

基于二层规划的供应链多阶响应周期决策模型

马士华¹, 杨文胜¹, 李莉^{1,2}

(1. 华中科技大学管理学院, 武汉 430074; 2. 安徽大学管理学院, 合肥 230039)

摘要: 优化和缩短供应链多阶响应周期是供应链快速响应市场需求, 缩短产品上市周期的有效途径, 也是供应链管理总体目标之一. 全文首先阐明了供应链多阶响应周期的概念, 以核心企业作为协调中心, 建立了供应链整体计划决策机制, 并运用二层规划方法对供应链多阶响应周期进行了建模研究. 最后用实际调研的数据作为一个算例对模型进行了数值演算和验证. 结果表明, 该模型能够协调管理供应链整体利益和节点企业局部利益、合理分配生产时间与物流时间, 为供应链优化和缩短多阶响应周期提供了一个有效的决策工具.

关键词: 决策模型; 多阶响应周期; 二层规划; 供应链

中图分类号: F27

文献标识码: A

文章编号: 1007 - 9807(2004)05 - 0031 - 09

0 引言

近十几年来, 随着日渐激烈的市场竞争压力、市场的全球化和后勤管理量的日益增长, 迫使厂商发展供应链技术以快速响应顾客需要, 缩短产品上市周期; 为了保持竞争力, 也必须尽可能地降低运作成本并改善对顾客的服务质量^[1]. 优化和缩短产品的市场响应周期 (response time) 是供应链管理总体目标之一.

随着供应链管理实践和理论的发展, 在快速、敏捷响应市场需求的研究方面, 从过去单纯强调某一节点企业的响应周期问题, 到研究企业间的集成对响应周期的影响^[2]、公共和延迟策略对响应时间的影响^[3]等, 目前已经注意从供应链整体的角度考虑供应链的响应周期问题^[4]. 20世纪90年代初 Stalk 提出了基于时间的竞争 (time-based competition)^[5] 和时间压缩 (time compression) 等概念^[6], 随后讨论这一主题的文献, 包括定性的描述^[7~9]、案例研究^[10,11] 和相关的模型研究等. 在模型研究方面, Hill 和 Khosla^[12] 建立了一个概念框架模型来讨论减少生产提前期 (lead time) 的问

题, 比较成本与降低提前期的好处, 并提供了几种计算最优提前期的方法; Li^[13] 对基于时间竞争的库存策略进行了研究, 目标是利用库存来最小化配送提前期, 确定了为使库存成本最小的提前期的水平; Kalai 等人^[14] 讨论了最优服务提前期的问题, 目标是研究关于服务速度的竞争结果. 这些文献大多是对供应链响应周期影响因素的分析, 或者是单纯就供应链中节点企业的生产周期或物流周期的优化问题进行研究, 未能从供应链整体上对多阶响应周期中各节点企业的响应子周期以及企业内生产周期与物流周期的协调优化问题进行探讨.

在供应链决策建模研究方面, Cohen 和 Lee^[15] 提出了一个整数规划模型来描述供应链系统的决策行为; Brown^[16] 探讨了多产品的供应链网络体系, 并用混合整数规划模型求解设备能力在各工厂的分配及产品从工厂向顾客的配送问题; 国内一些学者也研究了供应链中的决策优化模型^[17]. 但这些模型多为单层规划模型, 没有统筹考虑供应链整体和具体节点企业之间交互决策的影响关系.

供应链系统在结构上具有典型的递阶结构特

收稿日期: 2003 - 04 - 15; 修订日期: 2004 - 08 - 06.

基金项目: 国家 863 计划资助项目 (2001AA414110); 国家自然科学基金重点资助项目 (70332001).

作者简介: 马士华 (1956 -), 男, 天津人, 博士, 教授, 博士生导师.

征,由多阶的节点企业构成;在供应链的管理过程中,又存在着供应链整体利益和具体节点企业局部利益之间的上下层交互决策的管理关系.各节点企业具有一定的决策权来管理自己的采购、生产和销售,寻求自身利益的最大化;但是从供应链的角度来说,供应链的管理不仅要对各节点企业的生产和物流进行控制和安排,还要根据各节点企业的生产和物流情况来确定整体供应链的决策目标和方案,进而找到一个均衡点,使各方的综合利益都尽可能地达到最大.基于这种情况,本文利用二层规划(bi-level programming)的方法描述供应链多阶响应周期分配的交互决策过程,构建以供应链主体——核心企业作为供应链整体计划、控制与协调中心的上层决策者、各节点企业作为具有相对自主权下层决策者的运作管理机制,并基于二层规划对供应链多阶响应周期进行建模研究,希望在缩短和优化供应链多阶响应周期的同

时,在供应链整体利益和节点企业局部利益的协调分配上获得较好的解决方案.

