

非线性约束条件下的应急供应链网络均衡研究

眭佳鹏, 何胜学

上海理工大学管理学院, 上海

收稿日期: 2024年10月26日; 录用日期: 2024年11月19日; 发布日期: 2024年11月26日

摘要

在应急供应链因各参与方之间的利润冲突而频繁失效的背景下, 网络均衡理论常被用于构建应急供应链模型, 以确保决策的稳定性。然而, 现有模型的线性、单调、可导约束条件无法充分捕捉应急情境下的复杂决策行为, 从而限制了模型在实际应用中的有效性和准确性。为了解决这个问题, 我们提出了一个应急供应链网络均衡变分不等式模型, 并创新性地使用非线性、非单调甚至非连续的函数作为模型的约束条件。通过设计案例进行模拟仿真, 我们验证了该模型可以在复杂的非线性环境中, 为各参与方提供符合其利润要求的稳定决策, 显著提升了实际应用价值。

关键词

应急供应链, 网络均衡, 非线性约束, 变分不等式

Research on Emergency Supply Chain Network Equilibrium under Nonlinear Constraints

Jiapeng Sui, Shengxue He

Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Oct. 26th, 2024; accepted: Nov. 19th, 2024; published: Nov. 26th, 2024

Abstract

In the context of frequent failures in emergency supply chains due to profit conflicts among participants, network equilibrium theory is often used to construct emergency supply chain models to ensure decision stability. However, existing models with linear, monotonic, and differentiable constraints fail to fully capture the complex decision-making behaviors in emergency situations, thereby limiting

their effectiveness and accuracy in practical applications. To address this issue, we propose an emergency supply chain network equilibrium variational inequality model, innovatively using nonlinear, non-monotonic, and even discontinuous functions as constraints. Through designed case simulations, we verify that this model can provide stable decisions that meet the profit requirements of all participants in complex nonlinear environments, significantly enhancing its practical application value.

Keywords

Emergency Supply Chain, Network Equilibrium, Nonlinear Constraints, Variational Inequalities

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

应急供应链起源于 20 世纪 80 年代，最初只是普通的救援物资运输链。然而，1985 年墨西哥城大地震后，Davis [1] 指出，各国政府和国际组织开始重新审视应急响应和物资分配效率，推动了应急供应链网络优化模型的研究。随着时间推移，学者们发现这些模型忽视了供应链参与方之间的利润分配，导致得出的最优决策可能并不是所有参与方愿意保持的，从而影响决策的稳定性。例如，巩玲君和张纪海 [2] 就指出，现代应急供应链不仅要考虑物资的快速配送，还需要协调多方利益相关者的关系。如何确保这些不同参与方在相互作用下做出最优且稳定的决策，成为了现代应急供应链管理中的一个重要议题。

网络均衡指的是在一个网络系统中，各参与方在相互影响下达到的稳定状态。Nagurney [3] 首次将网络均衡理论运用于供应链建模，并定义供应链网络均衡为：每个参与方在给定其他参与方策略的情况下，无法通过单方面改变策略来获得更高的利润。这一均衡状态也确保了供应链参与方有足够的动力去维持其决策的稳定性。现有的应急供应链网络均衡模型主要通过建立变分不等式模型来实现。Nagurney 和 Liu [4] 首次将变分不等式方法运用于供应链网络均衡模型，并且证明了变分不等式的解等效于供应链网络均衡解。之后又有许多研究者构建了应急供应链网络均衡变分不等式模型。例如，张庆红等 [5] 通过变分不等式方法，构建了一个针对重大公共卫生事件下的应急物资供应链网络模型；Nagurney [6] 构建了一个多层次供应链网络均衡模型，专门用于灾难救援中的物资运输；Fargetta 和 Scrimali [7] 构建了一个两阶段变分不等式模型，用于应急管理中的医疗物资供应。然而，这些模型的约束条件通常被假设为线性、单调和可导的，这与模型的求解方法密切相关。现有的变分不等式模型大都采用传统数学方法进行求解的。例如，吴海翔和徐兵 [8]、朱军辉和程春蕊 [9]、曹炳汝和朱博文 [10]、陈兆波等 [11] 分别采用 Lagrange 对偶理论、拟牛顿法、修正投影法、欧拉方法求解供应链网络均衡变分不等式模型。但上述传统数学方法可以求解的前提是模型中的约束条件是高度线性且可导的。若模型中的约束条件具有高度非线性和不确定性，那么传统数学方法就难以有效处理这类复杂的问题。

