息集成重构实现 MES 系统与其它异构信息系统间基于语义的信息集成,通过在异构系统数据库上以可配置的方式建立数据变更捕获机制来获取集成信息,在经过语义网关的语义处理后由目标系统的应用集成代理将集成信息提交给数据库进行信息集成操作;服务集成重构实现 MES 系统与其它异构信息系统间基于语义的服务集成,通过将 MES 系统和其它系统的功能服务在语义网关中统一进行语义注册,为所有的信息系统提供固定的制造服务发布方式,并由语义网关进行参数间的语义解析映射,同时提供语法统一的服务访问接口,由服务集成代理实现对服务具体实现的统一调用,实现服务的动态调用,支持服务的集成重构。

最后,在上述研究成果的支持下,设计和开发了一套基于语义网关的可重构离散制造执行系统,并结合重庆某制造企业的车间生产管理与系统集成需求,进行了应用验证,取得了较好的应用效果。

语义网关作为一个新的概念,论文虽然对语义网关本身及其与制造信息系统的集成应用进行了部分研究,但是显然无法完全满足当前制造企业信息系统日益增长的集成需求,还需要对其进行更多的研究,比如行业语义标准的建立、语义网关设备的研发、基于语义网关的集成理论分析、基于信息集成和服务集成的异构业务流程的集成等工作还有待后续的展开,下一步的研究工作将从基于语义网关的异构系统间业务流程集成展开。

## 致 谢

在博士论文完成之际，衷心感谢我的导师鄢萍教授和宋豫川教授。本论文是在导师的精心指导和悉心关怀下完成的，论文的每一步工作均得到了导师的悉心指导，论文的字里行间饱含了导师辛勤的汗水和心血。鄢萍教授在课题的研究和论文的撰写中，鄢萍老师给予我许多具体的指导和帮助；同时鄢老师严谨的治学态度、一丝不苟的科研精神、朴实无华的为人处事之道也是我一生的学习榜样，在此向鄢老师致以真诚的感谢。在读研的过程中，宋豫川老师以其渊博的学识和诲人不倦的精神悉心指导着我的每一步成长，以其宽广的胸怀和正直的品格容纳和矫正我的每一次过错。同时衷心感谢课题组的雷琦副教授在我的科研、学习和生活上提供的无私帮助和支持。在此向三位老师表示我衷心的感谢和崇高的敬意！

衷心感谢刘飞教授等各位老师和员工在我的学业和生活上提供的支持和帮助；衷心感谢重庆大学制造工程研究所给我提供的学习、科研和生活环境，使我能够顺利完成科研工作，撰写论文，培养科研能力！

