文章编号：1674-9057(2021)03-0639-05　　doi：10.3969/j.issn.1674-9057.2021.03.022

社群化制造中众包设计任务间模糊加权图建模与优化重组

刘电霆[1]，胡浩平[2]，吴丹玲[1]

（1. 桂林理工大学 机械与控制工程学院，广西 桂林　541006；2. 深圳信息职业技术学院 财经学院，广东 深圳　518172）

摘　要：在社群化制造中，按众包方式的产品设计总任务需要被划分成若干恰当规模的虚拟模块，以便由合适的设计者组成虚拟的社群来承担。针对产品众包设计的原子任务之间和虚拟模块之间的关联性很难定量描述等问题，采用模糊加权图来建立它们之间的关联模型，并论述其在功能、结构相关度等的模糊描述，以及模糊加权图的建立和剪枝方法；以虚拟模块内最大聚合度、最小模块间耦合度和最小虚拟模块规模适应难度为目标，建立产品众包设计的原子任务重组为虚拟模块的优化模型，并将这种不确定性模型转换成确定型，采用蚁群算法来求解；最后举例证实了所提方法的可行性。

关键词：众包设计；任务重组；模糊加权图；社群化制造；蚁群算法

中图分类号：TH122；TP301.6；O224　　**文献标志码**：A

0　引　言

社群化制造（social manufacturing）[1-2]泛指人人都可参与产品生产的一种制造模式，是一种涉及产品整个生命周期的广义制造[3]。它包括个人或设计单位根据需求提出的众包设计[1]，为中小企业走出资源、技术和创新等不足的困境创造了条件。

现代产品越来越复杂，按众包设计方式，其总任务需要被细分成许多原子任务才能通过众包平台找到合适的个体设计者。然而，有些原子任务所对应的产品零部件，可能存在功能、结构等关联，引起设计人员之间频繁的沟通交流。为此，通常需要将它们重组为虚拟模块，由相应的设计人员构建虚拟社群来协作设计，这是社群化制造中产品众包设计过程的一个关键问题[1, 4-5]。

对于产品众包设计任务的划分与重组，通常先采用功能分解法和结构分解法进行产品任务分解[6]。前者是按照产品组合过程中多个任务单元所具备的功能进行分解，后者按照产品任务结构相关度进行分解。一个产品由多个部件组成，一个部件又由多个零件组成，由此得到一个产品的组成结构树；然后采用设计结构矩阵（design structure matrix，DSM）[7]及其改进的区间数设计结构矩阵 IDSM[8]和模糊设计结构矩阵 FDSM[9]等这些部件的原子设计任务之间的关系进行描述；再依据任务之间的关系紧密度，按一定的规则进行重组，得到产品设计的若干子任务模块；最后，对这些子任务模块进行描述，构成相应的产品众包设计任务。

设计结构矩阵 DSM 的直观性不是很强，需要寻找其他方法来描述原子设计任务之间的关系，最常用的是图论法，如 Duin 等[10]和胡从林等[11]采用有向图来描述原子设计任务之间的关系，然后从中得到可达矩阵，再由此将其聚类成若干子任务模块。陈健等[12]使用权重有向图来描述原子设计任务之间的关联，并将其转换成 DSM，再由此来重组任务模块。

相比设计结构矩阵，采用图论法来描述原子设计任务之间的关系更直观明了、易于理解。然而对

收稿日期：2020-04-01
基金项目：国家自然科学基金项目（71961005）；广西自然科学基金项目（2020GXNSFAA297024）
作者简介：刘电霆（1966—），男，教授，研究方向：网络+数据驱动的设计制造、系统建模与测控。
引文格式：刘电霆，胡浩平，吴丹玲．社群化制造中众包设计任务间模糊加权图建模与优化重组［J］．桂林理工大学学报，2021，41（3）：639-643.