1 供应链多阶响应周期

大多数产品生产过程可以描绘为一个多阶系统.多阶系统的各生产阶段分别履行产品的加工、装配、运输,及其它的价值增值的过程,每一生产阶段的输出作为后生产阶段的输入,例如电子和汽车装配系统、半导体生产系统、食品加工和包装系统等.供应链是在相互关联的部门或业务伙伴之间所发生的物流、资金流和信息流,覆盖从产品(或服务)设计、原材料采购、制造、包装到交付给最终用户的全过程^[18].因而,就产品生产从原材料到最终交付到用户的整个供应链的全过程来看,供应链是一个多阶的生产供应过程,也即供应链多阶结构.其简化模型如图1所示.

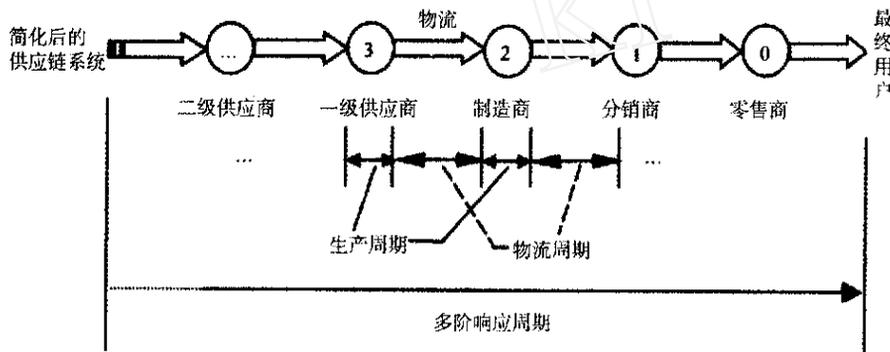


图1 供应链多阶响应周期模型

Fig. 1 Supply chain multi-stage response time model

一个供应链的不同阶段上有许多不同的企业,站在满足最终用户需求的角度看,要经过整个供应链的所有阶段才能向最终用户提供其所需的产品.因此,其响应周期应该是供应链所有阶段的生产周期和物流周期的总和,称之为多阶响应周期.多阶响应周期是供应链全过程的积累效应,由供应链上不同阶段的企业响应子周期构成的,每一个具有独立功能的节点企业所消耗的时间为一个子周期.定义每个节点企业的响应子周期包含该企业在产品生产过程中所消耗的生产周期和在采购、库存和运输等物流过程中所消耗的物流周期.

2 供应链二层决策机制

供应链实质上是建立在一系列自利的经济人间的契约之上的委托代理关系链,供应链各个环节存在着不同的能力条件和资源约束,因而从委托代理理论的角度看,供应链并非是一个统一的追求利益最大化的经济实体.长期以来,在图1所示的供应链多阶模型中,运作控制的主体是各个企业,在企业内部也按照各个部门对运作职能进行划分,这就使得各个企业乃至企业内的各个部门成为自利的代理人,因此,无法避免各自在

追求自身利益最大化的过程中忽视甚至损害整体利益。另一方面，近来，伴随着经济环境不确定性的增加，业界已经普遍认识到运作活动应该在业务活动的整个领域更多地被集成^[19,20]，进而在运作集成的基础上达到供应链整体的协调、同步运作，缩短供应链多阶响应周期和降低总成本，提高供应链竞争力，并最大化供应链整体利益。

为了解决上述供应链系统运作过程中存在的利益矛盾，需要在运作管理中引入一种协调决策机制，以便在跨越整个供应链的信息与资源共享的基础上，实现对供应链整体运作有效地计划、协调、调度和控制。

文献[21]提出了一种在供应链相关的企业之间加入协调决策中心的运作管理机制，供应链各协作企业间通过决策中心的协调协商实现经营过程，并提出了供应链运作的基于时间、费用的优化模型^[22]，但该模型只是从供应链整体利益角度进

行优化，没能充分考虑各节点企业利益的优化。事实上，各节点企业作为自利的经济人不考虑自身利益的整体利益最大化是不现实的。

在实际的供应链运作过程中，核心企业作为供应链的设计、组建和经营的主体首先从供应链整体利益优化的角度对各节点企业的利益分配的可行区域做出决策，然后各节点企业以这一决策为参量，根据自己的利益优化目标在可行区域内做出局部优化决策，并将自己的决策反馈给核心企业，核心企业在节点企业局部优化决策的基础上，在可行区域内再做出整体的优化决策。整个决策过程是一个以核心企业为主导，并与各节点企业进行交互的协商决策过程。

因此，集成供应链运作管理实质上是一个以核心企业作为供应链整体计划、协调、调度和控制中心的上层决策者、各节点企业作为具有相对自主权的下层决策者构成的二层决策机制。其结构模型如图 2 所示。

