

文章编号:1003-207(2013)02-0107-07

供应链网络系统的牛鞭效应时滞因素分析与库存控制策略研究

李 翀^{1,2}, 刘思峰², 方志耕², 白 洋²

(1. 福州大学管理学院, 福建 福州 350108; 2. 南京航空航天大学经济与管理学院, 江苏 南京 210016)

摘 要:牛鞭效应的存在严重影响了供应链系统的运作效率,增加了供应链管理的复杂性。本文基于供应链网络库存状态的内部系统动力学机制,构建了供应链网络库存系统的状态转移模型,并引入时滞影响因素,通过供应链网络库存系统的波动状态描述牛鞭效应。在此模型基础上,针对供应链网络系统的牛鞭效应问题,提出了一类新的基于库存波动状态的动态供应链库存控制策略,并运用系统稳定性理论,将该策略的参数优化求解问题转化成线性矩阵不等式的求解问题。最后通过系统仿真深入分析了供应链网络库存系统对库存控制策略参数以及系统时滞因素的敏感性,并验证了该动态库存控制策略可以有效地抑制牛鞭效应。

关键词:库存控制;供应链系统;牛鞭效应;时滞

中图分类号:F252;TP29 **文献标识码:**A

1 引言

社会经济环境的变动、市场需求的波动、以及供应链系统自身的发展与演变,增加了企业生产运作中面临的不确定性,为供应链管理(SCM)带来巨大的挑战。作为供应链系统运作低效的主要表现,牛鞭效应——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^[1-2],成为了供应链管理研究与实践的关注焦点。而在供应链管理模式下,库存系统是供应链管理的主要对象,单个企业的库存管理效果不仅影响该企业的经济效益和市场竞争能力,还通过供应链中复杂的供需关系制约着整个供应链网络系统的性能。有效的供应链库存系统管理,一方面可降低牛鞭效应对库存系统的直接影响,另一方面能够提升企业快速响应市场变化的能力、优化企业资源配置、协调生产活动、满足顾客个性化需求,从而降低企业生产运营成本,提升产品和服务质量,最终为企业带来经济利润和持久的竞争优势。

最早对牛鞭效应现象描述的是 Forrester^[1]。借助计算机仿真模型,他发现在典型的供应链系统中存在着显著的需求信息扭曲扩大问题。此现象也在宝洁、惠普、IBM 等大型跨国企业运作中得以印证^[3-4]。国内外学者已经对牛鞭效应进行了大量研究:从其社会、经济成因来看,主要有市场需求变动、信息共享限制、批量采购策略、价格波动等^[5-7];从其量化角度来看,主要有牛鞭效应表现的定性化描述和基于需求信息偏差的定量化描述^[8-9]。大量文献集中于牛鞭效应的控制方法与对策研究:例如刘春玲^[10]等利用 H_∞ 控制理论寻求集群式供应链系统中的最优订货数量,以降低安全库存水平和减弱牛鞭效应的影响^[11];Pishvae^[12]等针对牛鞭效应的需求波动成因,提出了一种鲁棒优化对策。更多的研究则是从供应链中信息共享价值的角度展开,如 Kelepouris^[13]等证实了信息共享可以降低两阶段供应链系统中的订单波动和上游企业的库存量。Ouyang^[14]指出,静态库存管理策略作用下的多阶段供应链系统也可通过信息共享(订单信息和库存信息)来降低牛鞭效应。此外,优化控制模型、基于代理商的仿真模型、预测方法等也被用于牛鞭效应控制策略的设计^[15-17]。

这些研究从不同层面探讨了牛鞭效应问题,丰富了供应链系统理论并为供应链管理提供了方法和决策制定依据。但就目前已有的研究文献来看,国

收稿日期:2011-04-19;修订日期:2012-12-31

基金项目:国家自然科学基金资助项目(90924022/G01);国家社会科学基金重点项目(08AJY024);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11_022 7);中央高校基本科研业务费专项资金资助

