

整数比策略下含变质产品且缺货部分需补的 VMI 模型

李新然, 牟宗玉

(大连理工大学 管理与经济学部, 大连 116024)

摘要 在不考虑原材料变质而产品变质且订货商处缺货部分需补的集成供应商管理库存 (VMI) 系统中, 由于生产准备成本的影响, 供应商采用批对批策略生产产品不一定最优, 因此文中允许供应商采购原材料和生产产品均采用整数比策略, 即一次采购的原材料分整数次生产, 一次生产的产品分整数次给订货商供货, 建立了包含一个供应商和一个订货商的 VMI 模型. 通过基于遗传算法设计的求解步骤得到了一次采购的原材料用于生产产品的次数, 一次生产的产品给订货商供货的次数、供货间隔期以及订货商处的服务水平等决策变量的值. 算例结果表明: 供应商采用整数比策略采购原材料和生产产品可得到 VMI 系统最小单位时间总成本的满意解; 进一步的分析表明生产准备成本、产品变质率、丢单系数等各自的变化均会对供应商的生产决策以及 VMI 系统最小单位时间总成本产生影响.

关键词 整数比策略; 变质产品; 缺货部分需补; 遗传算法; VMI

Vendor managed inventory model with deteriorating items and partial backlogging under integer ratio strategy

LI Xin-ran, MU Zong-yu

(Faculty of Management and Economics, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract We give a single vendor and single buyer VMI model in which raw materials are no deteriorating, items are deteriorating and buyer faces partial backlogging for unmet demand. It's not necessarily the best optimal way that vendor employs lot-for-lot strategy to yield items for the impact of setup cost. Therefore, we allow that vendor employs integer ratio strategy to procure raw materials and yield items, which means that each batch of raw materials procurement meet integer time of production, and each batch of items yield meet integer time of replenishment to buyer. We get these decision variables of time that meet production of each batch of raw materials procurement, time that meet replenishment to buyer of each batch of items yield, replenishment interval and buyer's service level by solving steps based on genetic algorithm. The result of numerical example indicates that the VMI system can get the satisfied solution of minimum per unit time total cost when vendor employs integer ratio strategy to procure raw materials and yield items. The respective change of setup cost, deterioration rate and losing sale ratio has an affect on vendor decision to produce and the minimum per unit time total cost of VMI system.

Keywords integer ratio strategy; deteriorating items; partial backlogging; genetic algorithm; VMI

1 引言

供应商管理库存 VMI (vendor managed inventory) 是集成供应链管理的一种重要运营模式. VMI 的实施可提升供应链应对市场变化的能力^[1]以及减弱牛鞭效应的影响^[2]. 在 VMI 系统中, 供应商负责所有成员的补货和库存决策, 使生产、库存和运输等活动同步协调, 以降低系统相关总成本. 目前有关 VMI 系统中供应商的补货和库存决策问题已有大量研究. Cetinkaya 等^[2]、刘丽文等^[3]和 Darwish 等^[4]均考虑整数次给订货商供货策略下的整合发货和库存补充的 VMI 模型, 但文献 [2-4] 中的供应商均不考虑生产产品, 而假设

收稿日期: 2011-07-08

资助项目: 国家自然科学基金 (70873014)

作者简介: 李新然 (1963-), 男, 汉, 辽宁大连人, 副教授, 研究方向: 生产运作管理、物流与供应链管理; 牟宗玉 (1983-), 男, 汉, 山东日照人, 博士研究生, 研究方向: 物流与供应链管理.

其上游存在一个拥有充足产品供应能力的供应商, 当需要产品时可瞬时到达. 而在实际市场环境中, 供应商采购原材料并生产产品来满足市场需求的 VMI 系统非常普遍. Woo 等^[5]、余玉刚等^[6]和 Yu 等^[7]探讨了供应商采用整数比策略采购原材料, 即一次采购的原材料分整数次生产, 和批对批 (lot-for-lot) 策略生产产品, 即一次生产的产品在相同的供货周期内可给每个订货商一次供货的 VMI 模型. 当供应商的一次生产准备成本相对给订货商的一次供货成本较高时, 供应商采用整数比策略生产产品, 即一次生产的产品分整数次给订货商供货的策略, 相比批对批策略会更优^[8-10]. Zhang 等^[11]进一步考虑供应商采用整数比策略生产产品的情况对文献^[5]进行了拓展.

由于生活中的许多产品在存储的过程中容易发生腐烂、损坏、蒸发、到期、无效和降价等现象, 即为变质产品 (deteriorating items). 杜少甫等^[12]和 Lan 等^[13]在文献^[2-3]的基础上研究了含变质产品的 VMI 模型, 其中文献^[13]通过遗传算法对模型进行了求解; Zhou 等^[14]探讨了一个含变质产品的集成库存模型, 模型中供应商采用不等批量供货; 王圣东等^[15]研究了一个含变质产品的供应链库存协调模型, 但文献^[14-16]中均不考虑原材料采购成本. 有些产品比如面包, 有着原材料变质率和产品变质率相差很大的情况, 原材料变质率相对而言可以忽略不计, 甚至没有变质率^[16]. 余玉刚等^[16]在^[5]的基础上研究了供应商采购原材料并生产产品, 且不考虑原材料变质而产品变质的 VMI 模型. 考虑到现实中缺货是一种普遍现象, 而出现缺货时缺货并非完全需补的, 罗兵等^[17]在^[16]的基础上研究了订货商处缺货量拖后率是拥有现货阶段需求率固定比例的 VMI 模型. 但文献^[16-17]中供应商均采用整数比策略采购原材料和批对批策略生产产品.

