

文章编号: 1001-0920(2012)12-1787-06

信息共享受限条件下的供应链网络系统牛鞭效应控制策略

李 翀, 刘思峰

(南京航空航天大学 经济与管理学院, 南京 210016)

摘 要: 研究在信息共享受限条件下供应链网络库存系统的牛鞭效应控制问题, 建立了包括市场需求、信息可获得性、信息及时性等不确定性因素的库存网络系统状态转移模型, 从系统内部动力学机制的角度分析了牛鞭效应的成因, 提出了动态库存控制策略, 并给出了策略参数设计的线性矩阵不等式组算法. 运用系统稳定性理论, 深入分析了信息共享对牛鞭效应的影响, 并通过仿真结果验证了库存控制策略的有效性和实用性.

关键词: 供应链管理; 牛鞭效应; 库存控制; 信息共享

中图分类号: F252; TP29

文献标志码: A

Bullwhip effect control strategy in supply chain networks with limited information sharing

LI Chong, LIU Si-feng

(College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China. Correspondent: LI Chong, E-mail: lichongxtgc@yahoo.cn)

Abstract: The bullwhip effect problem in supply chain networks with limited information sharing is studied. Based on the dynamic mechanism of inventories in supply chain networks, a supply chain inventory network system state transition model is presented, which includes uncertainties of demands, information availability and fluency. Then a dynamic inventory control strategy is proposed and transformed into the optimization problem of linear matrix inequalities. Furthermore, the value of information sharing in reducing the bullwhip effect is studied. Simulation results show the effectiveness and feasibility of the proposed method in reducing bullwhip effect and in improving supply chain performance.

Key words: supply chain management; bullwhip effect; inventory control; information sharing

1 引 言

全球经济一体化进程的加快和市场竞争的日益加剧, 对供应链管理提出了更高的要求. 有效的供应链管理能够使企业快速响应市场变化、优化资源配置、协调生产活动、满足顾客个性化需求, 从而降低企业成本, 提升产品和服务质量, 提高企业经济利润并为企业带来持久的竞争优势. 然而, 供应链系统自身以及其所在的社会经济环境的众多不确定性因素, 往往导致供应链管理的低效, 增加了供应链管理的难度. 如著名的牛鞭效应问题^[1,2]——供应链运作中需求信息的扭曲放大现象, 成为供应链管理的难点和焦点.

作为供应链系统普遍存在的现象, 牛鞭效应一方面直接影响到供应链系统中企业的库存水平, 导致库存成本的增加; 另一方面, 需求信息的失真降低了企

业对市场需求变化的应对能力, 从而增加了企业生产成本, 降低了整个供应链系统的效率. 牛鞭效应的研究多从其成因和对策两方面展开: 从其成因来看, 主要有需求波动、订货批量决策、价格波动、环境变异^[3-4]等. 从其对策来看, 黄小原等^[5]应用 H_∞ 控制理论的方法来减弱牛鞭效应并将该方法推广到具有再制造、废弃时滞和需求不确定性的闭环供应链系统中^[6], 类似方法可参见文献 [7]. Ivanov 等^[8]将数学规划方法和过程控制相结合, 为供应链管理提供了新的思路. 李刚等^[9]在 ARIMA 研究框架下提出并验证了反牛鞭效应的存在, 拓展了供应链牛鞭效应问题的研究领域. 其后, Wang 等^[10]详细研究了 3 类 ARIMA 模型对需求信息偏差的影响. 模糊自适应控制^[11]、预测与仿真^[12-13]等方法也被用于供应链牛鞭效应控制研

收稿日期: 2011-04-24; 修回日期: 2011-06-24.

基金项目: 国家自然科学基金项目(90924022/G01); 国家社会科学基金重点项目(08AJY024).

作者简介: 李翀(1983—), 女, 博士生, 从事供应链系统建模与优化控制的研究; 刘思峰(1955—), 男, 教授, 博士生导师, 从事灰色系统理论、系统评价与预测等研究.

