

文章编号: 1001-0920(2004)04-0411-05

需求不确定条件下柔性供应链生产决策模型及优化

潘景铭, 唐小我

(电子科技大学 管理学院, 四川 成都 610054)

摘要: 研究需求不确定条件下柔性供应链生产决策优化问题, 以供应链期望总成本最小化为目标函数, 考虑生产柔性为约束条件, 建立了柔性供应链生产决策模型; 通过优化分析, 给出了供应链生产柔性有效边界的定义和经济意义, 在此基础上引入成本柔性系数最小化的判断标准, 从而得到最优方案的确定方法. 最后通过算例对模型进行了验证.

关键词: 供应链; 生产柔性; 成本分析; 优化决策

中图分类号: C931; F272.7 **文献标识码:** A

Flexible supply chain s volume decision model and its optimization under demand uncertainty

PAN Jingming, TANG Xiaowu

(School of Management, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054, China
Correspondent: PAN Jingming, Email: pjmgm@uestc.edu.cn)

Abstract: The optimal decision on supply chain s volume flexibility is studied under demand uncertainty. Considering minimizing the expected cost of supply chain subject to volume flexibility, the flexible supply chain s volume decision model under demand uncertainty is established. Through optimal analysis, the definition of the efficient frontiers of supply chain s volume flexibility and its economic significance are given. Based on the work, a new criterion of cost-flexibility coefficient is introduced. The optimal solution to the volume decision model is obtained. An example is given to test and illustrate the model.

Key words: supply chain; volume flexibility; cost analysis; optimal decision making

1 引言

不确定性是引起供应链管理困难的主要原因之一, 而供应链中不确定性的来源主要有供应、制造和需求, 其中需求的不确定性是最难控制的^[1]. 如何尽可能地满足市场不确定需求以获取最大利润是供应链生产组织决策的关键问题. 为解决市场需求不确定条件下供应链管理问题, 国内外学者通过许多途径进行深入研究, 其中供应链柔性的研究是主要途径之一.

供应链柔性是指供应链系统对不确定性环境作出反映的能力^[2]. 面对市场需求的不确定, 增加柔性可以增加供应链产品的销量, 提高系统资源的利用率^[3], 从而提升整个供应链的价值水平. 目前, 供应链柔性研究主要集中在柔性概念和类型、绩效评价以及柔性量化建模等方面. 文献[4, 5]从柔性作为供应链绩效评价的角度对供应链柔性作了描述性研究; 文献[6, 7]从契约的角度, 研究了如何利用柔性对供应商和顾客进行激励, 从而提高供应链绩效;

收稿日期: 2003-03-17; 修回日期: 2003-05-28

基金项目: 国家杰出青年科学基金项目(79725002).

作者简介: 潘景铭(1973—), 男, 山东曹县人, 讲师, 博士生, 从事供应链管理的研究; 唐小我(1955—), 男, 四川彭州人, 副校长, 教授, 博士生导师, 博士, 从事管理经济分析、供应链管理等研究.

文献[8]则对供应链柔性进行了量化,认为柔性代表经营资源的富余能力。柔性供应链模型主要有4种类型,即产品柔性模型、混合柔性模型、生产柔性模型和交货柔性模型。由于生产柔性是指改变整体输出水平的能力,面对市场需求水平的不确定,生产柔性模型更适用于供应链的生产决策^[2,9]。文献[10]研究了基于市场需求能够准确预测条件下,考虑供应链生产柔性满足一定水平时,供应链各节点企业资源协调配置的多目标优化决策问题。然而实际中,市场需求很难准确预测,故本文针对需求不确定情况,研究柔性供应链生产决策优化问题,并建立了供应链的柔性生产决策模型;同时,给出了柔性生产决策模型最优解的计算方法,并通过算例对模型及求解方法进行了验证。

2 需求不确定下柔性供应链优化模型分析

供应链是通过前馈的物料流和反馈的信息流,将材料供应者、产品生产者、分销服务中心和顾客连成一体系统^[11]。通常,供应链是由一个核心制造企业和许多供应商、分销售、零售商共同组成的网状结构模式,是一种涉及多个不确定市场的复杂系统。供应链的生产决策就是协调材料供应商、产品制造商、分销商之间的资源配置,以最大限度地满足顾客需求。

