

面向全生命周期的服务制造网络建模研究*

李冀, 莫蓉

(西北工业大学 现代设计与集成制造技术教育部重点实验室, 西安 710072)

摘要: 服务型制造是企业间通过相互服务实现协同和创新, 企业间的相互服务聚集成了复杂的网络关系。如何描述和分析这种关系是研究维护并优化协同制造关系的前提。针对服务型制造发展的需要, 提出了面向全生命周期的服务制造网络建模方法。首先深入分析了服务型制造网络的概念和特点以及产品与服务的关系; 然后根据产品 BOM 建立了满足服务制造的 BOM, 在此基础上, 构建了设计、制造、维护三种基本形态的全生命周期的服务型制造网络模型。

关键词: 服务化制造; 产品全生命周期; 物料清单

中图分类号: TP391 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3695(2012)04-1349-04

doi: 10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.041

Research on modeling service-embedded manufacturing network oriented to product lifecycle

LI Ji, MO Rong

(Key Laboratory of Contemporary Design & Integrated Manufacturing Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Service-embedded manufacturing enterprise realize collaboration and innovation through mutual service, and mutual service relationship gathered a complex network. The research on the relationship is the key of service-embedded manufacturing theory. Due to the development of service-embedded manufacturing, this paper proposed manufacturing network modeling oriented to product lifecycle. Firstly, it analyzed the concept and characteristics of service-oriented manufacturing network and the relationship between products and services. Then it established the BOM to meet service manufacturing. On this basis, it constructed the design, manufacture, maintenance of service-based network models which formed service-based network model oriented to product lifecycle.

Key words: service-embedded manufacturing; product lifecycle; bill of material (BOM)

0 引言

服务化已成为当今世界制造业的发展趋势之一。为了便于产品的销售、提高用户的忠诚度、创造新的市场机会和获得新的效益增长点, 制造企业开始广泛地进行服务竞争, 试图通过服务来增强产品竞争力并将其作为价值的新来源。这种变化使得企业间的分工和协作更加精细化, 企业间因相互提供产品服务而形成的关系越来越趋于网络化。服务制造网络是服务发现与检索、产品协同开发的基础。因此, 如何对这种服务型制造网络进行建模, 是服务型制造领域中亟待解决的问题之一。

服务型制造已经成为制造业关注的焦点。国内外许多学者对其进行了深入的研究。文献[1]定义了服务化的概念。文献[2]提出了基于服务的制造概念。文献[3]提出了服务增强的概念, 并对生产性服务在企业组织层面的微观机理进行了探索。文献[4]指出制造企业可以通过提供服务来提高附加值, 延长价值链。文献[5]提出了面向企业服务的框架(enterprise service oriented architecture, ESOA)。该体系中的服务层

应包含必要的规则和功能, 以将多种服务合并成单一的集成服务。文献[6]在 ESOA 概念的基础上建立了产品服务系统(product service system, PSS), 该系统是一个由产品实体和服务组成的、能够满足客户需求的集合体。文献[7]从理论上将产品服务系统分为面向产品的 PSS、面向使用的 PSS 和面向结果的 PSS 三种类型。文献[8]针对制造服务的发现, 结合语义 Web 技术, 设计了制造网格服务本体并以此提出了制造网格服务发现模型。文献[9]针对语义 Web 的缺点, 提出了制造资源 UDDI 和 WSIL 联合发现机制, 并构建了网络制造资源发现框架。文献[10]以服务质量达到最优化为目标, 设计了一种迭代的在线服务选择方法。文献[11]提出一种基于 ASP 的网络化制造集成服务平台 e-MES 模型, 并研究了共性技术和关键使能技术。文献[12]提出了一种通过建立组合服务模式规约来验证多个服务组合有效性的方法。

从已有的研究来看, 制造产品服务关系(product service relationship, PSR) 使得服务型制造系统的运行面临着一系列难题: a) 不同产品链上节点企业之间相互提供服务性生产活动, 增加了网络复杂性; b) 服务的即时性增强了服务型制造网络的动态性; c) 服务的跨界性增加了资源利用的复杂性(协同博

收稿日期: 2011-09-07; 修回日期: 2011-10-14 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50805122)

