

控制与决策

Control and Decision

PI补充策略下供应链牛鞭效应的 H_{∞} 控制

钱晨, 陈庆伟, 宋成颖

引用本文:

钱晨, 陈庆伟, 宋成颖. PI补充策略下供应链牛鞭效应的 H_{∞} 控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2817–2824.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0441>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[平台品牌赋能情境下考虑信息不对称的供应链渠道冲突](#)

Supply chain channel conflicts considering asymmetric information under platform brand empowerment

控制与决策. 2021, 36(9): 2123–2132 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0098>

[大数据服务商参与下供应链联合减排的动态协调策略](#)

Dynamic coordination strategy of joint emission reduction in supply chain involving big data service provider

控制与决策. 2021, 36(8): 2013–2022 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.1560>

[基于周期动态事件触发的网络化切换系统的分析与控制](#)

The analysis and control for networked switched systems based on periodic event-trigger

控制与决策. 2021, 36(10): 2467–2474 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2020.0281>

[损失厌恶下考虑参照利润效应的供应链决策模型](#)

Decision model of supply chain considering reference profit under loss aversion

控制与决策. 2020, 35(11): 2810–2816 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0094>

[考虑气动效应不确定性的气动辅助变轨制导算法](#)

Aeroassisted orbital transfer robust guidance method considering atmosphere effect uncertainty

控制与决策. 2020, 35(11): 2773–2779 <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2019.0333>

PI 补充策略下供应链牛鞭效应的 H_∞ 控制

钱 晨, 陈庆伟[†], 宋成颖

(南京理工大学 自动化学院, 南京 210094)

摘要: 牛鞭效应是指供应链管理订单制定环节中因信息扭曲造成的需求逐级放大的一种现象. 针对供应链中的节点企业, 在订货点法的基础上加以改进构建新的订单制定规则, 并构建 H_∞ 控制器达到抑制牛鞭效应的目的, 从而降低供应链整体成本. 订单制定环节由企业订单规则和需求预测两个部分组成, 为应对需求持续上升使安全库存发散的情况, 在订货点法的基础上设计 PI 补充策略下的新订单规则, 并以系统 H_∞ 范数与供应链牛鞭效应的指标定义相同为基础, 引入 H_∞ 控制器代替预测函数. 仿真结果表明, 所设计的 PI 补充策略下的 H_∞ 控制器法与传统订单制定算法相比, 可有效削减牛鞭效应, 并且使企业库存始终维持在一个安全稳定的状态.

关键词: 供应链系统; 牛鞭效应; H_∞ 控制器; PI 补充策略

中图分类号: TP273

文献标志码: A

DOI: 10.13195/j.kzyjc.2020.0441

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



引用格式: 钱晨, 陈庆伟, 宋成颖. PI 补充策略下供应链牛鞭效应的 H_∞ 控制[J]. 控制与决策, 2021, 36(11): 2817-2824.

Reducing bullwhip effect in supply chain with PI replenishment rule via H_∞ control

QIAN Chen, CHEN Qing-wei[†], SONG Cheng-ying

(School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The bullwhip effect refers to a phenomenon in which the demand is gradually amplified in the order process of supply chain management, which is caused by the distortion of demand information. Focus on the one node enterprises in the supply chain, the paper constructs a new order-making rule based on the order-up-to method, and then builds an H_∞ controller to attenuate the bullwhip effect. The method can reduce the overall cost of the supply chain. The order-making process is composed of two parts: order-making rules and demand forecasting. When the demand continues to rise, the safety stock status will diverge. A new order rule under the PI supplement rule is designed based on the order-up-to method. In addition, based on the H_∞ norm of the system being the same as the definition of a bullwhip effect indicator in supply chain, the H_∞ controller is used to replace the prediction function. The simulation results show that the proposed method can effectively reduce the bullwhip effect, and the enterprise inventory can always maintain in a stable state.

Keywords: supply chain; bullwhip effect; H_∞ controller; PI replenishment rule

0 引言

供应链管理运营中,常出现供应链下游零售数量稳定,但上游接收到的需求波动较大的情况,这种现象称为牛鞭效应^[1]. 因为供应链上的企业之间传递的信息不完全,扭曲的信息会顺着供应链从下游向上游传递,并且信息误差逐级放大,最终造成供应商得到的订购信息与零售数据存在极大的偏差. 牛鞭效应导致供应链效率低下,增加企业运营的成本,不利于内部成员间的合作^[2]. 统计表明,牛鞭效应会引起供

应链 13.5%~35% 的额外成本^[3]. 自 Forrester^[4] 提出牛鞭效应的概念以来,有效抑制牛鞭效应一直都是供应链管理领域的研究热点.

