

DOI:10.13196/j.cims.2016.03.027

面向空间分布式小批量物流供需的多任务集成调度

周林¹, 王旭^{1,2+}, 林云^{1,2}, 景熠³

(1. 重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400030;

2. 重庆大学 现代物流重庆市重点实验室, 重庆 400030;

3. 重庆理工大学 管理学院, 重庆 400054)

摘要:针对供需呈空间分布的多个小批量物流服务需求,研究了面向多起始地—多目的地的多任务集成调度问题。基于分布式物流任务多路径与多集并的特点,设计了多任务物流服务网络图,综合考虑集并产生的费用折扣、等待成本与等待时间,从系统角度权衡任务个体与多任务整体利益,构建了以物流成本与延迟惩罚成本之和最小为目标的数学模型。针对模型求解过程中存在的变长度路径选择、多级集并、资源能力冲突等特点,设计了基于优先权的遗传算法对模型进行求解,并构造自适应变长度交叉与双变异机制增强求解效率。结合算例验证了模型和算法的有效性。

关键词:多任务集成调度;多级集并;小批量物流;遗传算法

中图分类号:TP39

文献标识码:A

Integrated multi-task scheduling for spatially distributed small-batch logistics

ZHOU Lin¹, WANG Xu^{1,2}, LIN Yun^{1,2}, JING Yi³

(1. State Key Lab of Mechanical Transmission, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

2. Chongqing Key Laboratory of Logistics, Chongqing University, Chongqing 400030, China;

3. College of Management, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: To meet the demands of multiple small-batch logistics in spatially distributed, a multi-task scheduling problem oriented to multi-origin and multi-destination was researched. Based on multi-path and multi-consolidation characteristics of distributed logistic tasks, the multi-task logistics service network diagram was designed. For purpose of synthetically balancing the interests between overall multi-task and individual tasks, a mathematical model was proposed to minimize the sum of logistics and penalty cost by considering cost discount, waiting cost and waiting time caused by consolidation. In view of variable length path selection, multi-stage consolidation and resources capability confliction in the process of solving, the genetic algorithm based on priority was designed, and the adaptive variable length chromosome crossover and double mutation mechanisms were constructed to improve the efficiency. The effectiveness of proposed model and algorithm was verified by case study.

Keywords: integrated multi-task scheduling; multi-stage consolidation; small-batch logistics; genetic algorithms

收稿日期:2014-11-13; **修订日期:**2015-12-08. Received 13 Nov. 2014; accepted 08 Dec. 2015.

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2015BAH46F01, 2015BAF05B03); 重庆市科技攻关计划资助项目(CSTC 2014yykfA40006, 2015yykfC60002); 中央高校基本科研业务费资助项目(CDJZR 14110001, 13110048, 106112015CDJSK02JD05); 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20130191110045); 重庆理工大学青年科研项目星火支持计划(2014XH24); **Foundation items:** Project supported by the National Key Technology R&D Program, China(No. 2015BAH46F01, 2015BAF05B03), the Chongqing Science and Technology Research Program, China(No. CSTC 2014yykfA40006, 2015yykfC60002), the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China(No. CDJZR 14110001, 13110048, 106112015CDJSK02JD05), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education, China(No. 20130191110045), the Spark Support Program for Young Researcher of Chongqing University of Technology, China(No. 2014XH24).

0 引言

电子商务的兴起加速了商品在全球范围内的流动,供给与需求呈现出显著的空间分布式特点。同时,消费形态的转变促使客户对商品的定制化及交付的时效性需求不断增强。因此,低成本地实现供需呈空间分布的小批量物流服务,成为物流行业面临的重要挑战。基于资源共享、同业集约的多任务集成调度成为解决该问题的有效途径。

近年来国内外学者对该问题开展了研究。刘琼^[1]等考虑物流资源之间的衔接时间和衔接成本,建立了以物流成本、完成时间和延迟为目标的多目标优化模型,设计了改进的非支配排序遗传算法对模型进行求解,该模型各任务之间相互独立,缺乏对任务集并的考虑。由于多任务集成调度的核心是通过大规模地运作多个任务以获取规模经济效应^[2],集并折扣成为多任务集成调度降低成本的核心手段。因此,黄敏等^[3]考虑多任务在运输时间与运输条件等方面不能等同于单任务的特点,在考虑费用折扣的基础上建立了最小化总成本数学模型,并设计了改进蚁群算法进行求解;王勇等^[4]考虑任务分配的多属性特征,建立了基于逼近正理想解排序方法(Technique for Order Preference by Similarity to Solution, TOPSIS)的第四方物流(Fourth Party Logistics, 4PL)多属性指派决策模型,并设计遗传算法求解模型;Leung等^[5]综合考虑任务整合带来的设置成本降低及集并带来的运输成本节约,提出了重复性多任务装运计划,建立以总成本最小为目标的0-1整数规划模型,融合启发式和分支定界法求解模型;针对现有模型不能体现集并下装运计划的可行性问题,Wong等^[6]在模型中增加了交付期、成本及资源能力限制。上述研究主要针对单起始地—单目的地的多任务调度问题,在此基础上,Cui等^[7-8]考虑了资源模糊持续时间,分别研究了单始发地—多目的地和多始发地—单目的地的多任务调度问题,以成本最小化为目标设计文化遗传算法求解模型。

在实际的运作过程中,商品的供给地与需求地呈现空间分布式特征,低成本驱动下多任务集成调度成为当前的主流服务业态。由于物流任务的空间流动性,多级集并成为降低物流成本的核心手段。当前针对多任务调度的研究存在如下三方面的不足:(1)缺乏对集并过程中等待环节的考虑,多级集

并带来的直接物流成本降低是以增加等待成本与任务延期风险为前提的,当前的研究重点关注集并带来的成本降低,忽略了集并等待成本与等待时间对调度的影响;(2)缺乏对资源发车时刻的考虑,当前的研究大都基于资源随时可用,忽略了部分物流资源(航空,铁路)按时刻发车的特点;(3)多任务的供需主体各异,有不同发货时间与交货期要求,从系统的角度权衡客户个体需求与多任务总体利益也是当前研究的忽视之处。

