

文章编号:1003-207(2007)01-0041-06

基于两单链合作下的集群式供应链 牛鞭效应的 H 控制研究

刘春玲¹, 黎继子², 孟波¹

(1. 武汉大学计算机学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉科技学院经济管理系, 湖北 武汉 430073)

摘要:以集群式供应链跨链间库存合作为背景, 针对两单链情形, 考察零售商的紧急库存补充渠道来自于另一供应链的零售商, 建立了集群式供应链跨链间库存合作下的库存模型和牛鞭效应量化方法。并用 H 控制理论来寻求最优订货系列, 以达到降低安全库存水平, 提高顾客满意度和减弱牛鞭效应的目的。仿真实验表明, 实施 H 控制和跨链间库存互补策略可以有效抑制牛鞭效应。

关键词: H 控制; 集群式供应链; 跨链库存; 紧急库存互补

中图分类号: TP273; F273 **文献标识码:** A

1 引言

牛鞭效应是供应链中的需求波动放大现象, 它是供应链运作中最为重要的性能指标。牛鞭效应问题研究的意义在于如何减弱牛鞭效应, 来提高整个供应链系统及企业的经济效益。人们已经从大量研究中得出结论, 消除牛鞭效应可提高 10% ~ 30% 的利润^[1]。而如何设计减弱和控制牛鞭效应的策略来提高供应链系统运行效率就成为当今研究的热点。

国内外学者从控制工程角度在此方面进行了大量的研究, 并取得很大的进展。比如, Disney 和 Towill 对牛鞭效应进行动态测量, 针对供应商管理库存 (VMI) 采用 Z 变换求解牛鞭效应控制方案^[2]。Braun 等人引入带前后馈的模型预测控制器, 来减小安全库存水平, 减弱牛鞭效应^[3]。黄小原、卢震等在 Disney 等人的基础上采用偏差波动定量描述牛鞭效应, 应用 H 控制理论控制牛鞭效应^[4]。Riddals 和 Benett 采用了比例积分 (PI) 控制器来抑制一个连续时间的供应链系统的牛鞭效应^[5]。黄小原、郭海峰等考虑多层供应链离散时间系统, 分析并建立了其时滞系统模型, 针对供应链中需求波动最差条件采用 H 控制方法来抑制牛鞭效应^[6]。张小

洪、陈剑等针对实际库存活动中普遍存在的顾客等待有限耐烦期这种现象, 构造出一种随机库存系统最优控制模型, 并借助于动态规划原理给出了最优控制律^[7]。

虽然上述文献从不同层面探讨了量化和减弱牛鞭效应的方法, 并且取得了丰富有效的成果。但文献都是针对单一供应链的上下游企业相互协作的基础上, 来弱化牛鞭效应, 极少考虑供应链之外横向企业协作对牛鞭效应的影响。Yong zhang 和 David Diltts 通过仿真实例指出, 在稳定需求下, 供应链间有无协作对供应链性能没有多大影响, 但在动态需求下供应链间的库存协作显得尤其重要^[8]。所以本文基于单个供应链上下游企业相互协作基础上引入另一单链, 通过协作以减弱整个系统的库存波动和需求放大的现象。而引入另一单链式供应链, 是以相互库存互补 (transshipment) 方式来进行合作, 这就客观上要求上述两合作单链式供应链在地域上相临近。而以产业集群为运作平台的“集群式供应链”正好对应于此。因为, 集群式供应链是指在特定集群地域中, 存在围绕同一产业或相关产业价值链不同环节的诸多研发机构、供应商、制造商、批发商和零售商, 甚至是终端客户等组织, 以“供应商-客户”关系, 通过“信任和承诺”非正式或正式契约方式进行连接, 形成基于本地一体化的、多供应链的网络组织^[9]。

在该种背景下, 本文以集群式供应链两个单链式供应链相互补充库存为基础, 来建立两单链间的

收稿日期: 2006-04-07 修改日期: 2007-01-04-08

基金项目: 国家自然科学基金项目 (70502029); 湖北省教育厅重点项目 (2004D001); 武汉市基金资助项目 (06019)

