随机供应中断和退货环境下库存问题的建模与控制

娄山佐1 田新诚1

摘 要 供应中断和退货的不确定性,导致企业库存控制异常困难. 然而,由于系统存在多个随机因素,采用传统方法很难构建模型,所以,以往均将供应中断和退货分开考虑. 为综合分析它们对库存的影响,本文在采用布朗运动描述库存水平动态变化过程条件下,利用连续时间 Markov 链、更新过程和鞅理论,构建了系统期望折扣总费用模型,并设计了交叉熵法确定最优库存策略. 最后,通过仿真实验,分析了供应中断、净需求和系统参数,对最优控制策略和期望费用的影响.

关键词 库存控制,中断,退货,布朗运动,Kella-Whitt 鞅

引用格式 娄山佐, 田新诚. 随机供应中断和退货环境下库存问题的建模与控制. 自动化学报, 2014, **40**(11): 2436-2444 **DOI** 10.3724/SP.J.1004.2014.02436

Modeling and Control for Inventory with Stochastic Supply Disruptions and Returns

LOU Shan-Zuo¹ TIAN Xin-Cheng¹

Abstract Uncertainties in supply disruptions and returns make it extremely hard to control a firm's inventory. However, the traditional approach is found quite difficult to develop a model due to many stochastic factors in the system, therefore supply disruptions and returns are dealt with separately. In order to analyze their effects on the firm's inventory comprehensively, under the condition that the inventory level process is expressed as a Brownian motion (BM), an expected total discounted cost model is established by utilizing continuous-time Markov chain, renewal process and martingale theorems. Subsequently, a cross-entropy method is designed to obtain the optimal inventory policy. Numerical results are provided to illustrate the influences of disruptions, net demands and system parameters on the optimal control policy and the expected discounted cost.

Key words Inventory control, disruption, return, Brownian motion, Kella-Whitt martingale

Citation Lou Shan-Zuo, Tian Xin-Cheng. Modeling and control for inventory with stochastic supply disruptions and returns. *Acta Automatica Sinica*, 2014, **40**(11): 2436–2444

目前,我国零售企业面临一些新挑战.一方面它们经常遭受商品供应中断的困扰.据中国物流与采购联合会提供的信息显示,国内零售企业缺货率在10%左右,远高于国外同行水平,每年因畅销商品未能及时补充上架销售的损失高达830亿元.造成缺货的主要原因之一,是由于供售双方物流配送质量不能保障[1].另一方面许多零售企业还需随时应对用户的退货.以电子商务零售市场为例,2013年仅"双十一"的退货率就达25%,部分商家更是高达40%[2].供应中断和退货犹如一对孪生兄弟,不

Manuscript received March 7, 2013; accepted February 12, 2014 国家高技术研究发展计划 (863 计划) (2012AA041307), 国家科技重 大专项 (2010ZX04001-161), "泰山学者"建设工程专项经费资助

录用日期 2014-02-12

Supported by National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012AA041307) and National Science and Technology Major Project (2010ZX04001-161), and Research Fund for the Taishan Scholar Project of Shandong Province of China

本文责任编委 李乐飞

收稿日期 2013-03-07

Recommended by Associate Editor LI Le-Fei

- 1. 山东大学控制科学与工程学院 济南 250061
- $1.\ \,$ School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061

仅严重影响企业与顾客的关系,降低顾客对品牌的 忠诚度,而且还极大增加企业的损失和费用.

如何应对供应中断和退货, 在不断提高服务水 平的同时,增加企业效益,成为近年来库存研究的 热点. 针对供应中断问题, Kleindorfer 等[3] 给出多 种防御策略, 其中, 库存被视为最常用手段[4-5]. 另 外, 人们还常结合多源订货[6] 和应急采购[7] 防御策 略. 还有学者在供应链设计阶段, 将设施的可靠性与 库存相结合, 选择最佳设施位置[8]. 针对退货问题, Östlin 等^[9] 总结有报废到期退货 (End-of-life returns)、使用到期退货 (End-of-use returns)、商业退 货 (Commercial returns) 和可重用组件 (Reusable components) 等几种类型. 限于篇幅, 下面仅给出近 年来因产品不满足用户期望形成的商业退货有关研 究成果. Ofek 等[10] 分析了网络销售情况下退货对 竞争者价格和实体店服务水平的影响. Chen 等[11] 针对零售商剩余库存和用户退货,分析了制造商和 零售商间的回购定价问题. Mitra[12] 研究了退货与 需求相关情况下库存管理问题. Shulman 等[13] 分析 了竞争环境下产品定价和退货损失平衡问题. 另外, 过多的退货, 不但造成大量的库存费用, 而且还会受到存储空间的限制. 在库存水平变化过程采用布朗运动 (Brownian motion, BM) 描述条件下, Karakayali 等^[14] 和 Berman 等^[15] 分别构建了退货可处理和订单可取消条件下库存控制模型. Yao^[16] 和 Cadenilias 等^[17] 给出库存控制在某一范围和趋近给定目标值的最优策略.

总之,针对单个方面已有许多成果.但系统同时包含两个方面时,由于供应、退货和需求均为随机的,致使库存变化失去传统管理下的单调递减性,呈现出异常复杂的随机波动特性,从而导致模型构建非常困难,所以,到目前为止,还鲜有研究同时考虑供应中断和退货的库存问题.

为解决该问题,针对系统中存在多个不确定因素,本文基于 Lévy 过程和鞅理论,构建了它的期望折扣总费用模型,并给出最优库存控制策略,最后,通过仿真实验,揭示了关键因素对系统的影响.