作者简介: 李冀(1975-), 男, 河北辛集人, 博士研究生, 主要研究方向为数字化制造、制造协同(twoii@163.com); 莫蓉(1957-), 女, 教授, 博导, 主要研究方向为数字化制造、制造协同。

奔);d)服务的无形性增加了制造对客户主观感受和企业的知识依赖性。这些困难使得必须对服务型制造网络进行建模,以便对其形成、状态、结构、特点等方面进行研究,从而为服务型制造提供理论依据。

1 服务型制造网络

1.1 服务型制造中的产品、服务和企业

产品结构反映了产品及其组成部分的关系,组成产品的各个部分则是服务的载体,企业为产品全生命周期的各个阶段提供服务。一个企业不仅可以提供多个产品服务,而且可以在某一服务中是提供者而在另一服务中却是接受者。在产品全生命周期内,产品服务关系(product service relationship, PSR)模型用于描述企业间因相互提供产品服务系统而形成的关系,其主要元素包括服务提供者(service provider, SP)、服务接受者(service accepter, SA)、服务类型(service type, ST)、服务载体(service carrier, SC)、载体所有权(ownership of service carrier, OoSC)、服务质量(quality of service, QoS)、服务时间(timeliness of time, ToS)和服务成本(cost of service, CoS)等。如图 1 所示,产品由软件部分和硬件部件组成,而硬件又可以分为部件、零件和标准件。这些元素都可以作为服务的载体。从这个角度来说,产品服务可以分为以下几种类型:

- a) 零件相关服务,包括设计、加工、运输、维修和回收等。
- b) 部件相关服务,包括设计、装配、修理和维护等。
- c) 软件相关服务,包括设计、开发、部署、维护和升级等。
- d) 产品相关服务,包括维修、维护和租赁等。

对于某一服务类型,可能存在几个候选的服务提供者。

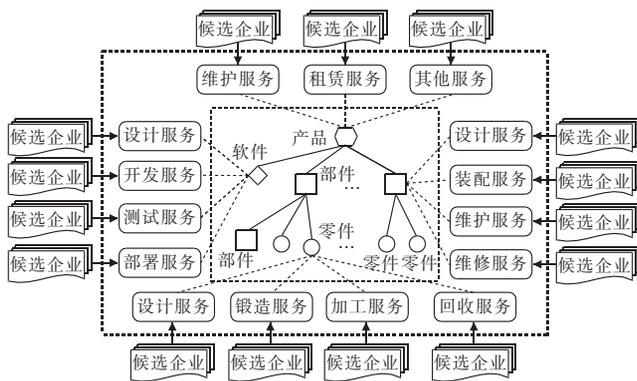


图 1 企业、产品与服务的关系

1.2 服务制造网络的概念和定义

在产品全生命周期内,每一服务都可以分解为若干服务节点。根据它们之间的逻辑次序,形成了一个产品服务链。服务候选者可以发布其服务,而服务接受者则可以从其中为每一个服务节点选择出服务提供者。当产品服务链上所有的节点都满足时,该服务的需求就得到了圆满解决,如图 2 所示。在该过程中,众多企业聚集形成了服务网络。企业间分工协作、优势互补、相互提供零部件和生产性服务,实现能力提升和快速应变。本文定义了面向全生命周期的产品服务网络(product service network, PSN)概念来描述这种关系。其定义为:产品服务网络是一个描述全生命周期内产品服务关系的有向网络。服务的提供者和接收者映射为网络中的节点,他们之间的关系映射为从服务提供者节点指向服务接收者节点之间的有向线段,即服务网络的边。由于一个服务提供者和一个服务接收者

之间可能存在多个服务关系,因此两个节点之间的连线可能不唯一。

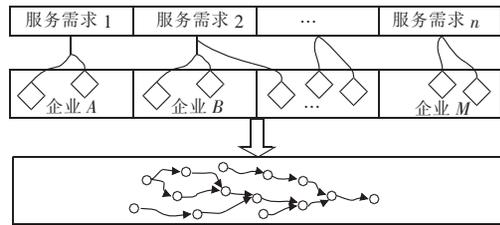


图 2 产品服务链

在产品的整个生命周期中,需要 n 个类型的服务,有 m 个企业参与其中。根据企业在产品生命周期中扮演的角色,将企业分成核心企业、生产型服务企业和服务型生产企业三类。核心企业由核心设计企业和核心制造企业组成,前者提供产品的设计服务和设计知识服务,后者提供产品制造服务、服务方案的设计和制造知识服务。生产型服务企业包括运输服务企业、设计服务企业(零部件设计)、租赁服务企业、软件开发企业、仓储服务企业。服务型生产企业包括零部件生产企业、维护服务企业、维修服务企业、测试服务企业、产品部署企业和原材料供应商等。

