

多级集群式供应链跨链库存合作及鲁棒优化算法

刘春玲¹, 孙林夫², 黎继子¹

(1. 武汉科技学院 电子信息工程学院, 湖北 武汉 430073; 2. 西南交通大学 CAD 工程中心, 四川 成都 610031)

摘要: 以四级两单链的集群式供应链为研究对象, 在两个单链相互竞合条件下, 建立了两单链间两零售商跨链间库存协作的时变鲁棒控制系统模型, 以及牛鞭效应的弱化方法, 并用 H_∞ 优化算法来求解动态最优决策. 通过实例分析表明, 集群式供应链跨链间协调及鲁棒优化能有效抑制牛鞭效应、降低库存水平, 在减小订货波动的同时可提高对集群市场的响应速度.

关键词: 集群式供应链; 跨链协作; 牛鞭效应; 紧急库存补充; 鲁棒优化算法

中图分类号: TP273.1, F272 **文献标识码:** A

Cross-chain inventory coordination of multi-echelon cluster supply chains and robust optimization algorithm

LIU Chun-ling¹, SUN Lin-fu², LI Ji-zi¹

(1. College of Electronics Information Engineering, Wuhan University of Science and Engineering, Wuhan Hubei 430073, China;
2. CAD Engineering Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 610031, China)

Abstract: On the basis of cluster supply chain with two four-echelon single supply chains, the cross-chain inventory coordination between two retailers is taken into account under the condition of co-petition between the two supply chains. The time-varying robust control system model is built. The method of the slacking bullwhip effect is then put forward, and dynamic optimal decisions are also explored by using the H-infinity optimization algorithm. The simulation example shows that the cross-chain inventory cooperation in cluster supply chains and the robust optimization method effectively weaken the bullwhip effect, reduce the stock, dwindle the fluctuation of order and improve the response to cluster market.

Key words: cluster supply chains; cross-chain coordination; bullwhip effect; emergency inventory transshipment; robust optimization arithmetic

1 引言(Introduction)

牛鞭效应是指供应链末端的顾客不确定性需求, 由于供应链传递的信息扭曲, 导致沿着供应链自下而上逐级放大的现象^[1,2]. 这种效应将影响供应链管理过程中库存运作效率, 因此, 如何协调供应链各个环节企业库存, 抑制供应链牛鞭效应, 就成为国内外学者研究关注的焦点. 目前, 对牛鞭效应抑制和弱化问题的研究, 已取得较为丰富的研究成果. 比如, Baganha和Cohen^[3]分析了针对信息共享来减弱供应链各级库存放大现象; 黄小原等^[4]在此基础上, 提出了顾客末端需求波动最差条件下的 H_∞ 控制方法来抑制牛鞭效应; Braun等人^[5]引入带前后馈的模型预测控制器, 来降低安全库存水平, 减弱牛鞭效应等.

但上述文献在探讨量化和减弱牛鞭效应问题上呈现出一个共同的特征, 都只以一个供应链作为研究对象, 忽视了在动态环境中供应链所面临的现实环境, 即任何一个供应链可能会与临近的另一供应链存在着竞争合作关系. 因此, 通过库存协作策略来抑制和弱化牛鞭效应, 不仅可通过单个供应链自身正常订货渠道来进行有效控制, 还可以借助另一邻近供应链的紧急补充订货渠道, 即集群式供应链跨链间的补充^[6], 来弱化供应链的牛鞭效应.

故此, 本文以两个供应链系统为背景, 在集群式供应链相互竞合条件下, 建立了集群式供应链跨链间的库存协调时变鲁棒控制系统模型, 利用鲁棒控制算法来求解控制决策, 对比分析有无供应链间合作两种情形下, 集群式供应链系统的库存、订货及

牛鞭效应的变化.

