

摘 要

经济的全球化和生产力的快速发展,带来了社会产品的极大丰富和人们物质生活的极大满足。然而与此同时,商品流通的各个环节产生了大量回流产品,经济建设对可再生资源的过度开发和对环境破坏的压力等制约着经济的可持续发展。为此各国纷纷建立了针对本国回流产品处理问题的法规政策。逆向物流作为解决这个问题的一种先进管理理念,现已成为近年来新兴的研究领域。

库存控制与管理是物流管理系统的一个重要子系统。库存持有成本占到了产品成本的 20%到 40%。逆向物流中经修复的返回品可作为库存持有量的一个重要补充部分,因此,研究逆向物流库存问题具有较大的经济意义。本文在上述背景下,提出了基于逆向物流的库存控制理论,通过建立逆向物流的库存控制模型,进而制定有效的逆向物流库存管理策略。

按照产品的需求和回流特征,本文将逆向物流库存控制模型分为确定型模型和随机型模型。在确定型模型情况下讨论允许缺货和不允许缺货的情形,提出了具有一定理论和实用价值的数学模型;在随机型模型情况下,讨论库存的单周期和多周期订购策略。对基于经典报童模型的单周期模型进行了改进;由于多周期库存模型是典型的多阶段决策问题,本文应用动态规划理论对其进行建模、求解,分析在不同参数情况下对库存成本的影响。通过运行 Mathematica 计算软件,得出了在多周期情形下不同库存水平的最优订购策略。研究表明,本文建立的模型具有较大的实用参考价值。

关键词: 逆向物流, 库存控制策略, 返回产品, 动态规划

Abstract

Global economic and the fast development productive forces bring the enormous social product and people's material life have been satisfied massively .However, there exists long time game between them and backflow product processing of commodities, as well as has overdevelopment to the renewable resources' and to the environmental protection pressure. At present, to realize the economical sustainable development, various governments have established the backflow product processing laws and regulations policy to their own countries. As an outstanding management idea, reverse logistics has already become the emerging research area in recent years.

The inventory control and the management are an important subsystem in logistics management. The holding cost of stock has occupied 20% to 40% of the product cost. The repaired returned products of reverse logistics can be the necessary additional item to the inventory Therefore, it is a big economic significance to study stock problems of reverse logistics. Under the above background, this article proposed inventory control theory based on the reverse logistics, by establishment reverse logistics inventory control model, then formulation effective management strategy for reverse logistics.

According to the product demand and the backflow characteristic, this article divides the reverse logistics inventory control model into the deterministic model and the stochastic pattern model. In the deterministic model situation, We discusses situations of permit stock out and non-permit stock out, proposed mathematical models that have certain theory and the use value; In the stochastic pattern model situation, the article discuss the single-cyclical and the multi-cyclical stock order strategy. To improve single-cyclical inventory control based on the classical newsboy model; because the multi-cycle inventory model is the typical multi-policy-making question, this article applies the dynamic programming theory to carry on the solution to it, analyzes the different parameter to the influence of inventory cost. By running the software Mathematica, the article gets the conclusion of the best purchasing policy under the multi-cyclical stock order situation. The research indicated that the models which established have the great use value to the realization.

Keyword: Reverse Logistics, Inventory Control Policy, Returned Items,
Dynamic Programming

论文独创性声明

本人声明：本人所呈交的学位论文是在导师的指导下,独立进行研究工作所取得的成果。除论文中已经注明引用的内容外，对论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。本论文中不包含任何未加明确注明的其他个人或集体已经公开发表的成果。

本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名： 罗志军 2008年5月27日

论文知识产权权属声明

本人在导师指导下所完成的论文及相关的职务作品，知识产权归属学校。学校享有以任何方式发表、复制、公开阅览、借阅以及申请专利等权利。本人离校后发表或使用学位论文或与该论文直接相关的学术论文或成果时，署名单位仍然为长安大学。

(保密的论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名： 罗志军 2008年5月27日

导师签名： 胡大伟 2008年5月27日

第一章 绪 论

1.1 选题背景与研究意义

1.1.1 选题背景

在经济全球化和各国将发展经济作为本国第一要务的全球大环境下,资源获得的空
间日渐狭窄和社会生产力的大幅提高,促使各国更加注重如何提高资源的利用率。物流
管理作为一种先进有效的优化配置有限资源的管理手段,被称为“第三方利润源”,逐
渐成为世界范围研究的热点问题。物流这个概念自上个世纪八十年代传入我国,立即引
起我国理论界和实业界的广泛研究和实践,尤其是近几年来,很多企业更是调整战略,
将物流管理的优劣作为本企业的核心竞争力之一^[1-3]。

传统物流管理可分为正向物流和逆向物流。目前研究最多的是针对供应链的从原材
料的采购、配送、生产加工、分销直至到达最终客户,即正向物流。逆向物流是指针对
各类产品从消费终端开始,在消费者、分销商、生产商、原材料供应商等过程中产生的
废弃、折旧、更换的产品进行收集、再加工等处理过程。从物品的流向上来看,可以简
单地认为逆向物流是正向物流的逆过程。随着近几年来在全球范围内对自然资源的过度
开发、各种原材料的日渐枯竭及购买成本的大幅增加,以及商品在各个流通环节所产生
的废弃物对环境所造成的巨大压力,逆向物流已经得到各个国家相关能源、环保部门和
经济研究团体的关注,逐渐成为物流研究领域一个新的研究热点^[4-5]。世界各国已就废
旧商品的回收处理或再利用制定了多项适合本国国情的法律法规。在德国,1991年的
包装条例强制工业企业回收所使用的包装材料。2004年9月,芬兰修改了《垃圾法》,
旨在减少包装垃圾的同时提高包装废弃物的再利用率。我国也颁布了多项法律法规,如
《环境影响评价法》、《可再生能源法》、《废旧家电及电子产品回收处理管理条例》等,
目前我国共颁布了28部环境保护法律、30部行政法规、65个环保规章制度,13部自
然资源管理法律和34项环境保护法规;环境保护部门出台了90多项全国性环境保护规
章和1020多件地方性环境保护法规^[6-7],从中可以看出我国政府部门对加强环保和提高
资源利用率的决心和执行力度。

1.1.2 研究意义

(1) 发展循环经济,实现经济、能源可持续发展的必由之路

“循环经济”一词,是由美国经济学家波尔丁首先提出的,是指在人、自然资源和

科学技术的大系统内，在资源投入、企业生产、产品消费及其废弃的全过程中，把传统的依赖资源消耗的线型增长的经济，转变为依靠生态资源循环来发展的经济，可以最大限度地减少人类社会活动对环境产生的破坏作用^[8]。

21 世纪是可持续发展的世纪，是循环经济的时代。循环经济按照生态原则指导经济活动、按照生态效益规范经济活动，以“减量化、再利用、资源化”为基本原则，是一种建立在物质充分循环利用基础上的经济发展模式。作为循环经济的核心内容，循环物流能使有限的自然资源得以充分利用，并有利于保护生态环境，它是我国实现可持续发展的必由之路。因此，企业实施逆向物流，政府、社会促进和构建逆向物流系统是我国经济发展必然的选择。

(2) 增强企业竞争力和建立节约型社会的有效途径

在竞争日益激烈的今天，企业实施逆向物流战略有助于提高企业竞争力，提升企业的社会形象。在买方市场的新市场结构下，消费者在供应链中的地位得到了前所未有的提升。企业为争夺市场，满足更多消费者需要，实施了层次不同的退货政策，很多企业甚至提出无条件退货的政策。由各种原因造成的各种数量不等的返回品的出现，使得逆向物流在供应链中的地位骤然上升，逆向物流已成为企业管理的重要环节。表 1.1 是一些产业的产品及其返品率^[9]。

表 1.1 各项逆向物流产及其返品率

产业名称	返品率
杂志出版	50%
书籍出版	20-30%
分类零售商	18-35%
贺卡	20-30%
书籍配送	10-20%
计算机制造商	10-20%
电子产品配送	10-12%
光盘	18-25%
印刷	4-8%
促销商	14-15%

从表 1.1 可以看出，首先，在原材料的费用及运输费用成本日渐增高的今天，如果将回流的产品充分利用，能极大的降低产品的生产成本，提高企业的库存管理水平；其次，这可以增强企业的社会形象，提高企业的公信力和在消费者心中形成良好的口碑；

第三,在我国政府大力提倡建立节约型社会的政策下,有效的开展逆向物流的运作与管理,有助于在全社会形成一种倡导节约、保护环境的良好社会风气。

库存控制是物流管理研究中的一个重要问题。正向物流库存控制着重于确定库存数量的多少以及何时补充库存,补充多少库存,而逆向物流库存控制除了要考虑以上问题外,还要考虑的是何时返回库存及返回数量,可见,回流在库存系统中扮演着重要的角色,是库存系统的重要入口之一,大部分回流产品在经过回流处理后能够重新返回库存进行销售,这在降低企业的生产成本的同时,也使企业在制定库存系统的订购决策时还要充分考虑到回流带来的库存量增加。然而,实际情况是回流量往往是一个不确定的、随机的数值,尤其在多周期逆向物流库存系统中,各个周期的回流量不尽相同,逆向物流库存系统的订购决策因此而变得更为复杂和难以估计。如果此时仍按传统的库存订购决策来制定逆向物流库存系统的订购策略,可能会造成大批滞销商品的出现,不仅占用大量资本和存货空间,也会影响到库存系统的正常流通与运转。

综上所述,随着回流量的增加,逆向物流已对传统库存体系产生重大影响,有必要将库存系统订购决策放到逆向物流环境中来重新考虑。可以说,逆向物流库存系统订购决策技术的发展是市场充分竞争的必然趋势。而作为供应链中的各级企业,在关注多级库存系统问题的同时,更希望得到一套解决自身逆向物流库存系统订购决策的方法。

1.2 逆向物流及其库存控制问题的国内外研究现状

物流管理作为一种有效配置、管理商品供应链的运作思想和管理方法,目前已经深入人心。但是很长时间以来,逆向物流远没有正向物流那样引起业界的广泛关注和研究。随着供应链的全球化 and 原材料的紧缺与采购成本上涨,人们逐渐认识到逆向物流潜在的巨大经济效益。零售巨头西尔斯公司的物流副总裁曾说,逆向物流也许是企业在降低成本中的最后一块处女地了。逆向库存控制问题已在国内外引起了一股研究热。

1.2.1 国外研究现状

(1) 有关对逆向物流的研究

近年来,随着环保法规约束力度的加强以及在商品供应链中产生了大量的返回品,学术界和企业界对逆向物流理论的建设 and 实践越来越关注。在上个世纪九十年代初期,美国物流管理协会曾有两项关于逆向物流的研究。第一项是 1992 年 Stock^[10]的研究成果,他提出了逆向物流的概念,阐述了逆向物流领域与商业和社会的相关性;一年后,Kopicki^[11]等学者对逆向物流的实际操作和规则作了研究,指出产品再利用和再循环的

观点。Fleishman M^[12]是较早主张从供应链角度研究逆向物流的学者。作者将回收产品研究领域零散的定量模型进行了归纳整理后将其统一置于逆向物流的框架之内,并且主张采用定量方法解决逆向物流问题,为此后的研究拓宽了道路。1998年,Stock^[13]详细阐述了如何设置和实施逆向物流策略。Rogers和Tibber、Lembke介绍了逆向物流广泛的商业应用^[14],2000年Guide等人做了关于逆向物流制造再加工系统方面的特征研究。Minner等^[15]研究在动态需求和回收的确定型模型中的最优生产和再制造的策略。Kleber等^[16]研究了回收系统中的多种再制造选择。Inderfurth等^[17]认为在再利用选择为处置和再制造的情形下存在简单的近似最优控制政策。

(2) 有关逆向库存控制问题与模型的研究

逆向物流的库存管理要求将逆向物流整合到生产计划中,逆向库存控制机制是该领域的研究重点。库存控制的目标就是控制外部的订单水平以及内部的产品回收流程以便在满足服务水平的前提下将固定成本以及可变成本降至最低。按照需求量和回流产品的返回量的特点,可以将库存模型可以分为确定型模型和随机型模型两类。

1) 确定型模型

确定型模型是指在一个库存管理过程中,需求和回流量都是已知的。Schrady^[18](1967)提出了一个假定需求率、回收率、固定提前期都是常数的确定型模型,他得到的结果与EOQ模型类似。Dobos和Richter(2004)也对需求和回收率为确定情况下再循环产品库存问题进行了研究^[19]。文中基于产品的回收速度和使用速度给出了使总成本最小的产品循环时间和生产与回收产品的数量,并给出了基于EOQ和不基于EOQ的两种模型。Nahmias和Rivera(1979)^[20]则针对有限循环/修复率的情况对这个模型进行了扩展研究。Richter在1996年提出了一个和Schrady模型相等价的模型,但他所用的控制策略不同^[21]。在模型中Richter用EOQ模型研究了生产和回收再制造、相协调的问题,他在模型中将产品需求和产品回流假定为连续不断和恒定的,并给出了最优控制参数的值,探讨了这些参数和回收率的关系。

2) 随机型模型

与确定型模型不同,随机型模型是指无论从订货周期和订货量或是返回品方面,这些都是随着需求的改变而变。按照库存计划时间,随机型模型可分为单周期和多周期模型。

①单周期逆向库存模型

Webster^[22]和Guider^[23]从零售商的角度研究了易腐烂物品从零售商返回制造商的

处理策略,作者以最大化零售商的利润为目标函数制定相应的零售价格。Kleber^[24]等人针对需求和返回均是随机的情况,考虑了一个多库存点的问题。作者以最小化系统的总费用建立了数学模型,然后通过转化为 Hamilton 函数进行了求解。

② 多周期逆向库存模型

Cohen^[25]等人针对有些返回品可以直接利用来满足新的客户需求这一实际情况,建立了一个单一库存点模型采用周期盘点策略对库存进行控制。作者通过比较库存持有成本和缺货的损失费用得出具体的订货策略。Kelle^[26]等人在此基础上进行了扩展,他们假设订货有固定成本并且已售出的产品在市场上的返回时间是一个随机变量,作者运用动态批量的方法对此进行了研究。Fleischmann^[27]等人对一个单品种单一库存点问题进行了较为深入的分析,作者基于传统的 (s, Q) 库存模型,通过对净库存水平均值和方差的求解进而以最小化长期平均成本建立了 (s, Q) 库存模型。

1.2.2 国内研究现状

由于物流研究在国内的起步时间相对不长,国内学者对逆向物流库存问题的研究也处于初级研究阶段。黄祖庆、达庆利^[28]提出了一个允许退货的库存控制模型,模型假设销售商允许顾客退货,回收商品经过处理后仍然能以原价卖出。在此条件下,提出了一个最优订购模型和求解方法,并用数值和算例讨论分析了不同回流率、库存成本和缺货损失对销售商的最优订购量和期望收益的影响。黄祖庆、达庆利和王东东^[29]提出了逆向物流具有时滞的一个 EOQ 扩展订购模型。他们考虑了退回产品修理的滞后期和修复成本,将订购周期分为前时间 L 和 $T-L$ 阶段。假设销售商在一个订购周期 T 内,允许消费者退货,退回物品经过时间 L 简单修复处理后仍然可以和“新产品”一样销售,但在 $T-L$ 后退回的产品则被直接处理,据此得到了一个 EOQ 扩展的销售商订购模型,并分析讨论了回流率对销售商的收益及订购策略的影响。益宇鸣^[30]根据回流品不同性质及不同处理方式,将逆向物流库存问题划分为自治复原库存问题和管理复原库存问题两大类,并分别给出了库存控制模型及实例分析。储洪胜、王京春和金以慧^[31]建立了一个两级最优库存策略模型,该模型包括一个回收源、一个订货补充点,考虑固定单位订货成本、固定维修成本、库存成本和缺货成本,在不考虑订货提前期的情况下,首先对单周期决策问题进行了分析,在此基础上分析建立了两级最优库存策略的求法。郝梅玲^[32]介绍了几种常用的返回品预测模型,然后在一个现有的库存控制模型基础上,对其进行改进,提出了一个更符合实际的新模型。董甜甜^[33]分析了在缺货补足和不再补足两种情况下的逆向库存情况,并采用马尔科夫理论给出了相应库存控制策略。袁霄^[34]在考虑多

周期库存控制的情况下，分析了局部库存最优与本期库存最优之间的关系，并采用预测方法和计算机测试模拟给出了结论。

综上所述，虽然国内外对确定型和随机型逆向物流库存模型有一定的研究，但是在确定型模型中考虑允许缺货条件下的逆向物流库存模型研究较少；在随机型模型中，单周期回流产品的不同处置策略以及多周期库存策略的研究也相对匮乏。

1.3 本文研究内容和架构安排

1.3.1 研究内容

基于逆向物流及逆向物流库存问题对于指导实践生产和理论研究具有的重大意义，本文将在已有对该问题的研究基础上，首先阐述了逆向物流及其库存问题的基本概念、理论，然后按照回流产品的返回特性（稳定返回或随机返回），将逆向物流库存控制模型分为确定型逆向物流库存问题和随机型逆向物流库存问题两大类；在确定型库存控制决策下，考虑了生产允许缺货和不允许缺货情况的库存控制模型；针对随机型逆向物流库存控制模型，本论文分析了单周期和多周期逆向库存的情况，并给出相应问题的数学模型、求解方法以及数值算例、模型参数分析。对于这些问题的研究，旨在将实际逆向物流库存操作问题纳入到理论研究的层次内，通过研究理论模型，从而可以更好的指导实践操作。

1.3.2 本论文架构安排

第 1 章 绪论。指出研究本问题的背景和意义，国内外研究现状及本论文的主要研究内容。

第 2 章 逆向物流及库存控制理论。阐述了逆向物流的概念、分类、特征及发展的驱动因素；阐述了库存控制理论的含义、分类、组成要素、库存处理策略和库存模型；分析了逆向物流库存控制的含义，简要介绍了目前研究逆向物流库存问题的最新理论 CMI (Collector Managed Inventory, 收集商管理库存)，最后做了本章小结。

第 3 章 确定型逆向物流库存控制研究。首先对本章的确定型逆向库存问题进行了描述，接下来提出了生产中不允许缺货和生产允许缺货（缺货需补足）情形下的模型假设、模型的建立和求解，然后给出了数值算例进行验证，对模型中的关键参数进行系统分析。文末对本章的研究内容做了小结。

第 4 章 随机型逆向物流库存控制研究。首先对本章研究的问题进行了简要描述。然后分析了单周期库存模型，在经典报童问题的基础上，应用 ABC 分类控制的管理思

想,针对返回品的三种处理策略进行较详细的分析,然后提出了本文的改进单周期模型,并以实例验算;本章第二部分分析了在多周期情形下的逆向库存模型,首先介绍了动态规划的基本问题,然后用动态规划理论方法建立了本文的多周期数学模型,求解模型确定了模型的 (s, S) 策略。考虑到模型的复杂性,最后本文采用 Mathematica5.0 进行了计算,得出各阶段的多周期数学求解公式。文末是本章小结。

第 5 章 结论和研究展望。本章主要对本论文的研究内容进行了总结。然后指出本文研究的局限性、存在的问题和未来研究的方向。

第二章 逆向物流及库存控制理论

2.1 逆向物流概述

2.1.1 逆向物流的涵义及分类

(1) 逆向物流的涵义

自 19 世纪以来，社会生产力的极大发展和人们物质生活需求的提高，社会产品极大丰富，在商品流通的原材料采购、生产、配送等各个环节产生了大量的废弃、折旧、破损的可回流产品；与此同时，各种可再生资源的不断减少和过度开发、破坏大自然所带来的资源和环保危机正日益加剧。如何充分利用供应链的回流产品，使之既能补充供应链库存，减少原材料采购成本，实现经济价值，又符合环保要求，实现可持续发展。在这种环境下，逆向物流应运而生。从供应链的角度看，产品、零部件和材料沿着与正向物流流通渠道相反的方向，从产品的下游向上游回流的过程，称之为“逆向物流”。

图 2.1^[35]、图 2.2^[36]反映了简单和复杂逆向物流流程。

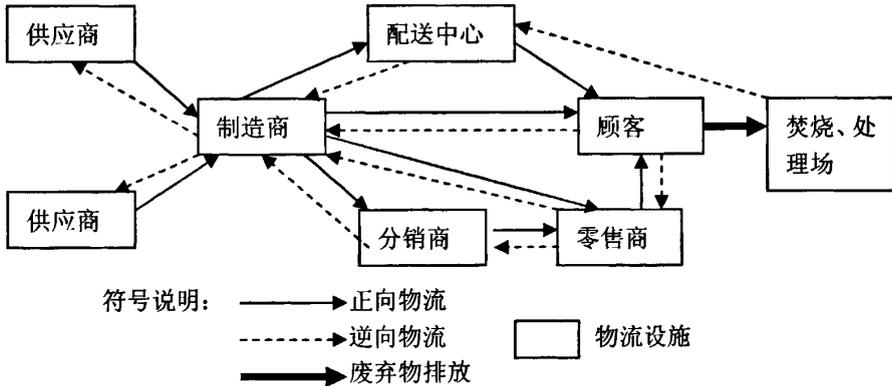


图 2.1 简单逆向物流系统

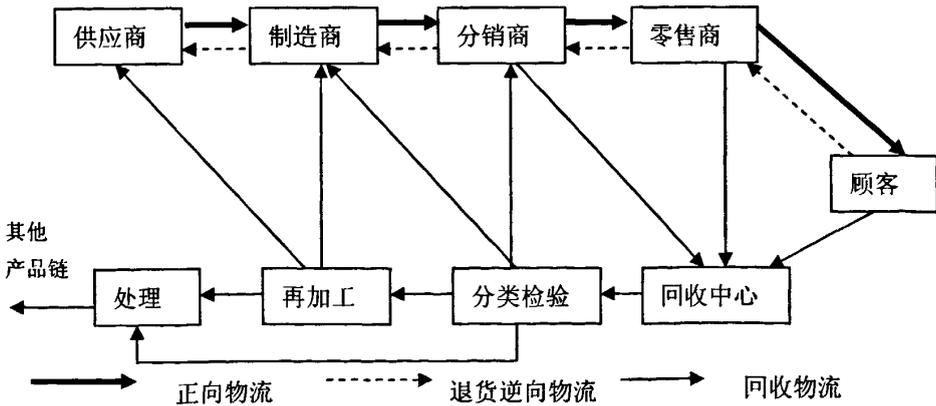


图 2.2 复杂的逆向物流系统

逆向物流虽然具有重要的理论和实践价值,但目前学术界对此还没有一个统一的定义。美国物流管理协会(CLM)的 Stock(1992)首先提出 Reverse Logistics 这个用词。Stock 认为:逆向物流狭义上指循环利用、垃圾处理以及危险品管理这类物流活动。广义上是指所有与资源减量、循环、置换、材料再使用。