现有的应急供应链网络均衡变分不等式模型为了方便求解，往往简化了约束条件，导致无法充分反映应急情境下市场的复杂性和不确定性。为了解决这一问题，我们构建了一个包含非线性、非单调和非连续约束条件的应急供应链网络均衡变分不等式模型，并将其转换为一个等效的非线性规划模型。最后，我们通过模拟仿真，并使用多尺度榜样学习算法这一启发式算法进行求解，以验证所提出模型的有效性。

2. 应急供应链网络建模

2.1. 应急供应链网络均衡条件

图 1 展示了一个由供应商、制造商、物资中心和物资需求点组成的四层应急供应链网络。其中，原材料供应商的数量为 h ，每个供应商 e 仅能提供一种原材料，并将其销售给下游制造商；制造商的数量为 l ，每个制造商 i 以最低的价格从供应商采购原材料，并将生产的单一品种物资出售给物资中心或物资需求点；该网络仅包含一个物资中心 m ，其提前储备物资，以最低价格从制造商采购，并销售给物资需求点；物资需求点的数量为 n ，每个需求点 j 根据实际拥有的物资数量决定从上游物资中心或制造商进行采购的费用。本文使用的常用符号及其意义说明在附录中展示。

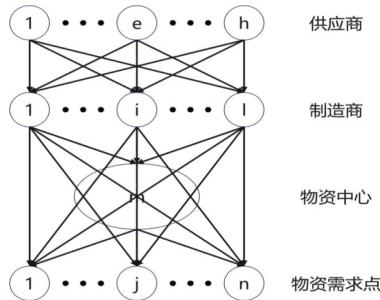


Figure 1. Four-tier emergency supply chain network

图 1. 四层应急供应链网络

链接 (g, k) 上的单位运输成本 $C_{gk}(f_{gk})$ 是一个关于流动量的函数，表示为：

$$C_{gk}(f_{gk}) = \begin{cases} a_{gk} f_{gk} + b_{gk} f_{gk}^2 + \varepsilon_{gk} f_{gk}^3 + d_{gk} & \text{if } f_{gk} \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (1)$$

在链接 (g, k) 中，我们认为当 k 与 g 之间的价格差异足以覆盖运输成本时， $f_{gk}^* = \max(f_{gk})$ ；当价格差不能覆盖运输成本时， $f_{gk}^* = 0$ ；当价格差与运输成本相同时， f_{gk}^* 可以在 $[0, \max(f_{gk})]$ 任意取值。这一现象反映了网络均衡条件，其变分不等式表达式为：

$$(P_{g(g,k)}^* + C_{gk}(f_{gk}^*) - P_{k(g,k)}^*)(f_{gk} - f_{gk}^*) \geq 0, \forall (g, k) \quad (2)$$

$$0 \leq f_{gk} \leq f_{gk}^{\max} \quad (3)$$

2.2. 供应商的决策约束

图 2 展示了一个典型的供应商 e 与其下游制造商之间的关系。具体的决策约束由公式(4)至(13)构成。

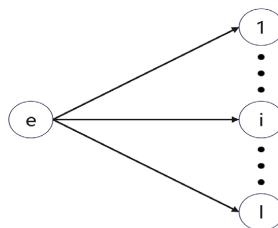


Figure 2. A typical supplier “ e ” and downstream manufacturers

图 2. 一个典型的供应商 e 与下游制造商

$$r_{e,i} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{i=1}^l w_{e,i} = 0 \\ w_{e,i} / \sum_{i=1}^l w_{e,i} & \text{if } \sum_{i=1}^l w_{e,i} \neq 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$Q_{e,Sold} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{e,i} = 0, \forall i \\ \min \left\{ Q_e, \frac{f_{ei}^{\max}}{r_{e,i}} \right\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_{ei} = Q_{e,Sold} \cdot r_{e,i}, \quad i = 1, 2, \dots, l \quad (6)$$

$$Q_{e,Sold} = \sum_{i=1}^l f_{ei} \quad (7)$$

$$Q_e = Q_{e,Left} + Q_{e,Sold} \quad (8)$$

$$CP_e = FC_e + VC_e \quad (9)$$

$$VC_e = a_e Q_e + b_e Q_e^2 \quad (10)$$

$$TC_e = CP_e + C_{e,Left} (Q_{e,Left}) + C_{e,Sold} (Q_{e,Sold}) \quad (11)$$

$$AC_e = \frac{TC_e}{Q_e} \quad (12)$$

$$P_{e,Sold} = AC_e (1 + r_e) \quad (13)$$

其中，公式(4)至(8)描述了供应商如何根据对下游制造商的重视度来确定向各制造商销售原材料的数量。公式(9)至(13)描述了供应商的成本组成及单位售价的制定过程。