于产品设计，尤其是新产品开发或改型设计，原子任务之间的关系无法事先准确知道，具有不确定性。为此，本文采用模糊加权图来描述原子任务之间的关系，并主要依据模块内聚合度、模块间耦合度和模块规模适应难度等对众包设计原子任务进行聚类，重组为若干虚拟模块。

1 众包设计原子任务间的模糊加权图建模

1.1 众包设计原子任务间的相关度

越来越复杂的当代产品，从结构上来看，一般由许多零部件组成。采用众包方式进行设计时，将与各个不能再细分的产品基本单元(一般是零部件)相对应的设计任务，设定为产品众包设计的原子任务。产品基本单元存在功能、结构等方面的关联，一般难以给出具体精确的值。通过相关性分析，结合原子任务两两之间的关联度，可用 5 级标度的三角模糊数[0.6, 0.8, 1.0]、[0.4, 0.6, 0.8]、[0.2, 0.4, 0.6]、[0.0, 0.2, 0.4]和[0.0, 0.0, 0.0]来表达[13-14]。

对产品众包设计的原子任务，它们之间的相关度可按照三角模糊数的运算法则[15]进行计算

$$\tilde{a}_{ij} = w_{\mathrm{F}}\tilde{f}_{ij} + w_{\mathrm{S}}\tilde{s}_{ij}, \tag{1}$$

其中：$\tilde{f}_{ij}$、$\tilde{s}_{ij}$ 和 $\tilde{a}_{ij}$ 分别为两任务单元间的功能相关度、结构相关度及其相应的原子任务之间的相关度；$i, j = 1, 2, \cdots, N$(i, j 表示对应产品任务单元的下标)；w_{F} 和 w_{S} 为权重系数，具体取值可根据知识经验或者使用层次分析法来获得。

1.2 众包设计原子任务间模糊加权图建模

1.2.1 模糊加权图的构造 以众包设计的原子任务为节点，它们之间联系为边、相关度为边的权值，则可以构造原子任务间的加权图。本文采用 5 级标度的三角模糊数来描述原子任务之间的关联，模糊加权图如图 1 所示。其中的 16 个节点表示 16 个原子任务，两两节点连接边上的数字表示原子任务间的相关度（即已进行处理之后的三角模糊数）。

1.2.2 模糊加权图的剪枝 按照一定的粒度阈值 a_0，对上述模糊加权图去掉相关度小于 a_0 的边，本文取粒度阈值 $a_0 = 0.6$，则得到相应的剪枝图(图 2)。

可知，经剪枝后分为 4 个子任务模块，分别为(1, 6, 8, 13, 16)、(3)、(2, 5, 7, 11, 14)和(4, 9, 10, 12, 15)。

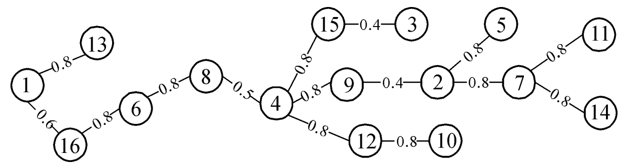

图 1 模糊加权图

Fig. 1 Fuzzy weighted graph

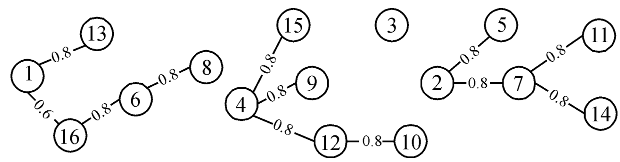

图 2 剪枝加权图

Fig. 2 Pruning weighted graph

2 众包设计原子任务的虚拟重组原理

2.1 众包设计原子任务虚拟重组原则与步骤

目前越来越复杂的产品中，有些产品基本单元在功能、结构上关联比较紧密，需要设计人员随时沟通，交流意见，在完成各自设计任务的同时，达到局部上各产品基本单元、整体上相关联产品的基本单元都满意的设计效果。这也符合社群化制造模式的共享、交互、协作等主要特征。