欧洲的 RevLog^[37]将逆向物流定义为,(逆向物流)是将原材料、半成品、产成品从制造商、经销商或消费者处流向回收地点或适当处理地点的规划、实施和控制的过程。以及弃置有关的物流活动。

Fleischmann^[38]提供了一个新的定义,逆向物流是有效地规划、实施和控制二手产品的流入和存储以及相关信息的过程,它与传统的供应链方向相反,其目的是为了产品的价值恢复和恰当处理。Fleischmann 的定义用了一个更加宽泛的概念:二手产品,这样就包含了没有使用过的产品。

我国国家标准《物流术语》(GB/T 18354-2006)对逆向物流的定义为:物品从供应链下游向上游的运动所引发的物流活动。

一般说来,从产品实体的运动过程中逆向物流可以看作是传统物流的“逆过程”。而且从不同的供应链环节(如分销商、零售商等)的角度看,其概念也不尽相同。

在上述定义的基础上,本文对逆向物流做出如下定义:逆向物流是指将原材料、半成品、产成品和包装从制造商、经销商或消费者等供应链的各个节点处沿供应链返回其上级节点直至最初的原材料供应商,也可以返回至第三方回收商再由回收商进行处理。其目的是重新获取价值或对其进行适当处理。逆向物流包括产品再利用、再制造、整修、材料再生、废品处置等活动,以及伴随而产生的收集、运输、库存管理等物流活动。

(2) 逆向物流的分类

狭义的逆向物流是指对已经废弃的产品进行再制造、再使用或再循环的过程。广义的逆向物流还包括减少资源使用以及有效的退货管理等含义。

1) 按照逆向物流的回收方式可分为:

- ①再使用:主要指容器、包装等能进行简单的处理就能再次投入使用。
- ②再制造:对于复杂的装备或机器进行处理,一般需要制造商才能处理。
- ③再循环:分为法规驱动和经济驱动,前者主要指减少废物,后者主要指废物利用。
- ④销毁处理:对那些没有经济价值或严重危害环境的回收品或零部件,通过机械处理、地下掩埋或焚烧等方式进行销毁。

2) 按照逆向物流的退货来源可以分为:

① 制造业退回：对于生产出的产品不满意质量或者是过剩的退回。

② 商业退回：根据商业协议包含逆流供应链中的相关活动。其中 B2B 一般指的是过期的产品的退回。B2C 一般指的是时间和产品质量问题不适应需求和供给的退回。

③ 产品召回：有缺陷的产品进入供应链后导致该产品的退回。

④ 保修退回：在质量保证期或维修期内被退回并修理。

⑤ 终端使用退回：使用期满后产品被收集进行重新制造、回收或者焚烧。

2.1.2 逆向物流与正向物流的比较

从图 2.1 和图 2.2 对简单和复杂逆向物流系统的分析图中可以看出，逆向物流和正向物流是处于同一供应链系统中不同产品(新品和返回品)的流向链。在正向物流的运行过程中，由于存在可能的新产品缺陷，这部分产品直接就通过逆向物流渠道返回到上级销售商或生产商手中；同时，逆向渠道中的部分经修复或再加工后的产品又可以以新产品价格或折扣价格在正向物流渠道中售出，因此可以看出两者的紧密联系，既独立又相互关联。

(1) 逆向物流与正向物流的相同点

1) 处于同一供应链配送系统中

在实际的产品配送过程中，为实现成本最低、效益最大化，同一个配送中心既可以是新产品的集散地，又可以在库存和管理允许的情况下作为回流产品的收集区。运载车辆在将需配送的产品卸载后，又可以将需维修的回流品取回，提高车辆返程的实载率。这对降低企业的回流运输成本有较大的意义。

2) 运作目的相同

正向物流旨在合理选择车辆配送路线和配送设施的定位来降低整个产品的配送成本；逆向物流通过对问题产品的回收和再加工、再售出，来降低企业的生产成本，提高顾客的满意度，进而提高企业的经济收益和社会知名度。因此，从这个意义来说，正向物流和逆向物流的实施目标是一致的，即提高企业的经济效益和降低生产经营成本。

(2) 逆向物流与正向物流的不同点

正向物流的产品从初始配送点出发，按照订单需求，逐级配送到分销商、零售商以及最终用户，因此，它的产品流向是以需求为导向的。而逆向物流的产品流向，是回收品从顾客或次级分销商等向供应链的上一级的收购商或第三方回收商的一个产品回流过程，它是一个产品逐级责任流动的过程。从实际运作来看，逆向物流管理的重要特征就是不确定型，不确定型主要体现在产品回收地点、回收数量、回收产品的质量、回收

时间的不确定以及产品处理选择的不确定。因此,从这个角度来看,逆向物流要比正向物流复杂的多。表 2.1 从产品的订购数量、订货周期等方面对正向物流和逆向物流的特点进行了比较。

表 2.1 正向物流和逆向物流特点比较^{[39][40]}

项目	正向物流	逆向物流
数量	大批量的标准产品	小批量的不同产品
不确定型	不确定型因素影响较小	不确定型因素影响较大
成本因素	更透明,简单	更隐蔽,复杂
起讫点数目	一个起点,多个终点	多个起点,一个终点
反应速度	比较快	比较慢
流动方向	生产商到消费者	消费者到生产商
预测性难易程度	预测相对比较直接	预测难度大
回流渠道	标准化渠道	特殊的渠道
定价策略	定价策略相对一致	定价需依赖很多因素

2.1.3 逆向物流的发展驱动因素

从逆向物流的产生、发展情况来看,可以从以下几个方面来了解逆向物流发展的驱动因素^[41]。

(1) 国家法律法规要求 为实现各国经济的可持续发展,许多发达国家已经强制立法企业回收处理所生产的产品或包装物品等。如荷兰要求汽车制造商对所有废旧汽车实行再生;在德国,1991年实施的包装条例强制工业企业回收所使用的包装材料。我国在2003年出台并实施了《电子垃圾回收利用法草案》,该《草案》明确规定制造商有义务对废旧产品回收再处理,目前我国已制定并实施了大量对回收品处理利用的法律法规。

(2) 企业的生产竞争压力和收益 企业通过废旧物品回收再利用,一方面可以减少生产成本、减少物料的消耗、挖掘废旧物品中残留的价值,可以直接增加经济效益;另一方面,可以在激烈的竞争环境中,提升企业的“环保”形象、改善企业与消费者的关系,间接地提高企业的经济效益。

(3) 环保要求 由于垃圾填埋和焚化不但会造成资源损耗,而且还会造成环境污染,不利于生产活动的健康持续发展,故要求生产商对产品的整个生命周期负责,以节约资源、保护生态环境。

(4) 社会效益 生产企业回收利用所生产的产品,符合社会发展的“绿色”思路,从而有利于企业在社会中树立良好的公众形象,产生巨大的社会效益。

以上几种驱动因素在实际生产实践中往往是互相影响。例如,若增加废弃物的处理成本,则会使得废弃物减少更多,产生更大生态效益和社会效益;而消费者的环保意识又表现出另一种新的市场机会,间接促进了经济效益的提高。

2.2 供应链库存控制理论

2.2.1 库存控制内涵及分类

在构成物流系统的各个组成要素中,库存是物流大系统中的一个重要子系统。据统计,库存持有成本占到了产品成本的 20%到 40%^[42],因此,研究库存以及库存控制,具有较大的现实意义。

(1) 库存及库存控制的涵义

根据我国的国家标准《物流术语》(GB/T18354-2006)中对库存的定义,库存是指作为今后按预定的目的使用而处于闲置或非生产状态的物品。广义的库存还包括处于制造加工状态和运输状态的物品。

库存控制是在保证生产和销售正常供应的前提下,以订货点(周期)、订货量为研究目标,按照库存费用最小的原则,来对库存进行计划和管理的手段。其目的是在提高客户满意度的前提下,降低库存成本,以强化企业的竞争力。

(2) 库存的分类^{[43][44][45]}

从产品的生产过程、库存物品所处的状态、经营过程或积累的角度可以分为以下几种:

- 1) 按生产过程可分为原材料库存、零部件及半成品库存、成品库存三类;
- 2) 按照库存物品所处的状态可看分为静态库存和动态库存;
 - ① 静态库存:指长期或暂时处于储存状态的库存;
 - ② 动态库存:也叫广义库存,是指包括处于制造加工状态或运输状态的库存。
- 3) 按经营过程或积累的角度可分为:
 - ① 周期库存:是指由补充过程导致的库存,它可用来满足确定条件下的需求,也就是说,企业能够正确地预测需求和补货时间(提前期);
 - ② 在途库存:是指从一个地方到另一个地方处于运输线路中的物品;
 - ③ 安全库存(缓冲库存):由于需求和提前期等方面存在着不确定,需要持有超过

周期库存的安全库存或缓冲库存；

④ 投机库存：是指为除满足正常需求之外的原因而备的库存。如由于预期价格上涨或材料匮乏、可能出现罢工等，为了批量折扣而购买的多余需求的材料；

⑤ 季节性库存：它是投机库存的一种形式，指在某季节开始前进行的库存积累。这种情况常发生在农产品和季节性产品中；

⑥ 闲置库存或称呆滞库存：它是指在某些具体的时期内不存在需求。呆滞库存可能在任何地方都是过时的，也可能只在某一个库存点是过时的。

4) 在库存理论中，根据物品需求的重复程度和库存计划时间的长度，库存可分为单周期库存和多周期库存。

① 单周期库存

单周期库存也叫一次性库存，这种需求的特征是偶发性和物品生命周期短，研究的是单周期或时令性商品的库存问题，因而很少会重复订货。例如，没人会在中秋节后预定月饼，这就是单周期需求。

② 多周期库存

绝大多数的需求都是多种周期需求，多周期需求是在长时间内的反复发生，库存需要不断补充。多周期库存又分为独立需求库存和相关需求库存：

A. 独立需求库存

独立需求库存是指需求变化独立于人们的主观控制能力之外，因而其数量与出现的概率是随机的、不确定的、模糊的。对于一个相对独立的企业而言，其产品是独立的需求变量，一般是无法预先精确知道的，只能通过一定的预测方法得到。

B. 相关需求库存

相关需求库存是指企业库存的需求数量和需求时间与其他的变量存在一定的相互数量关系，可以通过一定的数学关系推算得出。

2.2.2 库存控制系统的组成要素

库存控制系统有需求、补充、库存成本、缺货处理、盘点方式、存贮策略、目标函数等组成。

(1) 需求

库存的目的是为了满足需求。为了尽可能满足需求，存储管理者应设法了解和掌握需求规律，一般可通过销售量历史数据的统计和预测，或者基于对市场销售量的调查与分析来获得。需求是库存系统的输出，可以是常量，如某一地区一年内的蔬菜需求平均

量，或是某一居民区的生活用水量；需求量也可以随机的变量，如夏季某一商场每天对啤酒的需求量。图 2.3 是几种常见的需求模式。

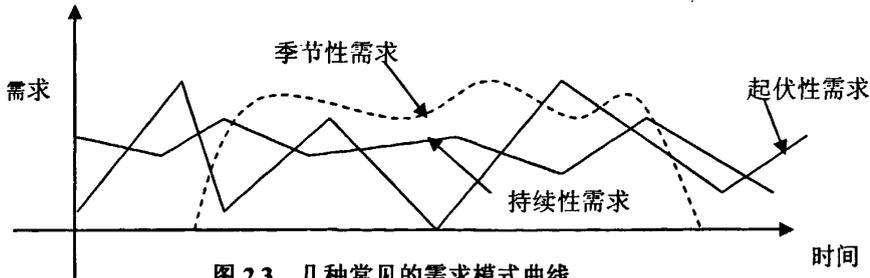


图 2.3 几种常见的需求模式曲线

(2) 补充

库存由于外界的需求不断减少，因此必须加以补充库存以满足需求，库存的补给是库存系统的输入环节。它可以通过向供货厂商订货来补充，也可以自己组织生产来补充。需求是外界提出的，不受控制，补充与输入则是可以控制的。

库存的补充供应是一个过程，需要一定的时间，这种从订购某货物到它实际加入库存之间的延续时间称之为拖后时间。换个角度看，为了在某一时刻能补充库存，必须提前订货，那么这段时间也可称之为订货提前期或备货时间。

(3) 库存成本

库存成本是指与库存系统经营相关的成本，它是建立一切库存控制模式的基本参数。主要包括采购成本、库存持有成本以及缺货成本。

(4) 缺货处理

由于需求或供货滞后时间可能具有随机型，因而缺货是可能发生的。对缺货现象通常采取如下两种方式处理：对未能满足的需求，其不足部分在订货到达后立即补上，即延迟交货；对未能全部满足的需求其不足部分将损失掉，就是说不再补充供应。

(5) 盘点方式

可以分为连续盘点和周期盘点。在连续盘点的情况下，任意时刻库存水平都为已知；在周期盘点模式下，每隔一个周期对库存进行盘点，不同的盘点方式会影响存贮决策。

(6) 存控制策略 这将在下文详细阐述。

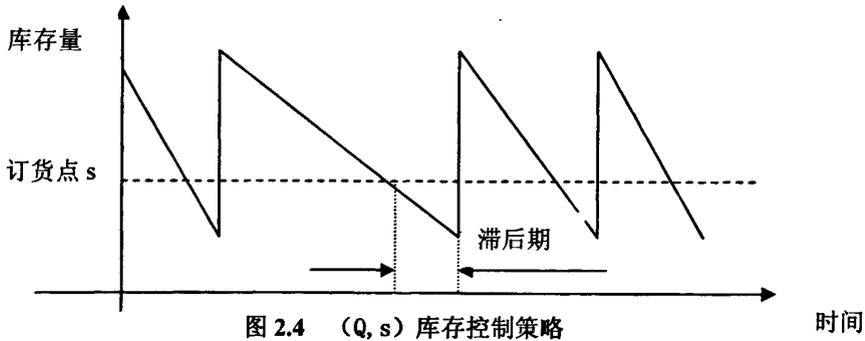
(7) 目标函数

目标函数是选择最优策略的准则。常见的目标函数有平均费用(或利润)及折扣费用(或利润)。最优策略的选择应是平均费用最小或平均利润最大。使平均费用最小的策略等价于使平均利润最大的策略。

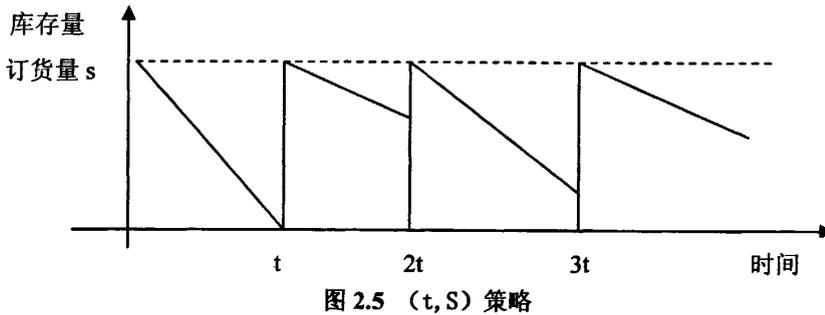
2.2.3 库存控制策略

库存控制策略即为控制库存所采取的方法,主要解决的问题是:何时补充;补充数量;库存系统的安全库存量、周转率和缺货次数等,常见的策略有:

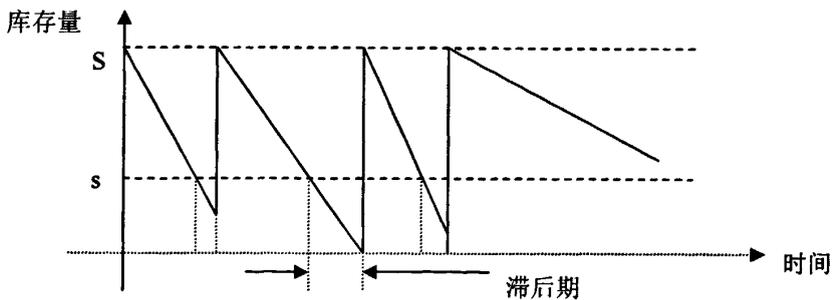
(1) (Q, s) 策略,对库存进行连续盘点,为连续型盘点类固定补充量方法。当库存降低到订货点水平 s 时,即进行补货,每次的补货量保持不变,都为 Q 。如图 2.4。



(2) (t, S) 循环策略,周期盘点模型。每隔 t 时间补充存贮量,使存贮达到 S 。如图 2.5。



(3) (s, S) 策略,与 (Q, s) 类似,为周期连续型盘点类补充方法。每当存贮量 $x > s$ 时不补充,当 $x < s$ 时补充库存。补充量 $Q = S - x$,即将存贮量补充到 S 。如图 2.6。



(4) (t, s, S) 混合策略,每经过 t 时间检查存贮量 x ,当存贮量 $x > s$ 时不补充,当

$x \leq s$ 时，使之达到 S 。

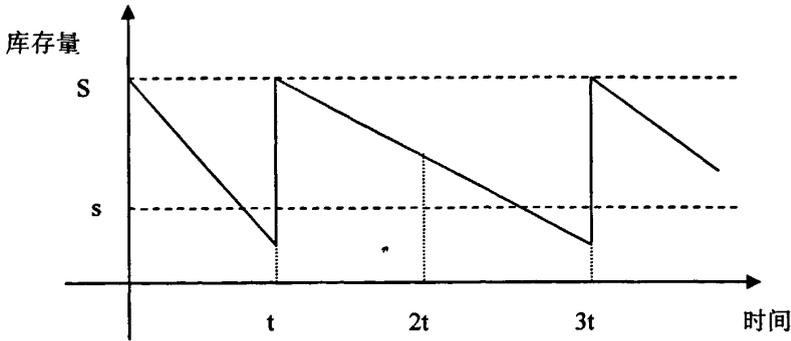


图 2.7 (t,s,S) 库存控制策略

2.2.4 经典库存控制模型

上述较为完整说明了一个库存控制系统应该包括一个生产过程（或周期）的库存需要、补货的方法、库存成本、对于缺货如何处理、库存费用结构以及使库存成本最小所建立的目标函数、存储策略。决策者通过何时订货，订多少货来对系统实施控制。若采用周期盘点时，订货周期的长度也是一个决策变量。从整体研究来看，库存控制模型可分为确定型库存控制模型和随机型库存控制模型。

2.2.4.1 确定型库存模型^[46]

在确定型库存模型中，需求和产品回流在每一个时点都是已知的，即需求不随时间变化，模型的目标函数是最优化固定成本和库存持有成本，假定需求，供给及供货滞后等相关量都是确定的，或为服从某已知函数的变量。确定型库存控制模型主要是针对经济订购批量模型 (EOQ) 及在 EOQ 基础上的建立的其他模型。主要有以下几类：

(1) 经济订购批量模型 (EOQ)

经济订购批量模型又称为整批间隔进货模型，英文为 Economic Order Quantity。此模型是在假设需求量和提前订货时间是确定、已知的情况下给出的，因此只要确定每次订货数量的多少或进货间隔期为多长，就可以做出存储策略。经济订购批量模型是典型的 (Q,S) 策略模型。

模型假设：

T：存储或订货周期；

R：单位时间需求速率；

Q：每次订购量；

C_0 ：每次订货费用；

C_1 : 单位库存存储成本

t : 瞬时补货, 即补货提前期为 0。

基本 EOQ 模型库存存储变化图:

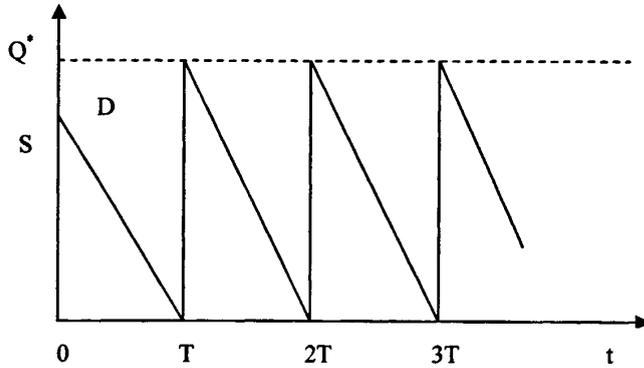


图 2.8 基本 EOQ 模型库存存储变化图

一个存储周期内需用该种物资 $Q=RT$, 图中斜线上的每一个点表示该时刻的库存水平, 每个周期的平均库存量为 $Q/2$, 其库存费为 $C_1QT/2$, 订货一次订货费为 C_0 , 此时本周期内存储总费用为 $C_1QT/2 + C_0$ 。

在 T 周期内, 单位时间的存储费用 C_z 为: $C_z = \frac{C_1Q}{2} + \frac{C_0}{T}$

根据 T 的定义知: $T=Q/R$, 代入上式, 得

$$C_z = \frac{C_1Q}{2} + \frac{C_0R}{Q} \quad (2.1)$$

显然, 单位时间的订货费随订购批量的增大而减小, 库存存储费随订购批量的增大而增大, 如图 2.9.

