文章编号：1003-1421(2026)06-0130-10
引用格式：戴邵杰，景云，刘一奥，等. 基于预留车厢模式的高铁快运配装方案优化[J]. 铁道运输与经济，2026，48(6)：130-139，171.
DAI Shaojie，JING Yun，LIU Yiao，et al. Optimization of High Speed Rail Express Loading Scheme Based on Reserved Carriage Mode[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(6)：130-139，171.

基于预留车厢模式的高铁快运配装方案优化

戴邵杰[1]，景　云[1,2]，刘一奥[1]，郑泽中[1]

(1.北京交通大学 交通运输学院，北京　100044；2.北京交通大学 智慧高铁系统前沿科学中心，北京　100044)

摘　要：为满足日益多样化的快运货物运输需求，充分利用高速铁路旅客列车的空闲时段运力，创造铁路运输额外经济价值，研究基于高速铁路动车组预留车厢模式的高铁快运货物运输组织优化问题。首先，依据既定列车时刻表及上座率确定列车可供快运服务使用的最大预留车厢数量，依据物流服务需求确定货物运输OD、服务等级、运到时限等运输需求。其次，考虑车厢预留成本、货物逾期交付的违约成本以及货物等待时间成本，以高铁快运服务总收益最大化为目标，构建高速铁路列车车厢预留与货物配装方案优化模型。最后，对模型线性化处理，采用编程调用Gurobi求解器进行计算，得到车厢预留与货物配装方案。以武广高速铁路为例，验证所提出的货物配装方案能够较好满足不同服务等级货物的运输需求，通过敏感性分析研究货物到达率与货物价值重要度对高铁快运服务质量的影响程度，为高铁快运企业推行预留模式提供借鉴参考。

关键词：铁路运输；高铁快运；预留模式；车货匹配；配装方案
中图分类号：U294.1　　**文献标识码**：A　　**DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250317003

Optimization of High Speed Rail Express Loading Scheme Based on Reserved Carriage Mode

DAI Shaojie[1]，JING Yun[1,2]，LIU Yiao[1]，ZHENG Zezhong[1]

(1. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Frontier Science Center for Smart High Speed Rail System, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: To meet the increasingly diversified transportation demands of express cargo, utilize the idle transport capacity of high speed railway passenger trains, and create additional economic value for railway transportation, this paper studied the optimization of high speed rail express cargo transportation organization based on the reserved carriage mode of high speed electric multiple units. First, the maximum number of reserved carriages of trains available for express services was determined according to the established train operation timetables and seat occupancy rates, and the transportation demands such as cargo transportation OD, service levels, and delivery time limits were determined based on logistics service demands. Secondly, considering the carriage reservation cost, the default cost of overdue delivery of cargo, and the cargo waiting time cost, an optimization model for high speed railway train carriage reservation and cargo loading scheme was constructed

收稿日期：2025-03-17
通信作者：景云(1981—)，男，陕西宝鸡人，北京交通大学交通运输学院教授。
基金项目：国家自然科学基金项目(52372300)

with the objective of maximizing the total revenue of high speed rail express services. Finally, the model was linearized and calculated by calling the Gurobi solver through Python programming to obtain the carriage reservation and cargo loading scheme. Taking the Wuhan-Guangzhou High Speed Railway as an example, it is verified that the proposed cargo loading scheme can well meet the transportation demands of cargo with different service levels. Through sensitivity analysis, the influence degree of cargo arrival rate and cargo value importance on the service quality of high speed rail express is studied, providing a reference for high speed rail express enterprises to implement the reserved mode.

Keywords: Railway Transportation; High Speed Rail Express; Reserved Mode; Cargo-Train Matching; Loading Scheme

0　引言

随着我国高速铁路网络的持续完善，高铁快运服务已覆盖全国大部分主要城市，并逐步发展为一种新型的快运货物运输方式。高铁快运(CRH Express)凭借运量更大、速度更快、可靠性更强等优势[1]，能够更好满足快运货物对时效性、安全性的高要求。由于高铁客流需求呈现明显的周期性与潮汐性特征，在客运需求较低的时段，利用高速铁路动车组剩余运力开展高铁快运，不仅可以满足快运货物运输需求，还能提高铁路运力利用率，增加铁路运输收益。

近年来，不同高铁快运服务模式下的货物装配方案已成为研究热点，当前高铁快运服务主要包括“捎带模式”“预留模式”和“专列模式”。

“捎带模式”是指利用列车行李架等空余空间运输货物，主要用于满足少量快运需求，具有较高的灵活性。杨喜梅等[2]基于高铁快运网络货运需求可行路径集，结合列车装载状态与列车跨线运行情况，构建了旅客列车捎带模式的货物运输配装方案编制方法。Lu等[3]基于时空状态网络构建了高铁快运计划优化模型，针对不同货流安排合理的运输方案，以实现运营收入最大化。Xu等[4]针对确定性需求和随机需求情况分别构建了整数线性规划模型和两阶段随机规划模型，研究高铁快运列车容量分配方案优化问题。孙洪霞等[5]考虑不同周期和不同附加值的货物运输需求，研究客货共运模式下基于既定列车时刻表及客座率的高速铁路动车组货物捎带的运输组织优化问题。万茜[6]基于捎带运输模式研究考虑箱流中转的高铁快运方案优化问题，构建列车与快运箱时空网络模型，并利用拉格朗日算法将问题分解为单个快运箱最短路径问题求解。

“预留模式”是指在列车上预留部分车厢专门用于货物快运，主要适用于载客率较低的场景，可作为中等规模快运需求的常态化服务模式。米雷等[7]基于列车始发时间、列车停站时间、列车越行与货物装配方案等影响因素，研究客货混运下列车运行图、动车组编组与货物配装计划协同优化问题。徐光明等[8]考虑高铁快运需求的时效性与随机性，构建高铁快运计划优化的两阶段随机规划模型，并采用反向消减算法转化为包含有限场景数的确定性整数线性规划模型进行求解。Zhen等[9]提出将高铁货运问题分解为运输资源安排和货流分配决策2个关键问题，构建了两阶段随机整数线性规划模型，并提出了一种引入定制策略的元启发式解决方法进行求解。

