

# 考虑货主时间价值的货物列车开行方案优化

王志美<sup>1,2</sup>, 张星臣<sup>2</sup>, 陈军华<sup>2</sup>

(1. 北京交通大学 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京 100044; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044)

**摘要** 随着高铁建设成网, 既有线货运能力得到极大释放, 为满足户主时效性需求的小编组高频次货物列车的开行创造了条件. 当前开行方案的编制通常仅从铁路运输企业自身的经济效益出发, 很少考虑货主时间价值需求对运输方案的影响; 此外, 在方案编制过程中, 很少将发到站相同但归属于不同货主的车流区分对待. 因此, 本文在综合考虑铁路运输企业和货主两方面因素的基础上, 结合新形势下为减少换装等待时间采取的欠轴运输策略, 对既有模型的目标函数进行改造: 增加单位列车的固定和变动开行费用以及不满足货主时间价值需求的惩罚费用, 并进行线性化处理, 降低模型求解的复杂度. 设计了并行禁忌算法, 实现了模型的求解, 验证了模型的正确性和算法的可行性.

**关键词** 铁路货物运输; 开行方案; 开行频度; 货主时间价值; 编成辆数

## Freight train service design problem with the time value of shipper

WANG Zhimei<sup>1,2</sup>, ZHANG Xingchen<sup>2</sup>, CHEN Junhua<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;  
2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

**Abstract** As high-speed railway network gradually developed, freight transportation capacity of existing railway lines have been released, which create the condition for operating high frequency loaded freight trains to meet the market demand. The current operation plan can hardly considered the time value of freight owners, which only take the railway transportation enterprise's economic benefits into consideration. In addition, in the process of designing operation plan, it is unreasonable to treat the traffic flow which has the same arrival-departure stations but belongs to different owners as the same. Therefore, this paper combine the benefits of railway transportation enterprise and freight owners, take the underloaded transportation strategy in consideration, modify the objective of the existing model as follows: increase the fixed and variable costs for per train and punishment fee which has not met time demands of the freight owners, we also linearize the quadratic term in objective function to decrease the complexity of model. Finally, a parallel tabu algorithm was designed to solve this model, a case study has been carried out to verify the validity of this model and feasibility of this algorithm.

**Keywords** freight railway transportation; freight train service; train frequency; time value; train size

收稿日期: 2014-11-24

作者简介: 王志美 (1984-), 女, 汉, 河南民权人, 讲师, 博士, 研究方向: 运输组织优化, 城市轨道交通运营管理, E-mail: zmwang@bjtu.edu.cn.

基金项目: 轨道交通控制与安全国家重点实验室自主课题 (RCS2014ZTY6); 科技部“863”课题 (T15B200011); 教育部中央高校基本科研业务费 (T15JB00190, T16RC00010)

Foundation item: The State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety (RCS2014ZTY6); National High-tech R&D Program of China (863 Program) (T15B200011); the Fundamental Research Funds for the Central Universities (T15JB00190, T16RC00010)

中文引用格式: 王志美, 张星臣, 陈军华. 考虑货主时间价值的货物列车开行方案优化 [J]. 系统工程理论与实践, 2016, 36(9): 2328-2336.

英文引用格式: Wang Z M, Zhang X C, Chen J H. Freight train service design problem with the time value of shipper[J]. Systems Engineering — Theory & Practice, 2016, 36(9): 2328-2336.

1 引言

随着高铁建设成网, 既有线货运能力得到极大释放. 为吸引更多货流到铁路, 铁路部门必须重视货主的高时效性需求, 才能提高客户的满意度和忠诚度. 为满足货主的高时效性需求, 铁路部门除推行一系列简化作业流程的实货制改革方案外, 还需制定出充分考虑分类别的货主时效性需求的开行方案, 才能适应市场需求, 最终在与其他方式竞争中立于不败之地.

当前我国在制定通用的货物列车运输组织优化方案时, 通常仅从铁路运输企业自身的经济效益出发, 即在合理利用线路和站点能力前提下使得自身运输成本最小<sup>[1-6]</sup>, 较少考虑货物运输需求方的满意度对其运输需求带来的影响. 对“小批量、高附加值、高时效”的快捷货物组织问题进行研究的学者<sup>[7-8]</sup>通常会考虑货物运送的时效性, 对送达时间、运输的安全可靠性要求较高, 但较少考虑货主不同对货运组织策略的影响, 仅有文献<sup>[9]</sup>考虑了货主的满意度. 但文献<sup>[9]</sup>仅以快捷货物为研究对象, 且未考虑车流的树形径路特性. 其他考虑货主满意度的研究多数从空车调配过程着手, 而不是整个运输过程<sup>[10-11]</sup>. 国外对货物列车编组计划的研究较多<sup>[12-13]</sup>, 但他们的货运线路条件、车流结构以及组织方法与国内有很大不同, 故无法完全借鉴.

此外, 当前货运线路能力较高铁开通前得到极大释放, 从减少车流集结时间角度, 应允许部分去向列车欠轴运输, 但这种情况下会导致机车牵引能力未充分利用. 因而, 在当前的运输新特征下, 有必要将多消耗的机车数和因减少等待时间提高的客户满意度在开行方案编制过程中进行权衡.

