

文章编号:1671-1637(2014)01-0075-09

# 长大货物多式联运路径优化模型与算法

雷定猷,游 伟,张英贵,皮志东

(中南大学 交通运输工程学院,湖南 长沙 410004)

**摘 要:**基于可行性与合理性的角度,分析了长大货物多式联运路径优化的影响因素。以最小运输时间、里程与费用为目标函数,以线路限界、桥梁承载能力、起重设备的起重能力为约束条件,建立了长大货物多式联运路径优化原始模型。考虑了约束条件的改造性特征,将原始模型扩展优化,设计了二维序列编码策略,运用遗传算法求解扩展模型。计算结果表明:运用提出的优化模型与遗传算法,最优运输时间、里程和费用分别为12.5 d、1 116 km、58.18万元,运用提出的优化模型与模拟退火算法,最优运输时间、里程和费用分别为15.5 d、1 131 km、67.74万元;运用单一的铁路运输方式与遗传算法,最优运输时间、里程和费用分别为12.7 d、1 152 km、56.50万元。与其他2种情况比较,提出的优化模型与遗传算法的综合优化程度分别提高52.22%与8.95%,可见,模型可行,算法有效。

**关键词:**长大货物;多式联运;路径优化;多目标规划;遗传算法

**中图分类号:**U116.2

**文献标志码:**A

## Path optimization model and algorithm of multimodal transport for long and bulky cargo

LEI Ding-you, YOU Wei, ZHANG Ying-gui, PI Zhi-dong

(School of Traffic and Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410004, Hunan, China)

**Abstract:** Based on the view of feasibility and rationality, the path optimization influence factors of multimodal transport for long and bulky cargo were analyzed. The minimum transport time, mileage and cost were taken as objective functions, the line boundary, bridge bearing capacity and lifting equipment capacity were taken as constraint conditions, and the original path optimization model of multimodal transport for long and bulky cargo was set up. By considering the transformation characteristics of constraint conditions, the original model was extended and optimized, two-dimensional sequence coding strategy was designed, and the extensional model was solved by using genetic algorithm. Calculation result shows that by using the extensional model and genetic algorithm, the optimal transport time, mileage and cost are 12.5 d, 1 116 km and 581 800 yuan respectively. By using the extensional model and simulated annealing algorithm, the optimal transport time, mileage and cost are 15.5 d, 1 131 km and 677 400 yuan respectively. By using single-railway transport mode and genetic algorithm, the optimal transport time, mileage and cost are 12.7 d, 1 152 km and 565 000 yuan respectively. By using the extensional model and genetic algorithm, the integrated optimization degree rises by 52.22% and 8.95% compared with the other 2 conditions. Obviously, the extensional model is feasible, and genetic algorithm is effective. 5 tabs, 5 figs, 21 refs.

收稿日期:2013-10-11

基金项目:国家自然科学基金项目(71371193,70971140)

作者简介:雷定猷(1958-),男,湖南浏阳人,中南大学教授,工学博士,从事交通运输营运管理及优化研究。

**Key words:** long and bulky cargo; multimodal transport; path optimization; multi-objective programming; genetic algorithm

**Author resume:** LEI Ding-you(1958-), male, professor, PhD, +86-731-82655931, ding@csu.edu.cn.

## 0 引 言

公路运输中,装后总轮廓尺寸、车货总重或汽车轴重超过规定允许限度的货物称之为超限货物或大件货物<sup>[1]</sup>;铁路运输中,装后综合轮廓或计算轮廓超过机车车辆限界基本轮廓的货物为超限货物,重车总重活载效应超过桥涵设计标准活载(中-活载)的货物为超重货物,二者统称为铁路超限超重货物<sup>[2]</sup>;水路运输中,将质量或长度超过特定航道既定标准的货物称为笨重长大货物<sup>[3]</sup>。将公路大件货物、铁路超限超重货物和水路笨重长大货物统称为长大货物。长大货物包括大型发电机组、变压器、锅炉汽包、轧钢机部件、炼油厂和化工厂的反应塔等大型设备,具有阔大、笨重、价格昂贵等特征。世界各国的长大货物运输技术发展实践证明,长大货物运输对国家基础建设和国防建设具有重大意义<sup>[4]</sup>。

长大货物多式联运是指通过公路、铁路和水路中的 2 种或 2 种以上运输方式进行的长大货物运输。与单一运输方式相比,长大货物多式联运具有显著优越性,既能弥补单一运输方式可达性的缺陷,又能充分发挥各种运输方式的优势,降低运输成本,缩短运输时间<sup>[5]</sup>。长大货物多式联运涉及的运输过程尤为复杂,需要更多的货物中转作业,组织难度较大,若不能合理地选择运输路径,势必大大削弱多式联运的优势,因此,路径优化是长大货物多式联运过程中至关重要的一个环节。

既有长大货物运输的路径优化研究更加注重单一运输方式(公路和铁路运输)的路径优化。Ray 结合美国特拉华州长大货物高速公路运输的实际需求,研制出路径审批决策支持系统,其功能偏向于长大货物运输路径的审核与评价<sup>[6]</sup>;乔国会等构建了网络配流模型,以线路障碍因素为约束获取了可行线路方案,并根据模糊评价理论从中挑选较优的大件货物公路运输线路<sup>[7]</sup>;罗建设计了层次优化模型,制定公路大件运输线路选择方案<sup>[8]</sup>;汤波等通过构造基于属性向量和权重向量的超限超重货物运输网络,以正常运输组织受到的干扰程度最小、最小运输里程和费用为优化目标,建立模型并设计启发式算法求解铁路超限超重货物运输路径优化问题<sup>[9-10]</sup>。

