摘 要

随着科学技术的快速发展，全球范围内的竞争日趋激烈，企业面临着越来越严峻的生存和发展压力，传统的经营管理模式已经不能满足不断变化的市场要求．尽管供应链管理的概念提出的时间并不长，人们已经逐渐认识到供应链管理是提升企业竞争力的重要手段，是企业适应全球竞争的有效管理模式。因此，供应链管理在企业的生存和发展中的地位也越来越重要，特别是国际上一些知名企业在供应链实践中所取得的成功，引起了国内外学术界和企业界的广泛关注。

本文主要研究关于短生命周期产品的供应链契约中的协调订货问题，在不同情况下提出相应的协调策略，并对协调策略的有效性展开讨论。最后，建立一个带有竞争性的供应链网络平衡问题，并对模型的求解算法进行讨论．本文的主要研究工作如下：

第一，主要针对短生命周期产品，研究由单一制造商、单一分销商和单一产品所组成的供应链中的协调订货决策问题，并且针对实际问题中可能出现的情况提出有效的协调策略．在需求不确定的条件下，我们提出通过季末补货的方式，不仅分销商可以获得更高的利润，而且供应链整体的期望利润也会随之增加．在交货日期不确定的条件下，我们提出一种合理的季末回购价格可以作为实现制造商和分销商之间协调的激励手段，并且使得供应链整体期望利润趋于最优．

第二，考虑到合理的利润分配是实现供应链协调的关键，我们提出一种可以实现系统利润灵活分配的协调机制．在需求和交货日期均不确定的条件下，引入数量弹性的策略，即允许分销商在交货日期推迟的情况下通过减少订货量来降低损失，但同时要对由此给制造商带来的库存积压损失进行一定比例的赔偿．进一步，还在需求预测更新的条件下，提出具有两次订货和两次生产的最优订货策略．分销商除了可以在销售季节到来之前订货，还可以根据更新后的需求信息重新调整订货量，而制造商以两种不同的生产模式进行生产及时满足需求。与已有的研究不同，我们允许分销商灵活地调整订货量，只是，如果调整后的订货量低于最初的订货量，分销商将同样需要对由此给制造商带来的利润损失进行补偿。我们的结论表明制造商以合理的回购价格和产品批发价格来影响分销商的订货决策，不仅可以有效实现系统的协调，而且该协调机制与产品的需求分布无关，最重要的是可以实现系统利润的灵活分配，并且分配结果满足“风险越大，利润越高”的市场法则．

第三，考虑到供应链是由多个独立的决策制定者，如原材料的供应商、制造商、分销商、零售商直到最终顾客所组成的链状或网状结构，对于多个制造商同时生产多种产品，并向多个分销商供货以满足处于多个需求市场的最终顾客需求

的情形建立了一个多层的供应链网络结构。通过对模型中不同的决策制定者行为的分析，构造其最优条件，得到了供应链整体的平衡条件，并建立有限维的变分不等式模型。为了对模型求解，我们先将其转换为等价的非光滑方程组，在此基础上提出一个光滑化 Newton 法求解。在合理的条件下，我们证明了算法的全局收敛性及其二次收敛性，并通过数值算例进行模拟。所得结果说明本模型的合理性，而且验证了算法的有效性和快速收敛的特点。

关键词：供应链管理；供应链协调；回购策略；数量弹性；预测更新；两阶段生产；光滑化 Newton 法

Abstract

With the fast development of science and technology, and the more and more intense market competition of globalization, modern enterprises are facing huge stress of survival and development. The traditional management method has no longer met the requirement of the constant market variance. Since the concept of supply chain management (SCM) was proposed not long ago, SCM has become an important tool for the enterprises to enhance their competition ability. Therefore, SCM has played more and more important role in the survival and development of enterprises. With the great success of SCM in many famous international enterprises, SCM has received more and more attention from academic interest and practical applications.

In this paper, we are concerned with the coordination order quantity decision for fashion goods. The coordination policies are presented under different conditions, and the validity is also studied. Additionally, a supply chain network equilibrium model with competition is developed and a smoothing Newton algorithm is given to solve a nonsmooth equation reformulation of this model. The main contributions of this thesis include:

Firstly, coordination order quantity decision is considered in a supply chain contract composed of one manufacturer and one retailer to meet the demand of a fashion good product with a short lifecycle. The coordination policies are proposed considering the different conditions being in the real-world. For example, to meet the random demand of product, the retailer will be expected to obtain more profit if another order may be placed at the end of the selling season. The expected profit of supply chain can be increased at the same time. The instance of uncertain delivery time is also considered, which means that the retailer will probably lose sales if the delivery time is late. Under the condition of random demand or uncertain delivery time, the manufacturer can coordinate with the retailer by a reasonable unit return price proposed. The coordination can also bring the expected profit of supply chain to be optimal.

Secondly, observing that reasonable profit distribution will stimulate both parties to cooperate in the best interest of channel, the coordination policies which is flexibility enough to distribution the system profit between the manufacturer and the retailer are also presented. Still under the condition of uncertain delivery time, the quantity flexibility is introduced, which allows the retailer purchasing a lesser quantity in case the delivery time is late and the retailer will compensate the manufacturer's profit loss for overstocking in a certain proportion. Moreover, with the demand forecast updating, the optimal order quantity decision is studied in a two-mode production environment. Beside an order quantity is decided before the sales begins, the retailer is also encouraged to adjust the order quantity according to the updated demand forecast. Here, the retailer can regulate the order quantity with freedom. Only if the retailer decreases the order quantity, will he share the manufacturer's loss in a certain proposition. Although considering distinct instances, the similar conclusion is obtained. The reasonable wholesales and return prices can be put forward to coordination with the retailer on the order decision. Such a contract can not only encourage the manufacturer and the retailer to act in the best interest of the whole supply chain, but also is independent of the demand distribution. Furthermore, it is flexible enough to arbitrarily allocate the profit of the system between the members. And the profit allocation follows the rule of the higher risk, the more profit.

Thirdly, in view of the supply chain composed by several independent decision-makers, a supply chain network equilibrium model consisting of manufacturer, retailers and consumers is developed. After analyzing the optimal conditions of various decision-makers in the model, the equilibrium condition is established as an equivalent finite-dimensional variational inequality formulation. It is solved by a smoothing Newton method. The global and quadratic convergence of the method is established. The numerical results show rapid convergent rate of the method. Such a model is sufficiently general to handle many decision-makers and their independent behaviors. And the rapid convergence of smoothing Newton method is beneficial to solve a complicated network model in the real-world.

Key Words: supply chain management; supply chain coordination; return policy; quantity flexibility; forecast updating; two production modes; smoothing Newton method

插图索引

附表索引

湖 南 大 学

学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：周茵　　　　　　　　日期：2006 年 6 月 6 日

学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权湖南大学可以将学位论文的全部或部分内容编人有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

本学位论文属于

1、保密☐，在＿＿＿＿年解密后适用本授权书.

2、不保密☑.

（请在以上相应方框内打“√”）

作者签名：周茵　　　　　　　　日期：2006年 6 月 6 日

导师签名：李董辉印　　　　　　　　日期：2006年 6 月 6 日

第1章 绪论

1.1 供应链管理概述

随着产业国际化的发展，全球范围内的市场竞争日趋激烈，供应链管理在企业生存与发展中的地位也越来越重要．作为一种新的管理模式，供应链管理通过物流和信息流的交换，将供应商、制造商、分销商、零售商和最终客户等供应链上诸多环节整合起来，强调战略伙伴合同、信息资源共享、快速市场反应以及为用户创造价值等．特别是 20 世纪 90 年代以来，供应链管理作为适应全球竞争的一个有效途径，已经成为现代企业的主要管理模式，不仅得到企业决策者的重视，也被国内外广大学者所关注．

1.1.1 研究背景

供应链管理思想产生和发展的原因有很多，但主要原因在于企业所面临的市场环境所发生的巨大变化， 特别是随着科学技术的不断进步和经济的不断发展，企业面临着越来越严竣的竞争压力，相应企业的经营管理模式也发生了很大变化．

长期以来，企业所面临的市场环境相对稳定，产品供不应求，企业与它的供应商、各种竞争者以及顾客都表现出一种对立和竞争的关系．为了在竞争中取得主动，企业往往是一种“大而全”或“小而全”的形式，例如许多制造企业拥有从毛胚铸造、零件加工、装配、包装、运输、销售全部的生产设备和技术人员．

但进入 20 世纪 80 年代以来，市场中供、需双方的关系出现了明显的变化，市场由卖方市场转变为买方市场，顾客在市场中占据了主导地位．随着全球市场的形成和技术变革的加速，不仅仅给企业带来了机遇，同时企业也面临着提高产品质量、缩短产品生产周期、降低成本和提高服务的压力，来满足日益向多样化、个性化方向发展的市场要求．最初，日本企业在国际竞争中暂露头脚，以其产品的高质量和低价格极大冲击了欧美市场，同时也引起了美国企业界和管理学术界的极大兴趣．通过研究，发现了日本企业和供应商有着特殊的关系． 1990 年，美国麻省理工学院国际汽车研究小组发表的《改变世界的机器》一书，详细地总结了日本企业经营管理方式的特点，其中专门论述了日本企业与其供应商的关系．在总结学习了日本经验的基础上，许多企业认识到为了在激烈的竞争中取得优势，仅仅依靠不断完善内部管理和开发利用企业自身资源是远远不够的，还必须加强和发展自身的核心竞争力．所谓“核心竞争力”是指企业获取、配置资源，形成并能保持竞争优势的能力，主要体现在企业在研发、设计、制造、营销、服务等某一两个环节上明显优于并不易被竞争对手模仿的、能够满足客户需要的独特能力．增强核心竞争力使得企业将主要精力放在了核心业务上，而将非核心业务以“外

包”的形式交给其他企业来完成．企业不再采用从前那种从设计、制造直到销售全部都自己负责的经营模式，而是在全球范围内与供应商和销售商建立合作伙伴关系，利用他们特有的资源和技术知识来达到优势互补，增强企业的竞争力．例如，为了追求低成本、高质量，美国福特汽车公司在推出新车 Festiva 时，就是采取新车在美国设计，在日本的马自达生产发动机，在韩国生产其他零件并装配，最后运往市场上销售．制造商在全球范围内选择最优秀的企业，构成了一条与产品的制造和服务有关的从供应商、制造商、分销商直到最终客户的网络，即供应链．为了使得组成供应链的企业之间加强合作，共同增强市场的竞争力，因此必须加强关于供应链的构成及运作研究，也就形成了供应链管理这一新的企业管理模式．供应链管理是从整个供应链的角度将供应链的所有成员视为一个整体，对各成员的资源进行整合和协调，对包括原材料的采购、产品的制造、运输、分销以及零售的整个过程进行有效的管理，同时合作伙伴共担责任、风险，共享利润，以求最小的成本获得最大的系统利润．

随着全球经济一体化进程的加快，使得世界各国的经济联系越来越紧密，经济上也越来越多地相互依存，特别是大量跨越国界和地区界限进行生产和销售的大型跨国公司的出现，推动了供应链管理的实施和研究．许多知名企业如宝洁 (P&G)、惠普 (HP)、沃尔玛、DEC 等在供应链管理的实践中都已取得了巨大成功．其中，宝洁公司通过与其供应商的紧密连接，共同制定商业计划来消除不必要的运作成本，一年就可以节省六千多万美元，而其与沃尔玛所形成的战略伙伴关系更是非常成功的供应商管理库存 (Vendor-Managed Inventory, VMI) 的案例．宝洁公司在沃尔玛的配送中心建立宝洁的产品库存，沃尔玛把包括订货时间、品种、数量等等的库存控制权交给宝洁，并与宝洁公司共享实时的产品销售数据．优化供应链结构，减少运作费用，提高企业的总体效益正是供应链管理的任务所在．

近二十年特别是近十年来信息技术的快速发展，因特网的出现和普及，正在改变着现有供应链的结构，越来越多的功能将被网络和电子商务所代替．在使得供应链上企业之间以及企业与客户之间的联系更加快捷和方便的同时，也给企业提出了更高的要求．它将彻底影响和改变现有的传统供应链中企业的运作模式，加快供应、制造、销售之间信息的传递，要求供应链各环节之间的协同更加有效，同时也为提高供应链管理水平提供了技术条件．

虽然供应链管理思想提出的时间并不长，但却引起了人们广泛的关注．特别是国际上许多知名企业在供应链实践中所取得的成功，使得人们逐步认识到企业的成功取决于管理供应链网络的能力，因而也吸引越来越多的学者和企业界人士研究和实践供应链管理．

1.1.2 供应链与供应链管理的概念

供应链的概念起源于迈克尔. 波特 (Michael E. Porter) 教授在《竞争优势》一书中提出的"价值链" [1]，随后，供应链的概念、基本思想和相关理论也迅速发展起来. 但迄今为止，关于供应链都还没有统一的定义，许多学者从不同角度对供应链进行了定义，常见的有以下几种：

Stevens 从供应链的完整性出发，认为：通过增值过程和分销渠道控制从供应商的供应商到用户的用户的流就是供应链，它开始于供应的源点，结束于消费的终点 [2] .

Harrison 更加注重供应链的网链关系将其定义为：供应链是执行采购原材料、将他们转换为中间产品和成品并且将成品销售到用户的功能网链 [3] .

Christopher 认为，供应链是一个组织网络，所涉及的组织从上游到下游，在不同的过程和活动中对交付给最终用户的产品或服务产生价值 [4] .

类似地，马士华等也对供应链作出如下定义：供应链是围绕核心企业，通过对信息流、物流、资金流的控制，从采购原材料开始，制成中间产品以及最终产品，最后由销售网络把产品送到消费者手中的将供应商、制造商、分销商、零售商直到最终用户连成一个整体的功能网络结构模式 [5] .

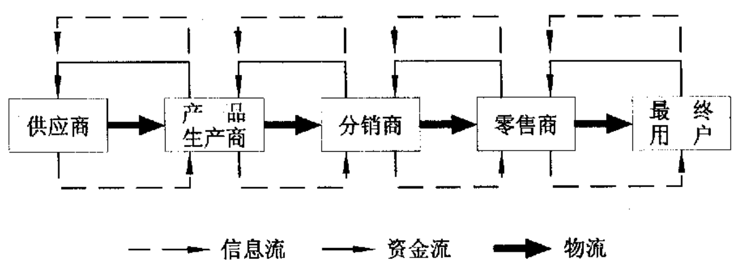

图 1.1 供应链的基本结构

还有一些研究机构和学者也对供应链作出自己的定义，虽然定义的内容不尽相同，但其核心思想都非常相近，大都集中于供应链的网链结构和合作流程. 通过对现有的供应链定义的分析和综合，可以认为供应链实际上就是产品在生产和流通过程中所涉及的原材料供应商、生产商、运输商、批发商、零售商以及最终消费者所组成的供需网络系统，即由与原材料采购、运输、加工制造、送达客户等一系列流程相关的企业和企业部门所组成的一个网络. 正如图 1.1 中所给出的供应链基本结构模型，每个企业都可以看作供应链中的一个节点，而节点企业与节点企业之间是一种需求与供应的关系。从拓朴结构来看，它是一个网络，其中心是供应链的核心企业，服务对象是产品或服务的最终用户，具有 5 个主要评价指标：速度、柔性、质量、成本和服务.

供应链管理就是对供应链上各个相关企业、组织和部门之间的业务联系进行

规划、控制、协调和平衡，以提高其效率和效益。同样，到目前为止，关于供应链管理的定义还没有达成统一。在国外关于供应链管理的定义中，Copacino 认为供应链管理是从物料供应者一直到产品消费者之间的物料流动和产品流动的技术 [6] 。Chase 等所给出的定义为，供应链管理是应用系统的方法来管理从原材料供应商通过工厂和仓库直到最终客户的整个信息流、物流和服务流的过程。美国供应链管理协会则将供应链管理定义为“供应链管理是为了生产和提供最终产品，包括从供应商的供应商到顾客的顾客的一切努力”，并描述了供应链管理的 4 个流程：计划、采购、制造和配送 [7] . 国内学者陈国权认为，供应链管理是对整个供应链系统进行计划、协调、操作、控制和优化的各种活动和过程，其目标是要将顾客所需的正确的产品 (Right product) 能够在正确的时间 (Right time) 、按照正确的数量 (Right quantity) 、正确的质量 (Right quality) 和正确的状态 (Right status) 送到正确的地点 (Right place) ，即“ 6R ”，并使总成本最小 [8] . 马士华认为，供应链管理是通过前馈的信息流 (需方向供方流动，如订货合同、加工单、采购单等) 和反馈的物料流及信息流 (供方向需方的物料流及伴随的供给信息流，如提货单、入库单、完工报告等) ，将供应商、制造商、分销商、零售商直到最终用户连成一个整体的模式 [9] . 不论哪种关于供应链管理的定义都表明，供应链管理不再仅仅注重企业自身系统的优化，而是将管理的范畴扩展到供应商的供应商和用户的用户，更加强调多个企业间的信息共享、集成管理及整体系统的优化。因此，可以认为供应链管理是对从供应商的供应商直到顾客的顾客整个网链结构上发生的物流、资金流和信息流进行综合、计划、控制和协调的一种现代管理技术和管理模式。

1.1.3 供应链管理的发展历史

自 20 世纪 80 年代到现在，可以大致将供应链管理的发展划分为如下三个阶段 [10, 11] ：

(1)20 世纪 80 年代是供应链管理萌芽阶段，在这个时期，供应链的中心任务是建立一个基于企业内部各部门的大型数据库，采集尽可能多的数据，以供企业来改造落后的商业运作模式来适应新的商业模式。这个阶段注重企业的内部整合，并开始加强与外部企业的联系和合作。

(2)20 世纪 90 年代，是供应链管理初步形成阶段。企业内部供应链管理整合的完成为进一步发展包括供应商和分销商在内的整条供应链的整合提供了坚实的基础。从 1996 年开始，一些跨国大公司开始着手加强与自己的供应商、分销商之间的联系，并通过计算机网络分享物流信息。尽管电子数据交换 (Electronic Data Interchange, EDI) 的出现为信息在合作伙伴间的快速传递提供了可能，也提高了信息传递的准确性，但由于 EDI 的投资大、灵活性差等问题，往往只能是在有限的

几个合作伙伴之间采用．因此，在这个时期供应链管理的实践取得了长足发展，但信息不能完全共享成为最大的障碍。

(3) 进入 21 世纪以来，供应链管理开始强调合作伙伴关系，并注重供应链网络的优化．在现实生活中，企业生存在一个与众多供应商和分销商构成的网络之中，随着企业与合作伙伴之间一对一的物流、信息流的加强，发展基于供应链网络的整体优化模式便自然而然成为企业的必然选择．供应链网络的商业模式不仅是指企业之间的信息共享，其最终目的是通过企业之间迅速的建立和终止合作关系来降低相应的费用，而企业之间也逐渐趋于价格、服务等客观因素的合作，提高整体的市场竞争力．这种网络间合作的加强，有助于促使企业集中精力发展其核心事业，并依靠第三方来提供更多的营运服务．

1.1.4 供应链管理的主要研究问题

目前，关于供应链管理的研究热点有很多，主要是针对供应链管理系统的模型开发、基本功能和关键技术的研究。本节只就库存管理、物流规划、信息价值、合作伙伴关系、委托一代理理论以及绿色供应链等几个主要问题的研究现状进行探讨，而供应链管理中的协调问题和与之有关的研究进展，将在下一节中详细介绍。

1.1.4.1 供应链管理中的库存问题

由于供应链上企业之间合作的缺陷或企业内部生产系统的缺陷，使得供应链面临着供给和需求的种种不确定性，库存作为整个供应链上各个成员之间联系的纽带 [12]，成为降低这些不确定性影响的重要手段之一。库存管理的目的就是在保持较高的客户服务水平前提下，对企业的库存水平进行控制，尽可能降低库存水平，提高企业市场竞争力 [13]．目前，供应链库存技术主要包括供应商管理库存 (VMI)、联合库存管理 (JMI) 以及协同规划、预测和补给 (CPFR)。VMI 是以供应链上的合作伙伴获得最低成本为目的，在一个共同的协议下，由供应商设立库存、确定库存水平和补给策略、拥有库存控制权，该方法体现了供应链的集成化管理思想。JMI 是一种基于协调中心的库存管理方法，它强调供需双方同时参与、相互协调，共同制定库存计划，可消除供应链上的需求变异和放大现象． CPFR 是一种协同式的供应链库存管理技术，它能同时降低销售商的存货量，增加供应商的销售量，其最大优势是能及时准确地预测由各项促销措施或异常变化带来的销售高峰和波动，从而使销售商和供应商都能做好充分的准备，赢得主动。

库存是传统供应链研究的重要问题之一，而关于库存管理的研究内容也非常丰富 [14~18]． 1915 年， F.Harris 针对银行货币的存储问题首先对商业库存问题建立了简单模型并求得最优解。但此后该领域进展非常缓慢，直至二次大战后，研究人员才开始对需求随机性、多阶段以及非平稳库存模型进行了深入研究，并

且采用了随机过程、动态规划、马氏决策过程以及其他运筹学方法。至今库存理论大体可以分成五个分支：确定性库存理论模型、随机性库存理论模型、无穷周期的库存理论模型、多级的库存理论模型和新兴起的库存合同模型。确定性库存理论模型比较简单，即产品需求确定，每次订货量、订货成本与单位库存成本均保持不变，在此基础上，不少研究人员从批量折扣、供货滞后时间、缺货事后补充等角度进行了扩展 [19] 。随机性库存模型则更为贴近实际，在需求随机、提前期不确定、订货成本可变及允许缺货等条件下研究如何确定最优订货量和安全库存的问题。经典的报童模型 (Newsboy Model) 是令单周期的利润最大或总成本最小，实际上，库存管理者更加关心的是多周期的库存成本，这样有助于进行中长期的库存决策与分析。因此，多周期库存问题也成为供应链库存建模的一个重要研究方向。 Bellman 等首先提出模型假定不同周期需求是独立同分布的，订货提前期为零，证明了安全库存策略的最优性 [20] 。 Kaplan 考虑了提前期的不确定性，证明了当不考虑固定订货成本时，多周期的最优订货策略仍然是安全库存策略 [21] 。 Decroix 和 Risa 采用动态规划在有资源约束条件下，将各周期成本之和作为系统的目标函数的多产品最优库存策略 [22] 。 Bhattacharjee 和 Ramesh 在需求确定的情形下，建立了一个零售供应链多周期利润最大化的订价与订货模型 [23] 。 Metters 则在需求不确定的条件下，基于多周期建立了一个考虑了资金时间价值的数学规划模型对长鞭效应进行定量研究 [24] . 此外， Genues 在运作参数随机以及不平稳的情况下建立了多周期的报童模型，提出了一个简单的、易于理解和实施的启发式策略，并且证明了该策略的柔性 [25] . 同时，供应链库存问题也可分为两类即单级库存决策问题与多级库存决策问题。在库存管理的最初研究中，主要是关于单级生产库存系统的研究，而且已经取得较为丰硕的成果，但其前提与假设往往与实际情况差距较大，如企业多受到库存空间、加工能力等约束条件的限制。多级库存管理的研究始于 1960 年 Clark 和 Scarf 的研究，他们给出了一个分解方法来解决系列多级结构的最优策略 [26] . 从此，不少学者都对多级库存系统展开了研究 [27~29] 。 Sherbrooke 将各次订单提前期之间相关性忽略不计，使系统可近似采用排队论描述每个销售商库存流程，将销售商已经发出但还没到货的订单近似描述为服从泊松分布的随机变量 [30] . Graves 同时考虑订单数的均值与方差，采用负二项分布近似订单分布 [31] ，这种方法更易于解决最优库存策略问题。但是，由于多级库存系统中包含有多个成员，而各个成员的目标不同、利益不同，使得在实际运作中很难建立对于整个系统而言最优的库存策略。但随着信息技术的发展，信息共享程度越来越高，通过成员间的合作来达到最优的库存管理 [32, 33] . 另外，在现有的分散决策结构下构造各成员的利润函数，引入协调机制建立库存策略，使得分散的供应链仍然可以达到整体最优水平 [34~36] 。

1.1.4.2 供应链环境下的物流管理

物流 (Logistics)，简单地说就是物品从供应地向接受地的实体流动过程。物流是供应链上下游企业的联结点，包括运输、储存、装卸、搬运、包装、流通加工、配送等环节，其中运输与配送最为重要。物流规划的目标就是降低成本和提高服务水平，因此在构建产品从供应点到需求点流动的结构时，确定运输工具、设施的数量、规模、地理位置以及运输路线的选择、车辆的调度等问题都成为物流决策成功的关键。好的物流规划往往可以降低整个供应链的物流成本，提高供应链管理的水平，加快对客户需求的响应速度，提高服务质量，增强客户对物流环节的满意度，降低供应链运作成本 [37]，成为了供应链管理的热点问题。本节主要从布局问题、设施选址问题和选址—路径问题三个方面对供应链中物流系统规划的研究现状进行概述。

(1) 布局问题

1961 年美国的理查德 · 缪瑟提出了系统布置设计 (System Layout Planning, SLP) 和系统搬运分析 (Systematic Handling Analysis，简称 SHA) 理论，主要探讨设施布局的模型和算法两方面。关于布局问题模型研究，假设设备之间的流量是已知的固定数量，将布局问题 (Layout Problem，简称 LP) 在计划展望期内看做是静态的，布局的目标仅仅是达到物流费用最小等。当时学者常用线性整数规划模型 (Linear Integer Programming Model) 研究此类问题 [38]。由于这些模型的假设条件往往不符合现代物流系统的现实要求，人们根据现实问题发展了许多扩展模型，如实际布局是多目标优化问题，且目标间可能相互矛盾，为此近年来构造了多目标决策布局模型。

(2) 设施选址问题

设施选址问题 (Layout-Assign Problem, LAP) 就是根据所需的客户服务水平和物流营运成本，确定企业设施的性质、数量、规模和地理位置。1972 年由 Cooper 首次提出，是物流网络系统设计的基本内容 [39]。从 LAP 涉及的供应链的阶段来看，可以分为单阶段 LAP(如工厂选址)、二阶段 LAP(如生产 / 分销系统选址) 和多阶段 LAP(如包括供应 / 生产 / 销售的整个供应链物流网络的选址)。从物流设施 (如工厂、分销中心) 的数量来看，LAP 可以分为单设施 LAP 和多设施 LAP，内容包括对设施数目、位置以及规模等的确定。从 LAP 研究的数据性质来看，可分为确定型 LAP 研究和不确定型 LAP 研究 (如随机问题、模糊问题)[40]。从 LAP 研究的时段来看，可分为静态 LAP 研究和动态 LAP 研究。从研究方法来看，主要采用非线性规划方法、混合整数规划模型、模糊机会约束规划模型和区间规划模型等。从模型解法来看，主要采用精确法、分解方法和启发式算法。对于阶段数少、规模小的 LAP，一般采用精确法求解。

(3) 选址一路径问题

物流系统的设计除了要确定设施的最小数目和位置之外，还需要确定最优的运输路线，并满足一定的服务水平，因此有了选址一路径问题 (Location-Routing Problem) 的研究 [41, 42] . 早期的研究主要集中在问题的复杂性上，并且将选址和运输分离开来。Cooper 开始意识到选址和运输决策间的协调性，认识到运输一选址问题 (Transportation-Location problem) 主要是找到供应商的最佳位置和从源头到目的地的最小的运输成本 [43]， Tapiero 综合了有关时间的复杂因素，建立了运输一选址模型，使该项研究更精确、更深入 [44] . Laporte 等研究了一类设施受能力约束的选址一路径问题的精确算法 [45]. Chient 对运输路线受能力约束而设施能力不受能力约束的选址一路径问题进行了研究 [46]. Dilek 和 Laura 考虑了更加复杂的情况，研究了多设施多运输工具且受运输能力约束的两层选址一路径问题 [47]. Wu 等则开发了一个多仓库选址一路线问题的启发式算法，该算法将原问题分为选址一分配和车辆路线两个问题分别进行求解 [48] . 另外， Canel 等 [49] 以及 Baita 等 [50] 还对动态路线、库存问题展开了研究.

1.1.4.3 供应链管理中信息的价值以及信息技术的应用

充分和有效的信息是供应链管理成功的关键. 成功的供应链战略管理是把整条供应链当作一个整体考虑，而不是只看到其中的某个阶段。管理者根据影响整个供应链的所有因素来制定策略，使得供应链整体利润最大化，而不是仅仅依靠影响供应链某些阶段或特定功能的因素. 供应链企业之间存在物流、信息流和资金流，由于物流是供应链中最明显、最直观的流动，在过去的研究中往往集中在物流运作的层面上 [51] . 随着信息技术的飞速发展和应用，信息成为供应链各成员、各环节之间进行沟通协调的载体，人们逐渐认识到信息对提高供应链运作效率和绩效的作用是不可忽视的. 在供应链中，一切物流、资金流都紧密地围绕信息流展开，管理好信息流，才能为物流和资金流提供正确的决策依据，才能实现供应链管理的目标，才能达到效率最优、成本最低。只有当决策者拥有了足够的信息，才可能了解整个供应链，才能对供应链作出最好的决策. 因此，信息在供应链管理的研究和应用中起着决定性的作用. 很多学者从供应链信息流管理运作上和信息技术支撑上对如何实现所提出的先进供应链运作管理思想进行了深入研究 [52] . 自 20 世纪 90 年代， Stalk[53] 提出时间因素是竞争关键因素以来，对基于时间竞争的研究一直是理论界和企业界共同关注的热点. 在基于时间竞争环境下，对最终用户需求的响应速度是企业供应链成功的关键因素之一。因此，对于整个供应链上响应时间压缩研究成为基于时间竞争研究的一个重要方面. Rachel 等分析了信息流对于压缩整个供应链响应时间，提升企业供应链竞争优势的重要性，并进一步研究了信息流上时间压缩的关键技术 [54] . Towill 还进一步强调供应链整个

响应时间压缩战略是包括从顾客需求 (Customer demand) 到满足顾客 (Customer satisfied) 这一系列过程中每个环节上的时间压缩 [55, 56]。

随着供应链涉及的资源和环节的增加，对整个供应链的管理变得越来越复杂，随之出现的信息不对称现象也影响到供应链的健康发展。1993 年，Hammer 和 Champy 发表了著名的《企业再造》，从而在世界范围内掀起了业务流程再造 (Business process reengineering, BPR) 的旋风。BPR 对企业重新思考、构建、改进自己的供应链起了极大的促进作用 [57~59]。而业务流程重构的一个重要支持手段就是信息技术，信息技术 (Information technology, IT) 是指各种以计算机为基础的工具，人们用它来加工信息，并支持组织对信息的需求和信息处理的任务。目前，信息技术在供应链管理中的应用主要包括：电子数据交换 (Electronic Data Interchange, EDI)、条形码技术、专家系统 / 人工智能、通信技术、数据库技术 / 数据仓库技术和网络技术 / 电子商务等，相应也开发出如 ERP(企业资源计划)、PDM(产品数据管理)、CRM(客户关系管理)、AQC(自动化质量控制)、WMI(仓库管理系统) 等各类软件 [60]。通过信息技术的应用，可以实现整个供应链上的信息共享，提高企业信息交换的准确性，去除冗余步骤，使整个业务流程有机结合。信息技术的应用可以消除传统供应链存在的问题，实现有效的经营和管理，从而推动供应链管理的发展。

1.1.4.4 供应链中战略合作伙伴关系的管理

供应链中战略合作伙伴关系的建立和管理是供应链管理中的一个重要内容。Maloni 和 Benton 认为供应链合作伙伴关系，又称为战略联盟，是指供应链中两个相互独立的实体为获取特定的目标和利益而形成的一种关系 [61]。Vokurka 等指出，伙伴关系是买方和供应商就一段较长时间达成的承诺和协议，其内容包括信息共享和分担伙伴关系带来的利益和风险 [62]。因此，供应链中的战略合作伙伴关系，应该是一种相互信任、互惠互利、信息共享、协同工作、共担风险的长期协作的关系。通过建立合作伙伴关系，不仅可以降低生产成本，提高信息共享水平，增加用户满意度，还能够提高合作各方的财务和运作绩效，达到“双赢” [63]。但是，对合作伙伴关系中得到的收益也不可期望过高。Graham 等指出，合作伙伴关系所带来的一些好处至少要三年才能体现出来 [64]。同时，合作伙伴关系也存在潜在的风险，Leavy 警告说，企业可能高估了合作伙伴关系带来的好处而忽视了潜在的风险，建议对传统的供应关系与战略合作伙伴关系进行深入的对比研究 [65]。因此，合作伙伴关系应从长远来规划，而且也不宜过分依赖伙伴关系的建立。建立合作伙伴关系的具体实施步骤为 [66, 67]：(1) 从企业战略的角度来检验是否真的需要建立供应商合作伙伴关系。企业必须首先评估与传统的供应过程相比，合作伙伴关系潜在的风险和收益。(2) 确定挑选合作伙伴的准则，评

估潜在的候选企业。(3) 正式建立伙伴关系。(4) 维持和精炼合作伙伴关系，包括增强彼此间的合作关系或解除与某些伙伴的关系。

供应链管理中合作伙伴的选择至关重要，在很大程度上决定着供应链运行的平稳程度和运行效能。近年来，国内外学者关于供应链中的伙伴选择问题也进行了大量的研究。1966 年 Dickson，最早开始系统地研究供应商评价问题 [68]。Weber 等就回顾了自 1966 年以来与供应商选择相关的多篇文献，着重于供应商选择过程中所采用的准则以及分析方法，从不同角度对 Dickson 提出的 23 条选择决策的评判标准进行了讨论，把对供应商选择的基本方法归为 4 类：线性加权方法、层次分析法 AHP 法、数学规划方法和统计概率方法 [69]。实际上，合作伙伴的选择和评价是相当复杂的问题。Tulluri 等提出了两阶段的伙伴选择过程模型，先利用数据包络分析 DEA 辨识有效伙伴，再优化选择 [70]。但该方法只是一个局部搜索和优化方法，可能丢失一些比较适合整体联盟的有效解，另外模型的可操作性较差，所有的候选伙伴都必须经过 DEA 评价以确定最佳的候选伙伴，这是一件费时、费力的工作。钱碧波等将虚拟企业伙伴的选择与优化过程分为初选、单目标评价、综合评价与优化三个阶段 [71]。这一方法把所有潜在伙伴归为一类进行优化选择，这样就可能造成有的类型伙伴选择过多，而有的类型伙伴却没被选择上，而且不能充分体现人在决策中的重要作用。陈菊红等将伙伴选择过程分为过滤、筛选和最优组合三个阶段 [72]，这种方法的第一阶段需要高层决策人员对潜在合作伙伴进行定性分析，不仅加重了决策人的工作量，而且受决策人主观判断的影响，很难达到准确快速过滤的效果。冯蔚东等提出了伙伴选择过程的遗传算法优化模型 [73]，部分解决了已有定量方法存在的局限性，但忽略了伙伴选择过程中大量存在的非定量因素，而且只计算了候选伙伴间的联结成本，没有考虑企业本身和候选伙伴间的联结成本。刘蓉等提出了结合层次分析法与基于指标满意度的模糊综合评判法的备选伙伴评估方法，讨论了合作伙伴关系评价和动态监控的问题 [74]。目前，针对合作伙伴企业选择的理论方法主要有定性的和定量的两类方法。其中，定性的方法包括直观判断法、招标法、协商选择法等，定量的方法有很多，主要有作业成本法 ABC、层次分析法、逼近理想解的排序方法 Topsis 法、遗传算法、模糊综合评判法等 [75]。

1.1.4.5 供应链企业间的委托—代理问题

最早提出委托代理概念的目的是为了研究股份制公司的管理体制问题。在经济生活中，委托—代理问题普遍存在，由当事人各方的信息不对称所引起。所谓的信息不对称，是指一方拥有另一方没有的信息，拥有信息的一方成为代理人 (agent)，缺乏信息的一方成为委托人 (principal)。由于供应链企业之间的信息不对称现象，同样也存在着委托—代理问题。代理方隐瞒相关信息以及欺骗行为，造成了供应

链企业间逆向选择 (adverse selection) 问题和道德风险 (moral hazard) 问题并存. 目前，国内外学者已经开始运用委托—代理理论对供应链中的信息不对称问题进行研究，而委托一代理理论的核心就是通过分析代理方的失信行为，设计合理的激励监督机制，实现预期效用的最大化. 针对供应链管理中的逆向选择问题，充分发挥信号传递机制的作用，可以实现对供应链合作伙伴的有效选择. Mishara 等指出，有害选择问题通常可以采用信号理论的方法解决，即利用某种信号揭示参与者的私有信息 [76]．Chu[77]、Lariviere 和 Padmanabhan[78] 对于通过某些信号传递来说明产品需求情况的问题也作了相关研究. 道德风险问题则主要是通过采用激励机制，如给予价格补偿，来约束供应商的欺骗行为. 杨治宇和马士华对于供应链企业间由于信息不对称引起的委托一代理问题，从制造商的角度对制造商一供应商委托代理中的有害选择和道德风险问题进行了讨论，并且提出如何进行激励机制设计 [79]．张爱等同样从制造商的角度出发，对供应链企业委托代理问题利用数量模型来定义和推导，并分别得到了道德风险问题和逆向选择问题的解决办法 [80]．李亚林在分析委托一代理理论及其模型的基础上，对如何建立合理的激励机制提出了自己的看法 [81]．

1.1.4.6 绿色供应链

在世界经济得到快速增长的同时，资源短缺、环境污染和生态环境遭到破坏的问题也愈来愈严重，可持续发展战略成为研究的热点问题. 为了人类社会的可持续发展，各国纷纷制定更加严格的环境保护法规，加强对环境的保护和管理. 随着人类环境意识的增强，人类社会也逐步进入绿色时代，环境问题成为影响企业生存与发展的问题. 实施绿色供应链管理，可以促使供应链上企业合理利用资源，减小对环境的危害，提高企业的“绿色竞争力”，是现代企业实现可持续发展的有效途径.

早在 20 世纪 70 年代就提出绿色供应链管理，但当时只是作为物流管理研究的一个方面提出的，直到 20 世纪 90 年代初，才开始了大规模、有意识地针对绿色物流的研究. 1994 年，Webb 研究了一些产品对环境的影响，建议通过环境准则来选择合适的原材料，同时注重再生利用，并提出了绿色采购 (green purchasing) 概念. 密歇根州立大学的制造研究协会 (MRC) 进行了一项名为“环境负责制造 (ERM)”的研究，于 1996 年首次提出了“绿色供应链”的概念. 随后，国外学者开始了对绿色供应链管理的广泛研究 [82]. Hart 分析了企业价值链对整个环境的影响 [83]. Min 与 Galle 在选择供应商的决策中讨论了如何考虑环境保护因素，以及“绿色采购”在减少废物中的作用 [84]．Sarkis 指出绿色供应链应包括如下的主要组成部分：企业内部物流和采购、物料管理、外部物流、包装和返回物流 [85]．Van Hoek 则研究了供应链实际操作中的生态平衡问题 [86]．Berman

考虑环境因素，提出了更广泛的供应链设计模式及“绿色供应链”的概念，同时还提出了一些新的经营指标，包括资源回收率 (Material recovery rate) 、核心回报率 (Core return rate) 、废物比 (Waste ratio) 、生态有效性 (Eco-efficiency) 等等 [87] 。 Sarkis 利用网络分析法对绿色供应链管理的战略进行了评估，指出绿色供应链管理战略能够提高企业的竞争优势、改善企业组织绩效、减少生产成本、保护自然环境等，突破了以往分散性的缺陷，形成了系统化的绿色供应链管理决策模型 [88] 。但总的来说，关于绿色供应链管理的研究比较分散，没有形成系统的理论。具体实践也主要局限在欧美一些大的公司，如微软、 IBM 、通用、惠普、可口可乐、百事可乐、保洁等都或多或少实施了某种形式的绿色供应链管理，以提高其核心竞争优势 [89, 90] 。在国内，关于绿色供应链的研究才刚刚起步。但斌、刘飞论述了绿色供应链管理的概念与内涵，提出了一种绿色供应链的体系结构，并探讨了绿色供应链研究和实施的主要内容 [91] 。李向东等提出，通过供应链上战略伙伴之间的协调与合作，可以实现企业效益和环保效益的双赢 [92] 。罗兵等对绿色供应链管理战略决策的要素及相互关系进行了补充和完善，形成了新的战略决策框架模型，用实例说明了采用网络分析法 ANP 法进行绿色供应链管理战略决策的过程 [93] 。对于绿色供应链，提出并且展开研究的时间并不长，目前，关于绿色供应链管理都还没有确切的定义，但从本质上来说，绿色供应链就是在实施供应链管理的同时注重对环境的保护，强调环境与经济的协调发展。绿色供应链管理的内容主要包括绿色采购管理、绿色设计、绿色生产、绿色包装和绿色营销等.