“专列模式”指开行列车整车运送高铁快件，对其余旅客列车运行影响较大，主要服务于特定时期大规模快运需求。戚建国等[10]通过分析客货共运模式下货运办理站点对货物运输、旅客列车时刻表与停站方案的影响，提出以旅客旅行时间和未满足货物惩罚成本最小化为目标的高铁兼办货运方案优化问题。高如虎等[11]以高铁快运时变需求为导向，对夜间高铁快运服务方案进行集成优化，研究快件配送方案和列车时刻表与天窗开设的协调匹配关系。陈婉茹等[12]基于高铁快运多品类货物运输需求的异质性和不确定性，提出异质货物协同运输策略，研究高铁快运专列开行方案和货物配载方案的联合优化问题。

此外，也有学者尝试研究不同服务模式组合搭配下的高铁快运方案协同优化问题。董晋廷等[13]借鉴铁路阶段计划，将全天分为多个时段，以各时段的货运需求为导向，针对下个时段的高铁快运货物装配方案、列车停站方案和时刻表进行协同优化。

杨京帅等[14]引入“路径”刻画快运需求与服务车次的复杂关系，构建了运力共享模式下的高铁快运货物配装决策模型。Li 等[15]提出客货共享车厢和共享列车两种模式开展高铁货运，构建给定列车时刻表的流量分布时空网络，并通过引入惩罚成本考虑客货混合运输对乘客的影响。Zhen 等[16]基于各种高铁快运模式的运行特点，研究各高铁快运模式列车货物运输量以及每种模式的运力资源安排等综合优化问题。

目前高铁运输服务仍以旅客运输为主，因此在开展高铁快运服务时应确保不影响旅客运输，并尽可能利用空余运力开展货物运输。由于“预留模式”无需调整列车运行图或对车站基础设施进行改造，且可通过预留图定列车中部分空闲车厢装载货物，实现货物在高铁站之间的运输，因此在短期内较为适合高铁快运服务推广应用。

综上，基于预留车厢模式开展高铁快运货物配装方案优化问题，选择客座率较低的既定旅客列车，并针对不同服务等级的快运货物，优化列车预留车厢数量及货物配装方案。主要创新点在于：①考虑货物等待运输时间成本，引入货物到达起点站待运时间参数；②考虑货物运输服务等级多样性，构建基于分钟到达的动态货运需求；③构建多日、多始发站列车备选集合，以满足不同 OD、不同服务等级的货物运输需求。

1　问题描述

以一条双线高速铁路单个运行方向的列车作为研究对象，通过在部分既有旅客列车中预留车厢用于装载快运货物，针对基于分钟到达的 OD 货运需求，综合考虑快运服务等级、运到时限要求、列车装载能力、货物等待时间及列车预留成本等因素，优化列车预留车厢数量及各批次货物配装运输方案，以实现高铁快运企业总利润最大化的目标。为更直观地描述货物需求与列车的配装匹配关系，列车时刻表与货物配装关系示意图如图 1 所示。

图 1 展示了 3 列列车的运行线与 2 个货物运输需求。其中列车 1 在车站 1，2，4 停站，列车 2 在车站 2，3，4 停站，列车 3 在车站 1，2，3，4 均停站；货物 1 的 OD 为车站 2—4，服务等级为 1，货物

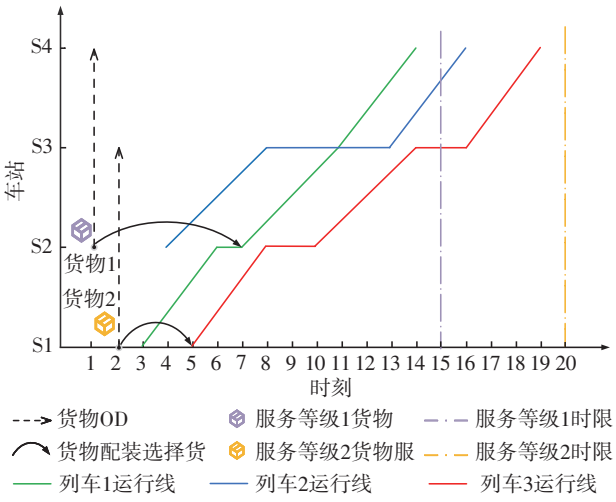

图 1　列车时刻表与货物配装关系示意图

Fig.1　Schematic diagram of relationship between train operation timetable and cargo loading

2 的 OD 为车站 1—3，服务等级为 2，服务等级 1 运到时限较等级 2 更早。通过货物配装选择可以看出列车与货物的匹配关系。

（1）货物 1 的 OD 为 2—4，且其在时刻 1 到达车站 2 等待运输，此时可选择列车 1 或列车 2 作为装载备选列车，但由于货物 1 的服务等级为 1，其对应运到时限为时刻 15，为确保满足该运到时限，货物 1 不选择出发时间较早的列车 2，而选择在时限范围内的列车 1 进行配装运输。

（2）货物 2 的 OD 为 1—3，且其在时刻 2 到达车站 1 等待运输，此时货物 2 可选择列车 1 或列车 3 进行运输，由于货物 1 的服务等级更高且已选择列车 1 配装，导致列车 1 剩余容量不足以装载货物 2，因此货物 2 只能选择列车 3 配装运输。

综上所述，货物服务等级、运到时限、列车停站情况及列车容量等多种因素综合影响高铁快运货物配装方案。此外，若考虑货物到站时间、货物等待时间以及车厢预留数量等限制条件，该问题的优化复杂度将进一步提升。

开展高铁快运服务应以不影响旅客运输为前提，因此采用预留车厢模式运输快运货物，即根据历史客运数据，在非客运高峰时段内选择客座率较低的车次，对动车组列车部分车厢采取不售票模式，确定可预留用于快运的车厢数。预留模式只改变部分车厢的用途属性，而不影响列车既定运行图，同时确定预留的车厢在动车组运输过程中不提

