第 34 卷第 3 期　　河 北 科 技 大 学 学 报　　Vol. 34, No. 3
2013 年 6 月　　Journal of Hebei University of Science and Technology　　June 2013

文章编号:1008-1542(2013)03-0182-06　　doi:10.7535/hbkd.2013yx03002

一种复杂集成服务型机械产品的模块化结构建模方法

李　浩,乔东平

(郑州轻工业学院机电工程学院,河南郑州　450002)

摘　要:研究了复杂集成服务型机械产品的模块化结构建模过程、原理与方法。建模方法主要包括以下两方面:首先,基于系统学原理(采用微观与宏观结构相结合的原理)和质量功能配置原理,实现了模块化设计与微观结构建模;然后,基于物理结构-网络拓扑映射原理,将集成服务产品结构抽象为社区结构网络,分析复杂集成服务产品的社区网络特性,实现模块化结构宏观建模。以上研究有助于揭示集成服务型机械产品内部关联规律和整体特性,从科学层面指导产品设计、质量控制和服务增值。

关键词:制造服务;集成服务型产品;模块化设计;结构建模;产品服务系统

中图分类号:TH122　　**文献标志码:**A

A modular structure modeling method for complex integrated service mechanical products

LI Hao, QIAO Dongping

(School of Mechanical and Electric Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou Henan 450002, China)

Abstract: The modular structure modeling process, principles and methodology of complex integrated service-oriented mechanical products are studied in this paper. The modeling methods mainly includes two aspects: first of all, based on the systematic principle (the principle which macro and micro structure combines together) and quality function deployment principle, the modular design and micro structure modeling are realized; second, based on the "physical structure-network topology" mapping principle, the ISP structure is abstracted as the community structure network, and then the community network characteristics of complex ISP are analyzed to realize the macro modular structure modeling. These studies help to reveal the inter-related laws and overall characteristics of the integrated service-oriented mechanical products, which provide the guidance for product design, quality control and value-added services in scientific level.

Key words: manufacturing service; integrated service product; modular design; structure modeling; product-service system

近年来,由于环境与可持续发展问题的日益严峻,同时,由于企业间价格战的恶性竞争使得单纯卖物理产品的利润越来越低,PSS 开始吸引工业界和学术界极大的兴趣,成为产品可持续发展的重要手段之一。PSS 系统设计是实现 PSS 的最重要环节,已成为 PSS 领域的研究热点之一[1-3]。

随着用户对产品和服务个性化需求越来越强烈,客户所需的物理产品与服务越来越具有明显的个性化

收稿日期:2013-03-02;修回日期:2013-03-26;责任编辑:李　穆

基金项目:国家自然科学基金(51205372);郑州市科技攻关项目(112PPTGY249-6)

作者简介:李　浩(1981-),男,河南南阳人,讲师,博士研究生,主要从事制造服务、设计方法学、网络化协同制造等方面的研究。

E-mail: lh9666@hotmail.com

和多变性特点，主要表现在物理产品的个性化、服务内容个性化与服务选择与使用的多变性[4-5]。随着 PSS 战略的出现，传统的模块化设计方法学需要扩展[6]，因为 PSS 中的产品与服务的个性化和多变性必然造成企业在管理、设计制造、供应和实施等环节成本的增加[5]。解决个性化与低成本矛盾的关键是实现客户需求的物理产品与服务的模块化，产品与服务的模块化战略可以应用于降低产品工程的复杂度[7]。因此，通过建立一系列标准的物理模块和服务模块，实现内部模块少样化，降低生产成本和减少对环境的影响；通过模块化组合实现物理产品与服务外在的个性化和多变性，满足客户的个性化需求[8-9]。

