

文章编号: 1001-0920(2011)01-0027-05

一种求解供应链环境下生产-配送问题的集成优化方法

梁春华, 周 泓, 赵 健

(北京航空航天大学 经济管理学院, 北京 100191)

摘 要: 研究了供应链环境下的生产-配送集成优化问题, 从整体的角度优化需求分配、生产调度、配送拼装和车辆调度, 利用交货时间因素来协调各模块的优化过程, 进而得到更优的运作方案. 设计了一个禁忌搜索和遗传算法相结合的集成优化策略, 对两个不同规模的问题分别进行了独立优化和集成优化, 数值实验结果显示了集成优化策略的优越性. 最后通过对惩罚因子的灵敏性分析, 讨论了交货时间因素对于运作成本的影响.

关键词: 生产调度; 配送拼装; 车辆调度; 禁忌搜索; 遗传算法

中图分类号: TP29

文献标识码: A

Integrated optimization approach for production-distribution planning in supply chain

LIANG Chun-hua, ZHOU Hong, ZHAO Jian

(School of Economics and Management, Beihang University, Beijing 100191, China. Correspondent: LIANG Chun-hua, E-mail: lch168888@163.com)

Abstract: The integrated optimization method for production and distribution planning in supply chain is studied. Decisions of different functions such as demand allocating, production scheduling, distribution consolidating and vehicle routing are integrated for a simultaneous optimization. The factor of time windows restrictions is used to coordinate the optimization process of all sub-models, which can attain higher service level and lower operational costs. An integrated approach combining tabu search and genetic algorithm is developed to solve the problem. Two experiments adopting integrated approach and decoupled approach respectively are conducted on two problems with different scales, and the results conform the substantial advantage of the integrated approach. Finally, sensitivity analysis on penalty parameters indicates that, the factor of time windows restrictions has significant influence on operational costs.

Key words: production scheduling; distribution consolidating; vehicle routing; tabu search; genetic algorithm

1 引 言

现代市场经济条件下, 产品生命周期不断缩短, 需求瞬息万变, 竞争压力的增加以及经济全球化局面促使企业在注重自身内部管理的基础上开始重视对供应链的管理, 以求更好地降低成本、提高效益、满足市场需求.

20 世纪末以来, 出现一种分析生产和配送运作的新方法, 即将不同职能的决策(如供应过程、配送、库存管理、生产计划等)集成到统一的优化模型中. 这种同时考虑不同职能的特点和要求进行总体优化的问题已经吸引了学者的注意, 并相继提出了一些模型. 文献[1-2]建立了生产-配送的动态规划模型, 用来求

解最小的制造和配送总成本. [3]提出了一个混合整数方法, 用来决定制造和配送的批量以达到多阶段的生产-库存-配送的总成本最小. [4]也采用这种整数规划方法研究了运输模式的选择问题. [5]用马尔可夫链的方法研究了单产品一个工厂一个仓库一个销售商的问题, 其后又发展为多产品模型并给出了次优算法. [6]考虑了供应链中的不确定性, 提出一种分析-仿真混合算法, 并将分析模型中的运作时间看作动态因素, 根据仿真模型的结果进行调整. [7]建立了一个生产-配送问题的多目标线性规划模型, 使用模糊目标规划方法将决策者对各目标权重水平的不确定性包含在模型中. [8]研究了一个多期的生产-配送问题, 使用一种带群体管理的改良式基因算法, 同时解决生产

收稿日期: 2009-10-21; 修回日期: 2010-03-18.

基金项目: 国家自然科学基金项目(70771003, 70821061); 航空科学基金项目(2008ZG55014).

作者简介: 梁春华(1981—), 男, 博士生, 从事生产与物流系统优化的研究; 周泓(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 从事生产系统优化与仿真领域等研究.

和配送决策. [9] 提出了一个包括生产调度、需求分配及运输问题的集成优化模型, 但是所考虑的问题十分简单, 且其运输问题也只涉及到运输模式的选择(普通模式或加急模式).

