基于促销投资的供应链应急协调研究

冯花平，黄俊莲，李光杰
（北京工业大学耿丹学院 信息工程系，北京 101301）

摘　要：研究了由单制造商和单零售商组成的供应链中，零售阶段需求依赖于零售商的促销投资水平，当制造商的生产成本和零售商的存货投资成本同时出现扰动时的应急协调问题。通过对生产成本和存货投资成本的扰动程度进行情形分析，提出了不同程度扰动时的最优应对策略和协调机制。该机制为集中供应链系统中的决策者和制造商在面临生产成本和存货投资成本同时扰动时提供了理论决策依据。

关键词：供应链管理；应急管理；促销投资；最优应对策略；协调机制
中图分类号：TP391.9　　**文献标志码**：A　　**文章编号**：1001-3695(2012)04-1249-04
doi:10.3969/j.issn.1001-3695.2012.04.013

Study on supply chain disruption coordination based on sales promotion

FENG Hua-ping, HUANG Jun-lian, LI Guang-jie
(*Dept. of Information & Engineering, Gengdan Institute of Beijing University of Technology, Beijing* 101301, *China*)

Abstract: This paper studied coordination problem of a supply chain with one manufacturer and one retailer under the manufacture's production cost and retailer's sales promotion cost disruptions, which demand relied on the sales promotion efforts of retailer. It provided the optimal disruption strategy and coordination method by analyzing the different disruptions of production cost and sale promotion cost. The coordination methods provided theoretic decision-making for decision-maker and manufacturer facing production cost and retailer's sales promotion cost disruptions.

Key words: supply chain management; disruption management; sales promotion; optimal disruption strategy; coordination method

供应链管理研究的一个主要目标是实现供应链的协调运作，将应急管理的思想应用到供应链管理中，是近年来的一个新发展趋势。对于一类短生命周期的产品，当制造商根据市场预测制订了相应的生产计划后，由于一些突发事件（如机器故障、工人罢工、自然灾害和其他突发事件等）的发生常常给供应链造成不同程度的扰动，导致市场需求的不确定，使原来协调的供应链不再协调。应急管理就是为了处理制造商在生产计划执行阶段出现的不确定性问题。它在建立新的目标函数时，将偏差费用引入目标函数中进行考虑。

目前对于供应链突发事件应急管理的研究仅处于起步阶段。Qi 等人[1]第一次将应急管理方法应用到供应链管理中，研究了价格需求关系是线性情况下，需求出现扰动时供应链系统的应对策略。在此基础上，Xu 等人[2,3]在生产成本函数为凸函数和非线性需求函数的情形下，对需求扰动做了类似的研究。Huang 等人[4]则针对指数需求函数情形进行需求扰动的供应链应急协调研究。于辉等人[5]研究了突发事件对经典的利用数量折扣契约协调的供应链造成的影响，提出了一种新的具有抗突发事件的数量折扣契约。Xiao 等人[6]对突发事件造成投资敏感系数扰动的供应链应急协调问题进行了研究。上述文献仅对单因素扰动的供应链应急协调策略进行研究，而对于两个或两个以上的因素同时发生扰动的研究文献甚少。文献[7,8]仅研究了需求线形依赖于零售价格的情况下，两因素同时扰动时的应急协调问题。本文基于需求依赖于零售商的促销投资，在文献[6]研究的基础上，对其模型进行推广和深化，研究单个制造商和单个零售商组成的供应链系统，制造商生产成本和零售商的投资存货成本同时扰动的供应链协调问题。

1　基准的供应链模型

考虑由单个制造商和单个零售商组成的供应链系统，制造商销售一短生命周期产品（如流行服饰、鲜花、报刊杂志等）给零售商，零售阶段该产品的市场需求量由零售商的促销努力水平——货架展示量决定，产品展示得越多，顾客购买量就越大。本文假设需求函数为

$$q(I)=a+kI^{b} \tag{1}$$

其中：a 表示零售商促销投资前的市场规模，$a>0$；k 表示零售商的促销投资敏感系数；I 表示零售商的促销努力水平，即货架展示量；b 表示增量需求的投资弹性。一般地，促销投资越多，需求越大，而投资的边际需求递减，即有 $0<b<1$。

在销售季节之前，制造商首先根据零售商面临的市场需求进行预测，然后利用供应链契约或转移支付的支付方法确定出零售商在该需求下的最优订货量来制订生产计划；当销售季节来临时，零售商根据面临的实际市场需求和制造商提供的契约进行决策，确定是否订购产品。该过程可以看做是一个

收稿日期：2011-09-27；**修回日期**：2011-11-01

作者简介：冯花平（1979-），女，山西孝义人，副教授，博士，主要研究方向为信息管理、电子商务、供应链管理、数据库应用技术等（fenghuapingf-hp@126.com）；黄俊莲（1978-），女，黑龙江大庆人，副教授，硕士，主要研究方向为软件开发、算法研究等；李光杰（1980-），女，辽宁朝阳人，讲师，硕士，主要研究方向为软件工程.

