

不确定需求下带约束供应链系统复杂动态行为分析

李卓群^{1,2}, 严广乐¹

(1. 上海理工大学 管理学院, 上海 200093; 2. 华东交通大学 信息工程学院, 南昌 330013)

摘要: 研究不同需求模式下,同时存在供应能力限制和不允许退货两个约束条件的非线性供应链系统的动态行为.通过计算订货决策空间中各种组合下的最大李雅普诺夫指数,比较分析不同情景模式供应链系统的准混沌行为.研究表明,受约束条件影响的供应链系统具有相对复杂的动态特征,但并不是无规律可循,即使在随机需求模式下,若订货策略合理,则仍可减轻甚至避免系统的混沌行为;反之,在稳定的需求模式下,不合理的订货策略仍会导致系统处于混沌状态.仿真实验验证了研究结果的合理性.

关键词: 李雅普诺夫稳定; 准混沌行为; 随机需求; 供应链

中图分类号: F224.12

文献标志码: A

Analysis of complex dynamics behaviors in constrained supply chain system under uncertain demand process

LI Zhuo-qun^{1,2}, YAN Guang-le¹

(1. Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China; 2. School of Information Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China. Correspondent: LI Zhuo-qun, E-mail: dandanli2002@163.com)

Abstract: Under different demand patterns, the dynamic behaviors of nonlinear supply chain system constrained by limited supply capacity and forbidden returns are studied. By calculating the maximum Lyapunov exponent, the quasi-chaotic behavior is analyzed under different scenarios of supply chain systems. The study demonstrates that the constrained supply chain system has more complex dynamic characters, but some regular rules can be concluded. Even in the random demand pattern, if ordering policy is reasonable, the chaotic behavior can be mitigated or even avoided. On the contrary, under the certain demand pattern, unreasonable ordering policies would lead to chaotic behaviors of the supply system. The experimental results show the reasonability of the conclusion.

Keywords: Lyapunov stability; quasi-chaotic behavior; random demand; supply chain

0 引言

近年来,越来越多的企业管理者意识到供应链管理的重要价值,管理者试图采取各种先进的管理方法降低供应链成本,改善企业服务水平,提高企业利润,从而在市场竞争中赢得先机.但企业的努力往往由于各种不确定因素的影响而受挫.供应链中存在各种类型的不确定性,如市场需求变化、生产能力受限、运输时间延迟等,这些因素导致供应链成为复杂的非线性系统.此外,不合适的管理决策可能会导致整个系统处于不稳定状态,无规律可循,势必大大增加管理的难度和管理成本.因此,考察受不确定因素影响的

供应链系统的动态行为,研究非线性供应链系统的稳定条件,对管理实践具有重要的实际意义.

对供应链稳定性的研究很早就已开始,在近年取得了一定的研究成果^[1-3]. Disney^[3]建立了供应链的线性模型,分析了供应链库存系统的准周期、牛鞭效应和稳定性; Mosekilde等^[4]在订货量非负约束的条件下,建立了非线性库存模型,并发现了系统中的混沌现象; Wang等^[5]利用切换系统控制原理研究了受供货能力限制的供应链系统的订货策略; Hwang等^[6]在确定需求过程下对复杂供应链系统进行了综合分析,研究结果显示库存策略、需求模式、信息共享、提前

收稿日期: 2014-11-20; 修回日期: 2015-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金项目(71262011); 上海市重点学科建设项目(S1201YLXK); 江西省教育厅科技项目(GJJ12285).

作者简介: 李卓群(1976—),女,副教授,博士生,从事复杂系统、供应链管理等研究; 严广乐(1957—),男,教授,博士生导师,从事复杂系统理论与应用等研究.

期、供应链阶层等因素都对库存系统的混沌现象有直接影响; Garcia等^[7]设计了一个供应链切换控制系统,通过内模控制技术提高了供应链的稳定性; 邱若臻等^[8]给出了能够抑制不确定需求影响的鲁棒优化策略; Wang等^[9]假设系统输入为确定的阶跃需求模式,对供应链进行了更符合实际的禁止退货限制,通过求解系统特征值分别给出了系统的稳定、周期、准周期以及混沌的边界; Hwang等^[10]将对混沌行为的研究引入到不确定需求的供应链环境下,采用3种确定需求函数(阶跃、脉冲、正弦)和3种不确定需求函数(独立分布、泊松分布和指数分布)分析不同管理策略下的李雅普诺夫指数,发现确定需求与不确定需求的系统特性有本质区别。

