

基于无标度网的制造业服务化系统自组织研究^①张 卫^② 王正肖^③ 方水良 唐任仲 潘晓弘

(浙江大学机械工程学系工业工程中心 杭州 310027)

摘 要 针对制造企业为客户提供产品和服务的复杂性特点,建立了包括制造业服务化设计和制造业服务化组建等自组织过程的制造业服务化系统的自组织模型,初步实现了制造业服务化的智能化应用。同时构造了制造服务单元的无标度网络模型,分析了制造服务单元入度和出度的度分布特性;在制造业服务化设计中,构建了制造业服务化系统的功能—结构—服务模型,并且采用公理设计方法实现产品方案、利用客户需求挖掘实现服务方案;在制造业服务化组建中,提出了应用无标度网的制造服务单元生成制造业服务化系统过程。通过吹瓶机的制造业服务化系统设计和组建的示例验证了制造业服务化系统自组织模型的有效性,以及基于无标度网建模与分析的优越性。

关键词 制造业服务化,信息化,自组织,复杂系统,无标度网

0 引 言

制造业服务化系统是制造企业为了提高竞争力,通过有效管理和整合有限的制造服务资源来满足客户更广泛、更实用的制造服务需求的系统,制造服务包括提供产品、服务和相关知识。从 1962 年 Becker 提出从产品向服务转移的思想开始,制造业服务化研究集中在揭示制造业的服务化趋势以及服务化与环境的关系两方面。1999 年 Goedkoop 提出“产品服务系统”概念^[1]后,制造业服务化从经管领域进入到制造领域,从而为实现实用的信息化系统奠定了基础,随后 Evans 又提出了工业产品服务系统^[2]等概念,从不同角度界定产品服务系统^[3],于是产品服务系统的结构与设计^[4]、运作实践^[5]以及服务价值^[6]等问题得到深入研究。国内制造业服务化研究比较零散,研究的问题有制造业服务增强^[7]、制造业服务化发展趋势^[8]、服务型制造^[9]、产品服务系统^[10,11]、维护维修运行系统等,而随着信息化的深入,制造业亟需服务化系统的支持,这就出现了服务化系统的自组织问题。自组织是无需外界特定指令而能自行组织、自行创生、自行演化,能够

自主地从无序走向有序,形成有结构的系统^[12,13]。对于自组织的建模而言无标度网是一个较好的选择。无标度网的实质是节点与节点之间的连接分布遵循幂次定律,其中大部分的节点只有少数连接,而少数节点则拥有大量的连接^[14-16]。无标度网络的增长特性和优先连接特性由于符合实际网络的现实,反映系统的开发性和复杂性,已经广泛用于物理学^[17]、生物学^[18]、机械工程^[19]、信息科学^[20]和社会学^[21]等领域。本文提出了基于无标度网的制造业服务化系统自组织机制,该机制以公理化设计实现产品方案、利用客户需求挖掘实现服务方案,最后利用无标度网来组建制造业服务化系统。

1 制造业服务化系统自组织过程

制造业服务化的核心思想是制造企业通过基于有形产品的服务来增强产品竞争力,并逐渐将服务作为价值创造的重要来源。制造业服务化系统的变迁和任何系统的变迁一样都具有一定的复杂性。复杂性尽管变化无常,但有捉摸不定的秩序,而且总是通过自组织与环境不断的适应,经过复杂过程和不同的变化阶段,向优化、更高级的秩序演进。制造业

① 863 计划(2011AA040601),国家自然科学基金(51205353),浙江省博士后科研项目(Bsh1202053)和中国博士后科学基金特别资助(2013T60586)项目资助。

② 男,1977 年生,工学博士;研究方向:制造服务技术;联系人,E-mail:zw373737@126.com

③ 通讯作者,wangzhengxiao@zju.edu.cn
(收稿日期:2012-09-05)

服务化运营中的复杂性特点主要表现在:系统各个主体本身的复杂性、系统结构与关系的复杂性、系统与网络环境互动的复杂性等;制造业服务化系统的复杂性同时也表现在它的智能性、不可逆性以及不

确定性等。制造业服务化自组织遵循着由无序到有序的设计过程和由低级有序向高级有序转化的组建过程。(图 1)