综上所述, 针对供应商采购原材料和生产产品时均采用整数比策略, 且不考虑原材料变质而产品变质的 VMI 系统, 现有成果无法给出相应的决策. 进一步考虑到现实中缺货并非完全需补这一情况, 本文建立了包含一个供应商和一个订货商, 且订货商处缺货部分需补的 VMI 模型. 基于遗传算法设计了有约束非线性混合整数规划目标函数的求解步骤, 拓展了模型的应用范围.

2 模型分析

2.1 模型假设及符号说明

1) VMI 系统由一个供应商和一个订货商组成, 生产和销售单一产品; 2) 供应商采购原材料的提前期为零, 每次采购的原材料分整数次生产, 不考虑原材料变质; 3) 产品存在变质现象, 变质率为常数, 单位时间变质量为当前库存量的一个固定分数, 变质产品无残值; 4) 供应商的生产率和订货商面临的市场需求率均为常数, 且生产率大于市场需求率; 5) 供应商一次生产的产品分整数次等批量给订货商供货, 供货提前期为零; 6) 订货商处缺货拖后率是拥有现货阶段需求率的固定比例, 且缺货于下一个供货间隔期开始时瞬时得到补充; 7) 供应商与订货商彼此熟悉对方的库存管理方式. 文中符号定义如下:

m 为供应商一次采购的原材料用于生产产品的次数 (决策变量); n 为供应商一次生产的产品给订货商供货的次数 (决策变量); A_m 为一次原材料采购成本; h_m 为单位原材料单位时间存储成本; M 为生产每单位产品所需原材料数量; A_v 为一次生产准备成本; f_v 为单位产品生产成成本; h_v 为供应商处单位产品单位时间存储成本; θ 为产品变质率, $0 < \theta < 1$; P 为产品的生产率; D 为产品的市场需求率, $P > D$; T 为供应商给订货商的一个供货间隔期 (决策变量); λ 为订货商处的服务水平, 即供货间隔期内有现货的时间占供货间隔期长度的比例 (决策变量), $0 \leq \lambda \leq 1$; A_b 为供应商给订货商的一次供货成本; h_b 为订货商处的单位产品单位时间存储成本; f_b 为订货商单位产品采购价格; s_b 为单位产品单位时间缺货成本; l_b 为单位产品的丢单成本; μ 为丢单系数, 即缺货期间丢失的需求率占有现货阶段需求率的比例, $0 \leq \mu \leq 1$.

2.2 模型建立

VMI 系统中订货商处的产品的库存水平变化如图 1 所示. t_1 为出现缺货的时刻点, 有 $t_1 = \lambda T$, 订货商在一个销售间隔期 T 内 t 时刻的库存水平 $I_b(t)$ 满足下列微分方程:

$$\begin{cases} \frac{dI_b(t)}{dt} = -\theta I_b(t) - D, & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{dI_b(t)}{dt} = -(1 - \mu)D, & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (1)$$

由边界条件, 可得式 (1) 的解为:

$$\begin{cases} I_b(t) = \frac{D}{\theta} [e^{\theta(t_1-t)} - 1], & 0 \leq t \leq t_1 \\ I_b(t) = -(1 - \mu)(t - t_1)D, & t_1 \leq t \leq T \end{cases} \quad (2)$$

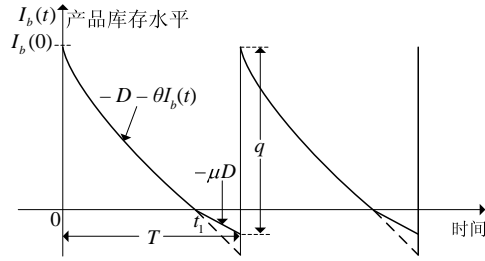


图 1 订货商处的产品的库存水平变化

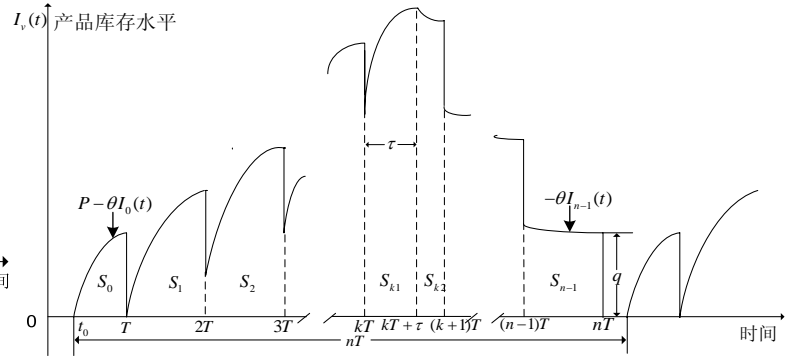


图 2 供应商处的产品的库存水平变化

由式 (2) 可得供应商一次给订货商的供货批量为:

$$q(\lambda, T) = I_b(0) - I_b(T) = \frac{D}{\theta}(e^{\theta\lambda T} - 1) + (1 - \mu)(1 - \lambda)DT \quad (3)$$

在一个供货间隔期内, 订货商处的产品的供货成本、存储成本、变质成本、缺货成本和丢单成本如下:

订货商处的产品的供货成本:

$$C_{Ab} = A_b \quad (4)$$

订货商处的产品的存储成本:

$$C_{hb}(\lambda, T) = h_b \int_0^{t_1} I_b(t) dt = \frac{h_b D}{\theta^2} (e^{\theta\lambda T} - \theta\lambda T - 1) \quad (5)$$