对现有研究进行分析发现: 1) 大部分相关研究将需求作为外生变量,即假设需求稳定,但事实上波动的需求模式更符合实际情况; 2) 为了使模型更符合实际,近期的研究考虑在供应链模型中增加约束条件,如禁止退货约束、供应能力限制约束,但大多数研究只考虑了单个约束条件; 3) 在对供应链动态行为分析研究中,一般仅比较同一供应链结构下各供应链成员的动态行为特征,而供应链结构不同是否对供应链系统稳定特性有影响需要进一步探讨。

本文在建立供应链模型时考虑供应能力有限和订货量非负两个约束条件,使建立的供应链模型能够更好地解释实际问题。在模型中引入自回归滑动平均(ARMA)随机需求函数,分析受随机需求影响的供应链系统的动态行为,并比较不同结构下供应链系统的动态特性变化,得出具有实践价值的结论以便供管理者参考。

1 供应链系统模型

1.1 基本模型

根据研究需要,本文建立了具有不同阶数的供应链模型,分别为单阶供应链模型和多阶供应链模型。单阶供应链模型假设供应链中只有上游零售商和下游市场需求; 多阶供应链模型由制造商、零售商和市场需求组成。虽然供应链结构不同,但供应链中物流和信息流的运作模式是一致的。供应链成员的工作以周期展开,每个周期供应链成员的事件流程为: 首先,在第 t 期初,供应链成员收到其上游 $t - t_d$ 期发出的货品(t_d 为运输延迟),到货量记为 A_t ,若为制造商,则 A_t 为本期生产的产品; 然后,供应链成员从实际库存 S_t 中发货,以满足下游的需求 L_t ,发货量为 C_t ,由于供货能力有限,供应链成员可能不能完全满足其下游的订货需求,可表示为 $C_t \leq L_t$; 最后,供应链成员决定本期的订货量 O_t 。订货决策是供应链库存管理

的重点,本文采用APVIOBPCS订货策略^[1,11],其基本思想为: 订货有固定的订货周期,每期的订货量由需求预测、库存调整和在途调整3部分组成。订货策略表达式如下:

$$O_t = \max(0, \hat{L}_t + AS_t + ASL_t), \quad (1)$$

$$AS_t = \alpha_S(S^* - S_t), \quad (2)$$

$$ASL_t = \alpha_{SL}(SL^* - SL_t). \quad (3)$$

其中: S^* 和 SL^* 分别为目标库存量和目标在途量,实际库存和实际在途的表达式为

$$S_t = \max(0, S_{t-1} + A_t - C_t), \quad (4)$$

$$SL_t = SL_{t-1} + C_t - A_t. \quad (5)$$

很多文献中都假设发货量为其下游 $t - 1$ 期的订货量,对于零售商,则为本期的市场需求量。本文假设供应链中存在供不应求的现象,因此,若对于供应链成员 i ,其下游为 $i - 1$,则发货量为

$$C_{i,t} = \begin{cases} O_{i-1,t-1}, & S_{i,t} \geq O_{i-1,t-1}; \\ S_{i,t}, & S_{i,t} < O_{i-1,t-1}. \end{cases} \quad (6)$$

对于零售商,发货量为

$$C_t = \begin{cases} L_t, & S_t \geq L_t; \\ S_t, & S_t < L_t. \end{cases} \quad (7)$$

每期供应链成员的到货量为其上游在 $t - t_d$ 期的发货量,即

$$A_t = C_{t-t_d}. \quad (8)$$

利用指数平滑法进行需求预测,零售商的需求预测为

$$\hat{L}_t = \theta L_t + (1 - \theta)\hat{L}_{t-1}, \quad 0 \leq \theta \leq 1. \quad (9)$$

其他供应链成员的需求预测为

$$\hat{L}_{i,t} = \theta O_{i-1,t-1} + (1 - \theta)\hat{L}_{i,t-1}, \quad 0 \leq \theta \leq 1. \quad (10)$$

式(1)、(4)、(6)和(7)都增加了约束条件,使供应链模型更贴近现实,但同时也提高了供应链模型的复杂程度,使整个供应链系统成为非线性系统。

在式(8)~(10)中,有两个参数需要确定,分别是平滑系数 θ 和运输延迟 t_d ,本文选取与文献[10]相同的参数设置,即 $\theta = 0.25$, $t_d = 3$ 。

1.2 市场需求过程

为了比较不同性质的需求分布对供应链系统的影响,本文分别选取确定性需求和随机需求两种需求分布。确定性需求为阶跃需求分布,随机需求为ARMA(1,1)需求。阶跃需求是考察供应链系统稳定性时常用的需求模式; ARMA需求模式为平稳可逆的时间序列,更符合现实市场规律,在研究供应链的文献中也较为常见^[12],但由于其具有随机性,一般研究者