供客运服务，即预留车厢与旅客车厢相对独立，尽可能避免旅客上下车与货物装卸的交叉干扰，减少快运对于客运服务的影响。

目前现行的高铁快运产品主要包括4种限时服务：当日达、次晨达、次日达、隔日达。为契合现实运输作业，同时发挥高铁快运服务快速、便捷的特点，选择以下3种货物运输服务等级。

（1）当日达：服务时效为当日10:00前所承接的快运货物，运到时限为当日22:00前。

（2）次晨达：服务时效为当日18:00前所承接的快运货物，运到时限为次日11:00前。

（3）次日达：服务时效为当日20:00前所承接的快运货物，运到时限为次日22:00前。

2　模型构建

2.1　模型假设

（1）高铁快运服务以不影响旅客运输为前提，假设货物装卸作业不得占用旅客上下车通道。

（2）假设旅客列车运行时刻表已知且不考虑晚点等特殊情况。

（3）为便于计算货物量，假设所有快运货物均使用标准大小货运箱装载，即快运货物最小单位为箱。

2.2　符号说明

符号及定义说明如表1所示。

2.3　目标函数

开展高铁快运可充分利用富余运力资源，提高铁路运输效益。因此以高铁快运企业收益最大化为优化目标，收益由货物运输收入减去总成本得到，总成本包括以下3部分。

（1）车厢预留成本。列车预留快运车厢所产生的固定成本。

（2）货物等待时间成本。货物在车站等待装运的时间成本。

（3）货物逾期交付违约成本。因未能在运到时限内完成货物交付而产生的违约成本。

$$\max f=\sum_{q\in Q}\sum_{k\in K}y_q^k w_q r_{l_q}^{(i_q,\ j_q)}-\sum_{k\in K}x_k c_k^{\mathrm{res}}-\sum_{q\in Q}\sum_{k\in K}y_q^k w_q c^{\mathrm{box}}\cdot\max\left(0,\ t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}}-t_q\right)-\sum_{q\in Q}\sum_{k\in K}y_q^k w_q c_{l_q}^{\mathrm{pen}}\cdot\max\left(0,\ t_{k,\ j_q}^{\mathrm{arr}}-u_{l_q}\right)\tag{1}$$

表1　符号及定义说明

Tab.1　Description of symbols and definitions

符号		定义
集合	K	列车集合$k\in K$
	S	车站集合$s\in S$
	S_k	列车k的停站集合$s\in S_k$
	Q	货物集合$q\in Q$
	L	货物服务等级集合$l\in L$
	OD	货物发到站点集合$(i,\ j)\in OD$
参数	p_k^s	0-1参数，若列车k在车站s停站则值为1，否则为0
	$t_{k,\ s}^{\mathrm{arr}}$	列车k在s站到达时刻
	$t_{k,\ s}^{\mathrm{dep}}$	列车k在s站出发时刻
	e_s	车站装卸货物效率，箱/min
	a_k	列车k最多可预留车厢数，节
	b_k	列车k单节车厢装载能力，箱
	$(i_q,\ j_q)$	货物q的发到站OD对
	w_q	某批次货物q的数量，箱
	l_q	某批次货物q的服务等级
	t_q	某批次货物q到出发车站时刻
	u_l	某服务等级为l的货物最晚运到时限
	f	高铁快运企业收益，元
	c_k^{res}	列车k预留一节车厢的单位成本，元/节
	c^{box}	货物在出发站等待运输的单位时间成本，元/箱分钟
	c_l^{pen}	服务等级为l的货物逾期送达惩罚成本，元/箱分钟
	$r_l^{(i,\ j)}$	货物服务等级为l、OD对为$(i,\ j)$的货物单位运输收入，元/箱
决策变量	x_k	列车k预留货运车厢数
	y_q^k	0-1变量，若货物q使用列车k运输则值为1，否则为0

2.4　约束条件

（1）列车装载能力约束。列车在各停靠站点完成货物装卸后，其在车货物量不超过列车预留车厢的最大装载能力。

$$\sum_{q\in Q,\ i_q\leqslant s}y_q^k w_q-\sum_{q\in Q,\ j_q\leqslant s}y_q^k w_q\leqslant x_k b_k\qquad\forall k\in K,\ s\in S_k\tag{2}$$

（2）单件货物不可分割。每件货物只能由一列列车安排运输，保证单批次货物运输的完整性。

$$\sum_{k\in K}y_q^k=1\qquad\forall q\in Q\tag{3}$$

（3）车货时间匹配约束。仅当货物到达起点站的时刻早于列车在该站的出发时刻时，该货物才能安排由此列车运输。

$$t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}}\geqslant t_q-M\left(1-y_q^k\right)\qquad\forall k\in K,\ q\in Q\tag{4}$$

（4）车货配装约束。货物只能由同时在其起点站和终点站停靠的列车装载运输。

$$y_q^k\leqslant p_k^{i_q}p_k^{j_q}\qquad\forall k\in K,\ q\in Q\tag{5}$$

（5）车厢预留限制。高铁快运以不影响客运服务为前提，依据客运需求确定列车预留车厢最大限额，预留的快运车厢数不能超过该限额。

$$x_k \leqslant a_k \qquad \forall k \in K \tag{6}$$

（6）车站装卸时间约束。列车在停靠车站的装卸货物总和不能超过列车既定停站时间内能完成的最大装卸量。

$$\sum_{q \in Q,\ i_q = s} y_q^k w_q + \sum_{q \in Q,\ j_q = s} y_q^k w_q \leqslant e_s \cdot (t_{k,\ s}^{\mathrm{dep}} - t_{k,\ s}^{\mathrm{arr}})$$

$$\forall k \in K,\ s \in S_k \tag{7}$$

（7）变量约束。

$$x_k \in \mathbb{N},\ y_q^k \in \{0,\ 1\} \qquad \forall k \in K,\ q \in Q \tag{8}$$

