

不确定环境下分散控制供应链物流计划优化^①

邵举平^{1,2}, 徐向艺², 孟祥华¹, 董绍华³, 杨瑞成⁴

(1. 鲁东大学商学院, 烟台 264025; 2. 山东大学管理学院, 济南 280100;

3. 北京科技大学物流工程系, 北京 100083; 4. 鲁东大学数学与信息学院, 烟台 264025)

摘要: 供应链物流计划是供应链管理的重要内容. 针对节点无限扩展的分散控制供应链物流计划问题, 在提出供应链元概念的基础上, 考虑供应链节点企业上下游物料价格要素的随机性, 应用随机机会约束规划理论, 建立了多级多节点多产品分散控制供应链一体化物流计划模型; 设计了基于随机模拟的混合智能算法求解模型; 并以算例仿真验证了模型和算法的有效性, 同时确定了算法参数合理的取值范围; 最后通过仿真对模型参数进行了灵敏度分析.

关键词: 分散控制供应链; 一体化物流计划; 随机机会约束规划; 模型与算法; 灵敏度分析; 仿真

中图分类号: F273 文献标识码: A 文章编号: 1007-9807(2011)12-0038-12

0 引言

分散控制供应链物流计划优化是研究在诸多约束条件下, 如何合理安排供应链中各节点企业原材料或产成品的采购量、生产批量、库存量及运输量, 以使计划期内分散控制供应链运作最优化的一类供应链计划问题. 在企业实际运营环境中, 对分散控制供应链中的任何一个企业而言, 其生产所需原材料的采购价格及其产品的销售价格常常同时表现出不确定性, 供应链物流计划决策要充分考虑这些参数的不确定性.

到目前为止, 有关供应链计划问题的研究大多都是在确定环境下进行的, 如文献 [1-6]. 对于不确定环境下的供应链计划问题, Hsu 等^[7] 在产成品价格、组件成本与提前期紧密相关的情况下, 考虑 ATO (assemble-to-order) 制造环境以及需求的随机性, 建立了基于实际问题的供应链合同

制造商最优库存计划模型, 并对模型参数进行了灵敏度分析; Pedro 等^[8] 综合考虑需求、生产及供应参数的模糊性, 建立了供应链采购-生产-分销计划模糊线性规划模型, 并用实际案例验证模型; Gupta 和 Maranas^[9] 考虑客户需求的不确定性, 建立了供应链生产-分销计划二级随机规划模型, 并利用优化软件 GAMS 求解模型; Cheung 和 Powell^[10] 考虑随机需求条件, 建立了静态多工厂、多仓库分销计划二级随机规划模型, 给出了求解模型的近似算法并利用实际算例验证其有效性; Escudero 等^[11] 研究了随机条件下供应链制造-组装-分销计划问题, 建立了具有补偿问题的二级随机规划模型, 但没有设计算法; Pedro 等^[12] 对不确定环境下供应链计划量化方法做了很好的综述; 姚建明和周国华^[13] 建立了随机需求与随机资源约束的多目标动态优化数学模型来反映大规模定制模式下供应链生产计划调度规律,

① 收稿日期: 2010-01-13; 修订日期: 2011-05-24.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (70771018); 山东省自然科学基金资助项目 (Y2008H08); 2009 年山东省高等学校优秀骨干教师国际合作培养资助项目; 山东省高等学校科技计划资助项目 (J09LA17); 山东省软科学研究计划资助项目 (2009RKB318); 山东省中青年科学家奖励基金资助项目 (2008BS014); 山东大学博士后科研经费资助项目.

作者简介: 邵举平 (1971-), 男, 甘肃庄浪人, 博士, 副教授, E-mail: wlusthshao@163.com.

并做了实践应用过程的验证与说明; 卢震和黄小原^[14]研究了不确定交货条件下供应链协调的 Stackelberg 主从对策, 并以实际问题为背景采用遗传算法进行了仿真计算; 周金宏等^[15]考虑需求、单位生产成本及生产能力为模糊参数, 建立了分布式多工厂供应链批量生产计划模型, 并采用遗传算法求解模型; 蔡政英等^[16]分析了循环供应链中存在的 uncertainty, 建立了模糊自适应循环供应链生产计划调度模型, 并对模型的应用进行了讨论和仿真验证; 李燕风等^[17]研究了包含模糊需求、随机生产能力及模糊随机需求的生产 - 分销二级跨国供应链计划问题, 给出了求解算法。

综上所述, 供应链计划问题的研究在一些领域内取得了比较丰富的成果, 但是在复杂供应链环境下, 考虑诸多参数的不确定性以及计划的多周期性, 从供应链物流系统的角度来研究供应链一体化物流计划的工作, 则尚待加强。具体而言:

- 1) 在供应链计划的研究领域上, 学者们对供应链生产计划的研究关注较多, 而对多级多节点多产品供应链一体化物流计划的研究, 则尚未有学者涉足。
- 2) 在供应链计划的研究视角上, 学者们对确定环境下供应链计划的研究关注较多, 而对考虑诸多参数不确定环境下的多级多节点多产品供应链一体化物流计划的研究, 则尚未有学者涉足。

本文以所提供供应链元概念为基础, 考虑供应链节点企业上下游物料价格要素的随机性, 建立了多级多节点多产品分散控制供应链一体化物流计划随机机会约束规划模型, 设计了求解模型的混合智能算法, 并以数值算例进行了仿真验证与分析。

1 问题描述与建模

1.1 问题描述

不确定环境下节点无限扩展的分散控制供应链一体化物流计划问题是个多级多节点多产品受约束的批量计划问题, 计划期内需综合考虑各节点企业原材料的采购量及运输量、产品的生产批量和库存量, 以使供应链整体利润最大化。考虑到节点企业上下游物料价格的随机性以及概率意义下如何使供应链整体收益达到最优, 需应用随

机机会约束规划把问题的模型转化为机会约束下的随机规划模型, 以表达在一定置信水平下的供应链利润最优化。

图 1 所示为节点无限扩展的分散控制供应链。为方便研究, 图中以网络某一节点为核心企业且计划期内具有供需关系的所有节点所组成的网络, 称为整个供应链中的一个供应链元。

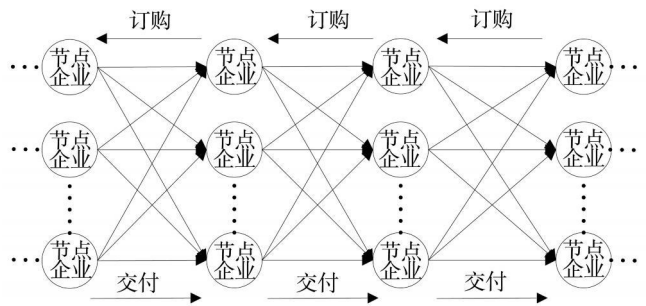


图 1 多级多节点多产品分散控制供应链

Fig. 1 Multi-stages, multi-nodes and multiple products decentralized supply chain

