

# 牛鞭效应与生产平滑模型有效性问题

李刚<sup>1,2</sup>, 汪寿阳<sup>1</sup>, 于刚<sup>3</sup>, 阎洪<sup>4</sup>

(1. 中国科学院管理、决策与信息系统重点实验室, 北京 100080;

2. 北京航空航天大学经济管理学院, 北京 100083;

3. 美国德州大学 McCombs 商学院, Austin, Texas, U. S. A.;

4. 香港理工大学物流学系, 香港, 中国)

**摘要:** 评述国内外关于牛鞭效应和与之紧密相关的生产平滑模型有效性问题的研究进展, 扼要地叙述作者在这个领域所做的部分工作. 作者的工作将国际上对牛鞭效应的研究从特殊时间序列下的两阶段模型扩展到一般 ARIMA 时间序列下的多阶段模型, 并以此为基础分析了需求信息在供应链中传播的一般规律. 这些规律的发现扩展了牛鞭效应研究的一些经典结论, 揭示了一些新颖现象的存在, 并为彻底解决国际学术界长达 20 年的关于生产平滑模型有效性问题的争论提供了可能. 最后, 指出几个相关的研究问题, 希望中国学者能在这一领域的研究中取得重要突破.

**关键词:** 供应链; 牛鞭效应; 生产平滑模型

**中图分类号:** F4

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1007-9807(2004)01-0001-18

## 0 引言: 什么是牛鞭效应

20 世纪 90 年代中期, 宝洁公司 (P&G) 的行政人员在对他们最热销的产品——婴儿尿布的销售状况进行例行检查时, 发现一个奇怪的现象: 零售商店的尿布销售存在着波动, 但并不强烈; 然而分销商给宝洁的订单却波动得很厉害. 当这些行政人员进一步检查宝洁给自己的供应商, 如 3M 等所下的订单时, 发现其波动的幅度变得更大了. 这表明当需求信息在供应链中以订单的形式向上游传播时, 它的波动会变得越来越大. 这就正如牛仔所使用的长鞭, 顶端的一点小小抖动就会在末梢转化为一条长长的弧线. 宝洁因此把这种现象命名为牛鞭效应 (bullwhip effect).

为工业界和学术界所普遍接受的牛鞭效应的定义由 Lee et al.<sup>[1]</sup> 给出. 在这个定义中, 需求的波动用过程的方差定量地描述: 牛鞭效应描述的是

供应链中供应商所接受的订单比终端顾客的需求具有更大的方差的现象 (即需求扭曲现象); 此外, 这种扭曲将以放大的形式向供应链的上游传播 (即方差放大现象).

牛鞭效应可以用图 1 直观地表示. 它比较了一个由顾客、零售商、分销商和生产商组成的四阶供应链中, 不同阶段所面临的需求曲线的变动情况. 在图 1 中, 最终顾客的需求 (图 1 中用实线表示) 只有很小的波动, 但这个波动经过零售商订单 (图 1 中用单点划线表示) 和分销商订单 (图 1 中用双单点划线表示) 的层层放大, 当最终反映为生产商的生产计划 (图 1 中用虚线表示) 时, 已经与最初的需求几乎看不出任何关联了.

牛鞭效应在各个工业领域已被大量的观察数据所证实. 在 IT 制造领域, 以惠普 (HP) 公司的打印机销售为例, 分销商向打印机生产部门所订购的数量远远比客户的最终需求具有更大的波动

收稿日期: 2003-11-20; 修订日期: 2003-12-05.

基金项目: NSFC/RGC 联合资助项目 (7991061987); 国家自然科学基金委员会优秀创新研究群体基金部分资助项目 (70221001); 国家自然科学基金资助项目 (9928001); 德州大学 FRA 基金部分资助项目; 香港 RCC 部分资助项目 (G-T599).

作者简介: 汪寿阳 (1958—), 男, 江苏人, 研究员.

性<sup>[1,2]</sup>. 在食品工业中,由于季节波动和牛鞭效应造成了供应链的上游需求剧烈波动,两个哈佛案例研究对此作了详细讨论<sup>[3,4]</sup>. 此外,研究人员也在汽车产品<sup>[5]</sup>、机床<sup>[6]</sup>、零售百货<sup>[7]</sup>、方便食品<sup>[8]</sup>、纸制品<sup>[9]</sup>、电子产品<sup>[10]</sup>以及皮包产品<sup>[11]</sup>等的供应链中观察到显著的牛鞭效应.

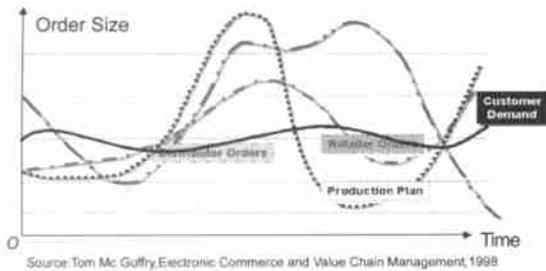


图1 牛鞭效应的直观图示

牛鞭效应对供应链管理的绩效有着多方面的影响. 随着信息的向上游传播,需求的波动性越发强烈,常常是巨大的订单后紧接着很少甚至没有订单,这样使得上游的生产厂商很难合理地安排当前的生产计划并规划未来的生产能力. 而对下游的销售厂商而言,由于订购数量远远偏离了实际的需求数量,其结果或者是产品大量积压而形成超额的库存费用,或者是无法供货而造成客源流失和支付违约费用. 统计数据表明,由于牛鞭效应造成的无效的生产运作将使企业多支付12.5%至25%的费用<sup>[12]</sup>. Fuller et al.<sup>[13]</sup>的研究还表明:在美国年产值3 000亿美元的食品工业中,各成员间由于牛鞭效应造成的无效库存竟然高达750亿到1 000亿美元. 因此,牛鞭效应对供应链上各环节的厂商都是一个要尽力避免的关键问题.

尽管牛鞭效应对许多管理者而言,早已是一个耳熟能详的名词,但是最近的研究表明:对于这个供应链中固有的现象,管理者中仍然存在着大量的一知半解甚至是错误的认识以及侥幸的心态. McCullen 和 Towill<sup>[14]</sup>将那些问题归纳为如下的十大认识误区,见表1.

为了消除这些误区,除了要加强对管理者的培训之外,一个很重要的工作是对牛鞭效应的起因、特征以及传播规律进行深入而系统的研究. 只有在全面地了解这一现象本质的基础上,才有可能设计出有效的解决方案,帮助管理者更好地协调和优化他们的供应链.

表1 关于牛鞭效应的十大认识误区

认识误区	表现
1. 无知	牛鞭效应:在世界上并不存在.
2. 傲慢	牛鞭效应:仅仅是学术界的发明.
3. 忽略不记	牛鞭效应:并不产生多大的费用.
4. 漠视	牛鞭效应:那又怎样?反正顾客能等!
5. 转移责任	牛鞭效应:那又怎样?反正供应商能应付,这是服务级别协议所规定的!
6. 无奈接受	牛鞭效应:这就象税收一样,总会跟随我们的.
7. 悲观失望	牛鞭效应:它是系统问题,我们无能为力.
8. 过时了	牛鞭效应:这是一个老问题了,它不是已经被消除了吗?
9. 不兼容	牛鞭效应:日本人的解决方案对我们不适用.
10. 无效	牛鞭效应:那些解决方案的确不错,但是不适合我们的行业.

## 1 牛鞭效应研究的四个里程碑

尽管牛鞭效应是一个新名词,但是这种需求放大的现象早在上个世纪中叶就由 J. W. Forrester 发现并进行了开创性的研究. 通过对企业数据的分析, Forrester<sup>[15]</sup>发现制造商感知的需求的方差通常远大于消费者实际需求的方差. 他也同时发现这种放大效应将随着需求向供应链上游的传播而变得更加剧烈. Forrester 认为出现这种现象的原因在于供应链系统是如此复杂,而现有公司间的信息反馈又非常困难,因此单个公司很难独自理性地作出订购决策. 因此他提出解决牛鞭效应的方法在于将供应链理解为一个整体,并采用“系统动力学”(system dynamics)的方法来对系统进行仿真建模,以便管理者能确定合适的决策方案.

牛鞭效应研究的另一位先驱是英国的 J. L. Burbidge. 基于在工业界长期从事生产计划和控制的经验, Burbidge<sup>[16-18]</sup>提出了“5个避免破产的黄金法则”. 在这些法则中,他详细地讨论了需求的放大现象以及解决方法. 不同于 Forrester, Burbidge的工作强调了关键结合点 (sharp edged) 的价值以及生产的不连续特性,以及因此造成的

所谓信息流的多级阶段 (multi-phasing of the information flow). 结合 Forrester 的系统动力学观点和 Burbidge 的多阶信息流理论, Towill<sup>[19]</sup> 从控制论的角度对牛鞭效应提出了一个综合性的解释.

牛鞭效应研究的一个里程碑式的进展源于著名的“MIT 啤酒游戏”的提出和研究. J. D. Sterman<sup>[20~22]</sup> 系统地描述了这个游戏:参与者在游戏中分别扮演一个啤酒销售供应链中的不同角色(啤酒零售商、批发商、分销商和酿造商). 随着游戏的进行,客户需求的一点微小变化将对上游供应商的订单和库存水平产生巨大的影响. 这个游戏自 20 世纪 60 年代问世以来,已被全世界不同背景的学生和公司的管理人员玩过上千次,结果都是相同的:过度的反应出现在供应链的上游,从而造成系统的总费用常常 5 到 10 倍于执行最优化策略产生的费用. Sterman<sup>[20]</sup> 以及 Diehl 和 Sterman<sup>[23]</sup> 认为产生这种不良绩效的原因在于参与者没有认识到系统是一个彼此联系的整体,因而不能合理地估计系统中存在着时间延迟的复杂信息反馈. 尽管啤酒游戏是理解牛鞭效应的一个有用的教学工具,但是它并不能帮助研究者精确地估计牛鞭效应所产生的费用影响. Sterman 注意到,参与者表现出的一种普遍的行为是他们倾向于根据自己的在手库存减去未交付的需求来决定下期订单数量,而忘记了考虑自己的在途定货(在途定货是指已向供应商订购,但尚未交付的定货. 根据库存理论,参与者应该根据自己的在手库存加上在途定货减去未交付的需求来决定下期订单数量). 这种非理性的决策在良好管理的企业中是不允许存在的. 针对在啤酒游戏中暴露出来的非理性决策问题, Sterman<sup>[21]</sup> 认为通过对管理人员的再培训,帮助他们养成“系统思维”(system thinking),可以有效地解决这个问题.