为便于分析,本文对供应链结构进行部分简化,设定供应链由制造商、销售商和顾客3方组成,且制造商仅生产一种产品,通过一个销售商销往一个需求不确定的市场,制造商原材料的获取不受任何限制。其需求不确定条件下供应链柔性优化模型建立如下。

2.1 成本构成分析

在组织生产过程中,供应链的每个节点企业都要发生各种生产成本。这里假定为快速响应客户需求,制造商采用MTO (make-to-order) 生产方式。这样,制造商成本仅为制造成本。设制造商的最大生产能力为 Φ ,产品产量为 Q ,制造商增加单位生产能力所需投入的固定费用为 m ,生产单位产品的变动成本为 v ,则制造成本为 $C_P = \Phi m + vQ$ 。

在MTO方式下,制造商生产的全部产品 Q 转移给销售商,若从制造商运送产品到销售商的单位运输成本为 r ,则产品运输成本为 $C_S = rQ$ 。

面对不确定性市场需求,制造商的产量与市场需求之间总是存在一定的差异,从而导致销售商存在一定的库存保管费用或延期交货的惩罚费用(如价格折扣等)。设产品市场需求量为 x ,单位产品的

库存费用为 s ,单位产品的延期交货惩罚费用为 l 。若 $x < Q$,则库存保管费用为 $C_i = (Q - x)s$;若 $x > Q$,则延期交货惩罚费用为 $C_d = (x - Q)l$ 。

因销售商存在一定的固定成本和产品到顾客的运输成本,而该费用对供应链生产决策影响不大,故通常可以忽略。

令 $y = x - Q$,用TC表示供应链总成本,则

$$TC = \Phi m + vQ + rQ + \int y |b(y)| dy \quad (1)$$

$$\text{其中 } b(y) = \begin{cases} s, & y < 0; \\ l, & y \geq 0 \end{cases}$$

2.2 模型的建立

设最终产品的单价为 p ,若市场需求量为 x ,则供应链产品销售收入为 px 。用 π 表示供应链的总利润,根据上面成本构成的分析结果,得到供应链总利润为

$$\pi(Q, \Phi) = px - TC = px - [\Phi m + vQ + rQ + \int y |b(y)| dy] \quad (2)$$

最终产品随机需求 x 的概率密度函数与分布函数分别表示为 $f(x)$ 和 $F(x)$,均值为 μ 。若用 $J(Q, \Phi)$ 表示供应链期望总利润,即 $J(Q, \Phi) = E[\pi(Q, \Phi)]$,则有

$$J(Q, \Phi) = p\mu - \left\{ \Phi m + (v + r)Q + \left[s \int_0^Q (Q - x)f(x) dx + l \int_Q^\infty (x - Q)f(x) dx \right] \right\}$$

整理后得

$$J(Q, \Phi) = p\mu - \left\{ \Phi m + (v + r)Q + (s + l)QF(Q) - lQ - s \int_0^Q xf(x) dx + l \int_Q^\infty xf(x) dx \right\} \quad (3)$$

$$\text{令 } Z(Q, \Phi) = \Phi m + (v + r)Q + (s + l)QF(Q) - lQ - s \int_0^Q xf(x) dx + l \int_Q^\infty xf(x) dx,$$

则式(3)变为

$$J(Q, \Phi) = p\mu - Z(Q, \Phi) \quad (4)$$

式中: $p\mu$ 为供应链系统的销售收入期望, $Z(Q, \Phi)$ 为供应链期望总成本。

在需求不确定条件下,供应链系统追求期望总利润的最大化,即 $\max J(Q, \Phi)$ 。由式(4)可知,在已知需求分布情况下, $p\mu$ 为常量,若求 $\max J(Q, \Phi)$,则 $\min Z(Q, \Phi)$ 。即:追求供应链系统期望总利润最大化的目标等价于追求供应链系统期望总成本最小化。

本文研究供应链生产柔性是指供应链改变产品产出水平的能力,它根据供应链的生产富余能力来计量^[9]。供应链生产柔性可表示为

$$W = (\Phi - Q) / \Phi \quad (5)$$

以供应链期望总成本最小化为目标函数,生产柔性作为约束条件,建立需求不确定条件下,供应链柔性生产决策优化模型为

$$\min_{Q, \Phi} Z(Q, \Phi), \quad (6a)$$

$$\text{s t } W = \epsilon, \quad (6b)$$

$$\Phi - Q \geq 0, \quad (6c)$$

$$Q, \Phi > 0 \quad (6d)$$

其中 ϵ 为供应链的生产柔性水平, $\epsilon \in [0, 1)$ 。约束式(6b)表示供应链生产柔性必须满足一定的柔性水平,式(6c)表示产品产量 Q 受到最大生产能力 Φ 的制约