图 2 中实线部分就是图 1 供应链中的一个供应链元。首先建立图 2 中供应链元核心企业 j (可简称为 j) 的一体化物流计划模型 (简称为供应链元物流计划模型), 然后对计划期内不同供应链元计划模型进行组合, 即可得到整个供应链一体化物流计划模型。对 j 的一体化物流计划, 在不考虑其内部工艺流程的前提下是一个单级多产品受约束的批量计划问题, 计划期要综合考虑 j 的原材料采购量及运输量、产品生产批量和库存量, 以使供应链元核心企业 j 利润最大化。

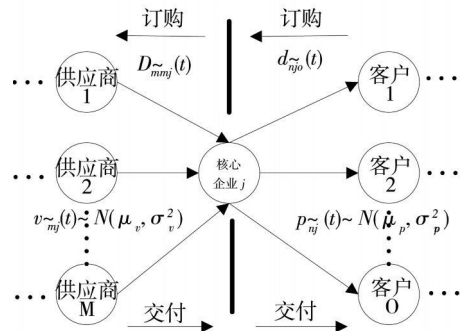


图 2 分散控制供应链中的供应链元

Fig. 2 The supply chain cell in the decentralized supply chain

1.2 建模

1.2.1 模型假设

为建立问题的数学模型, 作以下假设。

1) 对 j 而言, 生产所需原材料的市场采购价格独立并服从正态分布; 产品的市场销售价格独立并服从正态分布;

2) 供应链各节点企业的生产、库存及运输能力有限;

3) 计划期内供应链各节点企业间的供需可完全满足, 且供应等于需求;

4) 供应链各节点企业的初始库存都为零;

5) 不考虑供应链中的各种惩罚费用;

6) 不管提前期是否固定, 供应链中各种物料在计划期各阶段都能按要求准时到位;

7) 运输费用由买方承担

1.2.2 集合和参数

$\tilde{N}(j)$: j 生产的产品种类集合;

$\tilde{M}(m)$: j 的供应商 m 所提供的原材料种类集合;

J : 组成整个供应链的供应链元总数;

M : j 上游节点企业集合;

O : j 下游节点企业集合;

t : 计划期时间序列 ($t = 1, 2, \dots, T$);

$b_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期 j 对产品 \tilde{n} 的最大生产能力;

$q_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期 j 对产品 \tilde{n} 的最大库存能力;

$e_{\tilde{m}mj}(t)$: t 时期 j 对上游企业 m 的原材料 \tilde{m} 的最大运输能力;

$S_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期 j 生产产品 \tilde{n} 的生产准备费用;

$P_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期单位产品 \tilde{n} 在 j 的可变生产成本;

$I_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期单位产品 \tilde{n} 在 j 的库存成本;

$C_{\tilde{m}jm}(t)$: t 时期单位原材料 \tilde{m} 从上游企业 m 到 j 的运输成本, 该参数根据所选运输方式的不同会有所变化, 本文假定它是各种运输方式下单位原材料的平均运输成本;

$D_{\tilde{n}mj}(t)$: t 时期 j 向上游企业 m 要求的原材料 \tilde{m} 的数量;

$\tilde{D}_{\tilde{m}jm}(t)$: t 时期上游企业 m 承诺向 j 提供的原材料 \tilde{m} 的数量;

$d_{\tilde{n}jo}(t)$: t 时期下游企业 o 向 j 要求的产品 \tilde{n} 的数量;

$\tilde{d}_{\tilde{n}oj}(t)$: t 时期 j 承诺向下游企业 o 提供的产品 \tilde{n} 的数量;

$\Theta_{\tilde{n}\tilde{m}}$: 单位产品 \tilde{n} 和原材料 \tilde{m} 之间的产品结构系数;

$p_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期 j 对产品 \tilde{n} 的售价, 是一个连续随机变量并服从 $p_{\tilde{n}j}(t) \sim N(\mu_p, \sigma_p^2)$;

$v_{\tilde{m}j}(t)$: t 时期 j 购买原材料 \tilde{m} 的价格, 是一个连续随机变量并服从 $v_{\tilde{m}j}(t) \sim N(\mu_v, \sigma_v^2)$.

1.2.3 决策变量

$$u_{\tilde{n}j}(t) = \begin{cases} 1, & t \text{ 时期 } j \text{ 生产产品 } \tilde{n}; \\ 0, & \text{否则} \end{cases}$$

$x_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期产品 \tilde{n} 在 j 的生产批量;

$y_{\tilde{n}j}(t)$: t 时期末产品 \tilde{n} 在 j 的库存量;

$Z_{\tilde{m}mj}(t)$: t 时期原材料 \tilde{m} 从上游企业 m 到 j 的运输批量.

1.2.4 供应链元物流计划模型

依据问题描述、假设及各参数的定义, 建立供应链元物流计划模型为

$$f_j = \max \left\{ \sum_{t=1}^T \sum_{\tilde{n} \in \tilde{N}(j), o \in O, j \in J} \tilde{d}_{\tilde{n}oj}(t) p_{\tilde{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\tilde{n} \in \tilde{N}(j), j \in J} [x_{\tilde{n}j}(t) P_{\tilde{n}j}(t) + S_{\tilde{n}j}(t)] u_{\tilde{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\tilde{n} \in \tilde{N}(j), j \in J} I_{\tilde{n}j}(t) y_{\tilde{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\tilde{m} \in \tilde{M}(m), m \in M, j \in J} \tilde{D}_{\tilde{m}jm}(t) v_{\tilde{m}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\tilde{m} \in \tilde{M}(m), m \in M, j \in J} Z_{\tilde{m}mj}(t) C_{\tilde{m}jm}(t) \right\} \quad (1)$$

$$\text{s. t. } y_{\tilde{n}j}(t-1) + x_{\tilde{n}j}(t) - y_{\tilde{n}j}(t) = \sum_{o \in O} \tilde{d}_{\tilde{n}oj}(t) \quad (2)$$

$$\tilde{d}_{\tilde{n}oj}(t) = d_{\tilde{n}jo}(t) \quad (3)$$

$$\tilde{D}_{\tilde{m}jm}(t) = D_{\tilde{m}mj}(t) = Z_{\tilde{m}mj}(t) \quad (4)$$

$$x_{\bar{n}j}(t) \leq b_{\bar{n}j}(t) \tag{5}$$

$$y_{\bar{n}j}(t) \leq q_{\bar{n}j}(t) \tag{6}$$

$$Z_{\bar{m}mj}(t) \leq e_{\bar{m}mj}(t) \tag{7}$$

$$\partial_{\bar{n}\bar{m}} x_{\bar{n}j}(t) = \sum_{m \in M} \tilde{D}_{\bar{m}jm}(t) \tag{8}$$

$$D_{\bar{m}mj}(t) = 0, \text{ 且当 } j \text{ 上游没有供应商时} \tag{9}$$

$$d_{\bar{n}jo}(t) = 0, \text{ 且当 } j \text{ 下游没有客户时} \tag{10}$$

$$x_{\bar{n}j}(t), y_{\bar{n}j}(t), Z_{\bar{m}mj}(t) \geq 0, u_{\bar{n}j}(t) \in \{0, 1\} \tag{11}$$

$$\bar{n} \in \bar{N}(j), \bar{m} \in \bar{M}(m), m \in M, o \in O, j = 1, 2, \dots, J, t = 1, 2, \dots, T$$