因而, 本文在综合考虑铁路运输企业、货主两方面因素的基础上, 结合新形势下为节省集结时间、提高铁路竞争力可能采取的欠轴运输策略, 对既有货物列车开行方案优化模型的目标函数进行改造: 除了考虑车流的集结和改编费用外, 增加每列牵引机车的固定和变动费用, 以及不满足货运需求方时效性要求下的不满意惩罚费用. 在细化考虑货运需求方的满意度时, 以实际运输过程中相同发到站货物可能来源于多个货主, 每个货主对货物运送的时效性要求不尽相同为依据, 本文按照货物运送时效性从高到低的顺序对货主进行分类, 且在求解过程中允许高时效性要求的货物可不按照树形径路约束运行.

2 模型的构建

2.1 模型参数

- $G = (N, A)$ : 表示直达去向的网络, 有  $N$  个技术站, 可能的去向弧集合为  $A$ ;
- $v_{stp}$ : 表示发到站为  $s$  至  $t$  的第  $p$  个客户发送车流量 (车);
- $d_{ij}$ : 表示  $i \rightarrow j$  之间的里程数 (公里);
- $s_{ij}$ : 表示  $i \rightarrow j$  之间运行时间 (小时);
- $flow_{ij}$ : 表示  $i \rightarrow j$  直达去向吸引的车流量 (车);
- $m_{ij}$ : 表示  $(i, j)$  弧上运行的单位直达列车最大编成辆数 (车);
- $T_i$ : 表示  $i$  站开行一个直达去向的集结参数;
- $h_i$ : 单位车辆和技术站  $i$  进行改编的费用 (车小时);
- $C_i$ : 为技术站  $i$  拥有的分类线数 (条);
- $R_i$ : 为  $i$  站能承受的最大改编车数 (车);
- $\delta_{uv}^{ij}$ : 表示直达去向  $i \rightarrow j$  经过相邻区段  $u \rightarrow v$ ;
- $ct_{uv}$ : 表示区段  $u \rightarrow v$  最大通过能力, 该能力与  $v \rightarrow u$  方向可相同也不可不同 (车);
- $\alpha$ : 表示车小时与人民币的换算系数;
- $\rho$ : 只要被作为牵引机车, 就有一个固定费用 (元);
- $\theta$ : 单位公里单位车辆的牵引费用 (元).

2.2 决策变量

- 1) 车流与列车方案的关联变量: 决策变量  $x_{ij}^{stp} = 1$  时, 发到站分别为  $s$  和  $t$  的第  $p$  个客户车流选择  $i$  到  $j$  直达去向运输, 否则为 0;
- 2) 列车去向开行与否决策变量: 对于决策变量  $x_{ij}$ , 若在  $(i, j)$  弧上开行直达去向, 则取值为 1, 否则为 0;
- 3) 列车开行频度决策变量  $y_{ij}$ , 其取值范围为大于等于 0 的整数. 当直达去向存在时 ( $x_{ij} = 1$ ), 该去向开行列数至少一列, 即  $y_{ij} > 0$ ; 当直达去向不存在时 ( $x_{ij} = 0$ ), 必然有  $y_{ij} = 0$ ;

4) 相同到站车流的树形运输决策: 对于决策变量  $w_{it}^j$ , 若终到站为  $t$  的车辆在  $i$  站改编后的后续改编站为  $j$  时, 且  $j$  在  $i \rightarrow t$  的物理径路上, 则取值为 1, 否则为 0.

### 2.3 约束条件

1) 车流改编链接续约束. 即对于同一股流, 其可选择的运输方案是唯一的, 且改编链是连续的, 保证车流能够从始发站送往终到站.

$$\sum_{j:(i,j) \in A} X_{ij}^{stp} = 1 \quad i = s, i \neq t, s, t \in N, p \in P \quad (1)$$

上式表示对于  $s \rightarrow t$  中  $p$  类客户的车流必须在其出发站选择集结到其中一个出发去向中;

$$\sum_{j:(i,j) \in A} X_{ij}^{stp} - \sum_{j:(j,i) \in A} X_{ji}^{stp} = 0 \quad i \neq s, i \neq t, s, t \in N, p \in P \quad (2)$$

上式表示在  $s \rightarrow t$  物理径路上的某个中间站  $i$ , 有去向将该股流运入  $i$  站, 必然有出发去向将该股流从  $i$  站运出;

$$\sum_{j:(j,i) \in A} X_{ji}^{stp} = 1 \quad i \neq s, i = t, s, t \in N, p \in P \quad (3)$$

上式表示车流  $s \rightarrow t$  必须选择集结到一个终到  $t$  站的列车去向中, 才能保证车流能被运送到终到站.

这些约束条件可在不限定车流物理最短径路下寻找车流的最优改编方案, 而编组去向均假定走行最短物理径路. 车流选择在最短径路上改编费用较大技术站改编或绕道在改编费用较小技术站改编, 取决于绕道费用与改编费用大小的权衡.

