

协同供应链多级库存控制的多目标 优化模型及其求解方法

卫忠¹ 徐晓飞¹ 战德臣¹ 邓胜春¹

摘要 在多级库存的协调控制过程中,只考虑成本的目标优化模型对于提高供应链总体性能水平存在着局限,本文提出了考虑需求满足率、时间、成本的多目标协同优化模型,对于多品种、复杂拓扑结构,以及库容、生产能力受限的情况,提出了一种在外层对库存策略和内层对物流分配方案分别进行寻优的双层求解方法,并采用演化多目标优化技术构造了算法.通过算例实验对模型的有效性进行了验证,实验结果表明,基于多目标模型的优化结果使得系统总体性能得到显著改善.

关键词 供应链优化,多级库存,多目标优化,演化计算

中图分类号 TP393.07

Multi Objective Optimization Model for Collaborative Multi-Echelon Inventory Control in Supply Chain

WEI Zhong¹ XU Xiao-Fei¹ ZHAN De-Chen¹ DENG Sheng-Chun¹

Abstract The use of single objective model in which only the cost is considered in multi-echelon inventory systems does not suffice to raise the total performance of a supply chain. In this paper, we propose an optimization model in which the cost, elapsing time and the demand satisfaction rate are considered in a combined way. For the case where the capacity and supply are limited under the condition of multi classes, random demand and complex link relationships, a two-level solution algorithm is presented. This algorithm enables us to find out the optimal strategy of sites and at the same time deal with the logistic structure using a evolutionary multi objective optimization method and simulation approach. Numerical examples were designed to demonstrate the validity of the algorithm, and the results show that the multi objective optimization model can significantly improve the total performance of supply chains.

Key words Supply chain optimize, multi-echelon inventory, multi objective optimization, evolutionary computing

1 引言

多级库存全局优化是制约供应链总体性能的瓶颈问题.国内外学者针对这一问题进行了多方面的研究,Simchi-Levi等^[1]和Zipkin^[2]都对此作了比较全面的综述.目前已有的研究大多是以总成本极小作为单一优化目标,这样的模型并不考虑影响供应链性能的其他重要指标,虽然降低了问题难度,但是带来了两方面的问题:一是在计划过程中只考虑极小化成本,其代价是供应链的其他性能的降低,例如可能导致需求响应周期超长而丧失市场机遇,或者仅仅维持库存最小,而无法有效满足动态和不确定的市场需求,这就使得其优化结果在实际问题中并不

不合理,不能令人满意;二是单目标模型优化时需要把需求满足时间和用户满足率等指标固定下来,作为模型约束条件,其结果是可能忽略了在条件边缘的极小变动即可带来总体性能更优的可选方案,在实际供应链运作过程中,可能适当调高销售安全库存只引起微小的成本变化,却能带来需求满足率的巨大改善,而这种敏感性是单目标优化模型难于发现的,这就导致决策的片面性,限制了模型优化能力. Chiu等^[3]研究了准时多级库存系统的紧急补充策略,虽然解决了时间满足性问题,但是强时间约束使得系统成本代价较高,并且限制了适度缺货条件下的寻优能力. Ganeshan^[4]讨论了一种随机需求的多级库存优化策略,使用确定的订单满足率对仓库基本库存水平求解,这种方法实际上是以相同最低满足率作为所有仓库供应的必须条件,使得库存总体维持成本上升,缺乏优化的灵活性.鉴于单目标优化模型的不足,本文引入多目标优化理论,建立了同时考虑需求满足率、时间和成本等多个目标的协同优化模型.

为满足一类实际生产—库存—配送系统的优化

收稿日期 2006-3-28 收修改稿日期 2006-7-13
Received March 28, 2006; in revised form July 13, 2006
国家高技术研究发展计划 (863) 基金 (2003AA413021, 2003AA4Z3370) 资助
Supported by the National High-Tech Research and Development Plan of P. R. China (2003AA413021, 2003AA4Z3370)
1. 哈尔滨工业大学计算机科学与工程系 哈尔滨 150001
1. Department of Computer Science and Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001
DOI: 10.1360/aas-007-0181

要求,我们在模型中考虑了多品种、随机需求和复杂拓扑结构,对这样的模型求解十分困难,在现有的讨论多目标模型的文献中^[5, 6],基本只考虑了单品种系列结构的情况,我们综合了单目标模型下对多品种^[7]、不确定需求^[8]、复杂网络关系^[9, 10]的研究结果,提出了在外层对库存策略和内层对物流分配关系分别进行寻优的双层模型求解方法,并采用演化多目标优化技术 (Evolutionary multi objective optimization, EMOO)^[11]构造了求解算法. 通过仿真实验对模型优化结果进行了分析,验证了该模型的有效性.