订货商处的产品的变质成本:

$$C_{db}(\lambda, T) = f_b \int_0^{t_1} \theta I_b(t) dt = \frac{f_b D}{\theta} (e^{\theta\lambda T} - \theta\lambda T - 1) \quad (6)$$

订货商处的产品的缺货成本:

$$C_{sb}(\lambda, T) = s_b \int_{t_1}^T [-I_b(t)] dt = \frac{s_b D}{2} (1 - \mu)(1 - \lambda)^2 T^2 \quad (7)$$

订货商处丢单成本:

$$C_{lb}(\lambda, T) = l_b D \mu (T - t_1) = l_b D \mu (1 - \lambda) T \quad (8)$$

由式 (4)–(8) 可得订货商处的单位时间的总成本为:

$$ATB(\lambda, T) = \frac{C_{Ab} + C_{hb}(\lambda, T) + C_{db}(\lambda, T) + C_{sb}(\lambda, T) + C_{lb}(\lambda, T)}{T} \quad (9)$$

VMI 系统中供应商处的产品的库存水平变化如图 2 所示. S_0, S_1, \dots, S_{n-1} 分别为供应商在一个生产间隔期内, 每个供货间隔期内的库存量. 生产开始时刻点为 t_0 , 生产结束时刻点为 $kT + \tau$, 供应商在每个时刻点向订货商供应 $q(\lambda, T)$ 数量的货物.

下面求解供应商在一个生产间隔期内产品的库存量 S_v .

当 $t \in [t_0, T]$ 时, 由 $\frac{dI_0(t)}{dt} = P - \theta I_0(t)$; $I_0(T) = q(\lambda, T)$ 可得:

$$I_0(t) = \frac{1}{\theta} [(\theta q(\lambda, T) - P)e^{(T-t)\theta} + P] \quad (10)$$

由式 (10) 和 $I_0(t_0) = 0$, 可得:

$$t_0(\lambda, T) = T - \frac{1}{\theta} \ln \left[\frac{P}{P - \theta q(\lambda, T)} \right] \quad (11)$$

由式 (10) 和 (11) 可得:

$$S_0(\lambda, T) = \int_{t_0(\lambda, T)}^T I_0(t) dt = \frac{P}{\theta^2} \ln \left[\frac{P}{P - \theta q(\lambda, T)} \right] - \frac{q(\lambda, T)}{\theta} \quad (12)$$

当 $t \in [(i-1)T, iT]$, $i = 2, 3, \dots, k$ 时, 由 $I_1(T) = 0$; $\frac{dI_{i-1}(t)}{dt} = P - \theta I_{i-1}(t)$; $I_{i-1}(iT) = I_i(iT) + q(\lambda, T)$ 可得:

$$I_{i-1}(t) = -\frac{P}{\theta} \left[\left(e^{\theta T} + \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} e^{2\theta T} + \dots + \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} e^{(i-1)\theta T} \right) e^{-\theta t} - 1 \right] \quad (13)$$

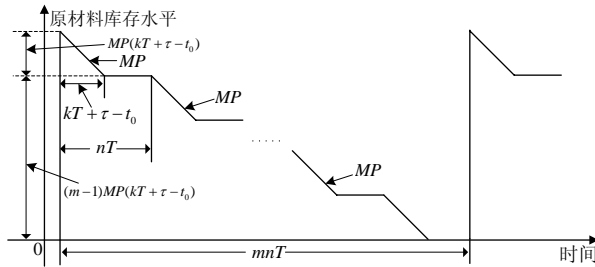


图 3 供应商处的原材料的库存水平变化

由式 (13) 可得:

$$S_{i-1}(\lambda, T) = \int_{(i-1)T}^{iT} I_{i-1}(t)dt = \frac{P}{\theta^2} \left[e^{-(i-1)\theta T} + \left(\frac{\theta q(\lambda, T)}{P} - 1 \right) e^{-(i-2)\theta T} + \theta T - \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} \right] \quad (14)$$

当 $t \in [kT, kT + \tau]$ 时, 由 $I_{k1}(kT) = I_{k-1}(kT) - q$; $\frac{dI_{k1}(t)}{dt} = P - \theta I_{k1}(t)$ 可得:

$$I_{k1}(t) = -\frac{P}{\theta} \left[\left(e^{\theta T} + \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} e^{2\theta T} + \dots + \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} e^{k\theta T} \right) e^{-\theta t} - 1 \right] \quad (15)$$

由式 (15) 可得:

$$S_{k1}(\lambda, T) = \int_{kT}^{kT+\tau} I_{k1}(t)dt = \left[\frac{P e^{(1-k)\theta T}}{\theta^2} + \frac{q(\lambda, T) e^{(2-k)\theta T} (1 - e^{(k-1)\theta T})}{\theta(1 - e^{\theta T})} \right] (e^{-\theta \tau} - 1) + \frac{P}{\theta} \tau \quad (16)$$

$$I_{k1}(kT + \tau) = -\frac{P}{\theta} \left[\left(e^{\theta T} + \frac{\theta q(\lambda, T)}{P} \frac{e^{2\theta T} - e^{(k+1)\theta T}}{1 - e^{\theta T}} \right) e^{-\theta(kT+\tau)} - 1 \right] \quad (17)$$

当 $t \in [(j-1)T, jT]$, $j = k+1, k+2, \dots, n-1$ 时, 由 $I_{n-1}(\lambda, T) = q(\lambda, T)$; $\frac{dI_j(t)}{dt} = -\theta I_j(t)$; $I_j(jT) = I_j(jT) + q(\lambda, T)$ 可得:

$$I_j(t) = q(\lambda, T)(e^{n\theta T} + \dots + e^{(j+1)\theta T})e^{-\theta t} \quad (18)$$

