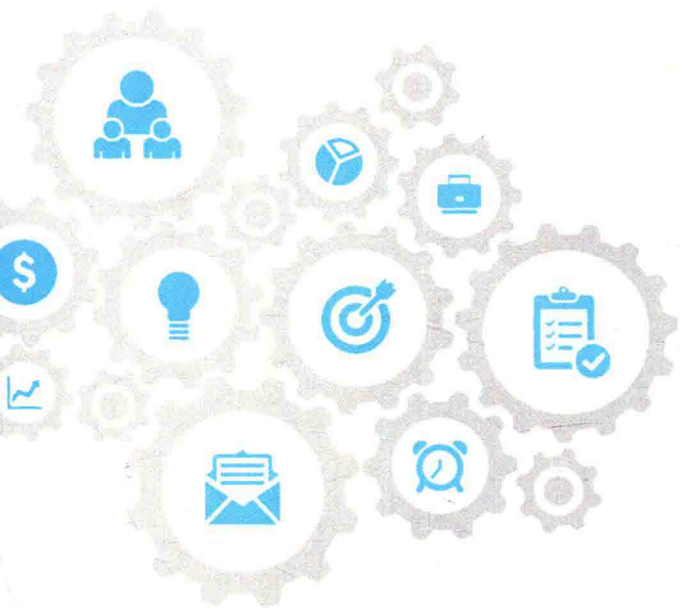




GONGYINGLIAN XITONG DE  
DONGTAI FUZAXING YANJIU

# 供应链系统的 动态复杂性研究

魏永长◎著

1



知识产权出版社

全国百佳图书出版单位



GONGYINGLIAN XITONG DE  
DONGTAI FUZAXING YANJIU

# 供应链系统的 动态复杂性研究

魏永长◎著



知识产权出版社  
全国百佳图书出版单位

图书在版编目(CIP)数据

供应链系统的动态复杂性研究 / 魏永长著. —北京:知识产权出版社, 2017. 12

ISBN 978-7-5130-5338-9

I. ①供… II. ①魏… III. ①供应链管理—研究 IV. ①F252

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 311267 号

内容提要

本书从多学科交叉的角度,系统研究了不同结构供应链系统的稳定性与牛鞭效应问题,将已有的稳定性结论从较小提前期扩展到任意提前期;讨论了顾客与零售商的非线性交互引发的混沌与分叉行为;研究了供应网络中牛鞭效应与库存波动的鲁棒控制问题。本书揭示了供应链动态复杂性的影响机理。

本书可供系统工程、物流与供应链管理、复杂性科学等领域的研究与管理人员参考。

责任编辑:安耀东

责任出版:孙婷婷

供应链系统的动态复杂性研究

GONGYINGLIAN XITONG DE DONGTAI FUZAXING YANJIU

魏永长 著

出版发行:知识产权出版社有限责任公司

网 址: <http://www.ipph.cn>

电 话: 010-82004826

<http://www.laichushu.com>

社 址:北京市海淀区气象路 50 号院

邮 编: 100081

责编电话: 010-82000860 转 8534

责编邮箱: [an569@qq.com](mailto:an569@qq.com)

发行电话: 010-82000860 转 8101

发行传真: 010-82000893

印 刷: 北京中献拓方科技发展有限公司

经 销: 各大网上书店、新华书店及相关专业书店

开 本: 720mm×1000mm 1/16

印 张: 10

版 次: 2017 年 12 月第 1 版

印 次: 2017 年 12 月第 1 次印刷

字 数: 140 千字

定 价: 58.00 元

ISBN 978-7-5130-5338-9

出版权专有 侵权必究

如有印装质量问题,本社负责调换。

## 前 言

随着市场竞争的日趋激烈化,企业的利润空间不断压缩,顾客对响应速度要求越来越高,有效的供应链管理应当能够根据外部环境的变化,适时地调整管理策略。与此同时,企业不仅要关注短期利益,更应该关注其长远的发展过程。然而,复杂不确定的顾客需求、复杂的供应关系、复杂的生产工艺流程等因素给供应链系统的动态运作与管理增添了难度。针对各种复杂因素,探索供应链系统的动态性,对于降低管理成本、改善顾客服务具有重要意义。

