

文章编号:1003 - 207(2003)01 - 0042 - 04

多分销中心供应链模型及其牛鞭效应的 H 控制

黄小原, 卢 震

(东北大学工商管理学院, 沈阳 110004)

摘要:本文在文^[1]具有一个分销中心供应链模型的基础上,建立了具有多个分销中心的供应链结构模型,采用供应链上游库存与订货偏差波动之和与下游顾客需求偏差波动之比描述牛鞭效应。提出顾客末端需求波动最差条件下 H 控制方法,以抑制牛鞭效应。这一方法本质就是供应链末端需求波动最差情况下,制定供应链管理的最优决策。并且以一个石油分销系统为对象进行了供应链牛鞭效应的 H 控制仿真实验。

关键词:供应链;牛鞭效应;库存;订货;H 控制

中图分类号:C931 **文献标识码:**A

0 引言

牛鞭效应是供应链中普遍存在的需求波动传递增大现象,这种效应影响供应链管理过程中库存、物流和运输的效率。到目前为止,牛鞭效应的研究工作主要集中在这样几个方面,即牛鞭效应的存在性;牛鞭效应的量化;牛鞭效应弱化及其稳定性优化。应该说,牛鞭效应的存在性问题已经进行了大量工作,人们认识到牛鞭效应的五个主要原因即,需求预测方法、供应短缺、订货提前期、订货批量和价格波动。关于牛鞭效应存在性问题的研究参见文[1,3,4,6]。牛鞭效应的量化就是指对于供应链中供应、制造、销售各个环节订货波动的定量描述。一般来说,现在大多采用方差来描述波动,并进一步分析结果,关于牛鞭效应量化的研究参见文[2,5]。人们也提出了减少牛鞭效应的方法,其中一个很重要的方法就是信息共享,见文[2,4,7]。牛鞭效应的优化问题,是指供应链系统在牛鞭效应的影响下,如何采取一种优化策略,使订货稳定、库存稳定。这一问题的研究不多见,见文[1]。

本文所进行的工作是改进文[1]供应链结构模型,建立具有多具分销中心供应链末端需求扰动的状态空间动态系统;改进一般牛鞭效应量化方法,建立具有供应链末端需求扰动影响上游订货和库存波

动的扰动指标,以此描述牛鞭效应;应用 H 控制理论,提出供应链牛鞭效应的控制理论方法,其本质就是考察供应链末端需求波动最差条件下,如何采取一个良好的控制策略,使牛鞭效应减低到最低程度。

1 供应链模型与牛鞭效应定量描述

1.1 供应链模型

文[1]提出了供应链多层结构模型,该模型包括市场中的顾客层、中间集结层和分销中心层三个部分组成,它讨论了由一个分销中心和多个顾客的多层模型。这一模型核心,是以库存为中心的状态空间方程。

现在,就来讨论经过改进的供应链多分销中心结构模型。首先,考虑供应链的标称系统,即

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + u_{1,k} - d_{1,k} \quad (1)$$

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - L u_{1,k} + u_{2,k} \quad (2)$$

式(1)是市场顾客层对于供应链上游部分库存动态方程。 $x_{1,k}$ 是市场顾客层供应链上游部分订货的库存, n 维列向量; $u_{1,k}$ 是对于顾客订货量, n 维列向量, $d_{1,k}$ 是需求的确定性 n 维向量。式(2)是分销中心对于上游部分库存动态方程。 $x_{2,k}$ 是分销中心订货的库存, m 维向量; $u_{2,k}$ 是对于上游部分(如制造商)提供的订货量, m 维向量; $L u_{1,k}$ 是分销中心对顾客订货集结量,矩阵 L 将顾客订货的 n 维向量集结转换为分销中心的 m 维需求向量,其中 L 是 m 行 n 列维矩阵,即

收稿日期:2002 - 02 - 19

基金项目:辽宁省自然科学基金资助项目(9910200208)