由于在社群化制造中，这些原子任务聚合成虚拟模块，由相应的设计人员构建社群来协作设计，所以要求其规模较合理、结构相对完整和功能相对独立，以便其能在设计者构成的社群中被顺利地接受和执行完成。因此，众包设计原子任务的虚拟重组原则是：满足其所设计产品模块的功能独立性和结构完整性；众包设计虚拟模块之间耦合度尽量小，而模块内部原子任务之间的聚合度尽可能大，且找到适当的模块规模。

按照产品模块的特性及其设计任务虚拟重组的原则，原子任务虚拟重组的步骤主要有：①分解得到原子任务；②构造描述原子任务之间关系的模糊加权图；③对该图进行剪枝；④建立该图剪枝的数学模型，并进行优化求解，得到最终的虚拟模块方案等。

2.2 虚拟模块内部聚合度和模块之间耦合度

模块内聚合度是对模块内部原子任务之间相关度的总体描述。设某虚拟模块 U_h 共有 P_h 个原子任务，且其中任意两个原子任务 i 与 j 的关联度为 $\tilde{a}_{ij}$，则所有 M 个虚拟模块的总聚合度 $\tilde{C}_1$ 为[13]

$$\widetilde{C}_1=\sum_{h=1}^{M}\widetilde{c}_h=\sum_{h=1}^{M}\left\{\sum_{i=1}^{P_h-1}\sum_{j=i+1}^{P_h}\widetilde{a}_{ij}/\left[\frac{P_h(P_h-1)}{2}+1\right]\right\},\tag{2}$$

同理，两个虚拟模块之间的耦合度可以用这个模块内部的原子任务与另一模块内部的原子任务的相关度来描述。假设虚拟模块 U_s 共 P_s 个原子任务组成，虚拟模块 U_t 共 P_t 个原子任务组成，虚拟模块 U_s 内任意原子任务 i 与模块 U_t 内任意原子任务 j 的相关度为 $\widetilde{a}_{ij}$，可以得到虚拟模块 U_s 与 U_t 之间的耦合度为[13]

$$\widetilde{c}_{st}=\sum_{i=1}^{P_s}\sum_{j=1}^{P_t}\widetilde{a}_{ij}/(P_sP_t),\tag{3}$$

所有虚拟模块间的总耦合度为

$$\widetilde{C}_2=\sum_{s=1}^{M-1}\sum_{t=i+1}^{M}\widetilde{c}_{st}。\tag{4}$$

2.3　众包设计任务虚拟模块规模的适应难度

产品众包设计原子任务重组为虚拟模块，需要由多人组成社群来协作设计。若模块规模过大，则需要的社群成员过多，社群内交流和冲突也太多，不利于模块的整体设计进度和质量等，即模块规模适应难度低。要实现最高的团队效率，需要最佳的团队成员数量为 P_*，一般为 4 ~ 6 人[16]，所以模块规模应当控制在 5 人左右。为此，在进行模糊加权图的剪枝时，模块规模的适应难度(R) 指标定义为

$$R=\sum_{i=1}^{M}\frac{|P_i-P_*|}{P_{\max}M},$$

式中：P_i 为第 i 个模块所含原子任务数；$P_{\max}$ 为最大模块规模(即原子任务总数)；M 为模块总数。

3　众包设计原子任务虚拟重组的优化

3.1　众包设计原子任务虚拟重组的优化模型

根据产品众包设计原子任务重组原则，虚拟模块内部聚合度应最大，模块之间的耦合度应最小，模块规模的适应难度最低，则原子任务虚拟重组的不确定优化模型为

$$\mathrm{Max}\ \widetilde{C}_1=\sum_{k=1}^{M}\left[\sum_{i=1}^{P_k-1}\sum_{j=i+1}^{P_k}\widetilde{a}_{ij}/\frac{P_k(P_k-1)}{2}\right];\tag{5}$$