Forrester, Burbidge 和 Sterman 的工作激励了大批后来的研究者,许多经济学家和运作管理学家开始把研究兴趣转移到这个充满挑战的领域,并在牛鞭效应的存在性和可能原因的分析方面取得了可喜的研究进展<sup>[24~27]</sup>. 尽管如此,大部分的工作仍然仅仅局限于定性的分析、实证的观察以及计算机的仿真上. 学者们仍然不能从理论上清楚

地解释:究竟有哪些因素,在什么样的条件下,通过什么途径诱发了牛鞭效应? Hau, Lee 领导的研究小组在这个问题上首先取得了突破. Lee et al. 发表在 Management Science<sup>[1]</sup> 和 Sloan Management Review<sup>[2]</sup> 上的两篇论文被公认为是供应链管理和牛鞭效应研究的经典之作. Lee et al. 支持经济学家的理论,即牛鞭效应起源于管理者追求利润最大化的理性决策,并结合运作管理研究中的系统思维,将供应链各环节作为一个整体来研究,提出了牛鞭效应产生的四种具体原因:1) 需求信号处理 (demand signal); 2) 订单批量 (order batching); 3) 价格波动 (fluctuating prices); 4) 短缺博弈 (shortage game). 针对每一种原因, Lee et al. 讨论了可能的解决策略.

在产生牛鞭效应的四种原因中,“需求信号处理”描述了将需求信息应用于订单决策的过程中所发生的方差变化,是研究供应链管理的其它基本问题(如信息共享、企业联盟等)的理论依据和基本出发点. 根据 Lee et al.<sup>[1]</sup>, 简要介绍如下:假设终端顾客的需求满足一个简单的 1 阶自相关过程 (AR(1))

$$D_t = d + \rho D_{t-1} + \varepsilon_t \quad (1)$$

其中:  $\rho$  为自相关系数,  $-1 < \rho < 1$ ;  $D_t$  表示  $t$  期末的顾客需求;  $d$  为常量;  $\varepsilon_t$  为一随机项,服从  $(0, \sigma^2)$  的正态分布. 当零售商采用 Heyman 和 Sobel<sup>[28]</sup> 给出的最优库存策略时,其订单具有如下分布

$$Y_t = d + \rho Y_{t-1} + \frac{1 - \rho^{l+2}}{1 - \rho} \varepsilon_t - \frac{(1 - \rho^{l+1})}{1 - \rho} \varepsilon_{t-1} \quad (2)$$

其中:  $Y_t$  为  $t$  期的订单,  $l$  为零售商的订单提前期. 可以证明:当  $\rho > 0$  时,订单  $Y_t$  的方差将大于需求  $D_t$  的方差. 这个差值,经计算可得

$$V r(Y_t) - V r(D_t) = \frac{2(1 - \rho^{l+1})(1 - \rho^{l+2})}{(1 + \rho)(1 - \rho)^2} \sigma^2 > 0 \quad (3)$$

这个简洁的结果表明:在“最优理性决策”下,牛鞭效应将必然出现,因此是不能被完全消除的. 管理者能做的仅仅是采用一些补救措施(如信息共享等),以尽可能地减小公式(3)中订单方差相对于需求方差的放大. 总结见表 2.

表2 牛鞭效应研究的四个里程碑

关键作者	产生原因	影响因素	建议的解决措施
Forrester:需求放大 <sup>[15]</sup>	需求不可见; 信息扭曲; 库存级别调整	再定货点; 过长的提前期	时间压缩; 消除系统中不必要的阶段
Burbidge:多阶段 <sup>[16~18]</sup>	多阶订购	不同步的订单流; 贫乏和不确定的信息	订购策略调整
Sterman:啤酒游戏 <sup>[20~22]</sup>	人类的错觉; 决策过程本身	终端用户需求信息不可见	改善供应链间的通讯; 对管理人员的再培训
Lee et al.:牛鞭效应 <sup>[1,21]</sup>	需求信号处理	终端用户需求信息不可见; 多重预测; 长提前期	信息共享,获取 POS 信息; 单点补充策略; 提前期缩减
	订单批量	高订购费用; “满载”策略; 随机或关联的订购	电子数据交换及计算机辅助采购; 第三方物流; 有规律的转运
	价格波动	高低价格策略; 转运和购买不同步	天天低价策略; 定制的采购合同
	短缺博弈	比例化的分配方案; 无视供应链的具体情况; 无约束的订购和自由退货策略	基于销售绩效的分配; 共享能力及供应信息; 有时间限制的柔性策略及能力储备

在 Lee et al.<sup>[1,21]</sup> 的工作之后, Cachon 和 Lariviere<sup>[29,30]</sup> 进一步研究了短缺博弈问题; Kelle 和 Milne<sup>[31]</sup> 以及 Cachon<sup>[32]</sup> 进一步研究了订单批量问题; 而更多的研究则集中在需求信号处理问题以及相应的信息共享问题上, 有影响的工作包括 Drezner et al.<sup>[33]</sup>, Baganha 和 Cohen<sup>[34]</sup>, Graves<sup>[35]</sup>, Kulp<sup>[36]</sup>, Lee et al.<sup>[37]</sup>, Chen et al.<sup>[38,39]</sup>, Gilbert<sup>[40]</sup>, Aviv<sup>[41]</sup>, Dejonckheere et al.<sup>[42]</sup> 和 Alwan et al.<sup>[43]</sup> 等。

国内学术界关于牛鞭效应这一供应链研究的重要课题近年来也发表了一些值得一提的工作。例如, 万杰等<sup>[44]</sup> 考虑了供应商的分配机制对牛鞭效应的影响, 这属于短缺博弈问题。基于与 Chen et al.<sup>[38,39]</sup> 类似的假设, 石小法等<sup>[45]</sup> 讨论了由于多重预测引起的牛鞭效应问题; 张钦等<sup>[46]</sup> 将 Lee et al.<sup>[1]</sup> 的模型扩展到 ARIMA(0,1,1) 需求模式, 分析了该模式下的牛鞭效应; 黄小原等<sup>[47,48]</sup> 则进一步扩展了 Baganha 和 Cohen<sup>[34]</sup> 的工作, 提出了顾客末端需求波动最差条件下 H 控制方法以抑制牛鞭效应。这三个工作都可归结为需求信号处理方面的研究。傅焯等<sup>[49]</sup> 则从委托代理的角度将 Lee et al.<sup>[1,21]</sup> 总结的四点原因归结于生产商和零售商以及零售商之间的委托代理关系由于不完全信息和不合理契约所引起的博弈过程。达庆利

等<sup>[50]</sup> 还就牛鞭效应的现象和起因以及对应策略等给出了一个相当详尽的研究综述。

总体来说, 上述这些研究都是对 Lee et al.<sup>[1,21]</sup> 工作的补充和实证。作为供应链管理的基础之一, 牛鞭效应的“起源问题”似乎已被解决。

## 2 争论 20 年的生产平滑模型的有效性问题的

牛鞭效应表明需求信息通过库存系统后方差增大了。这意味着库存起着一种放大波动的作用, 但这与库存设置的初衷是根本违背的。根据微观经济学的基本原理, 当公司的产品面临变动的需求, 生产费用曲线是凸性的, 而产品可储存时, 公司的最优策略是设置库存作为销售和生产之间的缓冲。这样公司可以通过消耗库存来满足那些未曾料到的需求突然增长, 以缓减生产的压力; 而当存在生产或交付的提前期时, 需求增长将更完全依赖库存来满足<sup>[51]</sup>。这样, 如果一个行业中的公司普遍设置库存, 该行业的宏观统计数据将呈现这样一种特征: 行业的销售数据的方差将大于生产数据的方差。这就是经济学中著名的生产平滑模型 (production-smoothing model) 的基本原理。

但是牛鞭效应的存在对这个基本模型的有效性提出了严峻的挑战. 自从 20 世纪 80 年代以来, 不少经济学家, 包括 Blanchard<sup>[52]</sup>, Blinder<sup>[53, 54]</sup>, Blinder 和 Maccini<sup>[55, 56]</sup> 和 West<sup>[57]</sup> 等都声称生产平滑模型是错误的, 至少需要对其基本假设作根本性的修正. 但也有许多经济学家, 包括 Fair<sup>[58]</sup>, Miron 和 Zeldes<sup>[59]</sup>, Krane<sup>[60]</sup>, Krane 和 Braun<sup>[61]</sup>, Allen<sup>[62]</sup> 以及 Michael 和 Brannon<sup>[63]</sup> 等, 提出证据表明生产平滑模型仍然有效, 能合理地解释大量实际的观测数据. 尽管争论激烈, 论辩的双方都不能回避一个基本的事实: 在实际的行业数据中, 既存在着方差放大的现象(即牛鞭效应), 也存在着方差减小的现象

(即生产平滑现象), 更存在着不少方差不变的现象. 一个有代表性的研究结果由 Krane 和 Braun<sup>[61]</sup> 给出, 它描述了不同的行业中生产过程和运输过程的方差的相对大小. Krane 和 Braun 发现: 在以炼油业为代表的一些行业中, 生产过程明显地比运输过程更平滑. 而在以伐木业为代表的许多行业中, 生产过程数据与运输过程数据的时间序列很难区分. 只有很少一些行业, 其中最具有代表性的是制酒业, 生产明显地比运输更具有波动性. 在这里, 运输过程代表了客户的需求过程. 下图引自 Krane 和 Braun<sup>[61]</sup> 研究报告的图 1, 它直观地表现了上述三种行业中生产过程和运输过程的波动状况.

