

文章编号: 1001-0920(2013)01-0013-07

含时滞的不确定性供应链网络系统 牛鞭效应控制策略及其经济性能分析

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: 考虑需求、生产能力、供应链结构等内外不确定性因素和供应链系统运作延迟, 构建了不确定环境下含时滞的供应链库存网络系统状态转移模型. 针对牛鞭效应问题, 提出了基于库存水平波动状态的控制策略和相应的经济性能指标; 借助线性矩阵不等式方法, 深入分析库存策略的参数优化设计对牛鞭效应以及经济性能的影响. 仿真结果表明, 在经济性能约束下, 该库存策略具有较强的牛鞭效应遏制能力, 从而表明了策略的有效性和实用性.

关键词: 供应链网络; 牛鞭效应; 不确定性; 时滞; 库存控制

中图分类号: F252; TP29

文献标志码: A

Bullwhip effect control strategy and economic performance in uncertain supply chain networks with lead time delays

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: A supply chain inventory network system state transition model is presented, which includes the uncertainties of demand, production capacity, supply chain network structure and the lead time delays. To minimize the negative effect of bullwhip effect, a dynamic inventory control strategy and its economic performance indicators are proposed. Then a sufficient condition for the effective inventory control policy of the uncertain supply chain networks with lead time delays is given in terms of the linear matrix inequalities(LMIs). Simulation study shows the effectiveness and feasibility of the proposed inventory policy in reducing bullwhip effect.

Key words: supply chain networks; bullwhip effect; uncertainty; lead time delays; inventory control

0 引 言

作为经济价值链的重要表现形式和载体, 供应链系统的运作与管理对企业的生存发展起着至关重要的作用^[1]. 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、提升产品和服务质量、降低成本、提高经济利润, 并为企业带来持久的竞争优势. 随着全球经济一体化的加快和市场竞争的加剧, 供应链系统呈现出一种复杂网络化的组织关系, 企业间的供需关系更为复杂, 各项业务活动相互影响. 供应链系统中普遍存在的牛鞭效应^[2]——供应链末端需求在沿供应链自下向上传递过程中的信息扭曲放大现象, 往往扰乱正常的企业生产计划安排, 削弱企业对市场需求变化的应对能力, 导致供应链管理的低效. 如何

有效地预防和抑制牛鞭效应已经成为供应链管理的难点并受到国内外学者的关注.

牛鞭效应的成因分析主要集中在需求波动、价格波动、订货批量、库存责任失衡等^[3-4]. 这些成因均可归结为供应链自身及其所处社会经济环境的众多不确定性因素的影响. Nienhaus等^[5]从短缺预期和订购批量的不确定性角度对经典啤酒游戏案例中的牛鞭效应进行了分析. Geary等^[4]将牛鞭效应的不确定性成因分成4类: 生产运作的不确定性、供应的不确定性、需求的不确定性和控制的不确定性. 对需求、价格、时滞等的不确定性分析可参见文献[6-8]. 与成因研究相对应的是牛鞭效应的控制方法与策略研究. Seferlis等^[9]提出了两层分级离散的库存控制策略,

收稿日期: 2011-07-18; 修回日期: 2011-12-09.

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.

其核心为基于自回归综合移动平均法 (ARIMA) 的需求预测模型. 这类基于需求预测的方法还可参见文献 [10-12]. Pishvae 等^[13]针对需求波动, 提出了一种鲁棒优化对策. 葛汝刚等^[14]从库存与订货 (IOBPCS 族) 参数不确定传递函数模型的角度, 提出了基于 H_∞ 保成本的订货策略优选方法. 蔡政英等^[15]采用模糊自适应生产计划调度模型来提高循环供应链中生产系统对需求和回收信息的响应速度. 此外, 模型预测控制、鲁棒控制等经典控制方法也被用于牛鞭效应问题的研究中^[16-18].

从已有文献来看, 目前的研究多集中于对牛鞭效应的定性分析, 而不确定性成因的定量分析又多局限于某一单独的因素, 且供应链研究对象多为简单的链状结构, 因此分析较为片面, 不能从整体上把握系统拓扑结构以及众多内外不确定性因素对供应链系统运作效率的影响. 此外, 已有的牛鞭效应控制研究大多忽略了供应链系统的经济性能表现, 而现实中经济效益表现往往决定了库存控制策略的选择与实施. 针对这些问题, 本文综合考虑需求、生产能力、供应链结构、运作时滞等内外不确定性因素, 构建了不确定环境下含时滞的供应链库存网络系统状态转移模型以及相应的经济性能评价指标, 结合经济性能约束, 研究了抑制牛鞭效应的库存控制策略优化设计问题, 并给出了仿真算例.