多式联运常见于集装箱运输,且既有多式联运

路径优化方面的研究很少涉及长大货物。Lozano 等设计了标签法在综合运输网络上搜索最短路径,并采用修改的连时序法求解多式联运最短可行路径<sup>[11]</sup>;Lam 等通过设计聚类算法来改善多式联运网络中关于  $k$  次最短路径问题的传统算法的性能<sup>[12]</sup>;Boussedjra 等采用双向研究策略构造多式联运网络,并设计了最小化运输时间的遗传算法<sup>[13]</sup>;王涛等通过构造多式联运虚拟运输网络,将多式联运路径优化问题转化为带时间和能力约束的最短路径问题<sup>[14]</sup>;苏印等将运输时间、费用和质量作为国际多式联运的关键 3 要素,利用决策论方法求解国际多式联运线路选择问题<sup>[15]</sup>;康凯等采用基于粒子群的蚁群算法求解了多式联运中运输方式与路径集成优化问题<sup>[16]</sup>;王金华提出了基于运输合理化的多式联运路径优化方法<sup>[17]</sup>。

在上述国内外研究现状中,既有研究较少涉及长大货物多式联运路径优化问题。结合公路、铁路以及水路长大货物运输的客观需要,本文统筹考虑长大货物多式联运路径优化问题的影响因素,以总运输时间、里程及费用最小为优化目标,建立了长大货物多式联运路径优化模型。考虑线路综合限界、桥梁承载能力和起重设备起重能力的可改造性特征,提出长大货物多式联运扩展优化模型,并设计遗传算法求解问题。

## 1 路径优化影响因素分析

长大货物多式联运路径优化问题的影响因素包括路径可行性与合理性 2 方面。路径可行性因素是决定性的,直接决定着长大货物能否安全运达目的地;路径合理性因素是基于安全性、经济性、时效性以及运输组织复杂程度等层面的多式联运运输方案优劣评价的标准,以得到更加合理的长大货物多式联运运输路径。

### 1.1 路径可行性因素分析

长大货物多式联运路径优化问题的可行性因素主要包括线路限界、桥梁承载能力以及换装点起重设备的起重能力 3 方面的内容。

#### 1.1.1 线路限界

线路限界决定了该线路上可安全通过的货物最大尺寸,是影响路径优化的关键因素。铁路限界往

往受隧道、桥梁、天桥、站台、雨棚、通讯设备、接触网、安装在线路上的各种安全检测装置和靠近建筑限界的其他建筑物的影响;公路限界经常会受到路旁建筑、桥梁、隧道、广告牌、交通标志牌和收费站等控制点的影响;水路限界则主要受航道跨河建筑物的影响。有些线路限界的某些影响可以通过改造加以消除,如暂时移动铁路信号设备与拆除公路交通标志牌等,制定长大货物多式联运运输路径方案时应考虑限界的改造时间与费用。

### 1.1.2 桥梁承载能力

桥梁承载能力与桥梁结构、跨度、设计截面以及使用年限等因素相关,不同桥梁的承载能力相差很大<sup>[18]</sup>。长大货物运输要求途经桥梁必须都具备足够的承载能力,在确定运输路径之前需对途经桥梁的当前承载能力进行严格测算。同样,也可以通过改造、加固桥梁或建“桥上桥”等方法增加原有桥梁的承载能力,并将改造时间与费用纳入相应路段进行计算。

### 1.1.3 起重设备的起重能力

在长大货物多式联运过程中,常会遇到换装的问题,如公铁、水陆换装作业。换装时,要求换装点必须具备足够起重能力的起重设备,否则就不能在该换装点换装,导致相应运输路径不可行。在实际运输过程中,就曾发生过从西安运往三峡的某长大货物由于武汉换装点不具备相应起重设备,不得不将该货物运往上海进行换装,而其理想方案便是直接在武汉将其换装至水路再经由长江航道运往三峡。当然,也可通过购置或从别处调用起重机(如浮吊)来解决此类问题,购置或调用起重设备的时间与费用应纳入相应路段进行计算。

## 1.2 路径合理性因素分析

从运输时间、运输里程和运输费用 3 方面衡量长大货物多式联运运输路径的合理性。

### 1.2.1 运输时间

运输时间包括 2 部分,即在节点之间的运输时间和消耗在某些节点的换装时间;若存在限界、桥梁或起重设备改造时,改造时间需计入总运输时间。对于货主和运输企业来讲,时间意味着巨大的经济效益,因此,运输时间是长大货物多式联运运输方案的重要评价指标之一,合理的运输路径应该是耗费尽可能少的运输时间。

### 1.2.2 运输里程

运输里程是运输路径上各节点之间的距离之和。运输里程直接影响运输时间和运输费用,运输

里程越大,意味着货物在途时间越多,发生意外的可能性就越大,所以,路径优化时应尽量选择运输里程较短的路径。

### 1.2.3 运输费用

货物运输费用是指为了使货物发生位移,货主需支付的全部费用。对长大货物多式联运而言,其运输费用主要包括行程费用和换装点的换装费用,前者与经由线路、运输方式等因素有关,后者则取决于换装点的换装设备与换装技术。