模型(6)的意义是:在给定供应链柔性水平 ϵ 的条件下,供应链期望总成本最小

2.3 模型求解

供应链柔性生产决策模型(6)为一非线性规划问题。根据 Kuhn-Tucker 条件,模型(6)的最优解满足下式:

$$\begin{cases} v + t - l + (s + l)F(Q^*) + r_1 + r_2 - r_3 = 0, & (7a) \end{cases}$$

$$\begin{cases} m - r_1(1 - \epsilon) - r_2 - r_4 = 0, & (7b) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_1[(1 - \epsilon)\Phi^* - Q^*] = 0, & (7c) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_2(\Phi^* - Q^*) = 0, & (7d) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_3 Q^* = 0, & (7e) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_4 \Phi^* = 0, & (7f) \end{cases}$$

$$\begin{cases} r_1, r_2, r_3, r_4 \geq 0, & (7g) \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q^*, \Phi^* > 0 & (7h) \end{cases}$$

式中: r_1 为 Lagrange 乘子, $r_2 \sim r_4$ 为 Kuhn-Tucker 乘子,上标 * 表示最优解

求解方程组得

$$F(Q^*) = \frac{L - (v + t) - m / (1 - \epsilon)}{s + l}, \quad (8)$$

于是

$$Q^* = F^{-1} \left[\frac{L - (v + t) - m / (1 - \epsilon)}{s + l} \right], \quad (9)$$

由式(7c),得

$$\Phi^* = \frac{Q^*}{1 - \epsilon} = \frac{F^{-1} \left[\frac{L - (v + t) - m / (1 - \epsilon)}{s + l} \right]}{1 - \epsilon}. \quad (10)$$

Q^* 和 Φ^* 分别表示给定生产柔性水平 ϵ 下,相应的

供应链最优产量和所应具有的最大生产能力

通过式(9)和(10)可计算出在市场需求随机波动情况下,给定供应链生产柔性水平 ϵ 且满足供应链期望总成本最小时的最优生产量和所需的最大生产能力

将 Q^* 和 Φ^* 代入式(6a),经化简可得

$$Z^* = \int_0^{Q^*} xf(x)dx - s \int_0^{Q^*} xf(x)dx, \quad (11)$$

令 $Q^* = g(\epsilon)$,则式(11)转换为

$$Z^*(\epsilon) = \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx - s \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx. \quad (12)$$

式(12)表示给定柔性水平 ϵ 下的最小供应链期望总成本,它反映了最小期望总成本和柔性水平之间的关系。对于不同的柔性水平 ϵ 总有一个最小的供应链期望总成本与其对应。由式(12)确定的曲线上的点均代表不同柔性水平下最小成本的集合,同时,供应链决策者通过该曲线能够对不同成本下供应链生产柔性进行优选。为此,定义式(12)为供应链生产柔性决策的有效边界

2.4 最优方案的确定

供应链生产柔性决策有效边界上的点均可视为供应链柔性决策的满意解,为此,需要找到一个最优解,但模型(6)无法直接计算得到,因此必须引入新的判断标准

柔性代表供应链对不确定性的反映能力,柔性越大,供应链适应市场需求变化的能力越强,而增大供应链系统的柔性,便意味着供应链成本相应增加。因此,供应链决策者一般希望以最小的成本获取最大的柔性

将 $\omega = Z/\epsilon$ 定义为成本柔性系数,其经济含义为:在单位柔性下供应链系统所承担的成本,是柔性 with 供应链承担成本之间的均衡关系的度量值。所以,在单位柔性水平下供应链成本越小越好。若在柔性供应链生产决策时取成本柔性系数 ω 为极小值,则对应的 ϵ^* 为最优生产柔性水平,即

$$\min \omega$$

$$\text{s t } Z^*(\epsilon) = \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx - s \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx. \quad (13)$$