Stackelberg博弈。

在这个博弈中,供应商和零售商都是独立的决策者,他们的目标是最大化各自的利润。设制造商的单位生产成本为常数 $c_m(c_m>0)$,零售商以固定价格 p 销售产品,其中 $p>c_m$,零售商的单位存货成本为 $h(h>0)$,则整个供应链系统的利润函数为 $f^{sc}(I)=(p-c_m)(a+kI^b)-hI$。经计算可知,当零售商的促销投资为 $I^*=((kb(p-c_m))/h)^{\frac{1}{1-b}}$ 时,供应链利润最大。此时,零售商的最优订购量和供应链的最大利润分别为 $q^*=a+k^{\frac{1}{1-b}}((b(p-c_m))/h)^{\frac{b}{1-b}}$ 和 $f^{sc*}=(p-c_m)(a+(kb)^{\frac{1}{1-b}}\frac{1-b}{b}\left(\frac{p-c_m}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}})$。

根据以上假设和文献[6]容易验证,制造商可以采用批发价格加促销补贴量契约 (w,s) 来实现供应链的协调,如定理1。

定理1　当批发价格加促销补贴契约 (w^*,s^*) 满足:

$$s^*=h\left(1-\frac{p-w^*}{p-c_m}\right)\quad c_m<w^*<p$$

分散式供应链可以达到集中式供应链的最大利润,实现供应链的协调。

2　生产成本和投资存货成本同时扰动的最优应对策略

2.1　集中式供应链最优应对策略

考虑供应链中存在集中决策者,制造商生产成本和零售商促销投资存货成本同时扰动时决策者的最优应对策略。

假设制造商生产成本和零售商促销投资存货成本的变化量分别用 Δc 和 Δh 表示,当且仅当 $c_m+\Delta c>0,h+\Delta h>0$ 时才有实际意义。当 Δc 和 Δh 为正时,分别表示生产成本和零售商促销投资存货成本的增加;当 Δc 和 Δh 为负时,分别表示生产成本和零售商促销投资存货成本的减少。用"¯"表示发生偏差后的情况,此处,偏差后的需求函数不变,仍为 $\bar{q}(\bar{I})=a+k\bar{I}^b$。尽管消费者需求和零售商的投资促销努力水平的关系没有发生变化,但是仍有可能会引起制造商生产计划的变化,因为零售商存货成本的扰动将影响其促销投资水平,促销投资水平高低又直接影响制造商的生产计划,而制造商生产成本的变化将直接对其生产计划产生影响。设生产数量变化量为 $\Delta q=\bar{q}-q^*$,当 $\Delta q<0$ 时,市场需求量减少,即制造商的生产计划应相应地减少,那么可能会有一些先前为生产产品所购买的原材料需要处理;当 $\Delta q>0$ 时,表示市场需求量增加,制造商必须生产更多的产品来满足新的需求。当然,由于需要利用更多的额外资源,且更重要的是要打破制造商原有的生产计划,这样不管是需求量增加还是需求量减少都将带来比原有成本更高的额外成本。因此,在进行新的生产计划和制定决策时,仍需像前面介绍的将这些额外费用作为新的目标函数的一部分来考虑。在发生突发事件的情况下,对于现实的需求 $\bar{q}$,考虑生产量偏差费用的供应链利润函数为

$$\bar{f}^{sc}(\bar{I})=(p-c_m-\Delta c)(a+k\bar{I}^b)-(h+\Delta h)\bar{I}-\lambda_1(k\bar{I}^b-kI^{*b})^+-\lambda_2(kI^{*b}-k\bar{I}^b)^+\tag{2}$$

其中:$\lambda_1,\lambda_2>0$,$(x)^+=\max(0,x)$。λ_1 是由于需求量增加时,增加的产品发生的额外单位成本;λ_2 是由于需求量减少,引起的额外单位处理成本。

为了获得集权供应链中最优的订购数量和最优投资,下面先做一个假设:

