

有限产能下基于满意度的平台订单分配研究^{*}

范志强¹, 师冉冉¹, 梁宁宁¹, 李姗姗²

(1. 河南理工大学 工商管理学院 能源经济研究中心; 2. 河南理工大学 财经学院, 河南 焦作 454003)

摘要:针对已有订单分配模型多假定供应商产能必须充分满足需求商订单需求,且忽略需求商满意度的情形,构建了有限产能下基于满意度的多供应商、多需求商、多产品、多周期的混合整数规划模型,通过最小化总分配成本体现了经济性,通过最大化最小交付质量满意度以及最大化最小交付时间满意度体现了均衡性。基于极大极小目标函数处理和多目标处理对模型进行了转换,节约了算法求解时间。证明了订单分配问题的 NP 特性,并设计了求解大规模问题的模拟退火算法。实验结果表明,所提出的模型能够兼顾订单分配的成本、质量和时间目标。与已有模型相比,所提模型可以有效避免因供应商有限产能造成的个别需求商订单严重短缺的情况,能够最大程度地确保多需求商之间的满意度均衡;所设计的模拟退火算法在处理大规模问题时的求解质量优于标准遗传算法,求解效率优于 LINGO 软件。

关键词:有限产能;订单分配;满意度;混合整数规划;模拟退火算法

中图分类号:O224;F252

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2025)01-0014-12

在面向订单生产(make to order, MTO)模式下,各企业最关注的是订单的合理分配,这也是供应链管理研究的热点。近些年来,随着以人工智能、大数据和云计算为代表的数字技术不断发展,各领域的平台企业快速崛起,改变了传统的交易模式^[1-2]。2022 年 7 月,亿邦智库联合中国物流采购与联合会公共采购分会共同发布的《2022 数字化采购发展报告》中指出,通过平台的数字化采购可将运营成本降低 40% 以上,时间效率提高 30% 以上,从而更好地满足供需双方对订单低成本和服务快速化的履行要求。因此,如何基于数字平台,科学地构建兼顾成本、质量和时间的订单分配模型成为数字经济时代亟待解决的现实问题。

目前,订单分配这一问题已在多个领域受到了学者们的关注,如零售业^[3]、物流服务供应链领域^[4-5]、网约车行业^[6]、仓储拣货系统^[7]等。而关于制造业供应链领域订单分配模型的研究各有侧重,差异主要集中于目标函数、产品品种数量(单/多产品)、周期数量(单/多周期)、需求商数量(单/多需求商)这 4 个方面。Ali 等人^[8]研究了纺织业方面的单产品、单周期和单需求商的订单分配问题,构建了含有 5 个目标函数的线性规划模型。Islam 等人^[9]研究了多产品、多周期和单需求商的订单分配问题,提出了三阶段框架解决订单分配问题,建立了多目标优化模型。梁迪等人^[10]以效益最大化和环境污染指数最小化为目标建立了模型,研究了单产品、多周期和单需求商的订单分配。Firouzi 等人^[11]以成本最小和延迟交付数量最少为目标构建了多产品订单分配模型,但仅涉及单周期和单需求商。谢乃明等人^[12]研究了基于云平台的多产品、单周期和单需求商的订单分配问题,目标是成本最小化。董明等人^[13]研究了基于互联网产能共享平台的多产品、单周期和单需求商订单分配,以最小延期时间为目标构建了数学模型。韩知秋等人^[14]研究了多产品、单周期和单需求商订单分配,仅以采购总成本最小作为系统的总优化目标。Mirzaee 等人^[15]在考虑碳排放的基础上建立了包含 3 个目标的多周期订单分配模型,但仅考虑了单个需求商。周豪等人^[16]研究了多项目背景下的订单分配问题,优化目标为总成本最小、不合格品数量最少和延迟交货数量最少,但仅涉及单个周期。王珂等人^[17]研究了多产品、多周期和单需求商的订单分配问题,优化目标为成本最小化。Hosseini 等人^[18]以成本最小化和价值最大化为目标,研究了多产品、多周期和单需求商的订单分配问题。

^{*} 收稿日期:2023-06-27 修回日期:2024-09-27 网络出版时间:2025-03-14T14:19

资助项目:国家社会科学基金项目(No. 23BGL058);河南省高等学校哲学社会科学创新团队支持计划(No. 2024-CXTD-06);河南省研究生教育改革与质量提升工程项目(No. YJS2025SZ11);河南理工大学人文社会科学研究基金项目(No. SKZD2025-07)

第一作者简介:范志强,男,副教授,博士,研究方向为物流系统优化与决策,E-mail:fanzhiqiang@hpu.edu.cn

网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/50.1165.N.20250313.1820.016

综上所述,现有的研究多侧重从经济角度分析订单产品如何在多供应商之间进行合理分配,以达到降低成本、提高价值的目的,而对订单来源的需求商则做简化处理,多数文献仅仅考虑单个需求商(见表 1),未从满意度均衡角度研究订单产品在多需求商之间分配问题。这是由于现有研究均以“供大于求”为背景展开,在此背景下,需求商的订单必然会被 100% 满足,因此也就没有进一步考虑有限供给数量下如何在多个需求商之间根据满意度进行分配的需要。此外,从表 1 可知,文献[16]虽然考虑了多个需求商,但仍以“供大于求”为研究前提,模型目标为总成本最小、不合格品数量最少和延迟交货数量最少,同样未从满意度角度进行研究。