## 2 路径优化模型

### 2.1 原始优化模型

设长大货物多式联运网络为  $N=(V, E, P)$ 。其中  $V=\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  为多式联运网络节点集合,  $v_i (i=1, 2, \dots, n)$  为节点, 运输任务的起始、终止节点分别为  $v_s$  和  $v_t$ ;  $E$  为多式联运网络路段集合,  $e_{ij}$  为节点  $v_i, v_j$  之间的路段 ( $i \neq j, v_i, v_j \in V, e_{ij} \in E$ );  $P$  为运输方式集合,  $p_a \in P, a$  取 1、2、3 分别表示公路、铁路和水路运输。设长大货物以运输方式  $p_a$  通过路段  $e_{ij}$  的运输时间、运输费用和运输里程分别为  $t_{ija}, c_{ija}$  和  $d_{ija}$ ; 路段  $e_{ij}$  在运输方式  $p_a$  下的综合限界、桥梁最大承载能力分别为  $L_{ija}$  和  $G_{ija}$ ; 长大货物在节点  $v_i$  由运输方式  $p_a$  换成  $p_b (a \neq b, p_b \in P)$  时所需的换装时间、换装费用分别为  $\tau_{iab}, \delta_{iab}$ ;  $u_{iab}$  为在节点  $v_i$  能否满足长大货物由运输方式  $p_a$  换成运输方式  $p_b$  的换装要求(以节点起重设备的起重能力为衡量标准),  $u_{iab}$  取 1 表示能够满足货物换装要求, 否则  $u_{iab}$  取 0; 节点  $v_i$  的外邻节点集合为  $\varphi(i)=\{v_j | e_{ij} \in E\}$ , 内邻节点集合为  $\beta(i)=\{v_j | e_{ji} \in E\}$ ; 长大货物以运输方式  $p_a$  运输时, 其装后轮廓(含装运工具)为  $K_a$ , 车货总质量为  $Q_a$ ; 设决策变量  $x_{ija}$  表示长大货物是否以运输方式  $p_a$  通过路段  $e_{ij}$ ,  $x_{ija}$  为 1 表示该货物以运输方式  $p_a$  通过路段  $e_{ij}$ , 否则  $x_{ija}$  为 0; 设决策变量  $y_{iab}$  表示长大货物是否选择在节点  $v_i$  将其运输方式由  $p_a$  换成  $p_b$ ,  $y_{iab}$  为 1 表示长大货物在节点  $v_i$  将其运输方式由  $p_a$  转换成  $p_b$ , 否则  $y_{iab}$  为 0。

综合考虑长大货物多式联运路径优化问题的影响因素, 建立以总运输时间、总运输里程、总运输费用最小为目标函数的长大货物多式联运路径原始优化模型, 即

$$\min S_1 = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija} t_{ija} + \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{iab} \tau_{iab} \quad (1)$$

$$\min S_2 = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija} d_{ija} \quad (2)$$

$$\min S_3 = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija} c_{ija} + \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{iab} \delta_{iab} \quad (3)$$

$$\text{s. t. } x_{ija} K_a \leq L_{ija} \quad (4)$$

$$x_{ija} Q_a \leq G_{ija} \quad (5)$$

$$y_{iab} \leq u_{iab} \quad (6)$$

$$\sum_{j \in \{j | v_j \in \varphi(i)\}} \sum_{a=1}^3 x_{ija} - \sum_{j \in \{j | v_j \in \beta(i)\}} \sum_{a=1}^3 x_{jia} = \begin{cases} 1 & v_i \text{ 为起点} \\ 0 & v_i \text{ 不为起点或终点} \\ -1 & v_i \text{ 为终点} \end{cases} \quad (7)$$

$$\sum_{a=1}^3 x_{ija} \leq 1 \quad (8)$$

$$\sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 y_{iab} \leq 1 \quad (9)$$

$$\sum_{j \in \{j | v_j \in \beta(i)\}} x_{jia} + \sum_{j \in \{j | v_j \in \varphi(i)\}} x_{ijb} \geq 2y_{iab} \quad (10)$$

式中:  $S_1$  为长大货物多式联运的总运输时间(包括路段运输时间和节点换装时间);  $S_2$  为长大货物多式联运的总运输里程;  $S_3$  为长大货物多式联运的总运输费用(包括路段运输费用和节点换装费用); 式(4)保证轮廓不能超过其沿途各路段的限界; 式(5)保证车货总质量不能超过沿途各路段的桥梁承载能力; 式(6)保证长大货物的换装作业只能在满足换装条件的节点进行; 式(7)保证节点流量输入输出平衡; 式(8)保证该货物在每一路段只能选择某一种特定的运输方式; 式(9)保证长大货物在每个节点最多只能办理 1 次换装作业; 式(10)保证长大货物多式联运的连续性。

长大货物多式联运路径优化问题为多目标规划问题, 在解决多目标规划问题时, 通常采用线性加权的方法将多目标转化为单目标进行求解<sup>[19]</sup>, 但长大货物多式联运路径优化目标具有不同的量纲, 必须先进行量纲为 1 处理。

设该问题现有  $m$  个可行方案,  $S_{k'l}$  为第  $l$  个方案的第  $k'$  目标函数值,  $k'=1, 2, 3, l=1, 2, \dots, m$ 。将目标函数值  $S_{k'l}$  处理成量纲为 1 的目标  $\gamma_{k'l}$ , 即

$$\gamma_{k'l} = \begin{cases} 0 & S_{k'l} \leq S_{k' \min} \\ \frac{S_{k'l} - S_{k' \min}}{S_{k' \max} - S_{k' \min}} & S_{k' \min} < S_{k'l} < S_{k' \max} \\ 1 & S_{k'l} \geq S_{k' \max} \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $S_{k' \min}$ 、 $S_{k' \max}$  分别为目标函数  $S_{k'}$  出现过的最小

值和最大值。

设  $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ 、 $\gamma_3$  分别为量纲为 1 的长大货物多式联运总运输时间、总运输里程和总运输费用的目标函数。考虑决策者偏好程度, 设目标函数的权重向量为  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \omega_3)$ ,  $\gamma$  为综合目标函数, 不改变约束条件, 将长大货物多式联运路径原始优化模型转化为对应的单目标优化模型, 即

$$\min \gamma = \omega_1 \gamma_1 + \omega_2 \gamma_2 + \omega_3 \gamma_3 \quad (12)$$

