

文章编号: 1003-207(2005)02-0088-07

# 基于 DE- APIOBPCS 策略的牛鞭效应和库存方差

罗 卫<sup>1,2</sup>, 张子刚<sup>1</sup>, 欧阳明德<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学管理学院, 湖北 武汉 430074; 2. 湖北工业大学管理学院, 湖北 武汉 430064)

摘 要: 本文就一般补充规则即 APIOBPCS 策略, 从控制理论的角度, 推导出牛鞭效应的一个分析表达式, 由该式知道, 采用增大预测平均时间和库存差异(或者渠道差异)增益以及减少生产提前期的控制手段, 可以减少牛鞭效应, 本文还推导出库存方差的一个分析表达式, 把它与牛鞭效应分析表达式一起使用时, 就两种方差之间一系列权重值, 讨论了牛鞭效应和库存方差之间的平衡, 基于这种平衡, 生产和库存控制者可以设计一些恰当的供应链系统。

关键词: 牛鞭效应; 供应链; z- 变换; APIOBPCS

中图分类号: C931 文献标识码: A

## 1 引言

牛鞭效应是供应链中由客户端向生产商回溯的过程的, 需求波动传递放大的现象, 这种效应影响供应链管理过程中的生产、库存、物流和运输效率。Lee 等人<sup>[1]</sup>指出牛鞭效应的发生存在五种原因: 非零提前期、需求信号处理、价格变动、理性和博弈以及批量订购, 人们证实目前实际供应链中的其它牛鞭效应的发生可以归于上述五种原因。到目前为止牛鞭效应的研究工作主要集中在这样几个方面, 即牛鞭效应的存在性; 牛鞭效应的量化; 牛鞭效应的弱化及其稳定性优化。关于牛鞭效应存在性问题的研究文献可参见文献[1, 2], 关于牛鞭效应量化的研究文献参见文献[3, 4], 牛鞭效应的优化问题, 是指在供应链牛鞭效应的影响下, 如何采用一种优化控制策略, 使供应链系统生产、订购和库存稳定, 从整体上优化供应链系统在生产调整、订购和库存补充(或者缺货)成本<sup>[2, 5]</sup>。

牛鞭效应的量化是指对于供应链中供应、制造、分销和零售各个阶段订购放大的定量描述, 目前见诸于文献中对牛鞭效应量化的方法不外乎两种, 一种是统计分析方法<sup>[3]</sup>, 另一种是控制理论方法<sup>[4, 5]</sup>。近来, 有学者用式(1)所定义的方差比来量化牛鞭效应<sup>[3]</sup>, 其中  $\sigma_0$  代表顾客向供应商提出的订购方差,

$\sigma_D$  代表顾客的销售额或者需求量方差,  $\mu_0$  代表顾客向供应商提出的订购均值,  $\mu_D$  代表顾客的销售额或者需求量均值。在式(1)中, 在很长一段时间内, 当系统的输入是稳定的随机信号且系统为线性系统时, 这里可以认为  $\mu_0 = \mu_D$ , 式(1)中的均值  $\mu$  可以消去。

$$\text{牛鞭} = VR_0 = (\sigma_0^2 / \mu_0) / (\sigma_D^2 / \mu_D) = \sigma_0^2 / \sigma_D^2 \quad (1)$$

方差比 VR 还可以用来量化式(2)描述的实际库存 AINV 的波动, 其中的平均库存水平大小可以任意假定, 因此库存均值同样可以从式(2)中消去。

$$\text{库存方差放大率} = VR_{AINV} = \sigma_{AINV}^2 / \sigma_0^2 \quad (2)$$

John 等人所建立的自动渠道的、基于库存和订购的生产控制系统 (APIOBPCS, Automated Pipeline, Inventory and Order Based Production Control System)<sup>[6]</sup> 是用来控制供应链中生产或分销订购的一种普遍补充策略, 从本质上说, 它包含在 IOBPCS (Inventory and Order Based Production Control System) 策略集中<sup>[7]</sup>。APIOBPCS 策略在实际生产和库存控制领域应用的例子很多, APIOBPCS 策略可以用来描述人们实际玩啤酒游戏时的生产和库存补充行为<sup>[8]</sup>, 通过设定 APIOBPCS 策略控制参数, 它可以描述精细、敏捷以及精细和敏捷混合等一系列供应链的生产和库存补充行为, 它是订购适当 (order-up-to) 策略及其变体的一般情形<sup>[4]</sup>, Deziel 和 Eilon 研究了 APIOBPCS 策略的一种重要情形即 DE- APIOBPCS 策略<sup>[9]</sup>。

