

基于 DMC 算法的二级闭环供应链协同策略研究

郭海峰¹ 郭雨杭¹

GUO Haifeng GUO Yuhang

摘要

针对既包含由单个制造商和单个分销商组成的正向物流,又包含退货、再制造的逆向物流,建立了基于 APIOBPCS 策略的二级闭环供应链模型,给出系统框图并推导出离散 z 域的传递函数,分析此策略下传统供应链与闭环供应链的性能差异。经仿真发现,闭环供应链牛鞭效应更小,但库存水平变得难以控制,对此设计了 DMC 控制器,给出该控制算法一般步骤。通过仿真可以看到,DMC 控制器能有效地使闭环供应链的库存水平接近期望值,提高系统的动态性能。

关键词

闭环供应链; 动态矩阵; 牛鞭效应; 回收再制造; APIOBPCS

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.01.021

0 引言

随着供应链系统发展得越来越完备,各种优化库存、生产策略层出不穷,但提升供应链效益的手段归根结底还是降低牛鞭效应。一个好的订货生产策略是抑制牛鞭效应最有效的方式。APIOBPCS 策略最早是 John 等人^[1]提出用来控制供应链中生产或分销订购的订货策略,Xueli Zhan 等人^[2]研究了 VMI-APIOBPCS (供应商管理库存的生产控制系统)在服装行业中的动态性能。用经典控制理论建立了服装供应链中的 VMI-APIOBPCS 模型,使用劳斯-赫维茨稳定性准则来分析稳定性,通过仿真得出库存调节参数对系统影响最大,偏差普遍存在于供应链中无法避免,但可依据特定的目标函数最小化。Huthaifa AL-Khazraji 等人^[3]对比了 APIOBPCS 和 2APIOBPCS 两种模型,利用两个模型的状态空间方程进行了基于仿真的实验设计,实验结果表明,无论在正常条件下还是具有产能约束或者前期操作不匹配的情况下,2APIOBPCS 策略都能提供更好的库存响应性能。Lina Tang 等人^[4]研究信息共享在降低牛鞭效应和提高供应链系统鲁棒性方面的效果时,采用 APIOBPCS 策略对具有不同信息共享策略的供应链进行建模,找出模型中排序参数的最优设置,以实现稳健的供应链。Chang W S 等人^[5]通过改进 APIOBPCS 策略建立的模型研究了基于危机准备程度、响应有效性、恢复速度和影

响传播率四个衡量标准,深入了解不同供应链在不同提前期持续时间下的影响,得出了从需求方角度约束订单率只有在交货期较长时才有效,而在交货期短时不利于企业的弹性结论。Ponte B 等人^[6]在 APIOBPCS 供应链中加入再制造环节,阐明了需求和回收不确定性之间的相互作用如何影响系统的性能。

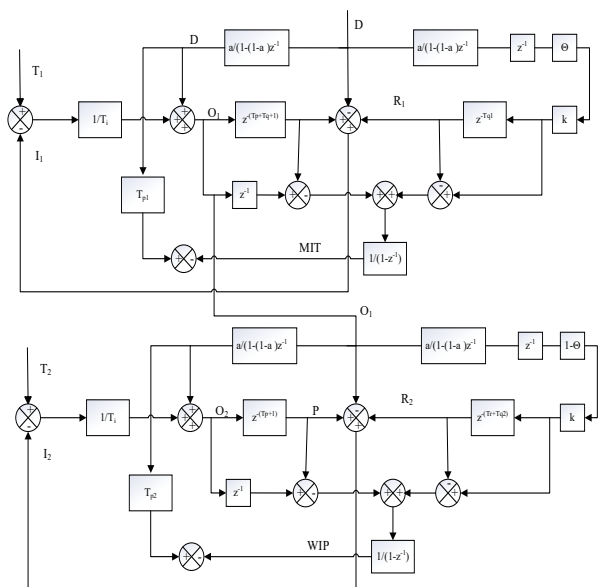
由上述文献可知,基于 APIOBPCS 订货策略建立的供应链模型可以有效减少库存积压,抑制牛鞭效应并形成供需平衡的状态,但对一些需要一定量的库存累积来应对促销等需要短时间提供大量货物的情况无法做出快速反应,且加入再制造环节后库存水平变得难以控制。因此本文在相关研究基础上设计了一个 DMC 控制器,使供应链系统在维持原有平衡的基础上可以按情况设置期望的库存水平以应对突变情况。本文主要工作有:首先将 DMC 预测控制算法与 APIOBPCS 策略相结合,协同作用于闭环供应链系统以提高系统动态性能;然后在相关研究的基础上,建立了基于 APIOBPCS 策略的二级闭环供应链模型;最后对比了传统供应链与闭环供应链的差别,设计了 DMC 控制器使库存水平稳定在设定的期望值处。