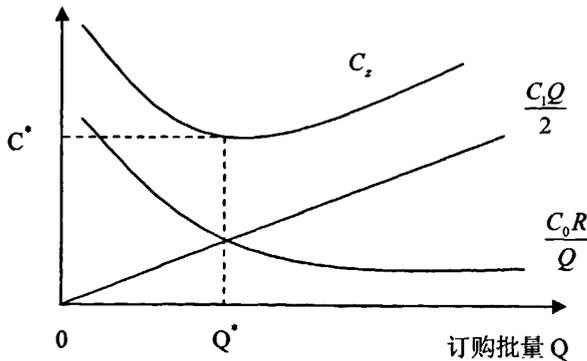


图 2.9 订购批量与库存系统费用关系

从图 2.9 看出, 在订货费用曲线和存储费用曲线相交处, 订货费和存储费相等, 存

储总费用曲线取得极小值。

由高等数学微分求极值的方法, 由式 2.1 得出

$$\frac{dC_z}{dQ} = \frac{C_1}{2} - \frac{C_0 R}{Q^2}$$

即得出经济订购批量

$$Q^* = \sqrt{2C_0 R / C_1} \quad (2.2)$$

由于 $\frac{d^2 C_z}{d^2 Q^2} = \frac{2C_0 R}{Q^3}$, 故当 $Q^* = \sqrt{2C_0 R / C_1}$ 时, C_z 极小值。

由式 2.2 和 $Q^* = T^* R$, 可得经济订货间隔期, 具体为

$$T^* = \sqrt{2C_0 / RC_1} \quad (2.3)$$

将 Q^* 值代入到式 2.1 中, 得出按经济订购批量进货时, 存储系统的最小存储总费用为

$$C_z^* = \sqrt{2RC_0 C_1} \quad (2.4)$$

EOQ 模型说明: 在确定经济订购批量时, 做了订货和进货同时发生的假设, 实际上到货和订货一般总有一段时间间隔, 为保证供应的连续性, 需要提前订货。

设提前订货时间为 t , 日需用量为 R , 则订购点 $s=Rt$, 当存储量下降到 s 时, 即按经济订购批量 Q^* 订货, 在提前订货时间 t 内, 以每天 R 的速度消耗库存, 当库存下降到零时, 恰好收到所定货物, 开始一个新的存储周期。

对于以上确定型存储问题, 最常使用的策略就是确定经济订购批量 Q^* , 并每隔 T^* 时间即订货, 使存储量 s (往往是以零计算) 恢复到最高库存量 $S=Q^*+s$ 。

当用 R 表示某种物资的年需求量, V 表示该物资的单价, C_0 为一次订货费, r 表示存储费率即存储每元物资一年所需的存储费用, 则得到经济订购批量的另外一种表达式:

$$Q^* = \sqrt{\frac{2RC_0}{rV}} \quad (2.5)$$

(2) 分批均匀进货的 EOQ 模型

由于这种模型最早用于确定生产批量上, 故称 Production Lot Size (PLS) 模型。在生产活动中, 产品的生产时间是不容忽视的, 即生产批量 Q 按一定的生产速度 P , 需要一定的时间 t_p 才能完成。推广到存储论中, 所谓分批均匀进货的 EOQ 模型, 一般是指零件厂—装配厂或生产厂—商店之间的供需关系中, 装配厂 (商店) 向零件厂 (生产厂) 订货, 零件厂 (生产厂) 一面生产, 一面向装配厂 (商店) 进货, 知道合同批量全部交货为止。

1. 模型假设

R 、 T 、 Q 、 C_0 、 C_1 含义同前, 不允许缺货; P 表示单位时间的供货速度 (生产量),

且 $P > R$ ；在 t_p 时间内，一边以 P 的速度供货(生产)，一边以 R 的速度消耗， t_p 时间内的进货量满足一个订货周期 T 的需用量，即 $Q = Pt_p = RT$ ，所以 $t_p = RT/P$ 。

2. 模型建立

分批均匀进货的 EOQ 模型的存储量变化状态图如下：

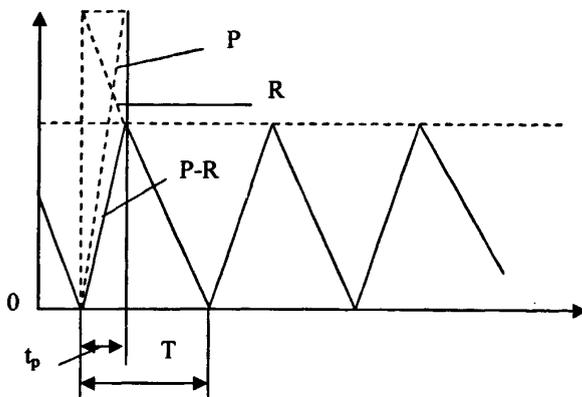


图 2.10 分批均匀进货的 EOQ 模型存储变化图

生产批量（即订购批量） Q 需时间 t_p ，即 t_p 也为进货延续时间；单位时间的产量 P 为进货速度。故在 t_p 时间内库存的实际增长速度为 $P-R$ ，最高库存量为 $(P-R)t_p$ ；平均存储量为 $(P-R)t_p/2$ ；一个存储周期的存储总费用为

$$\frac{1}{2}C_1(P-R)t_pT + C_0$$

将 $t_p = RT/P$ 代入上式，得到一个存储周期的存储总费用为

$$\frac{C_1(P-R)RT^2}{2} + C_0$$

单位时间存储总费用为

$$C_z = \frac{C_1(P-R)RT}{2P} + \frac{C_0}{T}$$

将 $T=Q/R$ 代入上式，得到

$$C_z = \frac{C_1(P-R)Q}{2P} + \frac{RC_0}{Q}$$

使用微分求极值的方法，令

$$\frac{dC_z}{dQ} = \frac{C_1(P-R)}{2P} - \frac{RC_0}{Q^2}$$

求得使单位时间存储总费用最低的经济订购批量为

$$Q^* = \sqrt{\frac{2C_0RP}{C_1(P-R)}} = \sqrt{\frac{2C_0R}{C_1}} \sqrt{\frac{P}{P-R}} \quad (2.6)$$

经验证，得知 $\frac{d^2C_z}{dQ^2} > 0$ ，得式 2.5 得到的 Q^* 可使的 C_z 取得极小值。

相应地，经济订购周期为

$$T^* = \sqrt{\frac{2C_0P}{RC_1(P-R)}} = \sqrt{\frac{2C_0}{RC_1}} \sqrt{\frac{P}{P-R}} \quad (2.7)$$

单位时间最小存储总费用为

$$C_z^* = \sqrt{2RC_0C_1 \frac{(P-R)}{P}} = \sqrt{2RC_0C_1} \sqrt{\frac{P-R}{P}} \quad (2.8)$$

与经典的 EOQ 模型相比，由于分批均匀进货，节省了存储费用，订购批量是整批进货的 $\sqrt{P/(P-R)}$ 倍，但单位时间存储总费用反而是原来的 $\sqrt{(P-R)/P}$ 倍。

(3) 价格有折扣的 EOQ 模型

供应商为了吸引顾客一次购买更多的商品往往规定对于购买数量达到或超过某一数量标准时给予顾客价格上的优惠，这个事先规定的数量标准称为折扣点。在数量折扣的条件下，由于折扣之前的单位购买价格与折扣之后的单位购买价格不同，因此需对经济批量模型进行必要的修正。

一般地，一次订购批量越大，单价越低。设单价有 n 级折扣，第一级规定的最低一次订购批量最小，假定可以从零开始，单价最高，以后各级规定的最低一次订购批量逐级增加，而单价逐级降低，令 V_j 代表第 j 级的物资单价 ($V_{j-1} > V_j$)； Q_j 代表第 $j+1$ 的最低一次订购批量 ($Q_j < Q_{j+1}$) 则当 $Q_{j-1} \leq Q \leq Q_j$ 时，单价为 V_j ，购货款为 QV_j 。按这种形式折扣，所订购的物资，整批按一个统一单价计算货款。现在本文来分析有价格折扣的 EOQ 模型。

由于取得折扣价，所以购货款节省；同时，由于订购数量大，减少了订货次数，节省了订货费，但存储费开支增大。故本文在建立模型时，应综合权衡以上三个方面的费用，选择三者总和最小的订购批量为经济订购批量。

在不同的折扣价格 V_j 下总货款与订货数量的关系如图 2.11 所示。

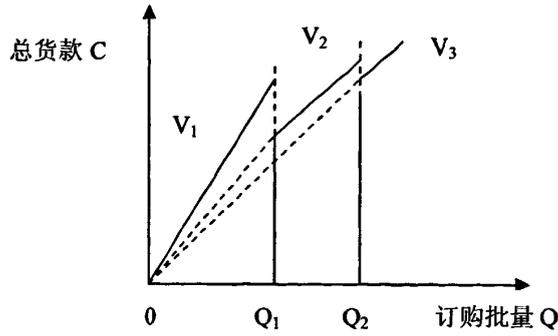


图 2.11 订购批量—货款曲线

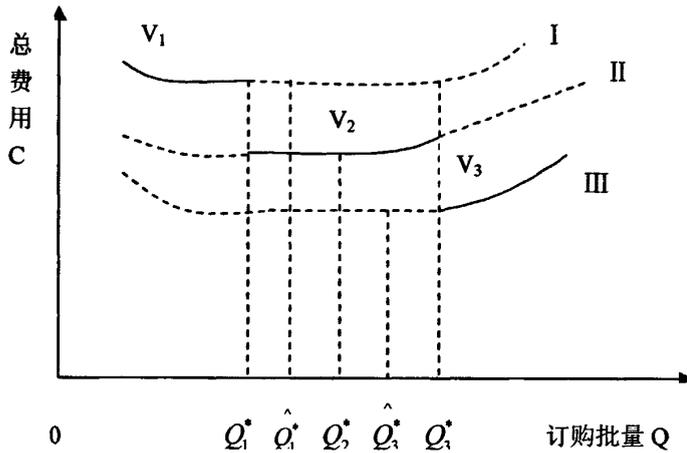


图 2.12 订购批量—总费用曲线

从图 2.11 可以看出，单价为 V_j 是 Q 的定义域为 $Q_{j-1} \leq Q \leq Q_j$ ，定义域范围内的实线曲线段表示订购批量 Q 是实际可能发生的，定义域范围外的虚线曲线表示订购批量是不可能发生的。年总费用随 V_j 的不同而不同，它构成一组曲线。单价 V_j 越高（ j 值越小）曲线位置越高（斜率越大）。寻找经济订购批量 Q^* ，即在定义域 $0 < Q < \infty$ 范围内，找出年总费用曲线的最低点，方法如下。

先求折扣价格 V_j 时的经济订购批量。根据公式 (2.5) 可得理论经济订购批量 \hat{Q}_j^* ，计算公式为

$$\hat{Q}_j^* = \sqrt{\frac{2RC_0}{rV_j}}$$

如果 \hat{Q}_j^* 处于实线段中，即 $Q_{j-1} \leq \hat{Q}_j^* \leq Q_j$ ，则 \hat{Q}_j^* 即该折扣单价 V_j 时的经济订购批量；如 \hat{Q}_j^* 处于虚线段中，则靠近 \hat{Q}_j^* 的那个实线段端点即该折扣单价 V_j 时的经济订购批量。

即

$$Q^* = \begin{cases} Q_{j-1} & \hat{Q}_j \leq Q_{j-1} \\ Q_j^* & Q_{j-1} \leq \hat{Q}_j < Q_j \\ Q_j & Q_j \leq \hat{Q}_j \end{cases} \quad (2.9)$$

在求出不同折扣价格 V_j 时的经济订购批量 Q_j^* 后, 其中使年库存总费用(包括购货款)最低的 Q_j^* 为最终选定的经济订购批量 Q^* 。

(4) 多种物资联合订购的 EOQ 模型

在实际的采购中, 一般时一次同时采购多种物资。这样, 可以凑够一定批量, 既便于装车提运又节省采购人力, 并且可以节省订货费用。下面本文就简单讨论以下多种物资的联合订购的 EOQ 模型。

1. 模型假设

联合订购的几种物资, 没有价格折扣; R_i 表示第 i 种物资的单位需求量; Q_i 表示第 i 种物资的订购批量; C_{1i} 表示第 i 种物资单位时间内单位数量的存储费用; C_0 表示每次订货的订货费用; T 表示 n 种物资的共同存储周期。

2. 建立模型

本模型关键在于 n 种物资的综合考虑, 以库存总费用最小为目标, 确定共同的经济存储周期 T^* , 从而确定各自物资的经济订购批量 Q_i^* 。

第 i 种物资单位时间的存储费用

$$\frac{1}{2} Q_i C_{1i} = \frac{1}{2} R_i T C_{1i}$$

N 种物资单位时间的存储费总和为

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{2} Q_i C_{1i} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (R_i T C_{1i})$$

单位时间的订货费为 C_0/T 。

所以, 单位时间的存储费用为

$$C_z = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (R_i T C_{1i}) + \frac{C_0}{T}$$

上式对 T 求导, 并令 $\frac{dC_z}{dT} = 0$, 得

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (R_i C_{ii}) - \frac{C_0}{T^2} = 0$$

所以, 共同的经济存储 (订购) 周期为

$$T^* = \sqrt{\frac{2C_0}{\sum_{i=1}^n R_i C_{ii}}} \quad (2.9)$$

第 i 种物资的经济订购批量为

$$C_z = \sqrt{2C_0 \left(\sum_{i=1}^n R_i C_{ii} \right)} \quad (2.10)$$

这 n 种物资共同的最小存储总费用为

$$Q_i^2 = R_i \sqrt{\frac{2C_0}{\sum_{i=1}^n R_i C_{ii}}} \quad (2.11)$$

显然, 当 $n=1$ 时, 式 (2.9) 到 (2.11) 与 EOQ 基本公式相同。

2.2.4.2 随机型库存控制模型^[47]

在实际情况中, 由于各种随机因素的影响, 很多时候的需求量是事先无法确定的, 因此, 在理论模型中假定需求为随机变量, 其它参数为确定型, 结果更符合实际情况。随机型库存模型可分为单周期模型、多周期模型两大类。

(1) 单周期随机库存模型

单周期模型, 是指在整个时期内, 订货只进行一次, 若未到期末货已售完也不再补充订货; 若发生滞销, 未售出的货应在期末处理。因此, 决策者只在计划期开始有一次决策的机会。这类订货可以重复进行, 但在各周期之间订货量与销售量相互独立。

典型的单周期模型是“报童问题”。每天上午报童购入当日报纸, 购入量是决策变量。一天的需求量是不能事先确定的, 但可假定需求量的分布为已知。如果购入量过少则供不应求, 收入有损失; 如果购入的报纸销售不完, 则剩余报纸也会造成损失。问题是如何根据需求分布以及各种费用参数进行决策, 以使费用的期望值达到极小 (或者利润最大)。这就是单周期模型要解决的问题。

研究单周期模型一方面是由于可以用它来近似描述某些实际的库存问题, 如经营季节性商品或时髦物品的商店, 考虑进货问题时可以用单周期模型; 另一面单周期模型简

单，它为进一步研究多周期随机库存模型打下了基础。

(2) 多周期随机库存模型

多周期模型中，考虑系统运行 n 个周期 ($n > 1$)，决策者在每个周期开始都需做一次决策。与单周期模型不同的是，每次决策时不是考虑使该周期达到最优而是使 n 个周期的总体达到最优。

把单周期模型的周期数增至 n ，假定各周期的需求量是独立同分布的随机变量，分布函数及密度函数已知，各周期的费用结构与单周期的相同。当某个周期的需求超过供给时库存水平记作负值，其不足部分在下次进货时立即补足（只有最后一个周期除外）。每个周期结束时都对库存水平进行一次观测，并对下个周期做出订货量的决策。目标是使 n 个周期的总体费用期望值达最小。

2.3 逆向物流下的库存控制分析

2.3.1 逆向物流下的库存控制涵义

逆向物流管理的目的就是如何尽快的减少回流产品的库存量，使回流产品库存通过逆向处理手段恢复成可再次销售或直接进入新产品的再生产过程的产品。一是为了减少回流产品库存占用的资金，二是为了尽快从回流产品中获得产品价值，创造更大的利润。减少逆向物流的库存成本，最大限度地恢复回流产品库存的价值，这是逆向物流库存管理的主要目标之一。

从图 2.13^[48]也可以看出来，逆向物流库存控制问题实际上是在传统的库存控制系统上加入了一个逆向的物料流，因此，目前对于逆向物流库存控制的研究主要还是建立在传统的库存控制理论上，是基于传统库存模型的改进。

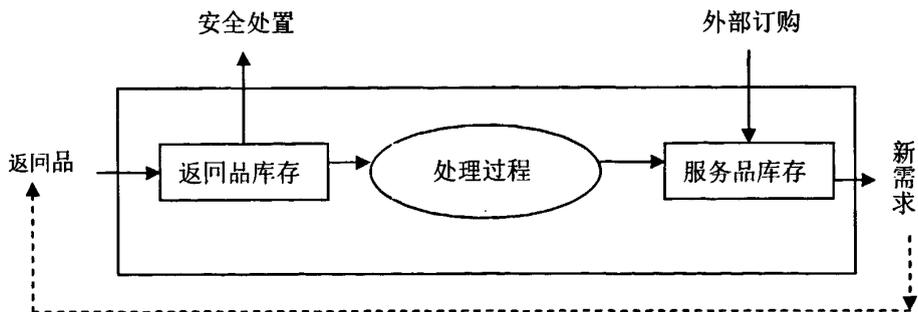


图 2.13 逆向物流库存系统结构图

与传统的库存系统相比，逆向物流库存中因为有了回流的存在而变得更加复杂，在库存控制管理上有很大的差异。逆向物流的回流通常是很难控制的，由于回流产品返回

库存,使得在以往的盘点库存和补充库存的做法下,库存量往往会节节上升。为避免这种情况的发生,在逆向物流库存控制中,回流对库存控制的影响需予以充分考虑。当回流产品以稳定的回流率返回时,相应的库存控制也是一种相对稳定的稳定性库存控制问题;而在产品的回流是随机的情况下,逆向物流的库存控制是一种随机型库存控制,相应的,逆向物流库存模型也是随机型库存模型。逆向物流库存模型中,库存费用除了传统库存的订购费用、库存持有费用、缺货费外,多了一项逆向物流费用,包括回流的运输、保管、修理、再售等费用。其中逆向物流的运输、保管、修理费用可统称为回流处理费用。而逆向物流的回流在经过逆向物流处理后一方面能够满足一部分需求,另一方面也会对库存产生影响,尤其在多周期逆向物流库存分析时,回流对最终所采取的逆向物流库存策略有重要影响。

2.3.2 CMI 理论^{[49][50]}

CMI 作为逆向物流库存管理的全新的、有效的管理理念和方法,受到了理论界和生产企业、物流企业越来越多的重视。H.M.Le Blanc 等人于 2004 年提出了一个对逆向物流进行 CMI 管理的理念。其主旨是:由收集商作为库存或循环物资管理的核心而担负责任,全面负责逆向(需要再循环)的零配件或者原材料的储存和配送,借助现代化信息技术,对逆向物流进行全程监控,及时掌握逆向物资信息,减少逆向物流的不确定型,通过恰当的预测,提前制定收集计划、调整库存容量、整合配送,从而达到效益最优。

CMI 在逆向供应链中的作用与 VMI (Vendor Managed Inventory, 供应商管理库存)在正向供应链中的作用相类似。正向供应链管理的经验已经充分展示了 VMI 通过协调统一供应链的运输和库存决策而给企业带来的成本节省和经济效益的明显提高。在很大程度上,逆向供应链管理的复杂性是由不确定型引起的。而这种存在于系统中的不确定型又是源于与返回品有关的数量、时间、产品构成以及质量的信息和控制机制的缺乏。并且由于返回品的价值不大和修复工作需要集中进行,因此对逆向物流,应采取一次尽可能多地收集、集中配送的方式,以此降低单位物品收集、配送成本。这正是 CMI 的思想方法:获得逆向物流效益的方法是对何时进行收集的前瞻性考虑,以及寻求联合收集的可行性,从而极大降低配送库存的总费用。另外,由于采用 CMI,回收物品的库存量和出货量就由收集商决定。这样,收集商就能估计何时应当收集或者如何规模化地进行收集。因而,对循环使用物资或废弃物品的控制权从生产企业转变到了收集商,其最终目标是有效地增加利润。在实际的商品配送和返回品的收集,如图 2.2 所示,存

在着两者共用一条供应链的可能性，则 CMI 即可由 VMI 来负责，以提高 VMI 返回车辆的车载率，又可由专业的第三方 CMI 来负责收集，按照预先协商好的收集和送货的地点和时间，按企业要求完成返回品的收集工作，此时，第三方 CMI 可以通过 VMI 的配送渠道完成收集工作，亦可在完成收集任务的前提下，使用自己的收集渠道。

因此，应用 CMI 最重要的是准确预测回收物品的相关信息。随着新的信息和通讯技术的发展和成熟，收集商能实时监控产生废弃物企业的存储情况。来自于遥测信息的开发使收集计划的效率大大提高。另外，运用 CMI 后，库存控制、可再循环物和废弃物的运输等业务都转移到了收集商那里。收集商现在可以估计何时进行收集，并把预测结果融合到收集计划中，这在很大程度上提高了效率，增加了收益。预测得越准，路径选择得越好，总的运输成本就越低，则说明二者结合得很好。仅关注运输成本的原因在于回收品的库存费用很低。根据 CMI 理论，选定合时的时机，对不同的逆向物资进行收集形成规模配送，从而减少逆向物流的成本，提高企业和整个供应链的绩效。

