

文章编号: 1005-0523(2024)06-0081-09



分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化

邱振, 左晗琦, 罗俊

(华东交通大学交通运输工程学院, 江西南昌 330013)

摘要:【目的】为了研究分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化问题,对列车、需求与潜在的时空轨迹之间的关系进行了重构,从而构建了整数线性规划模型,替代了传统的非线性规划模型。【方法】该模型的目标函数包含了货运列车的运用数量、客运需求的等待时间以及货运需求的滞留时间,所需满足的限制条件主要包括客货需求的流平衡约束、客货列车的容量约束、客运需求的最长等待时间约束以及货运需求的最长滞留时间约束等。通过松弛表示客货流量分配的整型变量,原始模型可等价地转化为混合整数规划模型,这可提高模型的求解效率。以北京地铁原八通线为场景构造一系列算例,并利用商业求解器 Gurobi 对其进行求解。【结果】实验结果表明:相较于原始模型, Gurobi 能够更快地求解松弛模型;相较于原时刻表,优化后的时刻表能够减少系统的广义成本。【结论】所提出的方法不仅能够满足分车模式下的地铁客货协同运输需求,而且可以有效控制分车模式下的地铁货运对客运需求的影响。

关键词: 地铁货运; 客货协同运输; 分车模式; 时刻表

中图分类号: U121

文献标志码: A

本文引用格式: 邱振, 左晗琦, 罗俊. 分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化[J]. 华东交通大学学报, 2024, 41(6): 81-89.

Joint Optimization of Metro Passenger-Freight Cotransportation and Timetable Under Train-Dedicated Mode

Di Zhen, Zuo Hanqi, Luo Jun

(School of Transportation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: 【Objective】In order to study the joint optimization problem of metro passenger-freight cotransportation and timetable under the train-dedicated mode, the relationships between trains, demands and potential space-time trajectories are reconstructed and an integer linear programming model is formulated instead of the traditional nonlinear programming model. 【Method】The objective function of this model includes the number of freight trains in use, the waiting time of passenger demand as well as the detention time of freight demand. The restriction conditions to be met mainly include the flow balance constraints of passenger and freight demands, the capacity constraints of passenger and freight trains, the longest waiting time constraint of passenger demand and the longest detention time constraint of freight demand. By relaxing the integer-type variables of passenger and freight flows, the primal model could be equitably transformed into a mixed integer programming model, which can improve the solving efficiency of the model. Taking the original Batong Line of Beijing Metro as the background information, a series of numerical examples were designed and then solved by commercial solver Guro-

收稿日期: 2024-05-31

基金项目: 国家自然科学基金项目(72161010)

bi. **【Result】**The experimental results show that Gurobi can solve the relaxation model faster than the primal model; and compared with the original timetable, the optimized timetable can reduce the generalized cost. **【Conclusion】**The proposed method can not only meet the needs of subway passenger and freight cotransportation in the split mode, but also effectively control the influence of metro freight on passenger demand under this mode.

Key words: metro freight; passenger-freight cotransportation; split mode; timetable

Citation format: DI Z, ZUO H Q, LUO J. Joint optimization of metro passenger-freight cotransportation and timetable under train-dedicated mode[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2024, 41(6): 81–89.

【研究意义】基于地铁的客货协同运输是近年来的研究热点^[1-4],在运营操作上有客货分车和客货共车两种模式^[5-6],且有关后者的研究居多。客货共车模式虽然在资源的利用率上更有优势,但对乘客的影响较大。因此,研究分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化问题,具有一定学术意义和实际应用价值。

【研究进展】对于给定的地铁时刻表,Di等^[7]研究了客货共车模式下的车厢分配和流量控制联合优化问题,该问题被构建成一个整数线性规划模型,并采用了基于Benders分解的精确算法进行求解。邸振等^[8]更加细致地考虑了货运需求的运输方式约束和客货需求的时间窗约束,利用商业求解器Cplex对所构建的模型进行求解。此外,杨婷等^[9]构建了基于地铁的地下物流路径优化模型,并采用了遗传算法求解。郑长江等^[10]设计了基于道路和地铁的地上地下协同配送模式。

当地铁时刻表作为决策变量加入到基于地铁的客货协同运输优化问题时,所构建的模型多为非线性的。例如,Behiri等^[11]在客货共车模式下没有考虑车厢分配,构建了地铁客货运输与时刻表协同优化问题的数学模型,由于所构建的模型为非线性混合整数规划模型,故采用了启发式求解算法。Ye等^[12]和Hou等^[13]也考虑了类似的问题,他们分别采用了变邻域搜索算法和遗传算法进行求解。Ozturk等^[14],Sahli等^[15]先后研究了利用城市轨道交通进行货运的时刻表优化问题(所构建的模型也是非线性的);但由于仅仅考虑了非客运时段,他们的研究并不是实质上的客货协同运输的时刻表优化。

【创新特色】在非高峰时段,城市轨道交通的列车之间具有较大的时间间隔,在其间开行货运专列对乘客的影响较小,但现有文献较少研究分车模式

下的地铁客货协同运输与时刻表联合优化问题。另一方面,地铁时刻表优化问题往往被构建成非线性模型,虽然某些模型可以线性化,但所引入的中间变量及较大实数可能对算法或者求解器的效率产生较大影响。考虑到已有研究的不足,本文主要研究分车模式下的地铁客货协同运输与时刻表联合优化问题,将问题构建为线性整数规划(ILP)模型。

