

文章编号: 1001-0920(2007)06-0667-03

基于再制造的闭环供应链动态模型及其鲁棒 H 控制

黄小原, 邱若臻

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110004)

摘要: 研究基于再制造的闭环供应链运作问题, 建立了具有再制造、废弃时滞和需求不确定性的闭环供应链动态模型. 分析了闭环供应链的鲁棒运作, 给出了针对再制造闭环供应链动态模型的鲁棒 H 控制策略和线性矩阵不等式算法, 鲁棒 H 控制策略能够抑制闭环供应链运作过程中的不确定性影响, 使闭环供应链系统运作达到理想总成本. 最后通过仿真计算验证了所提出方法的有效性.

关键词: 闭环供应链; 动态模型; 鲁棒 H 控制; 线性矩阵不等式

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Supply chain dynamic model based on remanufacturing and its robust H control

HUANG Xiaoyuan, QIU Ruozhen

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: QIU Ruozhen, E-mail: qrz1980@163.com)

Abstract: The operation of closed-loop supply chain based on remanufacturing is studied. A closed-loop dynamic model with uncertainty of remanufacturing, disposal time-delays and demand are developed. The robustness operation of closed-loop supply chain is analyzed. The robust H control strategy of closed-loop supply chain based on remanufacturing and linear matrix inequality arithmetic is proposed, by which the impact of uncertainty on the operation of closed-loop supply chain is restrained, and an ideal cost of closed-loop supply chain operation is obtained. A simulation shows the effectiveness of the method.

Key words: Closed-loop supply chain; Dynamic model; Robust H control; Linear matrix inequality

1 引言

资源节约和环境友好已经成为社会关注的普遍问题, 通过再制造回收物料和旧的产品是资源节约和环境保护的重要措施, 闭环供应链则是一项重要的管理运作方式. 一般的供应链是指原材料采购、中间产品和产品生产、最终销售到顾客的前向网络结构. 而闭环供应链则是指包括前向供应链并以其末端顾客的产品作为起点, 经过退货、直接再利用、维修、再制造、再循环回收或者废弃处理而形成的物流、资金流和信息流闭环系统. 当重点考虑制造环境和产品回收问题时, 则是一个基于再制造的闭环供应链系统, 此问题的研究主要集中于静态问题. 例如, 文献[1]研究了再制造系统的运作、制造、存货和分销问题, 文献[2]综述了再制造和产品回收的研究

问题, 文献[3]研究了具有再制造的闭环供应链 3 种选择模型, 并给出了协调策略. 还有一些研究关注闭环供应链动态系统问题, 例如文献[4]对于再制造的动态模型问题, 研究了一个再制造系统库存模型; 文献[5]研究了再制造系统的推拉模型. 近年来, 人们基于再制造的闭环供应链模型的动态系统进行了一定的工作, 例如文献[6]讨论了一个单一产品回收系统最优策略; 文献[7]研究了基于再制造系统的闭环供应链的最优控制问题. 然而, 上述研究对不确定问题涉及很少.

闭环供应链不但考虑前向渠道, 而且考虑逆向渠道, 因此比传统供应链具有更多的不确定性^[8]. 本文建立基于再制造的具有时滞不确定和外部输入不确定的闭环供应链动态模型, 并分析了闭环供应链

收稿日期: 2006-03-10; 修回日期: 2006-05-16.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70572088); 教育部高等学校博士学科专项基金项目(20050145022); 辽宁省科学技术计划项目(2004401015).

作者简介: 黄小原(1947—), 男, 河南罗山人, 教授, 博士生导师, 从事供应链管理、电子商务等研究; 邱若臻(1980—), 男, 山东青岛人, 博士生, 从事供应链管理、电子商务的研究.

的鲁棒运作,给出闭环供应链的鲁棒 H 控制策略.最后进行了仿真计算.