2) 列车去向吸引的车流量与列车开行频度的关联关系约束, 保证所有吸引到某去向的车流必须能被全部运走:

$$flow_{ij} = \sum_s \sum_t \sum_p v_{stp} X_{ij}^{stp} \quad \forall (i, j) \in A \quad (4)$$

$$flow_{ij} \leq m_{ij} y_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (5)$$

3) 列车去向开行方案与开行频度变量的关联关系约束, 在有列车去向时, 列车开行频度才能大于等于 1, 否则为 0:

$$I(y_{ij}) = \begin{cases} 1 & y_{ij} > 0 \\ 0 & y_{ij} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$I(y_{ij}) \leq x_{ij} \quad (7)$$

4) 编组站能力约束. 包括最大解编车数约束和集结的列车去向占用的股道数约束:

$$\sum_s \sum_t \sum_j \sum_p v_{stp} X_{ij}^{stp} \leq R_i \quad \forall i \in N, s \neq i, t \neq i, j \neq i \quad (8)$$

$$\sum_j \phi(flow_{ij}) \leq C_i \quad \forall i \in N \quad (9)$$

式 (9) 中左边表示  $i \rightarrow j$  去向占用的股道数是该去向吸引的车流量  $flow_{ij}$  分段函数, 具体表达可参照文献 [8] 中 5.1.3 节内容.

5) 线路通过能力约束. 表示区段  $i \rightarrow j$  方向最大通过车数限制:

$$\sum_s \sum_t flow_{st} \delta_{ij}^{st} \leq ct_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (10)$$

6) 改编径路唯一性约束:

$$\sum_{j:(i,j) \in A} w_{it}^j \leq 1 \quad (11)$$

该方程式表示对于到站为  $t$  的 OD, 在  $i$  站改编后, 后续改编站只能选择  $i \rightarrow t$  径路上其中一个技术站进行改编. 若  $j$  取值为  $t$  时, 表示车流从  $i$  直达  $t$  站, 若  $j$  属于  $i \rightarrow t$  的中间某技术站, 表示车流要先送往  $j$  站改编.

7) 车流改编站选择约束. 对于  $i \rightarrow t$  的车流, 若在其径路上  $j$  站改编, 则必须有  $i \rightarrow j$  的直达去向存在, 即

$$w_{it}^j \leq x_{ij} \quad (12)$$

8) 具有相同到站车流的树形改编链约束. 具有相同到站的车流若在途中某个技术站同时改编, 那么他们的后续改编站应完全相同, 可用下式表达:

$$x_{ij}^{stp} \leq w_{it}^j \quad (13)$$

式 (13) 遵循了铁路运输实际中不考虑车流从哪个方向到达, 只要其后方到站相同, 将其流放到相同股道的原则. 相同到站的车流在其后续运输方案完全相同, 这种表达式称之为树形改编链约束.

9) 分客户别的车流运送时间统计及满意度函数表达

$$Ar_{stp} = \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{stp} s_{ij} + \sum_{(i,j) \in A} x_{ij}^{stp} \frac{12}{y_{ij}} + \sum_{(i,j) \in A, i \neq s} x_{ij}^{stp} h_i \quad (14)$$

其中, 第一项为沿途运送时间, 第二项是每连挂到一个去向的平均等待时间, 第三项是车列在改编站花费的改编车小时消耗. 而该支车流客户所能接受的运输时长范  $[L_{stp}, U_{stp}]$ , 其满意的时长范围是  $[LL_{stp}, UU_{stp}]$  参照文献 [9], 客户满意度与运送时间的关系函数如图 1 所示.

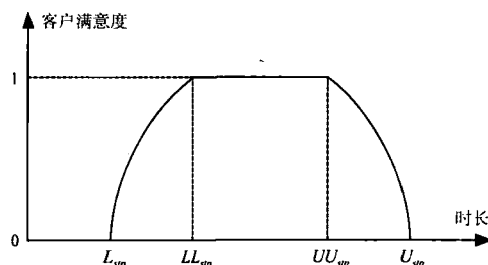


图 1 客户满意度与运送时间的关系函数图

满意度函数可用  $F_{stp}(Ar_{stp})$  来表示, 则

$$F_{stp}(Ar_{stp}) = \begin{cases} \left[ \frac{Ar_{stp} - L_{stp}}{LL_{stp} - L_{stp}} \right]^\alpha & LL_{stp} < Ar_{stp} < L_{stp} \\ 1 & LL_{stp} < Ar_{stp} < UU_{stp} \\ \left[ \frac{Ar_{stp} - U_{stp}}{UU_{stp} - U_{stp}} \right]^\beta & UU_{stp} < Ar_{stp} < U_{stp} \\ 0 & o.w. \end{cases} \quad (15)$$

其中,  $\alpha, \beta$  是客户对时间的敏感系数.

