

回收品质量水平的再制造系统研究

高雅, 郭健全

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 研究了考虑回收品质量水平的再制造系统的模型. 在模型中消费者需求由新产品制造和回收品再制造来满足, 假设回收品质量水平服从指数分布; 回收率、回收成本、再制造成本都是有关回收品最低质量水平的函数, 建立平均总成本函数. 结果表明: 当回收产品的质量水平低时, 则回收成本低, 虽然再制造成本高, 但是平均总成本低, 制造商更愿意以成本最低的方式回收较低质量水平的回收品. 通过粒子群算法和灵敏度分析, 验证了该模型的有效性.

关键词: 管理工程; 再制造系统; 质量水平; 再制造成本; 粒子群算法; 灵敏度分析

中图分类号: F 253.3 **文献标志码:** A

Strategies for Remanufacturing System with Consideration of the Quality of Recycled Products

GAO Ya, GUO Jian-quan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The model of recycled products was investigated with consideration of the minimum quality level in remanufacturing system. In the model, the consumer's demand was satisfied by manufacturing raw materials and remanufacturing recycled products. The quality level of recycled products was set to be of exponential distribution and then the model with the objective of minimizing the average total cost was constructed. It was assumed that in establishing the model, the functions of recycling rate, buyback cost and remanufacturing cost are related to the minimum quality level. The results show that if the quality of the recycled products is low, the buyback cost is low; though the remanufacturing cost is high, the average total cost is low; the manufacturers are willing to recycle the used products with low quality level. Through construction of a solution process of particle swarm optimization and with resorting to numerical examples with sensitive analysis, the validity of the model was proved.

Key words: management engineering; remanufacturing system; quality level; remanufacturing cost; particle swarm optimization; sensitivity analysis

收稿日期: 2013-07-17

基金项目: 上海市教委重点学科建设资助项目(J50504); 国家自然科学基金资助项目(71071093); 上海市自然科学基金资助项目(10ZR1413300)

第一作者: 高雅(1990-), 女, 硕士研究生. 研究方向: 物流工程. E-mail: elegancey@126.com

通讯作者: 郭健全(1972-), 男, 副教授. 研究方向: 国际贸易、国际商务、国际物流与供应链管理. E-mail: jasonguousst@126.com

近年来,由于环境立法制度日趋严格和人们环保意识日益提高,回收品再制造作为一种废旧产品处理的高级形式,越来越受到重视^[1-3].对于制造商而言,再制造过程是有利可图的.再制造系统不像直接再利用产品方式一样,产品质量会降级,再制造系统制造的产品可以和新产品一样销售,有其独特的优势,可以降低制造商的总成本^[4-7].然而由于再制造系统回收品质量、数量以及回收时间的不确定性,再制造系统比传统制造系统更复杂^[8-9].

Schradly^[10]首先提出考虑回收品的确定型 EOQ 模型,引起许多学者的关注和研究.景熠等^[11]考虑制造/再制造商将回收产品加工为两种质量不同的再制造产品,高质量的再制造产品与新产品具有同质性,且当其生产数量超过需求量时,可以作为低质量再制造产品的替代品进行销售. Fleischmann 等^[12]建立回收品质量不确定的仿真模型. Wei 等^[13]提出回收和需求不确定条件下的生产和库存鲁棒最优策略. Alinovi 等^[14]制订随机的经济订货量的制造/再制造混合系统的库存控制模型,模型的目的是确定是否需要放置一个制造/采购订单,以避免出现断货情况. Vercraene 等^[15]协调制造、再制造和返回验收在混合系统、客户需求和退回产品到达系统的根据独立的泊松过程. Cai 等^[16]研究不同质量水平下采购生产问题的混合制造再制造系统推导定价和生产政策. Poles 等^[17]提出生产和库存系统的再制造系统,使用系统动力学仿真建模方法分析容量规划影响和交货期系统. Sang^[6]研究了回收品质量和回收成本,但是假设其关系是独立的. Mukhopadhyay 等^[18]研究了在质量和需求的不确定情况下,再制造系统中最优的采购和生产决策. 缪周等^[19]研究了回收品为随机情况下的制造/再制造混合系统库存控制模型,并考虑废弃处置. EI 等^[20]研究回收品回收是可变的,回收价格与回收质量水平有关. 陈丽华等^[21]研究回收率依赖回收产品质量情况下制造/再制造混合系统的 EOQ 模型,并且考虑缺货情况. Guo 等^[22]拓展了之前的研究,考虑回收品的最低质量水平与回收率、再制造成本比率、再制造成本之间的相关关系,其假设质量水平服从均匀分布. 郭伟等^[23]从网络设计、回收渠道、定价与协调及库存管理 4 个方面,综述了再制造闭环供应链领域的研究现状. Lwao 等^[24]研究了在回收品质量不确定情况下的最优生产计划以及潜在的质量分类误差.