衷心感谢课题组内的李先旺博士和各位硕士研究生！

衷心感谢我的父母、女朋友冯凡、亲戚朋友和所有关心支持我的人，正是你们对我的一贯支持和宽容才使我有机会顺利完成我的学业！

谨向所有支持和帮助我的师长、同学和朋友们表示深深的谢意！

最后，衷心感谢在百忙之中评阅论文和参加答辩的各位专家、教授！

陈学海

二〇一四年五月 于重庆





## 参考文献

- [1] 路甬祥. 坚持科学发展, 推进制造业的历史性跨越[J]. 机械工程学报, 2007, 43(11): 1-6.
- [2] 刘飞, 张晓冬, 杨丹. 制造系统工程 [M]. 北京: 国防工业出版社. 2000.
- [3] 王先逵. 广义制造论[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 86-95.
- [4] 刘飞. 制造自动化的广义内涵、研究现状和发展趋势[J]. 机械工程学报, 1999, 35(1): 1-5.
- [5] 杨海成, 祁国宁. 制造业信息化工程——背景、内容与案例 [M]. 北京: 机械工业出版社. 2003.
- [6] 杨叔子, 吴波. 先进制造技术及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2003, 39(10): 73-78.
- [7] 杨叔子, 吴波, 李斌. 再论先进制造技术及其发展趋势[J]. 机械工程学报, 2006, 42(01): 1-5
- [8] 张莉莉. 我国企业信息化的发展现状及对策研究[D]. 太原: 太原理工大学博士学位论文, 2006.
- [9] 尹正. 制造型企业信息化跨越式发展问题研究[D]. 合肥: 合肥工业大学博士学位论文, 2006.
- [10] 黄杰. 制造业企业信息化模式研究[D]. 武汉: 武汉大学博士学位论文, 2005.
- [11] 齐建军. 基于 XML 的制造过程集成框架的研究与实现[D]. 北京: 北京航空航天大学博士学位论文, 2005.
- [12] Lu Changhui, Deng Su, Zhang Weiming. Applying XML for designing and interchanging information for multidimensional model[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2005, 16(04):823-830.
- [13] 张竞, 肖先勇. 基于 XML 的电能质量标准数据共享模型及跨平台数据交换[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 88-92.
- [14] Omar L ópez-Ortega, Ram órez Moramay. A STEP-based manufacturing information system to share flexible manufacturing resources data [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2005, 16(3): 287-301.
- [15] 刘乃若, 朱瑞清, 李善平. 基于 STEP 和约束机制的 CAD/CAP 集成技术的研究[J]. 计算机工程, 2000, 26(08):80-83.
- [16] 蔡长韬. 基于 STEP/XML 的集成化工艺信息描述方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(5): 912-06.
- [17] 余军合, 祁国宁, 吴昭同, 等. PDM 与 ERP 系统集成方法及应用研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2001, 7(6): 49-53.
- [18] 张和明, 曹军海, 范文慧, 等. 虚拟样机多学科协同设计与仿真平台实现技术[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(12):1105-1111.

- [19] 朱传军, 饶运清, 张超勇, 等. 基于 CORBA 的可重构制造执行系统研究[J]. 中国机械工程, 2004, 15(23): 2097-2101.
- [20] 周能发, 蔡力钢, 朱海平, 等. 基于 CORBA 和 XML 的 PDM/CAPP 集成[J]. 华中科技大学学报(自然科学版) 2004, 32(11): 30-32.
- [21] 苑明海, 李东波, 韦韞. 基于 Agent 的可重构装配线制造执行系统[J]. 计算机工程, 2008, 34(06): 246-249.
- [22] 杨潇, 万建成, 侯金奎. 一种基于语义重构的模型映射方法[J]. 计算机工程, 2007, 33(23): 45-47.
- [23] 刘传文, 苏宏业, 褚健. 一种新型企业综合集成应用的解决方案[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2005, 11(01): 39-44.
- [24] 申利民, 吕福军, 李峰. 面向企业信息集成的 Web 服务推荐模型[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(1): 186-190.
- [25] 尹胜, 尹超, 刘飞, 等. 基于 Web 服务的客户定制型订单全生命周期管理支持系统[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(10):2004-2017.
- [26] 杨慧, 盛业华, 温永宁, 等. 基于 Web Services 的地理模型分布式共享方法[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2009, 34(02):142-145.
- [27] 郭放, 刘伟, 石金华. 应用 ESB 简化网络化制造系统应用集成[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(S1):129-133.
- [28] 刘海涛, 赵江河, 苏剑. 基于 ESB 的配电网自动化及管理系统信息集成[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16):47-51.
- [29] 王崇文, 丁刚毅. 基于 ESB 的 DICOM 通信机制与工程项目集成[J]. 北京理工大学学报, 2010, 30(11):1315-1320.
- [30] 汪清明. 基于 SOA 的 ERP 系统体系结构的研究[J]. 计算机应用, 2007, 27 (2): 413-416.
- [31] 简斌, 闫光荣, 朱心雄. 基于 SOA 的中小制造企业业务流程的集成[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2007, 19(1): 125-129.
- [32] W.T.Tsai, Bingnan Xiao, Qian Huang, 等. Collaborative software design in an SOA environment[J]. Science in China Series F:Information Sciences, 2006, 49(6): 821-842.
- [33] Wang Guowei, Xu Guangming, Zhang Zhibin. Research on Data Synchronization and Integration Platform Based on SOA[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 7(13): 223-230.
- [34] 吴朝晖 肖修林. 可信用电子商务系统体系架构研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(04):265-270.
- [35] 章雪岩 陈宁, 武振业. 土木工程项目伙伴信息交换协议模型[J]. 西南交通大学学报, 2005, 40(04):525-529.