由于供应链系统中广泛存在反馈、延迟以及非线性,控制理论在研究供应链系统动态性方面具有明显优势。围绕影响动态性的各种复杂因素,本书以研究现状为基础,提出了供应链系统动态复杂性的主要研究框架以及基本研究思路,应用控制理论等方法研究了不同结构供应链系统的动态性,主要工作及贡献体现在以下若干方面:

以差分方程理论为基础,将离散的基于库存与订货的生产控制系统(APIOBPCS)的稳定性结论由较小提前期扩展到任意提前期。分别给出了当生产提前期为奇数和偶数时离散 APIOBPCS 模型保持稳定的充要条件。得到了与提前期无关的稳定参数区域,进一步简化了补货参数的选择。研究表明,在制品库存对于生产库存控制有重要的意义。在保证系统稳定的基础上,通过建立状态空间模型,研究了未知需求情形下系统的牛鞭效应问题,分析了补货参数、提前期以及需求预测过程对牛鞭效应鲁棒性的影响。

针对供应商管理库存(VMI)的特点,研究了 VMI 供应链系统中零售商的库存波动范围,得出了零售商的库存波动范围受发货提前期、

发货策略及需求特性综合影响的结论。研究了整个 VMI 供应链系统在动态性方面的特点,研究表明 VMI 供应链系统上游企业不仅可以灵活地控制对下游的发货频率,也可以使制造商的生产过程变得更加平滑。为了改善系统性能,结合传递函数与状态空间模型的各自优点,分析了系统参数对未知需求情形下牛鞭效应的影响。研究弥补了当前 VMI 供应链系统动态性缺乏解析研究的不足,得到的结论可用于指导 VMI 的实施。

现有的供应链系统动态性的研究偏向于将顾客需求看成是外生变量,然而现实生活中的顾客需求受价格与库存等因素的影响。针对供应链系统中分段线性的特点,采用切换系统理论,研究了依赖于库存的需求对供应系统动态性的影响。通过构建切换线性模型,研究了系统的稳定性与非线性动态复杂性。研究表明,当需求依赖于库存时,需求模型参数的改变不仅可能破坏系统的稳定性,而且会使得系统的非线性动态性变得更加复杂。

供应网络中企业内部机制的复杂性与供应关系的复杂性给供应网络的动态性研究带来了挑战。在考虑网络结构和需求合作的基础上,建立了包括多个零售商与多个分销商的供应网络的状态空间模型。以鲁棒控制理论为基础,设计了网络中企业的库存策略,降低了库存波动与订货波动。随后,通过数值仿真,分析了网络结构、需求合作以及零售商之间的横向调货策略对于网络动态性的影响。研究表明,复杂的供应关系有助于缓解系统中的牛鞭效应。

# 目 录

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 .....                  | 1  |
| 1.1 课题来源与资助 .....               | 1  |
| 1.2 问题提出、研究目的和意义 .....          | 1  |
| 1.3 相关文献综述 .....                | 4  |
| 1.3.1 供应链系统的稳定性 .....           | 6  |
| 1.3.2 供应链系统的牛鞭效应 .....          | 7  |
| 1.3.3 供应链系统的非线性动态性 .....        | 11 |
| 1.3.4 供应商管理库存 .....             | 12 |
| 1.4 研究思路 .....                  | 14 |
| 1.5 章节安排 .....                  | 15 |
| 第 2 章 供应链系统动态复杂性研究基础理论与方法 ..... | 18 |
| 2.1 引言 .....                    | 18 |
| 2.2 供应链系统动态复杂性研究理论框架 .....      | 19 |
| 2.3 供应链系统的稳定性 .....             | 23 |
| 2.3.1 稳定性判据 .....               | 23 |
| 2.3.2 差分方程的稳定性 .....            | 26 |
| 2.3.3 一个连续生产库存控制系统的稳定性分析 .....  | 27 |
| 2.4 供应链系统的牛鞭效应研究 .....          | 28 |
| 2.5 本章小结 .....                  | 31 |
| 第 3 章 生产库存控制系统的动态复杂性 .....      | 33 |
| 3.1 引言 .....                    | 33 |
| 3.2 生产库存控制系统的动态模型 .....         | 34 |