2.4 本章小结

本章介绍了逆向物流的概念、分类，以及逆向物流的特征和它发展驱动的因素。列表比较了正向物流和逆向物流的区别，指出发展逆向物流的经济意义和社会意义；然后详细介绍了供应链库存控制的相关理论，阐述了库存控制的涵义、分类、组成要素，以及研究库存控制理论的两类经典库存模型：确定型和随机型库存模型。然后，在逆向物流和库存控制理论的基础上，提出研究逆向物流下的库存控制的意义，最后简要介绍了近年来新兴起的针对产品回收的收集商管理库存理论 (CMI)。第 3、4 章将在本章的基础上，提出基于逆向物流库存控制的确定型和随机型模型研究理论。

第三章 考虑缺货情形的确定型逆向物流库存控制研究

3.1 问题描述

在实际的生产生活中,为了实现资源利用的最大化和降低企业的生产成本,通常的一个做法就是对可再利用的回收产品或其零部件进行再加工处理,以重新获取价值,成为可用品库存的补充源而重新进入流通渠道。再处理的过程根据回流产品的品质状况可以分为两种情形,一种是对返回品的清洗、零部件替换和重新包装等简单的修复处理,如生活中常见的对饮料类玻璃制品的回收,对于状况良好的玻璃瓶,一般的做法就是经过净化、高温消毒,然后装瓶、贴标签再出售;另一种是采取更为复杂的产品复原措施,对回流旧产品的改造、修理等增值活动,涉及了更为详细复杂的技术和工艺的再制造过程,如对破损严重的啤酒瓶粉碎后,熔炉重新成形、消毒,然后再利用。当返回产品经过修复和再加工,重新出售所获得的经济和社会效益在生产商和销售商的一个可接受的范围之内时,即满足前文所述的发展逆向物流的驱动因素,逆向物流必然会形成一个多方共赢和良性发展的局面。

本章以单产品的零部件回收为研究对象,在构建模型时,假设市场对产品的需求趋于稳定,商品以一定的速率和比率返回,且经过修复再加工后可以以原价售出。

研究逆向物流库存控制模型通常从两个方面来考虑,即是否允许缺货和是否存在生产时间的等待期^[51]。本章主要研究以下的两个组合:不允许缺货,生产需要一定的时间,新产品和返回品对库存的补充须满足生产销售不许缺货的要求;允许缺货,生产时间很短(或不考虑生产时间),即假设企业出于生产和自身利益的考虑,在库存降为零后,还可以再等待一段时间 T 后再订货,而在 T 时间后,库存可以立即得到满足和补充。在以上这两个组合中,本文考虑以下三个部分的费用:(1) 订货周期内的库存费;(2) 退回产品的修复处理费;(3) 订货费。以求解这三部分的最小费用为目标函数建立数学模型并求解。

3.2 不允许缺货情况下的逆向物流库存模型

3.2.1 模型应用分析

本节分析在库存不允许缺货情况下的逆向物流库存模型。在激烈的市场竞争中,商机稍瞬即逝,生产商和销售商为获取利益的最大化,为防止原料或商品断链,针对市场

上的畅销产品,采取订货提前期和返回品提前预测与回收,按返回品的不同品质做出修复或它用策略,使其能及时地补充到生产库存中去。从生产的源头—原材料的供应上来保证后续生产的可持续性。图 3.1 表示在不允许缺货下的逆向库存的库存变化图。在整个生产时间 t 中,订购 T 周期内库存水平到达 Q ,然后库存以 R' 的产品净需求速度下降到 0,在不允许缺货的情况下,使库存快速得到补充,从而开始下一个周期的库存订购。

3.2.2 模型假设及模型符号定义

(1) 不允许缺货,即缺货费用无穷大;

(2) 商品的返回是以一定的确定比例进行的。即认为本期产品的回流量与上期产品的销售量成一定的比例;

(3) 经修复后的产品可以与新产品同价出售;

(4) 在整个订购周期 T 中,回收产品依据其品质分为两类:一类是经过修复后可以与新品一样进入正常库存并销售;另一类是没有维修价值,或维修的成本高于经维修后重新售出所获得的收益,这两种情况给予不同的处理策略;

(5) 需求是连续和均匀的;

(6) 每次的订货量不变,订购费不变,单位库存费不变;

(7) 退回品经修复处理进入正常库存时,单位库存成本与新品库存成本相同。

模型符号:

T : 销售商的产品订购周期;

L : 返回品的有效修复周期;

Q : 产品订购批量;

R : 产品的需求速率;

S : 单位产品的销售价格;

C : 单位产品的订购价格;

t : 产品的生产时间;

P : 产品的生产速度, $P > R$;

C_0 : 每次产品订购的固定成本;

C_1 : 单位产品的库存持有成本;

C_2 : 单位产品返回修复的库存持有成本;

C_r : 单位返回品的修复成本;

α : 产品的回流率;

- s: 对返回品中无修复意义的产品的处理成本;
- Cs: 为处理返回品中无修复意义的产品而产生的库存费用;
- η : 返回品中可修复的产品占整个返回品的比率。

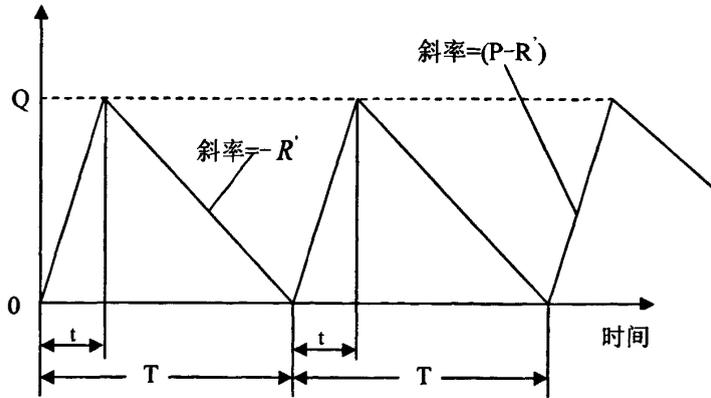


图 3.1 不允许缺货下的逆向库存图

3.2.3 模型建立及求解

基于以上的分析和假设，本问题即是在考虑库存总成本最小时确定最佳经济订购批量 Q 和订购周期 T 。整个订购周期的成本包括：(1) 整个订购周期的库存费用，包括原有产品的库存费用和返回产品的库存费用；(2) 退回产品的修复费用；(3) 订购费。

(1) 整个周期的库存费

单位时间产品的需求速率为 R ，同时又有 αR 的产品返回，在这批返回品中，经修复可进入库存的部分为 $\eta \cdot \alpha R$ 。故新产品的净需求速率为

$$R' = (1 - \eta \alpha) R$$

根据假设，不允许缺货，且当库存降为 0 时立即可以得到补充，生产量应等于净需求量。即

$$Q = R' T = (1 - \eta \alpha) R T \quad (3.1)$$

从图 3.1 可以看出，在 $[0, T]$ 内，存储量是以 $(P-R)$ 的速度增加，在 $[T, t]$ 区间是以速度 R' 减少，从图中容易看出， $(P-R)t = R'(T-t)$ ，即 $Pt = R'T$

由此得出整个订货周期内新产品的库存费用为

$$\frac{1}{2} C_1 (P - R') T t = \frac{1}{2} C_1 (P - R') \frac{R'}{P} T^2 \quad (3.2)$$

(2) 订购期 T 内返回产品中可修复品的库存费用

返回品中，可进行有效修复的部分在修复期 L 内占到的库存水平为 $\eta \alpha R L$ ，这部

分占用的库存费用为:

$$C_2 \int_0^r \eta \alpha R L dt = \eta \alpha C_2 R L T \quad (3.3)$$

(3) 返回品的处理费用

$$\text{返回品中对可修复部分的修复费用:} \quad \eta \alpha C_r R T \quad (3.4)$$

$$\text{返回品中对不可修复部分的处理费用:} \quad s(1-\eta) \alpha C_s R T \quad (3.5)$$

$$(4) \text{ 单位订购费:} \quad C_0 \quad (3.6)$$

故在整个订购周期内的平均总成本为:

$$\begin{aligned} C(Q, T) &= \frac{1}{T} \left[\frac{1}{2} C_1 (P - R') \frac{R'}{P} T^2 + \eta \alpha C_2 R L T + \eta \alpha C_r R T + s(1-\eta) \alpha C_s R T + C_0 \right] \\ &= \frac{1}{2} C_1 (P - R') \frac{R'}{P} T + \eta \alpha C_2 R L + \eta \alpha C_r R + s(1-\eta) \alpha C_s R + \frac{C_0}{T} \end{aligned} \quad (3.7)$$

对费用函数 $C(Q, T)$ 的 T 求偏导, 得

$$\frac{\partial C(Q, T)}{\partial T} = \frac{1}{2} C_1 (P - R') \frac{R'}{P} - \frac{C_0}{T^2} \quad (3.8)$$

令 $\frac{\partial C(Q, T)}{\partial T} = 0$, 解得最优订购周期 T^* 为

$$T^* = \sqrt{\frac{2C_0 P}{C_1 R' (P - R')}} = \sqrt{\frac{2C_0 P}{C_1 R (1 - \alpha \eta) [P - R(1 - \alpha \eta)]}} \quad (3.9)$$

将式 (3.9) 代入到 (3.1) 中, 得出本问题的经济订购批量模型 Q^* 为

$$Q^* = R' T^* = R' \sqrt{\frac{2C_0 P}{C_1 R' (P - R')}} = \sqrt{\frac{2C_0 P R'}{C_1 (P - R')}} = \sqrt{\frac{2C_0 P R (1 - \alpha \eta)}{C_1 (P - R(1 - \alpha \eta))}} \quad (3.10)$$

最优生产时间 t^* 为

$$t^* = \frac{R' T^*}{P} = \frac{R(1 - \alpha \eta)}{P} \sqrt{\frac{2C_0 P}{C_1 R (1 - \alpha \eta) [P - R(1 - \alpha \eta)]}} = \sqrt{\frac{2C_0 R (1 - \alpha \eta)}{P C_1 [P - R(1 - \alpha \eta)]}} \quad (3.11)$$

将式 (3.9)、(3.10) 代入式 (3.7) 中, 得出最优平均总成本为

$$\begin{aligned} \min C(Q, T) = C(Q^*, T^*) &= \sqrt{\frac{2C_0 C_1 R' (P - R')}{P}} + \eta \alpha C_2 R L + \eta \alpha C_r R \\ &\quad + s(1-\eta) \alpha C_s R + \sqrt{\frac{C_0 C_1 R' (P - R')}{2P}} \end{aligned} \quad (3.12)$$

很显然, 当不存在回流产品时, 即 $\alpha = \eta = 0$ 时, 式 (3.9)、(3.10)、(3.12) 就转换成

经典经济订购批量模型。可以将本模型与第 2 章中介绍的分批均匀进货的 EOQ 模型作对比, 订货批量减少了, 而订货周期可能延长也可能缩短。同时, 本文也可以得出, 返回产品的修复时间只对最优平均总成本有影响, 而对订购周期和订购量没有影响。

3.2.4 数值算例与分析

根据上文的分析得知, 当 $\alpha = \eta = 0$ 时, 本文所建立的不允许缺货情况下的逆向物流库存模型就转化为第二章介绍的分批均匀进货的 EOQ 模型, 本文将通过对一个模拟算例进行计算分析, 得出在本模型下的最佳订购策略, 然后在相同的参数条件下, 与分批均匀进货 EOQ 模型做比较, 得出本改进模型特点。

[模拟算例 1]: A 公司生产并销售 B 产品, 该产品的相关费用参数如下:

① 该产品单位生产速度为 50 件/天, 根据销售经验, 单位产品进入市场后, 需求速度为 20 件/天;

② 生产该产品所需的零件的单位订购价格为 40 元/件;

③ 每次生产订购的固定成本为 800 元;

④ 回流产品和待售库存单位库存持有成本分别为 2 元和 4 元;

⑤ 单位返回品的修复成本为 4 元/件;

⑥ 单位产品的销售价格为 100 元;

同时, 厂商在销售产品是做出了产品售后承诺, 如顾客在购买产品后一个月内发现质量问题可以无条件退货。根据历史退货记录发现, 该产品的退货率与其销售量近似成正比例关系, 退货率约为 20%。同时, 根据经验, 退回的产品中约有 15%数量的产品因折损严重失去修复价值, 对这部分返回产品实施弃置或他用处理策略, 处理成本为 2 元/件, 临时占用的库存费用为 1 元/件。由于包装修复技术的进步, 这里暂假定在经过两天的修复后产品可以以原价 100 元售出。那么对于销售商来说, 在不允许缺货的情况下, 如何制定一个长期的补货库存策略, 使得平均库存费用最小?

解: 从问题条件来看, 这是一个较为接近实际生产销售状况的案例。根据题设, 得各参数为: $P=50, R=20, C=40, C_0=800, C_1=4, C_2=2, C_r=4, S=100, \alpha=0.2, 1-\eta=15\%, \eta=85\%=0.85, s=2, C_s=1, L=2$

首先求解在不允许缺货情况下的逆向物流库存的最佳订购策略:

最佳经济订购周期 $T^*=6.0$ 天;

最佳经济订购批量 $Q^*=99.7$ 件/次;

最佳平均订货总费用 $C^*(C, Q)=428$ 元

将以上各值分别代入第二章的分批均匀进货的 EOQ 模型中，并与本章模型做比较，列表如下：

表 3.1 分批均匀进货 EOQ 模型与本文模型的订购策略比较 ($\alpha=0.2$)

策略模型	订购周期 T^*	订购量 Q^*	订货总费用 C^*
分批均匀进货 EOQ 模型	5.7	115	277.13
本文模型	6.0	99.7	428.0

可以看出，在此例中，由于存在着返回品，以及对返回品进行储存和修复的费用，在本文建立的不允许缺货情况下的逆向物流库存模型中，与分批均匀进货 EOQ 模型相比较，订购周期延长 5.3%，订购量减少 13.3%，订货总费用增加 54.4%。可以看出，在不考虑缺货的情况下，在返品率 $\alpha=0.2$ 时，由于返回品的增加补充了原有生产库存，使得订购周期延长，订购量减少，但同时也使得订货总费用大幅的增加，这也验证了实际生产订购情形。从建立模型的过程来看，订货总费用不涉及订购成本，因此本模型虽然会使得订货总费用增幅较快，但对于在实际生产中，订购成本占产品总成本中较大比例的情况来说，是有一定的现实意义的。

表 3.1 说明了在返品率 $\alpha=0.2$ 时的情形，表 3.2 进一步分析了在不同的产品返品率情形下， α 对产品的订购策略的影响情况。

表 3.2 本文模型在不同返品率 α 下的订购策略比较

序号	返品率 α	订购周期 T^*	订购量 Q^*	订货总费用 C^*
1	0.1	5.87	107.45	422.94
2	0.2	6.0	99.70	428.0
3	0.3	6.18	92.14	430.70
4	0.4	6.40	84.70	430.83
5	0.5	6.72	77.29	428.09
6	0.6	7.12	69.82	422.04
7	0.7	7.67	62.17	412.04
8	0.8	8.21	54.18	397.08

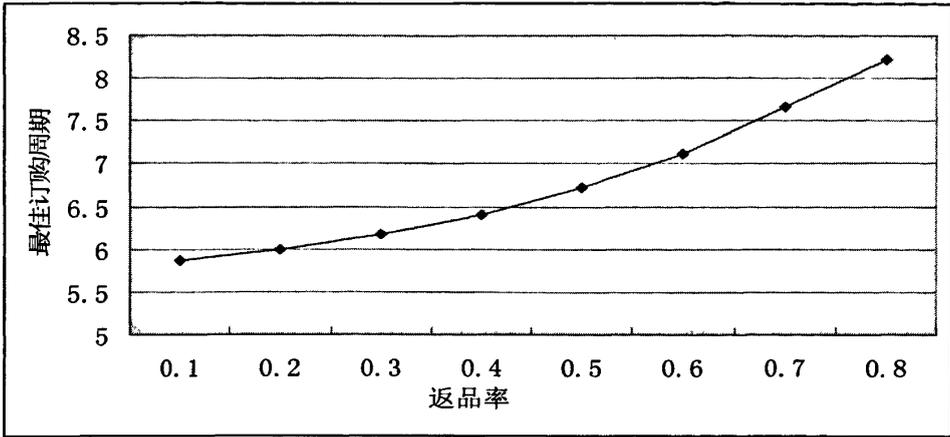


图 3.1 返品率与订购周期的关系

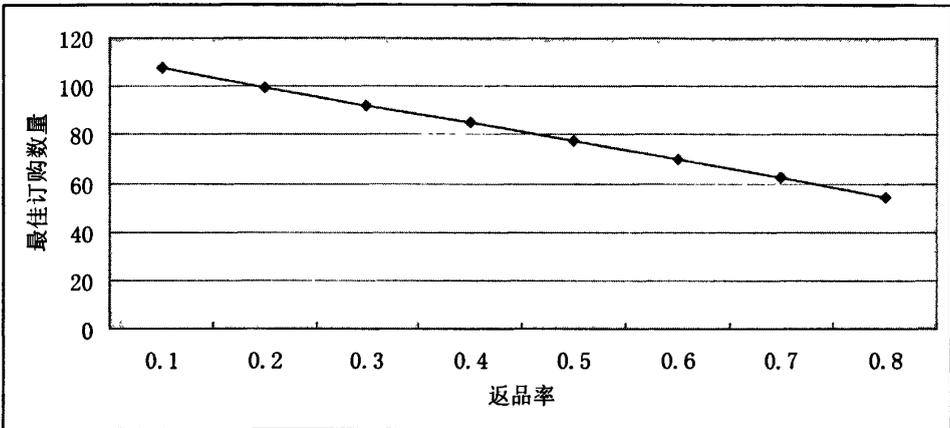


图 3.2 返品率与订购数量的关系

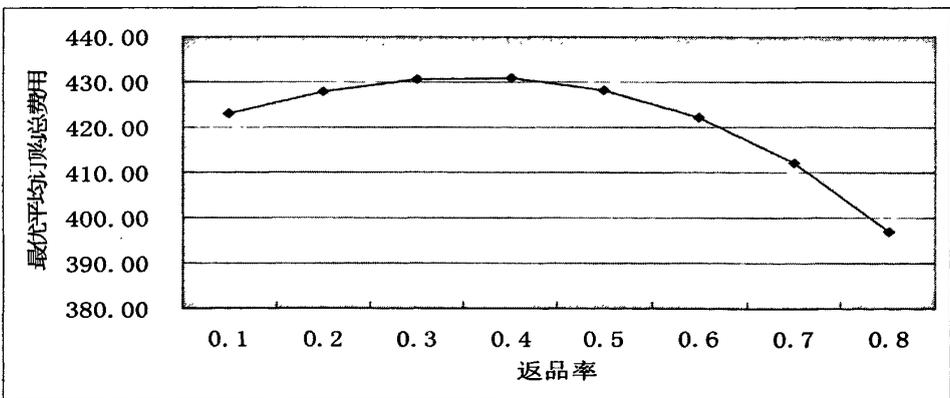


图 3.3 返品率与订货总费用的关系

从表 3.2、图 3.1、图 3.2、图 3.3 中可以看出，随着返品率 α 增大，返回品加大，使得订购周期也逐渐加大，订购量逐渐减小，但订货总费用却没有随之而持续增大，而是存在一个库存峰值 430.83(当 $\alpha = 0.4$)，然后就逐渐减小，当返品率为 0.8 时，相比分批均匀进货

EOQ 模型, 产品的订购周期延长 15.63%, 订购量减少 52.89%, 订货总费用变为分批均匀进货 EOQ 模型订货总费用的 43.28%, 有了较大的减少, 这是因为, 随着返回品的增加, 大量的减少了新产品订购费用和库存费用, 使得返回品的增加所引起的订货总费用小于订购生产新产品所需的库存费用和订购成本, 这也说明了对某些产品返品率较大的行业, 如饮料行业, 印刷行业等, 大量的回收产品可以有效的减少新库存量的购置, 延长订购期, 较少订购费用。

3.3 允许缺货(缺货需补足)情况下的逆向物流库存模型

3.3.1 模型应用分析

上文的分析是以假定不允许缺货为前提的, 但对实际的储存系统来说, 由于受到各种客观条件的限制, 完全不缺货是不可能的; 另一方面, 为保证不缺货, 必然要求有过大的储存量才能满足需要, 从而增大了存储费用。而适当的缺货, 虽然要支付缺货损失费, 但可以减少存储量, 同时也可以延长订货周期, 降低订购费用。一般来说, 当顾客遇到缺货时不受损失, 或损失很小, 而企业除支付少量的缺货费外也无其他损失, 此时发生缺货现象可能对企业是有利的。因此, 分析在允许缺货(缺货需补足)情况下的逆向物流库存模型, 具有一定的现实经济意义。

3.3.2 模型假设及模型符号定义

(1) 允许缺货, 但在缺货等待期(如图 3.2 中 $T-t_1$) 过后库存需要立即补足(生产时间很短);

(2) 商品的返回是以一定的确定比例进行的。即认为本期产品的回流量与上期产品的销售量成一定的比例;

(3) 经修复后的产品可以与新产品同价出售;

(4) 在整个订购周期 T 中, 返回品经修复后可以与新品一样进入正常库存并销售, 这里假设返回品可以全部进行修复重新使用;

(5) 需求是连续和均匀的;

(6) 订购费不变, 单位库存费不变;

(7) 退回品经修复处理进入正常库存时, 单位库存成本同新品库存成本。

(8) 补充库存和返回品库存在缺货等待期后同时到达。

模型符号:

T : 销售商的产品订购期;

- L: 返回品的有效修复周期;
- Q: 产品订购批量;
- Q_1 : 订购期初的贮存量;
- R: 产品的需求速率;
- C: 单位产品的订购价格;
- S: 产品的销售价格;
- t: 产品的生产时间;
- P: 产品的生产速度, $P>R$;
- C_0 : 每次产品订购的固定成本;
- C_1 : 单位产品的库存持有成本;
- C_2 : 单位产品返回修复的库存持有成本;
- C_3 : 单位产品库存的缺货成本;
- C_r : 单位返回品的修复成本;
- α : 产品的回流率;
- η : 返回品中可修复的产品占整个返回品的比率。