本文所做的工作是当输入是独立的并且同分布的随机信号时, 证明系统脉冲响应的平方和等于输

收稿日期: 2004-06-07; 修订日期: 2005-03-02

作者简介: 罗卫 (1964-), 男 (汉族), 武汉市人, 湖北工业大学管理学院副教授, 华中科技大学管理学院在读博士研究生, 研究方向: 决策理论与方法、物流与供应链管理。

出方差与输入方差之比。就 APIOBPCS 策略的重要变体即 DE- APIOBPCS 策略, 利用控制理论框图、传递函数和  $z^{-1}$  变换, 推导出牛鞭效应和库存方差的分析表达式, 提出供应链牛鞭效应和库存方差的控制理论方法, 其本质是如何控制一些关键参数, 来减少牛鞭效应和库存方差, 并且就它们之间的平衡进行了简要讨论。

## 2 生产调整成本和库存成本的平衡

Baganha 和 Cohen 指出: “当需求沿着供应链客户端向上游供应商传递时, 由于需求变动性不断增大, 库存管理策略可能起到了一种不稳定作用”, 否则, “无法解释供应链各阶段为什么投资建立库存(它们建立库存的一个主要理由是, 库存可以作为缓冲器吸收需求变动, 起到稳定物流的作用)”<sup>[2]</sup>, 换句话说, 库存应该起到平稳物流的作用, 但是, 市场需求变动为什么不是减弱而是放大呢? 如果通过常用的控制理论技术恰当地设计生产和库存控制策略, 那么库存对需求变动应该起到一种稳定作用, 库存经常之所以没有起到稳定作用, 这是由于生产库存管理者不恰当地设计了这些控制策略<sup>[2]</sup>。

要想设计良好的生产和库存控制策略, 需要解决的问题是: 在不增大库存成本, 要使生产调整成本最少, 那么生产率可以平滑到什么程度? 这属于生

产调整成本和库存成本之间的平衡问题。如果使用完全平准化生产率(即采用平准化生产策略), 那么供应链各阶段库存波动就会很大, 进而产生很大的库存成本; 反之, 如果希望供应链各阶段库存波动最小(即采用依定购交付策略), 那么需要经常调整生产计划, 从而产生很大的生产调整成本。要想在生产调整成本和库存成本之间做出最优平衡, 生产库存管理者需要考虑供应链的内在性质和供应链的成本结构。表 1 从概念上对这种重要的生产和库存平衡问题给予了说明。表 1 包含了全部可能采用的策略, 供应链设计者可以从中选择一个适当的定购决策, 例如, 固定生产率策略与精细生产模式对应, 这意味着供应链设计者偏爱平准化生产策略; 依定购交付(pass on orders)策略与敏捷生产模式对应, 这意味着供应链设计者期望使库存波动最小; 精细敏捷混合生产模式是指, 供应链的不同阶段恰当地采用精细和敏捷两种方式进行生产。在这些极端模式之间还存在其它“灰色阴影区”, 它们可以称为“理想过滤器”策略, 这种策略允许较低频率变动需求通过过滤器, 同时过滤掉或者减弱较高频率变动需求。通过把特定的控制器值设定为规定的值, APIOBPCS 补充策略, 包含了上述所有的策略即精细、敏捷、精细敏捷混合和理想过滤器策略, 它恰当地描述了诸如精细和敏捷供应链这样的广泛供应链方案。

表 1 生产和库存平衡

定购策略	低频率需求			高频率需求		
	生产定购率	库存波动	需求类型	生产定购率	库存波动	需求类型
定购适当型						
固定生产率型(平准化生产模式)	—			—		
固定库存水平型(依定购交付模式)		—			—	
理想过滤器型		—		—		
实际过滤器型						

## 3 APIOBPCS 策略及其变体 DE- APIOBPCS

### 3.1 APIOBPCS 策略和 DE- APIOBPCS 策略

APIOBPCS 策略可以描述为“让生产目标(或补充定购)等于平均(在  $T_a$  个时间单位上经指数平滑的)需求加上实际存货与目标存货之间库存差额的

部分调整量(差额与库存增益系数  $T_i$  倒数的乘积), 再加上目标半成品(TWIP)和实际半成品(AWIP)之间差额的部分调整量(差额与半成品增益系数  $T_w$  倒数的乘积)的总和”。