由于模型目标函数中要充分考虑车流的集结、改编和走行费用, 总是要求他们的费用之和越小越好. 而客户的满意度总是越大越好. 因此, 若将满意度考虑在目标函数中, 需将其转化为惩罚函数, 即如果服务未达到一定的服务标准, 则乘以一定的惩罚因子. 故基于顾客满意度的罚函数可表示为:

$$ZF_{stp}(F_{stp}(Ar_{stp})) = \begin{cases} \Lambda(1 - F_{stp}(Ar_{stp})) & 0 \leq F_{stp}(Ar_{stp}) \leq 1 \\ M & F_{stp}(Ar_{stp}) = 0 \end{cases} \quad (16)$$

## 2.4 模型的目标函数

$$\min z = \sum_i \sum_j T_i m_{ij} x_{ij} + \sum_i \sum_j \sum_{s \neq i} \sum_t \sum_p h_i x_{ij}^{stp} v_{st} + \sum_i \sum_j \sum_{s \neq i} \sum_t \sum_p \alpha(\rho + \theta m_{ij} d_{ij}) y_{ij} + \sum_s \sum_t \sum_p ZF_{stp}(F_{stp}(Ar_{stp})) \quad (17)$$

该目标函数包含四部分内容: 第一部分为形成一个直达去向的集结费用; 第二部分为车流在技术站的改编费用之和; 第三部分为机车牵引费用; 第四部分为达不到客户一定运送时间满意度要求下的惩罚费用.

其中, 第一和第二部分是车流编制成组过程中费用的权衡; 第三部分为机车牵引车列的费用, 该部分费用分为两部分: 固定费用和变动费用. 其中, 固定费用与列车编成辆数、走行里程等无关, 而变动费用与上述因素相关. 由此可看出, 对于一定的需求量, 如果列车编成辆数变小, 则运营列车数会增加, 固定费用也会相应

增加,而变动费用不变.列车编成辆数的减少同时也会引起车辆在站的平均等待时间减少,进而提高货主满意度,即降低了第四项费用.

通过分析目标函数可知,公式 (14) 中含有非线性方程式,即  $\frac{12}{y_{ij}}$ . 为了便于求解,本文将将其线性化处理:

- 步骤 1 首先限定所有的  $y_{ij}$  有取值上限,令其为  $U$ ;
- 步骤 2 引入新的 0-1 变量  $\varsigma_{ijk}$ ,表示如果  $y_{ij}$  的取值为  $k$  时,则该变量为 1,否则为 0;
- 步骤 3 引入新的约束  $y_{ij} = \sum_{k=0}^U \varsigma_{ijk} k$  和  $\sum_{k=0}^U \varsigma_{ijk} = 1$ ; 第一个约束表示  $y_{ij} = k$  时,  $\varsigma_{ijk} = 1$ ; 第二个约束表示,  $k \in [0, U]$  的整数集合里,总有一个值与  $y_{ij}$  相等,且只能有一个值与其等价.
- 步骤 4 表达式  $\frac{12}{y_{ij}}$  替换为  $\sum_{k=0}^U \varsigma_{ijk} \frac{12}{k}$ ,由此,将非线性表达式转换为线性表达式.

3 基于并行禁忌搜索算法的模型求解

禁忌搜索算法是一种亚启发式 (meta-heuristic) 优化算法,简称 TS,由美国科罗拉多大学系统科学家 Fred Glover 教授于 1986 年首次提出. TS 是通过模拟或揭示某些自然现象或智力过程而形成的一套算法,以用于求解各种工程问题中的优化解. TS 以其灵活的存储结构和相应的禁忌准则来避免迂回搜索,并通过藐视准则来赦免一些被禁忌的优良状态,进而保证多样化的有效探索以最终实现全局优化,同时由于 TS 的迭代过程是串行的,其求解速度较遗传、模拟退火等算法稍快. 这些优良特性使得 TS 在优化算法中独树一帜,而应用多任务并行搜索策略的禁忌搜索算法可进一步扩大搜索的解空间,使得最终解的平均值优于一般的禁忌搜索算法. 鉴于此,本文引入了并行禁忌搜索算法对该问题进行求解.

3.1 算法设计

基于并行禁忌搜索算法的计算流程如图 2 所示.

