

文章编号:1007-6735(2011)03-0264-04

生产中断风险下的供应链网络设计

刘祖刚

(宾夕法尼亚州立大学黑泽尔顿分校 商业与经济系, 黑泽尔顿 PA 18202)

摘要: 主要研究生产中断风险下的供应链网络设计问题. 基于超网概念和变分不等式的理论构建供应链网络模型, 模型包括多个供应商和制造商并且考虑生产中断的风险对供应链中决策者成本、利润以及生产网络产能设计的影响. 使用变分不等式的形式来表达网络均衡状态下的各个决策者的最优解. 同时还提供了模型解存在性证明以及变分不等式函数的单调性证明.

关键词: 供应链; 生产中断风险; 超网; 变分不等式

中图分类号: N 94 **文献标志码:** A

Supply chain network design under production disruption risk

LIU Zu-gang

(Department of Business and Economics, Pennsylvania State University, Hazleton, PA 18202, USA)

Abstract: A model regarding the supply chain network under production disruption risk was developed based on the concept of supernetworks and the theory of variational inequalities. The model consists of multiple suppliers and multiple manufacturers, and considers the impact of production disruption risks on the costs, profits, and capacity decisions of the supply chain firms. The variational inequality formulation was used to express the equilibrium conditions of the supply chain network where all decision makers' optimal conditions are simultaneously satisfied. The conditions for the existence of solution and conditions of monotonicity were provided.

Key words: *supply chains; production disruption risk; supernetworks; variational inequality*

供应链网络设计与优化在近年来成为越来越受关注的领域. 文献中大多数的研究都是集中于单一公司的供应链设计决策问题并且一般使用另一变量或者整数变量建构模型. 对于这一领域的研究和模型读者可以参考文献[1-4]概述和讨论. Nagurney^[5]研究了最优的供应链网络设计和再设计, 考虑

了需求满足的条件和最小化成本的目标. Nagurney^[6]进一步讨论了多公司竞争下的供应链设计模型, 基于变分不等式理论建模并且考虑了利润最大化的目标. Nagurney 等在文献[7-8]中又分别研究了供应链设计中的可持续性问题以及生产外包和关键需求的满足问题. 另外, 近年来许多理论和应用研

收稿日期: 2011-05-11
作者简介: 刘祖刚(1977—), 男, 助理教授. 研究方向: 供应链管理、运输与物流、风险管理、运筹学等. E-mail: zxl23@psu.edu

究从不同角度讨论了供应链中断风险以及相关的决策、成本以及影响. Craighead 等^[9]指出在当今的全球化环境中供应链中断导致的运营以财物风险是众多公司所面临的最具紧迫性的问题. Hendriks 等^[10]分析了 800 例供应链中断的案例. 他们发现这些经历了供应链中断的公司的股票价格比同一领域的其它公司低 30%~40%. Snyder 等^[11]提出了考虑供应风险的仓库位置选取模型更多有关供应链中断风险的研究可见文献[12-14]. 然而以上的研究主要集中在一个或两个公司的决策和分析. 基于超网理论的模型为研究由众多不同公司组成的供应链网络的供应中断风险提供了可能. Nagurney 等^[15]考虑了供应链网络的供应风险和需求风险. Qiang 等^[16]提出的考虑供应中断的供应链网络模型, 运用了多目标优化的方法并使用了成本的方差来衡量风险. Cruz 等^[17]研究了供应中断风险与投机风险在多时期供应链网络中的关系与影响. 笔者提出文献中首个考虑供应中断风险的供应链网络设计模型, 定义所需的决策变量和成本函数并建构供应链网络设计模型. 本模型不仅考虑供应中断风险并且考虑多个制造商之间的竞争, 同时提供存在性和单调性的结果以及一个求解本模型的算法.

1 考虑供应中断风险的供应链网络设计模型

模型基于超网的概念以及变分不等式的理论^[18-19]. 本文中的模型考虑 $n = 1, \dots, N$ 个供应商, $m = 1, \dots, M$ 个制造商, 如图 1 所示. 下面将分别讨论供应商和制造商的决策过程和优化问题并且提出表达供应链网络均衡的变分不等式.