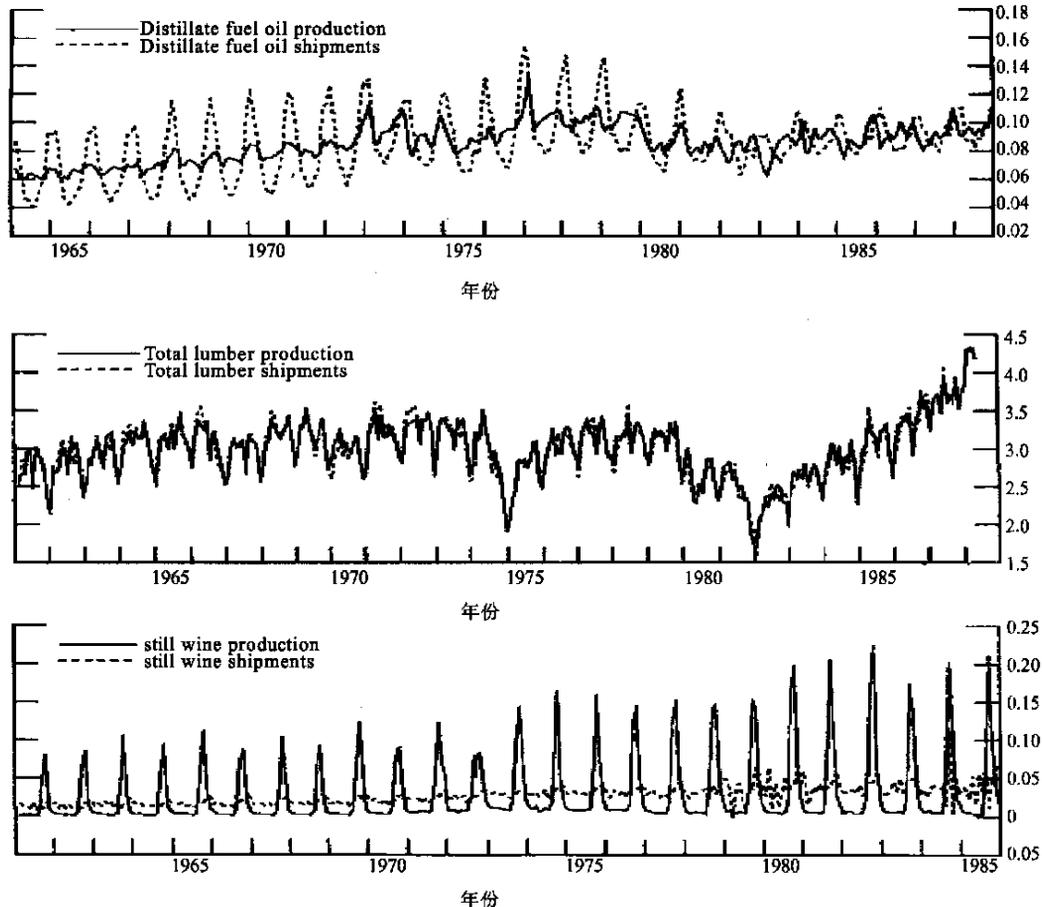


图 2 不同行业中生产过程和运输过程的波动性比较

### 3 一个集成的供应链需求信息传播研究框架

对现实中观察到的现象, 单纯的牛鞭效应理论或生产平滑理论都不能充分地给予解释, 需要

一个统一的理论框架来包容这些现象并量化它们彼此间的关系. 为了构建这样的一个理论框架, 作者注意到可以从广度和深度两个方面对经典理论作进一步的扩展:

1) 广度的扩展: Lee et al. 与其他许多学者的工作都是基于几类特定的需求模式(例如 AR(1)

模式被大量地讨论),那么对于其它的需求模式,例如对于更一般形式的求和自回归移动平均过程 (autoregressive integrated moving average, ARIMA),是否存在牛鞭效应?如果有,是怎样的一种表现形式?

2) 深度的扩展:几乎所有的研究都是考虑两阶段供应链下的牛鞭效应,进而认为这个效应会在多阶段供应链下持续地放大下去. Chen et al.<sup>[38, 39]</sup>的确讨论了多阶供应链的问题,但他们的假设是供应链的参与者放弃或不知道更有效的决策. 如果决策本身就是非理性的,那么任何非理性的结果都有可能发生. 简而言之,还没有学者探讨过在最优化决策下,供应链高阶阶段的牛鞭效应问题,虽然大家都“理所当然”地认为这个现象会在供应链的高阶段变得更加剧烈.

通过将需求模式从特殊的时间序列扩展到一般的 ARIMA 时间序列以及将供应链的建模从两阶段扩展到多阶段,将使我们完整和清晰地勾勒出需求信息在供应链中的传播规律,并有可能解决上述关于生产平滑模型的长期争论<sup>[64]</sup>.

### 3.1 ARIMA 时间序列下需求与订单的关系

在已有的文献中,AR(1)需求模式被大量地研究,如 Kahn<sup>[24]</sup>, Lee et al.<sup>[11, 37]</sup>, Chen et al.<sup>[38, 39]</sup>, Raghunathan<sup>[65]</sup>和 Aviv<sup>[66]</sup>;也有作者讨论的 IMA(0, 1, 1)形式,如 Graves<sup>[35]</sup>及张钦等<sup>[46]</sup>. 这些需求模式都是求和自回归移动平均过程 ARIMA 的特例<sup>[67]</sup>.

一个 ARIMA 过程是自回归过程(AR)和移动平均过程(MA)的“集成”,它不但能有效地表示这两个过程本身,而且能以较少个数的参数和简洁的符号表示这两个过程共同发挥作用的时间序列. 此外,ARIMA 过程能有效地表示大量的非平稳过程. 因此,一个 ARIMA 过程提供了一个强有力的集成模型以描述在实际的企业环境中出现的大部分时间序列,并被广泛地应用在建模和需求预测过程中<sup>[68]</sup>.

一个 ARIMA (p, d, q) 需求过程可以表示为

$${}_p(B) \nabla^d (D_t - \mu) = {}_q(B) \epsilon_t \quad (4)$$

其中:  $D_t$  是终端客户在  $t$  期的需求,  $\epsilon_t$  为一随机扰动,服从  $(0, \sigma^2)$  的正态分布. 多项式  ${}_p(B)$  表示一个  $p$  阶自回归过程 (autoregressive, AR(p)),  ${}_p(B) = 1 - \phi_1 B^1 - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ ; 多项式

${}_q(B)$  表示一个  $q$  阶移动平均过程 (moving average, MA(q)),  ${}_q(B) = 1 - \theta_1 B^1 - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ ;  $B$  为后移算子,  $B^j \epsilon_t = \epsilon_{t-j}$ ;  $\nabla$  为差分算子,  $\nabla D_t = D_t - D_{t-1}$ ,  $\nabla^d = (1 - B)^d$ . 在一个 ARIMA(p, d, q) 过程中,  $p$  是自回归过程的阶,  $q$  是移动平均过程的阶,  $d$  表示最初过程的第  $d$  阶差分. 如果  $d = 0$ , 在满足一定的条件下,  $\mu$  定义了需求回归的均值, 这个过程被称为平稳的 (stationary). 如果  $d > 0$ , 需求过程将逐渐偏离  $\mu$  值, 这种过程被称为非平稳的 (nonstationary); 如果该过程的第  $d$  阶差分有稳定的均值, 则称第  $d$  阶差分过程是平稳的. 考虑终端客户的需求是一个一般的 ARIMA 过程, 这意味着对这个模型的参数取值不做任何强制的约束. 但是需要指出的是, 当  $d > 0$ , ARIMA(p, d, q) 过程有无穷大的方差, 直接比较这类过程的方差以研究牛鞭效应的大小是没有意义的. 一个替代的方法是比较它们第  $d$  阶差分过程的方差. 因此, 对形式为 ARIMA(p, d, q) ( $d > 0$ ) 的需求过程的牛鞭效应研究总可以转化为等效的 ARIMA(p, 0, q) 过程之间的方差比较. 这样, 后面的仿真实验中仅仅考虑那些遵循 ARIMA(p, 0, q) 形式的初始需求.

应用与 Lee et al.<sup>[11, 37]</sup> 相同的库存策略, 证明如下的一个基本定理:

**定理 1** 一个 ARIMA 需求过程将产生一个 ARIMA 订单过程. 具体而言, 需求和订单的关系存在如下两种不同的情况:

1) 如果在一个 ARIMA(p, d, q) 需求过程中有  $p + d > 0$ , 订单过程是一个 ARIMA(p, d, p + d) 过程.

2) 如果在一个 ARIMA(p, d, q) 需求过程中有  $p + d = 0$ , 订单过程是一个 ARIMA(0, 0, max(q - l - 1, 0)) 过程, 其中  $l$  为供应提前期<sup>[69]</sup>.

作为上述定理的一个特例, 重新研究 Lee et al. 模型中的订单表达 (见表达式 (2)), 令  $b = \frac{1 - B^{l+2}}{1 - B}$  且  $a = \frac{(1 - B^{l+1})}{1 - B}$ , 易见  $b - a = 1$ . 进一步, 令  $b_t = B^t$  且  $a_t = \frac{1}{b}$ , 表达式 (2) 改写为

$$Y_t = d + Y_{t-1} - (1 - B) Y_{t-1} + \epsilon_t \quad (5)$$

根据定义, 这是一个 ARIMA(1, 0, 1) 形式的时间序列. 一个 ARIMA(1, 0, 0) (即 AR(1)) 的需



求产生了一个 ARIMA(1,0,1) 订单,这与定理 1 的结论完全吻合。

定理 1 展示了在供应链的信息输入和输出之间存在着一些有趣而且重要的联系:

1) 如果输入过程遵从某种 ARIMA 形式,通过库存系统的转换后,它的输出仍然遵从某种 ARIMA 形式. 这个结果从一般形式上证实了 Graves<sup>[35]</sup> 的发现:如果需求是 IMA(0,1,1) 过程,订单也是 IMA(0,1,1) 过程. 此外,定理 1 也表明库存系统的输出过程的自相关部分和差分部分的阶和系数与输入过程的对应部分相同. 注意到仅平稳过程的自相关部分或非平稳过程能影响一个 ARIMA 过程的期望均值,因此定理 1 表明:当遵从 ARIMA 的需求信息从供应链低阶向高阶传播时,信息的期望均值将维持不变。

2) 库存系统对需求信息的另一个重要的影响是当需求信息流向上传播经过某一特定阶段后,所有随后阶段的需求过程将维持结构的稳定性和对称性不变. 根据定理 1,如果初始阶段的 ARIMA( $p, d, q$ ) 需求过程满足  $p + d > 0$ ,从第 2 阶段开始,随后的需求过程将始终保持 ARIMA( $p, d, p + d$ ) 形式不变;而如果在初始需求中  $p + d = 0$ ,必然存在一个关键的阶段  $K$  满足  $l_k > q$ ,当信息传播越过这个阶段后,随后的需求过程将始终保持 ARIMA(0,0,0) 形式不变. 换言之,需求信息必将最终稳定于 ARIMA( $p, d, p + d$ ) 或 ARIMA(0,0,0) 形式中的一种,而这两种形式在需求变量的系数和随机扰动变量的系数之间都存在着一种近乎完美的对称。

3) 通过库存系统的转换,需求信息的形式改变仅出现在 ARIMA 过程的移动平均部分. 因此,如果把一个 ARIMA 过程的移动平均部分作为该过程复杂性的一个指标(注意到其它两个部分在信息转换中保持不变),从需求到订单的转换并不必然增加信息结构的复杂性. 信息结构是否变得更复杂或更简单依赖于初始阶段中  $p + d$  和  $q$  的具体取值. 例如,当初始需求过程为 ARIMA(0,0, $q$ ) 且  $l + 1 > q$ ,那么随后的需求过程都将为一个 ARIMA(0,0,0) 过程. 这样,相对于输入,库存系统产生了一个结构更为简单的输出。