20 世纪 80 年代, Sterman^[5] 设计了著名的“啤酒游戏”以验证牛鞭效应的存在,并且认为这是参与者缺乏系统观点的非理性行为导致的结果. 20 世纪 90 年代,很多学者进行了更系统的研究. Towill^[6] 通过建立数学模型,证明库存管理方式对牛鞭效应能起到抑制作用. Lee 等^[7] 通过建立供应链的统计学模型,分

收稿日期: 2020-04-18; 修回日期: 2020-07-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61673217, 61673219); 江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX19_0300).

责任编辑: 何勇.

[†]通讯作者. E-mail: cqw2020@126.com.

析出引起牛鞭效应的原因,并且可以通过改变内部组织的基础结构和相关过程来缓解牛鞭效应。Chen等^[8]将牛鞭效应定义为供应商订单与需求数量的方差之比,进而完成牛鞭效应的测度。

订单决策是影响牛鞭效应的重要部分,由订单决策方法和对需求量预测两个部分组成。使用不同决策模型和需求预测技术,得到的需求量方差存在差异,影响牛鞭效应的大小,因此选择合适的决策方法和预测技术成为众学者的研究重点。订货点库存控制策略^[9]又称为安全库存法,是订单决策中常用的方法。在新型市场环境下,传统的订货点策略已经无法满足需求剧烈波动的情况。例如,2020年新型冠状病毒疫情影响下,口罩需求急剧增加,出现缺货的情形。因此,必须将需求预测与订单决策相结合,建立基于需求预测的库存决策模型。

选择恰当的预测技术是进行有效的订单决策的首要步骤,事件序列模型(如自回归(AR)^[10]、指数平滑^[11]、移动平均(MA)^[12]、自回归移动平均模型(ARMA)^[13]、自回归求和移动平均(ARIMA)^[14]等)被用于提升预测精度,通过改变模型中的参数控制牛鞭效应。但是这些方法无法适应供应链随机多变的需求信息,导致预测需求精度不稳定。

Hussain等^[14]首次将控制理论的思想引入到牛鞭效应建模中,并且将振幅比(AR)作为牛鞭效应的指标。黄小原等^[15]建立和改进了供应链的多层结构模型,运用 H_∞ 控制理论提出了顾客末端需求波动最差条件下的 H_∞ 控制方法以抑制牛鞭效应。Qian等^[16]针对供应链中的核心企业,用 H_∞ 控制器代替预测函数,结合订货点法实现对牛鞭效应的控制,但是仿真表明,在需求信息持续增大的情况下,该方法使企业库存不断消耗,造成缺货的情形出现。

本文的工作是在文献[17]的基础上改进订单决策方法,以达到以下两个目标:一是对于单个企业牛鞭效应得到抑制,二是该企业的安全库存保持在一个稳定状态。首先引进库存变化量作为系统指标,为保证企业库存水平,在改进的订货点法的基础上引入比例-积分(PD)环节,构建新的PI补充策略下的订单决策方法。以牛鞭效应指标与 H_∞ 范数定义相同为基础,将供应链系统转化为离散 H_∞ 最优化问题,引入 H_∞ 控制器作为需求预测的方法预测一阶供应链系统的需求。针对供应链中某一核心节点企业,通过控制理论的思想对牛鞭效应进行抑制,从而提高整个供应链的效率,降低成本。最后,通过Matlab仿真表明,所提出方法设计的供应链系统可以在迅速跟踪需求

波动的基础上,弱化牛鞭效应且使得企业库存处于相对稳定状态,为企业尤其是需求持续增加企业的供应链管理提供有益的参考。

1 供应链模型

1.1 供应链订货点规则

图1为一多级供应链模型。为量化订单的波动性,将批发商这个节点作为分析对象,考虑由单一生产商和批发商组成的简单供应链。

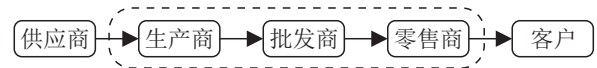


图1 多级供应链模型

假设在每个时间段 k 内发生以下事件:第1步,批发商收到在多个时间段之前向生产商订购的货物;第2步,批发商收到来自零售商的订单,即批发商的需求 $D(k)$,本文不考虑订单积压的情况;第3步,批发商更新自身库存,并根据订单决策规则向生产商下达订单 (k) 。该供应链模型中需要考虑时滞因子 L ,即批发商在时间段 k 内第3步下达的订单会延迟到时间段 $k+L$ 内第1步时收到货物,因此该时滞因子 L 由一个周期的事件序列延迟和生产或物流延迟 T_p 组成。本文 L 是一个固定的常数,设定其等于4。这样的假设在该模型中是常见的,且对最终结果不会有影响。

对于批发商的订单制定环节,选取文献[18]中的订货点库存控制策略,订单决策遵循以下公式:

$$O(k) = \hat{O}(k) + K_1(\text{TNS}(k) - \text{NS}(k)) + K_2(\text{DWIP}(k) - \text{WIP}(k)). \quad (1)$$