作者简介:李翀(1983-),女(汉族),四川成都人,福州大学管理学院,讲师,研究方向:供应链系统、物流管理。

内外对牛鞭效应的定性、定量研究方法尚存在以下不足：研究对象过于简化，例如仅考虑单条或两条供应链，较少从供应链网络系统的角度进行分析研究；对牛鞭效应主要成因之一的供应链运作时滞因素分析较少，忽略了需求波动在时间上的前后关联性。在此背景下，本文从供应链库存系统内部动力学机制的角度出发，构建了库存系统的状态转移模型，并引入时滞影响因素。针对牛鞭效应问题，利用系统稳定性理论，提出了一类新的基于库存波动状态的动态供应链库存控制策略，并给出策略参数设计的线性矩阵不等式优化模型，最后深入分析了此策略对牛鞭效应的抑制能力以及时滞因素对库存系统的影响。

2 供应链网络库存系统的状态转移模型

供应链系统是由原材料供应商、制造商、分销商、零售商，和最终用户组成的一个功能网络系统，其融合了物流、信息流和资金流三大基本流，是经济系统的重要组成部分。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。供应链成员往往采取增加库存的方法应对需求波动，故这种需求信息的扭曲将通过企业间的供需关系直接影响到企业的库存状态。这一方面增加了企业的库存管理成本，另一方面也将市场需求波动的经济风险放大并扩散至整个供应链系统。因此本文从供应链库存系统的角度来研究牛鞭效应的抑制问题。

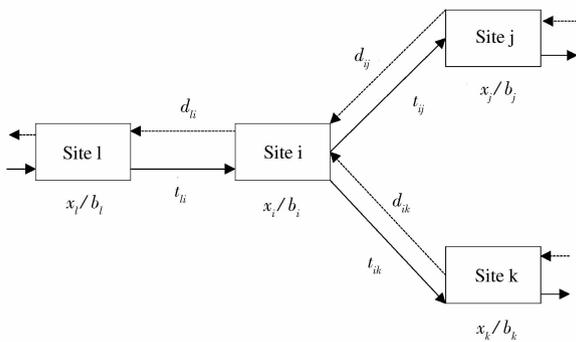


图1 供应链网络系统的微观结构图

考虑供应链网络系统的微观组成结构，如图1所示，以企业*i*为例，在第*k*个生产周期中，企业将其原料订单 $d_{li}(k)$ 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，假定企业*i*在第*k*时期从供应商*l*处

实收 $t_{li}(k)$ 的货物。类似， $d_{ij}(k)$ 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 为节点企业*i*的真实库存水平， \hat{x}_i 为市场需求稳定时对应的正常库存水平。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：

$$x_i(k+1) = x_i(k) + t_{li}(k) - (t_{ij}(k) + t_{ik}(k)) \tag{1}$$

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

$$b_i(k+1) = b_i(k) + d_{ij}(k) + d_{ik}(k) - t_{ij}(k) - t_{ik}(k) \tag{3}$$

(2)式考虑了库存短缺的情景。无库存短缺时，企业*i*的库存动态平衡关系为：

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

从供应链运作角度来看，牛鞭效应问题针对的是订货信息偏差放大的现象，而订单偏差直接影响到供应链成员的库存水平。为研究牛鞭效应，考虑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，库存水平的波动状态 δx_i 为：

$$\delta x_i(k) = x_i(k) - \hat{x}_i(k) \tag{5}$$

运用物质流平衡关系，可得(4)式对应的库存状态波动模型：

$$\delta x_i(k+1) = \delta x_i(k) + \delta d_{li}(k) - \delta d_{ij}(k) - \delta d_{ik}(k) \tag{6}$$

从(6)式反映的库存动态特征来看，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制定的影响，还受到下游相关企业的订单波动影响。为体现需求预期对企业订单制定的影响，本文采用如下的需求波动预测模型：

$$\begin{cases} \delta d_{ij}(k) = -k_{ij} \delta x_j(k) \\ \delta d_{ik}(k) = -k_{ik} \delta x_k(k) \end{cases} \tag{7}$$

