

文章编号: 1001-0920(2008)11-1201-05

## 动态供应链与控制问题研究进展

黄小原, 葛汝刚

(东北大学 工商管理学院, 沈阳 110004)

**摘要:** 首先, 阐述了在新的信息网络, 特别是无线射频识别技术 (RFID) 环境下, 供应链系统动态情景问题; 然后, 讨论了动态供应链运作特性问题, 并分析了动态供应链系统中经典控制、最优控制、模型预测控制、鲁棒控制等问题; 最后, 指出了动态供应链系统与控制进一步研究的几个问题。

**关键词:** 供应链管理; 动态系统; 运作; 模型; 控制

**中图分类号:** F274      **文献标识码:** A

### Survey of dynamic supply chain and control

HUANG Xiaoyuan, GE Rurang

(School of Business Administration, Northeastern University, Shenyang 110004, China. Correspondent: GE Rurang, E-mail: gerugang@163.com)

**Abstract:** In this paper, a review on the dynamic supply chain and control is provided. Under new information network environment, especially in the radio frequency identification (RFID) environment, the dynamic scene problems and operation characteristics of the dynamic supply chain system are discussed. Then some problems in the dynamic supply chain system are stated, such as classical control, optimal control model predictive control (MPC) and robust control. Finally, some suggestions about the future research are presented.

**Key words:** Supply chain management; Dynamic systems; Operation; Modeling; Control

### 1 引言

近几年来, 电子商务、企业资源计划 (ERP)、无线射频识别技术 (RFID) 以及新一代网络等信息网络技术的出现, 正在影响企业供应、制造、批发、零售直至顾客过程的物流、资金流和信息流的运作, 使物流与供应链实时系统设计和控制成为可能。动态供应链在管理科学、数学、物理、石油化工、生活服务以至军事后勤等领域引起了广泛关注<sup>[1-12]</sup>。动态供应链在时间和空间 (位置) 上的实时运作与研究具有重要的理论和实践意义。

在信息网络日益丰富的今天, 动态供应链的分析设计、控制与应用迅速发展。20 世纪 90 年代以来, 英国 Cardiff 大学动态物流研究所 Towill 和 Disney 等人<sup>[13,14]</sup> 在动态物流和动态供应链领域作了大量理论与实际工作。在 2006 年, 《Automatica》发表了关于管理科学与运作管理问题的专辑, 其中特别重点报道了动态供应链系统与控制的问题<sup>[5]</sup>。

在实际应用中, 目前正在建立 (包括电子商务和 ERP 一类企业信息系统中) 供应链网络与软件基础设施, 开始开发简单的自动供应链管理系统<sup>[10]</sup>。Sckhwartz<sup>[15]</sup> 已应用模型预测控制 (MPC) 在石油化工领域进行仿真实验和局部应用, 并且在供应链管理问题中发挥了重要作用。随着网络互联企业数量的增加, 生产和服务性企业资源控制的能力也相应提高。比如一个区域建筑的供暖、通风和空调系统网络, 就是一个服务系统实时供应链管理的例子。Cares<sup>[11]</sup> 指出军事后勤系统中动态物流、动态供应链与企业资源配置非常类似, 美军在动态物流和动态供应链系统中作了大量的研究与实战工作。

### 2 信息网络环境与动态供应链

信息与网络技术的发展为动态供应链提供了新的运作环境。供应链系统本质上是动态的, 企业运营要求高质量、低成本和快速响应生产和服务。因此, 对于企业供应、制造、批发、零售过程提出实时操作

收稿日期: 2007-08-17; 修回日期: 2007-11-28.

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).

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; 葛汝刚 (1982 →), 男, 辽宁抚顺人, 博士生, 从事供应链管理和电子商务的研究。