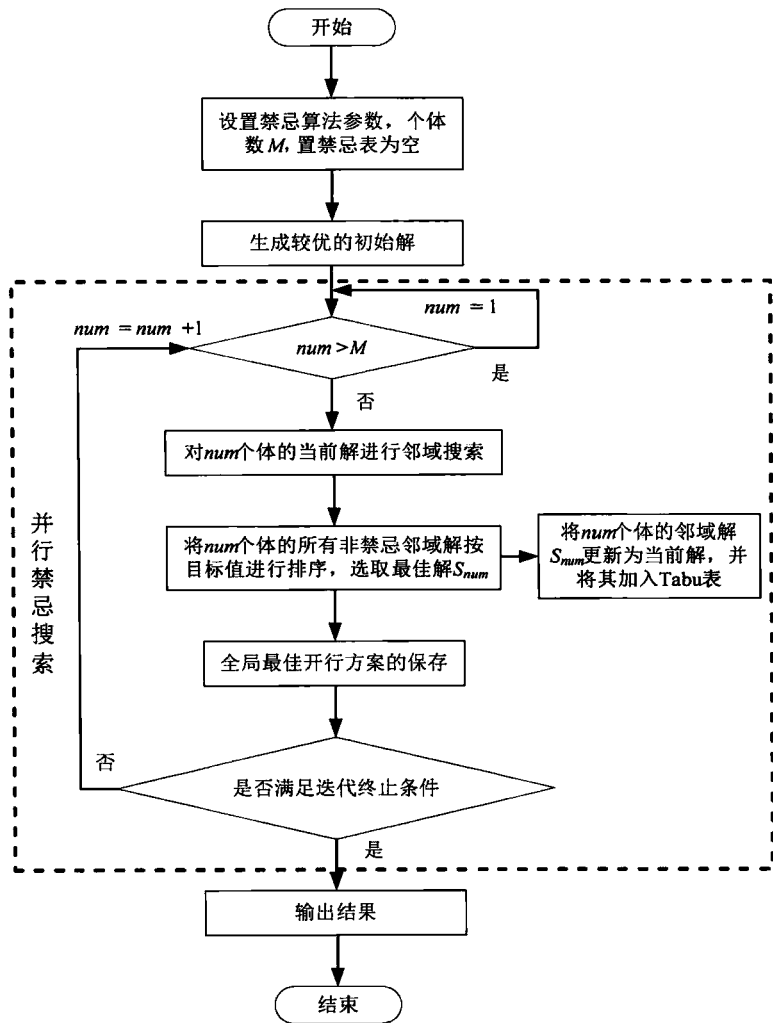


图 2 并行禁忌搜索算法的计算流程

1) 模型编码

本文在进行模型求解时, 对列车开行方案采取的编码策略为: 将列车开行频度和树形改编变量各用 1 位整数表示. 当列车开行频度大于 0 时, 表示存在直达去向; 否则, 无直达去向, 只有改编存在, 这种编码方式省略了对直达去向决策变量的编码. 另外根据对模型的分析, 可知变量  $x_{ij}^{stp}$  和  $w_{it}^j$  有很强的关联性, 当  $i = s$ , 且  $j$  在  $s \rightarrow t$  的径路上, 必定有  $x_{ij}^{stp} = w_{it}^j$ , 故给出变量  $w$  的解码后, 不需再对  $x$  进一步解码. 对  $N$  个点构造的路网的  $N * (N - 1)$  股 OD 流的运送方案编码, 形成一个长度为  $2 * N * (N - 1)$  的一维整形数组, 格式如 3 图所示.

$$y_{12}w_{12}y_{13}w_{13}\cdots y_{1N}w_{1N}\cdots y_{21}w_{21}\cdots y_{2N}w_{2N}\cdots y_{N1}w_{N1}\cdots y_{N(N-1)}w_{N(N-1)}$$

图 3 编码串图

其中,  $y_{ij}$  为大于等于 0 的整数;  $w_{ij}$  取值范围为  $i \rightarrow j$  物理径路上除  $i$  站以外的所有可能的技术站.

2) 扰动法则本文定义的领域结构为: 在给定的当前开行方案解  $U^0$  基础上, 任意改变一个 OD 对之间的开行频度  $y$  和变更车流可能的改编站  $w$ , 其余点之间的开行状态不变. 根据当前模型特点, 本文设计了如下扰动策略:

- a)  $i, j$  相邻, 随机取数, 更改其开行频度值, 需保证开行频度值始终大于等于 1, 并将其赋值到  $y'_{ij}$ , 此时  $w'_{ij} = 0$ ;
- b)  $i, j$  不相邻, 若原来  $y_{ij}^0 > 0$ , 通过对其值增加或减少进行扰动, 但保证扰动后的  $y'_{ij}$  也大于 0, 此时  $w'_{ij} = 0$ ;
- c)  $i, j$  不相邻, 若原来  $y_{ij}^0 > 0$ , 将其扰动, 令新的开行频度  $y'_{ij} = 0$ , 随机选择可行的改编站  $k$ , 赋值到  $w'_{ij}$ ;
- d)  $i, j$  不相邻, 若原来  $y_{ij}^0 = 0$ , 则随机取数, 使得  $y'_{ij} > 0$ ; 并令  $w'_{ij} = 0$ ;
- e)  $i, j$  不相邻, 若原来  $y_{ij}^0 > 0$ , 将  $y'_{ij}$  仍然赋值为 0, 但更改其改编站, 即扰动  $w_{ij}^0$ , 使得  $w'_{ij}$  取新的值.

基于初始方案和邻域结构, 通过上述扰动原则生成邻域解时, 因  $i \rightarrow j$  之间  $y_{ij}^0$  原来为大于 0 的数值, 即  $i \rightarrow j$  之间有直达去向, 则其他 OD 对间的  $w_{iq}$  继续选择在  $j$  站改编将不成立, 需变更其改编站, 即等价与模型中的  $w_{iq}^j$  只能取值为 0, 否则不满足直达和改编之间关系的约束条件, 即对所有的  $w_{iq}^j, q \in 1, 2, \cdots, N, q \neq i, q \neq j$ , 若存在  $w_{iq}^j = 1$ , 均将其值修正为 0. 在编码处理时, 将所有满足  $w_{iq} = j$  条件的编码挑出, 变更其第一改编站.