笔者假设在需求恒定情况下,需求由制造和再

制造过程来满足.在前人研究的基础上,假设回收率、回收成本比率、再制造成本与不同的回收品质量水平相关.将回收品最低质量水平、周期、制造期次数、再制造期次数设为变量,研究这些变量对平均总成本的影响.同时提出最优回收策略和最优制造、再制造策略.对于最优回收策略(最低质量水平),目的在于管理回收品的质量;最优制造、再制造策略(周期、制造期次数、再制造期次数),目的在于合理安排制造和再制造期,降低平均总成本.

1 模型假设与函数构建

1.1 模型假设

- a. 需求率恒定且已知;
- b. 回收品质量水平服从指数分布;
- c. 回收成本、再制造成本与回收品质量水平相关;
- d. 在一个周期中,原材料只在外部采购一次;
- e. 不考虑丢弃;
- f. 不考虑提前期;
- g. 不考虑缺货.

1.2 函数构建

根据以上假设,回收率、回收成本、再制造成本都与回收品质量水平相关.当回收时,如果所定的质量水平太高,那么回收率将会很低,反之亦然.对于再制造成本,如果回收品的质量水平很高,那么再制造难度降低,则再制造成本降低,反之亦然.对于回收成本,如果回收品的质量水平很高,那么制造商更愿意用相对高一点的价格回收,反之亦然.本文采用负指数函数建立模型^[25].

1.2.1 回收率函数

定义回收率 $d = \alpha D$, 定义边际回收率 $\alpha = be^{-\varphi q}$, 其中 q 为回收品最低质量水平, $0 \leq q \leq 1$; b 为回收率函数参数, $0 \leq b \leq 1$; φ 为回收率函数参数; D 为消费者在单位时间内需求率.参数 b, φ 适用于不同的情况.

根据假设, q 服从指数分布, $q \sim E(\lambda)$, 其中 λ 为指数分布参数, x 为回收品质量水平 ($q \leq x \leq 1$).

其概率密度函数为 $X(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & q < x < 1 \\ 0, & \text{其它} \end{cases}$

1.2.2 回收成本函数

定义回收成本比率 $p = ae^{-\theta(1-x)}$, 如图 1 所示, 其中 a 为回收成本函数参数 ($0 \leq a \leq 1$), θ 为回收成本函数参数.回收成本比率是单位回收品回收成

本与单位新产品生产成本的比率,其中生产成本包括单位制造成本 C_n 和单位原材料采购成本 C_{raw} . 参数 a, θ 适用于不同的情况.

$$\begin{aligned} \text{那么平均回收成本 } C_1 &= d(C_n + C_{raw})E(p), \\ E(p) &= \int_{-\infty}^{+\infty} \lambda e^{-\lambda x} a e^{-\theta(1-x)} dx = a\lambda e^{-\theta} \int_q^1 e^{(\theta-\lambda)x} dx = \\ &= \frac{a\lambda e^{-\theta}}{\theta-\lambda} \int_q^1 e^{(\theta-\lambda)x} d(\theta-\lambda)x = \frac{a\lambda e^{-\theta}}{\theta-\lambda} (e^{(\theta-\lambda)x})_q^1 = \\ &= \frac{a\lambda}{\theta-\lambda} [e^{-\lambda} - e^{-\theta+(\theta-\lambda)q}]. \end{aligned}$$

平均回收成本

$$C_1 = \alpha D(C_n + C_{raw}) \frac{a\lambda}{\theta-\lambda} [e^{-\lambda} - e^{-\theta+(\theta-\lambda)q}] \quad (1)$$

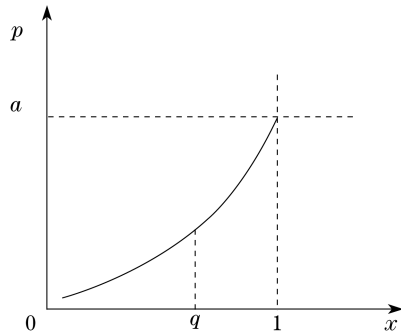


图1 回收成本比率

Fig.1 Buyback cost ratio

1.2.3 再制造成本函数

再制造成本函数类似于回收成本函数,再制造成本比率 $s = ce^{\delta(1-x)}$, 如图2所示. 其中 c 为再制造函数参数 ($0 \leq c \leq 1$), δ 为再制造函数参数. 再制造成本比率是单位再制造成本与单位制造成本的比率. 参数 c, δ 适用于不同的情况.

