

• “理论研究”专栏 •

考虑供应链韧性的产品规划模型及求解算法

曾 鸣, 叶洋洋, 雒兴刚

(杭州电子科技大学管理学院, 浙江 杭州 310018)

摘要: 为了提高公司面对供应商供货风险时的应对能力, 需要在产品规划过程中考虑产品供应链的韧性。该韧性供应链策略包括将所需的产品模块实例外包给多个供应商, 以应对供应链中可能发生的中断。为了适应不同规模的场景, 建立考虑供应链韧性的产品规划模型。对于较小规模的案例, 采用线性化的方法将模型转化为线性模型, 并采用求解器求解; 对于较大规模的案例, 采用嵌套遗传算法得到满意解。通过对一家智能手表制造公司的案例进行详细分析, 验证所提出方法的有效性。案例分析结果发现: 通过实施韧性供应链策略, 公司能够更好地应对供应链中的不确定性和中断, 从而提高产品的供应链韧性。

关键词: 产品规划; 供应链韧性; 优化模型

中图分类号: F273.2

文献标志码: A

文章编号: 2096-2827(2024)01-0054-12

0 引 言

随着市场竞争的激烈和供应链的不稳定性逐渐加剧, 众多公司开始在产品规划中考虑供应链韧性, 以提升客户满意度。产品规划过程涉及选择具有不同功能的组件, 以构建更符合消费者偏好的产品, 从而争夺更大的市场份额, 提升公司的竞争力。其优化目标通常为最大化利润或最小化成本^[1]。

为了优化企业规模和降低成本, 许多制造企业选择将产品的零件外包给其他供应商进行生产^[2]。然而, 维护供应链的稳定性在当前的动态市场环境下变得异常困难。供应链中断的主要原因包括自然灾害(如海啸和地震)和地缘政治因素以及供应商公司管理或运营层面的问题, 如资金流中断和机器故障^[3]。因此, 越来越多的公司开始重视供应链的韧性设计, 以提高企业对风险的应对能力和恢复能力, 从而降低风险事件发生后的损失。

供应链韧性这一概念最早在 2003 年被提出, 其定义是: 供应链受到干扰后能够恢复到其原始状态或更加理想状态的能力^[4]。设计韧性供应链有利于应对不断变化的市场条件和风险, 使企业能够迅速适应外部环境的变化, 能够有效处理突发事件、市场波动, 通过合理的库存管理、供应商多样性、技术创新等手段, 确保生产和供应的灵活性, 从而提高企业的抗风险能力, 降低运营成本, 并提供更高水平的客户服务。因此, 越来越多的公司认识到供应链韧性的重要性和必要性, 并将供应链韧性纳入产品零部件供应中。

作者简介: 曾鸣(1974—), 女, 浙江龙泉人, 博士, 副教授, 主要从事企业信息化研究。

在许多制造公司中,产品规划和供应链的设计分为两个阶段完成,第一个阶段由设计部门完成产品规划,第二阶段由产品制造部门考虑各个零件的供应链。然而,这种方法缺乏从整体角度考虑,因为替换某些零件可能会显著降低供应链中断风险和损失^[5]。目前,已有许多研究将这两个阶段整合决策,如将产品规划与供应商选择整合考虑^[5-7]。

提升供应链韧性的方法主要包括:1)多源采购方法,即通过从多个供应源采购零件,提高供应链的稳定性和降低风险^[8]。2)选取备用供应商作为替代性选择,可以在原始供应链出现问题时迅速补位,从而提高供应链的韧性和抗风险能力^[9]。3)强化供应商方法,即韧性供应商在中断风险事件发生时也具备一定的冗余生产能力,因此能降低风险和损失^[10]。

本文采取多源采购的方法设计产品规划优化模型,将各个产品零件的订单分配给多个供应商,当某个供应商发生中断时,制造公司可以紧急联系其他未中断的供应商补货,弥补缺货订单。提出线性化模型的方法使非线性的模型能被 CPLEX 等求解器求解,为了应对大规模的案例,还设计了嵌套遗传算法求解该模型。

1 文献综述

1.1 产品规划

产品规划是根据用户需求,以灵活的方式调整和定制产品的特性和功能的过程^[11]。在产品规划中,设计是为了满足市场需求而共享功能、接口、参数、组件、模块和子系统^[12]。这意味着产品的设计能够在满足用户个性化需求的同时,通过共享特定的设计元素,实现更高效的产品开发和生产流程。产品规划的灵活性和共享设计理念有助于制造公司更快速地响应市场变化,提供更具竞争力的产品。这一方法也为满足不同客户需求提供更广泛的选择,从而增强产品在市场上的适应性和吸引力。

在目前的研究中,有两种建立产品规划的建模方式:第一种方法分为两步,首先由决策者为参考集选择一组候选产品,再通过求解所建立的优化模型确定最优产品配置^[13],然而考虑到最优解集可能不包括在参考集中,从而导出的最优解可能不是真正的最优解;第二种方法为一步法,通常考虑到市场细分,采用联合分析方法度量产品模块实例的零件成分效用,用于建立优化模型^[14]。