表 1 文献梳理
Tab. 1 Summary of existing literature

文献来源	单产品	多产品	单周期	多周期	单需求商	多需求商	满意度目标	有限产能
文献[8]	✓		✓		✓			
文献[9]		✓		✓	✓			
文献[10]	✓			✓	✓			
文献[11]		✓	✓		✓			
文献[12]		✓	✓		✓			
文献[13]		✓	✓		✓			
文献[14]		✓	✓		✓			
文献[15]		✓		✓	✓			
文献[16]		✓	✓			✓		
文献[17]		✓		✓	✓			
文献[18]		✓		✓	✓			
本文		✓		✓		✓	✓	✓

上述文献[8-18]在模型构建方面奠定了很好的基础,但在以下方面有待进一步研究:1) 现有模型多假定需求必须被满足,即供应商产能必须充分满足需求商订单(供大于求),这与实际情况存在一定差异。近些年来“芯片荒”“电池荒”对电子产品制造业和汽车制造业造成了一定损失,贸易摩擦和突发公共卫生等事件也使供应链经常面临供不应求、产品短缺的困境。显然,考虑供应商有限产能及供不应求下的订单分配模型具有较大的现实应用空间。2) 在有限产能下,如何根据订单特点在多个需求商之间按满意度进行分配,这是一个新的问题。已有相关研究讨论了因假定需求必须被满足及 1 个需求商的情况,但从满意度角度对多个需求商之间订单分配问题还需做进一步探讨。3) 已有模型大多聚焦单产品、单周期或单需求商,因此,还需要同时考虑多产品、多周期、多需求商的订单分配,并设计解决该问题在大规模变化下的优化算法。有鉴于此,本文以有限产能为前提,通过极大极小目标函数评价满意度,构建兼顾成本、质量和时间的多目标订单分配模型,并设计求解大规模问题的模拟退火算法,以期对订单分配提供理论指导与决策建议。

1 问题描述及模型构建

平台内有多个供应商和多个需求商,每个供应商在每个周期可提供多种产品,但有一定的产能限制。平台接收各需求商提交的产品类型、数量、质量等订单需求信息,以及各供应商提交的产品产能、单价等供给信息。平台订单分配旨在根据供需双方信息特点,合理地将“需求商的订单需求”分配给“供应商的订单生产”,以便确定最优的“供应商—需求商”匹配关系及产品供求数量关系,从而达到成本、质量和时间最优的目标。数字平台会根据交易额收取一定的佣金,如图 1 所示。在此过程中,平台需要将有限的产品在多需求商之间依据满意度分配,避免出现严重短缺情况。

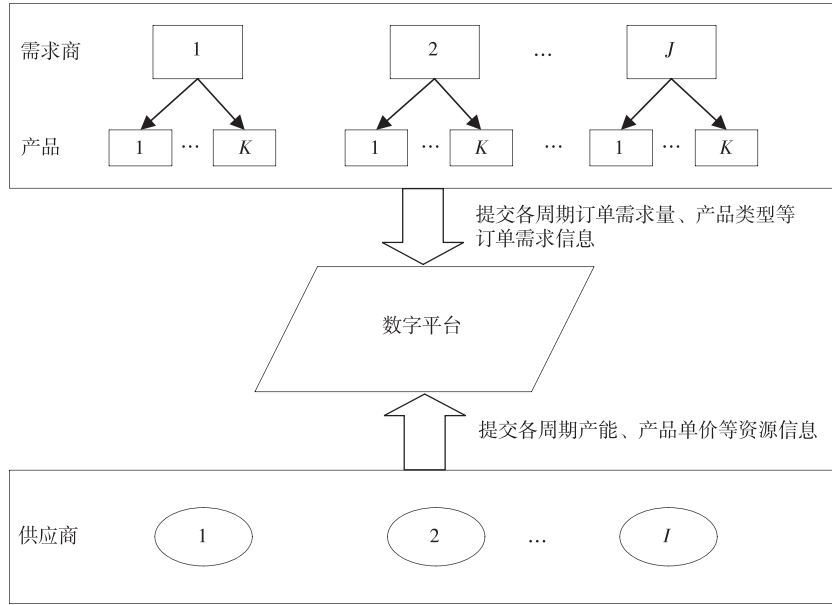


图 1 基于数字平台的订单分配关系

Fig. 1 Order allocation relationship diagram based on digital platform

1.1 模型假设

- 1) 需求商的需求量等信息是已知的;
- 2) 对于同一种产品,同一供应商在同一周期内提供给不同需求商的价格和质量是相同的;
- 3) 在平台分配过程中,每个需求商要求的产品都有特定的交付时间要求和质量要求。

1.2 符号说明

1) 模型参数。 i 为供应商序号, $i=1,2,3,\dots,I$; j 为需求商序号, $j=1,2,3,\dots,J$; k 为产品序号, $k=1,2,3,\dots,K$; t 为周期序号, $t=1,2,3,\dots,T$; α 为平台根据交易额收取佣金的系数; p_{ikt} 为供应商 i 在周期 t 时提供的产品 k 的单位价格; h_{ijk} 为供应商 i 向需求商 j 运输产品 k 的单位运输成本; D_{jkt} 为需求商 j 在周期 t 时对产品 k 的订单需求量; q_{ikt} 为供应商 i 在周期 t 时提供的产品 k 的质量合格率; Q_{jkt} 为需求商 j 在周期 t 时对产品 k 所能接受的最低质量合格率; t_{ikt} 为供应商 i 在周期 t 时提供的产品 k 的准时交货率; T_{jkt} 为需求商 j 在周期 t 时对产品 k 所能接受的最低准时交货率; V_{ikt} 为供应商 i 在周期 t 时能提供产品 k 的最大数量(产能)。