2 协同多级库存控制优化模型

2.1 问题描述与分析

考虑有制造节点的网状供应链多级库存系统,其最终产品为多个品种,在按照订单组织生产的同时还需要满足动态连续市场需求,供应链结构为网状拓扑结构,如图 1 所示. 在多企业联合的库存控制模式下,由决策协调中心统筹规划库存策略,由于通过市场预测产生的需求具有不确定性,为了达到系统全局最优化,需要在协同考虑最高需求满足率、最短总流程时间和最小总成本等多个目标条件下,给出各企业节点的库存控制策略.

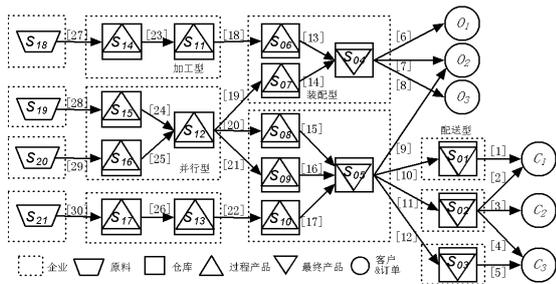


图 1 网状结构供应链多级库存系统

Fig. 1 The net structure of multi-echelon inventory system in supply chain

2.2 模型假设条件

- 1) 系统时间划分为基本时间段 t , $t = 1, 2, \dots, T$, T 为系统计算总周期;
- 2) 节点级别设为 k , $k = 1, 2, \dots, K$, 物流方向为 $(k + 1)$ 级到 k 级, 不存在逆向流动. 每级节点数量为 j , 单个节点记为 j_k ;
- 3) 连续盘点, 系统库存控制策略为 (s, S) ;
- 4) 系统需求分为两种, 批量订单需求 O_l , 订单数量为 l , 随机市场需求 C_m , 其需求源可能有多个, 数量为 m , 分别满足随机函数分布, 订单和客户需求可以分解到不同的节点, 分解策略由系统协调中心制定. 在一个总周期 T 内, 需求连续发生;

5) 允许缺货, 只在第 1 级产生缺货成本, 系统内部各级间不计缺货损失. 如果在第 1 级库存只能满足订单需求和市场需求的两者之一时, 优先满足订单需求. 在多级联合控制模式下, 缺货补充只发生在上下级之间, 同级库存不发生调拨关系;

6) 各节点针对各品种产品的备货期包括运输时间和本级生产时间, 不考虑订单的传输延迟和处理延迟;

7) 库存能力有限, 每个节点的最大允许库容设为 V_{jk} ;

8) 各节点生产能力有限, 在 t 时段, 其供应能力为 $P_{jk,t}$.

2.3 构造模型

相对于成本而言, 供应链在实际市场环境下的长期运作过程中, 优先考虑保持高需求满足率尤为重要, 根据模型假设, 系统有两种需求源, 我们把需求满足率定义为订单执行率与客户满足率之和, 根据条件, 订单数量为 l , 设 $I_{j_k,t}^{(v)}$ 表示 t 时段节点 j_1 中产品 v 的初始盘点数量, $IQ_{j_1,t}^{(v)}$ 表示 t 时段节点 j_1 中产品 v 的运入数量, 订单 O_l 在 t 时段分配到 j_1 的需求量为 $D_{j_1,O_l,t}^{(v)}$, 定义符号 $(x_1, x_2)^- = \min\{x_1, x_2\}$, p_O 表示外部订单执行率, 则有

$$p_O = \text{avg} \left\{ \sum_j \sum_v \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{I_{j_1,t}^{(v)} + IQ_{j_1,t}^{(v)}}{\sum_l D_{j_1,O_l,t}^{(v)}} \cdot 1 \right)^- \right] \right\} \quad (1)$$

公式 (1) 表示 p_O 取各节点各品种在总周期内的订单满足率的平均值.

根据模型条件, 市场需求源有 m 个, 满足随机分布函数, 对于需求源 m , 可能由一个节点单独满足, 也可能由几个节点联合满足, 假定其供应节点为 $(j_1^1, \dots, j_1^m, \dots, j_1^n)$, $D_{m,t}^{(v)}$ 表示 t 时间段市场源 m 对品种 v 的需求量, 在节点满足订单需求后, 用 $IN_{j_1,t}^{(v)}$ 表示其剩余净库存, 则有 $I_{j_1,t}^{(v)} + IQ_{j_1,t}^{(v)} - \sum_l D_{j_1,O_l,t}^{(v)} = IN_{j_1,t}^{(v)}$, 若令 $\sum_{j_1} IN_{j_1,t}^{(v)} = I$, 则 I 为所有供应 m 的节点的总净库存, 令 p_M 表示总外部市场用户满足率, 则有

$$p_M = \text{avg} \left\{ \sum_m \sum_v \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \left(\frac{I}{D_{m,t}^{(v)}} \cdot 1 \right)^- \right] \right\} \quad (2)$$

公式 (2) 表示 p_M 取各市场源所需各品种在总周期内的用户满足率的平均值.