作者简介:黄小原(1947 -),男(汉族),河南罗山县人,东北大学教授,博士生导师,研究方向:供应链管理、金融工程。

$$L = \begin{pmatrix} 11 & 12 & \dots & 1n \\ 21 & 22 & \dots & 2n \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m1 & m2 & \dots & m \end{pmatrix} \quad (3)$$

其中, $l_{ij} \geq 0, i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, \sum_{j=1}^n l_{ij} = 1, j = 1, 2, \dots, n$ 。中间集结矩阵 L 的行向量 $(l_{i1}, l_{i2}, \dots, l_{in})$ 实际上是一个加权系数行向量,它表明供应链中第 i 个中间集结点对于 n 个顾客订货的分担比例。

式(1)、(2)也可写成矩阵形式,即

$$\begin{bmatrix} x_{1,k+1} \\ x_{2,k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{1,k} \\ x_{2,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L & I \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{1,k} \\ u_{2,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -d_{1,k} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

供应链矩阵形式的标称系统,即

$$x_{k+1} = x_k + Bu_k + d_k \quad (5)$$

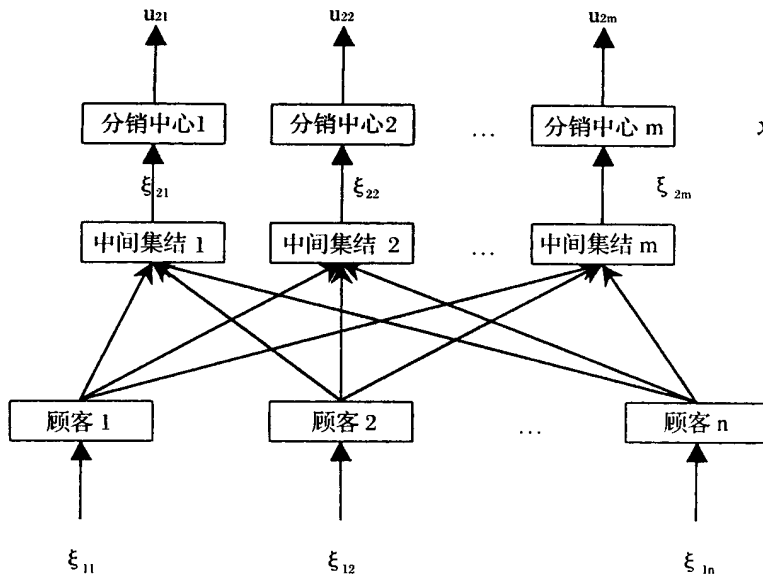
其中, $B = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -L & I \end{bmatrix}, d_k = \begin{bmatrix} -d_{1,k} \\ 0 \end{bmatrix}$

供应链受到末端需求不确定性扰动时,这种末端扰动记作 Fw_k ,当扰动向供应链前端分销中心、制造商传递过程时,形成牛鞭效应。此时,供应链的实际系统,如图 1 所示,即

$$x_{k+1}^f = x_k^f + Bu_k^f + d_k + Fw_k \quad (6)$$

其中, $F = \text{diag}(F_1, 0)$,这里, F_1 是 n 维矩阵, F 是 $(n+m)$ 维矩阵。供应链末端需求的不确定性可以进行这样的描述,即

$$w_k = d_k + F_1 w_{k-1} \quad (7)$$



$$x_{2,k+1}^f = x_{2,k}^f + u_{2,k}^f - \xi_2$$

$$\xi_2 = Lu_{1,k}^f$$

$$x_{1,k+1}^f = x_{1,k}^f + u_{1,k}^f - \xi_1$$

图 1 多个分销中心供应链模型的实际系统

其中, x_k 是供应链中 n 维需求向量, d_k 是需求的不确定性部分 n 维向量, w_k 是 n 维不确定性扰动的向量。供应链系统式(6)由于受到末端需求扰动,这种不确定性环境将使供应链系统中库存变量(即状态变量)、订货变量(即控制变量)均受到扰动。这样,受到扰动后的库存、订货变量成为 x_k^f, u_k^f 。