为了提升产品与服务集成后的潜能，AURICH 等在 PSS 领域首先提出了 PSS 系统的模块化设计框架、原理和配置设计方法，针对投资型产品，提出了一个两步骤的方法，建立了实现技术型产品－服务系统模块化原理，提出一个过程库用来设计和制造技术型产品－服务系统，也用来选择、组合和适应合适的过程模块[6,10-11]。WANG 等在 PSS 并行模块化开发和理解物理产品与服务的关系等方面做了深入研究，提出了一个面向 PSS 的模块开发框架，认为模块化过程可以分为 3 个部分：功能性、产品和服务模块化，采用 QFD 方法与 Portfolio 技术实现了面向 PSS 的模块开发[12]。集成物理产品与服务的产品模块化设计中，理清物理模块与服务模块的关系以及交互设计过程是难点和重点。对此，LI 等建立了广义产品模块化过程总体模型，并提出了一个三阶段的交互式集成服务型产品模块划分方法，将服务划分为功能性服务和非功能性服务，通过功能性服务理清了物理模块与服务模块的交互关系，实现了物理模块划分与服务模块划分的有机融合[9,13]。

以上研究促进了产品设计与服务的有机融合，推动了 PSS 系统的快速开发与实施。然而，传统物理产品与集成服务型产品存在较大不同，传统物理产品的模块化结构设计与建模理论需要拓展。对于复杂的机械产品，组成模块和零部件也越来越多，集成服务型产品在产品提供和系统实施方面变得较为复杂。例如，一架波音飞机就由两百多万个模块组成，一台汽轮机也有数万个模块，而复杂机械产品在集成无形的产品服务以后会变得更加复杂，在产品的概念设计阶段，就应该考虑到产品提供阶段的用户服务。模块化战略已经应用于降低产品与服务工程的复杂度[6]。然而，集成服务型机械产品所形成的复杂模块化系统里面蕴涵一系列科学问题，如有形的物理模块和无形的服务模块之间内在关联关系是怎样的，它们之间是怎样有机融合的。复杂集成服务型产品构成的复杂模块化系统究竟呈现哪些宏观整体特性，与传统物理产品形成的复杂模块化系统有哪些区别，这是一系列有趣并具挑战性的问题。

基于以上问题，本文首先分析了复杂集成服务型机械产品的模块化设计过程，给出了模块化结构建模原理。提出了复杂集成服务型机械产品的模块化结构建模方法，包括微观建模方法与宏观复杂网络建模方法。

1　复杂集成服务型机械产品的模块化设计过程

集成服务型产品是在销售阶段根据客户的订单需求形成的，如图 1 所示。集成服务型产品模块化设计的目的是建立面向服务配置的模块化平台，通过该平台可以配置出个性化的集成服务型产品。在客户需求、概念设计、详细设计等阶段，搜集客户需求，转化为技术特征和服务需求，服务需求包括功能性服务和非功能性服务，通过对其进行模块划分，形成服务模块主结构。物理产品的模块化设计需要对技术特征和功能性服务的分析，采取合适的模块划分方法，构建出物理模块主结构。

2　复杂集成服务型机械产品的模块化结构建模原理

1)整体宏观与内部微观研究相结合的系统学建模原理

集成服务型产品具有多角色、多类型和动态性的特点，在整体上呈现出复杂系统的特性。多角色是指产品形成和使用阶段涉及客户、设计人员、销售人员、培训人员、安装维修人员、产品回收人员等不同角色；多类型是指产品是由物理产品和产品服务组成，产品服务包括销售、安装调试、培训、维护维修、保养和回收等多个阶段的服务；动态性是指在产品的全生命周期过程中，产品服务的多变性导致产品结构的动态演变。根据复杂集成服务型机械产品的特点，结合系统学思想，不仅研究零部件和模块的特性，还必须从系统网络拓扑结构入手，采用系统宏观与结构微观相结合的原理来研究产品的内部结构关联机理与产品结构整体特征，控制系统结构并使之达到总体最优。