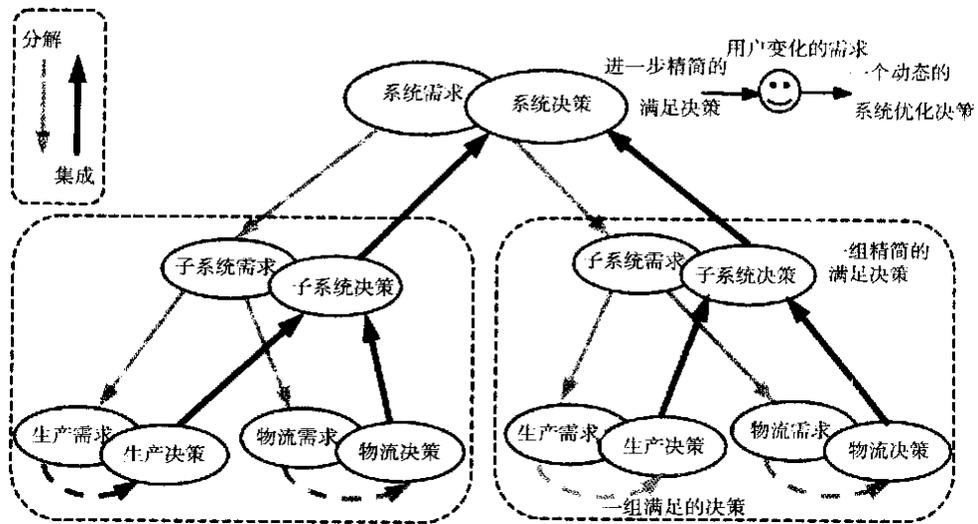


图 2 供应链二层决策机制模型

Fig. 2 Model of supply chain bi-level decision structure

这种供应链的二层决策机制具有以下特点：
 供应链各节点企业是平等、自治的，为达到一个共同的目标自发地相互协作；供应链是分层管理的，各层决策者依次做出决策，下层服从上层，但下层有相当的自主权；各层决策者有各自不同的目标，这些目标可能是相互矛盾的；各层决策者各自控制一部分决策变量，以优化各自的目标；上层决策者优先做出决策，下层决策者在为

优化自己的目标而选择策略时，不能违背上层的决策；上层的决策可能影响下层的策略集，因而部分地影响下层目标的达成，但上层不能完全控制下层的决策，在上层决策允许的范围内下层有自主决策权；下层的决策不但决定着自身目标的达成，也影响上层目标的达成。因此，上层在选择策略以优化自己的目标达成时，必须考虑到下层可能采取的策略对自己的不利影响；各层决

策者的容许策略集通常是不可分离的,他们往往形成一个相关联的整体; 供应链存在一个核心企业,规划、协调、监督各节点企业任务的执行,以确保相互之间的协作及冲突的解决.

3 供应链多阶响应周期二层规划模型

缩短和优化供应链多阶响应周期,是一个随着用户需求的变化,供应链整体如何合理地进行响应时间的分配和调整的决策问题.在最终用户供货时间的要求下,依据供应链各节点企业能力、资源等约束条件,确定响应时间分配方案,在此基础上,通过模型计算,给出各段响应时间的合理安排.这里的合理安排,既不是响应时间越长越好,也不是响应时间越短越好,而是通过节点企业之间响应时间及节点企业内部生产时间和物流时间的合理分配使得供应链整体及各节点企业的利益均达到最佳或较佳的优化过程.

3.1 二层规划模型的建立

基于订货型生产(MTO)方式的供应链多阶响应周期模型如图1所示,二层决策结构如图2所示.一般,二层规划模型由两个子模型(P₁)和(P₂)组成,其中(P₁)称为上层规划模型,(P₂)称为下层规划模型.

在客户要求供货时间即供应链多阶响应周期确定的情况下,上层规划(P₁)可以描述为供应链决策部门根据能力、约束等条件,确定各节点企业响应子周期的分配方案,使供应链总体收益最大;而下层规划(P₂)则描述供应链各节点企业在上层决策所确定的本企业响应周期时间范围内,如何合理安排其生产时间和物流时间以获得自身收益的最大.具体模型如下.

上层规划模型

$$(P_1) \quad \max F = \sum_{i=0}^n F_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)}) \quad (1)$$

$$\text{s. t.} \quad x_1^{(i)} \leq x^{(i)} \leq b^{(i)} \quad (2)$$

$$\sum_{i=0}^n x^{(i)} \leq b \quad (3)$$

$$x^{(i)} \geq 0, \text{且为整数} \quad (4)$$

其中: F 表示供应链总体收益; $F_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ 是节点企业 i 的收益 ($i = 0, 1, 2, \dots, n$. 其中 $i = 0$

代表核心企业); $x^{(i)}$ 为上层决策变量,代表供应链节点企业 i 的响应子周期, $x^{(i)}$ 为非负整数, $[a^{(i)}, b^{(i)}]$ 是其响应周期分配区间; $\sum_{i=0}^n x^{(i)}$ 为供应链多阶响应周期, $[a, b]$ 是客户要求的响应周期范围; $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}$ 为下层决策变量,分别表示节点企业 i 的生产周期和物流周期.

式(1) 上层目标函数是从供应链整体的角度追求收益最大.式(2) 是保证节点企业 i 的响应子周期必须在分配的时间范围内的约束.式(3) 是为了满足客户要求的响应时间约束.式(4) 是整数约束.