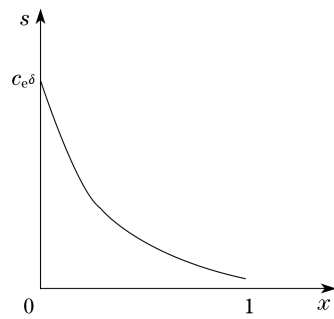


图2 再制造成本比率

Fig.2 Remanufacturing cost ratio

平均再制造成本 $C_2 = dC_M E(s)$, 经过简单的推算, 那么平均再制造成本

$$C_2 = \alpha DC_M \frac{c\lambda}{\delta+\lambda} [e^{\delta-(\delta+\lambda)q} - e^{-\lambda}] \quad (2)$$

2 系统模型

代颖等^[26]提出了制造再制造混合系统在 $(M, 1)$ 和 $(1, R)$ 策略下进行新产品制造和回收品再制造的最优批量模型, 并给出批量计算结果的简单修正方法. 杨爱峰等^[27]考虑了基于同收价格的再制造逆向物流系统, 建立启动 n 次新产品生产和 m 次回收品再制造模型. 陈丽华等^[28]研究了考虑回收率依赖于回收品价格, 并带有废弃处理的制造和再制造混合系统的 $(1, R)$ 和 $(M, 1)$ EPQ 模型. Dobos 等^[29]考虑了回收品丢弃率的混合制造再制造系统. 李新军等^[30]研究了带有废弃处理的 $(1, R)$ 和 $((M, 1)$ EOQ 模型, 回收产品部分用于再制造, 其余作废弃处理.

本文在前人研究的基础上建立最小成本函数, 假设一个周期 T 中包含 m 个制造期 T_m 和 n 个再制造期 T_n . 消费者对产品的需求由制造品库存和再制造品库存共同满足. 制造品通过在外购买原材料进行生产; 再制造品通过对旧产品回收进行再制造, 再制造系统中包含 3 种库存: 原材料库存、回收品库存、由制造品库存和再制造品库存组成的可用库存, 如图3所示.

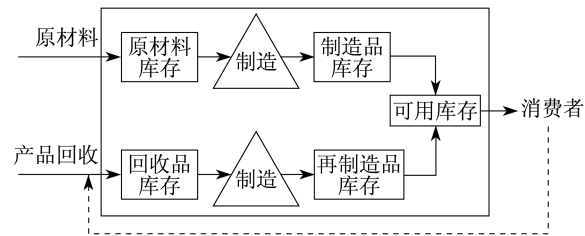


图3 物料流动

Fig.3 Material flow

2.1 库存水平

在周期 T 中, 再制造品的数量和回收品数量相同. 那么制造品的数量为消费者需求与再制造品数量的差.

消费者需求首先通过再制造过程满足, 然后再通过制造品过程满足. 再制造过程分为两部分: 第一部分, 对于再制造品而言, 再制造品数量上升到达顶峰, 这个过程中, 同时进行再制造和向消费者提供需求; 对于回收品而言, 回收品数量随着再制造过程而减少; 对于原材料而言, 没有进行制造过程, 就没有采购原材料. 第二部分, 对于再制造品而言, 再制造品数量下降到 0, 这个过程中, 只向消费者提供需

求;对于回收品而言,回收品数量会随着回收过程增加;对于原材料而言,同样没有进行制造过程,就没有采购原材料.再制造过程直到再制造品库存为0时,可以进行制造过程.

制造过程同样分为两部分:第一部分,对于制造品而言,制造品数量上升到达顶峰,这个过程中,同时进行制造和向消费者提供需求;对于回收品而言,回收品数量不会随着制造过程变化,回收品数量随着回收过程而增加;对于原材料而言,原材料数量随着制造过程而减少.第二部分,对于制造品来言,制

造品数量下降到0,这个过程中,只向消费者提供需求;对于回收品而言,回收品数量会随着回收过程增加;对于原材料而言,没有进行制造,就没有原材料数量变化.制造过程直到制造库存为0时,可以进行再制造过程.

根据以上分析,在周期 T 中,再制造品的数量和回收品数量相同, $mDT_m = dT$. 那么制造品的数量为消费者需求与再制造品数量的差, $nDT_n = DT - dT$. 如图4所示,本文假设 $m = 3, n = 3$, 实际中, m, n 可以为任意正整数.