作者简介: 刘春玲 (1975-), 女 (汉族), 湖北广水人, 武汉大学计算机学院, 博士生, 研究方向: 供应链优化仿真、最优控制。

跨链库存补充合作模型和牛鞭效应量化方法。本文针对库存模型用 H 控制思想给出在需求波动“最差”情况下的最优订货,最后通过实例来分析 H 控制和库存补充策略的实施及其对集群式供应链系统各链节的库存、需求以及减弱牛鞭效应的影响。

2 基本模型

2.1 集群式供应链库存系统描述

本文考察的集群式供应链库存系统,它是由两个单链式供应链组成,每个单链式供应链分别只有一个批发商和一个零售商,假设它们都经营同质、完全可替代的单一产品。由于两单链式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。长期的竞合博弈又使他们认识到,只有进行必要的合作才能放大整个集群地的市场份额,从而得到整体利润的提高^[9]。

集群式供应链跨链间库存,确切来说是一种紧急库存互补,也就是在集群式供应链某单链日常库存补充渠道发生短缺,而须通过其他单链来进行库存补充的情形,如图 1 所示。在基于两单链的集群式供应链中,设 x_1 、 x_2 分别代表供应链 1 的批发商和零售商的库存水平;设 x_3 、 x_4 分别代表供应链 2 的批发商和零售商的库存水平;设 u_1 、 u_2 分别表示供应链 1 的批发商和零售商向上游要求的定货量;设 u_3 、 u_4 分别表示供应链 2 的批发商和零售商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。

在现实中,两个供应链为了同一产业集群地的整体需求放大,长期建立合作关系,即当零售商 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 $a\hat{x}_1$ ($0 < a < 1$, \hat{x}_1 为零售商 2 的库存偏差量);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 $b\hat{x}_2$ ($0 < b < 1$, \hat{x}_2 为零售商 1 的库存偏差量)。

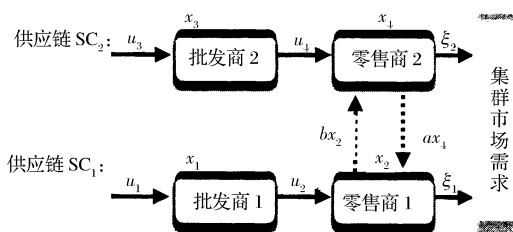


图 1 集群式供应链跨链库存合作结构图

则将库存状态作为状态变量的库存模型为

$$x_1(k+1) = x_1(k) + u_1(k) - u_2(k) \tag{1}$$

$$x_2(k+1) = (1 - b)x_2(k) + ax_4(k) + u_2(k) - \xi_1(k) \tag{2}$$

$$x_3(k+1) = x_3(k) + u_3(k) - u_4(k) \tag{3}$$

$$x_4(k+1) = bx_2(k) + (1 - a)x_4(k) + u_4(k) - \xi_2(k) \tag{4}$$

写成矩阵形式,即

$$x(k+1) = Ax(k) + B_1 \xi(k) + B_2 u(k) \tag{5}$$

其中,

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 - b & 0 & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & b & 0 & 1 - a \end{bmatrix}, B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, B_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \xi(k) = \begin{bmatrix} \xi_1(k) \\ \xi_2(k) \end{bmatrix}$$

将顾客端需求分在确定性和不确定性两部分,即

$$\xi_i(k) = d_i(k) + \hat{\xi}_i(k)$$

集群式供应链系统式(5)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。

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

$$\hat{x} = x - x_s \tag{6}$$

$$\hat{u} = u - u_s \tag{7}$$

由此可得集群式供应链的偏差系统为 $\hat{x}(k+1) = A\hat{x}(k) + B_1 \xi(k) + B_2 \hat{u}$ (k) (8)

规定

$$\begin{cases} a = 0 & 1, k < S_1 \text{ 或 } 0 < \hat{x}_2, k < S_2 \\ b = 0 & 2, k < S_2 \text{ 或 } 0 < \hat{x}_1, k < S_1 \end{cases} \tag{9}$$

其中, S_1 、 S_2 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 $ab = 0$,即两零售商间可能没互补,但同一时刻双方不能同时互补。

2.2 牛鞭效应的定量描述

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,对具有比较复杂的结构,如本文中集群式供应链系统中存在多链多节点情况,用方差来描述牛鞭效应的动态控制就比较困难。黄小原、卢震是从单链多节点出发建立牛鞭效应的偏差量描述^[4],而本文采用偏差量来描述集群式供应链多链