- 
- [36] Thomas H. Davenport. Enterprise Solutions and Ongoing Business Change[M]. 2002.
- [37] 王莉, 刘厚泉, 吴雪峰. 基于 BPEL 的业务流程管理系统架构的研究与应用[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(18): 3507-3510.
- [38] 徐春香, 屈婉玲, 王捍贫, 等. 基于同步网的 BPEL 建模和验证[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(S1):97-100.
- [39] 范贵生, 虞慧群, 陈丽琼, 等. 一种基于 Petri 网的服务组合流程分析方法[J]. 华东理工大学学报(自然科学版), 2009, 35(01):112-118.
- [40] 胡强, 杜玉越. Web 服务业务流程执行语言交互兼容性判定[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(06):1337-1343.
- [41] Neches R, Fikes R E, Gruber T R. Enabling Technology for Knowledge Sharing[J]. AI Magazine, 1991, 12(3): 36~56.
- [42] Gruber T R. A Translation Approach to Portable Ontology Specifications[J]. Knowledge Acquisition, 1993, 5: 199~220.
- [43] Borst W N. Construction of Engineering Ontologies for Knowledge Sharing and Reuse[D]. Enschede: University of Twente, 1997.
- [44] Studer R, Benjamins V R, Fensel D. Knowledge Engineering ,Principles and Methods[J]. Data and Knowledge Engineering, 1998, 25(122): 161~197.
- [45] Gao Rui Gao Shan, Wang Wenjun,Zhang Xiankun. Research on Ontology-based Emergency Situation Data Integration and Sharing[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2012, 7(9): 238-245.
- [46] Aristeidis Matsokis, Dimitris Kiritsis. An ontology-based approach for Product Lifecycle Management[J]. Computers in Industry, 2010, 61(8): 787-797.
- [47] Yazen Alsafi, Valeriy Vyatkin. Ontology-based reconfiguration agent for intelligent mechatronic systems in flexible manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2010, 26(4): 381-391.
- [48] Chang Xiaomeng, Terpenney Janis. Ontology-based data integration and decision support for product e-Design[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2009, 25(6): 863-870.
- [49] Berners-Lee T, Hendler J, Lassila O. The semantic web[J]. Scientific american, 2001, 284(5): 28-37.
- [50] 唐杰, 梁邦勇, 李涓子, 等. 语义 Web 中的本体自动映射[J]. 计算机学报, 2006, 29(11):1956-1976.
- [51] 张维明, 宋峻峰. 面向语义 Web 的领域本体表示、推理与集成研究[J]. 计算机研究与发展, 2006, 43(01):101-108.