现在,进一步考察供应链系统库存和订货的偏差,即

$$\tilde{x}_k = x_k^f - x_k \quad (8)$$

$$\tilde{u}_k = u_k^f - u_k \quad (9)$$

此时,多个分销中心的供应链的偏差系统,即

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{x}_k + B\tilde{u}_k + Fw_k \quad (10)$$

1.2 牛鞭效应的一种定量描述

供应链牛鞭效应的定量描述,大都采用方差形式的刻画。这种描述对于牛鞭效应的定量分析具有作用。但是,对于具有比较复杂的结构,如本文前述的多个分销中心供应链系统而言,这种描述就不方便了;进一步,研究牛鞭效应的动态控制就更为困难。这里采用对于牛鞭效应的偏差量描述。所谓牛鞭效应,就是供应链末端需求波动向前端传递过程中的增强效应。这里以供应链多个分销中心模型为对象,牛鞭效应就是低端的需求波动,引起前端波动增强过程。这里,采用供应链中前端库存和订货波动对末端需求波动之比来描述牛鞭效应,即

$$\beta_{1,k} = \frac{\tilde{x}_{1,k}^T Q_1 \tilde{x}_{1,k} + \tilde{u}_{1,k}^T T_1 \tilde{u}_{1,k}}{w_k^T w_k} \quad (11)$$

$$\frac{1}{2} \tilde{x}_{2,k}^T Q_2 \tilde{x}_{2,k} + \frac{1}{2} \tilde{u}_{2,k}^T \tilde{u}_{2,k} \quad (12)$$

其中, Q 是半正定矩阵 $Q = \text{diag}(Q_1, Q_2)$, Q_1, Q_2 也是半正定矩阵。 $1, k$ 描述顾客层对于需求波动的牛鞭效应; $2, k$ 描述分销中心对于末端需求波动的牛鞭效应。这样, 供应链牛鞭效应可以用较一般的参数 $1, k$ 和 $2, k$ 描述。参数 $1, k$ 和 $2, k$ 描述了供应链牛鞭效应, $1, k$ 和 $2, k$ 越大, 则牛鞭效应越强; $1, k$ 和 $2, k$ 越小, 则牛鞭效应越小。

2 牛鞭效应的 H 控制

2.1 牛鞭效应的控制机理

对于供应链系统偏差系统式(10), 牛鞭效应参数 $1, k$ 和 $2, k$ 式(11)、(12) 描述了供应链末端需求波动引起前端库存、订货波动的过程。如何选取一个适当的控制 \tilde{u}_k 使牛鞭效应尽量减弱, 特别是供应链末端需求剧烈波动, 即最差外界扰动环境条件, 选取控制 \tilde{u}_k 使供应链系统牛鞭效应降低到最低程度。用控制理论的系统分析的话来讲, 这是一个 H 控制问题。问题的实质是在 w 扰动很大即牛鞭效应条件下, 选取控制 \tilde{u}_k 使 J 最小, 或者

$$\min_{\tilde{u}_k} \max_{w_k} J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N (\tilde{x}_k^T Q \tilde{x}_k + \tilde{u}_k^T \tilde{u}_k - w^T w) \quad (13)$$

式中,

$$Q = Q_x^T Q_x = \text{diag}(Q_1, Q_2) = \text{diag}(Q_{x1}^T Q_{x1}, Q_{x2}^T Q_{x2})$$

是半正定矩阵, 是关于 w 扰动的加权因子。对于供应链偏差系统(10)和(13), 是一个 H 控制问题, 它可以等价于离散动态对策问题(10)、(13)的鞍点解, 即 (\tilde{u}_k, w_k) 。

2.2 H 控制算法

供应链系统(10)、(13)所描述的牛鞭效应 H 控制问题的现代物流管理意义是明确的, 即如何在牛鞭效应的不确定性情况下, 考虑“最差情况”。供应链管理策略, 以使库存状态和订货控制偏差即牛鞭效应达到最小程度, 亦即 $\tilde{x}_k - > 0, \tilde{u}_k - > 0$ 。