在研究供应链动态特性时很少使用这种模式. 现实的市场需求在大多数情况下都具有随机性, 本文引入 ARMA 需求模式以便模拟更加真实的供应链环境, 将 ARMA(1,1) 需求表示如下:

$$L_t = \mu + \rho L_{t-1} - \beta \varepsilon_{t-1} + \varepsilon_t. \quad (11)$$

其中: μ 为常数; ρ 为自回归系数, 表示本期需求与上一期需求的相关程度, 且有 $|\rho| \leq 1$; ε 为市场需求的波动误差, 为服从 $(0, \delta^2)$ 独立分布的随机变量; β 为误差系数, $|\beta| \leq 1$. 本文设 $\mu = 12, \rho = 0.5, \beta = 0.5$.

2 系统动态特征分析

2.1 李雅普诺夫稳定

本文利用李雅普诺夫稳定条件作为分析供应链复杂特征的标准. 根据李雅普诺夫稳定定义: 如果系统初始点为 $X(t_0)$, 经过一定时间后, 系统仍趋于此点, 则此系统为李雅普诺夫稳定; 若系统处于波动状态, 即使波动导致系统达不到平衡点, 但是波动有界, 则也属于李雅普诺夫稳定范围, 此时, 系统具有周期解. 李雅普诺夫不稳定是指系统的振荡无界, 此时系统处于混沌状态或系统处于持续增长状态, 轨道趋于无限. 对于本文研究的供应链库存系统, 系统渐近稳定且轨道趋于固定点是理想状态, 但在达不到理想状态时, 若能够达到周期状态, 使得系统有一定的规律可循, 则也不失为一个好方案. 因此, 采用李雅普诺夫稳定研究供应链库存系统是合适的方法.

李雅普诺夫指数(以下简称 LE 值)是用于刻画李雅普诺夫稳定特征的有效手段. 若两个系统初始存在微小误差, 随时间(或迭代)产生分离, 则分离程度可以用 LE 的大小来衡量. LE 值的正负决定系统的动态特征: 若 $LE < 0$, 则系统处于稳定、周期、准周期状态; 若 $LE > 0$, 则系统处于不稳定的混沌或发散状态. 由于本文考察的模型具有约束条件, 系统轨道在运行时因约束条件的限制会遇到边界, 不会无限发散, 如无特别说明, 本文 $LE > 0$ 特指系统处于混沌状态.

2.2 准混沌行为的界定

混沌是出现在非线性系统中的一种确定但不可预测的现象. 它对初值敏感, 具有临界水平, 并具有分形维, 它表明有序和无序的统一. 根据混沌的定义, 混沌现象存在于具有确定性输入的非线性系统中. 由 2.1 节对李雅普诺夫稳定的分析中可以看出, 李雅普诺夫指数大小可以衡量系统轨道的偏离程度, 当其大于 0 时, 系统处于混沌状态. 在随机不确定需求条件下, 也可以通过计算李雅普诺夫指数的方法考察系统的动态特性, 但此时的混沌行为有可能是由随机需求产生的, 为了避免与传统定义的混沌行为混淆,

本文将输入具有不确定性的非线性系统的混沌行为称为准混沌行为^[10,13].

在实践中, 需求稳定不变只是理想状态, 大部分需求都具有随机性, 在这种随机需求下, 也必定会存在类似混沌的现象, 这种现象无规律可循, 是企业不希望看到的. 随机需求导致的混沌现象是否有规律, 是否可以在随机需求条件下尽量避免混沌现象的产生, 这些问题的解决对管理实践具有重要价值, 因此, 研究随机需求下的供应链系统的动态行为更具现实意义.

2.3 简化模型的稳定条件判定

本文构建的模型具有非负约束条件, 使得系统成为带切换的非线性系统, 具有复杂的系统动态行为. 对于复杂系统, 理论推导有一定难度, 因此本文利用 wolf 重构法计算李雅普诺夫指数值, 将李雅普诺夫指数作为供应链系统特征的量化指标, 分析复杂供应链系统的动态行为. 为了确保此方法的有效性, 先对其进行验证. 考虑对模型进行简化, 设时间延迟为 $t_d = 1$, 并设模型中只存在订货量非负约束, 且 $S_1 = \{X | O \geq 0\}, S_2 = \{X | O < 0\}$, 则上节的供应链模型可以表示为