1 问题的描述

有一零售商销售某种商品的同时,还面临已购商品顾客的退货. 假设退货经简单处理 (如擦洗或换包装,处理时间和费用忽略不计) 后,直接进入库存,与新品一样提供给未来顾客. 由于需求和退货均连续不断地随机发生,并考虑到单参数分布因忽视方差,不能恰当反映问题真实变化特征的缺陷,这里,采用两个参数分布描述需求和退货,即假设单位时间退货量 X_R 和需求量 X_D 分别服从独立的均值为 μ_R 和 μ_D ,方差为 σ_R^2 和 σ_D^2 的正态分布,则单位时间净需求 $X = X_R - X_D$ 服从均值为 $\mu = \mu_R - \mu_D$ 和方差为 $\sigma^2 = \sigma_R^2 + \sigma_N^2$ 的正态分布,那么,时间 t 累积的净需求 X(t),可表示为漂移和扩散参数分别是 μ 和 σ^2 的布朗运动 (Brownian motion, BM). 现实中,退货量通常小于需求量,故要求 $\mu < 0$.

假设供应商管理多个零售商的库存,并负责轮流为它们配送货物.由于交通堵塞和运输设施故障等原因,供应商经常无法按预定计划完成配送任务.当该零售商库存到达补货水平 r 时,若供应商此时能供货,即相对该零售商处入供应状态 (以 ON 表示)时,它马上将库存补充到存储水平 Q (假设提前期为 0),并产生补货费用;若供应商因服务其他零售商目前暂时无法供货,即相对该零售商处入中断状态 (以 OFF 表示)时,则需要等待.当供应商按计划完成其他零售商服务时,若退货导致该零售商库存超出存储水平 Q,此情况下供应商取消补货,直到库存再次到达补货水平 r 为止.否则,供应商将该零售商库存补充到存储水平 Q.供应商状态处入OFF 期间,若该零售商的库存为零,则顾客需求无

法满足, 产生缺货损失. 确定 r 和 Q, 使该零售商的库存、短缺和补货期望折扣总费用之和最小.

2 模型的构建和求解

据前面描述知, 若选择每次供应商将库存补充到存储水平 Q 作为更新点, 则库存水平的动态变化是一个更新过程, 循环周期 T 为相邻更新点间的时间. 这里, 更新点的构成有两种情况: 1) 库存到达补货水平 r 时, 供应商状态为 ON; 2) 库存到达补货水平 r 时, 供应商状态为 OFF, 待它恢复到 ON 状态时, 该零售商库存水平小于 Q. 图 1 给出二种情况下零售商库存水平的典型样本路径.

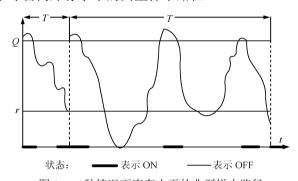


图 1 二种情况下库存水平的典型样本路径 Fig. 1 A typical sample path of the inventory level in two cases

2.1 模型的建立

假设供应商相对该零售商的供应和中断持续时间,分别服从独立的参数为 λ 和 ξ 的指数分布,那么,它相对该零售商的运行情况,可采用2个状态的连续时间 Markov 链 J(t) 描述.

$$J(t) = \begin{cases} 0, & \text{供应商状态为 ON} \\ 1, & \text{供应商状态为 OFF} \end{cases}$$

据随机过程理论可知, 供应商从 ON 状态开始, 在时间 t 供应商处于 ON 和 OFF 状态的概率分别为

$$p_{0,0}(t) = \frac{\xi}{\lambda + \xi} + \frac{\lambda}{\lambda + \xi} e^{-(\lambda + \xi)t}$$
 (1)

$$p_{0,1}(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \xi} - \frac{\lambda}{\lambda + \xi} e^{-(\lambda + \xi)t}$$
 (2)

假设库存从水平 Q 开始,那么,两次补货间零售商库存水平的变化过程可表示为 Q+X(t),这里,X(0)=0.由于不考虑延期交货,因此,为避免需求未满足库存为负的,我们将库存水平变化过程表示为在 0 点反射的布朗运动 (Reflected Brownian motion, RBM),即 W(t)=Q+X(t)+L(t),这里, $L(t)=-\min_{0\leq s\leq t}[(Q+X(s))\wedge 0]$ 为局部

时间过程. 另外, 为便于说明, 本文采用如下标记 $E_x[\cdot] = E[\cdot|W(0)=x]$.

据图 1 知,在两次补货间,供应商可能多次取消补货. 若将更新点间相邻两次取消补货的时间定义为一个周期,那么,一次循环中可能包含多个周期.用 I_n 表示第 n 个周期供应商从水平 r 开始的 OFF 状态持续时间,则据指数分布的无记忆性知,它服从参数为 ξ 的指数分布. 另据 RBM 的强 Markov 性知,第 n ($n \geq 2$) 个周期库存开始位置 Z_n 的分布,与从 r 出发的 RBM,经参数为 ξ 指数分布时间后,位于水平 Q 之上位置 Z 的分布相同,且除第 1 个周期外 (因它仅从水平 Q 开始),其余周期库存水平的变化均为独立同分布的随机过程.

定义停时如下:

$$\tau_1 = \inf\{t > 0 : W(t) = r\}$$

对 $n \geq 2$, 利用已得到的 $\tau_1, I_1, \dots, \tau_{n-1}, I_{n-1}$, 递推 定义停时如下:

$$\tau_n = \inf \left\{ t > \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_i + I_i) : W(t) = r \right\} - \sum_{i=1}^{n-1} (\tau_i + I_i)$$

则一次循环包含的周期数为

$$N = \min\{n \in \{1, 2, \dots\} : J(\tau_n) = 0 \text{ or } W(I_n -) < Q\}$$

这里, $W(I_n-)$ 表示时间 I_n 结束时的库存水平. 一次循环的时间为

$$T = \tau_1 + I_1 + \dots + \tau_N + I_N 1_{\{J(\tau_N)=1\}}$$

在此基础上,建立系统期望折扣总费用模型,包括库存、短缺及补货费用模型.下面,利用更新报酬定理,根据一次循环库存运行情况,分别给出它们的具体形式.

1) 期望折扣库存费用: 若单位时间内单位产品的库存费用为 h, 则 hdt 表示在时间 [t, t+dt] 内单位产品的库存费用, 那么, 该费用为

$$C_I = \frac{h \mathbf{E} \int_0^T \mathbf{e}^{-\beta t} W(t) dt}{1 - \mathbf{E} \mathbf{e}^{-\beta T}}$$

这里, β 表示折扣系数, 下同.