根据模型假设条件, j_k 在接到 j_{k-1} 的订单后, 如果输出库存大于下级需求, 则立即运输, 其备货期等于运输时间, 若输出库存不足, 则等待直至生产完成, 若进一步生产原料 (输入库存) 不能满足制造所

需, 则等待时间增加输入库存的订购补充时间 W_{Ru} , 所以 j'_{k-1} 的备货期 $L_{j'_{k-1}}$ 最长包括运输时间、生产时间和输入库存补充时间 $W_{j_k, Ru}$, $W_{j_k, Ru}$ 需要根据网络运行情况来确定. 设从节点 j'_{k-1} 向上级节点 j_k 对于品种 v 在时间段 t 的订货数量为 $Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}$, t 时段开始处置订单的生产时间为 $Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}(tP)$, 各等级之间需求的运输时间为 $Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}(tT)$, 周期 T 内的任务的总流程时间为 TT , 则有

$$TT = \sum_{t=1}^T \sum_k \sum_j \sum_v \left\{ Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}(tT) + Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}(tP) + W_{j_k, Ru} \right\} \quad (3)$$

该库存系统中, 总成本由订货成本、运输成本、存贮成本和缺货成本构成, 由于多级库存系统的特殊性, 一方面要考虑各级别的生产成本, 另一方面还要考虑产品购置费的逐级包含关系, 避免重复计算传递的上级订货成本. 所以模型中将订货成本分为两部分, 订货交易费和本地生产成本 (在第 K 级, 本地生产成本为原料成本), 不考虑库存占用资金的利息. 设品种 v 在第 k 级针对第 $k-1$ 级的单位订单处理成本为 $cA_{j_k, j'_{k-1}}^{(v)}$, 单位生产成本为 $cP_{j_k, j'_{k-1}}^{(v)}$, c_a 表示系统总订货交易费, c_p 表示系统总生产成本, c_o 表示系统总订货成本, 则有

$$c_o = c_a + c_p = \sum_{t=1}^T \sum_k \sum_j \sum_v \left\{ cA_{j_k, j'_{k-1}}^{(v)} Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)} + cP_{j_k, j'_{k-1}}^{(v)} Q_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)} \right\} \quad (4)$$

设从节点 j_k 向下级节点 j'_{k-1} 对于品种 v 在时间段 t 的运输数量为 $OQ_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}$, 其单位运输成本为 $cT_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}$, c_t 表示周期 T 内的总运输成本, 则有

$$c_t = \sum_{t=1}^T \left[\sum_k \sum_j \sum_v cT_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)} OQ_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)} \right] \quad (5)$$

计算节点存贮成本时需要区分输入产品 u 和输出产品 v 的存贮成本, 设 $I_{j_k, t}^{(u)}$ 和 $I_{j_k, t}^{(v)}$ 表示 t 时段节点 j_k 中输入库存和输出库存的初始数量, 物料 u 由前一层节点的运入数量为 $IQ_{(j'_{k+1}, j_k), t}^{(u)}$, 该时段产品 v 的投产数量为 $P_{j_k, t}^{(v)}$, 完工数量为 $\hat{P}_{j_k, t}^{(v)}$, 因为物料与产品之间是多对多的关系, 所以其存贮数量等于初始数量与运入数量的和, 减去所有产品 v 对物料 u 的用量之和; 产品 v 运向后一层节点的数量为 $OQ_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)}$, 其单位存贮成本为 $cH_{j_k, t}^{(u)}$ 和 $cH_{j_k, t}^{(v)}$, c_h 表示周期 T 内的总存贮成本, 则有

$$c_h = \sum_{t=1}^T \sum_k \sum_j \left\{ \sum_u cH_{j_k, t}^{(u)} \left[I_{j_k, t}^{(u)} + \sum_{j'_{k+1}=1}^{l(Ru)} IQ_{(j'_{k+1}, j_k), t}^{(u)} - \sum_v \eta(u, v) P_{j_k, t}^{(v)} \right] + \sum_v cH_{j_k, t}^{(v)} \left[I_{j_k, t}^{(v)} + \hat{P}_{j_k, t}^{(v)} - \sum_{j'_{k-1}=1}^{l(Sv)} OQ_{(j_k, j'_{k-1}), t}^{(v)} \right] \right\} \quad (6)$$

由公式 (6) 可知, 系统总存贮成本由物料存贮成本和产成品存贮成本构成.

根据模型条件, 缺货发生在系统第一层 ($k=1$), 设订单 O_l 单位缺货成本为 $cS_{O_l}^{(v)}$, 市场需求单位缺货成本为 $cS_m^{(v)}$, 定义符号 $(x_1, x_2)^+ = \max\{x_1, x_2\}$, c_{s_o} 表示总订单缺货成本, c_{s_m} 表示总市场需求缺货成本, c_s 表示系统总缺货成本, 则有

$$c_s = c_{s_o} + c_{s_m} = \sum_{t=1}^T \left\{ \sum_j \sum_v \left\{ cS_{O_l}^{(v)} [(-1) IN_{j_1, t}^{(v)}, 0]^+ \right\} + \sum_m \sum_v \left\{ cS_m^{(v)} [(-1) (I - D_m^{(v)}, 0)]^+ \right\} \right\} \quad (7)$$

由公式 (7) 可知, 系统优先满足订单需求, 其次满足市场需求, 在库存不足的情况下, 可能同时带来两方面的惩罚成本.

