

考虑作业能力均衡的直线铁路方向 单组货物列车编组计划优化

黄伟, 胡培奇, 刘银钊

(华北水利水电大学 管理与经济学院, 河南 郑州 450046)

摘要: 铁路货运对于保证国民经济持续稳定、缓解疫情带来的影响发挥着举足轻重的作用。对于运输去向及来源不同的货物, 在保证编组列车开行相对时间消耗较少的同时, 利用各作业技术站的改编能力有效整理货源, 提高运输效率十分重要。针对直线方向技术站间单组货物列车编组优化问题, 以技术站集结车小时消耗与沿途改编中转车小时消耗的总和最小为目标, 综合考虑车流的改编方案唯一性、车站改编能力、调车线容车能力等限制, 在传统技术站单组列车编组计划线性整数规划模型基础上, 增加无改编通过沿途技术站这一约束条件, 构建多目标线性0-1规划模型。通过小规模算例进行求解与分析, 验证模型的准确性和实用性, 以便进一步提高列车的货物运输效率。

关键词: 单组列车; 技术直达列车; 0-1规划模型

中图分类号: U294

文献标志码: A

文章编号: 1007-7375(2023)02-0148-07

Marshalling Plan Optimization for Single-group Freight Trains in the Direction of Straight-line Railways Considering the Balance of Operating Capacity

HUANG Wei, HU Peiqi, LIU Yinke

(School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China)

Abstract: Railway freight transportation plays a pivotal role in ensuring the continued stability of the national economy and fighting the impact of the epidemic. For goods with different transportation destinations and origins, it is necessary to effectively organize the origins of goods and improve the transportation efficiency by using the operating capacity of each marshalling station while ensuring low time consumption for the running of marshalling trains. Focusing on the marshalling optimization of single-group freight trains among stations in a straight-line direction, this paper aims to minimize the sum of the hourly consumption of assembled trains at stations and the hourly consumption of remarshalling transit trains along the way. Considering the limitations of the uniqueness of remarshalling strategies for traffic flows, the remarshalling capacity of stations, and the capacity of a shunting line, a multi-objective linear 0-1 programming model is established based on the linear integer programming model of the traditional single train marshalling plan at stations, adding the constraint of no remarshalling passing through the stations along the way. A small-scale example is adopted for solving and analysis to verify the accuracy and practicability of the model, and further improve the efficiency of railway freight transportation.

Key words: single-group train; technical through train; 0-1 programming model

根据国家铁路局发布的铁路统计公报, 2020年全国铁路货物运输总发送量完成45.52亿t, 比上年增加1.40亿t, 同比增加3.2%; 2021年全国铁路货运总发送量完成47.74亿t, 相比上年增长4.9%, 国家

铁路货物发送量持续强劲增长。全国铁路货运运输充分发挥全路“一张网”和集中统一指挥的优势, 及时调整运输结构、增加货运能力, 确保电煤和国家重点物资运输。在疫情冲击下, 铁路货物运输量不

收稿日期: 2022-01-18

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(19BGL224); 华北水利水电大学研究生创新课题资助项目(YK-2021-118)

作者简介: 黄伟(1975—), 男, 河南省人, 教授, 博士, 主要研究方向为大数据与系统优化仿真。

但没有出现大幅度下降, 反而在缓慢上升, 铁路货运对于保证国民经济持续稳定、抗击疫情带来的影响发挥着举足轻重的作用。随着货物列车的运输需求不断上升, 对于众多去向不同、来源不同的货物, 研究如何合理安排运输, 提高运输效率十分有必要^[1]。通过编制货物列车编组计划可以有效整理货源不同的货物和铁路上纵横交叉的道路, 使各个地方的货物可以到达各自目的地, 优化货物列车编组是有效提高列车编组效率进而提高铁路运输效率的有效方法^[2]。