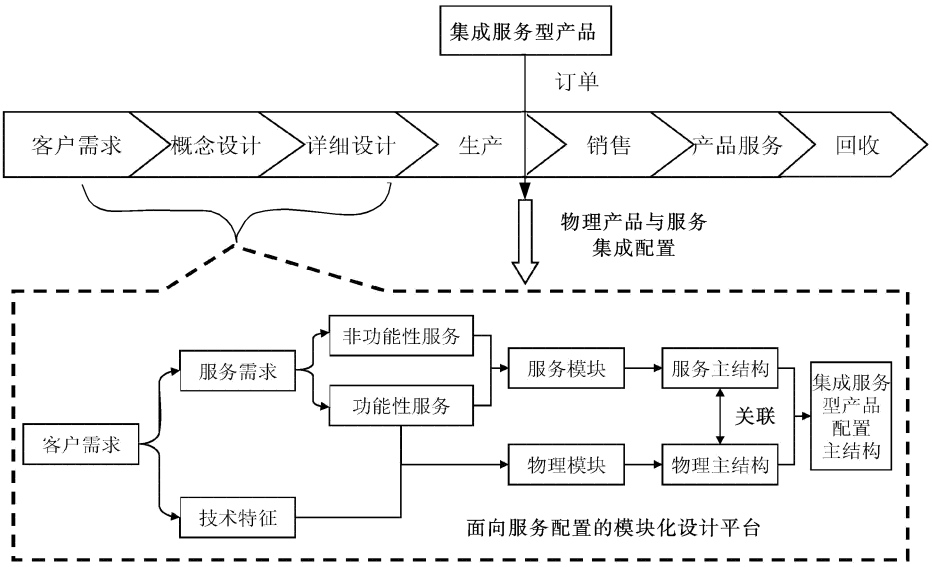

图 1 集成服务型产品的模块化设计过程

Fig. 1 Modular design process of ISP

2)多粒度的层次性建模原理

集成服务型产品可以分解为多个层次,每个层次粒度大小取决于具体的研究对象。最底层包括零件、服务过程等;中等层次是部件、物理模块、服务模块等;高层次是产品系统层。在不同的层次,研究产品的特性不同。在底层,主要研究微观零件的结构组成、时空规则、关联关系与描述方法等;在中等层次,主要研究模块间关系、主导子模块等,发现内部的关联机理;在最高层次,研究系统特性与演化规律。

3)物理结构—网络拓扑映射的建模原理

在从系统学原理研究集成服务型产品模型的过程中,可以将物理系统抽象成网络结构,从宏观上研究产品系统的整体特性与规律。零部件对应于网络上的节点,模块对应于网络社区,产品对应于网络系统。可以通过研究网络社区结构特性,发现系统结构的宏观特征与控制方法,然后再将具体原理和方法映射到物理系统中,实现对复杂集成服务型机械产品的优化建模。

3 复杂集成服务型机械产品的模块化结构建模方法

3.1 微观建模方法

3.1.1 集成服务型产品内部模块化结构作用原理分析

分析物理产品与服务的关系,包括物理零部件间的关系、服务间的关系和物理零部件与服务间的关系,如图 2 所示。根据服务与物理产品的关联程度,可将服务分成功能性服务与非功能性服务[9]。功能性服务与相关的可选物理组件直接相关,特定的可选物理组件在装配到物理产品中的情况下才能开展此产品的功能性服务;而非功能性服务能否开展与某一组件无关。因此,集成服务型产品的设计不但要考虑面向服务的物理产品设计,还需考虑基于物理产品的服务设计,要保证物理模块、相应的功能性服务模块之间的一致性,是物理产品和服务的集成设计过程。

3.1.2 一个“服务—物理—服务”三阶段模块划分过程

复杂集成服务型机械产品模块划分过程是一个服务模块划分与物理模块划分交互的“服务—物理—服务”过程。将“服务—物理—服务”模块化设计过程分为 3 个步骤,如图 3 所示,依次为基于“Top-Down”的服务模块划分、基于“Top-Down”的物理模块划分和基于“Bottom-Up”的服务模块划分过程[9]。

1)在“Top-Down”的服务模块划分过程中,模块划分是按照“服务需求域—服务功能域—服务模块域”的映射过程来实现的,是一种自上而下的过程。首先,分析服务功能,建立服务功能树,将其映射为服务业务;然后,把服务之间的相关性分为功能相关、类相关和服务过程相关,并建立综合相关性矩阵,通过计算服务间的相关度,使划分出的模块之间能够最大限度地满足各方面的需求,实现服务模块的划分。