APIOBPCS 策略产生的供应链定购由三项构成。第一项是需求预测信息项, 它可以用指数平滑法生成, 使用这种预测方法的理由是, 实践者容易理解这种预测方法, 且它在实际生产和库存活动中得

到了广泛应用,其次,从数学的角度来说,这种技术处理起来也相对简单。第二项是目标库存  $T_{INV}$  和实际库存  $A_{INV}$  之间差异的部分调整量  $(1/T_i)$ , 使用这个部分调整量的理由是,如果生产提前期确定,那么这个部分调整量非常适合“锁定”目标库存  $T_{INV}$  水平。第三项是目标半成品( $DWIP$ )和实际半成品( $AWIP$ )之间的差异(或者用啤酒游戏者的语言来说,它是指在定购中但还没有接收到的目标库存  $T_{INV}$  和在定购中还没有接收到的实际库存  $A_{INV}$  之间的差异)的部分调整量  $(1/T_w)$ , 使用这个部分调整量的理由是,如果生产提前期确定,那么,这个部分调整量非常适合“锁定”目标半成品  $WIP$  水平。

DE- APIOBPCS 策略同 APIOBPCS 策略的主要区别是,前者中事件发生的先后顺序与后者中事件发生的先后顺序有些不同, APIOBPCS 策略严格遵循啤酒游戏<sup>[8]</sup>中多个事件发生的先后顺序,其生产提前期( $T_p$ )是以单个周期增加,在  $WIP$  反馈环中存在单个周期的延迟。DE- APIOBPCS 策略是指,当半成品增益系数  $T_w$  与库存增益系数  $T_i$  相

同,也就是说,半成品差异恢复率同库存差异恢复率相同时,该策略成为 APIOBPCS 策略的一个变体。当它在供应链生产和库存控制系统中使用,生产和控制系统具有良好的稳定性,对许多非线性影响具有鲁棒性。当 APIOBPCS 策略变成 DE- APIOBPCS 策略时,由于平均生产提前期估计量  $T_p$  同生产或者分销提前期  $T_p$  相等,也减少了定购率( $O$ )的传输函数数学处理的难度。当假定实际库存水平( $A_{INV}$ )的平均值等于目标库存水平( $T_{INV}$ )时,对本文的分析没有影响,为了后面讨论方便,这里可以任意规定  $T_{INV}$  等于平均消费量水平。

### 3.2 DE- APIOBPCS 策略的框图及其传递函数

依据上述 APIOBPCS 策略结构的说明,这里可以使用控制理论和  $z$  变换技术,建立如图 2 给出的 DE- APIOBPCS 策略框图,对其中  $\alpha = 1/(1+T_a)$  的框图 2 进行处理,可以求出需求输入为  $D$  的生产定购率  $O$  的传递函数式(3)和实际库存水平  $A_{INV}$  的传递函数式(4)如下:

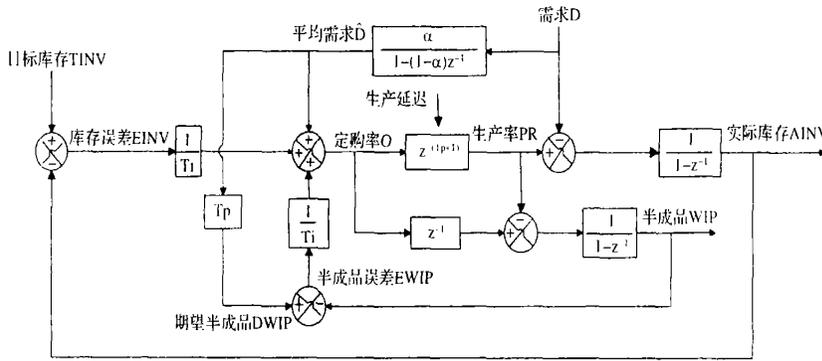


图 1 DE- APIOBPCS 的框图

$$F_o(z) = O(z)/D(z) = \frac{-(T_a + T_p + T_i)z + (1 + T_a + T_p + T_i)z^2}{(1 + T_i(-1 + z))(T_a(-1 + z) + z)} \quad (3)$$

$$F_{AINV}(z) = A_{INV}(z)/D(z) = \frac{z^{1-T_p}(-T_a - T_p - T_i + z + T_az + T_pz + T_iz - (1 + T_i(-1 + z)))}{(1 + T_i(-1 + z))(-1 + z)} \times (T_a(-1 + z) + z) \quad (4)$$

$$= \frac{(1/N_{\mu_{OUT}}) \sum_{n=0}^N (f_{OUT}[n] - \mu_{OUT})^2}{(1/N_{\mu_{IN}}) \sum_{n=0}^N (f_{IN}[n] - \mu_{IN})^2} \quad (5)$$