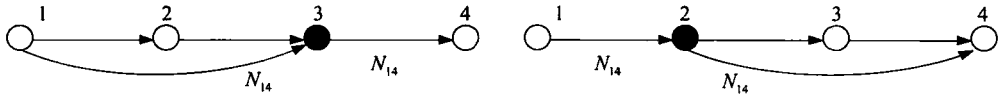


图 4 含有 4 个支点站的直线路网上车流送达策略示意图

以图 4 为例, 左图中  $y_{13} > 0, y_{14} = 0, w_{14} = 3$ . 相比与左图, 右图取消了  $1 \rightarrow 3$  直达去向, 增开了  $2 \rightarrow 4$  直达去向, 则在  $y_{13} = 0$  的情况下, 必然有  $w_{14} \neq 3$ . 由于在  $1 \rightarrow 4$  的运输径路上, 还存在技术站 2, 且与 1 站间存在直达去向, 故  $w_{14} = 2$ .

3) 禁忌表

本文在利用并行禁忌搜索算法进行模型求解时, 设计的禁忌表如下: a) 禁忌对象: 列车开行方案; b) 禁忌长度: 三倍于个体数量; c) 禁忌表中禁忌对象的替换: 采用先进先出的方式. 本文采用基于多禁忌搜索任务并行策略的禁忌搜索算法进行处理, 禁忌表的设计考虑了多任务协作的要求, 设计成各个个体共用一个禁忌表, 且实时更新禁忌表的禁忌对象, 实现各个体之间不重复搜索.

4) 适配置函数

由模型的目标函数和不满足约束条件的惩罚函数值构成.

5) 终止条件

连续 100 次全局最佳开行方案不更新.

3.2 案例

本文以 14 个技术站构成的辐射路网作为验证模型的算例路网, 如图 5 所示. 路网中技术站的集结参数 ( $T_i$ )、股道数 ( $C_k$ )、有调中转时间 ( $\tau_k$ ) 和最大改编能力 ( $R_k$ ) 如表 1 所示, 各区段之间的里程如表 2 所示, 各 OD 间分客户别的日均货流数据随机生成, 因篇幅有限, 不再罗列. 已知列车在各区段上的运行速度已知, 且均为 60 公里/小时.

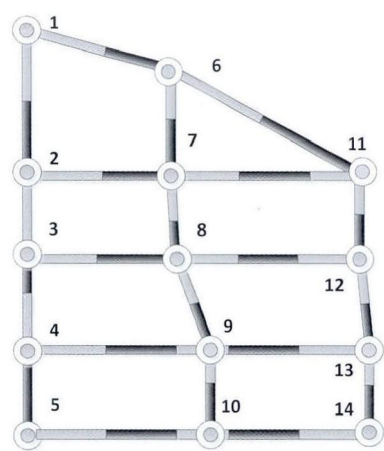


图 5 以 14 个技术站构成的路网图

表 1 技术站参数

站名	股道数	改编参数	解编能力	集结参数	站名	股道数	改编参数	解编能力	集结参数
1	61	3.5	19672	11.5	8	7	4.3	2800	11
2	48	3.6	19960	11.5	9	7	4.3	2400	11
3	8	4.3	3000	11	10	12	4.1	3600	11
4	29	4.1	7400	11.5	11	14	4.1	3911	11
5	73	3.5	20725	11.5	12	63	3.5	17500	11.8
6	58	3.5	18400	11.5	13	19	3.5	4800	11
7	7	4.2	2400	11	14	56	3.5	19761	11.8

表 2 区段里程数据

相邻站点	里程	相邻站点	里程	相邻站点	里程
1－2	283	6－7	261	11－12	118
2－3	173	7－8	148	12－13	156
3－4	159	8－9	171	13－14	158
4－5	74	9－10	106	1－6	130
5－10	216	10－14	158	6－11	247
2－7	117	3－8	130	4－9	167
7－11	63	8－12	329	9－13	147

表 3 不同固定开行费用下开行方案的指标分析

单位直达列车固定费用 (元)	0	1000	3000	5000
去向数 (个)	68	69	72	77
开行频度 (列)	331	324	316	305
总改编车数 (车)	5876	5696	5327	4828
单位列车的平均运距 (公里)	225.2	231.2	237.7	245.1
平均编成辆数	44	44.5	44.7	45

4 优化结果分析

以 VC++6.0 为优化算法的开发平台, 开发的模型求解算法在 CPU 为双核 2.40GHz、内存为 2GB 的硬件配置的 PC 机上运行, 获得优化方案. 为分析固定费用变化、客户时间价值波动对列车开行方案各项指标的影响, 以及欠轴运输模式下多消耗的固定费用 (等价于多使用的机车数) 和节省的等待时间价值在开行方案编制过程中的权衡, 分别对固定费用和满意度惩罚值设置了多种取值情形, 并对开行方案的各项指标变化规律进行分析.

1) 考虑单位列车运费的方案和不考虑单位列车运费下的开行方案指标变化规律分析

在其它参数值保持不变的条件下, 分别将固定开行费用设置为 0、1000、3000 和 5000 元/列进行计算, 将不同情形下开行方案指标进行统计分析, 形成表 3.