2.3. 制造商的决策约束

图 3 展示了一个典型的制造商 i 及其上游供应商以及下游物资中心、物资需求点之间的关系。假设制造商在制造过程中需要用到两种原材料，第一种原材料由供应商 $1—e$ 提供，数量记作 $Q_{i,1}$ ；第二种原材料由 $e+1—h$ 提供，数量记作 $Q_{i,2}$ 。 $RP_{i,1}$ 和 $RP_{i,2}$ 分别表示两种原材料的使用比例， RT_i 表示产品的转换率。第一种原材料的使用数量及剩余数量表示为 $Q_{i,Used1}$ 和 $Q_{i,Left1}$ ；第二种原材料的使用及剩余数量表示为 $Q_{i,Used2}$ 和 $Q_{i,Left2}$ 。 $C_{i,Left1}$ 和 $C_{i,Left2}$ 分别表示两种原材料的单位储存成本。制造商的决策约束由公式(14)至(30)表示。

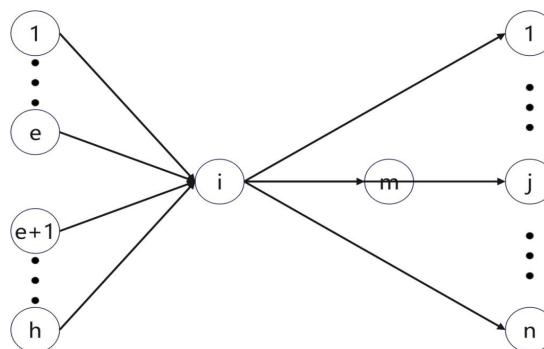


Figure 3. A typical manufacturer “ i ” and its upstream and downstream participants

图 3. 一个典型的制造商 i 及其上下游参与方

$$Q_{i,1} = \sum_{g=1}^e f_{gi} \quad (14)$$

$$Q_{i,2} = \sum_{g=e+1}^h f_{gi} \quad (15)$$

$$Q_i = (1 + RT_i) \min \left\{ \frac{Q_{i,1}}{RP_{i,1}}, \frac{Q_{i,2}}{RP_{i,2}} \right\} \quad (16)$$

$$Q_{i,Used1} = \frac{Q_i}{1 + RT_i} RP_{i,1} \quad (17)$$

$$Q_{i,Used2} = \frac{Q_i}{1 + RT_i} RP_{i,2} \quad (18)$$

$$Q_i = Q_{i,Left} + Q_{i,Sold} \quad (19)$$

$$Q_{i,1} = Q_{i,Left1} + Q_{i,Used1} \quad (20)$$

$$Q_{i,2} = Q_{i,Left2} + Q_{i,Used2} \quad (21)$$

$$Q_{i,Sold} = f_{im} + \sum_{j=1}^n f_{ij} \quad (22)$$

$$r_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n w_{i,j} = 0 \\ w_{i,j} / \sum_{j=1}^n w_{i,j} & \text{if } \sum_{j=1}^n w_{i,j} \neq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$\sum_{j=1}^n f_{ij} = \begin{cases} \min \left\{ Q_i - f_{im}, \frac{f_{ij}^{Max}}{r_{i,j}} \right\} & \exists r_{i,j} \neq 0, j = 1, 2, \dots, n \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (24)$$

$$f_{ij} = \sum_{j=1}^n f_{ij} \cdot r_{i,j} \quad (25)$$

$$p_{i,Buy1} = \min_{g=1,2,\dots,e} \{ p_{g,Sold} + c_{gi} \} \quad (26)$$

$$p_{i,Buy2} = \min_{g=e+1,e+2,\dots,h} \{ p_{g,Sold} + c_{gi} \} \quad (27)$$

$$TC_i = CP_i + C_{i,Left} (Q_{i,Left}) + C_{i,Sold} (Q_{i,Sold}) + p_{i,Buy1} Q_{i,1} + p_{i,Buy2} Q_{i,2} + C_{i,Left1} (Q_{i,Left1}) + C_{i,Left2} (Q_{i,Left2}) \quad (28)$$

$$AC_i = \frac{TC_i}{Q_i} \quad (29)$$

$$P_{i,Sold} = AC_i (1 + r_i) \quad (30)$$

其中, 公式(14)至(21)展示了如何计算第一种和第二种原材料的使用量和剩余量, 以及制造出物资的数量。公式(22)表示制造商出售物资的数量由物资中心和物资需求点两部分组成。公式(23)至(25)描述了制造商如何根据对需求点的重视度分配各个需求点的物资出售数量。公式(26)和(27)表明制造商以最低的价格从上游供应商处采购两种不同的原材料。公式(28)至(30)则反映了制造商的总成本构成及物资单位售价的制定过程。