$$\mathrm{Min}\ \widetilde{C}_2=\sum_{s=1}^{M-1}\sum_{t=i+1}^{M}\left[\sum_{i=1}^{P_s}\sum_{j=1}^{P_t}\widetilde{a}_{ij}/(P_sP_t)\right];\tag{6}$$

$$\mathrm{Min}\ R=\sum_{i=1}^{M}\frac{|P_i-P_*|}{P_{\max}M}。\tag{7}$$

3.2　众包设计原子任务虚拟重组优化模型的求解

3.2.1　不确定模型的转换　依照三角模糊数的运算法则[15]，进行该不确定优化模型内部的数据计算，并按加权重心法[15]将其转为确定数值。据此，把式(5)~(7)转换成确定型优化模型。

3.2.2　优化重组模型的蚁群算法求解　任务重组问题具有组合最优化特性，是 NP-Hard 问题，宜利用蚁群算法求解。本文的求解步骤为：

① 初始化各个参数以及相关数据。

② 循环迭代开始。

③ 随机安置蚂蚁于各个点上，初始化相关计算用表。

④ 计算最大转移概率的节点作为最佳选择，同时与 rand( )进行比较，从而重组到不同模块。

$$p_{ij}^{k}(t)=\begin{cases}\dfrac{[\gamma_{ij}(t)]^{\alpha}[\eta_{ij}(t)]^{\beta}}{\sum\limits_{s\subset allowed}[\gamma_{is}(t)]^{\alpha}[\eta_{is}(t)]^{\beta}}, & j\in allowed;\\ 0, & j\notin allowed。\end{cases}\tag{8}$$

其中，$\gamma_{ij}(t)$、$\eta_{ij}(t)$、α、β 为相应的信息素、相关性和相关启发因子。

⑤ 若全部顶点仍未被每只蚂蚁遍历完，则继续 ③，否则 ⑥。

⑥ 对称更新信息素

$$\gamma_{ij}(t+n)=(1-\rho)\cdot\gamma_{ij}(t)+\Delta\gamma_{ij}(t);\tag{9}$$

$$\Delta\gamma_{ij}(t)=\sum_{k=1}^{m}\Delta\gamma_{ij}^{k}(t);\tag{10}$$

$$\Delta\gamma_{ij}^{k}(t)=\begin{cases}Q\cdot L_k,\\ 0。\end{cases}\tag{11}$$

其中：m 为蚂蚁数；n 代表路径；ρ 为蚁群模型中的信息取值；Q 为常量；L_k 是适应度值(由式(12) 计算所得的 F 值经数据格式化后可得 L_k)。多目标式(5)、(6)、(7) 根据权重比例转为了单目标模型，即

$$F=w_1C_1-w_2C_2-w_3R。\tag{12}$$

⑦ 迭代完成则结束，并把最优解输出，未完则转到步骤 ②。

4　实例分析

4.1　问题描述

以某起重机桥梁设计总任务为实例[17]，共有 11 个原子任务：1 主梁子任务、2 轨道子任务、3 端梁子任务、4 端梁栏杆子任务、5 走台子任务、6 走台栏杆子任务、7 直梯子任务、8 斜梯子任务、9 司机室平台子任务、10 司机室子任务、11 检验平台

子任务，分别用 T_1，T_2，T_3，T_4，T_5，T_6，T_7，T_8，T_9，T_{10}，T_{11} 表示。功能相关度和结构相关度分别存于表 1 中上三角形与下三角形。

4.2 实验数据

用 C 语言编写程序，初始化离散的 11 位数字编码分别与 T_1，T_2，T_3，T_4，T_5，T_6，T_7，T_8，T_9，T_{10}，T_{11} 一一对应，迭代次数均为500次，设置不同参数获得的实验结果见表 2。