2.5　模型线性化处理

目标函数中 $\max\left(0,\ t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}} - t_q\right)$ 与 $\max\left(0,\ t_{k,\ j_q}^{\mathrm{arr}} - u_{l_q}\right)$ 为非线性表达式，为便于求解需要对其进行线性化处理。

$$\alpha_{q,\ k} = \max\left(0,\ t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}} - t_q\right) \tag{9}$$

$\alpha_{q,\ k}$ 表示货物在出发站等待时间，引入0–1变量 γ 和足够大正数 M_1，可等价转换为如下约束式。

$$\alpha_{q,\ k} \leqslant M_1 \gamma \qquad \forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{10}$$

$$\alpha_{q,\ k} \geqslant t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}} - t_q \qquad \forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{11}$$

$$\alpha_{q,\ k} \leqslant \left(t_{k,\ i_q}^{\mathrm{dep}} - t_q\right) + (1 - \gamma) M_1$$

$$\forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{12}$$

$$\alpha_{q,\ k} \in \mathbb{N},\ \gamma \in \{0,\ 1\},\ M_1 \in \mathbb{R}^+ \tag{13}$$

同理，令

$$\beta_{q,\ k} = \max\left(0,\ t_{k,\ j_q}^{\mathrm{arr}} - u_{l_q}\right) \tag{14}$$

$\beta_{q,\ k}$ 表示货物逾期送达超出时间，引入0–1变量 δ 和足够大正数 M_2，可等价转换为如下约束式。

$$\beta_{q,\ k} \leqslant M_2 \delta \qquad \forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{15}$$

$$\beta_{q,\ k} \geqslant t_{k,\ j_q}^{\mathrm{arr}} - u_{l_q} \qquad \forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{16}$$

$$\beta_{q,\ k} \leqslant \left(t_{k,\ j_q}^{\mathrm{arr}} - u_{l_q}\right) + (1 - \delta) M_2$$

$$\forall k \in K,\ q \in Q,\ l \in L \tag{17}$$

$$\beta_{q,\ k} \in \mathbb{N},\ \delta \in \{0,\ 1\},\ M_2 \in \mathbb{R}^+ \tag{18}$$

经过线性化处理后目标函数可等价转换为

$$\max f = \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} y_q^k w_q r_{l_q}^{(i_q,\ j_q)} - \sum_{k \in K} x_k c_k^{\mathrm{res}} - \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} y_q^k w_q c^{\mathrm{box}} \alpha_{q,\ k} - \sum_{q \in Q} \sum_{k \in K} y_q^k w_q c_{l_q}^{\mathrm{pen}} \beta_{q,\ k} \tag{19}$$

s.t. 公式(2)—(8)，公式(10)—(13)，公式(15)—(18)

综上，构建的模型可归纳为整数规划模型(ILP)，可使用Gurobi商业求解软件快速求解。

3　算例分析

3.1　算例信息

（1）线路车站。为验证上述模型的可行性，选取武广高速铁路(武汉—广州南)武汉至广州方向作为算例，利用编程调用Gurobi求解器进行优化求解。基于沿线车站所在城市快运业务量，选取武汉、咸宁北、岳阳东、长沙南、株洲西、衡阳东、郴州西、韶关、广州南(广州白云)共9个高速铁路站点作为高铁快运服务节点，并以1—9进行编号。由于武广高速铁路部分列车终到广州白云站，故将广州南站与广州白云站合并处理，武广高铁快运站点示意图如图2所示。

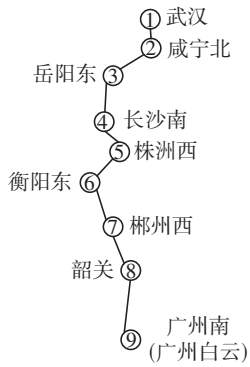

图2　武广高铁快运站点示意图

Fig.2　Schematic diagram of express stations of Wuhan–Guangzhou High Speed Railway

（2）列车信息。为满足当日达、次晨达、次日达3种服务等级的运到时限要求，选取2个运输日作为一个计算周期，并以分钟作为最小时间单位。该周期从第1天00:00开始至第2天24:00结束，共计2 880 min。选取2 d内由武汉站、长沙南站始发，终到广州南(广州白云)站的图定列车共计24列，以“1–Gxxxx”和“2–Gxxxx”区分不同运输日同车次编号的列车。快运备选列车运行图如图3所示，其中2 d同车次列车用相同颜色显示，图中圆点表示列车停站信息。

（3）货物需求。本研究中高铁快运货物需求包含起点站、终点站、货物箱数、到站时刻、服务类型5个属性，为模拟现实中快运货物动态到达特性，假设货物到达出发站服从泊松分布，到达率

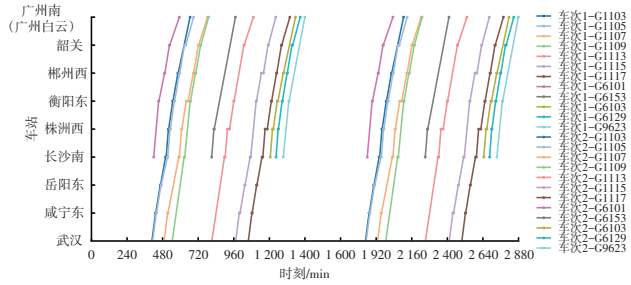

图3　快运备选列车运行图

Fig.3　Train working diagram of express alternative trains

λ = 0.1箱/min，并构建基于分钟到站的快运货物需求集合。算例共涉及200批次、合计1 555箱货物，其详细数据已上传http://dx.doi.org/10.13140/RG.2.2.12570.35526。快运货物需求如图4所示，按“当日达”“次晨达”“次日达”分别显示不同服务等级下各个批次货物的起讫站点、货物数量与到站时刻信息。