货物列车编组计划 (train formation plan, TFP) 也简称编组计划。编组计划统一安排全路车流组织方案, 在铁路运输组织工作中有着非常重要的作用。编组内容主要包括货物列车的编成辆数确定、货物列车集结时间确定、货物列车无改编通过沿途车站的时间节省确定等方面。在列车编成辆数方面, Chen等^[3]基于中国铁路背景构建了基于路径的单组货物列车线性编制模型, 并提出一种基于树的分解算法进行求解; Boysen等^[4]分析技术站列车编组问题的复杂性, 在掌握到达解体列车进站、解体顺序以及出发列车编组数量的基础上, 利用启发式算法给出调车线集结货车最优编组决策; 甘易玄等^[5]以铁路运输企业经济效益最大化为目标, 建立基于接续时间的货物列车编成辆数波动模型, 利用软件对算例进行列车编成辆数波动下的货物列车配流, 同时分析最大、最小编成辆数与技术作业时间波动率对发送货车数量和货物运输收益的影响。在货物列车集结时间方面, 范文议^[6]考虑远程货物直达列车运行径路的选择问题, 同时给出了车流集结时间、停站时间与旅行时间的定量确定方法, 并阐述了其车流集结特点和采用机车长交路轮乘制的优越性; 吴庆昕^[7]考虑到不同货车集结过程的影响因素, 总结出了符合所有货车集结过程的货车集结时间的计算通式; Bohlin等^[8-9]制定混合整数模型, 不仅解决了分类轨道的分配问题, 还计算出了每个出站列车的集合时间。在时间节省方面, Lin等^[10]为了解决中国实际路网的列车编组计划优化问题, 建立以所有车流集结和改编车小时最小为目标函数的双层规划模型, 采用模拟退火算法求解并取得较好结果; Zhang等^[11]提出一种优化时间表的双层模型以实现铁路系统的节能控制, 并利用实际数据证实了方法的可行性。

现有文献针对不同的货物列车编组计划研究对象, 基于一定的优化目标运用相关模型、算法来尽可能地优化货物列车编组计划, 其中在构建目标函数时通常只考虑了技术站总的车小时消耗以及经济效益方面^[5,12-15]。少有文献在货物列车改编方案中考虑各技术站作业能力的均衡程度, 同时对于无改编通过技术站的车辆情况也没有考虑在模型中。

由于我国矿产资源、原材料工业主要集中在北方, 我国铁路货运历来呈现“北重南轻”的状况。货运量集中在东部的情况有所改善, 以资源开发为主的中西部地区铁路货运量, 已由原来不足60%提高到70%, “三北”地区铁路货运量水平已下降至不足60%, 西南、西北铁路货运量上升1倍以上。但铁路建设经过几十年的发展, 东密西疏的铁路布局仍未有根本性的改观, 技术站的分布密度和改编能力有较大的差异, 路网布局有待进一步完善。在此情况下, 虽然现有研究对于货运列车编组技术和方法进行了卓有成效的研究, 大大降低了货运列车的开行总时间, 但在不考虑各技术站的作业能力均衡的情况下, 远程车流编组对于区域中心和出发技术站编组压力过大, 而通过中转技术站的编组能力又没有充分利用, 不利于铁路路网的货运效率达到总体帕累托最优。远程车流出发技术站在铁路货物运输中地位十分重要, 但现有研究成果立足于总体效率和时间消耗最低的策略, 过分依赖出发技术站, 一旦超过处理能力或出现故障, 极有机会引起全网运输能力的大幅度下降, 既不利于保证铁路货运的可靠性, 又不利于铁路货运网络结构的总体布局均衡。

基于上述原因, 本文提出一种考虑技术站集结车小时消耗和中途改编中转车小时消耗总和和最小为目标, 以车流改编方案唯一性、车站改编能力、调车线容车能力及车辆的无改编通过次数等为限制的多目标规划模型。