2)基于“Top-Down”的物理模块划分。在广义产品中,物理模块划分的基本原理是通过“客户需求域—

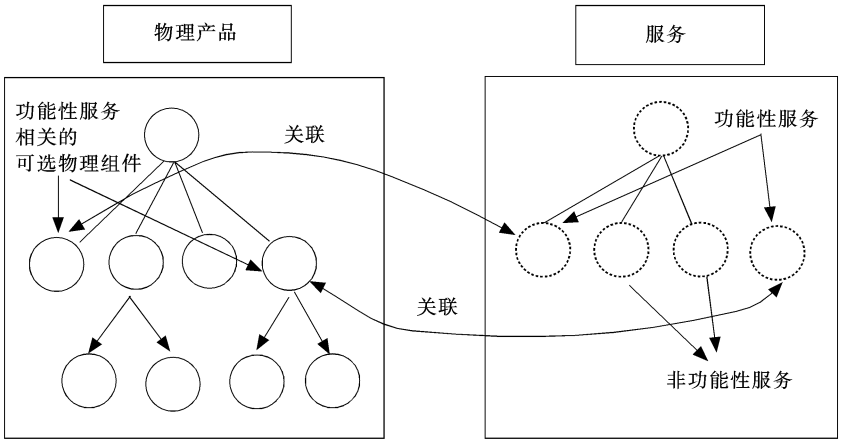

图 2　物理产品与服务关系分析

Fig. 2　Relation analysis between physical product and service product

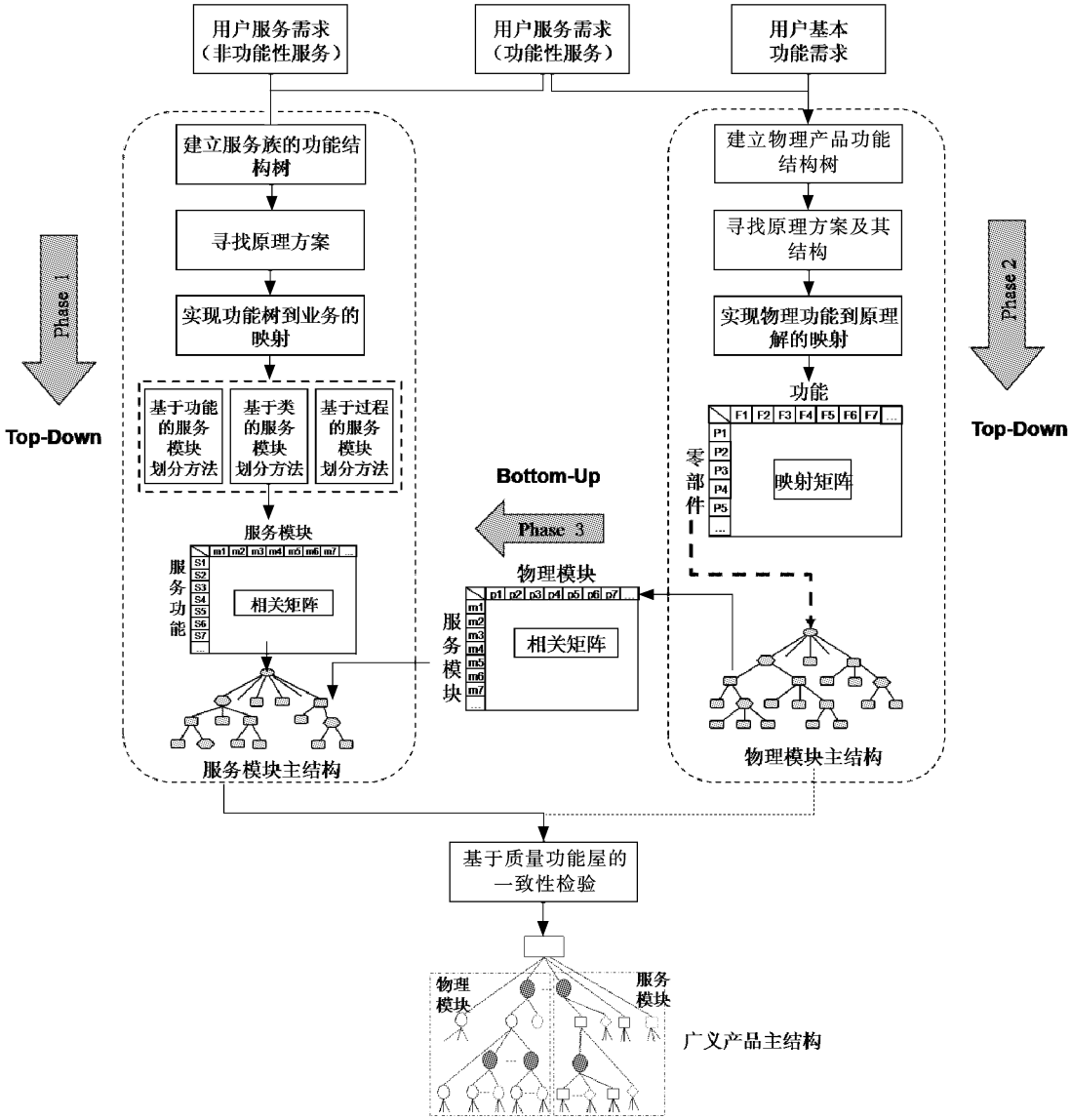

图 3　集成服务型产品模块划分过程模型

Fig. 3　Modular partition process model of ISP

功能域—结构模块域”的映射来实现，是一种自上而下的过程。

3)基于“Bottom-Up”的服务模块划分。一些服务模块如保修服务、备品备件服务等，与特定的物理模块关联度较高，在物理产品设计完成之前无法准确确定具体服务内容。因此，必须在物理模块设计完成后，根据物理模块来确定具体服务模块，这是一个从下到上的过程，因此称为“Bottom-Up”方法。

4)基于质量功能屋的冲突检测与消解机制和方法