（4）参数设定。为确保算例研究的合理性，依据中铁快运股份有限公司快运服务价格，设定算例中不同OD需求下各类服务等级的货物运输收入。同时，参考文献[17]设定不同服务等级货物逾期运到违约成本c_l^{pen}和货物等待时间成本c^{box}，参数设定如表2所示。此外，根据列车上座率确定各列车最大可预留车厢限制。在成本测算方面，假设预留车厢单位成本为10 000元/节。参照测算的高铁快运货运箱的标准大小(66 cm×50 cm×35 cm)[18]，设定预留车厢最大装载容量为80箱/节，设定列车在发到站的装卸效率为100箱/min，其余中间停靠车站均设为60箱/min[17]。

3.2　结果分析

（1）列车预留与装载分析。基于上述参数设定，经过计算求解得到最优车厢预留与货物配装方案，最终优化目标值收益为283 269.28元。其中车厢预留成本为90 000.00元，共选择9列车预留9节车厢，各车次列车预留车厢情况如表3所示。

表2　参数设定

Tab.2　Parameter setting

参数	设定值/(元/箱分钟)
c_1^{pen}	0.8
c_2^{pen}	0.4
c_3^{pen}	0.2
c^{box}	0.05

表3　列车预留车厢情况

Tab.3　Reserved carriage situation of trains

车次	预留车厢数/节	车次	预留车厢数/节
1-G1103	0	2-G1103	1
1-G1105	1	2-G1105	1
1-G1107	1	2-G1107	0
1-G1109	0	2-G1109	1
1-G1113	1	2-G1113	0
1-G1115	0	2-G1115	1
1-G1117	1	2-G1117	0
1-G6101	0	2-G6101	0
1-G6153	0	2-G6153	0
1-G6103	0	2-G6103	0
1-G6129	1	2-G6129	0
1-G9623	0	2-G9623	0

通过统计各列车在运行区段内货物装载率可以评估车厢预留数量方案的合理性。各区段内列车货

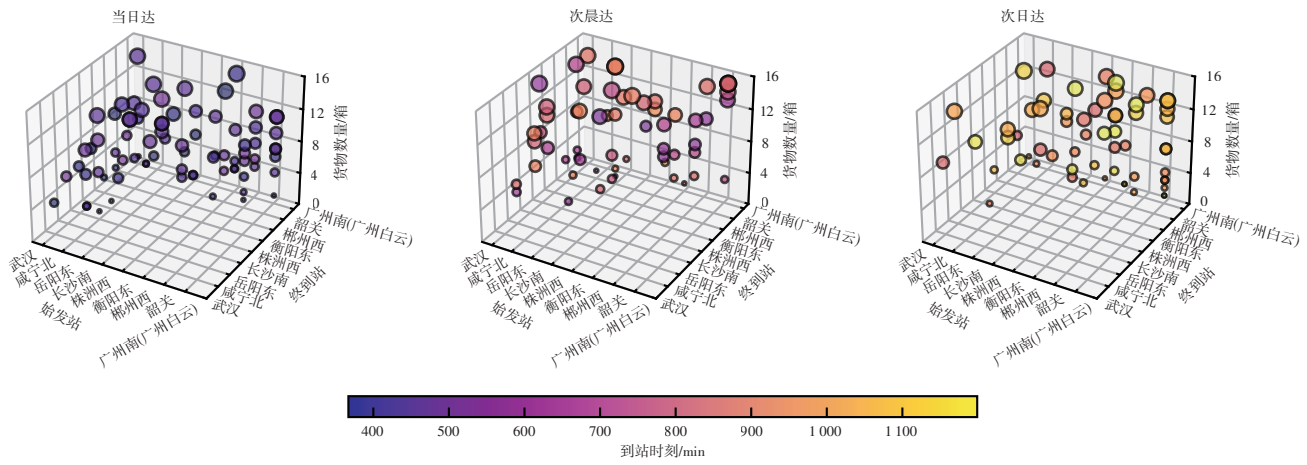

图4　快运货物需求

Fig.4　Express cargo demand

物装载率如图5所示。热力图中每一格颜色代表该列车在各区段内的货物装载率，在9列预留列车中有6列列车平均装载率达到75%以上，表明所提出的货物配装方案能够有效利用列车的空余运力。

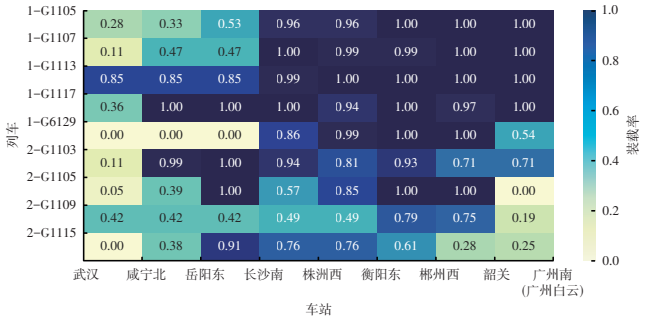

图5　各区段内列车货物装载率

Fig.5　Cargo loading rate of trains in each section

（2）货物配装方案分析。配装方案结果表明，所有货物都分配至相应列车完成运输，货物运输收入408 587.83元。其中大部分货物均能在其服务等级对应的运到时限内到达终点站，仅10批次共61箱货物逾期送达，占总货运需求的3.92%，产生逾期违约成本686.80元。不同服务等级货物的逾期运到情况如表4所示，分析主要原因在于部分货物到站时刻已晚于适配列车的出发时刻，因此只能选择较晚或推迟至第二日的列车装载，造成货物未能准时送达。

表4　不同服务等级货物逾期送达情况

Tab.4　Overdue delivery situation of cargo with different service levels

服务等级	逾期数量/箱	逾期率/%
当日达	10	1.82
次晨达	51	9.66
次日达	0	0

模型目标函数考虑了货物在站等待时间成本，即货物到达起点站后需等待可装载列车的时间。算例结果显示，总货物等待时间成本为34 631.75元，各批次货物在站等待时间分布如图6所示，其中以圆点代表各批次货物，散点的颜色区分货物不同等待时间。计算得到各货物等待时间占比如表5所示，90.8%的货物在站等待时间控制在1 200 min以内，表明模型得到的配装方案在当前货物需求下，能够较好匹配货物到站时间。