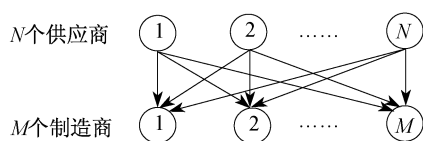


图 1 供应链网络

Fig.1 Supply chain network

1.1 供应商的决策和优化问题

每一个供应商 n 决定对每个制造商的供应量 q_m^n , 本身生产总量 q^n , 以及最大产能 y^n . 另外, 用 ρ_m^{n*} 表示供应商 n 与制造商 m 之间的交易价格, 用 $h^n(q^n)$ 表示生产成本函数, 用 $g^n(y^n)$ 表示产能建设成本, 用 c_m^n 表示供应商 n 与制造商 m 之间的单

位交易成本, 用 K^n 表示最大产能. 供应商 n 首先考虑利润最大化并优化问题

$$\max \sum_{m=1}^M \rho_m^{n*} q_m^n - h^n(q^n) - \sum_{m=1}^M c_m^n q_m^n - g^n(y^n) \quad (1)$$

满足约束条件

$$q^n \geq \sum_{m=1}^M q_m^n \quad (2)$$

$$q^n \leq y^n \quad (3)$$

$$y^n \leq K^n \quad (4)$$

供应商 n 还需要考虑生产中断风险 r^n . 用生产中断导致的惩罚期望值来表示生产中断风险. 用 $f^n(x)$ 表示供应商无中断生产 x 的概率密度, 使用 w^n 表示单位惩罚. 中断风险可表示为

$$r^n(q^n) = w^n \int_0^{q^n} (q^n - x) f^n(x) dx \quad (5)$$

引理 1 供应商生产中断风险 r^n 是 q^n 的凸函数.

证明

$$\begin{aligned} \frac{\partial r^n}{\partial q^n} &= w^n \frac{\partial \int_0^{q^n} (q^n - x) f^n(x) dx}{\partial q^n} = \\ &= w^n \left[\frac{\partial \int_0^{q^n} q^n f^n(x) dx}{\partial q^n} - \frac{\partial \int_0^{q^n} x f^n(x) dx}{\partial q^n} \right] = \\ &= w^n \left[q^n f(q^n) + \int_0^{q^n} f(x) dx - q^n f(q^n) \right] = \\ &= w^n \int_0^{q^n} f(x) dx \end{aligned}$$

因此, $r^n(q^n)$ 的二阶导数是 $w^n f(q^n) \geq 0$. Q. E. D

现在综合利润最大化和风险最小化供应商 n 的最优化问题可表示为

$$\max \sum_{m=1}^M \rho_m^{n*} q_m^n - h^n(q^n) - \sum_{m=1}^M c_m^n q_m^n - g^n(y^n) - r^n(q^n) \quad (6)$$

满足约束条件式(2)~(4).

现在假设所有供应商的成本函数都是凸函数并且所有供应商都采取不合作的纳什均衡方式竞争. 用 Q^1 表示所有 q^n 的矢量, 用 Q^2 表示所有 q_m^n 的矢量, 用 Y^1 代表所有 y^n 的矢量. 那么根据文献[18]和文献[20-21]所有供应商的最优化条件同时可表示为如下变分不等式: 决定 $(Q^{1*}, Q^{2*}, Y^{1*}) \in K^1$, 满足条件

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N [c_m^n - \rho_m^{n*}] \times [q_m^n - q_m^{n*}] +$$

$$\sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial h^n(q^{n*})}{\partial q^n} + \frac{\partial r^n(q^{n*})}{\partial q^n} \right] \times [q^n - q^{n*}] + \sum_{n=1}^N \frac{\partial g^n(y^{n*})}{\partial y^n} \times [y^n - y^{n*}] \geq 0, \quad \forall (Q^1, Q^2, Y^1) \in K^1 \quad (7)$$

这里可行性域 $K^1 \equiv \{(Q^1, Q^2, Y^1) | (Q^1, Q^2, Y^1) \in R_+^{MN+2N} \text{ 并且式(2)~(4)满足}\}$.

1.2 制造商的决策和优化问题

每一个制造商 m 决定从每个供应商的交易量 q_m^n , 本身生产总量 q_m , 以及最大产能 y_m . 另外, 用 ρ_m^{n*} 表示供应商 n 与制造商 m 之间的交易价格, 用 $h_m(q_m)$ 表示生产成本函数, 用 $g_m(y_m)$ 表示产能建设成本, 用 K_m 表示最大产能, 用 v_b 表示单位产品所需材料, 用 $P_m(q_m)$ 表示反需求函数. 供应商 n 首先考虑利润最大化并优化问题

$$\max P_m(q_m)q_m - \sum_{n=1}^N \rho_m^{n*} q_m^n - h_m(q_m) - g_m(y_m) \quad (8)$$

满足约束条件

$$v_b q_m \leq \sum_{n=1}^N q_m^n \quad (9)$$

$$q_m \leq y_m \quad (10)$$

$$y_m \leq K_m \quad (11)$$

制造商 m 还需要考虑生产中断风险 r_m . 用生产中断导致的惩罚期望值表示生产中断风险. 用 $f_m(x)$ 表示制造商无中断生产 x 的概率密度, 用 w_m 表示单位惩罚. 中断风险可表示为

$$r_m(q_m) = w_m \int_0^{q_m} (q_m - x) f_m(x) dx \quad (12)$$

引理 2 制造商生产中断风险 r_m 是 q_m 的凸函数.

