

文章编号: 1001-0920(2007)11-1223-05

基于应急供应的弹性供应网络设计研究

刘希龙, 季建华

(上海交通大学 安泰经济与管理学院, 上海 200052)

摘要: 在传统供应网络和多源供应网络设计的基础上, 结合战略应急库存和实物期权两种应急供应方法, 建立了基于应急供应的弹性供应网络模型, 并进行了算例验证. 研究结果表明, 与传统的供应网络模型相比, 该模型更具有现实意义, 不但能显著提高供应网络的弹性, 而且能达到网络成本、可靠性和弹性三者之间的平衡.

关键词: 战略应急库存; 实物期权; 应急供应; 弹性供应网络设计

中图分类号: F270 **文献标识码:** A

Resilient supply network design based on contingency supply

LIU Xi-long, JI Jian-hua

(Antai College of Economics and Management, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200052, China.

Correspondent: LIU Xi-long, E-mail: xliu@sjtu.edu.cn)

Abstract: Based on the traditional supply network and multiple sourcing model, and integrating strategic emergency stock and real options supply, a resilient supply model based on contingency supply is built. Finally, the model is validated through computation experiments. The results show that the model has more important practical significance compared with traditional supply network model. It can not only increase the resilience of supply network, but also balance cost, reliability and resilience of supply network.

Key words: Strategic emergency stock; Real options; Contingency supply; Resilient supply network design

1 引言

随着市场需求的不确定性和外部冲击的增加, 全球供应网络变得更加脆弱^[1]. 1999 年台湾大地震, 2001 年欧洲口蹄疫以及美国“911”事件都曾使全球供应网络系统遭受到不同程度的破坏, 许多企业因此不能正常运营甚至停产^[2]. 在竞争激烈的商业环境下, 如果供应网络在某个节点失效时, 不能按时持续地向顾客提供充足的产品, 就会失去市场, 失去客户信任, 降低供应链的整体竞争优势, 对供应网络上的所有企业都会产生严重的影响. 而在一般情况下, 供应网络一旦设计完成在短期内将不会改变^[3], 因此, 如何设计弹性供应网络以应对各种失效冲击具有重要现实和理论意义.

所谓供应网络弹性, 是指供应网络在部分失效时, 仍能保持连续供应且快速恢复到正常供应状态的能力. 本文对弹性的量度采用 Holling^[4] 提出的方法, 即以供应网络在部分失效时输出的损失来量度

供应网络的弹性.

当前文献大都是从成本和可靠性角度出发研究有关供应网络的设计. 比如, Nagurney 等^[5] 从成本最优的角度进行基于风险的多目标决策供应网络设计. Vidal 等^[6] 则从可靠性角度设计分销网络, 并将可靠性定义为供应网络正常运行的概率. Bundschuh^[7] 建立了序列线性的供应链可靠性模型. 对于供应网络弹性问题, 最近也出现了一些相关研究. Sheffi^[8] 提出采用双供应商的思想提高网络弹性, 并进行了定性分析; Landeghem^[9] 则提出了安全库存思想并进行了 Monte Carlo 模拟.

作者^[10] 曾给出了基于多源供应的弹性供应网络设计模型, 但仅采用多源供应, 对供应网络弹性的改善是有限的. 对此, 本文首先建立只考虑成本的基本模型; 然后在多源供应的基础上提出战略应急库存和实物期权两种应急供应方法, 并建立了考虑供应网络可靠性的弹性供应网络模型.

收稿日期: 2006-07-04; 修回日期: 2006-09-21.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70402005).

作者简介: 刘希龙(1977—), 男, 山东莒县人, 博士生, 从事运营与供应链管理的研究; 季建华(1950—), 女, 上海人, 教授, 博士生导师, 从事运营与物流管理的研究.

2 基本模型

假设有 n 个备选的供应商,设计供应网络的目标是从这 n 个供应商中选择合适的供应商组成一个 k 层供应网络.其中,每个供应商表示一个节点,层级用 T_i 表示, $i \in \{1, 2, \dots, k\}$. 供应商集合用 $N = \{1, 2, \dots, n\}$ 表示,第 n 个节点为制造商.

