

考虑主体心理预期的云制造资源双边匹配机制

赵道致[†], 李 锐

(天津大学 管理与经济学部, 天津 300072)

摘 要: 云制造的实践创新和相关机制研究是近几年供应链和制造领域研究的热点问题. 研究云制造平台上的碎片化资源匹配问题, 以探索物联网环境下提高企业资源配置效率的方法. 基于前景理论, 通过多属性评价, 计算出资源供求双方之间的满意度, 据此确定匹配主体的偏好序. 以偏好序作为匹配依据, 设计在考虑匹配数量的前提下, 求解稳定匹配方案的“多对多”匹配算法, 并论证匹配结果对于匹配优先方的 Pareto 最优性. 最后, 通过算例验证了整个匹配机制的可行性和有效性.

关键词: 云制造; 资源匹配; 前景理论; 稳定双边匹配

中图分类号: F270

文献标志码: A

Two-sided matching mechanism with agents' expectation for cloud manufacturing resource

ZHAO Dao-zhi[†], LI Rui

(College of Management and Economics, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The practice innovation in cloud manufacturing and related mechanism have been widely investigated in the fields of supply chain management and manufacturing management for a few years. The fragmented resource matching problem on a cloud manufacturing platform is studied to find a way to improve the efficiency of enterprise resource allocation. With multi-attribute evaluation under the prospect theory, satisfaction degree values and corresponding preferences between sellers and buyers are calculated. And based on agents' preference information, a heuristic algorithm is designed to obtain a stable matching result for the many-to-many matching problem with matching quantities. It is demonstrated that the matching scheme obtained is a Pareto-optimal solution for the agents on a dominating side. Finally, a sample application is given to illustrate the feasibility and effectiveness of the whole matching mechanism.

Keywords: cloud manufacturing; resource matching; prospect theory; stable two-sided matching

0 引 言

自 2005 年国际电联首次提出物联网的概念开始, 基于物联网技术的生产和运营管理创新正迅速地改变着全球企业的生产和交易方式. 众多知名企业从不同角度出发适应这种变革. 一是利用物联网技术改良生产组织方式: 波音公司组织全球 40 多个国家和地区的企业协同研发波音 787, 使研发周期缩短 30%, 成本减少 50%; 工业巨头西门子专门成立了数字化工厂集团, 旨在基于数字分享的合作平台, 实现 ERP、PLM、MES、控制系统和供应链管理的无缝信息互联. 二是开发嵌入物联网技术的智能产品, 如海尔集团推出的 U-home 智能家居平台, 其目标是随时随地与家中的电器设备互动. 近年来, Uber 和 Airbnb

为代表的分享经济模式的兴起已真正地将物联网技术带入普通人的日常生活.

单就制造领域而言, 从网络化制造到网格制造^[1-2]、从云计算到云制造^[3-4], 物联网技术推动学术和产业界不断探索新的先进制造模式. 一方面, 全球制造业正处于由生产型制造向服务型制造转型的时期, 市场的快速变化和用户的多样化需求使得生产企业经常面临高时效、高强度的订单需求, 单靠自身的制造能力很难满足; 同时又常会因为市场需求不足而造成资源闲置和能力浪费^[5]. 另一方面, 物联网技术实现的企业内外部资源的“物物”相连, 为供应链成员之间实现信息与资源共享提供了技术基础, 为供应链实现以设施资源为单位的全局最优提供了技术

收稿日期: 2016-04-28; 修回日期: 2016-10-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71472134).

作者简介: 赵道致(1956—), 男, 教授, 博士生导师, 从事物流与供应链管理、运营管理、企业战略管理等研究; 李锐(1991—), 男, 硕士生, 从事物联网环境下的供应链管理和云制造的研究.

[†]通讯作者. E-mail: dzzhao@tju.edu.cn

可能,为企业创造低成本和快捷资源配置提供了环境和条件.云制造模式正是利用物联网技术解决生产企业资源失衡问题的应用实践.李伯虎等^[6]首先提出“云制造”这一概念,将其定义为“面向服务的网络化制造”,并给出了云制造平台的体系架构.近年来,学术界、产业界都在对这种先进制造模式进行理论的实践探索,国内外已相继出现了一些初具雏形的云制造服务平台,如:国外最大的制造能力服务平台MFG,早在2012年就有50个国家近20万制造商在平台上提供服务;国内有天智网、航天云网等云平台,分别提供区域内的和产业内的制造资源交易服务.

平台上有多个资源提供方,也有多个需求方,因此要促成资源交易,必须要解决双边匹配问题.双边匹配的研究最早出现在Gale等^[7]对大学入学、婚姻稳定的研究中,随即引起学术界的广泛关注.Roth^[8]基于G-S算法的思想提出了H-R算法,可求出一对多双边匹配的一方最优稳定匹配结果.进入21世纪后,一些学者开始关注双边匹配中主体的心理行为:Teo等^[9]考察了稳定婚配问题中存在的主体关于偏好信息的欺骗策略;Sethuraman等^[10]研究了稳定匹配中的公平因素;李铭洋等^[11]引入失望理论构建了稳定匹配的多目标优化模型;也有部分学者从偏好序的角度研究不同情境下的匹配问题,包括直觉模糊偏好关系^[12]和弱偏好序信息^[13].但大多数研究都是“一对一”或者“一对多”的情况,并且没有涉及匹配数量的问题.

鉴于此,本文结合资源交易市场的实际,引入前景理论,求解主体存在心理预期时的满意度,针对含有数量维度的“多对多”匹配问题,设计一套稳定匹配算法,由此构建整个云平台的多资源匹配机制.最后,通过算例验证了整个匹配机制的可行性和有效性.