根据系统控制目标, 设系统总需求满足率为 TP , 系统总成本为 TC , 品种 u 和品种 v 所占单位库容为 $V^{(u)}$ 和 $V^{(v)}$, 建立优化模型如下

$$\max TP = (p_O + p_M)/2 \quad (8)$$

$$\min TT \quad (9)$$

$$\min TC = c_o + c_t + c_h + c_s \quad (10)$$

$$\text{s. t. } V^{(u)} \left(\sum_k \sum_j \sum_u I_{j_k, t+1}^{(u)} \right) + V^{(v)} \left(\sum_k \sum_j \sum_v I_{j_k, t+1}^{(v)} \right) \leq \sum_k \sum_j V_{j_k} \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_j \sum_u Q_{j'_{k-1}, t}^{(u)} \leq \sum_{t=1}^T \sum_j P_{j_k, t}^{(v)} \quad (12)$$

$$\sum_{t=1}^T Q_{(j_k, j'_{k+1}), t}^{(v)} \leq \sum_{t=1}^T \eta(u, v) Q_{(j'_{k-1}, j_k), t}^{(u)} \quad (13)$$

公式 (8) 表示需求满足率由订单满足率和市场用户满足率两部分构成, 公式 (10) 表示系统总成本包含订货成本、运输成本、存贮成本以及惩罚成本, 模型目标函数使得决策变量能够对最大需求满足率、最短总流程时间和最小系统总成本三个目标协同选优.

约束条件 (11) 表示经过时间段 t 的系统运作, 在时间段 $(t+1)$ 节点的初始库存不应超过系统总库容. 约束条件 (12) 表示 $(k-1)$ 级的订货数量不应超过第 k 级的生产供应能力. 约束条件 (13) 限制了节点内部连接的长期物料需求平衡关系.

3 模型求解

上节讨论的模型是一类网络流优化模型,其主要特点是通过随时间变化的物流数量刻画系统运作过程,这种方法使得模型表述较为直观,且易于计算和仿真.对该模型求解的关键是找到使得系统目标最优的合理物流数量,物流数量包括节点的下级需求数量、运出数量、订货数量和运入数量.实际上,在 t 时段,系统中任一节点发生的物流数量由后续节点订货数量和本地库存策略共同确定.

根据模型条件,设 $s_{j_k}^{(v)}$ 为节点 j_k 的订货点, $S_{j_k}^{(v)}$ 为其需要达到的存货水平, $AO_{j_k,t}^{(u)}$ 为已经订货但未到达的货物数量, $BO_{j_k,t}^{(v)}$ 为后续节点订货但未满足的货物数量,则有

$$AO_{j_k,t}^{(u)} = \sum_{\tau=1}^T \left\{ \sum_{j_{k+1}^{\prime}=1}^{l(Ru)} \left[Q_{(j_{k+1}^{\prime},j_k),\tau}^{(u)} - IQ_{(j_{k+1}^{\prime},j_k),\tau}^{(u)} \right] \right\} \quad (14)$$

$$BO_{j_k,t}^{(v)} = \sum_{\tau=1}^T \left\{ \sum_{j_{k-1}^{\prime}=1}^{l(Sv)} \left[Q_{(j_k,j_{k-1}^{\prime}),\tau}^{(v)} - OQ_{(j_k,j_{k-1}^{\prime}),\tau}^{(v)} \right] \right\} \quad (15)$$

公式 (14) 通过计算所有向上级节点发出的订货数量与运入数量的差额得到节点未达库存,公式 (15) 通过计算所有下级节点提交的订货需求与运出数量的差额得到节点未满足库存,则我们定义节点实有库存为:节点初始物料库存与未达库存经过物料系数转换得到节点可生产库存,计算可生产库存与初始产品库存之和得到节点可向下级提供的库存数量,其与当前未满足库存的差额即为节点实有库存,设 $I_{j_k,t}^{(v)}$ 为节点实有库存,则有

$$I_{j_k,t}^{(v)} = I_{j_k,t}^{(v)} + \sum_u \left[\eta(u,v) \left(AO_{j_k,t}^{(u)} + I_{j_k,t}^{(u)} \right) \right] - BO_{j_k,t}^{(v)} \quad (16)$$

由上式可知,实有库存 $I_{j_k,t}^{(v)}$ 实际上反映了节点的向下供应能力.节点根据实有库存与订货点的比较情况确定是否向上级订货,若实有库存大于订货点,则不需要订货,否则订货.订货数量由库存水平与实有库存的差额转换为相应输入库存得到,则有

$$Q_{(j_k,j_{k+1}),t}^{(u)} = \sum_v \left[\eta(u,v) \left(S_{j_k}^{(v)} - I_{j_k,t}^{(v)} \right) \right] \left(I_{j_k,t}^{(v)} \leq s_{j_k}^{(v)} \right) \quad (17)$$