2) 期望折扣短缺费用: 若 π 表示单位产品缺货造成的损失,则 $\pi dL(t)$ 为时间 [t,t+dt] 内需求未满足的惩罚,那么,该费用为

$$C_S = \frac{\pi E \int_0^T e^{-\beta t} dL(t)}{1 - Ee^{-\beta T}}$$

3) 期望折扣补货费用: 若 K 表示一次补货固定费用, κ 表示单位产品补货费用, 那么, 该费用为

$$C_R = \frac{K \mathrm{E}\mathrm{e}^{-\beta T} + \kappa \mathrm{E}[\mathrm{e}^{-\beta T}(Q - W(T -))]}{1 - \mathrm{E}\mathrm{e}^{-\beta T}} = \frac{(K + \kappa Q) \mathrm{E}\mathrm{e}^{-\beta T} - \kappa \mathrm{E}[\mathrm{e}^{-\beta T}W(T -)]}{1 - \mathrm{E}\mathrm{e}^{-\beta T}}$$

这里, W(T-) 表示补货发生前的库存水平. 因此, 系统期望折扣总费用模型为

$$TC(r,Q) = C_I + C_S + C_R$$

2.2 模型中有关函数的确定

我们采用的主要工具是下列辅助过程

$$M(t) = (\varphi(\alpha) - \beta) \int_0^t e^{-\alpha W(s) - \beta s} ds + e^{-\alpha W(0)} - e^{-\alpha W(t) - \beta t} - \alpha \int_0^t e^{-\beta s} dL(s)$$
(3)

这里, $\varphi(\alpha) = \log \operatorname{Ee}^{-\alpha X(1)} = \sigma^2 \alpha^2 / 2 - \mu \alpha$ 为 BM 的特征指数. 实际上, 过程 M 是 Kella-Whitt 鞅的一种特殊形式, 因而, 它也是一个鞅. 详细了解请参阅文献 [18].

由于循环结束时, 库存水平 W(T-) 和循环时间 T 均为随机的, 它们的确定, 对求解模型非常重要, 同时, 能够求得它们, 也是应用 Kella-Whitt 鞅的关键, 因此, 利用引理 1, 先给出 $\mathrm{E}[\mathrm{e}^{-\alpha W(T-)-\beta T}]$ 的表达形式.

引理 1. 一次循环结束时,循环时间 T 和库存水平 W(T-) 联合分布的 Laplace-Stieltjes 变换

$$\begin{split} &\mathbf{E}[\mathbf{e}^{-\alpha W(T-)-\beta T}] = \mathbf{e}^{-\alpha r} \mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{\scriptscriptstyle{0,0}}(\tau_{1})] + \\ &\mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{\scriptscriptstyle{0,1}}(\tau_{1})] \times \\ &\frac{\xi}{\xi + \beta} \mathbf{E}_{r}[\mathbf{e}^{-\alpha W(I_{1}-)} \mathbf{1}_{\{W(I_{1}-) < Q\}}] + \\ & \left\{ \mathbf{e}^{-\alpha r} \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{\scriptscriptstyle{0,0}}(\tau_{2})] + \\ &\frac{\xi}{\xi + \beta} \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{\scriptscriptstyle{0,1}}(\tau_{2})] \mathbf{E}_{r}[\mathbf{e}^{-\alpha W(I_{1}-)} \mathbf{1}_{\{W(I_{1}-) < Q\}}] \right\} \times \\ &\frac{\xi P(W(I_{1}) \geq Q) \mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{\scriptscriptstyle{0,1}}(\tau_{1})]}{\xi + \beta - \xi P(W(I_{1}) \geq Q) \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{\scriptscriptstyle{0,1}}(\tau_{2})]} \end{split}$$

证明. 利用全概率公式有

$$E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}] = \sum_{n=1}^{\infty} E_{Q}[e^{-\alpha W(T-)-\beta T} 1_{\{N=n\}}] = \sum_{n=1}^{\infty} E_{Q}[e^{-\alpha W(T-)-\beta(\tau_{1}+I_{1}+\cdots+\tau_{n})} \times$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{1}_{\{J(\tau_{1})=1,W(I_{1})\geq Q,\cdots,W(I_{n-1})\geq Q,J(\tau_{n})=0\}} + \\ & e^{-\alpha W(T-)-\beta(\tau_{1}+I_{1}+\cdots+I_{n})} \times \\ & \mathbf{1}_{\{J(\tau_{1})=1,W(I_{1})>Q,\cdots,J(\tau_{n})=1,W(I_{n}-)$$

据前面描述可知,每个周期供应商均从 ON 状态开始,但第 1 个周期库存水平的变化过程,与其余周期不是同分布的,为便于计算,将它单独考虑. 另据 RBM 的强 Markov 性有 $E_Q[e^{-\beta\tau_n}1_{\{J(\tau_n)=1\}}]=E_Z[e^{-\beta\tau_n}1_{\{J(\tau_n)=1\}}]$ 及 $J(\tau_n)$ 与 $W(I_n-)$ 是条件独立的,并且,在给定 W(0)=Q、N=n 和 $J(\tau_n)=1$ 条件下,W(T-) 与 I_n 的联合条件分布,与 W(0)=r、 $J(\tau_1)=1$ 和 $W(I_1-)<Q$ 条件下, $W(I_1-)$ 与 I_1 的联合条件分布,与 $W(I_1-)$ 与 I_1 的联合条件分布,与 $W(I_1-)$ 与 I_1 的联合条件分布相同,因此,上式可化简为

$$\begin{split} & \mathrm{e}^{-\alpha r} \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} \mathbf{1}_{\{J(\tau_{1})=0\}}] + \\ & \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} \mathbf{1}_{\{J(\tau_{1})=1\}}] \mathrm{E}_{r}[\mathrm{e}^{-\alpha W(I_{1}-)-\beta I_{1}} \times \\ & \mathbf{1}_{\{W(I_{1}-)$$