1 供应链网络系统的库存状态转移模型

1.1 基本库存状态转移模型

由于牛鞭效应的存在, 供应链下游企业面临的市场需求波动风险会被逐级放大并扩散至整个供应链系统, 主要体现在供应链成员的订单偏差和相应的库存水平状态波动上.

供应链库存系统的微观结构如图 1 所示. 以企业 i 为例, 在第 k 个生产周期中, 企业 i 将其原料订单 $d_{li}(k)$ 发送给上游原材料供应商 l . 由于交货延迟和企业供货能力的限制, 订单量与实际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 $s_{li}(k)$ 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, $s_{ij}(k)$ 和 $s_{ik}(k)$ 表示企业 i 实际的发货数量, 企业 i 在 k 时期的库存水平 $x_i(k)$ 由原材料库存 $x_{i1}(k)$ 和成品库存 $x_{i2}(k)$ 两部分组成, 生产率 p_i 表示单位原材料投入对应的产成品数量, $m_i(k)$ 表示其在 k 时期生产所耗的原材料数量. 由此可得企业 i 库存物资的动态平衡关系为

$$x_{i1}(k+1) = x_{i1}(k) + d_{li}(k) - m_i(k), \quad (1)$$

$$x_{i2}(k+1) = x_{i2}(k) + p_i m_i(k) - (d_{ij}(k) + d_{ik}(k)), \quad (2)$$

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (p_i - 1)m_i(k) + d_{li}(k) - (d_{ij}(k) + d_{ik}(k)). \quad (3)$$

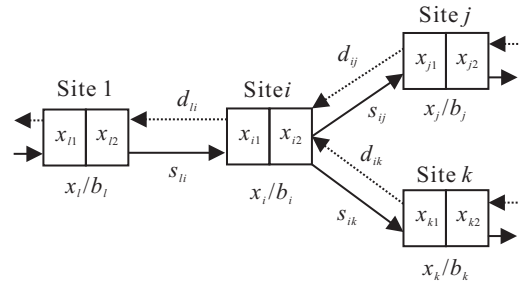


图 1 供应链库存系统的微观结构

从供应链运作角度来看, 牛鞭效应将直接体现在库存状态的波动上. 当企业以稳定的生产率生产时 (各生产周期中耗用的原材料库存占总库存的比例为 f_i), 式 (3) 对应的库存状态波动模型为

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

可见, 企业下一期的库存波动不仅受当期自身订单策略的影响, 还受下游订单需求的影响. 考虑需求预期对企业订单制定的影响, 本文采用以下需求波动预测模型:

$$\delta d_{ij}(k) = -c_{ij} \delta x_j(k). \quad (5)$$

其中: c_{ij} 为预测比例系数, 负号表示库存越多订货数量越少. 为了简化参数描述, 用 $x_i(k)$ 和 $u_i(k)$ 分别代替上述式中的 $\delta x_i(k)$ 和 $\delta d_{li}(k)$, 将式 (5) 代入 (4), 得到库存状态波动模型为

$$x_i(k+1) = x_i(k) + (p_i - 1)f_i x_i(k) + u_i(k) + (c_{ij} x_j(k) + c_{ik} x_k(k)). \quad (6)$$

借助矩阵理论可得到供应链网络系统的库存状态转移模型为

$$X(k+1) = AX(k) + BU(k) + CX(k),$$

$$A = I + \text{diag}\{(p_i - 1)f_i\},$$

$$C = [c_{ij}]. \quad (7)$$

其中: 向量 $X(k)$ 由供应链企业的库存水平波动状态组成; 作为库存网络系统模型的控制参数, $U(k)$ 由各企业的订单补偿量 $\delta d_{li}(k)$ 组成. 从模型 (7) 的构成要素来看: 参数 A 由供应链系统成员的生产率 p_i 和企业库存结构组成比例 f_i 决定, 故定义 A 为生产系数矩阵; 参数 B 反映了企业订单调整量 $\delta d_{li}(k)$ 的作用强度, 称为库存控制系数矩阵; 参数 C 直接由供应链网络成员之间的供需关系所决定, 称为系统结构矩阵.

1.2 含时滞和不确定性的库存状态转移模型

考虑真实供应链系统中的各种不确定性因素和时滞作用, 结合 Geary 等^[4,6-8]对牛鞭效应的各种生产运作不确定性、需求和供应不确定性、控制不确定性和时滞等不确定性成因的分析, 扩展模型 (7), 引入表示市场需求和企业生产能力的确定性 ΔA 、订单实施策略的不确定性 ΔB 、供应链结构变动的不确定