1.2 供应链韧性

Rice 等^[4]首先将供应链韧性定义为及时应对意外中断并使供应链网络恢复正常运行的能力。随后,人们提出了供应链韧性的各种定义。

一些研究主要设计供应链韧性结构框架的构建以及多层次指标之间的关系。例如:Kochan 等^[15]研究了供应链能力及其与供应链韧性的关系,开发了一个新框架;Shishodia 等^[16]描述了供应链韧性的脆弱性、能力、战略和绩效指标维度之间的结构性关系;Agrawal 等^[17]利用系统的文献综述和数据可视化,提出了供应链韧性和供应链中断的有害影响的框架。

一些研究旨在构建优化模型,与供应链韧性相关的优化模型的目标函数包括利润最大化和成本最小化^[18]。例如:Pires 等^[19]的供应链韧性的优化包括建立数学优化模型,旨在在破坏性事件发生之前创建韧性供应链;Luo 等^[20]提出了一个考虑大型客机公司库存和供应商管理的优化模型;Ni 等^[21]提出了一个最小化成本的模型,研究供应链韧性规划过程中未满足需求的影响;Zavala 等^[22]提出了一个基于库存成本的供应链韧性的数学模型;Behzadi 等^[23]建立了利润最大化的数学模型,用多种指标考察供应链的投资决策。

一些研究采用仿真方法对供应链进行模拟。Sabouhi 等^[24]通过仿真方法提出了一种多周期、多目标的优化方法,考虑了地区因素的韧性供应链。供应链韧性的仿真模型结合了网络结构的特征^[25],它可以扩展为图形模型,以模拟各种场景的破坏^[26],并减轻中断引起的连锁反应^[27]。

1.3 产品与供应链的协同优化

产品规划的优化过程需要产品规划和供应链设计之间的协同优化^[28]。将供应链设计纳入产品规划提高了整个过程的灵活性,生产出更高效的产品。不仅如此,将环境影响考虑在内,也表明了企业的社会责任感。通过降低对环境的不良影响,制造公司可以更好地履行可持续发展的理念,为社会和环境作出积极的贡献^[29]。

一些研究在产品规划中考虑了生产、分销或配送的选址问题。Khalaf 等^[30]对每个模块的生产地点选择进行了研究,旨在满足不同的客户需求。Baud-Lavigne 等^[31]在产品设计中考虑了设施和配送中心的位置以及供应商的选择。Pakseresht 等^[32]旨在通过选择最佳供应商、制造商、装配厂、配送中心和零售商,最大限度地提高总利润和客户效用,并最大限度地降低供应链成本。Fujita 等^[33]探讨了在全球产品的背景下,模块生产、组装和最终分销的制造地点选择。Hossain 等^[34]将供应链模块化的普遍性和成本与产品架构和接口模块化相结合。Khalaf 等^[35]研究了将产品模块分配到较远的工厂进行制造,然后在特定的时间内将其运输到附近的工厂进行组装。

随着人们对环境问题的日益关注,有一些研究考虑了绿色环保因素。Wang 等^[36]提出了一个以协调碳排放设计与产品的供应商选择的优化模型。Wu 等^[37]在产品规划和供应链设计的建模与案例研究中考虑了环境惩罚。Pakseresht 等^[32]通过选择绿色组件和模块进行产品规划以控制下游供应链中产生的污染。

一些研究在产品规划中还考虑了供应商选择。Cao 等^[6]提出了一种基于多项 logit 消费者选择规则的供应商选择模型。Luo 等^[5]考虑消费者偏好和外包成本引入了一个利润最大化的优化模型。Liu 等^[38]将模块订单分配给不同的供应商,利用协调和保护策略降低供应链风险。

除此之外,供应链还存在一些不可忽视的其他潜在风险和不确定性。Luo 等^[39]将产品的供应风险形式化为一个目标函数。Rezapour 等^[40]在产品规划和供应链网络的并行设计优化模型中考虑了质量风险。Hejazi 等^[41]引入了一种稳健的优化方法解决闭环供应链中固有的不确定性。

2 优化模型

2.1 模型变量与参数

(1)主要的决策变量:

p :产品的价格。

x_i :当 $x_i=1$ 时,细分市场 i 的消费者选择购买公司产品;当 $x_i=0$,细分市场 i 的消费者不会购买该产品而是选择购买竞争产品。

y_{kl} :当 $y_{kl}=1$ 时,选择模块 k 实例 l ;当 $y_{kl}=0$ 时,没有选择模块 k 实例 l 。

z_{hkl} :当 $z_{hkl}=1$ 时,选择供应商 h 供应模块 k 实例 l ;当 $z_{hkl}=0$ 时,未选择供应商 h 供应模块 k 实例 l 。