其中:在时间段 k 内, $O(k)$ 为向生产商下达的订单量, $\hat{O}(k)$ 为对下游需求的预测, $\text{NS}(k)$ 为批发商自身的库存, $\text{TNS}(k)$ 为该库存的目标值, $\text{WIP}(k)$ 为因时滞而未交割的货物数量, $\text{DWIP}(k)$ 为该数量的期望值, K_1 和 K_2 为该决策规则中的参数。 $\hat{O}(k)$ 由预测函数在每个周期进行更新, $\text{NS}(k)$ 和 $\text{WIP}(k)$ 的更新遵循下式:

$$\text{NS}(k) = \text{NS}(k-1) + O(k-L) - D(k), \quad (2)$$

$$\text{WIP}(k) = \text{WIP}(k-1) + O(k-1) - O(k-L). \quad (3)$$

$\text{TNS}(k)$ 可看作公司的安全库存,实际生产中 $\text{TNS}(k)$ 与 $\hat{O}(k)$ 相关,在每个周期内随预测的需求进行变化。 $\text{DWIP}(k)$ 作为未交割的货物量的期望值也与预测的需求相关。 $\text{TNS}(k)$ 和 $\text{DWIP}(k)$ 满足下式:

$$\text{TNS}(k) = \hat{O}(k), \quad (4)$$

$$\text{DWIP}(k) = (L-1)\hat{O}(k). \quad (5)$$

1.2 供应链系统结构

利用控制理论对牛鞭效应进行分析,将供应链系统的订单决策环节转化为控制模型,供应链系统分为被控对象和稳定控制器两个部分. 其中被控对象代表批发商的订单决策规则,稳定控制器代表需求的预测函数,供应链系统的闭环互联模型如图 2 所示. 本文利用控制器代替传统方法中的预测函数,输入为来自下游的需求 $D(k)$,输出为需求预测 $\hat{O}(k)$. 使用上述改进的订货点法,结合需求、需求预测和自身库存水平对订单量进行更新. 被控对象的输入是来自下游的需求 $D(k)$ 和对需求的预测值 $\hat{O}(k)$,输出为订单 $O(k)$.

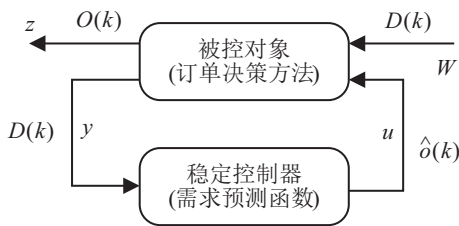


图 2 供应链系统闭环互联模型

订单决策部分可以看作一个双输入双输出的离散系统,其输入输出可表示为

$$\begin{bmatrix} O(z) \\ D(z) \end{bmatrix} = G(z) \begin{bmatrix} D(z) \\ \hat{O}(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(z) \\ \hat{O}(z) \end{bmatrix}, \quad (6)$$

其中 $G(z)$ 为订单决策的开环传递函数,并按照被控对象的输入输出维数将 $G(z)$ 分块为 $G_{11}(z)$ 、 $G_{12}(z)$ 、 $G_{21}(z)$ 和 $G_{22}(z)$. 控制器遵循如下公式:

$$\hat{O}(z) = K(z)D(z). \quad (7)$$

1.3 供应链指标

1.3.1 牛鞭效应指标

对于牛鞭效应的定量描述,给出两个牛鞭效应指标,分别从数学统计和控制理论方法两个方面进行分析.

数理统计的方法主要采用前端订货需求与末端客户需求波动之比进行描述,用历史数据的标准差来定量表示数据的波动,则牛鞭效应指标可以表示为

$$\gamma = \frac{\text{stdev}(O(k))}{\text{stdev}(D(k))}, \quad (8)$$

其中 stdev 为数据的标准差. 比值越大则订单的波动越大,牛鞭效应也越强.

从控制理论方面,供应链系统被分解为一个线性离散系统,系统性能可以用频率响应表示. 当正弦波作为输入时,会得到相同频率却不同振幅的正弦输

出,计算可得到该频率下的振幅比值. 不同频率下输入输出的振幅比不同,本文将振幅比的峰值作为牛鞭效应的一个指标.

系统的闭环传递函数是指 $D(k)$ 与 $O(k)$ 之间 z 变换之比,闭环传递函数可表示为

$$G_{cl}(z) = \mathbf{F}_l(G, K) = G_{11}(z) + G_{12}(z)K(z)(I - G_{11}(z)K(z))^{-1}G_{21}(z). \quad (9)$$

牛鞭效应的指标定义为

$$\text{ARP} \triangleq \max_{\omega \in (0, \pi]} (G_{cl}(e^{j\omega})). \quad (10)$$

其中: $G_{cl}(e^{j\omega}) = G_{cl}(z)|_{z=e^{j\omega}}$, ω 为系统输入的频率. 对于某个特定频率,振幅比达到最大值,即为供应链系统的最坏情况,此时牛鞭效应程度最大.