$$X_t = A_i X_{t-1} + b_i, X_{t-1} \in S_i, i = 1, 2. \quad (12)$$

其中

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\alpha_{SL} & -\alpha_S & -\alpha_{SL} \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} (1-\theta)(1+\alpha_S+\alpha_{SL}) & \alpha_{SL}-\alpha_S \\ 0 & 1 \\ \leftarrow 0 & -1 \\ 1-\theta & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$b_1 = \begin{bmatrix} \theta\alpha_{SL} + (1+\theta)\alpha_S + \theta \\ -1 \\ 0 \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1-\theta & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \\ 0 \\ \theta \\ 0 \end{bmatrix},$$

$$X = [O \ S \ SL \ \hat{L} \ SL]^T.$$

由系统方程可知, 系统为分段线性系统, 若系统始终处于状态 A_1 , 则系统为简单的线性系统, 此时系统有两种状态, 即稳定状态和不稳定状态. 若系统稳定, 则系统演化趋于某点; 若系统不稳定, 则系统轨道将趋于无限. 此时, 系统的稳定性只由 A_1 决定. 而当系统在 A_1 和 A_2 两个状态下切换时, 系统成为复杂的非线性系统, 系统的稳定性由 A_1 和 A_2 共同决定. 状态 A_2 的作用使得系统轨道不会趋于无限, 而会在一定区间内振荡, 这种振荡有可能是周期或准周期的, 即属于李雅普诺夫稳定条件, 也有可能是混沌的, 即属于李雅普诺夫不稳定条件.

由文献[9]求得 A_1 的特征值为

$$\lambda_{A_1} = \frac{1 - \alpha_{SL} \pm \sqrt{(1 + \alpha_{SL})^2 - 4\alpha_S}}{2}. \quad (13)$$

由式(13)可以给出系统的发散条件, 即

$$\alpha_S \leq \frac{(1 + \alpha_{SL})^2}{4}. \quad (14)$$

系统渐近稳定的条件为 λ_{A_1} 的模小于1, 此时有

$$0 < \alpha_S < 2\alpha_{SL} - 2, \quad -1 < \alpha_{SL} < 1; \quad (15)$$

$$2\alpha_{SL} - 2 < \alpha_S < \alpha_{SL} + 1, \quad 1 < \alpha_{SL} < 3. \quad (16)$$

系统周期稳定的条件为矩阵 $A_1^i A_2^j$ 渐近稳定, 因此可以通过求解 $A_1^i A_2^j$ 特征根, 并令其模小于1求得系统有周期解的条件. 由于 $A_2^j = A_2$, 只需考虑 $A_1^i A_2$ 即可.

若 $|\lambda_{A_1 A_2}| < 1$, 则可求得系统保持周期2的区域, 即

$$0 < \alpha_S < 2, \quad \alpha_S > \alpha_{SL} + 1; \quad (17)$$

若 $|\lambda_{A_1^2 A_2}| < 1$, 则可求得系统保持周期3的区域, 即

$$\alpha_{SL} < 2, \quad \alpha_S < \frac{2}{2 - \alpha_{SL}}; \quad (18)$$

若 $|\lambda_{A_1^3 A_2}| < 1$, 则可求得系统保持周期4的区域, 即

$$-2 \leq \alpha_S^2 + 2\alpha_S \alpha_{SL} - \alpha_S \alpha_{SL}^2 - 3\alpha_S \leq 0, \quad (19)$$

$$\alpha_S \geq \alpha_{SL} + 1. \quad (20)$$

按照此思想, 还可以求得更大周期解的区域, 但由于更大周期解对本文后续研究的作用不大, 本文只考虑周期4以内的稳定条件. 利用式(15)~(19)绘制出系统渐近稳定和系统周期2、3、4稳定的区域, 如图1所示的白色区域部分.

应用式(12)的模型在 Matlab 下进行仿真实验, 并采用 wolf 法计算系统的 LE 值, 求得 $LE < 0$ 的区域, 如图2所示白色部分, 即系统处于渐近稳定、周期状态对应的 $[\alpha_S, \alpha_{SL}]$ 区域.