【关键问题】本文对列车、需求与潜在的时空轨迹之间的关系进行了重构,这为构建问题的ILP模型及利用商业求解器求解该模型奠定了基础。通过松弛部分整型变量,将原始模型等价地转化为混合整数规划模型,从而提高模型的求解效率。

1 问题描述

城市轨道交通在非高峰时段的冗余运力和较长的发车间隔,为城市轨道交通运营企业开发货运、协同组织客流和货流提供了可能。在客货分车模式下,本文对客运列车之间加入货运列车并重新编制时刻表问题进行研究,从而达到地铁客货协同运输与时刻表联合优化的目的。

如图1(a)所示,某地铁线路有3个车站,黑色的折线表示列车原有的运行图,其中在高峰时段的列车之间间隔较小,而在非高峰时段列车之间的间隔较大。在非高峰时段,部分客运列车被允许改为货运列车运行,如图1(b)所示,或者加开货运列车,如图1(c)所示。因此,本文所研究的时间域为非高峰时段,在该时段内,每个车站有乘客需求(以人数计)和货物需求(以标准货运单元的数量计,记为SFU)。无论是客运列车改为货运列车还是加开货运列车都会对乘客出行产生一定影响。如果直接将某客运列车改为货运列车,部分乘客的等待时间

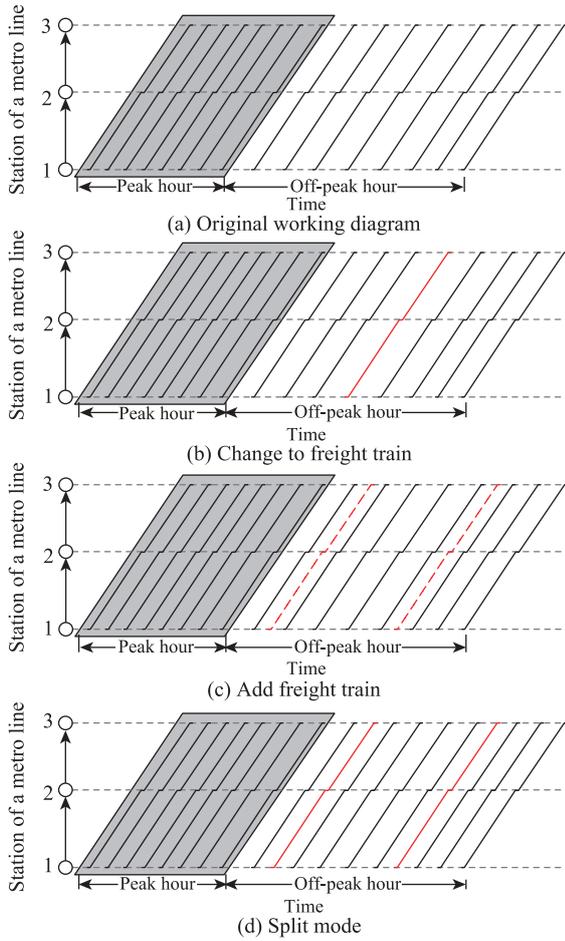


图1 分车模式下地铁客货列车安排示意图

Fig. 1 Schematic diagram of passenger and freight train schedule arrangement for subway under split mode

延长,紧随货车之后的那趟列车较为拥挤。如果直接在某两列客运列车之间加入货运列车,则可能导致列车之间的时间间隔不足以满足安全性的要求。综上所述,假如城市轨道交通运营企业要开发客货分车模式下的货运业务,就必须根据客运和货运需求对时刻表重新编制和优化。

假设已经给出分车模式下的地铁客货列车时刻表,如图1(d)所示,其中黑色折线表示客运列车的运行图,红色折线表示货运列车的运行图。接下来就要将时间依赖的客运需求合理地分配到客运列车上,将时间依赖的货运需求合理地分配到货运列车上,从而高效地完成运输任务。

2 数学模型

本节将上述问题构建为ILP模型,为此需要一些假设:

假设1 在所考虑的时段内,客运列车和货运列车的总数是固定的,且它们的运输能力是固定的;

假设2 地铁运行过程中的停站时间和区间运行时间是已知的;

假设3 乘客需求和货运需求的时空分布均是已知的,乘客需求量以人为单位计量,货运需求量以SFU为单位计量;

假设4 所有的客运需求和货运需求必须得到满足。

为了建模和叙述的方便,所需要用到的符号、参数及变量如表1所示。

2.1 约束条件

考虑一条包含车站集 $S = \{1, 2, \dots, s_{\max}\}$ 的地铁线路,在非高峰时段 $[0, T]$ 内有列车集 $I = \{1, 2, \dots, i_{\max}\}$ 在该线路上运行。第1节所叙述的问题实际上包括3方面的决策:①所有列车的运行图;②货运列车的分布;③客货需求的分配。

