

文章编号: 1001-0920(2003)02-0155-04

供应链牛鞭效应的 H 控制应用研究

黄小原, 卢 震

(东北大学 工商管理学院, 辽宁 沈阳 110004)

摘 要: 针对供应链中普遍存在的牛鞭效应, 改进和建立了供应链多层结构模型, 采用偏差波动定量描述牛鞭效应, 运用 H 控制理论提出了牛鞭效应的控制方法。以某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, 仿真结果表明, 供应链的 H 控制抑制并减弱了牛鞭效应。

关键词: 供应链; 牛鞭效应; 库存; 需求; H 控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Application of H control strategies of bullwhip effect in supply chain

HUANG Xiaoyuan, LU Zhen

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

Abstract: Applying a quantifying wave method, a multi-echelon model of supply chain is developed to describe the bullwhip effect. And the H control strategy of bullwhip effect is developed. Its essence is that under the worst station of demand variability, the optimal decision of supply chain management is made. A simulation of petroleum distribute system is done. The simulation result shows that H control of the supply chain makes the bullwhip effect weaker.

Key words: Supply chain; Bullwhip effect; Inventory; Demand; H control strategy

1 引 言

牛鞭效应是供应链中普遍存在的需求波动增大现象, 在现代物流和供应链管理中, 已引起人们极大关注。这是因为牛鞭效应影响着现代物流和供应链运营, 影响着供应链系统的经济效益。在供应链管理的订货供应过程中, 末端需求波动沿供应链向前端上游增加, 这样就会导致:

- 1) 供应链中供应、制造、销售各个环节库存量和库存费用增加;
- 2) 供应链中供应、制造、销售各个环节物流迟缓, 使得分销中心库存冗余和制造商生产过量;
- 3) 供应链中供应、制造、销售各个环节运输和劳

动效率降低。

因此, 如何减弱牛鞭效应是供应链管理研究和应用的重要工作。

迄今为止, 牛鞭效应的研究工作主要集中在如下几方面:

- 1) 牛鞭效应的存在性^[1~4];
- 2) 牛鞭效应的量化^[5,6];
- 3) 牛鞭效应弱化及其稳定性优化^[1,3,5,7]。

本文所要进行的工作如下:

- 1) 改进文献[1]供应链结构模型, 建立具有供应链末端需求扰动的状态空间动态系统;
- 2) 改进一般牛鞭效应量化方法, 建立具有供应

收稿日期: 2002-02-01; 修回日期: 2002-04-01。

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, 河南罗山人, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、智能控制等研究; 卢震(1972—), 男, 湖北黄陂人, 博士生, 从事供应链管理、电子商务的研究。

链末端需求扰动的上游订货波动的扰动指标, 以此描述牛鞭效应:

3) 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, 使牛鞭效应减到最低程度。

2 供应链模型与牛鞭效应定量描述

2.1 供应链多层结构模型

文献[1]提出了供应链多层结构模型, 该模型由市场中的顾客层、中间集结层和分销中心层 3 部分组成, 并讨论了由多个顾客和一个分销中心构成的多层模型。这一模型的核心是以库存为中心的状态空间方程。该模型将供应链顾客层作为末端, 并将顾客需求分为确定性部分和随机部分, 同时考虑了末端顾客需求随机部分的均值和方差。但是, 供应链的实际系统随机部分的波动特性(如均值、方差)难以测量, 而将其作为不确定的扰动则更为实际。

供应链末端需求的不确定性可描述为

$$\xi_1 = d_1 + Fw \quad (1)$$

其中: ξ_1 是供应链中 n 维需求向量, d_1 是需求的确定性部分的 n 维向量, w 是 n 维不确定性扰动的向量, F_1 是 n 维矩阵。

下面讨论经过改进的供应链多层结构模型。首先, 考虑供应链的标称系统

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

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - l^T u_{1,k} + u_{2,k} \quad (3)$$

式(2) 是市场顾客层对于供应链上游部分库存动态方程, 其中: $x_{1,k}$ 是市场顾客层供应链上游部分订货的库存 (n 维列向量), $u_{1,k}$ 是顾客层向分辨中心的订货量 (n 维列向量), d_1 是需求的确定性 n 维向量。式(3) 是分销中心对于上游部分库存动态方程, 其中: $x_{2,k}$ 是分销中心订货的库存 (1 维标量), $u_{2,k}$ 是对于上游部分(如制造商)提供的订货量 (1 维标量), $l^T u_{1,k}$ 是分销中心对顾客需求集结量 (标量), l 是 n 维列向量, 即 $l^T = (1, 1, \dots, 1)$ 。

将式(2) 和(3) 写成矩阵形式, 即

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

于是, 供应链矩阵形式的标称系统为

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

其中

$$B = \begin{bmatrix} I & 0 \\ -l^T & 1 \end{bmatrix}, \quad d_k = \begin{bmatrix} -d_{1,k} \\ 0 \end{bmatrix}$$

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), 扰动向供应链前端分销中心、制造商传递过程中形成牛鞭效应。此时, 供应链的实际系统如图 1 所示, 即