## 2.2 扩展优化模型

某些路段的限界、桥梁承载能力及节点上的起重设备起重能力具有可改造性, 按改造后的路网进行长大货物多式联运路径优化可能会获得更加合理的运输方案。基于此, 应统筹考虑限界、桥梁承载能力和节点起重设备起重能力的可改造特征, 进一步拓展长大货物多式联运路径原始优化模型。

若对路段  $e_{ij}$  进行限界改造, 设该路段改造后的综合限界为  $L_{ija1}$ , 限界改造所需时间、费用分别为  $t_{ija1}$  和  $c_{ija1}$ ; 若不进行限界改造, 则  $L_{ija1} = L_{ija}$ ,  $t_{ija1} = c_{ija1} = 0$ 。改造后, 路段  $e_{ij}$  的限界约束条件式(4)为

$$x_{ija} K_a \leq L_{ija1} \quad (13)$$

若对路段  $e_{ij}$  进行桥梁改造或加固, 使得桥梁承载能力提高为  $G_{ija1}$ , 设改造工程所需时间、费用分别为  $t_{ija2}$  和  $c_{ija2}$ ; 若不进行桥梁加固, 则  $G_{ija1} = G_{ija}$ ,  $t_{ija2} = c_{ija2} = 0$ 。改造后, 路段  $e_{ij}$  的桥梁承载能力约束条件式(5)为

$$x_{ija} Q_a \leq G_{ija1} \quad (14)$$

若对  $u_{iab} = 0$  的节点  $v_i$  的起重设备进行改造或从别处调用移动起重设备, 使之具备换装能力, 则该节点的换装能力  $u_{iab1}$  取值为 1, 改造或调用所需时间、费用分别为  $\tau_{iab1}$  和  $\delta_{iab1}$ ; 若不进行起重能力改造, 则  $u_{iab1} = u_{iab}$ ,  $\tau_{iab1} = \delta_{iab1} = 0$ 。改造后, 节点  $v_i$  的换装可行性约束条件式(6)为

$$y_{iab} \leq u_{iab1} \quad (15)$$

由于各项改造工程可同时进行, 因此, 路段  $e_{ij}$  的总改造时间  $t_{ija3}$  可记为

$$t_{ija3} = \max\{t_{ija1}, t_{ija2}\} \quad (16)$$

路段  $e_{ij}$  的总改造费用  $c_{ija3}$  等于各项改造费用之和, 可记为

$$c_{ija3} = c_{ija1} + c_{ija2} \quad (17)$$

改造后, 长大货物多式联运总运输时间为

$$S'_1 = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija} t_{ija} + \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{iab} \tau_{iab} + \max\{\max(x_{ija} t_{ija3}), \max(y_{iab} \tau_{iab1})\} \quad (18)$$

长大货物多式联运总运输距离计算方法保持不变,改造后,长大货物多式联运总运输费用为

$$S'_3 = \sum_{a=1}^3 \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n x_{ija} (c_{ija} + c_{ija3}) + \sum_{a=1}^3 \sum_{b=1}^3 \sum_{i=1}^n y_{iab} (\delta_{iab} + \delta_{iab1}) \quad (19)$$

设  $\gamma'_1$ 、 $\gamma'_2$  和  $\gamma'_3$  分别为扩展后的量纲为 1 的长大货物多式联运总运输时间  $S'_1$ 、总里程  $S'_2$  和总费用  $S'_3$  的目标函数,  $\gamma'$  为扩展后的综合目标函数,模型可进一步改写成长大货物多式联运扩展优化模型,即式(12)更新为

$$\min \gamma' = w_1 \gamma'_1 + w_2 \gamma'_2 + w_3 \gamma'_3 \quad (20)$$

原始优化模型的其他约束条件不变,式(4)~(6)更新为式(13)~(15)。

### 3 遗传算法求解

长大货物多式联运路径优化问题是一个求解多目标、多权值、多约束的运输网络中两节点间最短路径问题,该问题已被证明是 NP-hard 问题<sup>[20]</sup>,设计遗传算法求解模型。给定群体规模  $K$ 、最大进化代数  $G$ 、交叉概率  $p_c$ 、变异概率  $p_m$  及进化终止条件,长大货物多式联运路径优化问题的遗传算法求解框架见图 1。

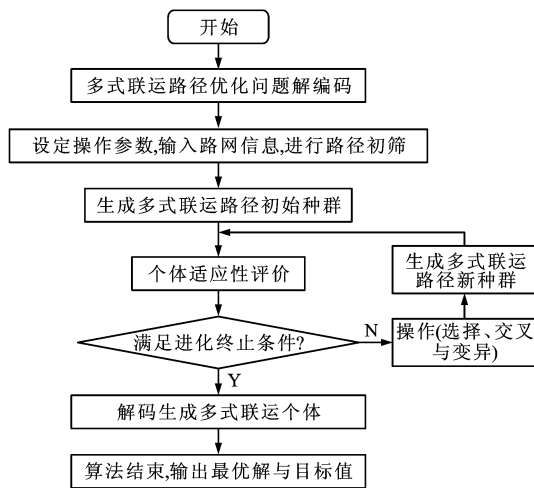


图 1 算法流程

Fig. 1 Algorithm flow

多式联运路径优化的遗传算法求解过程分为以下几步。

Step 1: 编码与解码。若直接对长大货物多式联运路径优化问题的决策变量  $x_{ija}$  和  $y_{iab}$  进行二进制编码,会导致编码长度过大,影响算法效率。长大货物多式联运运输路径取决于经由节点顺序、各节点间的运输方式,设计基于节点及运输方式的二维

