

文章编号: 1001-4632 (2026) 04-0243-15

引用格式: 薛锋, 黄哲, 徐俊林, 等. 考虑货车价值浓度的铁路技术站配流优化方法[J]. 中国铁道科学, 2026, 47(4): 243-257.

Citation: Xue Feng, Huang Zhe, Xu Junlin, et al. Optimization method of wagon-flow allocation in railway technical stations considering wagon value concentration[J]. China Railway Science, 2026, 47(4): 243-257.

考虑货车价值浓度的铁路技术站配流优化方法

薛 锋^{1,2,3}, 黄 哲¹, 徐俊林¹, 陈崇双^{2,4}, 张守帅^{1,2,3}

(1. 西南交通大学 交通运输与物流学院, 四川 成都 611756;

2. 西南交通大学 综合交通大数据应用技术国家工程实验室, 四川 成都 611756;

3. 西南交通大学 综合交通运输智能化国家地方联合工程研究中心, 四川 成都 611756;

4. 西南交通大学 数学学院, 四川 成都 611756)

摘 要: 为提升高价值货物在技术站的中转效率, 首先, 提出货车价值浓度概念, 以此衡量装载不同货物的货车在技术站的作业优先程度, 并建立技术站配流资源价值浓度评价指标体系, 通过加权秩和比方法综合计算并对货车的价值浓度进行排序; 其次, 以技术站货车在站停留时间最小、高价值浓度货车优先编发为目标, 设计 2 阶段配流模型, 通过改变货物列车满轴约束, 分阶段对不同价值浓度货车进行配流; 最后, 分 3 个层次求解模型, 并通过设计的价值匹配搜索算法, 求得调整配流内容的丢线列车最大发车方案。结果表明: 相较于传统配流方案, 考虑货车价值浓度后的优化配流方案可使算例中的高价值浓度货车平均在站停留时间减少 0.2 h; 采用价值匹配搜索算法对优化配流方案进行丢线列车调整后, 阶段计划内发车数增加 1 列, 货车总停留时间减少 159.3 h, 其中高价值浓度货车平均在站停留时间进一步减少 0.29 h, 且编发位置集中在阶段计划前序发车列车, 能够有效提高重点货物在站中转作业效率。

关键词: 铁路运输; 技术站; 价值浓度; 配流方案; 车流接续; 高价值货物

中图分类号: U292.3 **文献标识码:** A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2026.04.19

随着社会经济的发展, 社会货运需求结构也在发生改变, 高附加价值、高时效性货物 (简称“双高”型货物) 的运输需求逐渐增加, 而传统的技术站配流方式已难以满足此类货物的运输时限要求。目前我国已建成全球规模最大的高铁网络, 普速铁路的货运能力得到有效释放, 已经具备高效运输“双高”型货物的客观条件。充分考虑“双高”型货物的运输特性, 研究其在技术站的合理组织流程和配流方式, 有助于提高此类货物的送达速度, 进一步提升铁路货运企业的竞争力。

当前, 兼顾货物价值与运输企业收益的相关研究已取得一定的成果。HN Newton^[1] 以最小化总里程、装卸和延误成本为目标函数, 将铁路运输问

题转化为以站场为节点、以线路为弧段的网络设计问题; Jong 等^[2] 通过引入可靠性价值指标, 分析了运输时间可靠性成本, 并构建了针对不同货运产品的运输评价体系; Kurri 等^[3] 将货物的运送时间转化为货物的时间价值, 在此基础上得到不同货物单位时间的运输价值成本; 杨宗琴等^[4] 利用成本作业法建立了包含两种集结模式的运输效益函数并研究发现, 从满足高价值货物运输需求的角度, 定点集结比定编集结的经济优越性更大; 张颖金^[5] 结合货车价值与货车在站停留时间评估列车编组计划编制效果, 提出了考虑货车价值的收益开行法, 并基于货车价值特性构建了集结车的元小时和改编车的元小时指标; 于婕等^[6] 利用蒙特卡洛法, 将

收稿日期: 2026-01-09; 修订日期: 2026-05-13

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2025YFB2606501); 国家自然科学基金资助项目 (61203175, 52302417); 四川省自然科学基金资助项目 (2025ZNSFSC0396, 2023NSFC0906)

第一作者: 薛 锋 (1981—), 男, 山东邹城人, 副教授, 博士研究生导师, 博士。E-mail: xuefeng.7@163.com

通讯作者: 张守帅 (1990—), 男, 山东聊城人, 讲师, 博士。E-mail: zss@swjtu.edu.cn

运到期限分配到技术站,进而转化为最大在站停留时间约束,并引入优先级来评价货物的紧急程度,以达到优先处理高优先级货物的目的;刘畅^[7]在明确高附加价值货物运输特点的基础上,提出了技术直达列车途中留轴技术,并针对该运输方法进行损益性分析,研究发现该类型开行模式有利于提升铁路货物运输整体收益。

分析可见,既有文献大多针对单一因素,如考虑运到期限达成水平、货车装载货物价值等进行研究,缺乏对“双高”型货物整体运输状态的综合评估,难以在保证高价值货车尽快发车的前提下,实现技术站阶段作业的全局协调以及区域路网运输效率的全面优化。另外,由于铁路技术站现场工作统筹的复杂性,现有研究虽表明放宽条件下的定点发车模式具有较好的经济性,但受制于实际作业中的组织形式和技术条件,考虑高价值货车尽快配流的灵活作业模式尚未得以完全推广应用。

为此,提出铁路货车“价值浓度”概念,考虑技术站到站货车的运输状态,选取影响货车装载货物价值的若干指标并建立评价指标体系,以综合评估货车价值浓度。为求解最大车流接续目标下的高价值浓度货车尽快发车的方案,将求解过程分解分为多个阶段^[8],在技术站动态配流基础上二次配流,优先编组高价值浓度列车,进一步提升高价值货物列车车流接续的效率。

1 技术站货车价值浓度评价

1.1 价值浓度评价指标体系

“价值浓度”相关思想源于经济学中的“价值密度”概念,即单位时间或空间内创造的价值含量。在计算机科学领域,该概念被引入任务调度相关研究,通常指任务的预期价值和任务允许的最大执行时间的比值^[9]。调度策略倾向于优先执行价值密度高的任务,以提高系统在单位时间内的价值收益。这一核心思想同技术站配流方案中车流的选择机制高度相似。

铁路货运中,货车是中转技术作业的最小单位,根据其装载货物的空间属性,可视之为1个“价值载体”。在运输过程中,货车所承载货物的价值会随着运输过程中位移的变化而动态变化。为刻画“双高”型货物在运输组织中的时间敏感性,考虑引入“价值浓度”这一指标,用以表征运输过程

中货物价值在时间维度上的动态分布特征。在明确价值浓度内涵及其构成要素的基础上,选取成组到发模式下的货车数量、所载货物时间价值、延误时间、后续作业和货主等级5项指标,构建技术站配流资源价值浓度评价指标体系。

1.1.1 成组到发车组货车数量

在现有的技术站配流方案中,通常将到达列车中单辆货车视为解体和编组的最小作业单位,但技术站实际作业中常会出现多辆货车成组到发的情况。受列车换长、牵引重量等限制,当成组到发的车组在编挂列车中的占比上升时,包含该车组的列车在当前阶段的计划配流方案制定及后续技术作业实施的难度都会相应增加。因此,有必要将到达列车中货车车组的到达情况及各车组中的货车数量,作为配流计划中车组作业优先等级的判定依据。

1.1.2 货车所载货物时间价值

在具体实践中,铁路运输企业通常将到发的单辆货车视为价值均等的基本作业单元,而较少关注货车装载货物的实际价值差异。货车所载货物价值应由该辆货车所装载并运输的货物总价值构成,但铁路货车装载货物种类多样,单辆货车的货物总价值难以准确评估,特别是在零担运输场景下。故本文仅考虑整车货物运输且货车满载场景,并以单位“万元·辆⁻¹”表征单辆货车所载的货物价值。