另据 $W(I_{1}-)$ 与 I_{1} 是条件独立的, 以及将上式中包含 $J(\tau_{1})$ 和 $J(\tau_{2})$ 的项, 分别对 τ_{1} 和 τ_{2} 取条件, 可得:

$$\begin{split} & \mathrm{e}^{-\alpha r} \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{0,0}(\tau_{1})] + \frac{\xi}{\xi + \beta} \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{0,1}(\tau_{1})] \times \\ & \mathrm{E}_{r}[\mathrm{e}^{-\alpha W(I_{1}-)} 1_{\{W(I_{1}) < Q\}}] + \\ & \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{0,1}(\tau_{1})] \big\{ \mathrm{e}^{-\alpha r} \mathrm{E}_{Z}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{2}} \times \\ & p_{0,0}(\tau_{2})] + \frac{\xi}{\xi + \beta} \mathrm{E}_{Z}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{0,1}(\tau_{2})] \times \\ & \mathrm{E}_{r}[\mathrm{e}^{-\alpha W(I_{1}-)} 1_{\{W(I_{1}-) < Q\}}] \big\} \times \\ & \sum_{n=2}^{\infty} \big\{ \big[\frac{\xi P(W(I_{1}) \geq Q)}{\xi + \beta} \big]^{n-1} \times \\ & \big(\mathrm{E}_{Z}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{0,1}(\tau_{2})] \big)^{n-2} \big\} = \\ & \mathrm{e}^{-\alpha r} \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{0,0}(\tau_{1})] + \\ & \frac{\xi}{\xi + \beta} \mathrm{E}_{Q}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{1}} p_{0,1}(\tau_{1})] \times \\ & \mathrm{E}_{r}[\mathrm{e}^{-\alpha W(I_{1}-)} 1_{\{W(I_{1}-) < Q\}}] + \\ & \big\{ \mathrm{e}^{-\alpha r} \mathrm{E}_{Z}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{0,0}(\tau_{2})] + \\ & \frac{\xi}{\xi + \beta} \mathrm{E}_{Z}[\mathrm{e}^{-\beta \tau_{2}} p_{0,1}(\tau_{2})] \times \end{split}$$

$$\begin{split} & \mathbf{E}_r[\mathbf{e}^{-\alpha W(I_1-)} \mathbf{1}_{\{W(I_1-) < Q\}}] \big\} \times \\ & \frac{\xi P(W(I_1) \ge Q) \mathbf{E}_Q[\mathbf{e}^{-\beta \tau_1} p_{_{0,1}}(\tau_1)]}{\xi + \beta - \xi P(W(I_1) \ge Q) \mathbf{E}_Z[\mathbf{e}^{-\beta \tau_2} p_{_{0,1}}(\tau_2)]} \end{split}$$

引理 1 的式中包含多个未知函数, 为了能够得到 $E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}]$ 的具体表示形式, 下面, 利用连续时间 Markov 链和有关 Lévy 过程理论, 分别确定出这些未知函数明晰的数学公式.

引理 2.

$$\begin{split} & \mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{1}}p_{0,0}(\tau_{1})] = \frac{\xi}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{1}(Q-r)} + \frac{\lambda}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{2}(Q-r)} \\ & \mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{1}}p_{0,1}(\tau_{1})] = \frac{\lambda}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{1}(Q-r)} - \frac{\lambda}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{2}(Q-r)} \\ & \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{2}}p_{0,0}(\tau_{2})] = -\frac{\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\lambda + \xi}\Big[\frac{\xi\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha_{1})Q + \alpha_{1}r}}{\varepsilon_{2} - \alpha_{1}} + \\ & \frac{\lambda\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha_{2})Q + \alpha_{2}r}}{\varepsilon_{2} - \alpha_{2}}\Big] \\ & \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{2}}p_{0,1}(\tau_{2})] = \frac{\lambda\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\lambda + \xi}\Big[\frac{\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha_{2})Q + \alpha_{2}r}}{\varepsilon_{2} - \alpha_{2}} - \\ & \frac{\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha_{1})Q + \alpha_{1}r}}{\varepsilon_{2} - \alpha_{1}}\Big] \\ & \mathbf{E}_{r}[\mathbf{e}^{-\alpha W(I_{1} -)}\mathbf{1}_{\{W(I_{1} -) < Q\}}] = \frac{\eta_{2}\varepsilon_{2}}{\varepsilon_{2} - \alpha} - \frac{\eta_{2}\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1} - \alpha} + \\ & \frac{\eta_{2}\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1} - \alpha}\mathbf{e}^{(\varepsilon_{1} - \alpha)r} + \frac{\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\varepsilon_{2} - \alpha}\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha)Q} - \\ & \frac{\varepsilon_{2}(\eta_{1} + \eta_{2})}{\varepsilon_{2} - \alpha}\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2} - \alpha)r} \end{split}$$

这里, α_1 、 α_2 、 ε_1 、 ε_2 、 η_1 和 η_2 均为常数, 其值在证明过程中给出.

证明. 据式(1)得:

$$E_{Q}[e^{-\beta\tau_{1}}p_{0,0}(\tau_{1})] =$$

$$E_{Q}\left[e^{-\beta\tau_{1}}\left(\frac{\xi}{\xi+\lambda} + \frac{\lambda}{\xi+\lambda}e^{-(\lambda+\xi)\tau_{1}}\right)\right] =$$

$$\frac{\xi}{\xi+\lambda}E_{Q}[e^{-\beta\tau_{1}}] + \frac{\lambda}{\xi+\lambda}E_{Q}[e^{-(\lambda+\xi+\beta)\tau_{1}}] \quad (4)$$

为确定上式右边的期望值, 先给出库存从某一固定水平 z ($z \ge Q$) 出发, 到达水平 r 所需时间的 Laplace 变换.

定义停时: $\tau = \inf\{t > 0: W(t) = r\}$. 据 Lévy 过程理论知^[19],

$$E_z[e^{-s\tau}] = e^{-\psi(s)(z-r)}$$
(5)

这里, $\psi(s) = \sup\{\alpha \ge 0 : \varphi(\alpha) = s\}$ 为特征指数 $\varphi(\alpha)$ 的逆. 因 $\varphi(\alpha)$ 是增凸函数, 故 $\psi(s)$ 总是存在的.