究中. 信息作为供应链网络系统的重要组成元素, 其可获得性和准确性不仅决定了供应链成员间的协调关系, 也对牛鞭效应有着直接影响. 信息共享已被证实是抑制牛鞭效应的有效措施之一: 文献 [14] 证实了一个由批发商和零售商组成的二阶供应链中, 需求信息的共享可以降低上游企业的订单波动和库存波动; 文献 [15] 从库存信息共享的角度对牛鞭效应进行了分析研究. Dejonckheere 等^[16]指出, 在不同的库存补充策略下(例如 OUT 策略和平滑策略)信息共享的效果不同, 但都能有效降低多阶供应链中上游节点的订单波动. 汪传旭等^[17]结合 ARIMA 方法, 指出在不同的需求自回归系数作用下, 需求信息延迟会造成完全不同的牛鞭效应效果, 类似结果也在库存决策研究^[18]中得以证实.

到目前为止, 牛鞭效应的研究多是以单条或两条供应链为研究对象, 较少从供应链网络系统的角度进行分析研究, 并且分析多从需求信息的偏差波动出发, 定性分析较多, 定量方法又忽略了供应链信息流子系统的不确定性因素的影响, 这正是牛鞭效应的关键成因. 本文针对供应链网络系统的牛鞭效应问题, 从供应链库存系统的内部动力学特征角度出发, 构建了包括市场需求、信息可获得性、信息及时性等不确定性因素的库存网络系统状态转移模型, 给出了信息共享受限条件下的动态库存控制策略, 深入分析了信息共享对牛鞭效应的影响.

2 供应链库存网络系统的状态转移模型

2.1 基本状态转移模型

由于受到信息不对称等供应链系统内外因素的影响, 市场终端消费需求信息的扭曲放大将以牛鞭效应的形式扩散至整个供应链系统. 为应对需求的波动, 供应链成员往往采取加大库存的方法, 这必将增加企业的库存管理成本, 也使得市场需求波动的经济风险放大并扩散至整个供应链系统.

以企业 i 为例, 在第 k 个生产周期中, 企业 i 将其原料订单 $d_{li}(k)$ 发送给上游供应商 l . 由于交货延迟和企业供货能力的限制, 实际订单量与收货数量往往不一致. 假定 k 时期企业 i 从供应商 l 处实收 $t_{li}(k)$ 的货物; 类似地, $d_{ij}(k)$ 和 $d_{ik}(k)$ 分别表示企业 i 收到的来自下游企业 j 和 k 的订单, 而 $t_{ij}(k)$ 和 $t_{ik}(k)$ 是企业 i 实际的发货数量. x_i 为企业 i 的真实库存水平, \hat{x}_i 为市场需求稳定时的正常库存水平. 令 $b_i(k)$ 为 k 时期企业 i 因自身产品库存短缺而积压的未处理订单量, 可得如下关系:

$$\begin{aligned} x_i(k+1) &= x_i(k) + t_{li}(k) - (t_{ij}(k) + t_{ik}(k)), \quad (1) \\ t_{ij}(k) + t_{ik}(k) &= \end{aligned}$$

$$\min\{x_i(k), b_i(k) + d_{ij}(k) + d_{ik}(k)\}, \quad (2)$$

$$b_i(k+1) =$$

$$b_i(k) + d_{ij}(k) + d_{ik}(k) - t_{ij}(k) - t_{ik}(k). \quad (3)$$

无库存短缺时, 企业 i 的库存动态平衡关系为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + d_{li}(k) - (d_{ij}(k) + d_{ik}(k)). \quad (4)$$

当终端消费需求波动超过供应链系统能平稳运作的波动范围时, 往往触发牛鞭效应, 造成库存网络系统的波动. 为此考虑库存水平的波动状态 δx_i , 有

$$\begin{aligned} \delta x_i(k+1) &= x_i(k+1) - \hat{x}_i(k+1) = \\ \delta x_i(k) + \delta d_{li}(k) &- (\delta d_{ij}(k) + \delta d_{ik}(k)). \quad (5) \end{aligned}$$

可见, 下一时期的库存波动 δx_i (即牛鞭效应在库存状态上的表现), 不仅受到当期企业自身订单的影响, 还受到下游相关企业的订单波动影响. 现实中, 企业的订单制定也往往受到需求预期的影响, 为此本文采用如下的需求波动预测模型:

$$\delta d_{ij}(k) = -k_{ij}\delta x_j(k), \quad \delta d_{ik}(k) = -k_{ik}\delta x_k(k), \quad (6)$$