针对所有列车的运行图而言,在假设1下,首先给出运行图选择集 $K = \{1, 2, \dots, k_{\max}\}$,即列车潜在的时空轨迹备选集,如图2所示。在该图中,相邻两个潜在的时空轨迹之间的时间间隔为 Δ 。需要说明的是, Δ 取值越小,潜在的时空轨迹就越多,优化结果越精确,但同时问题的规模越大。

令0-1变量 $e_{ik} (i \in I, k \in K)$ 作为列车 i 是否选择潜在的时空轨迹 k 作为其运行图。当列车 i 选择潜在的时空轨迹 k 作为其运行图时,变量 e_{ik} 的取值为1;否则,该变量的取值为0。

列车 i 必须且只能选择一个潜在的时空轨迹,这些变量首先需要满足下面的等式约束

$$\sum_{k \in K} e_{ik} = 1, \quad \forall i \in I \quad (1)$$

为了保证运行安全和减少需求的等待或滞留时间,相邻列车必须满足下面的时间间隔约束

$$\delta_{\min} \leq \sum_{k \in K} t_{ki}^d e_{ik} - \sum_{k \in K} t_{ki}^d e_{i-1,k} \leq \delta_{\max}, \quad \forall i \in I \quad (2)$$

式中: $t_{ki}^d (k \in K)$ 为潜在的时空轨迹 k 离开车站1的时刻,在假设2下,它是已知的参数; δ_{\min} 和 δ_{\max} 分别为最小的时间间隔和最大的时间间隔,它们也都是预先给定的参数。

针对货运列车的分布而言,为了构建线性规划模型,本文并不直接给出变量用于表达列车 i 是否为货运列车,而是间接地给出变量表达潜在的时空

表1 建模过程中用到的符号、参数及变量
Tab.1 Notations and their definitions used in modeling process

Parameter	Definition
$[0, T]$	Time domain considered
I	Set of trains
S	Set of stations
A	Set of running sections
K	Set of potential space-time trajectories
D^s	Set of freight demands
D^l	Set of passenger demands
i	Index of trains
s	Index of stations
$(s, s+1)$	Running section, $s \in S/\{s_{\max}\}$
k	Index of potential space-time trajectories
j	Index of freight demands
l	Index of passenger demands
f_j	Amount of freight demand j (SFU)
p_l	Amount of passenger demand l (person)
c^s	Capacity of a freight train (SFU)
c^l	Capacity of a passenger train (person)
$o(\cdot)$	Origin station of a demand
$d(\cdot)$	Destination station of a demand
t^a	The time of a demand arriving at its origin station
t_{ks}^d	The time of potential space-time trajectory k departure from station s
w	The maximum waiting (stranding) time of a demand at its origin station
$\delta_{\min}, \delta_{\max}$	Minimum time interval and maximum time interval of adjacent trains
γ	Operational cost of a freight train
α, β	Penalty coefficient of the waiting (stranding) time of a demand at its origin station
e_{ik}	0-1 decision variable to represent whether potential space-time trajectory k is selected by train i as its traveling diagram
x_k	0-1 decision variable to represent whether potential space-time trajectory k is selected by some freight train as its traveling diagram
y_{jk}	Integer decision variable to represent the amount assigned to potential space-time trajectory k from freight demand j
z_{lk}	Integer decision variable to represent the amount assigned to potential space-time trajectory k from passenger demand l

轨迹是否为货运列车的运行图。

令0-1变量 $x_k (k \in K)$ 表示潜在的时空轨迹 k 是否为某货运列车的运行图。如果 $x_k = 1$, 则表示潜在的时空轨迹 k 是某货运列车的运行图; 如果

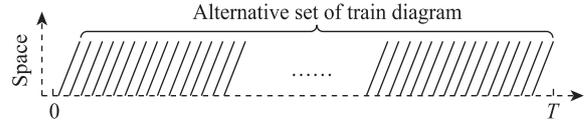


图2 列车潜在的时空轨迹备选集示意图
Fig. 2 Schematic diagram of potential pace-time trajectories of trains

$x_k = 0$, 则表示潜在的时空轨迹 k 不是任何货运列车的运行图。因此, 变量 x_k 的取值必须满足下面的不等式约束

$$x_k \leq \sum_{i \in I} e_{ik}, \quad \forall k \in K \quad (3)$$

式(3)说明, 只有在潜在的时空轨迹 k 被某列车选择的情况下(此时不等式(3)的右端项等于1), 潜在的时空轨迹 k 才有可能成为货运列车的运行图, 即 x_k 的取值可以为1或0; 而在潜在的时空轨迹 k 没有被任何列车选择的情况下(此时不等式(3)的右端项等于0), 即变量 x_k 的取值一定为0。

针对客货需求的分配而言, 为了构建线性规划模型, 本文也不直接给出变量用于表达客货需求被分配给列车 i 的数量, 而是间接地给出变量表达客货需求被分配给潜在的时空轨迹 k 的数量。