2.4. 物资中心的决策约束

图 4 展示了物资中心 m 与其上游制造商以及下游物资需求点之间的关系。我们用 $Q_{m,Advance}$ 表示 m 已提前储备的物资数量。物资中心具体的决策约束由公式(31)至(39)构成。

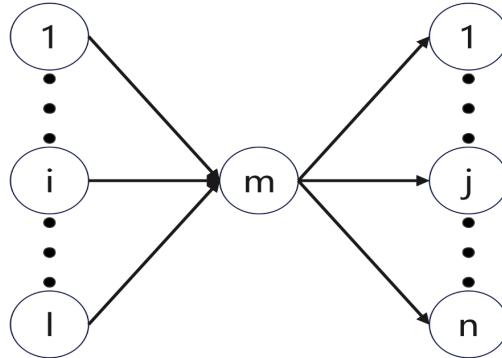


Figure 4. Material center “ m ” and its upstream manufacturers and downstream material demand points

图 4. 物资中心 m 及其上游制造商和下游物资需求点

$$Q_m = Q_{m,Advance} + \sum_{i=1}^l f_{im} \quad (31)$$

$$Q_m = Q_{m,sold} + Q_{m,Left} \quad (32)$$

$$r_{m,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } \sum_{j=1}^n w_{m,j} = 0 \\ w_{m,j} / \sum_{j=1}^n w_{m,j} & \text{if } \sum_{j=1}^n w_{m,j} \neq 0 \end{cases} \quad (33)$$

$$Q_{m,Sold} = \begin{cases} 0 & \text{if } r_{m,j} = 0, \forall j = 1, 2, \dots, n \\ \min \left\{ Q_m, \frac{f_{m,j}^{Max}}{r_{m,j}} \right\} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

$$f_{mj} = Q_{m,Sold} \cdot r_{mj} \quad (35)$$

$$P_{m,Buy} = \min_{i=1,2,\dots,l} \{ P_{i,Sold} + C_{im} \} \quad (36)$$

$$TC_m = CP_m + C_{m,Left} (Q_{m,Left}) + C_{m,Sold} (Q_{m,Sold}) + p_{m,Buy} \cdot Q_m + Q_{m,Advance} \cdot C_{m,Left} \quad (37)$$

$$AC_m = \frac{TC_m}{Q_m} \quad (38)$$

$$p_{m,sold} = AC_m (1 + r_m) \quad (39)$$

其中，公式(31)和(32)展示了物资中心所拥有物资数量的构成。公式(33)至(35)描述了物资中心如何根据对下游需求点的重视度来分配出售物资的数量。公式(36)至(39)展示了物资中心的总成本的构成及单位售价的制定过程。

2.5. 物资需求点的决策约束

图 5 展示了物资需求点 j 与其上游制造商及物资中心之间的关系。我们用 $Q_{j,Demand}$ 表示 j 的物资需求

数量, p_j^{\max} 表示 j 能提供的最高物资单价。物资需求点的决策约束由公式(40)至(42)构成。

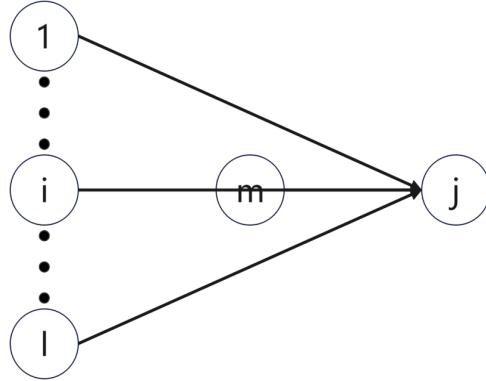


Figure 5. A material demand point “ j ” and its upstream manufacturers and material center

图 5. 一个物资需求点 j 与其上游制造商和物资中心

$$Q_j = f_{mj} + \sum_{i=1}^l f_{ij} \quad (40)$$

$$Q_{j,Demand} \leq Q_j \leq 1.1 \cdot Q_{j,Demand} \quad (41)$$

$$P_{j,Buy} = \max \left\{ 0, p_j^{\max} - a_j \cdot Q_j - b_j \cdot Q_j^2 \right\} \quad (42)$$