其中 k_{ij} 和 k_{ik} 为预测比例系数. 为简化模型描述, 下文分析中将 $x_i(k)$ 和 $u_i(k)$ 分别替代式 (6) 中的 $\delta x_i(k)$ 和 $\delta d_i(k)$. 由式 (5) 和 (6) 得

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) + x_j(k)k_{ij} + x_k(k)k_{ik}. \quad (7)$$

从企业 i 的库存动态模型 (7) 出发, 借助矩阵理论可得供应链库存网络系统的状态转移模型

$$\begin{cases} X(k+1) = (I + A)X(k) + U(k), \\ A = [k_{ij}]. \end{cases} \quad (8)$$

其中: A 是订单预测系数矩阵, 体现了库存网络系统的拓扑结构和节点企业间的供需关系; $X(k)$ 是供应链网络系统的库存波动状态向量. 从供应链管理角度来看, 由各企业的订单补偿量 $\delta d_i(k)$ 组成的 $U(k)$ 可作为该库存网络系统状态模型的控制参数.

现实中, 库存信息获取的准确性和及时性直接影响供应链系统运作的效率^[19], 但由于受到社会、经济、技术等因素的限制, 信息获取成为提升供应链管理的最大阻碍. 因此, 本文关注于如何在信息受限条件下降低牛鞭效应的影响. 库存信息的可获得性由下式表示:

$$Y(k) = C \cdot X(k). \quad (9)$$

其中: C 为信息可获得矩阵, $Y(k)$ 为可获知的库存状态向量. 为了对整个供应链系统进行有效的控制, 需要先对不可获知库存信息的节点进行状态预测. 采用如下加权平均方法:

$$X_c(k+1) = A_c X_c(k) + B_c Y(k). \quad (10)$$

其中: X_c 为预测的库存系统状态, A_c 和 B_c 为权重矩阵. 借鉴文献 [20-21] 的方法, 本文提出如下的动态库存控制策略:

$$U(k) = C_c X_c(k) + D_c Y(k). \quad (11)$$

其中: C_c 和 D_c 分别为库存状态预测值和真实值的权重矩阵. 至此, 式(8)~(11) 构成了供应链库存控制系统的基本状态转移模型.

2.2 信息共享受限条件下的状态转移模型

本文通过不同的信息丢失情景来描述库存网络系统中信息的可获得性和及时性, 主要针对两方面: 用于库存策略参数设计的库存状态信息和作为系统控制变量的订单补偿量信息. 借鉴文献[22]的方法, 这两类信息在供应链运作中的可获得性分别由参数 s_1 和 s_2 决定. s_1 和 s_2 分别以一定的概率取值 1 或 0: 当参数值取 1 时 (s_1 以概率 r_1 , s_2 以概率 r_2), 相应的信息可被及时获知并更新; 当参数值取 0 时 (分别以概率 $1 - r_1$ 和 $1 - r_2$), 信息被丢失, 在此情景下, 库存系统模型中的相应参数将保持信息丢失前一个时刻的状态值. 表 1 汇总了不同信息丢失情景下的库存系统状态特征.

表 1 不同信息丢失情景下的系统状态参数对应关系

| 情景 i | 情景参数 | 概率 | 库存系统状态参数 |
|--------|--------------------|----------------------------|--|
| 1 | $s_1 = 0, s_2 = 0$ | $p_1 = (1 - r_1)(1 - r_2)$ | $U(k) = U(k - 1)$ $\hat{Y}(k) = \hat{Y}(k - 1)$ |
| 2 | $s_1 = 1, s_2 = 1$ | $p_2 = r_1 r_2$ | $U(k) = V(k)$ $\hat{Y}(k) = Y(k)$ |
| 3 | $s_1 = 0, s_2 = 1$ | $p_3 = (1 - r_1)r_2$ | $U(k) = U(k - 1)$ $\hat{Y}(k) = Y(k)$ |
| 4 | $s_1 = 1, s_2 = 0$ | $p_4 = r_1(1 - r_2)$ | $U(k) = V(k)$ $\hat{Y}(k) = \hat{Y}(k - 1)$ |