|                               |    |
|-------------------------------|----|
| 3.2.1 模型描述 .....              | 34 |
| 3.2.2 模型分析 .....              | 37 |
| 3.3 任意提前期下的稳定性分析 .....        | 39 |
| 3.3.1 依赖于提前期的稳定条件 .....       | 40 |
| 3.3.2 独立于提前期的稳定条件 .....       | 43 |
| 3.3.3 稳定性的仿真实验 .....          | 46 |
| 3.4 牛鞭效应的鲁棒性 .....            | 48 |
| 3.4.1 牛鞭效应的鲁棒性指标 .....        | 50 |
| 3.4.2 状态空间模型及其鲁棒性分析 .....     | 52 |
| 3.5 仿真实验 .....                | 53 |
| 3.5.1 系统参数对牛鞭效应鲁棒性的影响 .....   | 54 |
| 3.5.2 需求过程对牛鞭效应鲁棒性的影响 .....   | 56 |
| 3.6 本章小结 .....                | 56 |
| 第4章 供应商管理库存系统的动态复杂性 .....     | 59 |
| 4.1 引言 .....                  | 59 |
| 4.2 VMI 供应链系统的动态模型 .....      | 60 |
| 4.3 零售商的库存波动范围 .....          | 65 |
| 4.3.1 库存波动范围的理论分析 .....       | 65 |
| 4.3.2 库存波动范围的仿真分析 .....       | 68 |
| 4.4 VMI 供应链系统的整体动态性 .....     | 71 |
| 4.4.1 动态性分析 .....             | 71 |
| 4.4.2 仿真实验 .....              | 74 |
| 4.5 VMI 供应链系统的牛鞭效应 .....      | 77 |
| 4.5.1 状态空间模型与传递函数 .....       | 77 |
| 4.5.2 数值分析 .....              | 78 |
| 4.6 本章小结 .....                | 82 |
| 第5章 需求依赖于库存的供应链系统的动态复杂性 ..... | 83 |
| 5.1 引言 .....                  | 83 |
| 5.2 供应链系统的动态模型 .....          | 84 |
| 5.2.1 系统描述 .....              | 84 |

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| 5.2.2 切换线性模型 .....                 | 87  |
| 5.3 供应链切换模型的稳定性分析 .....            | 89  |
| 5.3.1 子系统的稳定性 .....                | 89  |
| 5.3.2 切换线性系统的稳定性 .....             | 91  |
| 5.4 仿真实验 .....                     | 93  |
| 5.4.1 稳定性结论验证 .....                | 93  |
| 5.4.2 非线性动态复杂性 .....               | 96  |
| 5.5 本章小结 .....                     | 101 |
| 第 6 章 横向调货策略下供应链网络中牛鞭效应的鲁棒控制 ..... | 102 |
| 6.1 引言 .....                       | 102 |
| 6.2 模型建立 .....                     | 104 |
| 6.3 鲁棒性指标与库存策略求解算法 .....           | 106 |
| 6.4 数值分析 .....                     | 108 |
| 6.5 本章小结 .....                     | 113 |
| 第 7 章 需求合作背景下供应链网络的鲁棒控制策略 .....    | 114 |
| 7.1 引言 .....                       | 114 |
| 7.2 供应链网络的动态建模 .....               | 115 |
| 7.3 鲁棒性指标及其控制 .....                | 121 |
| 7.3.1 鲁棒性指标 .....                  | 121 |
| 7.3.2 库存控制策略设计方法 .....             | 122 |
| 7.4 仿真实验 .....                     | 124 |
| 7.4.1 鲁棒控制方法的有效性验证 .....           | 124 |
| 7.4.2 网络结构对鲁棒性指标的影响 .....          | 127 |
| 7.4.3 需求合作对鲁棒性指标的影响 .....          | 131 |
| 7.5 本章小结 .....                     | 133 |
| 第 8 章 总结与展望 .....                  | 135 |
| 8.1 全书总结 .....                     | 135 |
| 8.2 研究展望 .....                     | 137 |
| 参考文献 .....                         | 139 |

# 第 1 章 绪论

## 1.1 课题来源与资助

本著作来源于攻读博士学位期间参与的以下科研项目：

(1) 国家杰出青年基金“管理系统工程”(项目编号:71125001);