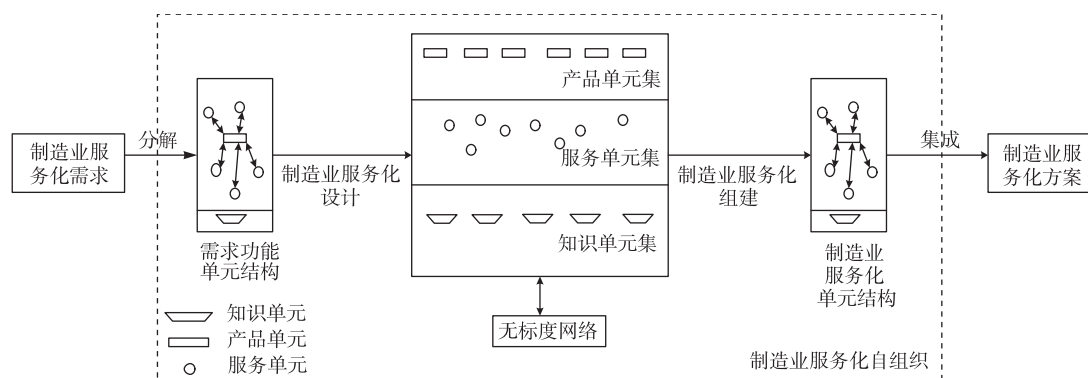


图 1 制造服务链组装过程简图

模型中相关概念及其意义:

(1)制造服务单元:制造服务单元是产品单元、服务单元和知识单元的个体或者集合体,是能为客户提供特定服务功能的实体。

(2)制造业服务化系统:制造业服务化系统是制造服务单元的集合,该集合可提供制造企业满足客户需求的完整解决方案。

(3)制造业服务化系统结构:是作为系统组成部分的制造服务单元的构成和组合,也包含描述系统构成结构成分的数据。

基于无标度网的制造业服务化系统自组织过程具体为:制造业服务化需求的分解—制造业服务化设计—制造业服务化组建—制造业服务化方案的集成。自组织过程是对产品单元、服务单元和知识单元等制造服务单元进行无标度网建模与集成以达到制造资源优化和提高企业服务效率的目的,使制造企业更具竞争力。

首先系统通过市场调研和客户定制等途径获得制造业服务化需求,并根据企业自身特点将需求分解为需求单元。每个需求单元对应若干个制造服务单元,这些制造服务单元能满足客户需求单元的要求。然后系统对每个需求单元进行产品设计和 Service 设计。一般从企业的产品单元集、服务单元集和知识单元集中选择制造服务单元,若已经存在,则可以直接采用,若不存在,则进行新设计并制造产品单元、实现服务单元和构建知识单元。进而系统依据设计方案组建基于无标度网的制造服务单元关系网

络,其中若干制造服务单元逻辑上构成较大粒度的制造业服务化单元,制造业服务化单元结构对应于需求功能单元结构。最终用信息化手段集成制造服务单元形成制造业服务化方案,完成制造业服务化系统的自组织。

2 制造服务单元关系网络

制造业服务化系统的自组织依赖于制造服务单元关系网络的构建。对于制造服务单元关系的表达,运用普通的树状结构有其局限性,可以采用加权有向无环图的形式加以描述,描述的结果可以视为复杂网络。

2.1 制造服务单元的无标度网构造

制造业服务化系统一般由种类和数量繁多的制造服务单元组成,制造服务单元之间服务关系复杂。引入复杂网络理论来表达制造服务业服务化系统的功能结构,用网络形式来描述制造服务单元之间的关系,并构造无标度网。

2.1.1 构造方法

结合 BA 模型^[14]和 G 增长^[22]模型,并考虑有向性,假设节点到达网络服从泊松分布,则可以构造制造服务单元服务关系的无标度网。

首先将不同的制造服务单元作为网络的节点,将制造服务单元的服务关系作为网络的边,然后将所有边取为有向边,边的方向是从制造服务提供者指向制造服务消费者,边的权重为父节点包含子节

点的数目,最后构成一张加权有向无环图。

2.1.2 增长模型 I

对于制造企业而言,由于制造业服务化系统是根据客户需求设计的,新系统除了选用现有系统中的通用制造服务单元外,经常会增加一些满足客户个性化需求的新制造服务单元,因此制造服务单元关系网络的节点数量是随着客户需求变化而不断增长的,即制造服务单元关系网络具有增长特性。增长模型 I 如下:

开始带有较少的制造服务单元数 m_0 , 制造服务单元的到达具有参数 λ 的齐次泊松过程。在 t 时刻,当一个新制造服务单元进入网络时,此制造服务单元具有 $m(m \leq m_0)$ 条边,连接这个新制造服务单元到 m 个不同的已经存在于网络中的制造服务单元,并且入边数 l 服从二项分布 $B(m, q)$, 出边数 s 服从二项分布 $B(m, 1 - q)$ 。其中, $q \in (0, 1)$, q 是 m 条边中入边的概率, $1 - q$ 是 m 条边中出边的概率。