在集成服务型产品交互式模块化设计中，物理模块之间、服务模块之间、物理与服务模块之间、用户需求与模块之间等存着诸多可能的冲突之处。例如，物理与服务模块划分粒度的大小不一致可能导致配置设计过程中的冲突；用户的服务模块需求在物理产品配置时无法得到保证等。基于此，在面向配置(物理模块与服务模块)的模块化设计过程中，可采用基于质量功能屋的用户需求、物理模块与服务模块划分的一致性检验方法和基于规则的冲突消解机制等。

3.1.3 物理产品与服务的循环式优化设计

“服务—物理—服务”模块化设计过程可归纳为“划分服务模块—划分物理模块—完善服务模块”的单循环过程。在模块划分过程中，服务模块化设计的约束目标是企业利润最大化和客户满意度，物理模块化设计的约束目标是功能与性能最优和成本最低。尽管在单次优化设计中能满足服务模块化设计和物理产品模块化设计的约束目标，然而，由于物理与服务之间有复杂的交互关联关系，单次循环设计后形成的总体模块化方案不一定是最优化方案，需要对总体方案进行评价。广义产品模块化方案需要从环境需求、服务需求、功能需求、性能需求和用户特点等方面综合评价，系统总体目标是功能性能最优和利润最大化。在完成首轮评价发现方案不是最优化，内部模块之间有不一致情况或用户需求不能得到有效满足，则需要进入更高一层次的循环设计，如图4所示。直到得到能满足用户需求和约束目标的最优化方案为止。