(2) 长江学者和创新团队发展计划“复杂系统的动力学行为分析、优化与决策”(项目编号:IRT1245);

(3) 国家自然科学基金“供应链库存控制与决策系统的动态复杂性”。

本著作受到工作期间以下科研项目的资助：

(1) 国家自然科学基金青年基金“不确定需求环境下汽车供应链网络的牛鞭效应研究”(项目编号:71401181);

(2) 教育部人文社科基金青年基金“行为因素对供应链牛鞭效应的影响机制研究”(项目编号:14YJC630136);

(3) 教育部人文社科基金青年基金“人因在订单拣选策略设计中的影响机制研究”(项目编号:15YJC630008);

(4) 中央高校基本科研业务费团队项目“供应链运营与管理”(项目编号:2016GS12);

(5) 安全预警与应急联动技术湖北省协同创新中心开放课题“防灾应急平台体系框架与运转机制”(项目编号:JD20150201)。

## 1.2 问题提出、研究目的和意义

供应链是一个围绕核心企业,通过对信息流、物流、资金流的有效控

制,从采购原材料开始,制成中间产品以及最终产品,最后由分销网络把产品送到最终用户而连成的整体系统<sup>[1]</sup>。供应链管理则是由竞争激烈的市场环境催生出来的一种新型管理模式。自 20 世纪 90 年代以来,随着科学技术的迅猛发展、经济水平的不断提高以及顾客购买力的增强,市场环境出现了很强的不确定性。面对瞬息万变的市场需求,传统的管理模式很难及时、准确地做出科学、合理的决策。为了解决这些难题,许多企业充分利用了无线射频识别(RFID)、互联网等信息技术,采取了一些先进的制造技术与管理手段,如准时生产制(JIT)、连续补货计划(CRP)、供应商管理库存(VMI)、协同规划、预测与补货(CPFR)等<sup>[2-4]</sup>。在这些管理模式中,企业不仅要关注自身的运作与发展,也必须处理好与上下游企业之间的关系;面对和上下游企业之间的矛盾,必须采取有效的协调手段去提高整体竞争力。

目前,全球经济下滑、全球采购以及复杂的生产工艺使得制造企业的生产提前期不断延长、原材料的采购难度加大、制造企业的利润空间不断被压缩,这一系列问题使得企业的运作与管理过程出现了越来越多的波动,供应链系统的动态控制与管理难度越来越大。面对不断波动的市场需求,零售商很难做出准确的预测并采取有效的库存控制方法;顾客需求的不确定性会从下游向上游逐级传播,受季节性、价格促销、批量订货等因素的影响,很容易出现需求波动放大的现象,即产生了牛鞭效应<sup>[5]</sup>。牛鞭效应的产生意味着信息的传播过程发生了扭曲,最终导致供应与需求无法匹配的严重后果。

供应链系统的动态性越来越复杂,影响供应链系统动态复杂性的因素是多方面的,包括顾客需求、提前期、库存控制策略、企业之间的合作与竞争、信息共享、供应链结构等。当前半导体制造过程面临的主要难题包括复杂的封装过程、技术的快速变革以及漫长的制造过程等<sup>[6]</sup>,而非零提前期是需求放大现象产生的根源之一;寡头市场企业之间的竞争很容易产生混沌现象<sup>[7]</sup>,与之相反,企业之间的合作由于实现了信息共享,减少了信息扭曲,有利于改善供应链系统的动态性<sup>[8,9]</sup>。针对各种不同的复杂因素,企业应当采取相应的控制与管理手段。例如,面对瞬息

万变的市场需求,一方面,企业可以采取科学的需求预测方法提高预测的精度以实现信息的准确传递;另一方面,企业可以通过需求信息共享保证上游企业根据真实的需求信息来组织生产与采购等活动,以实现供应与需求的匹配。