由表 3 可知, 在其它参数值保持不变的情况下, 随着单位列车固定开行费用增加, 直达去向数逐渐增加, 而总开行列数逐渐减少. 分析表 3 第 3 行的数据可知, 随着单位列车的固定费用增加, 总改编车数逐渐减少. 表明由于增开了部分长程直达去向, 使得长程车流由中转运送方案变为直达运送, 减少了全路的改编车数. 分析表 3 第 4 行的数据可知, 单位列车的平均运距随着固定费用的增加而逐渐增加, 这表明随着固定费用增加, 长程直达列车的开行频度在所有直达列车开行频度中的比例提高. 在实际运输中, 运距较短的列车在首末站的机车连挂、整备时间和费用占据其运输过程的比例相比于长距离列车较高, 因而, 尽可能开行长距离直达列车符合运输实际需求, 而对开行方案优化时考虑列车固定费用可满足此要求. 分析平均编成辆数

数据可知, 随着单位列车固定费用的增加, 单位列车的平均编成辆数也呈现增长的趋势, 表明随着固定费用的增长, 若仍保持原有编成辆数, 则均摊到每车的固定费用也增加, 为尽可能减少均摊到单位车辆的固定费用, 通过增大每列的编成辆数可达到此目标。

2) 考虑顾客满意度条件下的开行方案指标变化规律分析

本文设相同发到站的 OD 流由两种类型货主的车流汇集而成, 且设第一种货主的时间价值要求不高, 第二种有较高要求。这里仅变化第二种类型货主的时间价值进行对比分析, 分别设其时间价值为 10、30、50 元/车小时。此外, 分别考虑两种类型车流都遵循树形改编情形下的开行方案和第二种类型货主运送的车流不考虑树形改编策略下的开行方案, 并进行对比分析, 形成表 4。由表 4 可知, 在固定费用保持不变的情况下, (整体类型的客户) 随着客户的时间价值升高, 单位列车的编成辆数在减少。表明通过增开列车数 (增加固定费用), 换取等待时间的节省; 同时, 时间价值惩罚较高车流的改编次数呈减少趋势。故客户的时间价值影响着方案的编制。同时, 在对高时间价值货主以自由径路选择策略下, 相比于树形径路运输策略, 其运输流优先选择直达运输, 降低改编次数。

表 4 不同固定开行费用下开行方案的指标分析

指标	不遵循树形改编策略约束			遵循树形改编策略
	10	30	50	10
开行列数	351	374	392	350
平均编成辆数	43.5	41.6	40.3	44.3
总改编次数	102	109	115	110

3) 算法的求解效果分析

为验证本文设计的并行禁忌算法对该问题求解的可行性和高效性, 将并行禁忌算法应用在 14 个点构成的算例网络上求解, 它的求解效果如图 6 所示。

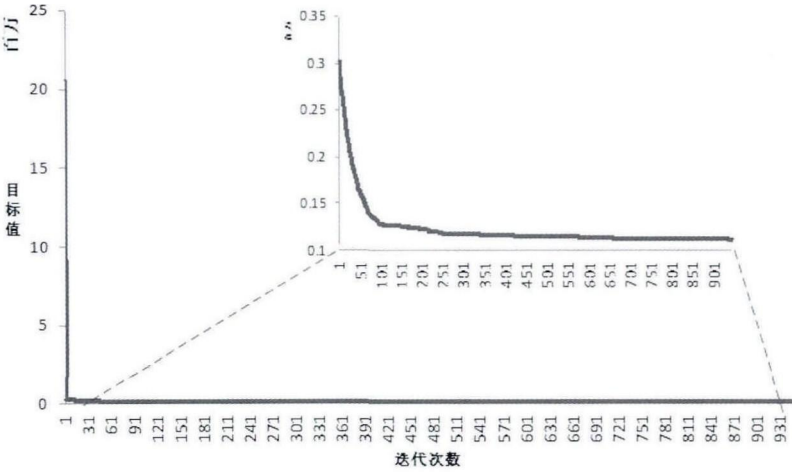


图 6 并行禁忌搜索算法的迭代次数与目标值关系曲线图

从图 6 可看出, 迭代次数从 0 开始计数, 前两次迭代的目标值差距大, 表明算法的收敛速度快; 从第 2 次至 49 次迭代过程中目标值下降曲线显著, 从 49 次至 931 次, 解的目标值下降曲线趋缓, 表明算法能够较快寻找到可行解, 收敛效果好, 对该问题求解有效。

4) 与传统禁忌搜索算法及商业求解软件的对比分析

为了验证本文设计的并行禁忌算法的求解质量和效果, 本文也分别应用商业优化软件 ILOG 12.4 (分支定界) 和一般的禁忌搜索算法进行求解, 并将他们的求解效果列入表 5。

表 5 求解质量及效率对比表

	并行禁忌	禁忌	ILOG
求解时间 (秒)	13	21	600
目标值 (百万)	0.1116	0.1137	0.1449

在运用 ILOG 求解时, 以 10 分钟时长为终止条件, 将它解得的目标值与并行禁忌进行对比。结果表明, 尽管本文已经对目标函数中的非线性表达式进行了线性化处理, ILOG 的求解速度仍不能与并行禁忌算法相



比, 且其目标值质量略差于并行禁忌. 由此表明, 本文设计的禁忌搜索算法不仅能获得较高质量的解, 而且求解速度较快, 具备对较大规模问题求解的可行性. 将传统禁忌搜索算法的求解效果与并行禁忌对比, 两者的目标值相差不大, 但并行禁忌搜索算法在求解速度上有很大提升.