多节点系统牛鞭效应。以集群式供应链系统模型为对象(式(8)),牛鞭效应就是低端的需求波动,引起前端订货 \hat{u}_1 和 \hat{u}_3 的波动增强过程。这里,采用集群式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

$$z(k) = \frac{(\hat{x}(k))^T Q \hat{x}(k) + (\hat{u}(k))^T R \hat{u}(k)}{(\hat{u}(k))^T S \hat{u}(k)} \quad (10)$$

其中, Q、R、S 是给定的对称正定加权矩阵,由各变量的权重决定。参数 $z(k)$ 描述了集群式供应链的牛鞭效应, $z(k)$ 越大,则牛鞭效应越强; $z(k)$ 越小,则牛鞭效应越小。

3 牛鞭效应的 H 控制

集群式供应链偏差系统式(8)、牛鞭效应参数 $z(k)$ 式(10)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系列 $\hat{u}(k)$ 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。

确定系统被控输出为

$$z(k+1) = C_1 \hat{x}(k) \quad (11)$$

其中, $C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$

如果对某一类外部扰动信号 $\hat{x}(k)$,系统的被控输出 $z(k)$ 总能保持是“小”的,则具有这样性能的系统具有“好”的性能,在这种情况下,外部扰动对系统被控输出的影响很小,系统抑制外部扰动的能力较强。

由系数矩阵 C_1 可知,被控输出关心的量是两供应链上游企业库存波动,控制的目的是考虑在扰动最坏情况下,如何选取反馈控制系列 $\hat{u}(k)$ 使偏差系统 $\hat{x}_1(k), \hat{x}_3(k)$ 最小。

对于 H 控制问题,存在许多种求解的方法,从最初复杂的算子方法到 Riccati 方程处理方法。这里主要从基于线性矩阵不等式的 H 控制问题求解方法来进行分析,因为这一方法的好处在于可以用相对直接的矩阵运算来得到控制器的设计方法,并且可以求出系统扰动抑制度,而对系统模型无须过多的限制条件。

定义反馈控制律 $\hat{u}(k) = K\hat{x}(k)$,则闭环系统传递函数

$$T_{wz}(s) = C_1 [I - (A + B_2 K)]^{-1} B_1$$

由 Lyapunov 定理,对集群式供应链偏差系统式(9)、式(11),当存在正定对称矩阵 P 使得

$$(A + B_2 K)^T P + P(A + B_2 K) < 0 \quad (12)$$

时,系统存在正定解。进一步,当 P 满足

$$(A + B_2 K)^T P + P(A + B_2 K) - P B_1 B_1^T P - C^T C < 0 \quad (13)$$

时,闭环系统存在正定解且满足

$$T_{wz}(s) < 1$$

利用矩阵的 Schur 补性质,将式(13)转化为

$$\begin{bmatrix} (A + B_2 K)^T P + P(A + B_2 K) & P B_1 & C_1^T \\ B_1^T P & -I & 0 \\ C_1 & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (14)$$

上式中存在两个未知矩阵变量 K 和 P ,而且这两个矩阵变量是以非线性的形式出现在这个矩阵不等式中,现将式(14)变换得

$$\text{diag}\{P^{-1}, I, I\} \begin{bmatrix} (A P^{-1} + B_2 K P^{-1} + (A P^{-1} + B_2 K P^{-1})^T & B_1 & P^{-1} C_1^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ C_1 P^{-1} & 0 & -I \end{bmatrix} \text{diag}\{P^{-1}, I, I\} < 0 \quad (15)$$

其中, $[\cdot]_1$ 代表式(14)左边矩阵。

定义 $X = P^{-1}$ 和 $W = KX$,式(15)可变为如下的形式

$$\begin{bmatrix} AX + B_2 W + (AX + B_2 W)^T & B_1 & XC_1^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ C_1 X & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