表征货车所载货物的时间价值时,进一步从货主视角出发,考虑货物在运输过程中随时间推移、空间位移而导致的自身价值损耗。参考文献^[10]中对货物本身时间价值的界定,将货物价值划分为货物对货主资金的占用、因运输时间延长造成的损耗和货物贬值3个部分。由此得到货车所载货物的时间价值函数 t_v 为

$$t_v = \frac{\gamma + \rho + k}{365} \omega_s \quad (1)$$

式中: γ 为货主的年资金收益率; ρ 为货物的年损耗比; k 为货物的年贬值率; ω_s 为实际作业中每辆标准货车满载同一种类货物的总价值。

1.1.3 延误时间

在既有研究中,货物的时间价值通常是从货主角度刻画的,结合货物本身价值(又称“所占用的社会资本”)、货物年损耗比以及货物贬值属性进行衡量。但在实际运输过程中,技术站工作人员不仅需要考虑到货车所载货物的时间价值,还需要统筹考虑已发生的时间延误与潜在的时间延误风险;不仅需要已到达车场的货车进行合理组织,确保其

及时发出,还需要对已发生延误的货车进行优先处置,防止延误进一步扩大。因此,对于当前站内车流资源,既应当单独考虑货物占用社会资本所带来的价值,又应当进一步考虑前序车站技术作业迟滞所产生的延误时间及其对铁路运输企业收益的影响。

货物的延误程度越大,往往意味着货运企业需要承担延误赔偿责任的可能性越大。由文献[8]可知,货物作业在站停留时间、技术站中转作业时间及区间运行时间都可用正态分布进行描述。当货物的运输方案确定后,其车流径路的运行时间也相对确定,故可根据路网历史统计数据,结合始发站出发列车数据、区间运行总里程、列车运行速度以及技术作业时间标准,确定该货车的理想最早到达时刻 T_1 ,实际到达时刻 T_2 ,理想最晚到达时刻 T_3 。实际中这三者间的数值关系存在4种情况,如图1所示。

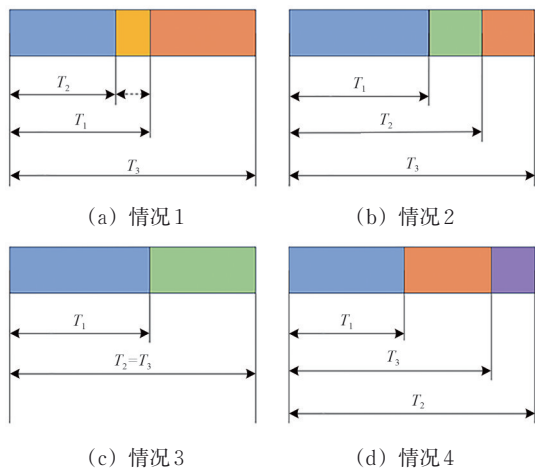


图1 货车延误的4种情况

从图1可以看出:情况1中,货车实际到达当前技术站的时刻 T_2 早于理想最早到达时刻 T_1 ,此种情况可能由于该货车在前序径路中改变了作业计划,编入了更高等级列车或技术站采取了更为高效的作业模式,此时货车运到时间最早,赔付可能性最低;情况2中, T_2 介于 T_1 与理想最晚到达时刻 T_3 之间,是实际运输中较为常见的情况,赔付可能性较低;情况3中, T_2 与 T_3 相同,此时货车在剩余运行径路中的作业时间弹性较小,极易在后续作业中产生延误,故赔付可能性较高;情况4中, T_2 晚于 T_3 ,说明货车在抵达当前技术站时已存在一定的延误,在后续运行径路中存在继续延误甚至延误扩大的可能,赔付可能性最高。在实际作业中,各阶段

作业时间具有不确定性,时间偏差很难避免。本文配流问题的关键在于准确识别延误车组,故后续重点讨论情况2(最为常见)和情况4。

当前我国铁路货物运输实行以“d”为单位的运到期限统计标准,这虽会给实际作业的制定和实施带来一定的便利,但已难以适应当前市场竞争环境下的货物运输需求。因此,参考技术站阶段计划中以“min”为单位的计算模式,按“min”测算运到期限,计算车流的延误时间。由于货物延误时间是对货车截至当前作业状况的直接反映,对于技术站而言,不仅需要承担因前序车流延误所带来的“负担”,同时还应考虑后续车流径路可能出现的延误风险,故 T_2 应当尽可能偏向 T_1 。由此货车延误情况可计算为

$$T_{yw} = T_2 - T_1 \quad (2)$$

式中: T_{yw} 为货物在延误情况下占用的延误时间。

1.1.4 货车后续作业情况

在货物列车运输全过程中,列车实际开行时间通常占比不大,约占总运输时间的1/3,货物运到时长大量消耗在始发终到作业以及在途中转作业的停留时间上^[11]。根据国家统计局数据,铁路货车平均中转停留时间为4.7 h,货物列车旅行速度为 $35.6 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[12],按2024年铁路货物运输平均运距693 km计算,当货物列车中转次数分别取1,2和3次时,货车中转时间占比分别为24.1%,48.3%和72.4%,显然中转次数越多,中转停留时间越长。但运输方案确定后货车的车流径路和中转车站都会相对固定,因此货车延误情况是对到达本站及其以前货车运输状态的客观描述,货车后续作业需求则是对由本站出发后作业情况的提前评估。

1.1.5 货主等级

我国铁路货运部门的传统客户分级管理办法通常以客户的年货物发送量为依据,将货主分为大客户和一般客户,但该方法侧重于总量指标,现场作业人员较难按此准确判断货主等级,指导车流接续具体作业。为此,参照文献[13]以及铁路快捷货运市场特点,构建更适用于现场作业判断的铁路客户分类方法。首先,通过最近购买时间(R)、购买频率(F)和总购买金额(M)这3项重要的客户行为指标,构建“基于RFM的客户分类及价值评价模型”,并以购买时间判断客户价值;然后,使用K均值聚类法,将铁路货运客户划分为七类,即重要保持客户、一般价值客户、重要挽留客户、重要发展客户、一般保持客户、一般挽留客户和无

价值客户；最后，将上述客户分类结果映射为货主等级指标，按客户重要性从高到低取值。

1.2 基于加权秩和比方法的货车价值浓度评价

由于各指标存在量纲差异，且对货车价值浓度的影响程度各不相同，先选用熵权法这种依据数据本身蕴含信息确定指标权重的客观赋权法分析各评价指标体系的权重，再以离差标准化方法对数据进行无量纲化处理。考虑在多指标综合评价中，秩和比法具有计算简便、结果稳定的特点，进一步引入加权秩和比（Weighted Rank Sum Ratio, WRSR）评价法，对技术站货车价值浓度进行综合排序^[14-16]。具体评估过程如下。

（1）数据标准化。考虑指标量纲差异，在评价之前首先进行数据标准化。针对某技术站的到达列车，对该到达列车中所有货车车辆分别构建评价矩阵，其中矩阵的行表示到达货车样本，列表示价值浓度的构成因素（共5个），该矩阵包含货车数量个样本，每个样本包含5个评价指标。后续作业和货主等级的取值为实际数据，其余评价指标可参考文献[17]使用离差标准化方法，先将指标数据变换至 $[0, 1]$ 之间；再将 $[0, 1]$ 等分为10份，从低到高对应1—10级；最后针对样本数据，将其整理为矩阵。所得矩阵即到达列车的评价矩阵 A_{uv} ，其中 u 为到达货车样本编号， v 为价值浓度构成因素编号（ $v=1, 2, \dots, 5$ ），二者分别表示矩阵的横纵坐标。

（2）对评价矩阵 A_{uv} 中的各个指标进行编秩。根据指标属性不同，将评价指标划分为效益性指标和成本型指标，其中货车数量、货物时间价值、后续作业和货主等级属于效益性指标，延误时间属于成本型指标，对效益性指标按数值从小到大编秩，成本型指标按数值从大到小编秩，同一指标下对相同数据取平均值，得到的秩矩阵记为 R_{uv} 。

（3）权重设计。考虑铁路技术站作业特点，采用熵权法确定各个指标的权重，记为 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n]$ 。

（4）加权秩和比计算。计算第 i 个评价指标的加权秩和比并将其记为 δ_{WRSRi} ，计算式为

$$\delta_{WRSRi} = \frac{1}{pq} \sum_{j=1}^p \lambda_j R_{ij} \quad (3)$$

式中： j 为评价指标编号； λ_j 为第 j 个评价指标的权重； p 为评价指标个数，取值为5； q 为秩值等级数，取值为10。

（5）排序。按照加权秩和比的估计值对评价指标按从大到小进行排序。

考虑到配流的优化目标是“在相同车流组号的货车中，优先将价值浓度较高的单辆货车编入先发列车”，为此，在价值浓度的计算和对比过程中，需统计并比较编入各到达列车中货车车辆的价值浓度情况。由于货车成组到达的需求较难量化测算，结合铁路运输实际情况对其进行简化假设。