$Q_{a,hkl}$:在供应模块 k 实例 l 未发生中断时供应商 h 分配到的订单数量,即原始订单分配数量。

$Q_{q,shkl}$:在供应模块 k 实例 l 的场景 s 下,供应商 h 实际供应该零件的数量。

(2)与市场和产品规划有关的参数:

I :细分市场。

K :产品模块。

L_k :模块 k 的全部实例。

S_{kl} :供应模块 k 的实例 l 可能出现的潜在场景。

$r_{\max,i}$:细分市场 i 的竞争产品中最大的剩余部分价值效用。

u_{ikl} :模块 k 的实例 l 在细分市场 i 下的部分价值效用。

Q_i :细分市场 i 的规模。

(3)与供应链及中断场景有关的参数:

R :供应商来自的地区。

H_{kl} :模块 k 实例 l 的供应商。

$H_{r,kl}$:模块 k 实例 l 位于地区 r 的供应商。

D_{hkl} :当发生中断时,供应商 h 使用紧急运输通道对模块 k 实例 l 补货所需的天数。

θ_{skl} :供应模块 k 实例 l 时场景 s 发生的概率。

φ_{shkl} :在 s 场景中,供应商 h 供应模块 k 实例 l 的状态。当 $\varphi_{shkl}=1$ 时,表示供应商 h 能正常供应模块 k 的实例 l 。当 $\varphi_{shkl}=0$ 时,表示供应商 h 中断供应模块 k 实例 l 。

δ_{hkl} :供应商 h 对模块 k 实例 l 的总生产能力。

α_{hkl} :供应商 h 在发生中断情况下对模块 k 实例 l 补货的灵活性,用百分比表示。

$C_{D,kl}$:模块 k 实例 l 的单位延迟成本。

$C_{M,kl}$:模块 k 实例 l 的单位损失成本。

$C_{f,hkl}$:与供应商 h 签订关于供应模块 k 实例 l 的固定管理费用。

$C_{n,hkl}$:在未发生中断时,供应商 h 对模块 k 实例 l 的单价。

$C_{a,hkl}$:当发生中断,供应商 h 对模块 k 实例 l 额外补货单价。

$C_{tn,hkl}$:当未发生中断时,供应商 h 对模块 k 实例 l 的运输单价。

$C_{td,hkl}$:当发生中断时,供应商 h 使用紧急运输通道运输模块 k 实例 l 的运输单价。

2.2 建模

2.2.1 消费者购买规则

式(1)表示若细分市场选择公司产品,那么该产品的剩余效用一定大于该市场中任意竞争产品的剩余价值效用。然而,如果细分市场的消费者没有选择公司产品而是选择竞争产品,还需要确保竞争产品的剩余价值效用大于公司产品的剩余价值效用,用式(2)表示。

$$x_i \left(\sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} u_{ikl} y_{kl} - p - r_{\max,i} \right) \geq 0, i \in I \quad (1)$$

$$x_i \left(\sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} u_{ikl} y_{kl} - p - r_{\max,i} \right) \geq \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} (u_{ikl} y_{kl} - p - r_{\max,i}), i \in I \quad (2)$$

2.2.2 供应链中断场景

在计算订单分配和相关成本之前要先考虑供应各个零件可能发生的场景及其发生的概率。因为每个供应商都有两种可能的状态(正常和中断),因此供应模块 k 实例 l 的场景数量为 $S_{kl}=2^{H_u}$ 。计算各个场景的概率用如下的三步法,如式(3)、式(4)、式(5)。

第一步:首先考虑一个供应商中断发生的事件,计算 $P_{r,skl}$,其中 P_{hkl} 表示供应商 h 供应模块 k 实例 l 的中断事件发生的概率。

$$P_{r,skl} = \prod_{h \in H_{kl}} [(1 - \varphi_{shkl})P_{hkl} + \varphi_{shkl}(1 - P_{hkl})], l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl}, r \in R \quad (3)$$

第二步:再考虑地区中断事件,计算 $\pi_{r,skl}$, P_{rkl}^* 表示地区 r 对供应模块 k 实例 l 的地区事件发生的概率。

$$\pi_{r,skl} = \begin{cases} P_{rkl}^* + (1 - P_{rkl}^*)P_{r,skl}, & \text{模块 } k \text{ 实例 } l \text{ 的供应商全部中断} \\ (1 - P_{rkl}^*)P_{r,skl}, & \text{其他} \end{cases} \quad l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl}, r \in R \quad (4)$$

第三步:计算各个场景发生的概率

$$\theta_{skl} = \prod_{r \in R} \pi_{r,skl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (5)$$

5) 损失成本 $LC_{x,t}$: 供应链韧性并不能保证在中断期间恢复到原始或最佳状态, 供应链中断后未满足

足需求所产生的费用,如式(16);