2) 决策变量。 x_{ijkt} 为供应商 i 在周期 t 时分配给需求商 j 产品 k 的数量; y_{ijkt} 为 0-1 变量, 供应商 i 在周期 t 时为需求商 j 分配产品 k 时为 1, 否则为 0; s_{jkt} 为需求商 j 在周期 t 时分配到的产品 k 的数量。

1.3 数学模型

基于上述问题描述和符号说明, 本文建立的数学模型如下:

$$\min Z_1 = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T p_{ikt} x_{ijkt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T h_{ijk} x_{ijkt} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \alpha p_{ikt} x_{ijkt}, \quad (1)$$

$$\max Z_2 = \min_{j,k,t} \frac{\sum_{i=1}^I q_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}}, \quad (2)$$

$$\max Z_3 = \min_{j,k,t} \frac{\sum_{i=1}^I t_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}}, \quad (3)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{i=1}^I V_{ikt} < \sum_{j=1}^J D_{jkt}, \quad \forall k, t, \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkt} y_{ijkt} \leq D_{jkt}, \quad \forall j, k, t, \quad (5)$$

$$V_{ikt} = \sum_{j=1}^J x_{ijkt}, \forall i, k, t, \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkt} \leq s_{jkt}, \forall j, k, t, \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkt} q_{ikt} \geq s_{jkt} Q_{jkt}, \forall j, k, t, \quad (8)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{ijkt} t_{ikt} \geq s_{jkt} T_{jkt}, \forall j, k, t, \quad (9)$$

$$x_{ijkt} \geq 0, y_{ijkt} = 0 \text{ 或 } 1, \forall i, j, k, t. \quad (10)$$

其中:式(1)为成本目标,表示订单分配的总成本最小,包括采购成本、运输成本和平台佣金费用;式(2)为交付质量满意度目标,表示交付质量满意度最大,即最大化需求商 j 周期 t 时分配到的质量合格产品 k 的最小比率,此时会依据质量满意度对各需求商各周期各产品的需求进行较为均衡的分配;式(3)为交付时间满意度目标,表示交付时间满意度最大,即最大化需求商 j 周期 t 时分配到的准时交付产品 k 的最小比率,此时会依据时间满意度对各需求商各周期各产品的需求进行较为均衡的分配;式(4)是有限产能约束,供应商产能无法完全满足需求商订单需求;式(5)表示 t 周期时分配给需求商 j 产品 k 的数量不能超过它的订单需求量;式(6)表示供应商的产能必须全部分配;式(7)为需求商分配到的产品数量;式(8)表示每个需求商对每种零件的质量合格率都有最低要求,所采购产品的质量合格数量要高于所能接受的产品最低质量合格数;式(9)表示每个需求商对每种产品都有最低准时交货率,所采购产品的准时交货率要高于所能接受的最低准时交货数;式(10)为决策变量的 0-1 约束和非负约束。

2 模型转换

2.1 极大极小函数处理

第 2 个目标函数和第 3 个目标函数为极大极小函数,引入辅助变量 W_1 和 W_2 进行转化,令

$$W_1 = \min_{j,k,t} \frac{\sum_{i=1}^I q_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}}, W_2 = \min_{j,k,t} \frac{\sum_{i=1}^I t_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}},$$

此时,式(2)、(3)转化后的表达式如下,在原约束基础上增加 2 个约束条件:

$$\begin{aligned} \max Z_2 &= W_1, \\ \max Z_3 &= W_2, \\ \text{s. t. } W_1 &\leq \frac{\sum_{i=1}^I q_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}}, \forall j, k, t, \\ W_2 &\leq \frac{\sum_{i=1}^I t_{ikt} x_{ijkt}}{D_{jkt}}, \forall j, k, t. \end{aligned}$$

2.2 多目标转化

LP-metric 方法多被应用于解决目标量纲不一致问题,因此对于本文的多目标规划模型采用 LP-metric 方法将多目标转化为单目标进行求解。首先对每个目标函数进行单独求解得到理想值 Z_1^*, Z_2^* 和 Z_3^* ,然后通过专家评价法 Delphi 来确定各目标的权重 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$,最后转化为如下单目标形式:

$$\begin{aligned} \min Z &= \lambda_1 \frac{Z_1 - Z_1^*}{Z_1^*} + \lambda_2 \frac{Z_2^* - Z_2}{Z_2^*} + \lambda_3 \frac{Z_3^* - Z_3}{Z_3^*}, \\ \text{s. t. } \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3 &\in [0, 1], \\ \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 &= 1. \end{aligned}$$

3 模拟退火算法

定理 1 单目标订单分配问题是 NP 完全问题。

证明 从式(1)、(5)和(10)可以看出,所建模型的一部分属于经典的集合覆盖问题(set covering problem, SCP)。由于 SCP 是 NP 完全问题,因此本文所建的单目标订单分配问题(仅考虑目标 1)也属于 NP 完全问题。

证毕

定理 2 多目标订单分配问题是 NP 完全问题。

证明 多目标订单分配问题的求解就是要寻找包含单目标订单分配问题最优解在内的所有局部最优解,如果多目标订单分配问题是多项式时间可解的,则单目标订单分配问题也是多项式时间可解的,这与定理 1 相矛盾。