的要求,就是对于供应链运作提出动态管理的要求。电子商务、ERP的出现和发展推动了供应链动态化的结构设计,而RFID的出现推动了供应链动态化的技术设计。无线射频识别技术RFID能快速、实时、准确采集和处理信息,在生产、销售和流通的物流供应链领域有广泛的应用前景。沃尔玛公司采用RFID解决了零售业两个难题:物品脱销和损耗。RFID在生产过程中也有广泛应用。德国宝马公司在汽车装配流水线上应用RFID技术实现用户定制生产方式,在流水线上每个工作点上设有读写器,保证汽车在流水线上完成装配任务。对于大型仓储中心,采用RFID系统可对货物进行实时的跟踪和管理。在火车、轮船、集装箱管理、邮政中心采用该技术实现物品跟踪和动态管理。另外,在动物饲养和检疫工作中采用该技术,能保证生产、销售和防疫实时管理。此外,RFID技术也可用于容器如煤气罐的使用和退回过程以及城市垃圾动态管理中。这些领域的实际应用推动了物流供应链动态管理产生变革性进展<sup>[16,17]</sup>。

到目前为止,供应链系统经典的静态模型已有大量的研究成果,其中最具代表性的是供应链供应、生产、销售运作经典的模型,特别是反映供应链合作关系的契约模型。这类供应链契约模型反映了供应链两个节点之间的合作与竞争关系,是静态模型的核心内容。动态供应链模型已从经典的传递函数、微分方程和差分方程等描述形式,向着更为复杂的结构,诸如非线性系统、时变系统、网络系统、混杂系统,特别是电子商务、移动商务环境下的时间、位置的动态模型系统发展。

### 3 动态供应链的运作

#### 3.1 牛鞭效应

牛鞭效应是供应链中的需求波动放大现象,反映了供应链总体运作的绩效和效率。牛鞭效应影响供应链系统的运行绩效和效率,是动态供应链分析最为重要的性能指标<sup>[18-20]</sup>。

牛鞭效应是时间、位置两个维度的波动与放大效应,但到目前为止,还是将牛鞭效应的量化作为位置维度处理。一般而言,牛鞭效应是从订货、制造、销售等这样一系列节点需求被逐步放大的过程。因此,将牛鞭效应作为位置、时间两个维度的动态处理更合理,也为动态供应链管理提出了新的课题。

#### 3.2 运作指标与动态分析

动态供应链分析指标反映供应链运作过程中的特性和要求,它是供应链分析、设计和综合问题的依据。客户满意度、运作成本、快速响应、库存波动等是动态供应链运作的重要分析指标<sup>[2,12,21,22]</sup>。

客户满意度是供应链竞争、提高市场占有率的重要指标,它直接影响企业产品生产和服务的经营效益。文献[12]提出了动态供应链客户满意度的指标,即采用订货误差的均值描述客户满意度。

运作成本是企业金融财务方面的重要指标,它包括供应、制造、销售过程中库存、服务、运输、等待等一系列资金状况。运作成本是随时间、位置变化的,用来刻画动态供应链,并反映供应链动态资金状况。Perea<sup>[12]</sup>提出了用生产和存储成本均值描述运作成本的方法。Naim<sup>[23]</sup>对于动态供应链提出了净现值NPV的动态指标。NPV指标对于传统供应链和在电子商务环境下的动态供应链都具有意义。

快速响应是企业跟踪市场与敏捷制造的重要指标。供应链管理比传统生产计划与控制模式大大推进了一步。由于信息网络技术的快速发展,供应链管理决策信息来源已远远超过了传统生产计划情况下的单源信息,来自供应、制造、销售的多元信息增强了快速响应的能力。供应链管理的决策群体性和分布式也为快速响应提供了基础,信息反馈机制和市场快速响应能力也明显地增强。Boukas<sup>[22]</sup>提出了供应链运作系统生产直接跟踪市场顾客的性能指标,该指标描述了动态供应链系统的快速响应问题。

库存波动是供应链运作的重要指标。对于标称库存和安全库存,库存波动直接影响供应链运作的时间、成本和效益。Perea<sup>[12]</sup>给出了库存波动这一动态指标。另外,在动态供应链运作过程中,运作提前期和运作质量等也是重要指标。George<sup>[2]</sup>研究并给出了这些运作指标,并分析了动态供应链的运作。

#### 3.3 稳定性与鲁棒性

供应链系统稳定性是在系统受到初始条件或参数(如分销商、制造商时滞)的扰动时具有的能恢复到原来状态的能力<sup>[8]</sup>。Venkateswaran<sup>[24]</sup>从实证方面考察了供应链系统的稳定性。Riddalls<sup>[25]</sup>对于生产库存动态系统模型问题,研究了供应链的稳定性,分析了生产库存系统延迟相关、延迟无关两种稳定性,并给出了初始参数变动区域对稳定性的影响。稳定性的研究对于供应链系统初始条件或参数扰动条件下供应链生产、销售、库存运作以及如何保持原有管理功能是有意义的。