6)管理成本 SC_{kl} :与供应商参与相关的成本与场景概率无关,如谈判和培训费用,如式(17)。

$$OC_{skl} = \sum_{h \in H_u} C_{n,hkl} Q_{q,shkl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (12)$$

$$PC_{skl} = \sum_{h \in H_u} C_{a,hkl} Q_{eq,shkl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (13)$$

$$TC_{skl} = \sum_{h \in H_u} C_{tn,hkl} \varphi_{shkl} Q_{a,hkl} + C_{td,hkl} Q_{eq,shkl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (14)$$

$$DC_{skl} = \sum_{h \in H_u} Day_{hkl} Q_{eq,shkl} C_{D,kl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (15)$$

$$LC_{skl} = C_{M,kl} Q_{v,skl}, l \in L_k, k \in K, s \in S_{kl} \quad (16)$$

$$SC_{kl} = \sum_{h \in H_u} C_{f,hkl} z_{hkl}, l \in L_k, k \in K \quad (17)$$

为了说明中断场景中的订单分配和重新分配,给出模块 k 实例 l 的例子,供应商信息如表 1 所示,其需求量设为 2 000,单位损失成本设为 450 元,单位延迟成本设为 15 元,1 个供应商的固定成本设为 300 元。表 1 列出了 3 个供应商的详细情况。

表 1 供应商 S_1 与 S_2 的信息

供应商 H_{kl}	S_1	S_2
地区 R	R_1	R_2
地区中断事件概率 $P_{rkl}^* / \%$	1.5	2
供应商生产能力 α_{hkl}	1 400	1 500
正常购买单价 $C_{n,hkl}$	83	85
中断后购买单价 $C_{n,hkl} + C_{a,hkl}$	93	95
正常运输单价 $C_{tn,hkl}$	8	9
紧急运输单价 $C_{td,hkl}$	13	14
延迟天数 D_{hkl}	2	3
灵活性比率 $b_{hkl} / \%$	25	35
供应商中断发生概率 $P_{hkl} / \%$	6	8

在这种情况下,可能会出现 4 种可能的中断情况。韧性的供应链设计使中断后供应链能尽快恢复。然而,由于供应商的生产能力和灵活性等限制,供应链可能并不总是恢复到原来最佳的状态。如表 2 所示,第一行表示在没有任何供应商中断的情况下两个供应商的原始分配,其余部分显示每个潜在中断场景的发生概率和订单重新分配,因此该零件总成本为 208 243 元。

表 2 订单分配

场景	供应状态	场景概率	$Q_{q,s1kl}$	$Q_{q,s2kl}$	$Q_{v,skl}$	成本/元
场景 1	S_1, S_2	0.834 79	1 050	950	0	184 850
场景 2	\bar{S}_1, S_2	0.010 00	0	1 282	718	463 528
场景 3	S_1, \bar{S}_2	0.091 10	1 312	0	688	462 528
场景 4	\bar{S}_1, \bar{S}_2	0.007 29	0	0	2 000	900 000

2.3 优化模型

考虑供应链韧性的产品规划优化模型如下(模型 A):

$$\text{Max} \sum_{i \in I} Q_i p x_i - \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} SC_{kl} - \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} \sum_{s \in S_u} \theta_{skl} (OC_{skl} + PC_{skl} + TC_{skl} + DC_{skl} + LC_{skl}) \quad (18)$$

约束式(1)、式(2),式(6)~式(11)

$$\sum_{l \in L_k} y_{kl} = 1, k \in K \quad (19)$$

$$x_i, y_{kl}, z_{hkl} \in \{0, 1\}, p \geq 0, Q_{a, shkl} \geq 0, Q_{q, shkl} \geq 0, Q_{eq, shkl} \geq 0, Q_{v, shkl} \geq 0$$

$$i \in I, l \in L_k, k \in K, h \in H_{kl}, s \in S_{kl} \quad (20)$$

其中,约束(19)是确保每个模块只选择一个模块实例,约束(20)是约束变量的取值范围。

3 求解算法

3.1 精确算法

用大 M 法将非线性的模型 A 转化为以下线性化模型(模型 B):

$$\text{Max} \sum_{i \in I} Q_i t_i - \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} SC_{kl} - \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} \sum_{s \in S_{kl}} \theta_{skl} (OC_{skl} + PC_{skl} + TC_{skl} + DC_{skl} + LC_{skl}) \quad (21)$$

约束式(7)~式(11)、式(19)