- [52] 郭钢, 汤华茂, 陈国荣, 等. 基于语义 Web 的网络化制造模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(04):690-697.
- [53] 满君丰, 邱银安, 陈青,等. 语义 Web 服务框架模型研究[J]. 计算机集成制造系统, 2005, 11(10):1372-1379.
- [54] 宋庭新, 黄必清, 熊健民, 等. 语义 Web 服务在业务协同与供应链集成中的应用[J]. 中国机械工程, 2008, 19(04): 410-414.
- [55] 李铁克. 制造执行系统模型综述与分析[J]. 冶金自动化, 2003, (4): 13-18.
- [56] Mesa International, MESA International White Paper Number 1 [R], 1997.
- [57] Mesa International, MESA International White Paper Number 2 [R], 1997.
- [58] Mesa International, MESA International White Paper Number 3 [R], 1997.
- [59] Mesa International, MESA International White Paper Number 4 [R], 1997.
- [60] Mesa International, MESA International White Paper Number 5 [R], 1997.
- [61] Mesa International, MESA International White Paper Number 6 [R], 1997.
- [62] Wallace, NIST Response to RFI-3 [R], 1999.
- [63] 曹乐. 面向大规模定制的扩展制造执行系统及其关键技术研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2008.
- [64] 于海斌, 朱云龙. 可集成的制造执行系统[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2000, 6 (6): 1-6.
- [65] Nagesh Sukhi, Ward Nick. Intelligent Second-Generation MES Solutions for 300mm Fabs[J]. Solid State Technology, 2000, 43(6): 133-137.
- [66] D.Scot. Comparative Advantage through Manufacturing Execution Systems[C]. Proceedings of the SEMICON Taiwan 96 IC Seminar, September,1996.
- [67] F.T.Cheng, E.Shen, J.Ydeng, etal. Development of a System Framework for the Computer-Integrated MES: A Distributed Object-Oriented Approach[J]. International Journal of CIM, 1999, 12(5): 385-402.
- [68] M.Hori, T.Kawamura, A.Okano. OpenMES: Scalable Manufacturing Execution Framework Based Distributed Object Computing[J]. Proceedings of IEEE. International Conf. on Sys, Man & Cybernetics 1999, (4): 398-403.
- [69] Barry J, Durniak T, Durniak T, 1998.
- [70] Production System Modeling Technical Committee Japan Fa Open Systems Promotion Group, 2000.
- [71] Zgür nver. Design and Development of a Distributed Shop Floor Control System Using Windows DNA[C]. Proceedings of the IASTED, 2000,8:14-16.
- [72] Cheng F-T, Shen E, Deng J-Y, etal. K. Development of a System Framework For the

- Computer-integrated Manufacturing Execution System : a distributed object-oriented approach[J]. International Journal Computer Integrated Manufacturing, 1999, 12(5): 384-402.
- [73] Fan-Tien Cheng, Shang-Lun Wu. Systematic Approach for Developing Holonic Manufacturing Execution Systems[C]. The 27th Annual Conference of the IEEE, 2001: 261-266.
- [74] 王琦峰. 面向服务的车间制造系统运行模式及支持技术研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2009.
- [75] 宋海生, 王家海, 张曙. 网络联盟企业中基于 web 的制造执行系统[J]. 制造业自动化, 2001, 23(2): 20-23.
- [76] 曹江辉, 宁生, 解放, 等. 基于 CORBA 的制造执行系统的实现[J]. 南京航空航天大学学报, 2002, 34(4): 336-341.
- [77] 周光辉, 江平宇. 基于移动 Agent 的网络化制造资源的封装和集成[J]. 计算机集成制造系统—CIMS, 2002, 8(9): 728-732.
- [78] 和延立, 何卫平, 杨海成. 用多 Agent 系统实现分布的制造资源集成(待续)[J]. 组合机床与自动加工技术, 2001, (12): 54-56.
- [79] 和延立, 何卫平, 杨海成. 用多 Agent 系统实现分布的制造资源集成(续完)[J]. 组合机床与自动加工技术, 2002, (1): 58-60.
- [80] 王玲, 殷国富, 胡晓兵, 等. 基于 MRP II 的车间生产管理信息系统[J]. 计算机工程, 2002, 28(5): 222-224.
- [81] 贾广飞, 杨铁南, 高雪强. CIMS 环境下的车间生产管理系统研究[J]. 制造业自动化, 2002, 24(12): 12-14.
- [82] 兰长青, 连军, 陈关龙. 基于 WEB 的车身车间生产管理系统[J]. 制造业自动化, 2003, 25(3): 30-34.
- [83] 饶运清, 李培根, 李淑霞. 制造执行系统的现状与发展趋势[J]. 机械科学与技术, 2002, 21(6): 1011-1016.
- [84] 饶运清, 刘世平, 李淑霞, 等. 敏捷化车间制造执行系统研究[J]. 中国机械工程, 2002, 13(8): 654-656.
- [85] 刘晓冰, 蒙秋男, 黄学文, 等. 基于软构件的柔性制造执行系统平台的研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2003, 9(02):101-106.
- [86] 李波, 李辉, 陈鹰. 可重构制造执行系统的研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(6): 721-724.
- [87] 房亚东, 何卫平, 秦钟宝, 等. 支持网络化制造的制造执行系统的研究[J]. 计算机应用研究, 2006, (5): 44-46.
- [88] 李亚白, 蔡宗琰, 郝文育, 等. 面向服务的可重构制造执行系统研究与实现[J]. 机械科