1 货物列车编组计划复杂度分析

技术站间单组货物列车编组计划的研究对象主要包括直达列车和直通列车。在编制装车地直达列车开行方案后, 没有被编入装车地直达列车的残存车流、到达技术站解体的远程车流以及卸车地未能被组织成空车专列的零星空车都需要在技术站集结编组再出发。货物列车编组计划的制定需要根据编组的基本条件确定车流合并与衔接方案, 且随着车

流数及技术站个数的增加, 货物列车编组计划复杂度呈指数增长。

1.1 货物列车编组的基本条件

技术站间的车流支数随着技术站数量的增多不断增加, 在编组时需要决定哪些车流单独编组, 哪些车流合并开行。以 N_s 表示直达车流总数, t 表示列车无改编通过技术站的节省车小时, c 表示车站的列车集结参数, m 表示列车的平均编成辆数。令 $T = c \times m$, 表示列车在编发站的集结车小时消耗, 本文中时间单位用小时(h)来度量。

1) 货物列车编组的必要条件。

单独开行一个编组到达站, 会增加一个列车集结时间, 而合并开行又会增加消耗远程车流的改编时间, 所以当列车单独开行所增加的集结时间低于单独开行所节省的时间时, 单独开行是可以节省消耗时间的。即单独开行的必要条件为单支车流在运行全程无改编通过沿途技术站的节省时间大于或等于该支车流在直达列车编发站的集结车小时消耗。即

$$N_s \sum t \geq T. \quad (1)$$

2) 货物列车编组的充分条件。

远程车流是否应与同路径较短车流进行合并开行的主要条件应是远程车流本应无改编通过沿途技术站, 但因合并需在该技术站改编所产生的节省车小时大于等于其在编发站的集结车小时消耗, 由式(2)表示。其中, N_L 表示单支或合并车流的远程车流组数, 即直达列车到达目的车站办理解体作业后在调车场集结等待, 挂运后续列车接续运行的中转车流; t_L 表示与同路径较短车流相比, 远程车流本该无改编通过技术站的车辆节省时间。

$$N_L \sum t_L \geq T. \quad (2)$$

3) 货物列车编组的绝对条件。

若单支车流无改编通过沿途中任何一个技术站的节省车小时都大于等于其在编组站的集结车小时消耗, 则该支车流就满足了绝对条件。可直接列入方向的最优编组方案中, 由式(3)表示。其中, N 为该支车流组数; t_{\min} 为沿途技术站的 t 的最小值。

$$N t_{\min} \geq T. \quad (3)$$

1.2 直线方向单组列车编组的复杂度分析

我国铁路网有多个环状径路, 货运站数量非常

庞大, 即使同一方向上也会有各种性质的中间站, 技术设备条件也不尽相同。因此货物列车编组计划的制定十分复杂。以图1中直线方向上的4个技术站为例, 计算货物列车编组的可能方案数, 分析货物列车编组计划复杂度。

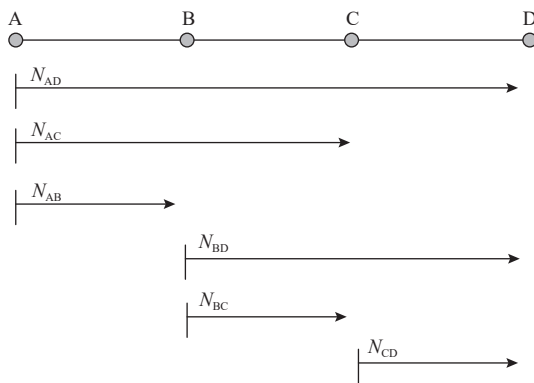


图 1 直线方向技术站及车流组成

Figure 1 Technical stations located at straight direction railway and wagon flows

直线方向4个技术站共可产生6股车流。以其中一支车流 N_{AD} 为例, 这支车流沿途的中转站有2个, 分别是B站和C站。车流 N_{AD} 在B站和C站的中转方式有如下4种组合: B站和C站均无调中转; B站有调中转, C站无调中转; B站无调中转, C站有调中转; B站和C站均有调中转。故车流 N_{AD} 的中转方式为4种, N_{AC} 中转方式为2种, N_{AB} 中转方式为1种, N_{BD} 中转方式为2种, N_{BC} 中转方式为1种, N_{CD} 中转方式为1种。所有编组方案为 $4 \times 2 \times 1 \times 2 \times 1 \times 1 = 16$ 种。

