

基于组合预测的供应链系统建模及其鲁棒状态反馈镇定

张宝琳[†], 刘丽萍, 魏 丽

(中国计量大学 理学院, 杭州 310018)

摘要: 针对上游节点未能及时获取下游节点当前订单信息的情形, 提出一种利用历史订单信息预估供应链下游节点企业订货量的线性组合预测方法, 进而将供应链系统模型化为一个含有多状态时滞的线性时滞不确定性系统, 给出了供应链系统时滞依赖状态反馈鲁棒镇定的充分条件和状态反馈控制器设计方法. 仿真算例表明, 组合预测方法以及鲁棒状态反馈控制器能有效抑制牛鞭效应, 显著改善供应链系统的性能.

关键词: 供应链系统; 牛鞭效应; 需求预测; 时滞依赖; 镇定

中图分类号: TP273 文献标志码: A

Dynamic modeling and robust state feedback stabilization of supply chains via demand combination prediction schemes

ZHANG Bao-lin[†], LIU Li-ping, WEI Li

(College of Science, China Jiliang University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: In view of the case that present demand signals of the downstream sites are not available for the upstream sites of a supply chain, a combined demand prediction scheme is proposed based on the past demand signals of downstream sites of the supply chain. Then the supply chain under consideration is modeled as an uncertain linear system with multiple state time-delays. Some delay-dependent sufficient conditions of the robust state feedback stabilization of the supply chain system and the design scheme of the controller are presented. Simulation results show that, by using the designed demand prediction method and controllers, the bullwhip effect is reduced effectively and the performance of the supply chain system is improved remarkably.

Keywords: supply chain system; bullwhip effect; demand prediction; delay-dependent; stabilization

0 引言

供应链系统是一个围绕核心企业, 通过对物流、资金流、信息流的控制, 将原材料供应商、制造商、分销商、零售商和终端客户连成一个整体的功能网络系统^[1], 是经济系统中重要的增值链. 然而, 随着经济全球化进程的不断加快以及科学信息技术的不断更新, 社会经济环境愈加复杂多变, 使得供应链系统的动态控制和管理难度越来越大. 其中, 牛鞭效应——客户需求信息在沿着供应链从下游终端客户到上游原材料供应链的过程中不断被扭曲并逐渐放大的一种现象^[2], 作为供应链系统中最典型的特征, 自从被首次发现以来^[3], 如何有效地预测和控制牛鞭效应已经成为供应链管理领域的重要课题之一, 引起了国内外学者的广泛关注.

影响牛鞭效应的因素主要集中于市场需求波动、

信息共享缺乏、价格变动、批量订货策略等^[4-7]. 为了有效抑制牛鞭效应, 文献[8]利用指数平滑需求预测方法和 APIOPBCS 订单策略建立了供应链系统的状态空间模型, 并得到了使系统稳定的订单策略的参数取值范围. 文献[9]基于 C_0 -半群理论和谱分析方法, 研究了供应链系统解的适应性问题. 文献[10]对于具有订货提前期的动态供应链系统, 利用现有的库存水平信息, 提出了一个时滞依赖的鲁棒控制方法来抑制牛鞭效应. 文献[11]利用鲁棒 H_∞ 控制策略抑制生产时滞、成本参数以及需求不确定性对供应链系统的干扰, 使得供应链具有理想的运作成本. 文献[12]建立了一个动态供应链时变偏差系统模型, 并借助线性矩阵不等式方法提出了一个 H_∞ 鲁棒控制策略来有效抑制由需求扰动引起的牛鞭效应问题. 文献[13]根据供应链网络库存状态的内部系统动力学

收稿日期: 2016-02-29; 修回日期: 2016-05-17.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61379029); 浙江省高校中青年学科带头人学术攀登项目(PD2013190).

作者简介: 张宝琳(1972-), 男, 教授, 博士, 从事时滞系统、网络控制系统、供应链管理等研究; 刘丽萍(1992-), 女, 硕士生, 从事供应链管理的研究.

[†]通讯作者. E-mail: zhangbl2006@163.com

机制,建立了供应链网络系统模型,并通过基于库存波动状态的库存控制策略研究了系统的牛鞭效应问题.最优控制、滑模控制等控制方法也被用于控制牛鞭效应的研究中^[14-15].另外,由于信息共享缺乏是导致牛鞭效应的关键因素^[16-17],学者们通过增强信息共享^[18]、改善需求预测机制^[19]和制定合理的订货策略^[20]等方法来抑制牛鞭效应.注意到,上述研究模型大多建立在下游节点企业当前订单信息已知的基础之上.然而,由于信息共享的缺乏以及各种延迟的影响,上游企业对下游企业的当前订单信息并不能及时获取.在此情况下,利用供应链中相关下游节点企业已知的过去若干订单信息,设计新的订单预测方法,并基于此寻找有效的控制方法进而抑制供应链系统的牛鞭效应尤为必要.

本文首先基于供应链下游节点企业前几个连续订货周期的订单信息,给出预测供应链下游节点企业订货量的线性组合预测方法,进而在考虑供应链各企业产品生产过程和库存决策实施过程中的不确定性因素的基础上,将供应链系统模型化为一个含有多状态时滞的线性时滞不确定性系统.进一步,研究了时滞依赖鲁棒状态反馈镇定供应链系统的充分条件以及求解状态反馈控制器的方法,并基于一个供应链简化模型分析了鲁棒状态反馈镇定控制器的有效性,以及线性组合预测方法对供应链系统性能的影响.仿真结果表明,利用历史订单信息,通过线性组合预测下游节点订货量的方法和所设计的鲁棒状态反馈控制器能有效减小牛鞭效应,进而改善动态供应链系统的性能.

