

网格环境下企业制造资源的逆优化配置模型

张相斌, 林萍

(南京邮电大学管理学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 网格环境下每个企业都要根据计划期的生产任务合理确定可以出租及租进资源的类型、数量和参考价格. 在考虑资源交易过程及其对价格影响基础上, 从满足市场需求出发, 按照企业整体利润最优的原则, 采用线性规划的逆优化方法建立企业资源用量和交易参考价格的决策模型. 由于模型体现了网格环境下因制造资源流动迅速使企业对制造资源为弹性需求的特点, 因此, 模型可以根据市场需求的变化, 及时确定企业租出资源的数量和参考价格, 租进资源的数量和参考价格, 实现企业的资源精益化和效益最优化.

关键词: 网格环境; 制造资源; 优化配置; 逆优化模型

中图分类号: **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-5781(2014)02-0246-11

Inverse optimal allocation model of manufacturing resource in grid environment

Zhang Xiangbin, Lin Ping

(School of Management, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In a manufacturing grid, enterprises have to determine the optimal resource types, quantities and quoted prices of resources ready for leasing in and out according to the manufacturing plan. Considering the resource exchange process and its impact on the prices, we establish an inverse optimization model of a linear programming absorbing resource usage and prices as reference variables, so as to meet market demands and optimize the enterprise's overall profit. Owing to the feature of dynamic demands for manufacturing resources because of the rapid flow in the grid, this model helps the enterprises to determine the quantities and quoted prices of resources promptly ready for lease in and out according to the changes of market demands. This model helps the enterprise to achieve the lean manufacturing resources and the integral profit optimization.

Key words: grid environment; manufacturing resource; optimal allocation; inverse optimization model

1 引言

在网格环境下, 借助于网格及相关信息技术将分散在不同的企业和社会组织中的制造资源, 加以封装和集成, 屏蔽资源的异构性和分布性, 通过中介服务组织的优化调度使用户能够以请求服务的方式方便地获得与其制造任务相关的所需服务, 实现各类制造资源的共享和协同工作.

设一个制造网格由多个资源型节点企业和一个中介服务组织构成, 每个资源型企业即是资源(如制造资源或加工服务)提供者又是资源需求者, 中介服务组织作为网格平台管理者按批处理方式为用户资源供需双方交易提供代理服务. 每次资源交易过程总是开始于资源供需双方在下一个计划周期之前向网格平台注册可以

收稿日期: 2012-12-20; 修订日期: 2013-07-08.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70972083).

提供的资源类型、数量或效率、作业起止时间和参考价格信息及任务类型、数量、作业起止时间和参考价格信息; 中介服务组织根据资源供需双方的注册信息产生符合要求的资源交易候选方案, 并分别按照需求方利益最大化和需求方利益最大化准则评价和选出更符合要求的候选方案, 推荐给供需双方; 供需双方确认资源交易方案并签订交易合同; 中介组织根据资源成交数量和价格向需求方收取订金并向资源提供方传递资源预留信息; 如果资源提供方按期完成任务, 中介组织则向其转移服务费用, 否则, 则向需求方返还订金. 整个交易过程如图 1 所示.

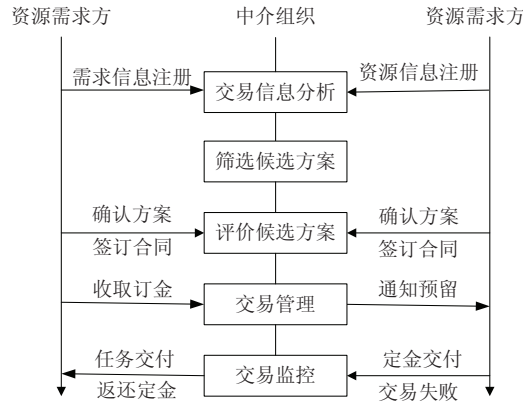


图 1 制造资源交易过程

Fig. 1 The process of manufacturing resource transaction

由于在一定的时间内整个制造网格上需要服务的制造任务与提供服务的制造资源主要取决于每个资源型企业资源配置结构和所承担的任务, 所以, 网格中每个企业为完成自己所承担的任务, 需要确定在什么样的价格范围内向其他企业租用稀缺资源, 在什么样的价格范围内可以将自己的富余资源出租给其他企业使用以获取更多的效益, 这既关系到本企业的资源配置的优化及任务的最佳完成, 也关系到网格上制造资源的全局优化配置.