1 问题描述

随着分享经济的发展和物联网技术的普及,制造

企业越来越倾向于有选择地共享生产资料,此时便需要一个第三方平台整合、发布这些生产信息,并运行、维护整个分享机制.本文的研究对象正是这样一个物联网环境下的云制造平台,平台为其服务的 N 个企业提供制造资源的匹配和交易服务,平台架构和功能如图1所示.各企业为完成生产任务共需要 l 种制造资源,假设不同企业拥有的同一种资源是同质的,每一个企业的每一种资源在实际生产过程中都可能存在短缺或过剩的状态,而个性化定制生产的发展造成需求预测的准确度下降,从而使企业制定制造资源计划更加困难,这又间接增大了资源盈缺的可能性.实施物联网技术以后,制造资源的详细使用信息可以随时方便地传递到平台上,因此,云平台可以实时监控在线企业的制造资源使用状态.

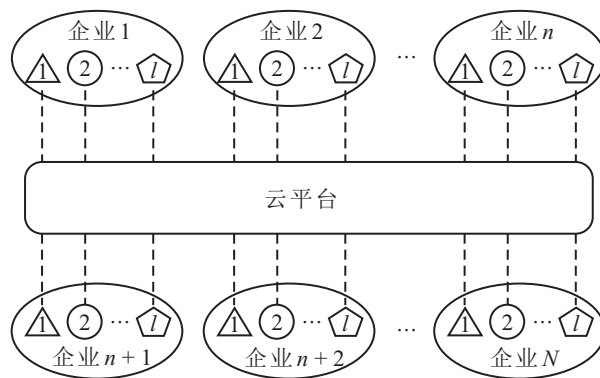


图1 云制造平台组织架构和服务功能示意图

设企业 i 用于在平台上交易的资源 k 的数量为 r_{ik} , r_{ik} 存在以下3种情况:

- 1) $r_{ik} > 0$, 资源过剩, 企业 i 成为资源 k 的提供方;
- 2) $r_{ik} = 0$, 资源均衡, 企业 i 没有可交易的资源 k ;
- 3) $r_{ik} < 0$, 资源短缺, 企业 i 成为资源 k 的需求方.

在此基础上,形成 l 个资源的双边交易市场,如图2所示.

l 个双边市场用集合 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_l\}$ 表示,本文要解决的问题是,在考虑实际生产易操作性的前提下,得到稳定的资源双边匹配,匹配的依据则是供求主体各自对对方的偏好序^[11-13](满意度). l 个

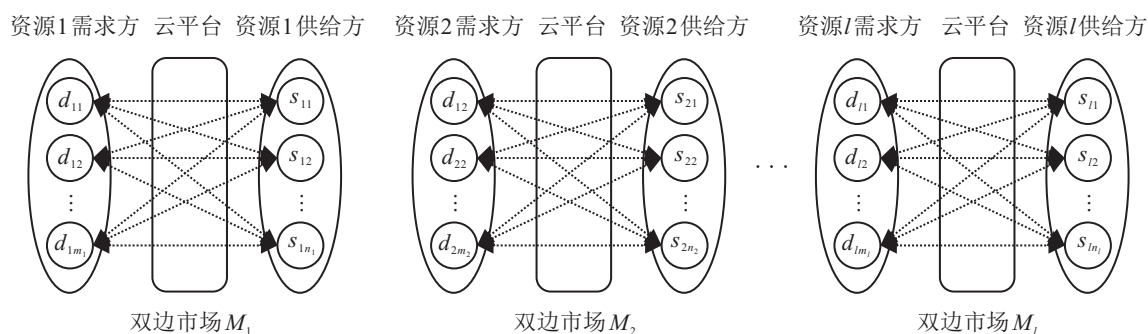


图2 云制造平台上的双边市场结构图

市场的结构是相同的,对双边市场 M_k 而言,仅交易一种资源 k , k 的供需双方集合分别用 $S_k = \{s_{k1}, s_{k2}, \dots, s_{kn_k}\}$ 和 $D_k = \{d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{km_k}\}$ 表示,显然 $D_k \cap S_k = \emptyset$. 不同于传统匹配问题中“一对一”(如婚配问题)和“一对多”(如雇佣问题)关系,云制造资源的双边匹配属于“多对多”的情况. 根据可用资源的数量,一个需求方可能同时购买多个提供方的资源,同样,一个提供方可能将其资源卖给多个需求方.

匹配市场的主体满意度基于前景理论对对方多属性评价计算得到,以任意双边市场 M_k 为例进行说明. 为简化标记,以下用 M 表示任意双边市场 M_k ,相关符号均略去下标 k .

假设 $A = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$ 为需求方(买方)对提供方(卖方)进行评价的 p 个属性的集合, A_k 为第 k 个属性, ω_k 为属性 A_k 对应的权重,满足 $\omega_k > 0$ 且 $\sum_{k=1}^p \omega_k = 1$. $E = [e_i^k]_{m \times p}$ 为买方对卖方属性的预期水平矩阵, e_i^k 为 d_i 对卖方关于属性 A_k 的预期值; $R = [r_{ij}^k]_{m \times n \times p}$ 为买方对卖方属性的实际测度矩阵, r_{ij}^k 为 d_i 针对 s_j 得到的属性 A_k 的实际值.

结合实际问题,属性集合 A 由两类不同数值类型的属性构成:一类是如价格这样可用实数测度的属性,对应子集记为 A^R ;另一类是像信誉这种只能用模糊语言评价的属性,对应子集记为 A^F ,有 $A = A^R \cup A^F$.

当 $A_k \in A^F$ 时, $e_i^k \in L, r_{ij}^k \in L; L = \{0, 1, 2, 3, 4\}$, 数字表示的含义分别为“很差/差/一般/好/很好”. 模糊语言 $l (l \in L)$ 可以转化为三角模糊数 F , 对应公式为

$$F = \left(\max \left\{ \frac{l-1}{4}, 0 \right\}, \frac{l}{4}, \min \left\{ \frac{l+1}{4}, 1 \right\} \right), \quad l = \{0, 1, \dots, 4\}. \quad (1)$$

相应地,卖方使用类似的属性参数评价买方.