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} u_{ikl} \omega_{ikl} - t_i - x_i r_{\max, i} \geq 0, i \in I \quad (22)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} u_{ikl} \omega_{ikl} - t_i - x_i r_i^{\max} \geq \sum_{k \in K} \sum_{l \in L_k} u_{ikl} y_{kl} - p - r_{\max, i}, i \in I \quad (23)$$

$$\sum_{h \in H_{kl}} Q_{a, hkl} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} Q_i \omega_{ikl}, l \in L_k, k \in K \quad (24)$$

$$\omega_{ikl} \leq x_i, i \in I, l \in L_k, k \in K \quad (25)$$

$$\omega_{ikl} \leq y_{kl}, i \in I, l \in L_k, k \in K \quad (26)$$

$$\omega_{ikl} \geq x_i + y_{kl} - 1, i \in I, l \in L_k, k \in K \quad (27)$$

$$t_i \leq x_i * M, i \in I \quad (28)$$

$$t_i \geq p + (x_i - 1) * M, i \in I \quad (29)$$

$$t_i \leq p + (1 - x_i) * M, i \in I \quad (30)$$

$$p \geq 0, Q_{a, shkl} \geq 0, Q_{q, shkl} \geq 0, Q_{eq, shkl} \geq 0, Q_{v, shkl} \geq 0, t_i \geq 0, x_i, y_{kl}, z_{hkl}, \omega_{ikl} \in \{0, 1\} \quad (31)$$

其中, M 是一个极大值, ω_{ikl} 和 t_i 都是辅助的决策变量。与模型 A 比较,模型 B 能被 CPLEX 等软件求解,它的求解代价在于会多出额外辅助的决策变量和约束。

3.2 嵌套遗传算法

3.2.1 算法概述

该模型需要决策产品配置、供应商的选择、订单分配还有供应中断场景后的再分配。利用嵌套遗传算法(NGA)求解该模型,将决策变量两个主要组成部分:确定最佳产品配置和每个模块设计韧性供应链。NGA 的外部遗传算法解决了产品配置,包括产品配置和产品定价以及消费者购买规则。同时,内部遗传算法计算韧性供应链设计,包括每个模块实例的供应商原始分配和各种场景下的重新分配。

如果使用传统的遗传算法应用于该模型,该算法的染色体结构会非常复杂,这会导致交叉和变异后出现大量无效个体,会降低算法的效率并减慢运行速度。NGA 的关键优势在于它能够将大规模问题分解为多个子问题,并采用融合内部和外部遗传算法的嵌套结构。外部遗传算法用于解决产品规划问题,而内部遗传算法用于处理供应链配置问题,这提高了内部和外部染色体的质量,最终提高了算法效率。

3.2.2 染色体结构与算法流程

染色体分为两部分:一部分用于外部遗传算法,另一部分用于内部遗传算法。外部染色体由 3 个部分组成:产品配置、产品定价和客户选择。内部遗传算法的染色体说明不同场景中的供应商订单分配,每个场景划分为一部分。

如果有 4 个供应商,那么就有 16 个场景,染色体理应被划分为 16 个部分,然而订单为 0 的情况下

可不参与迭代,比如供应商全部中断的场景订单分配都为 0,可都不参与迭代。当对算法进行编码时,染色体的元素由 0 和 1 表示。

算法流程如下:1)外部遗传算法初始化参数和染色体。2)计算外部适应度值,即产品的收入。3)外部染色体选择、交叉、变异,生产新的种群。4)内部遗传算法初始化染色体、设置参数。5)计算内部适应度值,即各个模块的成本。成本计算用到外部遗传算法的产品规划决策变量。6)内部遗传算法选择、交叉、变异。7)内部遗传算法将其最优结果反馈给外部遗传算法。8)判断迭代次数是否达到停止迭代要求。

3.2.3 选择、交叉和变异

染色体选择过程采用轮盘赌方法,这种方法适应度值较高的个体更容易被选择。在内部遗传算法中,较低供应链成本的染色体更容易被选择。相反,在外部遗传算法中,较高利润的染色体更容易被选择。

内部和外部染色体的每个部分均采用两点交叉的方法。两点交叉涉及在单个染色体内随机建立两个交叉点,然后进行部分基因交换。本算法随机从每一个部分选择两个点进行部分基因交换。如果染色体在交叉后转化为无效染色体,则通过修复程序进行纠正。

算法的变异均采用单点变异。该过程随机从每一个部分选择一个基因,并根据突变概率改变基因,即将 1 变为 0、0 变为 1。与交叉类似,如果染色体在交叉后转化为无效染色体,则通过修复过程进行纠正。

4 案例分析

4.1 案例描述

某公司计划推出一个智能手表产品,该产品经过模块化设计被分为 6 个模块:屏幕模块、表带模块、芯片模块、存储器模块、电池模块和外壳模块。这些模块的实例如表 3 所示。

表 3 智能手表模块及其实例

编号	模块名称	模块实例
M ₁	屏幕	尺寸:1.2 英寸、1.4 英寸、1.6 英寸、1.8 英寸
M ₂	表带	材质:橡胶、皮革
M ₃	芯片	型号:W1,W2
M ₄	存储器	容量:512MB,1G,2G,3G
M ₅	电池	容量:2 000 mAh, 3 000 mAh
M ₆	外壳	颜色:粉、白、黑

这 6 个产品模块分别具有 4、2、2、4、2 和 3 个实例,从而产生 384 种可能的产品,市场部难以对全部的 384 种可能产品进行消费者偏好分析,因此为了简化市场分析,使用 SPSS 软件生成 L16 正交矩阵进行联合分析可能的产品。