上述: 式 (1) 中括号内各项依次表示计划期 T 内 j 的所有产品销售毛收入之和、所有产品可变生产成本总和、所有产品库存成本总和、所有原材料成本总和及所有原材料运输成本总和; 式 (2) 表示 t 期 j 产品 \bar{n} 的生产量加上 $(t-1)$ 期末库存量,

$$\max F = \sum_{j=1}^J f_j = \sum_{j=1}^J \left\{ \max \left[\sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), o \in O, j \in J} \tilde{d}_{\bar{n}og}(t) p_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), j \in J} [x_{\bar{n}j}(t) P_{\bar{n}j}(t) + S_{\bar{n}j}(t)] u_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), j \in J} I_{\bar{n}j}(t) y_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M, j \in J} \tilde{D}_{\bar{m}jm}(t) y_{\bar{m}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M, j \in J} Z_{\bar{m}mj}(t) C_{\bar{m}jm}(t) \right] \right\} \tag{12}$$

$$\text{s.t. } \sum_{j=1}^J \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M} \tilde{D}_{\bar{m}jm}(t) = \sum_{j=1}^J \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M} D_{\bar{m}mj}(t) \tag{13}$$

$$\sum_{j=1}^J \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), o \in O} d_{\bar{n}jo}(t) = \sum_{j=1}^J \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), o \in O} \tilde{d}_{\bar{n}oj}(t) \tag{14}$$

上述: 式 (12) 表示 T 内 J 个供应链元核心企业利润之和最大化; 式 (13) 表示 t 期上游企业的原材料供应量要与 J 个供应链元核心企业的需求

$$\max \bar{F} \tag{15}$$

$$\text{s.t. } \Pr \left\{ \sum_{j=1}^J \left[\max \left[\sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), o \in O, j \in J} \tilde{d}_{\bar{n}og}(t) p_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), j \in J} [x_{\bar{n}j}(t) P_{\bar{n}j}(t) + S_{\bar{n}j}(t)] u_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{n} \in \bar{N}(j), j \in J} I_{\bar{n}j}(t) y_{\bar{n}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M, j \in J} \tilde{D}_{\bar{m}jm}(t) y_{\bar{m}j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{\bar{m} \in \bar{M}(m), \lambda m \in M, j \in J} Z_{\bar{m}mj}(t) C_{\bar{m}jm}(t) \right] \right] \geq \bar{F} \right\} \geq \beta$$

再减去 t 期末库存量, 与向下游所有对该产品有需求的企业承诺提供的总量相等; 式 (3) 表示 t 期 j 承诺供应下游企业 o 产品 \bar{n} 数量与要求量相等; 式 (4) 表示 t 期 j 向上游企业 m 要求的原材料 \bar{m} 数量与 m 承诺向其提供的 \bar{m} 的数量以及 \bar{m} 的运输量相等; 式 (5) 表示 t 期 j 产品 \bar{n} 的生产能力约束; 式 (6) 表示 t 期 j 产品 \bar{n} 的库存能力约束; 式 (7) 表示 t 期 j 对 m 的原材料 \bar{m} 的运输能力约束; 式 (8) 表示 t 期 j 产品 \bar{n} 与对所有上游相关企业原材料 \bar{m} 需求之间的数量对应关系; 式 (9) 表示供应链上游始端条件; 式 (10) 表示供应链下游末端条件; 式 (11) 为决策变量非负和 0-1 条件。

1.2.5 整个供应链物流计划模型

根据 j 的模型, 对 J 个不同的供应链元模型进行组合, 即可得 T 内整个供应链一体化物流计划模型, 而约束除 j 的模型中所有约束外, 增加了整个供应链物流平衡约束, 即

量平衡; 式 (14) 表示 t 期 J 个供应链元核心企业产品供应量要与下游企业的需求量平衡。

1.3 模型转化

由于 1.2.5 节的模型包含有随机变量, 这使得 \max 和约束条件不具有完整的数学意义, 因此需要对其进行转化. 考虑到实际决策环境的可靠性和参数的不确定性, 将其转化为随机机会约束规划^[18]模型, 为

式(2) - 式(11), 式(13) 和(14)

$$\tilde{n} \in \tilde{N}(j), \tilde{m} \in \tilde{M}(m), m \in M, o \in O, j =$$

1, 2, ..., J, t = 1, 2, ..., T

模型中 \bar{F} 是目标函数 $F(X, p_{n_j}, v_{m_j})$ 在置信水平 β 下的乐观值, 即

$$\bar{F} = \sup \{F \mid \Pr \{F(X, p_{n_j}, v_{m_j}) \geq F\} \geq \beta\} \tag{16}$$

式中: β 是事先给定的置信水平, $0 < \beta < 1$; X 表示模型中所有决策向量; p_{n_j} 和 v_{m_j} 是模型中的随机变量, 其他和原模型相同.

转化后的模型是复杂随机线性混合整数凸规划^[18] 问题, 凸规划的任何局部最优解都是全局最优解. 根据文献[1], 模型又是强 NP-hard 问题. 对于该模型本文采用基于随机模拟的混合智能算法来求解.

$$U : (X) \rightarrow \Pr \left\{ \sum_{j=1}^J \left[\max \left[\sum_{t=1}^T \sum_{n \in N(j), o \in O, j \in J} \tilde{d}_{noj}(t) p_{n_j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{n \in N(j), j \in J} [x_{n_j}(t) P_{n_j}(t) + S_{n_j}(t)] u_{n_j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{n \in N(j), j \in J} I_{n_j}(t) y_{n_j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{m \in M(m), m \in M(j) \in J} \tilde{D}_{mjm}(t) v_{m_j}(t) - \sum_{t=1}^T \sum_{m \in M(m), m \in M(j) \in J} Z_{mjm}(t) C_{mjm}(t) \right] \right] \geq \bar{F} \right\} \geq \beta \tag{17}$$