令 s 分别等于 β 和 $\lambda + \xi + \beta$, 求得下列两个正根:

$$\begin{split} &\alpha_1 {=} \psi(\beta) = \frac{\mu + \sqrt{\mu^2 + 2\beta\sigma^2}}{\sigma^2} \\ &\alpha_2 {=} \psi(\lambda + \xi + \beta) = \frac{\mu + \sqrt{\mu^2 + 2(\lambda + \xi + \beta)\sigma^2}}{\sigma^2} \end{split}$$

分别将它们代入式(5),可得:

$$E_z[e^{-\beta\tau}] = e^{-\alpha_1(z-r)} \tag{6}$$

$$E_z[e^{-(\lambda+\xi+\beta)\tau}] = e^{-\alpha_2(z-r)}$$
 (7)

当 z 取值为 Q 时, τ 即为 τ_1 , 因此, 据式 (6) 和 (7), 式 (4) 可化为

$$E_{Q}[e^{-\beta\tau_{1}}p_{0,0}(\tau_{1})] = \frac{\xi}{\xi + \lambda}e^{-\alpha_{1}(Q-r)} + \frac{\lambda}{\xi + \lambda}e^{-\alpha_{2}(Q-r)}$$

同理, 据式 (2)、(6) 和式 (7), 可求得:

$$\begin{split} \mathbf{E}_{Q}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{1}}p_{_{0,1}}(\tau_{1})] &= \frac{\lambda}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{1}(Q-r)} - \\ &\frac{\lambda}{\xi + \lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{2}(Q-r)} \end{split}$$

另外, 文献 [20] 给出, 从水平 r 出发的 RBM, 在参数为 ξ 指数分布时间结束时的密度函数为

$$g_r^+(s) = \eta_1 \varepsilon_2 e^{\varepsilon_2 s}, \ s > r$$

$$g_r^-(s) = \eta_2 (\varepsilon_1 e^{\varepsilon_1 s} - \varepsilon_2 e^{\varepsilon_2 s}), \quad 0 < s \le r$$

这里

$$\varepsilon_{1} = \frac{\mu + \sqrt{\mu^{2} + 2\sigma^{2}\xi}}{\sigma^{2}}$$

$$\varepsilon_{2} = \frac{\mu - \sqrt{\mu^{2} + 2\sigma^{2}\xi}}{\sigma^{2}}$$

$$\eta_{1} = \frac{\varepsilon_{1}e^{-\varepsilon_{2}r} - \varepsilon_{2}e^{-\varepsilon_{1}r}}{\varepsilon_{2} - \varepsilon_{1}}$$

$$\eta_{2} = \frac{\varepsilon_{2}e^{-\varepsilon_{1}r}}{\varepsilon_{2} - \varepsilon_{1}}$$

当库存从位置 Z(Z) 为随机变量) 开始时, 利用上述结果, 有:

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{Z}[\mathbf{e}^{-\beta\tau_{2}}p_{0,0}(\tau_{2})] &= \mathbf{E}_{Z}\left[\frac{\xi}{\xi+\lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{1}(Z-r)} + \frac{\lambda}{\xi+\lambda}\mathbf{e}^{-\alpha_{2}(Z-r)}\right] = \frac{\xi}{\xi+\lambda}\int_{Q}^{\infty}\mathbf{e}^{-\alpha_{1}(z-r)}g_{r}^{+}(z)\mathrm{d}z + \frac{\lambda}{\xi+\lambda}\int_{Q}^{\infty}\mathbf{e}^{-\alpha_{2}(z-r)}g_{r}^{+}(z)\mathrm{d}z - \frac{\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\xi+\lambda} \times \left[\frac{\xi\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2}-\alpha_{1})Q+\alpha_{1}r}}{\varepsilon_{2}-\alpha_{1}} + \frac{\lambda\mathbf{e}^{(\varepsilon_{2}-\alpha_{2})Q+\alpha_{2}r}}{\varepsilon_{2}-\alpha_{2}}\right] \end{aligned}$$

同理, 可求得:

$$E_{Z}[e^{-\beta\tau_{2}}p_{0,1}(\tau_{2})] = \frac{\lambda\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\lambda+\xi} \left[\frac{e^{(\varepsilon_{2}-\alpha_{2})Q+\alpha_{2}r}}{\varepsilon_{2}-\alpha_{2}} - \frac{e^{(\varepsilon_{2}-\alpha_{1})Q+\alpha_{1}r}}{\varepsilon_{2}-\alpha_{1}} \right]$$

另外

$$E_{r}[e^{-\alpha W(I_{1}-)}1_{\{W(I_{1}-)

$$\int_{0}^{r} e^{-\alpha z} g_{r}^{-}(z) dz + \int_{r}^{Q} e^{-\alpha z} g_{r}^{+}(z) dz =$$

$$\frac{\eta_{2}\varepsilon_{2}}{\varepsilon_{2}-\alpha} - \frac{\eta_{2}\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1}-\alpha} + \frac{\eta_{2}\varepsilon_{1}}{\varepsilon_{1}-\alpha} e^{(\varepsilon_{1}-\alpha)r} +$$

$$\frac{\eta_{1}\varepsilon_{2}}{\varepsilon_{2}-\alpha} e^{(\varepsilon_{2}-\alpha)Q} - \frac{\varepsilon_{2}(\eta_{1}+\eta_{2})}{\varepsilon_{2}-\alpha} e^{(\varepsilon_{2}-\alpha)r}$$$$

概率 $P(W(I_1) \ge Q)$, 据密度函数 $g_r^+(s)$ 很容易确定, 在此不再列出.

至此, 引理 1 给出 $\mathrm{E}[\mathrm{e}^{-\alpha W(T-)-\beta T}]$ 式中包含的 函数已全部得到. 下面, 基于鞅 M, 确定费用模型的 有关函数.