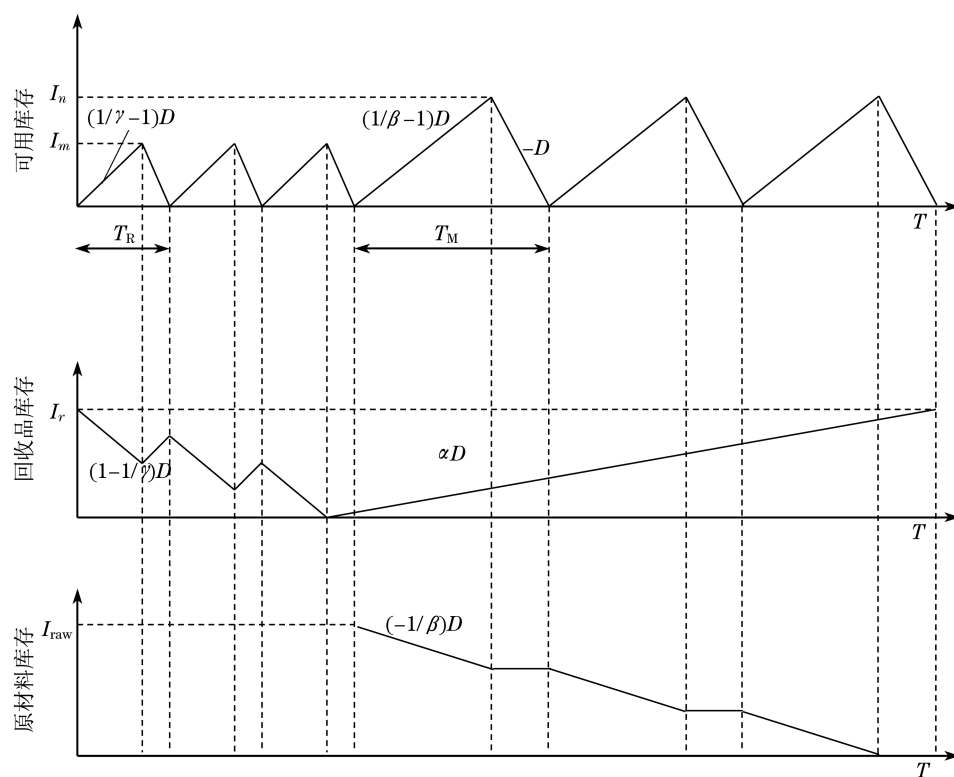


图4 库存水平

Fig.4 Inventory status

定义再制造率 $(1/\gamma)D$, 其中 $\gamma < 1$, 定义制造率 $(1/\beta)D$, 其中 $\beta < 1$. 再制造品数量上升时间为 T_1 , 再制造品数量下降时间为 T_2 . 再制造过程, 对于再制造品而言, 再制造品库存以 $(1/\gamma - 1)D$ 的速率上升, 到达再制造品最大数量 I_m , 然后以 D 的速率下降到0; 对于回收品而言, 回收品库存以 $(\alpha - 1/\gamma)D$ 速率下降, 然后以 αD 速率上升. 制造过程, 对制造品而言, 制造品库存以 $(1/\beta - 1)D$ 的速率上升, 到达制造品最大数量 I_n , 然后以 D 的速率下降到0; 对于回收品而言, 回收品库存以 αD 速率上升; 对于原材料而言, 原材料以 $(1/\beta)D$ 的速率下降. 根据以上分析

$$T = mT_m + nT_n$$

$$mDT_m = \alpha DT, nDT_n = (1 - \alpha)DT$$

$$mI_m = (1/\gamma - 1)DT_1 = DT_2, T_1 + T_2 = T_m$$

那么, $I_m = (1 - \gamma)\alpha DT/m$, 同理

$$I_n = (1 - \beta)(1 - \alpha)DT/n$$

$$I_r = m(1/\gamma - \alpha)D\gamma T_m - (m - 1)\alpha D(1 - \gamma)T_m = \alpha DT[m(1 - \alpha) + \alpha(1 - \gamma)]/m$$

$$I_{raw} = nDT_n = (1 - \alpha)DT$$

2.2 平均库存持有成本

再制造品平均库存持有成本

$$H_m = \frac{1}{2}h_s I_m T_m \frac{1}{T} = \frac{1}{2}h_s \frac{1}{m}(1 - \gamma)\alpha D T T_m$$

$$\frac{1}{T} = \frac{1}{2m}h_s(1 - \gamma)\alpha^2 DT \quad (3)$$

制造品平均库存持有成本

$$H_n = \frac{1}{2} h_s I_n T_n \frac{1}{T} = \frac{1}{2} h_s \frac{1}{n} (1 - \beta)(1 - \alpha)$$

$$DTT_n \frac{1}{T} = \frac{1}{2n} h_s (1 - \beta)(1 - \alpha)^2 DT \quad (4)$$

回收品平均库存持有成本

$$H_r = \frac{1}{2} h_r I_r T \frac{1}{T} =$$

$$\frac{1}{2} h_r \frac{1}{m} [m(1 - \alpha) + \alpha(1 - \gamma)] a DTT \frac{1}{T} =$$

$$\frac{1}{2} h_r \left[\alpha(1 - \alpha) + \frac{1}{m} \alpha^2 (1 - \gamma) \right] DT \quad (5)$$

原材料平均库存持有成本

$$H_{raw} = \frac{1}{2} h_{raw} (1 - \alpha)^2 \frac{\beta + n - 1}{n} DT \quad (6)$$