利用随机模拟在随机变量 p_{n_j} 和 v_{m_j} 的所有可能取值范围内寻求最优解. 易知 $\max \bar{F}$ 应在式(17) 等号成立处达到, 即

$$\Pr \{F(X, p_{n_j}, v_{m_j}) \geq \bar{F}\} = \beta \tag{18}$$

首先根据 p_{n_j} 和 v_{m_j} 各自的概率测度从其各自的样本空间 Ω_1 和 Ω_2 中产生样本 ω_{1i} 和 $\omega_{2i}, i = 1, 2, \dots, N$, 记 $p_{n_j(i)} = p_{n_j}(\omega_{1i}), v_{m_j(i)} = v_{m_j}(\omega_{2i})$. 这等于根据 p_{n_j} 和 v_{m_j} 各自的概率分布产生随机变量观察值 $p_{n_j(i)}$ 和 $v_{m_j(i)}$. 为了求 $\Pr \{F(X, p_{n_j}, v_{m_j}) \geq \bar{F}\} \geq \beta$ 的最大 \bar{F} , 定义

$$h(p_{n_j(i)}, v_{m_j(i)}) = \begin{cases} 1, & \text{若 } F(X, p_{n_j(i)}, v_{m_j(i)}) \geq \bar{F} \\ 0, & \text{其它} \end{cases} \tag{19}$$

由强大数定律, 当 $N \rightarrow \infty$ 时, 有

$$\frac{\sum_{i=1}^N h(p_{n_j(i)}, v_{m_j(i)})}{N} \rightarrow \beta \text{ a. s.} \tag{20}$$

2 算法设计

2.1 模型计算说明

由于组成供应链的节点企业无限扩展, 所以模型求解时采取了按需分层计算的方式: 1) 首先要确定计划期 T 内的供应链结构; 2) 其次要确定 T 内供应链中的所有供应链元, 所有供应链元核心企业构成 T 内的计算层; 3) 用混合智能算法求计算层各核心企业决策变量的最优解和总利润. 需要说明: 若需计算整个供应链的总利润, 则只需遍历供应链中的每一个节点企业, 按上述方法划分出全部的计算层, 然后求出每一计算层的总利润, 再采取所有计算层叠加的策略即可得到整个供应链的总利润.

2.2 随机模拟

模型中的不确定函数

注意到 $\sum_{i=1}^N h(p_{n_j(i)}, v_{m_j(i)})$ 正是使得 $F(X, p_{n_j(i)}, v_{m_j(i)}) \geq \bar{F}$ 成立的 $p_{n_j(i)}$ 和 $v_{m_j(i)}$ 的数目, 因此 \bar{F} 应该处于序列 $\{\max F_1, \max F_2, \dots, \max F_N\}$ 中的第 N' 个最大的元素位置. 总结如下.

- 1) 根据随机变量 p_{n_j} 和 v_{m_j} 各自的概率分布函数从它们各自的样本空间 Ω_1 和 Ω_2 中产生样本 ω_{1i} 和 $\omega_{2i}, i = 1, 2, \dots, N$;
- 2) 置 $F_i = \max F(X, p_{n_j}(\omega_{1i}), v_{m_j}(\omega_{2i}))$;
- 3) 置 N' 为 βN 的整数部分;
- 4) 返回序列 $\{\max F_1, \max F_2, \dots, \max F_N\}$ 中第 N' 个最大的元素.

2.3 混合智能算法流程

- 步骤 1 确定并输入种群规模 pop_size 、交叉概率 p_c 、变异概率 P_m 和终止代数 \max_gen ;
- 步骤 2 初始化产生 pop_size 个染色体, 并用 2.2 节随机模拟检验初始染色体的可行性;
- 步骤 3 对染色体进行交叉和变异运算, 并

用 2.2 节随机模拟检验后代的可行性;

步骤 4 通过 2.2 节随机模拟计算每一条染色体目标函数值;

步骤 5 根据目标值计算每个染色体的适应度;

步骤 6 通过比例选择的方法选择染色体;

步骤 7 重复步骤 3 ~ 步骤 6 直到完成给定的循环次数;

步骤 8 给出最好的染色体作为最优解。

2.3.1 编码方案

采用混合编码策略: 0-1 变量采用二进制编码, 其他决策变量采用实数编码。

2.3.2 初始种群确定

1) 根据模型约束, 给出包含最优解的初始区域, 该区域能够满足式 (2) - 式 (11), 式 (13) 和式 (14);

2) 用计算机随机数产生技术在该区域产生随机变量 $\xi_{n-j}(t)$, $\xi_{n-j}(t)$, $\xi_{u_{n-j}}(t)$, $\xi_{m_{mj}}(t)$, 其中每一个 $\xi_{n-j}(t)$ 服从分布 $U(0, b_{n-j}(t))$, 每一个 $\xi_{u_{n-j}}(t)$ 服从 $U(0, q_{n-j}(t))$, 每一个 $\xi_{m_{mj}}(t)$ 服从 $U(0, e_{m_{mj}}(t))$, 每一个 $\xi_{u_{n-j}}(t)$ 服从 0-1 分布;

3) 用 2.2 节随机模拟检验产生的初始染色体是否满足模型约束, 如满足, 则转 4), 否则, 则返回 2);

4) 重复 2) - 3) 共 pop_size 次, 即可得到初始种群。

2.3.3 染色体适应度函数

采用基于序的适应度函数。将种群中 pop_size 个染色体按目标函数值由大到小排列, 即染色体按照由好到差排列, 设参数 $\alpha \in (0, 1)$ 给定, 定义基于序的适应度函数 $fit(V_i) = \alpha(1 - \alpha)^{i-1}$, $i = 1, 2, \dots, pop_size$ 。 $i = 1$ 说明染色体是最好的, $i = pop_size$ 是最差的。因为适应度最大的染色体不一定出现在最后一代中, 所以在迭代一开始的计算中必须把最好的染色体保留下来, 记为 V_o , 如果新的种群中又发现了更好的染色体 V_o , 则用它代替原来的染色体 V_o , 在进化完成之后, 这个染色体就可作为优化问题的解。

2.3.4 选择运算

用正比于个体适应度的概率来选择相应的个体, 选择概率为

$$p_i = \frac{fit(V_i)}{\sum_{i=1}^{pop_size} fit(V_i)} \quad (21)$$

同时为保证算法的收敛性, 采用最优保存策略, 即把第 n 代种群中适应度值最差个体用上代最优个体替代。

2.3.5 交叉运算

1) 首先根据交叉概率确定每次种群中进行交叉操作的染色体数目: $P_c \cdot pop_size$;

2) 在 $[0, 1]$ 中产生随机数 r , 如果 $r < P_c$, 则选择 V_i 作为一个父代。从 $i = 1$ 到 pop_size 重复该过程, 即可得到进行交叉运算的父代 V_1', V_2', V_3', \dots ;