在市场调查后,确定了 3 个细分市场,每个细分市场的客户数量分别为 2 000、1 500 和 1 000 人。邀请每个细分市场的代表客户评估这 16 种可能的产品。随后,使用线性最小二乘回归方法^[42]评估每个细分市场中每个模块实例的部分价值效用。

根据市场部的调查,目前市场上有两个主要竞争产品。细分市场 1、2、3 对两个竞争产品的效用均用价格表示。竞争产品 1 的效用分别为 568 元、550 元、575 元;细分市场 1、2、3 的竞争产品 2 的效用分别为 510 元、511 元、498 元。经过进一步调查,该公司选择与两个地区的供应商合作。对于每个模块实例,选择了 4 个供应商。

其中,以模块 3 的实例 1 为例,该零件的单位损失成本和单位延迟成本分别为 550 元和 10 元。采

用供应商的固定成本为 200 元,地区 1 和地区 2 的地区中断事件发生概率为 0.5% 和 1%。 S_1 和 S_2 位于地区 1, S_1 和 S_2 生产能力分别为 1 500 和 1 700,正常情况下单价分别为 70 元和 65 元,灵活性为 30% 和 35%,中断后额外付费单价为 8 元,这两个供应商的正常情况下的运输单价为 7 元,紧急运输单价为 12 元,延迟天数为 2 天,供应商中断事件发生概率都为 1%。 S_3 和 S_4 位于地区 2, S_3 和 S_4 生产能力分别为 2 000 和 2 300,正常情况下单价分别为 62 元和 60 元,灵活性为 40% 和 45%,中断后额外付费单价为 8 元,这两个供应商的正常情况下的运输单价为 10 元,紧急运输单价为 17 元,延迟天数为 4 天,供应商中断事件发生概率都为 2%。

4.2 结果分析

方法 A 是传统方法,该方法首先确定产品配置,然后设计韧性供应链。方法 B 是产品配置和供应链配置同时进行,但是不考虑韧性。这意味着,根据方法 B,在发生中断的情况下,未中断供应商没有补货的能力,不能满足需求的零件数量直接计入损失成本。方法 C,即所提出的优化方法,需要产品配置和韧性供应链的联合配置。

方法 A 的产品定价为 560 元,产品配置模块 1 选择实例 4,模块 2 选择实例 2,模块 3 选择实例 2,模块 4 选择实例 3,模块 5 选择实例 2,模块 6 选择实例 3。方法 B 和方法 C 的产品配置相同,定价为 548 元,模块 1 选择实例 2,模块 2 选择实例 2,模块 3 选择实例 1,模块 4 选择实例 3,模块 5 选择实例 2,模块 6 选择实例 3。

方法 A 和方法 C 的产品配置在模块 1 和模块 3 中有所不同。尽管方法 A 产生了更高的收入,但也会产生更高的成本。因此,方法 C 的利润比方法 A 高 15.32%。方法 B 和方法 C 的产品配置相同,但方法 B 的供应链成本更高,导致方法 C 比方法 B 的利润更高,方法 C 的利润比方法 B 高 22.15%。

虽然方法 B 和方法 C 的产品配置相同,但它们的供应链配置不同。用方法 C 计算的结果选择了 4 家供应商,订单分配数量分别为 840、1 259、1 221、1 180 个,总成本为 342 029.32 元。方法 B 的结果只选择了 3 个供应商,这 3 个供应商的订单分配分别为 1 500、1 700、1 300 个,由于没有考虑韧性,总成本为 373 984.04 元。因此,方法 C 的成本比方法 B 的成本低 9.34%。

利用嵌套遗传算法求解模型参数如下:在外部遗传算法中,种群大小为 20,迭代次数为 40,选择概率为 0.6,变异概率为 0.3。至于内部遗传算法,参数被设置为 30、20 次迭代的群体大小、0.6 的选择概率和 0.5 的变异概率。嵌套遗传算法迭代次数为 240 次,迭代结果最终收敛至 1 189 663 元,嵌套遗传算法的达优率为 97.3%,如图 2 所示。