通过求解矩阵不等式(16)可得可行解 X^*, W^* ,则

$$\hat{u}(k) = W^* (X^*)^{-1} \hat{x}(k) \quad (17)$$

是系统的一个状态反馈 H 控制器。

线性矩阵不等式(16)提供了关于 X, W 的一个凸约束,因此,通过式(16)给出了系统的所有状态反馈 H 控制律的一个凸约束刻画。对给定的标量 $\gamma > 0$,为求系统的状态反馈 γ -次优 H 控制器,考虑到

$$T_{wz}(s) < \gamma \Leftrightarrow \gamma^{-1} T_{wz}(s) < 1$$

故可以通过用 $\gamma^{-1} C_1$ 来代替模型式(8)、式(11)中矩阵 C_1 对得到的新系统模型设计标准 H 控制器来得到所求的状态反馈 γ -次优 H 控制器^[11]。此时,相应的矩阵不等式为

$$\begin{bmatrix} AX + B_2 W + (AX + B_2 W)^T & B_1 & \gamma^{-1} XC_1^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ \gamma^{-1} C_1 X & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

将式(15)变换得

$$\text{diag}\{I, I, I\} \begin{bmatrix} \cdot \\ \cdot \\ \cdot \end{bmatrix}_2 \text{diag}\{I, I, I\} =$$

$$\begin{bmatrix} AX + B_2W + (AX + B_2W)^T & B_1 & XC_1^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ C_1X & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \quad (19)$$

其中, $[\cdot]_2$ 代表式(18)左边矩阵。

因此,通过求解以上的线性矩阵不等式可以得到系统的状态反馈 二次优 H 控制器。

进一步,基于状态反馈 二次优 H 控制器的存在条件(19),通过对 最小值的搜索,可以得到一个具有线性矩阵不等式约束和线性目标函数的凸优化问题,即

$$\begin{aligned} & \min \\ \text{s. t. } & \begin{bmatrix} AX + B_2W + (AX + B_2W)^T & B_1 & XC_1^T \\ B_1^T & -I & 0 \\ C_1X & 0 & -I \end{bmatrix} < 0 \end{aligned} \quad (19)$$

$$X > 0$$

利用该优化问题的最优解可以得到系统的最优 H 控制器,相应的最小扰动抑制度是 。针对集群式供应链系统, 值越小,牛鞭效应越小; 值越大,牛鞭效应越大。

4 实例分析

假设集群式供应链的标称系统为

$$x_{1s} = 500 \text{ (件)}, x_{2s} = 450 \text{ (件)}, x_{3s} = 750 \text{ (件)}, x_{4s} = 700 \text{ (件)};$$

$$u_{1s} = 550 \text{ (件)}, u_{2s} = 500 \text{ (件)}, u_{3s} = 820 \text{ (件)}, u_{4s} = 750 \text{ (件)}。$$

设库存偏差量的初始条件

$$\hat{x}_1(1) = 0 \text{ (件)}, \hat{x}_2(1) = 20 \text{ (件)}, \hat{x}_3(1) = 20 \text{ (件)}, \hat{x}_4(1) = 40 \text{ (件)}。$$

假设起始时无订货偏差。

为了减小系统复杂性,假设供应链 1 的零售商在 $k=1$ 时刻受到一较大的需求波动(扩大的需求大于预定需求的一半),供应链 2 在这一段时间无需求波动且库存量偏高,因此按照契约,供应链 2 的零售商向供应链 1 的零售商提供紧急库存补充,假如补充系数 $a=0.95, b=0$ 。令

$$Q = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix},$$

$$R = \begin{bmatrix} 0.9 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

用 Matlab 的优化函数计算得控制器的系统矩阵为

$$A_{k1} = \begin{bmatrix} -0.01 & 0 & 0 & 0.12 \\ 0 & -0.4 & 0 & 0.3 \\ -0.0008 & 0.011 & 0 & 3.1332 \\ 0 & 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix},$$

$$A_{k2} = \begin{bmatrix} -0.05 & 0 & 0 & 0.0114 \\ 0 & -0.45 & 0 & 0.3 \\ -0.0058 & 0.0224 & 0 & 1.2556 \\ 0 & 0 & 0.0114 & 0.3117 \end{bmatrix}$$

其中, A_{k1} 为有跨链补货时的求解,对应的扰动抑制度为 0.7401; A_{k2} 为跨链间无合作 ($a=0, b=0$) 时的求解,对应的扰动抑制度为 0.8978。