3) 对按 2) 产生的父代 V_1', V_2', V_3', \dots 两两配对, 并在开区间 $(0, 1)$ 中产生随机数 λ 对每一对父代 (V_i', V_j') 按下式进行交叉操作, 产生两个后代 X 和 Y

$$\begin{aligned} X &= \lambda V_i' + (1 - \lambda) V_j' \\ Y &= (1 - \lambda) V_i' + \lambda V_j' \end{aligned} \quad (22)$$

4) 用 2.2 节随机模拟检验后代染色体是否满足模型约束;

5) 重复 3) - 4), 直到完成对所有父代 (V_i', V_j') 的交叉操作, 并且所有后代 X 和 Y 均可行为止。

2.3.6 变异运算

1) 首先根据变异概率确定每次种群中进行变异操作的染色体数目: $P_m \cdot pop_size$;

2) 在 $[0, 1]$ 中产生随机数 ζ 如果 $\zeta < P_m$, 则选择 V_i 作为一个变异的父代。从 $i = 1$ 到 pop_size 重复该过程, 则可得进行变异运算的父代, 对每一个被选择的父代, 用 $V = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 表示;

3) 对按 2) 产生的父代 $V = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 进行变异操作: 定义足够大的数 M 并在空间 R^n 中随机产生一个变异方向 d , 生成后代 $X = V + M \cdot d$;

4) 用 2.2 节随机模拟检验后代染色体是否满足模型约束。如满足, 则用 $X = V + M \cdot d$ 代替原来的染色体 V ; 否则, 则置 M 为 0 到 M 之间的随机数, 然后重复 3), 这样又得到了一个新的染色体,

再检验其可行性. 重复该过程直到所有染色体均可行为止, 转5);

5) 重复3) - 4) 共 pop_size 次;

6) 计算目标值, 并选取最大的指定为 V_0 .

2.3.7 终止条件

如果 $t < \max_gen$, 则继续执行混合智能算法步骤3) ~ 步骤7), 如果 $t = \max_gen$, 则算法终止.

3 算例仿真及模型参数灵敏度分析

3.1 算例设计

图3是某3级分散控制供应链, 供应链中有3个供应链元, 见图4. 对于供应链元1: 上游企业1供应原材料1和2, 上游企业3供应原材料3, 核心企业1生产产品1和2, BOM关系为1:1; 对于供应链元2: 上游企业1供应原材料1和2, 上游企业2供应原材料2和4, 核心企业2生产产品4和5, BOM关系为1:1; 对于供应链元3: 上游企业2供应原材料2和4, 上游企业3供应原材料3, 核心企业3生产产品3和4, BOM关系为1:1; BOM见图5. 各核心企业上游原材料的市场采购价格和下游产品的市场销售价格独立并服从正态分布, 见表1和表2; 计划期 $T = 4$; 核心企业成本及能力参数见表1和表3; 各核心企业产品的市场需求根据订单及预测得到, 见表2; 根据计划期各时段对产品市场需求的预测及售价的分布情况, 供应链元核心企业生产的产品在满足供需平衡的基础上应持有一定数量的安全库存.

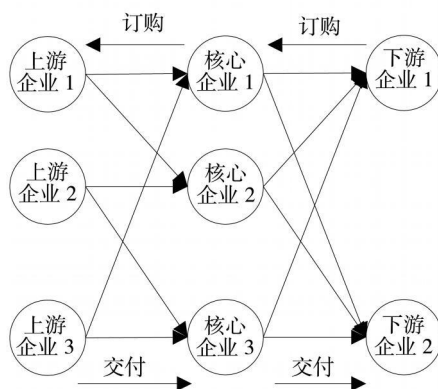


图3 3级分散控制供应链

Fig. 3 Three-level decentralized supply chain

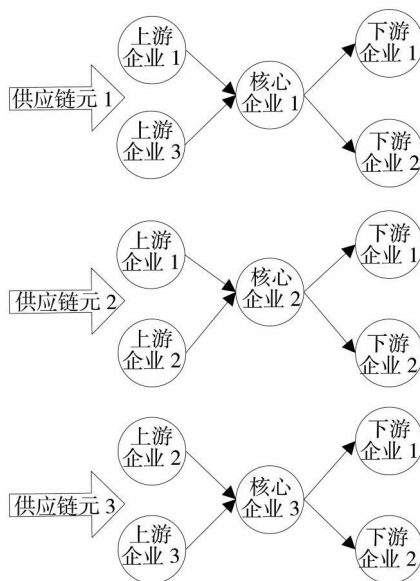


图4 供应链中的供应链元

Fig. 4 The supply chain cell in the supply chain

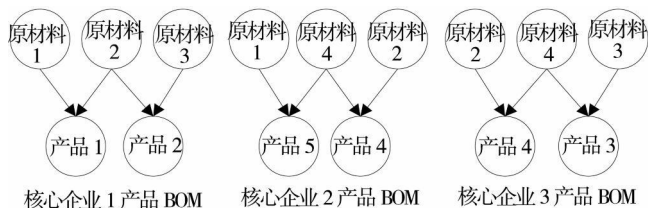


图5 产品结构关系

Fig. 5 The product structure

3.2 仿真结果分析

上面的算法中, 置信度 $\beta = 0.9$, 种群规模 $N = 90$, 交叉概率 $P_c = 0.6$, 变异概率 $p_m = 0.5$, 迭代次数 $G_{max} = 30000$, 基于序的评价函数中 $\alpha = 0.05$, 循环模拟次数为6000次. PC机主频2400 MHz, 算法程序用C++语言实现. 图6显示了

算例的目标函数收敛过程, 从图中可以发现, 当迭代次数超过26500次后, 目标函数收敛曲线基本趋于平缓, 逐渐收敛于目标最优值. 迭代30000次后发现的的目标值见表4 (限于篇幅, 各决策变量最优决策省略).

为进一步验证算法和模型的有效性, 在置信

表 1 供应链元核心企业原材料运输成本及售价分布规律

Table 1 Raw material's transportation costs and distribution of sales prices of core enterprise in supply chain cell