- 学与技术, 2005, 24(11): 1377-1382.
- [89] 柴永生, 树栋, 吴秀丽, 等. 制造执行系统柔性应用框架研究[J]. 计算机应用, 2005, 25(3): 679-681.
- [90] 邹顺享, 饶运清. 基于 Web 的可重构制造执行系统研究[J]. 计算机应用研究, 2006, (8): 240-242.
- [91] 张凌云, 黄刚, 左革成, 等. 支持网络化制造的车间 MES 与 CAPP 集成研究[J]. 机械科学与技术, 2006, 25(10): 1241-1245.
- [92] 徐云, 肖田元, 梁策. 网络化制造平台集成及制造网格研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(11):1838-1847.
- [93] 王彬, 王美清. 离散型制造企业生产质量信息管理与集成[J]. 航空精密制造技术, 2007, 43(1): 47-50.
- [94] 张士杰, 王成恩, 张福顺, 等. 基于组件的可重构制造执行系统[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2004, 10(04):422-427.
- [95] 周华, 刘民, 吴澄. 基于代理的可重构制造执行系统研究[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2005, 11(06): 776-780.
- [96] 程志伦, 范玉青. 钢铁企业基于组件的柔性制造执行系统设计[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(3): 490-496.
- [97] 刘卫宁, 黄文雷, 孙棣华, 等. 基于射频识别的离散制造业制造执行系统设计与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(10): 1886-1890.
- [98] 闫欢, 张宜生, 李德群. 规则引擎在制造企业 MES 中的研究与应用[J]. 计算机工程, 2007, 33(7): 210-212.
- [99] 王琦峰, 刘飞, 黄海龙. 面向服务的离散车间可重构制造执行系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(4): 737-743.
- [100] 王琦峰, 阎春平, 刘飞. 基于知识集成的车间制造系统运行模式研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(04):698-704.
- [101] 郝广科, 何卫平, 闫慧, 等. 模型驱动的制造执行系统可重构方法[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(03): 536-542.
- [102] 黄刚, 李晋航, 巫婕妤, 等. 离散制造业可适应制造执行系统的研究与实现[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(10):2137-2143.
- [103] 黄毅, 郑力, 向晴, 等. 支持跨粒度重构的制造执行系统体系结构[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(04): 747-759.
- [104] 张映锋, 赵曦滨, 孙树栋, 等. 一种基于物联技术的制造执行系统实现方法与关键技术[J]. 计算机集成制造系统, 2012, (12): 2634-2642.
- [105] 李亚杰, 何卫平, 陈金亮, 等. 可重构流程模型驱动和组件化的 MES 流程进化[J]. 计算