供应链系统中广泛存在反馈、延迟及非线性,这些特征使得应用控制理论方法解决供应链系统的动态复杂问题具有得天独厚的优势。首先,库存控制系统本质上可视为反馈控制系统<sup>[10-13]</sup>。若将外部顾客需求当作扰动输入,将库存水平、在途库存以及在制品库存等变量视为系统状态,库存控制问题本质上则是基于状态信息寻找一个能满足特定性能要求的反馈控制器。图 1.1 展示了库存控制系统与一般控制系统之间的相似性与区别。其次,供应链系统中广泛存在各种延迟<sup>[14-15]</sup>,这些延迟包括采购延迟、运输延迟、生产延迟、订单处理延迟等,延迟(时滞)也是控制领域着力解决的重点问题之一。此外,受到各种约束条件的影响,供应链系统中广泛存在非线性关系<sup>[16-20]</sup>。例如,顾客需求可能是产品价格以及库存水平的非线性函数<sup>[21]</sup>;供应商对下游的发货量通常是其实际库存与下游需求量的非线性函数<sup>[20]</sup>。同样,订货也受到资金、库存容量等因素的约束,大部分的订货控制策略也是非线性的。

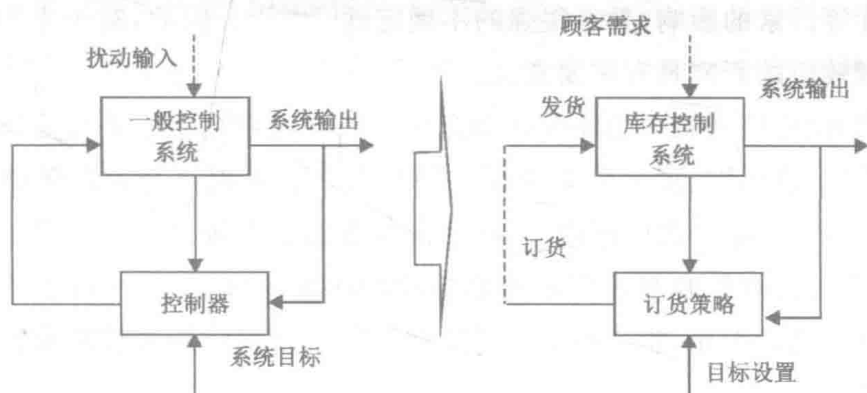


图 1.1 库存控制系统与一般控制系统的相似性与区别

综上所述,针对影响供应链系统动态性的各种复杂因素,对供应链库存控制系统进行动态建模与分析,对于降低库存成本、改善顾客服务水平具有重要意义。本书旨在利用系统工程方法,以不同结构供应链

系统为研究对象,应用传递函数、鲁棒控制、切换系统以及时滞系统等理论,揭示供应链系统的动态复杂性规律,为供应链管理中的库存控制、需求管理、合作计划实施及网络设计等问题提出管理建议,同时也扩展了控制理论的应用领域,重点关注以下几方面的问题。

(1)线性供应链系统的稳定性。反馈机制给供应链系统带来了稳定性问题<sup>[22-23]</sup>。当顾客需求发生突然变化时,稳定的供应链系统能够对外部的变化做出快速响应,使得供应链系统能够以较快的速度回归正常的运作状态<sup>[24]</sup>。此外,稳定的供应链系统能一定程度地限制库存波动与订货波动的范围。例如,当需求有界时,库存与订货波动也会在一定的范围内波动。相反,不稳定的供应链系统则容易出现库存积压或者缺货等现象。

(2)供应链系统的牛鞭效应。牛鞭效应是供应链系统中研究最为广泛的、最典型的动态特性<sup>[5,21,25-26]</sup>,牛鞭效应的产生与促销、提前期、短缺博弈、批量订货等因素都有着紧密的关系<sup>[5]</sup>。现有的牛鞭效应研究大多是针对特定的需求模型,然而牛鞭效应对顾客需求可能具有很强的敏感性,这意味着对于有特定需求的牛鞭效应研究所得到的结论未必适用于其他需求的形式。在现实世界中,顾客需求受产品生命周期、技术水平、季节性等因素的影响,具有很强的不确定性<sup>[10,27-29]</sup>。因此,对于未知需求的牛鞭效应的研究具有重要意义。

(3)供应链系统中的非线性动态性。供应链系统中的非线性动态性包括周期、准周期、混沌甚至超混沌等行为<sup>[17]</sup>。随机库存控制策略往往是需求概率分布参数的函数,而混沌现象意味着系统进入一种混乱的状态,库存与订货量容易出现不规则的波动现象,这使得供应链系统的行为难以预测。因此,非线性动态复杂性可能会给供应链系统的库存控制与管理带来很大的挑战<sup>[30]</sup>。