供应链系统鲁棒性是系统受到内部运作和外部突发应急事件等不确定性干扰下,仍然能保持供应链的收益和持续性运行的功能。Tang<sup>[26]</sup>认为在扰动条件下,运作策略具备两种性质,称其为鲁棒性能。一是效率性能,它将使企业能有效地管理运作风险;二是弹性性能,它将使企业在扰动过程中能维持其正常运作。供应链系统鲁棒性,可采用系统增益描

述,系统增益越小,系统抑制外部扰动、抑制牛鞭效应的性能越好。因此,对供应链系统鲁棒性的研究是一项有意义的工作。

## 4 动态供应链的控制策略

### 4.1 经典控制

动态供应链的经典控制主要是由 Towill<sup>[27]</sup> 提出的基于生产控制系统的库存和订货策略 (IOBPCS) 及其后进行的一系列关于供应链传递函数和 PID 控制等工作。

Riddalls 等人<sup>[28]</sup> 进一步提出基于生产控制系统的自动管道库存和订货策略 (APIOBPCS)。根据 APIOBPCS 模型, Zhou<sup>[29]</sup> 给出了一种包括制造和再制造的混杂系统。Dejonckheer 等人<sup>[30]</sup> 研究了单阶段离散时间系统传递函数问题。White<sup>[31]</sup> 提出更为成熟的库存控制策略,利用一个 PID 策略降低库存水平和成本。Disney 等人<sup>[13]</sup> 研究了一条由一个生产单元与一个分销商组成的简单供应商管理库存 (VMI) 的供应链,并用一个离散的 APIOBPCS 模型分析了生产单元的动态性。Lin<sup>[32]</sup> 提出了一个供应链系统的离散时间模型,描述供应链节点单元的传递函数,并进行了 PID 控制器设计。

动态供应链系统采用传递函数描述和 PID 控制,其优点是简捷、实用。但对于多级多层供应链系统则很难描述和分析,尤其对于一些动态指标,比如牛鞭效应。

### 4.2 最优控制

动态供应链的最优控制是时域上最基本的方法。通常运用极大值原理和动态规划方法给出供应链最优反馈控制结果。

Clark 和 Scarf<sup>[33]</sup> 最先提出关于生产库存系统最优控制的一类问题。Gallego 和 Ozer<sup>[34,35]</sup> 针对无产能约束的库存系统提出了最优的补货策略。Ozer 和 Wei<sup>[36]</sup> 建立了具有产能限制的库存系统最优策略。Simchi-Levi 等人<sup>[37]</sup> 分析了在具有有限生产能力的两级供应链系统中,零售商和制造商进行信息共享的价值。使用动态规划得到了最优数值解。Boukas 等人<sup>[38]</sup> 研究了一个单一产品、多机器的生产系统的最优控制问题。需求不确定是在生产和控制中影响决策制定的一个重要因素。Song 等人<sup>[39]</sup> 研究了一个具有失效倾向机器和随机需求的连续生产线的最优控制问题,并研究了该问题的 bang-bang 控制。Boukas 等人<sup>[40]</sup> 考虑了易逝品库存-生产计划问题,易逝品的价值随时间而不断减少。

动态供应链采用极大值原理和动态规划分析与综合,其优点是可结合运作机理分析问题。但动态供应链系统作为一个工程实际问题,不可能都有经

典最优结果。若系统是在实时和不确定环境下,则极大值原理更难以奏效。

### 4.3 模型预测控制

模型预测控制 (MPC) 是直接工业过程领域中出现的一类基于模型的计算机优化先进控制算法<sup>[41]</sup>。它是企业动态供应链系统实施的方法策略。许多文献都已注意到 MPC 在运作管理中的重要性,将其视为解决多周期最优问题的工具,比如在滚动周期下的生产计划和供应链管理等。