上述的讨论表明,库存系统从本质上对需求

信息流是起着某种“稳定”作用的,至少不是必然使信息趋向于无序. 形成这种“insight”很重要,它有助于我们对库存系统的作用保持清醒的认识,从而不轻易地去附和一度流行的“库存无用论”或“库存有害论”。

### 3.2 仿真工具设计

通过对定理 1 的证明,得到了需求和订单关系的函数关系. 根据这些关系,设计出一个适用于多阶段供应链的仿真工具,根据指定的需求过程自动地推导出对应的订单过程,而且仿真需求信息在多阶段供应链中的传播,以此分析信息在传播中所发生的变化<sup>[70]</sup>。

仿真程序需要连续完成三个任务:1) 根据初始阶段的需求过程表达式推导供应链后续阶段的需求过程表达式. 不失一般性,在下文的实验安排中,设置初始需求过程的均值  $u = 1000$  和随机变量方差为  $\sigma^2 = 50$ . 2) 仿真每个阶段的需求过程. 对于一个 ARIMA 需求过程,因为在时间  $t$  的需求实现能表达为从  $t_0$  到  $t$  的所有随机扰动的一个线性组合,通过随机地生成  $t$  个满足正态分布的扰动项,程序能有效地仿真  $t$  期内的初始需求. 而依据定理 1,当初始阶段的需求被确定后,所有后续阶段的需求也相应地被确定了. 为了便于比较,程序将不同阶段需求过程的时间序列曲线描绘在同一个时间序列图中,但不同阶段曲线的样本点有不同形状. 通过比较曲线的波动程度,能直观地了解各阶段需求过程的特征. 3) 使用不同的指标量化需求信息的波动. 对任一阶段  $k$ ,使用样本点集合  $\{D_{k,t}\}$  的方差作为该阶段需求过程方差的主要衡量指标,记为  $V(D_k)$ . 为了比较信息转换的幅度,设计两个指标:一个是基于样本点方差的相对比较,记为  $A_{i,j} = \frac{V(D_i) - V(D_j)}{V(D_j)}$ ;另一个是基于样本点本身的比较,记为  $B_{i,j} = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (D_{i,t} - D_{j,t})^2}}{T}$ . 如果使用指标  $A_{i,j}$ ,出现  $|A_{k+2,k+1}| > |A_{k+1,k}|$  意味着信息从阶段  $k$  传播到  $k + 2$  过程中,转换幅度增强;出现  $|A_{k+2,k+1}| < |A_{k+1,k}|$  意味着信息转换的幅度减弱. 如果使用指标  $B_{i,j}$ ,出现  $B_{k+2,k+1} > B_{k+1,k}$  意味着信息转换的幅度增强;出现  $B_{k+2,k+1} < B_{k+1,k}$  意味着信息转换的幅度减弱。

### 4 需求信息在供应链中的传播规律

借助于定理 1 提供的计算框架和仿真工具提供的图形界面,作者系统地研究了需求信息在供应链中传播的规律. 这些规律有的已在经典的文献中有记载,而不少其它的则是完全新颖的,需要进一步地研究. 本文的主要结果包括以下三个方面:

#### 4.1 牛鞭效应,反牛鞭效应与它们的跃迁点

图 3 展示了一个典型的牛鞭效应图象. 在这个案例中,初始阶段需求模式为  $ARIMA(1,0,1)$ , 过程参数为:  $\phi_{1,1} = 0.5, \theta_{1,1} = 0.1, l_1 = l_2 = 1$ . 通过逐步改变  $\theta_{1,1}$  的值并保持其它参数值不变, 实验显示:当  $\phi_{1,1} > \theta_{1,1}$ , 牛鞭效应始终出现在供应链第 2 阶段. 与此同时,实验中也观察到其它两个现象:(1) 当  $\phi_{1,1} < \theta_{1,1}$ , 供应链第 2 阶段比第 1 阶段有较小的方差;(2) 当  $\phi_{1,1} = \theta_{1,1}$ , 供应链第 2 阶段和第 1 阶段的需求过程完全相同. 图 4 和 5 分别展示了这两个现象. 在图 4 中  $\theta_{1,1} = 0.9$ , 图 5 中  $\theta_{1,1} = 0.5$ , 其它参数与图 3 案例中的设置相同.

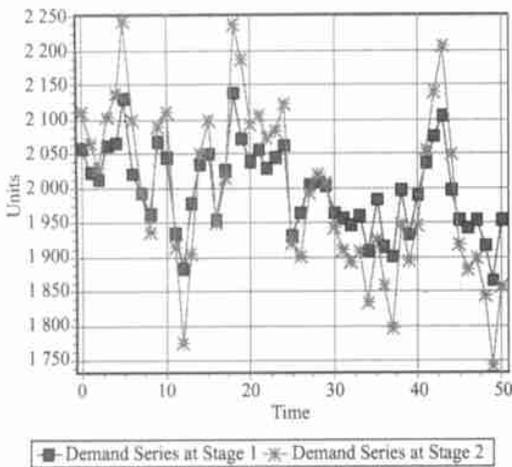


图 3 牛鞭效应

可使用反牛鞭效应以描述展示在图 4 中的现象:订单过程的方差小于需求过程的方差;用信息稳定效应以描述展示在图 5 中的现象:订单过程和需求过程完全相同. 这样可发现供应链中需求信息的转换存在着三种情况:方差增大,方差减小以及方差不变. 这个发现完美地吻合了图 2 中引用的 Krane 和 Braun<sup>[61]</sup> 在现实中观察到的现象.

关于上述的现象,很自然的两个问题是:(1)

什么条件导致不同现象的发生?(2) 这些现象之间是什么关系? 实验显示,下面的规律适用于一切形式的 ARIMA 需求过程:

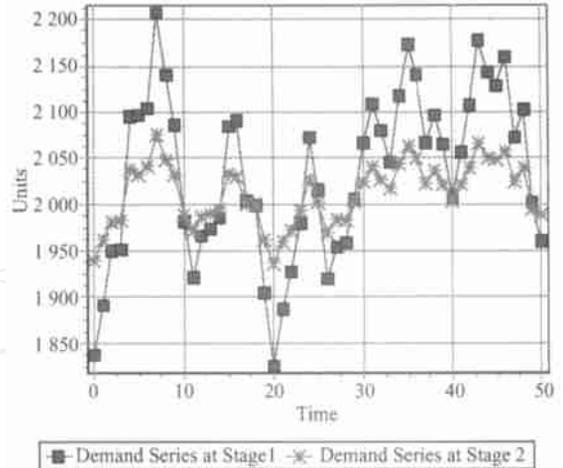


图 4 反牛鞭效应

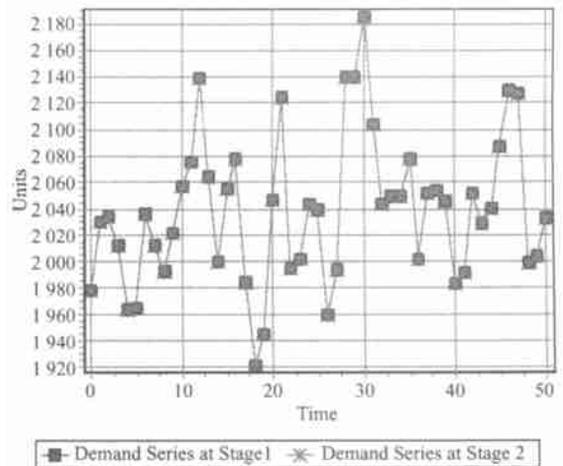


图 5 信息稳定效应

**规律 1** 对每一种 ARIMA 需求形式,在它们的参数对  $\{\phi_{1,i}, \theta_{1,i}\}$  中存在一个跃迁点. 当  $\{\phi_{1,i}, \theta_{1,i}\}$  的值逼近这个跃迁点时,信息将在随后的所有阶段保持稳定. 对一个  $ARIMA(p,0,0)$  过程,这个跃迁点是  $\phi_{1,i} = 0 (i \in [1,p])$ ; 对一个  $ARIMA(0,0,q)$  过程,这个跃迁点是  $\theta_{1,i} = 0 (i \in [1,q])$ ; 对一个  $ARIMA(r,0,r)$  过程,这个跃迁点是  $\phi_{1,i} = \theta_{1,i} (i \in [1,r])$ .

如果初始阶段的需求过程是  $ARIMA(p,0,q) (p \geq q)$ , 它将在第 2 阶段改变为  $ARIMA(p,0,p)$  形式,并保持这一形式直到无穷阶段. 这样,  $ARIMA(p,0,q) (p \geq q)$  的跃迁点也许可以在高

于 2 的阶段达到。

此外,本文的实验也在很多的案例中观察到牛鞭效应和反牛鞭效应发生的充分条件. 以下的规则总结了这些发现.

**规律 2** 当初始阶段的 ARIMA( $p, 0, 0$ ) 需求过程满足平稳条件且  $|\phi_{1,i}| < 1 (i \in [1, p])$ , 如果  $\phi_{1,i} < 0 (i \in [1, p])$ , 反牛鞭效应出现在第 2 阶段; 如果  $\phi_{1,i} > 0 (i \in [1, p])$ , 牛鞭效应出现在第 2 阶段.

**规律 3** 当初始阶段的 ARIMA( $0, 0, q$ ) 过程满足  $l_1 + 1 \leq q$ , 如果  $\phi_{1,i} < 0 (i \in [1, q])$ , 牛鞭效应出现在第 2 阶段; 如果  $\phi_{1,i} > 0 (i \in [1, q])$ , 反牛鞭效应出现在第 2 阶段.

当初始阶段面临一个 ARIMA( $p, 0, q$ ) 的需求过程, 且  $p$  和  $q$  是任意整数的时候, 没有发现一个普遍适用的信息转换规律. 然而, 对每一类具体的  $p$  和  $q$  的值, 都的确存在一个信息转换的跃迁点. 在这个点两边, 牛鞭效应和反牛鞭效应在一定条件下是对称的. 例如, 如果第 1 阶段的需求是一个 ARIMA( $1, 0, 1$ ) 过程, 下述规则始终成立:

**规律 4** 当初始阶段的 ARIMA( $1, 0, 1$ ) 过程满足平稳条件且  $|\phi_{1,1}| < 1$ , 如果  $\phi_{1,1} < \theta_{1,1}$ , 反牛鞭效应出现在第 2 阶段; 如果  $\phi_{1,1} > \theta_{1,1}$ , 牛鞭效应出现在第 2 阶段.