2 模型的建立(Model establishment)

2.1 系统描述(System description)

考察集群式供应链库存系统由两个供应链组成, 每个供应链分别包含一个供应商、一个制造商和一个零售商等, 假设它们都经营同质、完全可替代的产品. 由于两供应链面对集群地域同一寡头市场,

经营同质化使得它们之间相互竞争. 长期的竞合博弈使他们认识到, 只有进行必要的合作才能放大整个集群地的市场份额, 从而实现“双赢”. 在集群式供应链中, 如图1所示, 设 $x_{1i}(i = 1, 2, \dots, m)$, x_{2i} 分别代表供应链1和供应链2各节点库存水平; 设 u_{1i} , u_{2i} 分别表示供应链1和供应链2各节点向上游要求的定货量; ξ_1, ξ_2 分别表示供应链1和供应链2的市场需求.

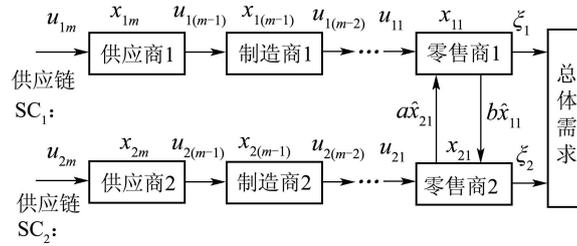


图1 集群式供应链库存合作框图

Fig. 1 Framework of inventory cooperation in cluster supply chains

在现实中, 两个供应链基于减少缺货率, 提高服务水平的目的, 而建立长期合作关系, 从而使得同一产业集群地的整体需求放大. 这种合作关系表现在, 当零售商1的顾客端需求中不确定性部分急剧增大导致缺货时, 零售商2可在考察自己的库存波动后向零售商1提供紧急补充货物(这里暂不讨论货物紧急补充价格), 补充量为 $a\hat{x}_{21}$ ($0 < a \leq 1$); 当零售商2的顾客端需求中不确定性部分急剧增大导致缺货时, 零售商1可向零售商2提供紧急补充货物, 补充量为 $b\hat{x}_{11}$ ($0 < b \leq 1$).

设将库存状态作为状态变量的库存模型为

$$x_{i,k+1} = x_{i,k} + u_{i,k} - \xi_{i,k}, \quad i = 1, 2, \dots, m. \quad (1)$$

将顾客端需求分成确定性和不确定性两部分, 即

$$\xi_{i,k} = d_{i,k} + \omega_{i,k}. \quad (2)$$

设集群式供应链系统中, 库存变量、订货的标称值分别为 x, u , 则供应链系统库存和订货的偏差为

$$\hat{x} = x - xs, \quad (3)$$

$$\hat{u} = u - us. \quad (4)$$

由此可得集群式供应链的偏差系统为

$$\hat{x}_{i,k+1} = \hat{x}_{i,k} + \hat{u}_{i,k} - \hat{\vartheta}_{i,k}. \quad (5)$$

对于供应链1有

$$\hat{x}_{1i,k+1} = \hat{x}_{1i,k}^c + \hat{u}_{1i,k} - \hat{\vartheta}_{1i,k}. \quad (6)$$

$i = 1, 2, \dots, m$, 表示供应链1的各节点. 其中:

$$\hat{\vartheta}_{11,k} = \omega_{1,k} + b\hat{x}_{11,k},$$

$$\hat{\vartheta}_{1i,k} = \hat{u}_{1(i-1),k}, \quad i = 2, 3, \dots, m,$$

$$x_{11,k}^c = \hat{x}_{11,k} + a\hat{x}_{21,k}, \quad x_{1i,k}^c = \hat{x}_{1i,k}, \quad i = 2, 3, \dots, m.$$

对于供应链2有

$$\hat{x}_{2i,k+1} = \hat{x}_{2i,k}^c + \hat{u}_{2i,k} - \hat{\vartheta}_{2i,k}. \quad (7)$$