令整数变量 $y_{jk} (j \in D^s, k \in K)$ 表示货运需求 j 被分配给潜在的时空轨迹 k 的数量。在假设4下, y_{jk} 必须满足下面的流平衡约束

$$\sum_{k \in K} y_{jk} = f_j, \quad \forall j \in D^s \quad (4)$$

式中: f_j 为货运需求 j 的数量。

对于潜在的时空轨迹 k 而言, 在任意运行区间内其容量都不能被超出。因此, 变量 y_{jk} 还必须满足下面的不等式约束

$$\sum_{j \in D^s, o(j) \leq s < d(j)} y_{jk} \leq c^s x_k, \quad \forall k \in K, (s, s+1) \in A \quad (5)$$

式中: c^s 为货运列车的容量。只有在变量 x_k 取值为1的情况下, 潜在的时空轨迹 k 恰恰是某货运列车的运行图; 通过约束式(5)可知, 当变量 x_k 取值为0时, 任何货运需求分配给潜在的时空轨迹 k 的货运量均为0。

令整数变量 $z_{lk} (l \in D^l, k \in K)$ 表示客运需求 l 被分配给潜在的时空轨迹 k 的数量。类似于约束式(4)和约束式(5), 变量 z_{lk} 必须满足下面的等式约束和不等式约束

$$\sum_{k \in K} z_{lk} = p_l, \quad \forall l \in D^l \quad (6)$$

$$\sum_{l \in D^r, o(l) \leq s < d(l)} z_{lk} \leq c^r \left(\sum_{i \in I} e_{ik} - x_k \right), \quad \forall k \in K, (s, s+1) \in A \quad (7)$$

式中: p_l 为客运需求 l 的数量; c^r 为客运列车的容量。对于任意潜在的时空轨迹 k 而言,只有在表达式 $\sum_{i \in I} e_{ik}$ 取值为1且变量 x_k 取值为0的情况下,潜在的时空轨迹 k 恰恰是某客运列车的运行图,此时客运需求可分配给该潜在的时空轨迹;而在其它情况下(表达式 $\sum_{i \in I} e_{ik}$ 的取值等于变量 x_k 的取值),潜在的时空轨迹不是任何客运列车的运行图,通过约束式(7)可知,任何客运需求被分配给该潜在的时空轨迹的乘客数量均为0。

为了防止货运需求对乘客出行造成较大影响,本文还考虑了客运需求的等待时间约束,指乘客需求从其到达出发车站到离开该车站之间的等待时间不得超过给定的值。这一要求可以写为

$$(t_{k,o(l)}^d - t_l^a - w_l) z_{lk} \leq 0, \quad \forall l \in D^r, k \in K \quad (8)$$

式中: t_l^a 和 $t_{k,o(l)}^d$ 分别为客运需求 l 到达其出发车站的时刻和离开该车站的时刻; w_l 为乘客需求 l 的最长等待时间。需要说明的是, $t_{k,o(l)}^d$ 的含义源自符号 t_{ks}^d , 因为 $o(l)$ 表示客运需求 l 出发的车站,所以 $t_{k,o(l)}^d$ 表示潜在的时空轨迹 k 离开车站 $o(l)$ 的时刻。如果客运需求 l 的全部或者一部分被分配给时空轨迹 k , 则 $t_{k,o(l)}^d$ 就是乘客需求 l 的全部或一部分离开其出发车站的时刻。

另外,乘客需求显然不能分配给该需求到达出发车站的时刻之前已经离开该车站的潜在的时空轨迹。这一逻辑约束可以写为

$$(t_l^a - t_{k,o(l)}^d) z_{lk} \leq 0, \quad \forall l \in D^r, k \in K \quad (9)$$

类似地,对于货运需求而言,可给出其最长滞留(等待)时间约束和逻辑约束分别为

$$(t_{k,o(j)}^d - t_j^a - w_j) z_{jk} \leq 0, \quad \forall j \in D^s, k \in K \quad (10)$$

$$(t_j^a - t_{k,o(j)}^d) z_{jk} \leq 0, \quad \forall j \in D^s, k \in K \quad (11)$$

式中: t_j^a 和 $t_{k,o(j)}^d$ 分别为货运需求 j 到达其出发车站的时刻和离开该车站的时刻; w_j 为货运需求 j 的最长滞留时间。

最后,给出所有变量的取值范围为

$$e_{ik} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in I, k \in K \quad (12)$$

$$x_k \in \{0, 1\}, \quad \forall k \in K \quad (13)$$

$$0 \leq y_{jk} \leq f_j, \text{ 整数}, \quad \forall j \in D^s, k \in K \quad (14)$$

$$0 \leq z_{lk} \leq p_l, \text{ 整数}, \quad \forall l \in D^r, k \in K \quad (15)$$

2.2 目标函数

目标函数首先包括货运列车的运营成本;其次,客运需求应尽早地得到服务,因此目标函数应包括客运需求的等待时间;最后,在条件允许的情况下货物需求也应尽早地得到服务,因此目标函数还应包括货运需求的滞留时间。另外,客运需求等待时间的重要性可以通过惩罚系数进行调整。综上所述,目标函数的形式如下

$$\min \left[\sum_{k \in K} \gamma x_k + \alpha \sum_{j \in D^s} \sum_{k \in K} (t_{k,o(j)}^d - t_j^a) y_{jk} + \beta \sum_{l \in D^r} \sum_{k \in K} (t_{k,o(l)}^d - t_l^a) z_{lk} \right] \quad (16)$$