为了直观地阐述规律 2、3、4, 分别使用一个 ARIMA( $1, 0, 0$ ) 过程, 一个 ARIMA( $0, 0, 1$ ) 过程和一个 ARIMA( $1, 0, 1$ ) 过程来仿真信息的转换规律. 对 ARIMA( $1, 0, 0$ ) 形式的初始需求, 以 0.1 的步长将  $\theta_{1,1}$  的值从 -0.4 增加到 0.4; 对 ARIMA( $0, 0, 1$ ) 形式的初始需求, 以 0.1 的步长将  $\theta_{1,1}$  的值从 -0.4 增加到 0.4; 而对 ARIMA( $1, 0, 1$ ) 过程, 固定  $\phi_{1,1} = 0.5$ , 以 0.1 的步长将  $\theta_{1,1}$  的值从 0.1 增加到 0.9. 提前期始终设置为 1. 信息在第 2 阶段转换的幅度用  $A_{2,1}$  表示. 根据定义, 如果  $A_{2,1} > 0$ , 牛鞭效应出现在第 2 阶段; 如果  $A_{2,1} < 0$ , 反牛鞭效应出现在第 2 阶段; 如果  $A_{2,1} = 0$ , 信息稳定效应出现在第 2 阶段.  $A_{2,1}$  的绝对值越大, 信息转换的幅度越大. 仿真的结果显示在图 6 中. 观察图中的三个案例都可以发现: 当横坐标的值从零开始逐渐增大, 逼近于跃迁点时, 信息转换的幅度单调地减小; 而当横坐标越过跃迁点并逐渐增大时, 信息转换的幅度单调地增大.

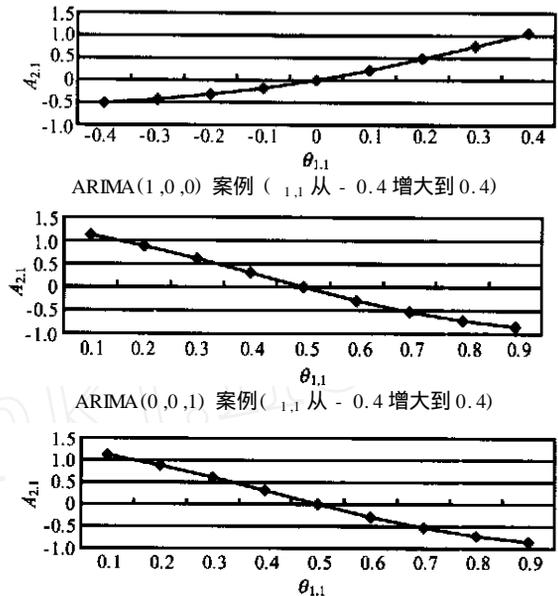


图 6 从牛鞭效应向反牛鞭效应的跃迁

上述结果揭示: 牛鞭效应和反牛鞭效应可以认为是一对对偶的现象, 它们对称地存在于跃迁点的两侧, 并在一定条件下可以相互转化. 这个结论不但完整地概括了在现实中观察到的现象, 而且也为长期争论的关于生产平滑模型的有效性问题提供了一个全新的解释: 需求和供应之间的波动大小并不仅取决于库存系统本身的特征, 还有一个关键的因素需要综合考虑, 即系统所面临的需求的特征. 在同样的库存策略下, 不同的需求形式可以产生不同的结果, 有时是需求放大, 有时是需求减小, 有时是需求不变. 因此, 仅局限于库存的一端争论生产平滑模型的对错是没有意义的.

#### 4.2 需求信息在供应链高阶阶段的传播

研究需求信息在供应链中的传播规律, 一个需要解决的重要问题是: 如果信息在传播过程中出现扭曲, 这种扭曲将以放大的形式向上游传播 (如同 Lee et al.<sup>[11]</sup> 所预言的那样), 还是有可能逐渐趋向停止. 仿真实验提供的答案是: 根据初始阶段参数的设置不同, 两种情况都有可能发生.

图 7 和图 8 演示了需求信息在向供应链高阶阶段传播时, 信息转换的两种典型趋势. 图中的 4 条时间序列曲线分别是供应链的第 1, 100, 500 和 1 000 阶段的需求过程曲线. 图 7 的终端需求是一个 ARIMA( $4, 0, 4$ ) 过程, 参数设置为  $\phi_{1,i} = \{-0.8, -0.5, -0.2, -0.2\}$ ,  $\theta_{1,i} = \{0.5, 0.2, 0.1, 0.1\} (i$

[1,4],  $l_k = 3(k \in [1, 1000])$ . 从图中可以看到, 后续阶段的需求过程的波动是如此显著以至比较之下, 前面阶段的需求曲线几乎呈现为一条直线. 图 8 显示的是另一幅图景: 阶段 100, 500 和 1000 的

需求曲线完全重合了. 这说明在阶段 100 以前的某个阶段, 信息的转换已经停止. 图 7 和 8 在参数上的唯一差别在于图 8 中  $l_k = 4(k \in [1, 1000])$ , 其它参数的设置都相同.