## 5 结论

本文指出当前的开行方案编制多数仅从铁路运输企业自身的经济效益出发, 很少考虑货主时间价值需求对运输方案的影响; 且在方案编制过程中, 很少将发到站相同但归属于不同货主的车流区分对待, 无法反映货主的时间价值需求. 鉴于此, 本文在细化车流 OD 货主类型及货主时间价值基础上, 构建了综合考虑铁路运输企业、货主两方面利益和允许欠轴运输的货物列车开行方案优化模型, 形成新的模型目标: 除考虑车流的集结和改编费用外, 增加单位列车的固定和变动开行费用以及不满足货主时间价值需求的惩罚费用.

通过设计的并行禁忌算法在 14 个算例路网上对模型进行求解, 结果表明: 单位列车固定费用越高, 列车越趋向满轴和长距离运输; 在固定费用保持不变的情况下, 随着客户的时间价值升高, 列车越趋于小编组运输. 由此可看出, 固定费用和客户的时间价值在运输费用中呈背反关系, 且两者对方案的制定有着重要的影响.

## 参考文献

- [1] Lin B L, Wang Z M. Optimizing the freight train connection service network of a large-scale rail system[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(5): 649-667.
- [2] 朱松年. 列车编组计划的二次 0-1 规划模型及解法 [J]. 西南交通大学学报, 1986: 65-72.  
Zhu S N. Quadratic 0-1 programming method for optimizing the train formation plan[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 1986: 65-72.
- [3] 林柏梁, 朱松年. 路网上车流路径与列车编组计划的整体优化 [J]. 铁道学报, 1999, 21(1): 1-7.  
Lin B L, Zhu S N. Synthetic optimization of train routing and makeup plan in a railway network[J]. Journal of the China Railway Society, 1999, 21(1): 1-7.
- [4] 杜旭升. 货车编组计划的优化 [C]// 铁道科学技术新进展 —— 铁道科学研究院五十五周年论文集, 2005: 907-914.
- [5] 陈崇双, 王慈光, 薛峰. 货物列车编组计划国内外研究综述 [J]. 铁道学报, 2012, 34(2): 8-20.  
Chen C S, Wang C G, Xue F. Survey of optimization of train formation plan at home and abroad[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 34(2): 8-20.
- [6] 牛惠民. 铁路枢纽编组站作业分工整体优化的研究 [D]. 北京: 北京交通大学, 1999.  
Niu H M. Optimization work division of railway hub marshalling yard[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 1999.
- [7] 李海鹰, 杨肇夏, 王伟, 等. 基于服务网络的快运直达班列开行方案优化方法研究 [J]. 物流技术, 2009, 28(10): 83-86.  
Li H Y, Yang Z X, Wang W, et al. How to optimize express freight direct train service based on service network design[J]. Logistics Technology, 2009, 28(10): 83-86.
- [8] 王保华, 何世伟, 宋瑞, 等. 快捷货运动态服务网络设计优化模型及其算法 [J]. 铁道学报, 2009, 31(5): 17-22.  
Wang B H, He S W, Song R, et al. Optimization model and algorithm of dynamic express shipment service network design[J]. Journal of the China Railway Society, 2009, 31(5): 17-22.
- [9] 张玉召, 严余松. 基于货主需求的快捷货物列车开行方案多目标优化模型 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2014, 14(3): 111-116.  
Zhang Y Z, Yan Y S. A multi-objective model and algorithm of operation plan for express freight trains[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2014, 14(3): 111-116.
- [10] 张进川, 杨浩. 基于货主满意度的铁路空车调配方案研究 [J]. 物流技术, 2007, 11: 128-131.  
Zhang J C, Yang H. Study on railway empty wagon allocation base on satisfaction of consignors[J]. Logistics Technology, 2007, 11: 128-131.
- [11] 程学庆, 蒲云. 基于货主满意度的模糊空车调配模型的研究 [J]. 铁道运输与经济, 2007, 29(11): 71-73.  
Cheng X Q, Pu Y. Study on railway empty wagon allocation base on satisfaction of consignors and fuzzy theory[J]. Railway Transport and Economy, 2007, 29(11): 71-73.
- [12] Yaghini M, Moneni M, Sarmadi M. A simplex-based simulated annealing algorithm for node-arc capacitated multicommodity network design[J]. Applied Soft Computing, 2012, 9(12): 2997-3003.
- [13] Ahuja R K, Jha K C, Liu J. Solving real-life railroad blocking problems[J]. Interfaces, 2007, 37(5): 404-419.