2 基于再制造的闭环供应链模型

文献[7]研究基于再制造的闭环供应链系统及其模型,考虑了再制造过程生产的产品作为实际库存,顾客使用的产品则作为虚拟库存.闭环供应链区别于传统供应链的一个重要特点,就是闭环供应链系统自身存在更多的不确定性.本文对于文献[7]的模型进行了两点改进:一是闭环供应链再制造和废弃的时滞作用的不确定性;二是外部输入需求的不确定性.建立一个基于再制造闭环供应链的偏差量模型,所谓偏差量就是系统的实际运作量与标称量之差.该模型为

$$x_{1,k+1} = x_{1,k} + \beta_1 x_{2,k} + \beta_2 x_{2,k-1} + u_k - w_k, \quad (1)$$

$$x_{2,k+1} = x_{2,k} - \beta_1 x_{2,k} - \beta_2 x_{2,k-1} - \beta_3 x_{2,k-2} + w_k, \quad (2)$$

其中: $x_{1,k}$ 是 k 时刻再制造生产产品的实际库存,为状态变量; $x_{2,k}$ 是 k 时刻顾客的虚拟库存,为状态变量; $x_{2,k-1}$ 是具有时滞的实际库存,库存时滞由再制造的时间延迟形成;时滞参数 $(0 < \beta_i < 1)$ 是时滞独立的,时滞独立的系统将在整个 $[0, \infty)$ 时间内维持控制作用稳定; u_k 是 k 时刻生产的产品,为控制变量; w_k 是 k 时刻的顾客需求,为外部输入不确定性变量; β_1 和 β_2 是再制造率, β_1 和 β_2 是废弃率,均为常数,且 $0 < \beta_i < 1, 0 < \beta_i < 1, 0 < \beta_i + \beta_i < 1, i = 1, 2$.

式(1)和(2)分别描述了再生产实际库存和顾客虚拟库存的动态过程.应该指出,式(1)和(2)是一个偏差量描述的系统,其中库存、生产和需求等变量均为偏差量的描述,即实际运作与标称量之差.因此,库存、生产和需求偏差量是在标称量附近波动的数值,可能是正值或负值.实际库存 $x_{1,k}$ 和顾客虚拟库存 $x_{2,k}$ 均采用偏差量描述.因此,即使 $x_{2,k} < 0, \beta_i x_{2,k} < 0, i = 1, 2$, 当实际运作中考虑标称值时,仍有可以保证 $x_{1,k}$ 的实际运作值增加.

闭环供应链运作总成本为

$$z_k = c_h x_{1,k} + c_r \beta_1 x_{2,k} + c_w \beta_2 x_{2,k} + c_n u_k, \quad (3)$$

其中: z_k 是闭环供应链运作总成本,为输出变量; c_h 是再制造生产库存成本, c_r 是再制造产品的成本, c_w 是废弃处理成本, c_n 是新产品的通常制造成本,均为常数.

式(3)描述了闭环供应链总成本由再制造库存、再制造产品、废弃处理、再制造产品的生产等成本之和组成.

式(1)~(3)写为矩阵形式,即

$$x_{k+1} = Ax_k + Au_k + Bw_k, \quad (4)$$

$$z_k = Cx_k + Du_k. \quad (5)$$

状态方程式(4)中

$$x_k^T = (x_{1,k}, x_{2,k}),$$

$$A = \begin{bmatrix} 1 & \beta_1 & \beta_2 \\ 0 & 1 - \beta_1 & -\beta_2 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & \beta_2 \\ 0 & -\beta_2 & -\beta_2 \end{bmatrix},$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

输出方程式(5)中有

$$C = (c_h, c_r \beta_1 + c_w \beta_2), D = c_n.$$

式(4)和(5)描述了一个具有再制造、废弃时滞和需求外部输入不确定的、基于再制造的闭环供应链动态系统.

3 鲁棒 H 控制

3.1 闭环供应链的鲁棒运作

基于再制造的闭环供应链动态系统,存在再制造、废弃时滞和外部输入需求两种不确定因素.如何在这些不确定条件下,得到一个闭环供应链稳定的生产控制,这就需要系统的鲁棒 H 控制.