网格资源的优化配置问题是制造网格应用的关键和研究热点. Buyya 等^[1-3]基于价格机制提出了市场经济网格模型, 并将“中间人”引入到网格中来, 采用任务最终期限和预算限制的调度算法(DBC)将任务分配到资源上, 已有的 DBC 调度算法包括费用最优调度、时间最优调度和费用-时间均衡最优调度. 在基于价格机制的资源调度模型中, 采用微观经济学或宏观经济学原则来解决网格资源的共享和分配问题, Kwok 等^[4]提出商品市场模型, Khan 等^[5]提出拍卖模型, Ferguson 等^[6]提出议价模型及标价模型, 李立等^[7]按出价比例共享资源模型等. 基于纳什均衡的资源调度方式则对多个理性参与者行为所产生的相互影响进行分析, Buyya 等^[1]和 Chun 等^[8]将资源配置看作一个博弈问题, 通过寻找纳什均衡解得到效用最大化下的资源分配方案, 并通过利用 Nash 谈判模型, 周长春等^[9]使用 UML 类图对制造资源进行了分类建模, 并采用 WSDL 规范对制造资源进行描述和封装, 提出了基于二级模糊综合评价的制造资源优化配置模型和策略. 马雪芬等^[10]将制造资源分成设备组和设备两种类型, 分别对两类资源的优化配置建立了以交货期、成本和质量等目标的优化模型, 通过权重法将其转换成单目标规划后用遗传算法得出结果. 周永利等^[11]在制造网格的基础上引进基于效益驱动的资源管理分析机制, 对制造网格的资源从经济学角度进行分析, 采用基于单元组织管理的模型建立方法, 在此基础上提出一种基于代理的面向效益的制造网格资源管理模型. 王维欢等^[12]提出针对网格资源分配中的竞争问题, 提出一种基于竞价机制的网格资源分配方法, 并定义了参与方的效用函数, 设计出一种网格资源分配算法. 李俊萍等^[13]研究了资源提供者和资源消费者在进行交易时的价格策略, 提出一种基于资源调度双方信誉值的网格计算经济模型. 上述文献主要集中在网格中不同企业的资源供给与资源需求之间相互匹配的优化调度问题的研究.

本文从满足市场需求出发, 按照企业整体利润最优的原则, 对网格环境下企业制造资源优化配置问题采用线性规划的逆优化方法建立资源用量和交易参考价格的决策模型, 即通过对企业资源配置优化模型中的

参数进行调整和优化,使得由市场需求确定的产品组合成为企业资源优化配置模型的最优点,进而确定企业的资源配置结构和资源交易参考价格。

2 制造企业资源优化配置建模

在网格环境下资源流动快速便捷,为企业提升内部资源的利用效率,有效利用外部资源提供了有利条件.企业提升内部资源利用效率的一个主要方式就是在满足计划期生产任务的前提下将富裕的资源出租给其他企业;企业有效利用外部资源的主要方式也就是按照计划期生产任务的要求从其它企业租进资源.因此,企业需要交易的资源数量主要取决于计划期满足生产任务需要的企业资源最优配置计划.企业资源最优配置计划可以用线性规划模型表示.

设一个制造网格在某一计划周期内,某一个节点企业生产 K 种产品,每种产品的计划期产量分别为 x_1, x_2, \dots, x_K ;生产这些产品共需要 N 种资源,其中一部分资源能够满足其生产任务的要求,另一部分资源的占有量不能满足其生产任务的要求,其它资源完全没有库存.若 $\bar{b}_1, \bar{b}_2, \dots, \bar{b}_T$ 为能满足生产任务要求的 $1, 2, \dots, T$ 种自有资源库存数量, $\bar{b}_{T+1}, \bar{b}_{T+2}, \dots, \bar{b}_Z$ 为不能满足生产任务要求的 $T+1, T+2, \dots, Z$ 种自有资源库存数量; $\bar{b}_{Z+1}, \bar{b}_{Z+2}, \dots, \bar{b}_N$ 为需要从网络上其它节点企业租用 $Z+1, Z+2, \dots, N$ 种资源的数量; $M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{iN}$ 为生产第 i 种产品对资源 $1, 2, \dots, N$ 的单位需求量; $M_{ij}x_i$ 为生产第 i 种产品所需的第 j 种资源总量.

假设企业节点的剩余资源可全部出租,短缺资源的市场供应是充足的.于是,该节点企业的优化目标是通过产品合理组合获得最大利润以及富裕资源出租获得最佳利益,其目标函数为

$$R = \sum_{i=1}^K (P_i - C_i)x_i + \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j) \left(\bar{b}_j - \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i \right), \quad (1)$$

由于富裕资源的销售获益中 $\sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j)\bar{b}_j$ 是常数,对 x 的取值不产生影响,所以将目标函数转化为

$$R' = \sum_{i=1}^K (P_i - C_i)x_i - \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j) \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i. \quad (2)$$

节点企业的资源优化配置模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Max } R' = \sum_{i=1}^K \left(P_i - C_i - \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j) M_{ij} \right) x_i \\ \text{s.t.} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i \leq \bar{b}_j, j = 1, 2, \dots, T \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i = \bar{b}_j, j = T+1, T+2, \dots, Z, Z+1, \dots, N \\ x_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, K, \end{array} \right. \quad (3)$$

其中 P_i 为产品 i ($i = 1, 2, \dots, K$) 的市场价格; S_j 为富裕资源 j ($j = 1, 2, \dots, T$) 的出售价格; C_i 为产品 i ($i = 1, 2, \dots, K$) 的资源占用成本,由于 $Z+1, Z+2, \dots, N$ 的资源需要部分租入,所以 $b_{j'}$ 为需要租入的资源量.