1.2 供应链协调及相关学科研究概述

供应链是由与产品生产以及流通过程相关的供应商、制造商、分销商、零售商直到最终用户，通过信息流、物流、资金流联接在一起构成的供需网络。通常，组成供应链的各个成员之间相互独立，且拥有各自的优化目标和私有信息，当供应链成员以自身利润的最大化来制定其生产经营决策时，往往会与供应链整体利润相冲突。因此，建立合理有效的协调机制，促进供应链范围内的部门之间和节点企业之间的协调一致，才能提高供应链整体的竞争力，实现系统利润的最大化.

1.2.1 供应链协调研究现状

协调是供应链稳定运行的基础，也是实现供应链集成化管理和节点企业间的协作的重要手段。供应链是由不同利益主体所构成的合作型系统，在供应链各成员追求自身利润的最大化的同时，往往与供应链整体最优利润相冲突。供应链协调的目的就是对供应链成员间的物流、信息流、资金流进行有效的控制和协调，将企业内部的供应链和外部的供应链集成起来进行管理，实现成本的降低，服务

质量的提高，从而提高供应链整体的管理水平和运作效率，最终达到整体动态最优目标。Beamon 将供应链协调定义为，供应链上的某个成员通过提供某种激励来试图改变另一个成员的行为 [94]。目前，供应链协调机制的研究已经成为供应链管理中一个很重要的研究方向。

虽然，供应链还是一个较新的概念，实际上，早在 1960 年 Clark 和 Scarf 对多级库存、分销系统的研究中协调的思想就有所体现 [26]。尽管随后也有许多关于多级库存、分销系统的研究成果，但其中却很少再有提到协调生产和销售的。直到进入 20 世纪九十年代以来，协调机制的研究才引起了越来越多学者们的关注。其中，协调订货决策问题是供应链协调中一个主要的研究内容。Ingene、Parry[95] 和 Chen 等 [96] 在已知市场需求的前提下，研究了单个制造商和多个零售商的协调订货决策问题。在现实生活中，销售商总会在需求完全获悉之前订货以满足未来可能的产品需求，而制造商也要提前预计产品的市场需求量来制定生产决策。这样，不论是订货量还是生产量，都会与实际的需求之间存在一定偏差。为了增加供应链上的利润，降低由于预测偏差给供应链带来的利润损失，必须对供应链进行协调。Tsay[97]、Milner 和 Rosenblatt[98] 提出了分销商同样是在市场需求确定前订货，但是待市场需求确定后允许其调整实际订货量的带有数量弹性的订货契约。Gumani 和 Tang 探讨了分销商具有两次订货机会时的最优订货策略 [99]。Iyer 和 Bergen 提出快速反应 (Quick response) 模式 [100]，在此基础上，Chen 和 Xu 提出了带有两次订货和两次生产的改进的快速反应策略，并与传统的生产经营模式相比较 [101]。Donhue 也提出两阶段生产模式下的协调订货问题，使得分销商可以根据更新的需求信息来调整其订货水平 [102]。目前，关于供应链协调的文献已相当丰富，所研究的内容也非常广泛。Gavirneni 考虑了市场需求是独立同分布 (Independent and identically distribution) 的随机变量，一个供应商与多个零售商之间的协调，并比较了三种协调方式 (无协调、部分协调和完全协调) 对供应链绩效的影响 [103]。Viswanathan 和 Piplani 在需求确定的情形下，考虑了由一个卖方、多个买方和单一产品所构成的供应链中通过共同补给期来协调库存的问题 [104]。Boyaci 和 Gallego 在需求具有价格敏感性的条件下，研究了由一个批发商和一个或多个零售商组成的供应链中的协调定价以及库存补给策略问题 [36]。Romano 对三种供应链网络结构中物流的协调以及集成机制进行了研究 [105]。Sebadtian 等详细分析了 Internet 在改善供应链企业经营活动方面的影响，研究基于 Internet 的供应链协调机制 [106]。Chen 等在需求随机的情况下研究了定价和库存补给的联合决策问题 [107]。Thomas 和 Griffin 在对供应链协调问题进行综述时，研究了供应链中采购、生产、销售三个基本阶段，并且将供应链协调定义为三个方面：买方－卖方协调 (Buyer-vendor coordination)、生产－分销协调 (Production-distribution coordination)、库存－分销协调 (Inventory-distribution coordination)[108]．总的来说，可以将供应链中的协调分为两个层次，企业内的协调和合作伙伴间的协调 [109]．企业内部的协调是指供应商、制造商和销售商企业内部各部门之间各项活动的协调，包括物流、资金流和信息流的协调，合作伙伴间的协调是指供应商、制造商和销售商之间的相互协调.

1.2.2 供应链契约研究现状

我们将供应链上的成员称为广义的卖方和买方,所谓供应链契约 (Supply chain contract, 也称供应链合同)，就是通过提供合适的信息和激励措施，来保证买卖双方的协调、优化供应链绩效的有关条款 [110]．由于信息不对称造成在供应链不同成员间传递时的扭曲，或由于供应链上不同的成员有着不同的优化目标往往是造成供应链失调的主要原因．通过缔结契约来激励供应链上成员规范自己的决策行为，可以减少因信息不对称造成的生产、供应和销售等环节不确定性，以及消除因供应链的各成员目标不同而造成的利益冲突，提高供应链的整体绩效．因此，供应链契约作为实现供应链协调的有效激励机制，具有非常现实的研究价值.

供应链契约归纳起来主要有以下几类:

(1) 数量折扣契约 (Quantity discount contract)

数量折扣是协调机制中最为常见的激励形式．当产品需求对于价格变化非常敏感时，卖方会考虑提供价格折扣来激励买方增加订货量．常见的数量折扣模型都是基于订货量来建立的，包括全体数量折扣 (All-unit quantity discount) 和增量数量折扣 (Incremental quantity discount) 两种．Monahan 计算了供应商向单一分销商供货并使其利润达到最大的数量折扣，假设供应商选择批量对批量 (Lot-for-lot) 策略，得到充分大的数量折扣可促使买方选择较大的订货量，从而增加供应商的利润 [111]． Weng 在由单一买方和单一卖方构成的供应链中将上述两种数量折扣策略进行了研究，并就市场需求确定和价格敏感两种情况分别加以讨论，得到数量折扣策略可以有效提高供应链整体利润并对其合理分配的结论 [112]． Munson 等将数量折扣应用三层供应链模型，研究了实现系统协调的价格策略 [113]．Corbett 等讨论了非对称信息条件下的数量折扣策略，并与完全信息条件下的策略进行了对比，说明在完全信息下系统可以取得最佳的绩效 [114]． Yang 在需求是销售价格的线性递减函数的假设下，对于易变质产品考虑了带有数量折扣的最优定价和订货策略 [115]．

(2) 回购契约 (Return contract)

也有国内学者将其翻译为退货契约，主要是对于那些生产提前期长、销售季节短、需求不确定的时令商品 (如服装、报刊、书籍、电子类产品等) 来说，在销售季节结束时，分销商可以将其未售出的剩余产品以某回购价格全部或部分返还给制造商．通过采用回购策略，使得制造商和分销商共同分担市场需求不确定的

风险，可以有效的实现供应链协调。 Pasternack 是第一个研究回购策略的学者 [116]。Cachon 在假定市场需求不确定且零售价格由市场决定的前提下，证明回购策略可有效地协调供应链，并使供应链整体利润达到最优 [117]。 Wang 在需求函数依赖于价格的概率分布情况下，研究了回购契约对供应链利润的影响 [118]。余玉刚等考虑制造商和零售商风险厌恶的情况，指出通过设计合理的回购策略，制造商不但利益不会受到损失，相反，还可以获得很大的收益份额 [119]。电子商务的出现不仅改变了传统的经营管理模式，也为商家提供了成本更低、更加便捷的产品销售空间， Choi 等正是考虑到季末退回的产品如果在电子市场的环境下售出可以获得更高利润，研究了基于电子市场的最优回购策略 [120]。肖振伟和李华在信息共享的前提下，建立了由退货价格激励的供应链合作模型，合作双方达到"双赢"，并且系统达到帕累托最优 [121]。

(3) 数量弹性契约 (Quantity flexibility contract)

数量弹性的基本思想是当初始的产品订购数量为 Q 时，则制造商可以提供最多为 $(1+\alpha)Q$ 的产品，同时买方承诺至少会订购 $(1-\beta)Q$ 的产品，其中 α 和 β 均为非负数。在短时间内观测到需求后，买方可以在 $(1-\beta)Q$ 至 $(1+\alpha)Q$ 的范围内确定其最终的产品订购量。 Tsay 研究了这种灵活订货契约中买卖双方的行为，并且证明数量弹性能够使分布式的供应链比没有应用数量弹性的供应链获得更多利润 [97]。 Donohue[122] 和 Taylor[123] 考虑了需求预测更新的情况下，不同形式的数量弹性契约模型。 Wu 也考虑了一类弹性订货契约，分销商首先对需求进行预测后决定最初的订货量，在接下来的时间里不断的收集和更新需求信息，用贝叶斯方法预测产品需求，根据制造商的生产量和最初的订货量允许在一定范围内调整订货量。显然可调整订货量的范围越大，对分销商往往会更有利 [124]。

(4) 共享利润契约 (Revenue sharing contract)

卖方通过制定产品售价来与买方进行协调，同时分享买方的销售利润。Giannoccaro 和 Pontrandolfo 建立了三级供应链上的利益共享契约模型，制造商和分销商分别向其下游企业提供利益共享契约，使得整个供应链利益达到最优 [125]。Gerchak 和 Wang 则在具有随机需求的装配系统中考察了利益共享契约，组装者通过使用利益共享契约，可以使供应链达到协作并使每个参与者的利益都得到提高 [126]。王勇和裴勇考虑到价格对需求的影响，在需求具有价格敏感性的条件下，建立利润共享契约模型，研究最终销售价格为内生变量的条件下实施利益共享的情况 [127]。

(5) 备货契约 (Backup contract)

在销售季节开始时，卖方只将全部订单的部分商品配送到买方处，而把剩余部分作为备货保存起来。在观测到早期需求后，买方仍然可以按最初的单位售价购买得到所需产品，并且可获得迅速的配货，但必须为没有购买的那部分备货支

付罚金。 Eppen 和 Iyer 在研究备货契约问题时使用贝叶斯方法预测并调整产品的需要量，同时也要求对买方未完成购买量的行为实施惩罚 [128] 。

(6) 价格保护契约 (Pricing protection contract)

价格保护契约是在产品的生命周期中，若出现批发价下降的情况，制造商付给销售商未售出产品的一个信用担保。 Lee 等将该契约应用于个人电脑企业，保护分销商抵御商品零售价格的降低而带来的利润损失 [129] 。Taylor 分析了两个阶段的价格保护模型 [123] 。零售商在第一个销售季节开始时从制造商那里以批发价格 w_1 ，订购产品数量为 Q ，当第二个销售季节开始时，由于新产品的引入使得产品的批发价格跌至 w_2 。为了分担零售商所可能面临的产品过时风险，制造商会在第一个销售季节结束时为所有未售出的单位商品支付价格补偿为 b ，该契约是具有多个销售阶段的产品面临过时风险时的一种动态价格保护策略。

供应链契约还包括：最低购买数量契约 (Minimum commitment contract)[130] ，即买方承诺至少向卖方购买一定数量的产品，卖方通常根据这个数量给予一定的价格折扣，而且产品的单位售价会随着数量的增加而降低；期权契约 (Option contract)[131] ，在销售季节开始时，零售商以正常价格购买产品并且以期权价格购买期权，当观察到市场需求后，零售商可以按执行价格 (Exercise price) 购买这些期权产品；卖方为了避免买方退回未售出的过时产品，通过一定价格的削减或补贴来激励买方继续保留那些过时未售出的产品的削价契约 (Markdown contract)[132] 等。

1.2.3 信息共享研究现状

20 世纪 90 年代，美国宝洁公司发现“帮宝适”产品的销售量很稳定，但是从零售商到分销商的订单波动却很大，从分销商到制造商的订单波动则更加惊人。人们称这种需求信息从下游向上游逐级放大失真的现象为“牛鞭效应”。许多学者对“牛鞭效应”的成因进行了深入的研究。麻省理工学院 Sterman 教授通过“啤酒游戏”案例，分析证实了“牛鞭效应”是由游戏参与者的系统性、非理性行为和对反馈信息错误理解所造成的 [133] 。Towill 通过模拟方法证实了不同库存策略对供应链信息扭曲的影响程度 [134] 。Lee 等利用数学模型进一步论证了引起“牛鞭效应”的四个原因：调整市场预测需求、理性对策、批量订货和价格波动。他指出供应链各成员企业间的信息共享可以改善或减轻这种由需求信息扭曲放大导致的供应链利润损失。同时，还指出由于交易过程中的道德风险问题，使得信息共享策略的实施会存在一定困难，以及与其他企业共享私有信息可能会带来的经营风险，信息共享后的盈利分配问题 [135] 。 Chen 等定量研究了导致“牛鞭效应”的需求预测和订货提前期两个因素，认为顾客需求信息集中能够有效减弱“牛鞭效应” [136] 。

由于"牛鞭效应"的影响，使得供应链企业的库存成本增加，利润降低，而解决"牛鞭效应"的基本方法就是在供应链企业间加强信息共享。因此，信息共享在供应链管理乃至供应链协调中都具有非常重要的研究价值。Cachon 和 Fisher 在 1 个供应商和 N 个销售商所组成的二级供应链中研究了共享需求信息和库存信息的价值问题，数值试验结果表明完全的信息共享会带来供应链库存成本的明显降低 [32]。Corbett 和 Groote 将不对称信息与完全信息两种情况进行比较，说明是否了解零售商的成本结构信息对于供应商制定策略的影响 [114]。Thonemann 分析了共享需求信息对提高供应链整体绩效的影响，研究结果表明制造商和客户都将从共享需求信息中受益，制造商的成本降低，客户可以获得更低的产品售价和更高的服务水平 [137]。在已有的文献中，多是研究供应链中下游企业的私有信息对上游企业的影响，而 Fu 和 Piplani 则考虑了上游企业信息的价值，说明如果供方愿意与其买方共享信息，同样可以起到提高供应链稳定性和服务水平的作用 [138]。信息共享及其激励机制同样也引起了国内学者的研究兴趣。马新安等运用两阶段多任务委托—代理模型研究了供应链成员之间的信息共享激励问题 [139]。张菊亮和陈剑在不完全信息条件下，研究了回购策略对供应商、销售商以及供应链整体的影响，说明信息共享对于实现供应链协调是有必要的 [140]。张子刚和刘开军建立了由一个制造商和 n 个相同的零售商组成的二级供应链模型，通过价格机制来激励供应链上的下游企业与上游企业分享信息，并给出了最优的定价策略 [141]。王瑛针对产销双方之间信息的不对称性，分析了实现供应链合作伙伴信息共享的条件，提出了促进制造商与分销商信息共享的激励机制 [142]。

1.2.4 关于短生命周期产品研究现状

短生命周期产品 (Short life cycle good)，是指一类具有一个相对较短且固定的销售时间的商品，如时装、书籍、报刊、电子类商品、节日装饰品等。对这类生命周期较短的产品，分销商往往需要在销售季节到来之前订货。此时，分销商很难得到需求的确切信息，在权衡缺货或是库存积压所带来的利润得失之后，通过预测产品的需求量制定最优订货策略。因为销售商所单方决定的订货量往往是以自身期望利润最优来决定的，很难使得供应链整体的期望利润同时也达到最优，即导致供应链效益的"双重边际化" (Double marginalization)。"双重边际化"，是指供应链中每个成员在制定决策时只考虑到各自的边际效益，而不考虑其他成员的边际效益，当单方决策影响到市场需求，造成每一方所获得的利润都将减少。因此，对于短生命周期产品而言，同样需要采用供应链契约来促使供应链中各成员之间的合作和协调。

Pasternack 首先研究了关于短生命周期产品的退货问题。在由一个制造商和一个分销商组成的供应链模型中，制造商承诺在销售季节结束时，会以低于产品批

发价格的回购价格将分销商所有剩余产品购回，得到有效的批发价和回购价格，可以实现销售渠道的协调 [116] 。 Lau 和 Lau 同样在由一个制造商和一个分销商所组成的供应链中，分销商根据制造商提出的产品批发价格以及季末回购价格，来决定最优订货量和产品的市场零售价格，讨论了需求的不确定性对于制造商和分销商制定决策及其期望利润的影响 [143] 。 Donohue 研究了在两次生产和订货模式下，如何设计关于退货价格和两次订货价格的供应链契约实现供应链双方的协调和 Pareto 最优 [122] 。 Lee 在对于季末未售出的产品，除了可以退还给制造商，还可以通过折扣销售店 (Discount sales outlet) 处理掉的情况下，通过制造商、分销商、折扣店共同协调制定库存、季末削价销售以及回购的策略，使得供应链整体利润的最大化 [144] 。对于季末剩余产品，除了可以将其以一定价格退还给制造商或是通过折扣店的形式将其低价处理掉，还有一种常见的方式称为滞销补贴 (markdown money)，即制造商给与销售商一定的补贴，使分销商将没有售出的产品全部卖出。 Tsay 在一般的供应链模式下，即销售商只订货一次、制造商也仅生产一次的情形下，研究了退货策略和滞销补贴策略的适用条件 [132] 。丁利军等考虑由一个制造商和一个销售商组成的两级供应链，生产和销售一种生产提前期很长，销售季节较短的季节性商品，研究一类两次生产和订货模式的供应链契约式协调问题，通过分析退货契约和滞销补贴契约的适用条件，设计了有效的退货契约和滞销补贴契约，并通过数值仿真的方法说明退货契约和滞销补贴契约对制造商的两次生产行为和销售商的两次订货行为的影响 [145] 。另外， Weng 考虑了由一个制造商和一个买方通过合作来满足具有短生命周期的单一产品的随机需求问题，提出了单位数量折扣来实现利润最大化的协调策略 [146] 。 Khouja 在需求具有价格敏感性特点的条件下，用多重价格折扣的方式来处理过剩库存，得到最初售价和订货量的联合最优策略 [147] 。 Milner 和 Rosenblatt 从买者的角度研究了短生命周期产品的数量弹性契约，指出数量弹性契约可以减小需求不确定的负面影响 [98] 。

1.3 网络平衡模型及相关数学基础

1.3.1 网络平衡模型研究概述

考虑到供应链是由多个独立的决策制定者构成的链状或网状结构，使得对于供应链的研究更加复杂 [148]，而通过建立网络模型来解决各类问题，在运输、物流、通信、金融等多个领域的研究中已相当普遍 [149, 150] 。

平衡模型在运输领域中的研究较为广泛 [151~155] 。 Lederer 对于彼此独立，互相竞争的多个运输企业建立了一个简单的网络模型，目的就是为了促使各个企业在确定其运输价格以及企业行为的同时达到平衡 [156] 。 Smith 提出了交通网络

平衡模型可以用一个变分不等式来表示 [157]，而变分不等式最初是用来研究带有边值条件的椭圆问题、障碍问题、自由边界问题以及其他类似的数学物理问题. 正是得益于此，关于网络平衡问题的研究也开始快速发展起来. Daniele 列出了多个平衡模型，包括静态、动态以及连续流情形下的交通平衡模型，以及静态、动态情形下的市场平衡价格，发现变分不等式与其均有密切联系，并且给出了平衡解的计算步骤 [158]。 Ricardo 考虑了多种运输工具的存在，建立了一个新的网络平衡模型，并将该模型转化为变分不等式的形式进行求解 [159]。

不仅是在交通运输方面，在经济以及金融领域，平衡模型同样也有广泛的应用 [149, 160]。供应链通常由几层组成，且每一层又是由互相竞争的几个不同的公司所构成. Phillp 和 Lederer 正是考虑了向那些对时间敏感的客户提供产品或服务的企业之间的竞争性 [161]。 Corbett 则建立了多层且需求确定的供应链模型 [162]。 Nagurney 、 Dong 和 Zhang 建立了一个由制造商、分销商、顾客组成的三层供应链网络平衡模型，虽然同一层中各企业间可能存在着竞争，但不同层之间他们却是互相合作的 [163]。通过转化为变分不等式的形式利用迭代计算格式得到了平衡的生产量、订货量和需求量，以及在不同层中产品相应的平衡售价. Nagurney 等进一步将电子商务这一新兴的商业运作模式也考虑进来建立了相应的网络平衡模型 [164]。另外，考虑到变分不等式形式的网络模型大多是在成本、收益或是利润等已知且确定的前提下得到的，Dong 、 Zhang 和 Nagurney(2002) 将假设条件放宽，即分销商处的需求是随机的，也建立了一个变分不等式模型并给出了一个求解方法 [165]。

经济学领域中的空间价格平衡问题的研究也同样引起了广泛的关注 [166, 167]。空间价格平衡问题 (Spatial price equilibrium) 就是要得到满足平衡条件的商品供给价格、需求价格以及商品流量. 如果某个供应商与某个需求市场之间有商品流动，则需求价格等于供给价格与运输费用之和，若需求价格小于供给价格和运输费用之和，则该对供应商与需求市场之间也就不会有商品流. Enke 在 1951 年建立了空间价格平衡问题和电路网络平衡问题之间的联系，指出这种类似关系可以用于计算出空间价格和商品流. 而后， Samuelson 、 Takayama 及 Judge 都分别指出满足空间价格平衡条件的价格和商品流可以通过求解一个数学规划问题来确定. 这一理论的发展不仅能对平衡模式进行定量分析，也为发展有效的求解算法提供了可能. 到目前为止，空间价格平衡模型已经广泛应用于农业生产、能源市场、矿产经济以及金融等多个领域 [149]。

1.3.2 变分不等式基础

变分不等式和非线性互补问题在物理、力学、对策论等领域以及工程、经济、管理等实际问题中有广泛的应用. 在这一节中，我们主要介绍与本文有关的有限

维变分不等式问题. 给出该问题与优化问题和互补问题之间的等价关系, 以及变分不等式解的存在和唯一性定理.

我们首先给出变分不等式的定义。

定义 1.3.1 有限维变分不等式问题, 记作 $VI(F,D)$, 即求向量 $x^* \in D \subset R^n$, 使得

$$\langle F(x^*)^T, x - x^* \rangle \geqslant 0, \qquad \forall x \in D, \tag{1.1}$$

成立, 其中 $F: D \to R^n$ 是给定的连续函数且 D 为闭凸集.

变分不等式与最优化问题以及非线性方程组之间有密切的联系。下面的引理给出了优化问题与变分不等式问题之间的一种联系.

引理 1.3.1 令 x^* 是最优化问题

$$\min_{x\in D} f(x) \tag{1.2}$$

的解, 这里 f 连续可微且 D 为闭凸集, 则 x^* 也是如下变分不等式 $VI(\nabla f, D)$ 的解

$$\langle \nabla f(x^*)^T, x - x^* \rangle \geqslant 0, \qquad \forall x \in D, \tag{1.3}$$

其中 ∇f 表示 f 的梯度。

证明: 对 $\forall x \in D$, 存在向量序列 $\{x^k\} \to x^*$ 和正数序列 $\{\delta_k\} \to 0$ 使得 $x^* + \delta_k(x - x^k) \in D$. 由于 x^* 是最优化问题 (1.2) 的解, 故当 k 充分大时, 必有

$$f(x^*) \leqslant f(x^* + \delta_k(x - x^k)) = f(x^*) + \delta_k \nabla f(x^*)^T(x - x^k) + o(\delta_k).$$

从而, $\nabla f(x^*)^T(x - x^k) \geqslant 0 + o(1)$. 令 $k \to \infty$, 即得

$$\nabla f(x^*)^T(x - x^*) \geqslant 0,$$

由定义 1.3.1 可知 x^* 就是变分不等式 (1.3) 的解.

引理 1.3.2 如果函数 $f(x)$ 为凸函数, 且 x^* 是变分不等式问题 $VI(\nabla f, D)$ 的解, 则 x^* 也是优化问题 (1.2) 的解.

证明: 由 $f(x)$ 是凸的, 有

$$f(x) \geqslant f(x^*) + \langle \nabla f(x^*)^T, x - x^* \rangle, \qquad \forall x \in D,$$

因为 x^* 是 $VI(\nabla f, D)$ 的解, 还有 $\langle \nabla f(x^*)^T, x - x^* \rangle \geqslant 0$, 故有下式成立:

$$f(x) \geqslant f(x^*), \qquad \forall x \in D,$$

即函数 $f(x)$ 在 x^* 处达到最小值.

可见, 在一定条件下, 优化问题和变分不等式之间存在着等价性.

R^n 中非线性互补问题定义如下: 求 $x^* \geqslant 0$, 使得

$$F(x^*) \geqslant 0, \qquad F(x^*)^T x^* = 0. \tag{1.4}$$

若映射 F 是仿射的，即可以表示成 $F(x)=Mx+b$ 的形式，其中 M 是 $n\times n$ 矩阵，b 为 $n\times 1$ 维向量，则称 (1.4) 式为线性互补问题，否则为非线性互补问题。不难证明，非线性互补问题 (1.4) 与 $VI(F,R_+^n)$ 等价，其中 $R_+^n=\{x\in R^n|x>0\}$，即下面的引理成立。

引理 1.3.3 若定义在 R_+^n 上的变分不等式问题 $VI(F,R_+^n)$ 与互补问题 (1.4) 式有解，则解必相同。

下面的定理给出了变分不等式解的一个存在性条件。

定理 1.3.1 若 D 为有界闭凸集，且 F 在 D 上连续，那么变分不等式问题 $VI(F,D)$ 至少存在一个解 x^*。

证明：在 D 是闭凸集的条件下，变分不等式等价于一个不动点问题 [149]，且由 D 的有界性，Brouwer 不动点定理保证解的存在性。

另外，由 F 的单调性还可以保证解的唯一性成立。

定义 1.3.2 若对 $\forall x_1,x_2\in D$，都有

$$\langle (F(x_1)-F(x_2))^T,x_1-x_2\rangle\geqslant 0$$

成立，则称函数 F 在 D 上是单调的。如果对 $\forall x_1,x_2\in D$ 且 $x_1\neq x_2$，有

$$\langle (F(x_1)-F(x_2))^T,x_1-x_2\rangle> 0$$

成立，则称函数 F 在 D 上是严格单调的。

定理 1.3.2 如果 F 在 D 上是严格单调的，那么若变分不等式 $VI(F,D)$ 有解，则解必唯一。特别，当 $F'(x)$ 正定时，$VI(F,D)$ 的解唯一。

证明：假设 $x_1,x_2\in D$ 均为变分不等式问题的解，且 $x_1\neq x_2$。因为 x_1,x_2 均为解，故有

$$\langle F(x_1)^T,x-x_1\rangle\geqslant 0,\qquad \forall x\in D, \tag{1.5}$$

$$\langle F(x_2)^T,x-x_2\rangle\geqslant 0,\qquad \forall x\in D. \tag{1.6}$$

用 x_2 代替 (1.5) 式中的 x，x_1 代替 (1.6) 式中的 x，并且将两式相加后可得

$$\langle (F(x_1)-F(x_2))^T,x_2-x_1\rangle\geqslant 0,$$

显然与 F 是 D 上的严格单调函数的题设条件相矛盾。

1.3.3 求解变分不等式和非线性互补问题的光滑化方法

用于求解变分不等式问题的算法有很多，如投影算法、线性化方法、分解算法等。我们先简单介绍求解非线性互补问题的光滑化方法。

因为许多重要的实际应用都与求解形如 (1.4) 式的非线性互补问题 ($NCP(F)$) 有关，对其解法的研究也因此引起了广泛的关注 [168, 169]．由非线性互补问题的定义，见公式 (1.4)，不难看出 $NCP(F)$ 等价于求解如下的非线性方程组

$$\min\{x,\, F(x)\} = 0, \tag{1.7}$$

其中向量值函数的极小值按分量进行。非线性互补问题还有其它等价的非线性方程组。我们引入 Fischer-Burmeister 函数，$\varphi: R^2 \to R$，

$$\varphi(u,v) = u + v - \sqrt{u^2+v^2}. \tag{1.8}$$

该函数的一个重要性质是：

$$\varphi(u,v) = 0 \Leftrightarrow u \geqslant 0,\, v \geqslant 0,\, uv = 0.$$

令

$$\varphi_i(x) = \varphi(x_i\,, F_i(x)), \quad i \in \{1,\ldots,n\},$$

则非线性互补问题 (1.4) 等价于如下的非线性方程组

$$\Phi(x) = (\varphi_1(x),\ldots,\varphi_i(x),\ldots,\varphi_n(x)) = 0.$$

某些变分不等式也可以转换为非线性方程组求解。考察 $VI(F,D)$，其中 D 由下面形式给出：

$$D = \{x | g_i(x) \geqslant 0,\, i = 1,\ldots,m,\, h_j(x) = 0,\, j = 1,\ldots,p\}.$$

设 x^* 是 $VI(F,D)$ 的解，且在该处某种约束品性 (如有效约束的梯度线性无关等) 成立，则存在 $\lambda_i^*,\, i = 1,\ldots,m,\, \mu_j^*,\, j = 1,\ldots,p$，使得 x^*、λ^*、μ^* 满足下面的 KKT 条件：

$$\begin{cases} F(x) - \sum\limits_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla g_i(x) - \sum\limits_{j=1}^{p} \mu_j \nabla h_j(x) = 0, \\ \lambda_i \geqslant 0, \quad g_i(x) \geqslant 0, \quad i = 1,\ldots,m, \\ h_j(x) = 0, \quad j = 1,\ldots,p. \end{cases} \tag{1.9}$$

上面的 KKT 系统可等价地写成如下非线性方程组

$$\begin{cases} F(x) - \sum\limits_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla g_i(x) - \sum\limits_{j=1}^{p} \mu_j \nabla h_j(x) = 0, \\ \min\{\lambda_i,\, g_i(x)\} = 0, \quad i = 1,\ldots,m, \\ h_j(x) = 0, \quad j = 1,\ldots,p. \end{cases} \tag{1.10}$$

利用 Fischer-Burmeister 函数 φ，KKT 系统还可以等价地写成

$$\begin{cases} F(x) - \sum\limits_{i=1}^{m} \lambda_i \nabla g_i(x) - \sum\limits_{j=1}^{p} \mu_j \nabla h_j(x) = 0, \\ \varphi(\lambda_i,\, g_i(x)) = 0, \quad i = 1,\ldots,m, \\ h_j(x) = 0, \quad j = 1,\ldots,p. \end{cases} \tag{1.11}$$

由上面的讨论可以看出，变分不等式和非线互补问题可等价地表示为非线性方程组

$$\Phi(x)=0. \tag{1.12}$$

由上面的分析也可以看出算子 $\Phi: R^n \to R^n$ 一般不是光滑的，因此不可以用熟知的收敛速度快且迭代格式简单的古典 Newton 法来求解. 近 20 年来，求解形如 (1.9)、(1.10)、(1.11) 的非光滑 Newton 法和光滑化 Newton 法的研究得到了快速发展. 这些算法保持了古典 Newton 法快速收敛的优点。 Qi 和 Sun 提出了非光滑 Newton 法 [170]，设算法中每次迭代求解如下的 Newton 方程

$$V_k d=-\Phi(x^k), \qquad V_k \in \partial\Phi(x^k), \tag{1.13}$$

其中，$\partial\Phi(x)$ 为函数 Φ 在点 $x\in R^n$ 处的广义雅可比 (Generalized Jacobian)。这个方法在一定的条件下具有局部的超线性或二次收敛性. 借助特定的函数 Φ，Jiang 和 Qi[171]、Facchinei 和 Soares[172]、Kanzow 和 Kleinmichel[173] 等研究了具有全局收敛性且局部快速收敛性的非光滑 Newton 型算法.

求解形如 (1.9)、(1.10)、(1.11) 的另一类颇受欢迎的算法是光滑化 Newton 法. 其基本思想如下，构造光滑函数 $\Phi_u: R^n \to R^n$，其中参数 $u>0$，Φ_u 满足条件，当 $u\to 0$ 时，$\Phi_u \to \Phi$. 通过求解光滑方程组

$$\Phi_u(x)=0, \tag{1.14}$$

逼近 (1.12) 的解. 例如，对于由公式 (1.8) 所给函数 $\varphi(u,v)$，可以定义带有光滑参数 ε 的函数

$$\varphi_\varepsilon(u,v)=u+v-\sqrt{u^2+v^2+2\varepsilon}, \tag{1.15}$$

其中 $\varepsilon>0$. 类似定义

$$\varphi_i^\varepsilon(x)=\varphi_\varepsilon(x_i,F_i(x)), \qquad i\in\{1,\ldots,n\},$$

并且令 $z:=(\varepsilon,x)\in R\times R^n$，则求解非线性互补问题 (1.4) 等价于解

$$H(z):=\begin{pmatrix}\varepsilon\\ \varphi_1^\varepsilon(x)\\ \vdots\\ \varphi_n^\varepsilon(x)\end{pmatrix}=0. \tag{1.16}$$

利用求解 (1.16) 逼近 (1.12) 的解的方法称为光滑化法, Chen 和 Managasarian[174]、Chen 和 Harker[175]、Burker 和 Xu[176] 等许多学者都对该类算法进行了研究. 光滑化方法在每一次的迭代中都求解如下的 Newton 方程

$$\Phi_u'(x^k)d=-\Phi_u(x^k), \tag{1.17}$$

或

$$H'(z^k)d_k=-H(z^k). \tag{1.18}$$

在一定条件下, 光滑化 Newton 法具有全局收敛性和超线性 / 二次收敛性 [177~180]。

我们将在本文的第七章将光滑化 Newton 法应用于求解一个供应链网络平衡模型。

1.4 问题的提出及本文的主要研究内容

1.4.1 问题的提出

虽然供应链提出的时间并不长，但它已经引起了人们的广泛关注。特别是国际上一些知名企业在供应链实践中所取得的巨大成功，使得人们逐渐认识到供应链管理是提升企业核心竞争力的重要手段，也引起国内外企业界和学术界的重视。由于供应链管理是对由供应商、制造商、分销商、零售商直到最终客户等组成的网络中的物流、信息流、资金流进行管理的过程，是涉及到多个互相独立的利益主体的复杂系统，使得供应链管理在实践过程中还存在着许多急需解决的问题，如供应链合作伙伴如何选择、供应链成员间信息不对称、缺乏协调机制、利润分配问题等．都是造成供应链整体的效率低下的主要原因。因此，对供应链进行深入研究具有重要的理论和实践价值。

一般来说，供应链结构可分为集中式控制 (Central control) 和分散式控制 (Decentralized control) 两种。集中式控制结构由单一决策者 (核心企业或第三方企业) 利用供应链中的全部信息进行决策，目标是使得供应链整体利润最大化。而分散式供应链中的各成员企业都具有较强的独立性，是以自身利润最大化为目标来独自作出决策。通常，分散式供应链的总体绩效要低于集中式供应链，而为了使分散式供应链的整体绩效接近集中式供应链，必须采用协调机制来促进供应链上下游企业之间的合作和协调，因此对于不同形式的供应链协调策略的研究越来越受到重视。而作为实现供应链协调的有效途径，供应链契约及其对供应链协调的影响都成为供应链管理中一个重要的研究方向。

特别是对于一类短生命周期产品，往往具有需求不确定，销售季节时间固定且较短的特点，分销商需要在销售季节到来之前通过预计产品的需求量来决定最优的订货量，而制造商又会根据分销商的订货行为来制定自己的生产计划。供应链中的买卖双方往往都需要承担由于缺货和库存积压带来利润损失的市场风险，同时，成员间信息的不对称还很可能造成需求信息在传递过程中的放大和失真现象，即“牛鞭效应”，使得供应链中成员的决策出现偏差，导致供应链的利润损失。为了努力降低供应与需求之间的矛盾，越来越多的，特别是与生命周期较短的产品有关的企业都越来越重视对供应链有效的管理。因此，针对短生命周期产品的特点，如何设计有效的协调策略，提高供应链成员间的信息共享程度，使得产品的供应方和买方的生产与订货行为与供应链整体最优解一致，从而提高供应链整体服务水平并且增加各方的利润，显然具有非常现实的研究价值。

1.4.2 主要内容

鉴于供应链管理在理论研究与实际应用中的重要性，本文以供应链管理作为研究方向，主要研究关于短生命周期产品供应链契约中的协调订货决策问题，并且针对真实世界中可能出现的不同情况提出相应的协调策略，提供一种决策，使得制造商和分销商通过该策略所制定的生产和订货决策除了可以满足该产品在销售季节的随机需求，还使得供应链整体有望获得最大的期望利润，同时可使得制造商和分销商的利润较各自独立决策时的最佳利润要高．另外，还建立一个由多个制造商、多个分销商以及多个产品组成的供应链网络模型，该模型可以处理多个决策制定者以及他们独自的决策行为的情形．具体内容如下：

(1) 首先研究由单一制造商、单一分销商、单一产品组成的供应链契约中带有回购策略的协调订货问题，该产品具有生命周期短，且市场需求不确定的特点．协调订货决策问题，就是为了减少由于供应链各成员在试图使自己的利益最优化的过程中，造成供应链整体利润的损害而提出的一种解决方法，通常采用一些激励手段，如价格折扣、回购策略等，以调整供应链成员关系来协调供应链，使分散的供应链整体利润与一个集中的系统下的利润尽量相等．通过分析发现，分销商选择合适的进货策略可为其带来更高的期望利润，同时使得供应链整体期望利润达到最佳．制造商可以通过提高回购价格作为与分销商在订货决策问题上的协调机制，刺激分销商的最佳经济订货量趋于供应链整体最佳经济订货量，同时使得供应链整体期望利润有望与供应链整体最佳期望利润趋向一致．

(2) 一般情况下，制造商总会尽力使产品可以按合同要求按时运达分销商处，但在实际的生产过程中，各种因素都可能造成制造商无法按时交货，随之也会带来其下游买方因暂时无法满足市场需求而造成的利益损失．我们考虑在产品的市场需求不确定，产品的销售季节具有明确的开始和结束时间，以及制造商的交货日期不确定的条件下，由单一制造商、单一分销商和单一产品组成供应链契约中的协调订货决策问题．这里，制造商承诺在销售季节结束时，将分销商处的剩余产品全部购回，而且一旦交货日期推迟，还会重新调整回购价格来弥补分销商的部分损失．研究结果表明，制造商通过提出合理的回购价格可以与分销商在订货决策问题上进行协调．

(3) 在已有的大多数关于供应链协调的文献中，虽然都通过采取有效的协调机制带来供应链整体利润的增长，却很少有提到增长的这部分利润应如何在供应链成员之间进行分配．考虑到合理的利润分配是实现供应链协调的关键，同样是在产品的市场需求不确定，产品的销售季节具有明确的开始和结束时间，以及制造商的交货日期不确定的条件下，我们引入数量弹性策略，即允许分销商在交货日期延迟的情形下减少订货量，但同时也要对由此造成的制造商处产品积压而带

来的利润损失进行一定比例的补偿. 我们的研究表明制造商可以通过提出合理的批发价格和回购价格与分销商在订货决策问题上进行协调, 不仅能有效实现系统的协调, 并且与产品的需求分布无关, 最重要的就是可以实现系统利润的灵活分配, 且分配结果满足“风险越大, 利润越高”的市场法则.