2.1.3 择优连接模型 II

制造业服务化系统自组织过程中,为减少服务设计工作量、缩短设计周期、降低系统成本等,通常会优先选用那些使用次数多、通用性好、可靠性高的现有制造服务单元。因此制造服务单元关系网络具有择优连接特性。择优连接模型 II 如下:

当选择网络中已有的制造服务单元与新制造服务单元连接时,若新制造服务单元是起点,则选择终点 i 的概率 $\prod_1$ 依赖于制造服务单元 i 的入度 I_i , 即满足

$$\prod_1(I_i) = \frac{p_1 I_i + 1 - p_1}{\sum_j (p_1 I_j + 1 - p_1)} \quad (1)$$

若新制造服务单元是终点,则选择起点 i 的概率 $\prod_2$ 依赖于制造服务单元 i 的出度 O_i , 即满足

$$\prod_2(O_i) = \frac{p_2 O_i + 1 - p_2}{\sum_j (p_2 O_j + 1 - p_2)} \quad (2)$$

其中, $p_k \in (0, 1)$, p_k 是选择网络中已有的制造服务单元进行择优连接的概率,而 $1 - p_k$ 是随机的选择网络中已有制造服务单元进行连接的概率, $k = 1, 2$ 。

2.2 制造服务单元的无标度网分析

对于制造服务单元构造的网络系统,如果满足无标度网的特征,就可以保证制造业服务化系统自组织的顺利实现,自组织的核心就是制造服务单元组建过程具有无标度特性,要证明这一点就需要对

构造的网络系统进行无标度网分析。实际应用中也应该将具体制造服务单元以及制造服务单元之间的关系设计成满足无标度网络规则的模型才可以实现系统的自组织。

在制造服务单元关系网络中,制造服务单元入度和出度分别表示该制造服务单元的上一级制造服务单元数量和下一级制造服务单元数量。无标度网分析就是验证网络制造服务单元入度和出度的度分布是否服从幂律分布,其分析如下(分析中相关参数定义同前):

假设在 t 时刻网络制造服务单元数为 $\alpha(t)$, 令 $N(t) = \alpha(t) - m_0$, 由于制造服务单元的到达过程 $N(t)$ 是具有参数 λ 的齐次泊松过程,则网络在 $(0, t)$ 内到达网络制造服务单元的平均数为

$$u(t) = \lambda t \quad (3)$$

制造服务单元 i 在 t 时刻的入度 I_i 是连续实值变量,由于其变化率正比于概率 $\prod(I_i)$, 则 i 满足动态方程

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} = m(1 - q)u'(t) \frac{p_1 I_i + 1 - p_1}{\sum_j p_1 I_j + 1 - p_1} \quad (4)$$

由 $\sum_j (p_1 I_j + 1 - p_1) = \left[p_1 + \frac{1 - p_1}{m} \right] mu(t)$, 得

$$\frac{\partial I_i}{\partial t} = (1 - q) \left[\frac{p_1 I_i + 1 - p_1}{p_1 + (1 - p_1)/m} \right] \frac{1}{t} \quad (5)$$

解得

$$I_i(t) = \left[I_i(t_i) + \frac{1 - p_1}{p_i} \right] \left(\frac{t}{t_i} \right)^{\frac{1-q}{1-p_1}} \quad (6)$$

式中 t_i 表示第 i 个制造服务单元进入网络的时刻。进而

$$p(I_i(t) < k) = p \left\{ t_i > \left[\frac{p_1 I_i(t_i) + 1 - p_1}{kp_1} \right]^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1 m(1-q)} \right)} t \right\} \quad (7)$$

所以有

$$\begin{aligned} p(I_i(t) < k) &= \sum_{l=0}^m p\{I_i(t_i) = l\} \cdot \\ p \left\{ t_i > \left[\frac{p_1 I_i(t_i) + 1 - p_1}{kp_1} \right]^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1 m(1-q)} \right)} t \mid I_i(t_i) = l \right\} \\ &= \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} q^l (1 - q)^{m-l} \cdot \\ p \left\{ t_i > \left[\frac{p_1 l + 1 - p_1}{kp_1} \right]^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1 m(1-q)} \right)} t \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