由式 (18) 可得:

$$S_{j-1}(\lambda, T) = \int_{jT}^{(j+1)T} I_j(t)dt = -\frac{q(\lambda, T)}{\theta} (1 - e^{(n-j+1)\theta T}) \quad (19)$$

当 $t \in [kT + \tau, (k+1)T]$ 时, 由 $I_{k2}((k+1)T) = I_{(k+1)}((k+1)T) + q(\lambda, T)$; $\frac{dI_{k2}(t)}{dt} = -\theta I_{k2}(t)$ 可得:

$$I_{k2}(t) = q(\lambda, T)(e^{n\theta T} + e^{(n-1)\theta T} + \dots + e^{(k+1)\theta T})e^{-\theta t} \quad (20)$$

由式 (20) 可得:

$$S_{k2}(\lambda, T) = \int_{(kT+\tau)}^{(k+1)T} I_{k2}(t)dt = \frac{q(\lambda, T)e^{\theta T}(1 - e^{(n-k-2)\theta T})}{\theta(1 - e^{\theta T})} (e^{-\theta \tau} - e^{-\theta T}) \quad (21)$$

$$I_{k2}(kT + \tau) = q(\lambda, T) \frac{e^{(k+1)\theta T} - e^{(n+1)\theta T}}{1 - e^{\theta T}} e^{-\theta(kT+\tau)} \quad (22)$$

因为 $I_{k1}(kT + \tau) = I_{k2}(kT + \tau)$, 所以令 (17) 等于 (22), 可得:

$$\tau(\lambda, T) = \frac{1}{\theta} \ln \left[1 + \frac{\theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{P(1 - e^{\theta T})} \right] - (k-1)T \quad (23)$$

由式 (12)、(14)、(16)、(19)、(21) 和 (23) 可得供应商处在一个生产间隔期内产品的库存量 S_v 为:

$$\begin{aligned} S_v(n, \lambda, T) &= \sum_{i=0}^{k-1} S_i(\lambda, T) + S_{k1}(\lambda, T) + S_{k2}(\lambda, T) + \sum_{i=k+1}^{n-1} S_i(\lambda, T) \\ &= \frac{1}{\theta^2} \left\{ P \ln \left[P + \theta q(\lambda, T) \frac{(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})} \right] - P \ln [P - \theta q(\lambda, T)] - n\theta q(\lambda, T) \right\} \quad (24) \end{aligned}$$

结论 1 令式 (24) 中 $\mu \rightarrow 0$, $\theta \rightarrow 0$, 则 $\frac{S_v}{nT} = \frac{P(n-Dn)-P+2D}{2P} nT$, 为文献 [11] 中一个供应商和一个订货商的 VMI 模型中, 供应商处在一个生产间隔期 nT 内的平均库存量。

结论 2 令文献 [14] 中 $T_i = T (i = 1, 2, \dots, n)$, 即, 供应商在一个生产间隔期内采用等批量供货方式给订货商供货, 则文中供应商处在一个生产间隔期 nT 内的平均库存量为 $\frac{1}{\theta^2 \sum_{i=1}^n T_i} \left\{ P \ln \left(\frac{D e^{\theta \sum_{i=1}^n T_i} - D}{P - D e^{\theta T} + D} \right) + 1 \right\} + nD - D \sum_{i=1}^n e^{\theta T_i} = \frac{1}{\theta^2 nT} \left\{ P \ln \frac{P-D(e^{\theta T}-e^{n\theta T})}{P-D(e^{\theta T}-1)} - nD(e^{\theta T}-1) \right\}$ 。

结论 3 令式 (24) 中 $\lambda \rightarrow 1$, 即订货商处不考虑缺货, 则供应商处在一个生产间隔期 nT 内的平均库存量为 $\frac{S_v}{nT} = \frac{1}{\theta^2 nT} \left\{ P \ln \frac{P-D(e^{\theta T}-e^{n\theta T})}{P-D(e^{\theta T}-1)} - nD(e^{\theta T}-1) \right\}$, 同结论 2 结果。

供应商处在一个生产间隔期内的产品的生产准备成本、存储成本和变质成本如下:

供应商处的产品的生产准备成本:

$$C_{Av} = A_v \quad (25)$$

供应商处的产品的存储成本:

$$C_{hv}(n, \lambda, T) = h_v S_v(n, \lambda, T) = \frac{h_v}{\theta^2} \left\{ P \ln \left[\frac{P}{P - \theta q(\lambda, T)} + \frac{\theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})(P - \theta q(\lambda, T))} \right] - n\theta q(\lambda, T) \right\} \quad (26)$$

供应商处的产品的变质成本:

$$C_{dv}(n, \lambda, T) = f_v \theta S_v(\lambda, T) = \frac{f_v}{\theta} \left\{ P \ln \left[\frac{P}{P - \theta q(\lambda, T)} + \frac{\theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})(P - \theta q(\lambda, T))} \right] - n\theta q(\lambda, T) \right\} \quad (27)$$

VMI 系统中供应商处原材料的库存水平变化如图 3 所示. 供应商处在一个原材料订购间隔期内的库存量为:

$$S_m(m, n, \lambda, T) = \frac{m^2 MP}{2} (kT + \tau(\lambda, T) - t_0(\lambda, T))^2 + \frac{m(m-1)MP}{2} (kT + \tau(\lambda, T) - t_0(\lambda, T))(nT - kT - \tau(\lambda, T) + t_0(\lambda, T)) \quad (28)$$