1 基于 APIOBPCS 订货策略的二级闭环供应链动态模型

1.1 系统框图

根据物流周期逻辑和 APIOBPCS 策略建立由单个制造商和单个分销商组成的二级闭环供应链系统框图如图 1 所示。

1. 沈阳理工大学自动化与电气工程学院 辽宁沈阳 110159
[基金项目] 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目 (LJKMZ20220616)



O 为订货量; T 为期望库存; I 为可用库存;
WIP (MIT) 为在制品 (在途商品) 库存; D 为需求量

图1 二级闭环供应链框图

1.2 差分方程

供应链内部运转是基于需求预测开始的, 本文采用简单指数平滑法对每周期的需求量进行预测。APIOBPCS 订货策略实质上是一种比例控制, 通过调整每期订货量来达到供需平衡的状态。假设制造商和分销商的调整量一致, 订货/生产量根据上期库存 (包含在制品) 偏差量的一个调整量与预测出的需求量决定, 在制品即是生产 (运输) 过程中未到手的货物。对于回收再制造过程而言, 无缺陷的退货/回收商品可作为完成品由分销商进行二次销售, 其余回收品运回制造商进行再制造, 假设再制造产品与新生产产品无异, 可直接提供给分销商进行销售。此二级供应链运作一个周期的活动可大致描述为: 分销商根据历史数据预测量及库存偏差量制定订货策略将订单发给制造商, 制造商根据分销商订单及库存偏差量进行生产, 生产后的产品经过运输到达分销商处进行销售, 再根据当期末尾所得销售量与历史数据对下期需求量进行预测, 循环往复, 由此得到的差分方程如表1所示。

表1 详细差分方程

描述	差分方程
需求预测	$\hat{D}_t = \alpha D_t + (1-\alpha)\hat{D}_{t-1}$
分销商订货量	$O_t^1 = \frac{T_{p1} - I_{t-1}^1}{T_i} + \frac{T_{p1}\hat{D}_{t-1} - M_{t-1}}{T_M} + \hat{D}_{t-1}$
制造商订货量	$O_t^2 = \frac{T_{p2} - I_{t-1}^2}{T_i} + \frac{T_{p2}\hat{O}_{t-1} - W_{t-1}}{T_w} + \hat{O}_{t-1}$
分销商退货量	$R_t^1 = \theta k \hat{D}_{t-1-T_q1}$
制造商退货量	$R_t^2 = (1-\theta)k \hat{O}_{t-1-T_r-T_q2}$
分销商实际可用库存	$I_t^1 = I_{t-1}^1 + O_{t-T_p-T_q}^1 + R_t^1 - D_t$

表1 (续)

描述	差分方程
制造商实际可用库存	$I_t^2 = I_{t-1}^2 + P_t + R_t^2 - O_t^1$
分销商在途商品	$M_t = M_{t-1} + O_{t-T_p-T_q}^1 + \theta k \hat{D}_{t-1-T_q1}$
制造商在制品	$W_t = W_{t-1} + O_{2t-T_p}^2 + (1-\theta)k \hat{O}_{t-1-T_q2-T_r}$

1.3 系统传递函数

由差分方程可推导出基于 APIOBPCS 策略建模的供应链系统的传递函数。

分销商订货量传递函数为:

$$\frac{O_1}{D} = \frac{z^{T_p+T_q+T_{q1}+1}(T_w A_1 + A_2 - \theta k T_i)}{(A_3 z^{T_p+T_q} + (T_w - T_i)) A_1 z^{T_{q1}}} \quad (1)$$

制造商订货量传递函数为:

$$\frac{O_2}{O_1} = \frac{z^{T_p+T_r+T_{q2}+1}(T_w A_1 + \bar{A}_2 - (1-\theta)k T_i)}{(A_3 z^{T_p} + (T_w - T_i)) A_1 z^{T_r+T_{q2}}} \quad (2)$$