利用式 (3), 对 T 应用最优抽样定理, 有 E[M(0)] = E[M(T)], 化简可得下式:

$$(\varphi(\alpha) - \beta) \mathbf{E} \int_0^T e^{-\alpha W(t) - \beta t} dt =$$

$$\mathbf{E}[e^{-\alpha W(T -) - \beta T}] - e^{-\alpha Q} +$$

$$\alpha \mathbf{E} \int_0^T e^{-\beta t} dL(t)$$
(8)

将引理 1 得到的 $E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}]$ 代入式 (8).

首先, 令 $\alpha = \alpha_1$, 因 $\varphi(\alpha_1) - \beta = 0$, 式 (8) 左 边为 0, 故求得:

$$E \int_0^T e^{-\beta t} dL(t) = \frac{e^{-\alpha_1 Q} - E[e^{-\alpha_1 W(T-) - \beta T}]}{\alpha_1}$$
 (9)

在此基础上, 据式 (8) 有:

$$E \int_{0}^{T} e^{-\alpha W(t) - \beta t} dt = \frac{E[e^{-\alpha W(T -) - \beta T}] - e^{-\alpha Q} + \alpha E \int_{0}^{T} e^{-\beta t} dL(t)}{\varphi(\alpha) - \beta}$$
(10)

将式 (9) 代入式 (10) 后, 对式 (10) 两边关于 α 求导, 并令 $\alpha = 0$ 得:

$$E \int_{0}^{T} e^{-\beta t} W(t) dt = -\frac{d}{d\alpha} \left\{ \frac{E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}] - e^{-\alpha Q}}{\phi(\alpha) - \beta} + \frac{\alpha E \int_{0}^{T} e^{-\beta t} dL(t)}{\varphi(\alpha) - \beta} \right\} \Big|_{\alpha=0} \tag{11}$$

最后, 利用引理 1 给出 $E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}]$ 的等式, 可求得:

$$E[e^{-\beta T}] = E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}]\Big|_{\alpha=0}$$

$$E[e^{-\beta T}W(T-)] = -\frac{d}{d\alpha} \left\{ E[e^{-\alpha W(T-)-\beta T}] \right\}\Big|_{\alpha=0}$$
(13)

上面这些式子求解比较简单但结果冗长, 考虑 空间限制, 在此省略.

至此, 我们确定出总费用模型中包含的所有函 数, 即式 (9)、(11)、(12) 和式 (13).

2.3 模型的求解

在构建模型完成后,下面,确定它的最优解,即

$$\min TC(r,Q) = C_I + C_S + C_R$$
 s.t. $0 < r < Q$

显然, 上式是 r 和 Q 高度非线性函数, 用传统 优化方法很难求解. 近年来, 交叉熵法在解决连续多 极值优化问题方面,得到人们广泛关注. 采用罚函数 思想, 我们将带约束的优化问题化为无约束优化问 题. 另外, 为避免算法陷入局部最优解, 在迭代过程 中, 对其进行修正. 考虑问题的复杂性及求解的效果 与效率, 本文修正参数 ϖ 取 0.95. 下面, 给出第 n次迭代 r 和 Q 均值和方差更新及修正公式,详细了 解请参阅文献 [21].

均值和方差更新公式

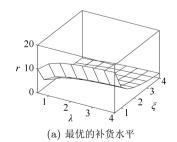
$$\widehat{u}_{k,n} = \frac{\sum_{i=1}^{S} 1_{\{TC_{i,n} \le \chi_n\}} \gamma_{i,n}^k}{\sum_{i=1}^{S} 1_{\{TC_{i,n} \le \chi_n\}}}$$

$$\widehat{\delta}_{k,n}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{S} 1_{\{TC_{i,n} \le \chi_n\}} (\gamma_{i,n}^k - \widehat{u}_{k,n})^2}{\sum_{i=1}^{S} 1_{\{TC_{i,n} \le \chi_n\}}},$$

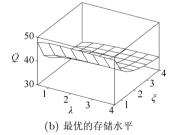
$$k = 1, 2$$

均值和方差更新值修正公式

$$u_{k,n} = \varpi \widehat{u}_{k,n} + (1 - \varpi) u_{k,n-1}$$



(a) Optimal replenishment level



(b) Optimal storage level

$$\delta_{k,n}^2 = \varpi \widehat{\delta}_{k,n}^2 + (1 - \varpi) \delta_{k,n-1}^2, \qquad k = 1,$$

经过 N 次抽样和更新, $u_{k,N}$ (k=1,2) 非常接 近最优的 $\{r,Q\}$, 即可视它们为最优解.

3 仿真实验及结果分析

因无其他数据可供使用, 为分析中断、净需求 和系统参数, 对最优库存策略 r 和 Q 及期望费用 TC 的影响, 给出参数基本值如下: $\lambda = 1$, $\xi = 1$, $\mu = -5$, $\sigma = 3$, h = 0.1, $\pi = 5$, $\kappa = 0.3$, $K = 10, \ \beta = 0.04.$

3.1 供应中断的影响分析

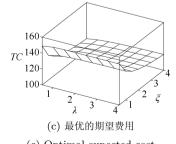
在其他参数取基本值条件下, 图 2 给出 λ 和 ξ 变化, 对应的最优库存策略和期望费用.

首先, 针对参数 λ 和 ξ 变化, 进行影响分析. 借 鉴排队理论, 用平均中断时间和平均供应时间之比, 即 $\rho = \lambda/\xi$, 表示中断强度. 则据图 2 知, 正如人们 期望的, r 和 Q 及 TC 均与中断强度的变化成正比, 即随 ρ 的增大 (λ 增大或 ξ 减小) 而增加; 随 ρ 的减 $小(\lambda 减小或 \xi 増大)$ 而降低.

其次,针对中断的不同类型,进行影响分析.由 于对于固定的 ρ , 中断又可分为频率低持续时间长和 频率高持续时间短两种类型. 为说明问题, 利用图 2, 选取中断强度 ρ 等于 1, 即选择图中位于 λ 和 ξ 坐 标平面对角线上的数据进行分析. 当点从 (0.5, 0.5) 沿对角线向(4,4)移动时,中断类型从频率低持续时 间长逐渐转为频率高持续时间短, 此时, 对应的r、 Q 和 TC 均逐渐降低. 文献 [7] 在解决供应中断环 境下库存问题时,得到同样的结论.本文将它推广到 更为复杂的供应中断和退货环境.