当 k 是有限时间,这里假设 $k=30$ 时,计算结果如图 2~图 10 所示。

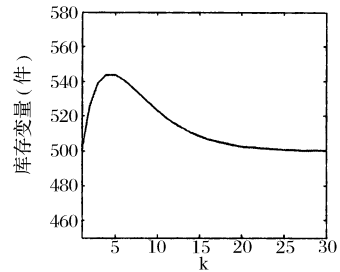


图 2 x_1 实际库存变化曲线

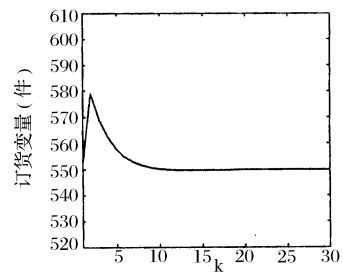


图 3 u_1 实际订货变化曲线

由图 4 可以看出,由于 $k=1$ 时刻供应链 1 末端需求增长迅速,导致零售商 1 的库存水平在 $k=2$ 时刻迅速下降,而新的订货要在 $k=3$ 时刻才能到达,假设零售商采用备货销售方式,则零售商 1 必须采取紧急库存补充策略,才能减少 $k=2$ 到 $k=3$ 两订货点间隔期内可能出现的过大的缺货率。凭借集群式供应链地域邻近的优势,零售商 1 向零售商 2 请示紧急库存补充。紧急库存补充的结果是: 零售商 1 的缺货率大大下降,库存水平很快 ($k=5$) 趋

于标称值,而其在 $k=2$ 时刻的订货量也不如库存量波动得厉害,仅为同一时刻库存量波动的 40%(如图 4、图 5 所示)。零售商 2 由于在 $k=2$ 时刻向零售商 1 提供了紧急库存补充,库存变量出现一定幅度波动,但随着下一时期订货量的补充,库存水平经过两次较小的摆动很快趋于标称值(如图 8、图 9 所示)。从图 2、图 3 可以看出,由于实施 H 控制,批发商 1 的库存水平和订货量并不因零售商 1 和零售商 2 存在较大幅度库存波动和订货波动而发生大幅度波动现象。这说明实施 H 控制可以在全局范围内对供应链实施优化控制,从而可以在一定程度上抑制集群式供应链末端需求波动所引起的前端库存、订货波动现象。图 10 也表明在 $k=2$ 时刻由于零售商库存波动的增大导致牛鞭效应增大,但随着紧急库存补充策略和 H 控制的实施,牛鞭效应迅速减小并趋于稳定。

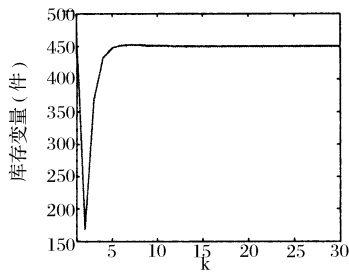


图 4 x_2 实际库存变化曲线

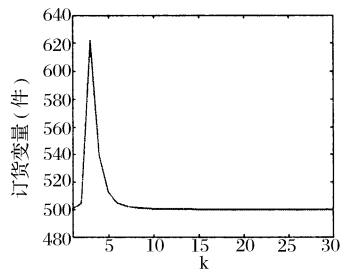


图 5 u_2 实际订货变化曲线

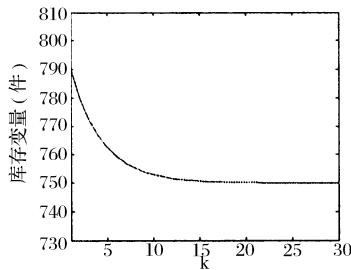


图 6 x_3 实际库存变化曲线

虽然实例中只考虑一次脉冲型的需求扰动,没有涉及到多周期可能出现的脉冲扰动,但这并不妨碍实例对模型的解释,因为多周期脉冲扰动将按式(9)来确定补充关系,仍然可按前面所述的鲁棒控制