总平均库存持有成本

$$V = H_m + H_n + H_r + H_{raw}$$

$$V = \frac{1}{2m} h_s (1 - \gamma) \alpha^2 DT + \frac{1}{2n} h_s (1 - \beta)(1 - \alpha)^2$$

$$DT + \frac{1}{2} h_r \left[\alpha(1 - \alpha) + \frac{1}{m} \alpha^2 (1 - \gamma) \right] DT +$$

$$\frac{1}{2} h_{raw} (1 - \alpha)^2 \frac{\beta + n - 1}{n} DT \quad (7)$$

2.3 平均总成本

平均总成本 ATC 包括平均回收成本、平均再制造成本、平均库存持有成本、平均制造成本、平均准备成本、平均订购成本、平均原材料成本。

平均制造成本

$$(1 - \alpha) DC_n \quad (8)$$

平均准备成本

$$(mS_m + nS_n)/T \quad (9)$$

式中, S_m 为再制造准备成本; S_n 为制造准备成本。

平均订购成本

$$C_0/T \quad (10)$$

式中, C_0 为订购成本。

平均原材料成本

$$(1 - \alpha) DC_{raw} \quad (11)$$

经过推导和计算,将 $\alpha = be^{-\varphi q}$ 代入平均总成本函数,得

$$ATC = \frac{1}{2m} DTh_s (1 - \gamma) b^2 e^{-2\varphi q} + \frac{1}{2n} DTh_s (1 - \beta)$$

$$(1 - be^{-\varphi q})^2 + \frac{1}{2} DTh_r \left[be^{-\varphi q} (1 - be^{-\varphi q}) + \right.$$

$$\left. \frac{1}{m} b^2 e^{-2\varphi q} (1 - \gamma) \right] + \frac{1}{2n} DTh_{raw} (\beta + n - 1)$$

$$(1 - be^{-\varphi q})^2 + be^{-\varphi q} D(C_n + C_{raw}) \frac{a\lambda}{\theta - \lambda}$$

$$[e^{-\lambda} - e^{-\theta + (\theta - \lambda)q}] + e^{-\varphi q} DC_n \frac{c\lambda}{\delta + \lambda} [e^{\delta - (\delta + \lambda)q} - e^{-\lambda}] +$$

$$(1 - be^{-\varphi q}) D(C_n + C_{raw}) + (mS_m + nS_n)/T + C_0/T$$

3 粒子群优化算法

粒子群优化算法 (particle swarm optimization, PSO) 是 1995 年由 Eberhart 等首先提出,源于对鸟群捕食行为的研究. 粒子群算法具有高效的信息共享机制,通过当前搜索到最优优点进行共享信息,所以很大程度上这是一种单项信息共享机制,从理论上说,粒子群算法收敛更快. Lingo 优化问题更多地集中于对线性问题或简单的非线性问题的优化. 因为本文模型为线性问题,这种情况下一定能够找到全局最优解,而不是近似最优解. 本文首先通过粒子群算法与 Lingo 算法对比,然后判断近似值与全局最优值差距,最后得出结论.

针对此模型的优化计算,该模型的优化目标是平均总成本 ATC 最小,而决定这个最优目标的决策变量分别是回收品质量水平 q , 制造和再制造的周期 T 以及制造和再制造的次数 n 和 m . 根据模型的假设,本文采用粒子群优化算法来找出该最优目标的各种决策变量值.

3.1 粒子群算法简介

PSO 是一种基于群体理论的智能优化算法,它将每个粒子都当成无体积的,在一定的搜索空间内以不确定速度飞行,并且其速度是根据自身的历史经验和同伴的经验而进行实时调整. 基本原理为:设 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{in})$ 为粒子 i 的当前位置, $V_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{in})$ 为粒子 i 的当前飞行速度, $P_i = (p_{i1}, p_{i2}, p_{i3}, \dots, p_{in})$, 为粒子 i 所经历的最佳位置,也就是粒子 i 所经历过的具有最好适度值的位置,称为个体在时间 k 获得的最好位置. 整个粒子群搜索到的最佳位置表示为 $P_g = (p_{g1}, p_{g2}, p_{g3}, \dots, p_{gm})$, 意义为整个粒子群到时间 k 位置搜索到的最佳位置. 其中每个粒子新的速度为

$$v_{in}^{k+1} = wv_{in}^{k+1} + c_1 r_1 (p_{in} - x_{in}^k) +$$

$$c_2 r_2 (p_{gm} - x_{in}^k) \quad (12)$$

其中, c_1 和 c_2 为加速度系数; w 为惯性权重系数,可以控制当前粒子速度受之前速度影响的大小; r_1, r_2 为随机数值,一般取值 $0 \sim 1$. 计算每个粒子更新位置为