当直线方向上有5个技术站时, 将构成10股车流, 构成编组方案150种。有6个技术站时包含15股车流, 具有7 800个编组方案。有7个技术站时, 将有21股车流, 1 575 600个方案。车流方案数随技术站数增多而不断增加, 并呈指数增长。实际货物列车编组计划的编制十分复杂, 故需采用现代模型优化方法进行求解。

2 直线方向单组列车编组0-1规划模型

以列车运行的相对时间消耗和各技术站改编能力利用率的均衡程度两方面为目标, 考虑车流改编方案唯一性、车站改编能力、调车线能力及车辆无改编通过次数等约束建立多目标0-1规划模型。

2.1 变量符号及说明

相关变量符号及说明见表1。

表1 变量符号及说明
Table 1 Variable symbols and description

变量符号	说明
V	直线方向上技术站的集合, $i \in V$
n	直线方向上有 n 个技术站, 编号依次为1, 2, \dots , n
β	一昼夜车站发往各个去向(1, 2, \dots , n)的货车数, 一般有 $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$
$M(i, j)$	从 i 站到 j 站车流可能进行改编作业的所有站点集合
A_{ij}^+	经由 i 站到达 j 站车流的发送站集合, $s \in A_{ij}^+$
A_{ij}^-	从 i 站出发途径 j 站的到达站集合, $e \in A_{ij}^-$
N_{ij}	从 i 站始发到 j 站的固定技术车流量
c_i	出发站 i 站的车辆集结参数
m_{ij}	由 i 站开往 j 站去向的平均编成辆数
t_k	无改编通过 k 站的节省时间
f_{ij}	在 i 站出发或改编之后发往 j 站之间的实际车流量
g_{ij}	在 i 站出发开往 j 站方向的实际车流量, 即 $i \rightarrow j$ 去向所吸引的车流量
R_k	k 技术站的最大改编能力
θ_k	k 技术站改编能力的有效利用率
η_k	k 站的实际改编能力利用率
G_i	i 站可用的调车线数量
K	列车编组方案的直达去向数
P	开行列车方案集合
φ	技术站改编能力均衡参数
L	列车编组无改编通过次数
x_{ij}^j	直达决策变量
y_{ij}^k	中途改编决策变量

其中, 最大改编能力是指技术站在最繁忙的时候采取可行的技术组织措施来应对车辆非日常的增多, 此时一昼夜内能够解体 and 编组的货物列车辆数; 有效利用率是处于资源得到有效利用没有负荷过大的情况也没有过多闲置的情况。决策变量分为直达决策变量 x_{ij}^j 和中途改编决策变量 y_{ij}^k , 其表达方式分别为

$$x_{ij}^j = \begin{cases} 1, & \text{开行 } i \text{ 站始发并终到 } j \text{ 的直达列车;} \\ 0, & \text{其他。} \end{cases}$$

$$y_{ij}^k = \begin{cases} 1, & i \rightarrow j \text{ 去向的车流在 } k \text{ 站改编;} \\ 0, & i \rightarrow j \text{ 去向的车流不在 } k \text{ 站改编。} \end{cases}$$

2.2 目标函数

以列车运行中的相对时间消耗和各技术站改编能力利用率的均衡程度两方面作为模型的目标来建立多目标求解模型。其中列车运行的相对时间消耗

包括技术站车辆集结所产生的车小时消耗和改编中转产生的车小时消耗。

1) 技术站车辆集结车小时消耗。

开行直达列车需要在出发站等待该列的所有车辆集结完毕才会出发, 所产生的总的集结车小时消耗表示为

$$Z_1 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} c_i m_{ij} x_{ij}^j. \quad (4)$$