分销商库存传递函数为:

$$\frac{I_1}{D} = \frac{z^{T_{q1}+1}(T_w - T_i z^{T_p+T_q})(A_1 + A_4 z^{T_p+T_q} - \theta k T_i)}{(A_3 z^{T_p+T_q} + (T_w - T_i)) A_1 z^{T_{q1}}(z-1)} \quad (3)$$

制造商库存传递函数为:

$$\frac{I_2}{O_1} = \frac{z^{T_r+T_{q2}+1}(T_w - T_i z^{T_p})(A_1 + \bar{A}_4 z^{T_p} - (1-\theta)k T_i)}{(A_3 z^{T_p} + (T_w - T_i)) A_1 z^{T_r+T_{q2}}(z-1)} \quad (4)$$

式中:

$$A_1 = (z(1+T_a) - T_a) \quad (5)$$

$$A_2 = T_i(T_w + T_{p1})(z-1) \quad (6)$$

$$\bar{A}_2 = T_i(T_w + T_{p2})(z-1) \quad (7)$$

$$A_3 = (T_i T_w (z-1) + T_i) \quad (8)$$

$$A_4 = (T_w + T_{p1} + T_w((1+T_a)z - T_a)) \quad (9)$$

$$\bar{A}_4 = (T_w + T_{p2} + T_w((1+T_a)z - T_a)) \quad (10)$$

2 动态矩阵预测控制方法

动态矩阵控制 (DMC) 是模型预测控制算法的一种, 该算法以被控对象的阶跃响应或脉冲响应为模型, 采用滚动优化的方式在线对过程实现优化控制, 在复杂的工业过程中显现出良好的控制性能。

2.1 预测模型

以订货量为控制变量, 可用品实际库存为状态变量, 由上述传递函数可得到库存与订货的关系, 求得其阶跃响应并采样得到采样值 a_i 。设 P 为预测步长, M 为控制步长, 库存 I 随 O 的动态变化关系可由采样值与订货量的乘积近似描述。在 f 时刻假定控制作用保持不变, 在无控制增量作用时对未

来 P 个时刻有预测初始值 I_0 ，此时在 f 时刻增加 M 个控制增量 ΔO ，则可计算出在其作用下的预测输出值。

$$I = I_0 + A\Delta O \quad (11)$$

$$\text{式中: } I = \begin{bmatrix} I(f+1) \\ \vdots \\ I(f+P) \end{bmatrix}; I_0 = \begin{bmatrix} I_0(f+1) \\ \vdots \\ I_0(f+P) \end{bmatrix}$$

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_p & \cdots & a_{p-M+1} \end{bmatrix}; \Delta O = \begin{bmatrix} \Delta o(f) \\ \vdots \\ \Delta o(f+M-1) \end{bmatrix}$$

2.2 滚动优化

与传统最优控制算法不同，模型预测控制算法所求最优解只作用于当前时刻，下一时刻最优解根据下一时刻的预测初值等变量重新计算作为控制增量，再根据前一时刻的控制量组成新的控制量作用于下一时刻，如此循环往复的过程称为滚动优化。

损失函数 J 由两部分构成，其一为当前时刻库存预测值 i 与期望库存 t 越接近越好，即：

$$J_1 = \sum_{i=1}^P [t(f+g) - I(f+g)]^2 \quad (12)$$

其二即控制增量 Δo 变化不能过大，应以最平缓的方式达到目标期望值，即：

$$J_2 = \sum_{j=1}^M [\Delta o(f+j-1)]^2 \quad (13)$$

将两个目标函数合为一体并加入权重得到完整的目标函数：

$$J = \sum_{i=1}^P q_i [t(f+g) - I(f+g)]^2 + \sum_{j=1}^M s_j [\Delta o(f+j-1)]^2 \quad (14)$$