证毕

鉴于问题的 NP 特性,本文采用模拟退火算法求解。

3.1 解的编码与解码

采用 $[x_{1111} \cdots x_{ijkl}, y_{1111} \cdots y_{ijkl}]$ 对解进行编码,如图 2 所示,给出了供应商、需求商、产品和周期均为 2 个时解的编码,用白色部分和灰色部分分别表示 x_{ijkl} 和 y_{ijkl} 。显然,解码作业非常简便,供应商 1 在周期 1 中分配给需求商 1 的订单为 15 个产品 1 和 22 个产品 2,在周期 2 中分配给需求商 1 的订单为 30 个产品 1 和 0 个产品 2,以此类推。

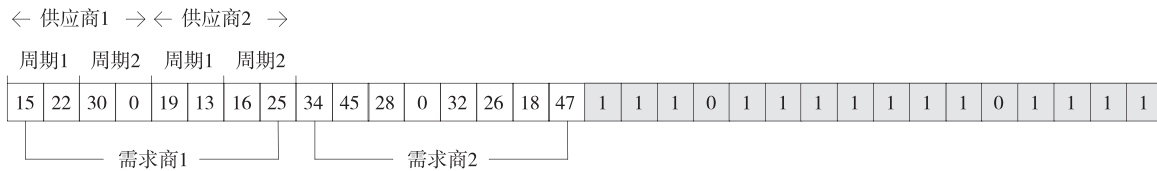


图 2 1 个解的编码示例

Fig. 2 A coding example of a solution

3.2 初始解的生成

初始解的好坏直接影响到模拟退火算法的搜索效率,本文结合模型特点通过启发式算法生成较高质量的初始解。

步骤 1,对供应商与需求商之间的运输成本 h_{ijk} 按照从小到大的顺序进行排列,生成序列 $P(h_{ijk})$;

步骤 2,对于序列 $P(h_{ijk})$ 中的第 1 项成本数据,选择对应的“供应商、需求商和产品”,分配合适的订单量,直至该产品需求量被满足或供应商产能为 0;

步骤 3,根据步骤 2 的订单量,更新供应商产能 V_{ikt} 和需求商订单需求量 D_{jkt} ,同时将步骤 2 中的成本数据删除;

步骤 4,对序列 $P(h_{ijk})$ 中的成本数据,依次重复步骤 2 与步骤 3,直至所有供应商产能被分配完毕,此时即可得到订单分配问题的初始可行解。

3.3 邻域解

邻域解的多样性是模拟退火算法跳出局部空间进行全局广域搜索的关键。本文借鉴遗传算法中变异运算可提高解的多样性特点,在邻域解的生成过程中采用内部换位变异操作,即在同一个供应商提供的产品中,随机选择 2 个需求商订单数量,交换二者位置。若邻域新解比当前解更优,则无条件移动;若邻域新解是劣解,则以一定概率进行有条件移动。

3.4 算法流程

算法 1 模拟退火算法主程序 $SA(S_0, T_0, \beta, M, M_{\maxiter})$ 伪代码。

输入: S_0 (初始解), T_0 (初始温度), β (冷却率), M (内循环最大迭代次数), $M_{\maxiter}$ (外循环最大迭代次数)

输出: S_{best} % 最优解

begin

```

     $T = T_0, C_{\text{curS}} = S_0, S_{\text{best}} = C_{\text{curS}}$            %  $C_{\text{curS}}$  为当前解
     $O_{\text{cur}} = O_{bj}(C_{\text{curS}}), O_{\text{best}} = O_{bj}(S_{\text{best}})$    %  $O_{bj}$  为目标函数值
     $i_{\text{iter}} = 0$                                        %  $i_{\text{iter}}$  为外循环次数
    while  $i_{\text{iter}} < M_{\maxiter}$  do

```

```

    调用子程序 Subpro
     $T = \beta \times T$ 
     $i_{\text{iter}} = i_{\text{iter}} + 1$ 
end while
输出  $S_{\text{best}}$ 

```

end

算法 2 子程序 Subpro($C_{\text{curS}}, O_{\text{cur}}, S_{\text{best}}, O_{\text{best}}, T, M$)伪代码。

begin

```

     $i_l = 0$     %  $i_l$  为内循环次数
    while  $i_l < M$  do
         $N_{\text{news}} = N_{\text{neighbor}}(C_{\text{curS}})$ 
         $O_{\text{new}} = O_{bj}(N_{\text{news}})$ 
         $\Delta O_{bj} = O_{\text{new}} - O_{\text{cur}}$ 
        if  $\Delta O_{bj} < 0$ , then
             $C_{\text{curS}} = N_{\text{news}}$ 
            if  $O_{\text{new}} < O_{\text{best}}$ , then
                 $S_{\text{best}} = N_{\text{news}}$ 
            end if
        else if  $R_{\text{random}} < e^{-\Delta O_{bj}/T}$  then
             $C_{\text{curS}} = N_{\text{news}}$ 
        end if
         $i_l = i_l + 1$ 
    end while
end

```

4 实验分析

4.1 模型对比分析

现有文献中关于订单分配模型的研究较少考虑到多需求商之间依据满意度分配问题,本节将通过与此类研究结果的对比,验证本文所提模型的可行性与有效性。参照已有文献,在未考虑满意度分配模型中,目标 2 与 3 分别设定为“不合格产品数量最少”和“延迟交货产品数量最少”。