当系统输入是一个稳定随机需求信号时,有  $\mu_{OUT} = \mu_{IN}$ , 式(5)可简化为式(6):

$$\text{牛鞭} = VR_o = \frac{\sum_{n=0}^N (f_{OUT}[n] - \mu_{OUT})^2}{\sum_{n=0}^N (f_{IN}[n] - \mu_{IN})^2} \quad (6)$$

由于假定系统是线性的,所以这里可以任意规定剩下的  $\mu_{OUT} = \mu_{IN} = 0$ , 式(6)变成式(7):

$$\text{牛鞭} = VR_o = \frac{\sum_{n=0}^N f_{OUT}^2[n]}{\sum_{n=0}^N f_{IN}^2[n]} \quad (7)$$

用反  $z$ - 变换符号重新描述式(7),可以得到式(8):

## 4 牛鞭效应和库存方差

### 4.1 牛鞭效应与系统脉冲响应平方和的关系

依据式(1)可以得到下式(5):

$$\text{牛鞭} = VR_o = (\sigma_{OUT}^2/\mu_{OUT})/(\sigma_{IN}^2/\mu_{IN})$$

牛鞭 = VR<sub>0</sub>

$$= \sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z) I(z)\}^2 / \sum_{n=0}^N Z^{-1} \{I(z)\}^2 \quad (8)$$

式(8)可以简化为(依据 z- 变换的定义)式

(9):

$$\text{牛鞭} = VR_0 = \sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z)\}^2 / \sum_{n=0}^N \delta^2[n] \quad (9)$$

其中 δ 是 Kronecker- Delta 函数, 它们的和显然等于 1, 因此得到式(10):

$$\text{牛鞭} = VR_0 = \sum_{n=0}^N Z^{-1} \{F^*(z)\}^2 = \sum_{n=0}^N f^2[n] \quad (10)$$

当 N 趋向无穷时, 牛鞭效应衡量标准代表总体而不是样本, 因此得到式(11):

$$\text{牛鞭} = VR_0 = \sum_{n=0}^{\infty} f^2[n] \quad (11)$$

上式表明系统脉冲响应的离散纵坐标平方和等于牛鞭。

#### 4.2 牛鞭效应方差比的分析表达式

在推导出牛鞭效应的分析表达式之前, 首先对式(3)所表示的传递函数进行简化, 这样式(3)简化后变成式(12):

$$F_0(z) = \frac{Q(z)}{D(z)} = a_1 \frac{z(z-a_2)}{(z-a_3)(z-a_4)} \quad (12)$$

其中  $a_1 = \frac{1+T_{p+}+T_{a+}+T_i}{T_i(1+T_a)}$ ,  $a_2 = \frac{T_{p+}+T_{a+}+T_i}{1+T_{p+}+T_{a+}+T_i}$ ,

$$a_3 = \frac{T_a}{1+T_a}, a_4 = 1 - \frac{1}{T_w}$$

取传递函数(12)的反 z- 变换, 可以得到下列时间域脉冲响应:

$$f_0(n) = \frac{1}{(1+T_a)(1+T_a-T_i)T_i} ((1+T_a) \left(\frac{-1+T_i}{T_i}\right)^n \times (1+T_{a+}+T_p) - \left(\frac{T_a}{1+T_a}\right)^n T_i(T_i+T_p)) \quad (13)$$