即库存越多订货数量越少，其中 k_{ij}, k_{ik} 为预测比例系数。现实中，时滞因素广泛地存在于供应链运作的各个环节，从企业生产计划的制定、生产实施到订单处理和配送货物，都存在着时滞。时滞因素对供应链有两方面影响：一是使需求信息不能及时更新，影响了生产计划的制定和库存管理的效率，二是使产品和服务不能及时满足顾客需求，导致消费者满意度降低，影响企业的未来发展。本文关注于第一种影响，在考虑上述需求波动预测基础上，将时

滞因素 τ 引入库存波动模型(6)得:

$$\delta x_i(k+1) = \delta x_i(k) + \delta d_i(k) + (k_{ij}\delta x_j(k-\tau) + k_{ik}\delta x_k(k-\tau)) \quad (8)$$

可见,为抑制牛鞭效应,可将当期的订单补偿量 $\delta d_i(k)$ 作为企业库存策略的控制参数 $u_i(k)$,通过调整其取值来抑制下一期的库存扰动。为简化模型描述,下文分析中以 $x_i(k)$ 和 $u_i(k)$ 分别替代上面公式中的 $\delta x_i(k)$ 和 $\delta d_i(k)$,得:

$$x_i(k+1) = x_i(k) + u_i(k) + (k_{ij}x_j(k-\tau) + k_{ik}x_k(k-\tau)) \quad (9)$$

从单个企业的库存动态模型(9)出发,借助矩阵理论可得供应链网络库存系统的状态转移模型:

$$\begin{cases} X(k+1) = X(k) + CX(k-\tau) + U(k) \\ C = [k_{ij}] \end{cases} \quad (10)$$

其中, C 是需求预测系数矩阵,体现了供应链网络系统的拓扑结构以及节点企业间的供需关系。向量 $X(k)$ 由企业的库存波动状态组成; $U(k)$ 为供应链库存系统模型的控制参数,由各企业的订单补偿量 $\delta d_i(k)$ 组成。

3 基于库存波动状态的动态库存控制策略

受到社会经济、技术等因素的限制,供应链网络系统中的时滞是不可消除的。模型(10)描述了在时滞因素作用下供应链网络库存系统状态演变的内部动力学机制。从系统控制角度来看,供应链网络的牛鞭效应抑制问题变成:寻找适当的系统订单补偿量 $U(k)$,使得供应链库存状态波动 $X(k)$ 尽可能的小。为此,我们提出以下的基于库存波动状态的动态供应链库存控制策略:

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

其中, K 为订单决策系数,表明库存波动状态对订单调整量的影响程度。代入(10)式,得此策略作用下的供应链库存系统状态转移模型:

$$\begin{cases} X(k+1) = (I-K)X(k) + CX(k-\tau) \\ C = [k_{ij}] \end{cases} \quad (12)$$

其中, I 为单位矩阵。从上述供应链库存控制模型可看出,订单调整量决定了系统库存状态的变动方向。至此,针对一个供应链网络实体对象,本文研究的含时滞影响因素的牛鞭效应库存控制策略设计问题可描述成:给定该供应链系统中企业间的供需结构关系,通过市场调查分析企业面临的下游需求信息的更新时滞,根据当前库存水平波动量,企业应该如何调整其下一时期的订单量以防止库存水平

波动的扩大,降低牛鞭效应带来的风险。故下面探讨如何设计订单决策系数 K ,使该库存控制策略能够有效地抑制牛鞭效应造成的库存水平波动。

定理: 给定供应链网络库存系统模型(10)的系统参数值 C 和时滞 τ ,如果存在对称正定矩阵 $P \in R^{n \times n}$, $P \in R^{n \times n}$ 和任意矩阵 $W \in R^{n \times n}$ (n 为供应链网络系统的成员数目),以下线性矩阵不等式(13)成立,则含时滞的供应链库存系统(10)在动态库存控制策略(11)作用下是渐近稳定的,即牛鞭效应得以抑制。并且得到订单决策系数的可行解: $K = P^{-1}W$ 。

$$\begin{bmatrix} -P & P-W & PC \\ P-W^T & Q-P & 0 \\ C^T P & 0 & -Q \end{bmatrix} \quad (13)$$