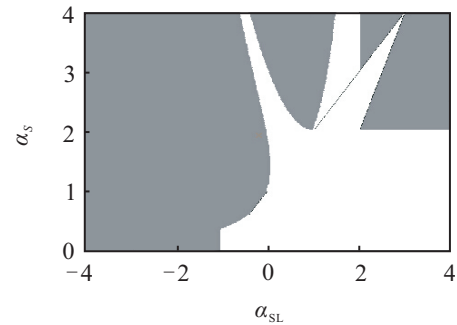


图1 李雅普诺夫稳定及周期4以内的区域

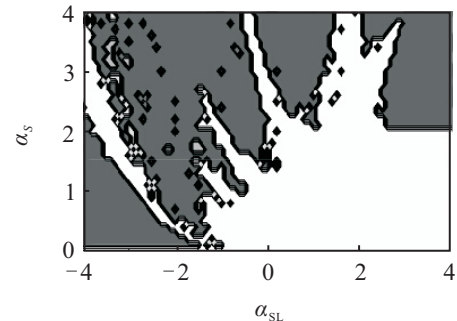


图2 李雅普诺夫指数小于0的区域

比较图1和图2可知, 两图中有近似的稳定区域, 说明利用李雅普诺夫指数刻画系统动态行为的方法与理论推导的结果是一致的, 此方法是可行的. 图2的白色分支与图1相比较多, 这是因为图1中只显示了周期4以内的稳定区域, 而图2显示了所有 $LE < 0$ 的区域, 多出的分支是能够使系统处于较大周期的区域. 这也说明, 利用模拟方法求出的稳定区域更加准确.

从上述理论推导的过程可以看出, 如果时间的延迟较大, 且系统的约束条件增加, 则理论推导的难度较大, 因此本文后续将利用计算李雅普诺夫指数的方法进行的研究.

3 系统仿真与数据分析

3.1 订货决策调整参数

由上节分析可以看出, 库存调整参数 α_S 和在途调整参数 α_{SL} 对系统的动态特征有重要影响. 上节给出了在简化系统模型下李雅普诺夫稳定的条件, 为了进一步研究不同订货策略对带约束的非线性供应链系统的影响, 本文设计仿真实验计算决策空间 $[\alpha_S, \alpha_{SL}]$ 中各种订货参数组合下的 LE 值, 利用 LE 的大小考察供应链系统动态特征. 考虑到在管理实践中, 决策者更加注重库存调整, 而且调整参数都小于1, 因此本文假设两个参数的取值范围为 $0 \leq \alpha_{SL} \leq \alpha_S, 0.02 \leq \alpha_S \leq 1$.

α_S 和 α_{SL} 都以步长为0.02变化, 仿真实验需要计算各种参数组合下的 LE 值, 共计有1325个参数组合. 当 LE 小于或等于0时, 说明系统处于稳定、周期

或准周期状态,是订货决策的理想状态;当LE大于0时,说明系统处于混沌或准混沌态。

3.2 仿真分析

根据研究需要,本文设计了6个情景,前3个情景以确定需求模式为基础,后3个情景以随机需求模式为基础。第1个和第4个情景为单阶供应链,其余4个情景为多阶供应链。6个情景分类方法如表1所示。

表1 实验情景设计

需求模式	供应链成员		
	单阶供应链 零售商	多阶供应链 零售商	多阶供应链 制造商
阶跃需求	1	2	3
随机需求	4	5	6

对于每个情景,利用Matlab进行仿真实验,计算1325个订货决策参数组合下的LE值,并以Contour图的形式表示。仿真运行2000次,若周期以天计算,即为5年的数据量,考虑到目前企业实际的库存周转周期都较短,5年的数据量应该是足够的。图3~图5分别为在6种情景下的Contour图。

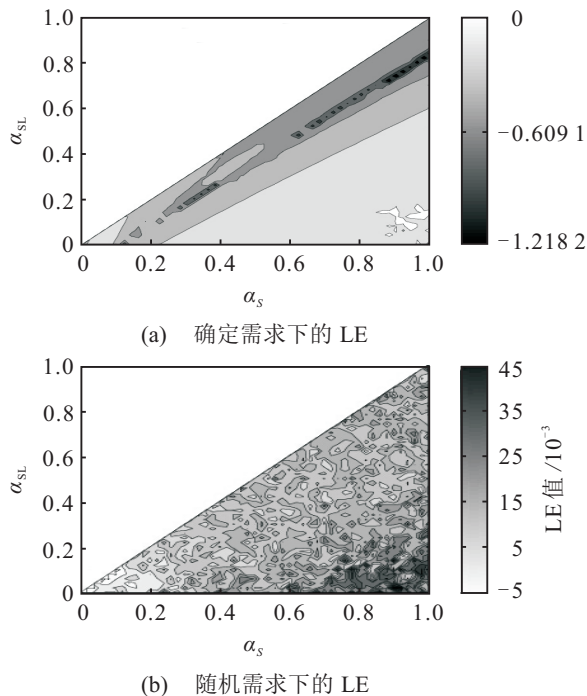


图3 单阶供应链不同需求模式下零售商LE

由图3可以看出,在阶跃需求模式下,单阶供应链系统的LE值在整个决策空间域内都小于0,表明此时系统处于稳定、周期或准周期状态;而在随机需求模式下,LE值在大部分决策域内都大于0,即系统处于准混沌状态。这与实际库存系统的情况是一致的,若需求稳定,则库存系统稳定,但若需求波动较大,则系统不能够保持稳定状态运行。进一步观察图3(b)发现,即使在随机需求模式下,仍存在部分决策域使得LE值为负,即系统具有稳定特征。此部分出现