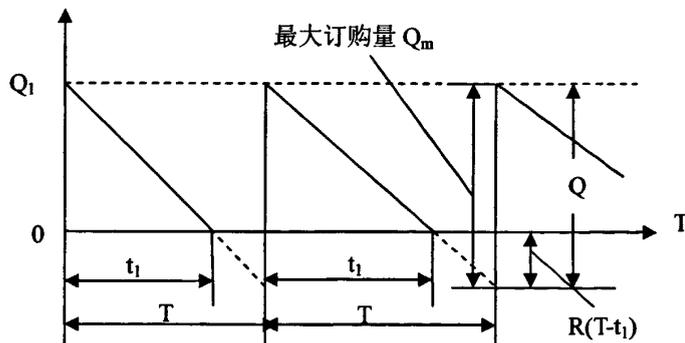


图 3.2 允许缺货的逆向物流库存图

3.3.3 模型的建立和求解

基于对本模型的分析 and 假设, 本模型的目的是要在考虑总成本最小时的最佳经济订购批量 Q 和订购周期 T 。以及从上文对允许缺货(缺货需补足)情况下和图 3.2 对于 $Q-T$ 关系的分析, 整个订购周期的成本包括: (1) 整个订购周期生产的新产品的库存费用; (2) 返回需修复产品的库存费用; (2) 退回产品的修复费用; (3) 缺货费用; (4) 订购费。

(1) 整个订购周期内的待售产品的库存费用

设单位产品的需求速率为 R ，在 T 内产品的消耗量为 Rt_1 ，单位时间内有 $\eta \cdot \alpha R$ 的产品的返回修复并进入新品待售库存，故净需求速率为 $R' = R(1 - \alpha\eta)$ 又由题设，生产期初的储存量为 Q_1 ，它只能满足 t_1 的生产需求，在 t_1 时间内的平均贮存量为 $\frac{1}{2}Q_1$ ，在 T 有 $Q_1 + \alpha\eta Rt_1$ 的库存用于满足 t_1 内的需求，即 $Q_1 + \alpha\eta Rt_1 = Rt_1$ ，

解得
$$t_1 = \frac{Q_1}{R(1 - \alpha\eta)} = \frac{Q_1}{R'}$$

周期 T 内原有贮存产品所需的库存费用为：

$$C_1 \frac{1}{2} Q_1 t_1 = \frac{1}{2} C_1 \frac{Q_1^2}{R'}$$

周期 T 内返回修复并进入新品待售库存费用为：

$$C_1 \frac{1}{2} \alpha\eta R t_1 t_1 = \frac{1}{2} C_1 \frac{\alpha\eta R Q_1^2}{R'^2}$$

则周期 T 内的待售品库存成本为：

$$\frac{1}{2} C_1 \frac{Q_1^2}{R'} + \frac{1}{2} C_1 \frac{\alpha\eta R Q_1^2}{R'^2} = \frac{1}{2} C_1 \frac{Q_1^2}{R'} \left(1 + \frac{\alpha\eta R}{R'}\right) \quad (3.13)$$

(2) 返回需修复产品的库存费用

根据假设，产品退回即修复出售，则退回产品的库存是均匀的，在一个修复周期内 L ，返回产品库存费用为：

$$C_2 \int_0^L \alpha R L dt = \alpha C_2 R L T \quad (3.14)$$

(3) 返回品的修复成本： $\alpha C_r R T$ (3.15)

(4) 缺货费用

从图 3.2 可以看出，在 $T - t_1$ 时间的存储为零，平均缺货量为 $\frac{1}{2} R'(T - t_1)$ ，则在一个 T 内的缺货费为：

$$C_3 \frac{1}{2} R'(T - t_1)^2 = \frac{1}{2R'} C_3 (TR' - Q_1)^2 \quad (3.16)$$

(5) 订购费 C_0

则在一个订购周期内的平均总费用为

$$\begin{aligned}
 C(T, Q_1) &= \frac{1}{T} \left\{ \frac{1}{2} C_1 \frac{Q_1^2}{R} \left(1 + \frac{\alpha \eta R}{R} \right) + \alpha C_2 R L T + \alpha C_3 R T \right. \\
 &\quad \left. + \frac{1}{2R^2} C_3 R (TR' - Q_1)^2 + C_0 \right\} \\
 &= \frac{1}{2T} C_1 \frac{Q_1^2}{R} \left(1 + \frac{\alpha \eta R}{R} \right) + \alpha C_2 R L + \alpha C_3 R + \frac{1}{2TR} C_3 (TR' - Q_1)^2 + \frac{C_0}{T}
 \end{aligned} \tag{3.17}$$

式中有两个变量，利用多元函数求极值的方法求 $C(T, Q_1)$ 的最小值。

$$\frac{\partial C(T, Q_1)}{\partial Q_1} = \frac{1}{T} C_1 \frac{Q_1}{R} \left(1 + \frac{\alpha \eta R}{R} \right) - \frac{C_3}{T} \frac{R(TR' - Q_1)}{R^2} = 0 \tag{3.18}$$

由已知易知， $R \neq 0, T \neq 0$

$$\text{解得: } Q_1 = \frac{C_3 T R'}{C_1 + C_3} \tag{3.19}$$

对 T 求导

$$\frac{\partial C(T, Q_1)}{\partial T} = -\frac{C_1 R Q_1^2}{2R^2 T^2} - \frac{C_3 R (R'T - Q_1)^2}{2R^2 T^2} + \frac{C_3 R (R'T - Q_1)}{TR'} - \frac{C_0}{T^2} = 0 \tag{3.20}$$

对式 (3.20) 整理得

$$\frac{\partial C(T, Q_1)}{\partial T} = -(C_1 + C_3) Q_1^2 - 2C_0 \frac{R^2}{R} + C_3 T^2 R^2 = 0 \tag{3.21}$$

将式 (3.19) 代入 (3.20) 中，解得本模型的最佳订购周期为

$$T^* = \sqrt{\frac{2C_0(C_1 + C_3)}{R C_1 C_3}} = \sqrt{\frac{2C_0(C_1 + C_3)}{R(1 - \alpha \eta) C_1 C_3}} \tag{3.22}$$

再代入到 (3.19) 中去，得

$$Q_1^* = \sqrt{\frac{2R' C_0 C_3}{C_1(C_1 + C_3)}} = \sqrt{\frac{2R(1 - \alpha \eta) C_0 C_3}{C_1(C_1 + C_3)}} \tag{3.23}$$

将 Q_1^* 和 T^* 代入到式 (3.17) 中去，得本模型的最优平均总费用

$$\begin{aligned}
\min C(Q_1, T) &= C(Q_1^*, T^*) = \frac{1}{2T} C_1 \frac{Q_1^2}{R(1-\alpha\eta)} \left(1 + \frac{\alpha\eta}{1-\alpha\eta}\right) + \alpha C_2 RL + \alpha C_r R \\
&+ \frac{1}{2T} \left\{ C_3 [RT(1-\alpha\eta) - Q_1]^2 / R(1-\alpha\eta)^2 + 2C_0 \right\} \\
&= \alpha C_2 RL + \alpha C_r R + \frac{C_0}{T} + \frac{C_3 [RT(1-\alpha\eta) - Q_1]^2}{2TR(1-\alpha\eta)^2} + \frac{Q_1^2 C_1}{2TR(1-\alpha\eta)^2} \\
&= \alpha C_2 RL + \alpha C_r R + \sqrt{\frac{2R' C_0 C_1 C_3}{C_1 + C_3}} \tag{3.24}
\end{aligned}$$

从图 3.2 中可以看出，周期订购量 $Q = Q_1 + R'(T - t_1)$ ，故需要补足的缺货量为

$$B = R'(T - t_1) = \sqrt{\frac{2R' C_0 (C_1 + C_3)}{C_1 C_3}} - \sqrt{\frac{2R' C_0 C_3}{C_1 (C_1 + C_3)}}, \text{ 故在一个周期内订购量为}$$

$$Q = R'T = R' \sqrt{\frac{2C_0 (C_1 + C_3)}{R C_1 C_3}} = \sqrt{\frac{2R' C_0 (C_1 + C_3)}{C_1 C_3}}, \text{ 其中的 } R'(T - t_1) \text{ 用于满足上期生产的缺}$$

货， $Q_1^* = \sqrt{\frac{2R' C_0 C_3}{C_1 (C_1 + C_3)}}$ 用作下一期的生产贮存。

本模型是在考虑返回品中部分产品经修复后可再利用的前提下建立的，也是对允许缺货的经典库存模型一个扩展，当本文建立的模型中的 $\alpha = \eta = C_2 = C_r = 0$ 时，式(3.22)、(3.23)、(3.24)就转化为经典允许缺货的库存模型，参见文献[51]。产品的周期订购量 $Q = R'T$ 分为两部分，一部分用来补充上一期的缺货损失，一部分用来作为下一期的生产贮存。从最优订购批量和周期的模型也可以看出，允许退货下的逆向库存模型与修复周期 L 、修复成本、返回品的库存成本也无关系，这些量是影响了到平均最优总费用的数值。

3.3.4 数值算例与分析

[模拟算例 2]：C 公司生产并销售 D 产品，根据历史经验，企业存在生产和市场信息不对称的情况，若订购过多的库存，将有可能给企业带来较大的库存成本压力，因此，对于 D 产品的生产允许缺货。D 产品的相关费用参数如下：

- ① 待售库存单位库存持有成本为 100 元，可修复的回流产品的库存持有成本为 50 元；
- ② 每次生产订购的固定成本为 8000 元；
- ③ 单位返回品的修复成本为 100 元/吨；
- ④ 单位缺货损失为 80 元；
- ⑤ 成品进入市场后，产品的需求速度为 10 吨/天；

⑥ 单位产品的销售价格为 5000 元/吨。

同时，由于技术的进步，产品更新换代速度较快和消费者对新产品新功能的需求，在产品销售出去一段时间后，以 20% 的比例返回，返回品中有 85% 的产品经修复后可以以原价售出。由于修复技术的进步，这里暂定假设经过 5 天的修复后产品可以以原价 5000 元售出，且在下一周期开始缺货需要立即补充，返回品也同期到达。那么对于销售商来说，在不允许缺货的情况下，如何制定一个长期的允许缺货库存策略，使得平均订购策略总费用最小？

解：根据题意分析知，这是一个允许缺货的库存模型。模型中的各参数为：

$$C_0 = 8000 \text{ 元}, C_1 = 100 \text{ 元}, C_2 = 50 \text{ 元}, C_3 = 80 \text{ 元}, C_r = 100 \text{ 元/吨}, R = 10 \text{ 吨/天}, \alpha = 0.2,$$

$L = 5$ 天。 $\eta = 0.85$ 代入模型 (3.22)、(3.23)、(3.24) 中

计算得：

最佳订购周期 $T^* = 6.59$ 天；

最佳期初贮存量 $Q_1 = 22.15$ 吨

缺货量 $B = 30.37$ 吨

最优平均订购成本 $C^*(T, Q) = 3129.45$ 元

本例是给定了缺货成本与返品率的一个数值算例。下面本文以本例的基本参数为基础，来分析不同缺货成本与返品率对允许缺货情形下的订购策略的影响。

表 3.3 考虑不同缺货成本下对本模型订购策略的影响 ($\alpha = 0.2$)

序号	缺货成本 C_2	订购周期 T^*	期初贮存量 Q_1	缺货量 B	订购费用 C^*
1	20.00	10.75	11.01	74.39	2187.73
2	40.00	8.21	16.40	48.70	2647.89
3	60.00	7.17	19.78	37.19	2931.59
4	80.00	6.59	22.15	30.37	3129.45
5	100.00	6.21	23.90	25.77	3276.82
6	120.00	5.94	25.27	22.43	3391.40
7	140.00	5.75	26.36	19.88	3483.28
8	160.00	5.60	27.26	17.87	3558.72
9	180.00	5.48	28.01	16.23	3621.84

表 3.4 考虑不同缺货成本下对本模型订购策略的影响($\alpha=0.3$)

序号	缺货成本 C_2	订购周期*	期初贮存量 Q_1	缺货量 B	订购费用*
1	20.00	11.35	9.76	70.47	2459.49
2	40.00	8.67	14.93	46.14	2895.46
3	60.00	7.57	18.26	35.24	3164.24
4	80.00	6.95	20.60	28.77	3351.69
5	100.00	6.55	22.36	24.41	3491.31
6	120.00	6.27	23.73	21.25	3599.87
7	140.00	6.07	24.83	18.84	3686.92
8	160.00	5.91	25.73	16.93	3758.39
9	250.00	5.48	28.37	11.67	3967.93
10	350.00	5.25	29.97	8.70	4094.85

表 3.5 考虑不同缺货成本下对本模型订购策略的影响($\alpha=0.5$)

序号	缺货成本 C_2	订购周期*	期初贮存量 Q_1	缺货量 B	订购费用*
1	20.00	12.92	8.16	61.91	2988.28
2	40.00	9.87	12.89	40.53	3371.29
3	60.00	8.61	16.04	30.96	3607.42
4	80.00	7.91	18.29	25.28	3772.10
5	100.00	7.46	20.00	21.45	3894.76
6	120.00	7.14	21.34	18.67	3990.13
7	140.00	6.91	22.42	16.55	4066.61
8	160.00	6.72	23.31	14.87	4129.40
9	180.00	6.58	24.05	13.51	4181.93
10	200.00	6.46	24.69	12.38	4226.56

通过表 3.3、表 3.4、表 3.5 可以看出以下几个特点:

(1) 在同一返品率水平下, 随着缺货成本的增大, 订购周期在减小, 期初贮存量在增大, 缺货量在减小, 即期初贮存量与缺货量反相关。订购费用成本也在增大。且三个表的一个共同的特点就是随着缺货率的增大, 其他四个参量的变化趋于平稳(如图 3.3 至图 3.8 所示)。

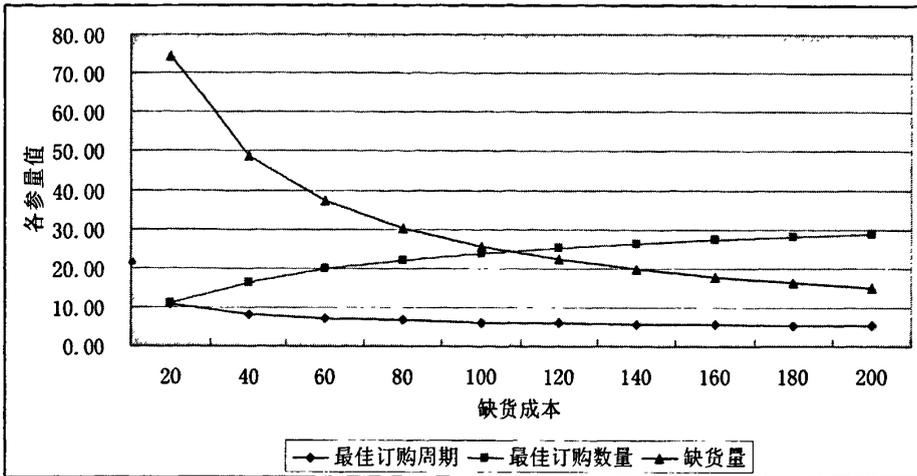


图 3.3 缺货成本与订购周期、期初贮存量、缺货量的关系 ($\alpha=0.2$)

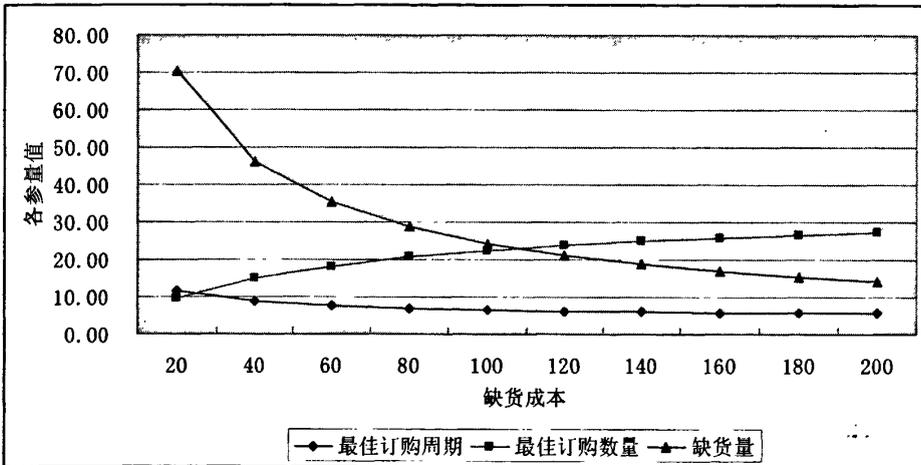


图 3.4 缺货成本与订购周期、期初贮存量、缺货量的关系 ($\alpha=0.3$)

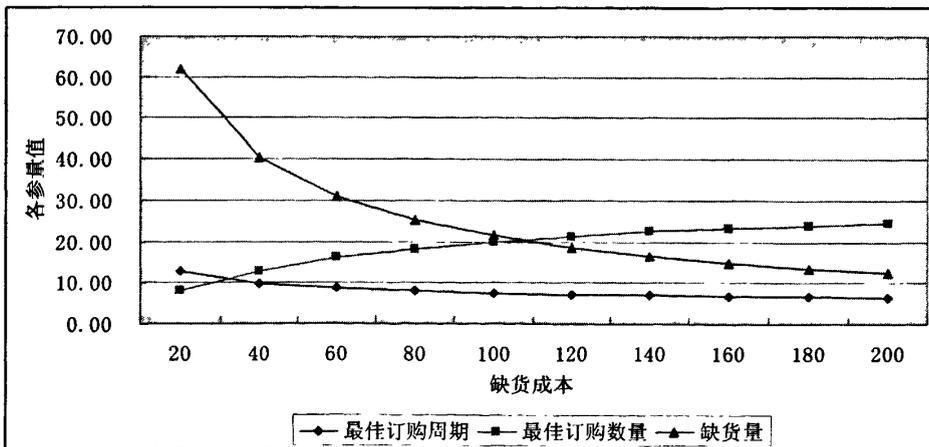


图 3.5 缺货成本与订购周期、期初贮存量、缺货量的关系 ($\alpha=0.5$)

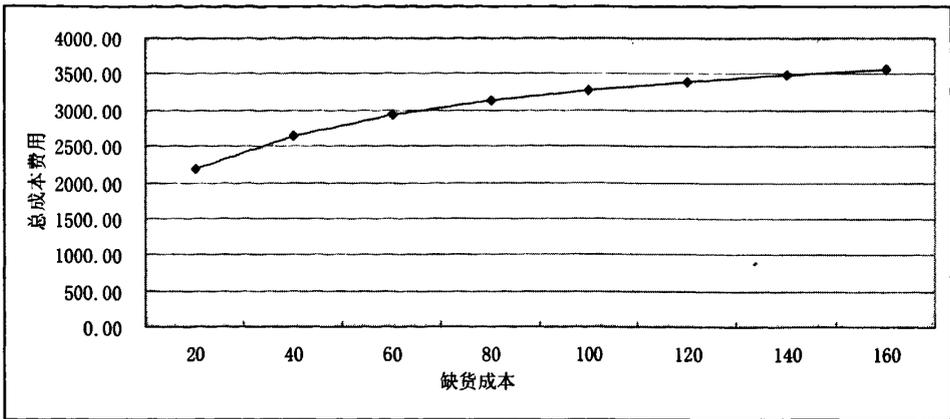


图 3.6 缺货成本与最优平均总费用的关系 ($\alpha = 0.2$)

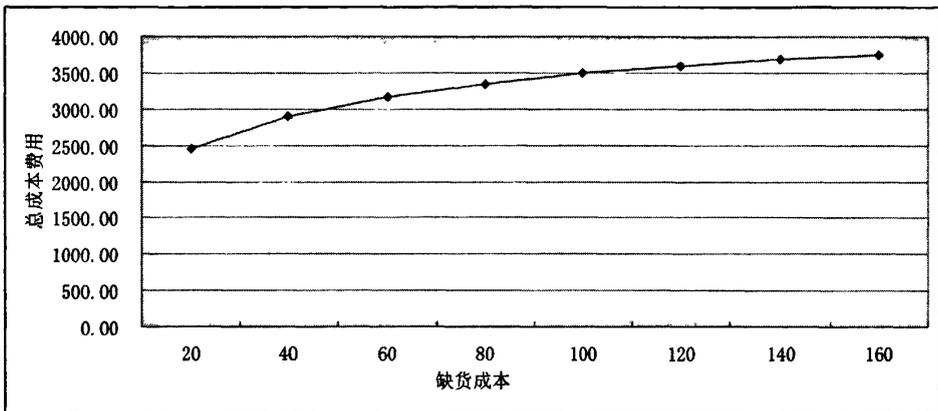


图 3.7 缺货成本与最优平均总费用的关系 ($\alpha = 0.3$)

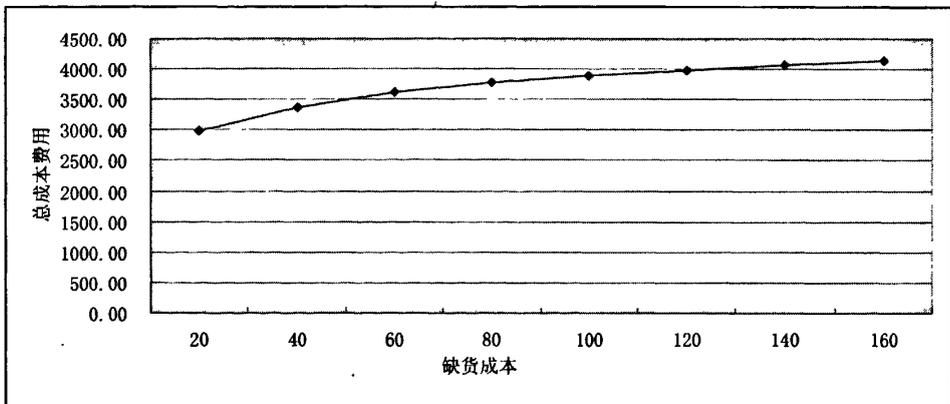


图 3.8 缺货成本与最优平均总费用的关系 ($\alpha = 0.5$)