1 问题描述

本文考虑一类供应链模型^[10],其局部拓扑结构如图1所示.其中: l, i, j 和 p 表示供应链的各个节点; $x_i(k), x_{i1}$ 和 x_{i2} 分别表示供应链第 i 个节点在 k 时刻的总库存量、原材料库存量和成品库存量; $d_{li}(k)$ 表示第 i 个节点在 k 时刻向第 l 个节点的订单量, $s_{li}(k)$ 表示第 l 个节点向第 i 个节点实际的发货量.

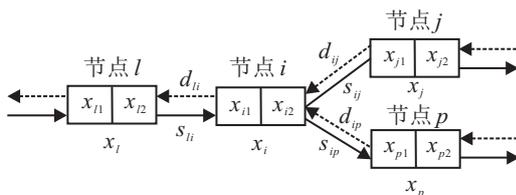


图1 供应链局部结构^[10]

该供应链模型^[8]中,供应链各个节点的总库存量进一步细分为原材料库存量和成品库存量.以第 i 个节点为例,有

$$x_i(k) = x_{i1}(k) + x_{i2}(k). \quad (1)$$

在下面的讨论中,假设该供应链包含 n 个节点,且不存在库存短缺的情形.根据供求平衡关系,节点 i 的库存动态方程可表示为

$$\begin{cases} x_{i1}(k+1) = x_{i1}(k) + d_{li}(k) - f_i x_i(k), \\ x_{i2}(k+1) = x_{i2}(k) + p_i f_i x_i(k) - d_{ij}(k) - d_{ip}(k). \end{cases} \quad (2)$$

其中: f_i 表示供应链的第 i 个节点中可用于生产成品的库存量占总库存量 x_i 的比例, p_i 表示可用于生产的每单位库存量可生产出的产品量, $i = 1, 2, \dots, n$.

进而,由式(1)和(2)可得

$$x_i(k+1) = [1 + (p_i - 1)f_i]x_i(k) + d_{li}(k) - d_{ij}(k) - d_{ip}(k). \quad (3)$$

在供应链系统中,牛鞭效应不可避免.为此,由式(3)可知,供应链第 i 个节点的库存偏差量满足如下动态方程:

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

其中: $\delta x_i, \delta d_{li}, \delta d_{ij}$ 和 δd_{ip} 分别表示第 i 个节点关于标称库存的偏差量,第 i 个节点向第 l 个节点关于标称订货量的订货偏差,第 j 个节点和第 p 个节点分别向第 i 个节点关于标称订货量的订货偏差.

有关供应链的订货补偿策略、库存量变化趋势以及下游订单的预测方法的研究,均基于增量方程(4)展开.然而,为表示简单起见,在下文的讨论中,增量方程(4)中的符号 δ 一并省略.

为了抑制牛鞭效应,通常视实际订单波动 d_{li} 为动态供应链系统(3)的控制变量,并设计适当的订单补偿方法来调节供应链的库存变化^[8].为此,令

$$u_i(k) := d_{li}(k). \quad (5)$$

注意到,供应链的上游节点通过选择适当的预测机制来预测当前时刻下游节点的订单信息进而调节供应链的库存量,是减小牛鞭效应简单而有效的方法之一^[10].考虑到由于时滞、信息共享等因素的影响,供应链的上游节点 i 并不总是能够及时而准确地获取当前时刻下游节点 j 和 p 的订单信息.本文针对当前时刻下游节点订单信息未知的情形,提出一种基于下游节点过去连续若干个订单周期的订单信息进行预测的新的订单预测方案,进而研究使动态供应链系统渐近稳定的条件.

为此,设下游节点 j 和 p 向上游节点 i 的订单预测

量由最近连续 h 个历史订单信息描述,即

$$\begin{cases} d_{ij}(k) = - \sum_{m=1}^h \alpha_m c_{ijm} x_j(k-m), \\ d_{ip}(k) = - \sum_{m=1}^h \alpha_m c_{ipm} x_p(k-m). \end{cases} \quad (6)$$

其中: h 为正整数, $\alpha_m \geq 0$, $c_{ijm} > 0$ 和 $c_{ipm} > 0$ 表示权重系数, 满足 $\sum_{m=1}^h \alpha_m = 1$; 负号表示库存水平与订单波动呈相反的变化趋势.

注1 在文献[10]中, 订单预测方法是基于下游节点的当前订单信息. 本文提出的预测方案, 是基于下游节点企业过去连续的若干个订单信息. 前者适用于上游节点已知下游节点当前订单信息的情形, 后者则适用于上游节点无法获取下游节点当前订单信息的情形. 在下游节点当前订单信息已知的情况下, 文献[10]中采用的预测方法在减小牛鞭效应、改善供应链系统的暂态性能和稳态性能方面无疑优于本文提出的订单预测方法. 当上游节点因时滞、信息共享、外部干扰等因素影响而导致未能及时获取下游节点当前订单信息的情况下, 本文提出的订单预测方法为改善供应链系统的整体性能提供了一种简单可行的选择.