模型(P₁) 为一整数规划, $x^{(i)}$ 在给定 $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}$ 和 $F_i(\cdot)$ 的具体表达式的情况下,可采用整数模拟退火算法求解.特别指出的是(P₁) 中的 $x_1^{(i)}, x_2^{(i)}$ 和 $F_i(\cdot)$ 由下层规划(P₂) 求得和给出.

下层规划模型

$$(P_2) \quad \max F_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)}) = q_i I_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)}) - q_i [p_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)}) - f_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)})] \quad (5)$$

$$\text{s. t.} \quad C_1^{(i)} \leq x_1^{(i)} \leq D_1^{(i)} \quad (6)$$

$$C_2^{(i)} \leq x_2^{(i)} \leq D_2^{(i)} \quad (7)$$

$$x_1^{(i)} + x_2^{(i)} = x^{(i)} \quad (8)$$

$$x_1^{(i)} \geq 0, \text{且为整数} \quad (9)$$

$$x_2^{(i)} \geq 0, \text{且为整数} \quad (10)$$

其中, q_i 为订货批量,当用户定单下达以后,从整体供应链角度,可将 q_i 视为常量; $I_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ 为单位批量收益函数,为单位批量价格函数 $p_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ 与单位批量费用函数 $f_i(x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)})$ 之差; $p_i(\cdot), f_i(\cdot)$ 分别与 $x^{(i)}, x_1^{(i)}, x_2^{(i)}$ 相关,其数量模型可以应用回归分析方法,根据每个企业的具体价格 - 时间、费用 - 时间数据拟合求得; $[C_1^{(i)}, D_1^{(i)}], [C_2^{(i)}, D_2^{(i)}]$ 分别为节点企业 i 的生产周期和物流周期的时间分配区间.

式(5) 下层目标函数是从供应链节点企业的角度追求收益最大.式(6) 和式(7) 分别表示生产周期和物流周期必须满足所分配的时间区间的约束;式(8) 是保证生产周期与物流周期之和必须在上层决策者所分配的节点企业响应子周期范围内的约束.式(9) 和式(10) 是非负整数约束.

3.2 单位批量收益函数

供应链各节点企业单位批量收益函数 $I_i(\cdot)$ 由单位批量价格函数 $p_i(\cdot)$ 和单位批量费用函数 $f_i(\cdot)$ 组成。

单位批量价格函数 $p_i(\cdot)$ 与 $x^{(i)}$ 、 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$ 相关,对于给定的 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$, 响应周期 $x^{(i)}$ 越短,单位批量定价 $p_i(\cdot)$ 越高;反之, $x^{(i)}$ 越长, $p_i(\cdot)$ 越低,两者之间呈负相关关系,如图 3 所示。同理, $p_i(\cdot)$ 与 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$ 亦呈负相关关系。

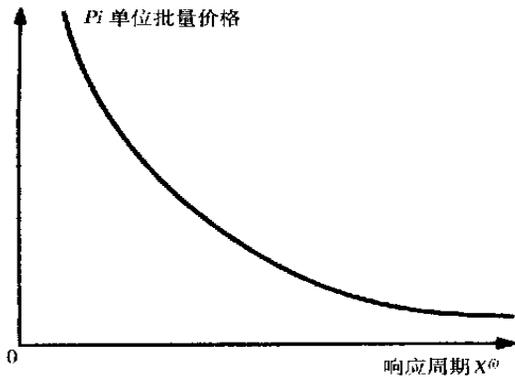


图 3 单位批量价格与响应周期的相关关系示意图
Fig. 3 Correlation of unit batch price and response-time

单位批量费用函数 $f_i(\cdot)$ 也与 $x^{(i)}$ 、 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$ 相关,响应周期的长短以及制造周期和物流周期时间的不同分配,都会对企业发生费用产生影响,对于给定的 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$, 考查 $f_i(\cdot)$ 与 $x^{(i)}$ 的相关关系时,可用图 4 示意。随着响应周期 $x^{(i)}$ 的增加,企业所发生费用 $f_i(\cdot)$ 首先会快速地降低,当达到某一平衡点时,随后又会缓慢地增加。同理可分别考查 f_i 与 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$ 的关系,它们均有如图 4 相似的相关关系。

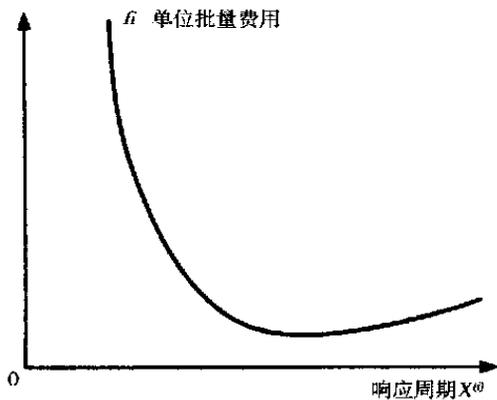


图 4 单位批量费用与响应周期的相关关系示意图
Fig. 4 Correlation of unit batch cost and response-time

单位批量收益函数 $I_i(\cdot)$ 为单位批量价格 $p_i(\cdot)$ 与费用 $f_i(\cdot)$ 的差值。由于单位批量价格 $p_i(\cdot)$ 、费用 $f_i(\cdot)$ 与响应时间 $x^{(i)}$ 的关系分别如图 3、图 4 所示,且在响应时间 $x^{(i)}$ 的可行集范围内必然满足单位批量价格大于单位批量费用,因此,单位批量价格与费用必然相交。对于固定的 $1^{(i)}$ 、 $2^{(i)}$, 单位批量收益函数 $I_i(\cdot)$ 与响应周期 $x^{(i)}$ 的关系如图 5 所示。