闭环供应链鲁棒 H 控制的运作管理意义是通过实际和虚拟库存 x_k 产生生产控制 u_k ,抑制闭环供应链时滞和外部输入 w 的不确定性扰动,使闭环供应链运作总成本 z 达到一个较为理想的水平.闭环供应链控制 u_k 对于上述扰动的抑制程度可用描述,即 z_2/w_2 , 越小系统的性能越好.其中 $\|\cdot\|_2$ 是函数的 L_2 范数,它度量了供应链运作过程中的成本、需求, z_2/w_2 则描述了供应链系统输出能量与外部输入能量之比的增益.这相当于闭环供应链从需求 w_k 到输出成本 z_k 产生的牛鞭效应,即外部输入需求 w_k 的波动放大效应传导到输出成本 z_k 时的增益,鲁棒 H 控制将使 z_2/w_2 达到最小^[9].应用闭环供应链鲁棒 H 控制策略,得到系统在时滞和外部输入最坏条件下的生产控制 u_k ,抑制牛鞭效应,并且使闭环供应链运作成本达到一个相对小的结果.

3.2 闭环供应链的鲁棒 H 控制

基于再制造的闭环供应链动态模型是时滞、外部输入均为不确定的线性离散时间系统.根据文献[10-12],给出解决闭环供应链系统(4)和(5)鲁棒 H 控制策略,有如下定理成立:

定理 1 对于线性离散时间系统(4)和(5),给定正常数 γ ,如果存在正定矩阵 Q, S_1, S_2 和矩阵 M 使得下面的线性矩阵不等式成立:

$$\begin{bmatrix} -Q + A S_1 A^T & A Q + B M & E \\ Q A^T + M^T B^T & -Q & 0 \\ E^T & 0 & -\gamma^2 I \\ 0 & C Q + D M & 0 \\ 0 & M & 0 \\ 0 & Q & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ Q C^T + M^T D^T & M^T & Q \\ 0 & 0 & 0 \\ -I & 0 & 0 \\ 0 & -S_2 & 0 \\ 0 & 0 & -S_F \end{bmatrix} < 0, \quad (6)$$

则系统(4)和(5)是具有 H 范数界可镇定的,相应的状态反馈控制律 $u_k = M Q^{-1} x_k$.

4 仿真计算

本文对闭环供应链系统(4)和(5)鲁棒 H 控制策略进行仿真求解计算.根据文献[8],参数取值为再制造率参数 $\alpha_1 = 0.2, \alpha_2 = 0.2$;废弃率参数 $\beta_1 = 0.5, \beta_2 = 0.4$;成本参数 $c_h = 1, c_r = 3, c_n = 2, c_o = 1$.在主频 1.6 GHz、内存 256 MB 的 PC 机上应用 Matlab 6.5 软件 LMI 工具箱中的 feasp 求解器求解,计算用时 1.853 s.调用 feasp 求解器,在满足 LMI(6)的条件下,迭代计算 5 次,得到 $t_{\min} = -0.545 0$.计算结果为

$$M = [-24.936 7 \quad -7.468 8],$$

$$Q = \begin{bmatrix} 69.409 8 & -18.230 6 \\ -18.230 6 & 30.041 5 \end{bmatrix}.$$

鲁棒 H 状态反馈控制策略为

$$u_k = [-0.505 1 \quad -0.555 1] x_k.$$

此时,闭环供应链系统对不确定因素干扰的抑制率为 $\gamma = 1$.