(4) 在需求预测更新的条件下, 我们通过建立供应链契约使得制造商和分销商在短生命周期产品的订货决策上达成协调的问题进行了讨论. 由于分销商总是会在销售季节到来之前订货, 且往往距离销售季节的开始还有一段较长的时间, 制造商相应会采用一种生产周期较长, 成本较低, 这里称为第一阶段的生产模式来生产, 但随着销售季节的临近, 分销商所掌握的产品需求信息必然会不断的更新, 且更加准确. 制造商允许分销商根据更新后的需求信息来灵活调整订货量, 即提供两次订货的机会, 如果调整后的订货量低于原订货量, 分销商愿意对制造商由此产生的产品积压带来的利润损失进行一定比例的补偿, 但一旦高于原订货量, 制造商则考虑是否需要启动与第一阶段的生产模式相比生产周期更短, 相应生产成本也会更昂贵的生产模式来及时满足需求. 得到了和前面类似的结论, 即制造商同样可以通过提出合理的产品批发价格和回购价格与分销商在订货决策问题上进行协调, 该协调策略与产品的需求分布无关, 在有效实现系统的协调的同时, 也能有效实现系统利润的灵活分配, 且同样满足“风险越大, 利润越高”的市场法则.

(5) 考虑到供应链是由众多的决策制定者, 如原材料的供应商、制造商、分销商、零售商、需求市场等成员所组成的链状或网状结构, 建立一个由制造商、分销商、顾客所组成的多层且带有竞争性的供应链网络平衡模型. 通过对模型中不同的决策制定者构造其最优条件, 得到了供应链整体的平衡条件, 将其表示成有限维的变分不等式形式, 并应用光滑化 Newton 法来进行求解. 我们首先对模型分析解的存在、唯一性, 还提出保证所给算法收敛的条件, 同时建立算法的二次收敛性定理, 并通过数值算例验证该算法, 本文结果对解决实际问题中的复杂供应链问题具有非常实际的应用价值.

本文的章节安排如下: 第一章对供应链管理、供应链协调、供应链网络模型及其相关问题的研究进行综述, 并简要介绍本文的主要内容. 第二章研究需求不确定条件下的一类供应链契约中的协调订货问题. 第三章在需求和交货日期均不确定的条件, 研究带回购策略的协调订货决策问题. 第四章引入数量弹性策略, 重新对需求和交货日期均不确定条件下的协调订货问题进行讨论. 第五章在需求预测更新的条件下, 提出了两阶段生产模式下的供应链协调策略. 第六章建立了一个供应链网络平衡数学模型, 并通过转换为等价的非光滑方程组, 应用光滑化 Newton 法求解, 建立算法的收敛性定理. 最后, 在总结本文所做工作的基础上, 对进一步的研究工作进行了展望.

第 2 章 需求不确定的供应链契约中协调订货决策问题

2.1 引言

数量折扣是供应链协调中最为常见的激励机制，已有的关于协调订货决策问题的研究中大多是在需求确定的条件下研究价格折扣方案下的订货批量对买卖双方利益的影响 [114,115,118,181~183] 。

本章，我们研究由单一制造商，单一分销商和单一产品组成的供应链契约中的协调订货决策问题．制造商和分销商通过协调确定订货批量来满足该产品在销售季节的随机需求，使得供应链整体期望利润达到最优．假设该产品具有销售季节短，需求不确定等特点。分销商会在销售季节到来之前订购一批产品来补充库存，以满足需求。进入销售季节之后，实际需求量很可能会与分销商在售季前的预测有差距，特别是接近销售季节的尾声，如果实际需求量超过其库存，则分销商会考虑是否向制造商发出第二个订单来补充库存以获得更高利润．考虑到第二次订货发生在销售季节即将结束的时候，往往会要求所订购的产品尽快生产完毕，其成本很可能会比销售季节开始之前订货时的要高 [122, 184] 。但如果实际需求量低于分销商的库存，则会造成产品积压，带来分销商的利益损失．而制造商始终根据分销商的订单来决定生产时间和生产数量，并不持有库存． Weng 考虑了一个由单一买方、单一卖方、单一产品组成的联合经济订货问题，该产品同样具有生命周期短，需求不确定等特点，只是对于销售季节结束时的剩余产品，采取的是低价处理或是销毁的方式将其脱手，避免由于库存积压造成更大损失，同时以制造商的数量折扣作为激励手段，来协调买方的最佳经济订货量与供应链整体的最佳订货量达成一致 [146] ．但是， Weng 只考虑了买方的订货成本，而未考虑产品送达时的库存持有成本及卖方同样须承担的相应的订货成本．本章，我们将退货策略引入该模型，即制造商承诺在销售季节结束时将剩余产品以低于批发的价格全部收回，得到制造商可通过以调整退货价格而不是采取数量折扣来影响买方的订购行为．此外，我们还将考虑交易过程中可能发生的订货成本、库存持有成本、生产准备成本等．研究分销商除了在销售季节前完成一次订单外会根据实际需求可能在售季尾声完成第二个订单的最佳经济订货决策问题，并将其与传统的在产品的整个销售过程中只在销售季节前完成一次订单的带有回购策略的供应链契约的经济订货量作比较，得到前者分销商、制造商及供应链整体都将获得更高的期望利润，指出制造商可通过采取合适的回购价格提高供应链的协调效率．

2.2 模型的建立

在供应链的各环节中，买卖双方的目标通常都是为了获得各自最大的利润，下面分别从分销商和制造商分析其利润模型．分销商根据制造商所公布的产品批发价格来决定一个经济订货量，使得自己的期望利润最大．通常情况下，该订货量使得分销商利润最大，但并不能保证制造商同时达到最佳的期望利润，因此制造商很可能对如何与买方协调来影响其订购行为更感兴趣．为了促使分销商订货同样带来制造商利润的增长，制造商不得不采取一些激励手段．如制造商可以承诺在销售季节结束时将分销商处所有剩余产品以低于批发的价格全部收回，若双方的利润都有所增长，则这种激励手段显然是一种有效的协调机制．

我们先讨论分销商和制造商的成本构成．在分销商的成本中包括单位采购成本 (即单位批发价格) 、单位过剩成本、单位缺货成本、单位平均库存维持成本 (通常以占单位销售价格的百分比来表示) ，以及每次订货时产生的订货成本和运输成本．制造商承担的成本包括单位生产成本，当分销商订单到达时同样也会发生订货准备成本，由订货过程成本、生产准备成本和运输成本等组成．在销售季节结束时，若分销商处有剩余的未售出产品，则制造商还须承担单位回购成本；若分销商处仍有需求无法满足，则还可能会发出第二份订单．这样除了买卖双方须承担由于又一次订货发生的交易成本，分销商通常对第二批订单有特殊要求，如要求制造商快速反应，分销商还要承担由于制造商为了满足其要求，临时改变生产计划时造成的损失．

为了陈述问题的方便，我们引入了以下记号：

x　产品的随机需求

d　产品的平均需求量

p　单位产品的零售价格 (分销商单位产品的销售价格)

w　单位产品的批发价格 (制造商单位产品的销售价格)

s　单位产品的残余价值 (制造商的单位回购价格)

c　单位产品的生产成本

Q　分销商在售季初的订货量

C_m　分销商在售季末补货时，制造商改变生产计划的费用

h　分销商的单位产品的库存维持成本所占单位销售价格的比例

M_i　分销商第 i 次订货时，制造商承担的订货准备成本
(包括订货成本，生产准备成本，运输成本， $i = 1, 2$)

R_i　分销商第 i 次订货时承担的订货成本和运输成本 ($i = 1, 2$)

C_u　单位缺货成本 ($C_u = p - w$)，也是分销商单位产品所获利润

C_o　单位产品的过剩成本 ($C_o = w - s$)

在建立模型之前，还需提出一些适当的假设 [185]。我们假设该产品生命周期短，需求 x 是连续的随机变量，密度函数为 $f(x)$，且对 $\forall x>0$，有 $f(x)>0$ 且 $f'(x)<0$，其分布函数为 $F(x)=\int_0^x f(x)dx$。通常情况下，随机需求的概率分布可以由传统数据或其它方法进行估计。另外，假设制造商和分销商是合作伙伴关系，愿意与对方分享如产品的需求、售价以及成本构成等私有信息 [33, 97, 186]。制造商、分销商可以完全分别控制批发价格、回购价格和零售价格。制造商根据分销商的订单安排生产时间和生产数量，不持有库存，因而不考虑单位库存维持成本，且其单位生产成本不变，并且承诺会以低于批发价格在销售季节结束时回购所有剩余产品。为了保证制造商不会因为产品的销量不大而出现利润为负的情况，还要求 $w-c>s$。

2.2.1 分销商的期望利润模型

分销商的决策问题就是决定合适的订货数量使其达到最大的预期利润。分销商首先在售季初订货 Q，以满足未来可能的需求 x。若在销售季节尾声，$x\leqslant Q$，则分销商可将多余的产品退还给制造商，此条件下分销商利润可表示为

$$RP_2(x|x\leqslant Q)=C_ux-C_o(Q-x)-hp\,Q-R_1.$$

若实际需求 $x>Q$，则分销商需决定是否补货，以避免因库存不足而承担的缺货成本。假定 q 为分销商决定是否补货的分界点，即若 $x-Q>q$ 时，分销商会决定购进第二批货物，且订购量为 $x-Q$。由于分销商往往要求制造商快速反应，以使得所购商品赶在销售季节结束前及时到达，因此，分销商应承担生产商为满足其订单要求而临时改变生产计划的损失以及生产准备费用，这里合计为 C_m。否则，分销商宁可承担由于缺货造成的利润流失而避免可能更大的损失。其利润可分别表示为

$$RP_2(x|Q<x\leqslant Q+q)=C_uQ-C_u(x-Q)-hp\,Q-R_1,$$

$$RP_2(x|x>Q+q)=C_ux-hp\,x-R_1-R_2-C_m.$$

关于 q 的选取，分销商会以自己的利润得失作为衡量标准，即是否会在销售季节尾声补充库存取决于补货后所带来的利润增长与不补货所流失的利润之差是不是非负来决定。因此，若有

$$RP_2(x|x>Q+q)-RP_2(x|Q<x\leqslant Q+q)\geqslant 0,$$

即当 $x-Q\geqslant\dfrac{R_2+C_m}{2C_u-hp}$ 时，分销商会决定补进第二批产品，取其下界

$$q=\frac{R_2+C_m}{2C_u-hp} \tag{2.1}$$

作为分销商决定补货与否的分界点.

将分销商在补货策略下的预期收益记为 $RP_2(Q)$ ，就是三种条件下利润的期望值的总和。

$$\begin{aligned} RP_2(Q) &= \int_0^Q RP_2(x|x \leqslant Q)f(x)dx + \int_Q^{Q+q} RP_2(x|Q < x \leqslant Q+q)f(x)dx \\ &\quad + \int_{Q+q}^{\infty} RP_2(x|x > Q+q)f(x)dx \\ &= C_uQ + \int_0^Q (C_u + C_0)(x-Q)f(x)dx - \int_Q^{Q+q} C_u(x-Q)f(x)dx \\ &\quad + \int_{Q+q}^{\infty} ((C_u - hp)(x-Q) - R_2 - C_m)\, f(x)dx - hp\,Q - R_1. \end{aligned} \tag{2.2}$$

若分销商不采取补货策略，即整个销售过程中只在售季前订货 Q ，可认为此时 $q \to +\infty$ 。如果到销售季节结束时实际需求 $x < Q$ ，同样可将剩余产品以退货价格 s 返还给制造商，此条件下分销商的预期收益 $RP_1(Q)$ 为

$$RP_1(Q) = C_uQ + \int_0^Q (C_u + C_0)(x-Q)f(x)dx - \int_Q^{\infty} C_u(x-Q)f(x)dx - hp\,Q - R_1. \tag{2.3}$$

2.2.2 制造商的期望利润模型

假设制造商根据分销商的订货次数和订货量安排生产计划，并不保有库存，因而也不发生库存维持成本. 若分销商采取补货策略，当需求 $x \leqslant Q$ 时，制造商的利润为

$$MP_2(x|x \leqslant Q) = (w-c)Q - s(Q-x) - M_1.$$

若需求量 x 介于 Q 与 $Q+q$ 之间时，分销商处无多余产品退还给制造商处，则有

$$MP_2(x|Q < x \leqslant Q+q) = (w-c)Q - M_1.$$

当需求量 $x > Q+q$ 时，分销商会决定根据需求 x ，补进第二批产品 $x-Q$. 此条件下的制造商的利润为

$$MP_2(x|x > Q+q) = (w-c)x - M_1 - M_2.$$

可见当分销商下第二批订单时，会对制造商利润造成一定影响. 作为制造商，当然不愿意由于分销商的订货策略造成自己的利润损失，如果有

$$MP_2(x|x > Q+q) - MP_2(x|Q < x \leqslant Q+q) \geqslant 0$$

成立，即若分销商第二批订货量 $x-Q \geqslant \dfrac{M_2}{w-c}$，则制造商也可从中获得更高的利润．取其下界 $q'=\dfrac{M_2}{w-c}$ 作为补货策略对其利润影响的分界点。对于分销商和制造商而言，只有当第二次订货可以给双方都带来更多的利润，分销商才会在季末补货，同时制造商也愿意开展第二次生产来满足分销商的订单要求。假设在供应链契约模型中，分销商和制造商是合作伙伴关系，共享需求信息及商品的批发价格、零售价格等信息，则分销商和制造商可以通过调节其各自的售价使得 $q=q'$，即补货策略对分销商利润影响的分界点与对制造商利润影响的分界点趋于一致，实现销售渠道的协调．

制造商的期望利润为

$$\begin{aligned} MP_2(Q) &= \int_0^Q MP_2(x|x\leqslant Q)f(x)dx+\int_Q^{Q+q} MP_2(x|Q<x\leqslant Q+q)f(x)dx \\ &\quad +\int_{Q+q}^{\infty} MP_2(x|x>Q+q)f(x)dx \\ &= (w-c)(Q+\int_{Q+q}^{\infty}(x-Q)f(x)dx)+s\int_0^Q(x-Q)f(x)dx \\ &\quad +M_2F(Q+q)-(M_1+M_2). \end{aligned} \tag{2.4}$$

若分销商不采取补货策略，制造商的预期利润可以表示为

$$MP_1(Q)=(w-c)Q-M_1+s\int_0^Q(x-Q)f(x)dx. \tag{2.5}$$

2.2.3 供应链的整体期望利润模型

分销商采取补货策略下的供应链整体预期利润即是制造商和分销商在该策略下各自期望利润的总和，即

$$\begin{aligned} & JP_2(Q)=MP_2(Q)+RP_2(Q) \\ =\ & (p-c)Q+p\int_0^Q(x-Q)f(x)dx-\int_Q^{Q+q}(p-w)(x-Q)f(x)dx \\ & +\int_{Q+q}^{\infty}(p-c-hp)(x-Q)f(x)dx-(R_2+C_m+M_2)(1-F(Q+q)) \quad (2.6) \\ =\ & (p-c-hp)d-R_1-M_1-(R_2+C_m+M_2)(1-F(Q+q)) \\ & +\int_0^Q(c+hp)(x-Q)f(x)dx-\int_Q^{Q+q}(p-w+p-c-hp)(x-Q)f(x)dx \\ & -hpQ-R_1-M_1. \end{aligned} \tag{2.7}$$

同样可以得到分销商不采取补货策略下的供应链整体预期利润为

$$\begin{aligned} JP_1(Q) &= MP_1(Q)+RP_1(Q) \\ &= (p-c)Q+p\int_0^Q(x-Q)f(x)dx-\int_Q^{\infty}(p-w)(x-Q)f(x)dx \\ &\quad -hpQ-R_1-M_1. \end{aligned} \tag{2.8}$$

2.3 补货策略对订货决策问题的影响

无论分销商销售该产品时是否采取补货策略，都需要在销售季节到来之前决定季初的订货量．在决策过程中，分销商可能未与制造商进行协调，即分销商仅考虑如何使自己的利润达到最优选择合适的订货量，或是与制造商进行协调后，考虑使总体利润最优来决定订货量．因此，在两种订货策略下，分别会存在一个未经协调的最佳经济订货量和协调机制下的最佳经济订货量．本节将其分别进行比较，说明补货策略对订货决策问题的影响．

定理 2.3.1 存在非负的 Q^*_{r1}、Q^*_{r2}，分别使得分销商期望利润在不采取补货策略和采取补货策略时取得最大值，且有 $Q^*_{r1} > Q^*_{r2}$．

证明: 易知存在唯一的 $Q^*_{r1} > 0$，满足

$$\frac{\partial RP_1(Q^*_{r1})}{\partial Q} = 2(p-w) - hp - (p-w+p-s)F(Q^*_{r1}) = 0, \tag{2.9}$$

使得 $RP_1(Q)$ 在 Q^*_{r1} 处取到最大值． 由 $s < w$, 且对 $\forall\, x > 0$, $f'(x) < 0$, 易知对 $\forall\, Q > 0$, 都有 $\dfrac{\partial^2 RP_2(Q)}{\partial Q^2} < 0$．类似也存在

$$\frac{\partial RP_2(Q^*_{r2})}{\partial Q} = (2(p-w) - hp)F(Q^*_{r2}+q) - (p-w+p-s)F(Q^*_{r2}) = 0, \tag{2.10}$$

的唯一解 $Q^*_{r2} > 0$，使得 $RP_2(Q)$ 取到最大值．且当 $Q \to +\infty$ 时，$\dfrac{\partial RP_2(Q)}{\partial Q} < 0$, $Q \to 0$ 时，$\dfrac{\partial RP_2(Q)}{\partial Q} > 0$，即

$$\begin{cases} \dfrac{\partial RP_2(Q)}{\partial Q} < 0, \quad RP_2(Q) < RP_2(Q^*_{r2}), \qquad Q > Q^*_{r2}; \\ \dfrac{\partial RP_2(Q)}{\partial Q} > 0, \quad RP_2(Q) < RP_2(Q^*_{r2}), \qquad Q^*_{r2} > Q > 0, \end{cases} \tag{2.11}$$

由公式 (2.9) 可得 $\dfrac{\partial RP_2(Q^*_{r1})}{\partial Q} < 0$, 知 $Q^*_{r1} > Q^*_{r2}$, $RP_2(Q^*_{r1}) < RP_2(Q^*_{r2})$．

上面的定理表明，在补货策略下，分销商未经协调的最佳经济订货量低于相应在不采取补货策略下得到的最佳经济订货量．这样有助于减少分销商的库存积压量，而对于分销商和制造商经过协调后得到的供应链整体最佳经济订货量也存在类似的结论．

定理 2.3.2 若考虑供应链整体利润，存在最佳经济订货批量 $Q^*_{j1}, Q^*_{j2} > 0$，使得相应的供应链整体利润 $JP_1(Q)$、$JP_2(Q)$ 在不补货策略与补货策略下分别达到最优，且 $Q^*_{j1} > Q^*_{j2}$．

类似于定理 2.3.1 的证明方法，可推得定理成立。而且可以得到

$$\frac{\partial JP_2(Q_{j2}^*)}{\partial Q} = (p-w+p-c-hp)F(Q_{j2}^*+q)-(2p-w)F(Q_{j2}^*)=0, \quad (2.12)$$

以及

$$\begin{cases} \dfrac{\partial JP_2(Q)}{\partial Q} < 0, \quad JP_2(Q) < JP_2(Q_{j2}^*), \qquad Q > Q_{j2}^*; \\ \dfrac{\partial JP_2(Q)}{\partial Q} > 0, \quad JP_2(Q) < JP_2(Q_{j2}^*), \qquad Q_{j2}^* > Q > 0, \end{cases} \quad (2.13)$$

成立。

上面的两个定理表明，对分销商而言，无论从其本身的利益出发还是从供应链的整体利益出发，采用补货策略都可以得到比在无补货策略下更低的最佳经济订货量。这样无疑可以减少分销商的库存压力，提高资金利用率。

2.4 补货策略及协调机制对供应链整体及成员期望利润的影响

在这一节中，通过比较分销商是否采取补货策略，或是否接受协调机制下的最佳期望利润及供应链整体利润，得到补货策略及协调机制均有利于分销商、制造商和供应链整体获得更高的期望利润。

下面的定理表明，分销商从自身的利益出发，采用补货策略可获得更高的利润，且供应链也有望获得更高的整体最佳利润。

定理 2.4.1 分销商在补货策略下的最大期望利润高于其在无补货策略下的最大期望利润，即 $RP_2(Q_{r2}^*) > RP_1(Q_{r1}^*)$ ，同时还会带来更高的供应链整体最佳期望利润，即 $JP_2(Q_{j2}^*) > JP_1(Q_{j1}^*)$.

证明：令

$$\begin{aligned} \Delta RP(Q) &= RP_2(Q) - RP_1(Q) \\ &= \int_{Q+q}^{\infty} C_u(x-Q)f(x)dx + \int_{Q+q}^{\infty}((C_u-hp)(x-Q)-R_2-C_m)f(x)dx, \end{aligned}$$

则 $\dfrac{\partial \Delta RP(Q)}{\partial Q} = (2C_u-hp)(F(Q+q)-1) < 0$, 且 $Q\to\infty$ 时，有 $\Delta RP(Q)\to 0$ ，可知 $RP_2(Q_{r1}^*)-RP_1(Q_{r1}^*) > 0$, 由定理 2.3.1 ，有 $RP_2(Q_{r_2}^*) > RP_1(Q_{r_1}^*)$ 成立。类似的方法，还可以证明在补货策略的影响下，供应链整体有望获得更高利润。

$$\begin{aligned} \Delta JP(Q) &= JP_2(Q) - JP_1(Q) \\ &= (2p-w-c-hp)\int_{Q+q}^{\infty}(x-Q)f(x)dx - (R_2+C_m+M_2)(1-F(Q+q)), \end{aligned}$$

$$\frac{\partial \Delta JP(Q)}{\partial Q} = (p-w+p-c-hp)(F(Q+q)-1) < 0,$$

则 $\Delta JP(Q)$ 是单调递减函数。又由 $Q \to \infty$, 有 $\Delta JP(Q) \to 0$, 则 $\Delta JP(Q_{j1}^*) > 0$, 即 $JP_2(Q_{j1}^*) > JP_1(Q_{j1}^*)$ 。由定理 2.3.2，可得 $JP_2(Q_{j2}^*) > JP_1(Q_{j1}^*)$，定理得证。

实际上，分销商往往只根据自己的利润来决定订货量，下面的定理在补货策略下，比较了从供应链整体利益出发和从分销商利益出发得到的最优订货量之间的关系以及相应的最佳利润之间的关系.

定理 2.4.2 在补货策略下，供应链整体最优订货量大于分销商从自身利润出发所决定的最优订货量，即 $Q_{j2}^* > Q_{r2}^*$，且若分销商仅考虑自身利润来决定最初的订货量，还会使得供应链整体期望利润低于最佳水平，即 $JP_2(Q_{r2}^*) < JP_2(Q_{j2}^*)$ 。

证明: 不难知道 $\dfrac{\partial JP_2(Q_{r2}^*)}{\partial Q} = (w-c)F(Q_{r2}^*) - s\,F(Q_{r2}^*)$, 由前假设 $w-c>s$, 及 $\forall x>0, f'(x)<0$, 容易得到 $\dfrac{\partial JP_2(Q_{r2}^*)}{\partial Q} > 0$ 。由 (2.13) 式可知 $Q_{r2}^* < Q_{j2}^*$, 且 $JP_2(Q_{r2}^*) < JP_2(Q_{j2}^*)$，定理得证。

上面的定理表明，分销商考虑自身利润最优得到的经济订货量与供应链整体利润最优时所确定的经济订货量可能不一致。为了使得分销商单方所决定的订货量同样可以带来供应链整体利润最优，制造商可以通过调节回购价格 s 来影响分销商的经济订货量。下面，我们分析这种可能性，我们的分析表明适当地调节回购价格 s 可增加供应链整体期望利润。

定理 2.4.3 若制造商提高回购价格，使调节后的回购价格 s' 仍然满足前假设条件 $w-c>s'>s$，则有利于刺激分销商增加初次订货量，在不影响供应链整体最佳期望收益的同时，使得供应链整体期望利润提高但却达不到整体最佳的期望利润。

证明: 由 (2.12) 式可知，回购价格并不影响供应链整体的最佳经济订货量，由 (2.6) 式可知也不会影响到供应链整体最佳期望利润。但若制造商将回购价格增加至 $s'(s'>s)$，且仍满足 $s'<w-c$, 由定理 2.3.1 知必存在唯一的 $Q_{r3}^*>0$，使得 $\dfrac{\partial RP_2(Q_{r3}^*, s')}{\partial Q} = 0$ 成立。因为 $\dfrac{\partial RP_2(Q_{r3}^*, s)}{\partial Q} = (s-s')F(Q_{r3}^*) < 0$, 由公式 (2.11)，可得 $Q_{r3}^* > Q_{r2}^*$ 。又由 $\dfrac{\partial JP_2(Q_{r3}^*)}{\partial Q} = (w-c)F(Q_{r3}^*+q) - s'F(Q_{r3}^*) > 0$, 及公式 (2.13)，可知 $Q_{r3}^* < Q_{j2}^*$，即 $Q_{r2}^* < Q_{r3}^* < Q_{j2}^*$，当然会有 $JP_2(Q_{r2}^*) < JP_2(Q_{r3}^*) < JP_2(Q_{j2}^*)$ 。

可见，适当调节回购价格，可以增加供应链的整体利润，但与供应链整体的最佳期望利润仍然还有一定差距。若制造商愿意以高于产品批发价与生产成本之

差的回购价格来与分销商在最初订货量的决策问题上进行协调，可使分销商单方决策的最佳订货量与整体最佳经济订货量趋于一致。当然，多数情况下，只有制造商和分销商各自的期望利润都不会减少的情况下才会接受相应的协调方案，因此有下面定理。

定理 2.4.4 若制造商愿意承担利润为负的风险，以提高回购价格来与分销商进行协调，则分销商单方决策的季初订货量可以保证供应链整体期望利润达到最优的必要条件是调节后的回购价格为

$$s^* = \frac{(2p-w)(w-c)}{2p-w-c-hp}, \tag{2.14}$$

且

$$s^* \leqslant g(Q_{j2}^*)^{-1}((w-c)\,g(Q_{j2}^*+q)-(w-c)\,g(Q_{r2}^*+q)+s\,g(Q_{r2}^*)) \tag{2.15}$$

成立，其中 $g(x)=\int_0^x F(x)dx$ 。

注：易知 $s^* > w-c$ ，且只需 $2c > h\cdot w$ ，就有 $s^* < w$ 。通常情况下，单位库存维持成本只占单位售价的很小一部分，可认为该条件是自然成立的，则有 $s^* \in (w-c, w)$ ，制造商是可以接受这样一个不超过批发价格的回购价格的.

定理 2.4.4 的证明：设公式 (2.14) 成立，由公式 (2.10)、(2.12)，可得 $\frac{\partial RP_2(Q_{j2}^*, s^*)}{\partial Q} = 0$ 。即若回购价格为 s^* ，则分销商此时的最佳经济订货量恰为 Q_{j2}^* ，此时供应链整体期望利润可达到最优。但分销商是否愿意接受该回购价格，以及制造商是否愿意制定该回购价格还取决于是否可使两者的利润与原回购价格 s 水平上所得利润相比，至少不会减少。令

$$\Delta R(Q) = RP_2(Q,s) - RP_2(Q,s^*) = -(s-s^*)\int_0^Q F(x)dx.$$

由 $s^* > w-c > s$ 知对 $\forall Q > 0$ ，有 $\Delta R(Q) < 0$, 自然有 $RP_2(Q_{r2}^*, s^*) > RP_2(Q_{r2}^*, s)$, 且由 $w > s^*$, 有 $\frac{\partial^2 RP_2(Q,s^*)}{\partial Q^2} < 0$, 则 Q_{j2}^* 为 $\frac{\partial RP_2(Q,s^*)}{\partial Q} = 0$ 的唯一解，即 $RP_2(Q_{j2}^*, s^*) > RP_2(Q_{r2}^*, s^*)$, 则 $RP_2(Q_{j2}^*, s^*) > RP_2(Q_{r2}^*, s)$ 。可见提高回购价格，分销商的期望利润会随之增长，若还有公式 (2.15) 成立，则制造商的期望利润也不会因为抬高回购价格而有所损失。由

$$\begin{aligned}\Delta M(Q) &= MP_2(Q_{r2}^*, s) - MP_2(Q_{j2}^*, s^*)\\ &= -(w-c)\int_{Q_{r2}^*+q}^{Q_{j2}^*+q} F(x)dx - s\int_0^{Q_{r2}^*} F(x)dx + s^*\int_0^{Q_{j2}^*} F(x)dx,\end{aligned}$$

若希望制造商的利润至少不减少，则要求 $MP_2(Q_{r2}^*, s) - MP_2(Q_{j2}^*, s^*) \leqslant 0$, 即只要公式 (2.15) 成立，该协调机制就会被制造商和分销商所接受，同时供应链的整体利润达到最优水平。

2.5 数值模拟

本节，通过数值模拟，对补货策略下供应链契约模型中的交易成本对供应链整体期望利润的影响进行数值分析，分别考虑了需求服从指数分布和均匀分布的情形。这里，交易成本 T 包括季初和季末订货时制造商、分销商分别承担的订货成本、运输成本等及分销商承担的制造商为满足其要求而改变生产计划带来的损失的总和，即 $T=\sum_{i=1}^{2}(R_i+M_i)+C_m$ 。其中，模型中各参数分别为 $c=4, w=9, p=15, h=0.05$ 。由公式 (2.10) 可计算得到 $s=3$ 时未采取协调机制下的经济订货量 Q_{r2}^* ，进一步由公式 (2.7) 可得供应链整体期望利润 $JP_2(Q_{r2}^*)$ 。类似地，由公式 (2.12) 计算得到协调机制下的经济订货量 Q_{j2}^* ，由公式 (2.7) 得到供应链整体期望最优利润 $JP_2(Q_{j2}^*)$ 。相比之下，协调机制作用下供应链整体期望利润的增长率记为 $Increase=(JP_2(Q_{j2}^*)/JP_2(Q_{r2}^*)-1)\times 100\%$ 。

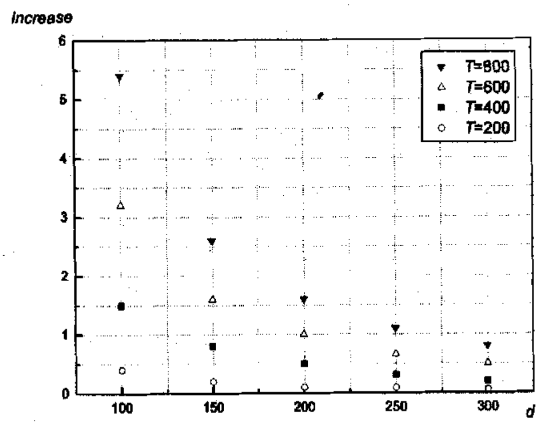

图 2.1 供应链整体期望利润的增长率 I(×100%)

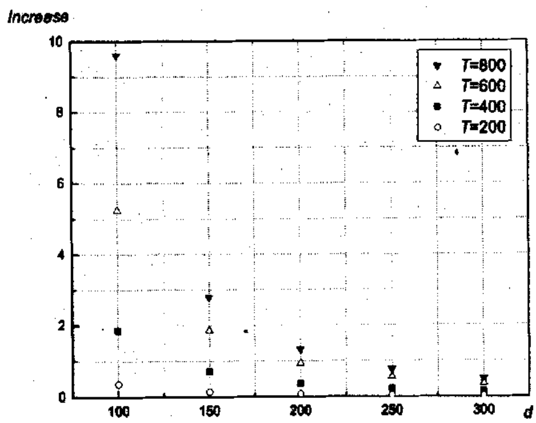

图 2.2 供应链整体期望利润的增长率 II(×100%)

图 2.1 、图 2.2 分别为需求服从指数分布和均匀分布在协调机制作用下供应链整体期望利润的增长率. 可见，协调机制对供应链整体期望利润的影响是明显的，特别是产品的平均需求量越小、交易成本越大，其影响会变得越显著.

2.6 本章小结

本章建立了由单一制造商、单一分销商、单一产品组成的两种不同进货策略下的供应链契约模型，并分析了不同的进货策略对分销商订货量、供应链各成员及整体期望利润的影响. 得到了若分销商采取除了在销售季节到来之前订购一批产品外，还会在售季即将结束时根据实际需要订购第二批产品的策略，不仅分销商个人可以获得更高的期望利润，且供应链整体期望利润也会随之增加. 同时，若制造商以提高回购价格作为与分销商在制定订货量时的协调机制，可以使得供应链更加接近甚至达到整体最佳期望利润.

第 3 章 需求和交货日期均不确定的带回购策略的协调订货决策问题

3.1 引言

本章在产品具有需求不确定，且销售季节具有明确的开始和结束时间的条件下，研究了由单一制造商、单一分销商和单一产品组成的供应链契约中的协调订货问题. 制造商和分销商通过协调确定订货量除了要满足该产品在销售季节的随机需求，还要考虑制造商可能无法按时交货的条件下供应链整体期望利润达到最优. 由于生产过程中的各种因素使得制造商可能无法按时交货，随之也会带来分销商因暂时无法满足市场需求而造成的利益损失. 此时，制造商应对分销商的损失进行赔偿. Weng 利用价格折扣来解决制造商和分销商之间的这种利益冲突，即一旦推迟了交货日期，制造商会以低于合同中所定的产品批发价格将产品卖给分销商，来弥补可能带给分销商的损失，使得交货日期的推迟并不影响分销商获得其最佳期望利润，从而与其在订货批量上进行协调 [187] . 在本章中，采用回购策略，通过调整回购价格而不是采取价格折扣来影响买方的订购行为. 同样也考虑若无法按时交货，制造商会以调整其退货价格来弥补分销商的损失，但考虑到供应链中各成员均应分担交货日期延迟的风险，因而只要求该退货价格保证分销商此情形下仍能获得在已订购的产品数量基础上的最佳期望利润.

3.2 模型的建立

在这一节中，我们提出建立模型所需的基本假设和记号. 假设该产品的销售季节具有明确的开始和结束时间，我们将其划分为若干个单位时间段，使得在每个时间段内产品的预计需求恰为 1 ，并将开始时间记为 0 ，则整个销售季节可记为 $(0,b)$, b 为正的整数. 分销商的订购合同会要求制造商在特定的交货日期将所购产品运达，但只要是在销售季节开始之前就不会影响分销商的产品销售和利润所得，所以可认为合同规定的交货日期就是销售季节的开始之际. 但由于生产环节中的不确定因素使得制造商的交付日期具有不确定性. 若产品已先于分销商所需生产出来，则制造商会花费一定费用 (即库存维持成本) 将其存放起来，等到接到订单再按时将其运出；但如果所订购产品生产出时就已经比交货日期晚，则制造商会立即将其运往分销商处，虽然不用承担库存维持成本，却要对可能带给分销商的利益流失进行补偿. 假设分销商愿意与制造商分享其产品的需求信息、零售价格及其成本构成的各个部分，使得在调整后的回购价格的基础上，分销商仍可获得相应的最佳期望利润，也只有这样，制造商延误交货日期的行为才可以被

分销商所接受。因为是双方共同承担交货日期可能推迟的风险，此时分销商的期望利润可能达不到可按时交货情形下预计的期望利润。可见，制造商的成本构成包括若产品已事先生产好需支付的单位库存维持成本 (这里用制造商的单位销售价格，即产品的单位批发价格的百分比来表示)，单位生产成本，订货准备成本 (由订货过程成本、生产准备成本和运输成本组成)，等到销售季节结束，若分销商处有剩余未售出的产品，制造商还要承担单位回购成本。而在分销商的成本中包括单位采购成本、单位过剩成本、单位缺货成本、单位平均库存维持成本 (通常以占单位销售价格的百分比来表示) 以及订货时产生的订货成本和运输成本。

为了陈述问题的方便，我们引入以下记号：

x	分销商处产品的随机需求
y	制造商的订单完成时间 (若 $y \leqslant 0$，则说明制造商先于合同规定期限将所购产品生产出，意味着可以按时交货；若 $y > 0$，则意味者交货日期相对于售季开始会推迟 y 个时间段)
$s(0)$	按时交货，即 $y \leqslant 0$ 时单位产品的残余价值，也是制造商提出分销商用于参考确定订货量的回购价格
$s(y)$	若交货推迟，即 $y > 0$，制造商调整后的回购价格以补偿分销商的损失
p	分销商处单位产品的零售价格
w	制造商处单位产品的批发价格
c	单位产品的生产成本
Q	分销商的订货量
C_m	制造商的订货准备成本 (包括订货成本，生产准备成本，运输成本等)
C_r	分销商订货时承担的交易成本 (包括订货成本和运输成本等)
C_u	单位缺货成本，这里认为就是分销商单位产品所获利润 ($C_u = p - w$)
C_o	单位产品的过剩成本 ($C_o = w - s$)
h_m	制造商的平均库存维持成本占单位批发价格的百分比
h_r	分销商平均库存维持成本占单位零售价格的百分比

这里除了 y，其余变量均为非负. 需求 x、交货日期 y 均为连续的随机变量，由于受制造商是否可按时交货的影响，需求 x 会因交货日期的不同而有所变化，分别用 $f(x|y \leqslant 0)$, $f(x|y > 0)$ 表示制造商按时交货及延期交货时需求 x 的概率分布密度函数，其相应的分布函数为 $F(x|y \leqslant 0) = \int_0^x f(x|y \leqslant 0)dx$, $F(x|y > 0) = \int_0^x f(x|y > 0)dx$. $g(y)$ 为交货日期 y 的概率分布密度函数. 另外，同样假设制造商、分销商可以分别控制产品的批发价格、回购价格和零售价格，而考虑到制造商同样应获得适当的利润，一个不超过其单位批发价格的回购价格才可以被制造商所接受，则还要求 $s(0) < w$.

接下来，我们分别就制造商和分销商建立其期望利润模型.