2 模型构建

根据问题求解侧重点的不同，既有研究关于技术站配流模型的目标函数可大致分为4种类型，分别是：时间型，以货车在站总停留时间最小为目标；数量型，以车站总发出列车数量最大为目标；收益型，以车站发出列车收益最大为目标；综合型，综合考虑多个目标。本文主要研究高价值浓度货车的车流接续优化问题，核心在于兼顾高价值浓度货车在站停留时间的降低和中转货车在途作业效率的提高，属于综合型目标函数。由于高价值浓度货车在到达货车中的占比较低，优先配流高价值浓度货车不会给车站整体作业带来过多负荷，因此按编成货车的价值浓度，考虑设计2阶段配流模型。第1阶段为高价值浓度配流阶段，以货车在站停留时间最短为目标构建车流接续模型，在求解过程中，通过调整模型目标函数及相关约束条件，使高价值浓度货车在车流接续资源分配中获得优先保障；第2阶段为普通价值浓度配流阶段，先将高价值浓度货车在前一阶段占用的配流资源“剔除”，再将普通价值浓度货车作为车流接续资源输入，继续以货车在站停留时间最短为目标函数，在第1阶段既定资源分配结果约束下，对剩余配流资源进行再优化配置，以提升普通价值浓度货车的接续效率。通过调整货车满编的上下限约束，求解得到2阶段配流方案，形成综合考虑货车价值浓度与货车总在站停留时间的配流模型。

2.1 模型假设

（1）技术站采用单推单溜的作业方式，阶段计划中所有列车均正点到达，不考虑技术站内作业过程中的突发情况与不确定因素。

（2）技术车站的设备及工作人员在数量上满足作业需求，能够对到达列车与出发列车及时发到发技术作业。

(3) 调机在工作时间内作业连续, 中途无暂停情况, 不考虑调机整备、故障等异常、维修状态。

(4) 每列到达列车中同一车流组号的货车价值浓度相同(但为应对实际作业中可能出现货车价值浓度差异过大的情况, 也可对车流组进行细分处理, 如将号码为 a 的原车流组拆分为2个子车流组 a_1 和 a_2 , 并在模型中对后续的约束条件和输入条件也做相同处理)。

(5) 同一到达列车中, 具有相同车流组号的高价值浓度货车也均具有成组到发需求。

(6) 计算价值浓度时, 将“车组”视为最小的统计单元, 在秩和比评价时对“成组到发车组货车数量”之外的其他评价指标进行量化。

2.2 符号定义

定义核心变量及参数如下。 k 为车流组号, K 为车流组号集合, $k \in K$; m 和 n 分别为到达列车和出发列车数量; i 为到达列车, I 为到达列车集合, $\{1, 2, 3, \dots, i, \dots, m\}$, $i \in I$; j 为出发列车, J 为出发列车集合, $\{1, 2, 3, \dots, j, \dots, n\}$, $j \in J$; $T_{\text{JTKS}}(i)$ 和 $T_{\text{JTJS}}(i)$ 分别为到达列车 i 的实际解体开始时刻和实际解体结束时刻, $i \in I$ 。

2.3 目标函数

根据技术站的到达货车价值浓度特征, 考虑2阶段配流方案均以货车在站停留时间最短作为目标函数, 对到达车流中的高价值浓度货车进行优先配流后, 再对剩余车流按照相同目标函数配流, 最终得到当前阶段计划内货车在站总停留时间最短的配流方案。由此, 目标函数 Z 为

$$Z = \min \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^K x_{ijk} (T_{\text{CF}}(j) - T_{\text{DD}}(i)) \quad (4)$$

式中: x_{ijk} 为整数变量, 表示到达列车 i 向出发列车 j 提供的车辆数按车流组号形式记为 k , $i \in I$, $j \in J$, $k \in K$; $T_{\text{CF}}(j)$ 为出发列车 j 的出发时刻, $j \in J$; $T_{\text{DD}}(i)$ 为到达列车 i 的到达时刻, $i \in I$ 。

2.4 约束条件

主要考虑的约束条件包括列车到达解体作业约束、出发列车编组作业约束、车流接续约束和出发列车满轴约束这4类表示作业过程逻辑的约束。需要说明的是: 在第1阶段(高价值浓度货车配流阶段), 由于此类货车数量较少, 配流时很难组成“全高价值浓度满轴列车”, 因此对配流模型适当修改, 不再考虑出发列车满轴约束, 而是将出发列车的最小编成数量和重量条件适当放宽; 在第2阶段

(普通价值浓度货车配流阶段), 须保证高价值浓度货车全部发车, 因此对编入高价值浓度出发列车的当前状态进行修改, 将出发列车满轴约束的条件区间按照第1阶段的求解结果进行修正。这一思路能够有效提升高价值浓度货车的发车效率, 同时降低了高价值浓度货车与普通价值浓度货车之间的干扰, 充分保障运输需求。

1) 到达列车解体作业约束

到达列车抵达技术站后, 需要经过到达技术作业才能成为待解列车。到达列车的最早解体时刻即为列检结束时刻, 因此调整后的列车实际解体时刻不得早于其列检技术时刻, 设 h 为解编顺序中的序位编号, $Y_1, Y_2, \dots, Y_h, \dots, Y_m$ 为表示到达列车解体顺序的数列, 是对应列车到达顺序 $1, 2, \dots, m$ 的1种排列, 构造约束如式(5)和式(6)所示。

解体顺序为 Y_h 的列车实际解体时间不得早于其最早解体时间, 即

$$T_{\text{JTKS}}(Y_h) \geq T_{\text{DD}}(Y_h) + T_{\text{DDJS}} \quad h = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

式中: $T_{\text{JTKS}}(Y_h)$ 为解体顺序为 Y_h 时到达列车的实际解体开始时刻, $i \in I$; $T_{\text{DD}}(Y_h)$ 为解体顺序为 Y_h 时到达列车的到达时刻; T_{DDJS} 为到达技术作业时间标准。

解体顺序为 Y_h 的列车实际解体时刻不得早于前序列车(到达顺序为 Y_{h-1})的解体结束时刻, 即

$$T_{\text{JTKS}}(Y_h) \geq T_{\text{JTKS}}(Y_{h-1}) + T_{\text{JT}} \quad h = 2, \dots, m \quad (6)$$

式中: T_{JT} 为到达列车的解体时间, 是根据技术站作业标准确定的常量。

2) 出发列车编组作业约束

设 $H_1, H_2, \dots, H_l, \dots, H_n$ 为表示出发列车编组顺序的数列, 是对应列车出发顺序 $1, 2, \dots, n$ 的1种排列, 构造约束如式(7)和式(8)所示。

编组顺序为 H_l 的出发列车最晚结束编组时间 T_{ZWB} 不得早于其实际结束编组时间, 即

$$T_{\text{ZWB}}(H_l) \geq T_{\text{CF}}(H_l) - T_{\text{CFJS}} \quad l = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

式中: $T_{\text{ZWB}}(H_l)$ 为编组顺序为 H_l 的出发列车最晚结束编组时刻; T_{CFJS} 为出发技术作业时间标准。

编组顺序为 H_l 的出发列车开始编组时间不得早于前序出发列车实际编组结束时间, 即

$$T_{\text{BZKS}}(H_l) \geq T_{\text{BZKS}}(H_{l-1}) + T_{\text{BZ}} \quad l=1,2,\dots,n \quad (8)$$

式中: $T_{\text{BZKS}}(H_l)$ 为编组顺序为 H_l 的出发列车的实际编组开始时刻; T_{BZ} 为出发列车的编组时间, 是一个常量, 根据技术站作业标准确定。

3) 车流接续约束

只有出发列车 j 的编组开始时刻晚于到达列车 i 的解体结束时刻时, 到达列车 i 才能为出发列车 j 提供车流, 即

$$M(\varphi_{ij} - 1) \leq T_{\text{BZKS}}(H_j) - T_{\text{JTJS}}(Y_i) \quad \forall i \in I, j \in J \quad (9)$$

式中: φ_{ij} 为 0-1 变量, 当到达列车 i 能够为出发列车 j 提供接续车流时取值为 1, 否则取值为 0; M 为极大常数; $T_{\text{JTJS}}(Y_h)$ 为解体顺序为 Y_h 的列车的实际解体结束时刻。