假设1　对于额外增加的产品的成本单价应小于产品的单位利润,即 $\lambda_1<p-c_m-\Delta c$。

假设1是符合实际情况的,因为如果额外增加的生产数量的惩罚单价大于产品的单位利润,制造商增加生产数量将没有任何利润,所以没有必要来满足额外的需求。

引理1　假设 $\bar{I}^*$ 是式(2)中供应链系统利润函数 $\bar{f}^{sc}(\bar{I})$ 取得最大值时的最优促销存货量,则:

(a)当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant0$ 时,有 $\bar{I}^*\geqslant I^*$;

(b)当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant0$ 时,有 $\bar{I}^*\leqslant I^*$。

证明　反证法。假设当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant0$ 时,有 $\bar{I}^*<I^*$,则函数 $\bar{f}^{sc}(\bar{I})$ 的最优化问题可退化为求解式(3)的最优解:

$$\bar{f}_0^{sc}(\bar{I})=(p-c_m-\Delta c)(a+k\bar{I}^b)-(h+\Delta h)\bar{I}-\lambda_2(kI^{*b}-k\bar{I}^b)\tag{3}$$

容易验证,$\bar{f}_0^{sc}(\bar{I})$ 为 $\bar{I}$ 的严格凹函数,则存在唯一的最优解:

$$\bar{I}_1=\left(\frac{kb(p-c_m-\Delta c+\lambda_2)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\tag{4}$$

由 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant0$,$\lambda_2h>0$ 和 $0<b<1$,则有:

$$\left(\frac{kb(p-c_m-\Delta c+\lambda_2)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\geqslant\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\Leftrightarrow$$
$$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c-h\lambda_2\leqslant0\tag{5}$$

即 $\bar{I}^*\geqslant I^*$,与假设矛盾,故(a)成立;同理可证(b)。

根据引理1的条件,下面分两种情形来讨论制造商的生产成本和零售商的促销投资存货成本同时发生偏差时,集权供应链中集中决策者的最优应对策略。

2.1.1　情形1:$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant0$

在该情形下,由引理1可知,求式(2)的最优解问题可以简化为求解下面问题的最优解:

$$\bar{f}_1^{sc}(\bar{I})=(p-c_m-\Delta c)(a+k\bar{I}^b)-(h+\Delta h)\bar{I}-\lambda_2(k\bar{I}^b-k\bar{I}^{*b})\tag{6}$$

易证,$\bar{f}_1^{sc}(\bar{I})$ 为 $\bar{I}$ 的严格凹函数,则存在唯一的最优解,其解为

$$\bar{I}_1=\left(\frac{kb(p-c_m-\Delta c-\lambda_1)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\tag{7}$$

当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1h$ 时,$\bar{I}_1$ 满足约束条件 $\bar{I}^*\geqslant I^*$,则此时 $\bar{I}_1$ 为式(6)的最优解,即 $\bar{I}_1^*\geqslant\bar{I}_1$,则相应的最优生产数量和供应链系统的最大利润分别为

$$\bar{q}_1^*=a+k^{\frac{1}{1-b}}(M)^{\frac{b}{1-b}}$$
$$\bar{f}_1^{sc*}=(p-c_m-\Delta c)a+(h+\Delta h)\left(\frac{1-b}{b}\right)(kM)^{\frac{1}{1-b}}+\lambda_1k\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}}\tag{8}$$
$$M=\frac{b(p-c_m-\Delta c-\lambda_1)}{h+\Delta h}$$

当 $-\lambda_1h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant0$ 时,易知 $\bar{I}_1<I^*$,不满足约束条件 $\bar{I}^*\geqslant I^*$。由 $\bar{f}_1^{sc}(\bar{I})$ 的凹性可知,函数 $\bar{f}_1^{sc}(\bar{I})$ 在区间 $[\bar{I}_1,\infty]$ 上是严格递减的,此时只有当最优存货量等于 I^* 时,即 $\bar{I}_2^*=I^*$,系统供应链利润达到最大,且相应的最优生产数量和供应链系统利润分别为

$$\bar{q}_2^*=a+k\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}}=q^*$$
$$\bar{f}_2^{sc}=f^{sc*}-\Delta c\left(a+k\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}}\right)-\Delta h\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\tag{9}$$

2.1.2　情形 2:$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant 0$

在该情形下,类似于前面分析:

当 $0\leqslant(p-c)\Delta h+h\Delta c\leqslant\lambda_2 h$ 时,最优存货量、生产数量和供应链系统最大利润分别为

$$\bar{I}_3^*=I^*,\bar{q}_3^*=a+k\left(\frac{kb(p-c)}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}}=q^*$$

$$\bar{f}_3^{sc}=f^{sc*}-\Delta c\left(a+k\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{b}{1-b}}\right)-\Delta h\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\quad(10)$$