性 ΔC 、包括订单处理和交货延迟等在内的供应链系统运作时滞 $\tau(k)$, 得到不确定环境下含时滞的供应链库存系统状态转移模型为

$$\begin{aligned} X(k+1) = & \\ & (A + \Delta A)X(k) + (C + \Delta C)X(k - \tau(k)) + \\ & (B + \Delta B)U(k) + (D + \Delta D)U(k - \tau(k)), \\ & A = I + \text{diag}\{(p_i - 1)f_i\}, C = [c_{ij}], \\ & X(k) = 0, k < 0, 0 \leq \tau(k) \leq \tau_m. \end{aligned} \quad (8)$$

为了分析各类不确定性因素对供应链网络系统运作的影响, 假定以上不确定性参数是 Lebesgue 可测的, 即

$$[\Delta A(k), \Delta B(k), \Delta C(k), \Delta D(k)] = [H_i F_i(k) E_i], \quad i = a, b, c, d. \quad (9)$$

其中: $F_i(k)$ 为时变参数矩阵, 满足 $F_i^T(k)F_i(k) \leq I$; H_i, E_i 为适当维数的常数矩, 表示未知参数 $F_i(k)$ 对系统的影响. 由于现实中供应链的经济效益表现往往决定了库存控制策略的选择与实施, 给出如下的供应链经济性能指标函数:

$$V = \sum_{k=0}^{\infty} [X^T(k)QX(k) + U^T(k)RU(k)], \quad (10)$$

其中 Q 和 R 为对称正定矩阵, 分别定义为单位库存成本矩阵和单位采购成本矩阵. 式(10)累加项中第1项的经济含义是, 由库存水平的非正常波动造成的企业库存成本增量; 第2项表示与所选库存策略对应的订单量波动造成的采购成本的变动, 如考虑批量定价、供应商选择等的影响.

针对模型(8), 本文设计如下基于库存波动状态的供应链库存控制策略:

$$U(k) = KX(k). \quad (11)$$

其中: $U(k)$ 为订单补偿量, K 为订单决策系数. 在此策略下, 模型(8)可改写为

$$\begin{aligned} X(k+1) = & \\ & [(A + \Delta A) + (B + \Delta B)K]X(k) + \\ & [(C + \Delta C) + (D + \Delta D)K]X(k - \tau(k)). \end{aligned} \quad (12)$$

式(12)即为在库存水平波动状态反馈控制订单策略作用下的含时滞不确定性供应链库存网络系统状态转移模型.

2 含经济性能约束的牛鞭效应控制设计

造成牛鞭效应的原因众多, 各因素间的关系错综复杂, 而不同的控制策略带来的经济效果也不同. 如何在满足一定的经济性能要求基础上, 协调供应链中各个环节, 降低需求信息的扭曲程度, 抑制供应链牛鞭效应已成为供应链管理的难点. 从系统控制论的角度来看, 对于含时滞的不确定性供应链库存网络系

统(12), 含经济性能约束的牛鞭效应抑制问题变成: 寻找适当的订单决策系数 K , 在保证一定的供应链经济性能指标取值范围 ($V < V^*$) 基础上, 使得供应链库存状态波动 $X(k)$ 尽可能的小. 研究发现, 上述供应链库存控制策略的参数优化设计可转化成以下线性矩阵不等式问题的求解.

定理 1 针对可由式(8)描述的供应链库存网络系统, 给定相关的系统参数值 A, B, C, D , 对应的不确定性因素范围 $F_i(k), H_i, E_i$ ($i = a, b, c, d$), 系统时滞范围 τ_m , 经济性能指标参数 Q 和 R , 如果存在对称正定矩阵 $X, Y, Z, P \in R^{n \times n}$ (n 为供应链系统的成员数目), 任意矩阵 $K \in R^{n \times n}$ 和正标量 $\varepsilon, \varepsilon_i$ ($i = 1, 2, 3, 4$), 使得以下线性矩阵不等式组成立:

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -P & PE_3^T & 0 \\ 0 & E_3P & -\varepsilon_4 I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -I \\ 0 & 0 & 0 & \sqrt{\varepsilon} \tau_m^{-1} \delta^{-1} E_2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ K^T R & \tau_m \delta Y & 0 & \sqrt{\varepsilon}^{-1} \tau_m \delta (T_2 - I) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sqrt{\varepsilon} \tau_m^{-1} \delta^{-1} E_2^T & 0 & 0 & 0 \\ -\varepsilon \tau_m^{-2} \delta^{-2} \varepsilon_3 I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X & X E_2^T & 0 \\ 0 & E_2 X & -\varepsilon_3 I & 0 \\ 0 & Z & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \\ & \leftarrow \begin{bmatrix} RK \\ \tau_m \delta Y^T \\ 0 \\ \sqrt{\varepsilon}^{-1} \tau_m \delta (T_2 - I)^T \\ 0 \\ Z^T \\ 0 \\ (\varepsilon_2 + \varepsilon^{-1} \tau_m^2 \delta^2 \varepsilon_3) H_2 H_2^T + \\ \tau_m^2 \delta^2 \varepsilon_4 H_3 H_3^T - P + Q \end{bmatrix} \leftarrow < 0, \\ & E_1 E_1^T - \varepsilon_1 I < 0, \begin{bmatrix} -X & X E_2^T \\ E_2 X & -\varepsilon_2 I \end{bmatrix} < 0, \\ & E_2 E_2^T - \varepsilon_3 I < 0, \begin{bmatrix} -P & P E_3^T \\ E_3 P & -\varepsilon_4 I \end{bmatrix} < 0, \end{aligned} \quad (13)$$