基于上述分析,本文对多起始地—多目的地—多级集并的多任务调度问题(Multi-origin multi-destination and multi-stage Scheduling Problem for multi-task, 4MSP)进行研究,综合考虑多级集并产生的费用折扣、等待成本与等待时间,并将任务延期风险转化为基于客户预期交货期的延期惩罚,以系统总成本最优为目标建立多任务集成调度模型,设计改进遗传算法求解模型,并进行了算法性能分析及实例应用。

1 问题描述

本文从物流集成服务商的角度出发,研究一个调度周期内面向多起始地—多目的地、带有交货期约束的多个小批量物流任务的集成调度问题。在调度周期内,同时存在多个呈空间分布的物流任务,根据物流资源节点的分布与可用的公路、铁路、航空、水路等物流资源的空间可达性,各任务在起始地与目的地之间存在多条物理物流路径,据此可将各任务分解成基于资源依赖的具有紧前关系的多个活动序列,不同的活动序列对应不同的服务组合模式。多任务构成的物流服务网络将存在多个共同的物流活动,每个活动对应一个候选物流资源集,当各资源在能力范围内同时承担多个物流活动时称为一个集并,多任务多级集并示意图如图1所示。该集成调度过程涉及以下问题:

(1)路径选择 每个任务存在多条物流路径,不同路径对应的服务模式不同,需为各任务选择合适的路径。

(2)资源选择 从服务时间、服务成本与服务能力各异的候选资源集中为各活动配置合适的资源,尤其是针对集并活动。

(3)资源调度 各任务的开始时间不同,服务于集并活动资源的开始时间取决于最后到达任务的最早开始时间,需制定各资源的开始时间。

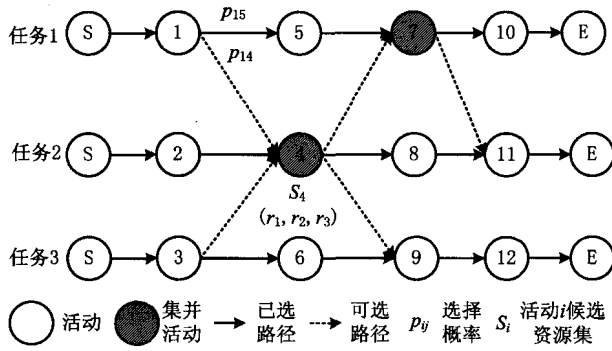


图1 多起始地-多目的地的多级集并示意图

本文重点考虑运输集并对多任务调度的影响，为便于简化模型，不失一般性，作如下假设：①小批量物流任务装卸搬运成本及时间占运输成本与运输时间的比重甚小，将装卸搬运活动并入运输活动来减少活动数量；②物流集成服务商有充足的资源来执行各活动，即活动节点的各资源能力有限制、资源数量不受限；③一个资源能同时执行多个任务，但每个活动只能由一个资源执行。

2 物流服务网络图构建

物流服务网络图是调度过程中路径选择与资源分配的基础。调度过程中存在集并和非集并两种执行模式。非集并模式下的共同活动隶属于不同任务，被不同资源服务。为便于调度时识别各活动的隶属关系，对活动采取“任务码+活动码”、对集并活动采取“任务码+集并活动码”的编码方式，集并活动码相同则视为可集并活动，共享同一候选资源集。转化后的图1如图2所示。

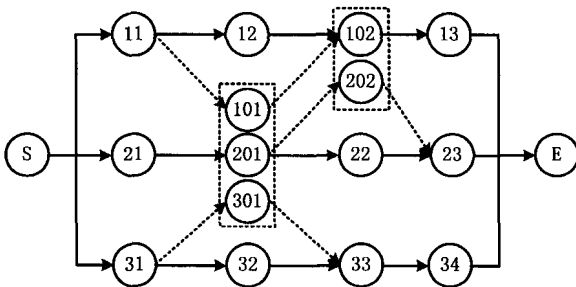


图2 物流服务网络图

在此基础上，结合图论^[9]与文献[10-11]构建物流服务网络图 G 。相关定义如下：网络图表示为 $G=(V,A)$ ，其中： $A=S \times \nabla \times P$ ； V 表示活动集合； S 表示紧后集合； ∇ 表示紧后连接关系， $\nabla=\{s,o\}$ ， s 表示顺序关系 (sequential)， o 表示选择关系 (optional)； P 表示紧后连接关系的发生概率。 $\forall v \in$

V ，如果 v 不是 G 的终止活动，则有 $\sum_{i=1}^I p_i=1$ ，其中 I 为从 v 流出的带选择条件活动的数量， p_i 为从 v 流出的活动 i 被选择的概率。特别地，针对顺序活动，可看作概率为 1 的选择性活动。根据以上定义，图 2 所示的服务网络图可表示为： $G=\{1s\{11(1),21(1),31(1)\},11o\{12(0.4),101(0.6)\},11s\{12(1)\},12s\{102(1)\},101s\{102(1)\},102s\{13(1)\},13s\{4(1)\},21s\{201(1),201o\{22(0.3),202(0.7)\},22s\{23(1)\},202s\{23(1)\},23s\{4(1)\},31o\{301(0.5),32(0.5),32s\{33(1)\},301s\{33(1)\},33s\{34(1)\},34s\{4(1)\}\}$ 。