到达列车 i 向出发列车 j 提供的车流组号为 k 的货车, 在数量上不能超过该到达列车中对应车流组号的货车数量, 即

$$\sum_{j=1}^n x_{ijk} \leq N_{ik} \quad \forall i \in I, k \in K \quad (10)$$

式中: N_{ik} 为到达列车 i 中车流组号为 k 的货车数量。

4) 编组内容关联约束

为保证当且仅当到达列车 i 与出发列车 j 间存在编组内容关联时才会产生车流接续决策, 有

$$x_{ijk} \leq M\varphi_{ij} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (11)$$

5) 出发列车满轴约束

高价值浓度货车不会被编入摘挂和小运转列车, 所以出发列车 j 需要满重或满长才能发车。设 M_{max} 和 M_{min} 分别为技术站出发列车的最大、最小车辆数要求, 则任一出发列车 j 的长度需要限制在 $[M_{\text{min}}, M_{\text{max}}]$, 有

$$M[\theta_N(j) - 1] + M_{\text{min}} \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ijk} \leq M[1 - \theta_N(j)] + M_{\text{max}} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (12)$$

式中: $\theta_N(j)$ 为 0-1 变量, 出发列车 j 满足满长要求时取值为 1, 否则取值为 0, $j \in J$ 。

设 W_{max} 和 W_{min} 分别为技术站出发列车的最大、最小换重要求, 则任一出发列车 j 应满足其重量需要限制在 $[W_{\text{min}}, W_{\text{max}}]$ 的要求, 有

$$M[\theta_w(j) - 1] + W_{\text{min}} \leq \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} x_{ijk} w_k \leq M[1 - \theta_w(j)] + W_{\text{max}} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K \quad (13)$$

式中: $\theta_w(j)$ 为 0-1 变量, 出发列车 j 是否满足满重要求时取值为 1, 否则取值为 0, $j \in J$; w_k 为车流组号为 k 的车组对应换重, $k \in K$ 。

3 模型求解

考虑货车价值浓度的铁路技术站 2 阶段配流模型为非线性混合整数规划模型, 其求解属于 NP 难问题。因此, 随着到达列车及出发列车数量的增加, 问题解空间规模呈指数级增长, 导致模型难以在可接受时间内获得有效可行解。对于有 n 个到达列车、 m 个出发列车的技术站, 假设每列到达列车包含 k 辆货车, 则该阶段计划内就存在 $(mk)^n$ 个配流方案^[18], 既有研究多采用启发式算法进行求解, 但启发式算法本身存在求解效率不够稳定、受初始解影响较大等问题。为降低求解难度, 分 3 个层次对所建模型进行求解。

(1) 第 1 层: 求解最大车流接续目标下, 技术站的解编顺序以及不考虑货车价值浓度的初始配流方案。

(2) 第 2 层: 在最大车流接续解编顺序下, 依次对高价值浓度与普通价值浓度货车进行配流。

(3) 第 3 层: 针对配流失败的高价值浓度货车, 优先匹配发车时间较早的出发列车, 同时分析站存货车构成, 调整丢线列车编组内容。

在第 1 和第 2 层中, 由于高价值浓度车组在到达车流中的占比较低, 优先对该类车组进行配流; 同时, 受阶段计划制定时效性要求以及实施过程不确定性的影响, 需要采用高效且易于实现的配流及重点车流调整算法。为此, 借鉴文献^[19]的思路, 设计技术站车流接续最大化的邻域搜索算法进行求解。

在第 3 层中, 当阶段计划中已包含高价值浓度货车且技术站存在丢线列车时, 为保障高价值浓度货车优先发车, 需对丢线列车编组内容进行调整。结合站存车资源及丢线列车发车时间已确定的作业特点, 参照静态配流中的网络模型求解方法, 设计高价值浓度货车优先发车的技术站丢线列车编组内容调整算法。

在各层配流过程中, 通过动态调整配流模型约束条件形成的配流结果, 从而确保既能提升每层配流计划的计算效率, 又能降低不同车组之间的相互影响。

3.1 车流接续最大化的邻域搜索算法

技术站配流问题的难点在于解编顺序的优化调整,通过改变到发列车的解体结束时刻与编组开始时刻,使初始到发顺序下不满足车流接续时间约束的车组满足约束条件,实现技术站阶段内发出车流最大化的目标。因此,采用局部邻域搜索算法求解最优解编顺序:先计算到发车流接续差,筛选出不满足车流接续条件的车组;再对这些车组所在列车的解编顺序建立邻域,搜索满足车流接续的最优解编方案。

步骤1。针对设备占用冲突以及当前列车解编顺序,分别计算不考虑这2项因素的理想到发接续车流矩阵 C_{LX} 与考虑这2项因素的实际到发接续车流矩阵 C_{SJ} 。两者差值即接续差矩阵,矩阵中取值大于0的元素所对应的车流即当前解编顺序下不满足车流接续约束条件的车流。

步骤2。针对接续差矩阵中取值大于0的元素位置构建解编顺序调整候选集 U ,并设候选集中第1个调整点为 u_1 、调整点总数为 N_{TZ} ,依次选取调整点构造邻域。在当前解编顺序下,首先,计算各调整点对应的到达列车解体顺序及出发列车编组顺序,根据得出的顺序依次调整对应的到达列车解体时间提前量及出发列车编组时间推迟量;然后,计算到达列车与出发列车间的接续时间差,从中筛选出满足接续时间约束的解编顺序调整量,生成当前解的邻域解;最后,调整该部分车流所归属的到发列车的解编顺序,以阶段计划到发列车顺序作为初始解编顺序,结合技术作业时间标准等时间约束,计算得到该技术站当前解编顺序下的实际到发车流接续矩阵。

步骤3。依次求解所有邻域解的配流结果,直到遍寻候选集中所有 N_{TZ} 个调整点的邻域解,得到最优配流方案 T_{Best} 。以阶段计划到发列车顺序作为初始解编顺序,计算相应阶段计划的到发列车信息,并将当前列车到发顺序作为配流方案中的列车解编顺序进行配流,得到初始解 T 。将当前求得的解与已记录的最优配流方案进行比较,若当前的目标函数值更小,则将求得的列车到发顺序作为当前最优解编顺序。

完成第1层求解后,得到最大车流接续目标下的列车解编顺序和考虑货车价值浓度的初始配流方案。其中,解编顺序作为第2层高价值浓度货车配流的已知条件输入模型;初始配流方案则用于对比后续配流方案的优化效果。

3.2 考虑货车价值浓度的技术站配流算法

考虑出发列车灵活编成辆数,基于定点集结模式进行配流,在求解出满足最大车流接续目标的解编顺序后,对配流过程进行分解。首先,筛选高价值浓度货车,将其作为配流计算时的输入进行优先配流;然后,计算得到高价值浓度货车配流方案,并结合阶段计划中出发列车的编组要求调整模型约束条件;最后,将剩余到达货车作为配流资源再次输入模型,实现对配流方案的二次优化。

步骤1。读取当前阶段计划到达列车的货车价值浓度信息,采用加权秩和比评价法进行评估,确定不同车组价值浓度的相对关系;技术站工作人员结合车流组织情况设定价值浓度阈值,将车组划分为高价值浓度车组和普通价值浓度车组。

步骤2。在第1层不考虑货车价值浓度的初始配流方案中,将高价值浓度车组标注出来,并检查各高价值浓度车组是否被编入对应车流组号中最早发车的列车,若已经满足该要求,则得到目标配流方案并输出;若未满足,则继续以第1层求得的解编顺序作为已知条件,将高价值浓度货车作为配流资源输入所建模型,求解出1阶段高价值浓度货车单独配流的结果。

步骤3。继续将普通价值浓度货车作为模型输入,通过修改出发列车满重约束,求解出2阶段普通价值浓度货车的配流结果。

步骤4。将2阶段配流结果合并,得到考虑货车价值浓度的动态配流方案。

考虑前2层的求解步骤及衔接关系后,得到技术站动态配流流程如图2所示。

3.3 高价值浓度货车优先发车调整算法

建立模型的思路是针对不同价值浓度车组依次配流,实现高价值浓度车组优先配流及最优解编顺序下的阶段计划配流,因此在第2阶段普通价值浓度货车配流中,部分已编入高价值浓度车组的出发列车可能会因编组货车资源不足而无法满足满轴要求,进而形成欠轴无法发车的丢线列车。丢线列车不仅会造成技术站资源浪费,也会带来一定的运输效益损失。对于该类车组,通常存在3种处理方式。

(1)若丢线列车满足高价值货车车流接续时间要求且存在可与滞留高价值货车组成满轴列车组合的站存车,则可考虑调整丢线列车的编组方向构成,在重新配流后形成满轴列车,达到兼顾高价值浓度货车发车效率最高和货车总在站停留时间最短的目的。