在未经协调的情况下，即分销商仅考虑自身期望利润最优来确定订货量，由于制造商总是尽力使得产品按合同规定按时交付，所以分销商在最初确定订货量时并未将交付日期的不确定性考虑其中，而是以制造商按时交货来预计其利润所得，就有了下面分销商的期望利润模型。

分销商首先在销售季节到来之前确定订货量 Q，以满足未来可能的需求 x。若在销售季节结束时， $x \leqslant Q$，则分销商可将剩余产品以回购价格 $s(0)$ 退还给制造商，此条件下分销商的利润表示为

$$RP(Q|\, x \leqslant Q, y \leqslant 0) = (p-w)x - C_o(Q-x) - h_r\, p\, Q - C_r.$$

若实际需求 $x > Q$，则分销商需承担由于缺货造成的利润流失，其利润为

$$RP(Q|\, x > Q, y \leqslant 0) = (p-w)Q - C_u(x-Q) - h_r\, p\, Q - C_r.$$

若分销商可以按时交货，则分销商的预期收益为上面两种条件下利润的期望值之和，

$$\begin{aligned}
RP(Q|\, y \leqslant 0) \;&=\; \int_0^{Q} RP(Q|\, x \leqslant Q, y \leqslant 0) f(x|\, y \leqslant 0)dx \\
&\quad + \int_Q^{+\infty} RP(Q|\, x > Q, y \leqslant 0) f(x|\, y \leqslant 0)dx \\
&= 2(p-w)\, Q - h_r p\, Q - C_r - (p-w)\, E(x|\, y \leqslant 0) \\
&\quad - \int_0^{Q} (2p - w - s(0)) F(x|\, y \leqslant 0)dx, \qquad (3.1)
\end{aligned}$$

其中 $E(x|\, y \leqslant 0) = \int_0^{+\infty} x\, f(x|y \leqslant 0)dx$ 表示按时交货时分销商处产品的平均需求。

由于制造商的交货日期并不确定，若交货日期被推迟，分销商处的产品需求也会随之变化，此时，制造商会重新设定一回购价格 $s(y)$，而分销商的期望利润可表示为

$$\begin{aligned}
RP(Q|\, y > 0) \;&=\; 2(p-w)\, Q - h_r p\, Q - C_r - (p-w)\, E(x|\, y > 0) \\
&\quad - \int_0^{Q} (2p - w - s(y)) F(x|\, y > 0)dx, \qquad (3.2)
\end{aligned}$$

类似有 $E(x|\, y > 0) = \int_0^{+\infty} x\, f(x|y > 0)dx$。其中 $s(y)$ 是制造商根据交货日期的推迟时间调整后的回购价格，使得 $RP(Q|\, y > 0)$ 同样可在订货量 Q 处取到最大，而具体订货量 Q 如何确定，回购价格 $s(y)$ 如何调整均会在下一节中提到。

因此，分销商在整个销售季节中的期望利润可表示如下：

$$
\begin{aligned}
RP(Q) &= \int_{-\infty}^{0} RP(Q|\,y \leqslant 0)g(y)dy + \int_{0}^{+\infty} RP(Q|\,y > 0)g(y)dy \\
&= 2(p-w)Q - h_r p\,Q - C_r - (p-w)(\int_{-\infty}^{0} E(x|\,y \leqslant 0)g(y)dy \\
&+ \int_{0}^{+\infty} E(x|\,y > 0)g(y)dy) - (2p - w - s(0))\int_{-\infty}^{0}(\int_{0}^{Q} F(x|\,y \leqslant 0)dx)g(y)dy \\
&- \int_{0}^{+\infty}(\int_{0}^{Q}(2p - w - s(y))F(x|\,y > 0)dx)g(y)dy.
\end{aligned} \tag{3.3}
$$

由于订单完成时间 y 不确定，相应制造商的期望利润也会跟 y 有关. 若制造商按时交货，即 $y \leqslant 0$，则所订购产品是先于交货日期就已生产好，在运出之前，制造商需承担一定的库存费用，其利润可表示为

$$
\begin{aligned}
MP(Q|\,y \leqslant 0) &= \int_{0}^{Q} MP(Q|\,x \leqslant Q, y \leqslant 0)f(x|\,y \leqslant 0)dx \\
&\quad + \int_{Q}^{+\infty} MP(Q|\,x > Q, y \leqslant 0)f(x|\,y \leqslant 0)dx \\
&= \int_{0}^{Q}((w-c)Q - s(0)(Q-x) - C_m - h_m\,w\,Q)f(x|\,y \leqslant 0)dx \\
&\quad + \int_{Q}^{+\infty}((w-c)Q - C_m - h_m\,w\,Q)f(x|\,y \leqslant 0)dx \\
&= (w-c)Q - h_m\,w\,Q - C_m - s(0)\int_{0}^{Q} F(x|\,y \leqslant 0)dx.
\end{aligned}
$$

$s(0)$ 为制造商在最初提出的回购价格，当然一个不超过其售价的回购价格可以被制造商所接受. 上式由两部分利润组成，前一部分表示产品的实际需求若不超过分销商所订购的数量时，制造商会在销售季节结束时将所有剩余产品收回时的利润所得，另一部分则是分销商处产品若全部售出时制造商可得利润，两者的期望值之和即为制造商按时交货时的期望利润. 若无法按时交货，则制造商会根据订单完成时间 y 来调整其回购价格 $s(y)$，该条件下的利润为

$$
\begin{aligned}
MP(Q|\,y > 0) &= \int_{0}^{Q} MP(Q|\,x \leqslant Q, y > 0)f(x|\,y > 0)dx \\
&\quad + \int_{Q}^{+\infty} MP(Q|\,x > Q, y > 0)f(x|\,y > 0)dx \\
&= (w-c)Q - C_m - \int_{0}^{Q} s(y)F(x|\,y > 0)dx.
\end{aligned}
$$

同样，制造商的期望利润为两种条件下利润的期望值之和

$$
\begin{aligned}
MP(Q) &= \int_{-\infty}^{0} RP(Q|\, y \leqslant 0)g(y)dy + \int_{0}^{+\infty} RP(Q|\, y > 0)g(y)dy \\
&= (w-c)Q - C_m - h_m w Q \int_{-\infty}^{0} g(y)dy - s(0)\int_{-\infty}^{0}(\int_{0}^{Q} F(x|\, y \leqslant 0)dx)g(y)dy \\
&\quad - \int_{0}^{+\infty}(\int_{0}^{Q} s(y)F(x|\, y > 0)dx)g(y)dy. \qquad (3.4)
\end{aligned}
$$

供应链整体期望利润即为分销商和制造商各自期望利润之和

$$
\begin{aligned}
JP(Q) &= MP(Q) + RP(Q) \\
&= (2p-w-c)Q - C_r - C_m - h_r p Q - h_m w Q \int_{-\infty}^{0} g(y)dy \\
&\quad -(p-w)(\int_{-\infty}^{0} E(x|\, y \leqslant 0)g(y)dy + \int_{0}^{+\infty} E(x|\, y > 0)g(y)dy) \\
&\quad -(2p-w)(\int_{-\infty}^{0}(\int_{0}^{Q} F(x|\, y \leqslant 0)dx)g(y)dy + \int_{0}^{+\infty}(\int_{0}^{Q} F(x|\, y > 0)dx)g(y)dy). \qquad (3.5)
\end{aligned}
$$

3.3 模型分析

分销商在其订货决策过程中，往往未与制造商进行协调，仅考虑使得自己利润最优来决定适当的订货量，其最优订货量由下面定理给出。

定理 3.3.1 存在未经协调的经济订货量的 $Q_r^* > 0$ ，使得分销商在制造商按时交货的前提下利润最优，且满足

$$
F(Q_r^*|\, y \leqslant 0) = \frac{2(p-w) - h_r p}{2p - w - s(0)}. \qquad (3.6)
$$

证明：由公式 (3.3)，可得

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial RP(Q|\, y \leqslant 0)}{\partial Q} &= 2(p-w) - h_r p - (2p - w - s(0))F(Q|\, y \leqslant 0), \\
\frac{\partial^2 RP(Q|\, y \leqslant 0)}{\partial Q^2} &= -(2p - w - s(0))F(Q|\, y \leqslant 0).
\end{aligned}
$$

由前假设 $s(0) < w$，且 $w < p$ 是自然成立的，则对 $\forall Q > 0$，有 $\frac{\partial^2 RP(Q|\, y \leqslant 0)}{\partial Q^2} < 0$. 则必存在唯一的 $Q_r^* > 0$ ，满足

$$
\frac{\partial RP(Q_r^*|\, y \leqslant 0)}{\partial Q} = 2(p-w) - h_r p - (2p - w - s(0))F(Q_r^*|\, y \leqslant 0) = 0,
$$

即有公式 (3.6) 成立，使得 $RP(Q|\, y \leqslant 0)$ 在 Q_r^* 处取到最大值。

由于制造商交货日期的不确定性，一旦不能按合同要求按时交货，会重新调整回购价格，且制造商了解分销商的产品零售价格、需求情况及其成本构成，该回购价格使得分销商可以在已订购产品数量及延期交货的条件下仍获得相应的最佳利润，则制造商即使未能按时交货也是可以被分销商所接受的.

定理 3.3.2 若制造商无法按时交货，即 $y>0$ ，则会以调整回购价格 $s(y)$ 作为对分销商可能损失利润的补偿，而 $s(y)$ 可由下式确定

$$F(Q|\, y>0)=\frac{2(p-w)-h_r p}{2p-w-s(y)}\,, \tag{3.7}$$

这里 Q 为分销商确定的订货量.

类似于定理 3.3.1 中证明可知，由公式 (3.7) 所确定的 $s(y)$，使得 $RP(Q|\, y>0)$ 在 Q 处取到极大值。另外，由公式 (3.7) 可以得到 $s(y)<w+h_r p$ 。则 $s(y)$ 有可能会比 w 大，这也是合理的，制造商很可能用高于其批发价格的回购价格来补偿分销商因自己延误了产品的交货日期而受到的损失，但因为往往库存成本只占单位售价的很小一部分，即 $h_r p$ 在数值上很小，制造商是可以接受这一范围内的回购价格的. 前面得到的是分销商未经协调的最优订货量，即分销商仅根据自己的期望利润最优来决定订货量，同样，若采取协调机制，可得到分销商与制造商协调后的供应链整体最佳经济订货量.

定理 3.3.3 若考虑供应链整体利润，存在最佳经济订货量 $Q_J^*>0$ ，且有下式

$$\begin{aligned}(2p-w-c)-h_r p-h_m w\int_{-\infty}^{0} g(y)dy-(2p-w)\Big(\int_{-\infty}^{0} F(Q_J^*|\, y\leqslant 0)g(y)dy\\ +\int_{0}^{+\infty} F(Q_J^*|\, y>0)g(y)dy\Big)=0\end{aligned} \tag{3.8}$$

成立，可使得供应链整体期望利润达到最优.

证明：由公式 (3.5) 易得

$$\frac{\partial^2 JP(Q)}{\partial Q^2} = -(2p-w)\Big(\int_{-\infty}^{0} f(Q|\, y\leqslant 0)g(y)dy+\int_{0}^{+\infty} f(Q|\, y>0)g(y)dy\Big)<0, \quad \forall Q>0.$$

知一定存在唯一的 $Q_J^*>0$ ，满足

$$\begin{aligned}\frac{\partial JP(Q_J^*)}{\partial Q} &= (2p-w-c)-h_r p-h_m w\int_{-\infty}^{0} g(y)dy\\ &\quad -(2p-w)\Big(\int_{-\infty}^{0} F(Q_J^*|\, y\leqslant 0)g(y)dy+\int_{0}^{+\infty} F(Q_J^*|\, y>0)g(y)dy\Big)=0,\end{aligned}$$

定理得证.

采取怎样的协调方案，使得分销商单方决策的最佳订货量与供应链整体的最佳订货量趋于一致才是我们所关心的问题。由公式 (3.5) 可见供应链整体的期望利润与回购价格 $s(0)$、$s(y)$ 均无关，即制造商调整其回购价格并不影响供应链整体的最佳期望利润水平。由于制造商和分销商之间的信息共享，提出合理的回购价格可以使制造商与分销商在其订货决策问题上进行协调。

定理 3.3.4 若制造商与分销商共享产品需求、产品零售价格及其成本构成等信息，制造商可通过提出合理的回购价格与分销商在订货决策问题上进行协调，而按时交货和延期交货的回购价格 $s(0)$、$s(y)$，分别为

$$s(0) = 2p - w - \frac{2(p-w) - h_r p}{F(Q|\, y \leqslant 0)}, \tag{3.9}$$

$$s(y) = 2p - w - \frac{2(p-w) - h_r p}{F(Q|\, y > 0)}, \qquad y > 0, \tag{3.10}$$

且还要满足

$$\begin{aligned}\frac{\partial MP(Q)}{\partial Q} &= (w-c) - h_m w \int_{-\infty}^{0} g(y)dy - s(0)\int_{-\infty}^{0} F(Q|\, y \leqslant 0)g(y)dy \\ &\quad - \int_{0}^{+\infty} s(y)F(Q|\, y > 0)g(y)dy = 0\,.\end{aligned} \tag{3.11}$$

证明：由 (3.4) 式易知

$$\frac{\partial^2 MP(Q)}{\partial Q^2} = -\int_{-\infty}^{0} s(0)f(Q|\, y \leqslant 0)g(y)dy - \int_{0}^{-\infty} s(y)f(Q|\, y > 0)g(y)dy < 0, \quad \forall Q > 0,$$

则必存在唯一的 $Q^* > 0$，在给定 $s(0)$、$s(y)$ 的条件下，$MP(Q^*)$ 可取到最大值。若此时 $s(0)$ 的选取如公式 (3.9)，由定理 3.3.1 易知，此时分销商单方决策的最优订货量恰为 Q^*，则制造商和分销商在订货决策问题上达成一致，且均可获得各自的最大期望利润。若 $s(y)$ 由公式 (3.10) 给出，则有

$$\begin{aligned}\frac{\partial MP(Q)}{\partial Q} &= (w-c) - \int_{-\infty}^{0} \Big(2p - w - \frac{2(p-w) - h_r p}{F(Q|\, y \leqslant 0)}\Big)F(Q|\, y \leqslant 0)g(y)dy \\ &\quad - h_m w \int_{-\infty}^{0} g(y)dy - \int_{0}^{+\infty} \Big(2p - w - \frac{2(p-w) - h_r p}{F(Q|\, y > 0)}\Big)F(Q|\, y > 0)g(y)dy \\ &= (2p - w - c) - h_r p - h_m w \int_{-\infty}^{0} g(y)dy - (2p - w)\Big(\int_{-\infty}^{0} F(Q|\, y \leqslant 0)g(y)dy \\ &\quad + \int_{0}^{+\infty} F(Q|\, y > 0)g(y)dy\Big).\end{aligned}$$

由定理 3.3.3 知，若还有 (3.11) 式成立，则 $Q^* = Q_J^*$，即此时分销商的最优订货量恰为供应链整体最优订货量，同时，制造商、分销商在所给 $s(0)$、$s(y)$ 的基础上均可获得各自的最佳期望利润。

上面的分析表明，制造商与分销商进行协调的关键就是要做到信息共享，否则，即使制造商调节其回购价格也很难保证分销商所确定的订货量可达到整体最优。虽然供应链中的某一成员可能获得较高利润，但这往往是以损害另一方利益换回的，而达到供应链整体最佳期望利润也是不容易的.

3.4 数值模拟

本节，在产品需求及交货日期均不确定条件下将协调策略对于供应链整体最佳期望利润的影响进行了数值分析. 这里，假设需求、交货日期均服从均匀分布. 在前面已提到将整个销售季节分为若干个时间段,，使得每个时间段产品的预计需求恰为 1 ，可以用区间 $(0,b)$ 来表示整个销售季节， 0 代表着销售季节的开始，而 b 不仅意味着销售季节的结束，同时代表了销售季节中产品需求的上界，需求 x 在制造商按时交货和延期交货下的密度函数分别为

$$f(x|y\leqslant 0)=\begin{cases}\dfrac{1}{b}, & 0<x<b;\\ 0, & \text{其它},\end{cases}\qquad f(x|y>0)=\begin{cases}\dfrac{1}{b-y}, & 0<x<b-y;\\ 0, & \text{其它}.\end{cases}$$

而交货日期，即订单完成时间 y 服从区间 $(-\alpha_1 b,\alpha_2 b)$ 上的均匀分布， α_1、α_2 均为非负实数，其密度函数为

$$g(y)=\begin{cases}\dfrac{1}{(\alpha_1+\alpha_2)b}, & -\alpha_1 b<y<\alpha_2 b;\\ 0, & \text{其它}.\end{cases}$$

尽管制造商的订单完成时间无法确定，但通过 α_1 与 α_2 的比值，可以了解制造商按时交货的可能性的大小. 交易成本 T 包括制造商和分销商分别承担的订货成本，这里， $T=C_m+C_r$. 在整个计算过程中，模型中部分参数的值分别取为 $p=50,\ s(0)=25,\ w=30,\ c=10,\ h_r=h_m=0.005$. 由公式 (3.6) 可计算得到未采取协调机制下的经济订货量 Q_r^*，而由公式 (3.5) 可得到此时供应链整体期望利润 $JP(Q_r^*)$，类似可由公式 (3.8) 得到供应链整体最佳订货量 Q_J^*，进一步可计算出供应链整体最佳利润 $JP(Q_J^*)$. 相比之下，协调机制作用下供应链整体利润的增长率为 $Increase=(JP(Q_J^*)/JP(Q_r^*)-1)\times 100\%$.

图 3.1 中，取 $b=600,\ \alpha_1=\alpha_2$，则制造商可按时交货的概率总有 50% . 图 3.2 中，仍取 $b=600$，但 $\alpha_1+\alpha_2=1$. 可见， α_2 越大，即制造商延期交货的概率越大，可能的交货时间越迟，供应链整体期望利润的增长率也越大，而交易成本对利润增长率的影响也会越明显. 图 3.3 虽然是在 $\alpha_1=\alpha_2=0.5$ 时计算所得，但在 α_1、α_2 的其它取法下也有类似性质，即产品的需求量越小，协调机制作用下

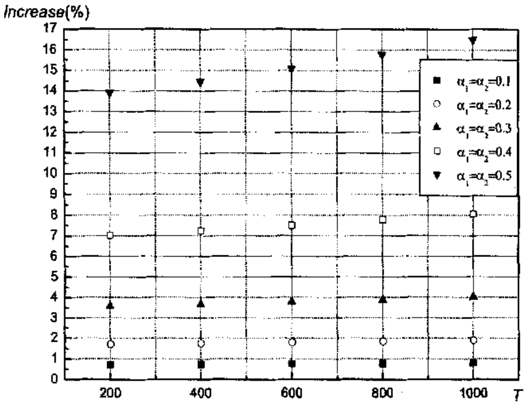

图 3.1 供应链整体期望利润的增长率 I

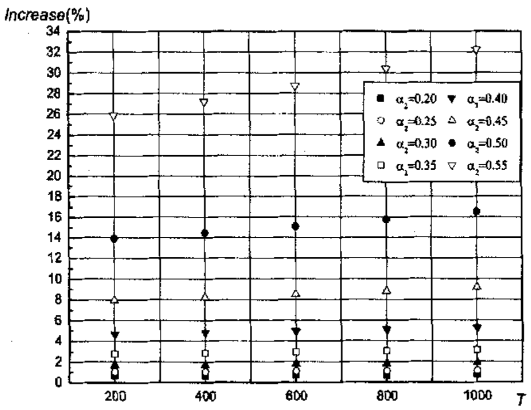

图 3.2 供应链整体期望利润的增长率 II

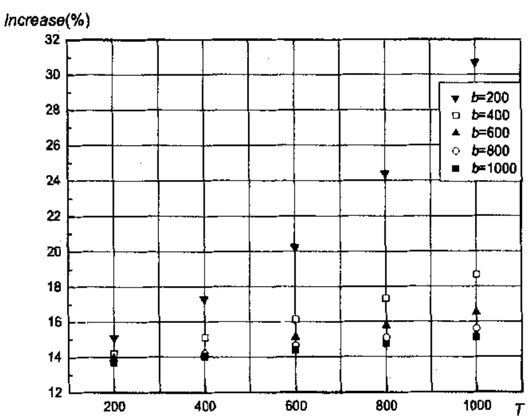

图 3.3 供应链整体期望利润的增长率 III

供应链整体利润的增长也将越显著. 通过反复计算, 我们发现, 无论是在 $\alpha_1=\alpha_2$, 或是在 $\alpha_1+\alpha_2=1$ 的选取下, 当制造商无法按时交货的可能性非常大, 而且交货日期可能非常迟的情况下, 即 $\alpha_2\geqslant 0.6$ 时, 制造商的利润将为负, 此时制造商将不会进行生产.

3.5 本章小结

本章在产品需求及交货日期均不确定的条件下, 研究了由单一制造商、单一分销商和单一产品组成的销售渠道中的协调订货决策问题. 制造商通过提出适当的回购价格与分销商在订货决策上进行协调, 并承诺会重新调整回购价格对延期交货时可能给分销商带来的利益损失进行补偿. 若分销商和制造商之间达到充分的信息共享, 则分销商可以分别调整按期交货及延期交货时的回购价格作为与分销商在订货决策问题上的协调机制, 使得供应链整体利润趋于最优. 但是, 制造商的利润很可能会因订单完成时间太迟而为负, 如果制造商在生产某种产品时, 延期交货的可能性很大, 与其去研究如何使制造商和分销商之间的协调机制起作用, 还不如讨论如何降低生产过程中的不确定因素, 这样, 即使有什么协调机制, 对供应链整体利润也不会产生太大的影响.

第 4 章　需求和交货日期均不确定的带有弹性订货的供应链协调

4.1　引言

对于像报纸、电子产品、服装等一类生命周期短的产品，其需求只发生在某一特定的时间段，制造商交货日期的不确定会直接影响到该产品的销售，因此，按时交货就显得非常重要。虽然制造商尽力使产品可以按合同要求按时运达分销商处，但生产过程中的各种因素使得制造商可能无法按时交货，一旦销售季节到来，分销商必然因无货可卖而遭受巨大的经济损失。那么，应如何看待和处理销售季节中制造商交货日期的不确定性和市场的随机需求就成为供应链契约中所面临的一个难题。

上一章，我们在制造商交货日期不确定的条件下，对需求不确定且销售季节具有明确的开始和结束时间的短生命周期产品的协调订货问题进行了讨论，提出了协调策略可以带来供应链整体利润的增长。和已有大多数研究供应链协调的文献一样，没有涉及增长的这部分利润应该如何在制造商和分销商之间进行分配。考虑到合理的利润分配是实现供应链协调的关键，而且事实上，分销商很可能事先知道交货日期的不确定性，当然由交货日期推迟而带来利润损失的风险也应由分销商和制造商共同承担。本章，我们允许分销商在制造商延期交货时，在原订货基础上减少订货量来降低损失，但同时也应对制造商处由此产生的产品积压而带来的利润损失承担一定比例，制造商则是以季末回购的形式来分担系统风险，这样即利于达成制造商和分销商之间的协调，又能实现系统利润在制造商和分销商之间的灵活分配。

在这一章里，主要针对需求和交货日期的不确定性，研究可调整订货量的供应链契约中的协调订货问题。显然信息共享程度的提高有利于更快且更准确的决策制定，同时也使得供应链对市场需求的变化作出更快的调整。我们在信息共享的前提下，提出可实现制造商与分销商协调的策略，使得由分销商单方决定的订货量同样实现系统利润的最大化。

4.2　模型的建立

和前一章一样，将产品的销售季节划分为若干个单位时间段，使得在每个时间段内产品的预计需求恰好为 1，而整个销售季节记为 $(0,b)$，同样也认为合同规定的交货日期就是销售季节的开始之际，因为只要是在销售季节开始之前将产品运送到分销商处就不会影响到产品销售和分销商的利润所得。在这里，认为制造

运送到分销商处就不会影响到产品销售和分销商的利润所得。在这里，认为制造

商是以传统的生产模式来进行生产，即订购多少，制造商就按合同生产多少，且在接到订单时开始生产，生产完毕后立即运往分销商处。由于生产环节中的不确定性因素使得制造商的交货日期具有不确定性，如果制造商不能及时将产品在销售季节开始之前运到分销商处，制造商会允许分销商根据延误交货日期的长短和市场需求信息，在原订货量的基础上减少订货量来降低利润损失，也只有这样，制造商延误交货日期的行为才可以被分销商所接受。但此时也会带来制造商的产品积压，因为正值销售季节，此时产品的残余价值比销售季节结束时的残余价值要高，虽然制造商可以通过直销市场或折扣店将这部分产品处理掉，但仍然会给制造商造成一定的经济损失。由于交货日期延迟的风险由制造商和分销商共同承担，对于由于分销商减少订货量而给制造商带来的损失，分销商也应承担一部分。因此，我们假设在制定订购合同时，制造商承诺会在销售季节结束时以某一回购价格将分销商处所有剩余产品收回，分销商通过预测市场需求后确定订货量，在交货日期延迟的情况下，会以一定比例来承担因减少订货量给制造商带来的经济损失。

本章中所涉及到的大部分变量，如 x、y、p、w、c、Q、C_m、C_r、C_o、h_r，其含义和上一章中所定义的完全一样。因为制造商不再持有库存，这里也就没有考虑其库存成本，并且将分销商处的单位缺货成本用变量 k 来表示，可以代表更加一般的情形。另外，还需要增加一些新的变量。如 s 表示销售季节结束时单位产品的回购价格，v 和 v_1 分别记为销售季节结束时和销售季节中单位产品的残余价值，若交货日期延迟，分销商可将订货量调整为 q，要求 $0 \leqslant q \leqslant Q$，同时分销商愿意以一定比例 r 来承担因减少订货而带给制造商的利润损失，其中 $0 \leqslant r \leqslant 1$。同样是除了 y，其余变量均为非负。$f(x|y<0)$，$f(x|y \geqslant 0)$，$F(x|y<0)$，$F(x|y \geqslant 0)$ 分别表示制造商按时交货及延期交货时需求 x 的概率分布密度函数和分布函数，且 $y_1 > y_2 > 0$ 时，意味着有 $F(x|y_1 \geqslant 0) > F(x|y_2 \geqslant 0)$。$g(y)$，$G(y)$ 分别为交货日期 y 的概率分布密度函数和分布函数。另外，也假设了制造商和分销商之间的信息共享，而考虑到制造商同样应获得适当的利润，一个不超过其单位批发价格的回购价格才可以被制造商所接受，则还要求 $s < w$。从经济意义上来看，产品的残值一定低于其生产成本，否则只要生产就有利可图，不符合现实，而且销售季节中产品的残余价值显然应高于销售季节结束后的残余价值，因此还假设 $v < v_1 < c$。

4.2.1 分散系统下的订货行为分析

在分散的系统中，分销商首先需要在销售季节到来之前确定订货量 Q，以满足未来可能的需求 x。在按时交货的情形下，若销售季节结束时，有 $x \leqslant Q$，则分销商可以将剩余产品以回购价格 s 退还给制造商，则可以将此条件下分销商的

利润表示为

$$RP(Q|\,x \leqslant Q, y < 0) = (p-w)x - C_o(Q-x) - h_r p\,Q - C_r.$$

若实际需求 $x > Q$ ，则分销商需承担由于缺货造成的利润流失，其利润为

$$RP(Q|\,x > Q, y < 0) = (p-w)Q - k(x-Q) - h_r p\,Q - C_r.$$

则分销商在制造商按时交货情形下的预期收益为上面两种条件下利润的期望值之和

$$\begin{aligned} RP(Q|\,y<0) &= \int_0^Q RP(Q|x \leqslant Q, y<0) f(x|y<0)dx \\ &\quad + \int_Q^{+\infty} RP(Q|x > Q, y<0) f(x|y<0)dx \\ &= (p+k-w)Q - (p+k-s)\int_0^Q F(x|\,y<0)dx - k\,E(x|\,y<0) \\ &\quad - h_r p\,Q - C_r, \end{aligned} \tag{4.1}$$

其中 $E(x|\,y<0) = \int_0^{+\infty} xf(x|\,y<0)dx$ ，表示按时交货时分销商处产品的平均需求.

由于制造商的交货日期具有不确定性，若交货日期推迟，因为已进入销售季节，分销商很可能因无货可卖而失去部分销售量，其产品需求也会随之变化。此时，制造商允许分销商减少订货量来降低损失，但同时对因减少订货而造成制造商处产品积压而带来的损失，分销商也愿意承担一部分，即每单位产品支付 $r(c-v_1)$ 作为经济补偿. 分销商调整后确定的订货量为 $q(Q \geqslant q \geqslant 0)$ ，其期望利润为

$$\begin{aligned} RP(q\,|\,y \geqslant 0) &= (p+k-w)q - h_r p\,q - C_r - (p+k-s)\int_0^q F(x|\,y \geqslant 0)dx \\ &\quad - k\,E(x|\,y \geqslant 0) - r(c-v_1)(Q-q), \end{aligned} \tag{4.2}$$

类似有 $E(x|\,y \geqslant 0) = \int_0^{+\infty} xf(x|\,y \geqslant 0)dx$ ，而分销商在整个销售季节中的期望利润可表示为

$$RP(Q,q\,|\,Q \geqslant q \geqslant 0) = \int_{-\infty}^0 RP(Q|\,y<0)g(y)dy + \int_0^{+\infty} RP(q\,|\,y \geqslant 0)g(y)dy. \tag{4.3}$$

在分散系统中，即未经协调的情况下，分销商总是以自身利润最优来确定订货量. 由于分销商知道交货日期具有不确定性，因而在确定订货量 Q 时，也会将不确定性因素考虑在内。另外，如果交货日期推迟，同样分销商也还是以自身利

润最优来调整订货量，因而分销商的整体期望利润也可写为

$$\max_{Q\geqslant 0} RP(Q)=\int_{-\infty}^{0} RP(Q|\,y<0)g(y)dy+\int_{0}^{+\infty} RP(Q|\,y\geqslant 0)g(y)dy, \quad (4.4)$$

$$RP(Q|\,y\geqslant 0)=\max_{Q\geqslant q\geqslant 0} RP(q\,|\,y\geqslant 0). \quad (4.5)$$

对于给定的 Q ，令 $y(Q)$ 为使得 $F(Q|\,y\geqslant 0)\leqslant\dfrac{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}{p+k-s}$ 成立的最大的 y ，即

$$y_r(Q)\equiv\arg\max_{y} F(Q|\,y\geqslant 0)\leqslant\frac{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}{p+k-s},$$

则得到以下结论.

定理 4.2.1 存在未经协调的经济订货量 $Q_r^*>0$ ，满足

$$\begin{aligned}G(y_r(Q_r^*)) &=\frac{r(c-v_1)}{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}+\frac{p+k-s}{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}\\ &\cdot\left(\int_{-\infty}^{0}F(Q_r^*|\,y<0)g(y)dy+\int_{0}^{y_r(Q_r^*)}F(Q_r^*|\,y\geqslant 0)g(y)dy\right),\end{aligned} \quad (4.6)$$

使得分销商的期望利润最优. 如果制造商交货日期推迟了 y 个时间段，分销商会重新调整订货量为 q_r^* ，其中

$$q_r^*=\begin{cases} q_r, & \text{若}\, q_r<Q_r^*,\\ Q_r^*, & \text{其它}\end{cases}$$

且 $q_r\equiv\arg\max_{q} F(q|y\geqslant 0)\leqslant\dfrac{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}{p+k-s}$.

证明: 由 (4.2), 可得

$$\begin{aligned}\frac{\partial RP(q\,|\,y\geqslant 0)}{\partial q} &= p+k-w-h_rp-(p+k-s)F(q\,|\,y\geqslant 0)+r(c-v_1),\\ \frac{\partial^2 RP(q\,|\,y\geqslant 0)}{\partial q^2} &= -(p+k-s)f(q\,|\,y\geqslant 0)<0,\end{aligned}$$

知 $RP(q\,|\,y\geqslant 0)$ 是关于 q 的凹函数. 且对于给定的 Q ，必存在 $q_r{}'>0$ ，使得 $RP(q\,|\,y\geqslant 0)$ 在 $q_r{}'$ 处取到最大值， $q_r{}'=\begin{cases} q_r, & \text{若}\, q_r<Q\\ Q, & \text{其它}\end{cases}$ ，其中 $q_r\equiv\arg\max_{q} F(q|\,y\geqslant 0)\leqslant\dfrac{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}{p+k-s}$. 则 $RP(Q)$ 也是关于 Q 的凹函数，因为

$$\frac{\partial^2 RP(Q|\,y<0)}{\partial Q^2}=-(p+k-s)f(Q|\,y<0)<0,$$

知 $RP(Q|\,y<0)$ 是关于 Q 的凹函数，而 $RP(Q|\,y\geqslant 0)$ 是一个带线性约束条件的最大值函数，且该函数也是凹函数，当然有 $RP(Q|\,y\geqslant 0)$ 也是关于 Q 的凹函

数，则必存在 Q_r^* 使得在未经协调的情况下，分销商的期望利润达到最优。则有

$$\frac{\partial RP(Q)}{\partial Q}=\int_{-\infty}^{0}\frac{\partial RP(Q|\,y<0)}{\partial Q}g(y)dy+\int_{0}^{+\infty}\frac{\partial RP(Q|\,y\geqslant 0)}{\partial Q}g(y)dy$$
$$=\int_{-\infty}^{0}(p+k-w-h_rp-(p+k-s)F(Q|\,y<0))g(y)dy$$
$$+\int_{0}^{y_r(Q)}(p+k-w-h_rp+r(c-v_1)-(p+k-s)F(Q|\,y\geqslant 0))g(y)dy,$$
$$-r(c-v_1)\int_{0}^{+\infty}g(y)dy$$
$$=(p+k-w-h_rp+r(c-v_1))G(y_r(Q))-r(c-v_1)$$
$$-(p+k-s)(\int_{-\infty}^{0}F(Q|\,y<0)g(y)dy+\int_{0}^{y_r(Q)}F(Q|\,y\geqslant 0)g(y)dy),$$

且 $Q\to 0$ 时，由 $G(y_r(Q))\to 1$ 且单位库存成本往往只占产品单位售价的很小一部分，则有 $\frac{\partial RP(Q)}{\partial Q}\to p+k-w-h_rp>0$，而当 $Q\to+\infty$ 时，$F(Q|y<0)\to 1$，$F(Q|y\geqslant 0)\to 1$，知 $\frac{\partial RP(Q)}{\partial Q}\to-(w+h_rp-s)G(y_r(Q))-r(c-v_1)(1-G(y_r(Q)))<0$，所以存在唯一的 $Q_r^*>0$ 满足 $\frac{\partial RP(Q_r^*)}{\partial Q_r^*}=0$，即

$$(p+k-w-h_rp+r(c-v_1))\,G(y_r(Q_r^*))-r(c-v_1)-(p+k-s)$$
$$\cdot(\int_{-\infty}^{0}F(Q_r^*|\,y<0)g(y)dy+\int_{0}^{y_r(Q_r^*)}F(Q_r^*|\,y\geqslant 0)g(y)dy)=0,\tag{4.7}$$

化简后有公式 (4.6) 成立，定理得证。

接下来，我们建立制造商的期望利润模型。在该模型中，制造商以传统生产模式进行生产，即接到订单开始生产，且订购多少，生产多少。由于订单完成时间 y 不确定，相应制造商的期望利润也会跟 y 有关。在可按时交货的情形下，即 $y<0$，其利润可表示为

$$\begin{aligned}MP(Q|y<0)\;&=\;\int_{0}^{Q}MP(Q|x\leqslant Q,y<0)f(x|\,y<0)dx\\&\qquad+\int_{Q}^{+\infty}MP(Q|\,x>Q,y<0)f(x|\,y<0)dx\\&=\;\int_{0}^{Q}((w-c)Q-(s-v)(Q-x)C_m)f(x|\,y<0)dx\\&\qquad+\int_{Q}^{+\infty}((w-c)Q-C_m)f(x|\,y<0)dx\\&=\;(w-c)Q-C_m-(s-v)\int_{0}^{Q}F(x|\,y<0)dx.\end{aligned}$$

上式由两部分组成，前一部分表示若产品的实际需求不超过分销商所订购的数量时，制造商会在销售季节结束时将所有剩余产品收回时的利润所得，另一部分则

是若分销商处产品全部售出时制造商可得利润，两者的期望值之和即为按时交货时制造商的期望利润.

若无法按时交货，制造商允许分销商在原订货基础上减少订货量，但因为延期交货的风险由制造商和分销商共同承担，因而，虽然剩下的这部分产品会给制造商带来一定经济损失，但每单位产品均可从分销商处获得 $r(c-v_1)$ 的经济补偿，该条件下制造商的期望利润为

$$MP(q\,|\,y\geqslant 0)=(w-c)q-C_m-(s-v)\int_0^q F(x|\,y\geqslant 0)dx-(1-r)(c-v_1)(Q-q),$$

这里的 q 是分销商在延期交货时重新确定的订货量。而整个销售季节中制造商的期望利润为两种条件下期望值之和

$$MP(Q,q\,|\,Q\geqslant q\geqslant 0)=\int_{-\infty}^0 MP(Q|\,y<0)g(y)dy+\int_0^{+\infty} MP(q\,|\,y\geqslant 0)g(y)dy. \tag{4.8}$$

4.2.2 集中系统下的订货行为分析

在集中系统下，供应链整体的利润就是分销商和制造商各自利润之和。在按时交货的情形下，订货量为 Q 时的整体利润为

$$\begin{aligned} JP(Q|\,y<0) &= RP(Q|\,y<0)+MP(Q|\,y<0) \\ &= (p+k-c)\,Q-(p+k-v)\int_0^Q F(x|\,y<0)dx-h_r p\,Q \\ &\quad -C_m-C_r-k\,E(x|\,y<0). \end{aligned}$$

若不能按合同要求按时交货，此时供应链的整体利润为

$$\begin{aligned} JP(q\,|\,y\geqslant 0) &= RP(q\,|\,y\geqslant 0)+MP(q\,|\,y\geqslant 0) \\ &= (p+k-c)q-h_r p\,q-C_m-C_r-k\,E(x|\,y\geqslant 0) \\ &\quad -(p+k-v)\int_0^q F(x|\,y\geqslant 0)dx-(c-v_1)(Q-q). \end{aligned}$$

而供应链的整体期望利润就是上面两种条件下的期望利润之和

$$JP(Q,q\,|\,Q\geqslant q\geqslant 0)=\int_{-\infty}^0 JP(Q|\,y<0)g(y)dy+\int_0^{+\infty} JP(q|\,y\geqslant 0)g(y)dy,$$

若考虑整体期望利润最优，可将上式改写为

$$\max_{Q\geqslant 0} JP(Q)=\int_{-\infty}^0 JP(Q|\,y<0)g(y)dy+\int_0^{+\infty} JP(Q|\,y\geqslant 0)g(y)dy,$$

$$JP(Q|\,y\geqslant 0)=\max_{Q\geqslant q\geqslant 0} JP(q\,|\,y\geqslant 0).$$

类似于上一节，可得到基于系统总利润最优的经济订货决策.

定理 4.2.2 若考虑供应链整体利润，存在最佳经济订货量 $Q_J^* > 0$ ，且有下式

$$\begin{aligned} G(y_J(Q_J^*)) &= \frac{c-v_1}{p+k-h_rp-v_1} + \frac{p+k-v}{p+k-h_rp-v_1}\Big(\int_{-\infty}^{0} F(Q_J^*|\,y<0)g(y)dy \\ &\quad + \int_0^{y_J(Q_J^*)} F(Q_J^*|\,y \geqslant 0)g(y)dy\Big) \quad (4.9) \end{aligned}$$

成立，其中 $y_J(Q) \equiv \arg\max_y F(Q|\,y \geqslant 0) \leqslant \dfrac{p+k-h_rp-v_1}{p+k-v}$ ，如果不能按合同要求按时交货，且推迟了 y 个时间段，则调整后的经济订货量应为

$$q_J^* = \begin{cases} q_J, & 若\, q_J < Q_J^*; \\ Q_J^*, & 其它, \end{cases}$$

这里 $q_J \equiv \arg\max_q F(q\,|\,y \geqslant 0) \leqslant \dfrac{p+k-h_rp-v_1}{p+k-v}$ 。

证明：在集中系统下，无论是在最初制定订货量还是在延期交货情形下调整订货量，都是基于整体利润最优来确定的。易知 $JP(q\,|\,y \geqslant 0)$ 是关于 q 的凹函数，因为

$$\begin{aligned} \frac{\partial JP(q\,|\,y \geqslant 0)}{\partial q} &= p+k-c-h_rp-(p+k-v)F(q\,|\,y \geqslant 0)+(c-v_1), \\ \frac{\partial^2 JP(q\,|\,y \geqslant 0)}{\partial q^2} &= -(p+k-v)f(q\,|\,y \geqslant 0) < 0. \end{aligned}$$

则对于给定的 $Q > 0$ ，必存在 $q_J > 0$ ，使得 $JP(q\,|\,y \geqslant 0)$ 取到最大值，即在延期交货的情形下，仍可使整体利润达到相应的最佳水平。若交货时间延迟 y 个时间段，相应的订货量为 $q_J' = \begin{cases} q_J, & 若\, q_J < Q \\ Q, & 其它 \end{cases}$ ，其中 $q_J \equiv \arg\max_q F(q\,|\,y \geqslant 0) \leqslant \dfrac{p+k-h_rp-v_1}{p+k-v} < 1$ 。由

$$\frac{\partial^2 JP(Q|\,y<0)}{\partial Q^2} = -(p+k-v)f(Q|\,y<0) < 0,$$

知 $JP(Q|\,y<0)$ 是关于 Q 的凹函数，而 $JP(Q|\,y \geqslant 0)$ 同样也是带有关于 Q 的线性约束条件的最大值函数，该函数是关于 Q 的凹函数，当然有 $JP(Q|\,y \geqslant 0)$ 也是关于 Q 的凹函数，则必存在 Q_J^* ，使得供应链整体利润最优。又

$$\begin{aligned} \frac{\partial JP(Q)}{\partial Q} &= \int_{-\infty}^{0} (p+k-c-h_rp-(p+k-v)F(Q|\,y<0))g(y)dy \\ &\quad - \int_0^{+\infty} (c-v_1)g(y)dy + \int_0^{y_J(Q)} ((p+k-c)-h_rp+(c-v_1) \\ &\quad -(p+k-v)F(Q|\,y \geqslant 0))g(y)dy \\ &= (p+k-h_rp-v_1)G(y_J(Q)) - (c-v_1) \\ &\quad -(p+k-v)\Big(\int_{-\infty}^{0} F(Q|\,y<0))g(y)dy + \int_0^{y_J(Q)} F(Q|\,y \geqslant 0)g(y)dy\Big), \end{aligned}$$

类似定理 4.2.1 中的证明, 当 $Q\to 0$ 时, $\dfrac{\partial JP(Q)}{\partial Q}\to(p+k-c-h_rp)>0$, 相应的当 $Q\to+\infty$ 时, $\dfrac{\partial JP(Q)}{\partial Q}\to-(c-v_1)(1-G(y_J(Q)))-(c+h_rp-v)G(y_J(Q))<0$, 所以一样也存在唯一的 $Q_J^*>0$ 有 $\dfrac{\partial JP(Q_J^*)}{\partial Q_J^*}=0$, 即公式 (4.9) 成立, 定理得证.