供应弧 $a = (v, u) \in A$ 代表从上游供应商 v 到下游客户 u 的可行供应渠道, A 为所有供应弧的集合.节点 v 的入向弧和出向弧分别用 I_v 和 O_v 表示.显然,对于所有的 $v \in T_1, I_v = \emptyset$; 对 $v \in T_k, O_v = \emptyset$.

决策变量有两个,分别是 X_a 表示沿供应弧 a 流过的物料数量,是一个连续变量; Y_a 表示供应弧 a 是否存在,是一个二元整数变量,表示为

$$Y_a = \begin{cases} 1, & \text{供应弧 } a \text{ 被选择;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

对于每个供应弧 $a \in A$,设物料的单位生产成本为 cp_a ,单位运输成本为 ct_a ,供应渠道的固定成本为 f_a .

供应网络的最优目标是达到生产、运输和固定成本总和的最小化,即

$$\min_{a \in A} [(cp_a + ct_a) X_a + f_a Y_a]. \quad (1)$$

设节点 v 的物料单系数为 α_v ,表示在节点 v ,输入 α_v 个单位的物料得到一单位的物料输出.因此,对于每个中间层的节点 v ,其物流平衡条件为

$$X_a = \sum_{a \in I_v} X_a = \sum_{a \in O_v} X_a, \quad v \in \bigcup_{i=2}^{k-1} T_i. \quad (2)$$

而对制造商节点 n ,其物流平衡条件为

$$X_a = \alpha_n D. \quad (3)$$

其中: α_n 为制造商节点(第 n 个节点)的物料单系数, D 为对供应网络最终产品的需求.

由于每个供应商都会受生产能力的约束,不妨设节点 v 的生产能力上限为 L_v ,则有

$$X_a \leq L_v, \quad v \in N \setminus \{n\}. \quad (4)$$

根据实际情况可知,每个供应商都会要求一个最小的订单数量.因此,为避免出现不合理的过小物流量,这里假设对于每个供应弧 $a \in A$,存在最小流量 m_a ,使得下面不等式成立:

$$m_a Y_a \leq X_a, \quad a \in A. \quad (5)$$

为保证只有在被选择的供应弧上存在物流量,设

$$X_a \leq M Y_a, \quad a \in A, \quad (6)$$

其中 M 表示一个足够大的常数.

综上所述,基本模型的目标函数为式(1),其约

束为式(2) ~ (6).

显然,以上基本模型只考虑了供应网络成本,而没有考虑供应网络的弹性.

3 应急供应网络模型

本文实现多源供应的方法是引入单供应商供应量限制参数 $(0 < \alpha < 1)$,表示对单个节点而言,单个供应商的供应量不超过流入该节点总供应量的 α 倍.在这种情况下,对于除第 1 层以外其他层上的任意节点 v ,有

$$X_a \leq \alpha \sum_{a \in I_v} X_a, \quad v \in \bigcup_{i=2}^k T_i, \quad a \in A. \quad (7)$$

虽然多源供应可在一定程度上提高供应网络的弹性,但这种改善是有限的^[10].本文提出采用战略应急库存(SES)和实物期权供应(RO)两种应急供应方式解决多源供应的局限性问题.

战略应急库存是专为应对供应中断而设立的,只有供应中断发生时才启用,不用于处理需求的日常波动;购买期权可看作是为供应损失购买保险.应急库存和期权供应方法各有利弊:SES在供应失效时可快速补偿供应损失,但其成本相对较高;而实物期权方法在供应网络内不存在实际的物理形式,成本较低,但实物期权的行使存在一个提前期的问题.本文将这两种方式结合起来,用期权方法降低应急供应的成本,而用SES提供提前期内供应需求量.