证明:针对含时滞的供应链网络库存系统(10),设定如下形式的李雅普诺夫方程:

$$V(X(k)) = X^T(k)PX(k) + \sum_{d=k-\tau}^{k-1} X^T(d)QX(d) \quad (14)$$

其中, $P, Q \in R^{n \times n}$ 为对称正定矩阵, $X(k)$ 为库存波动状态向量。 $V(X(k))$ 沿系统(10)演变轨迹的时间差分形式为:

$$\begin{aligned} \Delta V(X(k+1)) &= V(X(k+1)) - V(X(k)) = \\ &= X^T(k+1)PX(k+1) - X^T(k)PX(k) + \\ &+ X^T(k)QX(k) - X^T(k-\tau)QX(k-\tau) = Z^T \Pi Z \end{aligned} \quad (15)$$

其中:

$$\begin{cases} \Pi = \begin{bmatrix} (I-K)^T P(I-K) + Q - P & (I-K)^T PC \\ C^T P(I-K) & C^T PC - Q \end{bmatrix} \\ Z = [X^T(k) \quad X^T(k-\tau)]^T \end{cases}$$

从上面模型的描述可知,抑制牛鞭效应带来的库存波动等效于系统(12)具有渐近稳定性。根据系统稳定性理论^[18],需满足:

$$\Pi = \begin{bmatrix} (I-K)^T P(I-K) + Q - P & (I-K)^T PC \\ C^T P(I-K) & C^T PC - Q \end{bmatrix} < 0 \quad (16)$$

对式(16)调用 Schur 定理可得:

$$\begin{bmatrix} -P^{-1} & I-K & C \\ (I-K)^T & Q-P & 0 \\ C^T & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (17)$$

不等式两边左、右乘对角矩阵 $diag\{P, I, I\}$,得:

$$\begin{bmatrix} -P & P(I-K) & PC \\ (I-K)^T P & Q-P & 0 \\ C^T P & 0 & -Q \end{bmatrix} < 0 \quad (18)$$

最后利用参数替换： $K = P^{-1}W$ ，可得线性矩阵不等式(13)，至此完成定理的证明。

从上述定理证明过程可知，含时滞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和库存策略共同决定的。满足线性矩阵不等式(13)约束的订单补偿量设计可以实现供应链系统的渐近稳定，起到抑制牛鞭效应的作用。

4 仿真分析

为验证本文设计的库存控制策略对牛鞭效应的抑制能力，分析时滞因素对库存系统动态特征的影响，下面对供应链网络系统(如图 2 所示)进行仿真分析。图中，箭头上的数字对应于系统结构参数矩阵 C 中的元素，即上游节点企业对下游需求波动的预测系数。本仿真案例中，各参数的取值含意与本文第 2 部分和第 3 部分描述的库存控制模型参数相一致，即：9 个节点企业对应的库存水平波动状态参数为 $X(k) = \{x_i(k), i = 1 \dots 9\}$ ，它们的订单调整参数为 $U(k) = \{u_i(k), i = 1 \dots 9\}$ ，该供应链网络的供需结构矩阵 C 为：

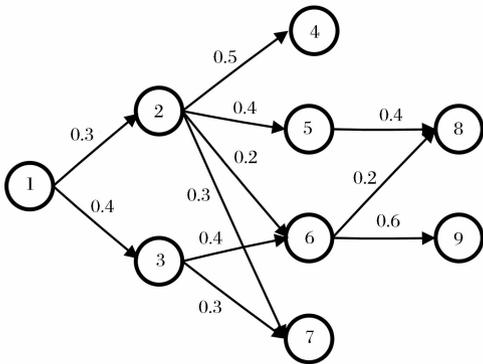


图 2 供应链网络仿真系统

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0.3 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.5 & 0.4 & 0.2 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0.6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

本仿真案例中，设定供应链末端节点企业(例如某产品的零售商)的初始库存水平波动为： $x_4(1) = 12, x_7(1) = 8, x_8(1) = 15, x_9(1) = 10$ 。以下分析将关注于受牛鞭效应影响较大的上游节点企业的库存波动状态 $x_i (i = 1, 2, 3, 5, 6)$ 。