其中参数 T_2, E_2, E_3, H_2, H_3 的值为

$$A + BK + C + DK + \sum_{i=a, c} H_i F_i(k) E_i +$$

$$\sum_{i=b, d} H_i F_i(k) E_i K = T_2 + H_2 F_2(k) E_2, \quad (14)$$

$$\left(A + BK + C + DK - I + \sum_{i=a, c} H_i F_i(k) E_i + \sum_{i=b, d} H_i F_i(k) E_i K \right)^T (C + DK + H_c F_c(k) E_c +$$

$$H_d F_d(k) E_d K)^T = T_3 + H_3 F_3(k) E_3, \quad (15)$$

则含时滞的不确定性供应链系统 (8) 在库存控制策略 (11) 的作用下是鲁棒稳定的, 且供应链系统的经济性能指标函数 (9) 存在一个上界值, 即满足

$$V \leq V^* = X^T(0) P X(0), \quad (16)$$

其中 $X(0)$ 为供应链网络系统的初始库存波动状态.

证明 首先给出引理 1 和引理 2^[19].

引理 1 若实数矩阵 A, B, C 维数相同, 且矩阵 C 满足 $C^T C \leq I$, 则对于任意标量 $\varepsilon (\varepsilon > 0)$ 有

$$ACB + B^T C^T A^T \leq \varepsilon A A^T + \varepsilon^{-1} B^T B. \quad (17)$$

引理 2 若实数矩阵 A, B, C, D 维数相同, 矩阵 D 满足 $D^T D \leq I$, 且对于任意对称正定矩阵 P 和标量 $\varepsilon (\varepsilon > 0)$, 有 $\varepsilon I - CPC^T > 0$, 则有

$$(A + BDC)P(A + BDC)^T \leq$$

$$APA^T + APC^T(\varepsilon I - CPC^T)^{-1}CPA^T + \varepsilon BB^T. \quad (18)$$

令 $\bar{A} = A + \Delta A$, $\bar{B} = B + \Delta B$, $\bar{C} = C + \Delta C$, $\bar{D} = D + \Delta D$, 对含时滞的不确定性供应链库存网络系统 (8), 引入如下差分等式:

$$X(k - \tau(k)) = X(k) - G,$$

$$G = \sum_{i=1}^k [(\bar{A} + \bar{B}K - I)X(k - \tau(i) - 1) +$$

$$(\bar{C} + \bar{D}K)X(k - \tau(i) - 1 -$$

$$\tau(k - \tau(i) - 1))](\tau(i) - \tau(i - 1)). \quad (19)$$

为了研究库存控制策略 (11) 对牛鞭效应的抑制能力, 令 $P \in R^{n \times n}$ 为对称正定矩阵, 考虑如下形式的 Lyapunov 函数:

$$V(X(k)) = X^T(k) P X(k). \quad (20)$$

在等式 (19) 的基础上, $V(X(k))$ 的差分方程为

$$\Delta V(X(k)) = V(X(k+1)) - V(X(k)) =$$

$$X^T(k)(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} +$$

$$\bar{D}K)X(k) + G^T(\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)G -$$

$$X^T(k)(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)G -$$

$$G^T(\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)X(k) -$$

$$X^T(k) P X(k). \quad (21)$$

根据引理 1, 易推出

$$\Delta V(X(k)) \leq$$

$$X^T(k)(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} +$$

$$\bar{D}K)X(k) + \varepsilon X^T(k)(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} +$$

$$\bar{D}K)(\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)X(k) +$$

$$G^T[\varepsilon^{-1}I + (\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)]G -$$

$$X^T(k) P X(k), \quad (22)$$

其中 $\varepsilon \in R^+$. 假定存在标量 $\delta > 1$, 满足

$$V(X(\varphi)) \leq \delta V(X(k)), \quad k - 2\tau_m \leq \varphi \leq k, \quad (23)$$

则不等式 (22) 等价于

$$\Delta V(X(k)) \leq$$

$$X^T(k)\{(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} +$$

$$\bar{D}K) + \varepsilon(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)(\bar{C} +$$

$$\bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K) + \tau_m^2 \delta^2(\bar{A} + \bar{B}K +$$

$$\bar{C} + \bar{D}K - I)^T[\varepsilon^{-1}I + (\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)](\bar{A} +$$

$$\bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K - I) - P\}X(k). \quad (24)$$