一般情况下,SES的成本包括采购成本和持有成本.由于战略应急库存的采购是通过正常的供应一起流入节点,导致在单独计算应急库存的成本时只计算持有成本.这里设SES的单位持有成本为 h_v ,决策变量 S_v 是节点 v 持有SES的数量.因此,供应网络中SES总成本为

$$h_v S_v, \quad v \in \bigcup_{i=2}^k T_i. \quad (8)$$

设供应弧 a 上期权供应的期权数量为 Q_a ,单位期权价格为 op .一般而言,期权价格是期权数量的阶梯函数,用 $op(Q_a)$ 表示,即

$$op_a(Q_a) = \begin{cases} op_{1,a}, Q_a & (0, e_{1,a}]; \\ op_{2,a}, Q_a & (e_{1,a}, e_{2,a}]; \\ \dots; \\ op_{J,a}, Q_a & (e_{J-1,a}, e_{K,a}]. \end{cases} \quad (9)$$

其中 $e_{j,a} (j \in \{1, 2, \dots, J\}, J$ 是断点数量)为供应弧 a 上期权供应量对价格的断点.

为保证一个期权供应量下只有一个断点被选中,定义一个新的(0-1)二元变量 $y_{j,a}$,且满足

$$\sum_{j=1}^J y_{j,a} = 1, \quad a \in A. \quad (10)$$

因此,沿供应弧 a 的期权成本为



$$X_a = \sum_{j=1}^J \text{op}_{j,a} \quad j, a \in A. \quad (11)$$

此时, 供应网络总成本目标函数为

$$c_a \sum_{j=1}^J \text{op}_{j,a} (Q_a) X_a + c_p X_a + c_t X_a + f_a Y_a + h_v S_v, v \in V, \sum_{i=2}^k T_i. \quad (12)$$

建立 SES 后, 对处于中间层上的节点 v 而言, 流入的常规供应量减去 SES 的量 S_v 必须等于流出的常规供应. 考虑物料单系数有

$$X_a = S_v + \sum_{i=2}^{k-1} T_i \quad v \in V, a \in A. \quad (13)$$

同理, 对于最终制造商节点 n , 则有

$$X_a = D_n + S_n. \quad (14)$$

处于中间阶段的节点 v 持有 SEB 量要至少能满足提前期时段内下游的期权供应需求. 则 SEB 的最小持有库存量为

$$S_v = t_v \sum_{a \in A} Q_a, \quad (15)$$

其中 t_v 为节点 v 的最大提前期.

一个节点向供应商购买的期权供应量应等于其应急库存不能满足下游期权供应的部分, 有

$$\sum_{a \in A} Q_a = \sum_{a \in A} X_a + S_v. \quad (16)$$

本文设置一个决策变量 μ ——最低容忍服务水平, 表示供应网络对最终需求的最低满足率. 不妨假设处于 T_i 层的供应商 w 失效. 在这种情况下, T_i 层上没失效的供应商提供的正常供应量和期权供应量之和加上 T_{i+1} 层持有的 SES 量, 至少是 T_i 层正常输出总量的 μ 倍. 可表示为

$$\mu \sum_{v \in T_i} \sum_{a \in A} (Q_a + X_a) \leq \sum_{a \in A} (Q_a + X_a) + \sum_{u \in T_{i+1}} S_u, \quad v \in T_i, a \in A, w \in T_i, i = \{1, 2, \dots, k-1\}. \quad (17)$$

最终制造商 SES 的持有量最少要能满足提前期内最终需求量的 μ 倍, 有

$$S_n \geq \mu D_n. \quad (18)$$

当然, 每个供应商都会受到生产能力的限制. 设供应商节点 v 的最大生产能力为 L_v , 则有

$$\sum_{a \in A} (X_a + Q_a) \leq L_v, \quad v \in V, \sum_{i=1}^{k-1} T_i. \quad (19)$$

SES 的库存量是有上限的, 用 S_v^* 表示节点 v 上的最大 SES 量, 则存在如下约束:

$$S_v \leq S_v^*, \quad v \in V, \sum_{i=2}^k T_i. \quad (20)$$

为减少期权供应的数量和成本, 模型的优化结果会出现所有备选供应商均被选择的情形, 显然这

是不合理的, 需要供应商数量限制约束.