可知，该方法充分发挥了蚁群智能算法的优点，很快得到收敛，迭代次数增加而收敛值不变，同实验设置不同的参数，所获得的最优适应值均为 26.000，说明该方法的稳定性较好；求得最佳重组虚拟模块：T_1，T_2，T_3，T_4，T_5，T_6，T_7，T_8，T_9，T_{10}，T_{11} 所一一对应的几组实验求解结果分别是{5，5，5，5，4，4，3，3，3，1，2}、{1，1，1，1，5，5，4，4，4，3，2}、{5，5，5，5，4，4，1，1，1，3，2}，其中每组最大数字 5 表示该求解结果划分为 5 个模块，相同数字为同一模块：即 T_1、T_2、T_3、T_4 为同组，T_5、T_6 为同组，T_7、T_8、T_9 为同组，T_{10}、T_{11} 各为一组。具体实例最优重组的虚拟模块是{直梯，斜梯，司机室平台}为同组，{主梁，轨道，端梁，端梁栏杆}为同组，{司机室}、{检验平台}各为一组，{走台，走台栏杆}为一组，结果与文献[17]中 $\lambda = 0.625$ 时划分结果相同，由于本方法研究的侧重点和求解模式不同，获得的结果具备唯一性，对行业的产品任务重组存在借鉴和指导作用。

5 结论

本文提出了一种基于模糊加权图的产品众包设计的原子任务之间关系建模与优化重组方法。对众包平台设计任务中考虑其任务单元的功能和结构相关性，构建多目标不确定优化模型；同时，将多目标转化为单目标模型，采用蚁群算法求解，实例测试，结果符合实际要求。

表 1 功能相关度和结构相关度

Table 1 Correlation values of function and structure

	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}	T_{11}
T_1	1.0	0.6	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_2	0.4	1.0	0.6	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_3	0.4	0.4	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_4	0.4	0.4	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_5	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
T_7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.6	0.6	0.0	0.0
T_8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	1.0	0.6	0.0	0.0
T_9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.4	1.0	0.0	0.0
T_{10}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	0.0
T_{11}	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0

表 2 实验结果

Table 2 Experiment results

实验编号	α	β	M	ρ	迭代次数	最优任务重组	最优值
1	4	2	8	0.4	1	1, 1, 1, 1, 6, 6, 5, 5, 4, 3, 2	15.600
					2~500	1, 1, 1, 1, 5, 5, 4, 4, 4, 3, 2	26.000
2	4	4	2	0.2	1~8	2, 1, 2, 2, 6, 6, 5, 5, 5, 4, 3	10.400
					9~500	5, 5, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 1, 2	26.000
3	4	2	20	0.4	1~500	5, 5, 5, 5, 4, 4, 3, 3, 3, 1, 2	26.000
4	8	2	30	0.4	1~500	5, 5, 5, 5, 4, 4, 1, 1, 1, 3, 2	26.000
5	4	2	50	0.8	1~500	5, 5, 5, 5, 1, 1, 4, 4, 4, 3, 2	26.000
6	8	2	50	0.4	1~500	1, 1, 1, 1, 5, 5, 4, 4, 4, 3, 2	26.000
7	4	4	8	0.8	1	6, 6, 6, 6, 1, 1, 5, 5, 4, 3, 2	15.600
					2~500	1, 1, 1, 1, 5, 5, 4, 4, 4, 3, 2	26.000
8	4	8	8	0.3	1	2, 2, 2, 1, 6, 6, 5, 5, 5, 4, 3	10.400
					2~500	1, 1, 1, 1, 5, 5, 4, 4, 4, 3, 2	26.000

进行社群制造中协作设计时，做好成员企业内部设计原子任务间的关系描述与重组是关键技术之一。根据本文提出的众包设计中任务虚拟模块重组的不确定优化方法，结合中小企业协同网络平台，可使产品众包设计任务推送更加智能化和自动化。

随着众包任务设计的复杂性增加，云计算大数据的软硬件技术支撑，互联网+众包任务分配必将更智能、更科学合理。下一步将引入 Pareto 最优解寻求更合理的多目标解，同时将研究更复杂的任务分配问题。

参考文献：

[1] 江平宇，丁凯，冷杰武，等. 服务驱动的社群化制造模式研究［J］. 计算机集成制造系统，2015，21（6）：1637-1649.