$i = 1, 2, \dots, m$, 表示供应链2的各节点. 其中:

$$\hat{\vartheta}_{21,k} = \omega_{2,k} + a\hat{x}_{21,k},$$

$$\hat{\vartheta}_{2i,k} = \hat{u}_{2(i-1),k}, \quad i = 2, 3, \dots, m,$$

$$\hat{x}_{21,k}^c = \hat{x}_{21,k} + b\hat{x}_{11,k}, \quad \hat{x}_{2i,k}^c = \hat{x}_{2i,k}, \quad i = 2, 3, \dots, m.$$

规定

$$\begin{cases} a = 0, & \text{当 } \omega_{1,k} < S_{11} \text{ 或 } \hat{x}_{21,k} < S_{21}, \\ b = 0, & \text{当 } \omega_{2,k} < S_{21} \text{ 或 } \hat{x}_{11,k} < S_{11}. \end{cases} \quad (8)$$

其中: S_{11}, S_{21} 分别为供应链1、供应链2零售商的安全库存水平, 任何时候均满足 $a \cdot b = 0$, 即两零售商间可能没互补, 但同一时刻双方不能同时互补.

由上所述, 对集群式供应链偏差时变系统用矩阵形式表示为

$$\hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k \hat{u}_k + D_k \omega_k. \quad (9)$$

其中:

$$A_k = \begin{pmatrix} 1-b & 0 & \dots & 0 & a & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ b & 0 & \dots & 0 & 1-a & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 \end{pmatrix}_{m \times m},$$

满足,且Riccati方程存在满足条件的正定解. 根据现代控制理论, (A_k, B_k) 采用状态反馈能镇定的充要条件是其不能控子系统为渐近稳定的. 在本文模型中,考察 $m = 6, n = 12$,当集群内两供应链无合作时, $a = b = 0$,由MATLAB函数计算 $\text{rank}M_{(A_k, B_k)} = n$,即为满秩,所以系统是完全能控的;当集群内两供应链有合作关系时, $0 < a \leq 1, 0 < b \leq 1, ab = 0$,对系统矩阵进行分解有, $A_k = A + \Delta A$, ΔA 为不确定矩阵,由 a, b 取值范围,可得 ΔA 满足匹配条件 $\Delta A \Delta A^T \leq I$. 由最大奇异值有界定理,通过MATLAB函数计算,系统也是完全能控的^[8]. 故本系统中 (A_k, B_k) 能镇定.

4 实例分析(Example analysis)

以广东某纺织服装产业集群为背景,考察两个4级供应链,其中每个供应链包含供应商、制造商、批发商、零售商4个节点,假设集群式供应链的标称系统为

$$x_s = (480, 580, 630, 730, 580, 630, 680, 780)^T (\text{件}),$$

$$u_s = (480, 620, 680, 780, 580, 680, 730, 830)^T (\text{件}).$$

设库存、订货偏差量的初始条件分别为

$$\hat{x} = (-10, -5, 20, 10, 70, 20, 10, 20)^T (\text{件}),$$

$$\hat{u} = (0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0)^T (\text{件}).$$

在这里,假设供应链1在 $k=0$ 时刻受到一较大的需求波动(扩大的需求满足 $\omega_{1,0} > 2S_{11}$),供应链2在这一段时间无需求扩大现象,库存水平升高,因此按照契约零售商1向供应链2的零售商请求紧急库存补充,基于链2库存波动 $\hat{x}_{21,0}$ 的补充系数 $a = 0.8$.

设牛鞭效应式(10)中加权矩阵分别为

$$Q = R = \text{diag}\{[0.1, 0.1, 0.15, 0.15, 0.1, 0.1, 0.15, 0.15]\},$$

$$S = \text{diag}\{[0.5, 0, 0, 0, 0.5, 0, 0, 0]\}.$$

基于上述 H_∞ 控制机理,用MATLAB的优化函数仿真计算可得集群式供应链系统各决策序列. 当 $N(k = 0, 1, \dots, N)$ 是有限时间,这里假设 $N = 64$,取 $\gamma = 3$,