令

$$W(\delta) =$$

$$(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K) +$$

$$\varepsilon(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)(\bar{C} +$$

$$\bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K) + \tau_m^2 \delta^2(\bar{A} +$$

$$\bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K - I)^T[\varepsilon^{-1}I + (\bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} +$$

$$\bar{D}K)](\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K - I) - P. \quad (25)$$

根据引理 2, 若存在正标量 ε_1 , 满足 $\varepsilon_1 I - E_1 E_1^T > 0$, 则有

$$(\bar{C} + \bar{D}K)(\bar{C} + \bar{D}K)^T \leq$$

$$T_1 T_1^T + T_1 E_1^T (\varepsilon_1 I - E_1 P E_1^T)^{-1} E_1 T_1^T + \varepsilon_1 H_1 H_1^T. \quad (26)$$

其中: $T_1 = C + DK$, $H_1 F_1(k) E_1 = \Delta C + \Delta DK$. 令

$$X = P + \varepsilon P [T_1 T_1^T + T_1 E_1^T (\varepsilon_1 I -$$

$$E_1 P E_1^T)^{-1} E_1 T_1^T + \varepsilon_1 H_1 H_1^T] P^T,$$

考虑变换式 (14) 有

$$(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K) +$$

$$\varepsilon(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K)^T P(\bar{C} + \bar{D}K)(\bar{C} +$$

$$\bar{D}K)^T P(\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K) =$$

$$(T_2 + H_2 F_2(k) E_2)^T X (T_2 + H_2 F_2(k) E_2). \quad (27)$$

若存在正标量 ε_2 , 满足 $\varepsilon_2 I - E_2 P E_2^T > 0$, 则根据引理 2 有

$$(T_2 + H_2 F_2(k) E_2)^T X (T_2 + H_2 F_2(k) E_2) \leq$$

$$T_2 X T_2^T + T_2 X E_2^T (\varepsilon_2 I - E_2 P E_2^T)^{-1} E_2 X T_2^T +$$

$$\varepsilon_2 H_2 H_2^T. \quad (28)$$

若存在正标量 $\varepsilon_3, \varepsilon_4$, 满足 $\varepsilon_3 I - E_2 E_2^T > 0$, $\varepsilon_4 I - E_3 P E_3^T > 0$, 结合参数替换式(14)和(15), 则根据引理2有

$$\begin{aligned} & \tau_m^2 \delta^2 (\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K - I)^T [\varepsilon^{-1} I + (\bar{C} + \bar{D}K)^T P (\bar{C} + \bar{D}K)] (\bar{A} + \bar{B}K + \bar{C} + \bar{D}K - I) \leq \\ & \varepsilon^{-1} \tau_m^2 \delta^2 [(T_2 - I)(T_2 - I)^T + (T_2 - I)E_2^T (\varepsilon_3 I - E_2 E_2^T)^{-1} E_2 (T_2 - I)^T + \varepsilon_3 H_2 H_2^T] + \tau_m^2 \delta^2 [T_3 P T_3^T + T_3 P E_3^T (\varepsilon_4 I - E_3 P E_3^T)^{-1} E_3 P T_3^T + \varepsilon_4 H_3 H_3^T]. \end{aligned} \quad (29)$$

将式(28)和(29)代入(25)有

$$\begin{aligned} & W(\delta) + Q + K^T R K \leq \\ & T_2 X T_2^T + T_2 X E_2^T (\varepsilon_2 I - E_2 X E_2^T)^{-1} E_2 X T_2^T + \varepsilon_2 H_2 H_2^T + \varepsilon^{-1} \tau_m^2 \delta^2 [(T_2 - I)(T_2 - I)^T + (T_2 - I)E_2^T (\varepsilon_3 I - E_2 E_2^T)^{-1} E_2 (T_2 - I)^T + \varepsilon_3 H_2 H_2^T] + \tau_m^2 \delta^2 [T_3 P T_3^T + T_3 P E_3^T (\varepsilon_4 I - E_3 P E_3^T)^{-1} E_3 P T_3^T + \varepsilon_4 H_3 H_3^T] - \\ & P + Q + K^T R K. \end{aligned} \quad (30)$$