表 1 中: $\hat{Y}(k)$ 为真正用于库存控制参数设计的库存状态信息; $V(k)$ 为求解所得的库存控制量 (即订单补偿量), 但受 s_1 的影响, 真正作用于系统的是 $U(k)$. 由此, 在 2.1 节模型的基础上, 得到信息共享受限条件下的库存网络系统状态转移模型为

$$Z(k + 1) = M_i \cdot Z(k), \quad i = 1, 2, 3, 4. \quad (12)$$

其中: $Z(k) = [X^T(k), \hat{Y}^T(k), X_c^T(k), U^T(k - 1)]^T$, M_i 对应于表 1 描述的情景 i , 即

$$M_1 = \begin{bmatrix} I + A & 0 & 0 & I \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & B_c & A_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$M_2 = \begin{bmatrix} I + A & D_c & C_c & 0 \\ C(I + A) & CD_c & CC_c & 0 \\ 0 & B_c & A_c & 0 \\ 0 & D_c & C_c & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_3 = \begin{bmatrix} I + A & 0 & 0 & I \\ C(I + A) & 0 & 0 & C \\ 0 & B_c & A_c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I \end{bmatrix},$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} I + A & D_c & C_c & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \\ 0 & B_c & A_c & 0 \\ 0 & D_c & C_c & 0 \end{bmatrix},$$

3 库存控制策略的参数设计

从上一节的模型描述易知, 库存网络系统状态转移模型 (12) 的稳定性从库存角度反映了供应链控制系统对牛鞭效应的抑制能力. 至此, 库存控制策略参数的设计问题变成: 寻找适当的预测权重矩阵 A_c, B_c 和控制权重矩阵 C_c, D_c , 保证系统 (12) 的稳定性. 在文献 [23] 定义的指数稳定性基础上, 引出如下保证系统指数稳定性的库存控制策略参数设计条件.

定理 1 给定供应链库存系统的信息流速率 r_1 和 r_2 , 如果存在对称正定矩阵 $X, Y, Z, W \in R^{n \times n}$ (n 为供应链系统的成员数目) 和标量 $\alpha, \alpha_i > 0, i = 1, 2, 3, 4$, 线性矩阵不等式组

$$\begin{bmatrix} -Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X & (I + A)X & 0 \\ 0 & X(I + A)^T & -\alpha_1^{-2}X & 0 \\ YB_c^T & 0 & 0 & 0 \\ ZA_c^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & W & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\leftarrow \begin{bmatrix} B_c Y & A_c Z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & W & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1 - \alpha_1^{-2})Y & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_1^{-2}Z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (1 - \alpha_1^{-2})W & 0 \end{bmatrix} < 0, \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} -W & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -Y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -X \\ 0 & 0 & X(I + A)^T C^T & X(I + A)^T \\ YD_c^T & YB_c^T & YD_c^T C^T & YD_c^T \\ ZC_c^T & ZA_c^T & ZC_c^T C^T & ZC_c^T \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow$$

$$\leftarrow \begin{bmatrix} 0 & D_c Y & C_c Z & 0 \\ 0 & B_c Y & A_c Z & 0 \\ C(I + A)X & CD_c Y & CC_c Z & 0 \\ (I + A)X & D_c Y & C_c Z & 0 \\ -\alpha_2^{-2}X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2^{-2}Y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\alpha_2^{-2}Z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\alpha_2^{-2}W \end{bmatrix} < 0, \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} -Z & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Y & 0 & C(I+A)X \\ 0 & 0 & -X & (I+A)X \\ 0 & X(I+A)^T C^T & X(I+A)^T & -\alpha_3^{-2}X \\ YB_c^T & 0 & 0 & 0 \\ ZA_c^T & 0 & 0 & 0 \\ 0 & WC^T & W & 0 \\ B_c Y & A_c Z & 0 & \\ 0 & 0 & CW & \\ 0 & 0 & W & \\ \leftarrow 0 & 0 & 0 & \\ -\alpha_3^{-2}Y & 0 & 0 & \\ 0 & -\alpha_3^{-2}Z & 0 & \\ 0 & 0 & (1-\alpha_3^{-2})W & \end{bmatrix} < 0, \quad (15)$$