式中: γ 为货运列车的运营成本; α 和 β 分别为客运需求和货运需求等待或滞留时间的惩罚系数。

上面构建了分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化的数学模型,它是一个ILP模型,被称为原始模式。根据Di等^[7]的结论,约束(14)和约束(15)中的整数变量可以松弛为连续变量,松弛后的模型被称为松弛模型,它是混合整数线性规划(MILP)模型。

3 算例

以北京地铁原八通线为场景设计了4个算例。如图3所示,该线路包括13个车站,12个运行区间,总长度18.94 km。4个算例所包含的部分参数(列车数量、潜在的时空轨迹数量以及客货需求的总体信息)如表2所示。需要说明的是,由于时间依赖的客货需求数据量较大,无法在文中列举,表2中的需求总体信息指的是需求集的元素总数和需求总量。例如,算例I中货运需求的总体信息(339, 726)指的是,该算例包括339组货运需求,它们共有726个SFU。模型中的其它参数设置如下: $c^s = 120$, $c^r = 1200$, $\gamma = 50000$, $\alpha = 1$, $\beta = 0.1$, $\delta_{\min} = 180$ s 和 $\delta_{\max} = 480$ s。除此之外,客运需求的等待时间不得超过600 s,货运需求的滞留时间不得超过3600 s。所有实验在Python中进行编码,并调用商业求解器Gurobi求解,电脑配置为Core(TM)i5-1135G7处理器和16 GB机带RAM。

在给定上述参数下,再设置Gurobi的停止条件为上下界之间的相对差异Gap小于或等于 10^{-4} ,分



图3 北京地铁原八通线示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the original Batong Line of Beijing Metro

表2 算例部分参数及使用Gurobi求解的时间

Tab.2 Parts of parameters and solution time by Gurobi

Example	Number of trains	Number of potential time-space trajectories	Information of freight demand	Information of passenger demand	Gap	Solution time of the primal model/s	Solution time of the relaxed model/s
I	11	60	(339, 726)	(469, 7 927)	10^{-4}	170	122
II	20	124	(192, 936)	(889, 10 914)	10^{-4}	5 190	2 651
III	30	199	(605, 1 278)	(1 206, 18 378)	10^{-4}	9 199	8 956
IV	40	266	(902, 1 977)	(1 502, 23 439)	10^{-4}	43 769	15 171

别求解原始模型和相应的松弛模型,求解时间如表2的最后两列所示。从求解时间可以看出,相较于原始模型,Gurobi能够更快地求解松弛模型,尤其对于规模较大的算例IV,求解时间减少了65%。

下面以算例II为例,详细叙述分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化的结果。需要说明的是,算例II之所以仅有192组货运需求,因为在该算例中设置了仅有车站1、4、7、9、11和13可以办理货运业务。

图4给出了优化后客运列车和货运列车的运行图,其中灰色为列车潜在的时空轨迹(时间间隔为60s),蓝色为客运列车的运行图,红色为货运列车的运行图。由于前期的客运需求量较大且乘客的最大等待时间约束较小,所以前期的客运列车运行图铺画较密,相对而言,货运列车运行图铺画较为均匀。通过比较,上述结果与客货运需求的时空分布是耦合的。

为了清晰表达列车在运行过程中其运输能力的动态利用情况,图5给出了算例II中的客运列车在每一站的上车乘客数(黑色竖线)、下车乘客数(紫色竖线)和列车运行时在车上的乘客数(青色横线),除此之外,图5还给出了算例II中的货运列车在每

一站装货数量(蓝色竖线)、卸货数量(红色竖线)和列车运行时在车上的货物数量(绿色横线)。如前所述,由于前期的需求较大,所以前期客货列车的运输能力均得到了充分的利用,且大部分客运列车在区间(9,10)、(10,11)或(11,12)时车上乘客达到列车的最大运输能力,大部分乘客在第13站下车。上述结果符合北京地铁原八通线的实际客流特征,因为该线路是市郊线,且终点站为换乘站。

分车模式下的地铁客货协同运输,因为客运列车之间穿插了货运列车,所以难免对客运需求造成一定的影响。为了直观反映客运需求的二次等待情况,图6给出了算例II中的客运需求在各个车站的二次等待数量变化情况,同时图6也给出了货运需求在车站1、4、7、9、11和13的滞留数量变化情况,其中每个子图的上半部分为货运需求的变化情况,而下半部分为客运需求的变化情况。从图6可知,由于前期的客运需求量较大,大部分车站在列车1离开后仍然有乘客二次等待;由于列车1是客运列车,可办理货运业务的车站在列车1离开后自然没有运载任何货运需求;由于列车2是货运列车,每个车站在列车2离开之后均出现二次等待的客运需求显著增加的过程,同时可办理货运业务的车站