易知 $W(\delta)$ 是关于参数 δ 单调递增的, 由于 Q 和 R 的对称正定性, 若 $W(1) + Q + K^T R K < 0$, 则存在一个充分小的 $\delta > 1$, 使得对于任意 $0 \leq \tau(k) \leq \tau_m$, 有 $W(\delta) < 0$. 根据 Razumikhin 稳定性定理^[20], 系统是全局一致渐近稳定的. 进一步, 调用 Schur 补定理, 作如下参数替换: $Y = T_3 P$, $Z = T_2 X$. 最终可得到 $W < 0$ 和推导过程标量 ε_i ($i = 1, 2, 3, 4$) 所需满足的条件的等价形式, 即线性矩阵不等式组(13). 同时, 由 $W + Q + K^T R K < 0$ 可得

$$\Delta V(X(k)) \leq -X^T(k)[Q + K^T R K]X(k). \quad (31)$$

对式(31)两边累加求和, 并考虑系统的鲁棒渐近稳定性, 可得到

$$\begin{aligned} & -V(X(0)) \leq \\ & -\sum_{k=0}^{\infty} [X^T(k)QX(k) + U^T(k)RU(k)]. \end{aligned} \quad (32)$$

即供应链库存网络系统的经济性能指标函数满足 $V \leq V^* = X^T(0)PX(0)$. \square

由上述模型分析可知, 满足线性矩阵不等式组(13)约束的库存控制策略, 一方面可实现含时滞的不确定性供应链库存网络系统(12)的鲁棒渐近稳定性, 从库存控制的角度遏制牛鞭效应的扩散; 另一方面, 其综合了经济评价指标, 使得策略实施效果满足一定的经济要求, 提高了该库存策略设计方法的有效性和实用性. 同时, 定理1给出了由于抑制牛鞭效应而造成的经济成本增量的上界, 一方面, 它从供应链库存系统演变的角度描述了系统控制的经济效果; 另一方面, 该性能指标值为供应链管理者的决策选择和实施

提供了经济量化依据.

3 仿真分析

为了验证本文设计的含经济性能约束的库存控制策略对牛鞭效应的抑制能力, 对图2所示的供应链网络系统进行仿真分析. 图2中, 箭头上的数字为上下游供需结点间的订单需求预测系数 c_{ij} 的取值. 该系统的状态参数为 $X(k) = (x_1(k), x_2(k), \dots, x_6(k))^T$, 库存控制参数为 $U(k) = (u_1(k), u_2(k), \dots, u_6(k))^T$. 生产系数矩阵 A 、库存控制系数矩阵 B 、系统结构矩阵 C 和 D 以及各自对应的波动变化参数值分别为

$$A = \text{diag}\{0.65, 0.6, 0.45, 0.7, 0.6, 0.8\},$$

$$E_a = \text{diag}\{0.2, 0.1, 0, 0.2, 0.15, 0.2\}, \quad B = I,$$

$$E_b = \text{diag}\{0.1, 0.15, 0, 0.2, 0.15, 0.1\},$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0.4 & 0.7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.6 & 0 & 0.4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$E_c = \begin{bmatrix} 0 & 0.15 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0.1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D = \text{diag}\{0.2, 0.3, 0.25, 0.15, 0.2, 0.1\},$$

$$E_d = \text{diag}\{0.05, 0.1, 0.06, 0, 0.08, 0\},$$

$$F_i(k) = \sin k, \quad H_i = I, \quad i = a, b, c, d,$$

$$\tau(k) = \tau_m |\sin k|. \quad (33)$$

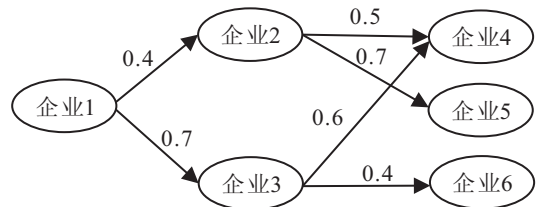
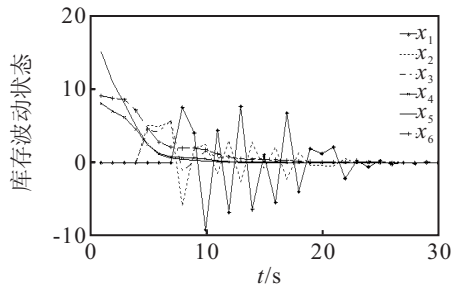
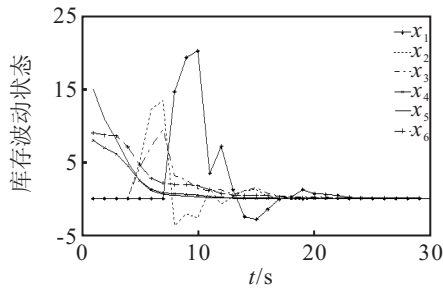


图2 供应链系统仿真结构

图2所示系统的初始库存扰动状态为 $X(0) = (0, 0, 0, 8, 15, 9)^T$, 所选的供应链系统经济性能指标参数取值为: 单位库存成本矩阵 $Q = \text{diag}\{0.3, 0.25, 0.2, 0.1, 0.12, 0.15\}$, 单位采购成本矩阵 $R = \text{diag}\{0.2, 0.08, 0.07, 0.5, 0.7, 0.6\}$. 仿真结果见图3($\tau_m = 3$)和图4($\tau_m = 5$), 所得经济性能指标上界值分别为: $V^*(\tau_m = 3) = 42.6716$, $V^*(\tau_m = 5) = 29.1014$.