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

其中: $F = \begin{bmatrix} F_1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$, F_1 是 n 维矩阵, F 是 $(n+1)$ 维矩阵。因此, 供应链末端扰动仅作用于顾客层的 n 维系统(式(2)), 而没有对分销中心(式(3))起作用。供应链系统(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(状态变量)、需求变量(控制变量)均受到扰动。这样, 受到扰动后的库存、需求变量成为 x_k^f, u_k^f 。

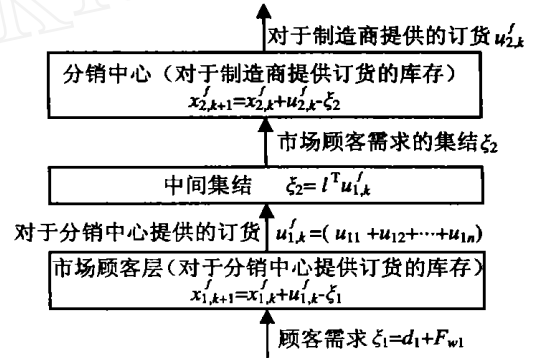


图 1 供应链多层结构模型的实际系统

现在, 进一步考察供应链系统库存和订货的偏差, 即

$$\tilde{x}_k = x_k^f - x_k \quad (7)$$

$$\tilde{u}_k = u_k^f - u_k \quad (8)$$

此时, 供应链的偏差系统为

$$\tilde{x}_{k+1} = \tilde{x}_k + B \tilde{u}_k + Fw_k \quad (9)$$

2.2 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。这种描述对于牛鞭效应的定量分析具有作用, 但对于具有比较复杂的结构, 如前述的多层结构供应链系统, 这种描述就不方便了, 进而研究牛鞭效应的动态控制就更为困难。本文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。这里以供应链多层结构模型为对象, 对于式(9) 而言, 牛鞭效应就是末端的需求波动 w , 引起前端 \tilde{u}_1 和 \tilde{u}_2 的波动增强过程。这里, 采用供应链中前端订货波动对末端需求波动之比来描述牛鞭效应, 即

$$\gamma_{1,k} = \frac{\tilde{u}_k^T \tilde{u}_k}{w_k^T w_k} \quad (10)$$

其中 $\gamma_{1,k}$ 是前端订货波动与末端需求波动之比。进而, 如果同时考虑库存偏差量, 那么, 牛鞭效应的描述可以增加对库存量偏差波动的考虑, 于是有

$$\gamma_{2,k} = \frac{\tilde{x}_k^T Q \tilde{x}_k + \tilde{u}_k^T \tilde{u}_k}{w_k^T w_k} \quad (11)$$

其中 Q 是半正定矩阵。这样, 供应链牛鞭效应便可以用较一般的参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 描述。参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 描述了供应链牛鞭效应, $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 越大, 牛鞭效应越强; 反之, 则牛鞭效应越小。

3 牛鞭效应的 H 控制

3.1 牛鞭效应的控制机理

对于供应链系统的偏差系统(9), 牛鞭效应参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 描述了供应链末端需求波动引起前端订货波动的过程。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, 即在最差外界扰动环境条件下, 选取控制 \tilde{u}_k 使得供应链系统牛鞭效应降低到最低程度。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

$$\min_{\tilde{u}_k} \max_{w_k} J = \frac{1}{2} \sum_{k=0}^N (\tilde{x}_k^T Q \tilde{x}_k + \tilde{u}_k^T \tilde{u}_k - \beta^2 w_k^T w_k) \quad (12)$$

式中: $Q = Q^T Q_x$ 是半正定矩阵, β 是关于 w 扰动的加权因子。对于供应链偏差系统(9) 和(12), 是一个 H 控制问题, 它可以等价于离散动态对策问题(9) 和(12) 的鞍点解, 即 (\tilde{u}_k, w_k) 。

3.2 H 控制算法

供应链系统(9) 和(12) 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”的供应链管理策略, 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 $\tilde{x}_k \rightarrow 0, \tilde{u}_k \rightarrow 0$ 。

对于问题(9) 和(12), 根据参考文献[8~ 10] 很容易得到下述结果, 即当且仅当

$$I - \beta^2 F^T S_{k+1} F > 0, \quad 0 \leq k < N \quad (13)$$

问题存在唯一鞍点解

$$\tilde{u}_k = - [B^T S_{k+1} [I + (BB^T - \beta^2 F F^T) S_{k+1}]^{-1} \tilde{x}_k] \quad (14)$$

$$w_k = \beta^2 [F^T S_{k+1} [I + (BB^T - \beta^2 F F^T) S_{k+1}]^{-1} \tilde{x}_k] \quad (15)$$

其中 S_k 满足 Riccati 方程

$$S_k = Q + S_{k+1} [I + (BB^T -$$

$$\beta^2 F F^T) S_{k+1}]^{-1}, \quad S_N = Q \quad (16)$$

如果 (I, B) 镇定, (I, Q_x) 可测, 当 $k \rightarrow \infty$ 时, $S_{k+1} - S_k \rightarrow 0$, 渐近稳定系统中存在反馈控制 \tilde{u}_k 。问题(9) 和(12) 显然满足 (I, B) 镇定和 (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(16) Riccati 方程中正定矩阵 S 。