将式 (11) 和 (23) 带入式 (28) 可得:

$$S_m(m, n, \lambda, T) = \frac{m^2 MP}{2\theta^2} \left\{ \ln \left[\frac{P(1 - e^{\theta T}) + \theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})[P - \theta q(\lambda, T)]} \right] \right\}^2 + \frac{m(m-1)MP}{2\theta} \ln \left[\frac{P(1 - e^{\theta T}) + \theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})[P - \theta q(\lambda, T)]} \right] \left\{ nT - \frac{1}{\theta} \ln \left[\frac{P(1 - e^{\theta T}) + \theta q(\lambda, T)(e^{\theta T} - e^{n\theta T})}{(1 - e^{\theta T})[P - \theta q(\lambda, T)]} \right] \right\} \quad (29)$$

在一个原材料订购间隔期内, 供应商处的原材料订购成本和存储成本如下:

供应商处原材料的订购成本:

$$C_{Am} = A_m \quad (30)$$

供应商处原材料的存储成本:

$$C_{hm}(m, n, \lambda, T) = h_m S_m(m, n, \lambda, T) \quad (31)$$

由式 (25)、(26)、(27)、(30) 和 (31) 可得供应商处与原材料和产品相关的单位时间的总成本为:

$$ATV(m, n, \lambda, T) = \frac{C_{Av} + C_{hv}(n, \lambda, T) + C_{dv}(n, \lambda, T)}{nT} + \frac{C_{Am} + C_{hm}(m, n, \lambda, T)}{mnT} \quad (32)$$

由式 (9) 和 (32) 可得集成 VMI 系统单位时间的总成本为:

$$ATC(m, n, \lambda, T) = ATB(\lambda, T) + ATV(m, n, \lambda, T) \quad (33)$$

$$\text{s.t. } 1 \geq \lambda \geq 0; T \geq 0; m \geq 0; n \geq 0; \text{ 且 } m, n \text{ 为整数} \quad (34)$$

3 模型求解

考虑到目标函数为非线性混合整数规划问题, 且式 (33) 的函数性质复杂, 通过传统的优化方法难以求得其精确解, 需要运用能够处理复杂优化问题的亚启发式算法. 而与其他亚启发式算法相比, 遗传算法具有适应性强、全局优化、自适应性等特点^[18]. 基于此, 本文参考文献 [13、18-19] 的遗传算法设计原理给出了求解集成 VMI 系统最小单位时间总成本的步骤, 具体过程如下:

初始化参数 种群的染色体采用二进制编码. 初始化种群 m 、 n 、 λ 和 T 的种群规模 N 、交叉概率 pc 、变异概率 pm 、满意目标函数值 $bestv = +\infty$ 和最大进化代数 GT , 种群 m 和 n 的染色体长度分别为 mL 和 nL , 十进制取值区间分别为 $[m \min, m \max] = [0, 2^{mL} - 1]$ 和 $[n \min, n \max] = [0, 2^{nL} - 1]$, 通常订货商的一个销售间隔期 T 比较短会小于一年, 因此给定种群 T 的十进制取值区间同种群 λ 的十进制取值区间为 $[\lambda \min, \lambda \max] = [T \min, T \max] = [0, 1]$, 染色体长度为 λTL (λTL 的值越大, 解的精度会越高), 通过公式 $(pop \max - pop \min) \times y / (2^{popL} - 1) + pop \min$ (pop 表示种群, y 表示种群二进制对应的十进制) 可将种群 m 和 n 的二进制转变成精度为 1, 即整数的十进制值, 将种群 λ 和 T 的二进制转变成精度为 $1/(2^{\lambda TL} - 1)$ 的十进制值.

Step 1 利用计算机随机技术产生二进制编码初始种群 m 、 n 、 λ 和 T , 令 $k = 1$, 转入 Step 2.

Step 2 将初始种群 m 、 n 、 λ 和 T 执行 2.1-2.4 操作求解目标函数值种群 ATC , 转入 Step 3.

2.1 令 $i = 1$, 转入 2.2;

2.2 通过公式 $(pop \max - pop \min) \times y / (2^{popL} - 1) + pop \min$ 将初始种群 m 、 n 、 λ 和 T 中的第 i 个二进制个体 m_i 、 n_i 、 λ_i 和 T_i 解码为十进制的位于可行域内的个体 my_i 、 ny_i 、 λy_i 和 Ty_i , 转入 2.3;

2.3 由式 (33) 得目标函数值种群 ATC 中第 i 个体 $ATC_i = ATC(my_i, ny_i, \lambda y_i, Ty_i)$, 令 $i = i + 1$, 转入 2.4;

2.4 若 $i \leq N$, 转入 2.2; 否则, 终止操作得到目标函数值种群 ATC .

Step 3 执行 3.1–3.2 操作计算目标函数值个体的适应度并存储满意个体和目标函数值, 转入 Step 4.

3.1 通过式 $func(ATC_i) = 1/(ATC_i^2 + 0.001)$ (ATC_i 平方的形式 ATC_i^2 是为了增大各个个体适应度函数值之间的差异, 提高求解效率; 分母中“0.001”是根据经验设置的, 以考虑 $ATC_i = 0$ 时的情况) 得目标函数值个体 ATC_i 的适应度, 转入 3.2;

3.2 由式 $f_{\min} = \min(ATC)$ 选择 ATC 中最小目标函数值, 若 $f_{\min} \leq bestv$, 则令 $bestv = f_{\min}$, 同时将种群 m 、 n 、 λ 和 T 中对应的二进制个体分别赋值给 $mbestv$ 、 $nbestv$ 、 $\lambda bestv$ 和 $Tbestv$; 若 $f_{\min} > bestv$, 则 $mbestv$ 、 $nbestv$ 、 $\lambda bestv$ 、 $Tbestv$ 和 $bestv$ 的值不变.