若 $\bar{c}_1, \bar{c}_2, \dots, \bar{c}_j, \dots, \bar{c}_N$ 为资源 $1, 2, \dots, N$ 的单位使用成本, $p_{T+1}, p_{T+2}, \dots, p_Z$ 和 $p_{Z+1}, p_{Z+2}, \dots, p_N$ 为资源 $\bar{b}_{T+1}, \bar{b}_{T+2}, \dots, \bar{b}_Z$ 和 $\bar{b}_{Z+1}, \bar{b}_{Z+2}, \dots, \bar{b}_N$ 的单位市场交易价格,则式(3)中单位产品资源占用成本为

$$C_i = \sum_{j=1}^T M_{ij}\bar{c}_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij} \frac{\bar{b}_j\bar{c}_j + p_j\bar{b}_{j'}}{\bar{b}_j + \bar{b}_{j'}}. \quad (4)$$

由于自有资源 $\bar{b}_{T+1}, \bar{b}_{T+2}, \dots, \bar{b}_Z$ 的占有量不能满足生产任务的要求, $\bar{b}_{Z+1}, \bar{b}_{Z+2}, \dots, \bar{b}_N$ 没有库存, 所以二者是需要从网络上其它节点租用资源以满足其生产任务, 考虑到部分自有资源的剩余, 所以向外租出资源的价格 S_1, S_2, \dots, S_T 和从网络上其它节点租用资源的价格 $p_{T+1}, p_{T+2}, \dots, p_Z$ 和 $p_{Z+1}, p_{Z+2}, \dots, p_N$, 以及数量 \bar{b}_j 是要进行决策的参变量, 即模型(3)式是一个含有参变量 S_j, p_j 和 \bar{b}_j 的资源优化配置模型.

模型(3)的对偶规划模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C = \sum_{j=1}^N \bar{b}_j y_j \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^N M_{ij} y_j \geq P_i - C_i - \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j) M_{ij}, \quad y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, T \\ y_i \text{ 无约束}, j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N. \end{array} \right. \quad (5)$$

令 $\bar{W}_i = P_i - C_i - \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{c}_j) M_{ij}$, $y_j = y_{1j} - y_{2j}$, $j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N$. 则模型(5)可改写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } C = \sum_{j=1}^T \bar{b}_j y_j + \sum_{j=T+1}^N \bar{b}_j (y_{1j} - y_{2j}) \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^T M_{ij} y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij} (y_{1j} - y_{2j}) \geq \bar{W}_i \\ y_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, T \\ y_{1j}, y_{2j} \geq 0, j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N. \end{array} \right. \quad (6)$$

在实际中, 网络节点企业在计划期内的生产任务 $x_i, i = 1, 2, \dots, K$, 通常由客户订单和市场需求决定, 资源的影子价格参考值 y_j 可以根据资源的市场均衡价格或机会成本近似确定^[14,15]. 所以, 确定模型(3)中参变量 $S_j (j = 1, 2, \dots, T), p_j$ 和 $b_j (j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N)$ 可以按照逆优化方法^[16-19]建立相应的以参变量 b_j 为优化变量的逆优化模型和以参变量 S_j, p_j 为优化变量的逆优化模型.

3 制造企业资源优化配置的逆优化模型

在市场经济条件下, 企业的生产任务不能完全由自己决定, 而是由市场需求决定, 因此, 在资源通过市场交易可以进行调整改变的情况下, 需要根据由市场需求决定的生产任务科学合理地确定资源的交易数量, 也就是通过对资源数量的调整使由市场需求决定的生产任务成为资源调整后所对应的资源优化配置模型的最优点. 于是, 可以用企业的资源优化配置模型的互补最优性条件作为约束, 用资源数量作为优化变量的逆优化模型来确定每个企业可提供资源的类型和数量及需要租赁的资源类型和数量.

在资源交易过程中, 资源需求方当然希望用最低的价格获得所需资源, 但他需要考虑网络中其他需求方对同类资源的需求和出价情况, 如果自己的出价过低就很有可能得不到所需资源; 资源提供方也希望所提供的资源能够以较高价格成交, 但由于需求方会参考网络中相关资源类型和价格, 并根据自己的预算等条件选择合适的资源, 因此, 若不考虑需求方的承受能力, 则很有可能造成无需求方购买资源而浪费资源的情况^[20]. 这就要求无论是资源供给方还是资源需求方在向网络上中介组织提供的拟出租资源的参考价格和希望租赁资源的参考价格具有一定的合理性, 才能使整个网络上的资源交易过程有效进行.