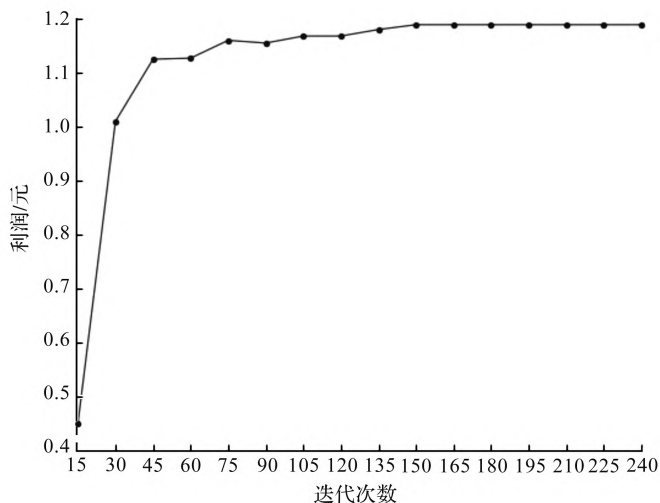


图 2 嵌套遗传算法计算结果

5 结 论

为了在设计早期充分考虑产品零部件的供应中断风险,本文建立了一个产品规划和韧性供应链设计的联合优化模型,其目标是在产品设计过程中最大化早期利润,而韧性供应链设计考虑了在各种干扰情景下的供应商选择、订单分配和订单重新分配等因素。为了高效地求解建立的非线性优化模型,通过引入额外的辅助决策变量和相关约束对其进行线性化处理。为了求解大规模问题,进一步设计了嵌套遗传算法。智能手表产品的案例分析结果表明所提出的模型和算法是有效的。

参考文献

- [1] SIMPSON T W, JIAO J, SIDDIQUE Z, et al. Advances in product family and product platform design: Methods & applications[M]. New York, NY: Springer New York, 2014.
- [2] CHOY K L, LEE W B, LO V. An intelligent supplier management tool for benchmarking suppliers in outsource manufacturing[J]. Expert Systems with Applications, 2002, 22(3): 213-224.
- [3] HU X, GURNANI H, WANG L. Managing risk of supply disruptions: Incentives for capacity restoration[J]. Production and Operations Management, 2013, 22(1): 137-150.
- [4] RICE J B, CANIATO F. Building a secure and resilient supply network[J]. Supply Chain Management Review, 2003, 7(5): 22-30.
- [5] LUO X G, KWONG C K, TANG J F, et al. Integrating supplier selection in optimal product family design[J]. International Journal of Production Research, 2011, 49(14): 4195-4222.
- [6] CAO Y, LUO X G, KWONG C K, et al. Joint optimization of product family design and supplier selection under multinomial logit consumer choice rule[J]. Concurrent Engineering, 2012, 20(4): 335-347.
- [7] LIU X, DU G, JIAO R J, et al. Co-evolution of product family configuration and supplier selection: A game-theoretic bilevel optimisation approach[J]. Journal of Engineering Design, 2018, 29(4/5): 201-234.
- [8] KAMALAHMADI M, MELLAT-PARAST M. Developing a resilient supply chain through supplier flexibility and reliability assessment[J]. International Journal of Production Research, 2016, 54(1): 302-321.
- [9] HOU J, ZENG A Z, ZHAO L. Coordination with a backup supplier through buy-back contract under supply disruption[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2010, 46(6): 881-895.
- [10] LIU D, LI Z, HE C, et al. Risk-averse co-decision for lower-carbon product family configuration and resilient supplier selection[J]. Sustainability, 2021, 14(1): 384.
- [11] SIMPSON T W. Product platform design and customization: Status and promise[J]. Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing, 2004, 18(1): 3-20.
- [12] FARRELL R S, SIMPSON T W. Product platform design to improve commonality in custom products[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2003, 14(6): 541-556.
- [13] KOHLI R, SUKUMAR R. Heuristics for product-line design using conjoint analysis [J]. Management Science, 1990, 36(12): 1464-1478.
- [14] DOBSON G, KALISH S. Heuristics for pricing and positioning a product-line using conjoint and cost data[J]. Management Science, 1993, 39(2): 160-175.
- [15] KOCHAN C G, NOWICKI D R. Supply chain resilience: A systematic literature review and typological framework[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 2018, 48(8): 842-865.