- 机集成制造系统, 2013, (04): 735-744.
- [106] 黄毅. 支持 RFID 实时监控的可重构制造执行系统研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2011.
- [107] Song Yuchuan, Lei Qi, Liu Fei. A Semantic Gateway Architecture for System Integration in Networked Manufacturing[J]. Key Engineering Materials, 2010, 419-420(2010): 453-456.
- [108] 陈学海. 基于语义网关的离散制造企业异构系统集成框架研究[D]. 重庆: 重庆大学硕士学位论文, 2009.
- [109] 雷琦, 宋豫川, 李先旺. 语义网关支持下的异构系统集成框架及其关键技术[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(11): 27-32.
- [110] 李先旺. 网络化制造中基于语义网关的异构系统集成体系结构及部分关键技术研究 [D]. 重庆大学博士学位论文, 2013.
- [111] 曹军. 多品种小批量机加车间数字化制造模式及支持系统研究[D]. 重庆: 重庆大学博士学位论文, 2012.
- [112] M. G. Mehrabi, A. G. Ulsoy, Y. Koren. Reconfigurable manufacturing systems: Key to future manufacturing[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2000, 11: 403-419.
- [113] 白俊杰, 龚毅光, 王宁生, 等. 面向订单制造的可重构制造系统中虚拟制造单元构建技术[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(02):313-320.
- [114] Hvolby Hans-Henrik, Trienekens Jacques H. Challenges in business systems integration[J]. Computers in Industry, 2010, 61(9): 808-812.
- [115] 李相育, 钱宇, 李秀喜. 基于 Web 服务的流程工业遗留系统的信息集成[J]. 计算机集成制造系统-CIMS, 2005, 11(10): 1387-1391.
- [116] 臧传真, 范玉顺. 基于智能物件的制造企业信息系统研究[J]. 计算机集成制造系统, 2007, 13(1): 49-56.
- [117] Li Qing, Zhou Jian, Peng Qi-Rui, 等. Business processes oriented heterogeneous systems integration platform for networked enterprises[J]. Computers in Industry, 2010, 61(2): 127-144.
- [118] Ricardo Jardim-Goncalves, Antonio Grilo, Adolfo Steiger-Garcia. Challenging the interoperability between computers in industry with MDA and SOA[J]. Computers in Industry, 2006, 57 (8-9): 679-689.
- [119] 周竞涛, 杨海成, 王明微, 等. 面向对等语义网格服务的企业信息集成框架[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(12): 2697-2707.
- [120] 赵振, 严隽薇, 刘敏, 等. 面向钢铁连铸设备 mro 的企业语义集成及业务协同平台[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(10): 2044-2056.
- [121] 余朋飞, 宋晓, 张霖, 等. 基于语义面向服务架构的信息集成系统体系结构研究[J]. 计

- 算机集成制造系统, 2009, 15(5): 959-967.
- [122] 蒋研川, 龚小容, 尹超. 摩托车零部件企业集成化车间生产管理系统集成框架及实现技术[J]. 重庆大学学报, 2011, 34(8): 71-79.
- [123] Kuk Seung Hak, Kim Hyeon Soo, Lee Jai-Kyung, 等. An e-Engineering framework based on service-oriented architecture and agent technologies[J]. Computers in Industry, 2008, 59(9): 923-935.
- [124] 岳英超, 肖田元, 范文慧, 等. 基于多视图—嵌套本体映射的高层体系结构语义互操作[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 932-942.
- [125] 顾新建, 张栋, 纪杨建, 等. 制造业服务化和信息化融合技术[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(11): 2530-2536.
- [126] Panetto Hervé, Molina Arturo. Enterprise integration and interoperability in manufacturing systems: Trends and issues[J]. Computers in Industry, 2008, 59(7): 641-646.
- [127] S. Izza, L. Vincent, P. Burlat. Exploiting semantic web services in achieving flexible application integration in the microelectronics field[J]. Computers in Industry, 2008, 59(2008): 722-740.
- [128] 张莹, 黄厚宽, 杨冬, 等. 基于 Chord 的带有 QoS 的语义 Web 服务发现方法研究[J]. 电子与信息学报, 2009, 31(3): 711-715.
- [129] 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.
- [130] 邱田, 李鹏飞, 林品. 一个基于概念语义近似度的 Web 服务匹配算法[J]. 电子学报, 2009, 37(2): 429-432.
- [131] 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.
- [132] 冯建周, 孔令富, 王晓寰. 基于语义关系图的 Web 服务自动组合方法[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(2): 427-436.
- [133] 徐红霞, 杜彦华, 董绍华. 时序约束下 Web 服务组合的兼容性修正研究[J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(11): 2562-2572.
- [134] 王志坚, 程永上, 徐经纬. Web 服务组合语义一致性验证研究[J]. 计算机集成制造系统, 2009, 15(1): 202-208.
- [135] 史忠植, 常亮. 基于动态描述逻辑的语义 Web 服务推理[J]. 计算机学报, 2008, 31(9): 1599-1611.
- [136] 李决龙, 张淼淼, 邢建春, 等. 遗留系统的服务识别方法研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(9): 2374-2383.