由于制造服务单元到达过程是 λ 的齐次泊松

过程,则制造服务单元的到达时间 t_i 服从 Γ 分布

$$p(t_i \leq x) = 1 - \exp(-\lambda x) \sum_{l=0}^{i-1} \frac{(\lambda x)^l}{l!}$$

所以有

$$p(I_i(t) < k) = \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} q^l (1-q)^{m-l} \cdot \exp\left[-\lambda t \left(\frac{p_1 l + 1 - p_1}{kp_1}\right)^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)}\right] \cdot \sum_{l=0}^{i-1} \frac{\left[\lambda t \left(\frac{p_1 l + 1 - p_1}{kp_1}\right)^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)}\right]^l}{l!} \quad (9)$$

因此,制造服务单元入度分布为

$$p(I_i(t) = k) = \frac{\partial p(I_i(t) < k)}{\partial k} = \frac{(mp_1 + 1 - p_1)\lambda t}{mp_1(1-q)k^{\left(1 + \frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)}} \cdot \sum_{l=0}^m \binom{m}{l} q^l (1-q)^{m-l} \left(l + \frac{1-p_1}{p_1}\right)^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)} \cdot \exp\left[-\lambda t \left(\frac{p_1 l + 1 - p_1}{kp_1}\right)^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)}\right] \cdot \frac{\left[\lambda t \left(\frac{p_1 l + 1 - p_1}{kp_1}\right)^{\left(\frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{p_1(1-q)m}\right)}\right]^{(i-1)}}{(i-1)!} \quad (10)$$

由上式可知:制造服务单元入度按概率 p_1 择优连接,制造服务单元入度服从幂律分布,并且与制造服务单元到达过程无关。幂律指数 γ_i 与 p_1 有关,即

$$\gamma_i = 1 + \frac{1}{1-q} + \frac{1-p_1}{(1-q)mp_1} \quad (11)$$

同样,求得制造服务单元出度分布为

$$p(O_i(t) = k) = \frac{(mp_2 + 1 - p_2)\lambda t}{mp_2 q k^{\left(1 + \frac{1}{q} + \frac{1-p_2}{p_2 q m}\right)}} \sum_{s=0}^m \binom{m}{s} (1-q)^s q^{m-s} \cdot \left(s + \frac{1-p_2}{p_2}\right)^{\left(\frac{1}{q} + \frac{1-p_2}{p_2 q m}\right)} \exp\left[-\lambda t \left(\frac{p_2 s + 1 - p_2}{kp_2}\right)^{\left(\frac{1}{q} + \frac{1-p_2}{p_2 q m}\right)}\right] \cdot \frac{\left[\lambda t \left(\frac{p_2 s + 1 - p_2}{kp_2}\right)^{\left(\frac{1}{q} + \frac{1-p_2}{p_2 q m}\right)}\right]^{(i-1)}}{(i-1)!} \quad (12)$$

由上式可知:制造服务单元出度按概率 p_2 择优连接,制造服务单元出度服从幂律分布,并且与制造服务单元到达过程无关。幂律指数 γ_o 与 p_2 有关,关系式为

$$\gamma_o = 1 + \frac{1}{q} + \frac{1-p_2}{qmp_2} \quad (13)$$

3 制造业服务化系统的自组织

制造业服务化系统的自组织是通过制造业服务化设计和组建来实现的。在设计中,系统从无序向有序方向发展,融合产品和服务要素得到制造业服务化系统模型;在组建中,系统由低级有序逐渐向高级有序演化,由制造服务单元关系网络的变化增长逐步形成制造业服务化系统。

3.1 制造业服务化设计

将制造服务需求分解为简单需求功能单元,通过制造业服务化设计细化为 N 个制造服务单元个体以及相互关系。制造业服务化设计是制造企业产品设计和设计服务的有机结合,可以通过构建功能域-结构域-服务域模型及其映射关系来实现。

制造业服务化系统自组织设计包含产品和服务两方面的设计,产品自组织设计可以根据传统的概念设计理论实现功能域到结构域的映射,获得产品方案,而服务设计是针对产品关联服务和产品使用服务的综合方案。制造业服务化系统围绕产品展开,功能域和结构域实现产品的生产过程设计需求,服务域实现产品销售和用户体验过程设计需求。服务域的自组织设计将进一步深化产品服务系统的应用范围,可以与管理信息系统集成使得产品的信息资源扩展到用户使用过程。