下面对于闭环供应链鲁棒 H 进行仿真.这里假设第 1 种需求情况 w_k 为正态分布噪声, $w_k \sim N(\mu, \sigma^2)$,其中 $\mu = 10, \sigma^2 = 0.1$;第 2 种需求情况 w_k 为正弦函数, $w_k = 10 + 0.1 \sin k$.初始值 $x_{1,0} = 10, x_{2,i} = 0, i = 0, -1, -2, -3, -4, -5$.假设时滞为 $\tau = 2$ 和 $\tau = 5$ 两种情况,式(4)和(5)是一个采用偏差量描述的系统.这里假设系统标称值是 $x_{1,k}$ (标称值) $= 25, x_{2,k}$ (标称值) $= 5, u_k$ (标称值) $= 0, z_k$ (标称值) $= 0$.仿真结果如图 1 ~ 图 4 所示,图示采用实际运作量,其值为偏差量与标称值之和.

从仿真结果看,根据鲁棒 H 控制策略得到的生产控制 u_k 能够抑制正态分布噪声需求和正弦需求扰动,同时还能抑制时滞不确定对系统的影响,使闭环供应链系统运作稳定.

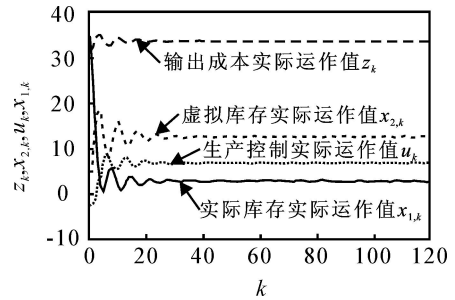


图 1 = 2 时正态分布噪声需求下的仿真结果

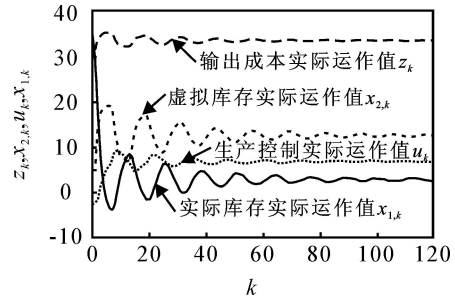


图 2 = 5 时正态分布噪声需求下的仿真结果

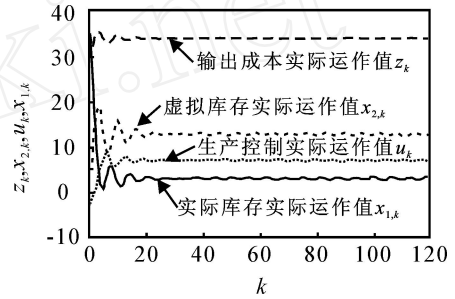


图 3 = 2 时正弦需求函数下的仿真结果

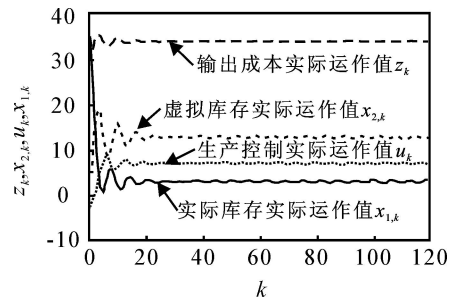


图 4 = 5 时正弦需求函数下的仿真结果

5 结 语

本文针对闭环供应链运作过程中的不确定问题,建立了具有再制造、废弃时滞和需求外部输入不确定性的闭环供应链动态模型,并给出了该模型的鲁棒 H 控制策略,得到了系统最优生产控制策略.仿真结果表明,鲁棒 H 控制策略能够有效抑制基于再制造的闭环供应链动态系统中的不确定性扰动.进一步,可考虑闭环供应链中回收产品再制造和废弃因素的不确定性问题作为未来研究方向.