Kapsiotis 等人<sup>[42]</sup> 率先将 MPC 应用到库存管理问题中,并且针对的是一个单库存节点。为了补偿生产提前期,得到了来自库存相关轨迹偏差的惩罚项。Tzafestas<sup>[43]</sup> 研究了包括生产/库存和市场决策的更一般化的生产计划问题,采用一个以广告效果作为销售量函数的线性经济模型。在销售量的动态方程中还加入了库存均衡等式。最优控制问题被描述成一个 MPC 问题,其中控制变量是广告效果和库存水平。目标函数对来自期望销售量和库存水平的偏差进行惩罚。Perea-Lopez<sup>[44]</sup> 应用 MPC 来管理一个多产品、具有提前期、不准缺货的多级生产和分销网络。Braun<sup>[45]</sup> 针对来自芯片工业的大规模供应链问题提出了一个线性的 MPC 研究框架。Lin<sup>[46]</sup> 提出了一个最小偏差控制 (MVC) 系统。该系统本质上具有 MPC 结构,其中最小化的目标函数由预测库存和在途水平之间的偏差组成,而偏差来自于超过两个预测范围的设定点和超过一个范围的订货变化。

动态供应链中模型预测控制考虑了运作过程中成本、库存等参数,但对于供应链中客户满意度这类更为复杂的指标,尚难以处理。

### 4.4 鲁棒控制

动态供应链鲁棒控制是在企业供应、制造、销售运作过程中,供应链处于具有外部扰动,内部参数不确定的环境下,如何作出生产、订货、销售等一系列最优动态决策的问题。

Blanchini<sup>[47]</sup> 研究了在最坏情况下,系统实现最小库存水平的问题,并提出了一种计算最小库存量的方法。最小的库存水平就是控制动态生产/库存系统的稳定状态,给出一种线性规划,可进行实时在线最优控制策略计算。Boukas<sup>[48]</sup> 考虑了带有产品损坏的连续时间生产库存问题,最小化有限二次生产和库存/短缺成本。Boukas<sup>[49]</sup> 描述了具有产品损失的库存问题的切换线性系统,切换变量是库存水平,并设计了一个基于 LMI 条件求解的分段仿射状态反馈鲁棒控制器。Laumanns<sup>[50]</sup> 研究了供应链网络系统问题,考虑了顾客需求外部扰动环境以及供应链

系统运作的约束条件和成本最小的目标函数,运用极小极大方法,求解了供应链的鲁棒最优控制. Huang<sup>[51,52]</sup>研究了经典供应链系统、电子商务环境下的供应链、闭环供应链系统的鲁棒  $H$  控制问题. 在外部需求扰动和内部参数、时滞扰动的条件下,考虑了供应链动态系统的系统增益,认为鲁棒  $H$  控制将减小系统增益,减弱牛鞭效应.

供应链的鲁棒控制对处理运作成本、快速响应、库存波动、牛鞭效应等指标是有效的. 但对于运作管理中具有诸多约束条件的情况,难以找到合适的方法. 对于运作管理中切换等复杂情况,尚未深入研究.

## 5 进一步研究的问题

目前的控制理论方法大多是面向工业过程提出的解决方案. 但对于供应链这样的非工业过程运作管理问题而言,已有控制理论方法存在缺陷,尚待在实践中探索. 本文提出如下几个值得进一步研究的问题:

1) 在电子商务和移动商务环境下关于时间和位置的动态供应链系统模型. 移动商务是在 RFID 环境中的商务运作,在不断变化的位置过程中物流和供应链动态运作的模型是一个具有理论和实际意义的问题.

2) 在频域上,供应链传递函数运作机理分析和供应链 PID 方式的满意控制. 在时域上,特别是模型预测控制、鲁棒控制等一类先进控制如何处理多目标、多约束的问题.

3) 分析传统供应链协调与动态供应链控制之间的关系,建立供应链节点之间的动态对策(微分对策)策略.

4) 动态供应链系统的复杂控制. 由于经济全球化、信息化和突发事件的影响,供应链网络和应急管理的问题研究也应提到日程.