序列进行编码,即

$$\begin{pmatrix} d_1 & d_2 & \cdots & d_n \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{pmatrix}$$

式中:多式联运运输节点序列  $d = (d_1, d_2, \dots, d_n)$  为多式联运节点集合  $V$  中所有节点的一个排列;  $d_k = v_j (k=1, 2, \dots, n, v_j \in V)$  表示节点  $v_j$  是对应运输路径中的第  $k$  个运输节点;  $d_1 = v_s$ , 即运输节点序列第 1 个节点为运输任务的起点; 运输方式序列  $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$  是基于路段运输方式的一个序列;  $z_k = p_a (k > 1)$  表示长大货物采用运输方式  $p_a$  通过节点  $d_{k-1}$ 、 $d_k$  之间的路段,  $z_1 = 0$ 。

长大货物多式联运的运输方案可解码成

$$d_1 \xrightarrow{z_2} d_2 \xrightarrow{z_3} \cdots \xrightarrow{z_n} d_n$$

长大货物多式联运运输任务的终点  $v_t$  可能出现在  $d_1$  之后的任何位置,运输路径记录到终点  $v_t$  出现的位置,目标函数的计算也截至这一位置的相关过程中。

Step 2: 路径初筛。根据长大货物多式联运的特殊性,对多式联运原始或改造后的运输网络进行路径初筛,剔除不满足线路限界、桥梁承载能力约束的路段,网络中实际不存在路段的运输费用、运输里程和运输时间均设置为  $+\infty$ 。

Step 3: 生成初始种群。采用随机的方法生成  $K$  个可行解,作为原始初始种群。

Step 4: 适应性评价。以目标函数值的大小(按式(20)计算确定取值)衡量染色体的适应性,即目标函数值越小,其个体适应性越强;反之,其个体适应性越差。按目标函数值升序排列所有染色体,由前  $K$  条染色体共同构成新种群。

Step 5: 选择与交叉。按照交叉概率  $p_c$  选择 2 个父代个体的染色体  $f_1$ 、 $f_2$ , 各自的运输节点序列为  $d_{f_1}$ 、 $d_{f_2}$ , 运输方式序列为  $z_{f_1}$ 、 $z_{f_2}$ 。对于运输节点序列,按部分匹配交叉法对  $d_{f_1}$ 、 $d_{f_2}$  编码串进行交叉运算,得到 2 个子代运输节点序列<sup>[21]</sup>。对于运输方式序列,假定子代运输方式序列与父代运输方式序列  $z_{f_1}$ 、 $z_{f_2}$  保持一致,并结合子代运输节点序列和既有运输网络,分析子代运输方式序列是否可行。若可行,则保持不变;若不可行,则随机选取可行的运输方式。若均不存在可行的运输方式,则重新选择父代个体进行二次交叉操作。

Step 6: 变异。按照变异概率  $p_m$  选择变异个体,分别对个体运输节点序列和运输方式序列进行逆转变异操作即在选定序列编码串中随机选取两

点,将两点间的子串逆序排列。

Step 7:进化终止条件。若连续若干代的最优解相同,则终止迭代,解码并输出最优个体与目标函数值;否则,一直迭代至最大进化代数  $G$ 。

### 4 计算结果分析

某运输企业承运一台质量约为 310 t、外形尺寸为 12 630 mm×3 440 mm×4 850 mm 的换流变压器,货主要求从河北保定(节点 1)运送至上海港(节点 11),多式联运网络结构见图 2,图中数字为节点编号,公、铁、水分别代表公路、铁路、水路运输。根据相关规定和经验:对于该件货物,水路运输时采用

1 500 t 级驳船;公路运输时牵引车选用 Benz Actros 4150 8×8,装载车选用 3 纵列 12 轴液压平板车,装后总质量约为 374 t,装后尺寸为 18 120 mm×4 800 mm×6 200 mm;铁路运输时选用 DK36 车辆装运,装后车货总质量约为 440 t,其装后尺寸见表 1。各节点换装信息、节点 1~11 之间的多式联运网络信息分别见表 2、3。表 3 中:“—”表示不改造即可通过该路段,其桥梁承载能力与综合限界均视作无穷大;运输信息表示路段在不改造即可通过或改造后可通过情形下,通过该路段的运输时间与运输费用;改造信息表示路段改造时间与改造费用,不含运输时间与费用。