以上文献大多对配送过程作了简化, 且没有考虑配送计划中的车辆调度问题. 因此, 真正关于生产-配送集成计划问题的研究依然有限. 本文寻求从整体的角度来优化生产-配送问题, 针对其中的核心环节, 综合考虑需求分配、生产调度、配送拼装和车辆调度, 利用交货时间因素来协调各模块的优化过程, 进而得到更优的运作方案以降低运作成本, 提高顾客服务水平. 为了求解该问题, 本文设计了一个禁忌搜索和遗传算法相结合的集成优化策略, 仿真分析显示了算法的优越性.

2 问题描述及建模

本文讨论多工厂、多产品带有时间窗的生产-配送问题. 考虑 1 个由 m 个工厂, 1 个配送中心和 n 个顾客组成的三级供应链配送网络, 每个顾客有不止一种产品需求, 每个工厂可以生产某几种产品. 顾客的需求首先被分配到 m 个工厂; 然后对被分配到各个工厂内的产品进行调度安排, 决定各个产品的加工顺序, 此处不考虑机器调整时间. 产品加工完成后直接被送到配送中心进行存储, 并根据其交货时间窗的范围安排其运输批次以及车辆路径, 提前或延后交货都会对顾客造成不便, 产生惩罚成本. 问题结构如图 1 所示. 这里假设工厂不保留库存, 生产的产品直接运送到配送中心(本文不考虑工厂到配送中心的运输问题, 假设生产完成的产品直接运至配送中心, 且运送时间为常数, 在计算中可忽略), 所有顾客需求的产品运输只能通过配送中心进行.

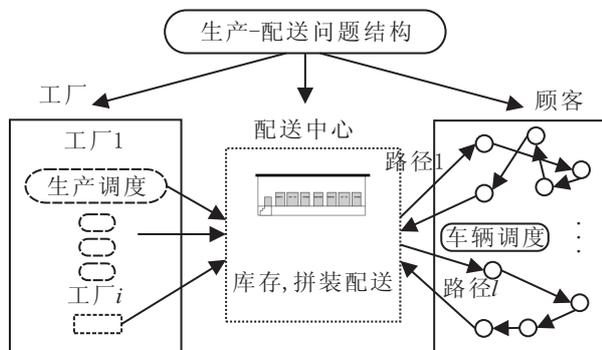


图 1 生产-配送集成问题结构

由图 1 可以看出, 本文要解决的问题有: 1) 需求分配, 决定每个产品需求分配到哪个工厂进行生产; 2) 生产调度, 决定每个工厂的产品加工顺序; 3) 运输批次划分, 决定每个产品需求分配到哪一个批次进行运输; 4) 车辆调度, 对每一批次的运输进行车辆路径优化, 以降低运输成本. 这些决策变量是密切联系的,

它们互相影响并且一起决定了系统的总成本.

问题的数学模型表述如下: 目标函数为最小化系统总成本, 即生产成本、库存成本、运输成本和惩罚成本之和, 有

$$\begin{aligned} \min \text{ total cost} &= \text{production cost} + \text{inventory cost} + \\ &\quad \text{delivery cost} + \text{penalty cost}, \\ \text{production cost} &= \sum_i \sum_j \sum_k \text{pc}_{ij} d_{kj} x_{ijk}, \\ \text{inventory cost} &= \sum_k \sum_j h_j \text{st}_{kj} d_{kj}, \\ \text{delivery cost} &= \sum_r \sum_u \sum_v \sum_l c_{uv} y_{uvl}^r + f \sum_r \text{vn}_r, \\ \text{penalty cost} &= \sum_k \sum_j (\alpha T_{kj} d_{kj} + \beta E_{kj} d_{kj}). \end{aligned}$$