## 参考文献(References)

- [1] Sarimveis H, Patrinos P, Tarantilis C D, et al. Dynamic modeling and control of supply chain systems: A review [J]. *Computers and Operations Research*, 2008, 35(11): 3530-3561.
- [2] Huang G Q, Lau J S K, Mak K L. The impacts of sharing production information on supply chain dynamics: A review of the literature [J]. *Int J of Production Research*, 2003, 41(7): 1483-1517.
- [3] Ortega M, Lin L. Control theory application to the production-inventory problem: A review [J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(5): 2303-2322.
- [4] Hinojosa Y, Kalcsics J, Nickel S, et al. Dynamic supply chain design with inventory [J]. *Computers and Operations Research*, 2008, 35(2): 373-391.
- [5] Sethi S P, Zhang Q. Introduction to the special issue on optimal control application to management sciences [J]. *Automatica*, 2006, 42(8): 1241-1244.
- [6] Riddalls C E, Bennett S, Tipi N. Modeling the dynamics of supply chains [J]. *Int J of Systems Science*, 2000, 31(8): 969-976.
- [7] Axsater S. Control theory concepts in production and inventory control [J]. *Int J of Systems Science*, 1985, 16(2): 161-169.
- [8] Nagatani T, Helbing D. Stability analysis and stabilization strategies for linear supply chains [J]. *Physica A*, 2004, 335(3): 644-660.
- [9] Makui A, Madadi A. The bullwhip effect and Lyapunov exponent [J]. *Applied Mathematics and Computation*, 2007, 189(1): 35-40.
- [10] Richard M M. Control in an information rich world: Report of the panel on future directions in control, dynamic and systems [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [11] Cares J. Distributed network war [M]. Beijing: Beijing Post University Press, 2005.
- [12] Perea E, Grossmann I, Ydstie E, et al. Dynamic modeling and classical control theory for supply chain management [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2000, 24(6): 1143-1149.
- [13] Disney S M, Towill D R. A procedure for the optimization of the dynamic response of a vendor managed inventory system [J]. *Computer and Industrial Engineering*, 2002, 43(1): 27-58.
- [14] Geary S, Disney S M, Towill D R. On bullwhip in supply chain historical review: present practice and expected future impact [J]. *Int J of Production Research*, 2006, 101(1): 2-18.
- [15] Schwartz J D, Wang W, Rivera D E. Simulation-based optimization of process control policies for inventory management in supply chains [J]. *Automatica*, 2006, 42(8): 1311-1320.
- [16] 朗为民. 射频识别(RFID)技术原理与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.  
(Lang W M. The technology and application of RFID [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2006.)
- [17] Angeles R. RFID technologies: Supply-chain applications and implementation issues [J]. *Information Systems Management*, 2006, 22(1): 51-65.
- [18] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect [J]. *Management Science*, 1997, 43(4): 546-558.
- [19] Towill D R, Zhou L, Disney S M. Reducing the bullwhip effect: Looking through the appropriate lens [J]. *Int J of Production Economics*, 2007, 108(3): 444-453.