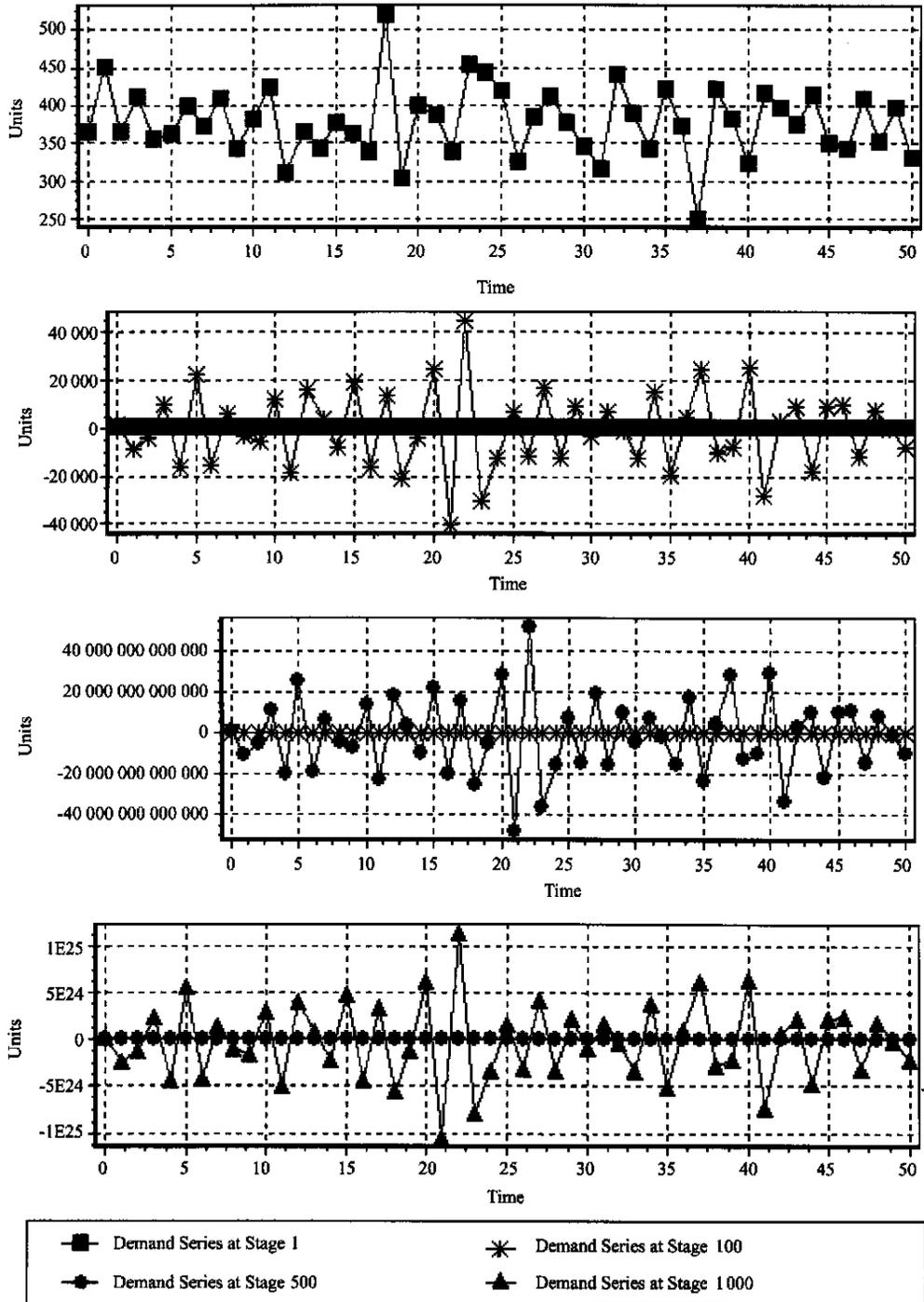


图 7 信息扭曲以放大的形式向上游传播案例

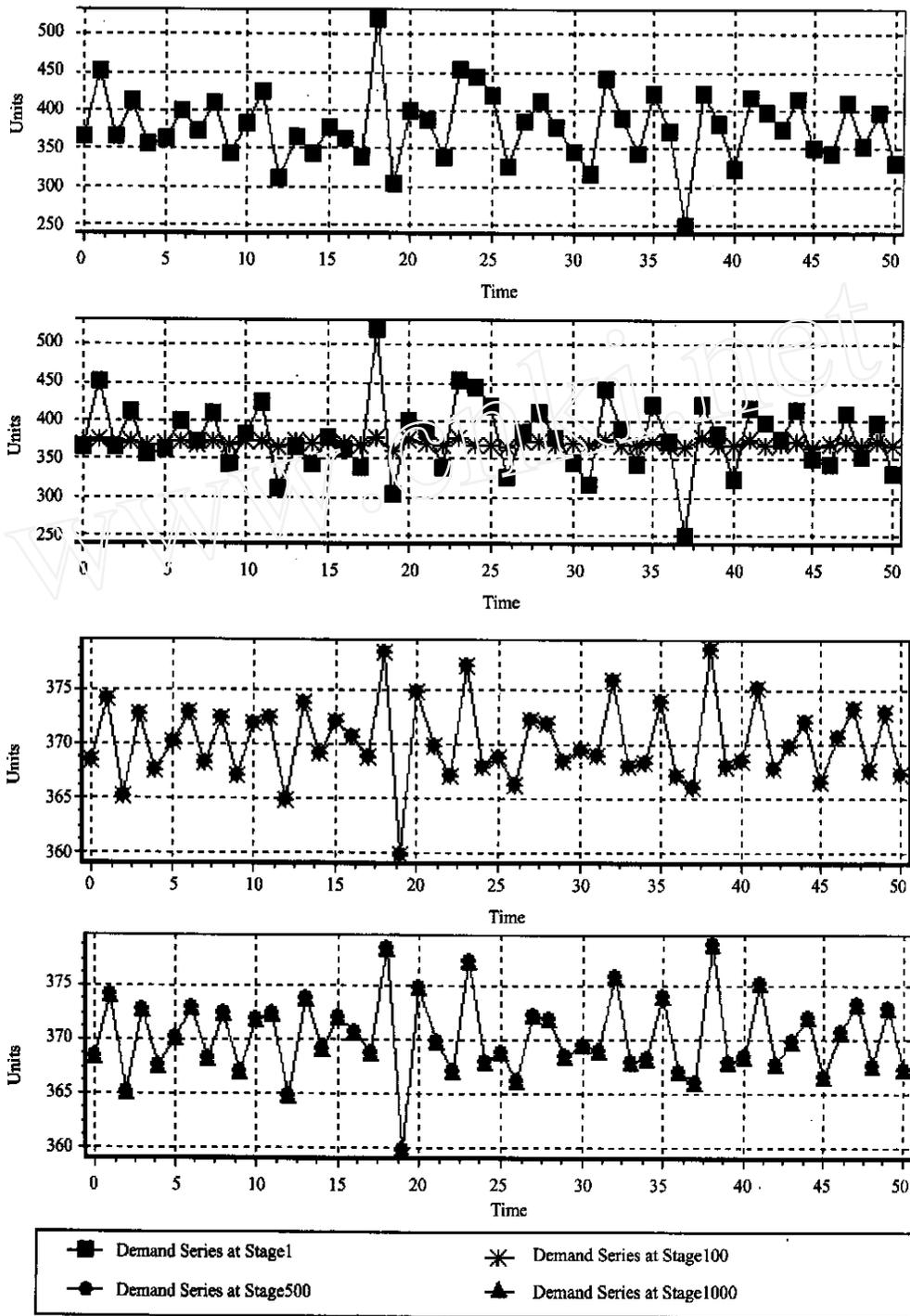


图 8 信息扭曲停止于某一阶段的案例

为了确定信息扭曲在什么条件下将增大到无穷,而在什么条件下将停止于某一阶段,作者从信息传播过程中需求方差的变化规律以及过程表达式的系数变化规律两个角度作进一步的分析.方差变化可以通过观察方差序列 $\{V(D_k)\}$ 得到.而对于系数变化,注意到对一个初始形式为  $ARIMA(p, 0,$

$q)$  的需求信息流,在第 2 阶段之后,系数变化仅发生在移动平均部分,因此可以通过观察系数序列 $\{k_i\} (i = [1, p])$  随阶段数  $k(k > 1)$  变化的规律来进一步了解信息传播的规律.仿真实验发现:对所有形式的  $ARIMA$  需求过程,方差序列 $\{V(D_k)\}$  和系数序列 $\{k_i\}$  的改变仅仅存在三种不同的形

式.接下来的三个图使用初始形式为 ARIMA(2,0,2) 的需求信息流演示这三种形式:在图 9 中,随着阶段数  $k$  的增加,过程的方差值  $\{V(D_k)\}$  (图的上部) 增加到一个上限,并在随后的阶段稳定于上限值;与此同时,过程的系数  $\{\theta_{k,1}\}$  (图的中部) 和  $\{\theta_{k,2}\}$  (图的底部) 也分别稳定于一个常数.在图 10 中,随着阶段数  $k$  的增加,过程的方差值  $\{V(D_k)\}$  (图的上部) 减小到一个下限,并在随后的阶段稳定于下限值;与此同时,过程的系数  $\{\theta_{k,1}\}$  (图的中部) 和  $\{\theta_{k,2}\}$  (图的底部) 也分别稳定于一个常数.在图 11 中,随着阶段数  $k$  的增加,过程的方差值  $\{V(D_k)\}$  (图的上部) 增大到无穷;与此同时,过程的系数  $\{\theta_{k,1}\}$  (图的中部) 和  $\{\theta_{k,2}\}$  (图的底部) 仍然分别稳定于一个常数.

在上述三种变化形式中,一些规律是共同的:

(1) 方差序列可能增大到无穷,也可能稳定于一

个常数;(2) 系数序列必然稳定于一个常数.此外,如果定义系数序列  $\{\theta_{k,i}\}$  稳定后的常数为  $\theta_i (i = [1, p])$ , 数据分析发现:如果  $\theta_i = \phi_{1,i} (i = [1, p])$ , 方差序列必然稳定于常数;相反地,如果  $\theta_i \neq \phi_{1,i} (i = [1, p])$ , 方差序列必然增大到无穷.上述的发现可以归纳为下述规律:

**规律 5** 如果供应链的初始阶段面临一个平稳的 ARIMA( $p, 0, q$ ) 需求过程,当需求信息从初始阶段向高阶传播时,需求过程的系数  $\theta_{k,i} (i = [1, p])$  稳定于一个常数集  $\theta_i (i = [1, p])$ , 即  $\lim_{k \rightarrow \infty} \theta_{k,i} = \theta_i (i = [1, p])$ . 如果  $\theta_i = \phi_{1,i} (i = [1, p])$ , 需求的方差将最终稳定于一个常数,这意味着在一定的阶段之后,信息扭曲将不再发生. 如果  $\theta_i \neq \phi_{1,i} (i = [1, p])$ , 需求的方差将趋向于无穷大,这意味着信息扭曲将趋向于无穷大.

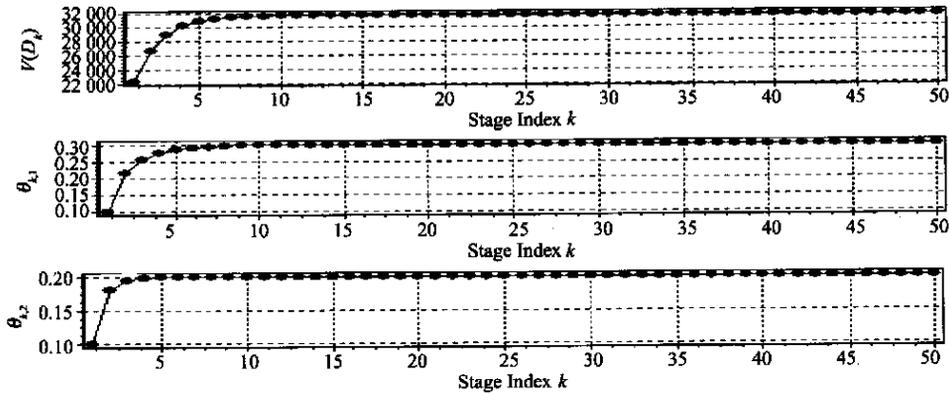


图 9 需求方差增大到上限的案例

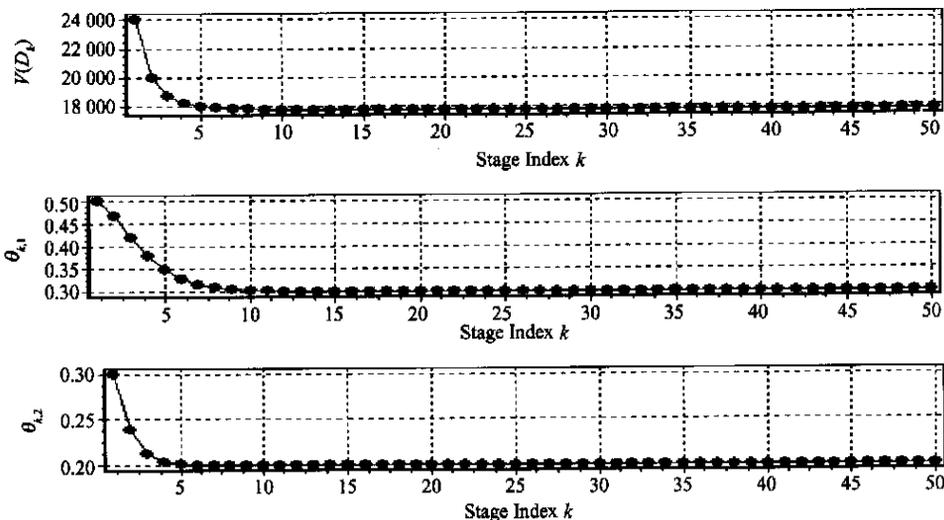


图 10 需求方差减小到下限的案例

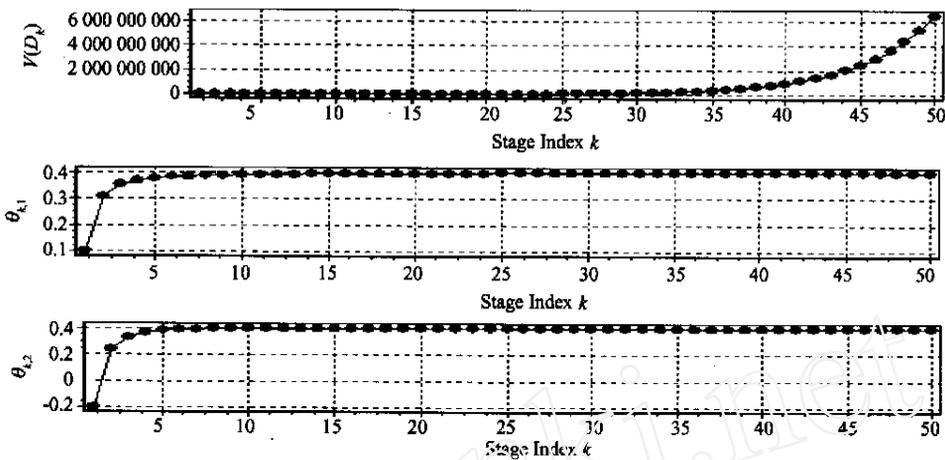


图 11 需求方差增大到无穷的案例

在 3.1 节中, 讨论了库存系统对需求信息的三个稳定作用. 规律 5 表明, 库存系统的稳定作用还有第 4 个方面: 它使需求过程的系数保持稳定, 并在一定条件下使需求过程的方差停止改变. 因此可以作出结论: 当初始阶段的需求信息满足一定条件时, 在信息向上游传播经过一定的阶段后, 各阶段需求过程的表达和方差都将完全相同, 呈现信息稳定效应. 实验也观察到, 在大部分的实验中这个关键阶段的数值很小, 一般不超过 4 阶.

### 4.3 提前期悖论

在现有的文献中, 提前期的存在始终被认为是造成牛鞭效应的一个主要因素: 提前期越大, 牛鞭效应越显著<sup>[1, 11, 15, 38, 39, 71]</sup>. 因此, 仿真研究的一个重要任务是验证提前期对需求信息传播的影响. 实验记录到以下一组典型的数据见表 3.