对于控制系统,系统的 H_∞ 范数定义为

$$\|G_{cl}(z)\|_\infty \triangleq \sup_{\omega} \sigma_{\max}[G_{cl}(e^{j\omega})]. \quad (11)$$

其中: \sup 为上限值, $\sigma_{\max}(G_{cl}(e^{j\omega}))$ 为对应频率下传递函数的最大奇异值, ω 为系统输入的频率. 因此,系统的 H_∞ 范数即为系统频率响应的最大奇异值的峰值. 可以看出,系统的 H_∞ 范数与 ARP 有相同的定义,这为后面将 H_∞ 控制器引入供应链系统提供了理论基础.

1.3.2 库存变化指标

供应链中的企业都会设置自身的安全库存,以防止订单的突然变化. 当安全库存设置较高时,会增加库存成本;当设置过低时,订单的突然增加会出现缺货的情况,造成巨大损失. 同时,需求的变化也会引起库存量的变化. 本文引入库存变化量 $\text{NSD}(t)$ 作为供应链中企业库存变化的指标,定义为

$$\text{NSD}(k) \triangleq \sum_{\tau=1}^k (O(\tau) - D(\tau)). \quad (12)$$

$\text{NSD}(t)$ 反映了企业库存的变化量,持续增加或减小都会使企业成本增加. 如何使企业库存保持在一个稳定状态也是本文的研究重点之一.

2 牛鞭效应的削减

2.1 PI 补充策略

订单补货规则中,存在参数 K_1 和 K_2 . 在传统的订货点法中,参数 K_1 和 K_2 被设为两个固定的常数,因此订单补货规则可以理解为一个比例控制系统. 式(1)中的 $(\text{TNS}(k) - \text{NS}(k))$ 和 $(\text{DWIP}(k) - \text{WIP}(k))$ 可看作 $\text{TNS}(k)$ 与 $\text{DWIP}(k)$ 的误差项, K_1 和 K_2 为两个误差的比例系数. 在实际的供应链系统中,需求和订单的差值影响着企业的库存量,也需要

- 3) 系统输入需求 $D(k)$ 稳定, 则 $\hat{O}(k) \rightarrow D(k)$;
- 4) $\text{NSD}(1) = 0$.

证明 根据订单补货规则(1)和供应链系统结构框图, 可得

$$O(k) = \hat{O}(k) + K_1 \left[\hat{O}(k) - \frac{O(k)z^{-4} - D(k)}{1 - z^{-1}} \right] + K_2 \left[(L - 1)\hat{O}(k) - \frac{O(k)z^{-1} - O(k)z^{-4}}{1 - z^{-1}} \right] = \frac{K_1[D(k) - O(k)z^{-4}] - K_2[O(k)z^{-1} - O(k)z^{-4}]}{1 - z^{-1}} + [1 + K_1 + (L - 1)K_2]\hat{O}(k). \quad (19)$$

将参数设置(13)和 L 代入式(19), 等式两边同乘 $(1 - z^{-1})$, 得到

$$(1 - z^{-1})O(k) = \left(1 + \frac{1}{T_N} + \frac{3}{T_W} + \frac{K_I z}{z - 1} \right) \hat{O}(k)(1 - z^{-1}) - \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_W} \right) O(k)z^{-4} - \frac{1}{T_W} O(k)z^{-1} + \frac{1}{T_N} D(k) - K_I \frac{z}{z - 1} [O(k)z^{-1} - D(k)]. \quad (20)$$

将时滞因子 z^{-1} 代入变量后整理得

$$O(k) = \left(1 + \frac{1}{T_N} + \frac{3}{T_W} + \frac{K_I z}{z - 1} \right) [\hat{O}(k) - \hat{O}(k - 1)] - \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_W} \right) O(k - 4) + \left(1 - \frac{1}{T_W} \right) O(k - 1) + \frac{1}{T_N} D(k) + K_I \frac{z}{z - 1} [D(k) - O(k - 1)]. \quad (21)$$

假设

$$\Delta(k) \triangleq \frac{z}{z - 1} [D(k) - O(k - 1)], \quad (22)$$

将式(22)两边同乘 $(z - 1)$, 整理后得到

$$\begin{aligned} \Delta(k + 1) &= \Delta(k) + D(k + 1) - O(k) = \\ \Delta(k - 1) + D(k) - O(k - 1) + D(k + 1) - O(k) &= \\ \Delta(1) + \sum_{\tau=2}^k [D(\tau) - O(\tau)] + D(k + 1) - O(1). \end{aligned} \quad (23)$$