定义一个新的二元整数决策变量 H_v , 为

$$H_v = \begin{cases} 1, & \text{供应商节点 } v \text{ 被选择;} \\ 0, & \text{其他.} \end{cases}$$

其中 $v \in N \setminus \{n\}$. 因此, 供应商数量限制约束为

$$\sum_{v \in T_i} H_v \leq V_i, \quad (21)$$

其中 $V_i (i = \{1, 2, \dots, k-1\})$ 为第 T_i 层的最大供应商数量.

设 p_v 表示供应商 v 的可靠性, 假设供应商可靠性是相互独立的, 则供应网络可靠性 P 为

$$P = \prod_{v \in N} p_v. \quad (22)$$

定义供应网络的最低容忍可靠性为 P^* , 则有如下不等式成立:

$$\sum_{v \in N \setminus \{n\}} H_v \log(p_v) \geq \log P^*. \quad (23)$$

显然, 在考虑了供应网络可靠性后, 原先存在供应弧的节点不一定被选择, 于是有

$$H_v Y_{(v,u)}, (v,u) \in A. \quad (24)$$

因只有在被选择的节点上才存在流量, 故有

$$X_{(v,u)} \leq M H_v, (v,u) \in A, \quad (25)$$

其中 M 表示一个足够大的常数.

这里, 最小订单数量 m_a 约束仍然存在

$$m_a Y_a \leq X_a, a \in A. \quad (26)$$

因此, 基于应急供应的弹性供应模型的目标函数为式(12), 其约束为式(7), (10), (13) ~ (21), (23) ~ (26).

4 仿真算例

以上海某汽车零部件制造商为例, 其供应商处于 6 层 ($k = 6$), 分布在 4 个地理区域, 第 1 到第 5 层每层均有 9 个供应商, 最后一层是制造商. 所以, 供应网络包含 46 个节点和 333 个弧. 供应商成本和可靠性赋值情况如表 1 所示.

表 1 供应商成本和可靠性参数赋值

区域	平均单位生产成本 / 元	可靠性	固定成本 / 万元
上海	230.42	0.984	
天津	215.73	0.981	10
江浙	174.38	0.973	
西部	149.39	0.968	

应急库存的单位持有成本是该节点单位生产成本的 0.2 倍. 期权供应价格对数量的阶梯函数有 3 个断点, 分别为 $\text{op}_{1,a} = 0.03 c_p a, Q_a \leq 4 \times 10^4$; $\text{op}_{2,a} = 0.08 c_p a, 4 \times 10^4 < Q_a \leq 5 \times 10^4$; $\text{op}_{3,a} = 0.13 c_p a, 5 \times 10^4 < Q_a \leq 12 \times 10^4$. 每层最大供应商数为 3.

本文用 Lingo6.1 注册版来求解模型, 得到供应

网络结构. 然后用 Matlab 计算分析绩效情况和失效损失, 仿真基于 50 000 种情形.

基本模型的供应网络结构如图 1 所示.

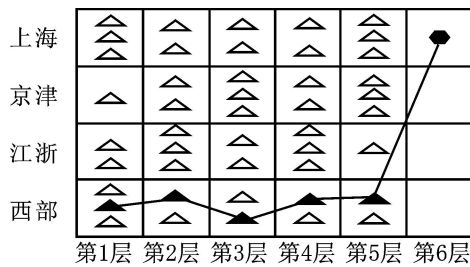


图 1 基本模型的供应网络结构

从图 1 可知, 每层均选择了一个供应商, 而且全部是可靠性较低且最便宜的供应商. 对于这样的线性结构, 任何一个供应商的失效都会导致供应网络的中断, 而且供应商的可靠性越低, 就越会增大供应网络中断的可能性, 使供应链的可靠性和弹性都很差. 表 2 给出了基本模型的绩效仿真结果.

表 2 基本模型绩效

成本 / 万元	41 050
供应网络中断数量	7 498
供应商失效数量	7 498
输出均值	425 020
输出标准差	197 563
供应链可靠性(分析结果)	0.849 8

下面求解应急供应模型. 为了分析参数对模型的影响, 设置两个不同的最低容忍可靠性.

情形 1 设 $\mu = 0.92$, $\sigma = 0.65$, $P^* = 0.78$, 其他参数设置同基本模型. 供应网络结构如图 2 所示.