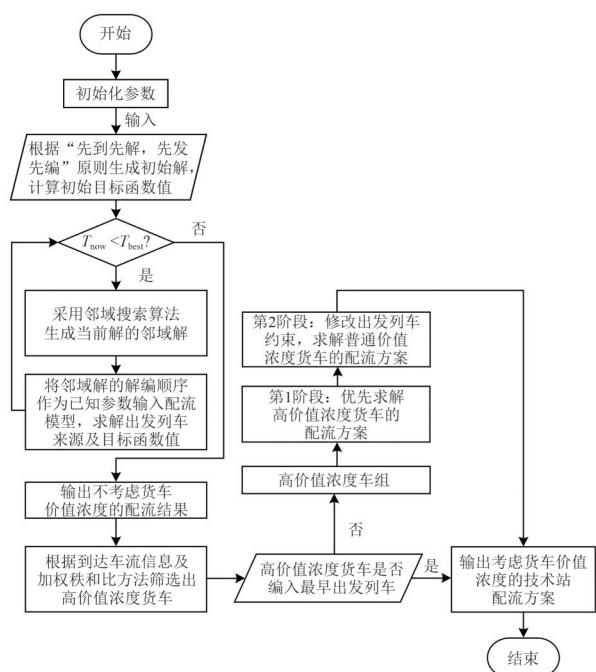


图2 考虑货车价值浓度的铁路技术站动态配流流程

(2) 当高价值浓度车组满足车流接续时间要求，但上一阶段内不存在能够满足满轴要求的出发列车时，需按照列车发车时间排序，确保编组内容中包含丢线列车的高价值浓度车组，以优先安排这些车组出发。并判断该列车换装货车引重是否满足满轴要求，选择合适的车组进行置换。

(3) 当上述2种处理方式均无法满足车流接续及满轴发车要求时，将高价值浓度车组的优先级调至最高，在下一阶段计划中优先进行编组作业。

结合以上处理方式，设计配流失败车组的调整策略。

步骤1. 检查配流失败货车的车流组号构成及编发失败的出发列车方向构成，并以后续出发列车中含有相同车流组号的普通价值浓度货车作为判断条件。

步骤2. 若满足条件，则优先考虑用高价值浓度车组置换满足条件的普通价值浓度车组，以“在站停留时间更长、货车价值浓度更低”作为置换的优先原则，并在置换完成后更新配流方案；若不满足条件、且丢线列车满足高价值货车车流接续时间要求，则将配流失败货车按照车流组号进行分类，其中与发车失败高价值浓度货车同方向的即为可编资源，录入新编发列车编组去向资源库；若丢线列车不满足高价值货车车流接续时间要求，则输出调整后的最优配流方案。

步骤3. 先对丢线列车所有可能的编组方向进

行组合，将当前方案中站存车资源转化为到达列车配流资源并输入配流模型，再将丢线列车的满轴限制放宽，求解调整后丢线列车最优的配流方案并输出。

3.4 丢线列车调整网络算法

“调整丢线列车编组内容以便站存高价值浓度货车尽快发车”问题可类比为静态配流问题并通过网络流模型求解^[20]。对此，构建网络流模型并针对所得配流方案中的站存车资源设计最大流算法，求解得到调整配流内容的丢线列车最大发车方案。

3.4.1 配流网络流模型

此时的优化目标为：在满足车流接续约束的条件下实现站存的高价值浓度货车优先配流。实际中到达列车车流往往不止一个编组去向、出发列车的编组内容也往往不是单一来源，为便于求解，设计构造一个具有单一“源”和单一“汇”的网络流模型。基于该网络和对本阶段车辆到发情况的分类，根据第1和第2层求解得到的最优车流接续矩阵筛选出满足相关规则及要求的点，并形成不同点列的连线，构建出高价值浓度货车优先发车调整网络流模型，模型示例如图3所示。图中： S 为“源”，即本阶段到达车辆总数，在实际方案中为考虑货车价值浓度配流方案中的站存车资源； T 为“汇”，即出发车辆总数，在实际方案中为改变编组内容的出发列车货车组合； d_i 为按车流去向分类后的到达侧节点，即满足相同去向特征的一类到达车流集合； f_i 为按出发编组去向分类后的出发侧节点，即可能编入同一出发列车的车流集合； m 和 n 分别为输入列节点类型，对应现有、可调用及备用配流资源节点，取值为1, 2, 3和4； t 为输出列节点，取值为1, 2和3。

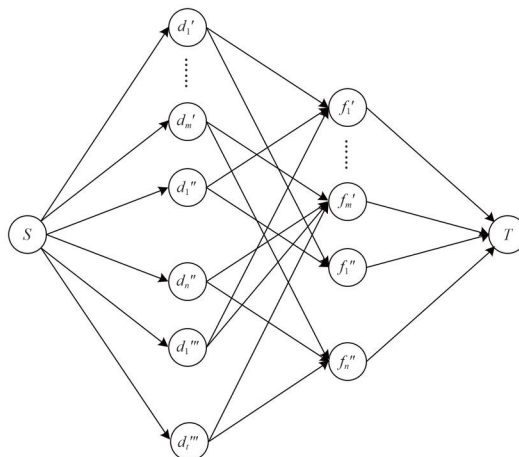


图3 高价值浓度货车优先发车调整网络流模型

3.4.2 网络流模型资源划分与结构规则设定

为满足该网络流模型针对高价值浓度车组配流的特定要求，做出以下界定。

(1) 现有配流资源：当前阶段计划内，满足高价值浓度车组车流接续要求的站存车流资源。

(2) 可调用配流资源：已按照现有配流方案编入发车的出发列车，且按照放宽条件的集结要求，调用后不影响原出发列车正点出发的车流资源。

(3) 备用配流资源：本技术站所有满足编挂要求的空车资源，用于保障滞留高价值浓度货车尽快发车。

(4) 车流接续弧：配流网络流模型中连接节点之间的弧，包含 3 项属性，分别是①节点 d_i 与节点 f_i 相连，代表 d_i 点到达列车所包含的车组满足 f_i 点出发列车车流接续要求；②弧上初始流量为 0；③弧上容量为对应配流资源的货车数量。

由于技术站到发车流规模庞大、流向复杂，在高价值浓度待编车组匹配车组时，应当优先考虑

从“现有配流资源”中选取，其次考虑从“可调用配流资源”中选取。在对丢线列车车流方向进行组合重构时，也应当结合下游技术站衔接方向，设定丢线列车可能的车流去向组合。因此，有必要设计网络流模型构建规则，用于合理确定节点排布、缩减非必要弧的数量。

规则 1。网络流模型图中左侧为源点 S ，相邻第 1 列为输入点 d_i ，代表本技术站的配流资源，包含：现有配流资源、可调用配流资源；源点 S 与输入点列的节点 d_i 之间存在单向连接弧，代表本技术站提供的车流接续资源。

规则 2。输入列从上到下依次编号为 1, 2, 3, ..., n ，其中现有配流资源分布在前，可调用分布资源分布在后。不同种配流资源内部，车组排序为：与高价值浓度货车车组车流组号相同的置于首位，其余分层排序，同一车流方向组合内不同车流组号的车组按照价值浓度由高至低排列。输入列节点类型及其对应排序规则见表 1。

表 1 输入列节点类型及排布顺序

节点类型	节点标号	排列顺序
现有配流资源	d_i'	按照与待发高价值浓度货车车流组号的匹配度排列，排列方式为相同车流组号在前，其余车流组号按照与高价值浓度货车车流组号由近及远排列。
可调用配流资源	d_i''	排列方式同现有配流资源，来自不同到达列车的相同车号车组，按照解体作业完成先后顺序排列，且该组节点整体位于现有配流资源节点组之后。
备用配流资源	d_i'''	位置分布于上述两类配流资源之后，排列顺序按照该组空车完成前序作业后到达调车场的时间。

规则 3。输出列与输入列的排布规则相同，但输出列求解的是改组后原丢线列车的可能出发组

合，故其点位不需要进行分裂操作。输出列节点类型及其对应排序规则见表 2。

表 2 输出列节点类型及排布顺序

节点类型	节点标号	排列顺序
现有配流资源	f_i'	按照与待发高价值浓度货车车流组号的匹配度排列，排列方式为相同车流组号在前，其余车流组号按照与高价值浓度货车车流组号由近及远排列。
可调用配流资源	f_i''	排列方式同现有配流资源，但该组节点整体位于现有配流资源节点组之后。