根据定理 1 中的条件 4), 结合假设有

$$\text{NSD}(1) = D(1) - O(1) = \Delta(1) - O(1) = 0. \quad (24)$$

所以 $\Delta(t)$ 可以简化为

$$\begin{aligned} \Delta(k) &= 0 + \sum_{\tau=1}^k [D(\tau) - O(\tau)] - O(k) = \\ & - \text{NSD}(k) - O(k). \end{aligned} \quad (25)$$

相似可得

$$\frac{K_I z}{z - 1} [\hat{O}(k) - \hat{O}(k - 1)] = K_I \hat{O}(k). \quad (26)$$

将 $\Delta(k)$ 代回式(21), 整理得

$$\begin{aligned} K_I \text{NSD}(k) &= \\ \left(1 + \frac{1}{T_N} + \frac{3}{T_W} \right) [\hat{O}(k) - \hat{O}(k - 1)] &- \\ \left(\frac{1}{T_N} - \frac{1}{T_W} \right) O(k - 4) + \left(1 - \frac{1}{T_W} \right) O(k - 1) &+ \\ \frac{1}{T_N} D(k) - (1 + K_I) O(k) + K_I \hat{O}(k). \end{aligned} \quad (27)$$

根据定理 1 的条件可知

$$\begin{aligned} \hat{O}(k - 1) &\rightarrow \hat{O}(k), \hat{O}(k) \rightarrow O(k), O(k) \rightarrow D(k), \\ O(k - 4) &\rightarrow O(k - 1), O(k - 1) \rightarrow O(k). \end{aligned} \quad (28)$$

将式(28)代入(27), 化简得

$$\text{NSD}(k) \rightarrow 0. \quad (29)$$

即系统库存指标 NSD 得到了修复. \square

3 数值仿真

参数设置为

$$\frac{1}{T_N} = 0.5, \frac{1}{T_W} = 0.25, K_I = 0.5.$$

由式(14), 企业订单决策的输入输出可表示为

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} O(z) \\ D(z) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D(z) \\ \hat{O}(z) \end{bmatrix} = \\ \begin{bmatrix} -2z^4 & 17z^5 - 26z^4 + 9z^3 \\ 4z^5 - 9z^4 + 3z^3 + z - 1 & 4z^5 - 9z^4 + 3z^3 + z - 1 \end{bmatrix} &\times \\ \begin{bmatrix} D(z) \\ \hat{O}(z) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

利用 Matlab 中鲁棒工具包计算出控制器的参数为

$$\begin{aligned} A_f &= \begin{bmatrix} 0.12 & -0.42 & -0.05 & -0.03 & 0.05 \\ -0.13 & 0.38 & 0.14 & -0.23 & -0.06 \\ -0.00 & 0.01 & 0.61 & 0.10 & 0.00 \\ 0.01 & -0.03 & 0.11 & 0.04 & -0.25 \\ -0.00 & -0.01 & -0.47 & -0.07 & 0.05 \end{bmatrix}, \\ B_f &= \begin{bmatrix} -0.06 \\ 0.10 \\ -0.50 \\ -0.05 \\ -0.62 \end{bmatrix}, \end{aligned}$$

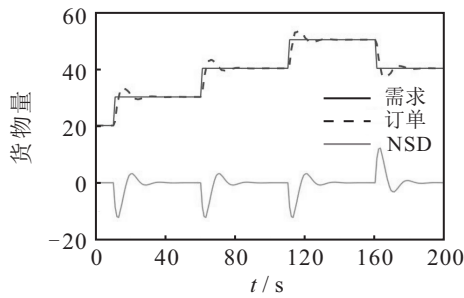
$$C_f = [0.35 \quad -0.17 \quad -0.04 \quad 0.01 \quad 0.04],$$

$$D_f = -0.07.$$

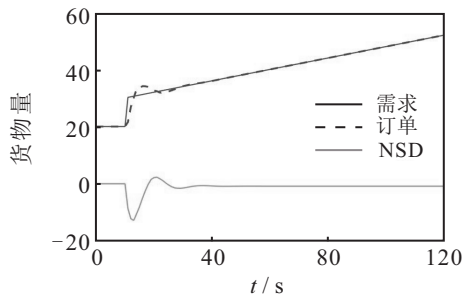
此时该组参数下供应链系统建模完成.

为对比供应链系统的性能, 在 Matlab 中模拟出两组数据作为供应链系统的需求函数, 分别为阶跃函数和坡度函数. 对订单能否迅速跟上需求变化和净

库存变化量进行观察,图4和图5为两种供应链系统对模拟的需求函数的响应.