### 1.3 相关文献综述

供应链系统的动态性研究有着漫长的发展历程,并取得了丰富的研

究成果,相关的综述性文章见文献[31,32]。本节内容从介绍这一研究领域的发展历程出发,围绕本书的研究内容进行分类综述。

20世纪50年代初,诺贝尔经济学奖获得者 Simon<sup>[33]</sup>应用拉普拉斯变换(Laplace Transform)方法研究了连续生产库存控制系统的稳定性,同时也提出了用于评估不同生产策略的成本标准。不久以后,Vassian<sup>[34]</sup>应用 $z$ 变换<sup>[35]</sup>将 Simon 的工作推广到离散情形,讨论了如何通过设计库存策略最小化库存方差。20世纪50年代末,Forrester<sup>[36]</sup>基于反馈思想提出用系统动力学(system dynamics)的方法来研究动态系统。系统动力学由于其强大的建模与仿真能力被认为是动态系统研究领域的一次重大突破。系统动力学广泛用于解决社会、经济、教育、生态与环境等不同领域中的复杂问题,同样也用于研究供应链系统的动态性。Sterman<sup>[37]</sup>以 Forrester 提出的基于系统动力学的啤酒游戏模型为基础,研究了决策人员的有限理性行为对供应链系统性能的影响,发现管理者进行补货决策时很容易忽视系统中的反馈与在途库存。

由于缺乏解析结论,系统动力学很难就如何改善系统的性能提出建议<sup>[38]</sup>。为了建立一个适用于理论研究的框架,Towill<sup>[38]</sup>通过对啤酒游戏仿真模型在约束条件以及非线性等方面进行了简化,以方块图的形式提出了基于库存与订单的生产控制系统(inventory and order based production control system, IOBPCS)。随后,很多学者又对 IOBPCS 进行了改进,提出了一些更具普适性的生产控制系统模型,得到了 IOBPCS 族(family)。IOBPCS 族中的模型一般包括五个组成部分:需求预测机制、生产提前期、库存反馈机制、在途库存反馈机制和目标库存设置。在实际应用中,可以根据系统的成本结构,将决策参数设置成不同的值来满足不同的性能要求<sup>[22]</sup>。

20世纪末,供应链管理领域的牛鞭效应、信息共享等问题引起了学者们的足够重视<sup>[5,25,39]</sup>,这些研究给供应链系统动态性的研究带来了新的契机。很多研究人员以 IOBPCS 族中的模型以及其他的供应链模型为基础,利用控制理论方法对供应链系统的稳定性、牛鞭效应等问题进

行了深入研究<sup>[9,22,24,40-43]</sup>;另外,部分学者以啤酒游戏仿真模型为基础,探寻供应链系统中的非线性动态复杂性<sup>[16-19]</sup>。围绕本书的研究内容,下面从供应链系统的稳定性、牛鞭效应与非线性动态性及供应商管理库存四个方面展开文献综述。

### 1.3.1 供应链系统的稳定性

稳定性是动态系统的最基本特性。面对外部需求的突然变化,稳定的供应链系统能够使库存与订货量在一定的时间之内回归正常状态;反之,不稳定的供应链系统则容易出现库存积压与严重缺货的现象。由于供应链系统中存在大量的反馈与延迟,稳定性问题变得至关重要,受到了广大学者的高度重视<sup>[14,15,22,24,44]</sup>。受传递函数等方法的限制,目前供应链系统稳定性的研究主要针对线性供应链系统。根据库存策略的时间特性,供应链系统稳定性的研究对象可以划分成连续时间模型与离散时间模型。

文献对连续时间模型的供应链系统稳定性的研究比较充分。例如,Riddalls 和 Bennett<sup>[15]</sup>应用微分方程理论给出了基于库存与订单的生产库存控制系统(automatic pipeline, inventory and order-based production control system, APIOBPCS)连续时间模型在依赖生产提前期与独立于生产提前期两种不同情形下的稳定性条件。Warburton 等<sup>[45]</sup>通过 Matlab 仿真发现 Riddalls 和 Bennett<sup>[15]</sup>的稳定性结论具有片面性,进一步研究连续时间情形下 APIOBPCS 模型的稳定性,并通过仿真实验验证了稳定性结论。最近,Sipahi 和 Delice<sup>[14]</sup>研究了存在制造延迟、运输延迟与决策延迟三种不同提前期情形下连续 APIOBPCS 模型的稳定性条件,得到了一些解析结论。