4.1 供应链网络系统对库存控制策略参数的敏感性分析

本部分验证供应链网络库存系统在不同的订单决策系数作用下的牛鞭效应抑制效果，系统时滞参数 $\tau = 3$ 。选用的订单决策系数见表 1，表中库存控制参数均满足本文定理的约束要求。仿真结果分别放于系统库存波动状态图 3 至图 7。

表 1 供应链仿真系统中的库存控制参数设定

仿真情景 i	$i = 1$	$i = 2$	$i = 3$	$i = 4$	$i = 5$
订单决策系数 K_i	K	$0.5K$	$0.25K$	$0.15K$	$0.1K$

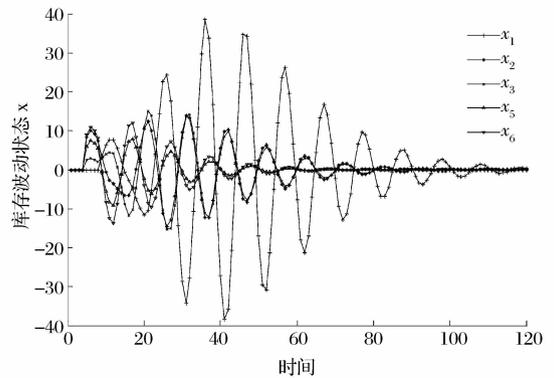


图 3 供应链库存波动状态图 ($K_1 = K$)

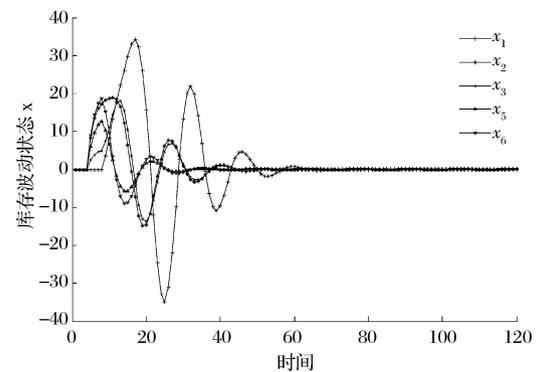
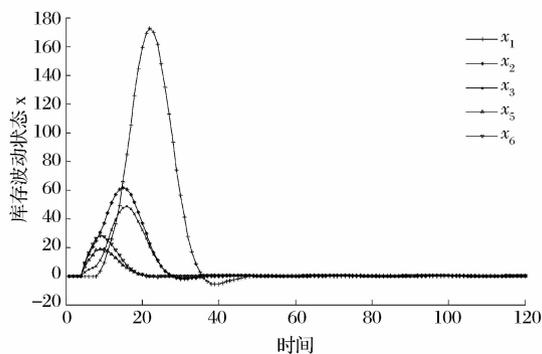
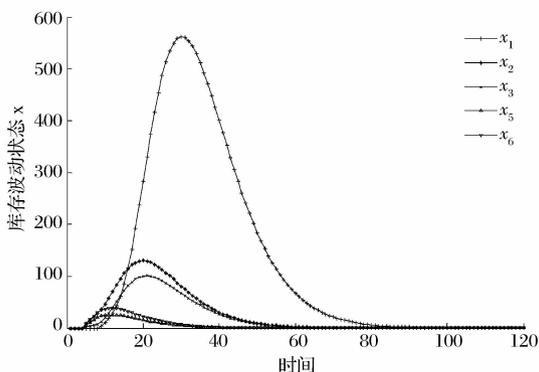
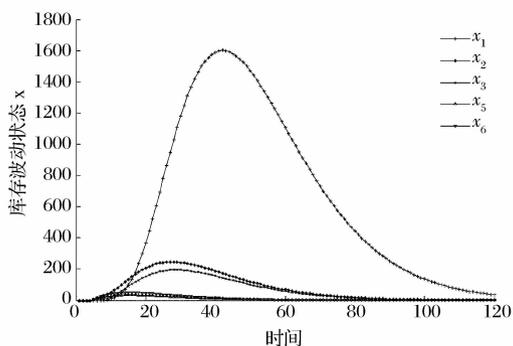


图 4 供应链库存波动状态图 ($K_2 = 0.5K$)