3 建立数学模型

3.1 参数与变量定义

(1) 参数

m 为物流任务， $m=1,2,\dots,M$ ；

n 为物流活动， $n=1,2,\dots,n_m$ ；

a_{mn} 为任务 m 的第 n 个活动；

R_{mn} 为活动 a_{mn} 对应的候选资源集合；

S_R 为候选资源集合， $R_n \in S_R$ ；

r_{nk} 为 R_n 内的第 k 个资源， $k=1,2,\dots,m_k$ ；

z 为集并次数， $z=1,2,\dots,Z$ ；

θ_z 为第 z 集并处的活动集合；

S_{θ_z} 为集并集合， $\theta_z \in S_{\theta_z}$ ；

w_z 为集并 z 处产生的等待费用；

s_z 为集并 z 处产生的折扣费用；

T_m^S 为任务 m 的开始时间；

T_m^F 为任务 m 的完成时间；

T_m^D 为任务 m 的交货期；

t_{mn}^S 为活动 a_{mn} 的开始时间；

t_{mn}^F 为活动 a_{mn} 的完成时间；

t_{mnk} 为资源 k 执行 a_{mn} 的时间；

Q_m 为任务 m 的货物数量；

Q_k 为资源 k 的服务能力；

Q_{zk} 为集并 z 处资源 k 的运输货物量；

c_{mnk} 为资源 k 执行活动 a_{mn} 的单位费用；

Δc_m^w 为任务 m 的单位时间等待成本；

Δc_m^p 为任务 m 的单位时间延迟惩罚成本；

λ_{mn} 为从活动 n 流出的选择性活动数量；

p_{nm} 为活动 a_{nm} 被选择的概率；

η_i 为第 i 种集并的折扣率， $i=1,2,\dots,I$ 。

(2) 变量

$y_z = \begin{cases} 1, & \text{集并活动在集合 } \theta_z \text{ 处;} \\ 0, & \text{其他;} \end{cases}$

$$H_{mnk} = \begin{cases} 1, & \text{活动 } a_{mn} \text{ 由资源 } k \text{ 执行;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

3.2 选择优化目标

多任务调度涉及物流集成服务商和客户的双方利益。前者的利益体现为在客户支付一定物流费用的前提下以最小成本满足客户需求,后者的利益体现为货物的按时交付。当前的多任务调度研究主要采用如下两种处理方式:各任务交货期无约束,优化物流成本^[1];各任务交货期为硬约束,优化物流成本^[3-8]。前者以物流成本最小为目标会带来各任务大幅延期,导致客户满意度的普遍下降;后者为同时满足各任务的交货期,调度时会大量配置优势资源,在一定程度上会以较高的物流成本促使多任务整体提前完成。实际上,任务提前交付不仅不会创造额外价值,客户还需储备额外的能力来应对任务的提前交付;同时优势资源的大量使用会带来资源能力的过度浪费,而这些资源本可被用于更紧迫的物流服务需求。

基于上述分析,本文允许任务延迟存在。同时,为提升被延迟交付客户的满意度,实现个性化交付,视任务的重要程度给予相应水平的延迟交付补偿,对物流集成服务商而言为延迟交付惩罚。物流集成服务商通过集成化运作来降低物流成本,并以降低物流成本带来的部分额外收益作为低重要度任务的交付延迟补偿,有助于实现多任务调度的整体优化。因此,本文以多任务物流成本和延迟惩罚成本之和最小为优化目标。

3.3 建立数学模型

根据上文分析,考虑多级集并的空间分布式小批量多任务集成调度模型可表示如下:

(1) 多任务物流总成本

物流总成本包括直接物流成本、集并等待成本和集并节约成本三部分,可表示为

$$C_L = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_{mk}} C_{mnk} H_{mnk} Q + \sum_{z=1}^Z w_z y_z - \sum_{z=1}^Z s_z y_z. \quad (1)$$

集并集合内各活动紧后活动的开始时间

$$T_{\theta z}^S = \max T_{mn}^F, a_{mn} \in \theta_z, z \in Z. \quad (2)$$

集并集合内各活动的等待时间

$$\Delta t_z = T_{\theta z}^S - T_{mn}^F. \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可知,集并 z 处的等待费用

$$w_z = \sum_{i=1}^{q_z} (T_{\theta z}^S - T_{mn}^F) \Delta c_m^w,$$

$$\forall a_{mn} \in \theta_z, m \in M. \quad (4)$$

在集并 z 处产生的集并费用折扣

$$s_z = Q_{zk} c_{mnk}^w (1 - \eta_i), \forall a_{mn} \in \theta, k \in K, i \in I. \quad (5)$$

由式(1)、式(4)和式(5),物流总成本可表示为

$$C_L = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_{mk}} C_{mnk} Q_m H_{mnk} + \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^{q_z} (T_{\theta z}^S - T_{mn}^F) \Delta c_m^w y_z - \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I Q_{ik} c_{mnk}^w (1 - \eta_i) y_z. \quad (6)$$

(2) 多任务总延迟成本

$$C_P = \sum_{m=1}^M \max\{T_{mn}^F - T_m^D, 0\} \Delta c_m^P. \quad (7)$$

(3) 总目标成本

结合以上两个目标,多任务调度系统运作目标可表示为:

$$C_L = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{n_m} \sum_{k=1}^{n_{mk}} C_{mnk} Q_m H_{mnk} + \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^{q_z} (T_{\theta z}^S - T_{mn}^F) \Delta c_m^w y_z - \sum_{z=1}^Z \sum_{i=1}^I Q_{ik} c_{mnk}^w (1 - \eta_i) y_z + \sum_{m=1}^M \max\{T_{mn}^F - T_m^D, 0\} \Delta c_m^P. \quad (8)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{n_m} H_{mnk} = 1, \forall k; \quad (9)$$

$$T_{mn}^S - T_{m(n-1)}^S \geq t_{m(n-1)k}, \forall m, n, k; \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^{n_m} H_{mnk} Q_m \leq Q_k, \forall k; \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^{\lambda_{mn}} p_{mn} = 1; \quad (12)$$

$$m = \{1, 2, \dots, M\}, n = \{1, 2, \dots, n_k\},$$

$$k = \{1, 2, \dots, n_{mk}\}. \quad (13)$$

其中:式(8)为物流成本与延期惩罚成本最小的目标函数;式(9)为资源分配逻辑约束,能且只能为一个活动分配一个资源;式(10)为活动间的紧前紧后约束,即后续活动不能在当前活动完成之前开始;式(11)为资源能力约束,物流资源运输的货物量不能超过资源最大服务能力;式(12)为网络完整性约束,即从某节点流出的多个选择性活动要满足概率为1的限制;式(13)为参数值域。