由式(4)、(5)和(6)可得

$$x_i(k+1) = [1 + (p_i - 1)f_i]x_i(k) + u_i(k) + \sum_{m=1}^h \alpha_m [c_{ijm}x_j(k-m) + \alpha_m c_{ipm}x_p(k-m)]. \quad (7)$$

事实上, 式(7)容易推广到一般情形, 即

$$x_i(k+1) = [1 + (p_i - 1)f_i]x_i(k) + u_i(k) + \sum_{m=1}^h \alpha_m \sum_{j=1, j \neq i}^n c_{ijm}x_j(k-m). \quad (8)$$

令

$$\begin{aligned} x(k) &= [x_1(k) \ x_2(k) \ \cdots \ x_n(k)]^T, \\ A &= \text{diag}\{a_{11}, a_{22}, \cdots, a_{nn}\}, \quad B = I, \\ C_m &= [c_{1m} \ c_{2m} \ \cdots \ c_{nm}]^T. \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} c_{im}^T &= [c_{i1m} \ \cdots \ c_{i,i-1,m} \ 0 \ c_{i,i+1,m} \ \cdots \ c_{inm}], \\ a_{ii} &= 1 + (p_i - 1)f_i, \quad i = 1, 2, \cdots, n. \end{aligned}$$

于是, 式(8)可改写为状态空间方程, 即

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Ax(k) + Bu(k) + \sum_{m=1}^h \alpha_m C_m x(k-m), \\ k &= 0, 1, 2, \cdots. \end{aligned} \quad (9)$$

特别地, 系统(9)的初始状态函数 $\varphi(k)$ 给定为

$$\varphi(k) = x(0), \quad k = -h, -h+1, \cdots, -1, 0, \quad (10)$$

其中 $x(0)$ 为已知的系统初始库存水平.

进一步, 考虑各节点的库存和订单扰动, 由式(9)可得到供应链系统的不确定性模型

$$x(k+1) = [A + \Delta A(k)]x(k) + [B + \Delta B(k)]u(k) + \sum_{m=1}^h \alpha_m C_m x(k-m). \quad (11)$$

其中 $\Delta A(k)$ 和 $\Delta B(k)$ 分别表示在产品生产过程和库存决策实施过程中的不确定性, 且满足

$$[\Delta A(k) \ \Delta B(k)] = GF(k)[E_a \ E_b], \quad (12)$$

G, E_a 和 E_b 是具有适当维数的已知实数矩阵, 未知时变矩阵 $F(k)$ 满足

$$F^T(k)F(k) \leq I. \quad (13)$$

为调节供应量系统的库存状态, 选取状态反馈控制律如下:

$$u(k) = Kx(k), \quad (14)$$

其中 K 为待定的 $n \times n$ 反馈增益矩阵.

将式(14)和(12)代入(11), 可得到闭环系统

$$x(k+1) = \hat{A}x(k) + Gp(k) + \Lambda(k). \quad (15)$$

其中

$$\begin{cases} \Lambda(k) = \sum_{m=1}^h \alpha_m C_m x(k-m), \\ \hat{A} = A + BK, \\ p(k) = F(k)(E_a + E_b K)x(k). \end{cases}$$

本文基于提出的订货预测方法(6), 研究动态供应链系统在状态反馈控制律(14)作用下鲁棒稳定的充分条件. 为得到本文的主要结果, 先引入如下引理.

引理1^[21] 对于任意的 $n \times n$ 实对称正定矩阵 R , 整数 r_1, r_2 满足 $r_2 > r_1 > 0$, 向量函数 $w : \{r_1, r_1 + 1, \cdots, r_2\} \mapsto \mathbf{R}^n$, 下面不等式成立:

$$\begin{aligned} (r_2 - r_1) \sum_{j=r_1}^{r_2-1} w^T(j) R w(j) &\geq \\ \left(\sum_{j=r_1}^{r_2-1} w(j) \right)^T R \left(\sum_{j=r_1}^{r_2-1} w(j) \right). \end{aligned} \quad (16)$$

引理2 若 $w(i+1) - w(i) = t(i)$, 则

$$\sum_{i=v}^m t(i) = w(m+1) - w(v). \quad (17)$$

2 状态反馈控制器设计

下面的定理给出了系统(15)鲁棒稳定的条件.

定理1 对于给定的正整数 h 和标量 $\alpha_m \geq 0, m$

$= 1, 2, \dots, h$, 供应链系统(15)鲁棒稳定, 如果存在 $n \times n$ 实对称正定矩阵 R, Q_m 和 $Z_m, m = 1, 2, \dots, h, n \times n$ 实矩阵 K 以及标量 $\varepsilon > 0$, 使得下述矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \Phi & \Psi \\ * & \Lambda \end{bmatrix} < 0. \quad (18)$$