## 附 录

### A 相关的论文目录

- [1] 陈学海, 宋豫川, 鄢萍, 刘飞. 基于语义网关的离散制造执行系统集成可重构研究[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4):745-550.
- [2] Xuehai CHEN, Yuchuan SONG, Ping YAN, Xianwang LI. Semantic Integration Principles for Manufacturing Information Systems based on Semantic Gateway[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(4):217-225.
- [3] 陈学海, 宋豫川, 鄢萍, 刘飞. 基于语义网关的可配置制造信息集成方法[J]. 计算机集成制造系统, 已录用.
- [4] Xianwang Li, Yuchuan Song, Ping Yan, Xuehai Chen. Framework and Modeling Method for Heterogeneous Systems Information Integration Based on Semantic Gateway[J]. Journal of Networks, 2014, 9(4):979-985.

### B 从事的科研项目

- [1] 2011 年至今, 作为主研人员参与国家自然科学基金项目“基于语义网关的制造企业异构信息系统集成建模方法和实现技术”(No.51075414)
- [2] 2009 年至 2010 年, 作为主研人员参与国家 863 计划项目“基于语义网关的异构系统集成模式、体系结构与支撑技术研究”(No.2007AA04Z152)
- [3] 2012 年至至今, 作为主研人员参与国家科技支撑计划重大项目“船舶柴油机关键系统绿色制造技术与集成应用工程”(No.2012BAF01B01)

### C 授权的发明专利

- [1] 宋豫川, 雷琦, 刘飞, 李先旺, 陈学海. 一种用于企业信息化异构系统集成的语义网关[P]. (专利号: ZL200910104048.6, 授权日期: 2011 年 12 月 14 日)



# 学位论文独创性声明

本人声明所呈交的~~博~~士学位论文《~~基于网络的智能执行系统建模与关键技术~~》是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

学位论文作者签名：陈学海

签字日期：2014-5-31

导师签名：郭萍

签字日期：2014-5-31

# 学位论文使用授权书

本学位论文作者完全了解重庆大学有关保留、使用学位论文的规定。学校有权按有关规定向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权重庆大学可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存、汇编学位论文，可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版。

非军工项目保密的学位论文在解密后也遵守此规定。（涉密期限至\_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日。）

作者签名：陈学海

导师签名：郭萍  
2014 年 5 月 31 日

**备注：**审核通过的军工涉密论文不得签署“授权书”，须填写以下内容：

该论文属于军工涉密论文，其密级是\_\_\_\_\_，涉密期限至\_\_\_\_\_年\_\_\_\_月\_\_\_\_日。

**说明：**本声明及授权书必须装订在提交的学位论文最后一页。

# 基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系与关键技术研究

作者: [陈学海](#)  
学位授予单位: [重庆大学](#)

引用本文格式: [陈学海](#) [基于语义网关的离散制造执行系统可重构体系与关键技术研究](#)[学位论文]博士 2014