由目标函数表达式(8)可知,当 Δc_m^P 取值为零时,模型可用于不考虑交货期约束的成本最小化优化;当 Δc_m^P 取值为无限大时,模型可用于交货期为硬约束的成本最小化优化;当对 Δc_m^P 根据任务的重要程度取值时,可用于不同重要度下多任务的集成优化,因此模型具有较好的灵活性。

4 求解算法设计

多任务优化调度属于 NP-hard 问题,本文建立的模型为非线性规划模型,计算空间随任务规模、活动节点及候选资源的增加呈指数级增长,采用一般的精确算法寻优的搜索能力有限,基于遗传算法鲁棒性好、通用性强且特别适用于大规模、多约束、非线性的函数优化问题的特点^[12],并结合模型涉及的可变长度路径、多级集并、时序及资源能力约束问题,设计改进的遗传算法对模型求解。

4.1 编码设计

针对多任务调度过程中存在的路径选择、资源分配、冲突消解等关键问题,本文设计了基于“优先权—活动层—资源层”的三层整数编码体系,如图3所示。在活动层,每个基因位代表一个物流活动;在资源层,每个基因位代表执行对应活动的物流资源;在优先权层,每个基因位代表对应活动的优先权,用于当多个任务选择同一活动时资源能力限制带来的资源冲突消解。当任务1,2,3选择同一活动 a_{04} 且随机分配同一资源 r_{041} 时,若 $Q_{041} < Q_1 + Q_2 + Q_3$,则存在资源能力冲突,优先为优先权小的活动 a_{104} 重新分配资源,依次重新分配资源直到冲突消解。

优先权	7	3	4	1	N	2	5	9	...	8
物流活动	a_{11}	a_{21}	a_{31}	a_{104}	a_{204}	a_{56}	a_{304}	a_{64}	...	a_{mn}
物流资源	r_{121}	r_{212}	r_{311}	r_{041}	r_{041}	r_{562}	r_{041}	r_{641}	...	r_{mn2}

图3 染色体编码示意图

4.2 初始种群

种群初始化是生成初始可行解的过程,该过程涉及到路径选择、资源分配、集并带来时序约束、资源冲突消解等问题。本文设计了基于优先权的启发式解生成算法。具体算法如下:

```

Input: G, SR, population size P0;
For (P ≤ P0) do
    Generate activity list list_amn according to G, list_r(amn) ← randomselect(rnk), ∀ amn ∈ list_amn, Identify S0z and activity length L0 of P0, list_p(amn) ← random select(pnk), pmn ∈ [1, L0]
    For all S0z do
        For all amn ∈ S0z do
            Calculate Qzk, if Qzk > Qk, random select rnk ≠ rnk for activities with lower priority, till no collision, else
        End for
    End for
    Record P0, P0 ← P0 ∪ temp
End for

```

Output: P₀.

4.3 解码设计

解码是实现由决策空间表征到目标空间的转化过程,是实施优化的关键。为保证解码的有效性,本文基于该问题多集并的特点,设计如下启发式解码算法:

```

Input: P0, G, SR, TmnS, TmnD
For (P ≤ P0) do
    Identify S0z and activity length L of P0
    Set TmnS = TmnS, C(P0) = 0
    For all S0z do
        For all amn ∈ S0z do
            Estimate if amn ∈ S0z, calculate TmnF, ∀ amn ∈ S0z, T0zS, wz, sz according to (2), (4), (5), tmnF = T0zF + tmnk; else, tmnF = T0zS + tmnk
        End for
    End for
    Calculate C according to (6), (7), (8) record C(P0), C(P0)
    ← C(P0) ∪ temp
End for
Output: C(P0)

```

4.4 适应函数

适应度是评价生成调度方案优劣的标准,本文采用启发式规则解码保证各调度方案解的有效性,在进行个体适应度评价时无需引入罚函数,算法的适应度函数为:

$$f(P_i) = 1/F(P_i). \quad (15)$$

式中 $F(P_i)$ 为个体 P_i 的目标函数值,适应度值越大,目标函数值越优。

4.5 遗传操作

(1) 选择操作

采用轮盘赌选择策略,按照染色体的适应度计算个体复制概率,并根据复制概率将个体复制到下一代种群,个体 P_i 被选择概率的计算公式为:

$$p(P_i) = f(P_i) / \sum_{i=1}^{P_0} f(P_i). \quad (16)$$

(2) 交叉操作

由于路径的多样性特点,不同路径对应编码方案的染色体长度各异。只有相同的基因位才能进行交叉,标准遗传算法交叉操作将带来大量无效操作。为保证交叉操作的有效性和交叉效率,本文设计可变量长度染色体自适应单点交叉算子。操作步骤如下:

步骤1 按照自适应选择概率选择两条染色体。

步骤2 判断两条染色体除始末节点外是否存在共同节点,若存在,则随机选择共同节点进行单点交叉;否则转步骤1。

步骤3 交叉结束,输出交叉结果。

可变长度染色体交叉示意图如图4所示。

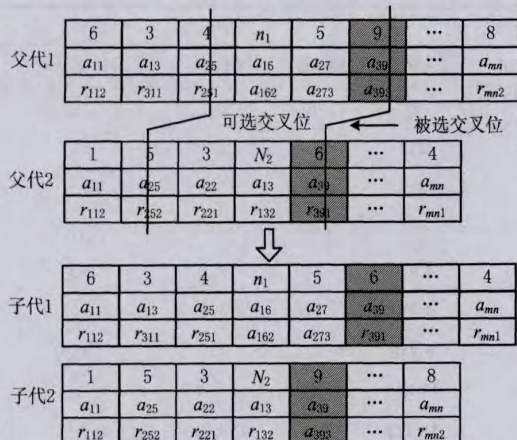


图4 可变长度染色体交叉示意图

自适应交叉概率

$$P_c = \begin{cases} P_{c1} - \frac{(P_{c1} - P_{c2})(f' - f_{avg})}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}; \\ P_{c1}, & f' < f_{avg}. \end{cases} \quad (17)$$