以芯片 1 和芯片 2 的订单分配为例,通过比较本文模型与未考虑满意度分配模型的订单分配结果及相应目标值,验证本文模型的有效性。假设有 3 个需求商,1 个供应商。3 个需求商对芯片 1 和芯片 2 的订单量均为 1 000,供应商对 2 种芯片的产能均为 2 400。为简化算例,仅考虑 1 个运营周期,2 种芯片的质量合格率、准时交货率以及 3 个需求商要求的 2 种芯片最低质量合格率和准时交货率均为 0.9,采购单价均为 10 元,平台佣金系数为 0.5%,3 个目标的权重依次为 0.4,0.3 和 0.3。从供应商到需求商的单位运输成本及 2 种分配模型的订单分配结果如表 2 所示,本文模型及对比模型的成本目标值、交付质量满意度和交付时间满意度如表 3 所示。

由表 2 可知,本文模型对 3 个需求商的订单分配是均衡的,分配到的订单数量均为 800 个,其中质量合格品数量和准时交货数量均为 720 个;而对比模型对需求商 1 和需求商 2 给予了完全满足分配,但对需求商 3 仅分配了 400 个,显然对需求商 3 是非常不利的,长此以往存在损失客户的风险。

由表 3 可知,就成本目标而言,本文模型为 67 440 元,对比模型为 66 240 元,后者较本文模型优化了约 1.8%;而在最小质量满意度和最小时间满意度 2 个目标方面,本文模型为 0.72,对比模型为 0.36,本文模型较之提升了 100%。

可见,本文模型相较已有研究模型在订单分配结果的满意度方面更具均衡性,同时也能兼顾到订单分配成本。

表 2 供应商到需求商的单位运输成本及订单分配结果

Tab. 2 The unit transportation cost from supplier to demander and order allocation result

参数	产品	需求商 1	需求商 2	需求商 3
单位运输成本(h_{ijk})/元	芯片 1	2	3	4
	芯片 2	4	5	6
本文模型的订单分配结果	芯片 1	(800,720,720)	(800,720,720)	(800,720,720)
	芯片 2	(800,720,720)	(800,720,720)	(800,720,720)
对比模型的订单分配结果	芯片 1	(1 000,900,900)	(1 000,900,900)	(400,360,360)
	芯片 2	(1 000,900,900)	(1 000,900,900)	(400,360,360)

注:括号中,第 1 个数据为订单分配个数,第 2 个数据为质量合格品个数,第 3 个数据为准时交货个数。下同。

表 3 本文模型及对比模型的成本、交付质量满意度和交付时间满意度

Tab. 3 The cost, delivery quality satisfaction and delivery time satisfaction of the model here and the comparison model

模型	产品	满意度	需求商			目标函数值		
			1	2	3	总成本/元	最小质量满意度	最小时间满意度
本文模型	芯片 1	质量	0.72	0.72	0.72	67 440	0.72	0.72
		时间	0.72	0.72	0.72			
	芯片 2	质量	0.72	0.72	0.72			
		时间	0.72	0.72	0.72			
对比模型	芯片 1	质量	0.9	0.9	0.36	66 240	0.36	0.36
		时间	0.9	0.9	0.36			
	芯片 2	质量	0.9	0.9	0.36			
		时间	0.9	0.9	0.36			

4.2 模型求解分析

1) 研究案例设计。假设平台中有 3 家供应商,可提供 2 种产品,有 5 家需求商,未来 2 个周期中各需求商的订单需求量等参数如表 4 和表 5 所示,平台佣金系数和目标权重同 4.1 节。

2) 结果分析。模拟退火算法在 Matlab 上编程运行,相关参数如下:初始温度 3 000,冷却率 0.95,内循环 1 000 次,外循环 5 000 次。当外循环次数迭代至 1 586 次时,目标函数值变得稳定并趋于收敛,程序运行耗时 122.35 s。此时,各供应商分配给各需求商的订单数量以及需求商分配到的产品数量、质量合格品数量和准时交货数量,如表 6 和表 7 所示。并对比分析了本文模型与对比模型测量满意度情形下,各需求商在各周期对各产品订单的交付质量满意度和交付时间满意度(图 3)。

就总成本而言,本文模型为 1 640 057 元,对比模型为 1 632 200 元,本文模型在分配成本方面上升了约 0.48%。

就交付质量满意度而言,本文模型的各需求商各周期各产品交付质量满意度均保持在 0.77 左右,而对比模型的此项指标波动范围为[0,0.98]。从图 3 可知,需求商 1,2,3 与 5 的交付质量满意度远远高于需求商 4。显然,本文模型更有利于在有限供应商产能情况下均衡各需求商对质量满意度的要求,做到公平分配。

就交付时间满意度而言,本文模型的各需求商各周期各产品交付时间满意度均保持在 0.79 左右,而对比模型的此项指标波动范围为[0,0.98]。从图 3 可知,同样存在需求商 4 的交付时间满意度过低的情形。显然,本文模型更有利于在有限供应商产能情况下均衡各需求商对时间满意度的要求,做到公平分配。