- [20] Lee N, Padmanabhan S, Whang S. The bullwhip effect in supply chains[J]. *Sloan Management Review*, 1997, 38(2): 93-102.
- [21] Hosoda T, Disney S M. The governing dynamics of supply chain: The impact of altruistic behaviors [J]. *Automatic*, 2006, 42(8): 1301-1309.
- [22] Boukas E K. Manufacturing systems: LMI approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 2006, 51(6): 1014-1018.
- [23] Naim M M. The impact of the net present value on the assessment of the dynamic performance of e-commerce enabled supply chains [J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 104(3): 382-393.
- [24] Venkateswaran J, Son Y J. Impact of modeling approximates in supply chain analysis: An experiment study [J]. *Int J of Production Research*, 2004, 42(15): 2971-2992.
- [25] Riddalls C E, Bennett S. The stability of supply chain [J]. *Int J of Production Research*, 2002, 40(2): 459-475.
- [26] Tang C S. Perspectives in supply chain risk management[J]. *Int J of Production Economics*, 2006, 103(2): 451-488.
- [27] Towill D R. Dynamic analysis of an inventory and order based production control system [J]. *Int J of Production Research*, 1982, 20(6): 671-687.
- [28] John S, Naim M M, Towill D R. Dynamic analysis of WIP compensated decision support systems[J]. *Int J of Manufacture System Design*, 1994, 1(1): 283-297.
- [29] Zhou L, Naim M M, Tang O, et al. Dynamic performance of a hybrid inventory system with a Kanban policy in remanufacturing process[J]. *Omega*, 2006, 34(3): 585-598.
- [30] 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.
- [31] White A S. Management of inventory using control theory[J]. *Int J of Technology Management*, 1999, 17(8): 847-860.
- [32] Lin P H, Wong D S H, Jang S S, et al. Controller design and reduction of bullwhip for a model supply chain system using  $z$ -transform analysis [J]. *J of Process Control*, 2004, 14(2): 487-499.
- [33] Clark A, Scarf H. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem[J]. *Management Science*, 1960, 6(3): 475-490.
- [34] Gallego G, Ozer O. Integrating replenishment decisions with advance order information [J]. *Management Science*, 2001, 47(10): 1344-1360.
- [35] Gallego G, Ozer O. Optimal replenishment policies for multi-echelon inventory problems under advance demand information [J]. *Manufacturing and Service Operations Management*, 2003, 5(1): 157-175.
- [36] Ozer O, Wei W. Inventory control with limited capacity and advance demand information [J]. *Operations Research*, 2004, 52(5): 988-1000.
- [37] Simchi-Levi D, Zhao Y. The value of information sharing in a two-stage supply chain with production capacity constraints [J]. *Naval Research Logistics*, 2003, 50(7): 888-916.
- [38] Boukas E K, Haurie A. Manufacturing flow control and preventive maintenance: A stochastic control approach [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(4): 1024-1031.
- [39] Song D P, Sun Y X. Optimal service control of a serial production line with unreliable workstations and random demand[J]. *Automatica*, 1998, 34(7): 1047-1060.
- [40] Boukas E K, Liu Z K. Manufacturing systems with random breakdowns and deteriorating items [J]. *Automatica*, 2001, 37(2): 401-408.
- [41] 俞金寿. 工业过程先进控制[M]. 北京: 中国石化出版社, 2002.  
(Yu J S. The advanced control in the industry process [M]. Beijing: Petrification Publisher of China, 2002.)
- [42] Kapsiotis G, Tzafestas S. Decision making for inventory/production planning using model-based predictive control [C]. *Parallel and Distributed Computing in Engineering Systems*. Amsterdam: Elsevier, 1992: 237-249.
- [43] Tzafestas S, Kapsiotis G, Kyriannakis E. Model-based predictive control for generalized production planning problems[J]. *Computers in Industry*, 1997, 34(1): 201-210.
- [44] Perea L E, Ydstie B E, Grossmann I. A model predictive control strategy for supply chain management [J]. *Computers and Chemical Engineering*, 2003, 27(6): 1201-1218.
- [45] Braun M W, Rivera D E, Flores M E, et al. A model predictive control framework for robust management of multi-product, multi-echelon demand networks [J]. *Annual Reviews in Control*, 2003, 27(2): 229-245.
- [46] Lin P H, Jang S S, Wong D S H. Predictive control of a decentralized supply chain unit [J]. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 2005, 44(23): 9120-9128.
- [47] Blanchini F, Pesenti R, Rinaldi F, et al. Feedback control of production-distribution systems with unknown demand and delays [J]. *IEEE Trans on Robotics and Automation*, 2000, 16(3): 313-317.

(下转第 1210 页)

$$X_1 = 1/x_1 + 0.65/x_2 + 0.65/x_3 + 0.6/x_4 + 0.6/x_5 + 0.5/x_6,$$

$$F = 0.7/x_1 + 0.75/x_2 + 0.8/x_3 + 0.8/x_4 + 0.85/x_5 + 0.9/x_6.$$

同样令  $I(x, y) = \max(1 - x, y)$ ,  $T(x, y) = \min(x, y)$ , 可得

$$I = 0.15, S_I = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\},$$

$$R(F(x_1)) = \inf_{y \in S_I} I(R(x_i, y), F(y)) = 0.7.$$

$$U = 0.05, S_U = \{x_1, x_2, x_3\},$$

$$\bar{R}(F(x_1)) = \sup_{x \in S_U} T(R(x_i, y), F(y)) = 0.7.$$

对于空集  $\emptyset$ , 可得

$$I = 0.4, S_I = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\},$$

$$R(\emptyset)(x_1) = \inf_{y \in S_I} I(R(x_i, y), \emptyset(y)) = 0,$$

$$U = 0, S_U = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\},$$

$$\bar{R}(\emptyset)(x_1) = \sup_{x \in S_U} T(R(x_i, y), F(y)) = 0.$$

显然, 性质(22)和(23)都是成立的.