下面给出制造业服务化系统的功能-结构-服务模型的相关定义。

定义 1 功能域 $Function = (f_{sy}, f_{st})$ 。其中, f_{sy} 是功能的集合,是对产品功能的描述; f_{st} 是功能稳定性的集合,是产品在整个生命周期内稳定实现功能的能力,通过产品的状态来表现。

定义 2 结构域 $Structure = (PE, PS, PR, r)$ 。其中, PE 是产品名称的集合,包括所有构成原理构件的零部件,产品方案以产品实体作为名称来描述; PS 是产品状态的集合,有相关状态特征参数表示 $x_i(t)$,它们构成一个 n 维向量空间,称为产品的状态特征向量 $\mathbf{X} = [x_1(t), x_2(t), \dots, x_i(t)]^T$,主要有两类参数,一类是输入输出特征参数,反映产品当前功能的实现情况,另一类是固定状态特征参数,反映不影响产品功能实现的某些固有特征; PR 是实体关系 PR_e 和参数关系 PR_p 的集合(PR_e 指个实体之间的包容关系, PR_p 指内部参数之间的转换关系); r 是产品的好度,表明产品在某一时刻使用的健

康状态,取值为 $[0,1]$,良好状态、一般状态、拟故障状态和损坏状态分别对应 r 的取值为 $(0.9,1]$ 、 $(0.7,0.9]$ 、 $(0.2,.07]$ 和 $[0,0.2]$ 。

定义3 服务域 $Service = (SE, SP, SR, Sch)$ 。其中, SE 是服务名称的集合,服务是为了改变产品状态的过程; SP 是服务参数的集合,包括服务的可变参数 SP_v 和固定参数 SP_f ,前者包括输入输出参数 SA_{in} 和 SA_{out} ,都是服务客体的状态(服务输入参数到输出参数的变换表征了服务活动的完成),后者包括服务频次、服务成本和时间等属性参数; SR 是服务关系集合,指各个服务活动之间的相互关系,比如包容、互补、互斥等关系; Sch 是服务方式的集合,存储服务客体各种可能的故障状态相应的处理方式。

制造业服务化设计的映射关系为功能域到结构域的映射和结构域到服务域的映射(图2),前者通过产品设计获得产品方案,后者通过服务设计获得服务方案。而最终制造业服务化方案是通过集成产品方案和服务方案得到的。

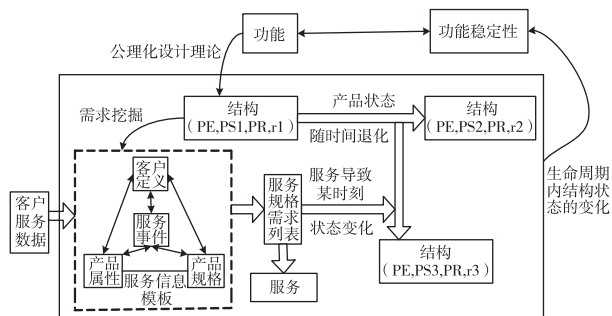


图2 制造业服务化设计的映射关系

功能域到结构域的映射是根据公理化设计的“之”字型映射(Zigzagging)方法实现的。公理化设计是在相邻的两个设计域之间自上而下地进行映射和变换,充分考虑两者之间的相互关系,整个映射过程形象地描述为“之”字形映射。映射的结果获得了功能层次树和结构层次树。功能层次树和结构层次树的最底层分别被称为功能元和原理构件元,二者能直接实现功能-结构映射。基于结构层次树,经过功能域中的功能技术要求分析,可以确定产品方案的实例。

结构域到服务域的映射是根据基于服务数据的客户需求挖掘实现的。在产品服务阶段产生客户服务数据,它们是非结构化的、零散的数据集合;然后对服务数据进行整理、归类,并建立结构的服务信息

模板;最后从服务信息模板中挖掘出服务规格需求列表,服务规格需求列表即能作为服务设计的需求分析,也能直接用于产品设计。在服务映射中客户定义、产品规格与产品属性都是静态的,通过服务事件这个动态的过程来组织映射。

3.2 制造业服务化组建

制造业服务化组建过程即是设计结果实例化的过程,也是构建服务化网络的过程。将制造服务单元构造成为无标度网是最符合互联网环境的,复杂网络理论已证实互联网的统计性质符合幂律,可以近似为无标度网络,而且无标度网的构造简单实用,在系统设计中容易实现,是现有自组织方法中较为成熟可靠的方法。考虑泊松过程的无标度网更方便系统自组织组建的实现。基于无标度网自组织机制的构建过程具有坚实的数学基础和实验证明,保证了自组织的可分析、可控制以及可靠移植等特性。基于无标度网的自组织机制的核心步骤如下:

(1)制造服务单元实例化。从制造企业的资源库中选择符合设计方案的制造服务单元,同时完成新制造服务单元的生产。将获得的 N 个制造服务单元针对具体客户信息初步实例化操作,以适应客户个性化需求环境。

(2)制造服务单元关系网络初始化。一般将具有常用简单关系而且数量不多的 m_0 ($m_0 \leq N$)个制造服务单元按设计方案连接成初始网络。

(3)制造服务单元关系网络的增长。从一个具有 m_0 个制造服务单元组成的网络开始,每次引入一个新的制造服务单元,并且连到 m 个不同的已经存在于网络中的制造服务单元。按照前述的增长模型I连接。

(4)制造服务单元关系网络的优先连接。一个新的制造服务单元与一个已存在的制造服务单元相连接的方法按照前述的择优连接模型II连接。

(5)自生成制造服务单元关系网络。重复(3)、(4)步骤 $t = N - m_0$ 次,完成网络的演化,得到制造业服务化系统。

4 实例分析

假设某企业以制造塑料吹塑成型设备为核心产品,以往主要业务是吹瓶机的制造生产,销售和维修等服务环节外包给其他公司。吹瓶机是能将塑料颗粒(软化成液体)或做好的瓶胚通过一定的工艺手段吹成瓶子的机器。由于吹瓶机造价高、应用复杂,

客户除了关心产品性能,也注重售后维修服务,因此需要企业改进服务化来提高企业利润增长点。

吹瓶机制造业服务化系统是实现该企业服务化的媒介,它在实施客户关系管理等信息化系统的基础上,拓展制造业服务化业务,为客户提供产品和服务的综合方案,增加了针对客户个性化服务业务,使客户和企业获得双赢。同时提高了企业竞争力,实现了企业从生产型向服务型转变。下面以企业和客户之间的制造业服务化系统设计和组建示例来说明系统的自组织,为便于分析做了适当简化。

以较简单的维修管理服务为例,其他制造业服务化系统模块类似构建。某食品饮料生产客户的制造业服务化需求^[23]为:欲购置吹瓶机,吹瓶机作为食品饮料瓶生产线上 14 工位的机器,前置为注塑机,后置为灌装机。希望提供维修管理服务,并能管理产品的维修状态。

4.1 吹瓶机制造业服务化设计

吹瓶机制造业服务化设计是建立在企业现有产品基础上的,一般不包括产品的详细设计,仅对概念设计做适当的调整。具体过程如下:

(1)功能域描述。依据需求分析确定产品功能。比如总功能可描述为 $Function = (f_{sy}, f_{st}) =$ (饮料瓶成型,0.9),其中 0.9 为功能稳定性要求。

(2)功能域映射到结构域。确定产品单元和知识单元,依据公理化设计理论,将总功能经过功能域到结构域的反复“之”字型映射,分解到产品单元和对应的知识单元。在图 3 中,左边为产品功能树,右边为产品结构树。

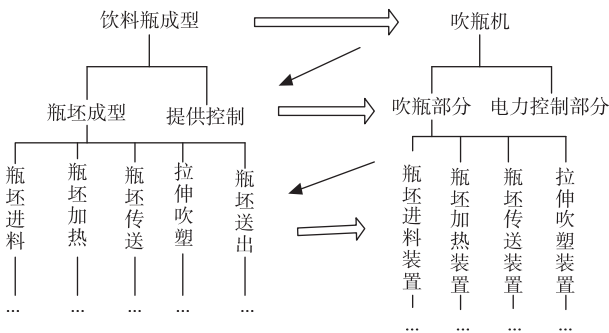


图 3 吹瓶机功能结构映射

(3)结构域描述,确定产品方案实例。依据客户的功能域技术要求,可配置出产品方案实例。比如总结构可描述为 $Structure = (PE,PS,PR,r) =$ (吹瓶机,(饮料瓶容积 0.25 ~ 3 升,总功率

632kW),(与注塑机、灌装机存在“与”关系,每小时产出率为 19600 瓶),1),其中 1 为产品良好度。

(4)结构域映射到服务域,确定服务单元和知识单元。依据需求挖掘的分析方法,对吹瓶机维修管理服务实例进行需求分析。在客户实践中,维修管理服务不限于吹瓶机,应与其它服务有机结合。获得如表 1 所示的服务规格需求列表。