仿真结果表明, 供应链网络系统下游的库存扰

图 3 供应链库存波动状态 ($\tau_m = 3$)图 4 供应链库存波动状态 ($\tau_m = 5$)

动会随时间逐渐扩散到上游企业(牛鞭效应),但在库存控制策略作用下,库存波动得到控制,最终供应链系统能较快地恢复到平稳状态,即牛鞭效应得以抑制。这验证了本文设计的库存控制方法可以有效地抑制牛鞭效应,减少由于系统内外不确定性因素以及运作时滞造成的库存波动,提升供应链系统的抗干扰能力。对比图3和图4可以看出,供应链运作时滞对库存系统的演变特征影响较大。虽然系统返回平稳状态耗用的时间差别不大,时滞波动范围越大($\tau_m = 5$),上游的库存波动幅度越大,反之($\tau_m = 3$)库存波动较小。此外,时滞波动范围的大小也影响到最终供应链系统经济性能的表现:尽管时滞小的库存控制系统的库存波动小于时滞大的,但其经济性能指标上界值 $V^*(\tau_m = 3) \approx 42.7$ 远大于时滞大的 $V^*(\tau_m = 5) \approx 29.1$ 。此现象可从供应链性能指标包含的经济含义进行解释:当时滞小时,在相同的初始扰动下,为了实现图3所示的较小的库存波动,需要增大订单补偿量,故造成供应链经济性能指标中采购成本取值的增加;当该值的增加量超过由此带来的库存成本减少量时,总的经济性能指标值也随之增加,故图3的经济性能表现不及时滞大的图4情景。

4 结 论

本文探讨了不确定环境下含时滞的供应链网络系统牛鞭效应问题。通过分析库存网络的系统动力学特征,构建了供应链库存网络系统状态转移模型,并引入市场需求、制造商生产能力、供应链拓扑结构和供应链系统运作时滞等内外不确定性因素。在模型分析的基础上,提出了基于库存水平波动状态的控制策略和相应的经济性能指标。借助线性矩阵不等式方法,

研究了含经济性能约束的库存控制策略参数优化设计问题。仿真结果表明,本文设计的库存控制策略在保证一定经济性能约束的基础上,具有较强的牛鞭效应遏制能力,表明了策略的有效性和实用性;同时研究指出,供应链库存控制系统的经济性能表现受系统运作时滞因素的影响较大。本文从供应链系统层面研究了不确定性因素以及时滞对牛鞭效应的影响,在此基础上如何深入细化研究供应链库存系统对各类不确定性因素的敏感度,对比分析牛鞭效应的各类不确定性成因的影响力大小,有待进一步的研究。

参考文献(References)

- [1] Al-Mudimigh A S, Zairi M, Ahmed A M M. Extending the concept of supply chain: The effective management of value chains[J]. *Int J of Production Economics*, 2004, 87(3): 309-320.
- [2] Forrester J W. *Industrial dynamics*[M]. Cambridge: MIT Press, 1961: 175-177.
- [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] Geary S, Disney S M, Towill D R. On bullwhip in supply chains: Historical review, present practice and expected future impact[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 101(1): 2-18.
- [5] Nienhaus J, Ziegenbein A, Schoensleben P. How human behaviour amplifies the bullwhip effect: A study based on the beer distribution game online[J]. *Production Planning & Control: The Management of Operations*, 2006, 17(6): 547-557.
- [6] Bidhandi H M, Yusuff R M. Integrated supply chain planning under uncertainty using an improved stochastic approach[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(6): 2618-2630.
- [7] Moyaux T, Chaib-draa B, D'Amours S. Information sharing as a coordination mechanism for reducing the bullwhip effect in a supply chain[J]. *IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics: Part C*, 2007, 37(3): 396-409.
- [8] 路应金,唐小我,张勇.供应链中牛鞭效应的分形特征研究[J]. *系统工程学报*, 2006, 21(5): 463-469. (Lu Y J, Tang X W, Zhang Y. Study on the fractal characters of the bullwhip effect in supply chains[J]. *J of Systems Engineering*, 2006, 21(5): 463-469.)
- [9] Seferlis P, Giannelos N F. A two-layered optimisation-based control strategy for multi-echelon supply chain networks[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, 28(5): 799-809.