资源的交易价格是资源的供给与需求相互作用的结果,是资源的需求方愿意支付的价格与供给方可以接受的价格通过不断讨价还价最终达到均衡的结果.因此,资源供给方的合理出价与资源需求方的合理出价通过讨价还价达成的交易价格应该在双方可以接受的范围内,也就是双方的出价不能相差过大.制造资源作为服务产品其交易价格也是由其价值决定的,但由于服务产品的无形性、顾客参与性及服务产生与消费的同步性使得服务产品的价值取决于服务质量,因此,制造资源的交易价格的高低主要由其服务质量的高低所决定.因为某种制造资源在为供给方提供服务时需要与其他资源一起相互作用完成生产任务,为需求方提供服务时也需要与其他资源一起相互作用完成生产任务,所以,制造资源的服务质量可以用其在具体应用环境里实现合理配置的情况下对总体效益目标所创造的边际效益(即制造资源的影子价格)来表示.考虑到制造资源在供需双方的使用价值没有明显差距和其应用技术水平也没有明显差距的情况下,制造资源在供需双方的应用环境里分别实现合理配置的情况下对各自总体效益目标所创造的边际效益(即资源的影子价格)就不会有较大差异.这样,某种制造资源由提供方合理使用这种资源对其总体效益目标所创造的边际效益所决定的提供方合理出价与由需求方合理使用这种资源对其总体效益目标所创造的边际效益所决定的需求方合理进价就可能通过讨价还价达成交易.因此,当资源的影子价格被估计出来后,就可以用企业资源配置对偶模型的互补最优性条件作为约束,用资源价格作为优化变量的逆优化模型来确定每个企业可提供资源的出价和需要租赁资源的进价.

设 x^* 和 y^* 分别为线性规划(3)和对偶规划(5)的最优解,令 $J = \{j|y_j^* = 0\}$, $\bar{J} = \{j|y_j^* > 0\}$, $I = \{i|x_i^* = 0\}$, $\bar{I} = \{i|x_i^* > 0\}$,则由线性规划互补最优性条件得

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \bar{b}_j \leq 0, j \in J \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \bar{b}_j = 0, j \in \bar{J}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) - \bar{W}_i \geq 0, i \in I \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) - \bar{W}_i = 0, i \in \bar{I}. \end{cases} \quad (8)$$

网络环境下企业可以出租的资源类型和数量以及需要从其它企业租赁的资源类型和数量必须依据企业在计划期的生产任务来确定.由于能够满足生产任务的资源配置方案通常不是唯一的,因此,需要根据企业资源优化配置模型的互补最优性条件(7)来构建其逆优化问题模型.

当企业在计划期内的生产任务 x_i^* , $i = 1, 2, \dots, K$ 确定后,以系数向量 \bar{b} 为变量,以 \bar{b} 变化最小为优化目标以式(7)为约束条件,相应的逆优化模型可表示成

$$\begin{cases} \text{Min } \|\bar{b}^* - \bar{b}\| \\ \text{s.t.} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i \leq \bar{b}_j, j \in J \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i = \bar{b}_j, j \in \bar{J}, \end{cases} \quad (9)$$

其中 \bar{b} 为网络节点企业在计划期内的相应资源的拥有量, \bar{b}^* 为 x^* 成为模型(1)的最优解时, \bar{b} 的相应值.

令 $\bar{b}_j^* = \bar{b}_j + \alpha_j - \beta_j$, $i = 1, 2, \dots, K$; $\alpha_j \geq 0$ 和 $\beta_j \geq 0$ 分别表示 \bar{b}_j 的增量和减量,考虑到 $\|\alpha - \beta\| \leq$

$\|\alpha + \beta\|$, 则式(9)可改写成式(10)和式(11).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \|\alpha + \beta\| \\ \text{s.t.} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j + \beta_j \leq \bar{b}_j, j \in J \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j + \beta_j = \bar{b}_j, j \in \bar{J}, \end{array} \right. \quad (10)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \|\alpha + \beta\| \\ \text{s.t.} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j \leq \bar{b}_j, j \in J \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j \leq \bar{b}_j, j \in \bar{J} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i + \beta_j \geq \bar{b}_j, j \in \bar{J}. \end{array} \right. \quad (11)$$

在取模为 l_1 时, 原问题的逆优化问题也是一个线性规划, 如模型(12)所示.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \sum_{j=1}^N \alpha_j + \sum_{j \in \bar{J}} \beta_j \\ \text{s.t.} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j \leq \bar{b}_j, j \in J \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i - \alpha_j \leq \bar{b}_j, j \in \bar{J} \\ \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i + \beta_j \geq \bar{b}_j, j \in \bar{J} \\ \alpha_j \geq 0, j \in \bar{J} \cup J \\ \beta_j \geq 0, j \in \bar{J}, \end{array} \right. \quad (12)$$

求解方程(12), 则企业自用的资源数量 \bar{b}_j^* 为

$$\bar{b}_j^* = \bar{b}_j + \alpha_j^* - \beta_j^*. \quad (13)$$

在计划期内可以出租给其他节点企业使用的资源结构 $SR_j, j = 1, 2, \dots, T$ 可以表示为

$$SR_j = \bar{b}_j^* - \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i^*. \quad (14)$$

需要从其它节点企业租用的资源结构 $WR_j, j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N$ 可分别表示为

$$WR_j = \sum_{i=1}^K M_{ij}x_i^* - \bar{b}_j^*. \quad (15)$$

当确定出企业可以出租的资源类型和数量以及需要从其它企业租赁资源的类型和数量, 就可以确定其相应的参考价格. 为此, 需要根据企业资源优化配置模型的互补最优性条件(8)来构建其逆优化问题模型.