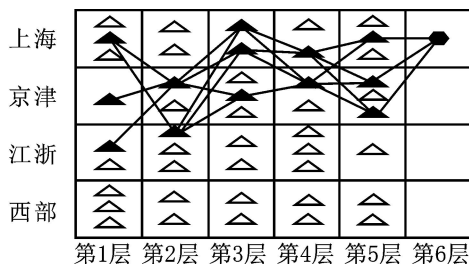


图 2 $P^* = 0.78$ 时的供应网络结构

从图 2 可知, 模型考虑了供应网络的最低容忍可靠性, 所以在可靠性相对较高的区域选择供应商. 供应商的数量较多, 主要是为了减少应急供应的数量, 达到减小成本的目的.

情形 2 设 $P^* = 0.80$, 其他参数设置同情形 1. 得到的供应网络结构如图 3 所示.

从图 3 可知, 模型中供应网络的最低容忍可靠性提高了, 所以在可靠性相对更高的区域选择供应商, 后面几层供应商的数量有所增加. 应急供应的仿

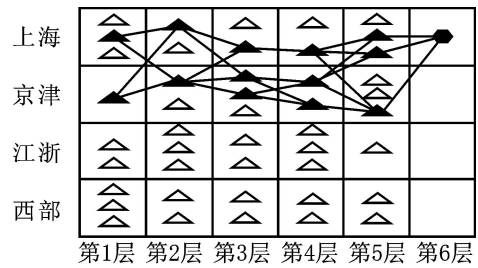


图 3 $P^* = 0.80$ 时的供应网络结构

真结果如表 3 所示.

表 3 应急供应模型绩效

指标	$P^* = 0.78$		$P^* = 0.80$	
	数值	模型比较 * / %	数值	模型比较 * / %
成本 / 万元	65 550	+ 59.98	69 320	+ 68.87
中断数量	105	- 98.6	79	- 98.95
失效数量	9 277	+ 23.73	9 024	+ 20.35
均值	495 020	+ 16.47	506 792	+ 19.24
标准差	61 837	- 68.7	56 839	- 71.23

注: * 为同基本模型绩效的比较

从表 3 可以看出, 相对于基本模型, 应急供应模型的供应中断数量有所降低, 输出均值明显上升而标准差则下降了, 所以供应网络的弹性明显提高. 供应商失效数量的增加, 主要是由于供应网络中供应商数量增加了几倍引起的. 就单个供应商而言, 其可靠性升高了. 但同时供应网络的成本也提高了, 主要是因为选择了成本较高的供应商, 而且增加了供应商的数量.

从表 3 还可以看出, 随着最低容忍可靠性的提高, 供应商的失效数量减少, 输出均值有所上升, 供应网络的弹性得到了提高, 但供应网络的总体成本也随之上升. 所以, 设计供应网络时, 要根据成本和弹性的平衡来选择合适的最低容忍可靠性, 使得供应网络既满足弹性要求又符合成本限制. 如果考虑供应减少和中断带来的外部惩罚成本, 应急供应网络在长期运营的情况下, 设定合适的最低容忍可靠性, 可能会使综合成本更低, 供应网络会更具有竞争优势. 总之, 采用应急供应方式, 使网络弹性增强, 单个供应商的失效对于整个供应网络的影响较小, 从而保持了供应网络的竞争优势.

5 结 语

本文在传统供应网络和多源供应网络设计的基础上, 提出应急供应的两种方法: 战略应急库存和实物期权, 并且建立了考虑供应网络可靠性的弹性供应网络模型. 该模型引入了最低容忍可靠性参数, 充分考虑了供应网络设计时弹性和成本的平衡问题. 研究表明, 采用战略应急库存和期权供应相结合的

应急供应方法设计的供应网络,能使供应中断数量显著降低,输出均值提高,输出标准差降低,进而使供应网络的弹性得到提高。

当然,只有当收益足以补偿供应网络中断导致的损失时使用战略应急库存方法才有价值,而且期权供应的提前期能否被接受也取决于节点上成本与收益的比较,未来的研究要考虑到这些方法的约束问题。另外,本文中没考虑区域供应商失效的情况,这也是下一步研究的重点。如果能建立多周期动态设计模型,将会更加接近实际,但会是相对较难的研究课题。