其中

$$\Phi = \begin{bmatrix} \Phi_{11} & 0 & \dots & \tilde{Z} & 0 \\ * & -Q_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ * & * & \dots & \Phi_{h+1, h+1} & 0 \\ * & * & \dots & * & -\varepsilon I \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} \Psi_{11} & \Psi_{12} & \Psi_{13} \\ \alpha_1 C_1^T & h\alpha_1 C_1^T & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_h C_h^T & h\alpha_h C_h^T & 0 \\ G^T & hG^T & 0 \end{bmatrix}, \quad (20)$$

$$\Lambda = \text{diag}\{-R^{-1}, -\tilde{Z}^{-1}, -\varepsilon^{-1}I\}; \quad (21)$$

$$\tilde{Z} = \sum_{m=1}^h Z_m, \quad \tilde{Q} = \sum_{m=1}^h Q_m,$$

$$\Phi_{11} = -R + \tilde{Q} - \tilde{Z}, \quad \Phi_{h+1, h+1} = -Q_h - \tilde{Z},$$

$$\Psi_{11} = A^T + K^T B^T, \quad \Psi_{13} = E_a^T + K^T E_b^T,$$

$$\Psi_{12} = hA^T + hK^T B^T - hI.$$

证明 选取如下的Lyapunov泛函:

$$V(k) = V_1(k) + V_2(k) + V_3(k). \quad (22)$$

其中

$$V_1(k) = x^T(k)Rx(k), \quad (23)$$

$$V_2(k) = \sum_{m=1}^h \sum_{i=k-m}^{k-1} x^T(i)Q_mx(i), \quad (24)$$

$$V_3(k) = h \sum_{m=1}^h \sum_{i=-h}^{-1} \sum_{j=k+i}^{k-1} \eta^T(j)Z_m\eta(j); \quad (25)$$

$$\eta(j) = x(j+1) - x(j). \quad (26)$$

注意到式(22)沿着(15)关于 k 的向前差分为

$$\Delta V(k) = \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) + \Delta V_3(k). \quad (27)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta V_1(k) = & x^T(k)(\hat{A}^T R \hat{A} - P)x(k) + 2x^T(k)\hat{A}^T R \Lambda(k) + \\ & 2x^T(k)\hat{A}^T R G p(k) + 2\Lambda^T(k)R G p(k) + \\ & \Lambda^T(k)R \Lambda(k) + p^T(k)G^T R G p(k), \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \Delta V_2(k) = & x^T(k)\tilde{Q}x(k) - \sum_{m=1}^h x^T(k-m)Q_mx(k-m), \end{aligned} \quad (29)$$

$$\Delta V_3(k) = h^2 \eta^T(k)\tilde{Z}\eta(k) + \Upsilon_1(k); \quad (30)$$

$$\Upsilon_1(k) = -h \sum_{i=k-h}^{k-1} \eta^T(i)\tilde{Z}\eta(i). \quad (31)$$

根据引理1和引理2, 由式(31)可得

$$\Upsilon_1(k) \leq -\zeta^T(k)\tilde{Z}\zeta(k), \quad (32)$$

其中 $\zeta(k) = x(k) - x(k-h)$. 于是, 由式(26),(32)和(30)可得

$$\begin{aligned} \Delta V_3(k) \leq & h^2 x^T(k)\hat{A}^T \tilde{Z} \hat{A} x(k) + 2h^2 x^T(k)\hat{A}^T \tilde{Z} \Lambda(k) + \\ & 2h^2 x^T(k)\hat{A}^T \tilde{Z} G p(k) + h^2 \Lambda^T(k)\tilde{Z} \Lambda(k) + \\ & 2h^2 \Lambda^T(k)\tilde{Z} G p(k) + h^2 p^T(k)G^T \tilde{Z} G p(k) - \\ & x^T(k-h)\tilde{Z}x(k-h) - x^T(k)\tilde{Z}x(k) + \\ & 2x^T(k)\tilde{Z}x(k-h), \end{aligned} \quad (33)$$

其中 $\tilde{A} = A + BK - I$.

由式(13)和(15)知, 对于任意的 $\varepsilon > 0$, 有

$$\begin{aligned} \varepsilon x^T(k)(E_a + E_b K)^T(E_a + E_b K)x(k) - \\ \varepsilon p^T(k)p(k) \geq 0. \end{aligned} \quad (34)$$

进一步, 由式(27) ~ (29), (33)和(34), 可得

$$\begin{aligned} \Delta V(k) \leq & \Delta V_1(k) + \Delta V_2(k) + \Delta V_3(k) - \varepsilon p^T(k)p(k) + \\ & \varepsilon x^T(k)(E_a + E_b K)^T(E_a + E_b K)x(k) \leq \\ & \Theta^T(k)(\Phi + \Xi_1^T R \Xi_1 + \varepsilon \Xi_3 \Xi_3 + h^2 \Xi_2^T \tilde{Z} \Xi_2)\Theta(k). \end{aligned} \quad (35)$$

其中

$$\Theta(k) = [x^T(k) \quad x^T(k-1) \quad \dots \quad x^T(k-h) \quad p^T(k)]^T,$$

$$\Xi_1 = [\hat{A} \quad \alpha_1 C_1 \quad \dots \quad \alpha_h C_h \quad G],$$

$$\Xi_2 = [\tilde{A} \quad \alpha_1 C_1 \quad \dots \quad \alpha_h C_h \quad G],$$

$$\Xi_3 = [E_a + E_b K \quad 0 \quad \dots \quad 0 \quad 0].$$

根据Schur补定理, 由矩阵不等式(18)得

$$\Phi + \Xi_1^T R \Xi_1 + h^2 \Xi_2^T \tilde{Z} \Xi_2 + \varepsilon \Xi_3 \Xi_3 < 0. \quad (36)$$