其中，公式(40)和(41)表述了物资需求点实际接收物资数量的组成及要求，我们要求实际接收数量不小于需求数量，但也不能大于1.1倍的需求数量，以避免物资的过度浪费。公式(42)则是将需求点的采购单价与市场环境相挂钩，认为采购单价会随接收数量的增加而逐步降低。

2.6. 变分不等式模型的等效转化

在构建应急供应链网络均衡模型时，决策变量的集合可划分为三个主要部分：首先是供应商生产原材料的数量 Q_e ，其次是网络中各条链接 (g,k) 上的权重 $w_{g,k}$ ，最后是供应商、制造商和物资中心所设定的利润率。这些决策变量可统一表示为向量 x ，向量 x 必须直接或间接满足上述一系列由等式和不等式所构成的约束条件，记作 $x \in B(x)$ 。通过将公式(2)作为均衡条件，并将 $x \in B(x)$ 视为决策变量的约束，我们可以为该应急供应链网络构建均衡变分不等式模型，表示为：

$$\sum_{(g,k) \in L} \left(p_{g,(g,k)}^* + C_{gk} \left(f_{gk}^* \right) - p_{k,(g,k)}^* \right) \left(f_{gk} - f_{gk}^* \right) \geq 0 \quad (43)$$

$$x \in B(x) \quad (44)$$

其中 L 代表了该应急供应链网络中的所有链接。

因为表示约束条件的函数缺乏线性和可微性这样的必要属性，我们无法使用传统数学方法求解该均衡变分不等式模型。为了解决这一难题，本文引入了一个与原变分不等式模型等效的非线性规划模型，并通过启发式算法进行求解。该非线性规划模型可以表示为：

$$\begin{aligned} & \min_{x \in B(x)} \sum_{gk} \left\{ f_{gk} \max \left\{ 0, -P_{k(g,k)} + P_{g,(g,k)} + C_{gk}(f_{gk}) \right\} \right. \\ & \quad \left. + \left(f_{gk}^{\max} - f_{gk} \right) \max \left\{ 0, P_{k,(g,k)} - P_{g,(g,k)} - C_{gk}(f_{gk}) \right\} \right\} \end{aligned} \quad (45)$$

3. 模拟案例仿真

如图 6 所示, 本文模拟构建了一个由四个原材料供应商(S1、S2 提供第一种原材料, S3、S4 提供第二种原材料)、两个制造商(M1, M2)、一个物资中心(C1)以及三个物资需求点(D1, D2, D3)组成的四层应急供应链网络。为了求解该模型, 我们采用了多尺度榜样学习算法(MMLA), 计算精度采用 1.0E-4, 以检验该网络中所有 19 条链接是否处于均衡状态。所有供应商、制造商、物资中心和物资需求点的约束条件相关系数分别列于表 1、表 2、表 3 和表 4。

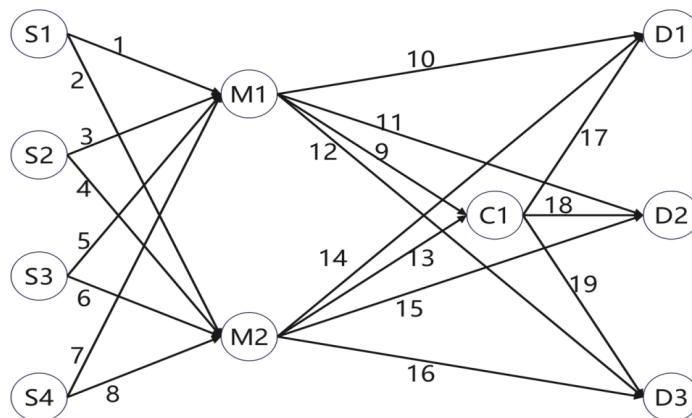


Figure 6. Simulating a four-tier emergency supply chain network
图 6. 模拟四层应急供应链网络

Table 1. Manufacturers M1 and M2 correlation coefficient
表 1. 制造商 M1、M2 相关系数

制造商	$RP_{i,1}$	$RP_{i,2}$	RT_i	$C_{i,Left1}$	$C_{i,Left2}$
M1	0.55	0.45	1.0	0.001	0.001
M2	0.6	0.4	1.0	0.004	0.008