利用上面已证明的式(11), 可以得到牛鞭效应分析表达式如下:

$$\begin{aligned} \text{牛鞭} = VR_0 &= \sigma_0^2 / \sigma_D^2 = \sum_{n=0}^{\infty} f_0^2(n) \\ &= \frac{2T_a^2 + 3T_i + 2T_{p+} + 2(T_i + T_p)^2 + T_a(1 + 6T_i + 4T_p)}{(1 + 2T_a)(T_a + T_i)(-1 + 2T_i)} \\ &= \frac{1}{2} \left( \frac{(T_{p+} + 0.5)^2}{(T_a + 0.5)(T_i - 0.5)(T_a + T_i)} + \frac{1}{T_i - 0.5} + \frac{2T_{p+} + 1}{(T_a + 0.5)(T_i - 0.5)} + \frac{1}{T_a + 0.5} + \frac{1}{T_a + T_i} \right) \quad (14) \end{aligned}$$

#### 4.3 库存方差比的分析表达式

实际库存方差比可以依下列步骤求出, 避开实际的库存传递函数式(4), 这样式(4)可以简化为式(15):

$$F_{AINV}(z) = \frac{A_{INV}(z)}{D(z)} = \frac{z}{z-1} \left( \frac{a_1(z-a_2)z z^{-(T_{p+}+1)}}{(z-a_3)(z-a_4)} - 1 \right) = \frac{z}{z-1} (F_0 z^{-(T_{p+}+1)} - 1) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \text{其中 } a_1 &= \frac{1+T_{p+}+T_{a+}+T_i}{T_i(1+T_a)}, a_2 = \frac{T_{p+}+T_{a+}+T_i}{1+T_{p+}+T_{a+}+T_i}, a_3 \\ &= \frac{T_a}{1+T_a}, a_4 = 1 - \frac{1}{T_w} \end{aligned}$$

从式(15)可以看出时间域响应  $f_{AINV}(n)$  的结构, 它应该有两项, 第一项是定购率累积和的反 z- 变换(式(12))被延迟了  $T_{p+} + 1$  个时间单位, 第二项是时间  $n = 0$  时开始的一个负单位阶跃函数。累积定购率的反 z- 变换的第一项如下:

$$\frac{z}{z-1} \frac{a_1(z-a_2)z}{(z-a_3)(z-a_4)}$$

当把  $a_1, a_2, a_3$  和  $a_4$  代入式(15)中, 可以得到式(16):

$$f(n) = 1 + \frac{(T_a/(1+T_a))^{1+n}(T_i+T_p) - ((T_i-1)/T_i)^{1+n}(1+T_{a+}+T_p)}{1+T_a-T_i} \quad (16)$$

当考虑延迟函数 ( $z^{-(T_{p+}+1)}$ ) 后, 式(16)变成式(17):

$$f(n) = \begin{cases} 0 & \text{当 } n \leq T_p, \\ (T_a/(1+T_a))^{n-T_p}(T_i+T_p) - ((T_i-1)/T_i)^{n-T_p}(1+T_{a+}+T_p) & \text{当 } n > T_p \end{cases} \quad (17)$$

当考虑式(15)的第一项并且加上负单位阶跃以后, 求出下式(18):

$$F_{AINV}(n) = \begin{cases} -1 & \text{当 } n \leq T_p, \\ (T_a/(1+T_a))^{n-T_p}(T_i+T_p) - ((T_i-1)/T_i)^{n-T_p}(1+T_{a+}+T_p) & \text{当 } n > T_p \end{cases} \quad (18)$$

因此, 这里可以求得式(19)表示的实际库存水平和需求之间的长期方差放大比:

$$VR_{AINV} = \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^2 +$$

$$\sum_{n=1}^{T_p+1} \left[ \frac{(T_a/(1+T_a))^{n-T_p}(T_{p+1}+T_i) - (T_{p+1}+T_a)((-1+T_i)/T_i)^{n-T_p}}{1+T_a-T_i} \right]^2 \quad (19)$$

式(19)收敛到式(20):

$$\begin{aligned} VR_{AINV} &= 1+T_{p+1} + \frac{2T_a^2(-1+T_i)^2+T_i(1+T_p)^2}{(1+2T_a)(T_a+T_i)(-1+2T_i)} \\ &= T_{p+1} + \frac{T_i T_p(2+T_{p+1}+2T_a(1+T_p))}{(1+2T_a)(T_a+T_i)(2T_i-1)} \\ &= 1+T_{p+1} + \frac{1}{2} \left( \frac{1}{4(T_a+T_i)(T_a+0.5)(T_i-0.5)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{2T_a+T_i} \left( \frac{1}{T_a+0.5} + \frac{1}{T_i-0.5} + 2T_p \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{((T_a+0.5)-0.5)^2((T_i-0.5)^2-0.5)^2}{(T_a+T_i)(T_a+0.5)(T_i-0.5)} \right) \quad (20) \end{aligned}$$