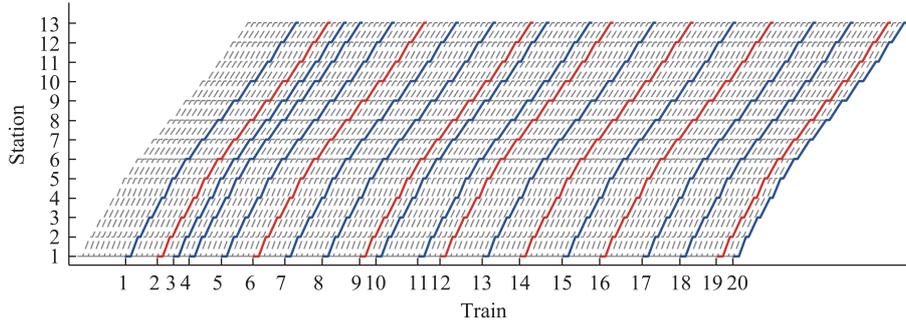


图4 算例 I 的客货列车运行图优化结果

Fig. 4 Optimization result of passenger and freight train diagram in Example I

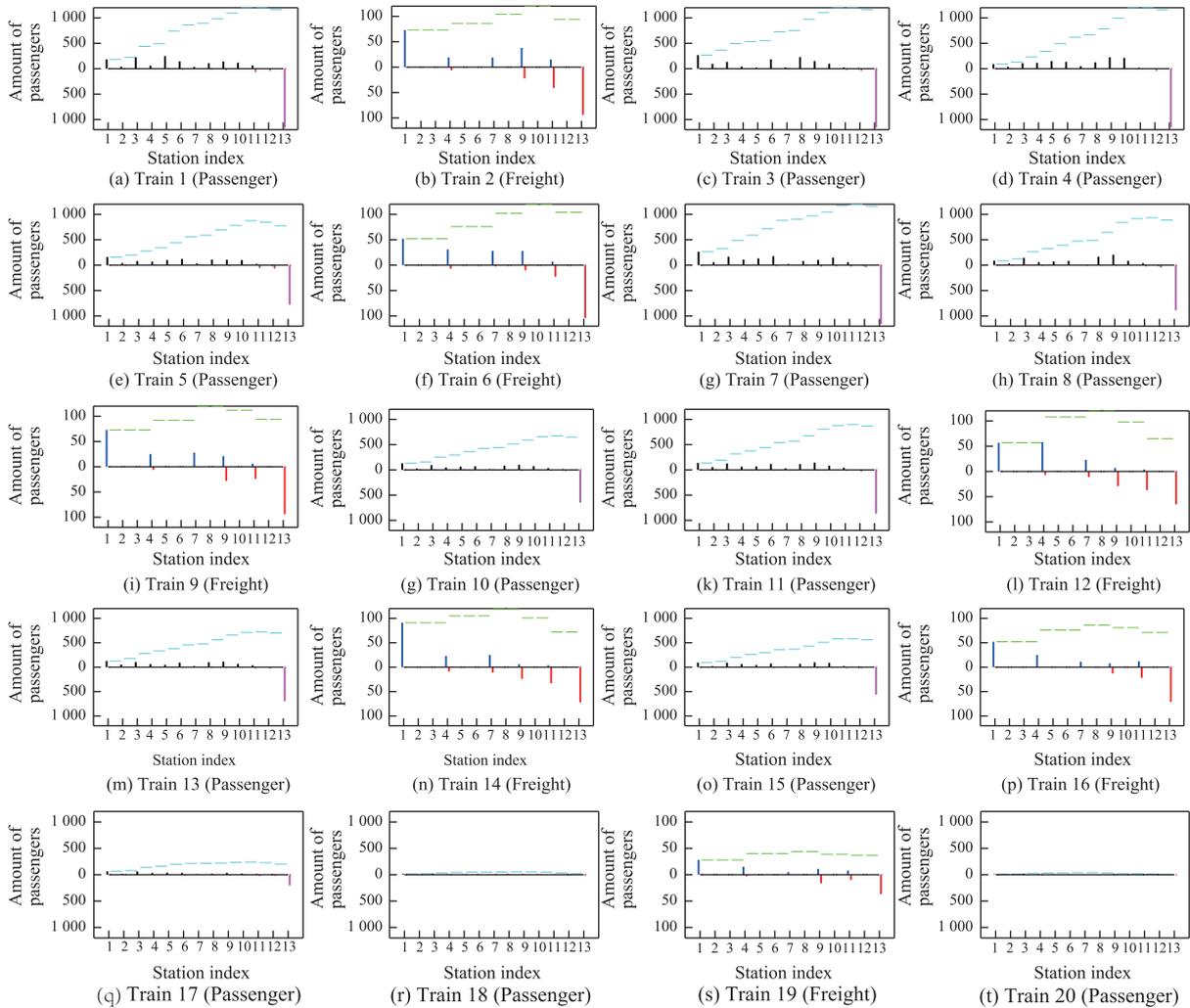


图5 算例 II 的客货列车动态利用示意图

Fig. 5 Diagram of dynamic utilization of passenger and freight trains in Example II

在列车2离开后均出现滞留的货运需求显著减少的过程。总体而言,分车模式下的地铁货运对客运需求中二次等待的数量有着明显的影响。

在模型中,可通过增大客运需求等待时间惩罚

系数,即 β 的取值,来减小分车模式下的地铁货运列车对客运需求的影响。为此,在接下来的实验中令 $\beta=1$,其他参数不变。作为对比,图7给出了算例 II 在增大客运需求等待时间惩罚系数后的车站