2 稳定匹配机制

2.1 基于前景理论的满意度求解

前景理论以实际值相对于参照点的差距作为衡量得失、评价好坏的依据;在本文研究的匹配市场中,将买方对卖方属性的预期水平 e_i^k 作为参照点,当得到买方对卖方属性的实际测度值 r_{ij}^k 后,比较二者大小关系,计算二者绝对距离(表征了实际值到参照点在逻辑上的远近程度),以此得到 r_{ij}^k 相对于 e_i^k 的损益值. 具体方法如下:

1) $A_k \in A^R$ 时,属性值为实数,可直接比较实际值与参照点的大小,并求距离 $d_{ij}^k = |r_{ij}^k - e_i^k|$.

2) 当 $A_k \in A^F$ 时,属性值为模糊语言,用整数表征,可直接比较大小. 计算距离时,由式(1)将实际值和参照点转化为模糊数形式,即

$$r_{ij}^k = (r_{ij}^{k1}, r_{ij}^{k2}, r_{ij}^{k3}), e_i^k = (e_i^{k1}, e_i^{k2}, e_i^{k3}).$$

得到两者距离

$$d_{ij}^k = \sqrt{\frac{1}{3}[(r_{ij}^{k1} - e_i^{k1})^2 + (r_{ij}^{k2} - e_i^{k2})^2 + (r_{ij}^{k3} - e_i^{k3})^2]}.$$

综合上述两点,可得距离公式为

$$d_{ij}^k = \begin{cases} |r_{ij}^k - e_i^k|, & A_k \in A^R; \\ \sqrt{\frac{1}{3}[(r_{ij}^{k1} - e_i^{k1})^2 + (r_{ij}^{k2} - e_i^{k2})^2 + (r_{ij}^{k3} - e_i^{k3})^2]}, & A_k \in A^F, \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (2)$$

在此基础上得到 r_{ij}^k 相对于 e_i^k 的损益值为

$$B_{ij}^k = \begin{cases} d_{ij}^k, & r_{ij}^k \geq e_i^k; \\ -d_{ij}^k, & r_{ij}^k < e_i^k. \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

B_{ij}^k 为正时称为收益,为负时称为损失. 考虑主体对待收益和损失采取的不同风险态度(即损失规避),计算出属性前景值^[14-15]为

$$V_{ij}^k = \begin{cases} (B_{ij}^k)^\alpha, & r_{ij}^k \geq e_i^k; \\ -\lambda(-B_{ij}^k)^\beta, & r_{ij}^k < e_i^k. \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

其中: $0 < \alpha < 1, 0 < \beta < 1, \lambda > 1$; 系数 λ 反映了主体对待损失相对于收益更敏感的心理表现, λ 越大表明损失规避程度越大. 参考文献[16]的分析结果,取 $\alpha = \beta = 0.88, \lambda = 2.25$.

在加权求和之前,还需对属性前景值进行去量纲处理,以真实反映各属性的权重关系. 标准化后的属性前景值为

$$\bar{V}_{ij}^k = \frac{V_{ij}^k}{\max_{j=1,2,\dots,n} |V_{ij}^k|}, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, 2, \dots, p. \quad (5)$$

得到买方 d_i 对卖方 s_j 的满意度前景值为

$$P_{ij} = \sum_{k=1}^p \omega_k \bar{V}_{ij}^k, \quad i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

同理可得卖方 s_j 对买方 d_i 的满意度前景值 \tilde{P}_{ij} ,

过程不再赘述.

2.2 匹配算法的设计

双边市场 M 的匹配主体分别用集合 A 、 B 表示, A 是供求主体其中一方, B 是相应的另一方, 确定的依据是市场需求总量和供给总量的大小关系. 设需求方 d_i 的需求数量为 q_{d_i} (即该企业资源待交易数量的相反数), 提供方 s_j 的供给数量为 q_{s_j} (即该企业资源的待交易数量), 则该市场中的供求总量分别为

$$Q_S = \sum_{j=1}^n q_{s_j}, \quad Q_D = \sum_{i=1}^m q_{d_i}.$$

市场总交易数量 $Q = \min\{Q_D, Q_S\}$, 且有

$$A = \begin{cases} D, & Q = Q_D; \\ S, & Q = Q_S. \end{cases}$$

A 、 B 之间的双边匹配可以用映射 $\mu: A \cup B \rightarrow A \cup B$ 表示. 结合资源市场的“多对多”关系, $\forall A_i \in A, \forall B_j \in B$ 满足下列条件: 1) $\mu(A_i) \subseteq B$; 2) $\mu(B_j) \subseteq A \cup B_j$; 3) 若 $B_j \in \mu(A_i)$, 则 $A_i \in \mu(B_j)$.

设 P_{ij} 、 \tilde{P}_{ij} 分别表示 A_i 对 B_j 、 B_j 对 A_i 的满意度 (第2.1节计算得到的满意度前景值). 若 μ 符合以下两种条件之一: 1) $\exists A_i, A_l \in A, B_j, B_k \in B, B_k \in \mu(A_i), B_j \in \mu(A_l)$, 满足 $P_{ij} > P_{ik}$ 且 $\tilde{P}_{ij} > \tilde{P}_{lj}$; 2) $\exists A_i \in A, B_j, B_k \in B, B_k \in \mu(A_i), B_j \in \mu(B_j)$, 满足 $P_{ij} > P_{ik}$. 则称 μ 为不稳定匹配, 否则称为稳定匹配.

设匹配市场的实际交易总量为 T , 则匹配活动的终止条件为 $T = Q$.