### 4.4 牛鞭效应和库存方差平衡

为了讨论牛鞭效应和库存方差的平衡,这里首先构造一个目标函数,它可以假定为牛鞭效应方差放大比和库存方差放大比的加权线性函数,当生产定购率方差和库存方差之间取不同权重值时,这里要决定参数组  $T_a$  和  $T_i$  取什么值时,库存方差和牛鞭效应方差的加权和取最小值?即生产库存控制系统达到最优。就一定的库存方差放大比来说,生产定购率方差的财务含义是不同的,这里把牛鞭效应和库存方差的加权和作为生产库存控制系统的绩效测量标准,系统绩效的优劣(用式(21)中的分数表示)就可以针对不同权重( $W$ )值在  $T_a-T_i$  参数平面上讨论:

$$\text{分数} = (W * VR_0) + VR_{AINV} \quad (21)$$

其中  $VR_0$  和  $VR_{AINV}$  分别是式(14)和(20)中的牛鞭效应方差放大比和库存方差放大比。

假定定购方差  $VR_0$  对生产库存控制系统的影响总是大于库存方差  $VR_{AINV}$ , 因此,这里只需要讨论权重  $W > 1$  时,牛鞭效应  $VR_0$  和库存方差  $VR_{AINV}$  的平衡。

## 5 结果讨论

假定一个简单的供应链是由一个零售商和制造商构成,零售商观察到顾客的需求是一个稳定的随机需求信号,该零售商对需求采用平滑常数为  $T_a$  的指数平滑法进行预测,制造商的生产提前期为  $T_p$ ,现在依据 APIOBPCS 策略来分析零售商阶段所产生的定购方差、库存方差以及它们之间的平衡。

由牛鞭效应方差放大比式(14)可以知道:由于

生产提前期仅仅出现在分子中,并且具有正系数,所以要想减少牛鞭效应,生产提前期  $T_p$  应该尽可能的短,即缩短供应链渠道可以减弱牛鞭效应;当  $T_i > 0.5$  时,由于两个  $T_p$  单调递增表达式的系数是正的,所以牛鞭效应是  $T_p$  的单调递增函数;当用  $T_{a+}$  0.5 取代  $T_{i-}$  0.5 时,牛鞭效应大小没有发生变化,反之一样,所以牛鞭效应关于  $T_{a-} T_{i-} 1$  和  $T_{i+} T_{a+} 1$  是对称的;还由于式(14)右端的所有五项都会随  $T_a$  和(或者)  $T_i$  增大而单调递减,所以牛鞭效应是  $T_a$  和  $T_i$  的单调递减函数;当  $T_a = T_i = \infty$  时,式(14)仅存在一个最小值(零),这代表平准化的生产模式。当  $VR_0 > 1$  时,意味着定购方差被放大,所以针对  $T_i$  求式(14),得到  $VR_0 = 1$  的根,通过判断,可以求出牛鞭效应存在的边界条件如下:

$$T_i < \frac{2+3T_a-2T_a^2+2T_{p+1}+\sqrt{1+2T_a+\sqrt{4+4T_a+T_a^2+2T_a^3+8T_{p+1}+4T_aT_{p+1}+4T_{p+1}^2}}}{4T_a}$$

当生产提前期  $T_p$  分别为 2、3、5 和 8 个生产单位时,依据式(14),图 2 给出了平滑常数  $T_a$  和库存增益系数  $T_i$  (或者半成品增益系数  $T_w$ ) 对牛鞭效应方差放大比的影响。对图 2 进行考察同样可以知道,当  $T_a$  和  $T_i$  取非常大的值时,牛鞭效应方差取最小值,反之则相反。