Table 2. Cost composition coefficients for all participants
表 2. 各参与方成本构成系数

参与方	FC_g	a_g	b_g	$C_{g,Left}$	$C_{g,Sold}$
S1	340	0.02	0.000012	0.01	0.002
S2	411	0.01	0.00001	0.02	0.002
S3	350	0.002	0.000002	0.01	0.001
S4	415	0.004	0.000014	0.01	0.0002
M1	100	0.001	0.000003	0.001	0.0001
M2	120	0.001	0.000001	0.001	0.0002
C1	20	0.0002	0.000001	0.004	0.0006

Table 3. The unit transportation cost coefficient for each link
表 3. 每条链接的单位运输成本系数

No. (g, k)	a_{gk} (E-4)	b_{gk} (E-5)	ε_{gk}	d_{gk}
1	4	2	0.005	0.55

续表

2	4	3	0.005	0.65
3	5	2	0.006	0.35
4	4	4	0.005	0.50
5	4	5	0.005	0.52
6	6	2	0.004	0.35
7	4	6	0.004	0.15
8	8	2	0.004	0.65
9	4	4	0.005	0.45
10	7	6	0.005	0.50
11	6	5	0.007	0.48
12	5	6	0.005	0.50
13	7	2	0.0045	0.25
14	6	5	0.006	0.46
15	5	7	0.006	0.45
16	6	6	0.006	0.44
17	2	2	0.0018	0.12
18	3	2	0.0022	0.12
19	2	2	0.0021	0.12

Table 4. Material demand point market pricing coefficient**表 4.** 物资需求点市场定价系数

物资需求点	p_j^{\max}	a_j	b_j
D1	70.842	0.045	0.00084
D2	70.970	0.047	0.00090
D3	71.129	0.050	0.00095

我们假设物资中心已经提前储备了 80.45995 数量的物资，三个物资需求点的实际需求数量均为 30。则通过多尺度榜样学习算法(MMLA)求解该案例得出的网络均衡解由图 7、表 5~9 所展示。

MMLA 要求所有个体在每个学习阶段进行一次表现力测试，并将表现最好的三个个体称为榜样(金、银、铜)。图 7 展示了每个阶段的榜样在整个周期内的表现变化。纵轴的目标函数值是公式(45)的计算结果，可以看出每位榜样的表现都呈现出逐步提高的趋势，反映出目标函数值的下降。最后，MMLA 通过 525 个学习阶段，将目标函数值收敛到 5.13030。

表 5 则具体展现了总共 19 条链接的均衡结果，通过将每条链接最后两列的值相乘，可以验证是否严格满足均衡条件。我们发现除了链接 14 和 15，其余链接都充分满足了均衡条件。

表 6~9 展示了该应急供应链仿真网络中所有参与方的最终决策内容。其中，供应商 S1 生产 14.21700 数量的第一种原材料，并以 23.93720 的单价全部出售；供应商 S3 生产 5.80921 数量的第二种原材料，并以 92.78687 的单价全部出售；制造商 M1 以 24.49186 的单价购买了 8.24549 数量的第一种原材料；制造商 M2 分别以 24.59066 和 93.14103 的单价购买了两种原材料，总共生产了 11.94302 数量的物资，并以

68.22634 的单价全部出售; 物资中心 C1 以 68.47891 的单价购入了 3.35127 数量的物资, 加上提前储备的数量, 总计为 83.81123, 并以 68.52899 的单价全部出售; 物资需求点 D1、D2、D3 分别以 68.67002、68.67415、68.66936 的单价购入了 30.68742、30.74599、30.96955 数量的物资。

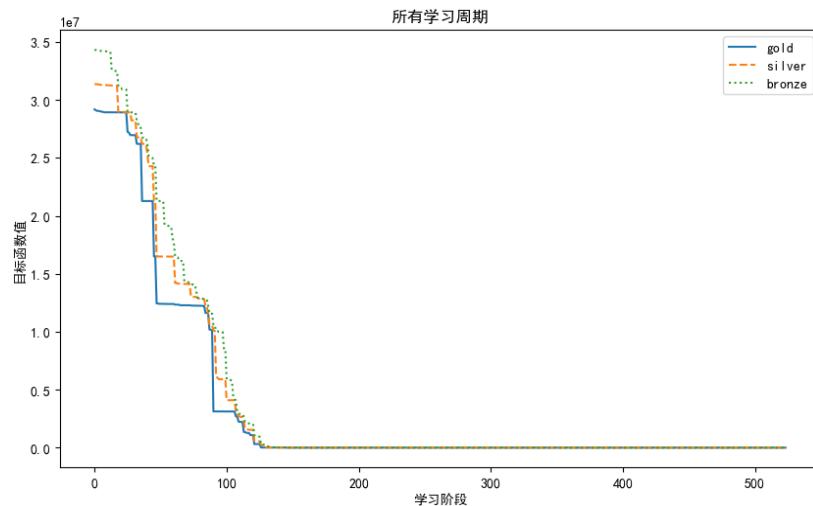


Figure 7. The trend of the objective function value in all learning stages of MMLA
图 7. MMLA 所有学习阶段下目标函数值的变化趋势