表 4 需求商相关参数取值
Tab. 4 Demander related parameter values

参数	产 品	周期/供应商	需求商				
			1	2	3	4	5
各需求商各周期对 各产品的需求量(D_{jkt})/个	$k = 1$	$t = 1$	500	400	300	600	700
		$t = 2$	300	200	200	400	500
	$k = 2$	$t = 1$	800	1 000	800	800	1 200
		$t = 2$	500	800	500	600	900
各需求商各周期对各产品 所能接受的最低质量合格率(Q_{jkt})	$k = 1$	$t = 1$	0.94	0.88	0.88	0.94	0.88
		$t = 2$	0.90	0.90	0.88	0.92	0.90
	$k = 2$	$t = 1$	0.92	0.93	0.92	0.93	0.92
		$t = 2$	0.88	0.92	0.91	0.92	0.92
各需求商各周期对各产品 所能接受的最低准时交货率(T_{jkt})	$k = 1$	$t = 1$	0.94	0.94	0.94	0.94	0.90
		$t = 2$	0.92	0.92	0.90	0.92	0.90
	$k = 2$	$t = 1$	0.94	0.94	0.94	0.90	0.88
		$t = 2$	0.90	0.94	0.96	0.92	0.94
供应商向需求商运输各产品 的单位运输成本(h_{ijk})/元	$k = 1$	$i = 1$	8	8	6	10	4
		$i = 2$	6	10	5	11	4
		$i = 3$	7	9	5	10	5
	$k = 2$	$i = 1$	6	7	5	9	5
		$i = 2$	6	9	6	10	4
		$i = 3$	5	8	6	10	5

表 5 供应商相关参数取值
Tab. 5 Supplier related parameter values

参数	产 品	周 期	供应 商 1	供应 商 2	供应 商 3
各供应商各周期的 产品价格(p_{ikt})/元	$k = 1$	$t = 1$	150	130	110
		$t = 2$	140	120	100
	$k = 2$	$t = 1$	160	200	180
		$t = 2$	150	190	170
各供应商各周期的 产品质量合格率(q_{ikt})	$k = 1$	$t = 1$	0.96	0.94	0.94
		$t = 2$	0.96	0.92	0.90
	$k = 2$	$t = 1$	0.93	0.98	0.94
		$t = 2$	0.92	0.94	0.96
各供应商各周期的 产品准时交货率(t_{ikt})	$k = 1$	$t = 1$	0.98	0.96	0.96
		$t = 2$	0.94	0.94	0.92
	$k = 2$	$t = 1$	0.96	0.98	0.96
		$t = 2$	0.96	0.96	0.98
各供应商各周期的 产品的产能(V_{ikt})/个	$k = 1$	$t = 1$	840	500	700
		$t = 2$	400	460	500
	$k = 2$	$t = 1$	1 100	1 500	1 140
		$t = 2$	1 000	820	900

表 6 各供应商分配给各需求商的订单数量
Tab. 6 Number of orders allocated by each supplier to each demander 个

供应商	产品	周期	需求商 1	需求商 2	需求商 3	需求商 4	需求商 5
$i = 1$	$k = 1$	$t = 1$		322		40	478
		$t = 2$		168		114	118
	$k = 2$	$t = 1$		456	375	269	
		$t = 2$		609	391		
$i = 2$	$k = 1$	$t = 1$	412				88
		$t = 2$	252				208
	$k = 2$	$t = 1$	122	282	275	379	442
		$t = 2$			29	48	743
$i = 3$	$k = 1$	$t = 1$			247	453	
		$t = 2$			172	226	102
	$k = 2$	$t = 1$	531	77			532
		$t = 2$	403	61		436	

表 7 各需求商分配到的产品数量、质量合格品数量和准时交货数量
Tab. 7 The quantity of products, quality qualified products, and on-time delivery quantity allocated to each demander

产品	周期	需求商 1	需求商 2	需求商 3	需求商 4	需求商 5
$k = 1$	$t = 1$	(412,387,396)	(322,309,316)	(247,232,237)	(493,464,474)	(566,542,553)
	$t = 2$	(252,232,237)	(168,161,158)	(172,155,158)	(340,313,315)	(428,396,400)
$k = 2$	$t = 1$	(653,619,629)	(815,773,788)	(650,618,630)	(648,622,630)	(974,933,944)
	$t = 2$	(403,387,395)	(670,619,644)	(420,387,403)	(484,464,473)	(743,698,713)

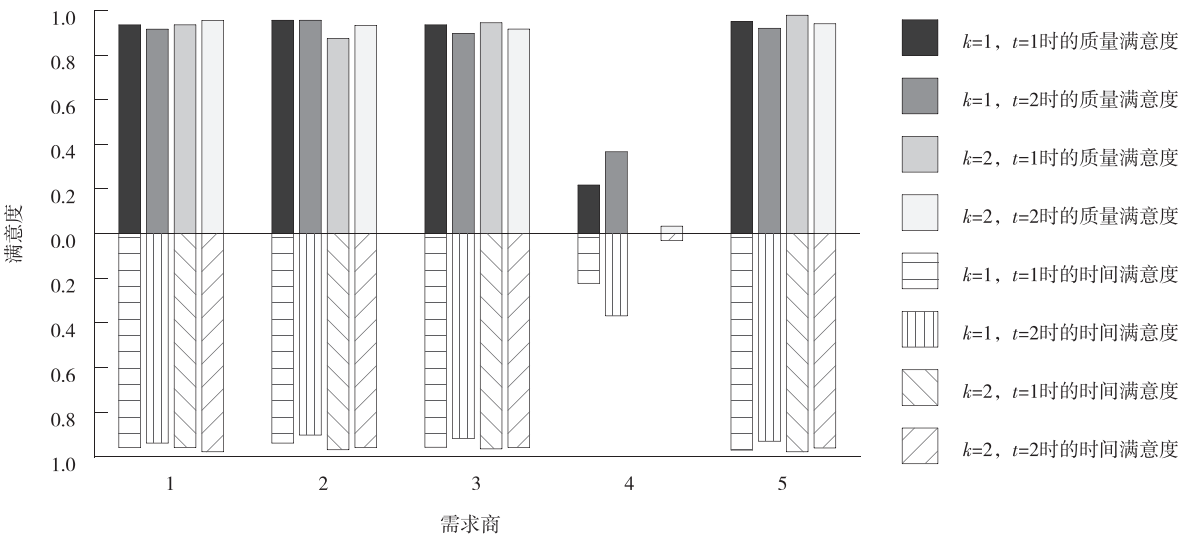


图 3 对比模型的各需求商各周期各产品交付质量和交付时间满意度

Fig. 3 Compare the delivery quality and delivery time satisfaction of each demander, each cycle, and each product in the model