表 3 提前期对需求信息传播的影响

$l_i$	0	1	2	3	5	10	20	50	100	500
$B_{2,1}$	0.572	0.876	1.034	1.085	1.121	1.147	1.149	1.155	1.155	1.166
$B_{3,2}$	0.429	0.219	0.111	0.054	0.014	0	0	0	0	0
$B_{4,3}$	0.107	0.055	0.028	0.014	0.003	0	0	0	0	0

上述数据是基于一个 ARIMA(1, 0, 1) 的初始需求过程, 参数  $\phi_{1,1} = 0.5$ ,  $\psi_{1,1} = 0.1$ ,  $l_k = 1 (k [1, 4])$ . 在保持其它参数不变的前提下,  $l_i$  的值从 0 增大到 500. 使用  $B_{i,j}$  来量化信息转换的幅度. 值  $B_{2,1}$  显示的是第 2 阶段的需求过程相对于第 1 阶段的转换情况, 它随提前期增大而增大的事实证实了长期以来一个观点: 提前期对牛鞭效应的加速作用. 真正令人惊奇的是  $B_{3,2}$  和  $B_{4,3}$  的值. 它们显示: 随着  $l_i$  的增大, 信息的转换幅度减小到

0. 这意味着第 1 阶段的提前期的增加, 促使第 2 和第 3 阶段所面临的需求与该阶段发出的订单趋向于相同. 这说明长的提前期增加了当前阶段的牛鞭效应的幅度, 但却抑制了更高阶段的牛鞭效应的幅度. 这个现象可称为提前期悖论, 因为它似乎意味着长提前期对高阶的参与者有弊有利的一面, 而这是与我们的直觉以及迄今为止所有的研究结论相违背的.

实验表明: 提前期悖论现象普遍存在于各种需求形式中, 因此不能仅当作一个偶然的事件来对待, 而应该仔细去考虑它的经济学和管理学内涵. 长提前期造成牛鞭效应在下一阶段增大和在更高阶段减小之间存在着什么关系? 这是否说明长提前期有它的有利的一面? 怎么解释这种现象发生的原因? 进一步的研究表明: 提前期悖论产生的原因在于当满足一定的条件时, 需求信息的方差改变不会无限制地发展下去, 它将最终逼近一个上限或下限 (参见规律 5). 这样, 某一阶段的长提前期将使该阶段的需求方差更大地逼近这个边界值, 并使后续阶段需求过程的方差的变化空间缩小, 从而在后续阶段呈现出信息稳定效应.

在长提前期下, 后续阶段所面临的需求和他们发出的订单的方差是接近的, 这种需求和供应“匹配”的现象可能诱使上游的公司有意识地拉长他们的提前期, 从而试图让牛鞭效应仅仅集中在前一阶段, 把由此而造成的损失更多由前一阶段的公司来承担. 尽管这样的策略似乎是有吸引力的, 但是从长期来看, 这个策略对供应链上每个企业都是有害的, 包括实行这种策略的公司本身.

道理很明显:如果一个公司面临的需求的方差越大,公司面临的风险也越大,因为此时缺货造成的损失或因为库存积压造成的费用都将随之增大。因此,所有的公司都希望面临一个平稳的需求。但是给客户供货时过长的提前期将使客户的订单方差很快增大到牛鞭效应的上限,这对公司显然是弊大于利。因此,提前期悖论并不意味着推翻传统的理论,它只是帮助我们更深刻和细致地理解了提前期在需求信息传播中所起的作用。

## 5 结论和进一步的工作

本文介绍了国内外关于牛鞭效应和与之紧密相关的生产平滑模型有效性问题的研究进展,也扼要地叙述了作者在这个领域所做的部分工作。与国内外同行的工作相比较,上述工作的意义主要体现在:

(1) 在一般性的 ARIMA 框架下,证明了:如果初始阶段的需求过程满足 ARIMA 形式,在最优适应性库存策略下,后续阶段的需求过程必然满足 ARIMA 形式。进一步地,后续阶段需求过程的参数和性质都可以根据初始阶段需求过程的参数和性质而采用递归的方法计算得到。这在国际上是首次精确地量化了需求和订单在 ARIMA 框架下的数量关系。这一关键结论提供了研究牛鞭效应和信息共享问题等的理论基础。

(2) 首先提出并验证了反牛鞭效应 (anti-bullwhip effect) 的存在。与牛鞭效应相反,反牛鞭效应描述了订单过程的方差小于需求过程的方差的现象。本文不仅从数学上推导了这个现象的存在,并从实证研究中获得了大量的支持证据。牛鞭效应和反牛鞭效应与经济学中的生产平滑模型紧密相关。而关于这个模型的有效性问题已经持续争论了接近 20 年。本文的工作揭示:牛鞭效应和反牛鞭效应应该被看作两个对偶的现象,它们对称地存在于一个跃迁点的两侧;当需求模式的参数变化时,可以从一个现象跃迁到另一个现象。这样,本文的工作全面地解释了在实证研究中所观察到的现象,对生产平滑模型有效性问题的最终解决提供了一个可行的途径。

(3) 揭示了需求信息在供应链的高阶阶段的传播并不是像权威著作中所预言的那样,必然发

生更大的扭曲。作者发现:需求扭曲在供应链的高阶可能增大到无穷,也可能减小到零,这一切决定于初始阶段的参数设置。在一些特定的需求模式下,需求扭曲在供应链的高阶阶段必然消失。

(4) 揭示了“提前期悖论”的存在:尽管某一阶段的提前期增长将使下一阶段的需求转换变得更加剧烈(如同相关文献所证明的那样),然而提前期的增长也将使更高阶段的需求转换的幅度减小。提前期悖论的存在意味着高阶的参与者也许有意愿保持一个长的提前期,以将他们的订单与需求“匹配”,从而把所有的损失转嫁给下游的参与者。作者分析了提前期悖论产生的原因,并指出了它对供应链整体绩效的危害。

简而言之,本文的工作意义可以用一句谚语来概括:‘a coin has two sides’(每一枚硬币都有它的两面):作者验证了牛鞭效应的存在,但同时也揭示了它的对偶现象,即反牛鞭效应的存在;验证了牛鞭效应的高阶放大现象,但同时也揭示了它的高阶衰减现象;验证了长提前期将加剧当前阶段的牛鞭效应,但同时也揭示了它对更高阶段的牛鞭效应所起的抑制作用。所有上述的工作都被集成在一个统一的模型框架内,由严格的数学推导所得出,并为大量的计算机仿真实验和实践的应用研究数据所支持。

在本文的理论框架下,仍然存在着不少需要进一步深入研究的议题。包括:

(1) 一般关联需求模式下的需求方差转换的分析研究。本文的工作给出了一般关联需求模式下需求和订单的关系,并根据这个关系,采用仿真的方法研究了需求信息在供应链中传播的一般规律。此外,也已经采用一个低阶的 ARIMA(1,0,1) 需求模式,给出了大部分规律的分析证明<sup>[72]</sup>。但是如何在一般的 ARIMA 模式下用分析方法证明这些规律?迄今为止,还没有找到有效的方法。根据分析,如果一般关联需求模式下的信息方差转换的分析函数能够被给出,对这些规律的证明将迎刃而解,并有可能发现更多有价值的规律,这对最终彻底理解需求信息流在供应链中的传播将起到关键的作用。

(2) 一般网络供应链模型下的牛鞭效应研究。本文对牛鞭效应的研究始终是基于单项目且每阶段单参与者的假设。尽管这个简化的模型有

助于将重点集中在分析信息的跨阶段传播上,但是,当引入多项目且每阶段有多个参与者时,模型和结论是否仍然成立?最近的一些初步研究表明:多项目和多参与者的引入不会动摇本文的基本结论,因为不管怎样,多个 ARIMA 过程的叠加仍然是一个 ARIMA 过程。但是因为新条件的引入,将对计算的方法和结果的表达带来许多困难。作者目前也在着手这方面的工作。

(3) 牛鞭效应的消减措施研究。经典的研究认为:牛鞭效应是不能绝对消除的,只能考虑合理的措施来减轻它的影响。但是,由于作者证明了反牛鞭效应的存在,对这个结论的有效性也需要重新思考:为什么管理者仅仅去考虑怎样消除或减轻牛鞭效应呢?难道不能考虑采用合理的措施,

将牛鞭效应“转变”为反牛鞭效应?对这个问题,目前考虑有两种可行的“转变”策略:一,通过合理的销售激励措施,改变终端消费者的需求模式,从牛鞭效应激发的需求过程转变为反牛鞭效应激发的需求过程。但是,这个激励措施是什么?在实践中有没有可借鉴的先例?有待进一步的研究。二,改变参与者的库存策略,从牛鞭效应激发的库存策略转变为反牛鞭效应激发的库存策略。尽管这样的代价是某阶段的参与者也许使用的不是对自身最优的策略,但是因为这种策略对上游的参与者将带来巨大的利益,可以通过利润返还等方式来弥补策略的实施者所蒙受的损失。关于这种反牛鞭效应激发的库存策略以及相应的协作策略研究是值得开展的。

#### 参 考 文 献:

- [1] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. Information distortion in a supply chain: The bullwhip effect[J]. *Management Science*, 1997, 43 (4): 546—558.
- [2] Lee H L, Padmanabhan V, Whang S. The bullwhip effect in supply chain[J]. *Sloan Management Review*, 1997, 38: 93—102.
- [3] Hammond J H. Barilla SpA (A), Case N9 - 694 - 046[M]. Boston, MA: Harvard Business School Publishing, 1994.
- [4] McKenny J L, Clark T H. Campbell Soup Co.: A leader in Continuous Replenishment Innovations, Case 9 - 195 - 124[M]. Boston, MA: Harvard Business School Publishing, 1995.
- [5] Edgehill J S, Olsmats C, Towill D R. Industrial case study on the dynamics and sensitivity of a close coupled production distribution system[J]. *International Journal of Production Research*, 1988, 26 (6): 1681—1693.
- [6] Fine C. Clock Speed, Winning Industry Control in the Age of Temporary Advantage[M]. Reading, MA: Perseus Books, 1998.
- [7] Holmstrom J. Product range management: A case study of supply chain operations in the European grocery industry[J]. *International Journal of Supply Chain Management*, 1997, 2 (8): 107—115.
- [8] Fransoo J C, Wouters M J F. Measuring the bullwhip effect in the supply chain[J]. *International Journal of Supply Chain Management*, 2000, 5 (2): 78—89.
- [9] Hamer A P. A method to avoid demand amplification in bulk paper distribution[J]. *Paper and Timber Journal*, 1996, 78 (3): 102—106.
- [10] Van Aken J. On the Control of Complex Industrial Organisations[M]. London: Martinus Nijhoff (Social Sciences Division), 1978.
- [11] Blackburn J D. The quick response movement in the apparel industry: A case study in time compressing supply chains[A]. in *Time-based Competition: The Next Battleground in American Manufacturing*[M]. Irwin, Homewood, I.L., Chapter 11, 1991.
- [12] Kurt Salmon Associates. Efficient Consumer Response: Enhancing Consumer Value in the Grocery Industry[R]. The Joint Industry Project on Efficient Consumer Response, Washington D. C., 1993.
- [13] Fuller J B, O'Conor J, Rawlinson R. Tailored logistics: The next advantage[J]. *Harvard Business Review*, 1993, May/June: 87—98.
- [14] McCullen P, Towill D. Diagnosis and reduction of bullwhip in supply chains[J]. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2002, 7 (3): 164—179.
- [15] Forrester J W. *Industrial Dynamics*[M]. Cambridge, MA: MIT Press, 1961.
- [16] Burbidge J L. *The Principles of Production Control*[M]. Plymouth: MacDonald and Evans, 1978.
- [17] Burbidge J L. Five golden rules to avoid bankruptcy[J]. *Production Engineer*, 1983, 62 (10): 965—981.