其中: st_{kj} 为顾客 k 需求的 j 产品在配送中心的存储时间, 可表示为 $\text{st}_{kj} = \text{ts}_r - \text{tf}_{kj}, r = m(k, j)$, 若 $\text{sch}_{imn} < \text{sch}_{ijk}$ 且 $x_{ijk} = 1$, 则有

$$\text{tf}_{kj} = \sum_m \sum_n \text{pt}_{im} d_{nm} x_{imn} + \text{pt}_{ij} d_{kj};$$

c_{uv} 表示点 u 到点 v 之间的行驶成本; $T_{kj} = \max\{0, \text{At}_{kj} - \text{Lt}_{kj}\}$ 表示顾客 k 需求的 j 产品的延迟时间; $E_{kj} = \max\{0, \text{Et}_{kj} - \text{At}_{kj}\}$ 表示顾客 k 需求的 j 产品的提前时间.

约束条件如下:

1) 工厂生产能力约束为

$$\sum_k \sum_j a_{ij} d_{kj} x_{ijk} \leq \text{CA}_i, \forall i.$$

2) 需求分配约束为

$$\sum_i \sum_j \sum_k d_{kj} x_{ijk} = \sum_k \sum_j d_{kj}.$$

3) 可用车辆数限制为

$$\text{vn}_r \leq \text{NVEC}.$$

4) 车辆容量约束为

$$z_{rl} \leq \text{VC}.$$

5) 车辆分配约束为

$$\begin{aligned} \sum_l \sum_u y_{uvl}^r &= 1, \forall r, v \neq 0; \\ \sum_u y_{uvl}^r &= \sum_u y_{vul}^r, \forall r, v, l; \\ \sum_u y_{0ul}^r &\leq 1, \forall r, l. \end{aligned}$$

模型参数如下: pc_{ij} 为产品 j 在工厂 i 的单位生产成本; d_{kj} 为顾客 k 对产品 j 的需求量; h_j 为产品 j 在配送中心的单位库存成本; tf_{kj} 为顾客 k 需求的产品 j 的生产完工时间; pt_{ij} 为产品 j 在工厂 i 的单位生产时间; c_{uv} 为点 u 到点 v 之间的行驶成本 ($u, v = 0, 1, \dots$), 0 表示配送中心, 其他为顾客号; f 为车辆

的固定费用; At_{kj} 为顾客 k 需求的 j 产品的送达时间; Et_{kj} 和 Lt_{kj} 为顾客 k 需求的 j 产品的交货时间窗; a_{ij} 为工厂 i 生产单位产品 j 消耗的生产能力; CA_i 为工厂 i 的最大生产能力; $NVEC$ 为配送中心可用车辆数; z_{rl} 为第 r 批运输中车辆 l 的负载.

决策变量如下: sch_{ijk} 为顾客 k 需求的 j 产品在工厂 i 中的生产顺序, $m(k, j)$ 为顾客 k 需求的 j 产品的运输批次, ts_r 为第 r 批运输的开始时间. 且有

$$x_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{顾客 } k \text{ 对产品 } j \text{ 的需求由工厂 } i \text{ 生产;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

$$y_{uvl}^r = \begin{cases} 1, & \text{在第 } r \text{ 批运输中弧 } (u, v) \text{ 属于} \\ & \text{车辆 } l \text{ 的行驶路径;} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

3 算法设计

3.1 算法思路

本文讨论的问题结构比较复杂, 其中生产调度和车辆调度均为已经证明了的 NP 难问题, 需要采用启发式方法进行求解. 遗传算法和禁忌搜索是两种著名的现代启发式算法, 近年来这两种算法的研究与应用发展迅速. 禁忌搜索的搜索速度较快, 在求解作业排序问题时效率高、效果好, 适合作为本文优化策略的外层. 遗传算法虽然搜索效率比禁忌搜索低, 但在求

解一些组合优化问题时, 特别是对于细节问题, 有其不可替代的优越性. 例如对于车辆路径优化、求解的质量很高, 在许多文献中已有成功的应用^[10]. 基于以上考虑, 本文设计了禁忌搜索和遗传算法相结合的集成优化策略, 用禁忌搜索优化外层的生产调度问题, 遗传算法优化内层的车辆调度问题. 前期的数值实验也表明了两者结合的优越性能.