对于问题(10)、(13), 根据参考文献^[8-10] 很容易得到下述结果, 即当且仅当

$$I - F^T S_{k+1} F > 0, \quad k = 0, \dots, N-1 \quad (14)$$

问题存在唯一鞍点解

$$\tilde{u}_k = -B^T S_{k+1} [I + (BB^T - F^T F) S_{k+1}]^{-1} \tilde{x}_k \quad (15)$$

$$w_k = -F^T S_{k+1} [I + (BB^T - F^T F) S_{k+1}]^{-1} \tilde{x}_k \quad (16)$$

其中 S_k 满足 Riccati 方程

$$S_k = Q + S_{k+1} [I + (BB^T - F^T F) S_{k+1}]^{-1} S_{k+1}, \quad S_N = Q \quad (17)$$

如果 (I, B) 镇定, (I, Q_x) 可测, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $S_k \rightarrow S > 0$, 渐近稳定系统中存在反馈控制 \tilde{u}_k 。问题(10)、(13)显然满足 (I, B) 镇定、 (I, Q_x) 可测的条件, 因此, 供应链系统具有渐近稳定的 H 控制解, 即只需要求解式(17) Riccati 方程中正定矩阵 S 。在实际仿真计算中, 对于式(17), 当 $k \rightarrow \infty$ 时, 即进行足够多的迭代计算之后, $S_{k+1} - S_k \rightarrow 0$, 则可以认为得到了 Riccati 方程 S 的稳定解。这样可计算得到稳定的 u 解。

因此, 供应链实际系统的库存量和订货量为

$$x^f_k = \tilde{x}_k + x_k \quad (18)$$

$$u^f_k = \tilde{u}_k + u_k \quad (19)$$

其中, 库存量状态 x_k 和订货量控制 u_k 可以根据供应链管理者的计划给出标称设定。

3 石油分销系统的仿真

供应链管理系统的仿真实验, 是根据辽化公司汽油市场的情况设计的。辽化公司是一个大型石油化工企业, 石油化纤是公司的主要产品。这里仅就石油产品为例进行仿真实验设计。假设石油产品有 $n = 10$ 个顾客(群), $m = 3$ 个分销中心。对于石油问题的供应链分销系统, 这里设定 $F = [I_{10} \quad 0_3]$, $Q = I_{13}$, $w = 4$ 。

设库存量偏差量的初始条件

$$\tilde{x}_1^T = (0.10, 0.11, 0.08, -0.07, 0.06, 0.09, -0.09, -0.02, 0.05, 0.08, 0.30, 0.25, 0.41) \text{ (千吨)}$$

供应链中顾客分销集结层矩阵

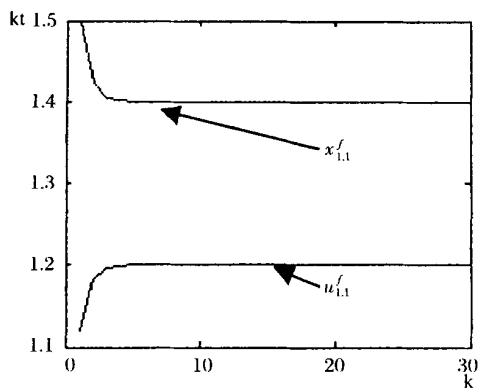
$$L = \begin{bmatrix} 0.2 & 0.4 & 0.2 & 0.1 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0.1 \\ 0.6 & 0.5 & 0.8 & 0 & 0.8 & 0.4 & 0 & 0.9 & 1 & 0.8 \\ 0.2 & 0.1 & 0 & 0.9 & 0.2 & 0.3 & 1 & 0.1 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}_{3 \times 10}$$