核心企业编号	上游企业编号	原材料编号	阶段	单位原材料运输成本	原材料价格分布函数
1	1	1	1	2.3	$N(9, 0.71^2)$
1	1	1	2	2.3	$N(11, 0.78^2)$
1	1	1	3	2.3	$N(8, 0.63^2)$
1	1	1	4	2.3	$N(7, 0.55^2)$
1	1	2	1	2.1	$N(10, 0.71^2)$
1	1	2	2	2.1	$N(12, 0.78^2)$
1	1	2	3	2.1	$N(9, 0.63^2)$
1	1	2	4	2.1	$N(10, 0.78^2)$
1	3	3	1	2.3	$N(12, 1.1^2)$
1	3	3	2	2.3	$N(9, 0.89^2)$
1	3	3	3	2.3	$N(11, 1.00)$
1	3	3	4	2.3	$N(13, 1.14^2)$
2	1	1	1	2.1	$N(9, 0.71^2)$
2	1	1	2	2.1	$N(11, 0.78^2)$
2	1	1	3	2.1	$N(8, 0.63^2)$
2	1	1	4	2.1	$N(7, 0.55^2)$
2	1	2	1	2.3	$N(12, 0.78^2)$
2	1	2	2	2.3	$N(11, 0.71^2)$
2	1	2	3	2.3	$N(10, 0.84^2)$
2	1	2	4	2.3	$N(9, 0.78^2)$
2	2	2	1	2.0	$N(12, 1.1^2)$
2	2	2	2	2.0	$N(14, 1.05^2)$
2	2	2	3	2.0	$N(13, 1.00)$
2	2	2	4	2.0	$N(10, 0.95^2)$
2	2	4	1	2.3	$N(9, 0.78^2)$
2	2	4	2	2.3	$N(8, 0.84^2)$
2	2	4	3	2.3	$N(10, 0.95^2)$
2	2	4	4	2.3	$N(11, 1.00)$
3	2	2	1	3.0	$N(20, 1.23^2)$
3	2	2	2	3.0	$N(23, 1.27^2)$
3	2	2	3	3.0	$N(19, 1.16^2)$
3	2	2	4	3.0	$N(21, 1.30^2)$
3	2	4	1	2.2	$N(25, 1.34^2)$
3	2	4	2	2.2	$N(23, 1.27^2)$
3	2	4	3	2.2	$N(26, 1.30^2)$
3	2	4	4	2.2	$N(24, 1.34^2)$
3	3	3	1	1.7	$N(27, 1.38^2)$
3	3	3	2	1.7	$N(25, 1.30^2)$
3	3	3	3	1.7	$N(29, 1.41^2)$
3	3	3	4	1.7	$N(26, 1.27^2)$

表 2 供应链元核心企业产品市场需求及售价分布规律

Table 2 Market demands and distribution of market prices of finished goods of core enterprise in supply chain cell

下游企业编号	核心企业编号	产品编号	阶段	需求	产成品价格分布函数
1	1	1	1	15	$N(26, 1.30^2)$
1	1	1	2	16	$N(29, 1.38^2)$
1	1	1	3	21	$N(24, 1.23^2)$
1	1	1	4	18	$N(27, 1.34^2)$
1	1	2	1	23	$N(30, 1.41^2)$
1	1	2	2	25	$N(28, 1.30^2)$
1	1	2	3	30	$N(27, 1.27^2)$
1	1	2	4	25	$N(29, 1.45^2)$
1	2	4	1	21	$N(45, 1.61^2)$
1	2	4	2	20	$N(47, 1.64^2)$
1	2	4	3	23	$N(51, 1.70^2)$
1	2	4	4	30	$N(49, 1.64^2)$
1	2	5	1	27	$N(52, 1.79^2)$
1	2	5	2	31	$N(50, 1.73^2)$
1	2	5	3	37	$N(53, 1.84^2)$
1	2	5	4	40	$N(50, 1.70^2)$
1	3	3	1	50	$N(43, 1.61^2)$
1	3	3	2	53	$N(40, 1.55^2)$
1	3	3	3	55	$N(42, 1.58^2)$
1	3	3	4	51	$N(44, 1.67^2)$
1	3	4	1	36	$N(47, 1.64^2)$
1	3	4	2	40	$N(45, 1.61^2)$
1	3	4	3	46	$N(51, 1.67^2)$
1	3	4	4	50	$N(49, 1.70^2)$
2	1	1	1	10	$N(26, 1.30^2)$
2	1	1	2	14	$N(29, 1.39^2)$
2	1	1	3	19	$N(24, 1.23^2)$
2	1	1	4	12	$N(27, 1.34^2)$
2	1	2	1	26	$N(30, 1.41^2)$
2	1	2	2	33	$N(28, 1.30^2)$
2	1	2	3	34	$N(27, 1.27^2)$
2	1	2	4	28	$N(29, 1.45^2)$
2	2	4	1	60	$N(39, 1.55^2)$
2	2	4	2	56	$N(37, 1.55^2)$
2	2	4	3	52	$N(41, 1.61^2)$
2	2	4	4	65	$N(42, 1.64^2)$
2	2	5	1	48	$N(50, 1.61^2)$
2	2	5	2	52	$N(51, 1.64^2)$
2	2	5	3	49	$N(50, 1.61^2)$
2	2	5	4	55	$N(53, 1.73^2)$
2	3	3	1	29	$N(34, 1.48^2)$
2	3	3	2	30	$N(36, 1.55^2)$
2	3	3	3	20	$N(33, 1.45^2)$
2	3	3	4	31	$N(35, 1.52^2)$
2	3	4	1	19	$N(39, 1.55^2)$
2	3	4	2	17	$N(36, 1.48^2)$
2	3	4	3	21	$N(40, 1.58^2)$
2	3	4	4	25	$N(43, 1.45^2)$

表 3 供应链元核心企业能力约束及其成本参数

Table 3 Capacity constraints and cost parameters of core enterprise in supply chain cell

核心企业编号	产品编号	最大生产能力	最大库存能力	最大运输能力	生产准备成本	单位产品可变生产成本	单位产品库存成本
1	1	142	150	570	2.0	4.0	1.2
1	2	140	145	570	2.6	3.0	1.4
2	4	190	210	665	2.7	3.0	1.3
2	5	200	230	665	2.7	3.0	1.6
3	3	146	139	790	3.0	5.0	1.5
3	4	150	155	790	2.7	3.2	1.9

度 $\beta = 0.9$, 基于序的评价函数中 $\alpha = 0.05$, 随机模拟次数为 6 000 次的情况下, 对算法的参数取不同的值进行仿真, 表 5 给出了参数的不同取值及所对应的仿真结果, 图 7 显示了各次实验目标收敛过程. 仿真结果表明: 算法的交叉概率取值在 0.5 ~ 0.7 之间、变异概率取值在 0.4 ~ 0.6 之间, 种群规模在 90 左右, 迭代次数 30 000 次以上可以

表 5 各次实验中参数的取值及优化结果

Table 5 Parameters value and the optimization results in each experiment

种群规模 N	90	90	120	90
交叉概率 p_c	0.7	0.6	0.6	0.6
变异概率 p_m	0.5	0.5	0.6	0.5
最大迭代次数 G_{max}	30 000	30 000	30 000	60 000
计算层总利润	46 643.145 (图 7a)	46 334.242 (图 7b)	46 574.996 (图 7c)	46 882.018 (图 7d)

得到较为理想的优化结果. 另外, 由于模型复杂, 参数和约束众多, 机器运行需要耗费相对较多的内存资源.