## 6 结论

经典粗糙集理论是处理不精确和不确定知识的有效数学工具, 但仅适用于一般信息系统. 模糊粗糙集模型将粗糙集理论的基本思想应用到模糊信息系统, 是经典粗糙集理论的重要扩展. 但从实际应用的角度而言, 由于数据获取或数据处理方面的原因, 信息系统中的数据难免含有噪音数据, 而模糊粗糙集模型同经典粗糙集模型类似, 都存在着容易受到噪音数据影响的问题. 对此, 研究者们受到变精度粗糙集模型的启发, 提出了变精度模糊粗糙集的概念. 现有的变精度模糊粗糙集模型不能满足一些基本的性质, 而这些性质是粗糙集、变精度粗糙集和模糊粗糙集所共有的. 本文针对现有变精度模糊粗糙集模型存在的这一问题, 提出了变精度模糊粗糙集的一种定义, 该定义能够满足上述的基本性质.

(上接第1205页)

- [48] Boukas E K, Shi P, Andijani A. Robust inventory-production control problem with stochastic demand[J]. *Optimal Control Applications and Methods*, 1999, 20(1): 1-20.
- [49] Boukas E K, Rodrigues L. Inventory control of switched production systems: LMI approach analysis, control and optimization of complex dynamic systems [M]. London: Kluwer Academic Publisher, 2005.
- [50] Laumanns M, Lefeber E. Robust optimal control of material flows in demand-driven supply networks[J].

## 参考文献(References)

- [1] Pawlak Z. Rough sets [J]. *Int J of Computer and Information Science*, 1982, 11(5): 341-356.
- [2] Pawlak Z. Some issues on rough sets [J]. *Trans on Rough Sets I*, 2004: 1-58.
- [3] Dubois D, Prade H. Rough fuzzy sets and fuzzy rough sets [J]. *Int J of General Systems*, 1990, 17(2/3): 191-209.
- [4] Dubois D, Prade H. Putting rough sets and fuzzy sets together [C]. *Intelligent Decision Support Handbook of Applications and Advances of the Rough Sets*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1992: 203-222.
- [5] Bodjanova S. Approximation of fuzzy concepts in decision making [J]. *Fuzzy Sets System*, 1997, 85(1): 23-29.
- [6] Yao Y. Combination of rough and fuzzy sets based on  $\alpha$ -level sets [C]. *Rough Sets and Data Mining*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1997: 301-321.
- [7] Ziarko W. Variable precision rough set model [J]. *J of Computer Systems and Science*, 1993, 46(1): 39-59.
- [8] Mieszkowicz-Rolka A, Rolka L. Variable precision fuzzy rough sets [J]. *Trans on Rough Sets I*, 2004: 144-160.
- [9] Mieszkowicz-Rolka A, Rolka L. Fuzzy implication operators in variable precision fuzzy rough sets model [C]. *Artificial Intelligence and Soft Computing-ICAISC 2004*. Zakopane: Springer-Verlag, 2004: 498-503.
- [10] Klir G J, Yuan B. *Fuzzy logic: Theory and applications* [M]. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995.
- [11] Radzikowska A M, Kerre E E. A comparative study of fuzzy rough sets [J]. *Fuzzy Sets System*, 2002, 126(2): 137-155.
- [12] 李凡, 刘启和, 叶茂, 等. 不一致决策表的知识约简方法研究 [J]. *控制与决策*, 2006, 21(8): 857-862. (Li F, Liu Q H, Ye M, et al. Approaches to knowledge reduction in inconsistent decision tables [J]. *Control and Decision*, 2006, 21(8): 857-862.)

*Physica A*, 2006, 363(1): 24-31.

- [51] Huang Xiao-yuan, Yan Ni-na, Guo Hai-feng. A H control method of the bullwhip effect for a class of supply chain systems [J]. *Int J of Production Research*, 2007, 45(1): 207-226.
- [52] 黄小原. 供应链运作——协调、优化与控制 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. (Huang X Y. *The supply chain operation: Coordination, optimization and control* [M]. Beijing: Science Press, 2007.)