进一步, 假设石油分销系统的标称系统库存和需求分别是, 即

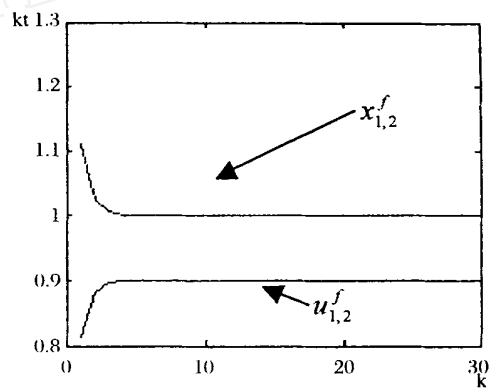
$$x^T = (1.4, 1.0, 0.8, 1.1, 1.3, 2.0, 1.1, 1.5, 0.7, 1.0, 3.4, 4.1, 3.9) \text{ (千吨)}$$

$$u^T = (1.2, 0.9, 0.75, 0.9, 1.2, 1.15, 1.0, 1.4, 0.5, 0.8, 3.2, 4.0, 3.7) \text{ (千吨)}$$

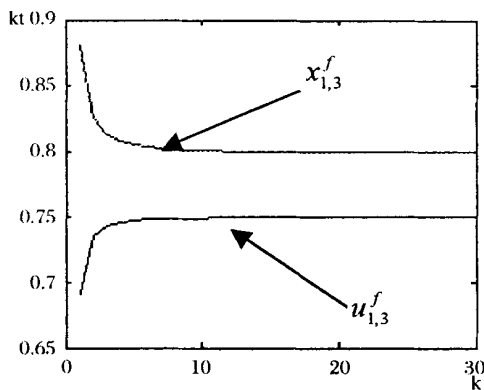
当 k 是有限时间, 这里假设为 $k = 30$ 时。当 $k \rightarrow \infty$ 时, 有增益矩阵

$$K = \begin{bmatrix} 0.63319 & -0.01369 & -0.01651 & -0.00730 & -0.01598 & -0.01230 & -0.00703 & -0.01710 & -0.01822 & -0.01625 & 0.02042 & 0.04024 & 0.01523 \\ -0.01369 & 0.63061 & -0.01612 & -0.00420 & -0.01174 & -0.01345 & -0.00201 & -0.01296 & -0.01417 & -0.01393 & 0.04961 & 0.03158 & 0.00472 \\ -0.01651 & -0.01612 & 0.62511 & 0.00226 & -0.01982 & -0.01194 & 0.00353 & -0.02274 & 0.02566 & -0.02109 & 0.01930 & 0.05626 & -0.00669 \\ -0.00730 & -0.00420 & 0.00226 & 0.60754 & 0.00561 & -0.01292 & -0.04386 & -0.00083 & 0.00395 & -0.00168 & 0.00946 & -0.00748 & 0.09171 \\ -0.01598 & -0.01174 & -0.01982 & -0.00561 & 0.62532 & -0.01098 & -0.00677 & -0.02406 & -0.02598 & -0.02098 & -0.00933 & 0.05692 & 0.01477 \\ -0.01230 & -0.01345 & -0.01194 & -0.01292 & -0.01098 & 0.63431 & -0.01244 & -0.01080 & -0.01061 & -0.01146 & 0.03585 & 0.02390 & 0.02641 \\ -0.00703 & -0.00201 & 0.00353 & -0.04386 & 0.00677 & -0.01244 & 0.59845 & -0.00149 & 0.00379 & -0.00162 & -0.00486 & -0.00715 & 0.10244 \\ -0.01710 & -0.01296 & -0.02274 & 0.00083 & -0.02406 & -0.01080 & -0.00149 & 0.62058 & -0.02970 & -0.02340 & -0.00989 & 0.06493 & 0.00381 \\ -0.01822 & -0.01417 & -0.02566 & 0.00395 & -0.02598 & -0.01061 & 0.00379 & -0.02970 & 0.61404 & -0.02582 & -0.01045 & 0.07294 & 0.00715 \\ -0.01625 & -0.01393 & -0.02109 & -0.00168 & -0.02098 & -0.01146 & -0.00162 & -0.02340 & -0.02582 & 0.62643 & 0.00498 & 0.05659 & 0.00404 \\ -0.08602 & -0.17960 & -0.08518 & -0.04194 & 0.00798 & 0.13343 & 0.00464 & 0.00840 & 0.00881 & -0.03860 & 0.59947 & -0.01926 & -0.00950 \\ -0.24028 & -0.19846 & -0.32210 & 0.00470 & -0.32301 & -0.15801 & 0.00424 & -0.36392 & -0.40483 & -0.32256 & -0.01926 & 0.47777 & -0.01139 \\ -0.08115 & -0.03834 & 0.00432 & -0.38033 & -0.08123 & -0.12384 & -0.42310 & -0.03849 & 0.00424 & -0.03845 & -0.00950 & -0.01139 & 0.52553 \end{bmatrix}$$