首先对一次匹配操作 $\mu(A_i, B_j)$ 进行解释. 设本次操作前的市场实际交易总量为 \hat{T} , 双方的已匹配主体序列为 $\hat{\mu}(A_i) = (B_{i1}, B_{i2}, \dots, B_{iN_i})$, $\hat{\mu}(B_j) = (A_{j1}, A_{j2}, \dots, A_{jM_j})$, 双方的已匹配数量序列为 $\hat{t}(A_i) = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{iN_i})$, $\hat{t}(B_j) = (\tilde{t}_{j1}, \tilde{t}_{j2}, \dots, \tilde{t}_{jM_j})$, 双方的待交易数量为 \hat{q}_{a_i} 、 \hat{q}_{b_j} ; 操作新增的交易数量为 t ($t \geq 0$); 操作后的市场实际交易总量为 T , 双方的已匹配主体序列为 $\mu(A_i), \mu(B_j)$, 双方的已匹配数量序列为 $t(A_i), t(B_j)$, 双方的待交易数量为 q_{a_i} 、 q_{b_j} , 且 $T = \hat{T} + t$, $q_{b_j} = \hat{q}_{b_j} - t$. 在此基础上给出一次匹配操作的算法.

算法1

Step 1 检查 \hat{q}_{a_i} 、 \hat{q}_{b_j} 的数量关系, 分为以下几种情况:

1) 若 $0 < \hat{q}_{a_i} \leq \hat{q}_{b_j}$, 则 $t = \hat{q}_{a_i}$, $q_{a_i} = 0$, $\mu(A_i) = (\hat{\mu}(A_i), B_j)$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j) \oplus A_i$, $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), t)$, $t(B_j) = \hat{t}(B_j) \oplus t$.

2) 若 $0 < \hat{q}_{b_j} < \hat{q}_{a_i}$, 则 $t = \hat{q}_{b_j}$, $\mu(A_i) = (\hat{\mu}(A_i),$

$B_j)$, 并且再次细分为以下情况:

ii) $P_{ij} \leq P_{jM_j}$ (A_{jM_j} 为 $\hat{\mu}(B_j)$ 里最后一个匹配主体), 有 $q_{a_i} = \hat{q}_{a_i} - t$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j) \oplus A_i$, $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), t)$, $(B_j) = \hat{t}(B_j) \oplus t$.

ii) $P_{ij} > P_{jM_j}$, 此时会从后向前拆散 $\hat{\mu}(B_j)$ 中原有的匹配对象. 设 A_{jL} 是最后一个拆掉 (部分拆掉) 的主体, 又存在以下3种可能:

a) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} > \hat{q}_{a_i} - t > \sum_{x=L+1}^{M_j} \tilde{t}_{jx}$, 有 $q_{a_i} = 0$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_L \oplus A_i (\hat{\mu}(B_j)_L$ 表示 $\hat{\mu}(B_j)$ 中前 L 个主体), $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), \hat{q}_{a_i})$, $t(B_j) = (\hat{t}(B_j)_{L-1}, \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} - \hat{q}_{a_i} + t) \oplus \hat{q}_{a_i} (\hat{t}(B_j)_{L-1}$ 表示 $\hat{t}(B_j)$ 中前 $L-1$ 个数). 设 B_j

为 $\hat{\mu}(A_{jL})$ 中第 N 个主体, 令 $t_{jLN} = \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} - \hat{q}_{a_i} + t$, 执行 $\text{Clr}(A_{jL}, B_j)$ 操作, 并对每一个 A_{jx} ($x = L+1, L+2, \dots, M_j$) 执行 $\text{Del}(A_{jx}, B_j)$ 操作.

b) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} = \hat{q}_{a_i} - t$, 有 $q_{a_i} = 0$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_{L-1} \oplus A_i$, $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), \hat{q}_{a_i})$, $t(B_j) = \hat{t}(B_j)_{L-1} \oplus \hat{q}_{a_i}$, 且对每一个 A_{jx} ($x = L, L+1, \dots, M_j$) 执行 $\text{Del}(A_{jx}, B_j)$ 操作.

c) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} < \hat{q}_{a_i} - t$ 且 $P_{ij} < P_{jL-1j}$, 有 $q_{a_i} = \hat{q}_{a_i} - t - \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx}$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_{L-1} \oplus A_i$, $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), t + \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx})$, $t(B_j) = \hat{t}(B_j)_{L-1} \oplus t + \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx}$, 且对每一个 A_{jx} ($x = L, L+1, \dots, M_j$) 执行 $\text{Del}(A_{jx}, B_j)$ 操作.

3) 若 $0 = \hat{q}_{b_j} < \hat{q}_{a_i}$, 则 $t = 0$, 同2) 可分为以下情况:

ii) $P_{ij} \leq P_{jM_j}$, 有 $q_{a_i} = \hat{q}_{a_i}$, $\mu(A_i) = \hat{\mu}(A_i)$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)$, $t(A_i) = \hat{t}(A_i)$, $t(B_j) = \hat{t}(B_j)$, 即拒绝匹配, 各参数保持不变.

ii) $P_{ij} > P_{jM_j}$, 有 $\mu(A_i) = (\hat{\mu}(A_i), B_j)$, 也存在以下3种可能:

a) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} > \hat{q}_{a_i} > \sum_{x=L+1}^{M_j} \tilde{t}_{jx}$, 有 $q_{a_i} = 0$, $\mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_L \oplus A_i$, $t(A_i) = (\hat{t}(A_i), \hat{q}_{a_i})$, $t(B_j) = (\hat{t}(B_j)_{L-1}, \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} - \hat{q}_{a_i}) \oplus \hat{q}_{a_i}$. 设 B_j 为 $\hat{\mu}(A_{jL})$ 中第