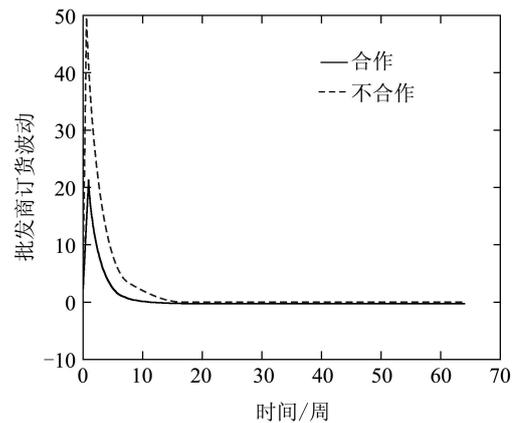
$$Q_f = \text{diag}\{[0.25, 0.25, 1, 1, 0.25, 0.25, 1, 1]\},$$

计算结果如图2~图4所示. 图中实线均表示供应链间有合作情形下的订货偏差及牛鞭效应变化趋势. 为了便于对比分析,系统也针对供应链间不合作情形下的模型做了仿真计算,图2~图4中虚线均

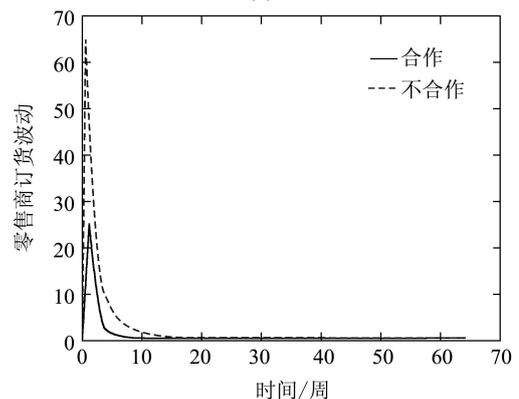
表示不合作情形下的订货偏差及牛鞭效应变化趋势.

将图2、图3中实线与虚线相对比可以发现,通过实施跨链间库存合作各节点企业的订货量避免了大幅度波动,如零售商1、批发商1(图2(b),图2(a))订货波动幅度分别减少了2/3和3/5. 而对于供应链2的零售商、批发商来说,在库存有盈余情况下,如果不实施库存合作,就将大幅度减少订货量,但实施库存合作后,订货波动幅值分别减少了83%和75%,大大减小了库存费用(图3(b),图3(a));在有合作情形下,供应链2的上游企业也都不程度地减小了订货波动,订货逐渐趋于稳定值.

图4表示了集群式供应链整体的牛鞭效应变化趋势,由图可以看出在集群式供应链系统无跨链间库存合作情形下,由于订货波动幅度较大,其牛鞭效应减弱的趋势比同等条件下有跨链间库存合作情形下牛鞭效应减弱的趋势要缓慢得多且峰值要大,但两者均表明如图所示的变化趋势.



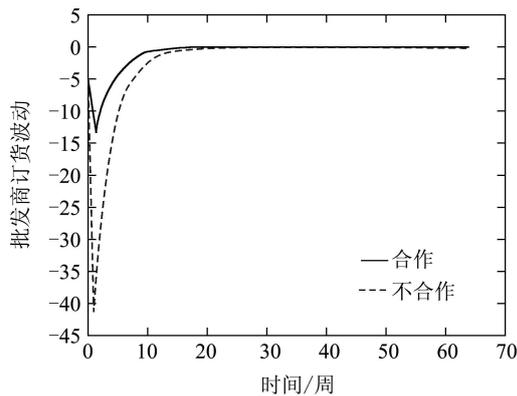
(a)



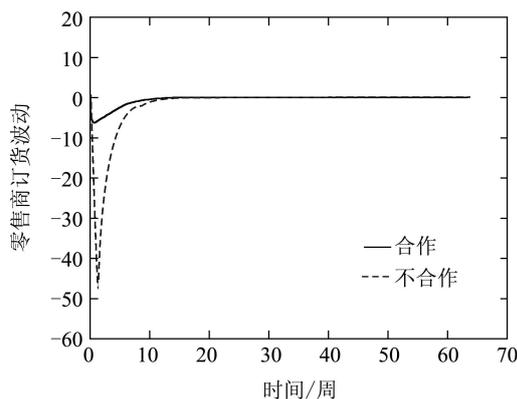
(b)