在 α_S 和 α_{SL} 都较小的区域,说明在随机需求条件下,可以采用较小的库存和在途调整参数以尽量减弱系统的不稳定状态。

图4为多阶供应链确定需求模式下零售商和制造商的LE Contour图。

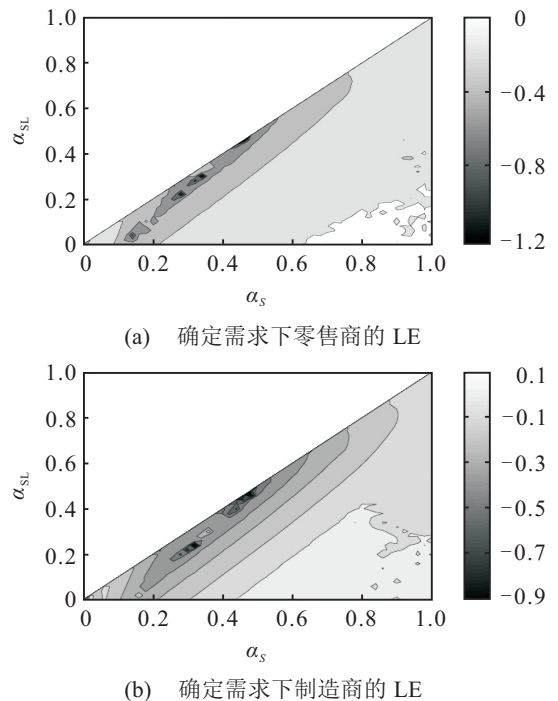


图4 多阶供应链确定需求模式下供应链成员LE

图5为多阶供应链ARMA随机需求模式下零售商和制造商的LE Contour图。

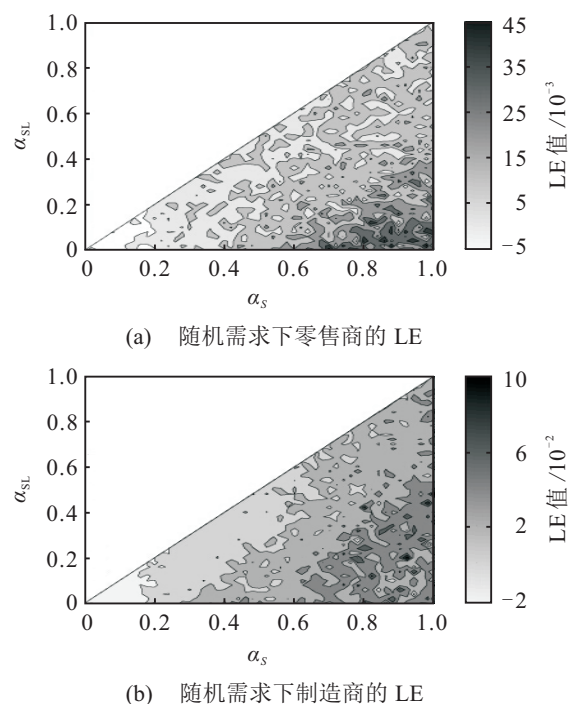


图5 多阶供应链随机需求模式下供应链成员LE

在图4中:零售商的情况与单阶供应链基本相同,LE值都在小于0的范围内;但是制造商的LE值

却在很大一部分区域内大于0,此现象在 α_S 较大且 α_{SL} 较小的区域内出现.这可能是由信息延迟引起的,制造商相对于零售商距离市场需求较远,需求信息的传递需要更多的时间,因此产生时滞,导致系统的稳定区域降低,系统更加复杂.上述现象表明,供应链上游的不稳定风险比供应链下游大,即使需求稳定,若供应链上游成员订货策略不合理,则仍会导致系统进入混沌状态.

分析图5可知,无论是零售商还是制造商,在随机需求模式下,大部分决策区域的LE值都大于0;但同时两个成员都有一部分区域可以使得LE值小于0,说明合理的订货策略可以缓解甚至消除随机输入带来的不确定性.