4.3 系统协调的实现

上一节的最后得到了以系统总利润最大为目标的整体经济订货量, 然而在实际过程中, 生产与销售的职能往往是由不同的利益主体来承担, 每个主体在决策时也都是基于局部利益最优的目标, 所以, 如果缺乏有效的协调机制来调节每个主体的行为, 必将会导致分散决策偏离系统最优的结果, 从而也降低系统的总利润. 因此, 采取怎样的协调方案, 使得分销商单方决策的订货量与供应链整体的最佳订货量趋于一致才是我们所关心的问题. 通过比较公式 (4.6) 和公式 (4.9) 的各个子项, 不难得到如下定理.

定理 4.3.1 若制造商与分销商共享其在延期交货时愿意承担因减少订货而带给制造商利润损失的比例 r 、产品的市场零售价格及成本构成等信息, 则可通过提出合理的产品批发价格 w^* 和回购价格 s^*, 分别为

$$w^* = (1-r)(p+k-h_rp)+rc, \tag{4.10}$$

$$s^* = (1-r)(p+k)+rv, \tag{4.11}$$

来与分销商在订货决策问题上进行协调.

证明: 通过比较公式 (4.6) 和公式 (4.9), 只要下面两式

$$\frac{c-v_1}{p+k-h_rp-v_1} = \frac{r(c-v_1)}{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}, \tag{4.12}$$

$$\frac{p+k-h_rp-v_1}{p+k-v} = \frac{p+k-w-h_rp+r(c-v_1)}{p+k-s}, \tag{4.13}$$

成立, 就有 $Q_J^*=Q_r^*$. 由 (4.12) 化简, 即得公式 (4.10). 而又由公式 (4.10) 成立, 可将 (4.13) 化简为 $r=\dfrac{p+k-s}{p+k-v}$, 则又有公式 (4.11) 成立, 定理得证.

可见, 只需 (r,w^*,s^*) 满足公式 (4.10) 和公式 (4.11), 即可实现供应链整体的协调. 而且, 此时产品的单位批发价格还满足如下不等式关系 $\dfrac{p+k-w^*-h_rp}{p+k-h_rp-c}=r\leqslant 1$, 则有 $w^*\geqslant c$, 且只要 $r\geqslant\dfrac{k-h_rp}{p+k-h_rp-c}$, 即 r 足够的大就有 $w^*\leqslant p$, 显然在这样一个范围内的批发价格是可以被分销商和制造商所接受的. 另外, 由 $\dfrac{p+k-s^*}{p+k-v}=r\leqslant 1$, 还可得到 $s^*\geqslant v$, 即确保制造商在销售季节结束时的回购价格不会低于产品的残值, 只有这样, 回购策略才是有效的. 因此, 协调策略中

提出的回购价格及批发价格是可以被分销商所接受的.

定理 4.3.2 在定理 4.3.1 所给出的协调机制中，若分销商在延期交货时因减少订货所承担的制造商利润损失的比例越高，与此同时，制造商在销售季节结束时购回剩余产品的价格 s^* 也会越低。

证明：由公式 (4.11)，$\dfrac{\partial s^*}{\partial r} = -(p+k-v) < 0$，则有 r 越大时，s 会越小，定理得证。

即在延期交货时，制造商所承担的产品积压损失的比例越低，则分担分销商在季末产品过剩损失的比例会越低，这意味着 r 与 s 对调节制造商和分销商承担风险比例时所起的作用是同向的，即某一方在延期交货时承担较大的产品积压损失，也将负担较大的季末产品过剩的损失，则 r 或 s 可以作为双方风险负担大小的度量标准，r 越大，说明分销商所承担的系统风险也越大。

定理 4.3.1 中制定了使分散决策的供应链实现系统协调的机制，其目的是为了使各利益主体从局部利益出发也将制定与系统整体利益相一致的决策，要使各利益主体能够统一到这种特定的机制上来，就必须使每一方都能通过这种合作受益，因此合理的利益分配也就成为促使协调机制起作用的有效途径.

定理 4.3.3 当系统实现协调时，分销商 / 制造商承担系统风险的比例之比越高，即 r 越大，其预期所获利润也会越多，反之亦然。

证明：当达到系统协调时，不难验证有

$$\frac{\partial RP(Q)}{\partial Q} = r\frac{\partial JP(Q)}{\partial Q}, \qquad \frac{\partial MP(Q)}{\partial Q} = (1-r)\frac{\partial JP(Q)}{\partial Q},$$

说明当分销商承担系统风险的比例越高时，同时也享有较高的边际利润，那么所得利润也会越多.

可见，系统利润的分配与 r 有关，且符合“风险越大，收益越高”的市场法则，从而有助于使供应链上各企业间开展公平的合作。考虑两种极端情形：当 $r=1$ 时，系统的风险全部转嫁至分销商，且 $w^* = c$，$s^* = v$，不难验证，分销商享有系统的全部利润，而制造商在这种情况下的平均利润为负；当 $r=0$ 时，$w^* = p+k-h_r p$，$s^* = p+k$ 意味着分销商的边际利润为零，由于面临着库存过量的风险和库存不足的商誉损失，其平均利润仍将小于零。如果分销商的平均利润 $r = r_{\min}$ 处达到零值，制造商的平均利润在 $r = r_{\max}$ 处达到零值，那么当 r 在 $[r_{\min}, r_{\max}]$ 上变动时，可实现制造商和分销商对系统利润的灵活分配.

4.4 数值模拟

在这一节里，通过数值分析，说明引入弹性订货策略后，在产品需求及交货

日期均不确定条件下协调策略对于供应链整体最佳期望利润的影响。我们仍只考虑需求、交货日期均服从均匀分布的情形，需求 x 在制造商按时交货和延期交货下的密度函数 $f(x|y<0)$、$f(x|y\geqslant 0)$，以及订单完成时间 y 的密度函数与上一章数值分析中所定义的完全一致。

计算中，模型中部分参数的值分别取为 $p=50, w=35, c=20, v_1=15, v=10, s=10, k=0, h_r=0.005, C_r=C_m=100$。由 (4.6) 式计算出未采取协调机制下的经济订货量 Q_r^*，而且通过计算可以得到此时供应链整体期望利润 $JP(Q_r^*)$，类似由公式 (4.9) 得到供应链整体最佳订货量 Q_J^*，进一步可分别计算出此时分销商及供应链整体的期望利润 $RP(Q_J^*)$、$JP(Q_J^*)$。则协调机制作用下供应链整体利润的增长率为 $Increase=(JP(Q_J^*)/JP(Q_r^*)-1)\times 100\%$，另外，分销商所得期望利润占总利润的百分比为 $O_R=RP(Q_J^*)/JP(Q_J^*)\times 100\%$。

表 4.1　供应链整体利润的增长率 ($\alpha_1=\alpha_2$)

α_2	*Increase* (%) ($r=0.5$)				
	$b=200$	$b=400$	$b=600$	$b=800$	$b=1000$
0.1	38.93	36.35	35.56	35.18	34.96
0.2	39.10	36.42	35.61	35.22	34.98
0.3	39.31	36.52	35.67	35.26	35.02
0.4	39.59	36.67	35.79	35.36	35.11
0.5	39.99	36.92	35.99	35.55	35.29
0.6	40.02	36.97	36.01	35.54	35.27
0.7	40.46	37.06	36.05	35.57	35.29
0.8	40.77	37.18	36.12	35.61	35.32
0.9	41.13	37.32	36.21	35.67	35.36

表 4.2　供应链整体利润的增长率 ($\alpha_1+\alpha_2=1$)

α_2	*Increase* (%) ($r=0.5$)				
	$b=200$	$b=400$	$b=600$	$b=800$	$b=1000$
0.1	38.82	36.30	35.53	35.16	34.94
0.2	38.91	36.43	35.56	35.18	34.95
0.3	39.10	36.42	35.61	35.22	34.99
0.4	39.42	36.59	35.73	35.32	35.08
0.5	39.99	36.92	35.99	35.55	35.29
0.6	40.51	37.11	36.10	35.61	35.33
0.7	41.66	37.33	36.19	35.65	35.33
0.8	41.78	37.23	35.93	35.31	34.95
0.9	45.46	39.45	37.78	37.00	36.55

表 4.3　分销商所得利润占供应链整体期望利润的百分比 ($\alpha_1 = \alpha_2$)

α_2	O_R (%) ($b = 600$)								
	$r=0.1$	$r=0.2$	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
0.1	8.72	19.04	29.36	39.68	50.00	60.32	70.64	80.96	91.28
0.2	8.68	19.01	29.34	39.67	50.00	60.33	70.66	80.99	91.32
0.3	8.64	18.98	29.32	39.66	50.00	60.34	70.68	81.02	91.36
0.4	8.59	18.94	29.29	39.65	50.00	60.35	70.71	81.06	91.41
0.5	8.53	18.90	29.26	39.63	50.00	60.37	70.74	81.10	91.47
0.6	8.47	18.85	29.23	39.62	50.00	60.38	70.77	81.15	91.35
0.7	8.40	18.80	29.20	39.60	50.00	60.40	70.80	81.20	91.60
0.8	8.33	18.74	29.16	39.58	50.00	60.42	70.84	81.26	91.68
0.9	8.24	18.68	29.12	39.56	50.00	60.44	70.88	81.32	91.76

表 4.4　分销商所得利润占供应链整体期望利润的百分比 ($\alpha_1 + \alpha_2 = 1$)

α_2	O_R (%) ($b = 600$)								
	$r=0.1$	$r=0.2$	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
0.1	8.75	19.06	29.38	39.69	50.00	60.31	70.62	80.94	91.25
0.2	8.73	19.05	29.36	39.68	50.00	60.32	70.64	80.95	91.27
0.3	8.69	19.01	29.34	39.67	50.00	60.33	70.66	80.99	91.31
0.4	8.62	18.97	29.31	39.66	50.00	60.34	70.69	81.03	91.38
0.5	8.53	18.90	29.26	39.63	50.00	60.37	70.74	81.10	91.47
0.6	8.40	18.80	29.20	39.60	50.00	60.40	70.80	81.20	91.60
0.7	8.21	18.66	29.11	39.55	50.00	60.45	70.89	81.34	91.79
0.8	7.94	18.46	28.97	39.49	50.00	60.52	71.03	81.54	92.05
0.9	7.35	18.16	28.77	39.39	50.00	60.61	71.23	81.84	92.45

表 4.1 、表 4.3 中，取 $\alpha_1 = \alpha_2$ ，则制造商可按时交货的概率总有 50% 。在表 4.2 、表 4.4 中，取 $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。可见，当 α_2 越大，即制造商延期交货的概率越大，可能的交货时间越迟，虽然供应链整体期望利润的增长率变化并不是很明显，但还是会随着产品的需求量越小，增长会越快. 表 4.1 、表 4.2 均是在 $r = 0.5$ 的情形下计算得到的，但通过反复计算，我们发现， r 的不同，并不会带来供应链整体利润增长率的明显变化，但是却与供应链整体的利润分配比例有密切的关系。表 4.3 、表 4.4 说明，在协调机制作用下，虽然市场的需求信息、产品的零售价格及其成本构成的不同会带来系统总利润的变化，但分销商所得利润占系统总利润的比例不会受延期交货可能性大小的影响，却是与 r 成正比，因此，分销商和制造商只需在对风险承担比例上达成一致就可以了。

4.5 本章小结

在产品需求及交货日期均不确定的条件下，研究了由一个制造商、一个分销商

和单一产品组成的销售渠道中的协调订货决策问题。提出在延期交货的情形下，允许分销商减少订货量来降低损失，且同时对这样可能给制造商带来的利润损失按一定比例进行补偿，而制造商则是以季末回购分销商处所有的剩余产品来承担系统风险。经验证，提出的协调机制不仅可有效实现系统的协调，而且协调的条件与产品的需求分布无关，另外，在确保系统协调的前提下，可实现对系统利润的灵活分配，且分配结果满足“风险越大，利润越高”的市场法则，因此，分销商与制造商只需在风险承担比例上达成一致。

第 5 章　在需求预测更新及两阶段生产模式条件下的短生命周期产品的最优订货策略

5.1　引言

对于短生命周期产品，分销商往往需要在销售季节到来之前订货，而只要所订产品在销售季节到来之前运达分销商处，就不会给分销商带来利润损失，所以制造商往往采用生产周期较长，生产成本较低的生产方式 (这里称为第一阶段的生产模式) 来进行生产. 这样，就要求分销商能够对产品需求作出准确的预测，但既然是预测，就会有偏差，况且订货行为先于销售季节，分销商所掌握的产品需求信息会随着销售季节的临近不断的更新。因此，最初的订货量与产品的实际需求会有一定差距。虽然制造商承诺会在销售季节结束时，将分销商处所有的剩余产品购回，但仍然不足以弥补分销商可能因缺货或库存过量造成的损失。

为了尽力减小分销商的订货量与实际需求量之间的差距， Tsay 对由一个制造商、一个分销商组成的分散系统提出了弹性订货的概念。弹性订货契约使得分销商的最终订货量既可以高于，同样也可能低于最初订货量，但却只能在一定范围内灵活的调整 [97]．这种弹性订货策略在一定条件下，可以使得分销商和制造商独立所做的订货与生产决策同样带来供应链整体的协调。而不只仅仅局限于讨论如何调整定价使得买卖双方在订货决策问题上进行协调 [185, 188]．关于短生命周期产品的供应链契约的研究，越来越多的学者对于信息预测以及供应链中各成员对需求信息了解的程度可能会对供应链协调造成的影响越来越感兴趣 [189~191]．Donohue 研究了在需求预测更新的情况下，给分销商提供了两次订货的机会. 通过采用第二阶段的生产模式，即与最初的生产模式相比，一种更快显然也是更昂贵的生产模式，利于分销商根据更新的需求信息重新调整订货水平 [122]．如果调整后的订货量高于最初的订货量，则制造商就必须考虑是否启动二阶段的生产模式来满足分销商处的产品需求。由于生产周期短，这部分追加的订货量可以及时交货而不影响分销商的销售活动. 通过有效的制定产品在两个不同生产阶段中的批发价格以及季末的回购价格，可以实现分销商和制造商的协调，从而整个销售渠道的利润可以达到最优，但有效的价格制定依赖于各个阶段间需求预测水平的提高和制造商对预测信息了解的程度。不同于 Donohue 中第二阶段的生产成本明显高于第一阶段 [102]， Gurnani 和 Tang 考虑了第二阶段产品的生产成本不确定的情况 [192]，例如同一种产品可以以两种不同的形式来生产 [193]，典型的例子就

是书籍的印刷可以有平装本和精装本来满足不同层次读者的需要，显然其成本也是不同的。另外在第一、二阶段间所获得的需求信息也不一定是完全的，也可能根本就没有获得任何相关信息的情况下，讨论了分销商的最优订货决策问题。根据需求预测更新确定订货决策问题的研究还可参看 Iyer 和 Bergan[100]， Wu[124]， Eppen 和 Iyer[128, 194]。

在上述文献中，大都是在需求预测更新的条件下，若最优订货量高于最初订货量，则启动二阶段的生产模式来满足需求，而对于最优订货量低于最初订货量的情形，即使允许分销商最终的订货量低于原订货量，也不能低于某一特定水平，而且没有涉及到系统利润在供应链各成员间分配的情况。本章，我们允许分销商根据更新后的需求信息来灵活调整订货量，若最终订货量低于原订货量，分销商必须对制造商因其退货造成产品积压所带来的利润损失承担一定的比例，相反，若分销商追加订货，则制造商同样会考虑启动二阶段的生产模式来及时满足需求。通过分析发现，这样做即有利于达成制造商和分销商之间的协调，又能实现系统利润的灵活分配。

5.2 模型的建立

为了满足未来可能的需求，分销商在销售季节到来之前根据所掌握的市场信息 I，通过推测市场需求 D 来决定一最初的订货量 Q. 制造商则往往采用一种较传统的生产方式，这里称为第一阶段的生产模式，即生产成本较低，提前期较长的方式进行生产。但由于订货时间距离销售季节的开始还有一段较长的时间，而且随着销售季节的日益临近，市场需求信息更易获得且更加准确，而分销商也将对市场需求作出更加准确的预测. 因此，提供了第二次的订货机会，即允许分销商根据预测更新后的需求信息来灵活调整订货量. 若调整后的订货量低于原订货量，虽然正值销售季节，制造商可以通过直销市场、折扣店等方式将这部分多余产品处理掉，但仍可能因产品积压带来利润损失，分销商会对这部分利润损失进行一定比例的补偿。若将第一阶段产品的单位生产成本记为 c_1，销售季节中产品的残余价值记为 v_1，而分销商所愿意承担的比例为 r，且 $0 \leqslant r \leqslant 1$，则单位产品由分销商所承担的利润损失为 $r(c_1 - v_1)$. 如果调整后的订货量高于原订货量，则分销商会向制造商追加订货来期望获得更高的利润. 因为该产品具有生命周期短的特点，为了不影响其销售，往往对所追加的这部分产品还会有特殊要求，如能够尽快生产完毕运抵分销商处. 对应于分销商的两次订货，制造商相应提供两阶段的生产模式，相对于第一阶段的生产模式，第二阶段的生产模式是一种生产周期更短，也是一种更昂贵的生产方式，其单位生产成本记为 c_2，自然有 $c_2 > c_1$. 对于这部分产品，制造商就会考虑启动第二阶段的生产来及时满足分销商的需求，其单位批发价格也会明显高于最初订货时提供的价格，分别用 w_1、w_2 来表示在最

初订货以及后来调整订货时制造商所提供的产品批发价格，同时有 $w_2 > w_1$ 。另外，在销售季节结束时，制造商还承诺会以回购价格 s 将分销商处所有的剩余产品购回，而季末，产品的残余价值记为 v . 整个销售季节，产品的零售价格始终为 p 。在分销商的成本中还包括单位缺货成本，记为 k ，即不能满足市场需求时分销商所承担的商誉损失。

这里，除了 I ，其余变量均为非负。需求 D ，市场信息 I 为连续的随机变量，取值范围分别为 $(\underline{D},\overline{D}), (\underline{I},\overline{I})$ ，因为需求总是非负的，显然 $\underline{D} \geqslant 0$ 。用 $f(\cdot), F(\cdot)$ 分别表示需求 D 的密度函数和分布函数，而市场信息 I 的密度函数和分布函数分别记为 $g(\cdot), G(\cdot)$ 。若 $\varphi(D,I)$ 为 D 和 I 的联合密度函数，则相应可得到给定了市场信息 I 的条件下，需求 D 的概率密度函数和分布函数，分别记为 $h(D|I), H(D|I)$ 。当 $I_1 > I_2$ 时，还意味着有 $H(D|I_1) < H(D|I_2)$ 成立。而且，制造商、分销商可以分别控制产品的批发价格、回购价格和零售价格且共享产品的需求信息，而考虑到制造商同样应获得适当的利润，一个不超过其单位批发价格的回购价格才可以被制造商所接受，所以还要求 $s < w_1 < w_2$ 。而从经济意义上来看，产品的残值一定低于其生产成本，而且销售季节中产品的残余价值显然应高于销售季节结束时的残余价值，因此还假设 $v < v_1 < c_1 < c_2$ 。

5.2.1 集中系统下的订货行为分析

我们首先将制造商和分销商视为一个整体，即认为其同属于一个公司。同样在销售季节到来之前，需要决定第一阶段的生产量，而根据更新后的需求预测信息，也要考虑是否需要事先将一部分产品通过直销市场或折扣店等其它方式处理掉以免季末造成大量的产品积压而带来更大的损失，或是启动第二阶段的生产通过满足更大的需求量来获得更多的利润。而实际上，公司会以获得更高利润为原则来决定具体选择其中某一种方式来调整其库存持有量。令 $E_I(\cdot)$ 表示基于随机变量 I 得到的期望值，则可以得到在整个销售季节中的总体期望利润，且必然是以该利润最优来确定最初订货量的。因此，选择第一阶段的生产量 Q 也就成为解以下的最优化问题：

$$\max_{Q\geqslant 0} \pi^c(Q) = E_I\{\max_{q_1\leqslant Q,\, q_2\geqslant Q}\{\pi_1^c(Q,q_1,I),\, \pi_2^c(Q,q_2,I)\}\}, \tag{5.1}$$

这里

$$\begin{aligned}\pi_1^c(Q,q_1,I) \;&=\; \int_{\underline{D}}^{q_1}(pD + v(q_1 - D) - c_1 q_1)h(D|I)dD \\ &\quad + \int_{q_1}^{\overline{D}}((p-c_1)q_1 - k(D-q_1))h(D|I)dD - (c_1 - v_1)(Q - q_1),\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
\pi_2^c(Q,q_2,I) &= \int_{\underline{D}}^{q_2}(pD+v(q_2-D)-c_1Q-c_2(q_2-Q))h(D|I)dD \\
&\quad +\int_{q_2}^{\overline{D}}(p\,q_2-k(D-q_2)-c_1Q-c_2(q_2-Q))h(D|I)dD,
\end{aligned}
$$

分别表示当需求信息更新时，以上述两种方式重新调整库存持有量为 q_1、q_2 时所得的期望利润。而对于给定的 Q 和 I，还分别存在最优的库存持有量使得上述两种情形下的期望利润分别取到最大，引理 5.2.1 给出了该最优解的表达式。

引理 5.2.1 若第一阶段的生产量为 Q，且更新后的需求预测信息为 I，若事先将部分产品处理掉，则存在 $q_{1c}\in(\underline{D},\overline{D})$ 使得该情形下整体的期望利润最优；若考虑启动二阶段的生产来满足更大的需求量，则同样存在 $q_{2c}\in(\underline{D},\overline{D})$ 使得相应的期望利润最优。 q_{1c} 与 q_{2c} 由下面给出：

$$
q_{1c}=\begin{cases} q_{1c}'(I), & \text{若}\, q_{1c}'(I)\leqslant Q; \\ Q, & \text{其它}, \end{cases}
\qquad
q_{2c}=\begin{cases} q_{2c}'(I), & \text{若}\, q_{2c}'(I)\geqslant Q; \\ Q, & \text{其它}, \end{cases}
$$

其中 $q_{1c}'(I)\equiv\arg\max\limits_{q} H(q|I)\leqslant\dfrac{p+k-v_1}{p+k-v}$，$q_{2c}'(I)\equiv\arg\max\limits_{q} H(q|I)\leqslant\dfrac{p+k-c_2}{p+k-v}$.

证明：将 $\pi_1^c(Q,q_1,I)$ 化简后可得

$$
\begin{aligned}
\pi_1^c(Q,q_1,I) &= (p-c_1)q_1-(c_1-v_1)(Q-q_1)+\int_{\underline{D}}^{q_1}(p-v)(D-q_1)h(D|I)dD \\
&\quad -k(\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}(D-q_1)h(D|I)dD-\int_{\underline{D}}^{q_1}(D-q_1)h(D|I)dD) \\
&= (p-c_1)q_1-(c_1-v_1)(Q-q_1)-(p-v)\int_{\underline{D}}^{q_1}H(D|I)dD \\
&\quad -k(E(D|I)-q_1+\int_{\underline{D}}^{q_1}H(D|I)dD) \\
&= (p+k-c_1)q_1-(c_1-v_1)(Q-q_1)-(p+k-v)\int_{\underline{D}}^{q_1}H(D|I)dD \\
&\quad -k\,E(D|I),
\end{aligned}
$$

这里 $E(D|I)=\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}Dh(D|I)dD$，表示给定需求信息 I 时产品的平均需求，易得 $\pi_1^c(Q,q_1,I)$ 为关于 q_1 的凹函数．因为

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial\pi_1^c(Q,q_1,I)}{\partial q_1} &= (p+k-c_1)+(c_1-v_1)-(p+k-v)H(q_1|I), \\
\frac{\partial^2\pi_1^c(Q,q_1,I)}{\partial q_1^2} &= -(p+k-v)h(q_1|I)<0,
\end{aligned}
$$

则对于给定的 Q 和 I，必存在 $q_{1c}'(I)\in(\underline{D},\overline{D})$，使得 $\pi_1^c(Q,q_{1c}'(I),I)$ 取到最大

值，因其最优解还需满足不大于 Q 的条件，可得引理中结论成立。同样由

$$\begin{aligned}
\pi_2^c(Q,q_2,I) &= p\,q_2 - c_1Q - c_2(q_2-Q) + \int_{\underline{D}}^{q_2}(p-v)(D-q_2)h(D|I)dD \\
&\quad -k\Big(\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}(D-q_2)h(D|I)dD - \int_{\underline{D}}^{q_2}(D-q_2)h(D|I)dD\Big) \\
&= p\,q_2 - c_1Q - c_2(q_2-Q) - (p-v)\int_{\underline{D}}^{q_2}H(D|I)dD \\
&\quad -k\Big(E(D|I) - q_2 + \int_{\underline{D}}^{q_2}H(D|I)dD\Big) \\
&= (p+k-c_2)q_2 + (c_2-c_1)Q - (p+k-v)\int_{\underline{D}}^{q_2}H(D|I)dD - k\,E(D|I),
\end{aligned}$$

而

$$\begin{aligned}
\frac{\partial\pi_2^c(Q,q_2,I)}{\partial q_2} &= (p+k-c_2) - (p+k-v)H(q_2|I), \\
\frac{\partial^2\pi_2^c(Q,q_2,I)}{\partial q_2^2} &= -(p+k-v)h(q_2|I) < 0,
\end{aligned}$$

可以得到 $\pi_2^c(Q,q_2,I)$ 也是关于 q_2 的凹函数,且引理中所给出的 q_{2c} 使得 $\pi_2^c(Q,q_{2c},I)$ 相应取到最大值。

因此,若对于给定的 Q ,分别令 $i_{1c}(Q)\equiv\arg\min\limits_I H(Q|I)\leqslant\dfrac{p+k-v_1}{p+k-v}$, $i_{2c}(Q)\equiv\arg\min\limits_I H(Q|I)\leqslant\dfrac{p+k-c_2}{p+k-v}$ ，则有 $q'_{1c}(i_{1c}(Q))=Q, q'_{2c}(i_{2c}(Q))=Q$ ，而整体期望利润可重新表示为

$$\begin{aligned}
\max_{Q\geqslant 0}\pi^c(Q) = \int_{\underline{I}}^{i_{1c}(Q)} &((p+k-c_1)q'_{1c}(I) - (c_1-v_1)(Q-q'_{1c}(I)) \\
&\quad -(p+k-v)\int_{\underline{D}}^{q'_{1c}(I)}H(D|I)dD)g(I)dI \\
+\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} &((p+k-c_1)Q - (p+k-v)\int_{\underline{D}}^{Q}H(D|I)dD)g(I)dI \\
+\int_{i_{2c}(Q)}^{\overline{I}} &((p+k-c_2)q'_{2c}(I) + (c_2-c_1)Q - (p+k-v)\int_{\underline{D}}^{q'_{2c}(I)}H(D|I)dD)g(I)dI \\
&-kE(D),
\end{aligned} \tag{5.2}$$

其中 $E(D)=\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}Df(D)dD$ 表示产品的平均需求量. 容易验证 $\pi^c(Q)$ 是关于 Q 的凹函数，自然就有以下结论成立。

定理 5.2.1 可选择第一阶段的生产量为 Q_J^* ，使得整体的期望利润最优，且满足下式

$$\begin{aligned}
(p+k-c_2)G(i_{2c}(Q_J^*)) &- (p+k-v_1)G(i_{1c}(Q_J^*)) \\
&-(p+k-v)\int_{i_{1c}(Q_J^*)}^{i_{2c}(Q_J^*)}H(Q_J^*|I)g(I)dI + c_2 - c_1 = 0.
\end{aligned} \tag{5.3}$$

证明: 由所定义的 $i_{1c}(Q), i_{2c}(Q)$ 易得

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \pi^c(Q)}{\partial Q} &= -\int_{\underline{I}}^{i_{1c}(Q)}(c_1-v_1)g(I)dI+\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)}(p+k-c_1\\
&\quad -(p+k-v)H(Q|I))g(I)dI+\int_{i_{2c}(Q)}^{\overline{I}}(c_2-c_1)g(I)dI\\
&= c_2-c_1+(p+k-c_2)G(i_{2c}(Q))-(p+k-v_1)G(i_{1c}(Q))\\
&\quad -(p+k-v)\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)}H(Q|I)g(I)dI,\\
\frac{\partial^2 \pi^c(Q)}{\partial Q^2} &= (p+k-c_2)g(i_{2c}(Q))i_{2c}'(Q)-(p+k-v_1)g(i_{1c}(Q))i_{1c}'(Q)\\
&\quad -(p+k-v)\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)}h(Q|I)g(I)dI\\
&\quad -(p+k-v)H(Q|i_{2c}(Q))g(i_{2c}(Q))i_{2c}'(Q)\\
&\quad +(p+k-v)H(Q|i_{1c}(Q))g(i_{1c}(Q))i_{1c}'(Q)\\
&= -(p+k-v)\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)}h(Q|I)g(I)dI<0,
\end{aligned}$$

则 $\pi^c(Q)$ 是关于 Q 的凹函数, 一定会存在唯一的 $Q_J^* \in (\underline{D},\overline{D})$，且满足 $\dfrac{\partial \pi^c(Q_J^*)}{\partial Q_J^*}=0$，使得 $\pi^c(Q)$ 在 Q_J^* 处取到最大值.

5.2.2 分散系统下的订货行为分析

在许多情形下，制造商和分销商作为独立的利益主体，都是各自作出其订货与生产决策，其目标也都是为了获得各自的最大利润．对于分销商，通常是在销售季节到来之前对市场需求作出初步预测后，决定一个最初的订货量．本文中，考虑随着销售季节的临近，分销商可以对市场需求作出更加准确的预测，因此允许分销商根据更新的需求预测信息来灵活地调整订货量．只是如果调整后的订货量低于最初订货量，因为分销商会对由此给制造商带来的利益损失进行一定比例的补偿，所以其减少订货量的行为可以被制造商所接受；反之，分销商不仅不会减少订货量，反而要追加订货，往往还会对这部分产品有特殊要求，如尽快生产完毕运达分销商处，而不致于影响分销商的销售活动，因此尽管制造商对这部分追加的产品要价更高，但分销商为了获得更高的利润，也是可以接受这样一个高于最初订货时的批发价格．在分散系统中，分销商总是会以自身利润最优来确定其最初订货量，同样也是以自身利润最优来调整并确定最终的订货量．因此，其最优订货量就是下述最优化问题的解

$$\max_{Q\geqslant 0}\pi^r(Q)=E_I\{\max_{d_1\leqslant Q,\, d_2\geqslant Q}\{\pi_1^r(Q,d_1,I),\pi_2^r(Q,d_2,I)\}\}, \tag{5.4}$$

其中

$$\begin{aligned}\pi_1^r(Q,d_1,I) &= \int_{\underline{D}}^{d_1}(pD+s(d_1-D)-w_1d_1)h(D|I)dD+\int_{d_1}^{\overline{D}}((p-w_1)d_1\\&\quad -k(D-d_1))h(D|I)dD-r(c_1-v_1)(Q-d_1),\\ \pi_2^r(Q,d_2,I) &= \int_{\underline{D}}^{d_2}(pD+s(d_2-D))h(D|I)dD+\int_{d_2}^{\overline{D}}(p\,d_2-k(D-d_2))h(D|I)dD\\&\quad -w_1Q-w_2(d_2-Q).\end{aligned}$$

容易验证，根据所获得的需求预测信息，分销商可在原订货量为 Q 的基础上通过调整订货量使其在考虑减少订货或追加订货时利润均可达到相应的最佳水平.

引理 5.2.2 若分销商最初订货量为 Q，则当需求信息更新后，记为 I，则分销商可通过减少订货量至 d_{1r}，或增加订货量至 d_{2r}，使其可以分别获得最高的期望利润，且

$$d_{1r}=\begin{cases} d'_{1r}(I), & 若\, d'_{1r}(I)\leqslant Q;\\ Q, & 其它,\end{cases}\qquad d_{2r}=\begin{cases} d'_{2r}(I), & 若\, d'_{2r}(I)\geqslant Q;\\ Q, & 其它,\end{cases}$$

其中 $d'_{1r}(I)\equiv\arg\max_q H(q|I)\leqslant\dfrac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s}$, $d'_{2r}(I)\equiv\arg\max_q H(q|I)\leqslant\dfrac{p+k-w_2}{p+k-s}$。

证明：类似于引理 5.2.1 中的证明方法，由

$$\begin{aligned}\pi_1^r(Q,d_1,I) &= (p-w_1)d_1-r(c_1-v_1)(Q-d_1)+\int_{\underline{D}}^{d_1}(p-s)(D-d_1)h(D|I)dD\\&\quad -k\left(\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}(D-d_1)h(D|I)dD-\int_{\underline{D}}^{d_1}(D-d_1)h(D|I)dD\right)\\&= (p-w_1)d_1-r(c_1-v_1)(Q-d_1)-(p-s)\int_{\underline{D}}^{d_1}H(D|I)dD-k(E(D|I)-d_1\\&\quad +\int_{\underline{D}}^{d_1}H(D|I)dD)\\&= (p+k-w_1)d_1-r(c_1-v_1)(Q-d_1)-(p+k-s)\int_{\underline{D}}^{d_1}H(D|I)dD\\&\quad -k\,E(D|I),\end{aligned}$$

则有

$$\begin{aligned}\frac{\partial\pi_1^r(Q,d_1,I)}{\partial d_1} &= (p+k-w_1)+r(c_1-v_1)-(p+k-s)H(d_1|I),\\ \frac{\partial^2\pi_1^r(Q,d_1,I)}{\partial d_1^2} &= -(p+k-s)h(d_1|I)<0,\end{aligned}$$

可知 $\pi_1^r(Q,d_1,I)$ 是关于 d_1 的凹函数。虽然不一定有 $\dfrac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s}<1$，但对于给定的 Q 和 I，必存在 $d_{1r}'(I)\in(\underline{D},\overline{D})$，满足 $d_{1r}'(I)\equiv\arg\max\limits_q H(q|I)\leqslant \dfrac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s}$，使得相应函数值取到最大。但还需满足调整后的订货量不应超过其最初的订货量，因此最终订货量为引理所给 d_{1r} 。类似的方法可得

$$\begin{aligned}\pi_2^r(Q,d_2,I)\ &= p\,d_2+\int_{\underline{D}}^{d_2}(p-s)(D-d_2)h(D|I)dD-w_1Q-w_2(d_2-Q)\\&\quad -k(\int_{\underline{D}}^{\overline{D}}(D-d_2)h(D|I)dD-\int_{\underline{D}}^{d_2}(D-d_2)h(D|I)dD)\\&=(p+k-w_2)d_2+(w_2-w_1)Q-(p+k-s)\int_{\underline{D}}^{d_2}H(D|I)dD\\&\quad -k\,E(D),\end{aligned}$$

同样有 $\pi_2^r(Q,d_2,I\,|d_2\geqslant Q)$ 是关于 d_2 的凹函数，因为

$$\frac{\partial^2\pi_2^r(Q,d_2,I)}{\partial d_2^2}\ =\ -(p+k-s)h(d_2|I)<0,$$

则类似地有该引理中结论成立。

但信息更新后，分销商是减少订货还是追加订货，都是以自身利润最优来作出选择的。而且与实际所获得的需求信息 I 是有密切联系的。不妨取 $i_{1r}(Q)\equiv \arg\min\limits_I H(Q|I)\leqslant\dfrac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s}$, $i_{2r}(Q)\equiv\arg\min\limits_I H(Q|I)\leqslant\dfrac{p+k-w_2}{p+k-s}$，可以将最优问题 (5.4) 重新表示为

$$\begin{aligned}\max_{Q\geqslant 0}\pi^r(Q)\ \ &=\ \int_{\underline{I}}^{i_{1r}(Q)}((p+k-w_1)d_{1r}'(I)-r(c_1-v_1)(Q-d_{1r}'(I))\\&\quad -(p+k-s)\int_{\underline{D}}^{d_{1r}'(I)}H(D|I)dD)g(I)dI\\&\quad +\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)}((p+k-w_1)Q-(p+k-s)\int_{\underline{D}}^{Q}H(D|I)dD)g(I)dI\\&\quad +\int_{i_{2r}(Q)}^{\overline{I}}((p+k-w_2)d_{2r}'(Q)+(w_2-w_1)Q\\&\qquad -(p+k-s)\int_{\underline{D}}^{d_{2r}'(Q)}H(D|I)dD)g(I)dI-k\,E(D),\end{aligned}\tag{5.5}$$

则分销商最初订货量的确定也就成为解以上最优化问题，不难得到以下定理。

定理 5.2.2 在分散系统中，即未经协调的情况下，若最初订货量 $Q_r^*\in(\underline{D},\overline{D})$ 满足下式

$$\begin{aligned}&(p+k-w_2)G(i_{2r}(Q_r^*))-(p+k-w_1+r(c_1-v_1))G(i_{1r}(Q_r^*))\\&\quad -(p+k-s)\int_{i_{1r}(Q_r^*)}^{i_{2r}(Q_r^*)}H(Q_r^*|I)g(I)dI+w_2-w_1=0,\end{aligned}\tag{5.6}$$

可使得分销商在整个销售季节中的期望利润最优。

证明：类似可以得到 $\pi^r(Q)$ 是关于 Q 的凹函数，且

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \pi^r(Q)}{\partial Q} &= -\int_{\underline{I}}^{i_{1r}(Q)} r(c_1-v_1)g(I)dI \\
&+\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)} (p+k-w_1-(p+k-s)H(Q|I))g(I)dI+\int_{i_{2r}(Q)}^{\overline{I}} (w_2-w_1)g(I)dI \\
&= w_2-w_1+(p+k-w_2)G(i_{2r}(Q))-(p+k-w_1+r(c_1-v_1))G(i_{1r}(Q)) \\
&-(p+k-s)\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)} H(Q|I)g(I)dI,
\end{aligned}$$

则必存在 $Q_r^*\in(\underline{D},\overline{D})$，满足 $\dfrac{\partial RP(Q_r^*)}{\partial Q_r^*}=0$，使得 $RP(Q)$ 取到其最大值。

制造商同样会以自身利润最优来选择第一阶段的生产量 q_1 . 尽管知道分销商最终的订货量很可能会比最初的订货量要低，但为了满足其订货要求，在第一阶段的生产中，其生产量不能低于该订货量。一旦分销商减少了订货，虽然正值销售季节，此时制造商可以通过直销市场、折扣店等方式将多余产品处理掉，而且分销商也会作出一定的补偿，但制造商仍可能因产品积压而带来利润损失。而且考虑到如果分销商追加订货，还可能会启动二阶段的生产模式，其单位生产成本远远高于第一阶段所生产的产品，所以在最初制定生产计划时，与分销商最初的订货量相比，制造商还可能会多生产一部分产品，期望在分销商第二次订货时可以获取更高的利润. 制造商与分销商共享产品的需求预测信息，对应于分销商在需求预测更新后根据所掌握的信息 I 来灵活调整订货量，制造商第一阶段生产量的确定问题也就是使其在整个销售季节中的期望利润最大化，即可以表示如下：

$$\begin{aligned}
&\max_{q_1\geqslant Q} \pi^m(q_1) \\
&=\int_{\underline{I}}^{i_{1r}(Q)}\Big(\int_{\underline{D}}^{d_{1r}'(I)}((w_1-c_1)d_{1r}'(I)-(s-v)(d_{1r}'(I)-D))h(D|I)dD \\
&\qquad +\int_{d_{1r}'(I)}^{\overline{D}}(w_1-c_1)d_{1r}'(I)\,h(D|I)dD-(1-r)(c_1-v_1)(Q-d_{1r}'(I)) \\
&\qquad -(c_1-v_1)(q_1-Q)\Big)g(I)dI \\
&+\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)}\Big(\int_{\underline{D}}^{Q}((w_1-c_1)Q-(s-v)(Q-D))h(D|I)dD \\
&\qquad +\int_{Q}^{\overline{D}}(w_1-c_1)Q\,h(D|I)dD-(c_1-v_1)(q_1-Q)\Big)g(I)dI \\
&+\int_{i_{2r}(Q)}^{i_{2r}(q_1)}\Big(\int_{\underline{D}}^{d_{2r}'(I)}(w_1Q+w_2(d_{2r}'(I)-Q)-c_1d_{2r}'(I)-(s-v)(d_{2r}'(I)-D)) \\
&\qquad \cdot h(D|I)dD+\int_{d_{2r}'(I)}^{\overline{D}}(w_1Q+w_2(d_{2r}'(I)-Q)-c_1d_{2r}'(I))h(D|I)dD
\end{aligned}$$

$$
\begin{aligned}
&\quad -(c_1-v_1)(q_1-d'_{2r}(I)))g(I)dI \\
&+\int_{i_{2r}(q_1)}^{\overline{I}}\Big(\int_{\underline{D}}^{d'_{2r}(I)}(w_1Q+w_2(d'_{2r}(I)-Q)-c_1q_1-c_2(d'_{2r}(I)-q_1) \\
&\qquad -(s-v)(d'_{2r}(I)-D))h(D|I)dD \\
&\quad +\int_{d'_{2r}(I)}^{\overline{D}}(w_1Q+w_2(d'_{2r}(I)-Q)-c_1q_1-c_2(d'_{2r}(I)-q_1))h(D|I)dD\Big)g(I)dI,
\end{aligned}
$$

直接化简后有

$$
\begin{aligned}
&\max_{q_1\geqslant Q}\pi^m(q_1) \\
&=\int_{\underline{I}}^{i_{1r}(Q)}((w_1-c_1)d'_{1r}(I)-(1-r)(c_1-v_1)(Q-d'_{1r}(Q))-(c_1-v_1)(q_1-Q) \\
&\qquad -(s-v)\int_{\underline{D}}^{d'_{1r}(I)}H(D|I)dD)g(I)dI \\
&+\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)}((w_1-c_1)Q-(s-v)\int_{\underline{D}}^{Q}H(D|I)dD-(c_1-v_1)(q_1-Q))g(I)dI \\
&+\int_{i_{2r}(Q)}^{i_{2r}(q_1)}(w_1Q+w_2(d'_{2r}(I)-Q)-c_1d'_{2r}(I)-(c_1-v_1)(q_1-d'_{2r}(I)) \\
&\qquad -(s-v)\int_{\underline{D}}^{d'_{2r}(I)}H(D|I)dD)g(I)dI \\
&+\int_{i_{2r}(q_1)}^{\overline{I}}(w_1Q+w_2(d'_{2r}(I)-Q)-c_1q_1-c_2(d'_{2r}(I)-q_1) \\
&\qquad -(s-v)\int_{\underline{D}}^{d'_{2r}(I)}H(D|I)dD)g(I)dI, \qquad (5.7)
\end{aligned}
$$

下面的定理给出了制造商在安排第一阶段生产时制定产量的依据.