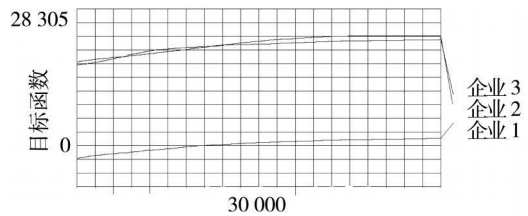


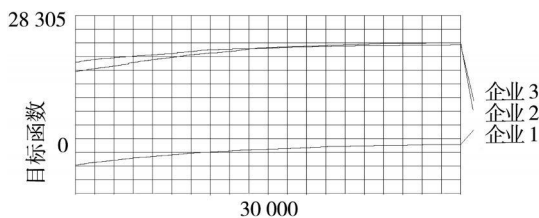
图 6 目标函数收敛过程

Fig. 6 Convergence process of the objective function

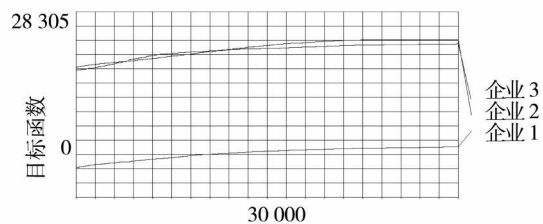
表 4 供应链元核心企业目标函数值

Table 4 The objective function's value of core enterprise in supply chain cell

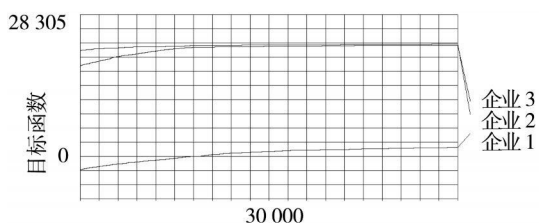
企业编号	目标函数值
1	1 580.347 155
2	22 765.279 347
3	21 988.615 690
计算层总利润	46 334.242 192



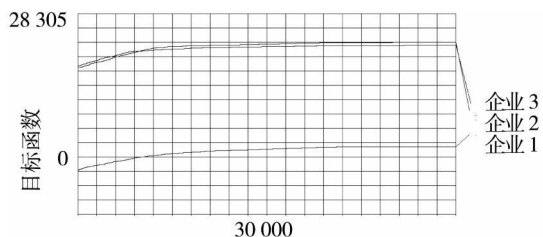
(a) 迭代次数



(b) 迭代次数



(c) 迭代次数



(d) 迭代次数

图 7 目标函数收敛过程

Fig. 7 Convergence process of the objective function

3.3 模型参数的灵敏度分析

为了考查计划期 T 内每一阶段模型参数 $S_{n^-j}(t)$, $P_{n^-j}(t)$, $I_{n^-j}(t)$, $C_{m^-jm}(t)$, $\tilde{d}_{n^-oj}(t)$, $b_{n^-j}(t)$, $q_{n^-j}(t)$, $e_{m^-mj}(t)$ 的变化对计算层总利润的影响, 对各参数进行敏感性分析. 以实验 1 (图 6) 的参数值为基准, 令各参数从基准值开始依次增加 (负号表示减少) $\pm 5\%$ 、 $\pm 10\%$ 及 $\pm 15\%$. 每个参数变化时, 其他参数值保持不变, 仿真结果如表 6 所示.

由表 6 可以得出以下结论: $S_{n^-j}(t)$ 和总利润弱负相关, 说明模型对其变化并不十分敏感; $P_{n^-j}(t)$ 和总利润负相关, 说明模型对其变化比较敏感; $I_{n^-j}(t)$ 和总利润负相关, 说明模型对其变化比较敏感; $C_{m^-jm}(t)$ 和总利润弱负相关, 说明模型对其变

化并不十分敏感; $\tilde{d}_{n^-oj}(t)$ 和总利润强正相关, 表明模型对其变化非常敏感, 因此应用模型时要尽可能准确的确定该参数值; $b_{n^-j}(t)$ 和总利润负相关, 说明模型对其变化比较敏感, 原因是在满足下游客户需求的情况下, $b_{n^-j}(t)$ 的变化导致原材料的订购量、产品生产量和安全库存量 (安全库存受需求量、产能、库存能力以及每一阶段产品价格分布情况的综合影响) 也跟着变化; $q_{n^-j}(t)$ 和总利润弱负相关, 说明模型对其变化并不十分敏感, 原因和 $b_{n^-j}(t)$ 的变化一样; $e_{m^-mj}(t)$ 的变化对总利润无影响, 原因是在满足原材料运输要求的情况下, 运输能力的变化并不能导致原材料订购数量等相关参数的变化.

表 6 参数的灵敏度分析

Table 6 The parameters's sensitivity analysis

参数变化幅度		-15%	-10%	-5%	0%	5%	10%	15%
$S_{n^-j}(t)$	计算层总利润	46 455.216 94	46 396.114 69	46 342.092 19	46 334.242 19	46 326.392 19	46 318.542 19	46 310.692 19
$P_{n^-j}(t)$		47 752.098 56	47 295.535 26	47 139.027 38	46 334.242 19	44 954.437 24	44 724.312 85	43 593.219 61
$I_{n^-j}(t)$		46 674.135 06	46 215.397 45	45 695.073 04	46 334.242 19	45 843.880 82	45 471.397 76	45 459.713 58
$C_{m^-jm}(t)$		46 487.332 15	46 436.302 18	46 385.272 18	46 334.242 19	46 283.212 19	46 232.182 18	46 181.152 17
$\tilde{d}_{n^-oj}(t)$		37 105.395 31	39 140.177 72	41 891.658 73	46 334.242 19	47 417.844 08	52 679.069 66	57 502.644 61
$b_{n^-j}(t)$		46 967.590 62	46 642.755 06	46 147.392 37	46 334.242 19	46 109.098 98	46 025.171 72	45 269.932 19
$q_{n^-j}(t)$		46 370.888 84	46 613.658 91	46 351.986 76	46 334.242 19	46 287.861 12	46 188.397 77	46 188.397 77
$e_{m^-mj}(t)$		46 334.242 19	46 334.242 19	46 334.242 19	46 334.242 19	46 334.242 19	46 334.242 19	46 334.242 19

4 结束语

本文研究了不确定环境下节点无限扩展的分散控制供应链一体化物流计划优化问题. 以所提出的供应链元概念为基础, 考虑了节点企业上下游物料价格要素的不确定性, 建立了多级多节点多产品分散控制供应链一体化物流计划随机机会约束规划模型, 设计了求解模型的混合智能算法, 并以算例对其有效性进行了仿真验证; 为进一步验证模型和算法有效性, 针对算例, 对算法的参数取不同值进行仿真, 并据此确定了算法参数合理的取值范围; 最后通过仿真对模型参数进行了敏感性分析, 找出了各参数变化与计算层总利润之

间的相关关系. 研究结果表明: 不确定环境下分散控制供应链一体化物流计划模型及其求解算法是有效的, 可以对分散控制供应链一体化物流计划决策提供理论依据和实践指导; 模型参数灵敏度分析所得结果可以作为模型应用中对参数进行控制的依据; 所提供供应链元的概念可以为研究复杂供应链提供方法上的支持.