3.3 结果分析

以上仿真实验以Contour图的形式显示了 α_S 和 α_{SL} 在1325种组合下的LE值,通过仿真实验可以直观地理解LE值受调整参数变化的影响,并得到一些有用结论.在实验中,为了避免实验结果的随机性,1325次模拟采用同一随机需求数据.为了使研究更有意义,也为了进一步消除随机对实验结论的影响,本节对整个调整参数区域空间进行划分,并计算各区域平均LE值,比较分析各区间平均LE值的取值范围和变化趋势.

图6给出了8个区域空间的划分范围,具体的划分标准参考文献[10].

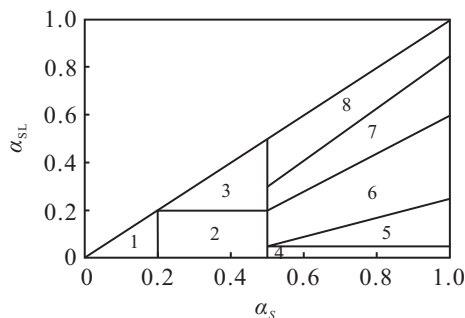


图6 调整参数区域划分

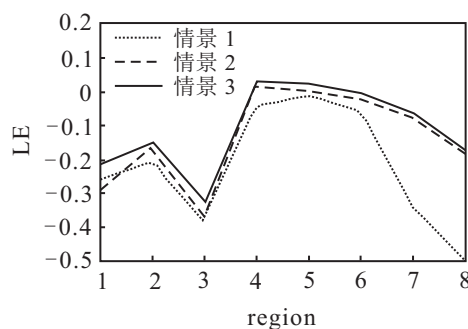


图7 确定需求下各区域平均LE值变化

分别计算图6中8个区域的平均LE值,图7和图8分别为确定需求和随机需求下不同供应链情景平

均LE值在8个区域之间的变化趋势.两图中情景序号所代表的具体供应链设置可参见表1.

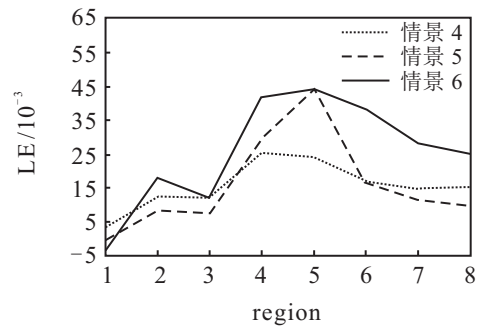


图8 随机需求下各区域平均LE值变化

观察分析图7和图8,可以得到如下结论:

1) 虽然在不同区域内平均LE值有一定差别,但是在各种情景下总体趋势大致相同,说明供应链系统的复杂性受订货策略影响.订货策略对系统动态行为有决定性影响,管理者应对订货策略产生足够的关注和重视.

2) 图7显示在确定需求模式下,单阶供应链在8个区域的平均LE值都小于0,而在多阶供应链模式下,在区域4和区域5(即库存调节参数 α_S 大于0.5且在途调整参数 α_{SL} 较小时)平均LE值大于0,说明即使需求稳定,供应链系统仍然可能处于准混沌状态.管理者应尽量避免调整参数组合在此区域出现.

3) 由图8可以看出,在随机需求模式下的3种情景均在区域4和区域5取得较大的平均LE值.特别值得关注的是,在多阶供应链随机需求模式情景下,平均LE值在区域1为负,即当 α_S 和 α_{SL} 都小于0.2时,即使需求不确定,仍可保证整个系统处于相对稳定的状态.

4) 无论是确定性需求还是随机需求,同一区域内制造商的平均LE值都处于零售商的上方,这说明处于供应链上游的制造商比处于下游的零售商更加难以控制.

值得一提的是,在确定需求模式下,本文的实验结果与文献[10]基本一致,而在随机需求模式下却有较大差异.文献[10]在随机需求条件下得到的出现最大平均LE值的区域是1,最小平均LE值区域是4和5,而本文得到的结果恰恰相反.这样的差异是由于本文模型中增加了供货限制这一约束条件.在确定需求下,供货不足的现象基本不会发生,因此本文与文献[10]得出的结果一致.但是,在随机需求条件下,供货不足现象却时有发生,使得本文得出的结果与文献[10]差距较大.

在随机需求下制造商的缺货量Contour图如图9所示.