Step 4 根据目标函数值个体的适应度, 采用轮盘赌的方法对初始种群 m 、 n 、 λ 和 T 分别执行 4.1–4.4 选择操作, 生成选择种群 mc 、 nc 、 λc 和 Tc , 转入 Step 5.

4.1 通过式 $p(ATC_i) = \sum_{j=1}^i func(ATC_j) / \sum_{i=1}^N func(ATC_i)$ 计算目标函数值个体适应度的累积概率, 转入 4.2;

4.2 令 $j = 1$, 转入 4.3;

4.3 利用计算机随机技术产生随机数 r , 若 $p(ATC_{i-1}) < r \leq p(ATC_i)$, 令 $popc_j = pop_i$ ($popc_j$ 为选择种群 $popc$ 中的第 j 个个体, pop_i 为初始种群 pop 中的第 i 个个体), 令 $j = j + 1$, 转入 4.4;

4.4 若 $j \leq N - 1$, 转入 4.3; 否则, 令 $popc_N = pop_{bestv}$, 得到选择种群 $popc$.

Step 5 对 Step 4 生成的选择种群 mc 、 nc 、 λc 和 Tc 分别执行 5.1–5.4 交叉操作, 生成交叉种群 ms 、 ns 、 λs 和 Ts , 转入 Step 6.

5.1 令 $i = 1$, 转入 5.2;

5.2 利用计算机随机技术产生位于 $[0, 1]$ 区间的随机数 r , 若 $r < pc$, 转入 5.3; 否则, 转入 5.4;

5.3 随机产生一个长度为 l ($1 \leq l \leq L - 1$) 的整数 (L 为染色体长度), 将选择种群中第 i 和 $i + 1$ 个染色体从第 l 位开始之后的所有基因进行互换后, 令 $pops_i = popc_i$ 和 $pops_{i+1} = popc_{i+1}$ ($pops_i$ 为交叉种群 $pops$ 中的第 i 个个体, $popc_i$ 为选择种群 $popc$ 中的第 i 个个体), 转入 5.4;

5.4 令 $i = i + 2$, 若 $i < N$, 转入 5.2; 否则, 令 $pops_N = pop_{bestv}$, 得到交叉种群 $pops$.

Step 6 对 Step 5 生成的交叉种群 ms 、 ns 、 λs 和 Ts 中前 $N - 1$ 个个体执行 6.1–6.3 变异操作 (该操作可使个体不同于父辈而具有自己独立的特征基因, 用于跳出局部极值), 生成变异种群 mm 、 nm 、 λm 和 Tm , 转入 Step 7.

6.1 利用计算机随机技术生成元素取值在 $[0, 1]$ 区间内的 N 行 L 列的数组 R ;

6.2 若 $R_{ij} < pm$, 则交叉种群 $pops$ 中基因 $pops_{ij}$ 变异 (若为 0 则变为 1, 若为 1 则变为 0), 否则, 不变;

6.3 对交叉种群 $pops$ 中的前 $N - 1$ 个个体的每个基因分别执行 6.1–6.2 操作, 第 N 个个体不发生变异, 令 $popm = pops$, 得到变异种群 $popm$.

Step 7 令 $k = k + 1$, 若 $k \leq GT$, 将变异种群 mm 、 nm 、 λm 和 Tm 分别赋值给初始种群 m 、 n 、 λ 和 T , 转入 Step 2; 否则, 输出满意个体 $mbestv$ 、 $nbestv$ 、 $\lambda bestv$ 、 $Tbestv$ 以及相应的满意目标函数值 $bestv$.

4 算例分析

设 VMI 系统有关参数如下: $D = 7500$ 件/年, $A_b = 50$ 元/次, $h_b = 15$ 元/(件·年), $f_b = 40$ 元/件, $s_b = 6$ 元/件, $l_b = 8$ 元/件, $\mu = 0.05$, $P = 10000$ 件/年, $A_m = 300$ 元/次, $h_m = 0.5$ 元/(件·年), $M = 1.2$, $A_v = 150$ 元/次, $h_v = 5$ 元/(件·年), $f_v = 25$ 元/件, $\theta = 0.15$.

运用 Matlab7.1 将上节的求解步骤编程, 初始化 $N = 60$ 、 $pc = 0.8$ 、 $pm = 0.05$ 、 $bestv = +\infty$ 、 $GT = 1000$ 、 $m_{\min} = n_{\min} = 0$ 、 $mL = nL = 6$ 、 $pop_{\max} = 2^{popL} - 1 \Rightarrow m_{\max} = n_{\max} = 63$ 和 $\lambda TL = 14$ (供货间隔期和订货商处的服务水平的精度取到 0.0001).

在 Intel Core2 CPU、内存 1G 计算机上运行程序, 达到最大进化代数 $GT = 1000$, 运行时间 9.497142s, 得到满意个体: $m^* = m_{bestv} = 3$, $n^* = n_{bestv} = 4$, $\lambda^* = \lambda_{bestv} = 0.6769$, $T^* = T_{bestv} = 0.0317$ 和相应的集成 VMI 系统最小单位时间总成本的满意解: $ATC^* = bestv = 8064.0313$. 即, 供应商采用一次采购的原材料用于 $m^* = 3$ 次生产, 一次生产的产品给订货商 $n^* = 4$ 次供货的策略, 可得到集成 VMI 系统最小单位时间总成本.