在实际仿真计算中, 对于式(16), 当 $k \rightarrow \infty$ 时, 即进行足够多的迭代计算后, $S_{k+1} - S_k \rightarrow 0$, 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 \tilde{u} 解。

因此, 供应链实际系统的库存量和订货量为

$$x_k^f = \tilde{x}_k + x_k \quad (17)$$

$$u_k^f = \tilde{u}_k + u_k \quad (18)$$

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。

4 仿 真

本文以某大型化工企业的石油产品为对象进行供应链管理系统的仿真实验设计。假设石油产品有 $n = 10$ 个顾客(群), 1 个分销中心。对于石油问题的供应链分销系统, 这里设定

$$F = \begin{bmatrix} I_{10} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad Q = I, \quad \beta = 0.001$$

设库存量偏差量的初始条件为

$$\tilde{x}_1 = (0.10, 0.11, 0.08, -0.07, 0.06, 0.09, -0.09, -0.02, 0.05, 0.08, 0.51)^T$$

进一步, 假设石油分销系统的标称系统库存和订货分别为

$$x = (1.4, 1.0, 0.8, 1.1, 1.3, 2.0,$$

$$1.1, 1.5, 0.7, 1.0, 5.1)^T$$

$$u = (1.2, 0.9, 0.75, 0.9, 1.2, 1.15,$$

$$1.0, 1.4, 0.5, 0.8, 4.9)^T$$

k 为有限时间(设 $k = 30$) 的仿真结果如图 2 所示。

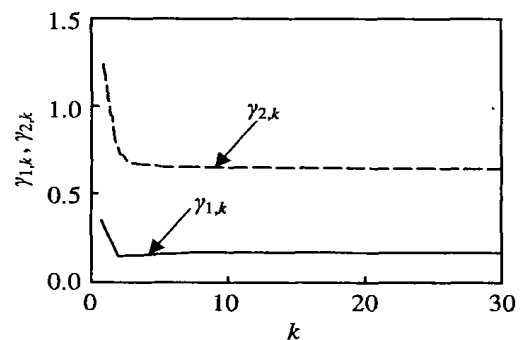


图 2 供应链牛鞭效应参数 $\gamma_{1,k}$ 和 $\gamma_{2,k}$ 的变化曲线

当 k 时,有增益矩阵

$$K = \begin{bmatrix} -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & 0.02185 & -0.08684 \\ 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & 0.02185 & -0.23414 & -0.08684 \\ -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & -0.01714 & 0.06969 \end{bmatrix}$$

由图2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。

限于篇幅,对于 k 时的情况,本文只给出了增益矩阵 K 。

5 结 语

本文对文献[1]的供应链模型进行了改进,建立了供应链多层结构模型。特别采用了偏差变量的描述方法对供应链中的牛鞭效应进行了量化描述,并进行了 H 控制理论研究。仿真实验表明,供应链的 H 控制抑制并减弱了牛鞭效应。

参考文献(References):

[1] Baganha M, Cohen M. The stabilizing effect on inventory in supply chains[J]. *Operational Research*, 1998, 46(3): 572-583

[2] Lee N, Padmanabhan S, Whang S. The bullwhip effect in supply chains[J]. *Sloan Management Review*, 1997, 38(2): 93-102

[3] Lee N, Padmanabhan S, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect[J]. *Management Science*, 1997, 43(4): 546-558

[4] Kaha J. Inventories and the volatility of production[J]. *The American Economic Review*, 1987, 77(5): 667-679

[5] Chen F, Drezner Z, Ryan J K, et al. 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

[6] Chen F, Drezner Z, Ryan J, et al. The bullwhip effect: Management insights on the impact of forecasting and information variability in a supply chain[A]. *Quantitative Models for Supply Chain Management*[C]. Kluwer Academic Publishers, 2000. 417-440

[7] 张钦, 达庆利, 沈厚才. 在ARMA(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
(Zhang Q, Da Q L, Shen H C. Bullwhip effect and assess of the information sharing under ARMA(0, 1, 1) demand[J]. *Chinese J of Management Science*, 2001, 9(6): 1-6)

[8] Carvani P. On H criterion for macroeconomic policy evaluation[J]. *J 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, Shaked V. Minimum H norm regulation of linear discrete time systems and its relation to linear quadratic discrete game[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(9): 1061-1064

下 期 要 目

仿真优化研究进展..... 王 凌, 等

非自治非线性DEDS的周时研究..... 程轶平, 郑大钟

一类基于神经网络非线性观测器的鲁棒故障检测和诊断..... 马立玲, 等

广义系统Wiener状态滤波新算法..... 许 燕, 邓自立

具有不确定未知界的相似组合系统的鲁棒自适应跟踪控制..... 刘粉林, 等

关联规则衡量标准的研究..... 罗 可, 吴 杰