$$\begin{bmatrix} -W & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -Z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -X & (I+A)X \\ 0 & 0 & X(I+A)^T & -\alpha_4^{-2}X \\ YD_c^T & YB_c^T & YD_c^T & 0 \\ ZC_c^T & ZA_c^T & ZC_c^T & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ D_c Y & C_c Z & 0 & \\ B_c Y & A_c Z & 0 & \\ D_c Y & C_c Z & 0 & \\ \leftarrow 0 & 0 & 0 & \\ (1-\alpha_4^{-2})Y & 0 & 0 & \\ 0 & -\alpha_4^{-2}Z & 0 & \\ 0 & 0 & -\alpha_4^{-2}W & \end{bmatrix} < 0, \quad (16)$$

$$\alpha_1^{(1-r_1)(1-r_2)} \alpha_2^{r_1 r_2} \alpha_3^{(1-r_1)r_2} \alpha_4^{r_1(1-r_2)} > \alpha > 1 \quad (17)$$

成立, 则信息共享受限条件下的库存网络系统(12)是指数稳定的, 并且可得库存控制策略为 $V(k) = C_c X_c(k) + D_c \hat{Y}(k)$.

证明 针对信息共享受限条件下的库存网络系统(12), 设定如下形式的李雅普诺夫方程:

$$\begin{cases} V(Z(k)) = Z^T(k) \Phi Z(k), \\ \Phi = \text{diag}(P, Q, R, S). \end{cases} \quad (18)$$

其中: $P, Q, R, S \in R^{n \times n}$ 为对称正定矩阵; $Z(k)$ 见模型(12). 由此可得

$$\begin{aligned} & V(Z(k+1)) - \alpha_i^{-2} V(Z(k)) = \\ & X^T(k+1) P X(k+1) + \hat{Y}^T(k+1) Q \hat{Y}(k+1) + \\ & X_c^T(k+1) R X_c(k+1) + U^T(k) S U(k) - \\ & \alpha_i^{-2} \{ X^T(k) P X(k) + \hat{Y}^T(k) Q \hat{Y}(k) + \\ & X_c^T(k) R X_c(k) + U^T(k-1) S U(k-1) \}. \end{aligned} \quad (19)$$

情景 1: $i = 1$, 库存控制系统为

$$Z(k+1) = M_1 \cdot Z(k),$$

调用式(19)得

$$V(Z(k+1)) - \alpha_1^{-2} V(Z(k)) = Z^T(k) D_1 Z(k), \quad (20)$$

$$D_1 = [M_1^T \Phi M_1 - \alpha_1^{-2} \Phi] =$$

$$\begin{bmatrix} -\alpha_1^{-2} P & & & \\ 0 & Q + B_c^T R B_c - \alpha_1^{-2} Q & & \\ 0 & & A_c^T R B_c & \\ 0 & & & 0 \\ & 0 & 0 & \\ & B_c^T R A_c & 0 & \\ \leftarrow A_c^T R A_c - \alpha_1^{-2} R & & 0 & \\ & & 0 & (1-\alpha_1^{-2})S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (I+A)^T P (I+A) & 0 & 0 & (I+A)^T P \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ P(I+A) & 0 & 0 & P \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha_1^{-2} P & & & \\ 0 & Q + B_c^T R B_c - \alpha_1^{-2} Q & & \\ 0 & & A_c^T R B_c & \\ 0 & & & 0 \\ & 0 & 0 & \\ & B_c^T R A_c & 0 & \\ \leftarrow A_c^T R A_c - \alpha_1^{-2} R & & 0 & \\ & & 0 & (1-\alpha_1^{-2})S \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (I+A)^T \\ 0 \\ 0 \\ I \end{bmatrix} P [(I+A) \ 0 \ 0 \ I]. \quad (21)$$

如果 $D_1 < 0$, 利用 Schur 定理, 式(21)等价于

$$\begin{bmatrix} -R^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & -P^{-1} & (I+A) \\ 0 & (I+A)^T & -\alpha_1^{-2} P \\ B_c^T & 0 & 0 \\ A_c^T & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 \\ B_c & A_c & 0 \\ 0 & 0 & I \\ \leftarrow 0 & 0 & 0 \\ (1-\alpha_1^{-2})Q & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_1^{-2} R & 0 \\ 0 & 0 & (1-\alpha_1^{-2})S \end{bmatrix} < 0. \quad (22)$$

对式(22)左、右乘对角矩阵 $\text{diag}(I, I, P^{-1}, Q^{-1}, R^{-1}, S^{-1})$, 并用 X, Y, Z, W 分别替换其中的 $P^{-1}, Q^{-1}, R^{-1}, S^{-1}$, 最终可得不等式(13). 证明中, $D_1 < 0$ 必须成立; 进一步, 由 $D_1 < 0$ 可得 $V(X(k+1)) - \alpha_1^{-2} V(X(k)) < 0$, 这满足了文献[23]的指数稳定性条

件, 故式 (13) 为情景 1 下的库存网络系统指数稳定条件.