当 $(p-c)\Delta h+h\Delta c\geqslant\lambda_2 h$ 时,最优存货量、最优生产数量和供应链系统最大利润分别为

$$\bar{I}_4^*=(M)^{\frac{1}{1-b}},\bar{q}_4^*=a+k(M)^{\frac{b}{1-b}}$$

$$\bar{f}_4^{sc*}=(p-c_m-\Delta c)a+(h+\Delta h)\left(\frac{1-b}{b}\right)(M)^{\frac{b}{1-b}}-\lambda_2 k\left(\frac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{1}{1-b}}\quad(11)$$

$$M=\frac{kb(p-c_m-\Delta c+\lambda_2)}{h+\Delta h}$$

通过 2.1.1 与 2.1.2 小节的分析,下面将通过定理 2 总结当突发事件造成制造商的生产成本和零售商的促销投资存货成本同时发生偏差时,在集权式供应链系统中集中决策者的最优应对策略。

定理 2　假设产品的市场需求依赖于零售商对该产品的促销努力水平,即需求函数为 $q(I)=a+kI^b$ 的形式,当突发事件造成制造商生产成本和零售商的促销投资存货成本同时发生变化时,为使整个供应链的利润达到最大,即实现集中供应链对于突发事件的最优应对,则零售商的最优促销努力水平(货架展示量)和最优订购数量应分别满足:

$$\bar{I}^*=\begin{cases}\bar{I}_1^*=\left(\dfrac{kb(p-c_m-\Delta c-\lambda_1)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{1}{1-b}} & \text{当}(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1 h\\ \bar{I}_2^*=\left(\dfrac{kb(p-c_m)}{h}\right)^{\frac{1}{1-b}}=I^* & \text{当}-\lambda_1 h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant\lambda_2 h\\ \bar{I}_3^*=\left(\dfrac{kb(p-c_m-\Delta c+\lambda_2)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{1}{1-b}} & \text{当}(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant\lambda_2 h\end{cases}$$

$$\bar{q}^*=\begin{cases}\bar{q}_1^*=a+k\left(\dfrac{kb(p-c_m-\Delta c-\lambda_1)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{b}{1-b}} & \text{当}(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1 h\\ \bar{q}_2^*=q^* & \text{当}-\lambda_1 h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant\lambda_2 h\\ \bar{q}_3^*=a+k\left(\dfrac{kb(p-c_m-\Delta c+\lambda_2)}{h+\Delta h}\right)^{\frac{b}{1-b}} & \text{当}(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant\lambda_2 h\end{cases}$$

由定理 2 表明:当突发事件造成制造商生产成本和零售商的促销投资存货成本的偏差满足关系式 $-\lambda_1 h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c<\lambda_2 h$ 时,即它们的偏差范围比较小时,供应链中的决策者保持原来的生产计划和促销投资水平为最优选择,这意味着在该情形下,原生产计划和零售商的促销努力水平在成本发生变化的情况下均具有一定的鲁棒性;而只有当 $|(p-c_m)\Delta h+h\Delta c|$ 变化较大时,才需要对原生产计划和促销投资水平作出相应的调整,使供应链获得更多的利润,且此时制造商的最优生产数量和零售商的促销投资水平均随着制造商生产成本的增加而降低,随着零售商促销投资存货成本的增加而减少。

2.2　分散式供应链的协调机制

当突发事件造成制造商的生产成本和零售商的促销投资存货成本同时发生偏差时,对于分散式供应链系统,制造商和零售商会分别改变他们的原计划以使自己的利润最大化。制造商会改变其生产数量、批发价和激励零售商的促销补贴;零售商会改变其促销投资努力水平和订购数量。为了使供应链能够协调达到集中决策下的最大利润,供应商需重新调整原来的协调机制——批发价格加补贴合同 $(\bar{w}^*,\bar{s}^*)$(显然有 $0<\bar{s}^*<h+\Delta h$)来诱使零售商促销投资努力水平达到 $\bar{I}^*$,订购产品数量达到 $\bar{q}^*$。

根据 2.1 节对生产成本和促销存货成本不同程度的扰动,分析集中决策者的最优应对策略。下面假设所有偏差费用均由制造商来承担,对应地分三种情形来讨论分散式供应链的协调机制。

2.2.1　情形 1:$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1 h$

在该情形,集中决策下供应链利润由前面式(8)所给,假设制造商提供的批发价格加促销补贴契约为 $(\bar{w}_1^*,\bar{s}_1^*)$,则制造商的利润函数为

$$\bar{f}_1^{m*}(\bar{w}_1^*,\bar{s}_1^*)=(\bar{w}_1^*-c_m-\Delta c)\bar{q}_1^*-\bar{s}_1^*\bar{I}_1^*-\lambda_1(k\bar{I}_1^{*b}-kI^{*b})\quad(12)$$