由库存方差放大比式(20)可以知道:当  $T_i > 0.5$  时,库存方差总是大于 1,这意味着库存变动将总是大于需求信号的变动,换句话说,生产和库存控制者想采用零库存策略,同时又希望顾客立即得到所定购的产品是不可能的;由于生产提前期  $T_p$  的系数总是正的,所以当生产提前期增大时,库存方差也随着增大;库存方差比关于  $T_{a-} T_{i-} 1$  和  $T_{i+} T_{a+} 1$  对称;库存方差比中的第一个 1 是指,事件的发生存在先后顺序,即本周期的需求直到该周末才能知道,因此库存变动至少应该等于需求变动;为了使脉冲响应的偏差平方和最小,可库存方差与平滑常数  $T_a$  和库存增益  $T_i$  的关系以恰当地设定  $T_a$  和  $T_i$  的值,但是,无论参数  $T_a$  和  $T_i$  如何设定,库存变动将至少是需求变动的  $\sigma_b^2(1+T_p)$  倍;当  $T_a = \infty$  和  $T_i = 1$  或者当  $T_a = 0$  和  $T_i = \infty$  时,库存方差取最小值。当生产提前期  $T_p$  分别为 2、3、5 和 8 个生产单位时,依据式(14),图 3 给出了平滑常数  $T_a$  和库存增益系数  $T_i$  (或者半成品增益系数  $T_w$ ) 对库存方差放大比的影响。对图 3 进行考察同样可以知道,当  $T_a$  取非常大以及  $T_i$  取非常小的值时,库存方差取最小值,反之则相反。

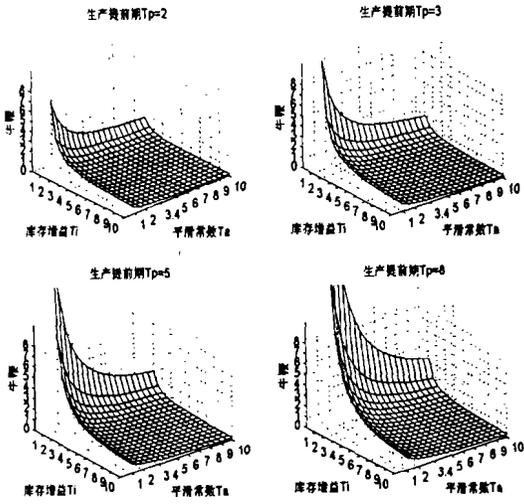


图 2 当生产提前期  $T_p$  分别为 2、3、5 和 8 时牛鞭与平滑常数  $T_a$  和库存增益  $T_i$  的关系

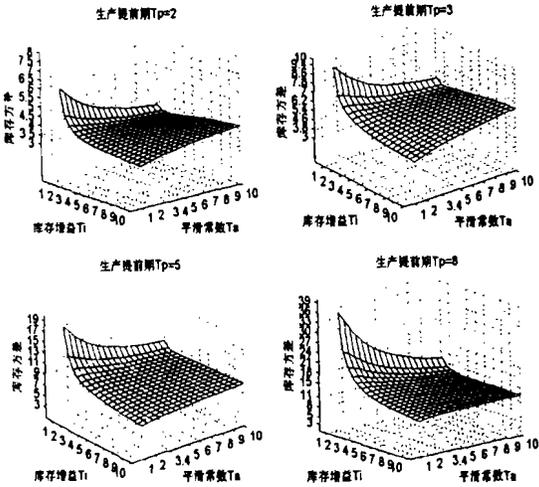


图 3 当生产提前期  $T_p$  分别为 2、3、5 和 8 时库存方差与平滑常数  $T_a$  和库存增益  $T_i$  的关系

依据式 (21) 表示的牛鞭效应方差和库存方差和, 这里可以衡量零售商和制造商构成的简单供应链的绩效, 图 4 给出了当  $T_p=2$  和  $W$  取不同值时, 平滑常数  $T_a$  和库存增益  $T_i$  (或者半成品增益  $T_w$ ) 对供应链系统性能的影响, 当  $5 < T_a < 10$  和  $5 < T_i < 10$  时, 依据这些参数值设计供应链方案, 将使牛鞭效应和库存方差之间达到满意的平衡, 从而使得定购和库存波动分别引起的生产调整成本和库存 (或者缺货) 成本的和极度减少。