Table 5. The equilibrium results of all links
表 5. 所有链接的均衡结果

No. (g, k)	$r_{g,k}$	$w_{g,k}$	$P_{g(g,k)}$	C_{gk}	$P_{k(g,k)}$	$P_{k(g,k)} - C_{gk} - P_i$	f_{gk}
1	0.57997	0.9236	23.9372	0.55466	24.49186	0	8.24549
2	0.42003	0.66888	23.9372	0.65346	24.59066	0	5.97151
3	0	0	10	0.35	24.49186	14.14186	0
4	0	0	10	0.5	24.59066	14.09066	0
5	0	0	92.78687	0.52	10.15	-83.15687	0
6	1	0.20264	92.78687	0.35416	93.14103	0	5.80921
7	0	0	10	0.15	10.15	0	0
8	0	0	10	0.65	93.14103	82.49103	0
9	0	0	10	0.45	68.47891	58.02891	0
10	0.11353	0.19797	10	0.5	68.67002	58.17002	0
11	0.478	0.83349	10	0.48	68.67415	58.19415	0
12	0.40847	0.71224	10	0.5	68.66936	58.16936	0
13	0.28061	0.54959	68.22634	0.25257	68.47891	0	3.35128
14	0.24703	0.48383	68.22634	0.46221	68.67002	-0.01853	2.9503
15	0.17209	0.33705	68.22634	0.45132	68.67415	-0.00351	2.05523
16	0.30027	0.58812	68.22634	0.44292	68.66936	1.00E-04	3.58621
17	0.33095	0.75982	68.52899	0.14093	68.67002	9.79E-05	27.73712
18	0.34232	0.78594	68.52899	0.14507	68.67415	9.26E-05	28.69076
19	0.32673	0.75013	68.52899	0.14047	68.66936	-9.99E-05	27.38335

Table 6. The final decision of the supplier
表 6. 供应商的最终决策

S	Q_e	$Q_{e,Sold}$	$Q_{e,Left}$	$P_{e,Sold}$
S1	14.21700	14.21700	0	23.93720
S2	0	0	0	0
S3	5.80921	5.80921	0	92.78687
S4	0	0	0	0

Table 7. The final decision of the manufacturer
表 7. 制造商的最终决策

M	Q_i	$Q_{i,Sold}$	$Q_{i,Left}$	$Q_{i,Left1}$	$Q_{i,Left2}$	$P_{i,Buy1}$	$P_{i,Buy2}$	$P_{i,Sold}$
M1	0	0	0	8.24549	0	24.49186	0	0
M2	11.94302	11.94302	0	0	1.82820	24.59066	93.14103	68.22634

Table 8. The final decision of the material center
表 8. 物资中心的最终决策

C	Q_m	$Q_{m,Sold}$	$Q_{m,Left}$	$P_{m,Buy}$	$P_{m,Sold}$
C1	83.81123	83.81123	0	68.47891	68.52899

Table 9. The final decision of the material demand point
表 9. 物资需求点的最终决策

D	$P_{j,Buy}$
D1	30.68742
D2	30.74599
D3	30.96955

4. 结论

本文旨在解决现有应急供应链网络均衡模型无法充分反映应急情境下参与方决策复杂性的问题。我们创新性地将模型中的约束条件设置为非线性、非单调和非连续。针对传统数学方法无法求解该模型的难题，我们将原有的变分不等式模型转换为等效的非线性规划模型，并通过启发式算法进行求解。最终，通过设计仿真案例，我们成功为各参与方提供了符合其利润要求的稳定决策，验证了所设计的应急供应链网络均衡变分不等式模型及其等效非线性规划模型的有效性，并观察到以下现象：