定理 3　当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1 h$ 时,如果制造商提供的批发价格加补贴契约 $(\bar{w}_1^*,\bar{s}_1^*)$ 满足下面的条件,则供应链能够被协调:

$$\bar{s}_1^*=(h+\Delta h)\left(1-\frac{p-\bar{w}_1^*}{p-c_m-\Delta c-\lambda_1}\right)$$

$$\max\{c_m,c_m+\Delta c+\lambda_1\}<\bar{w}_1^*<p$$

证明　当 $(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\leqslant-\lambda_1 h$ 时,在契约 $(\bar{w}_1^*,\bar{s}_1^*)$ 下,零售商的利润函数为 $\bar{f}_1^r(\bar{I})=(p-\bar{w}_1^*)(a+k\bar{I}^b)-(h+\Delta h-\bar{s}_1^*)\bar{I}$,易证,零售商的利润函数是关于 $\bar{I}$ 的严格凹函数。经化简可知,当零售商的促销投资努力水平 $\bar{I}=\left(\dfrac{kb(p-\bar{w}_1^*)}{h+\Delta h-\bar{s}_1^*}\right)^{\frac{1}{1-b}}$ 时,零售商的利润最大。由已知条件 $\bar{s}_1^*=(h+\Delta h)\left(1-\dfrac{p-\bar{w}_1^*}{p-c_m-\Delta c-\lambda_1}\right)$ 可知 $\bar{I}_1=\bar{I}_1^*$,此时零售商的最优存货量等于集中决策时的最优存货量,即使得分散式供应链系统的利润达到集中式供应链系统的利润,实现了供应链的协调。根据 $0<\bar{s}^*<h+\Delta h$,可得 $c_m+\Delta c+\lambda_1<\bar{w}_1^*<p$,又 $c_m<\bar{w}_1^*<p$,故有 $\max\{c_m,c_m+\Delta c+\lambda_1\}<\bar{w}_1^*<p$,定理 3 得证。

由定理 3 可得如下性质 1:

性质 1　当生产成本和投资存货成本同时发生偏差时,如果供应链系统能通过批发价格加促销补贴契约协调,则制造商可以通过调整批发价格来实现系统最优利润在其与零售商间的任意分配。

证明　由定理 3 可知,在契约 $(\bar{w}_1^*,\bar{s}_1^*)$ 下,零售商的最优投资为 $\bar{I}_1^*$,则其最大利润为

$$\bar{f}^{r*}=(p-\bar{w}_1^*)\left(a+(kb)^{\frac{1}{1-b}}\frac{1-b}{b}\left(\frac{p-c_m-\Delta c-\lambda_1}{h+\Delta h}\right)^{\frac{b}{1-b}}\right)\quad(13)$$

制造商的利润为

$$\bar{f}^{m*}=(\bar{w}_1^*-c_m-\Delta c-\lambda_1)\left(a+(kb)^{\frac{1}{1-b}}\frac{1-b}{b}\left(\frac{p-c_m-\Delta c-\lambda_1}{h+\Delta h}\right)^{\frac{b}{1-b}}\right)+\lambda_1 q^*\quad(14)$$

根据已知条件 $\max\{c_m,c_m+\Delta h+\lambda_1\}<\bar{w}_1^*<p$,$0<b<1$ 可知,零售商和制造商的利润均是正的,因此制造商可以通过控制批发价格,达到协调地进行供应链内部利润的任意分配。

2.2.2　情形 2:$-\lambda_1 h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c<\lambda_2 h$

在该情形,集中决策下供应链的总利润式(9)等价于:

$$\bar{f}_2^{sc}=f^{sc*}-\Delta cq^*-\Delta hI^*\quad(15)$$

其中:第二项 Δcq^* 是由制造商生产成本的变化 Δc 引起的利润的增加或损失;第三项 ΔhI^* 是由零售商的促销投资货架成本的变化 Δh 引起的利润的增加或损失。类似于定理 3,下面给出该情形的协调策略。