$$x_{in}^{k+1} = x_{in}^k + v_{in}^{k+1} \quad (13)$$

$$1 \leq i \leq n; 1 \leq n \leq N$$

通常为了避免在进化过程中粒子飞出搜索空间,式(13)中的 v_{in} 取 $[-V_{\max n}, V_{\max n}]$ 范围内的数,粒子以式(12)飞向新位置,并循环此过程直至用户定义的迭代条件不满足. 本文在求 ATC 的最优值时,为防止其落入局部最优值解中,粒子经过一次迭代后,对粒子进行了变异处理,人为控制了粒子的运行速度和方向. 如果 $x_i/v_i = rand \geq 0.7$, 那么 $x_{i1} = 10 \times rand$, $x_{i2} = 0.5 \times rand$, 这种自适应的变异可以避免本模型中的 ATC 最优值是局部最优的解.

3.2 计算过程

Step 1 随机初始化每个粒子的速度和位置,在本文中,随机初始化的是最低回收质量水平 q 和周期 T 及制造和再制造的次数 n 和 m .

Step 2 种群中所有粒子经过目标函数将得到一个适应度值,并将各粒子的目标和位置存于各粒子的 $pbest$ 适应度值中, $gbest$ 适应度值 = {所有 $pbest$ 中的个体具有最优适应度值的位置和目标}.

Step 3 按算法原理中的公式将粒子的位置及速度进行更新,如果在更新过程中 $x_i/v_i = rand \geq 0.7$ 即满足了变异的条件,则程序会自动进行粒子

位置和速度的变异.

Step 4 对更新后的粒子使其重新获得一个是适应度值.

Step 5 将各个粒子更新的 $pbest$ 值与当前适应度值进行比较,从而更新粒子的 $pbest$ 值.

Step 6 比较当前所有 $gbest$ 值和 $pbest$ 值,更新全局最优 $gbest$ 适应度值.

Step 7 判断是否达到了最优值,若达到了最优值,则输出 $gbest$ 值及其目标变量值并停止算法,否则转向 Step 3.

4 算例

4.1 计算结果

已知 $h_s = 2$, $h_r = 0.2$, $h_{\text{raw}} = 0.2$, $C_n = 30$, $C_{\text{raw}} = 20$, $C_o = 1\,000$, $S_m = 1\,500$, $S_n = 1\,500$, $D = 1\,000$, $a = 0.9$, $b = 0.9$, $c = 0.1$, $\gamma = 0.6$, $\beta = 0.5$, $\varphi = 2$, $\lambda = 1$. 参数是对纸品回收再制造企业进行实地调查和咨询相关专家建议的基础上得出来的. Lingo 与 PSO 结果对比可得表 1 结果,其中 Gaps 为 PSO 结果与 Lingo 结果的差额与 Lingo 结果的比值.

表 1 Lingo 与 PSO 结果对比
Tab.1 Gaps between Lingo and PSO

θ	δ	m	n	Lingo			PSO			Gaps/%
				q	T	ATC	q	T	ATC	
4	3.5	3	1	0.102	7.138	29 100.86	0.101	7.253	29 101.16	0.001%
	4	2	1	0.185	5.418	32 017.74	0.182	5.171	32 021.64	0.012%
	5	1	1	0.314	3.813	35 723.21	0.316	3.828	35 723.44	0.001%
5	3.5	3	1	0.095	7.168	28 270.55	0.097	7.313	28 271.50	0.003
	4	2	1	0.179	5.436	31 354.01	0.182	5.392	31 355.24	0.004
	5	1	1	0.310	3.818	35 268.79	0.312	3.811	35 269.26	0.001
6	3.5	3	1	0.091	7.185	27 707.65	0.093	7.287	27 708.37	0.003
	4	2	1	0.176	5.447	30 894.69	0.176	5.347	30 895.04	0.001
	5	1	1	0.306	3.821	34 942.17	0.305	3.812	34 942.82	0.002

表 1 表明:Lingo 和 PSO 的差距最大是 0.012%, 表明 PSO 算法的有效性. 根据 PSO 结果,可以得到以下结论:当 δ 相同时,随着 θ 逐渐增大, q 逐渐减小, ATC 逐渐减小;当 θ 相同时,随着 δ 逐渐增大, q 逐渐增大, ATC 逐渐增大. 即当再制造成本相同时,随着回收成本的降低,回收的产品质量水平会下降,平均总成本也会下降;当回收价格相同时,随着再制造成本的上升,回收产品质量水平会上升,平均总成本也会上升. 制造商更愿意降低平均总成本,当平均总成本最低时,回收品的质量水平很低. 制造商

的最优回收策略就是回收满足最低质量水平的回收品,降低平均总成本. 同时当平均总成本最低时,再制造次数和制造次数比例为 3:1, 制造商最优制造再制造策略就是要合理安排再制造和制造的批次,降低平均总成本. 这个结果和本文预计的结果一致.