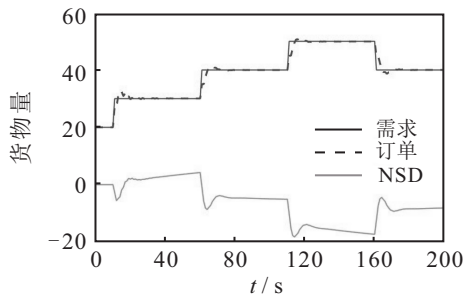


(a) PI补充策略下对阶跃需求的响应

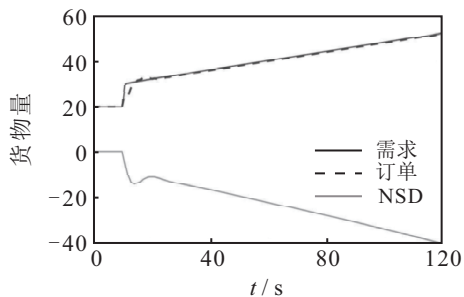


(b) PI补充策略下需求持续增长的响应

图4 PI补充策略下供应链对需求的响应



(a) 无PI补充策略下对阶跃需求的响应



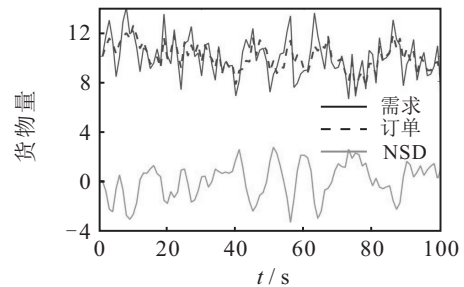
(b) 无PI补充策略下需求持续增长的响应

图5 无PI补充策略下供应链对需求的响应

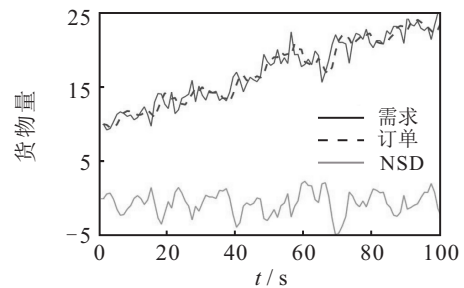
两种供应链系统均使用 H_∞ 控制器的输出代替预测函数对需求的预测,图4为订单制定环节包含PI补充策略的供应链系统的响应曲线, H_∞ 控制器为上述所求控制器. 图5为不包含PI补充策略的供应链系统的响应曲线,其中参数设定为 $K_1 = 0.5, K_2 = 0.7$. 图中上方实线为模拟的需求曲线,虚线为响应的订单曲线,下方实线为企业安全库存变化(NSD)曲线.

比较图4(a)和图5(a),当需求函数发生阶跃时,不包含PI补充策略的供应链中订单可以更加快速地上需求的变化,但是企业的安全库存变化量NSD并没有得到修复. 当需求阶跃增加时,库存变化也随之发生波动,且得不到修复,安全库存会被消耗,最终引起缺货的情况. 如图4(a)所示,包含PI补充策略的供应链系统在需求发生阶跃时,很好地修复了NSD曲线,迅速恢复到0附近. 比较图4(b)和图5(b)发现,需求持续增长的情况下,无PI补充策略的供应链系统中订单滞后于需求的增长,企业库存持续被消耗,不能保持在一个稳定状态. 而PI补充策略下的供应链能够跟上需求的增长,使得库存变化量始终保持在在一个较低的状态.

此外,产生两组随机数列用来模拟真实供应链中的需求,对3种供应链系统进行仿真模拟,系统响应如图6~图8所示. 两组随机数列中一组为普通状态下销量稳定的需求函数,另一组为销量持续增长情况下的需求函数,在图中用实线表示. 图6为订单制定环节包含PI补充策略,需求预测为 H_∞ 控制器的供应链系统的响应;图7为订单制定环节不包含PI补充策略,需求预测为 H_∞ 控制器的供应链系统的响应,参数与前文相同;图8为预测函数使用时间平移法的供应链的响应,参数设定为 $T_m = 10$. 图6(a)、图7(a)和图8(a)中,需求、订单和NSD数据特性统计如表1所示.