相比连续供应链系统,离散供应链系统稳定性的研究难度要大很多。现有的研究大多是针对较小或者特定的提前期进行研究。Disney 和 Towill<sup>[22]</sup>应用传递函数方法与劳斯判据对 VMI 供应链系统的稳定性进行了研究,在其模型中,制造商按照 APIOBPCS 模型中的生产规则来

决定生产量。当提前期增加时,传递函数的特征方程变成难以求解的超越方程,因此他们的研究仅仅只考虑了提前期不大于3个周期的情形。随后,学者们又尝试采用其他方法研究离散时间的基于库存与订单的自动管线,可变库存目标的生产控制系统(automatic pipeline, variable inventory and order-based production control system, APVIOBPCS)的稳定性,然而他们碰到了同样的问题。例如, Lalwani 等<sup>[43]</sup>将 APVIOBPCS 模型的传递函数转换成状态空间模型,再进一步分析状态空间模型的系数矩阵的特征值来分析系统的稳定性。当提前期比较大时,状态空间模型很难建立,因此作者也只研究了提前期为3个周期的稳定性条件。Disney<sup>[24]</sup>使用 Jury 提出来的 Inners 方法<sup>[46]</sup>来研究离散 APIOBPCS 模型的稳定性。笔者指出,针对特定的或者较小的提前期是这种方法的最大缺点。最近, Bijulal 等<sup>[47]</sup>分析了一个稍微修改过的离散 APIOBPCS 模型的稳定性,但是他们同样假定提前期为3个周期。国内学者刘会新等<sup>[48]</sup>建立了一类改进的最大库存策略下的库存控制系统的状态空间模型,针对不同的提前期,给出了保证系统稳定的订货策略参数的取值范围,并通过仿真实验验证了稳定性结论,然而其结论不适用于复杂的订货策略。Disney<sup>[23]</sup>在比较离散 APIOBPCS 模型与连续 APIOBPCS 模型的稳定性时明确指出:“直到现在为止,依然还没有得到离散 APIOBPCS 模型在任意提前期下的稳定性条件。”

综上所述,随着提前期不断增长,离散供应链系统传递函数的特征方程变成超越方程,难以求解。目前,离散供应链系统稳定性的研究局限于提前期较小的情形。

### 1.3.2 供应链系统的牛鞭效应

牛鞭效应是供应链系统中最典型的动态特性之一。牛鞭效应是指在供应链中,随着需求信息从最终顾客向上游传递到原材料供应商,每级成员的订货波动都要大于其下游企业的订货波动,即产生了需求放大效应<sup>[5]</sup>。牛鞭效应的研究可以分为以下几个方向<sup>[26]</sup>:通过经验证据证明

牛鞭效应的存在性;采用解析方法证明牛鞭效应的存在性;识别牛鞭效应产生的原因;提出能够抑制牛鞭效应的措施。早在 1961 年, Forrester<sup>[49]</sup>应用系统动力学方法给出了需求放大效应存在的经验证据。Sterman<sup>[37]</sup>利用啤酒游戏模型研究人的决策行为时,也发现系统中普遍存在需求放大效应。Caplin<sup>[50]</sup>研究了当零售商采用连续的(s,S)库存策略时,订货批量对牛鞭效应的影响,证明了当需求服从独立平稳分布时,订货波动的方差将明显高于需求的方差。直到 1997 年, Lee 等<sup>[5]</sup>将这种需求波动逐级放大的现象正式命名为“牛鞭效应”。Lee 等<sup>[5]</sup>指出了导致牛鞭效应的五种原因:需求信息处理、非零提前期、短缺博弈、批量订货以及促销活动。牛鞭效应的产生显著地增加了管理与运作成本,不利于上游制造商进行生产规划,因而降低供应链系统的牛鞭效应具有重要意义,学者们对牛鞭效应的原因及干预措施展开了深入研究。