图 3.3 至图 3.8 所示与现实生产生活的情形类似，随着缺货成本的增大，企业为使总体收益达到最优，提高期初贮存量，降低缺货量，但相应的总费用成本在增加，而且随着返品率的增大，总费用成本也在增大，这也与实际情形类似。

(2) 为便于比较和分析, 本文所假设的缺货成本是等差值较小的等差数列, 从三个表的各项值变化可以看出, 订购周期、订购量和订购费用的变化值不太大, 但当缺货成本急剧增大时, 三个订购策略参量的变化也比较大(参见表 3.4, 当缺货成本分别为 250 元和 350 元时, 订购周期、订购量和订购费用的变化情况)。

同时本文也分析了在同一缺货成本的变化趋势下, 不同返回品率情况下的订购策略, 可以看出, 返回品率对三个订购策略参量的影响也是比较大的, 尤其是对订购费用的影响。

接下来本文简要分析一下在缺货成本不变的情况下, 返品率对订购策略的影响。

表 3.9 考虑不同返品率对本模型订购策略的影响(仅分析当 $C_3=100$ 的情形)

序号	参数	返品率 α	订购周期 T^*	期初贮存量 Q_1^*	缺货量 B	总费用成本 C^*
1		0.1	5.91	25.82	27.06	3055.55
2		0.2	6.21	23.90	25.77	3276.82
3		0.3	6.55	22.36	24.41	3491.31
4		0.4	6.96	21.08	22.98	3697.83
5		0.5	7.46	20.00	21.45	3894.76
6		0.6	8.08	19.07	19.80	4079.90
7		0.7	8.89	18.26	18.00	4250.00
8		0.8	10.00	17.54	16.00	4400.00
9		0.9	11.67	16.90	13.71	4521.13
10		1.0	14.61	16.33	10.95	4595.45

从表 3.9 中可以看出, 当各订购周期的缺货成本一定时, 随着返品率的增大, 回流产品增多, 使得订购周期延长, 期初贮存量 and 缺货量都有所减少, 但整个平均总费用却增加。

图 3.9、图 3.10 反映了在不同的返品率下各库存决策参量的折线图。

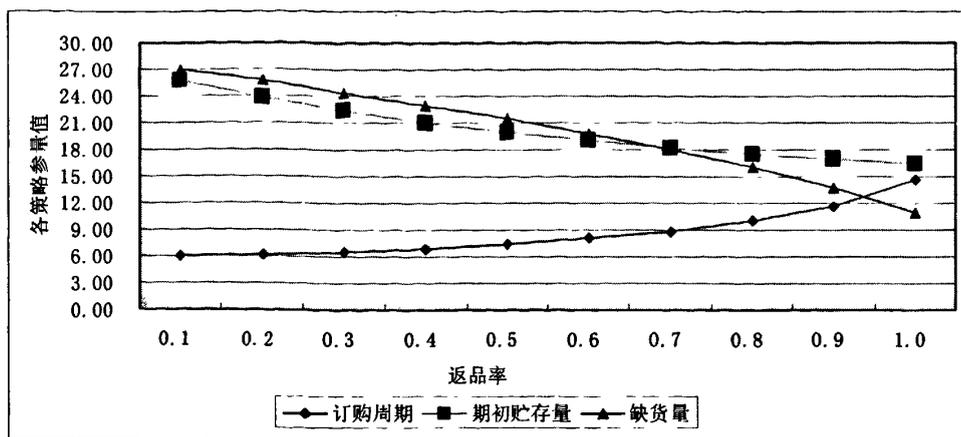


图 3.9 废品率与订购周期、期初贮存量、缺货量的关系 ($C_3=100$)

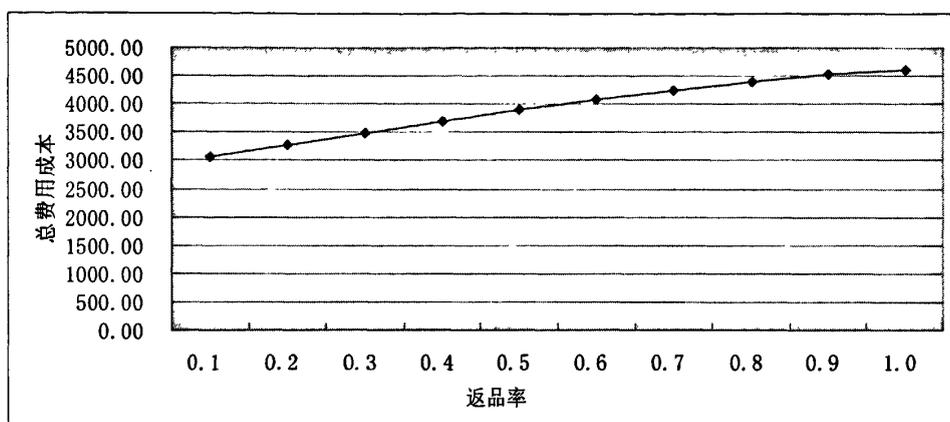


图 3.10 废品率与最优平均总费用的关系 ($C_3=100$)

从表 3.9、图 3.9、图 3.10 可以看出，废品率对实际库存策略的影响是比较大的，尤其是对订购费用的影响较大，计算结果与实际的生产现象类似。因此，在实际操作中，大部分的企业也是把降低产品的废品率作为调控企业订购费用的一项重要举措。

通过对考虑返回品库存的允许缺货模型与允许缺货的经典库存模型数值算例比较 (采用模拟算例 2 的相关数据，计算结果见表 3.10)，可以看出：由于返回品经修复后可以补充现有库存，使得订购量同比减少，订购周期同比延长。但是因为存在返回品的库存储存成本以及返回品的修复成本，因此使得平均总费用同比增加。以上现象在实际生产中普遍存在。本改进模型延长了订购周期，降低了订购批次，从而有效地降低了订购成本；同时由于对返回品的修复，补充了原有库存，降低了新产品的购进，使订购总量有所减少，从而有效地降低了企业的生产成本支出。

表 3.10 本文模型与经典的允许缺货库存模型的比较 ($\alpha=0.2, C_3=50$)

策略模型	订购周期 T^*	期初贮存量 Q_1^*	缺货量 B	总订购量 Q	订购费用 C^*
经典允许缺货模型	5.66	14.18	56	70.18	2666.67
本文模型	6.59	12.89	30.37	43.26	3129.45

3.4 本章小结

在确定型库存模型中，需求和产品回流在每一个时点都是已知的，即需求不随时间变化。在实际的生产销售过程中，同时存在着不允许缺货和允许缺货（缺货需补足）的情况。在分别建立两者的模型时，本文均假设需求和回流是稳定的，产品的返回与上一期销售的产品成一定的比例；库存持有费用不变，订购费和修复成本不变；返回品经修复后进入待销售的库存费用与新产品相同。据此给出了相应的模型和解法，并以模型数据予以验证，计算表明，在不考虑缺货成本时，由于存在着返回品对库存的补充，返品率的增大反而会使订购费用减小；但在允许缺货（缺货需补足）的情况下，由于返回品与订购的新产品是同时到达，使库存费用急剧增大，因而随着返品率和缺货成本的增大，订购费用均呈增大的趋势，但与此同时，也有效地降低了订购周期和订购量，从而有效地降低了企业的生产成本支出。

第四章 考虑库存计划周期的随机型逆向物流库存控制研究

4.1 问题描述

在实际的逆向库存储存问题中,由于受到各种随机型的影响,库存需求量往往不能准确确定,库存物资的需求量以及返回品数量在绝大部分情况下是具有一定随机规律的随机变量。当需求量或返回品数量两者或其中之一为随机变量的存储系统统称为随机型逆向物流库存系统。本文按照库存计划时间的长度,将逆向物流库存控制系统分为单周期型和多周期型,研究并建立相应的较拟合实际的逆向物流库存控制模型。对单周期型的逆向库存模型,以经典报童问题为切入点,在此基础上拓展模型,给出解法并以实例验证;对多周期型逆向库存模型,应用动态规划理论,针对单一库存点的返回品的问题进行研究,建立模型并给出相应的解法。

4.2 基于经典报童问题的单周期库存控制模型

4.2.1 经典报童问题及其求解模型分析

经典报童问题^[52]是一个典型的单周期随机库存问题。报童每天卖出的报纸数量是随机的,报童每卖出一份报纸会获得一定的收益;如果报纸没有卖完,做降价或退货处理,则每剩余一份报纸会造成一定的损益。问如何确定每天的订报量使得报童每天的期望收益率最大。

假设报童每天售出的报纸份数 x 是一个连续型随机变量,其概率 $P(x)$ 已知。报童每售出一份报纸赚 p 元,每剩余一份赔 r 元,问报童每天应该订购的报纸 Q 为多少,使得报童的收益最大?

如果报纸需求量 $X \geq Q$,则报童的每天的收益是 pQ ;如果报纸的需求量 $X < Q$,即每天报纸还有剩余,那么报童每天的收益是 $px - r(Q - x)$,则可以得出报童卖报的收益函数为:

$$\Phi = \begin{cases} pQ & X \geq Q \\ px - r(Q - x) & X < Q \end{cases}$$

获利的数学期望为:

$$\begin{aligned} E(\Phi) &= \int_0^Q [px - r(Q - x)]P(x)dx + \int_Q^{\infty} pQP(x)dx \\ &= \int_0^Q (p+r)xP(x)dx - rQ \int_0^Q P(x)dx + pQ \int_Q^{\infty} P(x)dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dE(\Phi)}{dQ} &= (p+r)QP(Q) - r \int_0^Q P(x)dx - rQP(Q) + p \int_0^{\infty} P(x)dx - pQP(Q) \\ &= p \int_0^{\infty} P(x)dx - r \int_0^Q P(x)dx \\ &= p - (p+r) \int_0^Q P(x)dx \end{aligned}$$

令 $\frac{dE(\Phi)}{dQ} = 0$, 则有 $\int_0^Q P(x)dx = \frac{p}{p+r}$ (4.1)

故最佳订购量 Q 由(1)式确定。更进一步地, 如果销售量 v 服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$, 则关系式(1)变为

$$\int_0^Q \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} dx = \frac{p}{p+r} \text{ 即 } \Phi\left(\frac{Q-\mu}{\sigma}\right) = \frac{p}{p+r}$$
 (4.2)

故当 v 服从正态分布时, 最佳订购量 Q 由(4.2)式确定, 其中 $\Phi(x)$ 为标准正态分布的分布函数。

这里要提出的是, 由(1)所确定的最佳订购量式根据获利期望值最大原则和损失期望值最小的原则确定的, 也就是说, 不考虑损益成本, 在实际决策中的风险较大, 需要在收益和风险之间找到一种平衡。

4.2.2 有产品回流下的三种单周期库存控制处理策略

经典报童模型对订购量多于需求量的部分采取降价售出, 不考虑缺失成本。但对于一个订购周期内需求有限量的库存系统来说, 如果订购量在本周期得不到满足, 就要付出相应的缺货成本; 而多余的订购量将要在未来的库存需求中消化, 这无疑又增加现阶段库存系统的持有成本。在这种情况下, 考虑逆向物流中, 产品的回流量, 可以对于企业的单周期库存系统管理和订货策略产生一定的影响。

在实际的生产中, 对回流产品的处理通常有几种策略, 见图 4.1。

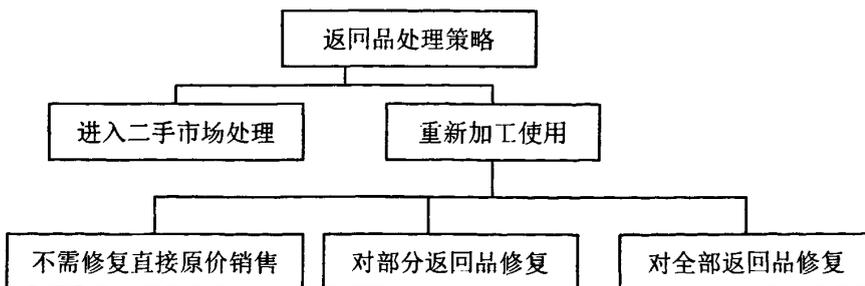


图 4.1 逆向返回品处理策略

对返回品进行二级市场处理即是经典报童模型问题, 不考虑缺货, 如果订购量多余

需求量,则对其进行降价处理。但是对于大部分的回流产品来说,企业为降低成本,经常采用的是重新加工再利用返回品的策略。考虑到不同的处理策略对产品库存成本及处理成本之间的关系,本文首先应用 ABC 库存控制管理法对返回品重加工的处理策略进行分析,并在这个思想的指导下建立相应的数学模型。

ABC 分类法又称帕累托分析法或巴雷托分析法、重点管理法等,源于“80/20”思想法则。最早由意大利经济学家维尔弗雷多·帕累托于 1906 年首创。1951 年,管理学家戴克(H. F. Dickie)首次将其应用于库存管理,由于该方法把被分析的对象分成 A、B、C 三类,所以该方法又称为 ABC 分析法。

ABC 分析法是运用数理统计的方法,把物资按品种和占用资金的大小进行分类排队,分清重点和一般,再按各类重要程度不同分别控制,抓住重点和主要矛盾,进行重点控制的一种分析方法。对应到库存管理中,ABC 分类管理就是将库存物品按品种和占用资金的多少分为特别重要的库存(A 类)、一般重要的库存(B 类)和不重要的库存(C 类)二个等级,然后针对不同等级分别进行管理与控制的一种方法,具体分类如下: :

- a) A 库存: 虽然只占有所有库存品目的 5%~15%, 却占出库金额的 60%~75%;
- b) B 库存: 占有所有库存品目的 20%~30%, 占出库金额的 20%~30%;
- c) C 库存: 虽然占有所有库存品目的 55%~75%, 却只占出库金额的 5%~10%。。

因此,对于上述三类重要程度不同的库存类型,应该给予不同的处理策略,分别控制。对 A 类物资要重点、严格控制。采购 A 类物资时应尽量缩短供应间隔期,选用最优的订购批量; B 类物资属于一般重要的库存货物,对于这类货物的库存管理介于 A 类和 C 类之间,一般进行正常的例行管理和控制。C 类物资的数量最大但对企业的重要性相对最低,故一般进行简单的管理和控制即可。这样企业就集中精力抓好 A 类和 B 类物资的采购和控制。

本文根据返回品的品质好坏将回流产品分为不需修复或修复成本可不计,直接原价销售策略;对部分返回品进行修复策略;对全部返回品进行修复的策略。根据实际的生产及销售经验,在回流物品中,不需要修复即可以原价出售的产品属于极少数,但因没有修复成本,重新售出后的收益也最大,根据 ABC 管理思想可将这部分列为 A 类产品;对全部返回品进行修复然后出售,这部分回流品数量最多,但考虑到修复成本,它所得到的收益也最小,这部分可归为 C 类产品;对返回品中的部分进行修复然后售出,其余产品进入二手市场处理,这部分的产品数量和处理费用是介于 A 类和 C 类之间,列为 B 类产品。

本文在报童问题的基础上，参考文献[53]所提出的几种情形下的最优库存订购模型。按照上文 ABC 法对回流产品处理策略的定性分析思想，对回流物品在单周期情况下的存储问题进行研究，提出针对回流物品符合实际需求的不同处理方式的数学模型，然后对模型进行了改进。

模型符号意义表示如下：

T: 产品的销售周期；

L: 产品的订购周期；

Q: 期初订购量；

X: 一个周期的需求量；

D: 产品需求量；

P: 单位产品的销售价格；

C: 单位产品的购买成本；

S: 单位返回品在降价销售时价格；

G: 单位缺货成本；

Π : 收益额；

Π_i : 第 i 种方案的收益额；

C_c : 单位产品的回收成本；

C_r : 将产品修复为原状态（新产品）的单位产品的修复成本；

C_f : 单位产品的固定修复成本；

P' : 单位产品订购的预期风险成本，应该满足：

$$C_r < P' - S, \quad P' = (1 - r)P + r(S - C_c)$$

即要求单位产品的修复成本要低于产品因降价处理而获取的收益，否则没有意义；

r: 正常订购产品返品率；

x: 实际产品需求量；

f(x): 需求密度函数(假设可微可导)。

在给出模型前，本文做出如下假设：所订的货物在期初已经达到；需求是一个连续的随机变量，返回是需求的线性函数；物品从售出到返回有一个常数的间隔期；重新加工需要负担加工费。则针对返回品有以下几种解决方案：

- (1) 将返回品中状况较好的产品直接出售（不需修复或修复成本可不计）（A 类产品）

在这种情况下，产品的收益额可分为三类：

1) 当 $X \leq Q$ 时，即需求量小于订购量时，产品的收益由预期风险投资收益 P' 、部分较好产品重新售出的收益 $S(Q-x)$ 之和去掉产品的订购成本。故它的收益函数为

$$P'x + S(Q-x) - CQ;$$

2) 当 $X \geq Q$ 时，即需求量大于订购量时，首先订购量的收益，它的收益函数为 $P'Q$ ；

3) 在 $X \geq Q$ 时，还要考虑的一个就是因产品订购不足，无法对返回中质量较好的产品进行二次销售的损失成本 SQr ；缺货损失 $G(x-Q)$ ，以及订购成本。这部分的损益为 $SQr + G(x-Q) + CQ$ 。

收益函数为：

$$\Pi_1 = \begin{cases} P'x + S(Q-x) - CQ & X \leq Q; \\ P'Q & X \geq Q; \\ SQr + G(x-Q) + CQ & X \geq Q; \end{cases}$$

期望收益额为：

$$\begin{aligned} E(\Pi_1) = & \int_0^Q [P'x + S(Q-x) - CQ] f(x) dx + \int_0^{+\infty} P'Q f(x) dx \\ & - \int_0^{+\infty} [SQr + G(x-Q) + CQ] f(x) dx \end{aligned} \quad (4.3)$$

对(3)式进行整理，得

$$\begin{aligned} E(\Pi_1) = & [P' + G - Sr - C]Q - G(P + G - S) \int_0^Q xf(x) dx + G \\ & - Q(P' + G - S - Sr) \int_0^Q f(x) dx \end{aligned} \quad (4.4)$$

根据数理统计的知识有： $\int_0^{\infty} xf(x) dx = E(x)$

再对上式进行整理得：

$$\begin{aligned} E(\Pi_1) = & [P' + G - Sr - C]Q - G(P + G - S)E(x) + G \\ & - Q(P' + G - S - Sr) \int_0^Q f(x) dx \end{aligned} \quad (4.5)$$

对(4.5)式的 Q 求一阶导数并令其等于零：

$$\frac{\partial E(\Pi_1)}{\partial Q} = (P' + G - Sr - C) - (P' + G - S - Sr) \int_0^Q f(x) dx = 0 \quad (4.6)$$

对(4.6)求二阶偏导，得

$$\frac{\partial^2 E(\Pi_1)}{\partial Q^2} = -(P' + G - S - Sr)f(Q) < 0 \quad (4.7)$$

故 (4.3) 是凹函数, 收益函数具有最大值。

则在本策略下, 部分状况较好的产品直接进行销售的处理策略下的最佳订购量 Q^* 为:

$$P_1(x \leq Q^*) = \int_0^Q f(x)dx = \frac{P' + G - Sr - C}{P' + G - Sr - S} \quad (4.8)$$

(2) 返回品中部分产品进行修复加工出售, 其余产品销往二手市场 (B 类产品)

这种返回品的处理策略分为两个部分, 一种是对生产所需要的返回品进行再加工然后重新销售; 另一部分是多剩余产品进行直接降价处理。所以这种处理策略的收益额可以这样进行(本策略建立在策略(1)的收益函数基础上);

1) 当 $X \geq Q$ 时, 缺失修复成本函数为 $C_r(x - Q)$;

2) 部分回流产品的修复成本函数 $C_r Q$;

本策略的期望收益值:

$$E(\Pi_2) = E(\Pi_1) - \int_0^Q C_r(x - Q)f(x) - \int_0^Q C_r Q f(x)dx \quad (4.9)$$

代入(1)式, 整理得

$$E(\Pi_2) = [P' + G + C_r - rC_r - Sr - C]Q - (P + G - C_r - S) \int_0^Q xf(x)dx + G - C_r - Q(P' + G + C_r - rC_r - S - Sr) \int_0^Q f(x)dx \quad (4.10)$$

同理, 可以证明式(4.10)存在最大值。

则在策略(2)下的最佳订货量 Q^* 是:

$$P_2(x \leq Q^*) = \int_0^Q f(x)dx = \frac{P' + G + C_r - rC_r - Sr - C}{P' + G + C_r - rC_r - Sr - S} \quad (4.11)$$

(3) 对全部返回品进行再加工以满足需求 (C 类产品)

本策略是对策略(1)、(2)的一个拓展。这个模型假设: 修复成本是针对所有的返回产品, 不论返回品是否为生产所需。在这种情况下的收益函数等于产品 修复后的总收益, 减去在订购量内的修复成本和多于订购量和服务品修复成本。为与前文定义过的修复成本区别, 这里设 C'_r 为本策略的修复成本, C_r 同样要满足 $C'_r < P' - S$ 。本部分的收益函数分析如下:

1) 本策略同样在策略(1)收益函数的基础上;

2) $X \geq Q$ 时, 所销售所有产品的修复成本函数为 $C'_r rx$;