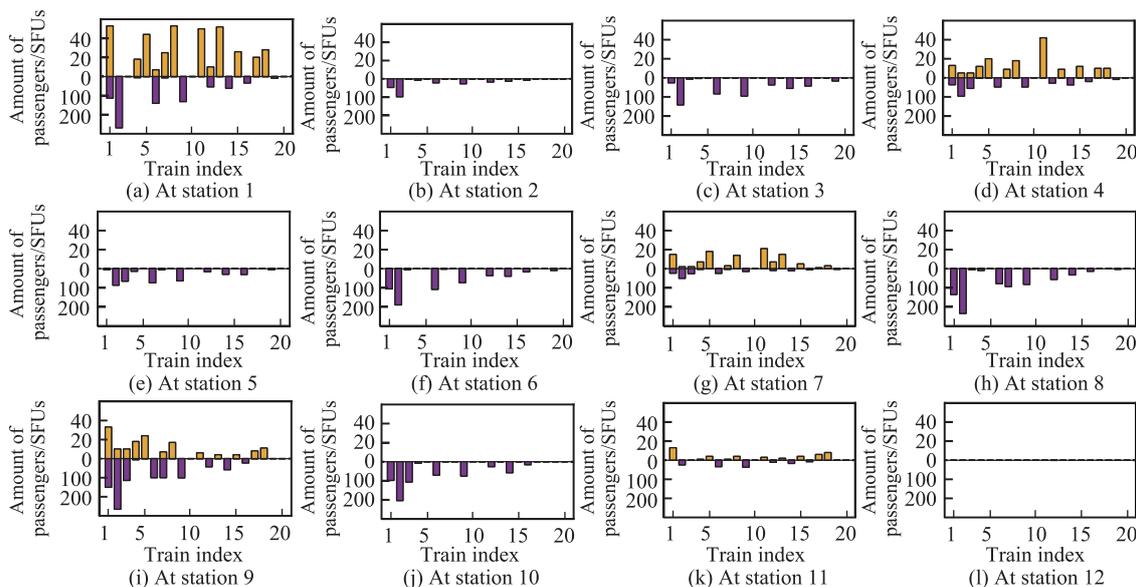


图6 算例Ⅱ的车站客货量变化示意图

Fig. 6 Change of passengers and freights at stations in Example II

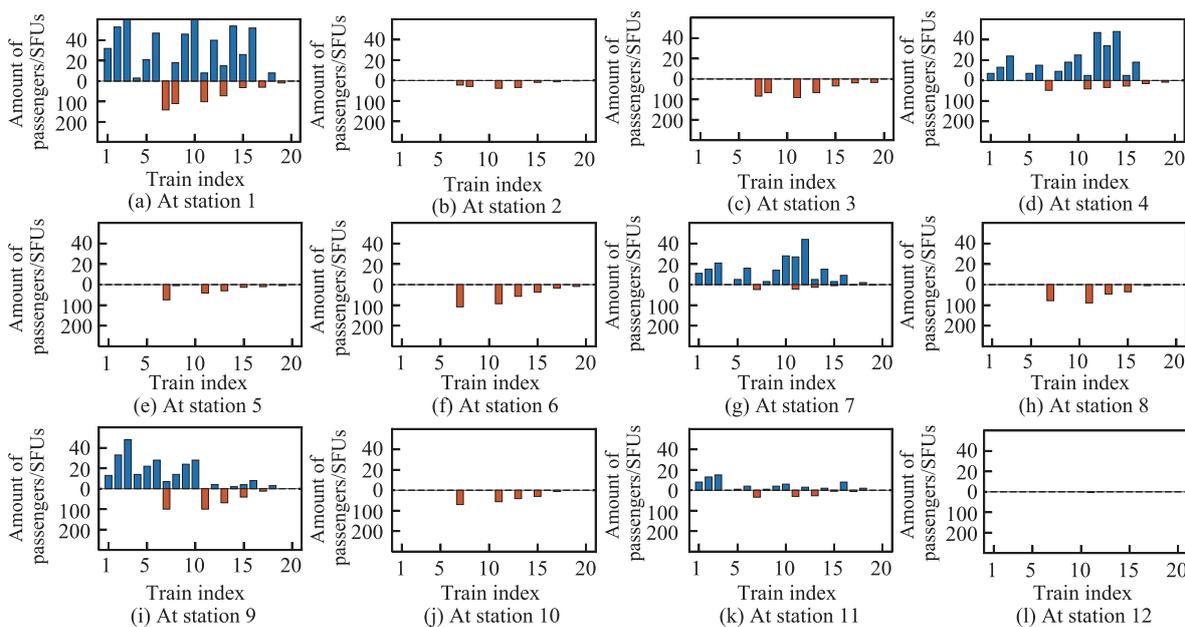


图7 算例Ⅱ在增大客运需求等待时间惩罚系数后的车站客货量变化示意图

Fig. 7 Change of passengers and freights at stations in Example II after increasing the penalty coefficient of demands

客货量变化示意图。首先,从总体上明显可以看出,客运需求的二次等待数量显著减少,尤其是在车站1、6、8、9和10。其次,在前6列列车运行期间,在任何车站几乎都没有出现客运需求的二次等待,相反地,在可办理货运业务的车站货运需求的滞留量较大。但在第4列列车运行之后,货运需求的滞留情况有所缓解,这说明该列车是货运列车。综上所述,尽管分车模式下的地铁客货协同运输不可避