（3）车站货物堆积分析。由于货物的到站时刻与列车出发时刻可能存在一定的偏差，货物在车站

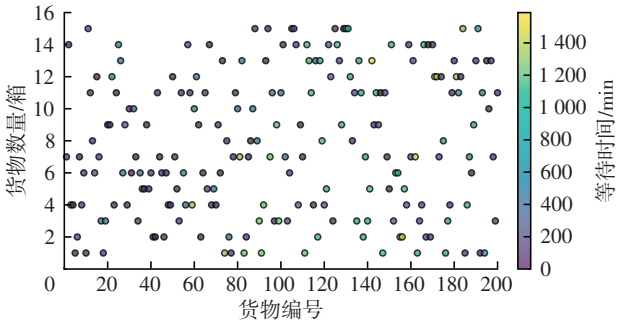

图6　各批次货物等待时间分布

Fig.6　Distribution of waiting time for cargo of each batch

表5　货物等待时间占比

Tab.5　Proportion of cargo waiting time

等待时间/min	货物数量/箱	占比/%
[0，400)	974	62.64
[400，800)	218	14.02
[800，1 200)	220	14.15
[1 200，1 600)	143	9.20

等待装载时会占用部分站内空间，因此需要尽可能减少货物堆积。算例计算结果各车站货物堆积情况如图7所示，可以看出各个车站货物堆积分布情况较为均衡，各车站最大货物堆积量均不超过20箱，表明上述模型所提出的货物配装方案能有效平衡各车站的货物分布，避免出现货物在站大规模堆积的情况。

3.3　敏感性分析

通过上述分析可知，构建的优化模型能够较好地匹配货物运输需求。同时研究发现货物到站时刻、列车运行时刻、货物服务等级等多方面因素均会影响高铁快运货物配装方案。鉴于预留模式以不影响旅客运输服务为前提，因此不对列车运行相关参数进行调整，而进一步对货物到站时刻分布和不同服务等级下逾期违约成本2方面参数进行敏感性分析。

（1）货物到达率参数。本研究假设货物到达起点站服从泊松分布，因此对货物到达率参数λ进行分析，参数λ表示单位时间内货物到达数量，λ越大表示货物到达越集中。在保持其余参数不变情况下，通过设定不同到达率λ，比较分析货物准时送达率与平均等待时间结果，以研究不同货物到达率对配装方案运输效果的影响。