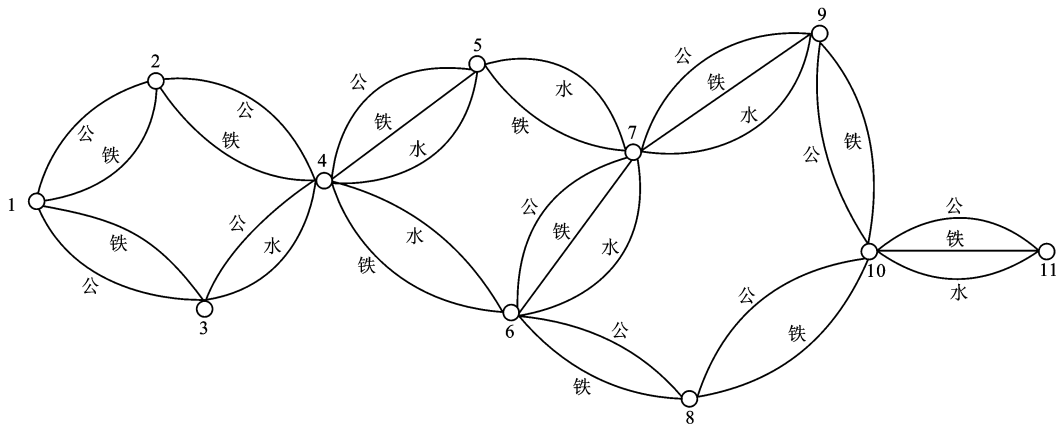


图 2 多式联运网络结构

Fig. 2 Network structure of multimodal transport

表 1 铁路运输时货物装载后的轮廓尺寸

Tab. 1 Profile dimension after cargo loading for

railway transport			mm	
侧高 次序	距轨面 高度	货物及车 辆半宽	300 m 曲线半 径使用中导向 时的半宽	300 m 曲线半 径使用内导向 时的半宽
中心高	5 100	1 530	1 864	1 738
一侧高	4 694	1 560	1 894	1 768
二侧高	3 990~1 200	1 990	2 324	2 198
三侧高	1 220~1 140	1 730	2 064	1 938
四侧高	250	1 470	1 804	1 678

取运输时间、里程和费用的权重向量为  $\omega = (0.3, 0.3, 0.4)$ 。遗传算法操作参数设定:群体规模  $K$  取 100,最大进化代数  $G$  取 1 000,交叉概率  $p_c$  与变异概率  $p_m$  分别取 1.0 与 0.5,进化终止条件为连续 50 代最优解相同。采用长大货物多式联运遗传算法求解,程序迭代 56 次,运行时间 2.933 s,货物的最优联运路径与运输方式为

$$1 \xrightarrow{1} 3 \xrightarrow{1} 4 \xrightarrow{1} 5 \xrightarrow{2} 7 \xrightarrow{2} 9 \xrightarrow{2} 10 \xrightarrow{2} 11$$

该货物首先经由公路从起始节点运至节点 5,

表 2 换装信息

Tab. 2 Reloading information

运输方式		换装时间/ d	换装费用/ 万元	满足换装条件 的节点
换装前	换装后			
1	2	1.0	1.5	2、3、5、8
1	3	2.0	7.0	3、5、7、10
2	1	1.0	1.5	2、3、5、8
2	3	2.0	9.0	2、5、7
3	1	1.5	10.0	3、5、7、10
3	2	1.5	10.0	2、5、7

在节点 5 办理公铁换装作业,再由铁路直接将货物运至目的地。长大货物多式联运遗传算法计算结果见表 4,将表 4 中数据作量纲为 1 处理后,最优总运输时间、里程、费用分别为 0.026 7、0.444 2、0.150 5,加权后的目标函数值为 0.201 5。

采用遗传算法、模拟退火算法求解长大货物多式联运路径优化问题、单一铁路运输方式运输问题,计算结果见表 5、图 3~5。

由表 5、图 3~5 可知,采用方法 1 求解长大货

表 3 运输网络信息

Tab. 3 Transport network information

序号	起始节点	终止节点	运输方式	桥梁承载能力/t	路段限界 通过状况	里程/km	运输信息		改造信息	
							时间/d	费用/万元	时间/d	费用/万元
1	1	2	1	600	改造后可通过	175	1.0	5.40	3.0	6.00
2	1	2	2	600	改造后可通过	185	1.0	2.87	3.5	8.00
3	1	3	1	500	改造后可通过	120	0.6	3.70	3.0	5.00
4	1	3	2	600	改造后可通过	130	0.6	2.02	4.0	8.00
5	2	4	1	600	改造后可通过	152	0.8	4.71	2.5	4.50
6	2	4	2	530	改造后可通过	156	0.9	2.80	2.5	6.50
7	3	4	1	650	改造后可通过	108	0.5	1.67	4.0	9.00
8	3	4	3	—	—	123	1.0	0.40	0.0	0.00
9	4	5	1	600	—	212	1.5	6.57	0.0	0.00
10	4	5	2	700	改造后可通过	243	1.5	2.30	5.0	8.00
11	4	5	3	—	—	250	2.0	0.80	0.0	0.00
12	4	6	2	700	改造后可通过	205	1.0	2.00	6.0	12.00
13	4	6	3	—	—	230	2.0	0.70	0.0	0.00
14	5	7	2	650	改造后可通过	165	1.0	1.54	3.0	5.00
15	5	7	3	—	—	180	1.5	0.60	0.0	0.00
16	6	7	1	650	改造后可通过	190	1.0	5.89	4.0	7.00
17	6	7	2	700	改造后可通过	200	1.0	1.76	5.0	8.00
18	6	7	3	—	—	210	1.8	0.70	0.0	0.00
19	6	8	1	650	改造后可通过	145	0.7	4.50	2.0	3.50
20	6	8	2	700	改造后可通过	155	1.0	1.50	2.5	4.00
21	7	9	1	650	改造后可通过	174	0.9	5.40	5.0	8.00
22	7	9	2	480	改造后可通过	167	0.9	5.20	5.2	9.00
23	7	9	3	—	—	192	1.0	1.80	0.0	0.00
24	8	10	1	600	改造后可通过	213	1.3	6.60	6.0	15.00
25	8	10	2	530	改造后可通过	287	2.0	2.30	4.0	13.00
26	9	10	1	650	改造后可通过	170	1.0	5.30	4.0	8.00
27	9	10	2	650	改造后可通过	180	1.0	1.67	4.5	6.80
28	10	11	1	700	改造后可通过	150	0.8	4.65	6.0	11.30
29	10	11	2	700	—	164	0.8	1.53	0.0	0.00
30	10	11	3	—	—	182	1.5	0.60	0.0	0.00