规则 4。网络图中所有的弧均为单向弧。

规则 5。输出列与汇点 T 之间连接的弧容量为技术站至下游相邻技术站区间容许的最大编成辆数。

以技术站 C 为例，在考虑货车价值浓度的配流后，站存车中存在高价值浓度车组，其车流组号为 1，结合区域路网分布和车流组号设定，可得到车流组号组合有以下 7 种：[1], [1, 5], [1, 6], [1, 5, 6], [1, 8], [1, 9], [1, 8, 9]，按照规则 2 中设定的排布方式，输入列 d_i 代表的车组顺序为 [1], [5], [6], [8], [9]。当同一车流组号的车组来自不同到达列车时，需将对应节点进行拆

分，并按照对应到达列车解体顺序排布。

3.4.3 具体算法

针对高价值浓度货车优先发车需求，网络构建规则虽已筛选出了可能与滞留高价值浓度货车进行编组的所有车组，但还需要解决“从中选取最优车组”问题。为此设计一种特殊的最大流求解算法——价值匹配搜索（Value Matching Search, VMS）算法，通过求解增流链的方式，在配流时优先选择与高价值浓度车组契合度更高的车组。在已构建的配流调整网络流模型基础上，采用文献 [21] 中的增广路最大流算法进行求解。在剩余容量网络中不断寻找增广路径，构建增流链并更新流量，直至不

存在可行增广路径为止,从而获得最大流分布结果。随后,再在输出流与汇点间的连接弧上,按照丢线列车可能的车流方向组合判断是否存在满足编组要求的可行组合模式。

例如,设置本技术站内最大、最小编成辆数分别为55和45,假设输出列 f_i 至“汇”间的弧仅有前3条存在流量,则可能出现以下4种情况。

(1)若3条弧对应的车流方向组合为可行组合且流量之和在45~55,则视为寻找到了一种丢线列车调整方案。

(2)若3条弧对应的车流方向组合为可行组合且流量之和小于45,则考虑开行摘挂列车或小运转列车,不满足开行要求时则视为配流失败。

(3)若3条弧对应的车流方向组合为可行组合且流量之和大于55,则按照从下至上的顺序扣除多余货车,直至满足编成数量要求。

(4)若3条弧对应的车流方向组合不是可能的组合,则视为丢线列车调整失败。

综上,将出现情况1时的丢线列车配流方案调整为3个节点对应的车流组号,出发时间为原丢线列车出发时刻。

4 算例分析

4.1 基础数据

某区域铁路网如图4所示,其中C站表示区域性编组站,以数字、小写字母标识的站点表示区域内其他技术站和中间站,用于刻画网络结构及列车运行关系。该技术站的列车到达与出发技术作业时间均为30 min,解编时间均为20 min,不同编组去向车流对应列车重量见表3,出发列车编成辆数要求为45~55辆,满轴约束为27 000~33 000 t。选取C站8:00—11:52的到达列车以及10:45—14:25的出发列车作为该站的配流依据,在这2个时间段内C站的到达列车和出发列车信息分别见表4。到达列车、出发列车的车次分别为递增排列的奇数和偶数。

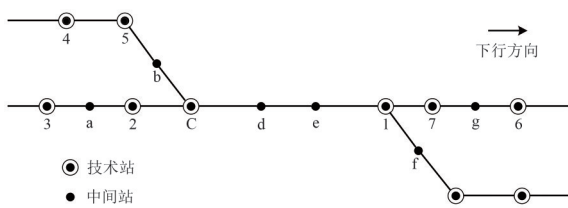


图4 某区域路网示例

表3 技术站不同编组车流组号对应列车重量 t

车流去向	重量	车流去向	重量
1	57	6	63
2	60	7	59
3	62	8	61
4	64	9	60
5	57		

表4 技术站到达、出发车流信息

车次	车流组号/(货车数量/辆)	车次	车流组号
10001	1/10, 6/14, 7/13, 9/8	10002	8, 9
10003	1/5, 5/12, 8/12, 9/23	10004	1, 7
10005	4/15, 5/24, 8/8	10006	4, 5
10007	3/6, 6/15, 8/24, 9/3	10008	8, 9
10009	2/11, 3/12, 5/23	10010	4, 5
10011	4/26, 5/11, 8/9	10012	2, 3
10013	2/23, 3/9, 4/10, 5/12	10014	4, 5
10015	2/23, 3/10, 8/9, 9/4	10016	2, 3
10017	4/17, 5/23, 9/10	10018	6, 8
10019	4/14, 5/16, 8/17	10020	4, 5
10021	3/21, 8/10, 9/14	10022	8, 9
10023	2/19, 3/27	10024	2, 3

4.2 考虑货车价值浓度的2阶段配流方案

结合1.2节,获取技术站到达车流的价值浓度构成因素信息,采用加权秩和比方法得到所有到达车流的价值浓度排序,并以到达列车末尾序号为X轴、车流组号为Y轴、车组价值浓度为Z轴,绘制到达车组价值浓度分布如图5所示。选取加权秩和比评价值不小于0.8的车组作为高价值浓度货车,综合考虑加权秩和比和货车数量排序,排序情况见表5;模型求解过程中得到的1阶段的配流结果和2阶段的配流方案见表6和表7。另外还设置了10次算例实验用于验证算法稳定性,每个算例包含50~60个高价值浓度车组,分布在10~12列出发列车上。

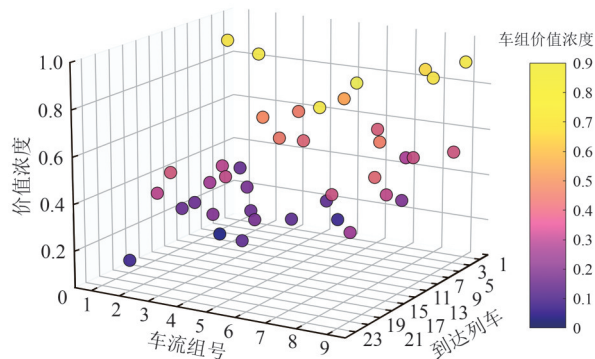


图5 到达车组价值浓度分布

表 5 高价值浓度货车排序

货车来源 (车流来源-车流组号)	货车数量/辆	加权秩和比	排序
10015-8	9	0.938 1	1
10021-8	10	0.901 3	2
10007-3	6	0.901 3	3
10001-9	8	0.901 3	4
10007-9	3	0.893 1	5
10003-1	5	0.893 1	6
10003-8	12	0.873 1	7

表 6 1 阶段高价值浓度货车优先配流结果

出发列车车次	编组内容 (车流组号/车流来源/货车数量)
10002	8/10003/12, 9/10001/8
10004	1/10003/5
10008	9/10007/3
10012	3/10007/6
10018	8/10015/9, 8/10021/10

注：货车数量单位为辆，后同。

从表 5—表 7 可知：高价值浓度车组 10007-9 虽然编入 10008 次列车，但列车不满足发车要求，因配流失败而需对配流方案进行调整；按照出发顺序由早到晚筛选满足车流组号要求的出发列车，得到后续出发列车中满足要求的是 10018 次列车和 10022 次列车；根据车流接续条件计算，认为 10018 次列车满足编入高价值浓度车组 10007-9 的要求，故顺次将该车组调整进入 10018 次列车，并形成考虑货车价值浓度的配流方案。

进一步对比表 6 和表 7 发现，相较于传统配流方案，考虑货车价值浓度的配流方案还有如下优化。

(1) 在传统配流过程中，高价值浓度车组 3/10007/6 被分为两部分，分别编入 10012 次和 10016 次列车；而在考虑货车价值浓度的配流方案中，该车组全部编入 10012 次列车，满足高价值浓度车组成组到发的要求。

(2) 对于到达车流组号为 8、9 的车组，1 阶段得到的高价值浓度车组配流结果将满足车流接续的车组安排在时间窗内最早出发的列车中；相较于传统配流方案，将车流组号为 8、9 的车组集中编入 10018 次列车后既提高了高价值浓度车组在该站的中转效率，又为其在后续技术站的配流提供了保障。

综上，相较于传统配流方案，所提方法形成的考虑货车价值浓度的技术站 2 阶段配流方案能够在阶段计划内货车在站总停留时间不变的情况下实现高价值浓度车组最快发车的要求。实验得出 2 阶段配流方案求解时间均在 20 s 以内，可以在保证阶段计划求解高效的前提下，将高价值浓度车组在站总停留时间减少 620 min，将高价值浓度货车的平均在站停留时间从 190.86 min 降低至 178.76 min，降幅 6.3%。