又由于系统运行于网状拓扑结构中,本级节点同时对多个上级节点,订货数量需要在节点间进行分配,则有

$$Q_{(j_k,j_{k+1}),t}^{(u)} = \sum_{j_{k+1}^{\prime}=1}^{l(Ru)} Q_{(j_k,j_{k+1}^{\prime}),t}^{(u)} \quad (18)$$

系统运输方案可以按照以下步骤确定:首先,新的需求计入 $BO_{j_k,t}^{(v)}$,按照先进先出原则,逐次比

较初始盘点库存 $I_{j_k,t}^{(v)}$ 与 $BO_{j_k,t}^{(v)}$ 中按时间排序的订单数量,若能够满足需求,则按需求数量起运,在 $BO_{j_k,t}^{(v)}$ 中减去该笔订单;否则,等待下一个周期,运输发生时段由备货期 L_{j_k} 确定,则有

$$OQ_{(j_k,j_{k-1}^{\prime}),t}^{(v)} = Q_{(j_k,j_{k-1}^{\prime}),t-L_{j_k}}^{(v)} \quad (19)$$

而节点运入库存 $IQ_{(j_{k+1}^{\prime},j_k),t}^{(u)}$ 则可以由上级节点运出库存递推确定.

由以上分析可清楚知道,在确定了各节点库存策略 $(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)})$ 和分配关系的条件下,根据计算关系 (14)~(19),由模型条件 (11)~(13) 约束,通过推演完整周期的物流运转仿真过程,可以得到网络中各节点随时间变化的物流数量,然后,按照公式 (1)~(7) 计算既定方案的性能指标,进而根据公式 (8)~(10) 获得模型各目标函数值.通过分析函数值在多目标意义下的排序关系,即能够比较不同优化方案的优劣.所以,模型的优化变量为 $(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)})$ 和各节点分配关系.

对于 $s_{j_k}^{(v)}$ 和 $S_{j_k}^{(v)}$ 的求解,在单目标模型下,常用的方法是动态规划法,但是在多目标模型下,由于其目标函数未必具有凸性,另外,在网络结构中局部最优与全局最优是冲突的,系列结构中的动态规划最优性原理不能成立,所以,Zipkin 模型中的通用多级库存基本递推公式^[2]对本文模型并不适用.针对本文模型,基本方法是在处理物流分配关系的同时优化库存控制策略的遍历方法,首先在给定仓库策略下搜索各节点最优分配方案,计算目标函数值,调整当前库存策略,重复搜索和计算过程,遍历全部库存策略,最后给出全局最优解.设系统节点数量为 n_1 , $(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)})$ 取值规模 n_2 和 n_3 , 每节点的分配方案数量为 $\omega(J_k)$, 则该问题计算复杂度为 $O(n_2 \times n_3 \times \omega(J_k))^{n_1}$, 而 $\omega(J_k)$ 是与 $(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)})$, $Q_{(j_k,j_{k-1}^{\prime}),t}^{(v)}$, $l(Ru)$ 相关的函数,对于大型分布式制造企业或供应链型行业集团,上述模型可能具有数百个节点和层叠分配关系,计算量大且复杂,用传统的松弛方法、分支定界法等求解该问题十分困难.

演化多目标优化 (EMOO) 方法是求解这一问题的有效方法,对于上述模型,由于网状结构的多级库存系统在优化仓库策略的同时,还需要同时优化一般形式物流结构下的分配关系,我们结合仿真方法,给出了一种在外层对库存策略和内层对分配方案分别进行寻优的双层演化多目标搜索算法.

3.1 基因编码方案

根据模型特点,由于考虑了多个产品在不同阶段的库存问题,其库存计量方法是不同的,为算法求解的需要,把各产品库存划分为可用整数度量的最小单位,外层库存编码采用如下整数编码:

$$ePOP_{1\dots popsize} = \left[\left(s_{j_1}^{(1)}, S_{j_1}^{(1)} \right), \dots, \left(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)} \right), \dots, \left(s_{j_k}^{(v)}, S_{j_k}^{(v)} \right) \right]$$

根据模型约束条件, 确定外层基因可行域为

$s_{j_k}^{(v)} \in (0, V_{j_k}/V^{(v)})$, $S_{j_k}^{(v)} \in (s_{j_k}^{(v)}, V_{j_k}/V^{(v)})$ 对内层分配关系编码需要考虑在不同的节点其对应关系是变化的, 所以针对对应节点的配比关系采用如下实数编码:

$$iPOP_{1\dots popsize} = [l_{j_1}(R1), l_{j_1}(R2), \dots, l_{j_1}(Ru), *, \dots, l_{j_k}(Ru)]$$

其中, $l_{j_k}(Ru)$ 为节点 j_k 对应供应节点的配比比率, 每个节点配比关系之间用符号“*”隔开, 则 $l_{j_k}(Ru)$ 取值满足下述关系:

$$l_{j_k}(R1) \in (0, 1), \dots, l_{j_k}(Ru) \in (0, (1 - l_{j_k}(R1) - l_{j_k}(R2) - \dots)) \sum_u l_{j_k}(Ru) = 1$$