当资源的影子价格参考值 y^* 近似确定后, 以系数 \bar{W} 为变量, 以系数 \bar{W} 变化最小为优化目标, 以

式(8)为约束条件,相应的逆优化模型可表示为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \|\overline{\mathbf{W}}^* - \overline{\mathbf{W}}\| \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) \geq \overline{W}_i, i \in I \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) = \overline{W}_i, i \in \overline{I}, \end{array} \right. \quad (16)$$

其中 $\overline{\mathbf{W}}$ 为原规划中 x 的系数向量, $\overline{\mathbf{W}}^*$ 为 y^* 成为模型(2)的最优解时,系数 $\overline{\mathbf{W}}$ 的相应值.

令 $\overline{W}_i^* = \overline{W}_i + \theta_i - \sigma_i, i = 1, 2, \dots, K$, 这里 $\theta_i \geq 0$ 和 $\sigma_i \geq 0$ 分别表示 \overline{W}_i 的增量和减量, 考虑到 $\|\theta - \sigma\| \leq \|\theta + \sigma\|$, 则式(16)可改写成

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \|\theta + \sigma\| \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) - \theta_i + \sigma_i \geq \overline{W}_i, i \in I \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) - \theta_i + \sigma_i = \overline{W}_i, i \in \overline{I}, \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} + y_{2j}) - \theta_i + \sigma_i = \overline{W}_i, i \in \overline{I}, \end{array} \right. \quad (17)$$

在取模为 l_1 的情况下, 式(17)转变成线性规划(18).

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \left(\sum_{i=1}^K |\theta_i| + \sum_{i \in \overline{I}} |\sigma_i| \right) \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) + \sigma_i \geq \overline{W}_i, i \in I \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) - \theta_i \leq \overline{W}_i, i \in \overline{I} \\ \sum_{j=1}^T M_{ij}y_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij}(y_{1j} - y_{2j}) + \sigma_i \geq \overline{W}_i, i \in \overline{I}, \end{array} \right. \quad (18)$$

令 $y_j = y_{1j} - y_{2j}, j = T + 1, T + 2, \dots, Z, Z + 1, \dots, N$, 则式(18)可改写为

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min } \left(\sum_{i=1}^K |\theta_i| + \sum_{i \in \overline{I}} |\sigma_i| \right) \\ \text{s.t.} \\ \sum_{j=1}^N M_{ij}y_j + \sigma_i \geq \overline{W}_i, i \in I \\ \sum_{j=1}^N M_{ij}y_j - \theta_i \leq \overline{W}_i, i \in \overline{I} \\ \sum_{j=1}^N M_{ij}y_j + \sigma_i \geq \overline{W}_i, i \in \overline{I}. \end{array} \right. \quad (19)$$

若 θ_i^*, σ_i^* 为模型(19)的最优解, 则 x^* 的最优成本系数为

$$\bar{W}_i^* = \bar{W}_i + \theta_i^* - \sigma_i^*, \tag{20}$$

其中 $\bar{W}_i = P_i - C_i - \sum_{j=1}^T (S_j - \bar{C}_j) M_{ij}$, $\bar{W}_i^* = P_i - \sum_{j=1}^T S_j^* M_{ij} - \sum_{j=T+1}^N M_{ij} \frac{\bar{b}_j \bar{c}_j + p_j^* \bar{b}_{j'}}{\bar{b}_j + \bar{b}_{j'}}$, $C_i = \sum_{j=1}^T M_{ij} \bar{c}_j + \sum_{j=T+1}^N M_{ij} \frac{\bar{b}_j \bar{c}_j + p_j \bar{b}_{j'}}{\bar{b}_j + \bar{b}_{j'}}$.

将其代入式 (20), 整理得

$$\sum_{j=1}^T M_{ij} (S_j - S_j^*) + \sum_{j=T+1}^N M_{ij} \frac{P_j - P_j^*}{\bar{b}_j + \bar{b}_{j'}} - \theta_i^* + \sigma_i^* = 0. \tag{21}$$

求解线性方程组(21), 就可以确定企业拟出租的资源参考价格 S_j^* 和从其它企业租赁的资源参考价格 P_j^* .

4 算例分析

假设某企业计划生产 P_1, P_2, P_3 三种产品, 要用到的五种资源 $M_{i1}, M_{i2}, \dots, M_{i5}$, 其中资源 M_{i4}, M_{i5} 需从外部网格中获取. 资源使用情况如表 1 所示.

表 1 资源使用情况
Table 1 Resource usage

	M_{i1} (个)	M_{i2} (个)	M_{i3} (个)	M_{i4} (个)	M_{i5} (个)	产品价格(元)
P_1	2	1	1	1	3	60
P_2	1	1	3	2	0	52
P_3	1	3	1	2	1	60
资源自有量	35×10^3	40×10^3	55×10^3	20×10^3	15×10^3	—
资源需求量	—	—	—	\bar{b}_{w4}	\bar{b}_{w5}	—

假设市场对三种产品的需求量 $\mathbf{X} = (5, 12.5, 7.5)$, 可求得 M_{i2} 正好满足需求, 需要购进资源 M_{i4}, M_{i5} 的量分别是 $\bar{b}_{w4} = 25, \bar{b}_{w5} = 7.5$. 对 \bar{b}_j 进行优化, 可求得 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_5, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_5$ 的取值均为 0. 如果市场订单发生变化, 相应的取值也会发生变化(见表 2 和表 3).