N 个主体, 令 $t_{jLN} = \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} - \hat{q}_{a_i}$, 执行 $\text{Clr}(A_{jL}, B_j)$ 操作, 且对每一个 A_{jx} ($x = L+1, L+2, \dots, M_j$) 执

行 $\text{Del}(A_{j_x}, B_j)$ 操作.

b) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} = \hat{q}_{a_i}$, 有 $q_{a_i} = 0, \mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_{L-1} \oplus A_i, t(A_i) = (\hat{t}(A_i), \hat{q}_{a_i}), t(B_j) = \hat{t}(B_j)_{L-1} \oplus \hat{q}_{a_i}$, 且对每一个 $A_{j_x} (x = L, L+1, \dots, M_j)$ 执行 $\text{Del}(A_{j_x}, B_j)$ 操作.

c) $\sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx} < \hat{q}_{a_i}$ 且 $P_{ij} < P_{j_{L-1}j}$, 有 $q_{a_i} = \hat{q}_{a_i} - \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx}, \mu(B_j) = \hat{\mu}(B_j)_{L-1} \oplus A_i, t(A_i) = (\hat{t}(A_i), \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx}), t(B_j) = \hat{t}(B_j)_{L-1} \oplus \sum_{x=L}^{M_j} \tilde{t}_{jx}$, 且对每一个 $A_{j_x} (x = L, L+1, \dots, M_j)$ 执行 $\text{Del}(A_{j_x}, B_j)$ 操作.

Step 2 检查 $q_{b_j} (q_{b_j} \geq 0)$ 的大小, 若 $q_{b_j} = 0$, 则执行 $\text{Clr}(A_i, B_j)$ 操作, 算法终止, 否则不进行其他操作, 算法终止.

运算 1 $\oplus : \mu(B_j) \oplus A_i$ 和 $t(B_j) \oplus \hat{t}(A_i, B_j)$ 总是成对出现 ($\forall A_x \in A, \forall B_j \in B$), 规则是根据 $O(B_j)$ 的顺序, 将 A_i 插入到 $\mu(B_j)$ 里, 再将 $\hat{t}(A_i, B_j)$ 插入到 $t(B_j)$ 里相同的位置上.

运算 2 $\ominus : S \ominus s$ 表示去掉序列 S 中的元素 s .

操作 1 $\text{Clr}(A_x, B_y) \{$

$\forall A_x \in A, \forall B_y \in B$, 设操作前后 A_x 的偏好序列分别为 $\hat{O}(A_x), O(A_x)$, 令 $O(A_x) = \hat{O}(A_x) \ominus B_y$.

$\}$

操作 2 $\text{Del}(A_l, B_k) \{$

$\forall A_l \in A, \forall B_k \in B$, 判断;

1) 若 $\hat{\mu}(A_l) = \emptyset \vee B_k \notin \hat{\mu}(A_l)$, 则输出为空, 不进行任何操作;

2) 否则, 设 B_k 为 $\hat{\mu}(A_l)$ 中的第 N 个主体, 令 $\mu(A_l) = \hat{\mu}(A_l) \ominus B_k, t(A_l) = \hat{t}(A_l) \ominus t_{lN}$ (去掉 $\hat{t}(A_l)$ 序列中 B_k 对应的数量 t_{lN}), $q_{a_l} = \hat{q}_{a_l} - t_{lN}$, 执行 $\text{Clr}(A_l, B_k)$ 操作.

$\}$

有了一次匹配操作的算法, 下面给出对主体 A_i 进行一次匹配检查的算法. 首先对算法 2 用到的参数符号进行说明: 检查前 A_i 的待交易数量为 \hat{q}_{a_i} , 已匹配主体序列为 $\hat{\mu}(A_i) = (B_{i_1}, B_{i_2}, \dots, B_{i_{N_i}})$, 已匹配数量序列为 $\hat{t}(A_i) = (t_{i_1}, t_{i_2}, \dots, t_{i_{N_i}})$, 偏好序列为 $\hat{O}(A_i) = (B_{i'_1}, B_{i'_2}, \dots, B_{i'_{M_i}})$; 检查后 A_i 的各参量分别为 $q_{a_i}, \mu(A_i), t(A_i), O(A_i)$.

算法 2

Step 1: 输入 $\hat{q}_{a_i}, \hat{\mu}(A_i), \hat{t}(A_i), \hat{O}(A_i), M_i (M_i$ 为 $\hat{O}(A_i)$ 的主体个数), 检查 $\hat{q}_{a_i} (\hat{q}_{a_i} \geq 0)$ 的大小, 若 $\hat{q}_{a_i} > 0$, 则转至 Step 2, 否则转至 Step 5.

Step 2: 令 $x = 1$, 转至 Step 3.

Step 3: 检查 x 的大小, 若 $x \leq M_i$, 则转至 Step 4, 否则转至 Step 5.

Step 4: 利用算法 1 对 $A_i, B_{i'_x}$ 执行匹配操作, 输出 $q_{a_i}, \mu(A_i), t(A_i), O(A_i)$. 令 $\hat{q}_{a_i} = q_{a_i}, \hat{\mu}(A_i) = \mu(A_i), \hat{t}(A_i) = t(A_i), \hat{O}(A_i) = O(A_i)$, 检查 $\hat{q}_{a_i} (\hat{q}_{a_i} \geq 0)$ 的大小, 若 $\hat{q}_{a_i} > 0$, 则令 x 在原值基础上加 1, 转至 Step 3, 否则转至 Step 5.

Step 5: 令 $q_{a_i} = \hat{q}_{a_i}, \mu(A_i) = \hat{\mu}(A_i), t(A_i) = \hat{t}(A_i), O(A_i) = \hat{O}(A_i)$, 输出 $q_{a_i}, \mu(A_i), t(A_i), O(A_i)$, 算法终止.