不同到达率下货物配装方案运输效率变化如图8所示，结果表明，随着λ取值增大，货物准时送达

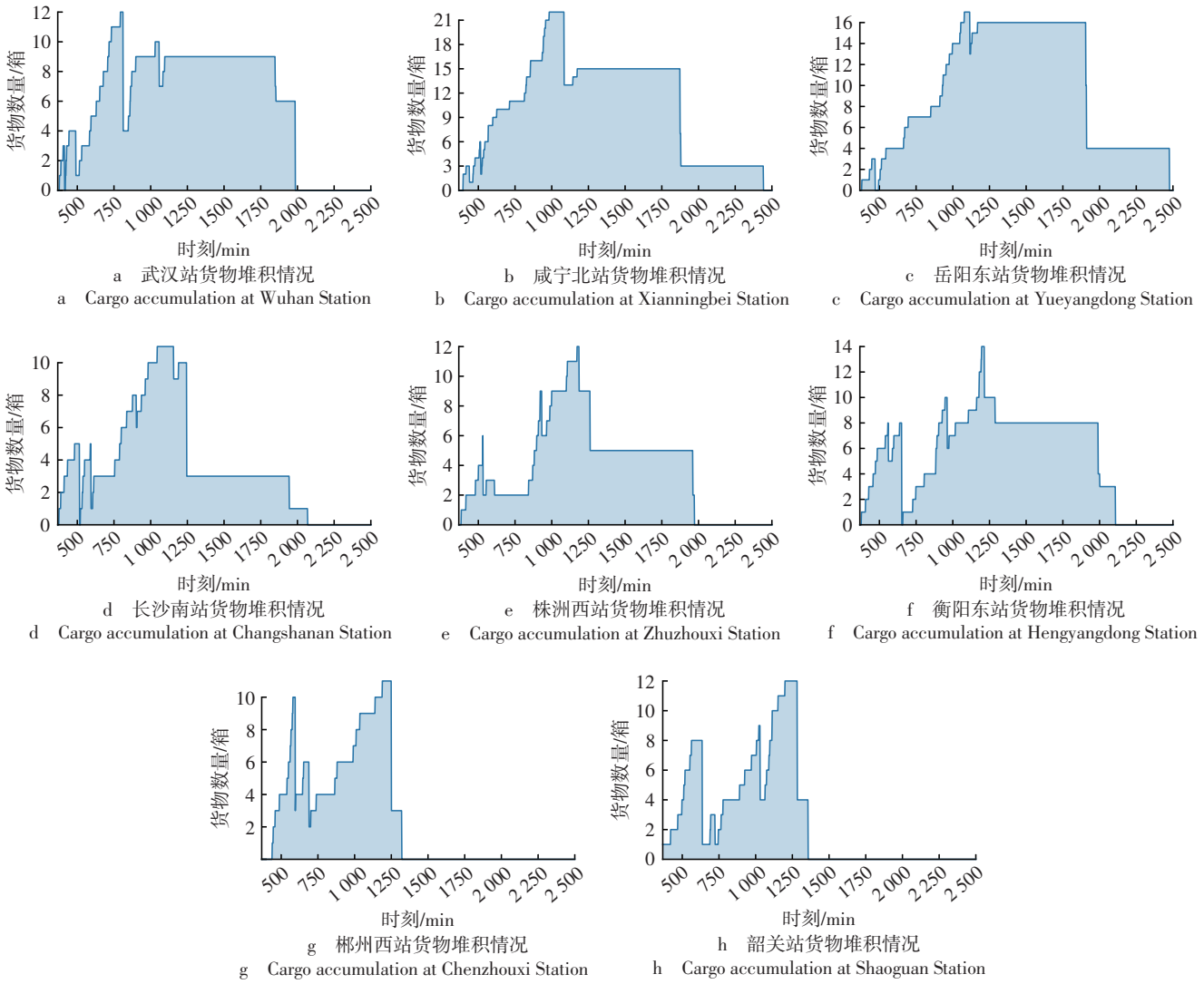

图7　各车站货物堆积情况

Fig.7　Cargo accumulation in each station

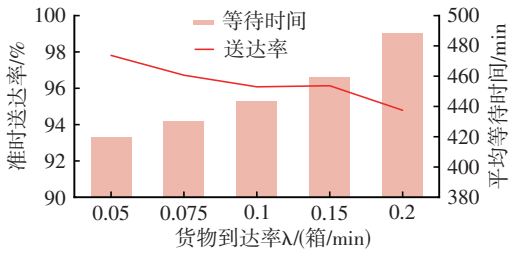

图8　不同到达率下货物配装方案运输效率变化

Fig.8　Variation of transportation efficiency of cargo loading scheme under different arrival rates

率下降且货物平均等待时间增加，说明货物在短时间内集中到达会显著影响高铁快运货物运输效率。分析原因在于：①当λ增大时，短时间内到达车站的货物数量可能超过列车预留的装载能力，导致部分货物无法得到及时装载，从而在车站内产生一定规模的货物堆积，导致货物等待时间延长；②同时由于预留模式下列车发车时刻表固定，而随着货物的持续到达，堆积在站的货物需要等待后续列车装载运输，若2列列车之间接续间隔过长，部分货物可能会因为等待后续列车而导致超过运到时限，进而降低货物准时送达率。综上，说明高铁快运系统的运输效率对货物到达模式较为敏感，尤其是在短时间内货物集中到达时，容易形成运力瓶颈。因此，可基于历史货物流量趋势，提前预测货运需求高峰期，并相应调整预留运力资源；或采用预约机制，引导客户在非高峰时段安排发货，以减少货物在特定时段内集中到达，平衡各时段货物流量。

（2）逾期运到违约成本参数。不同服务等级货

物价值重要性可通过逾期运到违约成本来衡量，逾期违约成本越高说明该服务等级货物越重要，更需要安排优先运输。在3.1节算例设定的逾期运到违约成本下，得到的货物配装方案运输“当日达”货物逾期送达率为1.82%，“次晨达”货物逾期率为9.66%，“次日达”货物逾期率为0%，相较之下，“次晨达”货物逾期送达率明显较高。为进一步探究不同服务等级货物的价值重要度对快运货物运输效率的影响，通过调整“次晨达”货物逾期运到违约成本参数c_2^{pen}，对比各服务等级货物的准时送达率与平均等待时间，以分析逾期运到违约成本参数对快运货物运输效率的影响。

不同违约成本下各服务等级货物运输效率如图9所示。结果表明，随着“次晨达”逾期运到违约成本参数c_2^{pen}逐步上升时，“次晨达”货物准时送达率显著提升，平均等待时间呈现先增加后减少变化趋势；与此同时“次日达”货物的等待时间明显延长，而对“当日达”货物的影响较小。分析原因在于：当逾期运到违约成本参数增加时，“次晨达”货物价值重要度相较于“次日达”货物得到进一步提高，在决策时更倾向于优先安排“次晨达”货物的运输，从而提升其准时送达率并缩短其等待时间；而由于“当日达”货物服务等级最高，仍处于优先运输地位，因此受影响较小；此外，由于逾期运到违约成本通常高于货物等待时间成本，因此可通过适当延长部分货物的等待时间，以换取整体更高的货物准时送达率。上述分析结果说明，货物逾期违约成本的设定会对整体货物配装方案运输效率产生影响。因此运输企业可根据对不同货物的价值重要度采取差异化策略，制定更细分的货运服务种类，并通过设定合理的逾期违约成本系数，有效平衡多种服务等级货物的配装运输次序，提升全品类货物运输方案综合效益。

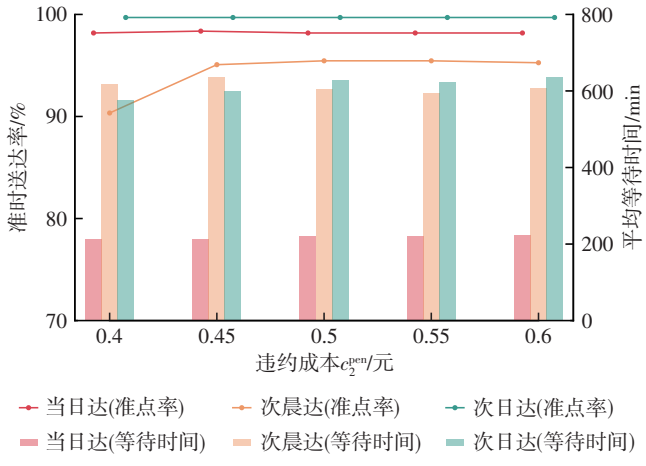

图9　不同违约成本下各服务等级货物运输效率

Fig. 9　Transportation efficiency of cargo with different service levels under different penalty costs

4　结论

本研究提出了一种基于高铁车厢预留模式的快运货物运输组织优化模型，依据2个运输日内既定列车时刻表及剩余运力，考虑服务等级、到站时刻、OD、数量等多维货物运输需求属性。以最大化高铁快运服务总收益为目标，综合车厢预留成本、货物逾期送达违约成本以及货物等待时间成本，同时引入列车区间装载能力、车货站点时间匹配、最大预留车厢限制等约束条件，从而优化高速铁路列车车厢预留与货物配装方案，以满足不同服务类型货物的运输需求。通过对货物到达分布与货物服务等级逾期成本参数进行敏感性分析，研究发现：①短期内货物集中到达会显著降低高铁快运服务质量；②不同货物的价值重要度区分会影响其他服务等级货物的运输效率。研究结果可为铁路运输企业推行预留模式开展高铁快运服务提供理论借鉴与实践参考。