3.2 多目标评价函数

在多目标优化条件下, 评价演化个体优劣的方法一般有 Pareto 排序法、效用函数法、权重和法等, 我们根据实际问题中的算法求解效率对比情况, 采用了权重和方法. 前述模型可以构造为统一最大化目标形式

$$\max \left\{ z_1 = TP - 1, z_2 = \frac{TT_{MAX} - TT}{TT_{MAX}}, z_3 = \frac{TC_{MAX} - TC}{TC_{MAX}} \right\} \quad (20)$$

其中 TT_{MAX} 为预计任务最大时间, TC_{MAX} 为预计任务最大成本, 则权重和多目标评价函数由下式给出

$$z(x) = w_1 z_1 + w_2 z_2 + w_3 z_3 \quad (21)$$

3.3 算法过程

设 et 表示外层种群当前进化代数, it 表示内层种群当前进化代数, $P(et)$ 和 $P(it)$ 为当前代的外层和内层种群, $popsize(et)$ 和 $popsize(it)$ 为外层和内层种群规模, $E(et)$ 和 $E(it)$ 为外层和内层 Pareto 解集, $maxgen(et)$ 和 $maxgen(it)$ 为外层算法和内层算法最大进化代数. 则整个算法过程归结如下:

Procedure(emoo/SC/inventory):

- 1) 初始化参数 $popsize(et)$, $popsize(it)$, $maxgen(et)$, $maxgen(it)$;
- 2) 令 $et = 0$, 生成外层初始种群 $P(et)$;
- 3) 令 $it = 0$, 生成内层初始种群 $P(it)$;
- 4) 运行仿真程序, 根据输出的方案目标函数值, 应用多目标适应度函数评价 $P(it)$, 更新确定内层 Pareto 解集 $E(it)$;
- 5) 计算被选择概率, 执行进化操作, 结合 $E(it)$

择优, 得到 $P(it + 1)$;

6) 若 $it < maxgen(it)$, 令 $it = it + 1$, 转 4), 否则, 转 7);

7) 重复 3) 至 6) 直到外层种群 $P(et)$ 结束;

8) 应用多目标评价函数比较 $P(et)$ 中各策略下最优的分配方案目标值, 更新确定外层 Pareto 解集 $E(et)$;

9) 计算外层种群个体被选择概率, 执行进化操作, 结合 $E(et)$ 择优, 得到 $P(et + 1)$;

10) 若 $et < maxgen(et)$, 令 $et = et + 1$, 转 3), 否则, 算法终止.

算法过程如图 2 所示, 外层库存策略和内层分配关系共同确定了运行周期内的物流过程, 算法最优解集为获得最高性能评价的两类优化变量组合.

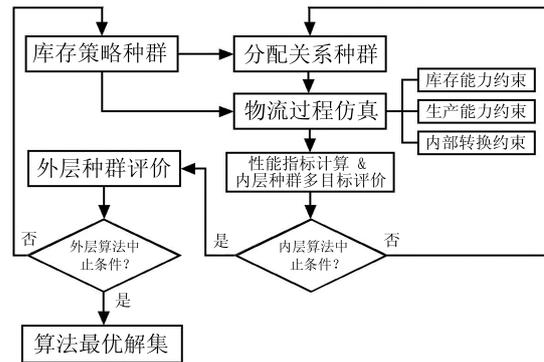


图 2 双层演化多目标搜索算法优化过程

Fig. 2 The process of the two level evolutionary multi objective algorithm

4 仿真实验

4.1 需求模拟器

根据本文模型, 设计了一种能够模拟序列订单需求和市场随机需求混合的需求发生模拟程序, 随机需求包含了几种主要的随机分布概率函数 (包括泊松分布、指数分布、几何分布和正态分布), 其发生数按照时段间隔传递到物流过程仿真器.

4.2 物流过程仿真器

物流过程仿真器设计为能够被算法重复调用的程序包, 其输入参数包括各节点仓库的订货点、库存维持水平、分配节点配比系数和连续的需求模拟器发生数. 根据输入参数推演系统网络流动过程, 周期为 T , 并计算输出物流过程的各目标值.

4.3 实验算例

为了验证多目标模型针对有能力约束的多级库存控制问题的优化性能, 我们选取了卷烟制造供应链实际生产环境的库存控制优化问题, 相关生产环境基本数据见表 1, 环境共分 5 个阶段, 10 个

企业节点, 订单需求任务序列给定, 随机市场源两个 ($m = 2$), 需求数据由需求模拟器生成.