当库存控制策略参数 $K_1 = K$ ，见图 3，上游节点的库存系统在演变初期表现出典型的牛鞭效应现象。但随着系统演变，库存扰动受到控制，系统最终

图5 供应链库存波动状态图 ($K_3=0.25K$)图6 供应链库存波动状态图 ($K_4=0.15K$)图7 供应链库存波动状态图 ($K_5=0.1K$)

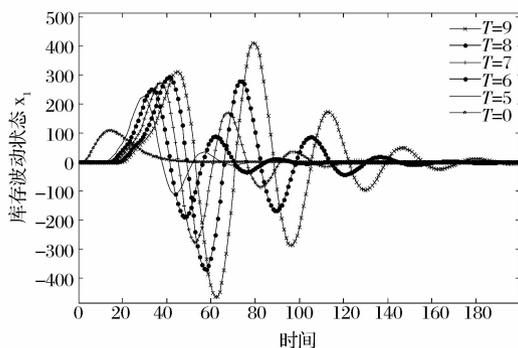
将返回到正常库存水平。当控制策略参数值下降到 $K_2=0.5K$ 时,见图4,库存控制的效果更好:上游节点的库存波动幅值和系统返回平稳状态所花费的时间都小于情景1。当控制参数值下降到 $K_3=0.25K$,图5,控制时间更短,但此情景下的库存波动幅值明显高于前两情景。此后,订单决策系数取值越小,牛鞭效应的控制效果越差,见图6,图7。

从上面的对比分析可知,初始供应链下游企业的库存波动会扩散到上游,并出现波动放大现象(牛鞭效应),越是位于供应链上游,企业受到的牛鞭效应影响越大。但在本文所提的动态库存控制策略的

作用下,库存波动得以控制,供应链网络系统可恢复到平稳状态。这证明了本文设计的基于库存波动的库存控制策略可以有效地抑制牛鞭效应。另外,对比不同控制参数的效果图可知,供应链网络库存系统对订单决策系数的取值较为敏感,不同的控制参数取值带来的牛鞭效应控制效果也不同,具体体现在控制时间的长短以及控制过程中企业库存水平波动幅度的大小两方面。过小的订单调整量所引起的库存水平波动较为平缓,但需要更长的控制时间;相反,过大的订单调整量虽然缩短了控制时间,但可能造成大幅度的库存水平波动。故在实际运用中,企业应根据自身对控制时间和库存波动幅值的要求来进行权衡和选择。

4.2 供应链网络系统对时滞因素的敏感性分析

本部分针对牛鞭效应的主要成因——时滞,对供应链网络库存系统进行敏感性分析,主要研究了供应链最上游节点 x_1 在不同系统时滞值影响下的库存状态演变特点。仿真中的时滞值设定为: $\tau=5\sim 9$,对照实验为 $\tau=0$,仿真结果见图8。

图8 不同时滞(T)下的库存波动状态图 (x_1)

由图8可以看出,系统时滞值越大,库存波动延续的时间越长,波动幅值越大。此外,随着时滞值的增加,库存波动最大幅值出现的时间也随之延迟,例如 $\tau=0,5,6,7$ 时的最大库存波动值出现在第一个波峰,而当 $\tau=8,9$ 时则推迟到第二个波峰出现。可见,供应链网络系统中的时滞因素不仅造成了牛鞭效应,对供应链库存系统的动态特征和库存控制策略的效果也有所影响。时滞越长,牛鞭效应持续的时间越长,带来的库存偏差越大,对供应链运作效率的影响越大。因此,企业在通过调整自身订单策略降低牛鞭效应影响的同时,也应提高自身对市场需求的处理效率,更高效地获得市场信息动态并及时地实施应对措施,从牛鞭效应的产生原因和控制手段两方面同时着手,提高供应链管理水