证明 同引理 1 的证明.

现在综合利润最大化和风险最小化制造商 m 的最优化问题可表示为

$$\max P_m(q_m)q_m - \sum_{n=1}^N \rho_m^{n*} q_m^n - h_m(q_m) - g_m(y_m) - r_m(q_m) \quad (13)$$

满足约束条件式(9)~(11).

现在假设所有制造商的成本函数都是凸函数, 反需求函数都为减函数, 并且所有制造商都采取不合作的纳什均衡方式竞争. 用 Q^3 表示所有 q_m 的矢量, 用 Y^2 表示所有 y_m 的矢量. 那么根据文献[18]和文献[20~21]所有供应商的最优化条件同时可表示为变分不等式: 决定 $(Q^{2*}, Q^{3*}, Y^{2*}) \in K^2$, 满足

条件

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \rho_m^{n*} \times [q_m^n - q_m^{n*}] + \sum_{m=1}^M \left[\frac{\partial h_m(q_m^*)}{\partial q_m} + \frac{\partial r_m(q_m^*)}{\partial q_m} - \frac{\partial P_m(q_m^*)}{\partial q_m} q_m^* - P_m(q_m^*) \right] \times [q_m - q_m^*] + \sum_{m=1}^M \frac{\partial g_m(y_m^*)}{\partial y_m} \times [y_m - y_m^*] \geq 0, \quad \forall (Q^2, Q^3, Y^2) \in K^2 \quad (14)$$

这里可行性域 $K^2 \equiv \{(Q^2, Q^3, Y^2) | (Q^2, Q^3, Y^2) \in R_+^{MN+2M} \text{ 并且式(9)~(11)满足}\}$.

1.3 供应链网络的均衡条件

当整个供应链网络处于均衡状态下时, 所有供应商的最优化条件以及所有制造商的最优化条件必须同时满足以至于没有决策者有改变决定的意愿. 另外每个供应商送出到每个制造商的材料数量必须与每个制造商所受到的材料数量吻合.

定义 1 在考虑供应中断和网络设计条件下整个供应链网络的均衡满足式(7)与式(14)的总和. 在这种情况下所有决策者都没有单方改变决定的意愿.

定理 1 (变分不等式形式)

考虑供应中断和网络设计条件下整个供应链网络的均衡条件可表示为变分不等式: 决定 $(Q^{1*}, Q^{2*}, Q^{3*}, Y^{1*}, Y^{2*}) \in K^3$, 满足条件

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N c_m^n \times [q_m^n - q_m^{n*}] + \sum_{n=1}^N \left[\frac{\partial h^n(q^{n*})}{\partial q^n} + \frac{\partial r^n(q^{n*})}{\partial q^n} \right] \times [q^n - q^{n*}] + \sum_{n=1}^N \frac{\partial g^n(y^{n*})}{\partial y^n} \times [y^n - y^{n*}] + \sum_{m=1}^M \left[\frac{\partial h_m(q_m^*)}{\partial q_m} + \frac{\partial r_m(q_m^*)}{\partial q_m} - \frac{\partial P_m(q_m^*)}{\partial q_m} q_m^* - P_m(q_m^*) \right] \times [q_m - q_m^*] + \sum_{m=1}^M \frac{\partial g_m(y_m^*)}{\partial y_m} \times [y_m - y_m^*] \geq 0, \quad \forall (Q^1, Q^2, Q^3, Y^1, Y^2) \in K^3 \quad (15)$$

这里可行性域 $K^3 \equiv \{(Q^1, Q^2, Q^3, Y^1, Y^2) | (Q^1, Q^2, Q^3, Y^1, Y^2) \in R_+^{2N+MN+2M} \text{ 并且式(2)~(4)、式(9)~(11)满足}\}$.

证明 首先将式(7)和式(14)加在一起得到式(15), 再在式(15)的第一项中加入 $+\rho_m^{n*} - \rho_m^{n*}$. 由于 $+\rho_m^{n*} - \rho_m^{n*}$ 等于 0, 并不能改变式(15). 加入 $+\rho_m^{n*} - \rho_m^{n*}$ 的变分不等式可拆分成式(7)和式(14).