定理 5.2.3 制造商可通过确定第一阶段的生产量来使得自己的期望利润达到最优，在满足分销商最初订货量 Q 的条件下，制造商在第一阶段的最佳生产量为 $q_1^m=\max\{q'_1,Q\}$, 其中 $G(i_{2r}(q'_1))=\dfrac{c_2-c_1}{c_2-v}$.

证明: 不难证明 $\pi^m(q_1)$ 是关于 q_1 的凹函数，由

$$
\begin{aligned}
\frac{\partial\pi^m(q_1)}{\partial q_1}&=-\int_{\underline{I}}^{i_{1r}(Q)}(c_1-v_1)g(I)dI-\int_{i_{1r}(Q)}^{i_{2r}(Q)}(c_1-v_1)g(I)dI \\
&\quad -\int_{i_{2r}(Q)}^{i_{2r}(q_1)}(c_1-v_1)g(I)dI+i'_{2r}(q_1)(w_1Q+w_2(q_1-Q) \\
&\quad -c_1q_1-(s-v)\int_{\underline{D}}^{q_1}H(D|i_{2r}(q_1))dD)+\int_{i_{2r}(q_1)}^{\overline{I}}(c_2-c_1)g(I)dI
\end{aligned}
$$

$$
\begin{aligned}
&\quad -i'_{2r}(q_1)(w_1Q+w_2(q_1-Q)-c_1q_1-(s-v)\int_{\underline{D}}^{q_1}H(D|i_{2r}(q_1))dD),\\
&= -(c_2-v)G(i_{2r}(q_1))+c_2-c_1,\\
\frac{\partial^2\pi^m(q_1)}{\partial q_1^2} &= -(c_2-v)i'_{2r}(q_1)g(i_{2r}(q_1)),
\end{aligned}
$$

由前假设知当 $I_1 > I_2$ 时，意味着有 $H(D|I_1) < H(D|I_2)$ ，注意到 $i_{2r}(q_1) \equiv \arg\min_I H(q_1|I) \leqslant \frac{p+k-w_2}{p+k-s}$ ，可知 q_1 越大，$i_{2r}(q_1)$ 也越大，当然就有 $i'_{2r}(q_1) > 0$ ，即 $\frac{\partial^2\pi^m(q_1)}{\partial q_1^2} < 0$ 。故存在唯一的 $q'_1 \in (\underline{D},\overline{D})$ 使得函数 $\pi^m(q_1)$ 取到最大，且满足 $G(i_{2r}(q'_1)) = \frac{c_2-c_1}{c_2-v}$ ，但同时又要求制造商所生产的产品数量至少不能低于分销商的订货量 Q ，因此，制造商最终的生产量应为 $q_1^m = \max\{q'_1, Q\}$ 。

组成供应链的各成员的目标都是为了获得各自的最大期望利润，虽然存在第一阶段的生产量 q'_1 使得制造商的期望利润达到最优，但因为实际的生产量不应低于分销商以自身利润最优来决定的经济订货量，这样就很难保证制造商的期望利润仍然可以达到最优水平。因此，制造商会对如何与分销商在订货决策问题上进行协调更感兴趣。在下一节中，将就这一问题展开讨论并给出了解决的途径。

5.3 系统协调的实现

上一节中，虽然得到了可以带来供应链整体期望利润最大化的经济订货量，但考虑到组成供应链的各个利益主体往往独自作出决策，如果没有有效的协调机制来调节每个主体的行为，是很难保证供应链整体的利润最优。这里，通过采取价格机制可以促使分销商单方决策的订货量与供应链整体的最优解趋于一致。

定理 5.3.1 制造商可通过调节产品的批发价格及回购价格来影响分销商的订货行为，当

$$
\begin{aligned}
w_1^* &= (1-r)(p+k)+rc_1, && (5.8)\\
w_2^* &= (1-r)(p+k)+rc_2, && (5.9)\\
s^* &= (1-r)(p+k)+rv, && (5.10)
\end{aligned}
$$

时，可以使得分销商以自身利润最优决定的订货量就是整体最优订货量。

证明：通过比较，发现只要有下面三式成立，

$$
\begin{aligned}
\frac{p+k-v_1}{p+k-v} &= \frac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s},\\
\frac{p+k-c_2}{p+k-v} &= \frac{p+k-w_2}{p+k-s},\\
\frac{c_2-c_1}{p+k-v} &= \frac{w_2-w_1}{p+k-s},
\end{aligned}
$$

就会有 $Q_r^* = Q_J^*$. 易得 $\dfrac{p+k-s}{p+k-v} = r$, 即公式 (5.10). 又由 $\dfrac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-v_1} = \dfrac{p+k-w_2}{p+k-c_2} = \dfrac{p+k-s}{p+k-v} = r$，则分别可得公式 (5.8)、公式 (5.9) 成立，定理得证。

可见，只需如定理 5.3.1 中所定义的 (w_1^*, w_2^*, s^*)，即可实现供应链整体的协调, 但这样做, 显然需要供应链各成员间建立起合作伙伴关系, 并达成充分的信息共享. 而且, 由于有 $\dfrac{p+k-w_1^*}{p+k-c_1} = \dfrac{p+k-w_2^*}{p+k-c_2} = r < 1$, 则两个不同生产阶段所生产的产品批发价格均满足 $w_1^* \geqslant c_1, w_2^* \geqslant c_2$, 且只要 $r \geqslant \dfrac{k}{p+k-c_1}$, 就会有 $w_1^* \leqslant w_2^* \leqslant p$ 。实际上缺货成本往往是很难进行衡量的, 通常会令 $k=0$ 或是以售出单位个产品所获利润来计算。但无论 k 取何值, 因为 $k \geqslant 0$，总会有 $\dfrac{k}{p+k-c_2} < 1$，因此只要分销商所愿意承担损失的比例不低于 $\dfrac{k}{p+k-c_2}$，所提出的产品批发价格是可以被分销商和制造商所共同接受的. 另外, 又由 $\dfrac{p+k-s^*}{p+k-v} = r \leqslant 1$，以及 $v < c_1 < c_2$，还可以得到 $v \leqslant s^* < w_1^* < w_2^*$，确保制造商在销售季节结束时的回购价格不会低于产品的残值同时还不会高于产品的批发价格, 只有这样, 回购价格才是有效的. 因此, 该协调策略中提出的回购价格及产品批发价格均是可以被分销商和制造商所接受的.

接下来, 我们将讨论协调机制对于制造商在决定第一阶段的生产量的影响. 从定理 5.2.3 可见, 制造商会选择最初订货量 Q 以及可使得自身利润最优的 q_1' 中较大的那一个作为其最后决定的生产量。对于制造商而言, 其生产量很可能会比订货量高, 因为这部分多生产的产品存在更高的利润空间, 即 $w_2 - c_1 > w_2 - c_2$. 因此, 在协调机制的作用下, 使得分销商单方决策的订货量与供应链整体的最佳订货量趋于一致的同时, 很可能制造商会选择一个比该订货量更高的生产量来获得更高的利润。然而, 通过下面的分析, 我们发现这种情况是不可能存在的.

定理 5.3.2 在协调机制的作用下, 分销商在最初的订货量就是整体最佳订货量, 而制造商此时相应的生产量就是该订货量.

证明: 协调机制作用下, 自然有分销商单方决策的经济订货量 Q 满足公式 (5.3), 即

$$\begin{aligned}(p+k-c_2)\,G(i_{2c}(Q)) - (p+k-c_1)\,G(i_{1c}(Q))\\ -(p+k-v)\int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} H(Q|I)g(I)dI + c_2 - c_1 = 0,\end{aligned}$$

当然会有

$$G(i_{2c}(Q)) \;=\; \frac{c_2-c_1}{c_2-v} + \frac{p+k-v}{c_2-v}\,G(i_{2c}(Q))$$

$$
\begin{aligned}
& -\frac{p+k-v_1}{c_2-v} G(i_{1c}(Q)) - \frac{p+k-v}{c_2-v} \int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} H(Q|I)g(I)dI \\
= \ & \frac{c_2-c_1}{c_2-v} + \frac{p+k-v}{c_2-v}(G(i_{2c}(Q)) \\
& -\frac{p+k-v_1}{p+k-v} G(i_{1c}(Q)) - \int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} H(Q|I)g(I)dI),
\end{aligned}
$$

由前定义，知 $H(Q|i_{2c}(Q)) = \dfrac{p+k-c_2}{p+k-v} < 1$, $H(Q|i_{1c}(Q)) = \dfrac{p+k-v_1}{p+k-v}$ ，则有

$$
\begin{aligned}
G(i_{2c}(Q)) \ > \ & \frac{c_2-c_1}{c_2-v} + \frac{p+k-v}{c_2-v}(H(Q|i_{2c}(Q))\, G(i_{2c}(Q)) - H(Q|i_{1c}(Q))\, G(i_{1c}(Q)) \\
& - \int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} H(Q|I)\, g(I)dI) \\
= \ & \frac{c_2-c_1}{c_2-v} + \frac{p+k-v}{c_2-v} \int_{i_{1c}(Q)}^{i_{2c}(Q)} h(Q|I)\, G(I)dI \geqslant \frac{c_2-c_1}{c_2-v},
\end{aligned}
$$

由定理 5.2.3 知 $G(i_{2c}(q')) = \dfrac{c_2-c_1}{c_2-v}$ ，则有 $i_{2c}(q') < i_{2c}(Q)$ 。又因为 $H(q'|i_{2c}(q')) = H(Q|i_{2c}(Q)) < H(Q|i_{2c}(q'))$ ，知必有 $q' < Q$ ，因此制造商在第一阶段的生产量也就是分销商的订货量 Q .

当供应链整体达到协调时，分销商所决定的经济订货量就是整体最优订货量，而制造商此时的生产量也恰为该订货量．显然， r 的不同不会影响所制定的订货量以及可能获得的整体最优利润，但下面的分析表明，在系统风险分担以及系统利润的分配比例上， r 却可以作为一个重要的衡量标准。

定理 5.3.3 对于定理 5.3.1 所给出的协调机制，若分销商在因其减少订货而造成制造商处产品积压所带来的利润损失所愿意承担的比例越高，同时，制造商在销售季节结束时购回剩余产品的价格也会越低且两次订货时产品的批发价格也会相应更低．

证明: 由公式 (5.10) 易得 $\dfrac{\partial s^*}{\partial r} = -(p+k-v) < 0$ ，因 $p > v, k \geqslant 0$ ，则 r 越大，当然 s^* 会越小，对于 w_1^*、w_2^* 也有类似结论成立．

即在允许分销商根据更新后的需求信息来灵活调整订货量的同时，若分销商减少订货量，制造商所承担产品积压损失的比例越低，相应在季末所承担产品过剩损失的比例也会越低．这就意味着当某一方在可能承担较大的产品积压损失的同时，也将负担较大的季末产品过剩的损失．因此，可以将 r 作为双方所承担系统风险大小的衡量标准， r 越大，说明分销商所承担的系统风险也越大．同时， r 越大，相应产品的单位批发价格也会越低，当然分销商所获得的利润很可能会更高，接下来的定理可以更好的说明 r 与供应链中各成员所获利润的关系。

定理 5.3.4 在定理 5.3.1 中所提出的协调机制作用下，分销商／制造商所承担的系统风险的比例之比越高，即 r 越大，分销商也将获得更高的期望利润，反之亦然。

证明： 当达到系统协调时，系统的整体最优利润虽然并没有发生变化，但不难验证有

$$\frac{\partial RP(Q)}{\partial Q}=r\frac{\partial JP(Q)}{\partial Q},\qquad \frac{\partial MP(Q)}{\partial Q}=(1-r)\frac{\partial JP(Q)}{\partial Q},$$

即整体利润在分销商与制造商之间的分配比例发生了变化，且承担的系统风险越大，相应也会有更高的边际利润，当然所获得的利润也会更多.

显然，系统利润的分配同样与 r 有关，而合理的利益分配可以促使供应链中互相独立的利益主体之间的合作和协调，是保证协调机制起作用的关键，也正是这样，本文提出的协调机制实现了系统利润的灵活分配，且符合“风险越大，利润越高”的市场法则，是促进供应链上各企业间开展平等的合作的有效途径. 另外，当 $r=1$ 时，分销商承担了全部的系统风险，但不难验证，分销商享有系统的全部利润，因为 $w_1^*=c_1, w_2^*=c_2, s^*=v$ ，而制造商此时的平均利润为负. 当 $r=0$ 时，有 $w_1^*=w_2^*=s^*=p+k$ ，分销商的边际利润为零，但由于面临着库存过量的风险和库存不足的商誉损失，其平均利润也将小于零. 如果分销商的平均利润在 $r=r_{\min}$ 处达到零值，制造商的平均利润在 $r=r_{\max}$ 处达到零值，那么，只要 r 在 $[r_{\min},r_{\max}]$ 上变动时，就可以实现系统利润在制造商和分销商之间的灵活分配. 因此，只要双方能对实现协调时利润的分配比例达成一致，就能在确保整体利润最大的情况下实现双赢.

5.4 数值模拟

我们首先假设市场信息 I 和需求 D 的联合概率分布函数 $\varphi(I,D)$ 是服从二维的正态分布，均值分别为 m、μ ，标准差分别为 λ和 σ ，且均为非负，其相关系数为 $\rho(0\leqslant\rho\leqslant1)$ 。不难得到变量 $(D|I)$ 仍然是服从均值 μ' ，方差为 σ' 的正态分布，其中 $\mu'=\mu+\rho(I-m)\sigma/\lambda,\ \sigma'=\sigma\sqrt{1-\rho^2}$, 显然有 $\sigma'\leqslant\sigma$ ，则有利于通过捕获市场信息来得到更加准确的需求预测. 虽然正态分布中随机变量的取值范围是 $(-\infty,+\infty)$ ，但只要有 $\mu-3\sigma\geqslant0$ ，即可认为需求 D 的取值范围为 $(0,+\infty)$ ，因为 $F(D\leqslant0)=\Phi(\frac{D-\mu}{\sigma}\leqslant\frac{-\mu}{\sigma})\leqslant\Phi(\frac{D-\mu}{\sigma}\leqslant-3)\leqslant0.002$, $\Phi(\cdot)$ 是标准正态分布的概率分布函数，符合前假设 $D\in(\underline{D},\overline{D})$ 且 $\underline{D}\geqslant0$. 由引理 5.2.2 可以得到 $i_{1r}(Q)=m+\frac{\lambda}{\rho\sigma}[Q-\mu-\sigma\sqrt{1-\rho^2}\Phi^{-1}(\frac{p+k-w_1+r(c_1-v_1)}{p+k-s})]$, $i_{2r}(Q)=m+\frac{\lambda}{\rho\sigma}[Q-\mu-\sigma\sqrt{1-\rho^2}\Phi^{-1}(\frac{p+k-w_2}{p+k-s})]$, 虽然可以将 $i_{1r}(Q)$、$i_{2r}(Q)$ 代入公式

(5.6) 并将其化简，但除非是 $\rho=0$或$\rho=1$，我们无法得到关于订货量 Q_r^* 的显式表达，相应也就无法对系统整体期望利润作出明确表达。而对于 $\rho=0, \rho=1$，分别代表了需求与市场信息完全不相关和完全相关两种特殊情况，在协调机制的作用下，可以得到关于供应链整体的最优利润的表达式.

情形 1：$\rho=0$

这时，即使有信息的更新，对于需求而言，也是一些毫无价值的信息，随机变量 D, I 互相独立，且 $\mu'=\mu, \sigma'=\sigma$，实际上就是对一个传统的报童问题求解系统最优订货量，相应可得到

$$Q_J^*=\mu+\sigma\Phi^{-1}(\frac{p+k-c_1}{p+k-v}),$$

以及系统最优期望利润

$$\begin{aligned}JP(Q_J^*) &= (p+k-c_1)\,Q_J^*-(p+k-v)\int_{\underline{D}}^{Q_J^*}F(D)dD-k\cdot\mu\\ &= (p+k-v)\int_{\underline{D}}^{Q_J^*}D\cdot f(D)dD-k\cdot\mu\\ &= (p-c_1)\,\mu+(p+k-v)\sigma\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(\frac{p+k-c_1}{p+k-v})}Z\cdot\phi(Z)dZ,\end{aligned}$$

这里 $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布的密度函数。

情形 2：$\rho=1$

显然分销商对需求的预测完全依赖于所获得的信息，即 D与I 完全相关，同时还有 $\mu'=\mu+(I-m)\sigma/\lambda, \sigma'=0$。当然，对于给定的 I，需求 D 也是确定的，且还有 $D|I=\mu+(I-m)\sigma/\lambda$。由 $i_{1r}(Q)=i_{2r}(Q)$，并记为 $i(Q)$，不难得到此时系统的最优订货量为

$$Q_J^*=\mu+\sigma\,\Phi^{-1}(\frac{c_2-c_1}{c_2-v_1}),$$

相应整体的期望利润可以表示为

$$\begin{aligned}&JP(Q_J^*)\\ &=\int_{\underline{I}}^{i(Q_J^*)}(p+k-c_1(\mu+(I-m)\sigma/\lambda)-(c_1-v_1)(Q_J^*-\mu-(I-m)\sigma/\lambda))g(I)dI\\ &\qquad+\int_{i(Q_J^*)}^{\overline{I}}((p+k-c_2)(\mu+(I-m)\sigma/\lambda)+(c_2-c_1)Q_J^*)g(I)dI-k\cdot\mu,\\ &=(p-c_1)\mu+(c_2-c_1)\sigma\int_{-\infty}^{\Phi^{-1}(\frac{c_2-c_1}{c_2-v_1})}Z\cdot\phi(Z)dZ.\end{aligned}$$

对于一般的情形，即 $0<\rho<1$，通过数值分析的手段来说明协调机制对于供应链整体利润的影响。在整个计算过程中，部分参数的取值分别 $p=50, w_1=$

$30, w_2 = 40, c_1 = 20, c_2 = 25, s = 15, v = 10, v_1 = 15, k = 0, \sigma = 50, m = 60, \lambda = 30$ 。可以分别得到未协调以及协调机制作用下的整体利润，相应协调机制作用下的供应链整体利润的增长率记为 $Increase$ 。

表 5.1　　供应链整体利润的增长率 I

ρ	$Increase$ (%) ($\mu = 200$)								
	$r=0.1$	$r=0.2$	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
0.1	201.67	102.13	63.68	42.76	29.49	20.29	13.52	8.35	4.27
0.2	199.70	101.04	62.99	42.32	29.22	20.15	13.51	8.43	4.44
0.3	197.62	99.78	62.13	41.71	28.79	19.87	13.35	8.39	4.49
0.4	195.96	98.67	61.35	41.16	28.43	19.67	13.28	8.43	4.64
0.5	195.15	97.95	60.86	40.88	28.34	19.75	13.51	8.81	5.15
0.6	195.05	97.51	60.56	40.79	28.46	20.06	14.02	9.50	6.01
0.7	195.29	97.09	60.23	40.68	28.59	20.45	14.64	10.35	7.10
0.8	195.45	96.28	59.50	40.21	28.42	20.58	15.08	11.10	8.15
0.9	194.00	92.36	56.97	37.99	26.58	19.13	14.03	10.44	7.89

表 5.2　　供应链整体利润的增长率 II

μ	$Increase$ (%) ($\rho = 0.6$)								
	$r=0.1$	$r=0.2$	$r=0.3$	$r=0.4$	$r=0.5$	$r=0.6$	$r=0.7$	$r=0.8$	$r=0.9$
200	195.05	97.51	60.56	40.79	28.46	20.06	14.02	9.50	6.01
250	194.38	95.96	58.75	38.88	26.50	18.08	12.03	7.51	4.03
300	193.91	94.86	57.49	37.55	25.14	16.71	10.65	6.14	2.67
350	193.56	94.05	56.56	36.57	24.14	15.70	9.65	5.13	1.67
400	193.29	93.43	55.85	35.82	23.37	14.93	8.88	4.36	0.91

可见，在协调机制的作用下，需求与信息更新相关程度的大小对供应链整体利润增长的影响差别并不是太明显，但是如果产品的平均需求量和分销商所承担的系统风险越小，利润也会增长得越快。通过反复计算，我们还发现虽然各参数取值的不同会带来系统总利润的不同，但是在协调机制作用下，分销商所得利润占系统总利润的比例总是会与 r 成正比。

5.5 本章小结

本章在需求信息更新的条件下，研究了供应链契约中的协调订货问题。在信息共享的前提下，通过制造商有效的确定产品在两个不同生产阶段的批发价格和季末回购价格，来影响分销商的订货行为，使其单方决策的订货量对于整个供应链而言都是最优的，即达到了整体的协调又实现了利益的最大化。通过数值例子表明，所提出的协调策略不仅可以实现系统的协调，而且协调的条件与产品的需

求分布无关。另外，还可以实现系统利润的灵活分配，且分配结果满足“风险越大，利润越高”的市场法则。因此，若要分销商与制造商在订货决策上取得协调，只需要他们在系统风险的承担比例上达成一致就可以了。

第 6 章　光滑化 Newton 法在求解供应链网络平衡模型中的应用

6.1　引言

供应链通常都是由几层组成，且每一层又是由互相竞争的几个不同的公司所构成．在这一章中，将建立一个由制造商、分销商、需求市场所组成的多层且带有竞争性的供应链网络平衡模型．已有的网络模型多是在单一产品的基础上建立起来，本章，我们考虑多个制造商同时生产多种产品且互相竞争的情形．为使各自的利润最优，每个制造商根据生产成本以及运输成本针对每一种产品选择最优的生产量以及向各个不同的分销商可以提供的产品数量；反过来，分销商也需认同该供货量，并且根据需求市场最终顾客所愿意支付的价格来寻求自己的利润最优；需求市场则根据分销商提供的产品售价来确定其消费水平．我们对于不同决策者以及他们独立的决策行为进行分析，在使得供应链整体利润最大的原则下，利用变分不等式建立平衡模型，并将其转换为等价的非光滑方程组，利用光滑化 Newton 法求解．在合理的条件下，证明算法的全局收敛性及其二阶收敛性．最后，通过数值模拟进行分析．

6.2　网络模型的建立

在这一节中，我们将建立由制造商、分销商以及消费者／顾客所组成的三层网络模型．制造企业处于网络的最上层即第一层的位置，承担多种产品的生产来满足位于中间层即第二层的分销商处的需求，网络的最底层即第三层为最终顾客所在的需求市场，接受来自分销商的供货以满足最终顾客的需求，层与层之间存在着供应与需求的关系．考虑到现实世界中往往存在着市场竞争，该模型中包含了可同时生产 t 种产品的 m 个制造商，以及 n 个分销商和 o 个需求市场，为了描述问题的方便，我们用 i, j, k, l 分别表示制造商，分销商，需求市场以及产品．通常情况下，供应链中各成员都是互相独立的决策制定者，并往往根据自身的利润最优来做出各种决策。下面，我们依次对制造商、分销商和需求市场进行分析，建立平衡模型，并建立平衡条件所满足的变分不等式形式．

6.2.1　制造商的行为分析及其利润模型

我们用 Q_{1il} 表示第 i 个制造商生产第 l 种产品的数量，而第 i 个制造商向下层的第 j 个分销商所提供的第 l 种产品的数量记为 $Q_{1ijl} \in R_{+}^{mnt}$ ，是构成向量 Q_1

的所有分量. 另外，对于第 i 个制造商，还需满足条件

$$Q_{1il} = \sum_{j=1}^{n} Q_{1ijl}, \qquad \forall\, l,$$

也就是说制造商所生产的产品数量正好等于他向各个分销商所提供产品数量的总和。这样，在制造商的成本中就只包括生产成本和运输成本。第 i 个分销商生产第 l 种产品的生产成本函数记为 f_{il}，它与生产量 Q_{1il} 有关。因为有多个制造商的存在，将市场的竞争性也考虑了进来，即认为第 i 个制造商所承担的生产成本不仅与自己所生产的产品数量密切有关，同时也会受到其他制造商的影响，生产成本相应可表示为

$$f_{il} = f_{il}(Q_1), \qquad \forall\, i, l.$$

而运输成本不仅与所运的产品种类及数量有关，还与运输路线和运输工具有关，这里我们用

$$c_{1ijl} = c_{1ijl}(Q_{1ijl}), \qquad \forall\, i, j,$$

表示由第 i 个制造商向第 j 个分销商运送 Q_{1ijl} 单位个第 l 种产品所需要的运输费用。因此，第 i 个制造商所承担的总成本就是生产这 l 种产品的总费用和所支付的运输费用之和。如果将第 i 个制造商向第 j 个分销商给出的第 l 种产品的单位售价记为 p^*_{1ijl}，我们可以得到制造商的利润所得，不难知道对于第 i 个制造商而言，最优供货量 Q_{1ijl} 是以下的最优化问题的解

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t} p^*_{1ijl} Q_{1ijl} - \sum_{l=1}^{t} f_{il}(Q_1) - \sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t} c_{1ijl}(Q_{1ijl}), \\ s.t. \quad & Q_{1ijl} \geqslant 0, \quad \forall\, j, l. \end{aligned} \tag{6.1}$$

根据平衡的观点，对于所有的制造商同时达到利润最优的条件可表示为如下的变分不等式形式 [149]，即找到 $Q_1^* \in R_+^{mnt}$ 使得下式成立

$$\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}\left(\frac{\partial f_{il}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}} + \frac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}^*)}{\partial Q_{1ijl}} - p^*_{1ijl}\right)(Q_{1ijl} - Q^*_{1ijl}) \geqslant 0, \qquad \forall\, Q_1 \in R_+^{mnt}. \tag{6.2}$$

上面的变分不等式实际上是最优化问题 (6.1) 的必要条件，若 (6.1) 的目标函数是凸函数，则 (6.1) 与 (6.2) 等价。变分不等式 (6.2) 具有很好的经济学意义。它说明如果分销商所愿意支付的产品单位售价等于相应的边际生产成本和边际运输成本之和，则制造商会向该分销商提供某种产品，否则，制造商与分销商之间不存在供求关系.

6.2.2 分销商的行为分析及其利润模型

分销商在整个网络中处于中间层的位置，相应也起到了连接最上层和最下层的重要作用，即不仅接受来自上一层制造商的供货，同时还要满足来自下一层需求市场的要求。假设各分销商彼此之间是互相独立的，即在其采购和销售过程中往往根据自身的利润最优来制定各类决策。显然，第 j 个分销商处第 l 种产品总的持有量就是由所有制造商对其供货量的总和，即 $\sum_{i=1}^{m} Q_{1ijl}$，而分销商向下一层所能够提供的产品数量的总和显然不能超过该产品的持有量。我们用 Q_{2jkl} 来表示第 j 个分销商向第 k 个需求市场提供第 l 种产品的数量，显然有以下不等式关系成立，

$$\sum_{k=1}^{o} Q_{2jkl} \leqslant \sum_{i=1}^{m} Q_{1ijl}, \qquad \forall j, l,$$

而且，Q_{2jkl} 是非负变量，即 $Q_2 \in R_{+}^{not}$。

对于分销商，除了应承担产品的采购成本，即向制造商所支付的那部分费用，还需要承担产品的保管及存放费用，这里我们称之为产品的持有成本，记为 c_{2jl}。持有成本与该分销商处相应的产品库存量有着直接的关系，为了增加模型中各成员间的竞争性，我们将持有成本表示为

$$c_{2jl} = c_{2jl}(Q_1), \qquad \forall j, l,$$

也就是说，第 j 个分销商对于第 l 种产品所支付的管理费用不仅与自己所持有的第 l 种产品的数量有关，同时还会受其他分销商所有的第 l 种产品数量的影响，并且假设该函数具有连续且凸的特点。这样，如果将其向第 k 个需求市场提出的第 l 种产品的单位售价记为 p_{2jkl}，则不难知道第 j 个分销商最大利润的获得可以表示为以下最优化问题

$$\begin{aligned} \max \quad & \sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t} p_{2jkl}^{*} Q_{2jkl} - \sum_{l=1}^{t} c_{2jl}(Q_1) - \sum_{i=1}^{m}\sum_{l=1}^{t} p_{1ijl}^{*} Q_{1ijl}, \\ s.t. \quad & \sum_{k=1}^{o} Q_{2jkl} \leqslant \sum_{i=1}^{m} Q_{1ijl}, \\ & Q_{1ijl} \geqslant 0, \quad Q_{2jkl} \geqslant 0, \qquad \forall i, k, l. \end{aligned} \tag{6.3}$$

在这个优化问题中，并没有把关于产品的价格作为决策变量来考虑，但是通过后面的讨论，会发现当完整的平衡模型建立起来，相应产品在各层之间最佳的交易价格也就可以确定下来。

对于每个分销商而言，都存在这样一个带有约束条件的最优化问题来决定其最佳的产品采购和销售行为。由于假设了各分销商之间是互相独立的竞争者，且其持有成本函数又具有连续且凸的性质，类似于前面，我们同样可以将 (6.3) 转换

为如下变分不等式，求 $(Q_1^*, Q_2^*, \lambda^*) \in R_+^{mnt+not+nt}$ 使得

$$\begin{aligned}&\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}(\frac{\partial c_{2jl}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}} + p_{1ijl}^* - \lambda_{ji}^*)(Q_{1ijl} - Q_{1ijl}^*)\\&+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(-p_{2jkl}^* + \lambda_{jl}^*)(Q_{2jkl} - Q_{2jkl}^*)\\&+\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}(\sum_{i=1}^{m} Q_{1ijl}^* - \sum_{k=1}^{o} Q_{2jkl}^*)(\lambda_{jl} - \lambda_{jl}^*) \geqslant 0\,,\ \forall (Q_1,\, Q_2, \lambda) \in R_+^{mnt+not+nt},\end{aligned} \tag{6.4}$$

这里， λ_{jl} 是与第 j 个分销商相关的最优化问题 (6.3) 中约束条件相应的拉格朗日乘子，而 λ 是由全部的乘子所构成的 nt 维的向量。

表示成变分不等式形式的最优条件 (6.4) 同样可以从经济学方面给出合理的解释。由不等式 (6.4) 的第二项可知，若第 j 个分销商向第 k 个需求市场提供了第 l 种产品，则相应的产品售价 p_{2jkl}^* 就会等于拉格朗日乘子 λ_{jl}^* ，而且进一步由变分不等式 (6.4) 的第三项，说明此时该分销商所持有的第 l 种产品也将全部售出，即 $\sum_{k=1}^{o} Q_{2jkl}^* = \sum_{i=1}^{m} Q_{1ijl}^*$. 另外，我们还发现，如果第 i 个制造商向第 j 个分销商提供第 l 种产品，则 λ_{jl}^* 会等于分销商向制造商所支付的单位产品价格 p_{1ijl}^* 和分销商保管该产品的边际持有成本之和。

6.2.3 需求市场的行为分析及其平衡条件的建立

在需求市场，最终客户的需求将会得到满足。这里，我们仍用 Q_{2jkl} 来表示由第 j 个分销商向第 k 个需求市场提供第 l 种产品的数量，而用 c_{3jkl} 来表示相应的产品在运输过程中所花费的成本。假设运输成本是连续的函数，并且将其表示为如下的一般形式

$$c_{3jkl} = c_{3jkl}(Q_2)\,, \qquad \forall\, j,\, k,\, l.$$

这里，将第 l 种产品在第 k 个需求市场的单位售价记为 p_{3kl} ，而相应的需求量记为 d_{3kl} 。显然对产品的需求量与产品在该需求市场的售价有关，我们不仅可以将需求表示为

$$d_{3kl} = d_{3kl}(p_{3l})\,, \qquad \forall\, k,\, l,$$

而且还假设该函数连续， p_{3l} 是以第 l 种产品在所有的需求市场的单位售价为分量所组成的 o 维向量。因此，产品在某个需求市场的需求量不仅与产品在该需求市场的单位售价有关，还会与它在其他需求市场的单位售价有关，从而增加了模型中各需求市场之间的竞争性，更加贴近现实世界的真实情况。

根据熟知的空间价格平衡条件 [149] ，就可以列出该模型中在第 k 个需求市场

对于任意的 j、l 都成立的平衡条件：

$$p_{2jkl}^{*}+c_{3jkl}(Q_2^{*})\begin{cases}\geqslant p_{3kl}^{*} & 若\ Q_{2jkl}^{*}=0\,,\\ =p_{3kl}^{*} & 若\ Q_{2jkl}^{*}\geqslant 0\,,\end{cases}\tag{6.5}$$

$$d_{3kl}(p_{3l}^{*})\begin{cases}=\sum\limits_{j=1}^{n}Q_{2jkl}^{*} & 若\ p_{3kl}^{*}\geqslant 0\,,\\ \leqslant\sum\limits_{j=1}^{n}Q_{2jkl}^{*} & 若\ p_{3kl}^{*}=0\,.\end{cases}\tag{6.6}$$

公式 (6.5) 说明在平衡状态下，如果第 k 个需求市场向第 j 个分销商购买了第 l 种产品，则产品在第 k 个需求市场的单位售价会恰好等于在运输过程中所需费用与第 j 个分销商处该种产品的单位售价之和。而条件 (6.6) 则说明当达到平衡时，若第 l 种产品在第 k 个需求市场的单位售价为正，此时对产品的需求量就等于第 k 个需求市场所持有该产品的总量。

对于所有的需求市场平衡条件 (6.5) 式和 (6.6) 式均成立，因此我们同样可以将该问题用一个变分不等式的形式来表示，即找到 $(Q_2^{*},p_3^{*})\in R_{+}^{not+ot}$，使得下式成立

$$\begin{aligned}&\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(p_{2jkl}^{*}+c_{3jkl}(Q_2^{*})-p_{3kl}^{*})(Q_{2jkl}-Q_{2jkl}^{*})\\&+\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(\sum_{j=1}^{n}Q_{2jkl}^{*}-d_{kl}(p_{3kl}^{*}))(p_{3kl}-p_{3l}^{*})\geqslant 0\,,\ \forall\,(Q_2,p_3)\in R_{+}^{not+ot},\end{aligned}\tag{6.7}$$

这里，p_3 是由所有产品在不同的需求市场的单位售价所组成的 ot 维向量。

6.2.4 供应链网络平衡条件的建立

对于组成供应链的制造商、分销商和最终顾客所在的需求市场，都会分别根据公式 (6.2)、(6.4) 和 (6.7) 来决定各自所愿意向下一层提供、或向上一层购买的产品数量，以及相应的产品售价或购买价格。当供应链整体达到平衡时，由制造商所决定的产品供应量就是各分销商所愿意购进的产品数量，而分销商向各分销市场所提供的产品数量也恰好就是各分销市场处产品的需求量。因此，为了使供应链中各成员所独自作出的决策与供应链整体的平衡解一致，在平衡条件下，各层间产品的交易数量以及价格必然会满足由公式 (6.2)、(6.4) 和 (6.7) 之和所构成的不等式。为了描述得更加准确，我们给出了如下定义。

定义 6.2.1 供应链整体达到平衡状态，即各层独立的决策制定者对于不同产品在层与层间的交易量以及价格达成一致，同时保证由条件 (6.2)、(6.4) 以及 (6.7) 之和所构成的不等式关系仍然成立。

由上述定义不难得到当供应链整体达到平衡时，供应链内部各决策变量所满

足的关系式，因此，我们有如下结论。

定理 6.2.1 带有竞争性的供应链网络平衡模型，等价于如下的变分不等式问题，即找到 $(Q_1^*, Q_2^*, \lambda^*, p_3^*) \in R_+^N$ 使得下式

$$\begin{aligned}
&\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}\Big(\frac{\partial f_{il}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}}+\frac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}^*)}{\partial Q_{1ijl}}+\frac{\partial c_{2jl}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}}-\lambda_{jl}^*\Big)(Q_{1ijl}-Q_{1ijl}^*)\\
&+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(c_{3jkl}(Q_2^*)+\lambda_{jl}^*-p_{3jkl}^*)(Q_{2jkl}-Q_{2jkl}^*)\\
&+\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}\Big(\sum_{i=1}^{m}Q_{1ijl}^*-\sum_{k=1}^{o}Q_{2jkl}^*\Big)(\lambda_{jl}-\lambda_{jl}^*)\\
&+\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}\Big(\sum_{j=1}^{n}Q_{2jkl}^*-d_{kl}(p_{3l}^*)\Big)(p_{3kl}-p_{3kl}^*)\geqslant 0\,,\ \forall\,(Q_1,\,Q_2,\,\lambda,\,p_3)\in R_+^N,
\end{aligned}\tag{6.8}$$

成立，其中 $R_+^N=\{(Q_1,\,Q_2,\,\lambda,\,p_3)|(Q_1,\,Q_2,\,\lambda,\,p_3)\in R_+^{mnt+not+nt+ot}\}$。

为了描述的简便，我们将上式改写为标准的变分不等式形式，即求 $X^*\in R_+^N$，使得

$$\langle F(X^*), X-X^*\rangle \geqslant 0\,,\qquad \forall\, X\in R_+^N,\tag{6.9}$$

成立，$X\equiv(Q_1,\,Q_2,\,\lambda,\,p_3)$，$F(X)\equiv(F_{ijl},\,F_{jkl},\,F_{jl},\,F_{kl})_{i=1,\dots,m,j=1,\dots,n,k=1,\dots,o,l=1,\dots,t}$ 依次代表了组成公式 (6.8) 的各个分项。而变分不等式中的各个变量依次为由制造商向分销商提供的产品 Q_1，由分销商向需求市场提供的产品 Q_2，与分销商的产品持有成本和售价有关的 λ 以及在需求市场产品的最终售价 p_3。

在前面供应链网络模型的构造中，制造商以及分销商处产品的售价均未作为变量来考虑，这是因为当供应链整体达到平衡状态时，产品的售价可以由其他变量的取值，即变分不等式 (6.8) 的解来共同决定。根据前面的分析，不难由公式 (6.8) 的解知道，如果第 i 个制造商向第 j 个分销商提供第 l 种产品，也就是说对某个 i、j、l 而言有 $Q_{1ijl}^*>0$，则此时产品的单位售价应为 $p_{1ijl}^*=\dfrac{\partial f_{il}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}}+\dfrac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}^*)}{\partial Q_{1ijl}}$；另外，若第 j 个分销商向第 k 个需求市场提供了第 l 种产品，即 $Q_{2jkl}^*>0$，则有分销商处产品的单位售价 $p_{2jkl}^*=\lambda_{jl}^*$。

由 (6.8) 可知，若 $\lambda_{jl}^*>0$，则有 $\sum\limits_{i=1}^{m}Q_{1ijl}^*=\sum\limits_{k=1}^{o}Q_{2jkl}^*$，即第 j 个分销商所持有的第 l 种产品会恰好全部售出。我们再提出一个合理的假设，在平衡时与制造商和分销商有关的任意一种产品的边际生产成本、边际运输成本和边际持有成本

之和会大于零，即

$$\frac{\partial f_{il}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}}+\frac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}^*)}{\partial Q_{1ijl}}+\frac{\partial c_{2jl}(Q_1^*)}{\partial Q_{1ijl}}>0.$$

对于 $\lambda_{jl}^*=0$ 的情形，由不等式 (6.8) 的第一项，不难知道对于所有的 i ，都有 $Q_{1ijl}^*=0$ 成立，进而由 (6.8) 式的第三项可以得到 $\sum_{k=1}^{o}Q_{2jkl}^*=0$. 此时，第 j 个分销商购进第 l 种产品的数量为零，同时售出的数量仍然为零。因此，无论 λ^* 的最终取值是多少，当由多个制造商、多个分销商、多个需求市场所构成的供应链达到平衡时，所有的制造商向某个分销商所提供的某种产品的总和恰好就等于所有需求市场在该分销商处所需产品的总和，即 $\sum_{i=1}^{m}Q_{1ijl}^*=\sum_{k=1}^{o}Q_{2jkl}^*$. 显然，当供应链整体达到平衡时，分销商既不需要为未售出的产品而承担利润损失，同时也不必担心因不能完全满足需求市场的要求而受到商誉损失，即有下面结论。

推论 6.2.1 在供应链达到平衡时，每一个分销商处所持有的产品都会恰好全部售出。

通过求解变分不等式 (6.8)，我们不仅可以得到供应链在平衡时，各制造商与各分销商之间，以及各分销商与各需求市场之间产品的交易量，同时还可以得到相应产品的交易价格. 在下一节中，我们将给出求解该不等式的方法，并且提出保证所给算法收敛的条件.