定义 1 服务型制造网络是一个有向图,描述了在产品生命周期中提供服务的企业之间的关系。有向图的节点表示服务的提供者和接收者,即企业;有向图的边表示企业间的服务关系。

定义 2 服务型制造网络中任意一条边的权 w_{ij} 通过该服务的持续时间、成本和服务质量加权确定。

定义 3 一个服务制造网络可用一个 $m \times m$ 矩阵 A 来描述其拓扑关系。其中的元素 x_{ij} 表示企业 j 接受了企业 i 服务的数量。

定义 4 与节点 v_i 相邻的边的数量是这个节点的度,记为 k_i 。该节点提供服务数量定义为节点的出度,记为 k_{in} ,接受服务的数量定义为节点的入度,记为 k_{im} ,则 $k_i = k_{in} + k_{im}$ 。

定义 5 一个产品服务链也定义为描述服务关系系列的有向图,服务关系映射为图的节点,它们的序列关系映射为图的边,可以用 $n \times n$ 的矩阵 Y 来描述产品服务链的拓扑关系。其中的矩阵元素 $y_{ij} = 1$ 时表示服务 i 在服务 j 之前,否则 $y_{ij} = 0$ 。

1.3 服务制造网络的特点

- a) 导航性。作为服务型制造的核心,服务型制造网络可以实现对整个产品服务过程的导航和控制。
- b) 阶段性。服务型制造网络针对服务过程而动态构建,由于服务型制造的过程存在任务发布、设计、制造、维护、回收等阶段,服务型制造网络也有相应的阶段变化。
- c) 全局性。服务型制造网络作为服务型制造体系的核心而存在,实现了整个服务性制造体系的全局控制和调度。
- d) 动态性。由于服务过程的动态性,与其对应的服务型制造网络也随着服务的产生和灭亡而具备相应的动态性。
- e) 分布性。服务型制造网络遍布整个服务型制造领域,不仅要用其在制造场所间的调度和跟踪,而且需要生产性服务场所间的调度和跟踪。
- f) 服务性。服务型制造网络以服务整个产品生命周期为目标,通过实现服务过程的全局数据和资源的跟踪控制来从服务企业层面上实现对成本、工期、质量的控制管理。

1.4 服务制造网络的分类

服务型制造网络可以分为单一的服务型制造网络和复合的服务型制造网络两类。单一的服务型制造网络为针对单一特定制造任务而形成的包括从动态服务任务分配、设计、制造,到维护、升级等为整个产品全生命周期提供服务流程的核心企业、扩展企业以及客户的、动态的、复杂的、基于时序的有向网络图。复合的服务型制造网络为包含网络中所有提供服务的供应商、客户共同组成的动态的、复杂的有向网络图,它是由所有的单一服务型制造网络复合交叉而形成的。单一的服务型制造网络是服务型制造的基本形态,是产品全生命周期的服务保障。由于现代工业产品的复杂多样性和供应商间的复杂关系,交叉复合形成了各种复合的服务型制造网络。

2 面向全生命周期的服务制造网络的构建

现代产品一般经历概念设计、结构设计、详细设计、工艺规划、生产制造和销售服务几个基本的全生命周期的阶段。针对产品生命周期不同阶段的不同服务需求,企业需要提供面向产品服务的设计、面向产品服务的制造以及便于向客户提供产品维护的服务。为了提供这些服务,只有形成一系列基于产品的、动态的、有效的服务型制造网络,才能使得服务企业和用户保持紧密的、动态的合作,才能最大程度地满足用户个性化需求和拓展服务价值。