3.2 净需求的影响分析

 ρ 给定时, 净需求率 μ 和均方差 σ 的影响比较 直观, 考虑到空间限制, 省略其结果. 下面, 分析不同 中断类型下,净需求波动的影响.不失一般性,假设 ρ等于1,其他参数取基本值.图 3 给出计算结果.



(c) Optimal expected cost

图 2 λ 和 ξ 变化对应的最优库存策略和费用

Fig. 2 Optimal inventory policy and expected cost for varying λ and ξ

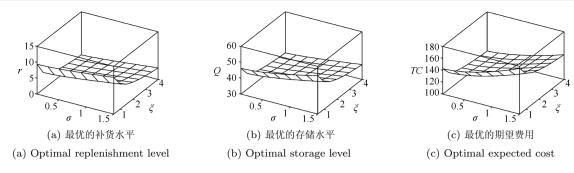


图 3 σ 和 ξ 变化对应的最优库存策略和费用

Fig. 3 Optimal inventory policy and expected cost for varying σ and ξ

据图 3 知, 当参数 ξ 固定时, 尽管净需求率 μ 不变, 但随均方差 σ 的增加, 即净需求波动的增大, r 和 Q 及 TC 均增大; 而当 σ 固定时, r 和 Q 及 TC, 又随着 ξ 的增大, 即中断类型由频率低持续时间长向频率高持续时间短转变 (因 ρ 固定) 而降低. 这进一步验证了第 3.1 节得到的结论. 另据图 3 还看出, 当均方差 σ 越大和参数 ξ 越小, 即净需求波动越大和中断趋近于频率低持续时间长时, r 和 Q 越大, 相应的 TC 也随之变大.

3.3 系统参数的灵敏度分析

下面,分析系统参数变化,对最优库存策略和期望费用的影响.每次实验仅改变一个参数值,其余取基本值.

据表 1 知, 随单位产品库存费用 h 增大, TC 逐渐增大; 另外, 为防止 h 增大造成过高库存费用, r 和 Q 均逐渐降低.

表 1 h 变化对应的最优库存策略和费用 Table 1 Optimal inventory policy and expected cost for varying h

h	r	Q	TC
0.025	8.723	83.627	73.256
0.050	7.541	58.116	98.548
0.075	6.607	47.657	117.768
0.100	5.871	41.533	133.971
0.125	5.267	37.359	148.249
0.150	4.755	34.261	161.143
0.175	4.311	31.835	172.973
0.200	3.920	29.860	183.950

据表 2 知, 随单位产品短缺费用 π 的增大, TC 也随之增大; 另外, 为避免 π 增大引起过高的短缺费用, 系统提高了相应的 r 和 Q.

随着单位产品补货费 κ 的增大, 系统如果减少

每次的补货量 (零售商订货时, 若供应商处入 ON 状态, 补货量为 Q-r; 若供应商处入 OFF 状态, 补货量为 Q-W(T-)), 那么, 会导致补货次数的增加. 然而, 由于固定补货费 K 较大, 减少补货量带来的费用节省, 不足以抵偿订货次数增加所造成固定补货费用的增大, 所以, 补货量不减反而增大. 又因单位产品短缺费 π 比库存费 h 大, 所以, 据表 3 看到, r 减小的量小于 Q 增大的量. 至于 TC 随 κ 的递增而增大, 其原因比较明显, 这里, 不再赘述.

表 2 π 变化对应的最优库存策略和费用 Table 2 Optimal inventory policy and expected cost for varying π

π	r	Q	TC
3	2.729	38.658	126.726
4	4.506	40.302	130.864
5	5.871	41.533	133.971
6	6.981	42.509	136.441
7	7.917	43.312	138.477
8	8.727	43.988	140.198
9	9.442	44.569	141.680
10	10.082	45.075	142.975

据表 4 知,随每次固定补货费用 K 的增大, TC 逐渐增大.另外,为缓解 K 增大造成的影响,系统减少了补货次数,即采取了降低 r 和增大 Q 的策略.

4 结论

随机供应中断会造成产品短缺,而随机退货又会导致产品积压,在此环境下,如何将库存有效控制在某一合理区间,成为当前零售企业管理者面临的新问题.然而,由于系统中包含多个随机因素,利用传统的数学建模和求解方法很难解决,所以,该问题在理论上还缺乏必要的研究.

表 3 κ 变化对应的最优库存策略和费用 Table 3 Optimal inventory policy and expected cost for varying κ

κ	r	Q	TC
0.1	6.369	40.503	112.907
0.2	6.123	41.002	123.459
0.3	5.871	41.533	133.971
0.4	5.612	42.098	144.442
0.5	5.346	42.699	154.868
0.6	5.072	43.340	165.249
0.7	4.790	44.023	175.580
0.8	4.500	44.752	185.861

表 4 K 变化对应的最优库存策略和费用 Table 4 Optimal inventory policy and expected cost for varying K

K	r	Q	TC
4	8.227	32.282	113.565
6	7.209	35.837	121.341
8	6.463	38.859	128.022
10	5.871	41.533	133.971
12	5.378	43.955	139.387
14	4.954	46.183	144.388
16	4.582	48.255	149.055
18	4.249	50.198	153.445

本文在采用 BM 描述需求和退货共同作用下库 存水平动态变化过程基础上, 通过将随机供应过程 表示为 2 个状态的连续时间 Markov 链, 并利用更 新过程理论及 Kella-Whitt 鞅, 分别研究了期望折 扣库存、短缺和补货费用模型的构建,这也是本文的 创新之处. 由于该模型是控制策略高度非线性函数, 又设计交叉熵法求它的最优解. 最后, 通过仿真实 验,分析了关键因素对系统的影响,并得到如下结论 和管理启示: 1) 系统的最优控制策略和期望费用, 不但与供应中断强度和净需求波动的大小有关,而 且还与供应中断的类型有关; 2) 针对单位产品的库 存费和短缺费较高, 且净需求波动较大的系统, 即使 供应中断的强度不变, 但在中断趋于频率低持续时 间长的情况下, 库存管理者增加订货量的同时, 还应 考虑其他的防御策略,譬如,采取多源订货或应急采 购措施, 以缓解中断造成较大的损失; 3) 随机供应 中断、退货和需求相互交织、共同作用, 极大地增加 了问题的复杂性. 因此, 管理者在制定库存控制策略 时,要综合考虑各种因素,尤其是单位补货费用变化 对系统的影响.