式中: f_{avg} 为当前种群的平均自适应值, f_{max} 为当前种群最大适应度值。

(3) 变异操作

为防止算法过早收敛并在一定程度上弥补单点交叉度较弱的问题,采用基于资源和优先权的双变异机制。资源层变异采用随机单点变异算子,对于按变异概率选择的染色体,随机从变异活动基因位对应的候选资源集中重新分配资源;资源变异后将产生新的资源冲突,采用原优先权进行冲突消解会限制解的搜索空间。因此,重新生成各活动的优先权,根据新生成的优先权进行冲突消解。双变异操作示意如图5所示。

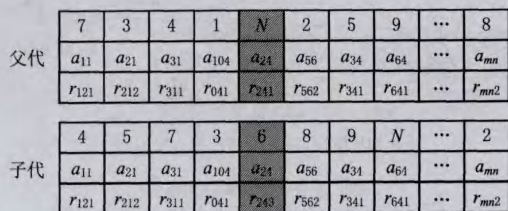


图5 染色体双变异操作示意图

自适应变异概率

$$P_m = \begin{cases} P_{m1} - \frac{(P_{m1} - P_{m2})(f_{max} - f)}{f_{max} - f_{avg}}, & f' \geq f_{avg}; \\ P_{m1}, & f' < f_{avg}. \end{cases} \quad (18)$$

4.6 算法性能分析

为验证所设计的改进遗传算法(Improved Genetic Algorithm, IGA)求解该类问题的有效性,不失一般性,结合文献[5]构建测试算例数据,随机生成 $3 \times 3 \times 3 \sim 50 \times 50 \times 50$ (任务 \times 活动 \times 资源)9组不同规模的算例,与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[13]进行对比分析。各任务货物数量在[20~50]内随机产生;开始时间在[0~48]内随机产生;资源能力在[100~300]内随机产生;活动成本随机[0.75~1.25]倍于行业平均值(设为10个单位);活动时间在[6~72]内随机产生,并与活动成本成反比关系,比率取值为[0.75~1.25];各任务交付时间[1.1~1.5]倍于各任务的最短完成时间;成本折扣在[0.1~0.3]内随机取值;各任务的单位时间延期惩罚成本随机在[1~5]内取值。算法在MATLAB 12.0平台上编译,在主频2.6 GHz双核,2.0 G内存、操作系统为Windows XP的计算机上运行。

初步实验发现,不同问题规模下的算法收敛性与初始种群数量密切相关,单一固定种群数量不能很好地体现算法在不同问题规模下的实际有效性,因此本文采取变种群数量的方法,针对不同规模问题测试采取不同的种群数量,经测试,选取种群数量 $p_0 = (\text{任务} + \text{活动} + \text{资源}) \times 4$ 。其他参数取值如下:最大迭代次数 $M = 1\,000$, $P_{c1} = 0.9$, $P_{c2} = 0.6$, $P_{m1} = 0.1$, $P_{m2} = 0.001$ 。两算法各自独立运行每组样本数据10次,运行结果如表1所示。由表1可知:

(1) 随着规模的增大,问题的复杂性显著增加,算法的运行时间呈非线性增长。

(2) 求解质量方面,在处理中小规模问题时(问题序号1,2,3和4),GA和IGA均能够获得相同的最优解,然而IGA在最劣解和平均解方面具有更好的表现。随着问题规模的增大(问题序号5,6,7,8,9),GA已不能获得与IGA相同的最优解,且获得的最优解、最劣解和平均解与IGA的偏差不断增大。

(3) 求解时间方面,在处理较小规模问题时(问题序号1和2),GA略胜于IGA,但表现相差不大;在求解中等规模问题时(问题序号3,4和5),IGA的表现明显优于GA,体现出了较好的收敛性。在求解较大规模问题时,GA能够以较快的时间收敛,但所求得解的质量显著逊于IGA。

表 1 算法对比分析

问题 序号	问题 规模	GA				IGA			
		最优解	最劣解	平均解	平均计算时间/s	最优解	最劣解	平均解	平均计算时间/s
1	3×3×3	95	95	95	0.13	95	95	95	0.16
2	5×5×5	213	218	215	2.3	213	213	213	2.5
3	8×8×8	550	578	567	39.7	550	568	562	24.6
4	10×10×10	800	856	832	196	800	840	824	113
5	15×15×15	1 896	1 991	1 971	748	1 886	1 970	1 942	561
6	20×20×20	3 478	3 659	3 589	2 270	3 313	3 446	3 396	2 432
7	30×30×30	7 307	7 672	7 526	6 834	6 946	7 233	7 120	7 126
8	40×40×40	12 163	12 474	12 310	11 766	11 888	12 185	12 067	12 114
9	50×50×50	18 532	18 866	18 700	15 816	18 115	18 441	18 296	16 960

分析结果表明,本文设计的 IGA 通过自适应变长度交叉与双变异机制能有效地提升 GA 的收敛性和求解质量,尤其适合中大规模问题的求解。另外,可以看出该算法能够在 1 h 内获得较好的中小规模问题的解,完全可满足生产实践的需要。

5 实例分析

5.1 验证实例

下面以我国一家专业的第四方汽车物流公司针对其客户的定制化整车物流服务为例,验证模型及方法的有效性。该公司为我国中西部重点汽车制造企业提供了全国范围内的整车物流服务。根据客户需求及汽车制造企业的发货计划,在一个调度周期内,6 家汽车制造企业分别有一小批量定制整车须交付到不同地区客户手中,具体信息如表 2 所示,由于各任务始发地和目的地不尽相同,不同任务的发货时间和交货期均不同,不能等同于整车发运计划,因此,为了以较低物流成本满足客户需求,需对 6 个任务制定综合的调度计划。

表 2 各物流任务信息表

m	Name	Q_m	T_m^S	T_m^D	Δw_m	c_m^h
1	成都—上海	4	0	175	10	1 000
2	成都—石家庄	5	0	164	10	50
3	重庆—济南	6	24	132	10	200
4	重庆—南昌	5	12	102	10	150
5	武汉—北京	6	48	108	10	2 000
6	长沙—太原	4	32	112	10	100

集并过程中的集并折扣费率为:

$$\eta_i(Q) = \begin{cases} c_{ijk}, & Q \in [0,6]; \\ 0.9 \cdot c_{ijk}, & Q \in [7,9]; \\ 0.8 \cdot c_{ijk}, & Q \in [10,14]; \\ 0.7 \cdot c_{ijk}, & Q \in [15,18]. \end{cases}$$