定理 4 当 $-\lambda_1 h<(p-c_m)\Delta h+h\Delta c<\lambda_2 h$ 时,有:

a)如果契约$(\bar{w}_2^*,\bar{s}_2^*)$满足下面的条件,则供应链能够被协调。

$$\bar{s}_2^*=\Delta h+h(1-\frac{p-\bar{w}_2^*}{p-c_m})$$

$$\max\{c_m,c_m-(p-c_m)\frac{\Delta h}{h}\}<\bar{w}_2^*<p$$

b)如果供应链系统能通过批发价格加促销补贴契约协调,则制造商可以通过调整批发价格来实现系统最优利润在其与零售商间的任意分配。

证明方法类似于定理 3 的证明。

2.2.3 情形 3:$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant\lambda_2 h$

类似于前面分析,有如下定理 5 来协调情形 3 下的供应链系统。

定理 5 当$(p-c_m)\Delta h+h\Delta c\geqslant\lambda_2 h$ 时,有:

a)如果契约$(\bar{w}_3^*,\bar{s}_3^*)$满足下面的条件,则供应链能够被协调。

$$\bar{s}_3^*=(h+\Delta h)(1-\frac{p-\bar{w}_3^*}{p-c_m-\Delta c+\lambda_2})$$

$$\max\{c_m,c_m+\Delta c-\lambda_2\}<\bar{w}_3^*<p$$

b)如果供应链系统能通过批发价格加促销补贴契约协调,则制造商可以通过调整批发价格来实现系统最优利润在其与零售商间的任意分配。

从定理 3~5 可知,当突发事件造成制造商生产成本和零售商促销存货成本同时发生扰动时,制造商可以通过重新设置批发价格加促销补贴契约来协调供应链;并且制造商可以通过调整批发价格来实现系统最优利润在其与零售商间的任意分配。

3 数值仿真与分析

本章通过具体的数值仿真来验证上述的结论,假设各参数分别为 $a=300,k=2,b=0.5,c_m=5,h=2,p=10$,则根据第 2 章的内容可计算出在确定性供应链模型中,零售商的最优投资水平和订购量分别为 $I^*=6.25,q^*=305$,供应链系统的最大利润 $f^{sc*}=1.512\times10^3$。下面首先考察制造商生产成本和零售商存货成本的不同偏差程度对零售商促销水平和制造商生产数量(零售商的订购量)的影响,然后考察偏差对供应链契约中批发价格和促销补贴的影响。假设偏差发生后的额外惩罚成本分别为 $\lambda_1=1,\lambda_2=0.5$。

3.1 生产成本和存货成本的偏差对存货量和生产计划的影响

假设突发事件造成制造商生产成本的变化范围为 $\Delta c\in[-4,4]$,$\Delta h\in[-1,1]$时,则它们对零售商最优存货量和制造商生产数量的影响情况如图 1 和 2 所示。

图 1 和 2 验证了定理 2 的结论,最优生产数量和最优存货量在生产成本和存货成本同时扰动的情况下均具有一定的鲁棒性。在本例中,当生产成本和存货成本的变化满足 $-1<\frac{(p-c_m)\Delta h+h\Delta c}{h}<0.5$ 时,保持原最优存货量 6.25 和生产数量 305 不变;否则同时调整存货量和生产数量,且最优存货量和最优生产数量均是随着制造商生产成本的增加而减低,随着零售商存货成本的增加而减少。

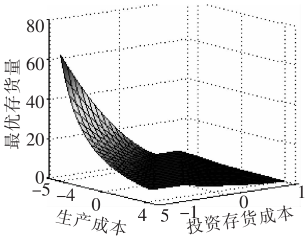


图 1 生产成本和存货成本的偏差对存货量的影响

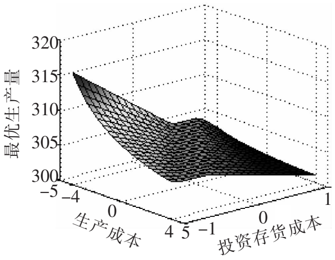


图 2 生产成本和存货成本的偏差对生产计划的影响

3.2 生产成本和存货成本的偏差对批发价格和促销补贴的影响

根据定理 3~5,图 3 和 4 分别给出了固定批发价格为 $w=9.5,w=9.1$ 时存货成本和生产成本对促销补贴的影响。

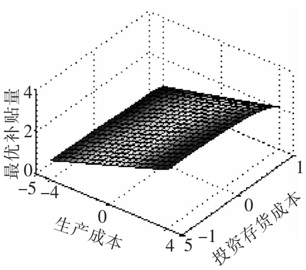


图 3 w=9.5 时存货成本和生产成本的偏差对促销补贴的影响

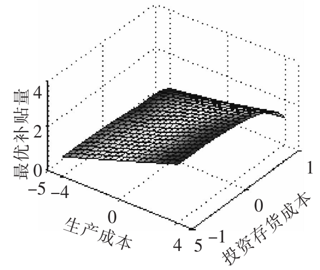


图 4 为 w=9.1 时存货成本和生产成本的偏差对促销补贴的影响

由图 3、4 可知:最优补贴均是随着批发价格的增加而增加;在批发价格不变的情况下,最优补贴随着零售商存货成本的增加而增加,随着制造商生产成本的减少而增加。该结论与 3.2 节提出的应对生产成本和存货成本不同扰动情况下的协调策略是一致的。