参考文献(References)

- [1] Cranfield University. Executive report — Supply chain vulnerability[R]. Bedford, 2002.
- [2] Peck Helen. Reconciling supply chain vulnerability with risk and supply chain management [C]. Proc of the Logistics Research Network Conf. Dublin, 2004: 412-419.
- [3] 高波. 基于信息技术的供应链结构设计与优化[J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2005, 25(3): 36-40.
(Gao Bo. Supply chain IT-based structure design of supply chain and its optimization[J]. J of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences Ed), 2005, 25(3): 36-40.)
- [4] Holling C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecological Systems, 1973, 4: 1-21.
- [5] Nagurney Anna, Matsypura Dmytro. Global supply chain network dynamics with multicriteria decision making under risk and uncertainty[J]. Transportation Research, Part E, 2005, 41: 585-612.
- [6] Vidal C J, Goetschalckx M. Strategic production distribution models: A critical review with emphasis on global supply chain models [J]. European J of Operational Research, 1997, 98(1): 1-18.
- [7] Bundschuh M. Modeling reliable supply chains [D]. Darmstadt: Darmstadt University of Technology, 2003.
- [8] Sheffi Yossi. Supply chain management under threat of international terrorism [J]. The Int J of Logistics Management, 2002, 12(2): 1-11.
- [9] Van Landeghem H, Vanmaele H. Robust planning: A new paradigm for demand chain planning [J]. J of Operations Management, 2002, 20(6): 769-783.
- [10] 刘希龙, 季建华. 基于多源供应的弹性供应网络研究 [R]. 上海: 上海交通大学, 2005.
(Liu Xi-long, Ji Jian-hua. Research on resilient supply network based on multiple sourcing [R]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2005.)
- [8] Pettersson S, Lennartson B. Hybrid modeling focused on hybrid Petri nets [C]. Proc of the 2nd European Workshop on Real-time and Hybrid Systems. Grenoble, 1995: 303-309.
- [9] Sava A T, Alla H. Combining hybrid Petri nets and hybrid automata [J]. IEEE Trans on Robotics and Automation, 2001, 17(5): 670-678.
- [10] Champagant R, Esteban P, Pingaud H, et al. Petri net based modeling of hybrid systems [J]. Computers in Industry, 1998, 36(1/2): 139-146.
- [11] David R, Alla H. On hybrid Petri nets [J]. J of discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application, 2001, 11(1): 9-40.
- [12] David R, Alla H. Discrete, continuous and hybrid Petri nets[M]. Berlin: Springer-Verlag, 2005.
- [13] Demongodin I, Koussoulas N T. Differential Petri net: Representing continuous systems in a discrete-event world[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 1998, 43(3): 573-579.
- [14] Wu Y L, Wu W M, Zeng J C, et al. Modeling and simulation of hybrid dynamical systems with generalized differential Petri nets[C]. Proc of IEEE Int Symposium on Intelligent Control. Vancouver, 2002: 789-794.
- [15] Sousa J R B, Lima A M N, Perkusich A. Modeling and analysis power consumption in sensor networks nodes based on differential hybrid Petri nets[C]. The 32nd Annual Conf of IEEE. Raleigh, 2005: 389-394.
- [16] Wu Y L, Zhen J C, Sun G J. Simulation method of hybrid system based on generalized differential Petri net [J]. J of Systems Simulation, 2003, 15(2): 730-752.
- [17] Davrazos G N, Koussoulas N T. A general methodology for stability analysis of differential Petri net [C]. Proc of the 10th Mediterranean Conf on Control and Automation-MED. Lisbon, 2002: 1085-1091.
- [18] Passino K M, Burgess K L, Michel A N, et al. Lagrange stability and boundedness of discrete event systems[J]. J of Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Application, 1995, 5(4): 383-403.
- [19] 郑大钟. 线性系统理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
(Zheng Da-zhong. Linear system theory[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.)

(上接第 1222 页)