集成优化策略的框架和求解过程如图 2 所示. 将优化问题分为两个部分, Part 1 优化顾客需求分配和工厂生产调度, Part 2 优化货物分批运输及车辆路径. Part 1 中的解确定了顾客需求的分配及其在各工厂中的生产顺序, 从这个解可以得出顾客需求产品的生产完工时间, 同时也间接确定了这些产品可以开始配送的最早时间. 将 Part 1 的每一个解引入 Part 2, 根据 batch 准则进行运输批次划分; 然后对各分批运输方案优化车辆路径; 最后选出最佳分批方案及其车辆路径, 并将结果反馈回 Part 1, 从而计算 Part 1 中解的评价值. 在 Part 1 的每一次迭代中, 其解都要引入 Part 2, 如此循环, 直到优化结束.

3.2 需求分配及生产调度 (Part 1)

3.2.1 构造初始解

本文构造了一个启发式方法来生成 Part 1 的初始解, 其步骤如下:

Step 1: 选择交货时间最紧的顾客需求 d_{kj} ;

Step 2: 令 Δ_j 表示可以生产产品 j 的工厂集合, RCA_i 表示工厂 i 的剩余生产能力, 若 $RCA_{i^*} = \max\{RCA_i, i \in \Delta_j\}$, 则将 d_{kj} 分配到工厂 i^* ;

Step 3: 对于尚未分配的需求, 重复 Step 1 和 Step 2, 直至所有需求均分配完毕.

解的结构可以表示为工厂和顾客需求的一个排列, 令 $1, 2, \dots, M$ 表示工厂, s_{kj} 表示顾客 k 对于产品 j 的需求订单编号. 以 1 个 3 个工厂, 4 个顾客, 每个顾客有 2 种产品需求的问题为例, 问题的解可以表示为 $1s_{11}s_{31}s_{42}2s_{22}s_{32}3s_{12}s_{21}s_{41}$. 其中, 分配到 3 个工厂的顾客需求及其生产顺序分别为

工厂 1: $s_{11} - s_{31} - s_{42}$,

工厂 2: $s_{22} - s_{32}$,

工厂 3: $s_{12} - s_{21} - s_{41}$.

3.2.2 设计禁忌搜索算法

禁忌搜索算法的一个显著特点是计算过程中用于记忆的一张禁忌表, 因此, 实现的技术问题是算法的关键. 具体方法如下:

1) 邻域操作. 本文使用 3 种操作来定义禁忌搜索的邻域, 其中两种是工厂间的操作, 包括再定位法和交换法, 另一种是工厂内的操作——2-opt 交换法. 再

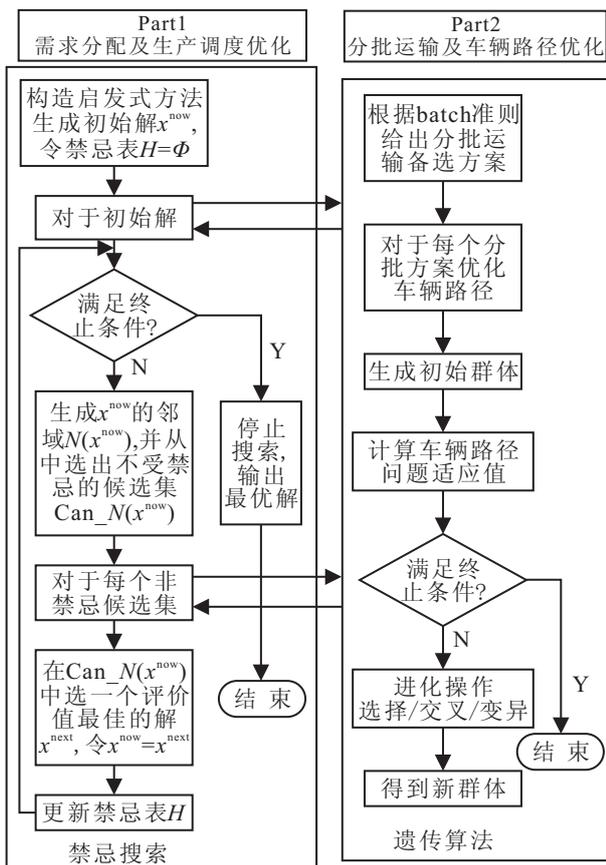


图 2 集成优化策略框架

定位法是将一个工厂中的某一任务插入到另一工厂中,保证解的可行性(可以生产并且不超过生产能力);交换法是在两个工厂中选择两个任务进行交换,也要保证解的可行性;2-opt交换法是在工厂的作业排序中删除两段不相邻的弧,以两段新的弧来代替。

2) 禁忌对象和禁忌长度. 禁忌对象可以分为3种^[11], 本文采用第2种, 即禁忌解的向量分量的变化. 邻域操作的每一个操作可以用两个边的集合来描述: 被插入的边和被删除的边. 用一张禁忌表同时保存两者的信息, 如果一个操作牵涉到的边在当前全部被禁, 则认为该操作被禁. 对被插入的边和被删除的边赋予不同的禁忌长度, 前者的禁忌长度小于后者, 本文中分别为5和8.

3) 特赦规则. 如果一对象被禁但若解禁后可以获得比当前最优解更好的结果, 则对其进行特赦.

3.3 分批运输及车辆调度 (Part 2)

3.3.1 batch 准则

本文设计了一个运输分批方法, 即 batch 准则, 其步骤如下:

Step 1: 确定每一个产品需求的初始启运时间 ts_{kj} : 假设 $atdc_{kj}$ 为产品到达配送中心时间, t_k 为配送中心到顾客 k 的行驶时间, 如果 $atdc_{kj} < Et_{kj} - t_k$, 则 $ts_{kj} = Et_{kj} - t_k$, 否则 $ts_{kj} = atdc_{kj}$. 将二维时间映射到一维, 即 $ts_{kj} \rightarrow ts_{(l)}$, 并按升序排列, 得到一个序列 $\{ts_{(1)}, ts_{(2)}, \dots, ts_{(L)}\}$, 此处 L 为顾客需求总数.

Step 2: 计算 $ts_{(L)} - ts_{(1)}$, 以 $(ts_{(L)} - ts_{(1)})/n$ ($n = 1, 2, \dots$) 为标准对 Step 1 中的序列分批, 每一批次内部两个时间之差不能大于 $(ts_{(L)} - ts_{(1)})/n$, n 取不同的值代表不同的运输分批方案, n 的取值个数即为运输分批的备选方案数.

3.3.2 设计遗传算法

遗传算法是一种自适应随机搜索算法, 在经典车辆路径问题中有大量应用, 并取得了良好效果. 本文遗传算法的基本思想是: 采用轮盘赌选择算子, 并引入最佳个体保留策略, 使最佳个体尽可能保持到下一代; 采用一种改进的边重组交叉算子^[12], 强化对父代个体上优秀性状的遗传; 应用自适应策略调整变异概率, 在克服早熟现象的同时尽可能保留优秀染色体不被破坏.

1) 编码方式. 本文采用自然数编码, 一条可行线路可以编成用一个自然数序列表示的染色体 $(i_{11}, i_{12}, \dots, i_{1s}; 0, i_{21}, \dots, i_{2t}; \dots; 0, i_{l1}, \dots, i_{lw})$. 其中: 0 表示配送中心, i_{lk} 表示第 l 辆车路径上的第 k 个顾客的顾客号.

2) 适应值函数. 本文选取如下所示的个体适应值

评价函数:

$$f_i = \begin{cases} 1/(z_i - z^*), & z_i > z^*; \\ M, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

其中: z^* 是当前最优目标值, z_i 是染色体 i 的目标值, M 是一个较大的正数.