根据该公司可管控的物流资源,覆盖多任务的物流路径网络如图 6 所示。根据物理物流网络图,将各物流任务分解成具有紧前关系的任务链,合并相同子任务,得到多任务逻辑物流任务网络图如图 7 所示。



图 6 多任务物理路径网络图

各活动节点的候选资源情况如表 3 所示(为便于展示,提取关键数据)。

5.2 求解结果

在与 4.6 节相同的算法编译平台与相同参数设置环境下,运用设计算法对构建的模型进行求解,调度结果如表 4 和图 8 所示。

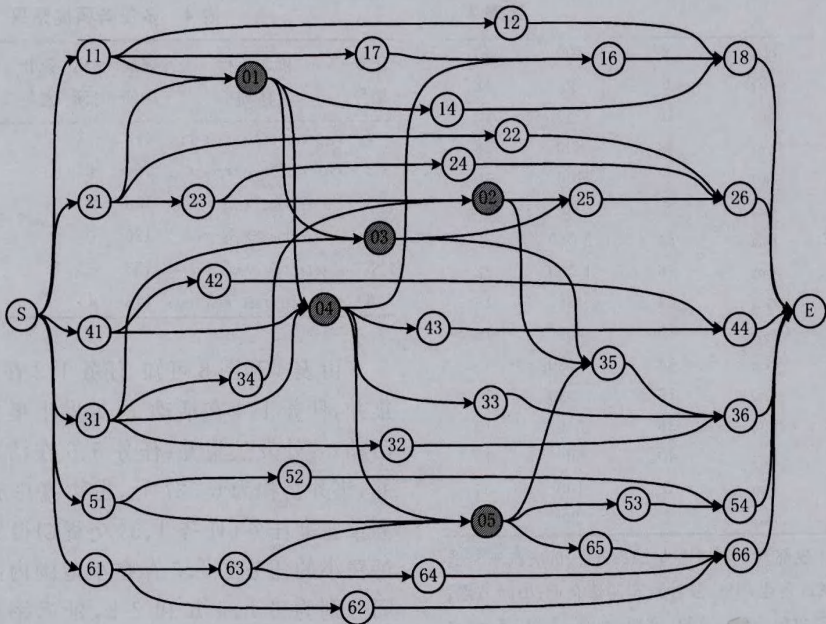


图7 多任务物流服务网络图

表 3 物流活动与资源信息表

续表 3

a_{nm}	Name	r_{nk}	t_{mnk}	c_{mnk}	Q_k						
11	A1-B7	r_{111}	6	40	80	31	A3-B2	r_{262}	12	80	16
		r_{112}	4	60	120			r_{311}	6	60	50
12	B2-B7	r_{121}	144	3 000	8	32	B2-B8	r_{312}	4	80	80
		r_{122}	168	2 800	16			r_{321}	96	2 250	8
13	B1-B4	r_{131}	96	1 680	12	33	B4-B8	r_{322}	108	2 480	8
		r_{132}	108	1 560	18			r_{331}	60	1 500	12
01	B1-B2	r_{011}	18	400	16	34	B2-B3	r_{332}	72	1 400	16
		r_{012}	24	480	16			r_{341}	42	850	18
14	B2-B7	r_{141}	120	2 700	18	35	B5-B8	r_{342}	48	880	18
		r_{142}	108	2 500	100			r_{351}	36	700	12
15	B4-B7	r_{151}	90	1 150	120	36	B8-C3	r_{352}	42	750	12
		r_{152}	84	1 250	100			r_{361}	6	150	16
16	B7-C1	r_{161}	6	90	8	41	C4-B2	r_{362}	8	120	18
		r_{162}	8	70	12			r_{411}	7	50	10
21	A1-B1	r_{211}	4	90	50	42	B2-B6	r_{412}	5	70	12
		r_{212}	7	60	80			r_{421}	72	2 000	12
22	B1-B10	r_{221}	108	2 700	16	43	B4-B6	r_{422}	78	1 850	18
		r_{222}	120	2 500	18			r_{431}	28	550	8
23	B1-B3	r_{231}	42	980	12	44	B6-C4	r_{432}	32	500	10
		r_{232}	54	910	16			r_{441}	6	120	30
24	B3-B10	r_{241}	54	1 170	12	04	B2-B4	r_{442}	8	80	50
		r_{242}	62	1 260	12			r_{041}	60	1 150	12
02	B3-B5	r_{021}	36	750	16	51	A5-B4	r_{042}	68	1 050	16
		r_{022}	30	660	18			r_{521}	72	1 550	8
25	B5-B10	r_{251}	36	580	10	52	B4-B9	r_{522}	84	1 450	8
		r_{252}	40	500	12			r_{531}	42	850	12
03	B2-B5	r_{031}	78	1 650	12	53	B5-B9	r_{532}	56	770	16
		r_{032}	88	1 560	18			r_{541}	6	80	18
26	B10-C2	r_{261}	8	100	18			r_{542}	4	120	18

续表 3

54	B9-C5	r_{611}	3	100	10
		r_{612}	5	60	12
05	B4-B5	r_{051}	48	750	12
		r_{052}	42	800	18
61	A6-B11	r_{611}	3	100	30
		r_{612}	5	60	100
62	B11-B12	r_{621}	84	2 050	8
		r_{622}	96	1 950	12
63	B11-B4	r_{631}	24	450	16
		r_{632}	30	400	18
64	B4-B12	r_{641}	64	1 480	8
		r_{642}	76	1 380	10
65	B5-B12	r_{651}	36	540	10
		r_{652}	40	500	10
66	B12-C6	r_{661}	5	100	30
		r_{662}	8	80	50

注:汽车企业:A1、A2—成都汽车制造企业,A3、A4—重庆汽车制造企业,A5—武汉汽车制造企业,A6—长沙汽车制造企业;中间节点:B1-B12分别代表成都、重庆、西安、武汉、郑州、南昌、上海、济南、北京、石家庄、长沙、太原;客户:C1-C6分别代表位于济南、石家庄、上海、南昌、北京、太原的客户。