令：

$$T(f) = [t(f+1) \ t(f+2) \ \dots \ t(f+P)]^T \quad (15)$$

Q 和 R 分别为 q_i 和 r_i 对角阵，平方得到：

$$J = (T(f) - I(f))^T Q (T(f) - I(f)) + \Delta O^T S \Delta O \quad (16)$$

将式 (1) 代入并对 ΔO 求导使其导函数为零得到最优解为：

$$\Delta O(f) = (A^T Q A + S)^{-1} A^T Q [T(f) - I_0(f)] \quad (17)$$

得到一个 $M \times 1$ 阶向量，取其中的即时控制增量构成实际控制策略，到下一时刻同理求出 $\Delta u(k+1)$ 以此类推，即为滚动优化。

$$\Delta u(f) = c^T \Delta U(f) = d^T (T(f) - Y_0(f)) \quad (18)$$

由式 (18) 可得出：

$$d^T = c^T (A^T Q A + R)^{-1} A^T Q \quad (19)$$

式中：

$$c = [1 \ 0 \ \dots \ 0] \quad (20)$$

2.3 牛鞭效应

牛鞭效应是供应链订货方差与需求方差之比沿供应链向上游传播时逐级放大的现象，这种现象可能会造成库存积压、生产波动、效率降低等问题，从而导致更多的成本损失，因

此牛鞭效应是衡量供应链性能的一个重要指标。本文主要研究供应链的详细内部运作情况，无复杂网络结构，因此采用 Lee 等人^[7]提出的定量方法量化牛鞭效应，使后续对供应链系统动态性能描述的仿真结果更加直观，具体公式为：

$$\text{牛鞭效应} = \frac{\sigma_o^2}{\sigma_d^2} \quad (21)$$

3 仿真分析

3.1 DMC 算法步骤

(1) 在 f 时刻，根据未施加控制增量的订货量与模型向量 a 计算出 P 个预测初值或直接测得在此订货量不变情况下的 P 个输出作为预测初值。

(2) 在给定 P 、 M 情况下， f 时刻的矩阵 A 确定，则可根据公式 (8) 计算出控制增量，进而根据叠加原理得到更新的控制率。

(3) 由公式 (1) 计算未来 P 个时刻预测值。

(4) 测得 $f+1$ 时刻在新控制率作用下的实际输出作为下一时刻的预测初值并与实际输出第一项做差得到预测误差 $e(f)$ 。

(5) 预测值经过补偿 $e(f)$ 后作为最终输出库存量。

(6) 若为二级供应链则更新后控制率作为制造商需求输入，得到相应输出库存作为其预测初值。

(7) 重复上述步骤至求得全部输出结束。

3.2 算例分析

对未施加动态矩阵控制的供应链进行仿真，仿真周期为 80。以 Villegas 等人^[8]观点来讲，客户需求被建模为客户需求随时间变化的连续数据，则需求预测问题可以表述为时间序列预测问题，而绝大多数时间序列数据均可看成多个正弦波的叠加，因此假设需求为两种正弦波叠加 $D = 2\sin(3x+4) + 3\cos(2x+2) + 50$ ，制造商与分销商生产、再制造生产、运输、回收提前期相等且均为 1 即 $T_p = T_r = T_q = T_{q1} = T_{q2} = 1$ ，平滑常数 $\alpha = 1/9$ ，回收率 $k = 0.5$ ，无缺陷退货率 $\theta = 0.4$ ，可用品库存、在制品、在途商品调整量 $T_i = T_w = T_m = 6$ ，传统供应链 ($k=0$) 与闭环供应链的仿真结果如图 2~3 所示。

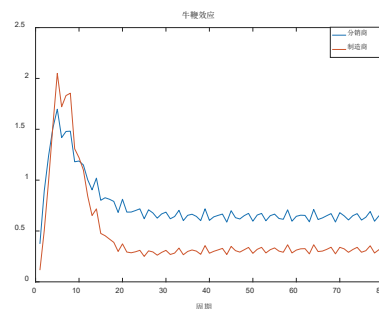


图 2 闭环供应链牛鞭效应

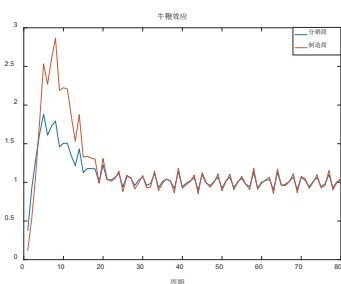


图3 传统供应链牛鞭效应

由图2、图3可知,无论对于制造商还是分销商而言,闭环供应链系统的牛鞭效应总是小于传统供应链。由图4、图5可以看出,传统供应链在达到供需平衡后库存水平趋近于0,而闭环供应链在供需平衡后仍有库存积压。不难看出,加入回收再制造环节的闭环供应链系统虽然可以减小牛鞭效应,但会造成库存积压、系统更加复杂、库存水平难以控制。因此,引入DMC控制器对闭环供应链的库存水平进行控制,并将分销商与制造商期望库存水平分别设为100和200,得到仿真结果如图6所示。根据图6可以看出,加入DMC控制器后可使实际可用库存水平接近厂商所设置的任意期望库存水平,同时也减小了牛鞭效应。