3) 自适应策略. 本文根据由下式确定的群体多样性程度^[13]来调整变异率 p_m :

$$|f_{\max} - f_{\min}|/\bar{f}. \quad (2)$$

其中: f_{\max} 是群体最佳适应值, f_{\min} 是群体最小适应值, \bar{f} 是群体平均适应值. 变异率 p_m 随群体多样性程度不同而不断改变, 若群体多样性程度较小, 则 p_m 增大; 反之, 则减小.

4 仿真分析

本文研究了两个不同规模的问题: 问题1为3个工厂, 1个配送中心, 10个顾客, 3种产品, 能够生产各种产品的工厂集分别为

$$\Delta_1 = \{1, 2\}, \Delta_2 = \{1, 3\}, \Delta_3 = \{2, 3\}.$$

问题2有3个工厂, 1个配送中心, 25个顾客, 5种产品, 分别为

$$\Delta_1 = \{1, 3\}, \Delta_2 = \{1, 2\}, \Delta_3 = \{2, 3\},$$

$$\Delta_4 = \{2, 3\}, \Delta_5 = \{1, 2\}.$$

在相同模型框架下, 基于不同的优化策略分别进行了两次实验. 实验1采用独立优化策略, 即先不考虑配送问题, 单独优化 Part 1 需求分配与生产调度问题, 求得相对优解之后, 再将结果输入到 Part 2 优化配送中的分批运输与车辆调度问题. 实验2采用集成优化策略, 对 Part 1 中的每一个潜在需求分配与生产调度方案引入 Part 2 进行配送优化, 再将结果反馈回 Part 1 来计算该方案的评价值, 如此循环直到获得整个生产-配送问题的满意解. 通过比较两个实验的结果来检验本文提出的集成优化策略的优越性, 并且实验中对提前惩罚因子 α 和延迟惩罚因子 β 进行了灵敏性分析, 以探讨顾客的服务时间要求对现代供应链管理中生产-配送计划带来的影响.

用 C 语言编程, 在 Intel(R)Core(TM)2/2.33 GHz 微机上运算, 问题1运算时间小于 8 s, 问题2运算时间小于 17 s. 表1对比了两种优化策略下的仿真结果. 从表1中可以看出, 集成优化策略使系统总成本分别降低了 6.69% 和 8.19%. 从分析数据来看, 集成优化方法使得库存成本、配送成本和惩罚成本均有所降低, 只是生产成本有所增加. 集成优化策略综合考虑了生产和配送操作, 虽然增加了生产成本, 但是与独立优化策略相比, 集成优化可以使分批配送问题中的许多配送进行拼装, 将交货时间窗较近的产品放到同一批次去运输, 同时还优化了车辆路径, 从而减少了配送

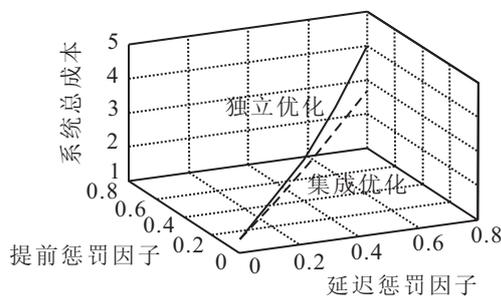
次数、配送车辆和总的车辆行驶距离,使得配送费用大为降低,并且最大可能地避免了无法按时交货的情况,显著降低了惩罚成本,从而使得系统总成本较低.这也是集成优化的意义所在:局部最优并不能代表整体最优,应该从整体的角度综合考虑,以达到全局最优.