表 4 遗传算法计算结果

表 5 不同方法的计算结果比较

Tab. 4 Calculation results by using genetic algorithm

项目	最小值	最大值	最优解
时间/d	12.3	19.8	12.5
里程/km	941	1 335	1 116
费用/万元	51.70	94.75	58.18

物多式联运路径优化问题的解明显优于方法 2 求解该问题,采用方法 1 得到的多式联运运输方案的最优总运输时间、里程和费用分别为 12.5 d、1 116 km、58.18 万元,采用方法 2 得到的结果为 15.5 d、

Tab. 5 Results comparison of different methods

方法类型	最佳运输方案	目标函数值	优化程度/%
遗传算法+多式联运(方法 1)	$1 \xrightarrow{1} 3 \xrightarrow{1} 4 \xrightarrow{1} 5 \xrightarrow{2} 7$ $7 \xrightarrow{2} 9 \xrightarrow{2} 10 \xrightarrow{2} 11$	0.201 5	52.22
模拟退火算法+多式联运(方法 2)	$1 \xrightarrow{1} 3 \xrightarrow{1} 4 \xrightarrow{1} 5 \xrightarrow{3} 7$ $\xrightarrow{2} 9 \xrightarrow{2} 10 \xrightarrow{2} 11$	0.421 7	—
遗传算法+单一运输(方法 3)	$1 \xrightarrow{2} 2 \xrightarrow{2} 4 \xrightarrow{2} 7$ $6 \xrightarrow{2} 8 \xrightarrow{2} 10 \xrightarrow{2} 11$	0.221 3	47.53

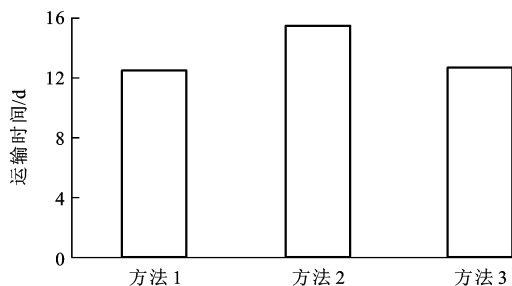


图 3 运输时间比较

Fig. 3 Comparison of transport times

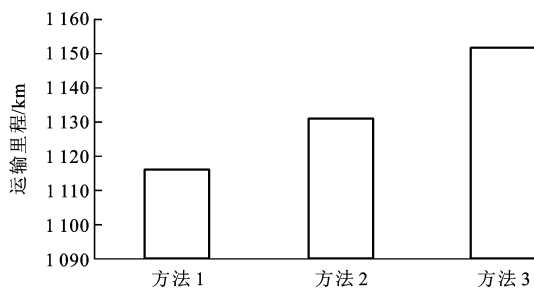


图 4 运输里程比较

Fig. 4 Comparison of transport mileages

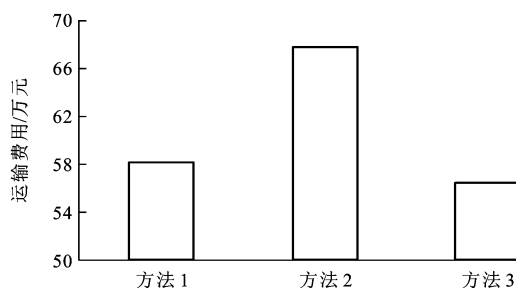


图 5 运输费用比较

Fig. 5 Comparison of transport costs

1 131 km、67.74 万元,方法 1 在总运输时间、里程和费用上全面优于方法 2,优化程度依次是 19.4%、1.3%、14.1%,总体而言前者优化程度高达 52.22%,优化效果极其显著;二者运输路径相同,但前者仅在节点 5 有 1 次公铁换装作业,换装费用为 1.5 万元,后者在节点 5、7 分别有 1 次公水、水铁换装作业,换装费用达 17 万元,因此,尽可能减少换装作业有利于降低总运输费用,降低目标函数值。采用方法 3 得到的总运输时间、里程和费用依次为 12.7 d、1 152 km、56.5 万元,虽然其总运输费用较低,但方法 1 在总运输时间和里程上优化了 1.2%、3.1%,综合考虑总运输时间、里程和费用,方法 1 的最优目标函数值优化了 8.95%,优化效果较为显著。本文提出的长大货物多式联运路径优化方法更有利于降低长大货物运输成本,同时也可看出遗传算法对于求解长大货物多式联运路径优化问题是有效可行的。

## 5 结 语

统筹考虑长大货物多式联运路径优化问题的影响因素以及线路限界、桥梁承载能力和起重设备起重能力的可改造性特征,以总运输时间最短、总运输里程最短和总运输费用最少为优化目标,构造长大货物多式联运原始优化模型和扩展优化模型。论文提出的长大货物多式联运路径优化方法能够快速制定出合理的多式联运运输方案,较好地解决长大货物多式联运路径优化问题。长大货物多式联运是一项极其复杂的系统工程,模型参数取值会发生随机变动,考虑多式联运过程中运输时间与费用的随机性、不同路段不同运输方式的风险差异性等,如何将上述因素融入到解决长大货物多式联运路径优化问题将是下一步研究的主要工作。