6.3 供应链网络平衡问题的求解

在已有的关于网络平衡模型的求解算法，主要是投影法或其修正形式。本节，我们利用近 20 年被广泛关注的光滑化 Newton 法来求解. 注意到变分不等式 (6.8) 可以等价地表示为下面的非线性互补问题，即求 $X^*\in R_+^N$ ，使得

$$F(X^*)\in R_+^N \quad \text{并且} \quad F(X^*)^TX^*=0. \tag{6.10}$$

我们在 Qi 、 Sun 和 Zhou[179] 所提出的光滑化 Newton 法的基础上，提出一种求解 (6.8) 或 (6.9) 的算法. 我们引入 Fischer-Burmeister 函数 $\varphi:R^2\to R$ ，

$$\varphi(a,b)=\sqrt{a^2+b^2}-a-b.$$

Fischer-Burmeister 函数的一个重要性质是：

$$\varphi(a,b)=0\Leftrightarrow a\geqslant 0,\ b\geqslant 0,\ ab=0.$$

利用该函数，可以将 (6.10) 转换为等价的非线性方程组. 令

$$G(x):=\begin{pmatrix}\varphi(x_1,\ F_1(x))\\ \vdots\\ \varphi(x_N,\ F_N(x))\end{pmatrix}.$$

容易看出，(6.10) 等价于非线性方程组 $G(x)=0$。由于 φ 在 (0,0) 处不可微，因此，$G(x)$ 不光滑。为了求解方程组 $G(x)=0$，我们构造 $G(x)$ 的光滑化函数 $G_u: R_+^N \to R_+^N$ 如下

$$G_u(x) := \begin{pmatrix} \varphi_u(x_1,\, F_1(x)) \\ \vdots \\ \varphi_u(x_N,\, F_N(x)) \end{pmatrix},$$

其中 $\varphi_u: R^2 \to R$ 记为关于 Fischer-Burmeister 函数的光滑近似 [195]

$$\varphi_u(a,b) = \sqrt{a^2+b^2+2u} - a - b, \quad u>0.$$

不难看出，对任何 $u>0$，函数 φ_u 连续可微。在此基础上，令 $z:=(u,x)\in R_+\times R^N$，并令

$$H(z) := \begin{pmatrix} u \\ G_u(x) \end{pmatrix}. \tag{6.11}$$

不难知道，当 $u=0$ 时，$G_u(x)=0$ 的解就是非线性互补问题 (6.10) 的解，即供应链网络模型平衡问题 (6.8) 等价于解非线性方程组 $H(z)=0$。类似于 Qi、Sun 和 Zhou[179] 中的光滑化 Newton 法，我们提出求解 (6.8) 的如下光滑化 Newton 法。

算法 1

步骤 0. 选择 $\bar{u}\in R_+$ 和 $\alpha\in(0,1)$ 使得 $\alpha\,\bar{u}<1$ 成立，给定常数 $\delta\in(0,1)$ 和 $\sigma\in(0,1/2)$。记 $\bar{z}:=(\bar{u},0)\in R_+\times R_+^N$，$u^0:=\bar{u}$，取 $x^0\in R^N$，定义 $\beta(z):=\alpha\min\{1,\psi(z)^{1/2}\}$，其中 $\psi(z):=\|H(z)\|^2$，令 $k:=0$。

步骤 1. $z^k:=(u^k,x^k)$，如果 $H(z^k)=0$，则计算停止，且得到所求解为 $X^*=x^k$；否则，令 $\beta_k=\beta(z^k)$。

步骤 2. 求解

$$H(z^k)+H'(z^k)\Delta z^k = \beta_k\bar{z}, \tag{6.12}$$

得到 $\Delta z^k:=(\Delta u^k,\Delta x^k)\in R_+\times R_+^N$。

步骤 3. 令 l^k 是使得

$$\psi z^k + \delta^l\Delta z^k \leqslant [1-2\sigma(1-\alpha\,\bar{u})\delta^l]\psi(z^k) \tag{6.13}$$

成立的最小的非负整数 l，并且令 $z^{k+1}=z^k+\delta^{l^k}\Delta z^k$。

步骤 4. 令 $k:=k+1$，转步骤 1。

注：上面算法的适定性可参看 [179]。而且，算法 1 产生的 u^k 保证为正数，因此，$H'(z^k)$ 总存在。为了建立算法 1 的收敛性定理，我们需要如下假设条件。

假设 6.3.1 函数 $F(\cdot)$ 是连续可微的.

假设 6.3.2 $H'(z)$ 对于任意的 $z \in R_+ \times R_+^N$ 是非奇异的。

我们将在后面给出由 (6.11) 定义的函数 H 满足上述假设的条件. 在假设 6.3.1 和假设 6.3.2 均成立的前提下， Qi 、 Sun 和 Zhou[179] 给出了保证算法 1 收敛的一般性定理，并且在一定条件下，该算法还具有超线性或二次收敛性。

引理 6.3.1 (全局收敛性) 若假设 6.3.1 和假设 6.3.2 均成立，则由算法 1 所得的迭代解序列 $\{z^k\}$ 的任何极限点都是 $H(z) = 0$ 的解.

引理 6.3.2 (二次收敛性) 若假设 6.3.1 和假设 6.3.2 均成立， z^* 是由算法 1 所得的迭代解序列 $\{z^k\}$ 的极限点。若 F' 在 z^* 处为 Lipschitz 连续，则算法 1 具有二次收敛性，即

$$\|z^{k+1} - z^*\| = O(\|z^k - z^*\|^2).$$

半光滑性 (Semismoothness) 最初是由 Mifflin[196] 提出，凸函数、光滑函数和分段线性函数都属于半光滑函数的范畴，而且由半光滑函数所构成的函数仍然是半光滑的. Qi 和 Sun[170] 将半光滑函数的定义推广至 R^n ，其定义如下，对函数 $\Phi: R^{m_1} \to R^{m_2}$ ，若对于 $x \in R^{m_1}$ ，

$$\lim_{\substack{V \in \partial\Phi(x+th') \\ h' \to h,\, t\downarrow 0}} Vh'$$

存在，则称函数 Φ 在点 x 处是半光滑的. Qi 和 Sun[170] 证明 Φ 在 x 点处是半光滑函数当且仅当组成该函数的各个分函数在 x 点处都是半光滑的. 而且，若 Φ 是半光滑函数，对 $\forall h \in R^{m_1}$ ， Φ 在点 x 都存在关于 h 的方向导数 $\Phi'(x;h)$ 。而所谓强的半光滑函数，是指函数 Φ 如果在点 x 处半光滑，且对 $\forall V \in \partial\Phi(x+h)$, 当 $h \to 0$ 时有

$$Vh - \Phi'(x\,;h) = O(\|h\|^2)$$

成立，则称函数 Φ 在点 x 处是强的半光滑函数. 若 F' 在 x 点处是 Lipschitz 连续的，则由 (6.11) 定义的 $H(z)$ 是强的半光滑函数.

假设 6.3.1 和假设 6.3.2 的成立可以保证算法的收敛，下面我们讨论 (6.11) 定义的函数 H 满足此两假设的条件.

引理 6.3.3 设所有 i, j, k, l ， $f_{il}, c_{1ijl}, c_{2jl}$ 均为 R_+^N 上连续可微的凸函数， c_{3jkl} 在 R_+^N 上单调递增， d_{kl} 在 R_+^N 上单调递减，则变分不等式 (6.9) 中的函数 F 连续可微，而且单调，即

$$\langle F(X') - F(X''), X' - X''\rangle \geqslant 0 \quad \forall X', X'' \in R_+^N. \tag{6.14}$$

证明：函数 F 的连续可微性显然。记 $X'=((Q_1',Q_2',\lambda',p_3'))$，$X''=(Q_1'',Q_2'',\lambda'',p_3'')$，并且 $X',X''\in R_+^N$，由 (6.8) 式可得

$$\langle F(X')-F(X''),X'-X''\rangle=\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}(\frac{\partial f_{il}(Q_1')}{\partial Q_{1ijl}}-\frac{\partial f_{il}(Q_1'')}{\partial Q_{1ijl}})\times(Q_{1ijl}'-Q_{1ijl}'')$$
$$+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}(\frac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}')}{\partial Q_{1ijl}}-\frac{\partial c_{1ijl}(Q_{1ijl}'')}{\partial Q_{1ijl}})\times(Q_{1ijl}'-Q_{1ijl}'')$$
$$+\sum_{i=1}^{m}\sum_{j=1}^{n}\sum_{l=1}^{t}(\frac{\partial c_{2jl}(Q_1')}{\partial Q_{1ijl}}-\frac{\partial c_{2jl}(Q_1'')}{\partial Q_{1ijl}})\times(Q_{1ijl}'-Q_{1ijl}'')$$
$$+\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(c_{3jkl}(Q_2')-c_{3jkl}(Q_2''))\times(Q_{2jkl}'-Q_{2jkl}'')$$
$$+\sum_{k=1}^{o}\sum_{l=1}^{t}(-d_{kl}(p_{3l}')+d_{kl}(p_{3l}''))\times(p_{3kl}'-p_{3kl}''),$$

因为 f_{il},c_{1ijl},c_{2jl} 是 R_+^N 上的凸函数，而 c_{3jkl} 在 R_+^N 上单调递增，d_{kl} 在 R_+^N 上单调递减，则上式的各个分项均非负，因此其和也仍是非负的，引理得证。

由上面的引理，可进一步得到如下关于变分不等式 (6.9) 解的唯一性定理。

定理 6.3.1 设对所有的 i,j,k,l，若 f_{il},c_{1ijl},c_{2jl} 为 R_+^N 上的严格凸函数，c_{3jkl} 在 R_+^N 上严格单调递增，d_{kl} 在 R_+^N 上严格单调递减，则函数 F 关于 (Q_1,Q_2,p_3) 严格单调，即

$$\langle F(X')-F(X''),X'-X''\rangle>0,\quad X',X''\in R_+^N \text{ 且 } (Q_1',Q_2',p_3')\neq(Q_1'',Q_2'',p_3''),\tag{6.15}$$

此时，变分不等式 (6.9) 若有解，则其解唯一。

证明：只需证明函数 F 的严格单调性成立。对应于 $(Q_1',Q_2',p_3')\neq(Q_1'',Q_2'',p_3'')$，则 $Q_1'\neq Q_1'',Q_2'\neq Q_2''$ 以及 $p_3'\neq p_3''$ 中至少有一个不等式关系成立。由定理中所给的条件及引理 6.3.3 可知，(6.15) 式中至少会有一个分项的严格不等号成立，自然所有分项的和也会严格大于零，由定义可知函数 F 是严格单调的。也正是因为函数 F 的严格单调性成立，由定理 1.3.2，可以直接得到若解存在，则必唯一的结论。

由引理 6.3.1 和引理 6.3.2，可建立算法 1 的如下收敛性定理。

定理 6.3.2 若引理 6.3.3 中所给条件成立，则光滑化 Newton 法产生的解序列的任何极限点都是 $H(z)=0$ 的解。

证明：由引理 6.3.1 知只需要证明假设 6.3.2 成立。因此，从以下两种情形分别进行讨论。用 e_i 表示第 i 个分量为 1 ，其余分量均为零的单位向量，则对任何的 $u>0$ ，有

$$\begin{aligned}\frac{\partial\varphi_u(x_i, F_i(x))}{\partial x} &= \frac{x_ie_i+F_i(x)\nabla F_i(x)}{\sqrt{x_i^2+F_i^2(x)+2u}}-(e_i+\nabla F_i(x)) \\ &= \left(\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2+F_i^2(x)+2u}}-1\right)e_i+\left(\frac{F_i(x)}{\sqrt{x_i^2+F_i^2(x)+2u}}-1\right)\nabla F_i(x).\end{aligned}$$

令

$$a_i(z)=\frac{x_i}{\sqrt{x_i^2+F_i^2(x)+2u}}-1, \qquad b_i(z)=\frac{F_i(x)}{\sqrt{x_i^2+F_i^2(x)+2u}}-1,$$

不难得到

$$H'(z)=\begin{pmatrix} 1 & 0 \quad \cdots \quad 0 \\ \frac{1}{\sqrt{x_1+F_1(x)+2u}} & \\ \vdots & A(z) \\ \frac{1}{\sqrt{x_N+F_N(x)+2u}} & \end{pmatrix}_{(N+1)\times(N+1)}$$

其中

$$A(z)=\begin{pmatrix} a_1(z) & & \\ & \ddots & \\ & & a_N(z)\end{pmatrix}+\begin{pmatrix} b_1(z) & & \\ & \ddots & \\ & & b_N(z)\end{pmatrix}\nabla F(x).$$

因此，$H'(z)$ 的非奇异性等价于 $A(z)$ 的非奇异性。因为 $u>0$，必有 $-2<a_i(z)<0, -2<b_i(z)<0$ 。记

$$\Lambda_1(z):=\begin{pmatrix} a_1(z) & & \\ & \ddots & \\ & & a_N(z)\end{pmatrix}, \qquad \Lambda_2(z):=\begin{pmatrix} b_1(z) & & \\ & \ddots & \\ & & b_N(z)\end{pmatrix},$$

则 $\Lambda_1(z), \Lambda_2(z)$ 均为对角线上元素为负的对角矩阵，且

$$A(z)=\Lambda_1(z)[I+\Lambda_1^{-1}(z)\Lambda_2(z)\nabla F(x)].$$

由于 $\Lambda_1(z), \Lambda_1^{-1}(z)\Lambda_2(z)$ 均为正定矩阵，且 $\nabla F(x)$ 半正定，因此，$A(z)$ 非奇异。从而由引理 6.3.1 知定理成立。

定理 6.3.3 设存在 $\{z^k\}$ 的极限点 z^* ，使得 $F'(x^*)$ 正定且 F' 在 x^* 处 Lipschitz 连续，则 $\{z^k\}$ 收敛于 z^* ，而且，收敛速度是二次的。

证明: 由引理 6.3.2 知，只需证明 $\partial H(z^*)$ 中每个元素均非奇异。注意到， $\forall x$ ，我们有

$$\frac{\partial \varphi_u(x_i,\, F_i(x))}{\partial x} \subseteq \{(\rho_{1i}-1)e_i + (\rho_{2i}-1)\nabla F_i(x) | \, \rho_{1i} \in (-1,1),\, \rho_{1i}^2 + \rho_{2i}^2 \leqslant 1, \quad \forall i = 1, \cdots, N\}. \tag{6.16}$$

因此， H 的广义 Jacobi 矩阵可以表示为

$$H'(z) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cdots & 0 \\ \dfrac{1}{\sqrt{x_1 + F_1(x)}} & & & \\ \vdots & & B(z) & \\ \dfrac{1}{\sqrt{x_N + F_N(x)}} & & & \end{pmatrix}_{(N+1)\times(N+1)}$$

其中

$$B(z) = \begin{pmatrix} \rho_{11}(z)-1 & & \\ & \ddots & \\ & & \rho_{1N}(z)-1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \rho_{21}(z)-1 & & \\ & \ddots & \\ & & \rho_{2N}(z)-1 \end{pmatrix} \nabla F(x),$$

ρ_{ij} 满足:

$$\rho_{1j}^2 + \rho_{2j}^2 \leqslant 1, \qquad j = 1, 2, \ldots, N.$$

由于 $\nabla F(x^*)$ 正定，故得 $B(z^*)$ 非奇异，从而 $H'(z^*)$ 非奇异。因此，由引理 6.3.2 知定理的结论成立。

对于由 6.2.4 节所定义的 F ，不难证明，若 $\forall i, j, k, l$ ， $\nabla^2 f_{il}$、$\nabla^2 c_{1ijl}$ 和 $\nabla^2 c_{2jl}$ 正定， $c'_{3jkl} > 0$ ， $d'_{kl} < 0$ ，则 $F'(x)$ 正定。

6.4 数值模拟

本节，就供应链中各成员互相独立或是互相竞争的情形给出了多个数值算例，并采用上一节中所提到的光滑化 Newton 法进行求解。在所有的计算中，迭代初始点 $\bar{u}$ 及 x^0 由计算机随机赋值，并且取 $\alpha = 0.0001, \delta = 0.8, \sigma = 0.3$ ，而收敛准则为 $\|H(z^k)\| < 10^{-6}$ 。

例 1. 我们首先考虑较简单的情形，即组成供应链的各成员间是互相独立的。虽然我们只假设供应链由两个制造商、两个分销商、两个需求市场和两种不同的产品所组成，却足以反映出复杂的供应链网络模型如何达到平衡，及其平衡解的特点。

一般而言，制造商的生产成本除了会与所生产产品的数量有关，往往还会包

括用于生产准备和安排的固定成本．这里，假设各制造商的生产成本分别为

$$f_{11}(Q_1) = 20\,Q_{111} + 1000, \qquad f_{12}(Q_1) = 40\,Q_{112} + 1000,$$

$$f_{21}(Q_1) = 20\,Q_{121} + 1000, \qquad f_{22}(Q_1) = 20\,Q_{122} + 1000.$$

且由制造商所承担的运输成本函数也只与产品数量有关

$$c_{1111}(Q_{1111}) = 2\,Q_{1111} + 200, \quad c_{1112}(Q_{1112}) = 2\,Q_{1112} + 200,$$

$$c_{1121}(Q_{1121}) = 2\,Q_{1121} + 200, \quad c_{1122}(Q_{1122}) = 2\,Q_{1122} + 200,$$

$$c_{1211}(Q_{1211}) = 2\,Q_{1211} + 200, \quad c_{1212}(Q_{1212}) = 2\,Q_{1212} + 200,$$

$$c_{1221}(Q_{1221}) = 2\,Q_{1221} + 200, \quad c_{1222}(Q_{1222}) = 2\,Q_{1222} + 200.$$

分销商处的持有成本可分别表示为

$$c_{211}(Q_2) = 2\sum_{i=1}^{2} Q_{1i11}, \quad c_{212}(Q_2) = 2\sum_{i=1}^{2} Q_{1i12},$$

$$c_{221}(Q_2) = 2\sum_{i=1}^{2} Q_{1i21}, \quad c_{222}(Q_2) = 2\sum_{i=1}^{2} Q_{1i22}.$$

通常情况下，需求总是关于价格的减函数，因此我们将需求市场处的需求函数表示为

$$d_{11}(p_{31}) = -2p_{311} + 1000, \quad d_{12}(p_{32}) = -2p_{312} + 1000,$$

$$d_{21}(p_{31}) = -2p_{321} + 1000, \quad d_{22}(p_{32}) = -2p_{322} + 1000.$$

而产品由各分销商处到达需求市场的过程中所花费的运输成本为

$$c_{3111}(Q_2) = 0.05\,Q_{2111} + 5, \quad c_{3112}(Q_2) = 0.05\,Q_{2112} + 5,$$

$$c_{3121}(Q_2) = 0.05\,Q_{2121} + 5, \quad c_{3122}(Q_2) = 0.05\,Q_{2122} + 5,$$

$$c_{3211}(Q_2) = 0.05\,Q_{2211} + 5, \quad c_{3212}(Q_2) = 0.05\,Q_{2212} + 5,$$

$$c_{3221}(Q_2) = 0.05\,Q_{2221} + 5, \quad c_{3222}(Q_2) = 0.05\,Q_{2222} + 5.$$

在这个例子中，除了产品的不同相应的生产成本也应当不同之外，与不同的制造商、分销商或是需求市场相关的函数关系却没有太大差异，这样假设，是为了方便后面的例子中，在更复杂的情形之下所得的平衡解可以与之做比较．通过用光滑化 Newton 法求解，用 7 次迭代就得到了供应链达到平衡时的解，并且有制造商向各个分销商所提供的产品数量分别为 $Q_1^*: Q_{1111}^* = Q_{1121}^* = Q_{1211}^* = Q_{1221}^* = 448.57, Q_{1112}^* = Q_{1122}^* = Q_{1212}^* = Q_{1222}^* = 429.52$，分销商向各需求市场所提供的产品数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^* = Q_{2121}^* = Q_{2211}^* = Q_{2221}^* = 448.57, Q_{2112}^* = Q_{2122}^* = Q_{2212}^* = Q_{2222}^* = 429.52$，分销商处产品的单位售价也就是向量 λ^* 的各个分量 $\lambda_{11}^* = \lambda_{21}^* = 24.00, \lambda_{12}^* = \lambda_{22}^* = 44.00$，而在需求市场处产品的单位售价为 $p_{311}^* = p_{321}^* = 51.43, p_{312}^* = p_{322}^* = 70.48$．

例 2. 与例 1 相比，除了第一个制造商的生产成本和运输成本有所不同，并且表

示为

$$f_{11}(Q_1) = 25\,Q_{111} + 1000, \qquad f_{12}(Q_1) = 45\,Q_{112} + 1000,$$
$$c_{1111}(Q_{1111}) = 2.5\,Q_{1111} + 200, \quad c_{1112}(Q_{1112}) = 2.5\,Q_{1112} + 200,$$
$$c_{1121}(Q_{1121}) = 2.5\,Q_{1121} + 200, \quad c_{1122}(Q_{1122}) = 2.5\,Q_{1122} + 200,$$

其余的函数关系均不变，该制造商的生产成本以及运输成本与另一个制造商相比较显然更高。

同样，用了 11 次的迭代我们得到了如下计算结果。达到平衡状态时，除了制造商向各个分销商所提供的产品数量变化为 $Q_1^* : Q_{1111}^* = Q_{1121}^* = Q_{1121}^* = Q_{1122}^* = 0, Q_{1211}^* = Q_{1221}^* = 897.14, Q_{1212}^* = Q_{1222}^* = 859.05$ ，其余变量的值都与例 1 中所得到的完全相同。这说明，因为成本的增加，原来由第一个制造商所生产和供应的产品全部转由另一个制造商来提供．因此当供应链整体达到平衡时，其整体的利润仍然达到了最优水平。

例 3. 在例 2 的基础上，只将第一个分销商的持有成本和与之有关的运输成本增加，具体为

$$c_{211}(Q_2) = 2.5\sum_{i=1}^{2} Q_{1i11}, \qquad c_{212}(Q_2) = 2.5\sum_{i=1}^{2} Q_{1i12},$$
$$c_{3111}(Q_2) = 0.1\,Q_{2111} + 5, \qquad c_{3112}(Q_2) = 0.1\,Q_{2112} + 5,$$
$$c_{3121}(Q_2) = 0.1\,Q_{2121} + 5, \qquad c_{3122}(Q_2) = 0.1\,Q_{2122} + 5.$$

通过 10 次迭代计算我们得到了供应链整体的平衡解．由制造商向分销商所提供的产品数量 $Q_1^* : Q_{1111}^* = Q_{1121}^* = Q_{1121}^* = Q_{1122}^* = 0, Q_{1211}^* = 581.87, Q_{1212}^* = 556.87, Q_{1221}^* = 1183.75, Q_{1222}^* = 1133.75$ ，由各分销商向各需求市场提供的产品数量为 $Q_2^* : Q_{2111}^* = Q_{2121}^* = 290.94, Q_{2112}^* = Q_{2122}^* = 278.44, Q_{2211}^* = Q_{2221}^* = 591.87, Q_{2212}^* = Q_{2222}^* = 566.87$ ，向量 λ^* 则为 $\lambda_{11}^* = 24.50, \lambda_{12}^* = 44.50, \lambda_{21}^* = 24.00, \lambda_{22}^* = 44.00$ ，需求市场处产品的单位售价为 $p_{311}^* = p_{321}^* = 58.59, p_{312}^* = p_{322}^* = 77.34$ ．随着其中一个分销商的成本增加，该分销商处对产品的需求明显减少，而且随着在分销商及需求市场产品售价的提高，相应对产品的整体需求量也有所减少。

例 4. 我们在例 3 的基础上增加了一个新的制造商，其生产成本及运输成本均介于其他两个制造商之间，以此增加成员间的竞争性。其具体的成本函数表示如下

$$f_{31}(Q_1) = 20\,Q_{131} + 1000, \qquad f_{32}(Q_1) = 45\,Q_{132} + 1000,$$
$$c_{1311}(Q_{1311}) = 2\,Q_{1311} + 200, \qquad c_{1312}(Q_{1312}) = 2\,Q_{1312} + 200,$$
$$c_{1321}(Q_{1321}) = 2.5\,Q_{1321} + 200, \quad c_{1322}(Q_{1322}) = 2.5\,Q_{1322} + 200.$$

而分销商的持有成本相应调整为

$$c_{211}(Q_2)=2\sum_{i=1}^{3}Q_{1i11},\quad c_{212}(Q_2)=2\sum_{i=1}^{3}Q_{1i12},$$

$$c_{221}(Q_2)=2\sum_{i=1}^{3}Q_{1i21},\quad c_{222}(Q_2)=2\sum_{i=1}^{3}Q_{1i22}.$$

因为只是增加了一个新的制造商，供应链的平衡解除了 Q_1^* 会有所变化，其余均与例 3 中计算得到的结果一致. 在 12 次的迭代计算之后，我们得到 Q_1^*：$Q_{1111}^*=Q_{1121}^*=Q_{1121}^*=Q_{1122}^*=0, Q_{1211}^*=290.94, Q_{1212}^*=556.87, Q_{1221}^*=1183.75, Q_{1222}^*=1133.75, Q_{1311}^*=290.94, Q_{1312}^*=Q_{1321}^*=Q_{1322}^*=0$ 。不难知道，原本是由第二个制造商所提供的产品，由于现在新的制造商的加入，变作由两个制造商来共同承担.

例 5. 保持例 3 中各函数关系不变，增加一个新的分销商，为了增加分销商之间的竞争性，将制造商与该分销商之间的运输成本表示为

$$c_{1131}(Q_{1111})=2\,Q_{1131}+200,\qquad c_{1132}(Q_{1132})=2\,Q_{1132}+200,$$

$$c_{1231}(Q_{1231})=2.5\,Q_{1231}+200,\quad c_{1232}(Q_{1232})=2.5\,Q_{1232}+200,$$

该分销商的持有成本为

$$c_{231}(Q_2)=2\sum_{i=1}^{2}Q_{1i31},\qquad c_{232}(Q_2)=2.5\sum_{i=1}^{2}Q_{1i32},$$

而分销商与各需求市场之间的运输成本为

$$c_{3311}(Q_2)=0.05\,Q_{2311}+5,\quad c_{3312}(Q_2)=0.05\,Q_{2312}+5,$$

$$c_{3321}(Q_2)=0.1\,Q_{2321}+5,\quad c_{3322}(Q_2)=0.1\,Q_{2322}+5.$$

经过 11 次的迭代我们得到了新的平衡解，制造商向各分销商所提供的产品数量为 Q_1^* : $Q_{1111}^*=Q_{1112}^*=Q_{1121}^*=Q_{1122}^*=Q_{1131}^*=Q_{1132}^*=0, Q_{1211}^*=400.70, Q_{1212}^*=386.60, Q_{1221}^*=821.41, Q_{1222}^*=793.20, Q_{1231}^*=579.74, Q_{1232}^*=544.87$，由分销商向各需求市场所提供产品的数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=179.04, Q_{2112}^*=173.27, Q_{2121}^*=221.67, Q_{2122}^*=213.33, Q_{2211}^*=368.08, Q_{2212}^*=356.54, Q_{2221}^*=453.33, Q_{2222}^*=436.67, Q_{2311}^*=358.08, Q_{2312}^*=336.54, Q_{2321}^*=221.67, Q_{2322}^*=208.33$，而产品在分销商及需求市场的单位售价分别为 $\lambda^*:\lambda_{11}^*=24.50, \lambda_{12}^*=44.50, \lambda_{21}^*=24.00, \lambda_{22}^*=44.00, \lambda_{31}^*=24.50, \lambda_{32}^*=45.00, p_3^*: p_{311}^*=47.40, p_{312}^*=66.83, p_{321}^*=51.67, p_{322}^*=70.83$．对应着分销商之间竞争性的增强，使得制造商与分销商之间以及分销商与需求市场之间的供求关系以及产品单位售价的制定都变得更加复杂.

例 6. 前面所提到的例子比较简单，涉及到的函数关系也都是线性的. 在接下来的算例中，我们同样考虑的是由两个制造商、两个分销商、两个需求市场及两种不同的产品所组成的供应链，只是为了增加模型中的竞争性，制造商的生产成本

不仅与自己所生产的产品数量有关，与其他制造商的生产也有关，即

$$f_{11}(Q_1)=0.5\,Q_{111}^2+Q_{111}Q_{121}+Q_{111},\quad f_{12}(Q_1)=Q_{112}^2+Q_{112}Q_{122}+Q_{112},$$
$$f_{21}(Q_1)=0.5\,Q_{121}^2+Q_{111}Q_{121}+Q_{121},\quad f_{22}(Q_1)=Q_{122}^2+Q_{112}Q_{122}+Q_{122}.$$

产品在制造商与分销商之间的运输过程所花费的成本为

$$c_{1111}(Q_{1111})=0.05\,Q_{1111}^2+2\,Q_{1111},\quad c_{1112}(Q_{1112})=0.05\,Q_{1112}^2+2\,Q_{1112},$$
$$c_{1121}(Q_{1121})=0.05\,Q_{1121}^2+2\,Q_{1121},\quad c_{1122}(Q_{1122})=0.05\,Q_{1122}^2+2\,Q_{1122},$$
$$c_{1211}(Q_{1211})=0.05\,Q_{1211}^2+2\,Q_{1211},\quad c_{1212}(Q_{1212})=0.05\,Q_{1212}^2+2\,Q_{1212},$$
$$c_{1221}(Q_{1221})=0.05\,Q_{1221}^2+2\,Q_{1221},\quad c_{1222}(Q_{1222})=0.05\,Q_{1222}^2+2\,Q_{1222}.$$

分销商的持有成本为

$$c_{211}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i11})^2,\qquad c_{212}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i12})^2,$$
$$c_{221}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i21})^2,\qquad c_{222}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i22})^2.$$

而产品由分销商到需求市场这一过程中所花费的运输成本为

$$c_{3111}(Q_2)=0.5\,Q_{2111}+50,\quad c_{3112}(Q_2)=0.5\,Q_{2112}+50,$$
$$c_{3121}(Q_2)=0.5\,Q_{2121}+50,\quad c_{3122}(Q_2)=0.5\,Q_{2122}+50,$$
$$c_{3211}(Q_2)=0.5\,Q_{2211}+50,\quad c_{3212}(Q_2)=0.5\,Q_{2212}+50,$$
$$c_{3221}(Q_2)=0.5\,Q_{2221}+50,\quad c_{3222}(Q_2)=0.5\,Q_{2222}+50.$$

在需求市场处，产品的需求量不仅受自身价格的影响，还会与其他需求市场的售价有关

$$d_{11}(p_{31})=-2p_{311}+1.5p_{321}+1000,\quad d_{12}(p_{32})=-2p_{312}+1.5p_{322}+1000,$$
$$d_{21}(p_{31})=-2p_{321}+1.5p_{311}+1000,\quad d_{22}(p_{32})=-2p_{322}+1.5p_{321}+1000.$$

显然，由于考虑了模型中各成员间的竞争性，使得所求解的平衡问题更加复杂，也更加贴近现实世界的真实情况。我们采用光滑化 Newton 法一样适用，用了 8 次迭代我们得到了如下解。由制造商向分销商所提供的产品数量为 $Q_1^*: Q_{1111}^*=Q_{1121}^*=Q_{1211}^*=Q_{1221}^*=225.87,\ Q_{1112}^*=Q_{1122}^*=Q_{1212}^*=Q_{1222}^*=183.33$，由分销商向需求市场所提供的产品数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=Q_{2121}^*=Q_{2211}^*=Q_{2221}^*=225.87,\ Q_{2112}^*=Q_{2122}^*=Q_{2212}^*=Q_{2222}^*=183.33$，向量 λ^* 也就是分销商处产品的单位售价为 $\lambda_{11}^*=\lambda_{21}^*=933.58,\ \lambda_{12}^*=\lambda_{22}^*=1125.00$，而需求市场处产品的单位售价为 $p_{311}^*=p_{321}^*=1096.52,\ p_{312}^*=p_{322}^*=1266.67$。

例 7. 在例 6 的基础上，我们只将第一个制造商的生产成本和与其有关运输成本

调整为

$$f_{11}(Q_1)=0.5\,Q_{111}^2+Q_{111}Q_{121}+10Q_{111},\quad f_{12}(Q_1)=Q_{112}^2+Q_{112}Q_{122}+10Q_{112},$$
$$c_{1111}(Q_{1111})=0.05\,Q_{1111}^2+12\,Q_{1111},\quad c_{1112}(Q_{1112})=0.05\,Q_{1112}^2+12\,Q_{1112},$$
$$c_{1121}(Q_{1121})=0.05\,Q_{1121}^2+12\,Q_{1121},\quad c_{1122}(Q_{1122})=0.05\,Q_{1122}^2+12\,Q_{1122},$$

显然其成本与原来相比有所增加。

在 7 次迭代计算之后，我们得到当供应链整体达到平衡时，由制造商向分销商所提供的产品数量为 $Q_1^*: Q_{1111}^*=Q_{1121}^*=129.77,\ Q_{1211}^*=Q_{1221}^*=319.77,\ Q_{1112}^*=Q_{1122}^*=177.91,\ Q_{1212}^*=Q_{1222}^*=186.96$，由分销商向需求市场所提供的产品数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=Q_{2121}^*=Q_{2211}^*=Q_{2221}^*=224.77,\ Q_{2112}^*=Q_{2122}^*=Q_{2212}^*=Q_{2222}^*=182.44$，向量 λ^* 为 $\lambda_{11}^*=\lambda_{21}^*=938.54,\ \lambda_{12}^*=\lambda_{22}^*=1129.03$，需求市场处产品的售价为 $p_{311}^*=p_{321}^*=1100.93,\ p_{312}^*=p_{322}^*=1270.24$。随着制造商成本的增加，与例 6 相比，由其生产和提供的产品数量明显减少，而且促使产品的整体售价都有所提高，需求量自然也就降低。

例 8. 在例 7 的基础上，我们将第一个分销商的持有成本以及该分销商与需求市场间的运输成本增加，即

$$c_{211}(Q_2)=0.01(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i11})^2,\qquad c_{212}(Q_2)=0.01(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i12})^2,$$
$$c_{3111}(Q_2)=Q_{2111}+50,\qquad c_{3112}(Q_2)=Q_{2112}+50,$$
$$c_{3121}(Q_2)=Q_{2121}+50,\qquad c_{3122}(Q_2)=Q_{2122}+50.$$

用 7 次迭代，我们得到如下新的平衡解。由制造商向分销商所提供的产品数量为 $Q_1^*: Q_{1111}^*=60.06,\ Q_{1121}^*=190.12,\ Q_{1112}^*=121.83,\ Q_{1122}^*=227.81,\ Q_{1211}^*=250.06,\ Q_{1221}^*=380.12,\ Q_{1212}^*=130.88,\ Q_{1222}^*=236.86$，由分销商向各需求市场提供的产品数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=Q_{2121}^*=155.06,\ Q_{2211}^*=Q_{2221}^*=285.12,\ Q_{2112}^*=Q_{2122}^*=126.36,\ Q_{2212}^*=Q_{2222}^*=232.33$，等同于分销商处产品的售价的 $\lambda^*: \lambda_{11}^*=914.57,\ \lambda_{21}^*=927.08,\ \lambda_{12}^*=1106.26,\ \lambda_{22}^*=1116.45$，需求市场处产品的单位售价为 $p_3^*: p_{311}^*=p_{321}^*=1119.64,\ p_{312}^*=p_{322}^*=1282.62$。因为成本的增加，第一个分销商处产品的需求明显减少，而另一个分销商处却明显增加。而且产品最终售价的增长，不仅带来了总体需求量的减少，也因此使得分销商处产品的单位售价反而有所降低。

例 9. 在例 6 中，我们增加一个新的制造商，与其相关的各成本函数表示为

$$f_{31}(Q_1)=0.5\,Q_{131}^2+2\,Q_{111}Q_{131}+Q_{131},\quad f_{32}(Q_1)=Q_{132}^2+0.5\,Q_{122}Q_{132}+Q_{132},$$
$$c_{1311}(Q_{1311})=0.05\,Q_{1311}^2+4\,Q_{1311},\qquad c_{1312}(Q_{1312})=0.05\,Q_{1312}^2,$$
$$c_{1321}(Q_{1321})=0.05\,Q_{1321}^2+4\,Q_{1321},\qquad c_{1322}(Q_{1322})=0.05\,Q_{1122}^2.$$

和其他制造商相比，新的制造商在生产第一种产品时成本较高，而生产第二种产

品的成本相对较低。分销商的持有成本相应为

$$c_{211}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{3}Q_{1i11})^2,\qquad c_{212}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{3}Q_{1i12})^2,$$

$$c_{221}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{3}Q_{1i21})^2,\qquad c_{222}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{3}Q_{1i22})^2.$$

经过 19 次的迭代，我们计算得到由制造商所生产和供应的产品数量分别为 $Q_1^*: Q_{1111}^*=Q_{1121}^*=Q_{1211}^*=Q_{1221}^*=223.33, Q_{1311}^*=Q_{1321}^*=9.68, Q_{1112}^*=Q_{1122}^*=164.84, Q_{1212}^*=Q_{1222}^*=109.12, Q_{1312}^*=Q_{1322}^*=191.94$，由分销商向需求市场提供的产品数量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=Q_{2121}^*=Q_{2211}^*=Q_{2221}^*=228.17, Q_{2112}^*=Q_{2122}^*=Q_{2212}^*=Q_{2222}^*=232.95$，分销商处产品的单位售价为 $\lambda_{11}^*=\lambda_{21}^*=923.22, \lambda_{12}^*=\lambda_{22}^*=901.73$，而在需求市场的价格为 $p_{311}^*=p_{321}^*=1087.31, p_{312}^*=p_{322}^*=1068.20$。显然，新制造商的加入，对其余制造商的生产和销售构成了一定影响，成员之间的竞争性也随之增强。与例 6 相比，无论是在分销商处还是在最终需求者所在的需求市场，产品的单位售价都有明显的降低。