2) 改编中转车小时消耗。

两支或两支以上发站或到站不同的车流合并需要让较短途车流到站后进行改编, 以接续车流的形式继续运送, 将产生改编车小时消耗。而不在中途技术站进行改编便会产生无改编通过的节省时间, 所以, 因中途改编中转产生的改编消耗可用无改编所节省的时间来表示。则技术站的改编中转产生的车小时消耗表示为

$$Z_2 = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} \sum_{k \in M(i, j)} f_{ij} t_k y_{ij}^k. \quad (5)$$

3) 车站改编能力利用情况。

在编制单组列车编组计划时应该尽量使每一个技术站的改编能力都得到有效的利用, 不会出现有的技术站繁忙不堪而有的技术站却存在闲置的情况。车站改编能力均衡可以用各站改编能力利用率的方差来表示, 技术站改编能力均衡参数为

$$\varphi = \sum_{k \in V} (\theta_k - \eta_k)^2. \quad (6)$$

其中, k 站的改编能力的实际利用率 η_k 为 k 站的改变车流与 k 站最大改编能力的比值, 即

$$\eta_k = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V} f_{ij} x_{ij}^k / R_k, \quad \forall k \in M(i, j). \quad (7)$$

综上, 目标函数为

$$\min Z = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} c_i m_{ij} x_{ij}^j + \sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} \sum_{k \in M(i, j)} f_{ij} t_k y_{ij}^k; \quad (8)$$

$$\min \varphi = \sum_{k \in V} (\theta_k - \eta_k)^2. \quad (9)$$

2.3 约束条件

1) 车流改编方案的唯一性约束。

根据单组列车编组计划车流不可分割的原则, 车流的组织只能是单独编组开行或者与其他车流合并开行, 两者只能选其一, 不能出现一支车流既是单支车流又是合并车流的情况即不会出现部分车流

改编，另一部分车流直达的情况。例， x_{ij}^j 取1表示从*i*站开行直达列车到达*j*站，那么该支车流在中途任何一站都不会进行改编，即 $y_{ij}^k \neq 1$ ，所以这种唯一性约束表示为

$$x_{ij}^j + \sum_{k \in M(i,j)} y_{ij}^k \geq 1。$$

(10)

2) 车站改编能力限制。
技术站改编能力限制是编制编组计划的重要因素。各个技术站的改编任务可以用在*k*站进行改编的实际车流表示，技术站的改编能力应为技术站得到有效利用时的改编能力，表示为

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V} f_{ij} y_{ij}^k \leq R_k \theta_k。$$

(11)

其中，经由*i*站到达*j*站的车流 f_{ij} 由两部分车流构成，一部分为始发于*i*站终到*j*站的直达车流，另一部分为在*i*站进行改编后发往*j*站的车流， f_{ij} 计算公式为

$$f_{ij} = N_{ij} + \sum_{s \in A_{ij}^+} f_{sj} y_{sj}^i。$$

(12)

3) 调车线容车约束。
调车线的作用是集结车辆、解编车辆、停放本站作业车及其他车辆。调车线的数量、有效长及总容量与车站作业效率、车站改编能力以及调车线能力能否充分发挥有密切关系。在技术站集结的车辆占用的股道数至少不能超过技术站用于集结占用的调车线数，设每条调车线的最大容车数为200，那么车流强度每增加200辆就会多占用一条调车线，则调车线约束可表示为

$$\left\lceil \frac{g_{ij}}{200} \right\rceil \leq G_i。$$

(13)

其中，去向*i*→*j*所吸引的车流由3部分组成：第1部分为始发*i*站终到*j*站的直达车流；第2部分为始发于*i*站之前于*i*站进行改编后又发往*j*站的车流；第3部分是始发于*i*站途经*j*站后发往更远的车站的车流，而且两部分可以用 f_{ij} 表示，所以去向*i*→*j*的车流强度 g_{ij} 表示为

$$g_{ij} = f_{ij} + \sum_{e \in A_{ij}^-} f_{ie} y_{ie}^j。$$

(14)