### 6 结论

本文就一般 APIOBPCS 策略, 从控制理论的角度, 为牛鞭效应问题提供了一个分析解, 它可以在仿真、统计和实验研究中量化牛鞭效应, 在不过分影响

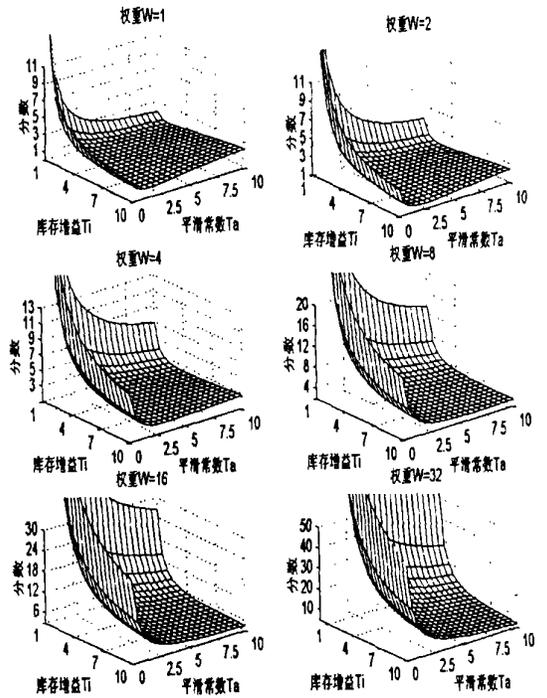


图 4 当生产提前期  $T_p=2$  和权重  $W$  取不同值时用分数评价的牛鞭效应和库存方差

库存方差时, 采用增加平均预测时间、减少库存和半成品修正比率的控制策略, 可以最小化牛鞭效应, 减少生产提前期, 即缩短供应链渠道, 也可以作为减少牛鞭效应的一种有效手段。本文还为库存方差提供了一个分析解, 并就库存方差的控制给予了相应控制策略。现在, 供应链的设计者在不使用控制理论条件下, 借助数据表格程序, 可以对牛鞭效应和库存方差进行仿真。本文就两种方差之间一系列权重值, 讨论了牛鞭效应和库存方差的平衡, 这对生产和库存控制者设计恰当的供应链系统具有现实指导意义。

### 参考文献:

- [1] Lee, H. L., Padmanabhan, V. and Whang, S., The Bullwhip Effect in supply chains[J]. Sloan Management Review, 1997, 38(2): 93- 102.
- [2] Baganha M. P., Cohen M. A., The stabilizing effect of inventory in supply chains[J]. Operations Research, 1998, 46(3): 572- 583.
- [3] Chen, F., Drezner, Z., Ryan, J. K. and Simchi- Levi, D., Quantifying the Bullwhip Effect in a simple supply chain: The impact of forecasting, lead- times and information [J]. Management Science, 2000, 46(3): 436- 443.
- [4] Dejonckheere, J., Disney, S. M., Lambrecht, M. R. and Towill, D. R., Measuring and avoiding the bullwhip effect:

- a control theoretic approach[ J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147( 3) : 567– 590.
- [ 5] 黄小原, 卢震. 多分销中心供应链模型及其牛鞭效应的  $H_{\infty}$  控制[ J]. 中国管理科学, 2003, 11(1): 41– 47.
- [ 6] John S. , Naim, M. M. and Towill, D. R. Dynamics analysis of a WIP compensated decision support system[ J]. International Journal Manufacturing Systems Design, 1994, 1( 4) : 283– 297.
- [ 7] Towill, D. R. Optimisation of an inventory and order based production control system[ C]. Proceedings of the Second International Symposium on Inventories, Budapest, Hungary, 1982.
- [ 8] Sterman, J. , Modelling managerial behaviour: misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment [ J]. Management Science, 1989, 35( 3) : 321– 339.
- [ 9] Deziel, D. P. and Eilon, S. , A linear production inventory control rule[ J]. The Production Engineer, 1967, 43: 93 – 104.

### Bullwhip Effect and Inventory Variance Based DE– APIOBPCS Policy

LUO Wei<sup>1,2</sup>, ZHANG Zi– gang<sup>1</sup>, OU YANG Ming– de<sup>1</sup>

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

2. School of Management, Hubei University of Technology, Wuhan 430064, China)

**Abstract:** From a control theory perspective, based on a generic replenishment rule that is APIOBPCS policy, the paper derives an analytical expression for bullwhip effect. It clearly shows that bullwhip effect can be reduced by increasing gain of the discrepancy in the inventory position and pipeline position, and by increasing the average age of the forecast and reducing the production lead– time. Then this paper also derives an analytical expression for the variance of inventory position. When this analytical expression is applied together with the bullwhip expression, the balance between both bullwhip effect and inventory variance for a range of weightings is discussed. According to these balances, the production and inventory controllers can design suitable supply chain system.

**Key words:** bullwhip effect; supply chains; z– transforms; APIOBPCS