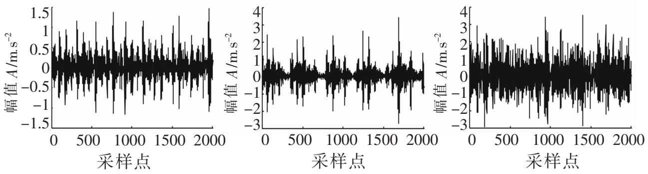
结合图 1 和 2,当扰动比较小时,最优存货量和最优生产数量具有一定的鲁棒性。并且可以发现,只要零售商的存货成本不发生变化,不管生产成本如何变化,在批发价格不变的情况下,制造商提供的最优补贴保持不变。这是因为新的目标函数中引入偏差费用的缘故,在该情形下,如果改变原计划,则由此带来的偏差费用将大于生产成本的变化带来的利润,此时制造商宁愿保持原来的补贴,促使零售商保持原来的存货量不变来维持原来的市场需求。

4 结束语

本文基于需求依赖于单个零售商的促销投资,研究了制造商的生产成本和零售商的促销存货成本同时扰动时的供应链应急协调问题。分别从集中式供应链系统和分散式供应链系统角度出发,提出了生产成本和促销存货成本同时扰动的最优应对策略。本文的结论表明:

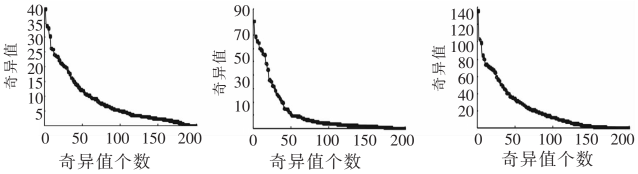
a)在生产成本和存货成本的扰动比较小的情形下,原生产计划和零售商的促销努力水平存在一个鲁棒区域。在该区域内,保持原生产计划和促销努力水平不变为最优决策。当扰动程度超出鲁棒性区域时,需要对原生产计划和促销投资水平作出定理 2 给出的调整方案,以使供应链能够达到扰动情况下的最大利润。

b)在生产成本和存货成本同时扰动的情形(下转第 1317 页)



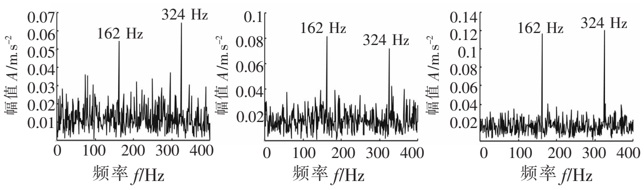
(a) 故障直径为 0.18 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号时域波形　(b) 故障直径为 0.54 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号时域波形　(c) 故障直径为 0.72 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号时域波形

图 7　滚动轴承故障信号时域波形



(a) 故障直径为 0.18 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号奇异值分解　(b) 故障直径为 0.54 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号奇异值分解　(c) 故障直径为 0.72 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号奇异值分解

图 8　滚动轴承故障信号奇异值分解



(a) 故障直径为 0.18 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号提取特征后频谱图　(b) 故障直径为 0.54 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号提取特征后频谱图　(c) 故障直径为 0.72 mm、故障深度为 0.28 mm 时,信号提取特征后频谱图

图 9　滚动轴承故障信号提取特征后的频谱

6　结束语

针对采集的振动信号突发性强、早期症状较难识别等特点,提出将时间序列重构的吸引子轨迹矩阵奇异值分解与改进的形态滤波相结合,形成一种新型的故障特征提取方法。该方法通过奇异值分解技术,降低了光滑信号和部分随机噪声信号的影响,并利用形态滤波提取信号中的冲击成分,通过滤波信号的功率谱得到了周期性冲击特征。数值仿真和轴承故障诊断实例的结果表明,该方法能有效地滤除了光滑信号和白噪声干扰,突出冲击故障特征,提高故障诊断的准确性,为提取滚动轴承故障特征提供了一种新的有效方法。在实际工程应用中,重构冲击信号的奇异值选择范围对于提取故障特征是至关重要的,它是今后进一步研究的重点。

参考文献:

[1] 郝如江,卢文秀,褚福磊. 形态滤波器用于滚动轴承故障信号的特征提取[J]. 中国机械工程,2009,20(2):197-201.