3) 期初订购量的返回品修复成本 $C'_r Qr$;

本策略的收益额为:

$$E(\Pi_3) = E(\Pi_1) - \int_0^Q C'_r r x f(x) dx - \int_Q^{\infty} C'_r r Q f(x) dx \quad (4.12)$$

代入 $E(\Pi_1)$, 得

$$\begin{aligned} E(\Pi_2) = & [P' + G + C_r - rC_r - Sr - C - rC'_r] Q \\ & - (P + G + rC'_r - C_r - S) \int_0^Q x f(x) dx \\ & + G - C_r - Q(P' + G + C_r - rC_r - S - Sr - rC'_r) \int_0^Q f(x) dx \end{aligned} \quad (4.13)$$

同理, 可得出本策略的最佳订购量 Q^* 为:

$$P_3(x \leq Q^*) = \int_0^Q f(x) dx = \frac{P' + G + C_r - rC_r - Sr - C - rC'_r}{P' + G + C_r - rC_r - Sr - S - rC'_r} \quad (4.14)$$

针对在实际回流产品的常用处理方法, 上文在经典报童问题和模型的基础上, 给出了回流产品的三种不同的处理方式, 根据回收产品的不同处理策略, 以最大化收益为目标函数建立了相应的模型, 并给出了相应的逆向处理模型。

4.2.3 模型改进

上述三个模型或对回流产品直接销售, 或是对产品进行修复处理后再进行销售。对于产品的修复成本是作为整体来计算的, 但实际上, 每种回流产品都有它的固定修复成本, 例如为重新包装产品所租赁来的设备或厂房等。回流单位产品, 就会有相应产品的固定成本折损, 当修复回流产品成本大于它的经修复后重新出售所获取的收益时, 修复回流品就没有任何实际意义。产品的固定修复成本在产品的订购初期就已经被纳入到产品的价值中。

在实际情况下, 返回品往往不能做到全部修复, 全部修复的代价太大或是若作全部修复没有实际意义。如回收的有破损的啤酒瓶, 如果对其修复的成本大于它修复后重新利用的价值, 即 $C_r < P' - S$, 则没有实际的经济效益。在这种情况下, 仅对部分产品进行再修复或重新制造, 对修复成本过高的产品进行弃置或降价处理更符合实际的经济效益最大化。

本文的改进模型在策略(2)的基础上, 考虑当 $X \geq Q$ 时, 多增加的回流产品固定修复成本时的情况。

本改进模型假设:

- 1) 只考虑回流产品中有修复价值的部分产品, 即在策略(2)的收益额基础上进行;
- 2) 回流产品服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2)$;
- 3) 多于订购量 Q 的产品的固定修复成本函数 $C_f(x-Q)f(x)$ 。

本改进模型的收益额为:

$$\begin{aligned}
 E(\Pi_4) &= E(\Pi_2) - \int_0^Q C_f(x-Q)f(x)dx \\
 &= E(\Pi_1) - \int_0^Q C_r(x-Q)f(x) - \int_0^Q C_r Q f(x)dx - \int_0^Q C_f(x-Q)f(x)dx \\
 &= \int_0^Q [P'x + S(Q-x) - CQ]f(x)dx + \int_0^{\infty} P' Q f(x)dx \\
 &\quad - \int_0^{\infty} [SQ + G(x-Q) + CQ]f(x)dx - \int_0^Q C_r(x-Q)f(x) - \int_0^Q C_r Q f(x)dx \\
 &\quad - \int_0^Q C_f(x-Q)f(x)dx
 \end{aligned} \tag{4.15}$$

整理式(4.15), 可以得出

$$\begin{aligned}
 E(\Pi_4) &= [P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - C]Q - (P + G - C_r - S) \int_0^Q xf(x)dx \\
 &\quad + (G - C_r - C_f) - Q(P' + G + C_r + C_f - rC_r - S - Sr) \int_0^Q f(x)dx
 \end{aligned} \tag{4.16}$$

现在来证明式(4.16)存在最大值, 即在考虑产品的固定修复成本时所取得的最佳收益。

$$\text{令 } \frac{\partial E(\Pi_4)}{\partial Q} = 0;$$

根据数理统计知识, 知 $E(x) = \int_0^{\infty} xf(x)dx$

推导得出:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial E(\Pi_4)}{\partial Q} &= (P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - C) \\
 &\quad - (P' + G + C_r + C_f - rC_r - S - Sr) \int_0^Q f(x)dx
 \end{aligned} \tag{4.17}$$

对式(4.17)求二次偏导, 得:

$$\frac{\partial^2 E(\Pi_4)}{\partial Q^2} = -(P' + G + C_r + C_f - rC_r - S - Sr)f(Q) < 0 \tag{4.18}$$

故可知 $E(\Pi_4)$ 为凹函数, 存在最大值。

从式(4.17)推导出本改进模型的最佳订购量为:

$$P_4(x \leq Q^*) = \int_0^Q f(x) dx = \frac{P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - C}{P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - S} \quad (4.19)$$

4.2.4 算例分析

某品牌服装地区代理分销商在一个销售季度 T 内, 产品的回流率为 0.3, 每件衣服的进货价 $C=120$ 元, 销售价 $P=170$ 元, 过季衣服处理价格为 $S=100$ 元 (低于购进成本价), 对于热销产品, 每少一件就损失 $G=50$ 元, 单位滞销服装的回收成本是 $C_c=30$ 元, 返厂修复的成本为 $C_r=20$ 元, 单位服装的固定修复成本为 $C_f=10$ 元。根据以前的销售情况统计可以知道, 同期需求量服从正态分布 $N(300, 400)$, 问此代理商应该进多少服装, 才能保证销售的期望收益最大?

解: 根据定义知 $P'=(1-r)P+r(S-C_c)$, 则 $P'=0.7*170+0.3*80=143$ 元

$$\text{又根据式 (16), } P_2(x \leq Q^*) = \int_0^Q f(x) dx = \frac{P' + G + C_r - rC_r - Sr - C}{P' + G + C_r - rC_r - Sr - S}$$

$$\begin{aligned} P(x \leq Q^*) &= \int_0^Q f(x) dx = \frac{P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - C}{P' + G + C_r + C_f - rC_r - Sr - S} \\ &= \frac{143 + 50 + 20 + 10 - 0.3 * 20 - 100 * 0.3 - 120}{143 + 50 + 20 + 10 - 0.3 * 20 - 100 * 0.3 - 100} = 0.77 \end{aligned}$$

由正态分布概率计算公式, 知

$$\begin{aligned} F(x) &= \int_0^x f(x) dx = \Phi\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right) \\ F(Q) &= \int_0^Q f(x) dx = \Phi\left(\frac{Q-300}{20}\right) = 0.77 \end{aligned}$$

查表得

$$\frac{Q^* - 300}{20} = 0.74$$

解得

$$Q^* = 314.8 \approx 315 (\text{件})$$

此时的最优订购量为 315 件。

本改进模型与原模型的比较:

代入数据, 解得原模型(4.11)的最优订购量 Q^* 为 312 件。

以上本文在介绍经典报童问题的基础上, 运用 ABC 分类控制管理的思想, 分析在有回流产品问题的三种处理策略并分别建立了模型。由于考虑回流产品的固定修复成本

的情况下对模型进行了改进，改进后的模型要比原模型订购量增大。

4.3 基于动态规划的多周期库存控制模型

4.3.1 问题描述

如前文所述，目前大多数的针对逆向物流库存控制的问题都是针对多周期情形下的。在实际的问题中，我们多数考虑的是生产过程中多周期随机库存模型，即系统运行 $N(N>1)$ 个周期，在每个周期开始初决定是否补充库存，如果补充，要补充多少。与单周期库存问题不同，每次决策时不是考虑使该周期达到最优而是使 n 个周期的总体达到最优。在决定第 n 个周期的库存水平时，就要考虑第 $n+1$ 个周期的库存决策水平。故如果能够预测到将来多个周期中每个周期的需求量的概率分布，那么考虑多周期模型显然比多次用单周期模型做出的决策更好。从以上对多周期库存模型的分析可以看出，多周期库存模型是典型的多阶段决策问题，而解决多阶段决策问题的可以用动态规划方法来求解。

4.3.2 动态规划概述

4.3.2.1 动态规划涵义

动态规划是运筹学的一个分支，它是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法。所谓多阶段决策问题，是指在现实生活中，有一类活动过程，由于它的特殊性，可将过程分成若干个互相联系的阶段，在它的每一阶段都需要做出决策，从而使整个过程达到最好的活动效果。因此各个阶段决策的选取不能任意确定，它依赖于当前面临的状态，又影响以后的发展。当各个阶段决策确定后，就组成一个决策序列，因而也就确定了整个过程的一条活动路线。这种把一个问题看作是一个前后关联具有链状结构的多阶段过程就称为多阶段决策过程，这种问题称为多阶段决策问题。



图 4.2 多阶段决策过程示意图

在多阶段决策问题中，决策依赖于当前状态，又随即引起状态的转移，一个决策序列就是在变化的状态中产生出来的，故有“动态”的含义，所以称这种解决多阶段决策最优化的过程为动态规划方法。

4.3.2.2 动态规划的最优性原理和适用范围

最优性原理：1951 年由年美国数学家 R. Bellman 等人提出：一个过程的最优决策具有这样的性质：即无论其初始状态和初始决策如何，其今后诸策略对以第一个决策所形成的状态作为初始状态的过程而言，必须构成最优策略。简言之，一个最优策略的子策略，对于它的初态和终态而言也必是最优的。

动态规划虽然是解决多阶段问题的一个重要方法，但也有它的适用范围，即问题需满足一定的条件才能用动态规划来求解，主要应该满足以下两个条件：

(1) 状态必须满足最优化原理；

(2) 状态必须满足无后效性。所谓无后效性原则，指的是这样一种性质：某阶段的状态一旦确定，则此后过程的演变不再受此前各状态及决策的影响。也就是说，“未来与过去无关”，当前的状态是此前历史的一个完整总结，此前的历史只能通过当前的状态去影响过程未来的演变。具体地说，如果一个问题被划分各个阶段之后，阶段 I 中的状态只能由阶段 I+1 中的状态通过状态转移方程得来，与其他状态没有关系，特别是与未发生的状态没有关系，这就是无后效性。

4.3.2.3 动态规划的求解思路和方法

动态规划所处理的问题是一个多阶段决策问题，一般由初始状态开始，通过对中间阶段决策的选择，达到结束状态。这些决策形成了一个决策序列，同时确定了完成整个过程的一条活动路线(通常是求最优的活动路线)。

(1) 划分阶段：按照问题的时间或空间特征，把问题分为若干个阶段。在划分阶段时，注意划分后的阶段一定要是有序的或者是可排序的，否则问题就无法求解。

(2) 确定状态和状态变量：将问题发展到各个阶段时所处于的各种客观情况用不同的状态表示出来。当然，状态的选择要满足无后效性。

(3) 确定决策并写出状态转移方程：因为决策和状态转移有着天然的联系，状态转移就是根据上一阶段的状态和决策来导出本阶段的状态。所以如果确定了决策，状态转移方程也就可写出。但事实上常常是反过来做，根据相邻两段各状态之间的关系来确定决策。

(4) 寻找边界条件：给出的状态转移方程是一个递推式，需要一个递推的终止条件或边界条件。

(5) 程序设计实现：动态规划的主要难点在于理论上的设计，一旦设计完成，实现部分就会非常简单。

从上述对动态规划的求解思路可以看出,对问题分阶段排序,用最优化原理找出最佳序列进而求得最优解,这就是动态规划的主要求解思路。多周期问题满足最优化原理和状态必须满足无后效性的适用条件,因此,本文将以动态规划理论为基础,建立并求解多周期逆向物流库存模型。

4.3.3 本问题模型变量假设

本节中讨论的是单一产品回流的随机模型。最早对这一问题提出解决模型的是 Simpson, V.P.^[54],他在假定订货提前期和回收品的修复时间均忽略不计的情况,并且假设需求和返回都是随机的且二者相互独立。本节将在 Simpson, V.P 研究的基础上,做出如下的假设:

- (1) 需要考虑产品的订货提前期和回收品的固定修复时间;
- (2) 由于受到库存持有成本的影响,本文假设返回品和服务品库存在一起,即单一库存点,它可以存储新的产品、修复品和回流品;
- (3) 对回流产品的处理包括立即修复、弃置、或者作为稍后修复的持有库存;
- (4) 产品生产和修复(再制造)的提前期是相同的,并且是确定型的;
- (5) 在有限计划的 T 周期内,库存策略的制定是有历史库存水平做参照的。在每个周期它都需要决定有多少库存需要弃置、修复或生产补充。

变量说明:

- t: n 个周期中的第 t 个周期;
- R(t): t 时期的回流量,服从正态分布;
- D(t): t 时期的需求量,服从正态分布;
- p(t): t 时期的产品生产量;
- r(t): t 时期的修复(再制造)量;
- d(t): t 时期的回流产品弃置量;
- $x_S(t)$: 库存决策前, t 期初的服务品库存水平;
- $x_R(t)$: 库存决策前, t 期初的修复品库存水平;
- $y_S(t)$: 库存决策后, t 期初的服务品库存水平;
- $y_R(t)$: 库存决策后, t 期初的修复品库存水平;
- ℓ : 制造和再制造提前期。

同时,本文对变量做出以下假设:

(1) 产品需求量和返回品量相互独立, 分布函数分别为 $\Phi(D)$ 、 $\Phi(R)$, 分布密度分别为 $\phi(D)$ 、 $\phi(R)$, 需求量和返回品量的均值和方差分别为 $E(D)=\mu_D$ 、 $E(R)=\mu_R$;

$$Var(D)=\sigma_D, \quad Var(R)=\sigma_R;$$

(2) 假设返回品在再生产和处理决策之前的 t 周期前的 $t-1$ 时的到达才是有效的。

4.3.4 模型的分析 and 建立

对于单一库存点的情况, 由于返回品和服务品放在一起, 则不存在返回品的库存问题, 每个周期要直接处理掉或再加工的产品量就应该等于产品的回流量:

$$R(t-1) = d(t) + r(t). \quad (4.20)$$

所以, 此时的逆向库存问题就简化为如何确定各周期的返回品的弃置量和需要生产的产品的最佳数量。可以表示为:

$$(p^*(1), p^*(2), \dots, p^*(T), d^*(1), d^*(2), \dots, d^*(T)) \quad (4.21)$$

上式称为库存的最优策略, 它将作为制定最小平均成本策略的依据。

另外, 还要考虑产品的生产, 再加工, 处理品, 订货和服务品库存的持有成本。本文假定每周期末的库存和订购成本与整个周期的净库存成本存在一定的比例关系, 定义为:

h_s : 服务品库存持有成本率;

h_b : 订货成本率

很显然, 第 $t+1$ 个周期的服务品库存量应该等于第 t 周期总库存量减去第 t 期的需求量和弃置量, 可得出以下的递推式:

$$x_s(t+1) = x_s(t) + p(t) - d(t) + R(t) - D(t) \quad (4.22)$$

另外, 本文定义在库存策略制定之后, 在 t 周期前的库存水平为:

$$y_s(t) = x_s(t) + p(t) - d(t) \quad (4.23)$$

可知, 在周期 $t+l$, 平均库存持有和订货成本为 (y_s 为库存水平因子):

$$L_t(y_s) = h_s \int_0^{y_s} (y_s - z) \varphi_{t,l,D}(z) dz + h_b \int_{y_s}^{\infty} (z - y_s) \varphi_{t,l,D}(z) dz \quad (4.24)$$

说明: $\varphi_{t,l,D}$ 表示在 $t, t+1, t+2, \dots, t+l$ 的需求量总和的分布密度函数, $\Phi_{t,l,D}$ 表示 $t, t+1, t+2, \dots, t+l$ 的累积分布函数, 由对 (4.27) 式 y_s 求导得出:

$$L_t'(y_s) = (h_s + h_B)\Phi_{t,t,D}(y_s) - h_B \quad (4.25)$$

此外，不妨假设，产品生产、返回品再生产以及弃置费用与他们三者的本期库存量呈一定的比例关系，分别表示为：

c_p ：单位产品的生产成本； c_d ：单位产品的弃置成本；

进一步地，本文引入一个在每个周期 t 内的随机变量，定义它为周期 t 内的需求量与返回量的差值： $Z(t) = D(t) - R(t)$ 。 (4.26)

由变量假设(2)知， $Z(t)$ 的分布函数为 $\Phi(Z)$ ，分布密度为 $\phi(Z)$ ，均值和方差分别为 $E(Z) = \mu_z$ ， $Var(Z) = \sigma_z$

令 f_n 为在计划期末 n 个剩余周期的最小相关平均成本， $\phi_{n,z}(z)$ 为随机变量 $Z(T-n)$ 的密度函。由动态规划的思想，可以得出在不考虑返回品产品库存的动态规划逆向物流库存模型：

$$f_n(x_s) = \min_{p,d \geq 0} \left\{ c_p p + c_d d + L_n(x_s + p - d) + \int_{-\infty}^{+\infty} f_{n-1}(x_s + p - d - z) \phi_{n,z}(z) dz \right\} \quad (4.27)$$

$n=1,2,3,\dots,T$, f_n 的初始变量为 f_0 。

在本文中，为简便起见，本文令 $f_0(x_s) \equiv 0$ (4.28)

当然，所有的结果对任意初始凸函数 f_0 都有效。

4.3.5 模型求解

设在相同的订货提前期下，最优库存策略可以用 $(s_t, S_t)_{t=1,2,\dots,T}$ 这两个参数来表示

(其中 s_t, S_t 分别表示周期 t 内的设定的最小、最大库存订货点)，如图 4.4 所示：

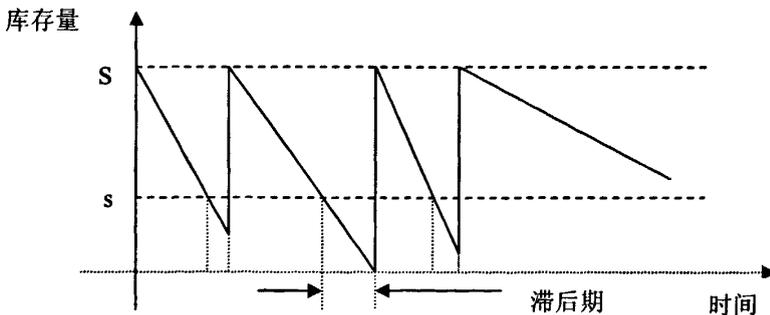


图 4.4 (s,S) 库存控制策略

$$p^*(t) = s_t - x_s(t), \quad d^*(t) = 0 \quad \text{if } x_s(t) < s_t, \quad (4.29)$$

$$p^*(t) = 0, \quad d^*(t) = 0 \quad \text{if } s_t \leq x_s(t) \leq S_t, \quad (4.30)$$

$$p^*(t) = 0, \quad d^*(t) = x_s(t) - S_t \quad \text{if } x_s(t) > S_t, \quad (4.31)$$

分别对 (4.27) 的 p 和 d 求偏导, 可以得出: s_n 和 S_n 在周期 T - n 内可以得出以下的求解等式:

$$H'_n(s_n) = -c_p, \quad H'_n(S_n) = c_d \quad (4.32)$$

这里的 H_n 定义为:

$$H_n(x_s) = L_n(x_s) + \int_{-\infty}^{+\infty} f_{n-1}(x_s - z) \phi_{n,z} dz \quad (4.33)$$

其中 f_n 在 (4.27) 中已经给出, 因此函数 f_n 和 H_n 可以进行递归计算。

(1) 函数 f_n

对于函数 f_n , 本文针对不同的情况, 做出不同的分析, 令 $n=1, 2, \dots, T-1, T$ 可以分为以下三种情况:

A. 当 $x_s < s_n$ 时: (式 4.29)

在这种情况下, 单产品数量达到了 s_n 水平, 故不存在弃置量, 此时

$$f_n(x_s) = c_p(s_n - x_s) + L_n(s_n) + \int_{-\infty}^{+\infty} f_{n-1}(s_n - z) \phi_{n,z}(z) dz \quad (4.34)$$

将上式简写为:

$$f_n(x_s) = c_p(s_n - x_s) + I_{n,1} \quad (4.35)$$

B. 当 $x_s > S_n$ 时: (式 4.31)

如若库存水平大于 S_n , 则回流量可以被处理到这个水平下而无新产品产生。此时

$$f_n(x_s) = c_d(x_s - S_n) + L_n(S_n) + \int_{-\infty}^{+\infty} f_{n-1}(S_n - z) \phi_{n,z}(z) dz, \quad (4.36)$$

同理, (4.36) 式可以记为:

$$f_n(x_s) = c_d(x_s - S_n) + I_{n,2} \quad (4.37)$$

C. 当 $s_n \leq x_s \leq S_n$ 时: 由于不存在产品和弃置量, f_n 可写作: (式 4.30)

$$f_n(x_s) = L_n(x_s) + \int_{-\infty}^{+\infty} f_{n-1}(x_s - z) \phi_{n,z}(z) dz, \quad (4.38)$$

(2) 函数 H'_n

$$H'_n(x_S) = L'_n(x_S) + \int_{-\infty}^{x_S - S_{n-1}} f'_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz + \int_{x_S - S_{n-1}}^{x_S - s_{n-1}} f'_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz + \int_{x_S - s_{n-1}}^{+\infty} f'_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz. \quad (4.39)$$

当 $n \geq 2$ 时, 若区间取值小于 s_{n-1} 或大于 S_{n-1} 时, 可以得出

$$H'_n(x_S) = L'_n(x_S) + c_d \Phi_{n,z}(x_S - S_{n-1}) - c_p(1 - \Phi_{n,z}(x_S - s_{n-1})) + \int_{x_S - S_{n-1}}^{x_S - s_{n-1}} f'_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz. \quad (4.40)$$