4.2 灵敏度分析

如表 1 所示,在 $\theta = 6$, $\delta = 3.5$ 时,平均总成本最低,在此基础上进行灵敏度分析. 为了检验最低质量水平、边际回收率和平均总成本是回收成本的函数,系数 a 取 0.1~1.0. 同样,检验最低质量水平、

边际回收率和平均总成本是再制造成本的函数,系数 c 取 0.07~0.16,计算结果如表 2 所示.

表 2 系统 a 和 c 的灵敏度分析
Tab.2 Results of sensitivity test on a and c

a				c			
a	q	α	ATC	c	q	α	ATC
0.1	0.078 2	0.769 7	25 493.99	0.07	0.016 9	0.870 1	23 587.18
0.2	0.079 8	0.767 3	25 773.86	0.08	0.044 6	0.823 3	25 192.60
0.3	0.081 4	0.764 9	26 052.84	0.09	0.069 0	0.783 9	26 545.86
0.4	0.082 9	0.762 4	26 330.92	0.10	0.091 0	0.750 2	27 707.65
0.5	0.084 5	0.760 0	26 608.09	0.11	0.111 0	0.720 8	28 719.74
0.6	0.086 1	0.757 6	26 884.36	0.12	0.129 3	0.694 9	29 612.00
0.7	0.087 8	0.755 1	27 159.71	0.13	0.146 2	0.671 8	30 406.52
0.8	0.089 4	0.752 7	27 434.14	0.14	0.161 9	0.651 0	31 120.03
0.9	0.091 0	0.750 2	27 707.65	0.15	0.176 6	0.632 2	31 765.48
1.0	0.092 7	0.747 7	27 980.24	0.16	0.190 3	0.615 1	32 353.09

表 2 表明:当 a 减小时, q 减小, α 增大, ATC 减小. 即当制造商可以以低成本回收回收品时,此时,回收品质量水平降低,但是回收率较高,平均总成本较低. 制造商愿意以低价回收满足最低质量水平的低质量的回收品进行再制造,以此减少平均总成本.

当 c 减小时, q 减小, α 增大, ATC 减小. 即当制造商可以高再制造成本再制造低水平的回收品时,回收率较高,平均总成本较低. 制造商愿意以高再制造成本来再制造满足最低质量水平的低质量的回收品,以此减少平均总成本.

当 a 每增大 0.1 单位, ATC 增大约 1%,表明平均总成本对于回收成本参数不是很敏感;当 c 较小时,每增大 0.01 单位, ATC 增大约 6%,而当 c 较大时,每增大 0.01 单位, ATC 增大约 2%,表明平均总成本对于再制造成本参数很敏感. 对于制造商而言,以低价回收低质量的回收品来降低平均总成本的潜力不大;以高再制造成本来再制造低质量的回收品,以此减少平均总成本,平均总成本下降的潜力比较大. 制造商主要是通过再制造这个过程来降低平均总成本.

5 结 论

研究了制造和再制造系统中考虑回收品的最低质量水平的最优回收生产策略. 本文假设制造商的回收品回收率、回收成本、再制造成本是回收品最低质量水平的函数,其中回收品的最低质量水平服从指数分布. 在模型中,包括一个周期包含 n 个制造

期和 m 个再制造期. 市场需求由制造新产品和再制造回收品来满足,建立制造商平均总成本函数,目标是平均总成本最小. 本文通过算例,采用 Lingo 算法和 PSO 算法对比验证了该模型的有效性. 制造商应以回收满足最低质量水平的回收品,降低平均总成本作为最优回收策略. 同时制造商应以合理安排再制造和制造的批次,降低平均总成本作为最优制造再制造策略. 通过灵敏度分析以高再制造成本来再制造低质量的回收品降低平均总成本潜力大,制造商应该合理的安排再制造过程,提高再制造的能力,以此作为降低平均总成本的主要方式.

对于本文的不足在于本文模型建立是基于一定的假设条件. 减少假设条件的约束将是下一步的研究方向. 可以改进的方面有:市场需求是随机的;考虑回收品丢弃、缺货情况和考虑制造和再制造提前期情况.

参考文献:

[1] Lindhqvist T. Cleaner production: government policies and strategies[J]. Industry and Environment, 2001, 24 (1/2): 41 - 45.

[2] Spicer A J, Jonshon M R. Third-party demanufacturing as a solution for extended producer responsibility[J]. Journal of Cleaner Production, 2004, 12(1): 37 - 45.

[3] Beamon B M. Designing the green supply chain[J]. Logistics Information Management, 1999, 12 (4): 332 - 342.

[4] 陈秋双, 刘东红. 再制造系统的库存控制研究[J]. 南开大学学报, 2003, 36(3): 67 - 72.