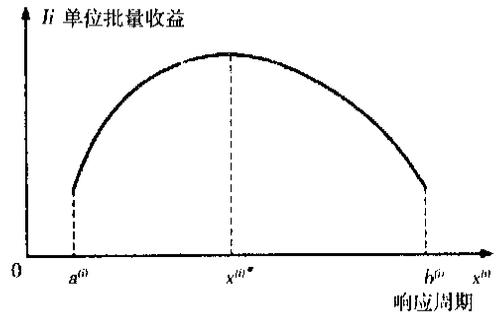


图 5 单位批量收益与响应周期的相关关系示意图
Fig. 5 Correlation of unit batch profit and response-time

由图 5 可知,单位批量收益函数 $I_i(\cdot)$ 在 $x^{(i)}$ 可行区间 $[a^{(i)}, b^{(i)}]$ 内为一凸函数,因此,必然存在一点 $x^{(i)*}$,使得单位批量收益达到最大,进而确定 $1^{(i)*}$ 、 $2^{(i)*}$,使得节点企业效益最大化。

由于供应链各节点企业生产能力、资源等约束条件的不同,其价格 - 时间、费用 - 时间曲线可能是各不相同的,可以根据各节点企业具体的价格 - 时间、费用 - 时间数据,通过回归分析方法,得到形如式 (11)、(12) 的价格函数和费用函数模型。

$$p_i(x^{(i)}, 1^{(i)}, 2^{(i)}) = m_0^{(i)} + m_1^{(i)} / x^{(i)} + m_2^{(i)} / 1^{(i)} + m_3^{(i)} / 2^{(i)} \quad (11)$$

$$f_i(x^{(i)}, 1^{(i)}, 2^{(i)}) = n_0^{(i)} + n_1^{(i)} x^{(i)} + n_2^{(i)} x^{(i)2} + n_3^{(i)} 1^{(i)} + n_4^{(i)} 1^{(i)2} + n_5^{(i)} 2^{(i)} + n_6^{(i)} 2^{(i)2} \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (12)$$

式 (11)、(12) 中, $m_0^{(i)}$ 、 $m_1^{(i)}$ 、 $m_2^{(i)}$ 、 $m_3^{(i)}$ 以及 $n_0^{(i)}$ 、 $n_1^{(i)}$ 、 $n_2^{(i)}$ 、 $n_3^{(i)}$ 、 $n_4^{(i)}$ 、 $n_5^{(i)}$ 、 $n_6^{(i)}$ 分别为供应链节点企业 i 的价格函数与费用函数的回归系数。

综合模型 (P₁)、(P₂) 和式 (11)、(12), 可知上述所建立的二层决策模型是一类非线性的二层整数规划问题。该模型可以通过对上层规划 (P₁) 采用整数模拟退火算法^[23], 对下层规划 (P₂) 采用离散搜索算法^[24] 求解。

4 模型算例

在某机械产品制造过程中,由核心装配企业、1阶零部件供应企业和2阶材料供应企业组成递阶供应链结构.已知供应链各节点企业在该产品制造中的单位批量响应时间情况及订货批量结构关系如表1和表2.

表1 供应链某产品订货批量关系表

Table1 Order batch relation among node firms

	核心装配企业	1阶供应企业	2阶供应企业
订货批量 q_i	1	2	6

表2 供应链某产品单位批量响应时间表

Table 2 Unit batch response-time of node firms

响应时间 / d		上下限	
		下 限	上 限
供应链多阶响应周期		68	101
核心 装配 企业	响应周期 $x^{(0)}$	12	23
	生产周期 $1^{(0)}$	10	13
	物流周期 $2^{(0)}$	2	5
1阶 供应 企业	响应周期 $x^{(1)}$	25	36
	生产周期 $1^{(1)}$	22	26
	物流周期 $2^{(1)}$	3	6
2阶 供应 企业	响应周期 $x^{(2)}$	31	42
	生产周期 $1^{(2)}$	25	30
	物流周期 $2^{(2)}$	6	9