在此基础上,还可研究: 1) 本文仅针对单个供应商,为避免较高的短缺费用,可研究多源订货或应急采购库存问题; 2) 本文忽略退货处理时间和费用对系统的影响,这对某些商品 (如服装) 是合理的. 但对有些商品,其影响不能忽略. 因此,可研究同时考虑这两个因素的库存问题; 3) 本文假设 BM 参数是固定的,实际中,它们很可能变化. 因而,可研究 BM参数与供应环境相关情况下库存问题. 通过进一步研究,以期更好解决该问题.

References

- 1 How to reduce the retail shortage rate [Online], available: http://www.chinawuliu.com.cn/xsyj/200507/04/134312. shtml, February 13, 2014 (如何降低零售业的缺货率 [在线], 地址: http://www.chinawuliu.com.cn/xsyj/200507/04/134312.shtml, February 13, 2014)
- 2 Double eleven return rate as high as 25% logistics industry embarrassment after shopping spree [Online], available: http:// www.chinairn.com/print/3232343.html, February 13, 2014 (双十一退货率高达 25% 购物狂欢后物流业遇尴尬 [在线], 地址: http://www.chinairn.com/print/3232343.html, February 13, 2014)
- 3 Kleindorfer P R, Saad G H. 2005. Managing disruption risks in supply chains. *Production and Operations Management*, 2005, **14**(1): 53–68
- 4 Lou Shan-Zuo, Wu Yao-Hua, Lv Wen. Study on inventory control under stochastic disruptions. *Acta Automatica Sinica*, 2010, **36**(7): 999—1006 (娄山佐, 吴耀华, 吕文. 随机中断环境下的库存控制研究. 自动化学 报, 2010, **36**(7): 999—1006)
- 5 Ahiska S S, Appaji S R, King R E, Warsing J D P. A Markov decision process-based policy characterization approach for a stochastic inventory control problem with unreliable sourcing. *International Journal of Production Economics*, 2013, 144(2): 485–496
- 6 Yan X M, Liu K. An inventory system with two suppliers and default risk. Operations Research Letters, 2009, 37(5): 322-326
- 7 Qi L. A continuous-review inventory model with random disruptions at the primary supplier. European Journal of Operational Research, 2013, 225(1): 59-74
- 8 Chen J L, Zhao X B, Zhou Y. A periodic-review inventory system with a capacitated backup supplier for mitigating supply disruptions. *European Journal of Operational Research*, 2012, **219**(2): 312–323
- 9 Östlin J, Sundin E, Bjorkman M. Importance of closed-loop supply chain relationships for product remanufacturing. *International Journal of Production Economics*, 2008, **115**(2): 336–348

- 10 Ofek E, Katona Z, Sarvary M. "Bricks and clicks": the impact of product returns on the strategies of multichannel retailers. *Marketing Science*, 2011, **30**(1): 42–60
- 11 Chen J, Bell P C. Coordinating a decentralized supply chain with customer returns and price-dependent stochastic demand using a buyback policy. European Journal of Operational Research, 2011, 212(2): 293-300
- 12 Mitra S. Inventory management in a two-echelon closed-loop supply chain with correlated demands and returns. Computers and Industrial Engineering, 2012, 62(4): 870–879
- 13 Shulman J D, Coughlan A T, Savaskan R C. Managing consumer returns in a competitive environment. Management Science, 2011, 57(2): 347-362
- 14 Karakayali I, Akcali E, Cetinkaya S, Üster H. Capacitated replenishment and disposal planning for multiple products with resalable returns. Annals of Operations Research, 2013, 203(1): 325-350
- 15 Berman O, Perry D, Stadje W. An (s, r, S) diffusion inventory model with exponential lead time and order cancellations. Stochastic Models, 2008, 24(2): 191–211
- 16 Yao D C. Optimal policy for Brownian inventory models with general convex inventory cost. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 2013, 29(1): 187–200
- 17 Cadenilias A, Lakner P, Pinedo M. Optimal control of a mean-reverting inventory. *Operations Research*, 2010, **58**(6): 1697–1710
- 18 Kell O, Whitt W. Useful martingales for stochastic storage processes with Lévy input. Journal of Applied Probability, 1992, 29(2): 396-403

- 19 Kyprianou A E. Introductory Lectures on Fluctuations of Lévy Processes with Application. New York: Springer-Verlag LLC, 2006. 75-83
- 20 Asmussen A, Kella O. A multi-dimensional martingale for Markov additive processes and its applications. Advance in Applied Probability, 2000, 32(2): 376-393
- 21 Kroese D P, Porotsky S, Rubinstein R Y. The cross-entropy method for continuous multi-extremal optimization. Methodology and Computing in Applied Probability, 2006, 8(3): 383-407



娄山佐 山东大学控制科学与工程学院副教授. 主要研究方向为复杂系统建模与仿真, 库存控制, 优化算法. 本文通信作者. E-mail: Lshanzuo@163.com (LOU Shan-Zuo Associate profes-

(LOU Shan-Zuo Associate professor at the School of Control Science and Engineering, Shandong University. His research interest covers modeling simu-

lation of complex systems, inventory control, and optimization algorithm. Corresponding author of this paper.)



田新诚 山东大学控制科学与工程学院 教授. 主要研究方向为运动控制, 机电一 体化, 智能控制系统.

E-mail: txch@sdu.edu.cn

(TIAN Xin-Chen Professor at the School of Control Science and Engineering, Shandong University. His research interest covers motion control, mecha-

tronics, and intelligent control system.)