一、在处于网络均衡状态时，各参与方都基本上实现了零库存的策略。这表明在应急供应链管理中，零库存策略在均衡状态下是可行的，并且能够有效减少库存成本。

二、在储备不足时，供应链中的物资流动不仅依赖于物资中心的分配，还包括制造商的直接供应，从而确保了物资需求点的充足供应。这种多层次的供应模式有助于提高供应链的灵活性和响应速度，确保在不同情况下都能满足物资需求。

参考文献

- [1] Davis, D.E. (2005) Reverberations: Mexico City's 1985 Earthquake and the Transformation of the Capital. In: Vale, L.J. and Campanella, T.J., Eds., *The Resilient City: How Modern Cities Recover from Disaster*, Oxford University Press,

- 255-280. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195175844.003.0018>
- [2] 巩玲君, 张纪海. 应急物资动员链构建与优化基本理论研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2018, 20(2): 117-123.
- [3] Nagurney, A. (2006) Supply Chain Network Economics: Dynamics of Prices, Flows and Profits. Edward Elgar Publishing.
- [4] Nagurney, A. and Liu, Z. (2007) An Evolutionary Variational Inequality Formulation of Supply Chain Networks with Time-Varying Demands. In: Friesz, T.L., Ed., *Network Science, Nonlinear Science and Infrastructure Systems*, Springer, 269-304. https://doi.org/10.1007/0-387-71134-1_12
- [5] 张庆红, 陈雪, 王英辉, 等. 重大公共卫生事件下应急物资供应链网络的均衡[J]. 物流研究, 2021(4): 33-47.
- [6] Nagurney, A. (2018) A Multitiered Supply Chain Network Equilibrium Model for Disaster Relief with Capacitated Freight Service Provision. In: Kotsireas, I., Nagurney, A. and Pardalos, P., Eds., *Dynamics of Disasters*, Springer, 85-108. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97442-2_5
- [7] Fargetta, G. and Scrimali, L. (2021) A Two-Stage Variational Inequality for Medical Supply in Emergency Management. In: Cerulli, R., Dell'Amico, M., Guerriero, F., Pacciarelli, D. and Sforza, A., Eds., *Optimization and Decision Science*, Springer International Publishing, 91-102. https://doi.org/10.1007/978-3-030-86841-3_8
- [8] 吴海翔, 徐兵. 技术扩散和贸易保护主义下的多期供应链网络均衡[J]. 中国管理科学, 2024, 32(2): 324-34.
- [9] 朱军辉, 程春蕊. 基于变分不等式的多商品流供应链网络模型[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2015, 32(4): 12-16.
- [10] 曹炳汝, 朱博文. 考虑再制造投资的闭环供应链网络均衡模型[J]. 工业工程, 2021, 24(3): 1-9.
- [11] 陈兆波, 王鑫, 田春英. 考虑劳动力流动限制的供应链网络均衡模型[J]. 工业工程, 2023, 26(5): 48-58.

附 录

符号名称	符号含义	符号意义
(g, k)	链接	从任意上游 g 到任意下游 k 之间的流动。
f_{gk}	数量	链接 (g, k) 上的流动数量。
$C_{gk}(f_{gk})$	运输成本	链接 (g, k) 上的单位运输成本。
$a_{gk}, b_{gk}, \varepsilon_{gk}, d_{gk}$	系数	决定 $C_{gk}(f_{gk})$ 的四个系数。
$P_{g(g,k)}, P_{k(g,k)}$	价格	同一产品分别在上游 g 和下游 k 的价格。
$P_{g(g,k)}^*, P_{k(g,k)}^*, f_{gk}^*$	均衡状态	处于均衡状态时的价格以及流动数量。
Q_g	总量	参与方 g 的生产数量或实际拥有数量。
$Q_{g,Sold}$	售出数量	g 出售产品的数量。
$Q_{g,Left}$	剩余数量	g 剩余产品的数量。
$w_{g,k}$	重视程度	g 对 k 的重视程度, 值域为 $[0,1]$ 。
$r_{g,k}$	数量比	根据 $w_{g,k}$ 决定 g 对 k 出售产品的数量比。
r_g	利润率	g 设定的利润率。
CP_g	成本	g 的生产或运营成本。
FC_g, VC_g	成本	g 的固定成本和可变成本。
a_g, b_g	系数	决定 VC_g 的系数。
$C_{g,Left}, C_{g,Sold}$	单位成本	g 的单位储存和单位交易成本。
TC_g	总成本	g 的总成本。
AC_g	单位成本	g 的单位成本。
$P_{g,Sold}$	价格	g 的单位售价。
$P_{k,Buy}$	价格	k 的单位购买价格。