表 4 多任务调度结果

任务 编号	资源执行 序列	完成 时间	延迟 时间	折扣 费用	物流 成本	延迟 成本	总 成本
1	$r_{112} \sim r_{011} \sim r_{041} \sim r_{162} \sim r_{181}$	172	-3				
2	$r_{211} \sim r_{011} \sim r_{032} \sim r_{252} \sim r_{261}$	164	6				
3	$r_{312} \sim r_{032} \sim r_{351} \sim r_{361}$	158	0		6 327	62 813	1 000 63 813
4	$r_{412} \sim r_{041} \sim r_{432} \sim r_{441}$	120	0				
5	$r_{512} \sim r_{051} \sim r_{531} \sim r_{542}$	153	-3				
6	$r_{611} \sim r_{631} \sim r_{051} \sim r_{651} \sim r_{661}$	148	4				

由表 4 和图 8 可知,任务 1、2 在活动 a_{01} 处发生集并,任务 1、4 在活动 a_{04} 处发生集并,任务 2、3 在活动 a_{03} 处发生集并;任务 5、6 在活动 a_{05} 处发生集并,集并折扣为 6 327 元,占物流总成本的 10.1%;高重要度任务(任务 1、5)交货期得到了保障,延迟惩罚小的任务 2、4、6 存在小范围内的延迟,延时时间分别为 6 h、4 h 和 2 h,延迟率分别为 3.7%、2.0%和 3.6%,多任务总体准时率为 98.44%;通过 1 000 元的延迟惩罚实现了 100%满意度。

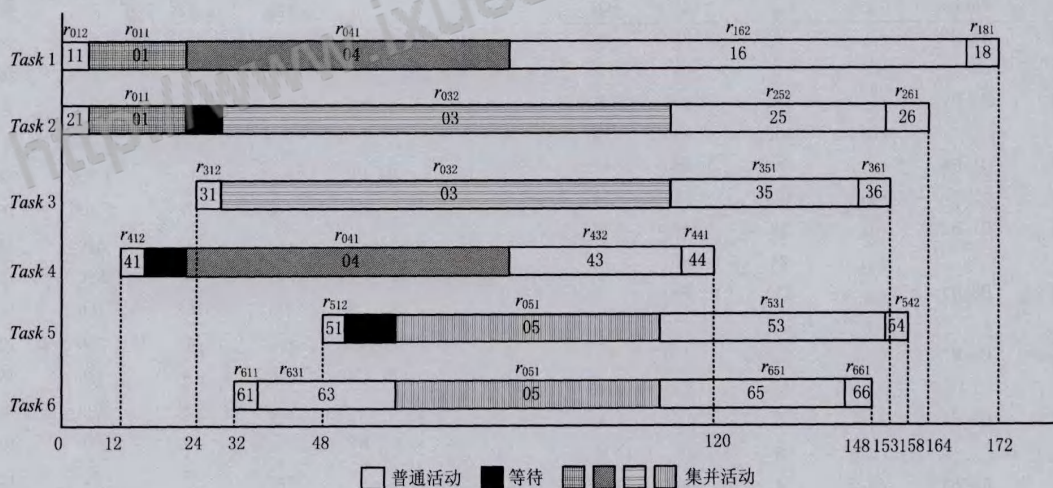


图8 多任务调度计划甘特图

5.3 结果对比分析

为验证本文所提模型的有效性,在相同算法运行环境下,与当前两种主流模型求解结果进行对比分析。模型 1:各任务工期无约束,总物流成本最小^[1];模型 2:各任务工期为硬约束,总物流成本最小^[3-8]。两种模型的求解结果如表 5 所示。

(1) 本文模型与模型 1 的对比分析

对比分析本文模型与模型 1 的调度结果可知,模型 1 的物流成本较本文模型的总成本节约 1 880

表 5 两对比模型调度结果

模型 类别	任务 编号	资源执行序列	完成 时间	延迟 时间	折扣 费用	物流 成本
模 型 1	1	$r_{112} \sim r_{011} \sim r_{041} \sim r_{161} \sim r_{181}$	178	3		
	2	$r_{211} \sim r_{011} \sim r_{032} \sim r_{252} \sim r_{261}$	108	0		
	3	$r_{312} \sim r_{032} \sim r_{351} \sim r_{361}$	164	2		6 327 61 933
	4	$r_{412} \sim r_{031} \sim r_{432} \sim r_{441}$	146	6		
	5	$r_{512} \sim r_{051} \sim r_{532} \sim r_{542}$	167	11		
	6	$r_{611} \sim r_{631} \sim r_{051} \sim r_{651} \sim r_{661}$	148	4		

续表 5

模 型 2	1	$r_{111}-r_{121}-r_{182}$	158	-17	3 630 66 230
	2	$r_{211}-r_{011}-r_{031}-r_{252}-r_{261}$	105	-9	
	3	$r_{312}-r_{031}-r_{351}-r_{361}$	154	-10	
	4	$r_{411}-r_{422}-r_{442}$	148	-8	
	5	$r_{512}-r_{052}-r_{531}-r_{542}$	139	-17	
	6	$r_{611}-r_{631}-r_{052}-r_{651}-r_{661}$	142	-2	

元,但成本的节约以除任务 2 之外的 5 个任务大范围延期为代价(分别延期 3 h,2 h,6 h,11 h,4 h),将造成总体客户满意度降低。若要实现总体客户满意,按照相同的单位时间延迟惩罚成本计算,模型 1 的惩罚成本为 26 900 元,总成本将达到 88 833 元,远高于对比模型的总成本 63 813 元。