在算法 1 和算法 2 的基础上, 给出整个匹配过程的算法.

算法 3

Step 1: 输入 $m (m$ 为 A 的主体个数), $\forall A_i \in A, \forall B_j \in B$, 令 $\hat{q}_{a_i} = q_{a_i}, \hat{\mu}(A_i) = \emptyset, \hat{t}(A_i) = \emptyset, \hat{O}(A_i) = O(A_i), \hat{q}_{b_j} = q_{b_j}, \hat{\mu}(B_j) = \emptyset, \hat{t}(B_j) = \emptyset, \hat{O}(B_j) = O(B_j)$, 又令 $y = 1, T = 0$. 转至 Step 2.

Step 2: 检查 y 的大小, 若 $y = m + 1$, 则令 $y = 1$, 利用算法 2 对 A_y 进行匹配检查, 输出 T , 检查 $T (T \leq Q)$ 的大小. 若 $T < Q$, 则令 y 在原值基础上加 1, 转至 Step 2, 否则算法终止.

定理 1 算法 3 求出的匹配结果是 A 方的 Pareto 最优解.

证明 设 μ^* 为算法 3 求出的匹配结果, 显然 μ^* 为稳定匹配. 假设 μ^* 不是 A 方的 Pareto 最优解, 则 $\exists \mu$, 对 A 方而言 μ 帕累托优于 μ^* , 即 $\exists A_i \in A$, 满足 $\mu(A_i)$ 优于 $\mu^*(A_i)$, 且 $\forall A_l \in A_{-i}$, 有 $\mu(A_l)$ 不劣于 $\mu^*(A_l)$. 对 μ^* 而言, 设 B_j 是 $\mu^*(A_i)$ 序列中的最末个体, 称 $\mu^*(A_i, B_j)$ 为坏的匹配操作. 由稳定匹配的定义可知, $\exists B_k, A_l$, 满足 $B_k \notin \mu^*(B_k), B_k \in \mu^*(A_l)$, 且有 $P_{ij} < P_{ik}$. 考虑从 μ^* 到 μ 的变化过程, $\mu^*(A_i)$ 的改变会引起 $\mu^*(A_l)$ 的改变, 又由 $\mu(A_l)$ 不劣于 $\mu^*(A_l)$ 可知 $\mu(A_l)$ 优于 $\mu^*(A_l)$, 所以有 $\mu^*(A_l, B_k)$ 为坏的匹配操作. 以此类推, 可得到整个匹配过程的第 1 次匹配操作 $\mu_1^*(A_x, B_y)$ 为坏的匹配操作. 由算法 3 可知, $\mu_1^*(A_x, B_y)$ 是最优匹配操作 (B_y 是 A_x 最满意的匹配对象), 矛盾, 因此假设不成立, 表明 μ^* 是 A 方的 Pareto 最优解. \square

2.3 云平台的匹配机制

在一个交易多种资源的云制造平台上, 汇集各个企业对各种资源的供需信息, 据此构建多个资源双边市场. 利用第 2.1 节的方法对主体进行满意度评价, 再通过第 2.2 节的算法完成对每种资源的双边匹配, 最

终得到如下云制造资源双边匹配机制.

Step 1: 每个企业给出每种资源的待交易数量, 根据待交易数量的正负确定企业是资源提供方还是需求方, 由此形成 l 个资源匹配市场.

Step 2: 对于每个双边市场 $M_k(k = 1, 2, \dots, l)$, 每个主体给出对对方各评价属性的预期值, 并测度每个主体评价对方每个主体各属性得到的实际值, 在此基础上计算出每个主体对对方每个主体的满意度前景值 P_{ij}^k 和 \tilde{P}_{ij}^k .

Step 3: 对 $M_k(k = 1, 2, \dots, l)$ 根据供求数量计算市场总交易数量 Q^k , 进而确定双方主体集合 A^k 、 B^k 和每个主体的待交易数量 $q_{a_i}^k$ 、 $\tilde{q}_{b_j}^k(i = 1, 2, \dots, m_k, j = 1, 2, \dots, n_k)$, 按满意度从高到低确定每个主体的偏好序列 $O(A_i^k)$ 和 $O(B_j^k)$.

Step 4: 对 $M_k(k = 1, 2, \dots, l)$ 运用算法3进行匹配, 输出每个主体的匹配序列 $\mu(A_i^k)$ 、 $\mu(B_j^k)$ 和对应的数量序列 $t(A_i^k)$ 、 $t(B_j^k)(i = 1, 2, \dots, m_k, j = 1, 2, \dots, n_k)$, 得到整个云平台资源的稳定匹配结果.

3 算例分析

考虑在一个云平台上, 共有8家企业参与3种制造资源的交易, 每家企业每种资源的待交易数量见表1. 根据待交易数量的正负确定各匹配市场的供需双方, 如表2所示.

表1 各企业每种资源的待交易数量

资源种类	企业							
	1	2	3	4	5	6	7	8
资源1	5	2	7	11	-6	-5	-8	-8
资源2	-9	-2	-10	0	8	7	3	6
资源3	13	0	-7	-14	9	0	4	-5

表2 各匹配市场的供需双方及其待交易数量

供求双方	M_1		M_2		M_3	
	企业	数量	企业	数量	企业	数量
D_1	5	6	1	9	3	7
D_2	6	5	2	2	4	14
D_3	7	8	3	10	8	5
D_4	8	8				
S_1	1	5	5	8	1	13
S_2	2	2	6	7	5	9
S_3	3	7	7	3	7	4
S_4	4	11	8	6		

在每个市场中, 买方(资源需求方)通过价格(A_1)、技术服务水平(A_2)、信誉(A_3)3个属性对卖方(资源提供方)进行满意度评价, 对应权重分别为0.5、0.3和0.2. 卖方通过付款速度(\tilde{A}_1)、信誉(\tilde{A}_2)两个属性对买方进行满意度评价, 对应权重分别为0.6和0.4. 其中: $A_1 \in A^R$, 属性值取负实数, 越大表示价格

越低, 对买方越有利, 为简化起见作取整去量纲处理; A_2 、 A_3 、 \tilde{A}_1 、 $\tilde{A}_2 \in A^F$, 取值范围和含义与第1节的说明一致, 即“0”最差, “4”最好. 3个市场相关属性取值见表3~表14.