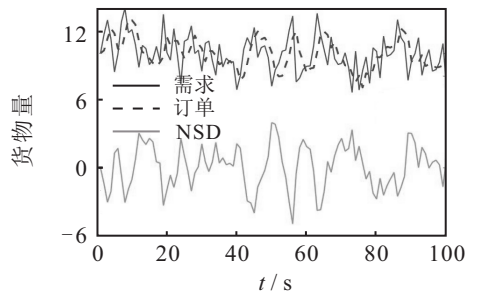
(a) PI补充策略下对普通随机需求的响应



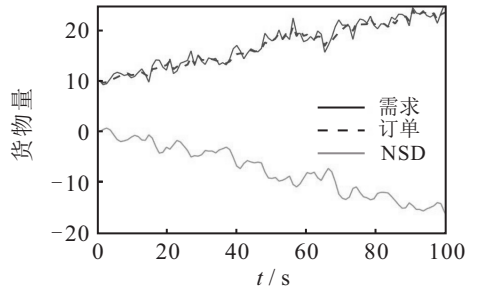
(b) PI补充策略下对需求随机增长的响应

图6 PI补充策略下供应链对随机需求的响应

由图8和表1中牛鞭效应指标 γ 数据可知,与两种用 H_∞ 控制器预测需求的方法相比,传统的时间平移法不能有效削减牛鞭效应,订单的波动大于需求的

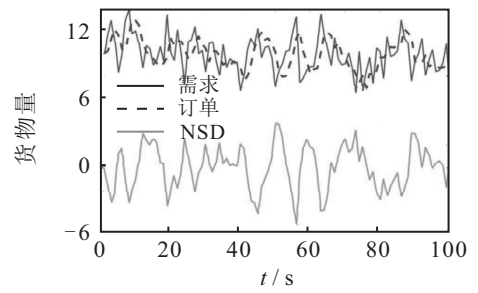


(a) 无PI补充策略对普通随机需求的响应

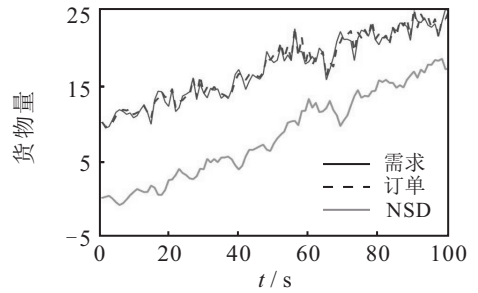


(b) 无PI补充策略对需求随机增长的响应

图7 无PI补充策略供应链对随机需求的响应



(a) 时间平移法下对普通随机需求的响应



(b) 时间平移法下对需求随机增长的响应

图8 时间平移法的供应链对随机需求的响应

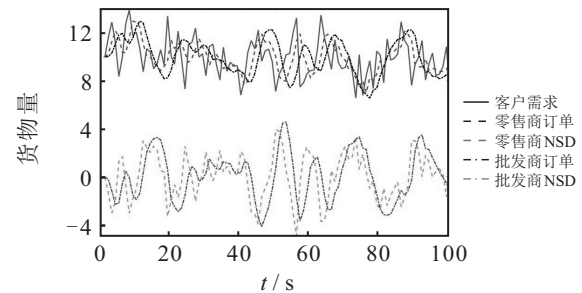
表1 随机需求下3种订单规则的数据统计

指标	PI补充策略下		时间平移法
	鲁棒控制法	鲁棒控制法	
需求标准差	1.607	1.607	1.607
订单标准差	1.189	1.158	1.984
牛鞭效应 $\gamma/\%$	73.99	72.06	123.46
NSD标准差	1.445	1.930	2.398

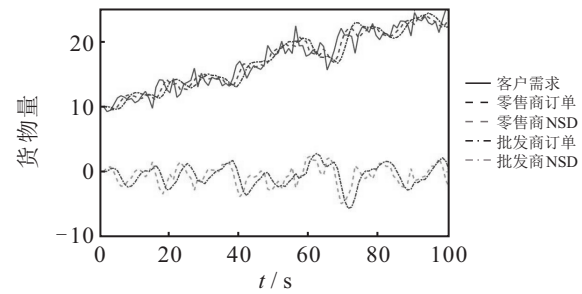
波动,需求持续增长的情况下,由于订单的波动幅度大于需求的增长,使得库存数量增长,增加了额外存

储成本.比较图6、图7和表1中数据可知,在销量随机波动时,无PI补充策略的供应链系统牛鞭效应控制略好于包含PI补充策略下的供应链系统,但是后者库存水平波动更小,始终保持在一个较低的水平.当销量持续增加时,由图6(b)和图7(b)可知,包含PI补充策略的供应链中,因为比例-积分环节的加入,很好地修复了库存变化值,库存水平始终保持在一个稳定且安全的水平;而不包含PI补充策略的供应链系统中订单滞后于需求的变化,使得NSD持续下滑,对企业造成不良影响.

至此,考虑的供应链模型是以批发商为节点企业的单层模型,关注批发商的供求关系,而实际供应链系统是多层模型.将供应链模型扩展为以图1中的批发商和零售商为核心节点的双层供应链模型,假设两个节点企业使用相同的参数,则计算出的 H_∞ 控制器参数也是相同的.图9为PI策略下双层供应链系统的对随机需求的响应.