4.3 丢线列车编组内容调整方案

在丢线列车车流编组内容调整的网络流模型中输入列 (d_1, d_2, d_3, d_4) 按照优先排布现有配流资源，其后排布可调用配流资源的顺序依次排布输入列的点位。输出列 (f_1, f_2, f_3) 按照优先排布与高价值浓度货车相同的车流方向的点位，其后排布可与高价值浓度车流组号组成编组组合的方式进行排布。例如 (1, 6, 7) 和 (1, 8, 9) 分别为出发

表 7 考虑货车价值浓度的 2 阶段配流方案汇总

出发列车车次	编组内容 (车流组号/车流来源/货车数量)	编成辆数/辆	轴重/t	配流状态
10002	8/10003/12, 9/10001/8, 8/10005/8, 9/10003/23	51	3 080	成功
10004	1/10003/5	5	285	失败
10006	4/10005/15, 5/10003/12, 5/10003/24	51	3 012	成功
10008	9/10007/3	3	180	失败
10010	4/10011/26, 5/10009/17, 5/10011/11	54	3 260	成功
10012	3/10007/6, 2/10009/4, 2/10015/23, 3/10013/6, 3/10015/10	49	2 984	成功
10014	4/10013/2, 4/10017/17, 5/10009/6, 5/10013/5, 5/10017/23	53	3 154	成功
10016	2/10009/7, 2/10013/23, 3/10009/12, 3/10013/3	45	2 730	成功
10018	8/10015/9, 8/10021/10, 8/10007/7, 8/10011/9, 8/10019/17	50	3 050	成功
10020	4/10013/8, 4/10019/14, 5/10013/7, 5/10019/16	45	2 719	成功
10022	8/10007/17, 9/10015/4, 9/10017/10, 9/10021/14	45	2 717	成功
10024	2/10023/18, 3/10021/8, 3/10023/27	53	3 250	成功
站存车	1/10001/10, 2/10023/1, 3/10021/13, 6/10001/14, 6/10007/15, 7/10001/13			

列车可形成的编组组合，其中站存车中存在车流组号为1的高价值浓度货车，则输出列排布的顺序设计为（1，6，7，8，9）。

使用 VMS 算法求得调整后的 10008 次列车所

包含的编组方向为 [1，6，7]。由于最大流网络中满足条件的货车数量超过满轴约束，根据货车价值浓度与编组去向进行调整，调整后的编组内容见表8。

表8 调整后新发列车编组内容

出发列车车次	编组内容 (车流组号/车流来源/货车数量)	编成辆数/辆	轴重/t	配流状态
10008	1/10003/5, 1/10001/10, 6/10001/14, 7/10001/13,6/10007/12	54	3 260	成功

综合 4.2 节的配流结果及表 8 所示的编组内容，得到调整后的考虑货车价值浓度的配流方案，并采用横向柱状图形式表示如图 6 所示。图中，以列车换长为横轴，出发列车编号为纵轴。货车价值浓度分类及数值高低以颜色作为区分，颜色越深对应车组的货车价值浓度越高。

丢线调整前后且考虑货车价值浓度的优化配流方案与传统配流方案的对比结果见表 9。由表 9 可知：对比调整前后的优化配流方案，发现使用 VMS 算法后，出发列车增加了 1 列，高价值浓度货车平均在站停留时间由 3.18 h 降低至 2.69 h，车辆在站总停留时间减少了 159.3 h，货车和高价值浓度货车的平均在站停留时间分别减少了 0.27 和 0.29 h，同时，相较于调整前的优化配流方案，高价值浓度货车平均在站停留时间减少了 0.49 h。该结果表明，在不增加站内作业负担的前提下，引入货车价值浓度并采用 VMS 算法进行配流调整，这不仅能够进一步提升高价值浓度车组编发效率，而且能够在不改变既有技术站配流方案整体结构的前

表9 各配流方案结果对比

方案	出发 列车/列	未成功 发车列车/列	车辆在站 停留时间/h	货车平均 在站停留时间/h	高价值浓度货车平均 在站停留时间/h	站存车 数量/辆
传统配流方案	10	2	1 706.9	2.99	3.18	71
优化配流方案	调整前	2	1 706.9	2.99	2.98	71
	调整后	1	1 547.6	2.72	2.69	17

4.4 2 种配流方案对比

针对 VMS 算法求解出的配流方案，绘制并对比经 VMS 算法调整丢线编组内容后、考虑货车价值浓度的配流方案与不考虑货车价值浓度的配流方案，如图 7 所示。图中每 1 列出发列车对应 2 种配流方案，下方为不考虑货车价值浓度的传统配流方案；上方为考虑丢线及货车价值浓度的优化配流方案（调整后）。各车组分布如图 8 所示。

对比传统配流方案与优化配流方案（调整后），可以发现该算法的求解结果具有以下优势：

①该算法能够保障高价值浓度车组尽快发车，将原本分布于后续列车的高价值浓度车组移动到满足接续要求的前序列车中；②经算法调整后，传统配流方案中的欠轴列车能够成功发车，满足条件的普通价值浓度货车则尽可能多地编入出发列车，有效降低了货车在站总停留时间。

5 结 论

（1）在进行技术站配流时，根据定点集结模式

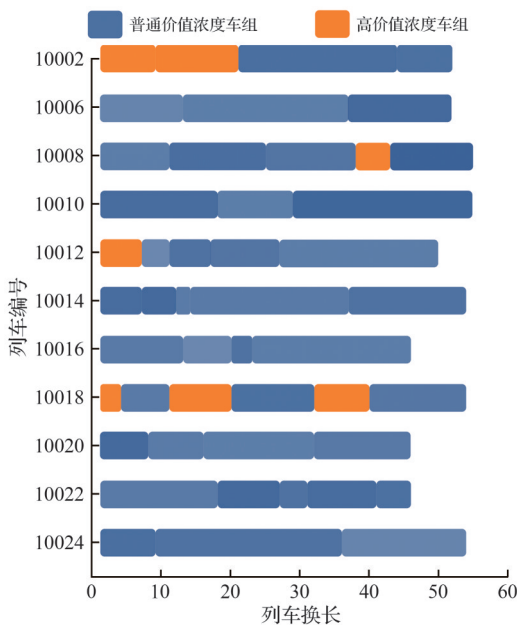


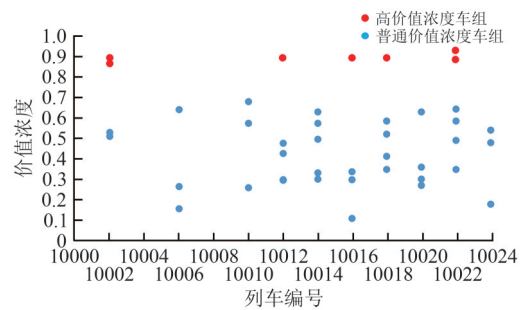
图6 调整后的考虑货车价值浓度的配流方案



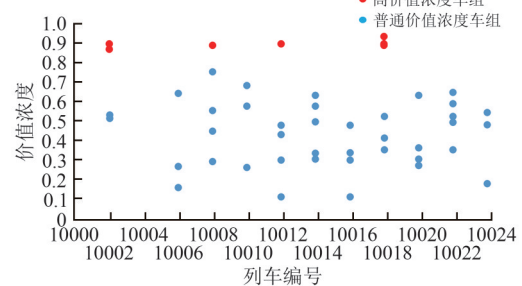
图7 2种配流方案对比

将到达车流按照价值浓度进行分类,依照“高价值浓度车组优先配流、普通价值浓度车组次之”的分解配流方法,可以使阶段计划内的高价值浓度货车在站总停留时间进一步降低,有效提高重点货物在站中转作业效率。

(2) 在最终形成的考虑货车价值浓度的多阶段配流方案中,高价值浓度车组集中于满足接续要求的最早出发列车中;通过算法的设计,避免了同时到发需求的货物被中转站拆分,满足了高价值浓度车组同组到发的要求。算例中,在考虑货车价值



(a) 传统配流方案



(b) 优化配流方案(调整后)

图8 2种情况下货车价值浓度的配流方案

浓度的技术站车流接续优化方案下,高价值浓度货车平均在站停留时间由3.18 h降低至2.69 h,同时所有车辆在站总停留时间减少了159.3 h。

(3) 相较于既有启发式算法,所设计的VMS算法可以快速求解得到丢线列车备选车流方向组合具体方案,且求解时基于最大车流接续目标下的最优解编顺序不仅能够进一步提升高价值浓度车组编发效率,而且能够在不改变既有技术站配流方案整体结构的前提下,实现对配流结果的优化。