情景 2~情景 4: $i = 2, 3, 4$ 的证明过程类似情景 1, 此处不再一一列出.

此外, 将文献 [23] 指数稳定性定理中的 r_1, r_2, r_3, r_4 参数用表 1 中的情景概率 p_1, p_2, p_3, p_4 替换, 并设参数 $m = 4$, 可得式 (17). \square

从上述定理证明过程可知, 信息共享受限的供应链网络系统中, 由需求波动引起的牛鞭效应 (库存波动) 能否被抑制, 供应链库存控制策略是否有效, 是由供应链网络系统的内部动力学特征、信息共享程度以及库存策略共同决定的. 满足线性矩阵不等式组 (13)~(17) 约束的订单补偿量设计可以实现供应链系统的指数稳定, 起到抑制牛鞭效应的作用.

4 仿真分析

本文以一个简单的供应链库存网络系统 (如图 1 所示) 进行仿真分析, 以验证动态库存控制策略对牛鞭效应的抑制能力, 并深入分析信息共享对系统稳定性的影响.

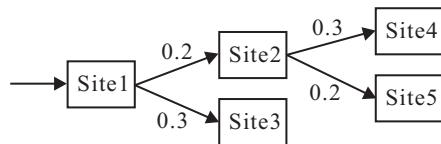


图 1 仿真系统结构图

图 1 中, 箭头上的数字对应于订单预测系数矩阵 A 中的元素 k_{ij} , 系统状态向量为 $X(k) = (x_1(k), \dots, x_5(k))^T$, 库存控制参数为 $U(k) = (u_1(k), \dots, u_5(k))^T$, 信息可获得矩阵为 $C = \text{diag}(1, 1, 1, 0, 0)$, 表示上游节点 1, 2, 3 的库存状态信息可获知, 而下游 4 和 5 的状态不可知. 系统初始状态 $X(0) = [0, 15, 20, 15, 30]^T$, $\hat{Y}(0) = [0, 15, 20, 15, 30]^T$, $X_c(0) = [0, 0, 0, 0, 0]^T$, $U(0) = [1, 1, 1, 0, 0]^T$. 其余参数设定见表 2, 采用 Matlab7.0 软件, 最终仿真结果见图 2~图 5.

表 2 库存网络系统仿真情景设定

| 情景 | 信息流通率 | 系统参数 | $\alpha = \prod_{i=1}^4 \alpha_i^{p_i}$ |
|----|------------------------|--|---|
| 1 | $r_1 = r_2 = 0$ | $\alpha_1 = 0.88, \alpha_2 = 2$ $\alpha_3 = 0.9, \alpha_4 = 0.8$ | $\alpha = 0.880$ |
| 2 | $r_1 = r_2 = 1$ | $\alpha_1 = 0.88, \alpha_2 = 2$ $\alpha_3 = 0.9, \alpha_4 = 0.8$ | $\alpha = 2.000$ |
| 3 | $r_1 = 0.5, r_2 = 0.9$ | $\alpha_1 = 2.88, \alpha_2 = 2$ $\alpha_3 = 1.9, \alpha_4 = 0.8$ | $\alpha = 1.901$ |
| 4 | $r_1 = 0.9, r_2 = 0.5$ | $\alpha_1 = 2.88, \alpha_2 = 2$ $\alpha_3 = 1.9, \alpha_4 = 1.73$ | $\alpha = 1.903$ |

图 2 和图 3 中, $r_1 = r_2 = 1$ 情景对应的线条分别显示了库存网络系统的两个特例, 即信息完全不共享与信息完全共享. 在初始控制量 $U(0) = [-10.5, -4.5,$