- [10] Carbonneau R, Laframboise K, Vahidov R. Application of machine learning techniques for supply chain demand forecasting[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 184(3): 1140-1154.
- [11] Ketzenberg M. The value of information in a capacitated closed loop supply chain[J]. *European J of Operational Research*, 2009, 198(2): 491-503.
- [12] 刘红, 王平. 基于不同预测技术的供应链牛鞭效应分析[J]. *系统工程理论与实践*, 2007, 27(7): 26-33.
(Liu H, Wang P. Bullwhip effect analysis in supply chain for demand forecasting technology[J]. *Systems Engineering-Theory & Practice*, 2007, 27(7): 26-33.)
- [13] Pishvae M S, Rabbani M, Torabi S A. A robust optimization approach to closed-loop supply chain network design under uncertainty[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2011, 35(2): 637-649.
- [14] 葛汝刚, 黄小原. 参数不确定的供应链传递函数 H_∞ 保成本计算与分析[J]. *控制与决策*, 2009, 24(6): 874-878.
(Ge R G, Huang X Y. H_∞ guaranteed cost computation and analysis of supply chain transfer function with uncertain parameters[J]. *Control and Decision*, 2009, 24(6): 874-878.)
- [15] 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.)
- [16] Hoberg K, Thonemann U W, Bradley J R. Analyzing the effect of inventory policies on the nonstationary performance with transfer functions[J]. *IIE Trans*, 2007, 39(9): 911-924.
- [17] Braun M W, Rivera D E, Carlyle W M, Kempf K G. Application of model predictive control to robust management of multiechelon demand networks in semiconductor manufacturing[J]. *Simulation Trans of the Society for Modeling and Simulation International*, 2003, 79(3): 139-156.
- [18] 黄小原, 葛汝刚. 动态供应链与控制问题研究进展[J]. *控制与决策*, 2008, 23(11): 1201-1210.
(Huang X Y, Ge R G. Survey of dynamic supply chain and control[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(11): 1201-1210.)
- [19] Wang Y, Xie L, Souza C E D. Robust control of a class of uncertain nonlinear systems[J]. *Systems & Control Letters*, 1992, 19(2): 139-149.
- [20] Jankovic M. Control Lyapunov-Razumikhin functions and robust stabilization of time delay systems[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2001, 46(7): 1048-1060.

(上接第12页)

- [90] 骆公志, 杨晓江. 变精度优势粗糙集属性约简择优算法[J]. *中国管理科学*, 2009, 17(2): 169-175.
(Luo G Z, Yang X J. An algorithm to choose reduction of attributes of variable precision dominance rough sets[J]. *Chinese J of Management Science*, 2009, 17(2): 169-175.)
- [91] Pawlak Z. Some remarks on conflict analysis[J]. *European J of Operational Research*, 2005, 166(4): 649-654.
- [92] Pawlak Z. An inquiry into anatomy of conflicts[J]. *Information Sciences*, 1998, 109(1-4): 65-78.
- [93] 安利平, 吴育华, 全凌云. 冲突分析中的联盟确定和策略选择[J]. *天津大学学报: 自然科学与工程技术版*, 2002, 35(1): 15-18.
(An L P, Wu Y H, Tong L Y. Determination of coalitions and strategy selection in conflict analysis[J]. *J of Tianjin University: Science and Technology*, 2002, 35(1): 15-18.)
- [94] 安利平, 吴育华, 全凌云. 基于粗糙集理论的冲突分析和谈判模型[J]. *北京科技大学学报*, 2002, 24(1): 91-95.
(An L P, Wu Y H, Tong L Y. Conflict analysis and negotiation model based on rough set theory[J]. *J of University of Science and Technology Beijing*, 2002, 24(1): 91-95.)
- [95] Deja R. Conflict analysis[J]. *Int J of Intelligent Systems*, 2002, 17(2): 235-253.
- [96] 高俊山, 谷冬元, 徐章艳, 等. 一个 Pawlak 粗糙集冲突分析模型的改进[J]. *中国管理科学*, 2008, 16(2): 150-156.
(Gao J S, Gu D Y, Xu Z Y, et al. New conflict analysis model based on rough set theory[J]. *Chinese J of Management Science*, 2008, 16(2): 150-156.)
- [97] 高俊山, 谷冬元, 徐章艳. 一种新的基于粗糙集理论的冲突分析模型[J]. *管理学报*, 2008, 5(6): 813-818.
(Gao J S, Gu D Y, Xu Z Y. A new conflict analysis model based on rough set theory[J]. *Chinese J of Management*, 2008, 5(6): 813-818.)
- [98] Skowron A, Ramanna S, Peters J F. Conflict analysis and information systems: A rough set approach[C]. *Proc of the Int Conf on Rough Sets and Knowledge Technology*. Heidelberg: Springer, 2006: 233-240.
- [99] Ramanna S, Peters J F, Skowron A. Approaches to conflict dynamics based on rough sets[J]. *Fundamenta Informaticae*, 2007, 75(1/2/3/4): 453-468.