从而, 由式(35)知 $\Delta V(k) < 0$, 即供应链系统(15)鲁棒稳定. \square

注意到矩阵不等式(18)中包含非线性项, 为求解控制器增益矩阵 K , 在矩阵不等式(18)两边分别同时乘以矩阵

$$\text{diag}\{\underbrace{R^{-1}, R^{-1}, \dots, R^{-1}}_{h+1}, \varepsilon^{-1}I, I, I, I\}$$

及其转置矩阵,并令

$$\begin{aligned} \bar{R} &= R^{-1}, \bar{K} = KR^{-1}, \bar{\varepsilon} = \varepsilon^{-1}, \\ \bar{Q}_m &= R^{-1}Q_mR^{-1}, \bar{Z}_m = R^{-1}Z_mR^{-1}, \\ m &= 1, 2, \dots, h. \end{aligned}$$

利用不等式^[22]

$$-Z_m^{-1} \leq -2\bar{R} + \bar{Z}_m, \quad m = 1, 2, \dots, h, \quad (37)$$

可得如下结论.

定理2 对于给定的正整数 h 和标量 $\alpha_m \geq 0, m = 1, 2, \dots, h$, 如果存在 $n \times n$ 实对称正定矩阵 \bar{R}, \bar{Q}_m 和 $\bar{Z}_m, m = 1, 2, \dots, h, n \times n$ 实矩阵 \bar{K} 以及标量 $\bar{\varepsilon} > 0$, 使得下述矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} \bar{\Phi} & \bar{\Psi} \\ * & \bar{\Lambda} \end{bmatrix} < 0, \quad (38)$$

则供应链系统(15)鲁棒稳定,且控制增益矩阵 K 可由 $K = \bar{K}\bar{R}^{-1}$ 得到.其中

$$\bar{\Phi} = \begin{bmatrix} \bar{\Phi}_{11} & 0 & \dots & \bar{Z} & 0 \\ * & -\bar{Q}_1 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ * & * & \dots & \bar{\Phi}_{h+1,h+1} & 0 \\ * & * & \dots & * & -\bar{\varepsilon}I \end{bmatrix}, \quad (39)$$

$$\bar{\Psi} = \begin{bmatrix} \bar{\Psi}_{11} & \bar{\Psi}_{12} & \bar{\Psi}_{13} \\ \alpha_1 \bar{R}C_1^T & h\alpha_1 \bar{R}C_1^T & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \alpha_h \bar{R}C_h^T & h\alpha_h \bar{R}C_h^T & 0 \\ \bar{\varepsilon}G^T & h\bar{\varepsilon}G^T & 0 \end{bmatrix}, \quad (40)$$

$$\bar{\Lambda} = \text{diag}\{-\bar{R}, \bar{Z} - 2\bar{R}, -\bar{\varepsilon}I\}; \quad (41)$$

$$\bar{Z} = \sum_{m=1}^h \bar{Z}_m, \quad \bar{Q} = \sum_{m=1}^h \bar{Q}_m,$$

$$\bar{\Phi}_{11} = -\bar{R} + \bar{Q} - \bar{Z},$$

$$\bar{\Phi}_{h+1,h+1} = -\bar{Q}_h - \bar{Z},$$

$$\bar{\Psi}_{11} = \bar{R}A^T + \bar{K}^T B^T,$$

$$\bar{\Psi}_{13} = \bar{R}E_a^T + \bar{K}^T E_b^T,$$

$$\bar{\Psi}_{12} = h\bar{R}A^T + h\bar{K}^T B^T - h\bar{R}.$$

3 数值仿真

3.1 供应链系统参数

考虑如图2所示的含有6个节点的供应链系统,系统中参数 p_i 和 f_i 的值由表1给出. 据此,可以计算出系统的参数矩阵

$$A = \text{diag}\{0.7786, 0.7240, 0.8425,$$

$$0.2170, 0.1901, 0.2344\}.$$

系统的控制矩阵 $B = I_6$. 图2中箭头线上的字母 c_{ij} 是与参数矩阵 $C_m(m = 1, 2, \dots, h)$ 相关的比例系数. 矩阵 C_m 具体取值依赖于 h 的选择.

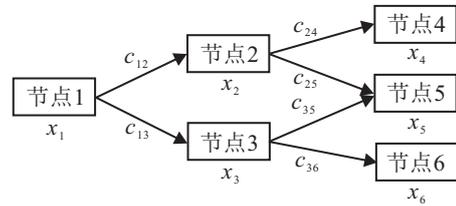


图2 供应链仿真模型

表1 供应链系统中参数 p_i 和 f_i 的取值

节点 i	1	2	3	4	5	6
p_i	0.59	0.40	0.25	0.10	0.11	0.12
f_i	0.54	0.46	0.21	0.87	0.91	0.87

设供应链系统中的参数扰动矩阵 G, E_a 和 E_b 分别取值如下:

$$G = \text{diag}\{0.5, 1.0, 1.0, 2.0, 1.0, 1.0\},$$

$$E_a = \text{diag}\{0.1, 0.1, 0.25, 0.1, 0.2, 0.1\},$$

$$E_b = \text{diag}\{0.35, 0, 0, 0.10, 0.10, 0.10\}.$$

设时变扰动项 $F(k) = \sin k$, 供应链系统的初始库存水平函数为

$$\varphi(k) = [0 \ 0 \ 0 \ 60 \ 50 \ 20]^T,$$

$$k = -h, \dots, -1, 0.$$

下面针对不同的下游订单预测情形,即 h 取不同数值以及 h 相同而对应的权系数 $\alpha_m(m = 1, 2, \dots, h)$ 不同的情形,分别设计相应的状态反馈控制器,并基于数值仿真结果分析在不同的控制器作用下,供应链系统性能的变化情况.