表3 M_1 买方主体对卖方属性的预期值

买方	卖方属性		
	A_1	A_2	A_3
D_1	-5	2	2
D_2	-6	4	3
D_3	-5	3	2
D_4	-4	1	2

表4 M_1 买方主体测度卖方主体属性的实际值

买方	S_1			S_2			S_3			S_4		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
D_1	-5	3	4	-7	4	3	-6	2	3	-4	2	2
D_2	-5	2	2	-7	4	3	-6	3	3	-4	1	1
D_3	-5	4	3	-7	3	2	-6	3	4	-4	1	2
D_4	-5	4	4	-7	4	3	-6	3	3	-4	2	2

表5 M_1 卖方主体对买方属性的预期值

卖方	买方属性	
	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2
S_1	2	3
S_2	3	3
S_3	2	2
S_4	2	1

表6 M_1 卖方主体测度买方主体属性的实际值

卖方	D_1		D_2		D_3		D_4	
	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2
S_1	2	1	3	4	2	3	1	2
S_2	1	2	2	3	2	3	2	4
S_3	2	2	2	3	3	4	1	3
S_4	2	2	3	3	2	3	2	3

表7 M_2 买方主体对卖方属性的预期值

买方	卖方属性		
	A_1	A_2	A_3
D_1	-10	4	3
D_2	-8	2	3
D_3	-9	2	2

表8 M_2 买方主体测度卖方主体属性的实际值

买方	S_1			S_2			S_3			S_4		
	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2	\tilde{A}_1	\tilde{A}_2				
D_1	-9	3	2	-7	2	1	-9	3	3	-8	2	2
D_2	-9	3	2	-7	1	1	-9	4	3	-8	2	2
D_3	-9	2	2	-7	2	2	-9	3	4	-8	2	3

表 9 M_2 卖方主体对买方属性的预期值

卖方	买方属性	
	\bar{A}_1	\bar{A}_2
S_1	3	2
S_2	3	3
S_3	1	3
S_4	2	2

表 10 M_2 卖方主体测度买方主体属性的实际值

卖方	D_1		D_2		D_3	
	\bar{A}_1	\bar{A}_2	\bar{A}_1	\bar{A}_2	\bar{A}_1	\bar{A}_2
S_1	1	2	0	2	3	4
S_2	1	3	1	2	3	3
S_3	2	3	2	1	4	4
S_4	2	2	1	2	3	4

表 11 M_3 买方主体对卖方属性的预期值

买方	卖方属性		
	A_1	A_2	A_3
D_1	-6	3	2
D_2	-6	2	2
D_3	-5	1	2

表 12 M_3 买方主体测度卖方主体属性的实际值

买方	S_1			S_2			S_3		
	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3	A_1	A_2	A_3
D_1	-5	2	2	-6	3	2	-4	1	3
D_2	-5	1	1	-6	3	3	-4	3	3
D_3	-5	2	3	-6	4	3	-4	2	2

表 13 M_3 卖方主体对买方属性的预期值

卖方	买方属性	
	\bar{A}_1	\bar{A}_2
S_1	3	3
S_2	2	1
S_3	2	2

表 14 M_3 卖方主体测度买方主体属性的实际值

卖方	D_1		D_2		D_3	
	\bar{A}_1	\bar{A}_2	\bar{A}_1	\bar{A}_2	\bar{A}_1	\bar{A}_2
S_1	3	3	2	2	2	3
S_2	3	4	3	2	1	2
S_3	4	3	1	2	2	2

首先,使用上述属性评价信息计算出每个匹配主体的满意度.比如,计算 M_1 中 D_1 对 S_1 的满意度,由式(2)可得 $d_{11}^1 = 0$,显然 $\bar{V}_{11}^1 = 0$.同样由式(2)可得 $d_{11}^2 = 0.5$.通过式(3)、(4)计算出 $V_{11}^2 = 0.543\ 367$,再由式(5)求得 $\bar{V}_{11}^2 = \frac{0.543\ 367}{0.881\ 104} = 0.616\ 69$,同理可求 $\bar{V}_{11}^3 = 1$.根据式(6)得到 $P_{11} = 0.5\bar{V}_{11}^1 + 0.3\bar{V}_{11}^2 + 0.2\bar{V}_{11}^3 = 0.385\ 007$.按此步骤可求得所有主体的匹配度并由此确定偏好序.

然后,按照第2.2节的描述,通过比较3个市场中供求双方待交易总量的大小,确定每个市场中的

A 方(即交易量较小的一方),其中 M_1 的 A 方为提供方, M_2 、 M_3 的为需求方.

最后,在VS2010环境下,利用C++语言实现匹配算法,求得的匹配结果如表15所示.举例来说,在 M_1 中,企业4依序出售给企业7、企业8、企业5的资源数量分别为1、8、2;在 M_2 中,企业1依序购买企业8、企业5的资源数量为6和3;以此类推.可以验证,在3个市场中, A 方的匹配需求均得到满足,且不符合不稳定匹配的两个条件,是稳定匹配.另一方面,以 M_3 为例,企业3需要7个数量的资源,其偏好序为企业7→企业1→企业5,结果对它而言已是最优;企业4需要14个数量的资源,其偏好序为企业7→企业5→企业1,若要实现其更佳匹配,则需要从企业3“抢走”企业7的资源,这样会降低企业3的匹配效用,因此在不改变企业3匹配组合的前提下,企业4的匹配组合亦是最优;企业8的情况同理可得.以上足以表明不能得到Pareto更优的结果.3个市场的分析结果一致表明,对 A 方而言不存在Pareto改进的可能,匹配结果是Pareto最优.