[2] The Economist. A third industrial revolution［EB/OL］.［2012-04-21］. http：//web. mit. edu/pie/news/Economist. pdf.

[3] 王先逵. 广义制造论［J］. 机械工程学报，2003，39（10）：86-94.

[4] 严杰，刘人境，刘晗. 国内外众包研究综述［J］. 中国科技论坛，2017（8）：59-68.

[5] 张富强，江平宇，郭威. 服务型制造学术研究与工业应用综述［J］. 中国机械工程，2018，29（18）：2144-2163.

[6] 李刚炎，肖佩，杨明忠. 机械设计分解方法的研究及其应用［J］. 武汉汽车工业大学学报，1997，19（4）：27-30.

[7] 李靓，武健伟，石浩然. 基于 DSM 的耦合模块划分方法的研究[J]. 机械设计与制造，2008(8)：223-225.

[8] 刘电霆，周德俭. 基于区间数设计结构矩阵的任务分解与重组［J］. 机械设计与研究，2009，25（6）：7-9.

[9] 涂建伟，李彦，李文强，等. 基于 FDSM 的产品族设计模块化方法的研究［J］. 组合机床与自动化加工技术，2011（8）：16-20.

[10] Duin H，Eschenbächer J，Thoben K-D. Modelling dynamics in collaboration：an extension to the collaborative network relationship analysis［J］. IFIP Advances in Information and Communication Technology，2011，362：287-294.

[11] 胡从林，容芷君，陈奎生，等. 产品设计任务的聚类优化研究［J］. 机械设计与制造，2014（7）：259-261.

[12] 陈健，莫蓉，初建杰，等. 工业设计云服务平台协同任务模块化重组与分配方法［J］. 计算机集成制造系统，2018，24（3）：720-730.

[13] 刘电霆，胡浩平. 绿色产品模块划分的不确定优化及求解［J］. 科技通报，2015，31（11）：143-147.

[14] 刘电霆. 绿色设计中产品模块划分的不确定优化及 GA 求解［J］. 桂林理工大学学报，2013，33（4）：743-748.

[15] 张市芳，刘三阳，秦传东，等. 动态三角模糊多属性决策的 VIKOR 扩展方法［J］. 计算机集成制造系统，2012，18（1）：186-191.

[16] 沃顿知识在线. 你的团队是最佳规模吗［J］. 人力资本，2006（8）：63-65.

[17] 刘琼，徐洋，邓明中. 面向产品配置的模块划分方法[J]. 南华大学学报(自然科学版)，2012，26(2)：36-40.

Fuzzy weighted graph modeling and optimization recombination of crowdsourcing design tasks in social manufacture

LIU Dian-ting[1]，HU Hao-ping[2]，WU Dan-ling[1]

(1. College of Mechanical and Control Engineering，Guilin University of Technology，Guilin 541006，China；2. College of Finance and Economics，Shenzhen Institute of Information Technology，Shenzhen 518172，China)

Abstract：In social manufacture，the total product design tasks need to be partitioned into appropriate crowdsourcing modules in order to be successfully undertaken by appropriate designer teams. Aiming at the difficulty in quantitatively describing the correlation of sub-task of product design and those between task modules，fuzzy weighted graph is used to establish the model of their relationship，and the methods such as the fuzzy description of functional correlation，structural correlation in a product. Fuzzy weighted graph and its pruning are discussed. With the maximum aggregation degree in each module and the minimum coupling degree between the modules and minimum adaptation difficulty of module scale as the objective functions，an uncertain optimization model for task module partitioning is established，which is transformed into a deterministic one，and then solved by ant colony algorithm. At the end，an example is given to illustrate the feasibility of the proposed method.

Key words：crowdsourcing design；task recombination；fuzzy weighted graph；social manufacture；ant colony algorithm

（编辑 任 鹏）