3.2 供应链系统性能分析

为分析供应链系统在所设计的控制器作用下的性能,针对所提出的供应链下游订单组合预测机制(6)的不同情形,即 $h = 1, 2, 3, 4$ 的4种情形,并就 h 的每个取值,分别讨论权系数组合 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_h$ 取不同值时分别设计相应的控制器. 表2给出了预测机制中参数 h 和 α_i 的不同组合方式. 例如,当 $h = 2, \alpha_1 = 0.85, \alpha_2 = 0.15$ 时(对应情形2),预测机制中采用下游企业前两个订货周期(即 $k-1$ 和 $k-2$)的库存水平信息,且 x_{k-1} 和 x_{k-2} 在订单预测中所占的权重分别为85%和15%. 对应于 h 的不同取值,表3给出了图2中箭头线上 $c_{12}, c_{13}, c_{24}, c_{25}, c_{35}, c_{36}$ 的不同取值,其他未标注的均取值为0.

表2 供应链系统中 h 和 α_i 的取值

情形	h	α_1	α_2	α_3	α_4
1	1	1	—	—	—
2		0	1	—	—
3	2	0.85	0.15	—	—
4		0.50	0.50	—	—
5		0.15	0.85	—	—
6		0	0	1	—
7	3	0.60	0.35	0.05	—
8		0.34	0.33	0.33	—
9		0.05	0.35	0.60	—
10		0	0	0	1
11	4	0.50	0.30	0.10	0.10
12		0.25	0.25	0.25	0.25
13		0.10	0.10	0.30	0.50

表3 系统结构中比例系数 c_{ij} 的取值

m	c_{12}	c_{13}	c_{24}	c_{25}	c_{35}	c_{36}
1	0.1	0.2	0.3	0.1	0.05	0.15
2	0.2	0.15	0.15	0.05	0.04	0.1
3	0.3	0.1	0.1	0.15	0.1	0.05
4	0.1	0.2	0.2	0.1	0.05	0.15

根据表3可以分别写出供应链系统(11)的参数矩阵 $C_1 \sim C_4$. 因篇幅所限,只给出矩阵 C_1 如下:

$$C_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.05 & 0.15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

于是,对于 h 和 α_i 的不同取值,根据定理2,可计算出相应的控制器增益矩阵 K ,从而得到相应的状态反馈控制器(14). 例如,对于表2中的情形1和情形6,可以分别求出对应的控制器增益矩阵 K ,分别记作

$$K_1 = \begin{bmatrix} -0.36 & -0.04 & -0.10 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.34 & 0 & -0.13 & -0.06 & 0 \\ 0 & 0 & -0.44 & 0 & -0.03 & -0.08 \\ 0 & 0 & 0 & 0.15 & 0.01 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.19 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.15 \end{bmatrix},$$

$$K_6 = \begin{bmatrix} 0 & -0.20 & -0.06 & 0 & 0 & 0 \\ -0.40 & 0.19 & 0.01 & -0.08 & -0.13 & 0 \\ 0 & 0 & 0.04 & 0 & -0.08 & -0.04 \\ 0 & 0 & 0 & 0.62 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.69 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.65 \end{bmatrix}$$

对应地,得到的状态反馈控制器分别记作SFC1和SFC6. 当上述控制器分别作用在供应链系统(11)时,系统各节点的库存水平和订单量的仿真曲线如图3和图4所示.

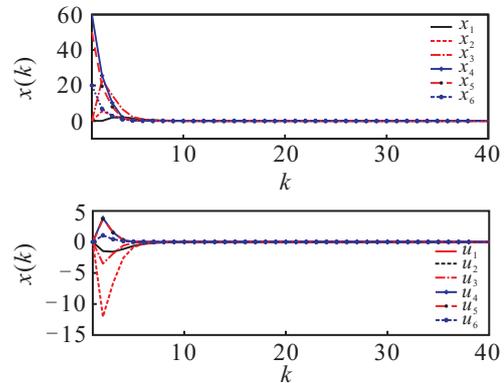


图3 在情形1中供应链系统的库存波动和订单波动

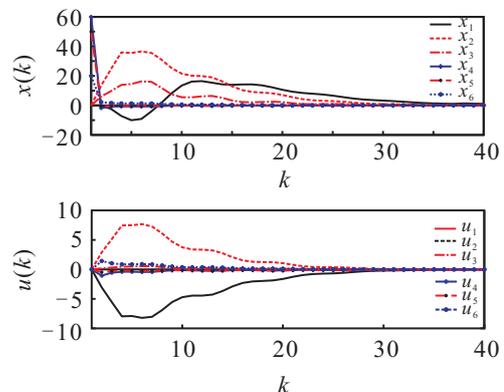


图4 在情形6中供应链系统的库存波动和订单波动

由图3和图4可以看出:所设计的控制器能有效调节供应链系统(11)的库存波动,在给出的订单补偿策略下,供应链系统能够鲁棒稳定;特别地,为预测下游节点的订单偏差,上述两种情况均只用到下游节点的一次历史订单信息. 在此基础上,所设计的订单补偿策略均能使供应链系统鲁棒稳定. 但是,不难发现,随着预测源信息离当前时刻越远,如 $h = 6$,各节点的库存波动幅度明显变大,系统的调节时间变长,订单补偿量也显著增大,牛鞭效应现象愈趋明显.