综上所述,本文提出的模型可以有效地进行订单分配,能够避免在有限供应商产能情形下某个需求商出现严重的产品短缺情况,尽可能地确保各需求商之间多产品多周期订单分配的公平性,更符合企业与行业的长期发展战略。

4.3 测试模拟退火算法性能

为进一步测试模拟退火算法性能,将模拟退火算法、标准遗传算法和 LINGO 软件进行对比分析。设置 8 组算例,算例规模依次增大,每组算例均可通过 LINGO 软件求得最优解,并通过式(11)来进一步评价算法有效性。

$$C_R = \left(1 - \frac{Z_{HA} - Z_{LINGO}}{Z_{LINGO}}\right) \times 100\%$$

(11)

其中: Z_{HA} 为优化算法(模拟退火算法或标准遗传算法)求解结果, Z_{LINGO} 为 LINGO 软件求解结果。为公平对比模拟退火算法与标准遗传算法求解质量,为二者设置非常大的迭代次数(确保算法至少运行 10 min),并将求解时间定为 10 min,时间到后算法停止运行并输出当前最优结果。

由表 8 可知,对于这 8 组算例,模拟退火算法与标准遗传算法均取得了稳定的满意解。由 C_R 指标可知,模拟退火算法的有效性在 98.29%~99.81%,求解质量均优于标准遗传算法的 97.30%~99.56%,显然模拟退火算法的求解质量较高。同时,从求解效率来看,LINGO 软件的求解时间随着算例规模的增加而逐渐增大,在 5~8 组算例中已经超过了模拟退火算法设定的 10 min 求解时间,因此模拟退火算法在处理大规模问题时的求解效率要优于 LINGO 软件。

表 8 算例测试结果
Tab.8 Numerical example test results

实验序号	算例规模				对比结果 C_R		LINGO 求解时间/min
	I	J	K	T	标准遗传算法	模拟退火算法	
1	5	10	3	2	99.56%	99.81%	2.86
2	7	15	4	2	99.23%	99.62%	4.72
3	10	20	4	3	99.34%	99.65%	6.29
4	12	25	5	3	99.08%	99.37%	9.35
5	15	30	5	3	98.82%	99.14%	14.91
6	18	35	6	4	98.55%	99.06%	21.56
7	20	40	6	4	98.17%	98.67%	38.62
8	25	60	6	4	97.30%	98.29%	73.38

5 结束语

本文从有限供应商产能情形下需考虑多需求商之间依据满意度分配的特点出发,提出了面向多供应商、多需求商、多产品、多周期的订单分配优化模型,通过成本最小化体现了经济性,通过最小交付质量满意度最大化和最小交付时间满意度最大化体现均衡性。运用极大极小目标函数处理和 LP-metric 方法对模型进行了转换,对问题的 NP 特性进行了证明,并设计了求解大规模问题的模拟退火算法。实验算例验证了模型的有效性和实用性,与已有模型多侧重经济目标相比,本文模型能够有效兼顾经济目标与满意度目标,从而获得合理的订单分配方案。

订单分配过程涉及多方面因素,如订单紧急程度、订单履行时间限制等,考虑这些条件下的订单分配问题有待深入研究。

参考文献:

[1] 邢小强,汤新慧,王钰,等. 数字平台履责与共享价值创造:基于字节跳动扶贫的案例研究[J]. 管理世界,2021(12):152-176.
XING X Q,TANG X H,WANG J,et al. The responsibility taking and shared value creation of digital platform enterprises:a