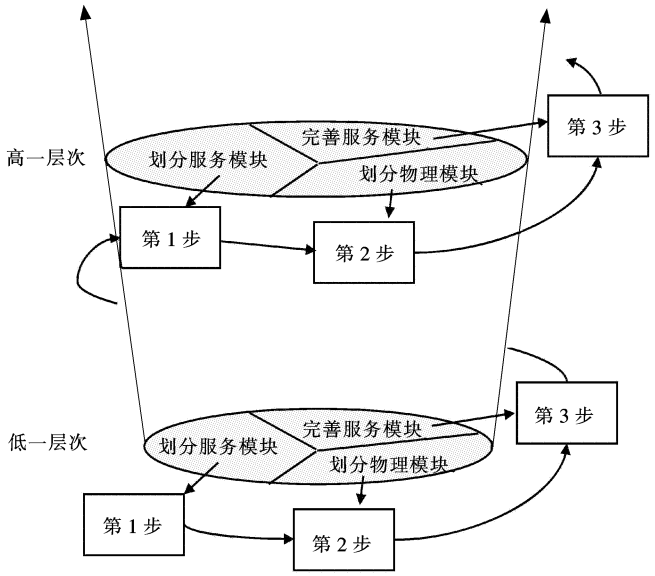

图4 螺旋式的循环设计原理

Fig. 4 Principle of spiral and loop design

3.1.4 建立复杂集成服务型机械产品模块化主结构

基于层次性原理建立集成服务产品的模块化主结构，主结构由物理模块和服务模块组成，包含基本模块、必选模块和可选模块(或额外模块)，各模块之间通过关联规则和联系组合而成。所谓基本模块，是指组成一个产品时必须包括的物理和服务模块；必选模块，是必须按照一定的规则从主结构中指定的模块中选择一定数量的模块；可选模块(额外模块)，是根据客户的特殊需求，按照一定的规则选择的物理和服务模块，有时客户需要特殊的服务不在主结构中，需要快速完善主结构。

3.2 宏观建模方法

3.2.1 复杂集成服务型机械产品网络建模

集成服务型产品模块化主结构是一个可配置的、包括所有可能零部件和服务模块组合的集合。运用网络建模原理，将已建立的集成服务型产品(族)主结构关系网络转换为网络表示形式，构造一张加权有向无环网，其中节点是产品中各个单独的个体(产品、部件、零件、服务和服务包)，有向边表示零部件(含服务)间的从属关系，方向是从上一级零部件(含服务)指向直接隶属于该零部件(含服务)的下一级零部件(含服务)，边权是父节点包含子节点的数目[9]。

3.2.2 基于社区结构网络理论的产品(族)结构分析

根据复杂集成服务型产品的网络拓扑模型，对零部件模块与服务模块关系网络分析，本文主要分析模块化网络的社区结构特性。模块度是度量网络社区结构的重要指标之一，主要用来评价网络结构的模块化程度。社区结构的强度也是度量网络社区结构的重要指标之一，主要用来评价网络结构的强健程度。如图5

所示，由 32 节点组成的五社区网络。当网络的社区结构强度较小时，各个社区之间连接就比较松散，当其中一个社区的某一个节点发生故障，故障就会在这个社区中迅速传播。通过计算社区网络的模块度和社区模块强度来分析集成服务型产品(族)的模块化程度、社区结构的强健度。对分析复杂集成服务型产品的模块最优划分、模块质量特性等有一定应用价值。

4　结　语

分析了 PSS 领域的模块化建模方法，指出了现有方法应用于集成服务型产品建模中的不足之处。提出了复杂集成服务型机械产品的模块化设计过程、原理与方法。提出研究集成服务型产品内部机理，建立集成服务型机械产品的结构组成、时空规则、物理与服务关联模型、模块冲突与一致性等，有助于发现复杂集成服务型机械产品内部服务模块、物理模块与模块化设计之间的影响规律。提出通过将集成服务产品模块化树状主结构映射为网络拓扑结构。运用网络建模原理来分析其社区结构特性，如出入度、模块度、社区结构强度等，从宏观角度分析集成服务型产品的模块化结构特性，发现模块化系统中蕴含的规律，以指导产品质量控制和服务增值演化。本文的研究内容对面向服务配置的集成服务型产品结构优化设计、基于社区结构网络的产品质量控制和基于社区结构网络的服务增值演化等方面有一定的指导价值。