现代产品的制造中,企业间的分工和协作更加精细化,企业更专注自身的核心竞争力,将自身聚焦在最擅长的环节中。企业相互间通过生产性服务和服服务性生产,在更紧密的分工和协作中以敏捷、柔性、高效、低成本的生产方式为顾客提供产品及其应用的解决方案。与之对应的是,服务型制造网络的规模大,用户需求多,需要管理方式的革新。产品 BOM 是企业间信息传递的主要形式,围绕产品 BOM 可以利用目录服务技术建立服务型制造的 BOM。该 BOM 作为分布式的服务型制造网络的核心管理组件,应该作为一个整体来管理,通过一个完全的、单一的、集成的网络视图展现出来。相对应传统模式,服务型制造的 BOM 不仅包含设计、制造过程中产生的信息,而且包含各种服务信息,如服务种类、服务开始时间、服务成本等。在设计阶段,针对客户的需求,建立产品设计 BOM,不仅包含几何、特征、功能、知识等设计信息,还有管理设计、测试、试制等服务的信息服务;在制造阶段,继承设计 BOM 的相关演化成为制造 BOM,既管理工艺、工装、装配等生产准备和生产执行信息,也是机加、铸造、检验等制造服务信息的集成管理;同样在运行阶段,继承了设计 BOM 和制造 BOM 中维修信息的产品维修 BOM 也是维修需求规划、例行保养、故障恢复等各种维修维护服务信息的集合。这些 BOM 中的每项服务都是服务型网络制造网络的一条边,BOM 中的每项服务的接收者和提供者是网络的节点。因此,通过 BOM 的服务信息可以映射建立服务型制造网络模型,依据设计、制造、维修 BOM 的服务信息分别建立服务驱动的网络化设计、制造、基于 MRO 的维修等服务型制造网络的阶段形态。

基于上述认识,本文根据产品 BOM 在全生命周期的演化,构建出在产品生命周期的设计、制造、运行阶段,适合需要的 BOM 视图,并针对演变的服务需求,映射出服务型制造网络的设计、制造、维护三种基本形态,如图 3 所示。

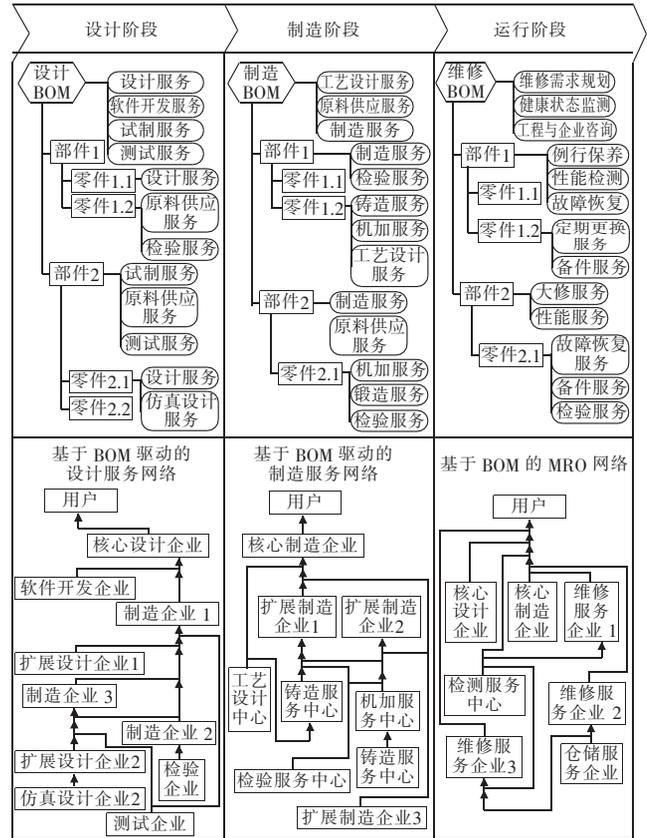


图 3 全生命周期服务网络框架

2.1 基于 BOM 驱动的设计服务网络

传统的制造模式下,产品设计的首要目的是为了满足不同功能需求,而在服务型制造中,产品对客户来说是可定制的,即产品的主要功能、具体性能、详细配置等可定制,这就要求客户能够参与产品的设计,对产品的设计提出自己的意见和建议。产品设计的的首要目的是为了满足不同用户个性化的需求和产品整体解决方案的需要。为此,产品设计阶段需要考虑的问题更加复杂。企业的服务化要求在设计方法方面采用服务驱动的网络化设计模式。服务驱动的网络化设计的核心是基于 BOM 的服务需求信息为信息源,建立动态的设计服务网络。这个网络包括设计任务分配、设计、试制、检验整个设计过程服务,通过这个网络实现设计的运作流程的控制和跟踪。网络内在设计资源服务化的基础上实现全局设计任务调度和设计协同。网络中企业采用的主要设计方法包括:

a) 设计外包 (design outsourcing)。也就是说,在服务化的理念下,产品设计也成为一种服务,即生产性服务。一些专业的设计单位成为这种服务的提供者。企业可以根据具体情况,把某些零部件,甚至产品的设计工作外包给这些设计单位。由这些设计单位设计出既满足客户需求,又满足企业实际生产状况、生产成本和质量要求的零部件或产品。由于设计任务的提供,设计外包服务企业和用户共同组建成一个生产性服务网络。

b) 满足产品服务需求的设计,即设计出的产品应能够方便地进行维护和维修,在零部件出现问题时能迅速地找出问题所在,并予以修复或更换。这就要求建立产品设计主模型以及面向各学科的子模型,维护各模型之间的关联关系,形成多学科协同设计环境,处理协同冲突,保证设计数据的一致性,在产品设计时融入面向维护的设计 (design for maintenance, DFM) 和面向维修的设计 (design for repair, DFR) 思想,并采用

模块化设计方法,尽量降低各部分之间的耦合程度,对易损零部件的拆装和更换进行有针对性的设计。

2.2 基于 BOM 驱动的制造服务网络

服务型制造同样使传统的产品制造模式发生了深刻的变革,使产品制造中所要考虑的问题更加多元化。为了满足产品服务系统的制造要求,企业间根据产品的 BOM 服务信息建立起动态的制造服务网络。产品、制造任务、企业之间的交叉使企业间的协同制造关系变得错综复杂,生产性服务和生产性生产成为两种典型的协同制造关系,而这些关系随着订单动态变化。产品的制造演变为包括动态制造任务分配、协同并行制造、装配的网络化制造流程。通过制造服务网络实现整个制造过程的导航和控制。制造服务网络中企业采用更加灵活的方式完成服务载体(即产品实体)的制造,主要方法包括:

a) 制造外包(manufacturing outsourcing)。为了降低成本和增强核心竞争力,企业把零件、部件,甚至产品的制造外包给其他可提供服务型生产的企业完成。服务型生产企业的选择不仅要宏观角度考虑候选企业的标价、交货期、制造能力、工人技术水平、设备能力等静态指标和车间、工作组及设备的任务负荷、设备的工作状态等动态指标,而且要根据订单,在具体零部件的设计要求(如公差范围)和候选设备可提供的精度范围之间取得平衡,同时满足时间窗的要求。

b) 集成产品制造过程中的技术状态信息。在产品的维修、维护、回收过程中,产品实体的加工制造历史,制造过程中所执行的工艺文件、技术文件、检验标准等技术状态信息成为重要的参考依据,因此,在支持制造外包的同时,建立统一的产品制造技术状态信息交换标准,实现技术状态信息的回流,完成技术状态信息的记录和集成。

2.3 基于 BOM 的 MRO 网络视图

随着产品的结构、功能复杂和多学科的复合,维修已经由简单的事后维修转变为综合的 MRO,维修的目的也由恢复设备功能变成保证设备的可靠性、安全性的同时提高维修能力。MRO 即 maintenance 维护、repair 维修、operation 运行。通常是指在实际的生产过程不直接构成产品,只用于维护、维修、运行设备的物料和服务。业主企业为了降低成本,需要维护和维修,甚至运行外包出去,维修公司为了快速获得最新技术,需要紧密地与其他企业合作。为了满足这些需要,必须根据产品 BOM 建立包括维修需求规划、例行保障、故障恢复、健康运行等完整的维修维护服务网络,提供完整的 MRO 解决方案。完整 MRO 网络为客户和维修企业的协同提供了信息跟踪和交换的支撑,可以满足以 BOM 为核心的维修知识管理、物料寿命管理、基于规则的维修策略判定和客户个性化维修等需求,使得企业可以采用更加先进的维修技术和方法。这些方法主要包括:

a) 状态预测与健康(PHM),主要用于解决装备使用过程中故障发生随机性强、重复率高、无法预知等问题,利用感知技术并借助数据分析方法,检测、监控和预测为装备维修保障过程提供有效的决策支撑手段。

b) 以可靠性为中心的维修(reliability centered maintenance, RCM),是基于可靠性分析方法实现维修策略优化的一门技术。其目标是在满足安全性、环境技术要求和使用寿命要求的同时,获得产品的最小维修资源消耗。通过这项工作,用户可以找出系统组成中对系统性能影响最大的零部件及其维

修工作方式。

c) 全生命周期知识综合利用。知识在产品的生命周期中是一种可以转移的生产元素,它的价值随着过程不断加入到产品中。知识的产生、开发、转移和应用过程是超越企业界限的,它蕴涵在产品生命周期全过程的各个阶段中。完整的 MRO 网络为知识的转移和传递企业间提供了支撑,维修中继承设计和制造中的知识,可以指导维修策略和故障诊断,维修中积累的知识反馈到设计,可以提高设计中可制造、可维修、可拆卸的可行性。

d) 建立备件(spare part)库。根据产品服务的具体状况,按照重要程度和更换频率对备件类型进行划分,开展面向备件的设计(spare part oriented design),并组织备件的生产和运输,建立战略备件(strategic spare part)库,保证发生常见故障时,所需备件能在第一时间提供到现场,同时降低更换和调试操作的技术难度,最大限度地降低因备件问题而引发的服务时间中断。

3 结束语

本文提出的面向全生命周期的服务型制造网络建模方法,根据产品 BOM 建立了满足服务制造的 BOM,并针对演变的服务需求,映射出服务型制造网络的设计、制造、维护三种基本形态,从而完成了全生命周期的服务制造网络建模。服务型制造是制造业未来发展和转型的方向。本文构建的全生命周期的网络模型为服务型制造理论及其实践打下了坚实的基础,必将提高企业的核心竞争力,促进企业服务化的进程。

参考文献:

- [1] NEELY A. The servitization of manufacturing: an analysis of global trend[C]//Proc of the 14th European Operations Management Association. 2007;1-10.
- [2] CHASE R B, KUMAR K R, WILLIAM E, et al. Service-based manufacturing: the service factory [J]. *Production and Operations Management*, 1992, 1(2): 175-184.
- [3] BGERGER S, LASER R. Made by Hong Kong[M]. Oxford: Oxford University, 1997.
- [4] MANLEY K, MAREAU J. Integrated manufacturing-services businesses in the Australian building and construction sector [J]. *The Australian Journal of Construction Economics and Building*, 2002, 2(1): 1-12.
- [5] CHE Z H. A genetic algorithm-based model for solving multi-period supplier selection problem with assembly sequence [J]. *International Journal of Production Research*, 2010, 48(15): 4355-4377.
- [6] TANG Long-ji, DONG Jin, PENG Tu. A generic model of enterprise service-oriented architecture[C]//Proc of IEEE International Symposium on Service-Oriented System Engineering. 2008: 1-7.
- [7] ALMEIDA L F, PAULO A, MIGUEL C, et al. A literature review of servitization: a preliminary analysis[C]// Proc of the 19th Annual Conference on POMS. 2008: 1-18.
- [8] 胡业发, 张海军, 陶飞, 等. 基于 OWL-S 的制造网络服务发现研究[J]. *中国机械工程*, 2008, 21(19): 2595-2599.
- [9] 郑立斌, 顾寄南, 代亚荣. 联合式网络制造资源发现框架及其关键技术[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 601-604.
- [10] 沈益民, 范玉顺. 企业协同服务组合的在线选择方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2008, 14(4): 799-805.
- [11] 江平宇. e-制造系统的实现方法与应用研究[J]. *计算机集成制造系统*, 2003, 9(4): 253-259.
- [12] 石彦华, 李蜀瑜. 基于聚类 Web 服务的组合服务模式规约[J]. *计算机应用研究*, 2011, 28(2): 597-600.