式(13)表明,在供应链生产柔性决策有效边界确定的期望总成本最小化的满意解范围内,求解 $\min \omega$ 的问题,即在有效边界上寻找最优点。其求解过程如下:

$$\frac{d\omega}{d\epsilon} = \frac{Z\epsilon - Z}{\epsilon^2}, \quad (14)$$

将式(12)代入(14),并令 $d\omega/d\epsilon = 0$, 得

$$\left\{ - (s + l)g(\epsilon)g'(\epsilon)f(g(\epsilon))\epsilon - \left[\int_{g(\epsilon)}^{\infty} xf(x)dx - s \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx \right] \right\} / \epsilon^2 = 0, \quad (15)$$

即

$$(s + l)g(\epsilon)g'(\epsilon)f(g(\epsilon))\epsilon + \int_{g(\epsilon)}^{\infty} xf(x)dx - s \int_0^{g(\epsilon)} xf(x)dx = 0, \quad (16)$$

其中 $g(\epsilon) = F^{-1} \left\{ \frac{l - (v + l) - m/(1 - \epsilon)}{s + l} \right\}$

通过解方程式(16)即可得到供应链的最优生产柔性水平 ϵ^* .

3 算例

供应链中某制造公司 A 生产一种尖端连接杆产品,主要销售市场为地区 D. 假设公司 A 每生产单位产品所需投入的生产设施费用 m 为 20 元/件,生产单位产品的变动成本 v 为 9 元/件. 该供应链在地区 D 有唯一销售商 B,从公司 A 运往销售商 B 的单位运输成本 t 为 1 元/件,销售商 B 的单位库存成本 s 为 3 元/件,销售商 B 在地区 D 的单位产品缺货成本 l 为 150 元/件. 产品的月市场需求量 x 服从正态分布,其均值 $\mu = 10\,000$ 件,方差 $\sigma^2 = 2\,000^2$.

使用 MATLAB 数学软件,计算出不同生产柔性水平 ϵ 下的供应链期望总成本和供应链最优决策数据如表 1 所示. 供应链生产柔性决策的有效边界如图 1 所示.

图 1 曲线的经济意义为:供应链决策者可依据自身的成本承受能力(或资本实力),对所能达到的最大供应链柔性进行选择. 例如,若供应链期望总成本投资可达到 80 万元,则供应链决策者可选择的最大柔性为 0.654;若供应链期望总成本最大投资只

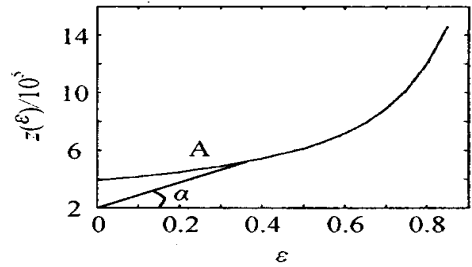


图 1 供应链生产柔性决策的有效边界

有 45 万元,则供应链决策者可选择的此成本下的最大柔性为 0.207 5.

通过图 1 还可看出,市场需求服从正态分布时的柔性供应链决策的有效边界为一条单调递增的凸函数曲线. 随着柔性的增大,供应链期望总成本逐渐增加,且变化规律为先缓后快.

在有效边界上任取一点 A,点 A 和坐标轴原点的连线与横轴的夹角为 α ,则 $\text{tg}\alpha = Z/\epsilon = \omega$. 即柔性成本系数 ω 的值等于夹角 α 的正切. 由图 1 可看出,随着 A 点在有效边界上从左向右移动,夹角 α 变化规律为:先由大变小,再由小变大. 由此表明,柔性成本系数 ω 的取值随着柔性水平 ϵ 的增大而变化,其变化规律为:先由大变小,再由小变大,中间存在唯一极小值. 由于柔性成本系数 ω 代表供应链系统在单位柔性下所承担的成本, ω 极小值的存在说明供应链决策者能以最小的成本柔性比,获得最理想的投资效益. 因此 ω 极小值点即为柔性供应链系统的最优决策点.

将数据代入式(16),通过解方程,可求得 $\epsilon^* = 0.580\,6$,此柔性水平下的供应链最优生产量为 10 523 件/月,所需最大生产能力为 25 091 件/月,销售商的订货量为 10 253 件/月,供应链期望总成本为 695 250 元.