表 2 订单变化对优化结果的影响
Table 2 The orders' change influence the optimization results

(x_1^*, x_2^*, x_3^*)	$(\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5)$	$(\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5)$
(2.5, 12.5, 7.5)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 2.5, 0.0, 2.5, 7.5)
(7.5, 12.5, 7.5)	(0.0, 2.5, 0.0, 2.5, 7.5)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
(5.0, 10.0, 7.5)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 2.5, 0.0, 5.0, 0.0)
(5.0, 15.5, 7.5)	(0.0, 2.5, 2.5, 5.0, 0.0)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)
(5.0, 12.5, 5.0)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)	(0.0, 7.5, 0.0, 5.0, 2.5)
(5.0, 12.5, 10.0)	(0.0, 7.5, 0.0, 5.0, 2.5)	(0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0)

从表 2 和表 3 可以看出, 随着 x^* 的增大, 相应的 \bar{b}^* 也在增大, 企业节点可以调整资源拥有量与租入量来满足生产计划要求, 且随着 x^* 的变化, 富有资源也可能会出现短缺的状况. 在 x_1 发生变化时, 由于产品 P_1 构成中对 M_{i5} 的需求量较大, 所以相应的 M_{i5} 资源变化幅度最大, 在 x_2 增加时, 由于 P_2 产品构成中对 M_{i3} 的需求量较大, 而对 M_{i5} 没有需求, 所以 M_{i5} 没有发生需求变化, 但是 M_{i3} 从富裕资源变成了稀缺资源需要进行外部采购, 在 x_3 增加时, 由于 P_2 产品构成中对 M_{i2} 的需求量最大, 因此 M_{i2} 从可以对外出租获利的原材料变成了稀缺资源需要进行外部采购. 实际上, 由于 M_{i2} 是刚好满足需求的资源, 所以除非总订单数量减

少, 否则 M_{i2} 都会从满足需求的资源变成稀缺资源, 需要从外部采购, 也因此受市场牵制较大. 企业在进行资源配置时, 一定要在市场价格较低的情况下多采购 M_{i2} 资源, 防止订单数量增加给企业成本带来被动的局面. 特别是如果这部分资源是企业核心竞争力, 则在参考价格范围内, 企业更应该积极购入储备, 提高企业持续发展能力.

表3 订单变化对资源数量的影响
Table 3 The orders' change influence the resources' s amount

(x_1^*, x_2^*, x_3^*)	$(\bar{b}_1^*, \bar{b}_2^*, \bar{b}_3^*, \bar{b}_4^*, \bar{b}_5^*)$	$(SR_1, SR_2, SR_3, SR_4, SR_5)$
(2.5, 12.5, 7.5)	(35.0, 37.5, 55.0, 42.5, 15.0)	(10.0, 2.5, 7.5, 22.5, 0.0)
(7.5, 12.5, 7.5)	(35.0, 42.5, 55.0, 47.5, 30.0)	(0.0, -2.5, 2.5, 27.5, 15.0)
(5.0, 10.0, 7.5)	(35.0, 37.5, 55.0, 40.0, 22.5)	(7.5, 2.5, 0.0, 20.0, 7.5)
(5.0, 15.0, 7.5)	(35.0, 42.5, 57.5, 50.0, 22.5)	(2.5, -2.5, -2.5, 30.0, 7.5)
(5.0, 12.5, 5.0)	(35.0, 32.5, 55.0, 40.0, 20.0)	(7.5, 7.5, 7.5, 20.0, 5.0)
(5.0, 12.5, 10.0)	(35.0, 47.5, 55.0, 50.0, 25.0)	(2.5, -7.5, 2.5, 30.0, 10.0)

将由 $X = (5, 12.5, 7.5)$ 的分量代入式(15)求得的 $\bar{b}_{w4} = 25, \bar{b}_{w5} = 7.5$ 代入式(4), 假设各种资源的成本和市场报价如表4所示.

表4 资源成本及市场报价
Table 4 The resources' cost and price

	M_{i1}	M_{i1}	M_{i1}	M_{i1}	M_{i1}
成本(元)	3	4	5	2	3
市场报价(元)	4	5	6	3	4

由于 M_{i1}, M_{i3} 可用于出租, 由式(5)可以求得 $\bar{W}_1, \bar{W}_2, \bar{W}_3$ 分别为(29.44, 20.89, 29.56). 将假设的资源成本代入式(5), 求得 y_1, y_2, \dots, y_5 的取值为(0, 1.27, 0.981, 6.12), 根据影子价格 y^* 可知资源 M_{i1} 和 M_{i3} 是企业节点自有资源且是富余的所以取值为0, 资源 M_{i2} 刚好满足生产需求, 而资源 M_{i4}, M_{i5} 由于自有资源不足, 因此影子价格较大, 增加 M_{i4}, M_{i5} 将给企业带来可观的利润.

假设 y^* 随市场报价将发生变化, 变化值见表5, 代入式(19), 得出 θ_i, σ_i , 并求得 \bar{W}_i^* .