根据供应链各节点企业单位批量产品报价与单位批量产品费用的历史数据(详见附录表3),按式(11)、(12)建立单位批量的价格函数和费用函数回归模型如下:

$$\begin{aligned}
 p_0(x^{(0)}, 1^{(0)}, 2^{(0)}) &= 136.470 + \frac{746.661}{x^{(0)}} + \frac{1240.918}{1^{(0)}} + \frac{151.173}{2^{(0)}} \\
 p_1(x^{(1)}, 1^{(1)}, 2^{(1)}) &= -379.415 + \frac{3711.906}{x^{(1)}} + \frac{8511.722}{1^{(1)}} + \frac{230.353}{2^{(1)}}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 p_2(x^{(2)}, 1^{(2)}, 2^{(2)}) &= -87.766 + \frac{2799.457}{x^{(2)}} + \frac{1765.109}{1^{(2)}} + \frac{208.610}{2^{(2)}} \\
 f_0(x^{(0)}, 1^{(0)}, 2^{(0)}) &= 2029.283 - 90.922x^{(0)} - 174.510 1^{(0)} + 11.741(1^{(0)})^2 - 18.602 2^{(0)} + 6.355(2^{(0)})^2 \\
 f_1(x^{(1)}, 1^{(1)}, 2^{(1)}) &= 5634.899 - 19.068x^{(1)} + 0.341(x^{(1)})^2 - 402.442 1^{(1)} + 7.834(1^{(1)})^2 - 44.907 2^{(1)} + 4.386(2^{(1)})^2 \\
 f_2(x^{(2)}, 1^{(2)}, 2^{(2)}) &= 1418.922 - 60.311x^{(2)} + 0.829(x^{(2)})^2 - 27.638 1^{(2)} + 0.503(1^{(2)})^2 + 23.381 2^{(2)} - 1.818(2^{(2)})^2
 \end{aligned}$$

故按 (P_1) (P_2) 建立的二层规划模型为

$$\begin{aligned}
 \min_x F(x,) &= 1 \times [136.470 + \frac{746.661}{x^{(0)}} + \frac{1240.918}{1^{(0)}} + \frac{151.173}{2^{(0)}} - 2029.283 + 90.922x^{(0)} + 174.510 1^{(0)} - 11.741(1^{(0)})^2 + 18.602 2^{(0)} - 6.355(2^{(0)})^2] + \\
 &2 \times [-379.415 + \frac{3711.906}{x^{(1)}} + \frac{8511.722}{1^{(1)}} + \frac{230.353}{2^{(1)}} - 5634.899 + 19.068x^{(1)} - 0.341(x^{(1)})^2 + 402.442 1^{(1)} - 7.834(1^{(1)})^2 + 44.907 2^{(1)} - 4.386(2^{(1)})^2] + \\
 &6 \times [-87.766 + \frac{2799.457}{x^{(2)}} + \frac{1765.109}{1^{(2)}} + \frac{208.610}{2^{(2)}} - 1418.922 + 60.311x^{(2)} - 0.829(x^{(2)})^2 + 27.638 1^{(2)} - 0.503(1^{(2)})^2 - 23.381 2^{(2)} + 1.818(2^{(2)})^2]
 \end{aligned}$$

价格函数和费用函数各式中回归系数下括号中数值为该系数的 t 检验值。

$$\begin{aligned}
 & \text{s. t.} \begin{cases} 12 & x^{(0)} & 23 \\ 25 & x^{(1)} & 36 \\ 31 & x^{(2)} & 42 \\ 68 & x^{(i)} & 101 \end{cases} \\
 & m_{(0)} x F_0(x^{(0)}, x^{(0)}) = 1 \times \left[136.470 + \frac{746.661}{x^{(0)}} + \right. \\
 & \quad \left. \frac{1240.918}{x^{(0)}} + \frac{151.173}{x^{(0)}} - 2029.283 + \right. \\
 & \quad 90.922x^{(0)} + 174.510x^{(0)} - \\
 & \quad \left. 11.741(x^{(0)})^2 + 18.602(x^{(0)})^2 - \right. \\
 & \quad \left. 6.355(x^{(0)})^2 \right] \\
 & \text{s. t.} \begin{cases} 10 & x^{(0)} & 13 \\ 2 & x^{(0)} & 5 \\ x^{(0)} + x^{(0)} & x^{(0)} \end{cases} \\
 & m_{(1)} x F_1(x^{(1)}, x^{(1)}) = 2 \times \left[-379.415 + \right. \\
 & \quad \left. \frac{3711.906}{x^{(1)}} + \frac{8511.722}{x^{(1)}} + \right. \\
 & \quad \left. \frac{230.353}{x^{(1)}} - 5634.899 + 19.068x^{(1)} - \right. \\
 & \quad \left. 0.341(x^{(1)})^2 + 402.442x^{(1)} - \right. \\
 & \quad \left. 7.834(x^{(1)})^2 + 44.907x^{(1)} - 4.386(x^{(1)})^2 \right] \\
 & \text{s. t.} \begin{cases} 22 & x^{(1)} & 26 \\ 3 & x^{(1)} & 6 \\ x^{(1)} + x^{(1)} & x^{(1)} \end{cases} \\
 & m_{(2)} x F_2(x^{(2)}, x^{(2)}) = 6 \times \left[-87.766 + \right. \\
 & \quad \left. \frac{2799.457}{x^{(2)}} + \frac{1765.109}{x^{(2)}} + \frac{208.610}{x^{(2)}} - \right. \\
 & \quad \left. 1418.922 + 60.311x^{(2)} - 0.829(x^{(2)})^2 + \right.
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & \left. 27.638(x^{(2)})^2 - 0.503(x^{(2)})^2 - \right. \\
 & \left. 23.381(x^{(2)})^2 + 1.818(x^{(2)})^2 \right] \\
 & \text{s. t.} \begin{cases} 25 & x^{(2)} & 30 \\ 6 & x^{(2)} & 9 \\ x^{(2)} + x^{(2)} + x^{(2)} \end{cases} \\
 & \text{通过在微机上用 Matlab 对算法编程求解得到} \\
 & F^* = 738.005, x^{(0)} = 19, x^{(1)} = 28, x^{(2)} = 33 \\
 & F_0^* = 181.865, x_1^{(0)} = 12, x_2^{(0)} = 4 \\
 & F_1^* = 133.32, x_1^{(1)} = 24, x_2^{(1)} = 4 \\
 & F_2^* = 422.82, x_1^{(2)} = 27, x_2^{(2)} = 6
 \end{aligned}$$