算法参数为外层最大代数 1000, 内层最大代数 500, 外层和内层种群规模都为 100, 保优数量 10, 外层杂交概率 0.2, 变异概率 0.5, 内层杂交概率 0.9, 变异概率 0.2, 为了比较单目标模型和多目标模型在优化性能上的区别, 考虑了三种情况, 一是不约束时间和满足率, 计算最小成本; 二是把本文模型中的需求满足时间和需求满足率作为约束条件 (取 $TT = 120$, $TP = 0.9$), 计算最小成本; 三是应用本文多目标模型计算最优解. 结果 (其中多目标最优解集列出部分 Pareto 解) 见表 2, 其中最短需求满足时间 $\min TT$ 、最小成本 $\min TC$ 、最大需求满足率 $\max TP$, $z(x)$ 由公式 (21) 得到, 取 $TT_{MAX} = 150$, $TC_{MAX} = 250$, $w_1 = w_2 = w_3 = 1/3$.

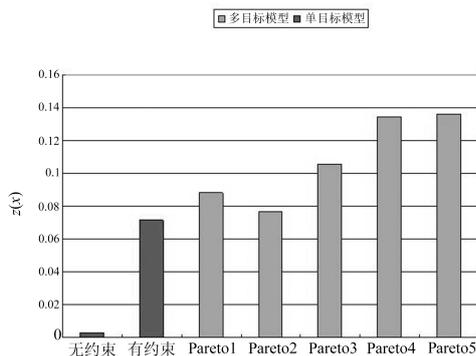


图 3 单目标模型和多目标模型库存策略优化结果比较
Fig. 3 Performance of the single objective model and multi objective model

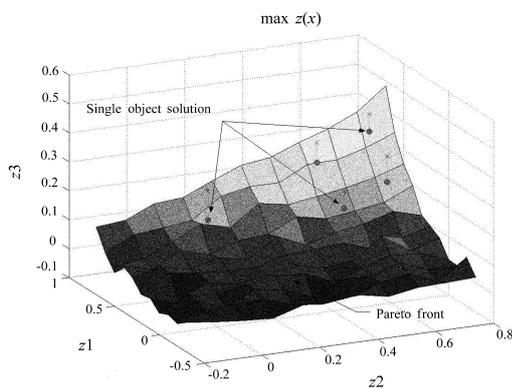


图 4 单目标模型与多目标模型最优解分布
Fig. 4 Comparisons between the two models through inventory control strategy

单目标模型与多目标模型优化性能的比较结果见图 3, 调整需求发生器的随机概率函数计算不同市场条件下的模型优化性能, 所有算例均运行了 20

次. 从图 3 中可以看到, 在无约束条件下, 虽然系统成本达到最低, 但由于系统其他性能急剧下降, 导致其总体性能偏低. 有约束的单目标模型优化结果明显低于多目标模型结果. 在协同考虑时间和满足率的条件下, 多目标模型的整体性能更优.

对这些结果进一步分析, 图 4 给出了两种模型得到的最优解在 Pareto 前沿面的分布情况, 前沿面由所有求得的 Pareto 解连接得到.

由图 4 可以看到, 大多数单目标模型得到的解没有落到 Pareto 前沿面上, 这是由于人为限定的时间和需求满足率不可能精确把握 Pareto 超优曲面的敏感变化, 这也是其整体优化性能低于多目标模型的根本原因.

5 结论

本文从实际优化问题入手, 考虑了一类供应链多级库存控制系统的多目标优化模型. 该模型能够处理多品种以及复杂拓扑结构的情况. 利用系统仿真方法和多目标演化技术构造了模型求解算法, 得到了比较满意的结果, 相对于现有单目标多级库存优化模型, 多目标模型因为较优的整体性能和优化敏感性, 具有一定的理论研究意义和更广的应用价值.

References

- 1 David Simchi-Levi, Xin Chen, Julien Bramel. *The Logic of Logistics: Theory, Algorithms, and Applications for Logistics Management*. New York: Springer-Verlag. 2004. 21~58
- 2 Paul H, Zipkin. *Foundation of Inventory Management*. New York: Mcgraw Hill Higher Education. 2000. 109~110
- 3 Chiu H N, Huang H L. A multi-echelon integrated JIT inventory model using the time buffer and emergency borrowing policies to deal with random delivery lead times. *International Journal of Production Research*, 2003, **41**(13): 2911~2931
- 4 Ram Ganeshan. Managing supply chain inventories: A multiple supplier, one warehouse, multiple retailer model. *International Journal of Production Economics*, 1999, **59**(2): 341~354
- 5 Sabri, Ehap H, Benita M Beamon. A multi-objective approach to simultaneous strategic and operational planning in supply chain design. *OMEGA-The International Journal of Management Science*, 2000, **28**(5): 581~598
- 6 Ding H, Benyoucef L, Xie X. A multiobjective optimization method for strategic sourcing and inventory replenishment. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA2004)*. New Orleans, USA: IEEE, 2004. 2711~2716
- 7 Uday S Rao, Jayashankar, M Swaminathan and Jun Zhang. Multi-product inventory planning with downward substitution, stochastic demand, and setup costs. *IIE Transactions*, 2004, **36**(1): 59~71
- 8 Wang Y, Gerchak Y. Capacity games in assembly systems with uncertain demand. *Manufacturing & Service Operations Management*, 2003, **5**(3): 252~267