(2) 本文模型与模型 2 的对比分析

对比分析本文模型与模型 2 的调度结果可知,本文模型求得的调度总成本较模型 2 总成本节约了 2 417 元,其中物流成本节约 3 417 元。结合表 4 和表 5 可知,模型 2 保障了各任务的交货期要求,但调度过程路径短、中转与集并环节少,大量配置过程时间短、费用高的物流资源,促使各任务总体大幅度提前完成,提前时间分别为:17 h,9 h,10 h,8 h,17 h,2 h。本文模型以三个低重要度任务(2、4、6)的小范围延期(分别为 6 h,2 h,4 h)实现了 2 417 元的成本节约。从利润角度看,本文模型利润通过 1 000 元的延期补偿,在实现整体客户满意的基础上增加了 2 417 元的利润。按照当前物流行业平均利润率为 8%测算,模型 2 的利润为 5 298.4 元,本文模型调度结果的利润率提高了 46%。

综上所述,本文构建的模型通过权衡各任务的个体利益和整体利益,能够更好地实现多任务调度的整体优化。

6 结束语

为解决供需空间分布下的多起始地—多目的地的多个小批量物流任务调度问题,本文综合考虑多级集并带来的费用折扣、等待成本与等待时间对总成本及各任务交货期的影响,从权衡需求个体与多项目整体利益的角度出发,构建了以物流成本与延迟惩罚成本之和最小为目标的数学模型。针对模型特点,设计自适应变长度交叉与双变异机制来增强 GA 的求解性能,并将改进的算法在不同规模算例下与 GA 进行对比分析,结果表明所设计的 IGA 有较好的求解性能,尤其适用于相对中大规模本文问

题的求解。通过具体运作实例,将本文模型与传统的两类模型进行了对比,验证了模型的有效性,对比结果表明本文模型通过对个体利益的适当妥协与合理补偿,权衡个体与整体利益,能最大程度地实现系统整体优化。未来将考虑研究双向对流与资源回程纳入集成调度过程的情况。

参考文献:

[1] LIU Q, ZHANG C, ZHU K, et al. Novel multi-objective resource allocation and activity scheduling for fourth party logistics[J]. Computers & Operations Research, 2014, 44 (2): 42-51.

[2] BOOKBINDER J H, HIGGINSON J K. Probabilistic modeling of freight consolidation by private carriage[J]. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 2002,38(5):305-318.

[3] HUANG Min, CUI Yan, LIN Wanting, et al. Multi-task fourth party logistics routing problem with cost discount[J]. Control and Decision, 2013,28(7):997-1001(in Chinese). [黄敏,崔妍,林婉婷,等.带有费用折扣的多任务第 4 方物流路径优化问题[J].控制与决策,2013,28(7):997-1001.]

[4] WANG Yong, ZHANG Zhanfeng, LAI Zhizhu. A multi-attribute assignment model for fourth party logistics based on TOPSIS method[J]. Journal of Systems & Management, 2011,20(5):569-577(in Chinese). [王勇,张战峰,赖志柱.基于 TOPSIS 法的第四方物流作业多属性优化指派模型[J].系统管理学报,2011,20(5):569-577.]

[5] LEUNG C, VAN H Y, WANG Y, et al. A 0-1 LP model for the integration and consolidation of air cargo shipments[J]. Operations Research, 2009,57(2):402-412.

[6] WONG W H, LNUG L C, HUI Y V. Airfreight forwarder shipment planning;a mixed 0-1 model and managerial issues in the integration and consolidation of shipments[J]. European Journal of Operational Research, 2009,193(1):86-97.

[7] CUI Yan, HUANG Min, WANG Xingwei. Research on fourth party logistics routing problem with cost discount[J]. Journal of System Simulation, 2013, 25 (4): 714-721(in Chinese). [崔妍,黄敏,王兴伟.带有费用折扣的第四方物流路径问题的研究[J].系统仿真学报,2013,25(4):714-721.]

[8] CUI Y, HUANG M, YANG S, et al. Fourth party logistics routing problem model with fuzzy duration time and cost discount[J]. Knowledge-Based Systems, 2013,50(3):14-24.

[9] REINHARD D. Graph theory[M]. 4th ed., Beijing: Higher Education Press, 2013 (in Chinese). [Reinhard Diestel. 图论[M]. 4 版,北京:高等教育出版社,2013.]

[10] ZHENG H, ZHAO W, YANG J, et al. Qos analysis for web service compositions with complex structures[J]. IEEE Transactions on Services Computing, 2013,6(3):373-386.

[11] JIANG Honghong, YANG Xiaohu, XU Yuan, et al. QoS-a-

- ware multi-path Web service composition using variable length chromosome genetic algorithm[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2011, 17(6):1334-1343(in Chinese). [姜红红, 杨小虎, 徐 远, 等. 基于变长基因算法的服务质量驱动多路径 Web 服务组合[J]. 计算机集成制造系统, 2011, 17(6):1334-1343.]
- [12] JING Yi, WANG Xu, LI Wenchuan, et al. Hybrid lot sizing production planning of manufacturing and remanufacturing automobile engine[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2013, 19(4):774-781(in Chinese). [景 熠, 王旭, 李文川, 等. 面向汽车发动机的制造/再制造混合批量生产计划[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19(4):774-781.]
- [13] QI Ershi, LI Hui, LIU Liang. Research on collaborative resource optimization of virtual enterprise based on genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Management Science, 2011, 19(1):77-83(in Chinese). [齐二石, 李 辉, 刘 亮. 基于遗传算法的虚拟企业协同资源优化问题研究[J]. 中国管理科学, 2011, 19(1):77-83.]

作者简介:

- 周 林(1987—),男,河南信阳人,博士研究生,研究方向:电子商务物流、优化调度, E-mail:zhoulin1205@126.com;
- 王 旭(1963—),女,四川南充人,教授,博士生导师,研究方向:现代物流管理、企业信息化、项目管理,通信作者, E-mail:wx921@163.com;
- 林 云(1976—),男,四川成都人,讲师,博士,研究方向:智能物流、服务供应链;
- 景 熠(1987—),男,贵州都匀人,副教授,博士,研究方向:生产运作管理。

<http://www.ixueshu.com>



知网查重限时 7折 最高可优惠 120元

本科定稿，硕博定稿，查重结果与学校一致

立即检测

免费论文查重: <http://www.paperyy.com>

3亿免费文献下载: <http://www.ixueshu.com>

超值论文自动降重: http://www.paperyy.com/reduce_repetition

PPT免费模版下载: <http://ppt.ixueshu.com>