为进一步分析不同预测机制对供应链系统性能的影响,对于表2中的其他情形,根据定理2,也设计出了相应的状态反馈控制器. 因篇幅所限,所求得的控制增益矩阵在此不一一列出. 针对预测方案的不同情形,在控制器作用下系统上游3个节点企业库存水平波动的响应峰值以及调节时间由表4给出. 其中,对于情形1,2,4和6对应的系统响应峰值和调节时间也一并列出. 特别地,图5给出了采用表2中情形3($h = 2$)对应的订单预测方案时,供应链系统(11)在所设计的控制器作用下各节点企业库存水平和订单补偿量的响应曲线.

表4 供应链系统库存波动的变化峰值和响应时间

情形	h	调节时间/s			响应峰值		
		x_1	x_2	x_3	x_1	x_2	x_3
1	1	8	8	5	2.0	22.5	5.2
2	2	14	13	7	4.9	20.2	5.1
3		14	13	7	4.9	20.2	5.1
4		16	15	8	4.5	17.5	4.9
5	3	17	15	9	4.0	16.5	5.0
6		35	28	22	17.5	37.5	17.5
7		34	22	17	10.1	19.0	5.0
8		35	23	21	12.0	20.1	9.5
9	4	37	27	21	15.0	28.5	12.0
10		52	40	33	20.2	22.0	10.0
11		44	38	30	20.2	22.0	10.0
12		60	38	33	30.0	37.5	15.0
13		70	40	33	37.5	50.0	20.2

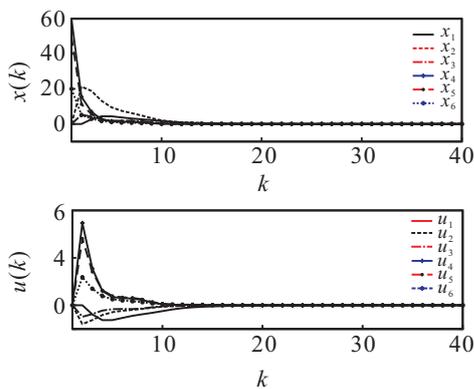


图5 在情形3中供应链系统的库存波动和订单波动

由表4和图3~图5可以进一步看出,当 h 取不同值时, h 的取值越小,供应链系统中库存波动的响应速度越快,库存波动的变化幅值越小.特别地,当预测机制中的信息组合方式采用 $h = 1$ (情形1)和 $h = 2$ (情形3)时,系统的性能更好;当 h 的取值相同时,例如当 $h = 2$ 时,第 $k - 1$ 次的库存水平信息在预测机制中所占的比重越大,库存波动的响应时间越短,但库存波动的变化幅度会随之增大.因此,综合考虑库存波动的响应时间和波动幅度两方面因素可知,当 $h = 2$ 时,采用平均加权法作用于第 $k - 1$ 次和第 $k - 2$ 次的订单量上,即采用情形4中的信息组合方式,供应链系统的性能可明显改善;当 $h \geq 3$ 时,第 $k - 1$ 次和第 $k - 2$ 次的订单量在预测机制中所占的比重越大,系统中库存波动的变化幅度越小,响应时间越快,从而牛鞭效应对系统的影响也越小.

综上所述,基于本文提出的利用下游节点企业的若干历史订单信息,对下游节点企业的当前订单进行组合预测,进而设计的状态反馈控制订单补偿策略能

保证供应链系统的鲁棒稳定性,有效减小牛鞭效应对供应链系统性能的影响.当组合预测机制中的信息组合方式不同时,系统的性能也不同.特别地,从系统实际应用角度看,综合考虑供应链系统的响应速度和库存响应幅值等因素,当 $h = 1$ 以及 $h = 2, \alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ 时,系统中的牛鞭效应能较大程度地得到抑制,供应链系统的性能能够得到显著改善.

4 结 论

本文研究了基于组合预测的动态供应链系统状态反馈鲁棒镇定问题,提出了一种基于下游节点企业在过去连续若干个订货周期中的订单信息进行预估当前订货量的线性组合预测方法,进而将动态供应链系统表示为含有多状态时滞的线性时滞不确定性系统.基于该模型,研究了动态供应链系统状态反馈鲁棒镇定的条件和控制器设计方法,得到了系统具有时滞依赖的状态反馈控制器的充分条件.仿真结果表明,本文提出的订单组合预测方法和状态反馈控制器能有效地抑制牛鞭效应对供应链系统的影响,显著改善系统的性能.