-
- [16] SHISHODIA A, SHARMA R, RAJESH R, et al. Supply chain resilience: A review, conceptual framework and future research[J]. *The International Journal of Logistics Management*, 2023, 34(4): 879-908.
- [17] AGRAWAL N, JAIN R K. Insights from systematic literature review of supply chain resilience and disruption[J]. *Benchmarking*, 2022, 29(8): 2495-2526.
- [18] ALDRIGHETTI R, BATTINI D, IVANOV D, et al. Costs of resilience and disruptions in supply chain network design models: A review and future research directions[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 235: 108103.
- [19] PIRES R J, BARBOSA-POVOA A. Supply chain resilience: Definitions and quantitative modelling approaches[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2018, 115: 109-122.
- [20] LUO Y, ZHU J. Resilience strategy optimization for large aircraft supply chain based on probabilistic language QFD[J]. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 2020, 13(4): 23-46.
- [21] NI N, HOWELL B J, SHARKEY T C. Modeling the impact of unmet demand in supply chain resiliency planning[J]. *Omega*, 2018, 81: 1-16.
- [22] ZAVALA A, NOWICKI D, RAMIREZ-MARQUEZ J E. Quantitative metrics to analyze supply chain resilience and associated costs[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Journal of Risk and Reliability*, 2019, 233(2): 186-199.
- [23] BEHZADI G, O'SULLIVAN M J, OLSEN T L. On metrics for supply chain resilience [J]. *European Journal of Operational Research*, 2020, 287(1): 145-158.
- [24] SABOUIHI F, JABALAMELI M S, JABBARZADEH A. An optimization approach for sustainable and resilient supply chain design with regional considerations[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2021, 159: 107510.
- [25] CARVALHO H, BARROSO A P, MACHADO V H, et al. Supply chain redesign for resilience using simulation[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2012, 62(1): 329-341.
- [26] TAN W J, CAI W, ZHANG A N. Structural-aware simulation analysis of supply chain resilience [J]. *International Journal of Production Research*, 2020, 58(17): 5175-5195.
- [27] IVANOV D. Revealing interfaces of supply chain resilience and sustainability: A simulation study [J]. *International Journal of Production Research*, 2018, 56(10): 3507-3523.
- [28] YANG D, JIAO J (Roger), JI Y, et al. Joint optimization for coordinated configuration of product families and supply chains by a leader-follower Stackelberg game [J]. *European Journal of Operational Research*, 2015, 246(1): 263-280.
- [29] ALHAWARI O I, SÜER G A, BHUTTA M K S. Operations performance considering demand coverage scenarios for individual products and products families in supply chains[J]. *International Journal of Production Economics*, 2021, 233: 108012.
- [30] KHALAF R E H, AGARD B, PENZ B. Simultaneous design of a product family and its related supply chain using a Tabu Search algorithm[J]. *International Journal of Production Research*, 2011, 49(19): 5637-5656.
- [31] BAUD-LAVIGNE B, AGARD B, PENZ B. Simultaneous product family and supply chain design: An optimization approach[J]. *International Journal of Production Economics*, 2016, 174: 111-118.
- [32] PAKSERESHT M, SHIRAZI B, MAHDAVI I, et al. Toward sustainable optimization with stackelberg game between green product family and downstream supply chain [J]. *Sustainable Production and Consumption*, 2020, 23: 198-211.
- [33] FUJITA K, AMAYA H, AKAI R. Mathematical model for simultaneous design of module

- commonalization and supply chain configuration toward global product family [J]. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 2013, 24(5): 991-1004.
- [34] HOSSAIN MD S, CHAKRABORTTY R K, ELSAWAH S, et al. Modelling and application of hierarchical joint optimisation for modular product family and supply chain architecture[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2023, 126(3/4): 947-971.
- [35] KHALAF R E H, AGARD B, PENZ B. Module selection and supply chain optimization for customized product families using redundancy and standardization [J]. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2011, 8(1): 118-129.
- [36] WANG Q, QI P, LI S. A concurrence optimization model for low-carbon product family design and the procurement plan of components under uncertainty[J]. *Sustainability*, 2021, 13(19): 10764.
- [37] WU Z, KWONG C K, AYDIN R, et al. A cooperative negotiation embedded NSGA-II for solving an integrated product family and supply chain design problem with remanufacturing consideration[J]. *Applied Soft Computing*, 2017, 57: 19-34.
- [38] LIU D Z, LI Z K. Joint decision-making of product family configuration and order allocation by coordinating suppliers under disruption risks[J]. *Journal of Engineering Design*, 2021, 32(5): 213-246.
- [39] LUO X, LI W, KWONG C K, et al. Optimisation of product family design with consideration of supply risk and discount[J]. *Research in Engineering Design*, 2016, 27(1): 37-54.
- [40] REZAPOUR S, HASSANI A, FARAHANI R Z. Concurrent design of product family and supply chain network considering quality and price[J]. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 2015, 81: 18-35.
- [41] HEJAZI T H, KHORSHIDVAND B. Robust optimization of sustainable closed-loop supply chain network considering product family[J]. *Environment, Development and Sustainability*, 2023. DOI: 10.1007/S10668-023-03166-4.
- [42] DIAMOND P. Fuzzy least squares[J]. *Information Sciences*, 1988, 46(3): 141-157.

A Product Planning Model and the Solving Algorithms Considering the Supply Chain Resilience

ZENG Ming, YE Yangyang, LUO Xinggang

(School of Management, Hangzhou Dianzi University, Hangzhou 310018, Zhejiang, China)

Abstract: To improve a company's ability to respond to supplier supply risks, it is necessary to consider the resilience of the product supply chain in the product planning. This resilient supply chain strategy includes outsourcing the required product module instances to multiple suppliers to cope with potential disruptions in the supply chain. In order to adapt to scenarios of different scales, a product planning model that takes supply chain resilience into consideration is established. For smaller scale cases, linearization can be used to convert the model into a linear one, and a solver can be used to solve it; For larger scale cases, nested genetic algorithms can be used to obtain satisfactory solutions. The effectiveness of the proposed method is verified through a detailed analysis of a case study of a smartwatch manufacturing company. The results show that by implementing a resilient supply chain strategy, the company can better cope with the possible uncertainty and interruptions in the supply chain, thereby improving the supply chain resilience of products.

Key words: product planning; supply chain resilience; optimization