考虑本文的主要创新点, 同时结合研究的现实问题, 这里仅对生产准备成本、产品变质率和丢单系数三个输入参数作灵敏度分析, 以说明这些参数对优化结果的影响。

表 1 A_v 对优化结果的灵敏度分析						表 2 θ 对优化结果的灵敏度分析					表 3 μ 对优化结果的灵敏度分析						
A_v	m^*	n^*	λ^*	T^*	ATC^*	θ	m^*	n^*	λ^*	T^*	ATC^*	μ	m^*	n^*	λ^*	T^*	ATC^*
130	3	4	0.6979	0.0303	7822.3408	0.05	2	6	0.8498	0.0292	7290.3614	0.04	3	4	0.5703	0.0330	7842.2107
140	3	4	0.6843	0.0312	7984.6399	0.1	2	6	0.8024	0.0280	7706.8915	0.045	3	4	0.6206	0.0325	7960.8875
150	3	4	0.6769	0.0317	8064.0313	0.15	3	4	0.6769	0.0317	8064.0313	0.05	3	4	0.6769	0.0317	8064.0313
160	3	5	0.7480	0.0277	8137.5152	0.2	3	4	0.6443	0.0308	8385.8022	0.055	3	5	0.8288	0.0264	8126.4326
170	3	5	0.7421	0.0279	8209.4649	0.25	3	4	0.6144	0.0299	8688.5536	0.06	3	6	1	0.0225	8159.6414
180	2	6	0.7478	0.0280	8274.9099	0.3	3	4	0.5847	0.0292	8975.0740	0.065	3	6	1	0.0225	8159.6414

表 1 显示了生产准备成本 A_v 的变化对供应商生产决策以及 VMI 系统最小单位时间总成本的影响. 保持其他参数不变, A_v 以 10 个单位从 130 增加. 当 A_v 增加到 160 时, 供应商应保持采购原材料的策略不变, 增加一次生产的产品给订货商供货的次数; 当 A_v 增加到 180 时, 供应商应减少一次采购的原材料用于生产产品的次数, 同时进一步增加一次生产的产品给订货商供货的次数. 当 A_v 的增加不至于使供应商调整采购原材料和生产产品供货的策略时, 供应商只需向下微调订货商处的服务水平, 并向上微调给订货商的供货间隔期; 当 A_v 的增加使供应商需要调整生产产品供货的策略时, 其应同步明显提高订货商处的服务水平, 并明显缩短给订货商的供货间隔期; 当 A_v 的增加使供应商必须同时调整采购原材料和生产产品供货的策略时, 供应商应同步向上微调订货商处的服务水平和给订货商的供货间隔期; A_v 的增加一定会引起 VMI 系统最小单位时间总成本的增加.

表 2 显示了产品变质率 θ 的变化对供应商生产决策以及 VMI 系统最小单位时间总成本的影响. 保持其他参数不变, θ 以 0.05 个单位从 0.05 增加. 当 θ 增加到 0.15 时, 供应商应增加一次采购的原材料用于生产产品的次数, 同时减少一次生产的产品给订货商供货的次数. 当 θ 的增加不至于使其调整采购原材料和生产产品供货的策略时, 供应商只需向下调整订货商处的服务水平和微调给订货商的供货间隔期; 当 θ 的增加使供应商必须同时调整采购原材料和生产产品供货的策略时, 供应商应明显降低订货商处的服务水平, 同时明显提高给订货商的供货间隔期; θ 的增加一定会引起 VMI 系统最小单位时间总成本的增加.

表 3 显示了丢单系数 μ 的变化对供应商生产决策以及 VMI 系统最小单位时间总成本的影响. 保持其他参数不变, μ 以 0.005 个单位从 0.04 增加. 当 μ 增加到 0.055 或 0.06 时, 供应商应保持采购原材料的策略不变, 增加一次生产的产品给订货商供货的次数. 当 μ 的增加不至于使其调整生产产品的策略时, 供应商只需向上调整订货商处的服务水平和向下微调给订货商的供货间隔期; 当 μ 的增加使供应商必须调整生产产品供货的策略时, 供应商应明显提高订货商处的服务水平, 同时明显降低给订货商的供货间隔期; μ 的增加会引起 VMI 系统最小单位时间总成本的增加; 但当 $\mu \geq 0.06$ 时, 有 $\lambda^* = 1$, 即订货商不再缺货, 此时随着 μ 的增加供应商的生产决策以及 VMI 系统最小单位时间总成本不再发生变化.

5 结论

建立适用复杂的经济和管理背景的库存控制模型, 对实际问题进行优化决策, 以降低系统的总成本一直是库存管理长期追求的目标. 基于此, 本文研究了不考虑原材料变质而产品变质且订货商处缺货部分需补的集成 VMI 系统的生产决策问题, 给出了供应商采购原材料和生产产品均采用整数比策略的模型, 通过设计的遗传算法求解步骤得到了供应商一次采购的原材料用于生产产品的次数、一次生产的产品给订货商供货的次数、订货商处的服务水平以及供货间隔期等决策变量的值. 通过算例分析我们可得到以下几点结论:

- 1) 供应商采用整数比策略采购原材料和生产产品可得到 VMI 系统最小单位时间总成本的满意解;
- 2) VMI 系统参数 (生产准备成本、产品变质率、丢单系数等) 各自的变化对供应商生产决策有不同的影响. 随着生产准备成本的增加, 供应商应采用减少一次采购的原材料用于生产产品的次数, 增加一次生产的产品给订货商供货的次数的策略; 而随着产品变质率的增加, 供应商应采用相反的策略; 随着丢单系数的增加, 供应商应采用保持一次采购的原材料用于生产产品的次数不变, 并增加一次生产的产品给订货商供货的次数的策略;
- 3) 以上三个参数的增加均会使 VMI 系统最小单位时间总成本增加, 因此降低生产准备成本、产品变质

率和丢单系数是降低 VMI 系统总成本的可行方法.