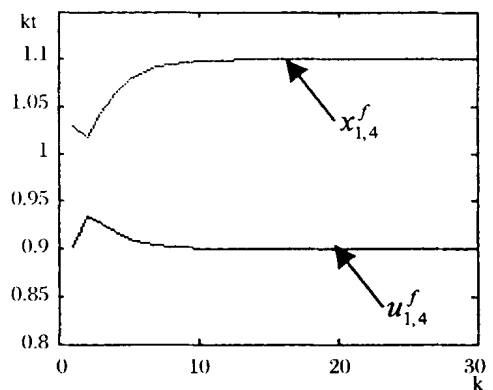
(a)



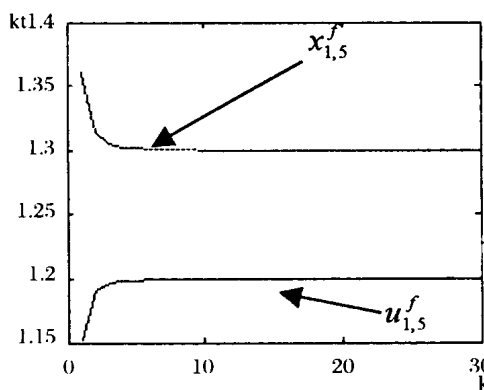
(b)



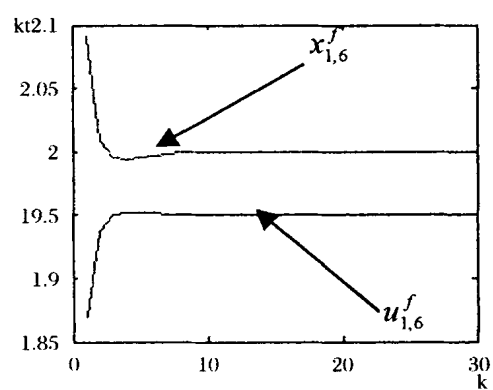
(c)



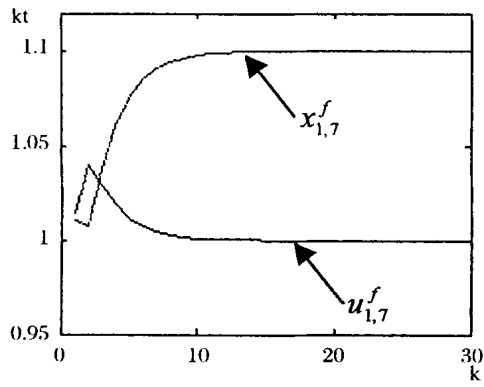
(d)



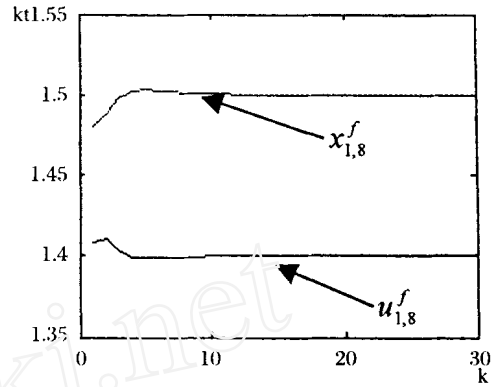
(e)