算例结果说明,该二层规划模型能够实现供应链多阶响应周期的协调优化,可以为供应链各节点企业响应周期及企业内生产周期与物流周期的合理安排提供一个有效的计算工具.

5 结束语

为了在理论上对供应链多阶响应周期,特别是各节点企业响应子周期及其内部生产周期和物流周期合理分配的优化决策过程进行描述,本文在构建了以核心企业作为供应链整体计划、控制、协调中心的上层决策者,各节点企业作为具有相对自主权的下层决策者的二层决策机制的基础上,提出了基于二层规划的供应链多阶响应周期决策模型,并通过实际调研数据对模型进行了数值演算和验证.结果表明,该模型符合供应链实际运作管理中的优化决策过程,能够在缩短和优化供应链多阶响应周期的同时,为协调管理供应链整体利益和节点企业局部利益,合理分配生产时间与物流时间,及时快速响应市场需求提供了一个有效的决策工具.

参考文献:

[1] Thomas D J, Griffin P M. Coordinated supply chain management[J]. European Journal of Operations Research, 1996, 94: 1—15.

[2] Kim I, Tang C S. Lead time and response time in a pull production control system[J]. European Journal of Operational Research, 1997, 101: 474—485.

[3] Ma S, Wang W, Liu L. Commonality and postponement in multistage assembly systems[J]. European Journal of Operations Research, 2002, 142: 523—538.

[4] Ettl M, Feigin G E, Lin G, et al. A supply network model with base-stock control and service requirements[J]. Operations Research, 2000, 48, 216—232.

- [5] Stalk G J. Time—the next source of competitive advantage[J]. *Harvard Business Review*, 1988, 66(4): 41—51.
- [6] Stalk G J, Hout T M. *Competing Against Time: How Time Based Competition is Reshaping Global Markets*[M]. New York: Free Press, 1990. 52—63.
- [7] Daniels N C, Essaiades G. Time-Based Competition[M]. London: Economic Intelligence Unit, 1993. 98—104.
- [8] Stalk G J, Webber A M. Japan's dark side of time[J]. *Harvard Business Review*, 1993, 71(4): 93—102.
- [9] Von Braun C F. The acceleration trap in the real world[J]. *Sloan Management Review*, 1991, 32(4): 43—52.
- [10] Dumaine B. How managers can succeed through speed[J]. *Fortune*, 1989, 119(4): 54—59.
- [11] Lindsley W B, Blackburn J D, Elrod T. Time and product variety competition in the book distribution industry[J]. *Journal of Operations Management*, 1991, 10(3): 344—362.
- [12] Hill A V, Khosla I S. Models for optimal lead time reduction[J]. *Production and Operations Management*, 1992, 1(2): 185—197.
- [13] Li L. The role of inventory in delivery-time competition[J]. *Management Science*, 1992, 38(2): 182—197.
- [14] Kalai E, Kamien M I, Rubinovitch M. Optimal service speed in a competitive environment[J]. *Management Science*, 1992, 38(8): 1154—1163.
- [15] Cohen M A, Lee H L. Strategic analysis of integrated production-distribution system: Model and methods[J]. *Operations Research*, 1988, 36(2): 216—228.
- [16] Brown G G, Graves G W, Honczarenko M D. Design and operation of a multicommodity production / distribution system using primal goal decomposition[J]. *Management Science*, 1987, 33(11): 1469—1479.
- [17] 赵晓煜, 汪定伟. 供应链中二级分销网络的优化设计模型[J]. *管理科学学报*, 2001, 4(4): 22—26.
Zhao Xiaoyu, Wang Dingwei. Optimization model for bi-level distribution network design in supply chain management[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2001, 4(4): 22—26. (in Chinese)
- [18] 马士华, 林勇, 陈志祥. 供应链管理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 40—45.
Ma Shihua, Lin Yong, Chen Zhixiang. *Supply Chain Management* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 40—45. (in Chinese)
- [19] Xu K, Yan D, Philip T E. Towards better coordination of the supply chain[J]. *Transportation Research Part E*, 2001, 37(1): 35—54.
- [20] Zimmer K. Supply chain coordination with uncertain just-in-time delivery[J]. *International Journal of Production Economics*, 2002, 77(1): 1—15.
- [21] 柴跃廷, 韩坚, 李芳芸. 基于协调中心的敏捷供需链系统的研究[J]. *计算机集成制造系统——CIMS*, 1998, 4(4): 26—29.
Chai Yueting, Han Jian, Li Fangyun. Research of agile supply chain based on coordination center[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 1998, 4(4): 26—29. (in Chinese)
- [22] 田春华, 柴跃廷, 刘义. 供需链组织设计的优化算法[J]. *计算机集成制造系统——CIMS*, 2002, 8(10): 797—803.
Tian Chunhua, Chai Yueting, Liu Yi. Optimization algorithm in organizational design of supply chain[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2002, 8(10): 797—803. (in Chinese)
- [23] 李磊, 王春峰, 滕春贤. 一类非线性两级混合整数规划问题的全局最优解的近似算法[J]. *系统工程理论与实践*, 2002, (4): 19—25.
Li Lei, Wang Chunfeng, Teng Chunxian. The approximate algorithm of global optimization for a sort of nonlinear bilevel mixed integer programming problem[J]. *System Engineering Theory & Application*, 2002, (4): 19—25. (in Chinese)
- [24] 吴清烈, 徐南荣. 求解一类非线性整数规划的新方法[J]. *控制与决策*, 1997, 12(2): 97—102.
Wu Qinglie, Xu Nanrong. A new method for solving a class of nonlinear integer programming problems[J]. *Control and Decision*, 1997, 12(2): 97—102. (in Chinese)