- case study on the poverty alleviation of bytedance[J]. *Journal of Management World*, 2021(12):152-176.
- [2] 纪园园, 张美星, 冯树辉. 平台经济对产业结构升级的影响研究: 基于消费者平台的视角[J]. *系统工程理论与实践*, 2022, 42(6): 1579-1590.
- JI Y Y, ZHANG M X, FENG S H. Research on the impact of platform economy on the upgrading of industrial structure: based on the perspective of consumption platform[J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 2022, 42(6): 1579-1590.
- [3] CAI X Y, LI J B, SONG X R, et al. Capacity allocation with minimum order quantity: Fixed allocation and turn-and-earn allocation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 172: 108507.
- [4] 高志军, 刘伟, 范志强, 等. 考虑交易费用的 LSSC 订单分配多目标优化模型[J]. *系统工程*, 2012, 30(7): 35-39.
- GAO Z J, LIU W, FAN Z Q, et al. Multi-objective optimization model of order allocation of LSSC considering transaction costs [J]. *Systems Engineering*, 2012, 30(7): 35-39.
- [5] 李姗姗. 物流服务供应链订单分配优化及其遗传算法[J]. *运筹与管理*, 2014, 23(5): 35-41.
- LI S S. Genetic algorithm to logistics service supply chain order allocation problem[J]. *Operations Research and Management Science*, 2014, 23(5): 35-41.
- [6] 夏宇, 朱俊武, 姜艺, 等. 运力紧张情形下的网约车跨区域订单分配机制[J]. *计算机应用*, 2022, 42(6): 1776-1781.
- XIA Y, ZHU J W, JIANG Y, et al. Cross-regional order allocation strategy for ride-hailing under tight transport capacity[J]. *Journal of Computer Applications*, 2022, 42(6): 1776-1781.
- [7] 秦进, 杨淑韵, 戴博. 电商 RMFS 系统订单分配与路径规划联合优化方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(1): 116-126.
- QIN J, YANG S J, DAI B. Joint optimization of order allocation and path planning in e-commerce robotic mobile fulfillment system[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(1): 116-126.
- [8] ALI H, ZHANG J W. A fuzzy multi-objective decision-making model for global green supplier selection and order allocation under quantity discounts[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 225: 120119.
- [9] ISLAM S, AMIN S H, WARDLEY L J. Supplier selection and order allocation planning using predictive analytics and multi-objective programming[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2022, 174: 108825.
- [10] 梁迪, 李依明, 刘璇, 等. 基于改进模糊多准则决策法的弹性供应商选择及动态订单分配[J]. *模糊系统与数学*, 2023, 37(4): 112-125.
- LIANG D, LI Y M, LIU X, et al. Dynamic selection and order allocation of resilient suppliers based on improved fuzzy multi-criteria decision method[J]. *Fuzzy Systems and Mathematics*, 2023, 37(4): 112-125.
- [11] FIROUZI F, JADIDI O. Multi-objective model for supplier selection and order allocation problem with fuzzy parameters[J]. *Expert Systems with Applications*, 2021, 180: 115129.
- [12] 谢乃明, 吴乔, 郑绍祥. 面向云平台中心化集成调度的跨供应商订单分配模型[J]. *控制与决策*, 2020, 35(3): 667-676.
- XIE N M, WU Q, ZHENG S X. Cross-vendor order allocation model for centralized integrated scheduling of cloud platforms [J]. *Control and Decision*, 2020, 35(3): 667-676.
- [13] 董明, 郭书泮. 基于互联网产能共享平台的动态订单分配问题研究[J]. *工业工程与管理*, 2023, 28(1): 199-206.
- DONG M, GUO S P. Research on dynamic order allocation of internet-based capacity sharing platform[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2023, 28(1): 199-206.
- [14] 韩知秋, 杨恶恶. 基于系统管理视角的柔性订单分配模型[J]. *管理评论*, 2022, 34(7): 302-309.
- HAN Z Q, YANG W E. Flexible order allocation model based on the system management perspective[J]. *Management Review*, 2022, 34(7): 302-309.
- [15] MIRZAEI H, SAMARGHANDI H, WILLOUGHBY K. A robust optimization model for green supplier selection and order allocation in a closed-loop supply chain considering cap-and-trade mechanism[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 228: 120423.
- [16] 周豪, 郑美妹, 夏唐斌, 等. 多项目背景下的平台零件采购供应商选择与订单分配模型[J]. *工业工程与管理*, 2020, 25(5): 33-41.
- ZHOU H, ZHENG M M, XIA T B, et al. Supplier selection and order allocation model in multi-project background[J]. *Industrial Engineering and Management*, 2020, 25(5): 33-41.
- [17] 王珂, 张玲珍, 周建. 基于风险-均值分析的供应商选择与订单分配集成优化模型与求解[J]. *运筹与管理*, 2022, 31(10): 33-39.
- WANG K, ZHANG L Z, ZHOU J. Integrated optimization model and solution for supplier selection and order allocation based on risk-mean analysis[J]. *Operations Research and Management Science*, 2022, 31(10): 33-39.
- [18] HOSSEINI Z S, FLAPPER S D, PIRAYESH M. Sustainable supplier selection and order allocation under demand, supplier availability and supplier grading uncertainties[J]. *Computer & Industrial Engineering*, 2022, 165: 107811.

Operations Research and Cybernetics

Research on Platform Order Allocation Model Based on Satisfaction Degree and Limited Capacity

FAN Zhiqiang¹, SHI Ranran¹, LIANG Ningning¹, LI Shanshan²

(1. Research Center of Energy Economy, School of Business Administration, Henan Polytechnic University;

2. School of Finance and Economics Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo Henan 454003, China)

Abstract: In view of the situation that the existing order allocation models mostly assume that the supplier's capacity can fully meet the demand of the demander, and ignore the fair allocation between multiple demanders, a mixed integer programming model considering satisfaction degree of multiple suppliers, multiple demanders, multiple products and multiple cycles under limited capacity is constructed. The economy is reflected by minimizing the total allocation cost, and the equilibrium is reflected by maximizing the minimum delivery quality satisfaction and the minimum delivery time satisfaction. Based on the maximum and minimum objective function processing and multi-objective transformation, the model is transformed to save the algorithm solving time. The NP property of the order allocation problem is proved, and the simulated annealing algorithm for solving large-scale problems is designed. The experimental results show that the proposed model can take into account the cost, quality and time objectives of order allocation. The established model is compared with the existing model, it can effectively avoid the serious shortage of orders of individual demanders caused by the limited capacity of suppliers, and ensure the equilibrium of satisfaction degree among multiple demanders to the greatest extent. The designed simulated annealing algorithm is superior to the standard genetic algorithm in solving large-scale problems, and its solving efficiency is better than LINGO software.

Keywords: limited capacity; order allocation; satisfaction degree; mixed integer programming; simulated annealing algorithm

(责任编辑 黄 颖)