表 15 匹配结果列表

匹配市场	匹配结果	
	A 方主体	匹配组合(括号内为匹配数量)
M_1	企业1	企业6(5)
	企业2	企业5(2)
	企业3	企业7(7)
	企业4	企业7(1), 企业8(8), 企业5(2)
M_2	企业1	企业8(6), 企业5(3)
	企业2	企业5(2)
	企业3	企业6(7), 企业7(3)
M_3	企业3	企业7(4), 企业1(3)
	企业4	企业5(9), 企业1(5)
	企业8	企业1(5)

4 结 论

本文针对物联网环境下云平台上的资源双边匹配问题,引入前景理论,通过多属性评价计算主体满意度,并结合资源匹配的实际情况,设计了稳定匹配算法并编程加以实现,主要结论如下:

1)不同于已有研究大多要求匹配主体直接给出偏好序,本文基于前景理论,让匹配主体(云平台企业)只需以程序化的方法评价对方的多种属性,满意度和偏好序由系统(云平台)计算得出.不仅大大降低了企业的操作难度,也能更真实地测度企业的偏好信息,实用性更强.

2)传统G-S和改进算法只能解决“一对一”和“一对多”的匹配问题,且匹配关系只存在非0即1(匹配或不匹配)两种情况.本文针对资源匹配“多对多”

属性和数量维度特征,利用数学表达式定量描述了稳定匹配算法,并以算例验证了算法的可行性和有效性.

3) 以待交易总量较小的一方作为匹配优先方(可类比博弈中议价能力更大的一方),完全满足其匹配数量,且匹配结果为其 Pareto 最优解,符合实际生产经济活动中存在因供求不一致造成的交易优势的现象,有利于促成匹配交易.

参考文献(References)

- [1] 邓宏, 陈笠, 邓倩妮. 基于制造网格的虚拟企业组织变更与制造资源调度问题研究[J]. 计算机集成制造系统, 2006, 12(8): 1211-1219.
(Deng H, Chen L, Deng Q N. Organization changing of virtual enterprise & scheduling of manufacturing resources based on manufacturing grid[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2006, 12(8): 1211-1219.)
- [2] Tao F, Zhang L, Nee A Y C. A review of the application of grid technology in manufacturing[J]. Int J of Production Research, 2010, 49(13): 4119-4155.
- [3] Xu X. From cloud computing to cloud manufacturing[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2012, 28(1): 75-86.
- [4] Laili Y, Tao F, Zhang L, et al. A study of optimal allocation of computing resources in cloud manufacturing systems[J]. Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(5-8): 671-690.
- [5] 战德臣, 赵曦滨, 王顺强. 面向制造及管理的集团企业云制造服务平台[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(3): 1211-1219.
(Zhan D C, Zhao X B, Wang S Q. Cloud manufacturing service platform for group enterprises oriented to manufacturing and management[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(3): 1211-1219.)
- [6] 李伯虎, 张霖, 王时龙. 云制造——面向服务的网络化制造新模式[J]. 计算机集成制造系统, 2010, 16(1): 1-6.
(Li B H, Zhang L, Wang S L. Cloud manufacturing: A new service-oriented networked manufacturing model[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2010, 16(1): 1-6.)
- [7] Gale D, Shapley L S. College admissions and the stability of marriage[J]. American J of Mathematics, 1962, 69(1): 9-15.
- [8] Roth A E. On the allocation of residents to rural hospitals: A general property of two-sided matching markets[J]. Econometrica, 1986, 54(2): 425-428.
- [9] Teo C P, Sethuraman J, Tan W P. Gale-Shapley stable marriage problem revisited: Strategic issues and applications[J]. Management Science, 2001, 47(9): 1252-1267.
- [10] Sethuraman J, Teo C P, Qian L W. Many-to-one stable matching: Geometry and fairness[J]. Mathematics of Operations Research, 2006, 31(3): 581-596.
- [11] 李铭洋, 樊治平. 考虑双方主体心理行为的稳定双边匹配方法[J]. 系统工程理论与实践, 2014, 34(10): 2591-2599.
(Li M Y, Fan Z P. Method for stable two-sided matching considering psychological behavior of agents on both sides[J]. Systems Engineering—Theory & Practice, 2014, 34(10): 2591-2599.)
- [12] 林杨, 王应明. 考虑直觉模糊偏好关系的双边稳定匹配及应用[J]. 控制与决策, 2015, 30(12): 2212-2218.
(Lin Y, Wang Y M. Bilateral stable matching considering intuitionistic fuzzy preference relations and their application[J]. Control and Decision, 2015, 30(12): 2212-2218.)
- [13] 梁海明, 姜艳萍. 一种基于弱偏好序信息的双边匹配决策方法[J]. 系统工程学报, 2014, 29(2): 153-159.
(Liang H M, Jiang Y P. Method for two-sided matching decision making based on the weak preference ordering information[J]. J of Systems Engineering, 2014, 29(2): 153-159.)
- [14] Kahneman D, Tversky A. Prospect theory: An analysis of decision under risk[J]. Econometrica, 1979, 47(2): 263-291.
- [15] Tversky A, Kahneman D. Advances in prospect theory: Cumulative representation of uncertainty[J]. J of Risk and Uncertainty, 1992, 5(4): 297-323.
- [16] He X D, Zhou X Y. Portfolio choice under cumulative prospect theory: An analytical treatment[J]. Management Science, 2011, 57(2): 315-331.

(责任编辑: 郑晓蕾)