参考文献

- [1] De Toni A, Zamolo E. From a traditional replenishment system to vendor-managed inventory: A case study from the household electrical appliances sector[J]. *International Journal of Production Economics*, 2005, 96(1): 63–79.
- [2] Cetinkaya S, Lee C Y. Stock replenishment and shipment scheduling for vendor-managed inventory systems[J]. *Management Science*, 2000, 46(2): 217–232.
- [3] 刘丽文, 袁佳瑞. VMI 环境下的库存与发货模型研究 [J]. *中国管理科学*, 2003, 11(5): 31–36.
Liu L W, Yuan J R. Inventory and dispatch models in VMI systems[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2003, 11(5): 31–36.
- [4] Darwish M A, Odah O M. Vendor managed inventory model for single-vendor multi-retailer supply chains[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 204(3): 473–484.
- [5] Woo Y Y, Hsu S L, Wu S S. An integrated inventory model for a single vendor and multiple buyers with ordering cost reduction[J]. *International Journal of Production Economics*, 2001, 73(3): 203–215.
- [6] 余玉刚, 梁樑, 徐克安, 等. 考虑产品定价、生产能力和原料采购的 VMI 系统集成 [J]. *中国科学技术大学学报*, 2006, 36(7): 781–787.
Yu Y G, Liang L, Xu K A, et al. VMI Integration considering pricing, production capacity and raw material procurement[J]. *Journal of University of Science and Technology of China*, 2006, 36(7): 781–787.
- [7] Yu Y G, Huang G Q, Liang L. Stackelberg game-theoretic model for optimizing advertising, pricing and inventory policies in vendor managed inventory (VMI) production supply chains[J]. *Computers & Industrial Engineering*, 2009, 57(1): 368–382.
- [8] Siajaji H, Ibrahim R N, Lochert P B. Joint economic lot size in distribution system with multiple shipment policy[J]. *International Journal of Production Economics*, 2006, 102(2): 302–316.
- [9] Zavanella L, Zanoni S. A one-vendor multi-buyer integrated production-inventory model: The ‘Consignment Stock’ case[J]. *International Journal of Production Economics*, 2009, 118(1): 225–232.
- [10] Lee W. A joint economic lot size model for raw material ordering, manufacturing setup, and finished goods delivering[J]. *Omega*, 2005, 33(2): 163–174.
- [11] Zhang T L, Liang L, Yu Y G, et al. An integrated vendor-managed inventory model for a two-echelon system with order cost reduction[J]. *International Journal of Production Economics*, 2007, 109(1–2): 241–253.
- [12] 杜少甫, 梁樑, 张靖江, 等. 考虑产品变质的 VMI 混合补货发货策略及优化仿真 [J]. *中国管理科学*, 2007, 15(2): 64–69.
Du S F, Liang L, Zhang J J, et al. Hybrid replenishment and dispatching policy with deteriorating item for VMI: Analytical model, optimization and simulation[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2007, 15(2): 64–69.
- [13] Lan H J, Li R X, Liu Z G, et al. Study on the inventory control of deteriorating items under VMI model based on bi-level programming[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, 38(8): 9287–9295.
- [14] Zhou Y W, Wang S D. Optimal production and shipment models for a single-vendor-single-buyer integrated system[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 180(1): 309–328.
- [15] 王圣东, 周永务, 甘犬财, 等. 易变质产品生产者和销售商库存协调模型 [J]. *系统工程学报*, 2010, 25(2): 251–257.
Wang S D, Zhou Y W, Gan Q C, et al. Inventory coordination model with single-manufacturer and single-buyer for a deteriorating item[J]. *Journal of Systems Engineering*, 2010, 25(2): 251–257.
- [16] 余玉刚, 梁樑, 王晨, 等. 一种考虑最终产品变质的供应商管理库存集成模型 [J]. *中国管理科学*, 2004, 12(2): 32–37.
Yu Y G, Liang L, Wang C, et al. An integrated vendor-managed-inventory model for deteriorating item[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2004, 12(2): 32–37.
- [17] 罗兵, 黄波, 卢娜, 等. 一种线形时变需求且短缺量部分拖后的 VMI 模型 [J]. *系统工程理论与实践*, 2006, 26(5): 36–41.
Luo B, Huang B, Lu N, et al. A vendor-managed inventory model with linear time varying demand and partial backlogging[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2006, 26(5): 36–41.
- [18] 金菊良, 杨晓华, 丁晶. 标准遗传算法的改进方案 - 加速遗传算法 [J]. *系统工程理论与实践*, 2001, 21(4): 8–13.
Jin J L, Yang X H, Ding J. An improved simple genetic algorithm—accelerating genetic algorithm[J]. *Systems Engineering — Theory & Practice*, 2001, 21(4): 8–13.
- [19] Nachiappan S P, Jawahar N. A genetic algorithm for optimal operating parameters of VMI system in a two-echelon supply chain[J]. *European Journal of Operational Research*, 2007, 182(3): 1433–1452.