从 (4.33) 中对 H_n 的定义及在 (4.38) 中得出

$$H_n(x_S) = f_n(x_S) \quad \forall x_S \in [s_{n-1}, S_{n-1}] \quad (4.41)$$

通过这个定义, 本文从函数 H_n 的变形中得到一个递推等式 (当 $n \geq 2$)

$$H'_n(x_S) = L'_n(x_S) + c_d \Phi_{n,z}(x_S - S_{n-1}) - c_p(1 - \Phi_{n,z}(x_S - s_{n-1})) + \int_{x_S - S_{n-1}}^{x_S - s_{n-1}} H'_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz. \quad (4.42)$$

$$\text{当 } n=1 \text{ 时,} \quad H'_1(x_S) = L'_1(x_S) \quad (4.43)$$

通过式 (4.25)、(4.41)、(4.43) 中可以确定最佳策略中 s_n 和 S_n 的值。

根据以上的分析, 可知第 n 个周期的最小库存成本由式 (4.27)、(4.28)、(4.34)、(3.36)、(3.38) 确定。

4.3.6 数值验算与分析

由于逆向物流处于发展的起步阶段, 很少有企业开展逆向物流管理, 因此难以得到实际测算数据; 同时存在着文献检索的局限, 因此本文采用模拟数据代入进行计算。设定以下参数值:

$c_p = 10, c_d = 4, h_s = 5, h_b = 20$. 需求量服从 $U(30,100)$ 的均匀分布, 返回量服从 $U(20,50)$ 的均匀分布。本文首先来确定 T 周期的 s_n 和 S_n 值。

由式 (4.28)、(4.36)、(4.46)、(4.47) 的分析得出 s_n 和 S_n 的计算式

$$H'_1(s_n) = L'(s_n) = L'_1(s_n) = (h_s + h_b)\Phi_{t,t,D}(s_n) - h_b = -c_p$$

$$H'_1(S_n) = L'(S_n) = L'_1(S_n) = (h_s + h_b)\Phi_{t,t,D}(S_n) - h_b = c_d \quad \text{即}$$

$$L'_1(s_n) = (h_s + h_b)\Phi_{t,t,D}(s_n) - h_b = -c_p \quad (4.44)$$

$$L_i'(S_n) = (h_s + h_b)\Phi_{i,t,D}(S_n) - h_b = c_d \quad (4.45)$$

将已知数据代入, 求得

$$\int_0^{s_n} \frac{1}{b-a} dx = \int_0^{s_n} \frac{1}{100-30} dx = 0.4, \text{ 解得 } s_n = 28;$$

$$\int_0^{S_n} \frac{1}{b-a} dx = \int_0^{S_n} \frac{1}{100-30} dx = 0.96, \text{ 解得 } S_n = 67$$

故库存订货策略 (s_n, S_n) 为

$$s_1 = s_2 = \dots = s_n = 28, S_1 = S_2 = \dots = S_n = 67 \quad (4.46)$$

现在来分析不同的参量对 s_n 和 S_n 的影响。

(1) 不同的服务品库存持有成本 h_s 所产生的影响

表 4.1 服务品库存成本 h_s 对订购量的影响

项目 \ 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_s	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
s_n	31.8	30.4	29.2	28	26.9	25.9	25	24.1	23.3	22.6
S_n	76.4	73	70	67.2	64.6	62.2	60	57.9	56	54.2

从表 4.4 看出, 随着 h_s 的增大, s_n 和 S_n 随之降低。

(2) 不同的订货成本对订购量的影响

表 4.2 产品订货成本 h_b 对订购量的影响

项目 \ 序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
h_b	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55
s_n	0.0	17.5	28.0	35.0	40.0	43.8	46.7	49.0	50.9	52.5
S_n	65.3	66.5	67.2	67.7	68.0	68.3	68.4	68.6	68.7	68.8

显然, s_n 和 S_n 随着 h_b 的增大而增大。注意到, 在本例下, 当订货成本为 10 时, 最小订购量 s_n 为 0。

考虑到本文的动态规划模型的复杂性, 下面采用运用 Mathematica5.0 来确定各周期最小库存成本。Mathematica 是目前较为优秀和流行的数学计算软件, 尤其在处

理符号运算、数值计算（复杂定积分求解）等方面有较为突出的优势，广泛应用于物理和数学等领域。

在上文确定 s_n 和 S_n 后，要根据本期决策前服务品库存的初始量来预测和确定未来各周期的最小库存成本，根据前文的分析，下面分情况来求解。

A. 当 $x_s < s_n$ 时

$$f_1(x_s) = c_p(s_1 - x_s) + L_1(s_1) = 525 - 10x_s$$

根据前文定义， $\Phi(Z)$ 应当服从 $U(10,50)$ 的均匀分布

$$f_2(x_s) = c_p(s_2 - x_s) + L_2(s_2) + \int_0^{s_2} f_1(s_2 - z)\phi_{2,z}(z)dz = 794.5 - 10x_s$$

$$f_3(x_s) = c_p(s_3 - x_s) + L_3(s_3) + \int_0^{s_3} f_2(s_3 - z)\phi_{3,z}(z)dz = 982.8 - 10x_s$$

$$f_4(x_s) = c_p(s_4 - x_s) + L_4(s_4) + \int_0^{s_4} f_3(s_4 - z)\phi_{4,z}(z)dz = 1115 - 10x_s$$

.....

$$f_n(x_s) = c_p(s_n - x_s) + L_n(s_n) + \int_0^{s_n} f_{n-1}(s_n - z)\phi_{n,z}(z)dz$$

B. 当 $x_s > S_n$ 时

$$f_1(x_s) = c_d(x_s - S_1) + L_1(S_1) = 4x_s + 12.6$$

$$f_2(x_s) = c_d(x_s - S_2) + L_2(S_2) + \int_0^{S_2} f_1(S_2 - z)\phi_{2,z}(z)dz = 4x_s + 257.1$$

$$f_3(x_s) = c_d(x_s - S_3) + L_3(S_3) + \int_0^{S_3} f_2(S_3 - z)\phi_{3,z}(z)dz = 4x_s + 667.6$$

$$f_4(x_s) = c_d(x_s - S_4) + L_4(S_4) + \int_0^{S_4} f_3(S_4 - z)\phi_{4,z}(z)dz = 4x_s + 1355.3$$

.....

$$f_n(x_s) = c_d(x_s - S_n) + L_n(S_n) + \int_0^{S_n} f_{n-1}(S_n - z)\phi_{n,z}(z)dz$$

C. 当 $s_n \leq x_s \leq S_n$

$$f_1(x_s) = L_1(x_s) = 0.18x_s^2 - 21x_s + 484$$

$$f_2(x_s) = L_2(x_s) + \int_{s_2}^{S_2} f_1(x_s - z)\phi_{2,z}(z)dz = 0.36x_s^2 - 58.2x_s + 1497$$

$$f_3(x_s) = L_3(x_s) + \int_{s_3}^{S_3} f_2(x_s - z)\phi_{3,z}(z)dz = 0.53x_s^2 - 111.2x_s + 3188$$

$$f_4(x_S) = L_4(x_S) + \int_{x_n}^{s_4} f_3(x_S - z)\phi_{4,z}(z)dz = 0.7x_S^2 - 178.5x_S + 5540$$

.....

$$f_n(x_S) = L_n(x_S) + \int_{x_n}^{s_n} f_{n-1}(x_S - z)\phi_{n,z}(z)dz,$$

在求解的过程中, 本文实际采用的是动态规划的顺推解法, 首先确定起始阶段的值, 然后根据相关两周期的迭代关系, 逐步确定每阶段的最优库存问题, 当 $x_S < s_n$ 时, 由于不考虑弃置费用, 决策总成本与生产新产品的成本和库存成本有关, 其他两者情形类推。从上述推导可以看出, 本期期初服务品库存水平直接影响着多周期订购策略的制定。

4.4 本章小结

当需求量和提前订货时间及返回品数量三者或其中之一为随机变量的存储系统统称为随机型逆向物流库存系统。在本章按照库存计划时间的, 将逆向物流库存系统分为单周期和多周期两类。首先研究了经典的报童模型, 以此为基础, 依照 ABC 分类控制思想, 将回流产品的分为不同处理方法, 并分别建立了相应的模型, 然后针对实际产品的回流过程中存在有固定修复成本的问题建立了改进模型, 并以实例验算。本章的第二部分是应用动态规划理论, 对多周期的逆向物流库存模型进行了分析, 给出了 (s, S) 库存策略及相关的最小库存成本函数。考虑到逆向物流是一个新兴的行业, 没有相关的实际数据可以验算, 本文在假设需求量和返回品量都服从均匀分布时用模拟数据进行了测算。产品需求和返回品量在其他分布情况下的数值结论, 有待于进一步的研究。考虑到模型的复杂性, 最后本文采用 Mathematica5.0 进行了计算, 得出各阶段的多周期逆向物流库存模型的数学求解公式。

结论和未来研究展望

1 本论文的主要结论

经济发展的全球化和生产力的快速提高,带来了社会产品的极大丰富和对人们物质生活的极大满足。与此同时在商品流通的原材料采购、生产、配送等各个环节产生了大量的废弃、折旧、破损的可回流产品;同时,各种可再生资源的不断减少和过度开发、破坏大自然所带来的资源和环保危机正日益加剧,资源获得的空间日渐狭窄。随着原材料成本的提高和环保对企业生产的要求,企业的生产成本在逐渐加大。基于以上背景,理论界和实业界开始涉足逆向物流领域。但是相比正向物流,国内外对逆向物流的研究相对较少。

论文在以上背景下提出了针对逆向物流库存控制模型的研究。研究和建立不同情形下的逆向库存模型,通过模拟数值计算得出以下结论:

(1) 对于传统的库存控制策略和模型,通过国内外研究现状分析,发现针对逆向物流库存控制问题的解决方案都是基于传统库存问题研究的改进。

(2) 研究了不允许缺货逆向库存模型,通过建模发现最佳订购周期和订购批量与返品率和返回品修复率相关,返回品的库存成本、修复成本、修复周期影响着总费用成本的大小,同时,通过算例分析得出,随着返品率的增大,使得新品订购量减少,平均总费用成本不一定会随之增大,而是存在着一个峰值;

(3) 对于允许缺货(缺货需补足)的逆向物流库存模型,本文在建立数学模型的基础上,通过引入一个模型算例,较详细的分析了返品率和缺货成本与订购周期、期初存量、缺货量、最优总费用成本的关系,从理论研究上验证了实际生产情形;

(4) 在单周期订购策略前提下,根据经典报童问题理论,运用 ABC 分类控制管理的思想,对返回品建立了符合实际处理策略的三种数学模型;然后在考虑返回品有固定修复成本的数学模型基础上给予了模拟数值计算分析,计算结果表明:在考虑返回品有固定修复成本的情形下,若要使得产品销售期望收益最大,需要加大订购产品的数量;

(5) 在多周期逆向库存问题中,用动态规划的基本方法和原理,建立了多周期的库存成本函数和周期订货(s, S)策略,分析了服务品库存成本和产品订货成本对订购量的影响,运用 Mathematica5.0 计算软件包对该策略模型进行了数值模拟计算,得出不同的订购期初存量对应的多周期最优订购费用计算模型。

2 存在的不足和未来研究展望

对于逆向物流库存理论的研究刚起步，是一个新兴的研究热点。同时针对逆向物流和逆向物流库存模型的研究也必将日益完善。限于时间和精力，本文的研究只是涉猎了其中的一部分，本论文的研究局限和进一步研究的方向为如下：

1) 在分析确定型逆向库存模型时，假设了本期退回产品与上期产品销售量成一定比率，产品的需求和退回是稳定的，退回产品经修复处理后可以以原价重新售出，这与实际情况或许略有差异，因此模型假设具有一定的局限性。

2) 模型验证的数据问题。如前文所述，由于对逆向物流的研究较少而且偏于对理论的研究，能够应用到企业中的就更少，因此实际数据的采集相对较困难。本文对模型的验证数据使用的都是模拟数据，因此有计算结果可能与实际有较大出入。

3) 多方法的处理库存问题。现有的逆向物流的库存模型几乎都是基于传统的库存模型的改进。本文的研究也沿用这种思路。但是否还有其它解法，这可作为一个问题来研究。

目前的供应链库存理论，都是在假定较为理想状态下情形，因此研究合建立更加符合实际的库存模型，不论是为进一步的理论研究做铺垫或是为实际生产服务，这无疑都将是一个更富有意义和挑战的课题。

参考文献

- [1] 向盛斌. 逆向物流与环境保护. [J]物流技术, 2001, 1: 44-45
- [2] Fleischmann M, Krikke H.R, Dekker R, Flapper S D RA Characterisation of Logistics Networks for Product Recovery.Omega[C] 2000, 28(6):653-666
- [3] Ed Grenchus, Shirley Johnson, and Dan McDonnell. Improving Environmental [J]2004.4: 145-151
- [4] Ginter P M,Starling J M. Reverse distribution channels for recycling[J].California Management Review,1978,2Q(3): 72-81
- [5] Emarien. Reverse logistics as competitive strategy[J].Supply Chain Management Review, Spring 1998: 43-45
- [6] 李薇薇, 邹声文. 中国网[DB/OL]. <http://www.china.com.cn/chinese/2002/Sep/208225.htm>
- [7] 中华人民共和国环境保护部网站 [DB/OL]. <http://www.zhb.gov.cn/law/index.htm>
- [8] 申成霖.基于循环经济的逆向物流网络规划研究[[D].天津:天津大学, 2004
- [9] Dale S. Rogers, Ronald S. Tibben-Lembke. Going Backwards:Reverse Logistics Trends and Practices[C] Reverse Logistics Executive Council,1998
- [10] SotckJ.R. Reverse LogistiCs[M], Coilof Logistics Management, Oka Borok, IL, 1992
- [11] Kopicki R. Reuse and Recycling-[J]Reverse Logistics Opportunities. Oak Brook IL:Council of Logistics Management, 1993
- [12] Fleischmann M. Krikke H R DekkerR Flapper S D P. A characterisation of logistics networks for product recovery[J]Omega, 2000. 28:653-666
- [13] Stock J R. [J]Reverse Logictics. Oak Brook IL: Council of Logistics Management, 1992
- [14] Rogers and Tibben-Lembke. Going Backwards: Reverse Logistics Trends and Practice [M]Nevada Reno: Reverse Logistics Executive Council, 1999
- [15] Minner S., Kleber R. Optimal control of production and remanufacturing in a simple recovery model with linear cost functions[J]. Or Spectrum 2001, 23 (1) :3-24
- [16] Kleber R., Minner S., Kiesmuller G. A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options[J]. International Journal of Production Economics, 2002 79(2): 121-141
- [17] Inderfurth K., Kok A.Cz, Flapper S.D.P. .Product recovery in stochastic remanufacturing systems with multiple reuse options[J]. European Journal of Operational Research, 2001, 133: 130-152
- [18] D. A. Schrady, A deterministic inventory model for repairable items,[D] Naval Research Logistics Quarterly 14(1967):391-398.

- [18] Nahmias N, Rivera H, A deterministic model for repairable item repair rate[J] International Journal of Production.54(1979): 215-221
- [19] Dobos I. Richter K. A Production / recycling model with stationary demand and return rates[J].Central European Journal of Operation Research.2004.11: 35-46.
- [20] Nahmias, Rivera, Managing repairable item inventory systems: A review[D] TIMS Studies in the Management Sciences 16,253-277.
- [21] Richter K, The EOQ repair and waste disposal model with variable setup numbers[J]. European Journal of Operational Research. 1996, 95: 313-324.
- [22] Webster, S., Weng, Z.K. A risk- free perishable item returns policy[J]. Manufacturing and Service Operations Management,2000,2(1):100- 106.
- [23] Guider Jr., V.D.R., Srivastava, R. Inventory buffers in recoverable manufacturing[J]. Journal of Operations Management, 1998,16(5):551- 568.
- [24] Rainer Kleber, Stefan Minner, Gudrun Kiemuler. A continuous time inventory model for a product recovery system with multiple options[J]. International Journal of Production Economics, 2002,79:121-141.
- [25] Cohen, M.A., Nahmias, S., Pierskalla, W.P. A dynamic inventory system with recycling[J]. Naval Research Logistics Quarterly,1980,27(2):289- 296.
- [26] Kelle, P., Silver, E.A. Forecasting the returns of reusable containers[J]. Journal of Operations Management, 1989,8(1):17- 35.
- [27] Mortiz Fleischmann, Roelof Kuik, Rommert Dekker. Controlling inventories with stochastic item returns: A basic model [J].European Journal of Operational Research, 2002,138:63- 75.
- [28] 黄祖庆, 达庆利, 王东东. 逆向物流具有时滞的一个 EOQ 扩展订货模型[J].物流技术, 2004 (5):82-84.
- [29] 黄祖庆, 达庆利.基于逆向物流定期和定量处理的最优库存控制策略研究[J].东南大学学报(自然科学版).2005(5).第 35 卷第 2 期:302-307.
- [30] 益宇鸣.基于逆向物流的库存控制研究[D].上海: 上海海运学院, 2003
- [31] 储洪胜, 王京春, 金以慧.反向物流库存模型控制策略[J].中南工业大学学报(自然科学版), 2003. 4(34): 432-435
- [32] 郝梅玲.逆向物流库存决策研究[D].福建: 福州大学, 2006
- [33] 董甜甜.基于逆向物流的库存控制研究[D].北京: 北京交通大学, 2007

- [34] 袁霄. 多周期逆向物流库存系统中订购决策方法的研究[D].四川: 西南交通大学, 2006
- [35] 夏春玉.绿色物流[M].北京: 中国物资出版社, 2005
- [36] 王长琼.绿色物流[M].北京: 化学工业出版社, 2004
- [37] RevLog.The Ewopean Working group on Reverse Logistics (1998-),
<http://www.fbk.ew.nl/OZ/REVLOG/>
- [38] Fleischmann, M.. Quantitative Models for Reverse Logistics. Lecture Notes in Economics and Mathematical Systems, 2001,vol. 501
- [39] 徐燕.逆向物流管理的研究[D].北京: 对外经济贸易大学, 2004
- [40] 龚花萍, 沈玖玖.逆向物流发展及对策[J].现代物流, 2007{8}: 50-51
- [41] 黄祖庆, 达庆利, 张钦. 逆向物流系统结构研究的现状及展望[J].中国管理科学, 2004(2), Vol.12,No,1: 131-138
- [42] 冷杰.含有逆向物流的库存管理研究[D].四川: 西南交通大学, 2005
- [43] 宋华, 胡左浩.现代物流与供应链管理[M].北京: 经济管理出版社, 2000: 226-227
- [44] 谢如鹤, 罗荣武, 张得志.物流系统规划原理与方法[M].北京: 中国物资出版社, 2004: 121-122
- [45] 杨海荣.现代物流系统与管理[M].北京: 北京邮电大学出版社, 2003: 162-164
- [46] 张可明, 宋伯慧.物流系统分析[M].北京: 清华大学出版社, 北京邮电大学出版社, 2004: 103-108
- [47] 杰里米·夏皮罗.供应链建模[M].北京: 中信出版社, 2005: 350-356
- [48] Fleischmann M, Bloemhof- Ruwaard J, Dekker R, van der Laan E, van Nunen J, Van Wassenhove L. Quantitative models for reverse logistics: a review[J]. European Journal of Operational Research, 1997,103:1
- [49] 何晓兰. 基于逆向供应链的 CM 工发展研究[J].物流平台, 2007, 7: 33-34
- [50] H.M. le Blanc, M.G.C. van Krieken, H.A. Fleuren, H.R. Krikke. Collector Managed Inventory, A proactive planning approach to the collection of liquids coming from end-of-life vehicles.[C]Discussion Paper,2004: 22
- [51] 钱松迪.运筹学[M].清华大学出版社, 1990
- [52] 文平, 努尔泥沙.报童问题及其在管理中的应用[J].昌吉学院学报, 2003, 01
- [53] Dimitrios Vlachos, Rommert Dekker. Return handling options and order quantities for single period products [J]. European Journal of Operational Research, 2003,151:38- 52.
- [54] Simpson, V.P. Optimum solution structure for a repairable inventory problem[J]. Operations Research, 1978,26(2):270- 281.

攻读学位期间取得的研究成果

一、发表论文

1.罗志军,郭咏梅等.基于物流配送需求的枢纽节点LRP模型研究[C].长安大学研究生学术年会论文集.2007:79-82.

2.李建,胡大伟,罗志军.遗传(GA)与模拟退火(SA)组合算法在车辆路线优化中的应用[J].第七届世界华人交通运输学术大会.2006:573-578

3.李惠玲,罗志军等.汽车供应链成本分析[C].长安大学研究生学术年会论文集.2007:101-104

二、参与科研项目

1.山区公路营运客车安全技术研究

2.陕西省国家公路运输枢纽总体规划研究

3.物流教育课题《物流类本科专业人才培养模式探索研究》

致 谢

本文是在我尊敬的导师胡大伟教授的悉心指导和关心下完成的。在三年的研究生学习期间，胡老师严谨的治学态度、求实的工作作风、深厚的学识修养、一丝不苟的敬业精神和平易近人的待人态度一直潜移默化的影响着我。无论在学习还是在生活上，胡老师都给了我很多帮助，不仅教给了我丰富的专业知识，研究本专业问题的技巧和方法，还教会了我很多做人的道理和为人处事的原则，使我终身受益。在此，我向胡老师表示最衷心的感谢和最崇高的敬意！

同时我要感谢在论文的写作过程中给予我帮助和支持的老师、同学以及师弟师妹们，衷心的祝愿他们在以后的人生道路上一帆风顺！

最后我要向我的家人献上我最诚挚的感谢，谢谢他们多年来对我在生活上的支持和学业上的鼓励，使我顺利的完成了本科阶段四年、研究生阶段三年时间的学习和生活。在今后的工作中我一定不辜负他们的期望，再接再厉！