[2] 陈恩利,吴勇军,申永军. 基于改进奇异值分解技术的齿轮调制故障特征提取[J]. 振动工程学报,2008,21(5):530-534.

[3] 汤宝平,蒋永华,张祥春. 基于形态奇异值分解和经验模态分解的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 机械工程学报,2010,46(5):37-42.

[4] YOU Rong-yi, HUANG Xiao-jing. Phase space reconstruction of chaotic dynamical system based on wavelet decomposition[J]. Chinese Physics B,2011,20(2):5-8.

[5] 何田,刘献栋,李其汉. 噪声背景下检测突变信息的奇异值分解技术[J]. 振动工程学报,2006,19(3):399-403.

[6] LIN Guo-song, GAO Shi-bin, LI Qun-zhan. Fault locating of traction power system with series-wound compensators based on morphological gradient and parameter identification[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,28(12):35-39.

[7] 徐骏,邵如平,时丹. 数学形态学在配电网故障选线中的应用[J]. 自动化仪表,2008,32(8):25-29.

[8] KAZAKEVICIUTE M, JUOZAPAVICIUS A, SAMAITIENE R. Morphological filtering of EEG [J]. Materials Physics and Mechanics,2010,9(3):185-193.

[9] LEHTOLA L, KARSIKAS M, KOSKINEN M, *et al*. Effects of noise and filtering on SVD-based morphological parameters of the T wave in the ECG[J]. Journal of Medical Engineering and Technology,2008,32(5):400-407.

[10] 章立军,黎敏,阳建宏,等. 基于自适应形态小波的轧机电气信号压缩方法[J]. 北京科技大学学报,2011,33(3):353-357.

[11] SHEN Lu, ZHOU Xiao-jun, ZHANG Wen-bin, *et al*. De-noising for vibration signals of a rotating machinery based on generalized mathematical morphological filter [J]. Journal of Vibration and Shock,2009,28(9):70-73.

[12] 张文斌,杨辰龙,周晓军. 形态滤波方法在振动信号降噪中的应用[J]. 浙江大学学报:工学版,2009,43(11):2096-2099.

[13] 沈路. 数学形态学在机械故障诊断中的应用研究[D]. 杭州:浙江大学,2010.

[14] CHAI Yi, LI Hua-feng, LI Zhao-fei. Multifocus image fusion scheme using focused region detection and multiresolution [J]. Optics Communications,2011,284(19):4376-4389.

[15] 张文斌, 周晓军, 林勇. 广义形态滤波器在振动信号处理中的应用研究[J]. 农业工程学报,2008,24(6):203-205.

[16] ZHANG Li-jun, XU Jin-wu, YANG Jian-hong, *et al*. Multiscale morphology analysis and its application to fault diagnosis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2008,22(3):597-610.

(上接第 1252 页)下,制造商可以通过调整批发价格加促销投资补贴契约协调扰动后的供应链,以使供应链利润最大化;并且制造商可以通过调整批发价格来实现系统最优利润在其与零售商间的任意分配。

参考文献:

[1] QI Xiang-tong, BARD J F, YU Gang. Supply chain coordination with demand disruptions[J]. Omega,2004,32(4):301-312.

[2] XU Ming-hui, QI Xiang-tong, YU Gang, *et al*. The demand disruption management problem for a supply chain system with nonliner demand functions[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering,2003,12(1):82-97.

[3] XU Ming-hui, GAO Cheng-xiu. Supply chain coordination with demand disruptions under convex production cost function[J]. Wuhan University Journal of Natural Sciences,2005,10(3):493-498.

[4] HUANG Chong-chao, YU Gang, WANG Song, *et al*. Disruption management for supply chain coordination with exponential demand function[J]. Acta Mathematica Scientia,2006,26(4):655-669.

[5] 于辉,陈剑,于刚. 协调供应链如何应对突发事件[J]. 系统工程理论与实践,2005,25(7):9-16.

[6] XIAO Tiao-jun, YU Gang, SHENG Zhao-han, *et al*. Coordination of a supply chain with one-manufacturer and two-retailers under demand promotion and disruption management decisions [J]. Annals of Operations Research,2005,135(1):87-109.

[7] 雷东,高修成,李建斌. 需求和生产成本同时发生扰动时的供应链协调[J]. 系统工程理论与实践, 2006, 26(9):51-59.

[8] 冯花平,吕廷杰. 基于需求偏差的供应链协调问题[J]. 控制与决策, 2008,23(5):487-491.