4) 无改编通过次数。
考虑车辆无改编通过车站的次数这一因素。并在论文中验证了在列车编组中存在一个最优的无改

编通过次数*L*，而这个无改编通过次数*L*与直达去向数*K*相关，直达去向数*K*可按式(15)~(17)确定。

计算平均每支车流无改编通过一个支点站的车小时节省 \bar{Q} 为

$$\bar{Q} = \frac{\sum Q_2 + \sum Q_3 + \cdots}{\sum L_2 + \sum L_3 + \cdots} = \frac{\sum N_2 t_2 + \sum N_3 t_3 + \cdots}{\sum L_2 + \sum L_3 + \cdots}。$$

(15)

计算平均每列直达列车的车辆集结时间 \bar{T} 为

$$\bar{T} = \frac{\beta_1 T_1 + \beta_2 T_2 + \cdots}{\beta_1 + \beta_2 + \cdots}。$$

(16)

构建车流通过函数关系见式(17)，并根据铁路等通过方案表确定相应的无改编通过次数*L*。

$$\sum L = f(K)。$$

(17)

5) 决策变量约束。
决策变量 x_{ij}^j 、 y_{ij}^k 均为0-1变量，即

$$x_{ij}^j \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V;$$

(18)

$$y_{ij}^k \in \{0, 1\}, \forall i, j \in V。$$

(19)

3 模型求解

3.1 实验场景

以直线方向上8个技术站形成的28种车流为例，对所建立的数学模型进行求解。车流数据和各技术站相关参数如表2和表3所示。另外，将各个去向的列车平均编成辆数*m*设为50辆。

表 2 技术站间车流量

Table 2 Wagon flows from origin technical station to destination technical station

技术站	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	93	70	80	50	120	84	90
2	0	0	50	92	71	113	34	100
3	0	0	0	100	63	120	94	70
4	0	0	0	0	43	150	43	80
5	0	0	0	0	0	59	87	40
6	0	0	0	0	0	0	45	160
7	0	0	0	0	0	0	0	89
8	0	0	0	0	0	0	0	0

表3 各技术站相关参数

Table 3 Related parameters of technical stations						
参数	集结参数	改编利用率/%	改编合理度/%	改编能力(车/d)	调车线数/条	无改编节省时间/h
1	9.2	80	73	240	8	3.2
2	8.4	80	75	380	6	2.9
3	10	80	70	200	7	3.1
4	9.5	80	72	360	6	3.4
5	9.8	80	68	200	4	5.1
6	10.2	80	74	300	3	4.7
7	9.3	80	50	250	4	3.8
8	9.7	80	65	270	5	3.5

3.2 模型求解

选用Lingo软件进行求解, 由于Lingo并不适合解决多目标规划的问题, 在使用其求解时需要将多目标规划模型转化为单目标规划模型。将目标函数中的技术站改编车辆均衡目标转化为约束条件, 并令其参数范围为0.1~0.15之间。即

$$0.1 \leq \sum_{k \in V} (\theta_k - \eta_k)^2 \leq 0.15.$$

(20)

先计算平均每支车流无改编通过一个支点站的车小时节省 $\bar{Q} = 293.6$ 。

再计算平均每一直达列车去向所消耗的车辆集结时间 $\bar{T} = 465.5$ 。

通过 $\sum L = f(K)$ 函数关系确定直达去向数 K 值, 由于 $2\bar{Q} > \bar{T} > \bar{Q}$, 可得 $K=8$ 。

根据铁路等通方案表查出此时较优的无改编通过次数 L 为43。所以使用Lingo求解时约束条件应输入为

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} x_{ij}^j = 8;$$

(21)

$$\sum_{i \in V} \sum_{j \in V/i} \sum_{k \in M(i,j)} y_{ij}^k = 13.$$

(22)