表 1 吹瓶机维修管理服务规格需求列表

服务名称	服务内容
维修组织服务	管理为客户提供维修人员的信息
维修项目服务	管理大型、复杂的产品维修任务的计划、实施、监控与记录
预防性维修服务	管理与时间相关的计划性维修任务
备件与库存服务	管理产品维修过程中需要更换的各类维修备件的采购、库存与加工
维修文档服务	管理产品维修图册、产品维修工艺流程、备件清单以及维修工单、维修记录表等维修文档
产品状态服务	产品基础信息管理、产品生产状态管理和产品维修状态管理

(5)服务域描述。确定服务方案实例。依据客户的功能域技术要求,可配置出服务方案实例。比如总服务可描述为 $Service = (SE,SP,SR,SCh) =$ (吹瓶机维修服务,((产品故障,故障排除),实时监控),与注塑机维修、灌装机维修存在“与”关系,解除故障)。

4.2 吹瓶机制造业服务化组建

对于吹瓶机的制造服务单元网络可以选择不同的层次组建,网络规模随着产品结构的细分而逐步复杂,下面仅以装置层的产品结构来示例。

(1)制造服务单元实例化。企业选择了 12 个制造服务单元: $N = 12$ (表 2),针对客户信息实例化。

(2)制造服务单元关系网络初始化。假如客户对吹瓶机产品方案认可,这样可以将制造服务单元 01-05($m_0 = 5$)按设计方案连接成初始网络(见图 4)。

(3)制造服务单元关系网络的增长。从一个具有 5 个制造服务单元组成的网络开始,每次引入一个新的制造服务单元,并且连到 4 个不同的已经存在于网络中的制造服务单元。按照前述的增长模型 I 连接。

表2 制造服务单元表

编号	制造服务单元	单元类别
01	瓶坯进料装置	产品单元
02	瓶坯加热装置	产品单元
03	瓶坯传送装置	产品单元
04	拉伸吹塑装置	产品单元
05	电气控制部分	产品单元
06	维修组织服务	服务单元
07	维修项目服务	服务单元
08	预防性维修服务	服务单元
09	备件与库存服务	服务单元
10	维修文档服务	服务单元
11	产品状态服务	服务单元
12	客户手册	知识单元

(4) 制造服务单元关系网络的优先连接。一个新的制造服务单元与一个已存在的制造服务单元相连接的方法按照前述的择优连接模型 II 连接。

(5) 自生成制造服务单元关系网络。重复(3)、(4)步骤 $t = N - m_0 = 12 - 5 = 7$ 次,完成网络的演化,得到吹瓶机制造业服务化系统(图5)。

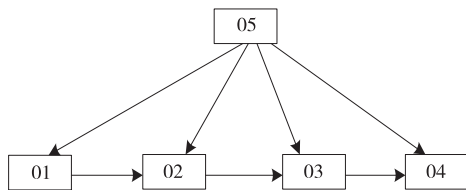


图4 吹瓶机制造服务单元初始网络

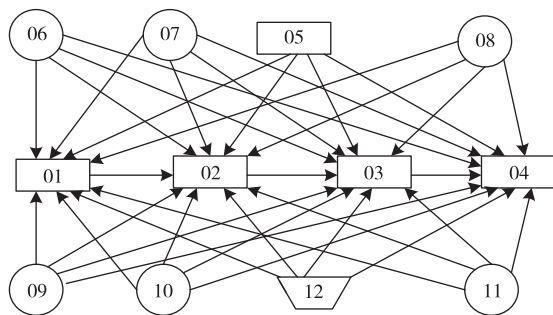


图5 吹瓶机制造业服务化系统网络

5 结论

将无标度网络和自组织目标结合起来,提出了制造业服务化系统自组织模型,该模型具有一定的

通用性和可扩展性,可有效解决制造企业服务化的迫切需求。结合复杂网络理论,建立了制造服务单元服务关系的无标度网络,并提出了制造业服务化系统的功能-结构-服务模型,以及公理化设计的产品单元设计方法和基于需求挖掘的服务单元设计方法,促进了制造与服务的有效融和。通过吹瓶机制造企业服务化的系统自组织过程分析,验证了所建立模型的有效性和无标度网络方法的可行性,为进一步研究提供了基础。