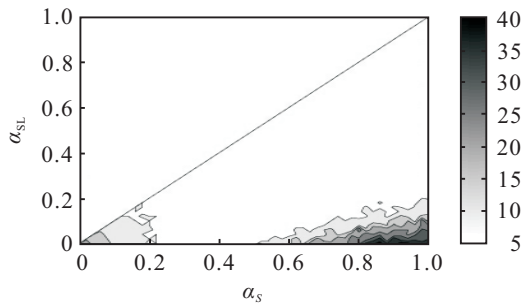


图9 随机需求下制造商缺货量

由图9可以很明显地看出, 缺货发生在区域1、区域4和区域5, 导致本文得到的这3个区域的动态特征与文献[10]不同. 这一发现说明, 在基本的供应链模型中增加约束条件会改变系统的动态行为. 关于此问题, 今后将做更深入的研究. 本文的研究结果适用于禁止退货和供应能力限制两个约束条件同时存在的供应链环境.

4 结 论

供应链是一个充满各种不确定性的复杂系统, 本文通过设定两种约束条件, 建立了一个更加接近真实的非线性供应链系统模型. 分别在6种供应链情景下进行仿真实验, 计算各种调整参数组合下的最大李雅普诺夫指数, 用于分析供应链系统的动态特性. 通过对实验数据的分析发现, 在随机不确定需求模式下, 非线性供应链系统在一定的订货策略下仍然可以保持稳定状态; 而即使需求确定, 在一部分调整参数组合区域内, 供应链系统也有可能演化为混沌状态. 在供应链中所处位置不同, 其系统动态特性有较大差距. 但是, 合适的订货策略可以弥补供应链位置产生的影响, 建议在制定订货策略时, 应注重对供应链位置的分析, 供应链成员采取适合自己的订货策略.

本文的研究还为分析实际企业数据提供了新的思路. 混沌原理可以用于分析各种系统数据, 但在分析混沌现象时应考虑数据的来源和当时供应链的具体结构. 由随机需求产生的准混沌行为不一定是由订货策略导致的, 更好地理解供应链中的准混沌现象可以帮助决策者作出更为正确、有效的决策.

参考文献(References)

[1] Dejonckheere J, Disney S M, Lambrecht M R, et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach[J]. *European J of Operational Research*, 2003, 147(3): 567-590.

[2] Nagatani T, Helbing D. Stability analysis and stabilization strategies for linear supply chains[J]. *Physica A: Statistical*

Mechanics and Its Applications, 2004, 335(3): 644-660.

[3] Disney S M. Supply chain aperiodicity, bullwhip and stability analysis with Jury's inners[J]. *IMA J of Management Mathematics*, 2008, 19(2): 101-116.

[4] Mosekilde E, Laugesen J L. Nonlinear dynamic phenomena in the beer model[J]. *System Dynamics Review*, 2007, 23(2): 229-252.

[5] Wang H, Liu H, Yang J. Dynamic analysis of a two-stage supply chain—a switched system theory approach[J]. *The Int J of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(1/2): 200-210.

[6] Hwang H B, Xie N. Understanding supply chain dynamics: A chaos perspective[J]. *European J of Operational Research*, 2008, 184(3): 1163-1178.

[7] Garcia C A, Ibeas A, Vilanova R. A switched control strategy for inventory control of the supply chain[J]. *J of Process Control*, 2013, 23(6): 868-880.

[8] 邱若臻, 黄小原, 苑红涛. 需求分布不确定条件下的多周期库存鲁棒优化模型[J]. *控制与决策*, 2014, 26(9): 1644-1648.

(Qiu R Z, Huang X Y, Yuan H T. Robust optimization model of multi-period inventory with uncertain demand distribution[J]. *Control and Decision*, 2014, 26(9): 1644-1648.)

[9] Wang X, Disney S M, Wang J. Exploring the oscillatory dynamics of a forbidden returns inventory system[J]. *Int J of Production Economics*, 2014, 147: 3-12.

[10] Hwang H B, Yuan X. Interpreting supply chain dynamics: A quasi-chaos perspective[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 233(3): 566-579.

[11] 王晶, 王寻. 受约束供应链模型的复杂动力学行为[J]. *系统工程理论与实践*, 2012, 32(4): 746-751.

(Wang J, Wang X. Complex dynamic behaviors of constrained supply chain systems[J]. *System Engineering — Theory & Practice*, 2012, 32(4): 746-751.)

[12] Boute R N, Disney S M, Lambrecht M R, et al. Coordinating lead times and safety stocks under autocorrelated demand[J]. *European J of Operational Research*, 2014, 232(1): 52-63.

[13] Ueno K, Fan C. Quasi-chaotic behaviors of narrow-band response of a non-deterministic resonant system: Application to analysis of ship motion in irregular seas[J]. *Japan J of Industrial and Applied Mathematics*, 2013, 30(1): 203-225.

(责任编辑: 闫妍)