为了更直观地反映成本柔性系数随柔性水平变动的情况,绘出了成本柔性系数曲线,如图 2 所

表 1 不同生产柔性 ϵ 条件下的供应链生产决策情况和期望总成本

ϵ	产量 Q /(件/月)	生产能力 Φ /(件/月)	期望总成本 Z /(元/月)	成本柔性系数 $\omega = Z/\epsilon$
0.00	11 572	11 572	390 026	
0.10	11 475	12 750	415 634	4 156 340
0.30	11 214	16 020	487 651	1 625 503
0.50	10 789	21 578	613 342	1 226 684
0.580 6	10 523	25 091	695 250	1 197 468
0.70	9 895	32 985	888 988	1 269 983
0.85	6 578	43 856	1 461 976	1 719 972

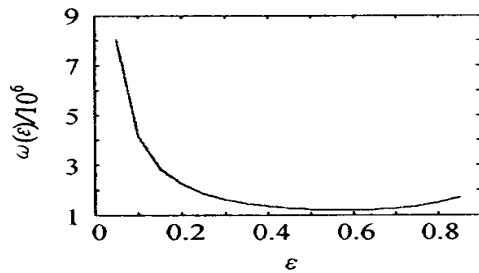


图2 成本柔性系数曲线

示 该图表明, 随着生产柔性水平的增大, 成本柔性系数取值呈先降后升的变化

4 结 语

本文研究了基于市场需求不确定条件下供应链的生产柔性决策问题, 通过成本分析建立了决策模型, 给出了供应链生产柔性决策有效边界的定义和经济意义, 并在此基础上引入成本柔性系数最小化的判断标准, 从而得出了最优方案的确定方法 本文建模过程简洁, 求解方便, 极具经济意义和应用价值

目前需求不确定性是供应链管理研究的热点和难点 本文仅研究了需求不确定条件下供应链中单生产商和销售商情景的柔性生产决策模型, 对于多销售商、多市场以及考虑供应商供应能力限制等条件下的柔性供应链设计问题, 是下一步将要研究的工作

参考文献(References):

- [1] 陈剑, 黄朔 供应链结构研究进展[J]. 系统工程学报, 2002, 17(3): 246-251.
(Chen J, Huang S. Prospects of studies on supply chain structure [J]. *J of Systems Engineering*, 2002, 17(3): 246-251.)

- [2] Beamon B M. Measuring supply chain performance [J]. *Int J of Operations & Production Management*, 1999, 19(3): 275-292
- [3] Jordan W C, Graves S C. Principles on the benefits of manufacturing process flexibility [J]. *Management Science*, 1995, 41(4): 577-594
- [4] PR TM. Scor model [EB/OL]. http://www.supply-chain.org/html/scor-overview_cfn, 2000-05-15
- [5] Gunasekaran A, Patel C, Tirriroglu E. Performance measures and metrics in a supply chain environment [J]. *Int J of Operations & Production Management*, 2001, 21(1/2): 71-87.
- [6] Tsay A A. The quantity flexibility contract and supplier-customer incentives [J]. *Management Science*, 1999, 45(10): 1339-1358
- [7] Tsay A A, Lovejoy W S. Quantity flexibility contract and supply chain performance [J]. *Manufacturing & Service Operations Management*, 1999, 1(2): 88-111.
- [8] Voudouris V T. Mathematical programming techniques to debottleneck the supply chain of fine chemical industries [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 1996, 20(6): 1269-1274
- [9] Slack N. The flexibility of manufacturing systems [J]. *Int J of Operations & Production Management*, 1987, 7(4): 35-45
- [10] Sabri E H, Beamon B M. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design [J]. *The Int J of Management Science*, 2000, 28(5): 581-598
- [11] Stevens J. Integrating the supply chain [J]. *Int J of Physical Distribution and Materials Management*, 1989, 19(8): 3-8

(上接第 410 页)

- [4] 俞卞章, 李志钧, 金明录. 数字信号处理[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1994. 68-101.
- [5] Ronald R Yager, Dimitar P Filev. Approximate clustering via the mountain method [J]. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1994, 24(8): 1274-1284
- [6] Jang J S R, Sun C T, Mizutani E. *Neuro-Fuzzy and Soft Computing* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1997. 56-90
- [7] 祖家奎, 戴冠中, 张骏. 基于聚类算法的神经模糊推理系

统结构和参数的优化[J]. 系统仿真学报, 2002, 14(4): 501-503

(Zu Jia-kui, Dai Guan-zhong, Zhang Jun. The structure and parameters optimization of neural-fuzzy inference system via clustering algorithm [J]. *J of System Simulation*, 2002, 14(4): 501-503

- [8] Chen S, Mulgrew B, McLaughlin S. A clustering technique for digital communications channel equalization using radial basis function network [J]. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 1993, 4(2): 570-579