例 10. 类似于例 9，我们在例 6 的基础上增加一个新的分销商，而制造商与该分销商之间的运输成本表示为

$$c_{1131}(Q_{1131})=0.025\,Q_{1131}^2+12\,Q_{1131},\quad c_{1132}(Q_{1132})=0.025\,Q_{1132}^2+12\,Q_{1132},$$

$$c_{1231}(Q_{1231})=0.025\,Q_{1231}^2+12\,Q_{1231},\quad c_{1232}(Q_{1232})=0.025\,Q_{1232}^2+12\,Q_{1232},$$

该分销商的持有成本为

$$c_{231}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i31})^2,\qquad c_{232}(Q_2)=0.005(\sum_{i=1}^{2}Q_{1i32})^2,$$

以及与需求市场之间的运输成本

$$c_{3311}(Q_2)=0.5\,Q_{2311}+50,\quad c_{3312}(Q_2)=0.5\,Q_{2312}+50,$$

$$c_{3321}(Q_2)=0.5\,Q_{2321}+50,\quad c_{3322}(Q_2)=0.5\,Q_{2322}+50.$$

经 19 次迭代，我们得到分销商与制造商之间产品的平衡供求量 $Q_1^*: Q_{1111}^*=Q_{1121}^*=Q_{1211}^*=Q_{1221}^*=155.52, Q_{1131}^*=Q_{1231}^*=151.61, Q_{1112}^*=Q_{1122}^*=Q_{1212}^*=Q_{1222}^*=126.71, Q_{1132}^*=Q_{1232}^*=120.28$，而分销商与需求市场之间平衡的供求量为 $Q_2^*: Q_{2111}^*=Q_{2121}^*=Q_{2211}^*=Q_{2221}^*=155.52, Q_{2311}^*=Q_{2321}^*=151.61, Q_{2112}^*=Q_{2122}^*=Q_{2212}^*=Q_{2222}^*=126.71, Q_{2312}^*=Q_{2322}^*=120.28$，产品在分销商及需求市场处的售价分别为 $\lambda^*: \lambda_{11}^*=\lambda_{21}^*=946.95, \lambda_{31}^*=948.90, \lambda_{12}^*=\lambda_{22}^*=1139.27, \lambda_{32}^*=1142.48, p_3^*: p_{311}^*=p_{321}^*=1074.71, p_{312}^*=p_{322}^*=1252.62$。类似于例 9 中所得结果，由于新的分销商的加入，增加了模型中的竞争性，产品售价降低的同时需求量也提高了。

在这一节中，我们给出了多个关于供应链网络的平衡问题，并用到第 3 节中所提到的光滑化 Newton 法求解。不论是对于组成供应链的各成员互相独立，与

其有关的函数关系为线性的这类较简单问题，还是各成员间存在着竞争，且涉及的函数关系是非线性的较复杂问题，光滑化 Newton 法都适用。尽管算法的初始点用随机数代替，对文中所给例子，都是只用几次或是十几次迭代就得到了问题的解。

6.5 本章小结

本章中，对于多个制造商同时生产多种产品，并向多个分销商供货以满足处于各个需求市场最终客户的要求建立了一个一般的供应链网络模型．通过对模型中不同的决策制定者行为的分析，建立了平衡条件，通过将其等价地表示成有限维的变分不等式形式，采用收敛速度快的光滑化 Newton 法来求解。给出了保证所给算法收敛的条件，同时还得到了算法的二次收敛性．最后，列出了多个例子，用光滑化 Newton 法计算均很快就得到了平衡解．

总 结

随着科学技术的快速发展，全球范围内的竞争日趋激烈，企业面临着越来越严峻的生存和发展压力，传统的经营管理模式已经不能满足不断变化的市场要求．尽管供应链管理的概念提出的时间并不长，但作为企业适应全球竞争的有效管理模式，供应链管理在企业的生存和发展中的地位也越来越重要，特别是国际上一些知名企业在供应链实践中所取得的成功，引起了包括学术界和企业界在内的广泛关注。

鉴于供应链管理在理论研究和实际应用中的重要性，本文针对供应链契约中的协调订货问题和多层的供应链网络平衡问题，得到如下的研究成果和结论：

(1) 对于如时装、书籍、报刊、电子类产品等，具有销售季节短且需求不确定等特点的一类短生命周期产品，分销商往往需要在销售季节到来之前订货，同时还要承担销售季节中可能面临的缺货或库存过量而带来利润损失的风险。为了努力降低供应与需求之间的矛盾，对供应链有效的管理也越来越受到重视。供应链成员间通过信息共享并共同参与决策制定而达成的合作伙伴关系，可以明显提高服务水平并增加各自利润，通过制定契约使得供应者和买方的生产和决策行为能与供应链整体的最优解一致，已引起了广泛的关注。本文主要针对一类短生命周期产品，研究了由单一制造商、单一分销商和单一产品所组成的供应链中的协调订货决策问题，并且针对实际问题中可能出现的情况提出有效的协调策略．例如，对于产品需求不确定的特点，提出通过季末补货的方式，不仅分销商个人可以获得更高的利润，而且供应链整体的期望利润也会随之增加．在交货日期不确定的条件下，即考虑到生产过程中的诸多因素都可能造成制造商无法按时交货而影响到分销商的正常销售活动的情形，得到合理的季末回购价格可以作为实现制造商和分销商之间协调的激励手段，并且使得供应链整体期望利润趋于最优。

(2) 在大多数关于供应链协调的文献中，虽然都提出采用协调机制可以带来供应链整体利润的增长，并且有效的协调策略应保证供应链中各成员的利润至少不会比协调前的低，但都没有提到增长的这部分利润在供应链成员间如何分配．考虑到合理的利润分配是实现供应链协调的关键，我们在需求和交货日期均不确定的条件下，引入了数量弹性的策略，即允许分销商在交货日期推迟的情况下通过减少订货量来降低损失，但同时要对由此给制造商带来的库存积压损失进行一定比例的赔偿。进一步，还在需求预测更新的条件下，提出了具有两次订货和两次生产的最优订货策略。分销商除了可以在销售季节到来之前订货，还可以根据更新后的需求信息重新调整订货量，而制造商以两种不同的生产模式进行生产来及时满足需求。不同于一般的数量弹性契约中只允许一定范围来调整订货量，我们

允许分销商可以绝对灵活地调整订货量，只是，如果调整后的订货量低于最初的订货量，分销商将同样需要对由此给制造商带来的利润损失进行补偿。虽然考虑的情况不一样，但都得到了类似的结论，即制造商以合理的回购价格和产品批发价格来影响分销商的订货决策，不仅可以有效实现系统的协调，而且该协调机制与产品的需求分布无关，最重要的是可以实现系统利润的灵活分配，并且分配结果满足“风险越大，利润越高”的市场法则。

(3) 考虑到供应链是由多个独立的决策制定者，如原材料的供应商、制造商、分销商、零售商直到最终顾客所组成的链状或网状结构，对于多个制造商同时生产多种产品，并向多个分销商供货以满足处于多个需求市场的最终顾客需求的情形建立了一个多层的供应链网络结构。通过对模型中不同的决策制定者行为的分析，构造其最优条件，得到了供应链整体的平衡条件，并将其等价地表示成有限维的变分不等式形式。在已有的研究网络平衡模型的文献中，多是采用单纯分解算法或修正投影算法来求解，我们提出了一种求解该问题收敛速度更快的光滑化 Newton 法。并给出了保证所给算法收敛的条件，数值算例的结果也说明了本文算法收敛速度快的特点。由于该模型的一般性，可以处理多个决策制定者以及他们独立的决策行为的情形，而光滑化 Newton 法收敛速度快的特点，也为求解这样一个复杂且维数高的供应链网络模型提供了有效的手段。

有待进一步研究的问题有：

(1) 本文主要对由单一制造商、单一分销商和单一产品所组成的供应链中的协调订货问题进行了讨论，对于有多个制造商和多个分销商的情形，利用本文类似的方法，还可以展开深入的研究。

(2) 本文中所建立的模型，虽然考虑了现实世界中的具体情况，如需求的不确定性，交货日期的不确定性，但必然又是具体问题的简化。如何将本文提出的方法和模型应用于实际的供应链管理中，还需要进一步的应用研究，并加以改进和完善。

(3) 文中反复强调了制造商和分销商之间信息共享的重要性，只有这样，制造商才可能提出合理的批发价格和回购价格来与分销商在订货决策上进行协调。但事实上，达成信息的完全共享是不太容易的，因此，在信息不对称的情形下，这里提出的协调机制是否仍然有效，还有待进一步的研究。而且在需求信息更新的条件下，允许分销商调整订货量，但是往往信息的收集以及整理并不是一件简单的工作，所以在获得有价值的信息的同时所可能花费的代价也是需要考虑的一个方面，这些都可以作为进一步研究的课题。

(4) 在本文的最后，虽然考虑到多个独立的决策制定者的存在，构造了一个由多个制造商、多个分销商、多个需求市场以及多种产品所组成的供应链网络模型。但是，对于多种产品的同时生产和同时销售，往往会使得实际情况变得更加

复杂。各个决策者在制定其决策时往往需要将其生产能力、资金或是存储空间的限制以及产品需求随机等因素都考虑进来，在建立模型时，如何使其更加贴近实际生活，都是非常有意义的研究课题。

参考文献

[1] 迈克尔·波特著. 陈小悦译. 竞争优势. 北京：华夏出版社， 1997, 33-53

[2] Stevens G C. Successful supply chain management. Management Decision, 1990, 28(8): 25-31

[3] Davis T. Effective supply chain management. Sloan Management Review, 1993, 34(4): 35-46

[4] Erengflc S S, Simpson N C, Vakharia A J. Integrated production/distribution planning in supply chain: an invited review. European Journal of Operational Research, l999, 115(2): 219-236

[5] 马士华，林勇，陈志祥. 供应链管理. 北京：机械工业出版社， 2000, 40-45

[6] Copacino W C. Supply chain management-the basics and beyond. Boston: The St Lucie Press, 1997, 1-15

[7] Chase R B, Aquilano N J, Jacobs F R. Production and operations management: manufacturing and services. New York: McGraw-Hill Companies, 1998, 1-50

[8] 陈国权. 供应链管理. 中国软科学， 1999, 14(10): 101-104

[9] 马士华，王一凡，林勇. 供应链管理对传统制造模式的挑战. 华中理工大学学报 (社会科学版), 1998, 5(2): 65-68

[10] 赵美瑜. 供应链战略管理及其评价研究： [西安交通大学硕士学位论文]. 西安：西安交通大学管理学院， 2000, 1-10

[11] 张涛，王亚军，张明等. 现代供应链管理. 成都：四川大学出版社，2003, 4-11

[12] Aikens C H. Facility Location Models for Distribution Planning. Europe Journal of Operations Research, 1985, 22(3): 263-279

[13] Baganha M P, Cohen M A. The stabilizing effect of inventory in supply chains. Operations Research, 1998, 46(3): 72-83

[14] Svoronos S, Zipkin P. Evaluation of one-for-one replenishment policies for multi-echelon inventory systems. Management Science, 1991, 37(1): 68-83

[15] Ernst R, Powell S. Optimal inventory policies under service-sensitive demand. European Journal of Operational Research, 1995, 87(2): 316-327

[16] Diks E B, Kok A G, Lagodimos A G. Multi-echelon systems: a service measure perspective. European Journal of Operational Research, 1996, 95(2): 241-263

[17] Xin X H , Susan H X. An inventory model with order crossover. Operations Research, 1998, 46(3): S112-S119

[18] George T. Pooling in multi-location periodic inventory distribution systems. Omega, 1999, 27(1): 39-59 、

[19] Rosenblatt N J, Lee H L. Improving profitability with quantity discounts under

fixed processes. IIE Transactions, 1985, 17(3): 388-395

[20] Bellman R E, Gicksberg I, Gross O. On the optimal inventory equation. Management Science, 1955, 2(1): 83-104

[21] Kaplan R A. A dynamic inventory model with stochastic lead times. Management Science, 1970, 16(7): 491-507

[22] Decroix G A, Risa A A. Optimal production and inventory policy for multiple products under resource constrains. Management Science, 1998, 44(7): 950-961

[23] Bhattacharjee S, Ramesh R. A multi-period profit maximizing model or retail supply chain management: an integration of demand and supply-side mechanisms. European Journal of Operational Research, 2000, 122(3): 584-601

[24] Metters R. Quantifying the bullwhip effect in supply chain. Journal of Operations Management, 1997, 15(2): 89-100

[25] Genues J P, Ramasesh R V, Hayya J C. Adapting the Newsvendor Model for Infinite-horizon Inventory system. International Journal of Production Economics, 2001, 72(3): 237-250

[26] Clark A J, Scarf H. Optimal policies for a multi-echelon inventory problem. Management Science, 1960, 6(4): 475-490.

[27] Andersson J, Axsäter S, Marklund J. Decentralized multi-echelon inventory control. Production and Operations Management, 1998, 7(4): 370-386.

[28] Ganeshan R. Managing supply chain inventories: a multiple retailers ,one warehouse , multiple suppliers model. International Journal of Production Economics, 1999, 59(3): 341-354

[29] Andersson J, Marklund J. Decentralized inventory control in a two-level distribution system. European Journal of Operational Research, 2000, 127(3): 483-506

[30] Sherbrooke C C. Metric: a multi-echelon technique for recoverable item control. Operations Research, 1968, 16(2): 121-141

[31] Graves S C. A multi-echelon inventory model for a reparable item with one-for-one replenishment. Management Science, 1985, 31(10): 1247-1256

[32] Cachon G, Fisher M. Supply chain inventory management and the value of shared information. Management Science, 2000, 46(8): 1032-1048

[33] Lee H L, So K C, Tang C S. The value of information sharing in a two-level supply chain. Management Science, 2000, 46(5): 626-643

[34] Goyal S K, Gupta Y P. Integrated inventory and models: the buyer-vendor coordination. European Journal of Operational Research, 1989, 41(3): 261-269

[35] Van Houtum G J, Inderfurth K, Zijm W H M. Materials coordination in stochastic multi-echelon systems. European Journal of Operational Research, 1996, 95(1): 1-23

[36] Boyaci T, Gallego G. Coordinating pricing and inventory replenishment policies for one wholesaler and one or more geographically dispersed retailers. International Journal of Production Economics, 2002, 77(2): 95-111

[37] Manasse M S, McGeoch L A, Sleator D D. Competitive algorithms for server problems. Journal of Algorithms, 1990, 11(2): 208-230

[38] Mina H, Jayaraman V, Srivastava R. Combined location-routing problems asynthesis and future research directions.European Journal of Operational Research, 1998, 108(1): 1-15

[39] Stock G N, Greis N P, Kasarda J D. Enterprise logistics and supply chain structure: the role of fit. Journal of Operations Management, 2000, 18(5): 531-547

[40] Jang Y J, Seong-Yong Jang S Y, Chang B M, Park J. A combined model of net work design and production/distribution planning for a supply network. Computers & Industrial Engineering, 2002, 43(1/2): 263-281

[41] Von Boventer. The relationship between transportation costs and location rent in transportation problem. Journal of Regional Science, 1962, 3(2):27-40

[42] Maranzana F E. On the location of supply points to minimize transport costs. Operational Research Quarterly, 1965,15(2): 261-270

[43] Cooper L. The Transportation-location problem. Operations Research, 1972, 20(1): 94-108

[44] Tapiero C S. Transportation-location-allocation problems over time. Journal of Regional Science, 1971, 11(5): 377-384

[45] Laporte G, Nobert Y, Arpin H Q. An exact algorithm for solving a capacitated location-routing problem. Annals of Operation Research, 1986, 6(2): 239-310

[46] Chien T W. Heuristic procedures for practical-sized uncapacitated location capacitated routing problems. Decision Sciences, 1993, 24(5): 995-1021

[47] Dilek T, Laura I B. A two-phase tabu search approach to the location routing problem. European Journal of Operational Research, 1999, 116(1): 87-99

[48] Wu T H, Low C, Bai J W. Heuristic solutions to multi-depot location-routing problems. Computers & Operations Engineering, 2002, 29(10): 1393-1415

[49] Canel C, Khumawala B M, Law J, Loh A. An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. Computers & Operations research, 2001, 28(5): 411-427

[50] Baita F, Ukovich W, Pesenti R, Favaretto D. Dynamic routing-and-inventory problems: a review. Transportation Research Part A, 1998, 32(8): 585-598

[51] Mason-Jones R, Towill D R. Using the information decoupling point to improve supply chain performance. International Journal of Logistics Management, 1999, 10(2): 13-26

[52] Georoge Q Huang, Jason S K Lau, K L Mak. The impacts of sharing production information on supply chain: a review of the literature. International Journal of Production Research, 2003, 41(7): 1483-1517

[53] Stalk G J. Time-the next source of competitive advantage. Harvard Business Review, 1988,65(6):41-51

[54] Mason-Jones Rachel, Towill D R. Time compression in the supply chain: information management is the vital ingredient. Logistics Information Management, 1998, 11(2): 93-105

[55] Mason-Jones R, Towill D R . Information enrichment: designing the supply chain for competitive advantage. International Journal Supply Chain Management, 1997, 2(4): 137-148

[56] Towill D R. Time compression and supply chain management-a guide tour. Logistics Information Management, 1996, 9(6): 41-53

[57] Buzzell R D, Gwen O. Channel partnerships streamline distribution. Sloan Management Review, 1995, 36(3): 85-96

[58] Quinn F J. Reengineering the supply chain： an interview with Michael Hammer. Supply Chain Management Review, 1999, 3(1): 20-27

[59] 陈志祥, 马士华, 陈荣秋. SCM 建模理论与方法研究. 管理科学学报, 1999, 2(1): 67-71

[60] Patterson K A, Grimm C M, Corsi T M. Adopting new technologies for supply chain management. Transportation Research Part E, 2003, 39(2): 95-121

[61] Maloni M b, Benton W C. Supply chain partnerships: opportunities for operations research. European Journal of Operational Research, 1997, 101(3): 419-429

[62] Vokurka R J. Supply partnership: a case study. Production and Inventory Management Journal, 1998, (1): 30-35

[63] 马新安, 张列平, 冯芸. 供应链合作伙伴关系与合作伙伴选择. 工业工程与管理, 2000,5(4): 33-36

[64] Graham T S, Daugherty P J, Dudley W N. The long-term strategic impact of purchasing partnerships. International Journal of Purchasing and Materials Management, 1994, 32(4): 797-805

[65] Leavy B. Two strategic perspectives on the buyer-supplier relationship. Journal of Production and Inventory Management, 1994, 35(2): 47-51

[66] Lyons T F, Krachenberg A R, Henke J W Jr. Mixed motive marriages: what's next for buyer-supplier relations?. Sloan Management Review, 1990, 31(3): 29-36

[67] Landeros R, Reck R, Plank R E. Maintaining buyer-supplier partnerships. International Journal of Purchasing and Materials Management, 1995, 31(3): 3-11

[68] Dickson G W. An analysis of vender selection systems and decision. Journal of

Purchasing, 1966, 2(1): 5-17

[69] Weber C A, Current J R, Benton W C. Vendor selection criteria and methods. European Journal of Operational Research, 1991, 50(1): 2-18

[70] Tulluri S, Baker R C. A quantitative framework for designing efficient business process alliances. In: Proceedings of the International Engineering Management Conference. Canada: Vancouver, 1996, 656-661

[71] 钱碧波，潘晓弘，程耀东. 敏捷虚拟企业伙伴选择评价体系研究. 中国机械工程， 2000, 11(4): 397-401

[72] 陈菊红，汪应洛，孙林岩. 虚拟企业伙伴选择过程及方法研究. 系统工程理论与实践， 2001, 21(7): 48-53

[73] 冯蔚东, 陈剑, 赵纯均. 基于遗传算法的虚拟企业伙伴选择过程及优化模型. 清华大学学报 (自然科学版), 2000, 40(10): 120-124

[74] 刘蓉，张毕西，廖朝辉. 供应链合作伙伴的选择、评估和动态监控. 系统工程， 2005, 23(5): 51-54

[75] 郑文堂, 杨晓奇. 供应链合作伙伴选择方法的研究. 北方工业大学学报， 2004, 16(3): 71-76

[76] Mishara D P, Heide J B, Cort S G. Information asymmetry and levels of agency relationships. Journal of Marketing Research, 1998, 35(3): 277-295

[77] Chu W. Demand signaling and screening in channels of distribution. Marketing Science, 1992, 11(4): 327-347

[78] Lariviere M A, Padmanabhan V. Slotting allowances and new product introductions. Marketing Science, 1997, 16(2): 112-128

[79] 杨治宇, 马士华. 供应链企业间的委托代理问题研究. 计算机集成制造系统， 2001, 7(1): 19-22

[80] 张爱, 袁治平, 张清辉. 供应链企业委托代理问题的研究. 工业工程与管理， 2003, 8(3): 52-55

[81] 李亚林. 委托 - 代理理论与供应链激励机制的研究. 物流科技， 28(113): 45-47

[82] Van Hoek R I. Case studies of greening the automotive supply chain through technology and operations. International Journal of Technology Management, 2002, 23(3): 89-112

[83] Hart S L. Beyond greening: strategies for a sustainable world. Harvard Business Review, 1997, 75(1): 66-76

[84] Min H, Gale W P. Green purchasing strategies: trends and implications. International Journal of Purchasing and Materials Management, 1997, 33(3): 10-17

[85] Sarkis J. Theory and Methodology: Evaluating environmentally Conscious business practices. European Journal operational Research, 1998, 107(1): 159-174

[86] Van Hoek R I. From reversed logistics to green supply chains. Supply Chain Man-

agement: An International Journal, 1999, 4(3): 129-135

[87] Beaman B M. Designing the green supply chain. Logistics Information Management, 1999, 12(4): 332-342

[88] Sarkis J. A strategic decision framework for green supply chain management. Jounal of Cleaner Production, 2003, 11(4): 397-409

[89] Rao P. Greening the supply chain: a new initiative in South East Asia. International Journal of Operations & Production Management, 2002, 22(6): 632-655

[90] Nagel M H. Managing the Environmental Performance of Production Facilities in the Electronics Industry: More Than Application of the Concept of Cleaner Production. Journal of Cleaner Production, 2003, 11(1): 11-26

[91] 但斌，刘飞．绿色供应链及其体系结构研究．中国机械工程，2000, 11(11): 1233-1236

[92] 李向东，阎洪，叶润强．建立绿色供应链中的协调关系．软科学，2001, 15(4): 66-69

[93] 罗兵，赵丽娟，卢娜．绿色供应链管理的战略决策模型．重庆大学学报 (自然科学版), 2005, 28(1): 105-109

[94] Beamon B M. Supply chain design and analysis: Models and methods. International Journal of Production Economics, 1998, 55(3): 281-294

[95] Ingene C, Parry M. Coordination and manufacturer profit maximization: the multiple retailer channel. Journal of Retailing, 1995, 71(2): 129-151

[96] Chen F, Federgruen A, Zheng Y S. Coördination mechanisms for a distribution system with one supplier and multiple retailer. Management Science, 2001, 47(5): 693-708

[97] Tsay A A. The quantity flexibility contract and supplier customer incentives. Management Science, 1999, 45(10): 1339-1358

[98] Milner J M, Rosenblatt M J. Flexible supply contracts for short lifecycle goods: the buyers' perspective. Naval Research Logistics, 2002, 49(1): 25-45

[99] Gurnani H, Tang C. Note: Optimal ordering decision with uncertain cost and demand forecast updating. Management Science, 1999, 45(10): 1456-1462

[100] Iyer A, Bergen M E. Quick response in manufacturer-retailer channels. Management Science, 1997, 43(5): 559-570

[101] Chen J, Xu L J. Coordination of the supply chain of seasonal products. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics-part A: Systems and Humans, 2001, 31(6): 524-533

[102] Donohue K L. Efficient supply contracts for fashion goods with forecast updating and two production modes. Management Science, 2000, 46(11): 1397-1411

[103] Gavirneni S. Benefits of cooperation in a production distribution environment.

European Journal of Operational Research, 2001, 130(3): 612-622

[104] Viswanathan S, Piplani R. Coordinating supply chain inventories through common replenishment epochs. European Journal of Operational Research, 2001, 129(2): 277-286

[105] Romano P. Coordination and integration mechanisms to manage logistics processes across supply networks. Journal of Purchasing & Supply Management, 2003, 9(3): 119-134

[106] Garcia-Dastugue S J, Lambert D M. Internet-enabled coordination in the supply chain. Industrial Marketing Management, 2003, 32(2): 251-263

[107] Chen X, Simchi-Levi D. Coordinating inventory control and pricing strategies with random demand and fixed ordering cost: the finite horizon case. Operations Research, 2005, 52(6): 887-896

[108] Thomas D J, Grifin P M. Coordinated supply chain management. European Journal of Operational Research, 1996, 94(1): 1-15

[109] 陈剑，蔡连侨．供应链建模与优化．系统工程理论与实践，2001, 21(6): 26-33

[110] 王迎军．顾客需求驱动的供应链契约问题综述．管理科学学报，2005, 8(2): 68-76

[111] Monahan J P. A quantitative discount pricing model to increase vendor profits. Marketing Science, 1984, 30(6): 720-726

[112] Weng Z K. Channel coordination and quantity discounts. Management Science, 1995, 41(9): 1509-1522

[113] Munson C L, Rosenblatt M J. Coordinating a three level supply chain with quantity discounts. IIE Transactions, 2001, 33(5): 371-384

[114] Corbett C J, Groote X D. A supplier's optimal quantity discounts policy under a symmetric information. Management Science, 2000, 46(3): 444-450

[115] Yang P C. Pricing strategy for deteriorating items using quantity discount when demand is pricing sensitive. European Journal of Operational Research, 2004, 157(2): 389-387

[116] Pasternack B A. Optimal pricing and returns policies for perishable commodities. Marketing Science, 1985, 4(4): 166-176

[117] CachonG P. The allocation of inventory risk in a supply chain: push, pull, and advance-purchase discount contracts. Management Science, 2004, 50(2): 222-238

[118] Wang Y Z. Channel performance under consignment contract with revenue sharing. Management Science, 2004, 50(1): 34-47

[119] 余玉刚，梁梁，王晨等．一种考虑最终产品变质的供应商管理库存集成模型．中国管理科学，2004, 12(2): 32-37

[120] Choi T M, Li D, Yan H. Optimal returns policy for supply chain with e-

marketplace. International Journal of Production Economics, 2004, 88(2): 205-227

[121] 肖振伟, 李华. 基于退货策略的供应链合作研究. 工业工程管理, 2005, 10(5): 52-55

[122] Karen L Donohue. Efficient supply contracts for fashion goods with forecast updating and two production modes. Management Science, 2000, 46(11): 1397-1411

[123] Taylor T A. Channel coordination under price protection, midlife returns, and end-of-life returns in dynamic markets. Management Science, 2001, 47(9): 1220-1234

[124] Wu J H. Quantity flexibility contracts under Bayesian updating. Computers & operations research, 2005, 32(5):1267-1288

[125] Giannoccaro L, Pontrandolfo P. Supply chain coordination by revenue sharing contracts. International Journal of Production Economics, 2004, 89(2): 131-139

[126] Gerchak Y, Wang Y Z. Revenue-sharing vs. wholesale-price contracts in assembly systems with random demand. Production and Operations Management, 2004, 13(1): 23-33

[127] 王勇, 裴勇. 需求具有价格敏感性的供应链的利益共享合约. 中国管理科学, 2005, 13(6): 29-33

[128] Eppen G D, Iyer A V. Backup agreements in fashion buying-the value of upstream flexibility. Management Science, 1997, 43(11): 1469-1484

[129] Lee H L, Padmanabhan V, Taylor T A , et al. Price protection in the personal computer industry[J]. Management Science, 2000, 46(4): 467-482

[130] Bassok Y, Anupindi R. Analysis of supply contracts with total minimum commitment. IIE Trasactions, 1997, 29(5): 373-382

[131] Delft C, Vial J. A practical implementation of stochastic programming: an application to the evaluation of option contracts in supply chains. Automatica, 2004, 40(5): 743-756

[132] Tsay A. Managing retail channel overstock: markdown money and return policies. Journal of Retailing, 2001, 77(4): 457-492

[133] Sterman J D. Modelling managerial behavior: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment. Management Science, 1989, 35(3): 321-339

[134] Towil D R. Industrial dynamics modelling of supply chains. International Journal of Physical Distribution & Logistics Management, 1996, 26(2): 23-42

[135] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information Distortion in a Supply Chain: The Bullwhip Effect. Management Science, 1997, 43(4): 546-558.

[136] Chen F, Drezner Z, Ryan J K, Simchi-Levi D. Quantifying the bullwhip effect in a simple supply chain: the impact of forecasting, lead time and information. Management Science, 2000, 46(3): 436-443

[137] Thonemann U W. Improving Supply performance by Sharing Information. European Journal of Operational Research, 2002, 142(1): 81-107

[138] Fu Y, Poplani R. Supply-side Collaboration and its value in Supply Chain. European Journal of Operational Research, 2004, 152(1): 281-288

[139] 马新安，张列平，田澎．供应链中的信息共享激励：动态模型．中国管理科学， 2001, 9(1): 19-4

[140] 张菊亮，陈剑．销售商费用信息不完全下的回收合约．中国管理科学， 2005, 13(6): 39-45

[141] 张子刚，刘开军．供应链中信息共享的定价激励策略．工业工程管理， 2004, 9(6): 50-53

[142] 王瑛．供应链伙伴信息共享的博弈与激励．中国管理科学， 2005, 13(5): 61-66

[143] Lau A H L, Lau H. The effects of reducing demand uncertainty in a manufacturer-retailer channel for single-period products. computers & Operations Research, 2002, 29(11): 1583-1602

[144] Lee C H. Coordinated stocking, clearance sales, and return policies for a supply chain. European Journal of Operational Research, 2001, 131(3): 491-513

[145] 丁利军，夏国平，葛健．两次生产和订货模式下的供应链契约式协调．管理科学学报， 2004, 7(4): 24-32

[146] Weng Z k. Coordinating order quantities between the manufacturer and buyer: A generalized newsvendor model. European Journal of operational research, 2004, 156(1): 148-161.

[147] Khouja M J. Optimal ordering, discounting, and pricing in the single-period problem. International Journal of Production Economics, 2000, 65(2): 201-216

[148] Slates P A, Blola B, Evers J J, et al. Logistic chain modelling. European Journal of Operations research, 1995, 87(1): 1-20

[149] Nagurney A. Network economics: a variational inequality approach (second and revised edition) Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 3-150

[150] Yang H. Sensitivity analysis for queuing equilibrium network flow and its application to traffic control. Mathematical and Computer Modelling, 1995, 22(4-7): 247-258

[151] Zubieta L. A network equilibrium model for oligopolistic competition in city bus services. Transportation Research Part B, 1998, 32(6): 413-422

[152] Athanasios K Z, Lei R. A simultaneous route and departure time choice equilibrium model on dynamic networks. International Transactions in Operational Research, 1999, 6(1): 21-37

[153] Yang H, Wong S C, Wong K I. Demand-supply equilibrium of taxi services in a network under competition and regulation. Transportation Research Part B, 2002,

36(9): 799-819

[154] Yang H, Huang H J. The multi-class, multi-criteria traffic network equilibrium and system optimum problem. Transportation Research Part B, 2004, 38(1): 1-15

[155] Ceylan H, Bell M G H. Genetic algorithm solution for the stochastic equilibrium transportation networks under congestion. Transportation Research Part B, 2005, 39(2): 169-185

[156] Lederer P J. A competitive network design problem with pricing. Transportation Science, 1993, 27(1): 25-38

[157] Smith M J. A new dynamic traffic model and the existence and calculation of dynamic user equilibria on congested capacity-constrained road network. Transportation Research B, 1993, 27B(1): 49-63

[158] Daniele P, Maugeri A. Variational inequalities and discrete and continuum models of network equilibrium problems. Mathematical and Computer Modelling, 2002, 35(5-6): 689-708

[159] Graciá R, Marín A. Network equilibrium with combined modes: models and solution algorithms. Transportation Research Part B, 2005, 39(3): 223-254

[160] Nagurney A. Economic equilibrium and financial networks. Mathematical and computer modelling, 1999, 30(1): 1-6

[161] Lederer P J , Li L. Pricing, production, scheduling, and delivery-time competition. Operations research, 1997, 45(3): 407-420

[162] Corbett C J, Karmarkar U S. Competition and structure in serial supply chains with deterministic demand. Management Science, 2001, 47(7): 966-978

[163] Nagurney A, Dong J, Zhang D. A supply chain network equilibrium model. Transportation Research E, 2002, 38(5): 281-303

[164] Nagurney A, Loo J, Dong J, et al. Supply chain networks and electronic commerce: a theoretical perspective. Netnomics, 2002, 4(2): 187-220

[165] Dong J, Zhang D, Nagurney A. A supply chain network equilibrium model with random demands. European Journal of operations Research, 2004, 156(1):194-212

[166] Low S H. Equilibrium allocation and pricing of variable resources among user-suppliers. Performance Evaluation, 1998, 34(4): 207-225

[167] Anna Nagurney, Fuminon Toyasaki. Reverse supply chain management and electronic waste recycling: a multitiered network equilibrium fram work for e-cycling. Transportation Research Part E, 2005, 41(1): 1-28

[168] Harker P T, Pang J S. Finite dimentional variational inequality and nonlinear complementarity problems: a survey of theory, algorithms and applications. Mathematical Programming, 1990, 48(1-3): 161-220

[169] Ferris M C, Pang J S. Engineering and economic applications of complementarity

problems. SIAM Review, 1997, 39(4): 669-713

[170] Qi L Q, Sun J. A nonsmooth version of Newton's method. Mathematical Programming, 1993, 58(3): 353-367

[171] Jiang H Y, Qi L Q. A new nonsmooth equations approach to nonlinear complementarity problems. SIAM Journal on Control and Optimization, 1997, 35(1): 178-193

[172] Facchinei F, Soares J. A new merit function for nonlinear complementarity problems and a related algorithm. SIAM Journal on Optimization, 1997, 7(1): 225-247

[173] Kanzow C, Kleinmichel H. A new class of semismooth Newton-type methods for nonlinear complementarity problems. Computational Optimization and Applications, 1998, 11(3): 227-251

[174] Chen C, Mangasarian O L. A class of smoothing functions for nonlinear and mixed complementarity problems. Computational Optimization and Applications, 1996, 5(2): 97-138

[175] Chen B, Harker P T. Smooth approximations to nonlinear complementarity problems. SIAM Journal on Optimization, 1997, 7(2): 403-420

[176] Burke J, Xu S. The global linear convergence of a non-interior path-following algorithm for linear complementarity problems. Mathematics of Operations Research, 1998, 23(3): 719-734

[177] Chen X, Qi L Q, Sun D. Global and superlinear convergence of the smoothing Newton method and its application to general box constrained variational inequalities. Mathematics of Computation, 1998, 67(222): 519-540

[178] Kanzow C, Pieper H. Jacobian smoothing methods for nonlinear complementarity problems. SIAM Journal on Optimization, 1999, 9(2): 342-373

[179] Qi L Q, Sun D F, Zhou G L. A new look at smoothing Newton methods for nonlinear complementarity problems and box constrained variational inequalities. Mathematical Programming, 2000, 87(1): 1-35

[180] Chen B, Chen X J. A global and local superlinear continuation-smoothing method for $P_0 + R_0$ and monotone NCP. SIAM Journal on Optimization, 1999, 9(3): 624-645

[181] Lee H L, Rosenblatt J. A generalized quantity discount pricing model to increase supplier's profit. Management Science, 1986, 33(9): 1167-1185

[182] Khouja M. The newsboy problem under progressive multiple discounts. European Journal of Operational Research, 1995, 84(2): 458-466

[183] Lin C, Kroll D E. The single-item newsboy problem with an emergency supply option. European Journal of Operational Research, 1997, 100(3): 562-565

[184] Mazzola J, Schantz R. Single-facility resource allocation under capacity-based

economies and diseconomies of scope. Management Science, 1995, 41(5): 669-689

[185] Parlar M, Weng Z K. Designing a firms coordinated manufacturing and supply decisions with short product lifecycles. Management Science, 1997, 43(10): 1329-1344

[186] Fiala P. Information sharing in supply chains. Omega: The International Journal of Management Science, 2005, 33(5): 419-423

[187] Weng Z K, Mcchurg T. Coordinated ordering decisions for short life cycle products with uncertainty in delivery time and demand. European Journal of Operational Research, 2003, 151(1): 12-24

[188] Fisher M L, Hammond J H, Obermeyer W R, et al. Making supply meet demand in an uncertain world. Harvard Business Review, 1994, 72(3): 83-93

[189] Khouja M. The single-period (news-vendor) problem:literature review and suggestions for future research. Omega: The International Journal Management Science, 1999, 27(5): 537-553

[190] Lee H L, So K C, Tang C S. The value of information sharing in a two-level supply chain. Management Science, 2000, 46(5): 626-643

[191] Cachon G P, Fisher M. Supply chain inventory management and the value of shared information. Management Science, 2000, 46(8): 1032-1048

[192] Gurnani H, Tang C S. Note: optimal ordering decisions with uncertain cost and demand forecast updating. Management Science, 1999, 45(10): 1456-1462

[193] Khouja M, Robbins S S. Optimal pricing and quantity of products with two offerings. European Journal of Operational Research, 2005, 163(2): 530-544

[194] Eppen G, Iyer A. Improved fashion buying with bayesian updates. Operations Research, 1997, 43(6): 805-819

[195] Kanzow C. Some noninterior continuation methods for linear complementarity problems. SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications, 1996, 17(4): 851-868

[196] Mifflin R. Semismooth and semiconvex functions in constrained optimization. SIAM Journal on Control and Optimization, 1977, 15(6): 957-972

附录 A 攻读学位期间所发表的学术论文目录

1. Yin Zhou, Donghui Li. Coordinating Order Quantity Decisions in the Supply Chain Contract under Random Demand. Applied mathematical modelling, accepted
2. 周茵，李董辉. 需求和交货日期均不确定的协调订货决策问题. 湖南大学学报(自然科学版), 已接收
3. 曾金平, 周茵. 解非线性方程组的一类多重分裂加性 Schwarz 算法. 湖南大学学报 (自然科学版), 2004, 31(6): 90-93
4. 周茵，曾金平. m 步非线性多重分裂 Newton 法的收敛性. 应用数学， 2005, 18(4): 553-559
5. 周茵，李董辉. 需求和交货日期均不确定的带回购策略的协调订货决策问题. 全国现代物流系统科技发展与管理学术会议，系统工程 (增刊), 2004, 17-24
6. Yin Zhou, Donghui Li. Optimal Quantity Decision for Fashion Goods with Demand Forecast Updating. Proceeding of International workshop on successful strategies in supply chain management, edited by Department of Applied Mathematics of the Hongkong Polytechnic University, 2006, 331-338

致 谢

本文是在导师李董辉教授的悉心指导下完成的。在博士研究生三年的学习中，无论是培养计划的制定、学位课程的选修，还是学位论文的选题、研究和撰写，都倾注了导师大量的心血。在研究课题以外，导师还注重培养学生独立思考的能力和开拓创新能力，教给我做人做事的很多道理，力求让我全面发展。一直以来，导师的崇高品德、渊博的知识、严谨的治学态度和一丝不苟的工作作风将永远激励着我奋发向上，使我受益终身。值此论文完成之际，谨向导师致以最诚挚的谢意！

特别感谢曾金平教授！在曾老师的细心指导和帮助下，本文得以顺利完稿，在此表示最真心的感谢！

感谢在学习期间所有的授课老师，特别是周叔子教授、胡锡炎教授，正是他们的倾囊相授才使我掌握了深厚理论知识。

我要感谢辛勤养育我的父母，正是由于他们默默的鼓励和支持，使我顺利地完成学业！

最后，还要感谢在生活和学习方面帮助过我的同学和朋友们，没有大家的鼎力支持，我的学业也无法顺利完成，因此我要衷心地感谢他们！