- [18] Burbidge J L. Automated Production Control with a Simulation Capability[M]. IFIP Working Paper, WGS(7), Copenhagen, 1984.
- [19] Towill D R. Forridge-principles of good practice in material flow[J]. Production Planning and Control, 1997, 8(7): 622—632.
- [20] Sterman J D. Modeling managerial behavior: Misperceptions of feedback in a dynamic decision making experiment[J]. Management Science, 1989, 35(3): 321—339.
- [21] Sterman J D. Teaching takes off, flight simulators for management education[J]. OR/MS Today, 1992, 19(5): 40—44.
- [22] Sterman J D. The beer distribution game[A]. J. Heineke and L Meile, eds. Games and Exercises for Operations Management [C]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995. 101—112.
- [23] Diehl E, Sterman J D. Effects of feedback complexity on dynamic decision making[J]. Organization Behavior: Human Decision Process, 1989, 62(2): 198—215.
- [24] Kahn J. Inventories and the volatility of production[J]. American Economic Review, 1987, 77: 667—679.
- [25] Eichenbaum M S. Some empirical evidence on the production level and production cost smoothing models of inventory investment [J]. American Economic Review, 1989, 79(4): 855—864.
- [26] Naish H F. Production smoothing in the linear quadratic inventory model[J]. Quarterly Journal of Economics, 1994, 104: 864—875.
- [27] Metters R. Quantifying the bullwhip effect in supply chains[J]. Journal of Operations Management, 1997, 3(15): 89—100.
- [28] Heyman D, Sobel M. Stochastic Models in Operations Research[M]. Vol II, McGraw Hill, New York, 1984.
- [29] Cachon G P, Lariviere M A. Capacity allocation using past sales: When to turn and earn[J]. Management Science, 1999, 45(5): 685—703.
- [30] Cachon G P, Lariviere M A. Capacity choice and allocation: Strategic behavior and supply chain performance[J]. Management Science, 1999, 45(8): 1091—1108.
- [31] Kelle P, Milne A. The effect of (s, S) ordering policy on the supply chain[J]. International Journal of Production Economics, 1999, 59: 113—122.
- [32] Cachon G P. Managing supply chain demand variability with scheduled ordering policies[J]. Management Science, 1999, 45(6): 843—856.
- [33] Drezner Z, Ryan J, Simchi-Levi D. Quantifying the Bullwhip Effect: The Impact of Forecasting, Leadtime and Information[M]. Working Paper, Northwestern University, Evanston, IL, 1996.
- [34] Baganha M, Cohen M. The stabilizing effect of inventory in supply chains[J]. Operations Research, 1998, 46: S72—S83.
- [35] Graves S C. A single-item inventory model for a nonstationary demand process[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 1999, 1: 50—61.
- [36] Kulp S C. Asymmetric Information in Vendor Managed Inventory Systems[M]. Working Paper, Harvard University, Boston MA, 2000.
- [37] Lee H L, So K, Tang C. The value of information sharing in a two-level supply chain[J]. Management Science, 2000, 46: 626—643.
- [38] Chen F, Drezner Z, Ryan J, 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.
- [39] Chen F, Ryan J, Simchi-Levi D. The impact of exponential smoothing forecasts on the bullwhip effect[J]. Naval Research Logistics, 2000, 47: 269—286.
- [40] Gilbert K. An Autoregressive Integrated Moving Average Supply Chain Model[R]. Working Paper, University of Tennessee, Knoxville, TN, 2002.
- [41] Aviv Y. A time-series framework for supply chain inventory management[J]. Operations Research, 2003, 51(2): 210—227.
- [42] Dejonckheere J, Disney S M, Lambrecht M R, Towill D R. Measuring and avoiding the bullwhip effect: A control theoretic approach[J]. European Journal of Operational Research, 2003, 147(3): 567—590.
- [43] Alwan L C, Liu J J, Yao D. Stochastic characterization of upstream demand processes in a supply chain[J]. IIE Transaction, 2003, 35: 207—219.
- [44] 万杰, 李敏强, 寇纪淞. 供应链中分配机制对牛鞭效应的影响研究[J]. 系统工程学报, 2002, 17(4): 340—348.

- [45]石小法, 张丽清, 杨东援. 信息对供应链的影响研究[J]. 系统工程, 2002, 20 (3): 37—40.
- [46]张 钦, 达庆利, 沈厚才. 在 ARIMA(0,1,1) 需求下的牛鞭效应与信息共享的评价[J]. 中国管理科学, 2001, 9 (6): 1—6.
- [47]黄小原, 卢 震, 吴红招. 电子商务系统牛鞭效应的 H 控制应用分析[J]. 控制工程, 2002, 9 (5): 11—14.
- [48]黄小原, 卢 震. 分销中心供应链模型及其牛鞭效应的 H 控制[J]. 中国管理科学, 2003, 11 (1): 42—47.
- [49]傅 焯, 郑绍濂. 供应链中的“牛鞭效应”——成因及对策分析[J]. 管理工程学报, 2002, 16 (1): 82—83.
- [50]达庆利, 张 钦, 沈厚才. 供应链中牛鞭效应问题研究[J]. 管理科学学报, 2003, 6 (3): 86—93.
- [51]Holt C C, Modigliani F, Muth J F, Simon H. Planning Production, Inventories, and Work Force[M]. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1960.
- [52]Blanchard O J. The production and inventory behavior of the American automobile industry[J]. Journal of Political Economy, 1983, 91: 365—400.
- [53]Blinder A S. Inventories and sticky prices[J]. American Economic Review, 1982, 72: 334—349.
- [54]Blinder A S. Can the production smoothing model of inventory behavior be saved?[J]. Quarterly Journal of Economics, 1986, 101 (3): 431—454.
- [55]Blinder A S, Maccini L J. The resurgence of inventory research: What have we learned?[J]. Journal of Economic Surveys, 1991, 5 (4): 291—328.
- [56]Blinder A S, Maccini L J. A critical assessment of recent research on inventories[J]. Journal of Economic Perspectives, 1991, 5 (1): 73—96.
- [57]West K D. A variance bounds test of the linear quadratic inventory model[J]. Journal of Political Economy, 1986, 94 (4): 374—401.
- [58]Fair R C. The production smoothing model is alive and well[J]. Journal of Monetary Economics, 1989, 24 (3): 353—370.
- [59]Miron J A, Zeldes S P. Seasonality, cost shocks, and the production smoothing model of inventories[J]. Econometrica, 1988, 56 (4): 877—908.
- [60]Krane S D. The distinction between inventory holding and stockout costs: Implications for target inventories, asymmetric adjustment, and the effect of aggregation on production smoothing[J]. International Economic Review, 1994, 35 (1): 117—136.
- [61]Krane S D, Braun S N. Production smoothing evidence from physical product data[J]. Journal of Political Economy, 1991, 99 (3): 558—581.
- [62]Allen D S. Seasonal production smoothing[J]. Federal Reserve Bank of ST. Louis, Economic Review, 1999, (9/10): 21—40.
- [63]Michael F G, Brannon J I. Seasonality and the production smoothing model[J]. International Journal of Production Economics, 2000, 65: 173—178.
- [64]李 刚. 供应链中牛鞭效应与信息共享的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2003.
- [65]Ragunathan S. Information sharing in a supply chain: A note on its value when demand is nonstationary[J]. Management Science, 2001, 47 (4): 605—610.
- [66]Aviv Y. Gaining benefits from joint forecasting and replenishment processes: The case of autocorrelated demand[J]. Manufacturing and Service Operations Management, 2002, 4 (1): 55—74.
- [67]Box G E P, Jenkins G M, Reinsel G C. Time Series Analysis Forecasting and Control, 3<sup>rd</sup> Ed[M]. Holden-Day, San Francisco, CA, 1994.
- [68]Montgomery D C, Johnson L A. Forecasting and Time Series Analysis[M]. New York: McGraw Hill, 1976.
- [69]Li G, Wang S Y, Yu G, Yan H. The relationship between the demand process and the order process under a time series framework [J]. to appear in European Journal of Operational Research, 2004.
- [70]Li G, Wang S Y, Yu G, Yan H. Information transformation in a supply chain: A simulation study[J]. to appear in Computers and Operations Research, 2004.
- [71]Kaminsky P, Simchi-Levi D. A New Computerized Beer Game: A Tool for Teaching the Value of Integrated Supply Chain Management[M]. POMS Series in Technology and Operations Management, Vol. 1. Global Supply Chain and Technology Management, U. S. A., 1998.
- [72]Li G, Wang S Y, Yu G, Yan H. Information Transformation in a Supply Chain: A Theoretical Analysis[R]. submitted to Mann

facturing and Service Operations Management , 2003.

## **Bull whip effect and validity of production-smoothing model**

*LI Gang*<sup>1,2</sup>, *WANG Shou-yang*<sup>1</sup>, *YU Gang*<sup>3</sup>, *YAN Hong*<sup>4</sup>

1. Academy of Mathematics and Systems Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China ;
2. School of Economics and Management, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China ;
3. McCombs School of Business, University of Texas at Austin, Austin, Texas, U. S. A. ;
4. Department of Logistics, Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China

**Abstract**: This article reviews the main progress in studying the bullwhip effect in supply chains and the argument about the validity of the production-smoothing model. Some of our very recent achievements in these two areas are also introduced. Our work integrates a general ARIMA (autoregressive integrated moving average) demand process into a multi-stage supply chain, and by the integrated model studies systematically the propagation rules of the demand information flow. The findings of these propagation rules revoke some classical conclusions on the bullwhip effect, reveal some important and novel phenomena and provide a reasonable explain on the validity of the production smoothing model. Three questions are also asked for further investigations in the field.

**Key word**: supply chain; bullwhip effect; production-smoothing model