图2 供应链1订货变量的变化趋势

Fig. 2 Varying trend of order in supply chain one



(a)



(b)

图3 供应链2订货变量的变化趋势

Fig. 3 Varying trend of order in supply chain two

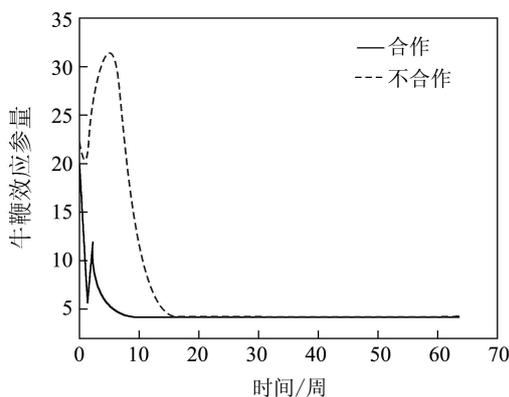


图4 集群式供应链整体牛鞭效应变化趋势

Fig. 4 Varying trend of bullwhip effect in supply chain

采用 H_∞ 控制方法,在需求条件“最差”情况下,可以在多级供应链上逐渐抑制牛鞭效应。

5 结论(Conclusions)

本文探讨了多级集群式供应链在互竞合作条件下库存跨链合作模型,并运用 H_∞ 控制理论讨论了如何寻求最优订货.通过实例仿真分析发现: H_∞ 控制能够寻求最优订货序列使得集群式供应链各节点库存和订货变量在较大需求扰动时很快趋于稳定,并减弱了牛鞭效应;集群式供应链的跨链间库存合作是对集群式供应链内单链库存供应的一种有效补充方式,使得整体系统鲁棒性更强,增强了链间企业的柔敏性,提高了对集群市场的响应速度。

参考文献 (References):

- [1] LEE H L, PADMANABHAN V, WHANG S. The bullwhip effect in supply chains[J]. *Management Review*, 1997, 38(2): 93 – 102.
- [2] LEE H L, PADMANABHAN V, WHANG S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect[J]. *Management Science*, 2004, 50(12): 1875 – 1886.
- [3] BAGANHA M P, COHEN M A. Stabilizing effect of inventory in supply chains[J]. *Operations Research*, 1998, 46(3): 72 – 83.
- [4] 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 Xiaoyuan, LU Zhen. Research on H_∞ control of Bullwhip Effect in supply chain[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(2): 155 – 158.)
- [5] BRAUN M W, RIVERA D E, FLORES M E, et al. A model predictive control framework for robust management of multi-product, multi-echelon demand networks[J]. *Annual Reviews in Control*, 2003, 27(2): 229 – 245.
- [6] 黎继子. 集群式供应链管理[M]. 北京: 中国经济出版社, 2006.
(LI Jizi. *Cluster Supply Chain Management*[M]. Beijing: Chinese Economic Press, 2006.)
- [7] BASAR T, BERNHARD P. H_∞ Optimal Control and Related Minimax Design Problems – A Dynamic Game Approach[M]. Boston: Birkhauser, 1995.
- [8] 付主木, 费树岷. 一类切换线性奇异系统的 H_1 控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(4): 693 – 695.
(FU Zhumu, FEI Shumin. H_1 control of one linear switched singular system[J]. *Control Theory & Applications*, 2008, 25(4): 693 – 695.)

作者简介:

刘春玲 (1975—), 女, 博士, 目前研究方向为供应链优化仿真、最优控制, E-mail: liuchunring@yahoo.com;

孙林夫 (1963—), 男, 教授, 目前研究方向为商务协同设计;

黎继子 (1970—), 男, 教授, 目前研究方向为物流供应链。