5 结语

通过实施供应链管理来提高企业绩效、增强企业竞争力已经得到了广泛的实践与认可。然而牛鞭效应的存在导致了供应链管理的低效,增加了企业管理的难度,成为供应链系统研究的重点和难点。本文针对牛鞭效应及其时滞成因,基于供应链网络库存的内部系统动力学机制,构建了含时滞的供应链库存系统状态转移模型。在模型基础上,提出一类新的基于库存波动状态的动态库存控制策略,借助系统稳定性分析方法,将该策略的参数优化求解问题转化成线性矩阵不等式的求解问题,并深入分析了供应链网络库存系统对库存控制参数值以及系统时滞因素的敏感性。系统仿真实验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。同时注意到,本文还有一些方面有待深入研究,例如,本文的库存控制设计是基于系统的最大时滞值,这会带来参数设计的保守性,后续研究可考虑具体的时滞变动特征,设计出更有针对性的库存策略,提升供应链管理水平。

参考文献:

- [1] Forrester J W. Industrial dynamics[M]. Cambridge: MIT Press, 1961.
- [2] Ouyang Y, Li Xiaopeng. The bullwhip effect in supply chain networks[J]. European Journal of Operational Research, 2010, 201(3): 799-810.
- [3] 姜继娇,杨乃定. 基于认知风险度量的ISC牛鞭效应分析[J]. 中国管理科学, 2006, 14(2): 124-128.
- [4] De Kok T, Janssen F, Van Doremalen J, Van Wachem E, Clerkx M, Peeters W. Philips electronics synchronizes its supply chain to end the bullwhip effect [J]. Interfaces, 2005, 35(1): 37-48.
- [5] Geary S, Disney S M, Towill D R. On bullwhip in supply chains- historical review, present practice and expected future impact[J]. International Journal of Production Economics, 2006, 101(1): 2-18.
- [6] Nienhaus J, Ziegenbein A, Schoensle ben 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.
- [7] 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.
- [8] Warburton R D H. An analytical investigation of the bullwhip effect[J]. Production and Operations Management, 2004, 13(2): 150-160.
- [9] Chen F, Drezner Z, Ryan J K, Simchi-Levi D. 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.
- [10] 刘春玲,黎继子,孟波. 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[J]. 中国管理科学, 2007, 15(1): 41-46.
- [11] 黄小原,卢震. 多分销中心供应链模型及其牛鞭效应的 H^∞ 控制 [J]. 中国管理科学, 2003, 11(1): 42-47.
- [12] 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.
- [13] Kelepouris T, Miliotis P, Pramataris K. The impact of replenishment parameters and information sharing on the bullwhip effect: A computational study [J]. Computers & Operations Research, 2008, 35(11): 3657-3670.
- [14] Ouyang Y F. The effect of information sharing on supply chain stability and the bullwhip effect [J]. European Journal of Operational Research, 2007, 182(3): 1107-1121.
- [15] Domoto E, Okuhara K, Ueno N, et al. Production planning system with multi-stages for controlling bullwhip effect by using particle swarm optimization [J]. Journal of Advanced Mechanical Design Systems and Manufacturing, 2007, 1(3): 319-327.
- [16] Aggelogiannaki E, Doganis P, Sarimveis, H. An adaptive model predictive control configuration for production-inventory systems [J]. International Journal of Production Economics, 2008, 114(1): 165-178.
- [17] Xie Ying. The influences of fuzzy demand forecast on bullwhip effect in a serial supply chain[C]. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management, New York, 2009.
- [18] Lyapunov A M. Stability of motion[M]. New York and London: Academic Press, 1966.

Bullwhip Effect in Supply Chain Networks with Lead Time Delays and Its Inventory Control Strategy

LI Chong^{1,2}, LIU Si-feng², FANG Zhi-geng², BAI Yang²

(1. School of Management, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. College of Economics and Management, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: The bullwhip effect problem has been recognized as one important topic in supply chain management. It brings bad effect on supply chain performance and reduces the efficiency of supply chain management. Based on the dynamic characteristics of inventories in a supply chain network, a supply chain inventory system state transition model is presented, which includes the operation lead time delays in system. Then a dynamic inventory control method is proposed to reduce the bullwhip effect. Based on the control theory, the solving process of the proposed inventory control method is presented. Further, the effect of lead time delays on inventory control performance of supply chain networks is studied. Simulation study shows the effectiveness of the proposed inventory control method in reducing bullwhip effect and in improving supply chain performance.

Key words: inventory control; supply chain systems; bullwhip effect; lead time delays.