需要指出, 除节点企业上下游物料价格要素的不确定性之外, 供应链中还存在着诸多其它的不确定因素, 如提前期、需求、成本等, 并且供应链一体化物流计划决策也应是多目标的, 如在控制成本的同时提高供应链的响应速度等, 因而进一步的研究需考虑多重决策目标及不同类型的诸多参数不确定环境下分散控制供应链一体化物流计划优化问题.

参考文献:

- [1] Van Hoesel S, Romeijn H E, Morales D R, et al. Integrated lot sizing in serial supply chains with production capacities[J]. *Management Science*, 2005, 51(11): 1706–1719.
- [2] Fumero F, Vercellis C. Synchronized development of production, inventory and distribution schedules[J]. *Transportation Science*, 1999, 33(3): 330–340.
- [3] von Lanzener C H, Pilz-Glombik K. Coordinating supply chain decisions: An optimization model[J]. *OR Spectrum*, 2002, 24(1): 59–78.
- [4] Bredstrom D, Ronnqvist M. Integrated Production Planning and Route Scheduling in Pulp Mill Industry[C]//Proceeding of the 35th Hawaii International Conference on System Sciences. Washington DC, USA: IEEE Computer Society Press, 2002: 1606–1614.
- [5] 孙会君, 高自友. 供应链分销系统双层优化模型[J]. *管理科学学报*, 2003, 6(3): 66–70.
Sun Hui-jun, Gao Zi-you. Bi-level optimization model for distribution system of supply chain[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(3): 66–70. (in Chinese)
- [6] 唐加福, Yung Kai-leung, 刘士新. 单产品物流网络系统的联合决策模型[J]. *管理科学学报*, 2005, 8(2): 54–60.
Tang Jia-fu, Yung Kai-leung, Liu Shi-xin. Joint decisions model for logistic network systems with single product[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2005, 8(2): 54–60. (in Chinese)
- [7] Hsu V N, Lee C Y, So K C. Optimal component stocking policy for assemble-to-order systems with lead-time-dependent component and product pricing[J]. *Management Science*, 2006, 52(3): 337–351.
- [8] Pedro D, Mula J, Jiménez M, et al. A fuzzy linear programming based approach for tactical supply chain planning in an uncertainty environment[J]. *European Journal of Operational Research*, 2010, 205(1): 65–80.
- [9] Gupta A, Maranas C D. Managing demand uncertainty in supply chain planning[J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2003, 27(8/9): 1219–1227.
- [10] Cheung R K M, Powell W B. Models and algorithms for distribution problems with uncertain demands[J]. *Transportation Science*, 1996, 30(1): 43–59.
- [11] Escudero L F, Galindo E, Garcia G, et al. Schumann, a modeling framework for supply chain management under uncertainty[J]. *European Journal of Operations Research*, 1999, 119(1): 14–34.
- [12] Pedro D, Mula J, Poler R, et al. Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: A review[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, 43(3/4): 400–420.
- [13] 姚建明, 周国华. 大规模定制模式下供应链计划调度优化分析[J]. *管理科学学报*, 2003, 6(5): 58–64.
Yao Jian-ming, Zhou Guo-hua. Analysis of supply chain optimization planning and scheduling in mass customization[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2003, 6(5): 58–64. (in Chinese)
- [14] 卢震, 黄小原. 不确定交货条件下供应链协调的 Stackelberg 对策研究[J]. *管理科学学报*, 2004, 7(6): 87–93.
Lu Zhen, Huang Xiao-yuan. Study on Stackelberg game of supply chain coordination with uncertain delivery[J]. *Journal of Management Sciences in China*, 2004, 7(6): 87–93. (in Chinese)
- [15] 周金宏, 汪定伟, 徐洋. 软计算求解分布式多工厂多顾客的供应链准时化生产计划问题[J]. *控制与决策*, 2001, 16(6): 894–897.
Zhou Jin-hong, Wang Ding-wei, Xu Yang. Soft computing for JIT production planning of supply chain of multi-location manufacturing systems[J]. *Control and Decision*, 2001, 16(6): 894–897. (in Chinese)
- [16] 蔡政英, 肖人彬, 谭勇, 等. 不确定条件下循环供应链模糊自适应生产计划调度[J]. *控制与决策*, 2008, 23(5): 525–529.
Cai Zheng-ying, Xiao Ren-bin, Tan Yong, et al. Fuzzy adaptive production plan dispatching of cycle supply chain under uncertainty conditions[J]. *Control and Decision*, 2008, 23(5): 525–529. (in Chinese)

- [17] 李燕凤, 夏国平, 杨跃翔, 等. 基于模糊随机期望规划的跨国供应链战术计划模型[J]. 系统工程理论与实践, 2005, 25(8): 1-9.
Li Yan-feng, Xia Guo-ping, Yang Yue-xiang, et al. Global supply chain tactical planning model based on fuzzy stochastic expected value programming[J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2005, 25(8): 1-9. (in Chinese)
- [18] 刘宝碇, 赵瑞清, 王 纲. 不确定规划及应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.
Liu Bao-ding, Zhao Rui-qing, Wang Gang. Theory and Practice of Uncertain Programming[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003. (in Chinese)

Optimization of logistics planning in decentralized supply chain under uncertain environment

SHAO Ju-ping^{1,2}, XU Xiang-yi², MENG Xiang-hua¹, DONG Shao-hua³, YANG Rui-cheng⁴

1. School of Business, Ludong University, Yantai 264025, China;

2. School of Management, Shandong University, Jinan 250100, China;

3. Department of Logistics Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083 China;

4. School of Mathematics and Information, Ludong University, Yantai 264025, China

Abstract: Supply chain logistics planning is the key issue of supply chain management. To solve the logistics planning problem of decentralized supply chain, in which the nodes can be unlimitedly expanded, the concept of supply chain cell is put forward. Considering the randomness of supply and demand price among the supply chain, a integrated logistics planning model for the multi-stages, multi-nodes, multi-products and decentralized supply chain is introduced based on the stochastic chance-constrained programming theory. Based on random simulation, a hybrid intelligence algorithm is developed for this model. With a numerical examples simulation the effectiveness of the model and the algorithm is proved, meanwhile the reasonable ranges of parameter values in the algorithm are defined and the sensitivity of the parameters in the model are analyzed with numerical example simulation.

Key words: decentralized supply chain; integrated logistics planning; stochastic chance-constrained programming; model and algorithm; sensitivity analysis; simulation