参考文献(References)

- [1] 马士华, 林勇. 供应链管理[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 1-160.
(Ma S H, Lin Y. Supply chain management[M]. Beijing: Higher Education Press, 2011: 1-160.)
- [2] Strozzi F, Noè C, Zaldívar J-M. Divergence control of a one-level supply chain replenishment rule[J]. Int J of Production Research, 2012, 50(7): 2046-2057.
- [3] Forrester J W. Industrial dynamics[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1961: 175-180.
- [4] Dominguez R, Cannella S, Framinan J M. On bullwhip-limiting strategies in divergent supply chain networks[J]. Computers & Industrial Engineering, 2014, 73(1): 85-95.
- [5] Jakšič M, Rusjan B. The effect of replenishment policies on the bullwhip effect: A transfer function approach[J]. European J of Operational Research, 2008, 184(3): 946-961.
- [6] Bhattacharya R, Bandyopadhyay S. A review of the causes of bullwhip effect in a supply chain[J]. The Int J of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 54(9): 1245-1261.
- [7] 龚本刚, 程幼明. 供应链中“牛鞭效应”的成因及弱化[J]. 运筹与管理, 2002, 11(5): 123-127.
(Gong B G, Cheng Y M. The cause and mitigation of bullwhip effect in supply chain[J]. Operations Research and Mangement Science, 2002, 11(5): 123-127.)
- [8] 冯娟, 王海燕. 基于稳定性分析的供应链系统牛鞭效应控制研究[C]. 江苏省系统工程学会第11届学术年会. 镇江, 2009: 751-760.

(Feng J, Wang H Y. Controlling the bullwhip effect of supply chain system based on the stability analysis[C]. Proc of the 11th Annual Conf of Systems Engineering Society of Jiangsu Province. Zhenjiang, 2009: 751-760.)

[9] 郭丽娜, 王鲜霞, 任杨莉. 一类具有优化调整状态的供应链系统的稳定性分析[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(12): 107-111.
(Guo L N, Wang X X, Ren Y L. Stability analysis for a supply chain system with state of optimal adjustment[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(12): 107-111.)

[10] Li Chong, Liu Sifeng. A robust optimization approach to reduce the bullwhip effect of supply chains with vendor order placement lead time delays in an uncertain environment[J]. Applied Mathematical Modelling, 2013, 37(3): 707-718.

[11] 邱若臻, 黄小原. 时滞和参数不确定的供应链动态模型及其鲁棒 H_∞ 控制[J]. 信息与控制, 2007, 36(2): 240-244.
(Qiu R Z, Huang X Y. A supply chain dynamic model with time-delay and uncertain parameters and its robust H_∞ control[J]. Information and Control, 2007, 36(2): 240-244.)

[12] 唐亮, 靖可. H_∞ 鲁棒控制下动态供应链系统牛鞭效应优化[J]. 系统工程理论与实践, 2012, 32(1): 155-163.
(Tang L, Jing K. Bullwhip effect optimization of dynamic supply chain system based on H_∞ robust control[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2012, 32(1): 155-163.)

[13] 李翀, 刘思峰, 方志耕, 等. 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[J]. 中国管理科学, 2013, 21(2): 107-113.
(Li C, Liu S F, Fang Z G, et al. Bullwhip effect in supply chain networks with lead time delays and its inventory control strategy[J]. Chinese J of Management Science, 2013, 21(2): 107-113.)

[14] Ignaciuk P. LQ optimal and robust control of perishable inventory systems with multiple supply options[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2013, 58(8): 2108-2113.

[15] Ignaciuk P, Bartoszewicz A. LQ optimal sliding mode supply policy for periodic review inventory systems[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2010, 55(1): 269-274.

[16] Voigt G, Inderfurth K. Supply chain coordination with information sharing in the presence of trust and trustworthiness[J]. IIE Trans, 2012, 44(8): 637-654.

[17] 李翀, 刘思峰, 方志耕. 信息共享机制对供应链系统牛鞭效应的影响研究[J]. 贵州大学学报: 自然科学版, 2011, 28(4): 130-135.
(Li C, Liu S F, Fang Z G. Research on the informantion sharing mechanism of the bullwhip effect of supply chain system[J]. J of Guizhou University: Natural Sciences, 2011, 28(4): 130-135.)

[18] Cho D W, Lee Y H. The value of information sharing in a supply chain with a seasonal demand process[J]. Computers & Industrial Engineering, 2013, 65(1): 97-108.

[19] Lin K P, Chang P T, Hung K C, et al. A simulation of vendor managed inventory dynamics using fuzzy arithmetic operations with genetic algorithms[J]. Expert Systems with Applications, 2010, 37(3): 2571-2579.

[20] Lee H T, Wu J C. A study on inventory replenishment policies in a two-echelon supply chain system[J]. Computers & Industrial Engineering, 2006, 51(2): 257-263.

[21] Jiang X, Han Q L, Yu X. Stability criteria for linear discrete-time systems with interval-like time-varying delay[C]. Proc of the 2005 American Control Conf. Portland: IEEE, 2005: 2817-2822.

[22] Zhang X M, Han Q L. Event-triggered dynamic output feedback control for networked control systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2014, 8(4): 226-234.

(责任编辑: 孙艺红)

下 期 要 目

多准则决策中的鲁棒有序回归方法综述 张宏军, 等

状态观测的未知死区非线性系统的自适应神经网络跟踪控制 司文杰, 等

城市物流跨区域联合配送模型与算法 葛显龙, 等

基于目标跟踪的双层结构工业预测控制 陈 桥, 等

不确定条件下速度时变VRPTW问题 李兵飞, 等

具有空闲时间的云制造作业车间调度方法 王 贞, 等

基于动态精简式混合地图的移动机器人自主探索 李秀智, 等

无偏非齐次灰色预测模型的直接建模法 党耀国, 等