表 1 两种优化策略结果对比

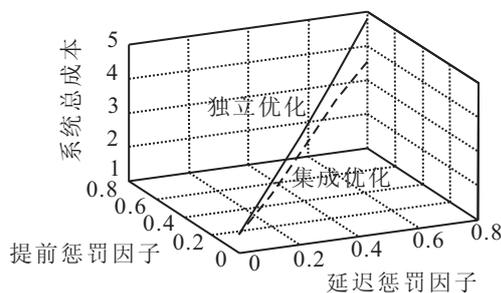
成本	独立优化		集成优化		改进比率/%	
	问题 1	问题 2	问题 1	问题 2	问题 1	问题 2
生产成本	9725	37552	11263	41225	-15.81	-9.78
库存成本	867	3663	815	3487	5.60	4.80
运输成本	9334	32688	6583	24358	29.47	25.48
惩罚成本	1021	3632	785	2115	23.11	41.77
总成本	20947	77535	19446	71185	6.69	8.19

另外,从表 1 还可以发现一个有趣的现象,集成优化对于系统总成本的降低程度随着顾客和产品的规模增长而增长,这是因为有更多的选择通过拼装来改善配送计划.

图 3(a)和图 3(b)分别显示了问题 1 和问题 2 在两个实验中,系统总成本在不同的惩罚因子下的变化情况.可以看出,不论是独立优化还是集成优化,系统总成本均随着惩罚因子的增大而增长.这意味着较高的客户服务水平将导致企业运作成本升高.企业管理者应该选择适当的惩罚因子以在服务水平和运作成本之间取得平衡.从图 3 中还可以看出,随着惩罚因子的增大,独立优化策略下系统总成本线斜率更大,说明随着顾客对服务时间准确性的要求越严,独立优化的系统总成本比集成优化增加得越快.当前消费者



(a) 问题 1



(b) 问题 2

图 3 不同惩罚因子下的系统总成本

市场已由卖方市场转向买方市场,顾客对服务水平的要求越来越高,更加体现出集成优化的重要价值.

5 结 论

本文从整体的角度研究了产品的生产与配送集成优化问题,综合考虑需求分配、生产调度、配送拼装和车辆调度,建立了相应的数学模型,并提出了一种基于禁忌搜索和遗传算法相结合的优化策略.仿真分析表明,集成优化方法可以减少配送次数、配送车辆和总的车辆行驶距离,使得配送费用大为降低,并且有效减少了延期交货的情况,显著降低了惩罚成本,从而使得系统总成本下降.随着问题规模的增大,集成优化策略的效果更为显著.而对于惩罚因子的灵敏度分析表明,在现代竞争激烈的市场环境下时间窗因素对运作成本有着极大影响,集成优化的管理方式能给企业带来更大效益.

本文的生产与配送集成模型中,考虑的是单配送中心、单运输模式和顾客需求确定的情况,多配送中心、多运输模式(例如普通运输和加急运输)和需求不确定情况下的问题还有待进一步研究.

参考文献(References)

- [1] Williams J F. A hybrid algorithm for simultaneous scheduling of production and distribution in mutil-echelon structures[J]. Management Science, 1983, 29(1): 77-92.
- [2] Muckstadt T A, Roudy R O. Logistics of production and inventory[M]. Amsterdam: North-Holland, 1993.
- [3] Haq A N, Vrat Prem, Kanda Arun. An integrated production-inventory-distribution model for manufacture of urea: A case[J]. Int J of Production Economics, 1991, 39(1-3): 39-49.
- [4] Benjamin J. An analysis of mode choice for shippers in a constrained network with applications to just-in-time inventory[J]. Transportation Research: Methodologic, 1990, 24(3): 229-245.
- [5] Pyke D F, Cohen M A. Performance characteristics of stochastic integrated production-distribution systems[J]. European J of Operational Research, 1993, 68(1): 23-48.
- [6] Lee Y H, Kim S H. Production-distribution planning in supply chain considering capacity constraints[J]. Computers and Industrial Engineering, 2002, 43(1/2): 169-190.
- [7] Hasan Selim, Ceyhan Araz, Irem Ozkarahan. Collaborative production-distribution planning in supply chain: A fuzzy goal programming approach[J]. Transportation Research: Logistics and Transportation Review, 2008, 44(3): 396-419.