## 参 考 文 献 :

### References :

- [1] 蔡建华,张剑飞. 超限运输的成因及治理对策[J]. 中国公路学报, 2006, 19(3): 100-105.  
CAI Jian-hua, ZHANG Jian-fei. Cause of overweight transportation and administration countermeasure[J]. China Journal of Highway and Transport, 2006, 19(3): 100-105. (in Chinese)
- [2] 尹晔飞. 超限超重货物运输方案研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.  
YIN Ye-fei. Research on project of the special train of out-of-gauge and overweight goods transportation[D]. Changsha: Central South University, 2009. (in Chinese)
- [3] 赵晓光,何建中,宋德星. 国内水路运输管理条例释义[M]. 北京: 人民交通出版社, 2012.  
ZHAO Xiao-guang, HE Jian-zhong, SONG De-xing. China Waterway Transportation Management Regulation Explanation[M]. Beijing: China Communications Press, 2012. (in Chinese)
- [4] 雷定猷. 货物装运优化理论与应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2005.  
LEI Ding-you. On optimizing theory and application of goods loading and carrying[D]. Changsha: Central South University, 2005. (in Chinese)
- [5] 吴 强. 大件货物加氢反应器运输方案设计与实施[D]. 大连: 大连海事大学, 2006.  
WU Qiang. The design and implementation of hydrogenation reactor transport scheme[D]. Dalian: Dalian Maritime University, 2006. (in Chinese)
- [6] RAY J J. A web-based spatial decision support system optimizes routes for oversize/overweight vehicles in delaware[J]. Decision Support Systems, 2007, 43(4): 1171-1185.
- [7] 乔国会,张东杰,聂钦中,等. 大件货物公路运输线路选择方法研究[J]. 物流技术, 2010, 29(7): 55-57.  
QIAO Guo-hui, ZHANG Dong-jie, NIE Qin-zhong, et al.



- Research on the route selection of outsize cargo highway transportation[J]. Logistics Technology, 2010, 29(7): 55-57. (in Chinese)
- [8] 罗建. 公路大件运输线路选择方案及模型研究[J]. 西华大学学报:自然科学版, 2013, 32(4): 71-76.  
LUO Jian. Study on the route selection scheme and model about heavy-cargo highway transportation[J]. Journal of Xihua University: Natural Science Edition, 2013, 32(4): 71-76. (in Chinese)
- [9] 汤波, 雷定猷, 张英贵. 铁路超限超重货物运输径路综合优化模型与算法[J]. 计算机应用研究, 2012, 29(8): 2876-2881.  
TANG Bo, LEI Ding-you, ZHANG Ying-gui. Integrated optimizing model and algorithms of transportation route in out-of-gauge and overweight freights of railway[J]. Application Research of Computers, 2012, 29(8): 2876-2881. (in Chinese)
- [10] 汤波. 铁路超限超重货物运输优化研究[D]. 长沙:中南大学, 2012.  
TANG Bo. Optimization research on out-of-gauge and overweight goods transportation by railway[D]. Changsha: Central South University, 2012. (in Chinese)
- [11] LOZANO A, STORCHI G. Shortest viable path algorithm in multimodal networks[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2001, 35(3): 225-241.
- [12] LAM S K, SRIKANTHAN T. Accelerating the  $K$ -shortest paths computation in multimodal transportation networks[C]//IEEE. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation System. Singapore: IEEE, 2002: 491-495.
- [13] BOUSSEDJRA M, BLOCH C, MOUDNI A E. An exact method to find the intermodal shortest path[C]//IEEE. 2004 IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control. Taipei: IEEE, 2004: 1075-1080.
- [14] 王涛, 王刚. 一种多式联运网络运输方式的组合优化模式[J]. 中国工程科学, 2005, 7(10): 46-50.  
WANG Tao, WANG Gang. A combined optimization model for transportation modes of multimodal transport[J]. Engineering Sciences, 2005, 7(10): 46-50. (in Chinese)
- [15] 苏印, 李铁柱. 国际多式联运线路选择的方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2006, 6(2): 91-94.  
SU Yin, LI Tie-zhu. A route choice method for international multi-modal transportation[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2006, 6(2): 91-94. (in Chinese)
- [16] 康凯, 牛海娇, 朱越杰, 等. 基于粒子群蚁群算法求解多式联运中运输方式与运输路径集成优化问题[J]. 物流工程与管理, 2009, 31(10): 61-65.  
KANG Kai, NIU Hai-jiao, ZHU Yue-jie, et al. Research on improved integrated optimization model for mode and route in multimodal transportation basing on the PSO-ACO[J]. Logistics Engineering and Management, 2009, 31(10): 61-65. (in Chinese)
- [17] 王金华. 基于运输合理化的多式联运路径优化[D]. 上海:上海交通大学, 2010.  
WANG Jin-hua. Optimization of the path of the multimodal network on the base of transport rationalization[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2010. (in Chinese)
- [18] 刘尧. 公路桥梁在大件运输中的若干问题研究[D]. 杭州:浙江大学, 2006.  
LIU Yao. The study on the problems of the bridges in the project of the large-scale equipments transportation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006. (in Chinese)
- [19] 肖晓伟, 肖迪, 林锦国, 等. 多目标优化问题的研究概述[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(3): 805-808.  
XIAO Xiao-wei, XIAO Di, LIN Jin-guo, et al. Overview on multi-objective optimization problem research[J]. Application Research of Computers, 2011, 28(3): 805-808. (in Chinese)
- [20] 康凯, 牛海娇, 朱越杰, 等. 多式联运中运输方式与运输路径集成优化模型研究[J]. 计算机应用研究, 2010, 27(5): 1672-1675.  
KANG Kai, NIU Hai-jiao, ZHU Yue-jie, et al. Research of improved integrated optimization model for mode and route in multimodal transportation[J]. Application Research of Computers, 2010, 27(5): 1672-1675. (in Chinese)
- [21] 符卓. 开放式车辆路径问题及其应用研究[D]. 长沙:中南大学, 2003.  
FU Zhuo. The open vehicle routing problems and their application[D]. Changsha: Central South University, 2003. (in Chinese)