参考文献

- [1] Goedkoop, Halen M J. Product Service Systems: Ecological and economic basics: [Report]. Dutch Ministries of Environment and Economic Affairs, 1999. 107-119
- [2] Evans S, Partidario P. Industrialization as a key element of sustainable product service solutions. *International Journal of Production Research*, 2007, 45(18/19): 4225-4246
- [3] Tukker A, Tischner. Product service as a research field: past, present and future. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(17): 1552-1556
- [4] Mont O, Tukker A. Product service systems: reviewing achievements and refining the research agenda. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(17): 1451-1454
- [5] Corbett J M. Advanced manufacturing technology and work design: towards theoretical framework. *Journal of Organizational Behavior*, 2008, 49(3): 201-218
- [6] Khendek, Zhang T. Modeling and analysis of value added services using message sequence charts. *Journal of Network and Computer Applications*, 2008, 31(3): 338-356
- [7] 蔺雷, 吴贵生. 制造企业服务增强差异化机制的实证研究. *管理世界*, 2007, 13(6): 103-113
- [8] 刘继国. 制造业企业投入服务化战略的影响因素及其绩效: 理论框架与实证研究. *管理学报*, 2008, 5(2): 237-242
- [9] 孙林岩, 李刚, 江志斌等. 21 世纪的先进制造模式——服务型制造模式. *中国机械工程*, 2007, 18(19): 2307-2312
- [10] 顾新建, 李晓, 祁国宁等. 产品服务系统理论和关键技术探讨. *浙江大学学报(工学版)*, 2009, 43(12): 2237-2243
- [11] 江平宇, 朱琦琦, 张定红. 工业产品服务系统及其研究现状. *计算机集成制造系统*, 2011, 17(9): 2071-2078
- [12] Nicolis G, Prigogine I. Self-organization in non-equilibrium system. New York: Wiley, 1977. 370-388
- [13] Haken K. Information and self-organization: a macroscopic approach to complex systems. Berlin Heidelberg: Springer, 1987. 261-278

- [14] Barabasi A L, Albert R. Emergence of scaling in random network. *Science*, 1999, 286 (5): 509-512
- [15] Albert R, Jeong H, Barabasi A L. Attack and error tolerance in complex networks. *Nature*, 2000, 406 (7): 387-482
- [16] Bianconi G, Barabasi A L. Bose-Einstein condensation in complex networks. *Phys Rev Lett*, 2001, 86 (7): 5632-5635
- [17] 闫栋, 祁国宁. 大规模软件系统的无标度特性与演化模型. *物理学报*, 2006, 55 (8): 3799-3084
- [18] 赵静, 俞鸿, 骆建华等. 应用复杂网络理论研究代谢网络的进展. *科学通报*, 2006, 51 (11): 1241-1247
- [19] 刘夫云, 祁国宁. 配置产品尺寸参数传递方法及其应用. *机械工程学报*, 2007, 43 (4): 144-151
- [20] 汤进, 陈展展, 罗斌等. 基于复杂网络和最优子序列双射的形状描述与匹配. *电子学报*, 2011, 39 (8): 1757-1765
- [21] 杨建梅. 复杂网络与社会网络研究范式的比较. *系统工程理论与实践*, 2011, 30 (11): 2046-2055
- [22] Guo J L, Bai Y Q. A note on mean field theory for scale free random networks. *Dynamics of continuous Discrete and Impulsive Systems, Ser B*, 2006, 13 (3): 520 -528
- [23] 胡浩. 长生命周期生产设备维修状态管理关键技术研究. 杭州: 浙江大学博士学位论文, 2011. 67-90

A study on self-organization of manufacturing servitization systems based on scale-free network

Zhang Wei, Wang Zhengxiao, Fang Shuiliang, Tang Renzhong, Pan Xiaohong

(Industrial Engineering Center, Department of Mechanical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027)

Abstract

A self-organization model for manufacturing servitization systems was established for manufacturing enterprises providing customers with products and services characterized by complexity, and the intelligent application of manufacturing servitization was initially realized. The model includes the design of manufacturing servitization, the formation of manufacturing servitization and other self-organization processes. Simultaneously, a scale-free network model for manufacturing service units was constructed to analyze the degree distribution characteristics of in-degree and out-degree of manufacturing service units. In the design of manufacturing servitization, a function-structure-service model for manufacturing servitization systems was built, the product solutions were realized by using axiomatic design method, and the service programs were implemented by digging need of the customers. In the formation of manufacturing servitization, the process of manufacturing servitization systems was generated by applying the manufacturing scale-free network service unit. The effectiveness of the self-organization model for manufacturing servitization systems, and the advantages of the modeling and analysis based on scale-free network were verified through the example of bottle blowing machine system designing and formation.

Key words: manufacturing servitization, information, self-organization, complex system, scale-free network