表 1 生产环境基本数据
Table 1 The basic parameters of production environment

k	jk	节点参数表								生产能力		库容能力
		u	v	l(Ru)	l(Sv)	$\eta(1, 1)$	$\eta(1, 2)$	$\eta(2, 1)$	$\eta(2, 2)$	$P(v1)/t$	$P(v2)/t$	V_{jk}
复烤	1 ₁	2	2		2	0.758	0.365	0.371	0.552	260	315	5300
	2 ₁	2	1		2	0.565		0.248		710		17900
	2 ₁	2	1		2	0.565		0.248		710		17900
醇化	1 ₂	2	2	2	1	0.989	1.023	1.105	0.882	550	610	21800
	2 ₂	1	2	2	1	1.216	0.827			850	675	11000
制丝	1 ₃	2	2	2	2	1.560	1.273	1.198	0.791	1225	1890	76000
卷接包	1 ₄	2	2	1	3	0.756	0.879	0.846	0.783	270	550	18900
	2 ₄	2	2	1	3	0.852	0.568	0.793	0.609	760	890	22000
分销	1 ₅	1	1	2	3	1				$I(v1)$		9800
	2 ₅	2	2	2	3	1	1	1	1	$I(v1)$	$I(v2)$	11000
	3 ₅	2	2	2	3	1	1	1	1	$I(v1)$	$I(v2)$	9600

表 2 单目标模型和多目标模型库存策略优化结果比较
Table 2 Comparisons between the two models through inventory control strategy

	1 ₁	2 ₁	1 ₂	2 ₂	1 ₃	1 ₄	2 ₄	1 ₅	2 ₅	3 ₅	min TC	min TT	max TP	z(x)
单目标 无约束	(17,79)	(17,63)	(89,96)	(92,266)	(84,216)	(103,325)	(46,97)	(163,556)	(321,491)	(132,679)	97.9	169	0.527	0.003
单目标 有约束	(22,32)		(122,296)	(95,168)	(129,1895)	(197,208)	(62,134)		(403,577)	(87,524)				
Pareto set[1]	(20,72)	(65,110)	(62,158)	(96,187)	(791,1926)	(35,121)	(198,361)	(438,1805)	(645,1298)	(412,1159)	172.9	129	0.815	0.076
Pareto set[2]	(22,51)	(78,113)	(79,96)	(76,156)	(892,2105)	(9,91)	(182,732)	(349,1186)	(562,901)	(526,871)	236.7	112	0.923	0.087
Pareto set[3]	(32,98)	(82,94)	(90,171)	(91,182)	(542,981)	(17,52)	(278,618)	(197,509)	(258,593)	(289,1530)	221.2	107	0.916	0.105
Pareto set[4]	(41,76)	(70,97)	(76,106)	(182,271)	(782,1276)	(11,72)	(90,892)	(561,1283)	(623,1603)	(522,892)	198.1	102	0.876	0.134
Pareto set[5]	(32,96)	(62,129)	(89,159)	(89,108)	(811,896)	(26,132)	(415,125)	(874,792)	(725,1429)	(538,907)	207.6	98	0.892	0.136

9 Ramesh Bollapragada, Uday S Rao, Jun Zhang. Managing inventory and supply performance in assembly systems with random supply capacity and demand. *Management Science*, 2004, **50**(12): 1729~1743

10 Xu Xian-Hao, Ma Shi-Hua. A model of multistage inventory control in the network construction model of supply chain. *Journal of Huazhong University of Science and Technique*, 1998, **26**(7): 68~70.
(徐贤浩, 马士华. 供应链网络状结构模型中多级库存控制模型. 华中理工大学学报, 1998, **26**(7): 68~70)

11 Eckart Zitzler, Lothar Thiele, Marco Laumanns, Fonseca C M, Viviane Grunert da Fonseca. Performance assessment of multiobjective optimizers: An analysis and review. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2003, **7**(2): 117~132



徐晓飞 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机集成制造系统和供应链管理. E-mail: xiaofei@hit.edu.cn
(XU Xiao-Fei Professor. His research interests include CIMS and SCM.)



战德臣 教授, 博士生导师, 主要研究领域为计算机集成制造系统和决策信息系统. E-mail: dechen@hit.edu.cn
(ZHAN De-Chen Professor. His research interests include CIMS and EIS.)



卫 忠 博士研究生, 主要研究领域为计算机集成制造系统、供应链优化、演化计算. 本文通信作者. E-mail: weizhong@mail.hit.edu.cn
(WEI Zhong Ph.D. candidate. His research interests include CIMS, SC optimization, and evolutionary computing. Corresponding author of this paper.)



邓胜春 副教授, 主要研究领域为供应链管理和数据挖掘与商务智能. E-mail: dsc@hit.edu.cn
(DENG Sheng-Chun Associate professor. His research interests include SCM, data mining, and BI.)