(a) 多级供应链普通随机需求的响应



(b) 多级供应链需求随机增长的响应

图9 多级供应链对随机需求的响应

图9(a)和图9(b)中上方实线为顾客的需求信息,两张图分别模拟普通情况下随机需求的响应和需求持续增长情况下供应链的响应,虚线分别为零售商下达的订单和库存变化情况,点划线为批发商的订单和库存数据.由图9可知,两种情况下,零售商和批发商的订单都可以很好地跟随客户需求的变化,在普通情况下,批发商订单的波动小于零售商的波动,即牛鞭效应在每一级上都得到了削减.同时,该方法下库存变化量始终控制在一定范围内,使企业的安全库存保持在稳定状态.

4 结论

本文针对供应链系统中单个节点企业订单决策过程,在订货点库存控制策略的基础上引入比例-积分(PI)环节,设计出新的PI补充策略下的订单制定规则.以系统 H_∞ 范数与牛鞭效应指标定义相同为基础,将供应链管理转化为离散 H_∞ 最优控制问题,引入 H_∞ 控制器对需求进行预测.本文所提出算法在有效抑制牛鞭效应的同时,使得企业的安全库存始终保持在一个稳定、安全的状态.仿真实验表明,包含PI补充策略的 H_∞ 控制器法与不包含PI补充策略的 H_∞ 控制器法和传统的时间平移法相比,牛鞭效应得到削减的同时,库存变化量也可以得到有效修复,防止库存过量或者缺货的状况.同时,实验表明该方法对于多级供应链有着同样效果,可以大大降低企业的库存风险和成本.

参考文献(References)

- [1] Kadivar M, Shirazi M A. Analyzing the behavior of the bullwhip effect considering different distribution Systems[J]. Applied Mathematical Modelling, 2018, 59: 319-340.
- [2] Hofmann E. Big data and supply chain decisions: The impact of volume, variety and velocity properties on the bullwhip effect[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(17): 5108-5126.
- [3] 徐勇. 牛鞭效应的控制理论方法研究[D]. 天津: 天津大学, 2008.
(Xu Y. Research on control theory of bullwhip effect[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.)
- [4] Forrester J W. Industrial dynamic[M]. New York: MIT Press and Wiley & Sons, 1961: 93-108.
- [5] Serman J D. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment[J]. Management Science, 1989, 35(3): 321-339.
- [6] Towill D R. Industrial dynamics modeling of supply chains[J]. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 1996, 26(2): 23-42.
- [7] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect[J]. Management Science, 1997, 43(4): 546-558.
- [8] Chen L, Lee H L. Bullwhip effect measurement and its implications[J]. Operations Research, 2012, 60(4): 771-784.
- [9] Zhao J L, Zhu H, Zheng S. What is the value of an online retailer sharing demand forecast information?[J]. Soft Computing, 2018, 22(16): 5419-5428.
- [10] Ma J H, Ma X G. Measure of the bullwhip effect considering the market competition between two retailers[J]. International Journal of Production Research, 2017, 55(2): 313-326.
- [11] 孙文清. 农产品供应链绩效影响的系统动力学研究[J]. 统计与决策, 2016(23): 37-40.
(Sun W Q. A system dynamics study on the impact of agricultural product supply chain performance[J]. Statistics and Decision, 2016(23): 37-40.)
- [12] Wang X, Disney S M. Mitigating variance amplification under stochastic lead-time: The proportional control approach[J]. European Journal of Operational Research, 2017, 256(1): 151-162.
- [13] Sankaran S. Demand forecasting of fresh vegetable product by seasonal arima model[J]. International Journal of Operational Research, 2014, 20(3): 315-330.
- [14] Hussain M, Shome A, Dong M L. Impact of Forecasting methods on variance ratio in order-up-to level policy[J]. Global Journal of Flexible Systems Management, 2016, 17(2): 157-169.
- [15] 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 X Y, Lu Z. Application of H_∞ control strategies of bullwhip effect in supply chain[J]. Control and Decision, 2003, 18(2): 155-158.)
- [16] Qian C, Chen Q W. Reducing bullwhip effects in supply chain systems via H_∞ control[C]. Proceedings of 2019 Chinese Intelligent Automation Conference. Zhenjiang: Springer, 2019: 349-358.
- [17] Dejonckheere J, Disney S M, Lambrecht M R, et al. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(3): 567-590.
- [18] Limebeer D J N, Green M, Walker D. Discrete time H_∞ control[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control. Tampa: IEEE, 1989: 392-396.

作者简介

钱晨(1993—), 男, 博士生, 从事多源信息融合、系统鲁棒控制等研究, E-mail: 217110010178@njust.edu.cn;

陈庆伟(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 从事智能控制、智能系统等研究, E-mail: cqw2020@126.com;

宋成颖(1996—), 女, 博士生, 从事多源信息融合、非线性控制系统等研究, E-mail: scy19961002@hotmail.com.

(责任编辑: 郑晓蕾)