[5] 李强, 梁工谦, 王沙婷. 制造与再制造系统混合库存分

- 析与研究[J]. 软科学, 2011, 25(9): 121 - 144.
- [6] Sang H Y, Ko Y D, Yune S H. A closed loop recycling system with minimum allowed quality level on returned products [J]. International Journal of Services and Operations Management, 2009, 5(6): 758 - 773.
- [7] Chung S L, Wee H M, Yang P C. Optimal policy for a closed-loop supply chain inventory system with remanufacturing [J]. Mathematical and Computer Modelling, 2008, 48(5/6): 867 - 881.
- [8] Rubio S, Chamorro A, Miranda F J. Characteristics of the research on reverse logistics (1995 - 2005) [J]. International Journal of Production Research, 2008, 46(4): 1099 - 1120.
- [9] Pokharel S, Mutha A. Perspectives in reverse logistics: a review [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53(4): 175 - 182.
- [10] Schrady D A. A deterministic inventory model for repairable items [J]. Naval Research Logistics Quarterly, 1967, 14(3): 391 - 398.
- [11] 景熠, 王旭, 李文川, 等. 考虑产品需求可替代的再制造批量生产计划优化[J]. 中国机械工程, 2012, 23(18): 2176 - 2181.
- [12] Fleischmann M, Bloemhof-Ruwaard J M, Dekker R, et al. Quantitative models for reverse logistics: a review [J]. European Journal of Operational Research, 1997, 103(1): 1 - 17.
- [13] Wei C S, Li Y J, Cai X Q. Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand [J]. International Journal of Production Economics, 2011, 134(2): 357 - 367.
- [14] Alinovi A, Bottani E, Montanari R. Reverse logistics: a stochastic EOQ-based inventory control model for mixed manufacturing/remanufacturing systems with return policies [J]. International Journal of Production Research, 2012, 50(5): 1243 - 1264.
- [15] Vercraene S, Flapper S D, Gayon J P. Coordination of manufacturing, remanufacturing and returns acceptance in a hybrid production-inventory system [C]//Proceedings of the 4rd International Conference on Information Systems. Quebec, 2012.
- [16] Cai X Q, Lai M H, Li Y, et al. Optimal acquisition and production policy in a hybrid manufacturing/remanufacturing system with core acquisition at different quality levels [J]. European Journal of Operational Research, 2014, 233(2): 374 - 382.
- [17] Poles R. System dynamics modeling of a production and inventory system for remanufacturing to evaluate system improvement strategies [J]. International Journal of Production Economics, 2013, 144(1): 189 - 199.
- [18] Mukhopadhyay S K, Ma H. Joint procurement and production decisions in remanufacturing under quality and demand uncertainty [J]. International Journal of Production Economics, 2009, 120(1): 5 - 17.
- [19] 缪周, 徐克林, 陆瑶. 考虑不确定回收率的制造/再制造系统的 EOQ 模型 [J]. 工业工程, 2009, 12(1): 132 - 135.
- [20] El A M, Jaber M Y. A production/remanufacturing inventory model with price and quality dependent return rate [J]. Computers & Industrial Engineering, 2010, 58(3): 352 - 362.
- [21] 陈丽华, 王波. 回收率依赖回收产品质量的再制造 EOQ 模型 [J]. 数学的实践与认识, 2010, 40(23): 55 - 61.
- [22] Guo J Q, Liang C J. Models for recycling and production policy for a closed-loop system [J]. Journal of Quality, 2011, 18(4): 303 - 314.
- [23] 郭伟, 鹿红娟, 邵宏宇, 等. 基于再制造的闭环供应链研究现状及发展 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 21(2): 11 - 17.
- [24] Iwao M, Kusukawa E. Optimal production planning for remanufacturing with uncertainty in quality of returns and classification error in quality grading [C]//Proceedings of the Asia Pacific Industrial Engineering & Management Systems Conference. Osaka, 2012.
- [25] Vörös J. Product balancing under conditions of quality inflation, cost pressures and growth strategies [J]. European Journal of Operational Research, 2002, 141(1): 153 - 166.
- [26] 代颖, 马祖军. 制造/再制造混合系统的最优生产批量模型 [J]. 西南交通大学学报, 2006, 41(1): 116 - 121.
- [27] 杨爱峰, 王晓. 基于回收价格的再制造系统策略研究 [J]. 合肥工业大学学报, 2011, 34(4): 593 - 597.
- [28] 陈丽华, 王波. 回收率依赖价格的再制造 EPQ 模型研究 [J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(3): 26 - 32.
- [29] Dobos I, Richter K. An extended production/recycling model with stationary demand and return rates [J]. International Journal of Production Economics, 2004, 90(3): 311 - 323.
- [30] 李新军, 达庆利. 一种新型的再制造条件下 EOQ 模型 [J]. 东南大学学报, 2006, 36(4): 667 - 671.

(编辑: 金虹)