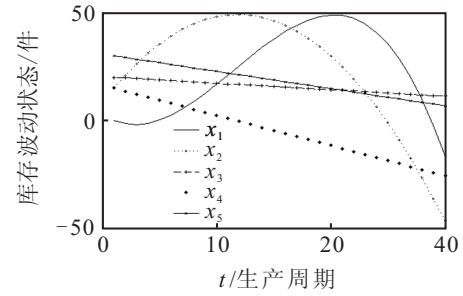


图 2 $r_1 = r_2 = 0$ 时库存控制系统状态的仿真结果

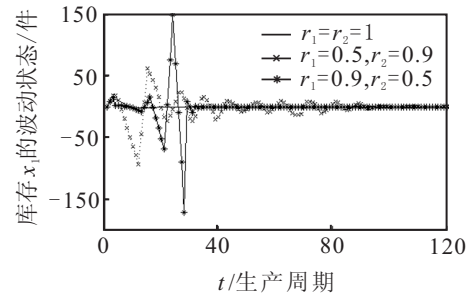


图 3 不同流通率参数组成下库存系统状态的仿真结果

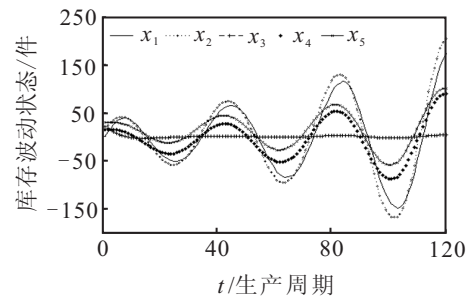


图 4 库存控制仿真系统中的牛鞭效应

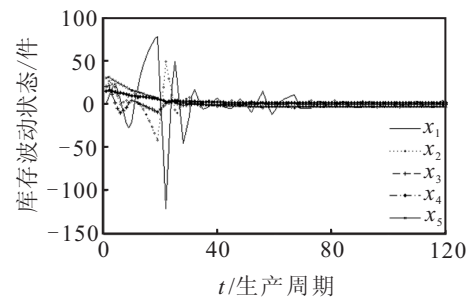


图 5 有效的库存控制参数设计效果图

$-0.3, -1.4, -0.8]^T$ 作用下, 图 2 的库存波动是不可控的; 相反, 图 3 情景 2 中, 库存波动的幅值和系统返回平稳状态所花费的时间都小于其他仿真情景. 这说明牛鞭效应的抑制效果在很大程度上取决于供应链库存信息的可获得性和及时性. 图 3 中另两条曲线为不同流通率参数组成情景下的库存 x_1 波动效果图. 情景 3 中库存状态信息的可获得性和及时性高于情景 4, 但其控制策略信号的实时性较低. 对比可见, 情景 3 的库存波动较为平缓, 但波动延续时间长. 由分析可知, 信号流参数 r_1 的大小对波动延续时间影响较大, 参数 r_2 对库存波动幅值的影响较大, 两者在牛鞭效应控制中起到的作用不同.

为进一步研究控制变量初始值对系统的影响, 设 $\hat{Y}(0) = [0, 15, 20, 0, 0]^T$, 其余参数同情景 3, 结果见图 4. 当 $\hat{Y}(0)$ 的元素组成与信息可获得矩阵 C 严格对应时, 系统会处于不平稳状态, 图 4 恰好描绘了一个典型的牛鞭效应现象. 由此可见, 库存控制变量的初始值设定对系统动态有着很大的影响, 这也说明了本文第 2 部分提到的预测机制的重要性. 在此情景下, 从式 (11) 可以看出, 当库存状态预测初始设定值 $X_c(0) = [0, 0, 0, 0, 0]^T$ 时, 由于 C 的作用, 单从控制权重矩阵 C_c 和 D_c 着手不能有效地控制库存波动. 此时, 可考虑调整库存状态预测初始值. 图 5 为 $X_c(0) = [0, 0, 0, 10, 15]^T$ 时, 供应链系统在最佳实时控制 (新的 C_c 和 D_c) 作用下的库存演变特征. 由此可见, 通过调整库存控制策略权重矩阵, 可以抵消由于信息获取受限带来的负面影响, 使库存系统收敛, 从而抑制末端需求波动带来的牛鞭效应.