免地对客运需求产生影响,但这种影响可以通过客货列车时刻表的调整得到一定程度的控制。

4 结论

1) 将分车模式下地铁客货协同运输与时刻表联合优化问题构建为一个ILP模型,模型的可松弛性质为提高求解效率奠定了基础。

2) 以北京地铁原八通线为场景设计了一系列

数值实验,并利用商业求解器 Gurobi 进行求解。实验结果表明:所提出的方法是有效的,相较于原始模型,松弛模型的求解时间显著下降;所得到的时刻表和运输方案不仅能够满足分车模式下的地铁客货协同运输需求,而且可以有效控制分车模式下的地铁货运对客运需求的影响。

3) 进一步的研究包括:客货需求不确定情况下的鲁棒时刻表与客货需求的运输计划问题;对于大规模算例而言,更为高效的求解算法;对比分析客货分车模式和客货共车模式对客运需求的影响差异;关于地面道路系统与地铁系统协同解决城市货运的问题等。

参考文献:

- [1] 刘崇献. 北京地铁晚间和非高峰期用作城市物流系统探讨[J]. 城市发展研究, 2011, 18(6): 122-124.
LIU C X. Study on how to use Beijing Subways as a part of the city's logistics system in the evening and non-traffic peak time[J]. Urban Development Studies, 2011, 18(6): 122-124.
- [2] 史毅飞. 关于地铁兼具载客、物流功能的可行性分析[J]. 物流技术, 2014, 33(1): 197-199.
SHI Y F. Analysis of feasibility of subway system taking on passenger and cargo transportation capabilities[J]. Logistics Technology, 2014, 33(1): 197-199.
- [3] 邸振, 肖妍星, 戚建国, 等. 考虑时间窗的地铁客货协同运输优化[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(12): 3569-3580.
DI Z, XIAO Y X, QI J G, et al. Passenger-freight coordination transportation optimization with considering time windows[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2022, 19(12): 3569-3580.
- [4] 王月丽, 杨中华, 刘邹洲, 等. 国内外地铁货运系统的研究现状与进展[J]. 物流科技, 2023, 46(1): 96-100.
WANG Y L, YANG Z H, LIU Z Z, et al. Metro-based underground logistics system: recent advances and future prospects[J]. Logistics Sci-Tech, 2023, 46(1):96-100.
- [5] MOTRAGHI A, MARINOV M V. Analysis of urban freight by rail using event based on simulation[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2012, 25: 73-89.
- [6] OZTURK O, PATRICK J. An optimization model for freight transport using urban rail transit[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 267: 1110-1121.
- [7] DI Z, YANG L, SHI J, et al. Joint optimization of carriage arrangement and flow control in a metro-based underground logistics system[J]. Transportation Research Part B, 2022, 159: 1-23.
- [8] 邸振, 曹楚悦, 肖妍星. 考虑货运方式和客运硬时间窗的地铁客货共车运输优化[J]. 交通运输工程与信息学报, 2024, 22(1): 150-159.
DI Z, CAO C Y, XIAO Y X. Train-shared metro passenger and freight co-transportation optimization considering freight modes and passenger hard time windows[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2024, 22(1): 150-159.
- [9] 杨婷, 郑长江, 马庚华. 基于地铁的带时间窗地下物流路径优化研究[J]. 华东交通大学学报, 2019, 36(4):67-74.
YANG T, ZHENG C J, MA G H. Research on optimization of underground logistics path with time window based on subway[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2019, 36(4): 67-74.
- [10] 郑长江, 陈宜恒, 沈金星. 基于地铁的地上地下闭环物流配送路径优化[J]. 华东交通大学学报, 2022, 39(1): 89-98.
ZHENG C J, CHEN Y H, SHEN J X. Distribution routing optimization of ground-underground closed-loop logistics based on metro network[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(1): 89-98.
- [11] BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S, CHU C. Urban freight transport using passenger rail network: scientific issues and quantitative analysis[J]. Transportation Research Part E, 2018, 115: 227-245.
- [12] YE Y, GUO J, YAN L. A metro freight plan for mixed passenger and freight transportation[J]. Journal of Advanced Transportation, 2022: 6602387.
- [13] HOU Z, HE R, LIU C, et al. Optimization of passenger and freight collaborative transportation for urban rail transit under virtual coupling condition[J]. Engineering Letters, 2024, 32(1): 179-192.
- [14] OZTURK O, PATRICK J. An optimization model for freight transport using urban rail transit[J]. European Journal of Operational Research, 2018, 267: 1110-1121.
- [15] SAHLI A, BEHIRI W, BELMOKHTAR-BERRAF S. An effective and robust genetic algorithm for urban freight transport scheduling using passenger rail network[J]. Computers & Industrial Engineering, 2021, 173: 108645.



通信作者:邸振(1979—),男,副教授,博士,硕士生导师,研究方向为交通运输系统优化。E-mail: 3126@ecjtu.edu.cn。

(责任编辑:吴海燕)