表5 影子价格与收益的变化关系
Table 5 The relationship between shadow price and profit

$(y_1^*, y_2^*, y_3^*, y_4^*, y_5^*)$	$(\theta_1, \theta_2, \theta_3)$	$(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$	$(\bar{W}_1^*, \bar{W}_2^*, \bar{W}_3^*)$
(0.00, 1.40, 0.00, 9.81, 6.12)	(0.13, 0.13, 0.38)	(0.00, 0.00, 0.00)	(29.57, 21.02, 29.94)
(0.00, 1.10, 0.00, 9.81, 6.12)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.17, 0.17, 0.52)	(29.27, 20.72, 29.04)
(0.00, 1.27, 0.00, 11.0, 6.12)	(1.19, 2.38, 2.37)	(0.00, 0.00, 0.00)	(30.63, 23.27, 31.93)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.00, 6.12)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.81, 1.62, 1.63)	(28.63, 19.27, 27.93)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.81, 6.30)	(0.54, 0.00, 0.17)	(0.00, 0.00, 0.00)	(29.98, 20.89, 29.73)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.81, 6.00)	(0.00, 0.00, 0.00)	(0.36, 0.00, 0.13)	(29.08, 20.89, 29.43)

由表5可见, 资源的影子价格越高, 其产生的收益就越高, 当资源的影子价格降低的时候, 其收益同步降低. 同时也注意到, 由于产品 P_2 并不需要资源 M_{i5} , 因此 y_5 的变化并没有对 \bar{W}_2^* 的变化产生任何影响.

由于资源 M_{i1}, M_{i3} 是富余资源, 企业可以直接确定出租价格, 因此本方程组 S_1, S_3 的取值仍然采用算例中的假设值4和6, 则可以求解上述方程组.

从表6可以看出, 当影子价格没有变化时, 对应的资源出租或购买价格基本没有发生变化, 与算例的假设值一致, 比如 y_2^* 发生变化而在 y_4^*, y_5^* 保持不变的情况下, 只有 S_2^* 发生了变化, 当影子价格上升时, 对应的资源出租或购买价格呈反向的下降趋势, 表明当某种资源对产品的利润影响较大时, 企业所期待的市场价格越低越好.

表6 资源影子价格对资源出租与购买价格的影响
Table 6 The shadow price influence the price of resources

$(y_1^*, y_2^*, y_3^*, y_4^*, y_5^*)$	$(\bar{W}_1^*, \bar{W}_2^*, \bar{W}_3^*)$	$(S_1^*, S_2^*, S_3^*, p_4^*, p_5^*)$
(0.00, 1.40, 0.00, 9.81, 6.12)	(29.57, 21.02, 29.94)	(4.00, 3.88, 6.00, 2.99, 3.98)
(0.00, 1.10, 0.00, 9.81, 6.12)	(29.27, 20.72, 29.04)	(4.00, 4.18, 6.00, 2.99, 3.98)
(0.00, 1.27, 0.00, 11.0, 6.12)	(30.63, 23.27, 31.93)	(4.00, 4.01, 6.00, 0.85, 4.00)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.00, 6.12)	(28.63, 19.27, 27.93)	(4.00, 4.01, 6.00, 4.45, 3.98)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.81, 6.30)	(29.98, 20.89, 29.73)	(4.00, 4.01, 6.00, 2.99, 3.44)
(0.00, 1.27, 0.00, 9.81, 6.00)	(29.08, 20.89, 29.43)	(4.00, 4.01, 6.00, 2.99, 4.34)

5 结束语

本文所讨论的网格环境下企业制造资源优化配置问题就是为完成生产任务,保持企业稳定发展的前提下,以资源用量和资源交易参考价格为参变量的线性规划模型. 求解该模型的实质是根据由市场需求确定的产品组合和相应的影子价格,以资源用量和资源交易参考价格为变量,应用线性规划的逆优化方法建立企业制造资源用量和交易参考价格的决策模型. 模型体现了由于网格环境下制造资源流动迅速可满足企业随市场需求变化对制造资源的弹性需求的特点. 因此,应用该模型企业可以根据市场需求的变化,及时确定企业租出资源的数量和参考价格,租进资源的数量和参考价格,实现企业的资源精益化和效益最优化. 算例验证了网格环境下企业资源结构决策模型和资源交易价格决策模型的可行性.

参考文献:

- [1] Buyya R, Abramson D, Giddy J, et al. Economic models for resource management and scheduling in grid computing[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience Journal, 2002, 14 (13/15):1507–1542.
- [2] Buyya R, Murshed Manzur. GridSim: A toolkit for the modeling and simulation of distributed resource management and scheduling for grid computing[J]. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 2002, 14(13/15): 1175–1220.
- [3] Buyya R, Murshed M, Abramson D, et al. Scheduling parameter sweep applications on global grids: A deadline and budget constrained cost - time optimization algorithm[J]. Software: Practice and Experience, 2005, 35(5): 491–512.
- [4] Kwok Y K, Song S S, Hwang K. Selfish grid computing: Game-theoretic modeling and NAS performance results[C] // Proceeding of the IEEE International Symposium on Cluster Computing and the Grid. Washington: IEEE Computer Society, 2005: 349–356.
- [5] Khan S U, Ahmad I. Non-cooperative, semi-cooperative, and cooperative games-based grid resource allocation[C] // Parallel and Distributed Processing Symposium. Rhodes Island, Greece, 2006: 25–29.
- [6] Ferguson D, Yemini Y, Nikolaou C. Microeconomic algorithms for load balancing in distributed computer systems[C] // Proceeding of the IEEE International Conference on Distributed Computer System. San Jose, CA, 1988:491–499.
- [7] 李立, 刘元安, 马晓雷. 基于组合双向拍卖的网格资源分配[J]. 电子学报, 2009, 37(1): 165–169.
Li Li, Liu Yuanan, Ma Xiaolei. Grid resource allocation based on the combinatorial double auction [J]. Chinese Journal of Electronic, 2009, 37(1): 165–169. (in Chinese)
- [8] Chun B, Culler D. Market-based Proportional Resource Sharing for Clusters[R]. Berkeley: University of California, Technical Report CSD-1092, 2000.
- [9] 周长春, 殷国富, 吴迎春, 等. 面向制造网格的制造资源优化配置策略研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版. 2009, 41(2): 237–244.
Zhou Changchun, Yin Guofu, Wu Yingchun, et al, Study on the tactics of manufacturing resource optimal allocation oriented to manufacturing grid[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition. 2009, 41(2): 237–244. (in Chinese)
- [10] 马雪芬, 戴旭东, 孙树栋. 面向网络化制造的制造资源优化配置研究[J]. 计算机集成制造系统, 2004, 10(5): 523–527.
Ma Xuefen, Dai Xudong, Sun Shudong. Optimization deployment of networked manufacturing resources[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2004, 10(5): 523–527. (in Chinese)
- [11] 周永利, 陈英武. 基于效益驱动的制造网格资源管理模型研究[J]. 现代制造工程, 2007(10): 20–23.
Zhou Yongli, Chen Yingwu. Research on MG resource management model based on beneficial drive[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2007(10): 20–23. (in Chinese)

- [12] 王维欢, 林晓娴, 魏物春. 基于竞价机制的网格资源分配方法[J]. 中国科技信息, 2011(4): 150–152.
Wang Weihuan, Lin Xiaoxian, Wei Wuchun. An approach to allocate grid resources based on bidding[J]. China Science and Technology Information, 2011(4): 150–152. (in Chinese)
- [13] 李俊萍, 徐成. 基于供求关系的网格经济模型及策略研究[J]. 武汉理工大学学报, 2009, 31(3): 463–466.
Li Junping, Xu Cheng. On grid computing economic model and the strategies based on supply and demand[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2009, 31(3): 463–466. (in Chinese)
- [14] 宋马林, 吴杰, 杨力, 等. 非期望产出、影子价格与无效决策单元的改进[J]. 管理科学学报, 2012, 15(10): 1–9.
Song Malin, Wu Jie, Yang Li, et al. Undesirable outputs, shadow prices and improvement on inefficient decision making units[J]. Journal of Management Sciences in China, 2012, 15(10): 1–9. (in Chinese)
- [15] 马赞甫, 彭凯. 影子价格的特征及其计算[J]. 管理学报, 2009, 6(7): 984–987.
Ma Zanfu, Peng Kai. The features and computation of shadow prices[J]. Chinese Journal of Management, 2009, 6(7): 984–987. (in Chinese)
- [16] Zhong J, Liu Z H. A further study on inverse linear programming problem[J]. Computational and Applied Mathematics, 1999, 106(2): 345–359.
- [17] Yang C, Zhang J. Two general methods for inverse optimization problems[J]. Applied Mathematics Letters, 1999, 12(1): 69–72.
- [18] 张相斌, 宋晓琳, 梁平. 面向企业最优生产计划的线性规划广义逆优化模型[J]. 系统工程理论与实践, 2007, 27(6): 80–85.
Zhang Xiangbin, Song Xiaolin, Liang Ping. Generalized inverse optimal models of linear programming for enterprise optimal production plan[J]. Systems Engineering: Theory & Practice, 2007, 27(6): 80–85. (in Chinese)
- [19] Zhang Xiangbin, Ni Youyi, Yuan Yamin. Supply chain optimization model based on process and generalized inverse optimization methods[J]. ICIC Express Letters, 2010, 4(5A): 1701–1708.
- [20] 顾孟迪, 黄采金, 李寿德. 排污权价格对绿色证书市场的影响[J]. 系统工程学报, 2007, 16(5): 576–578.
Gu Mengdi, Huang Caijin, Li Shoude. Effects of emission permits price on the tradable green certificates markets[J]. Journal of Systems Engineering, 2007, 16(5): 576–578. (in Chinese)

作者简介:

张相斌(1961—),男,吉林吉林人,博士,教授,研究方向:制造网格资源优化配置和供应链管理,Email: zhangxb@njupt.edu.cn;
林萍(1977—),女,福建惠安人,硕士,讲师,研究方向:物流与供应链管理,Email: lettertolinping@126.com.