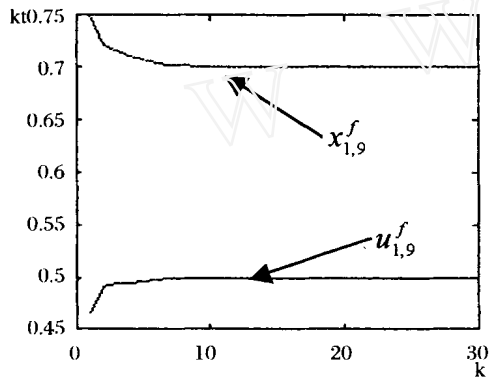
(f)



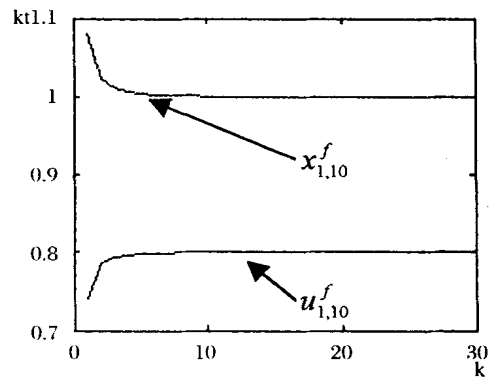
(g)



(h)

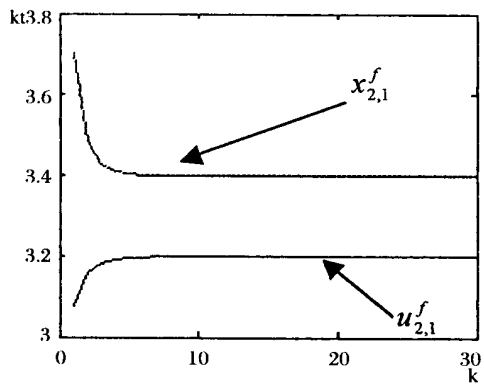


(i)

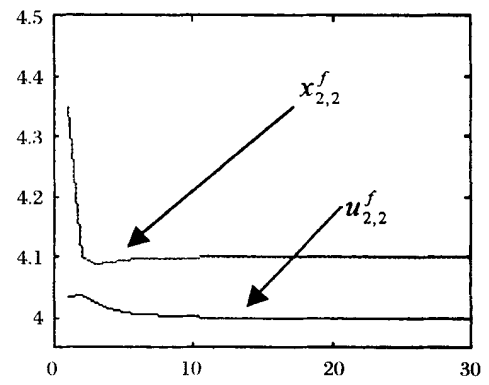


(j)

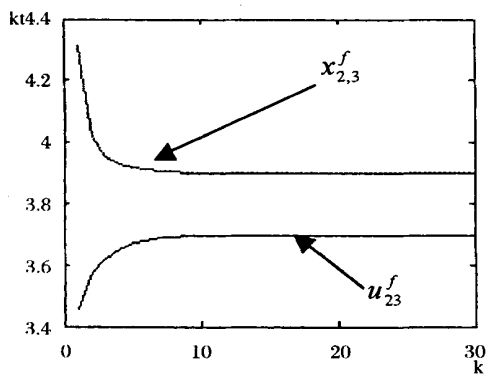
图2 (a) - (j) 供应链中顾客层实际库存 $x_{1,k}^f$ 和供应 $u_{1,k}^f$ 的变化的曲线



(a)



(b)



(c)

图3 (a) - (c) 为供应链中分销中心层实际库存 $x_{2,k}^f$ 和供应 $u_{2,k}^f$ 的变化的曲线

由图 2 能够看出,通过供应链 H 控制,供应链顾客层各节点间的订货量 $u_{1,k}^f$ 和库存 $x_{1,k}^f$,很快地趋于其标称值 u_k, x_k 。由图 3 看出,供应链分销中心层的订货量 $u_{2,k}^f$ 和库存 $x_{2,k}^f$ 也很快趋近于标称值。由图 4 则可以看出,通过 H 的控制方法可以使供应链的牛鞭效应参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 降低,即减弱了供应链在其末端需求扰动最大时的牛鞭效应。由于篇幅所限,图 2、图 3 仅给出了 $k = 1, 2, \dots, 30$ 有限时间的订货和库存变化。当 $k \rightarrow \infty$ 时,则只给出了增益矩阵 K 。