通过上面的对比分析可知, 本文所提出的动态库存控制策略可以有效地抑制牛鞭效应对库存的影响, 提升供应链库存网络系统的稳定性; 但供应链库存系统对信息共享的程度较为敏感, 信息的可获得性、及时性以及信息包含的内容在很大程度上决定了库存系统的演变特征, 也影响到最终牛鞭效应控制的效果. 实际运用中, 应在已有的信息共享技术基础上, 根据对控制时间和波动幅值的具体要求来对库存策略进行权衡和选择.

5 结 论

信息的可获得性和及时性是供应链系统牛鞭效应的重要影响因素. 本文针对供应链库存网络系统的牛鞭效应控制问题, 考虑供应链中信息可获得性和及时性的限制, 构建了信息共享受限条件下的供应链库存系统状态转移模型. 根据库存系统的动力学特征, 提出了一种动态库存控制策略, 并给出了策略参数设计的线性矩阵不等式组算法. 仿真结果表明: 信息共享在很大程度上决定了系统牛鞭效应的控制效果; 当信息共享受限时, 通过合理的预测机制和订单补偿量设计, 也可实现较好的供应链系统稳定性, 这也验证了本文设计的库存控制策略可以有效地抑制牛鞭效应. 进一步的研究可考虑在多种库存控制策略混合作用下的供应链系统的牛鞭效应问题.

参考文献(References)

[1] Forrester J W. Industrial dynamics[M]. Cambridge: Mass, MIT Press, 1961.
 [2] Ouyang Y, Li X. The bullwhip effect in supply chain networks[J]. European J of Operational Research, 2010, 201(3): 799-810.

[3] Miragliotta G. Layers and mechanisms: A new taxonomy for the bullwhip effect[J]. Int J of Production Economics, 2006, 104(2): 365-381.
 [4] Disney S M, Farasyn I, Lambrecht M R, et al. Controlling bullwhip and inventory variability with the golden smoothing rule[J]. European J of Industrial Engineering, 2007, 1(3): 241-265.
 [5] 黄小原, 卢震. 供应链牛鞭效应的 H_∞ 控制应用研究[J]. 控制与决策, 2003, 18(2): 155-158.
 (Huang X Y, Lu Z. Application of H_∞ control strategies of bullwhip effect in supply chain[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 155-158.)
 [6] 黄小原, 邱若臻. 基于再制造的闭环供应链动态模型及其鲁棒 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 167-174.
 (Huang X Y, Qiu R Z. Supply chain dynamic model based on remanufacturing and its robust H_∞ control[J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 167-174.)
 [7] Boccadoro M, Martinelli F, Valigi P. Supply chain management by H_∞ control[J]. IEEE Trans on Automation Science and Engineering, 2008, 5(4): 703-707.
 [8] Ivanov D, Sokolov B. Adaptive supply chain management[M]. New York: Springer, 2010.
 [9] 李刚, 汪寿阳, 于刚, 等. 牛鞭效应与生产平滑模型有效性问题[J]. 管理科学学报, 2004, 7(1): 1-18.
 (Li G, Wang S Y, Yu G, et al. Bullwhip effect and validity of production-smoothing model[J]. J of Management Sciences in China, 2004, 7(1): 1-18.)
 [10] Wang J L, Kuo J H, Chou S Y, et al. A comparison of bullwhip effect in a single-stage supply chain for autocorrelated demands when using Correct, MA, and EWMA methods[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(7): 4726-4736.
 [11] 蔡政英, 肖人彬, 谭勇, 等. 不确定条件下循环供应链模糊自适应生产计划调度[J]. 控制与决策, 2008, 23(5): 525-529.
 (Cai Z Y, Xiao R B, Tan Y, et al. Fuzzy adaptive production plan dispatching of cycle supply chain under uncertainty conditions[J]. Control and Decision, 2008, 23(5): 525-529.)
 [12] Bayraktar E, Koh S C L, Gunasekaran A, et al. The role of forecasting on bullwhip effect for E-SCM applications[J]. Int J of Production Economics, 2008, 113(1): 193-204.
 [13] 于晓霖, 刘敬保. 基于 APIOBPCS 模式 VMI 下牛鞭效应仿真研究[J]. 管理科学, 2007, 20(6): 11-21.
 (Yu X L, Liu J B. Bullwhip effect simulation research based APIOBPCS & VMI[J]. J of Management Sciences, 2007, 20(6): 11-21.)