律来实现。

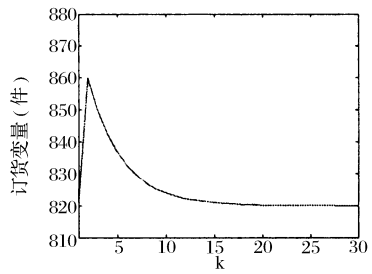


图 7 u_3 实际订货变化曲线

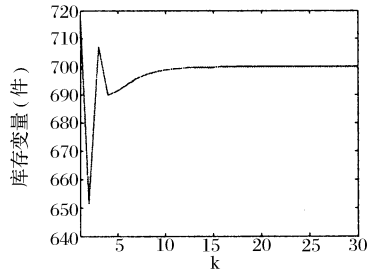


图 8 x_4 实际库存变化曲线

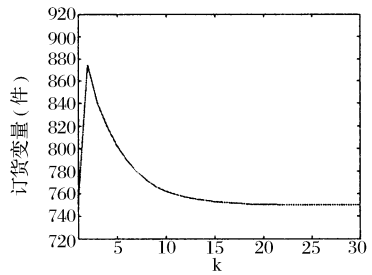


图 9 u_4 实际订货变化曲线

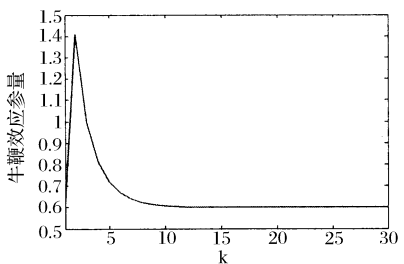


图 10 牛鞭效应参数 变化曲线

5 结语

本文构造了集群式供应链在相互合作下的库存控制模型,并运用 H 控制理论从减弱牛鞭效应的角度出发讨论如何寻求最优订货。通过实例分析发现:(1)实施 H 控制能够寻求最优订货系列以使得集群式供应链各节点库存和订货变量在存在较大的需求扰动时很快趋于稳定;(2)集群式供应链的跨链间紧急库存互补策略使得供应链下游企业间直接快速相互补充,大大减弱了供应链上游企业由于需求放大、生产提前期等原因造成的订货波动过大现象,

从而直接减弱了牛鞭效应。当然,有关此类研究还有待进一步深入,文中只涉及两级两供应链情形的库存控制问题,而两供应链批发商零售商间跨链补货,以及更一般化的多级多链间库存补充情形是今后值得研究的内容。

参考文献:

- [1] McCullen P. , Towill D. . Diagnosis and reduction of bullwhip in supply chains [J]. Supply Chain Management: An International Journal, 2002, 7(3) :164 - 179.
- [2] Disney S. M. , Towill K. R. . A procedure for the optimization of the dynamic response of a vendor managed inventory system[J]. Computer and Industrial Engineering, 2002, 43(1) :27 - 58.
- [3] Braun M. W. , Rivera D. E. , et al. A Model Predictive Control framework for robust management of multi - product, multi - echelon demand networks [J]. Annual Reviews in Control, 2003, 27:229 - 245.
- [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.
- [5] Riddalls C. E. , Benett S. . Production inventory system controller design and supply chain dynamics [J]. International Journal of Systems Science, 2002, 33(3) :181 - 195.
- [6] 黄小原, 郭海峰, 等. 供应链时滞系统模型及其牛鞭效应的 H 控制[J]. 系统工程学报, 2005, 20(6) :585 - 890.
- [7] 张小洪, 陈剑, 潘德惠. 有限耐烦期随机库存系统的最优控制[J]. 中国管理科学, 2004, 12(2) :38 - 42.
- [8] Zhang Y. , Diltz D. . System dynamics of supply chain network organization structure [J]. Information System and e - Business Management, 2004, (2) :187 - 206.
- [9] 黎继子. 集群式供应链管理 [M]. 北京:中国经济出版社, 2006.
- [10] Basar T. , Bernhard P. . H Optimal Control and Related Mini - max Design Problems - A Dynamic Game Approach [M]. Boston: Birkhauser, 1995.
- [11] 俞立. 鲁棒控制—线性矩阵不等式处理方法 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

Research on H Control of Bullwhip in Cluster Supply Chains Based on Cooperation between Two Single Chains

LIU Chur-ling¹, LI Ji-zi², MENG Bo¹

(1. Computer School, Wuhan University, Hubei Wuhan 430072, China; 2. School of Economic & Management, Wuhan University of Science & Technology, Wuhan 430073, China)

Abstract: This paper analyzed the trans - chain inventory cooperation in cluster supply chains that the retailer of one supply chain may replenish the stock from the retailer of another supply chain. The inventory coordination model and the method of quantifying the bullwhip were established. The H control theory was used to explore the optimal order for reducing safety stock, improving the customer satisfaction level and weakening the bullwhip. By simulation experiment, it was proved that implementing H control and the policy of cooperation across supply chains may efficiently restrain bullwhip.

Key words: H control; cluster supply chain; trans - chain inventory; emergency stock replenishment