牛鞭效应的研究方法主要包括经验研究方法、仿真方法<sup>[51-52]</sup>、概率统计方法<sup>[5,25,53-55]</sup>与控制理论方法<sup>[41-42,56]</sup>。经验研究一般建立在分析工业数据的基础之上。例如, Cachon 等<sup>[57]</sup>研究了不同行业的牛鞭效应情况,研究表明批发行业很容易产生牛鞭效应,而生产企业与零售商的牛鞭效应并不是很明显。此外,笔者发现季节性需求有利于缓解牛鞭效应。Bray 和 Mendelson<sup>[58]</sup>研究了 1974~2008 年 4698 家公司的牛鞭效应状态,研究表明不同公式之间的牛鞭效应情况差异明显。Yao 和 Zhu<sup>[59]</sup>以行业级数据为基础,研究了美国制造行业中电子连接(electronic linkage, EL)对牛鞭效应的影响,其研究表明,供应商使用 EL 有利于降低牛鞭效应而下游企业使用 EL 则容易产生负面影响。仿真方法的优点是能对相对复杂的供应链模型进行研究。例如, Cannella 与 Cincimino<sup>[51]</sup>利用仿真实验研究了供应链系统的合作对系统性能的影响,研究发现合作既抑制了牛鞭效应,也改善了顾客服务水平。Cannella 等<sup>[52]</sup>通过仿真实验研究了合作程度对供应链系统牛鞭效应的影响。概率统计方法的文献大多是针对不同的需求模型,这些需求模型要么服从某种概率分布,要么为特殊时间序列模型。例如, Chen 等<sup>[25]</sup>研究了需求

服从一阶自回归模型 AR(1)时,需求预测、提前期以及信息共享对牛鞭效应的影响。Chen 等<sup>[26]</sup>比较了指数平滑与移动平均两种常用的需求预测方法对牛鞭效应的影响。Gilbert<sup>[60]</sup>研究了需求为差分自回归移动平均模型 (autoregressive integrated moving average model, ARIMA) 时多级供应链系统中的牛鞭效应。Chen 和 Lee<sup>[61]</sup>进一步研究,当需求为 MMFE (martingale model of forecast evolution, MMFE) 模型时,需求信息共享对供应链牛鞭效应的影响。Kim 等<sup>[62]</sup>研究了当需求服从正态分布、提前期是随机时,信息共享对牛鞭效应的影响。

相比概率统计方法,控制理论方法既能处理特定的需求,也能研究未知需求情形下供应链系统的牛鞭效应,即牛鞭效应的鲁棒性。针对特定需求的牛鞭效应的研究比较广泛。例如,Dejonckheere 等<sup>[41]</sup>提出了应用控制理论方法对任意给定的需求时间序列的牛鞭效应进行量化的方法,其方法包括三步:推导传递函数、绘制频率曲线及谱分析。Dejonckheere 等<sup>[41]</sup>发现 APIOBPCS 模型在特定的参数情形下可以抑制供应链系统中的牛鞭效应。Dejonckheere<sup>[56]</sup>等利用控制工程方法研究了需求信息共享对牛鞭效应的影响。Hoberg 等<sup>[63]</sup>利用 Dejonckheere 提出的基于控制理论的牛鞭效应度量方法比较了级库存策略与点库存策略对牛鞭效应的不同影响。在点库存策略中,每个企业只知道自身的库存信息;在级库存策略中,企业以其下游所有节点的库存信息及自身的库存信息为基础进行库存决策。Jakšić 和 Rusjan<sup>[64]</sup>也基于控制理论方法研究了几种不同补货策略对牛鞭效应的影响。Disney 等<sup>[65]</sup>以传递函数的脉冲响应函数为基础对牛鞭效应与库存波动指标进行了优化,给出了参数选择的建议。Disney<sup>[24]</sup>利用 Inner 矩阵方法研究了 APIOBPCS 模型在需求服从独立正态分布时的牛鞭效应。此外,很多学者研究了一些特殊的 APIOBPCS 模型的牛鞭效应<sup>[53-55,65]</sup>。

受技术变革、季节性、产品生命周期等因素的影响,顾客需求具有很强的不确定性。近年来,供应链系统牛鞭效应的鲁棒性的研究逐步受到了重视。一方面,学者们应用控制理论方法对牛鞭效应的鲁棒性进行分