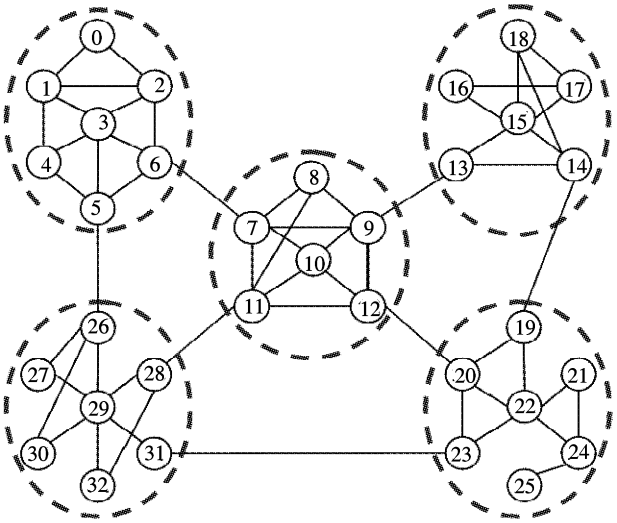

图 5　由 32 节点组成的五社区网络

Fig. 5　Five-community networks composed of 32 nodes

参考文献/References：

[1] GOEDKOOP M, HALEN V C, RIELE H T, et al. Product Service Systems, Ecological and Economic Basics [R]. The Netherlands: Pre Consultants, 1999.

[2] MONT O. Clarifying the concept of product-service system[J]. Journal of Cleaner Production, 2002,10(3): 237-245.

[3] 李　浩，纪杨建，祁国宁，等. 制造与服务融合的内涵、理论与关键技术体系[J]. 计算机集成制造系统，2010，16(11)：2 521-2 529.
LI Hao, JI Yangjian, QI Guoning, et al. Connotation, theory and key technologies on the fusion of manufacturing and services[J]. Computer Integrated Manufacturing System, 2010, 16(11): 2 521-2 529.

[4] JIAO J X, MA Q H, TSENG M M. Towards high value-added products and services mass customization and beyond[J]. Technovation, 2003,23 (10): 809-821.

[5] SUNDIN E, LINDAHL M, COMSTOCK M, et al. Integrated product and service engineering enabling mass customization[A]. Proceedings of 19th International Conference on Production Research[C]. Santiago:[s. n.], 2007. 786-791.

[6] AURICH J C, FUCHS C, WAGENKNECHT C. Modular design of technical product-service systems[A]. Innovation in Life Cycle Engineering and Sustainable Development[C]. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 303-320.

[7] WELP E G, MEIER H, SADEK T, et al. Modelling approach for the integrated development of industrial product-service systems[A]. Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier: The 41st CIRP Conference on Manufacturing Systems[C]. Tokyo: [s. n.], 2008. 525-530.

[8] 李　浩，顾新建，祁国宁，等. 现代制造服务业的发展模式及中国的发展策略[J]. 中国机械工程，2012，23(7)：798-809.
LI Hao, GU Xinjian, QI Guoning, et al. Research on the development mode of modern manufacturing services and its development strategy in China [J]. China Mechanical Engineering, 2012,23(7): 798-809.

[9] LI Hao, JI Yangjian, GU Xinjian, et al. Module partition process model and method of integrated service product[J]. Computers in Industry, 2012, 63(4): 298-308.

[10] AURICH J C, SCHWEITZER E, FUCS C. Advances in life cycle engineering for sustainable manufacturing businesses[A]. Proceedings of the 14th CIRP Conference on Life Cycle Engineering[C]. Berlin:[s. n.],2007. 32-47.

[11] AURICH J C, WOLF N, SIENER M, et al. Configuration of product service systems[J]. Journal of Manufacturing Technology Management,2009, 20(5):591-605.

[12] WANG P P, MING X G, LI D, et al. Modular development of product service systems[J]. Concurrent Engineering, 2011, 19(1): 85-96.

[13] LI Hao, MA Jun, XIAO Yanqiu, et al. Research on generalized product and its modularization process[A]. Proceedings of 2011 International Conference on System Science, Engineering Design and Manufacturing Informatization[C]. Guiyang:[s. n.], 2011. 290-293.