参 考 文 献

- [1] Newton H N, Barnhart C, Vance P H. Constructing railroad blocking plans to minimize handling costs[J]. Transportation Science, 1998, 32(4): 330-345.
- [2] Jong G D, Kouwenhoven M, Kroes E, et al. Preliminary monetary values for the reliability of travel times in freight transport[J]. European Journal of Transport and Infrastructure Research, 2009, 9(2): 83-99.
- [3] Kurri J, Sirkiä A, Mikola J. Value of time in freight transport in Finland[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2000, 1725(1): 26-30.
- [4] 杨宗琴,薛锋,孙宗胜,等.考虑高价值敏感货物运输时效性的铁路货车集结模式选择研究[J].交通运输工程与信息学报,2021,19(1):126-134.
Yang Zongqin, Xue Feng, Sun Zongsheng, et al. Aggregation mode selection analysis for the transport of high-value sensitive goods[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2021, 19(1): 126-134.
- [5] 张颖金.考虑货车价值的列车编组计划优化研究[D].北京:北京交通大学,2021.
Zhang Yingjin. Research on the optimization of train formation plan considering the value of freight cars[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [6] 于婕,彭其渊,邓永洁.基于运到期限的技术站动态配流优化研究[J].铁道运输与经济,2023,45(9):1-8.

- Yu Jie, Peng Qiyuan, Deng Yongjie. Dynamic wagon-flow allocation based on transit period at railway technical station [J]. *Railway Transport and Economy*, 2023, 45(9): 1-8.
- [7] 刘畅. 确保高附加值货物运到时限的特殊车流组织办法[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.
Liu Chang. Special traffic flow organization method to ensure the arrival time of high value added goods[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [8] 吴兴堂, 杨明坤, 王洪伟, 等. 面向负载均衡的高铁路网列车开行方案优化方法[J]. *自动化学报*, 2022, 48(2): 492-503.
Wu Xingtang, Yang Mingkun, Wang Hongwei, et al. Load-balancing oriented line plan optimization for a high-speed railway network[J]. *Acta Automatica Sinica*, 2022, 48(2): 492-503.
- [9] Mosse D, Pollack M E, Ronen Y. Value-density algorithms to handle transient overloads in scheduling[C]//Proceedings of 11th Euromicro Conference on Real-Time Systems. Euromicro RTS'99. New York: IEEE Press, 1999: 278-286.
- [10] 冯芬玲, 刘洋. 考虑时间价值的中欧班列差异化补贴策略[J]. *铁道科学与工程学报*, 2023, 20(4): 1250-1260.
Feng Fenling, Liu Yang. Differentiated subsidy strategy of China Railway Express based on dynamic game theory[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2023, 20(4): 1250-1260.
- [11] Baugher R W. Simulation of yard and terminal operations[M]//Handbook of operations research applications at railroads. Boston, MA: Springer US, 2015: 219-242.
- [12] 国家统计局. 中国统计年鉴 2024[EB/OL]. [2025-11-13]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook 2024[EB/OL]. [2025-11-13]. <https://www.stats.gov.cn/sj/ndsj/2025/indexch.htm>.
- [13] 帅斌, 邓绍蔚, 黄丽霞. 基于改进RFM模型的铁路快捷货运客户市场细分方法[J]. *铁道科学与工程学报*, 2014, 11(1): 112-117.
Shuai Bin, Deng Shaowei, Huang Lixia. Railway express freight consumer market segmentation based on improved RFM model[J]. *Journal of Railway Science and Engineering*, 2014, 11(1): 112-117.
- [14] Wang Zhenjie, Dang Shaonong, Xing Yuan, et al. Applying rank sum ratio (RSR) to the evaluation of feeding practices behaviors, and its associations with infant health risk in rural Lhasa, Tibet[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(12): 15173-15181.
- [15] 李聪颖, 张洪涛, 负开拓, 等. 基于熵值-秩和比的城市级停车设施动态评价[J]. *长安大学学报(自然科学版)*, 2023, 43(3): 85-94.
Li Congying, Zhang Hongtao, Yun Kaituo, et al. Dynamic evaluation of city-level parking facilities based on entropy value and rank-sum ratio[J]. *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)*, 2023, 43(3): 85-94.
- [16] 付学谦, 陈皓勇. 基于加权秩和比法的电能质量综合评估[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(1): 128-132.
Fu Xueqian, Chen Haoyong. Comprehensive power quality evaluation based on weighted rank sum ration method[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(1): 128-132.
- [17] 杨昊, 张昊天, 张璐, 等. 氩气氛围下介电阻挡放电均匀度表征方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(11): 4667-4678.
Yang Hao, Zhang Haotian, Zhang Lu, et al. Characterization method of dielectric barrier discharge uniformity in argon atmosphere[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(11): 4667-4678.
- [18] 李晟东, 徐长安, 吕红霞, 等. 基于货物运到期限的编组站动态配流优化研究[J]. *交通运输系统工程与信息*, 2018, 18(5): 164-169, 177.
Li Shengdong, Xu Chang'an, Lü Hongxia, et al. Dynamic wagon-flow allocation based on freight delivery time frame in marshalling station[J]. *Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology*, 2018, 18(5): 164-169, 177.
- [19] 薛锋, 李海, 陈崇双, 等. 考虑列车解编时间随机性与出发时刻柔性约束的相邻技术站间协同配流研究[J]. *铁道学报*, 2023, 45(9): 20-33.
Xue Feng, Li Hai, Chen Chongshuang, et al. Collaborative railcar flow allocation between adjacent technical stations considering randomness of train disintegration and marshalling operation time and flexible constraint of departure time[J]. *Journal of the China Railway Society*, 2023, 45(9): 20-33.
- [20] 王慈光. 运输模型及优化[M]. 2版. 成都: 西南交通大学出版社, 2010.
Wang Ciguang. Transportation model and optimization[M]. 2nd ed. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2010.
- [21] 景云, 王慈光. 不确定条件下编组站动态配流模型及算法研究[J]. *铁道学报*, 2010, 32(4): 8-12.

Jing Yun, Wang Ciguang. Model and algorithm of dynamic wagon-flow allocating in a marshalling yard under uncertain conditions[J]. Journal of the China Railway Society, 2010, 32(4): 8-12.

Optimization method of wagon-flow allocation in railway technical stations considering wagon value concentration

Xue Feng^{1,2,3}, Huang Zhe¹, Xu Junlin¹, Chen Chongshuang^{2,4},
Zhang Shoushuai^{1,2,3}

(1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China;

2. National Engineering Laboratory of Integrated Transportation Big Data Application Technology, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China;

3. National and Local Joint Engineering Research Center of Integrated Transportation Intelligence, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China;

4. School of Mathematics, Southwest Jiaotong University, Chengdu Sichuan 611756, China)

Abstract: In order to improve the transfer efficiency of high-value goods in technical stations, the concept of wagon value concentration is firstly proposed to measure the operation priority level of wagon loaded with different goods in technical stations. Then the evaluation index system of value concentration for flow allocation resource in technical stations is established, and the value concentration of wagons is comprehensively calculated and sorted by weighted rank-sum ratio method. Secondly, a two-stage flow allocation model is designed with the objective of minimizing the residence time of wagons in technical stations and prioritizing the dispatch of high-value concentration wagons. Through changing the full load constraint of freight trains, different value concentration wagons are allocated in stages. Finally, the model is solved by a three-level method, and the value matching search (VMS) algorithm is designed to obtain the maximum departure scheme of lost trains with adjusted flow allocation content. The results show that compared to traditional wagon-flow allocation schemes, the optimized flow allocation scheme considering the value concentration of wagons reduces the average station residence time of high-value concentration wagons by 0.2 h. After adjusting the lost trains in the optimized scheme by VMS algorithm, the number of trains in the stage plan is increased by 1, resulting in a 159.3 h reduction in the total residence time of wagons. The average station residence time of high-value concentration wagons is further reduced by 0.29 h, and the dispatch position is concentrated in the pre-scheduled trains of the stage plan, which can effectively enhance the transfer efficiency of essential goods in technical stations.

Key words: Railway transportation; Technical station; Value concentration; Wagon-flow allocation scheme; Wagon-flow connection; High-value goods

(责任编辑 耿枢馨)