(下转第 674 页)

- [6] Fang C H, Lee L, Chang F R. Robust control analysis and design for discrete-time singular systems [J]. Automatica, 1994, 30(11): 1741-1750.
- [7] Xu S Y, Lam J, Yang C W. Quadratic stability and stabilization of uncertain linear discrete-time systems with delay [J]. System Control Letter, 2001, 43(2): 77-84.
- [8] Xu S Y, Yang C W, Niu Y G, et al. Robust stabilization for uncertain discrete singular systems [J]. Automatica, 2001, 37(5): 767-774.
- [9] Xu S Y, Lam J, Zhang L Q. Robust D -stability analysis for uncertain discrete singular systems with state delay [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2002, 49(4): 551-555.
- [10] Xu S Y, Lam L, Yang C W. Robust H control for discrete singular systems with state delay and parameter uncertainty [J]. Dynamics of Continuous, Discrete and Impulsive Systems — Series B: Applications and Algorithms, 2002, 9(4): 539-554.
- [11] 沃松林, 史国栋, 邹云. 不确定离散广义系统的保性能最优控制[J]. 系统工程与电子技术, 2005, 27(1): 100-103.
- (Wo S L, Shi G D, Zou Y. Optimal guaranteed cost control for uncertain discrete-time singular linear systems [J]. Systems Engineering and Electronics, 2005, 27(1): 100-103.)
- [12] Wo S L, Shi G D, Zou Y. Guaranteed cost control for discrete-time singular large-scale systems with parameter uncertainty [J]. Acta Automatica Sinica, 2005, 31(5): 808-814.
- [13] 冯俊娥, 程兆林. 不确定奇异时滞系统的保性能控制 [J]. 控制与决策, 2002, 17(增): 711-714.
- (Feng J E, Cheng Z L. Guaranteed cost control of linear uncertain singular time-delay systems [J]. Control and Decision, 2002, 17(S): 711-714.)
- [14] Liu G P, Daniel W C H. Generalized quadratic stabilization for discrete-time singular systems with time-delay and nonlinear perturbation [J]. Asian J of Control, 2005, 7(3): 221-222.

(上接第 669 页)

参考文献 (References)

- [1] Stock J R. Reverse logistics [M]. Oak Brook: Council of Logistics Management, 1992.
- [2] Moyer L, Gupta S M. Environmental concerns and recycling/disassembly efforts in the electronics industry [J]. J of Electronics Manufacturing, 1997, 7(1): 1-22.
- [3] Savaskan R C, Bhattacharya S, Van Wassenhove L N. Closed-loop supply chain models with product remanufacturing [J]. Management Science, 2004, 50(2): 239-252.
- [4] Inderfurth K. Simple optimal replenishment and disposal policies for a product recovery system with lead-times [J]. OR Spektrum, 1997, 19(1): 111-122.
- [5] Van D, Laan E A, Salomon M. Production planning and inventory control with remanufacturing and disposal [J]. European J of Operational Research, 1997, 102(2): 264-278.
- [6] Kiesmuller G P. Optimal control of a product recovery system with lead time [J]. Int J of Production Economics, 2003, (81/82): 333-340.
- [7] Nakashima K, Arimitsu H, Nose T, et al. Optimal control of a remanufacturing system [J]. Int J of Production Research, 2004, 42(7): 3619-3625.
- [8] Guide Jr V D R, Jayaraman V, Linton J D. Building contingency planning for closed-loop supply chains with product recovery [J]. J of Operations Management, 2003, 21(2): 259-279.
- [9] Huang X Y, Yan N N, Guo H F. A H control method of the bullwhip effect for a class of supply chain systems [J]. Int J of Production Research, 2007, 45(7): 207-226.
- [10] Kim J H, Park H B. H state feedback control for generalized continuous/discrete time-delay system [J]. Automatica, 1999, 35(5): 1443-1451.
- [11] 李志虎, 王景成, 邵惠鹤. 时变不确定离散时滞系统的 H 鲁棒控制 [J]. 控制理论与应用, 2003, 20(1): 139-142.
- (Li Z H, Wang J C, Shao H H. H robust control of discrete time-delay systems with time-varying uncertainty [J]. Control Theory and Applications, 2003, 20(1): 139-142.)
- [12] Mahmoud M S. Robust H control of discrete systems with uncertain parameters and unknown delays [J]. Automatica, 2000, 36(4): 627-635.