由Lingo求解结果可得出该算例的各车流开行方案如表4所示。

3.3 结果分析

根据表4中求解的各车流开行方案可制定直线方向上的单组货物列车编组计划, 路网共需开行列车15列, 其中技术直达列车8列, 直通列车7列, 列车具体编组方案如表5所示。

该改编方案中, 2站的改编数为200车, 3站的改编数为100车, 4站的改编数为277车, 5站的改编

表4 车流开行方案

Table 4 Train operation scheme					
车流	开行方式	改编站	车流	开行方式	改编站
N_{12}	直达		N_{35}	改编	4
N_{13}	改编	2	N_{36}	改编	4
N_{14}	改编	2	N_{37}	改编	4
N_{15}	改编	2	N_{38}	直达	
N_{16}	直达		N_{45}	直达	
N_{17}	改编	6	N_{46}	直达	
N_{18}	改编	6	N_{47}	直达	
N_{23}	直达		N_{48}	改编	7
N_{24}	直达		N_{56}	直达	
N_{25}	直达		N_{57}	直达	
N_{26}	改编	5	N_{58}	改编	7
N_{27}	改编	5	N_{67}	直达	
N_{28}	改编	3	N_{68}	直达	
N_{34}	直达		N_{78}	直达	

表5 单组货物列车编组方案

Table 5 Formation scheme of one-block freight train						
列车	O-D	车流组成	车流数/车	开行列数/列	开行频次/h	
P_1	1-6	N_{16} 、 N_{17} 、 N_{18}	174	4	6	
P_2	2-4	N_{24} 、 N_{14}	172	4	6	
P_3	2-5	N_{25} 、 N_{15} 、 N_{26} 、 N_{27}	268	6	4	
P_4	3-8	N_{38} 、 N_{28}	170	4	6	
P_5	4-6	N_{46} 、 N_{36}	270	6	4	
P_6	4-7	N_{47} 、 N_{37} 、 N_{48}	217	5	4.8	
P_7	5-7	N_{57} 、 N_{27} 、 N_{58}	161	4	6	
P_8	6-8	N_{68} 、 N_{18}	250	5	4.8	
P_9	1-2	N_{12} 、 N_{13} 、 N_{14} 、 N_{15}	293	6	4	
P_{10}	2-3	N_{23} 、 N_{13} 、 N_{28}	220	5	4.8	
P_{11}	3-4	N_{34} 、 N_{35} 、 N_{36} 、 N_{37}	377	8	3	
P_{12}	4-5	N_{45} 、 N_{35}	109	3	8	
P_{13}	5-6	N_{56} 、 N_{26}	172	4	6	
P_{14}	6-7	N_{67} 、 N_{17}	129	3	8	
P_{15}	7-8	N_{78} 、 N_{48} 、 N_{58}	209	5	4.8	

数为147车, 6站的改编数为174车, 7站的改编数为120车, 而2、3、4、5、6、7站的改编能力分别为380、200、360、200、300、250, 各站改编能力利用率如表6所示。

可见, 该编组方案中, 除了4站和5站超出了车站的改编能力利用程度, 其余技术站都在合理利用程度以下, 且4站与5站的改编能力超出部分尚在可接受范围内, 所以, 该规划模型可以达到协调车站改编数量的目的。

表 6 部分改编站改编能力情况

Table 6 Reformation capacity of technical stations

改编站	改编能力 (车/d)	改编 合理度/%	改编 利用率/%	实际改编 车辆数/车
2	380	75	53	200
3	200	70	50	100
4	360	72	77	277
5	200	68	74	147
6	300	74	58	174
7	250	50	48	120

4 结论

本文以直线方向单组列车编组计划为研究对象，通过分析货物列车基本编组条件与直线方向单组货物列车编组复杂性，在传统技术站单组列车编组计划线性整数规划模型基础上，增加了无改编通过沿途技术站次数这一约束，构建了线性多目标0-1规划模型。模型以技术站集结车小时消耗和中途改编中转车小时消耗总和最小为目标，考虑了车流改编方案唯一性、车站改编能力、调车线容车能力及车辆的无改编通过次数等限制条件，最后通过小规模算例验证了所提模型的正确性及实用性。

参考文献:

[1] 沈晓冰, 杨保华. 基于双层混合联运的震后应急物资配送模糊多目标优化[J]. 工业工程, 2017, 20(3): 113-117.
SHEN Xiaobing, YANG Baohua. A fuzzy multi-objective optimization of post-earthquake emergency logistics systems based on bi-level programming and mixed transportation[J]. Industrial Engineering Journal, 2017, 20(3): 113-117.