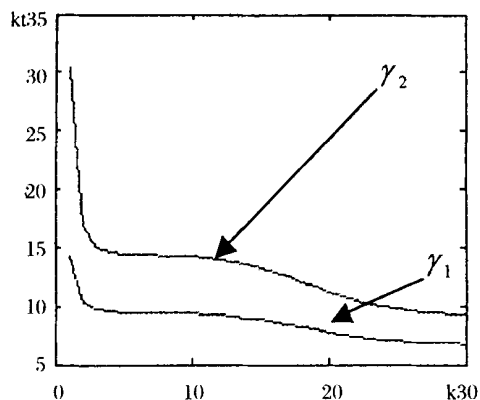


图 4 供应链牛鞭效应参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 的变化曲线

4 结语

本文对于文献^[1]的供应链模型进行了改进,建立了多分销中心供应链模型。特别对于供应链中牛鞭效应进行了定量描述,并进行了 H 控制理论研究。仿真实验表明,供应链的 H 控制有效抑制并减弱了牛鞭效应。

参考文献:

- [1] Baganha, M. and Cohen. M. , The stabilizing effect on inventory in supply chains[J]. Operational Research, 1998, 46(s3) :572 - 583.
- [2] Chen, F. Drezner, Z. Ryan, J. K. and Levi. D. S. , Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead times, and information [J]. Management Science, 2000, 46(3) :436 - 443.
- [3] Lee. N. Padmanabhan, S. and Whang, S. , The bullwhip effect in supply chains[J]. Sloan Management Review, 1997, 38(2) :93 - 102.
- [4] Lee. N. Padmanabhan, S. and Whang, S. , Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect [J]. Management Science, 1997, 43(4) :546 - 558.
- [5] Chen, F. Drezner, Z. Ryan, J. and Smich. D. , The bullwhip effect: management insights on the impact of forecasting and information variability in a supply chain, edited by Tayur, S. Ganeshan, R. and Magazine, M. , Quantitative models for supply chain management [M]. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [6] Kaha, J. , Inventories and the volatility of production [J] , The American Economic Review, 1987, 77(5) :667 - 679.
- [7] 张钦, 达庆利, 沈原才, 在 ARIMA(0, 1, 1) 需求下的牛鞭效应与信息共享的评价 [J]. 中国管理科学, 2001, 9(6) : 1 - 6.
- [8] Carvani, P. , On H criterion for macroeconomic policy evaluation [J]. Journal of Economic dynamic and control, 1995, 19(5 - 7) :961 - 984.
- [9] Todmo, G. , Worst case design in the time domain: the maximum principle and the stand H problem [J]. Mathematics of control, signals and system, 1990, 3(3) :301 - 324.
- [10] Yaesh, I and Shaked, V. , Minimum H norm regulation of linear discrete time systems and its relation to linear quadratic discrete game [J]. IEEE Trans, Automatic control, 1990, 35(9) :1061 - 1064.

The Model with Multi-distribution Center and H Control Strategies of Bullwhip Effect in Supply Chain

HUANG Xiao-yuan, LU Zhen

(School of Business and Management, Northeastern University, Shenyang 110004, China)

Abstract: Based on literature [1], applying a quantifying warp wave method, a model of supply chain with multi-distribution center is developed to describe the bullwhip effect. And the H control strategies of bullwhip effect is developed. It's essence is that under the worst station of demand variability, make the optimal decision of supply chain manage. A simulation of petroleum distribute system is done.

Key words: supply chain; bullwhip effect; inventory; order; H control strategies