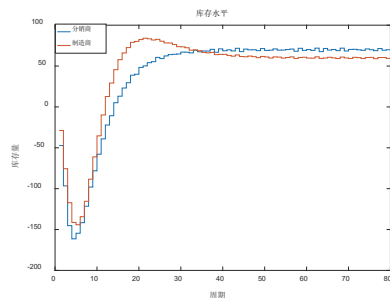


图4 闭环供应链库存水平

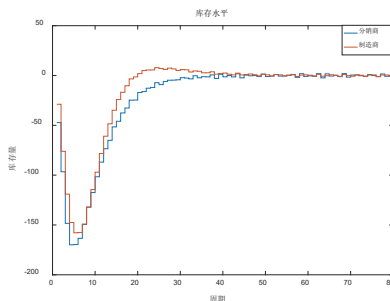


图5 传统供应链库存水平

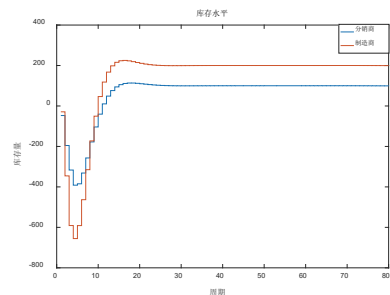


图6 闭环供应链库存水平

4 结论

从上述仿真结果可以看出,在无其他控制器作用的条件 下加入再制造环节的闭环供应链牛鞭效应相较于传统供应链 有所降低,但会造成一定的库存积压,使库存水平无法达到 期望值,系统变得难以控制。加入DMC控制器后闭环供应 链系统的库存水平也可达到期望值,同时牛鞭效应也小于传 统供应链,可见其系统动态性能更好。

尽管仿真取得较好结果,但目前研究还是存在一定局限 性。首先简单指数平滑法无法对随机性较强的数据进行预测; 其次未考虑非线性问题,未来研究将考虑不同需求类型采用 其他更精确需求预测方法,并考虑非线性问题使供应链更贴 合实际。

参考文献:

- [1] JOHN S, NAIM M M, TOWILL D R. Dynamic analysis of a WIP compensated decision support system[J]. International journal of manufacturing system design, 1994, 1(4): 283-297.
- [2] ZHAN X L, ZHANG Q, XIE W F. Dynamic performance and stability research of VMI-APIOBPCS in apparel industry based on control theory[J]. International journal of enterprise information systems, 2018, 14(2): 56-76.
- [3] AL-KHAZRAJI H, COLE C, GUO W. Optimization and simulation of dynamic performance of production-inventory systems with multivariable controls[J]. Mathematics, 2021, 9(5): 568.
- [4] TANG L N, YANG T, TU Y L, et al. Supply chain information sharing under consideration of bullwhip effect and system robustness[J]. Flexible services and manufacturing journal, 2021, 33(2): 337-380.
- [5] CHANG W S, LIN Y T. The effect of lead-time on supply chain resilience performance[J]. Asia pacific management review, 2019, 24(4): 298-309.
- [6] PONTE B, NAIM M M, SYNTETOS A A. The value of regulating returns for enhancing the dynamic behaviour of hybrid manufacturing-remanufacturing systems[J]. European journal of operational research, 2019, 278(2): 629-645.
- [7] LEE H L, PADMANABHAN S, WHANG S. The bullwhip effect in supply chain[J]. Sloan management review, 1997, 38(3): 93-102.
- [8] VILLEGAS M A, PEDREGAL D J, TRAPERO J R. A support vector machine for model selection in demand forecasting applications[J]. Computers & industrial engineering, 2018, 121: 1-7.

【作者简介】

郭海峰(1970—),男,山东莱芜人,博士,研究方向:先进控制理论与应用、物流与供应链运作技术。

郭雨杭(1999—),男,辽宁沈阳人,硕士,研究方向:复杂系统综合自动化技术。

(收稿日期:2023-09-25)