将式(15)写成变分不等式的标准形式: 决定 $U^* \in K$, 满足

$$F(U^*) \times (U - U^*) \geq 0, \forall U \in K \quad (16)$$

这里 K 对应 K^3 , U 对应 $(Q^1, Q^2, Q^3, Y^1, Y^2)$, $F(U)$ 对应式(15)中的每一项相应函数.

2 解的存在性和单调性

定理 2(存在性)

假设成本函数, 反需求函数都是连续的. 变分不等式(15) 存在一个解.

证明 由于左右的决策变量都有上限式(15)的可行性域是封闭的和有限的. 所以式(15)存在至少一个解^[18].

定理 3(单调性)

假设所有的成本函数是凸函数(含线形), 反需求函数是线性减函数. 则 $F(U)$ 是单调的. $F(U)$ 的 Jacobian 矩阵是半正定的.

证明 依据引理 1 和引理 2 可知风险函数是凸函数. 于是可以验证 $F(U)$ 的 Jacobian 矩阵是半正定的. 由此导出 $F(U)$ 是单调的.

所提出的模型可用 Modified Projection Method 求解^[18]. 如果 $F(U)$ 是单调的和 Lipschitz 连续该方法保证会收敛于一个解.

3 结 论

提出了一个考虑供应风险和网络设计的供应链网络均衡模型. 使用了超网的概念和变分不等式来表示此供应链网络的均衡状态. 本文同时还提供了模型解的存在性以及函数单调性的结论并且提出了求解方法.

参考文献:

- [1] BEAMON B M. Supply chain design and analysis: Models and methods[J]. International Journal of Production Economics, 1998, 55(3): 281 - 294.
- [2] MIN H, ZHOU G. Supply chain modeling: past, present, future[J]. Computers and Industrial Engineering, 2002, 43(1/2): 231 - 249.
- [3] MEIXELL M J, GARGEYA V B. Global supply chain design: A literature review and critique[J]. Transportation Research E, 2005, 41(6): 531 - 550.
- [4] GEUNES J, PARDALOS P M. Network optimization in supply chain management and financial engineering: An annotated bibliography[J]. Networks, 2003, 42(2): 66 - 84.
- [5] NAGURNEY A. Optimal supply chain network design and redesign at minimal total cost and with demand satisfaction[J]. International Journal of Production Economics, 2010, 128(1): 200 - 208.
- [6] NAGURNEY A. Supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition[J]. Transportation Research E, 2010, 46(3): 281 - 294.
- [7] NAGURNEY A, NAGURNEY S. Sustainable supply chain network design: A multicriteria perspective[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2010, 3(3): 189 - 197.
- [8] NAGURNEY A, YU M, QIANG Q. Supply chain network design for critical needs with outsourcing[J]. Papers in Regional Science, 2011, 90(1): 123 - 142.
- [9] CRAIGHEAD C W, BLACKHURST J, RUNGTUSANATHAM M J, et al. The severity of supply chain disruptions: Design characteristics and mitigation capabilities[J]. Decision Sciences, 2007, 38(1): 131 - 156.
- [10] HENDRICKS K B, SINGHAL V R. An empirical analysis of the effect of supply chain disruptions on long-term stock price performance and risk of the firm[J]. Production and Operations Management, 2005, 14(1): 35 - 52.
- [11] SNYDER L V, DASKIN M S. A reliability model for facility location: the expected failure cost case[J]. Transportation Science, 2005, 39(3): 400 - 416.
- [12] GUPTA D. The (Q, r) inventory system with an unreliable supplier[J]. INFOR, 1996, 34: 59 - 76.
- [13] PARLAR M, PERRY D. Inventory models of future supply uncertainty with single and multiple suppliers[J]. Naval Research Logistics, 1996, 43(2): 191 - 210.
- [14] TANG C S. Robust strategies for mitigating supply chain disruptions[J]. International Journal of Logistics, 2006, 9(1): 33 - 45.
- [15] NAGURNEY A, CRUZ J, DONG J, et al. Supply chain networks, electronic commerce, and supply side and demand side risk[J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(1): 120 - 142.
- [16] QIANG Q, NAGURNEY A, DONG J. Modeling of supply chain risk under disruptions with performance measurement and robustness analysis[C]// WU T, BLACKHURST J. Managing Supply Chain Risk and Vulnerability: Tools and Methods for Supply Chain Decision Makers. Berlin: Springer, 2009: 91 - 111.

(下转第 278 页)