[2] 李冰, 张志宁, 轩华, 等. 基于树枝形铁路专用线网络的小运转货物作业系统优化[J]. 系统管理学报, 2021, 30(2): 201-214.
LI Bing, ZHANG Zhining, XUAN Hua, et al. Optimization of small running cargo operation system based on dendritic railway special line network[J]. Journal of Systems Management, 2021, 30(2): 201-214.

[3] CHEN C, DOLLEVOET T, ZHAO J. One-block train formation in large-scale railway networks: An exact model and a tree-based decomposition algorithm[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2018, 118: 1-30.

[4] BOYSEN N, EMDE S, FLIEDNER M. The Basic Train Make-up Problem in Shunting Yards[J]. OR Spectrum, 2016, 38(1): 207-233.

[5] 甘易玄, 薛锋. 考虑货物到达与列车出发时间接续的货物列车编成辆数研究[J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(4): 20-25, 85.
GAN Yixuan, XUE Feng. Research on the number of freight

trains considering the succession of freight arrival and train departure time[J]. Railway Transportation and Economy, 2021, 43(4): 20-25, 85.

[6] 范文议. 远程货物直达列车运输组织研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
FAN Wenyi. Research on the organization of long-distance freight direct train transportation [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2007.

[7] 吴庆昕. 货车集结时间计算方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WU Qingxin. Research on the calculation method of truck assembly time[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.

[8] BOHLIN M, FLIER H, MAUE J, et al. Hump yard track allocation with temporary car storage[C/OL]//Proceedings of the 4th International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis, 2011(2011-02-01). <http://www.pw.ethz.ch/research/publications/papers/HumpYardTrackAllocation.pdf>.

[9] BOHLIN M, DAHMS F, FLIER H, et al. Optimal freight train classification using column generation[C]//12th Workshop on Algorithmic Approaches for Transportation Modelling, Optimization, and Systems. Dagstuhl: Schloss Dagstuhl-Leibniz-Zentrum fuer Informatik, 2012: 10-22.

[10] LIN B L, WANG Z M, JI L J, et al. Optimizing the freight train connection service network of a large scale rail system[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2012, 46(5): 649-667.

[11] ZHANG H, JIA L, WANG L, et al. Energy consumption optimization of train operation for railway systems: Algorithm development and real-world case study[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 214: 1024-1037.

[12] 李静, 帅斌, 许旻昊, 等. 考虑集结延误的列车编成辆数问题研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2019, 19(3): 88-95.
LI Jing, SHUAI Bin, XU Minhao, et al. Research on the number of trains in consideration of delays in assembly[J]. Transportation System Engineering and Information, 2019, 19(3): 88-95.

[13] LI B, QU W, XUAN H, et al. Shunting strategy for placing-in and taking-out wagons on branch-shaped freight operation network with simulation method[J]. Journal of Advanced Transportation, 2020, 2020: 3410481.

[14] 赵慧. 基于拉格朗日算法的技术站单组列车编组计划优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZHAO Hui. Research on optimization of single train marshalling plan at technical station based on Lagrangian algorithm [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.

[15] 张海舰. 技术站单组列车编组计划的禁忌搜索算法研究[J]. 山东科学, 2016, 29(3): 81-86.
ZHANG Haijian. Research on tabu search algorithm for single train marshalling plan in technical station[J]. Shandong Science, 2016, 29(3): 81-86.

(责任编辑: 刘敏仪)