目前仅针对单条高铁线路展开研究，未来可将范围拓展至高铁网络化运营场景，考虑跨线中转、路径优化等运输组织方式，以满足更大规模的货物运输需求；同时现有模型约束尚未考虑各站点的快运服务能力，后续可引入车站装卸效率、最大容量限制等车站运营属性开展进一步研究。

参考文献：

[1] 黄宝静，陈　诚，周凌云，等. 基于Petri网的高铁快运医药冷链作业流程优化及仿真[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：126-135，160.
HUANG Baojing，CHEN Cheng，ZHOU Lingyun，et al. Optimization and Simulation of Pharmaceutical Cold Chain Workflow of High Speed Rail Express Based on Petri Net[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：126-135，160.

[2] 杨喜梅，康柳江，孙会君，等. 旅客列车捎带模式下的高铁快运网络配装方案优化[J]. 系统工程理论与实践，2024，44(5)：1699-1713.

YANG Ximei，KANG Liujiang，SUN Huijun，et al. Demand Assignment for Express Delivery in High Speed Railway Networks：A Passenger Train Delivery Mode[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2024，44(5)：1699-1713.

[3] LU T E，CHEN J H，ZHAO C X，et al. Optimization of High-Speed Rail Express Transportation Plan Considering Products' Variable Time Requirements[J]. Applied Sciences，2023，13(12)：6919.

[4] XU G M，GUO J，ZHONG L H，et al. Optimal Capacity Allocation for High Speed Railway Express Delivery[J]. Computers & Industrial Engineering，2023，185：109683.

[5] 孙洪霞，石俊刚，邸　振. 基于价值差异化的高铁列车捎带货物运输组织研究[J]. 铁道科学与工程学报，2025，22(5)：1949-1960.
SUN Hongxia，SHI Jungang，DI Zhen. Organization of Piggyback Cargo Transportation of High Speed Rail Trains Based on Value Differentiation[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2025，22(5)：1949-1960.

[6] 万　茜. 考虑中转的高铁快运时空路径优化模型及拉格朗日松弛算法[J]. 铁道运输与经济，2025，47(3)：9-19.
WAN Qianxi. Time-Space Path Optimization Model and Lagrangian Relaxation Algorithm for High Speed Railway Express Considering Transit[J]. Railway Transport and Economy，2025，47(3)：9-19.

[7] 米　雷，卢亚菡，杨立兴，等. 客货混运下高铁运行图与货物配装方案协同优化[J]. 控制与决策，2025，40(1)：308-316.
MI Lei，LU Yahan，YANG Lixing，et al. Integrated Optimization of the Train Timetable and Freight Allocation on Shared Freight and Passenger High Speed Railway System[J]. Control and Decision，2025，40(1)：308-316.

[8] 徐光明，郭　婧，陈婉茹，等. 考虑随机运能和送到时限的高铁快递运输计划优化方法[J]. 控制与决策，2024，39(8)：2755-2764.
XU Guangming，GUO Jing，CHEN Wanru，et al. Optimization Method for High Speed Railway Express Transport Plan Considering Stochastic Capacity and Delivery Time Windows[J]. Control and Decision，2024，39(8)：2755-2764.

[9] ZHEN L，FAN T Y，LI H L，et al. An Optimization Model for Express Delivery with High Speed Railway[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2023，176：103206.

[10] 戚建国，周亚茹，杨立兴，等. 客货共运模式下高铁列车货运兼办方案优化[J]. 北京交通大学学报，2023，47(4)：1-11.
QI Jianguo，ZHOU Yaru，YANG Lixing，et al. Optimization Strategies for Freight on High Speed Railway Trains under Co-Transportation of Passenger and Freight[J]. Journal of Beijing Jiaotong University，2023，47(4)：1-11.

[11] 高如虎，王倩瑜，牛惠民. 高铁快运夜间列车服务方案集成优化[J]. 交通运输系统工程与信息，2024，24(6)：254-264.
GAO Ruhu，WANG Qianyu，NIU Huimin. Collaborative Optimization for Overnight Train Service Plan of High Speed Railway Express[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology，2024，24(6)：254-264.

[12] 陈婉茹，张得志，秦　进，等. 考虑货物异质性和模糊需求的高速铁路货运组织优化方法[J]. 铁道学报，2023，45(11)：20-28.
CHEN Wanru，ZHANG Dezhi，QIN Jin，et al. Optimization Method for Operation Scheme for High Speed Railway Freight Trains Based on Heterogeneous Fuzzy Demands[J]. Journal of the China Railway Society，2023，45(11)：20-28.

[13] 董晋廷，朱晓宁，王　力. 面向实时需求的高铁快运列车运输组织方案协同优化研究[J]. 铁道科学与工程学报，2024，21(6)：2172-2182.
DONG Jinting，ZHU Xiaoning，WANG Li. The Collaborative Optimization of High Speed Railway Freight Train Transportation Organization Scheme for Real-Time Demand[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2024，21(6)：2172-2182.

[14] 杨京帅，杨玉娥，李嫚嫚，等. 基于运力共享的高铁快运货物搭载决策研究[J]. 系统工程理论与实践，2024，44(6)：2046-2058.
YANG Jingshuai，YANG Yu'e，LI Manman，et al. Cargo Carrying Decision-Making Method of High Speed Railway Express Based on Transportation Capacity Sharing[J]. Systems Engineering—Theory & Practice，2024，44(6)：2046-2058.

[15] LI S Q，ZHU X N，SHANG P，et al. Optimizing a Shared Freight and Passenger High Speed Railway System：A Multi-Commodity Flow Formulation with Benders Decomposition Solution Approach[J]. Transportation Research Part B：Methodological，2023，172：1-31.

[16] ZHEN L，ZHANG N Z，YANG Z Y. Integrated Optimization

（下转第 171 页）