Response-time optimization of supply chain with multi-stage based on bi-level programming

MA Shi-hua¹, YANG Wen-sheng¹, LI Li^{1,2}

1. School of Management, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China;

2. School of Management, Anhui University, Hefei 230039, China

Abstract: Optimizing and shortening multi-stage response-time. As one of supply chain management goals, is an effective approach to supply chain to respond rapidly the demand in market and to reduce lead time. Firstly, the concept of supply chain multi-stage response time was illustrated. Supposed the core firm is a coordinating center, this paper constructed a decision-making mechanism, and developed a bi-level programming approach to model the supply chain multi-stage response-time. Then, the model was tested and verified by analyzing a practical case. The results shows that the model can coordinate the whole supply chain's benefit, local node firm's benefit, allocate production time and logistics time rationally, and is an effective decision-making aided tool for supply chain to optimize and shorten multi-stage response time.

Key words: decision-making model; multi-stage response time; bi-level programming; supply chain

附录:

表 3 供应链各节点企业单位批量产品报价与费用历史数据表

Table 3 Unit batch price and cost of supply chain node firms

序 列 号	核心制造企业					1 阶供应企业					2 阶供应企业				
	响应时间/d			价格/万元	费用/万元	响应时间/d			价格/万元	费用/万元	响应时间/d			价格/万元	费用/万元
	X0	Y10	Y20	P0	F0	X1	Y11	Y21	P1	F1	X2	Y12	Y22	P2	F2
1	12	10	2	40.0	37.070 9	25	22	3	24.0	21.267 8	31	25	6	10.8	4.567 8
2	13	10	3	37.5	27.832 5	26	23	3	20.8	16.749 8	32	26	6	10.3	3.517 4
3	14	10	3	36.3	22.253 2	27	24	3	18.8	12.566 5	33	27	6	9.8	2.786 3
4	15	11	3	34.6	18.597 6	28	24	4	16.8	10.843 4	34	27	7	8.8	2.012 1
5	16	11	4	33.2	16.456 2	29	25	4	16.5	9.826 7	35	28	7	8.4	1.985 4
6	17	12	4	31.9	15.811 5	30	25	5	16.0	9.099 2	36	29	7	8.2	1.850 0
7	18	12	4	31.5	15.297 5	31	25	5	14.5	9.412 2	37	29	7	7.6	1.933 4
8	19	12	4	31.0	15.423 5	32	25	5	14.2	9.639 7	38	29	8	7.4	2.000 4
9	20	13	4	30.8	16.012 7	33	25	5	13.8	9.755 3	39	29	8	7.3	2.101 4
10	21	13	4	30.5	16.754 4	34	26	5	12.5	9.964 4	40	30	9	6.5	2.195 4
11	22	13	5	30.2	17.521 7	35	26	6	12.2	10.428 7	41	30	9	6.2	2.629 4
12	23	13	5	30.0	18.335 6	36	26	6	12.0	11.144 4	42	30	9	6.0	3.253 4