

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2023.01.006

城市轨道交通虚拟编组列车 优化运行方案研究

游婷¹, 马法运², 苗峰², 徐恭德², 杨中平¹

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 中车青岛四方车辆研究所有限公司, 山东青岛 266031)

摘要: 虚拟编组技术通过车-车无线通信实现车辆“虚拟连接”。虚拟编组列车车辆间无机车车钩连挂装置, 在运行过程中可以进行动态连挂和解编操作, 能够基于客流变化实现灵活的运输模式。本文以缩短乘客旅行时间和提高列车运输效率为目标, 提出虚拟编组列车运行方案的优化方法, 并基于实际城市轨道交通线路早高峰客流 OD(original-destination)数据给出优化设计结果。虚拟编组优化运行方案与现行方案的仿真结果表明, 虚拟编组优化方案在保证运输效率的同时, 可以有效缩短乘客旅行时间, 提升轨道交通客运服务质量。

关键词: 城市轨道交通; 虚拟编组; 列车运行方案; 乘客旅行时间; 列车运输效率

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0036-07

Optimal Operation Plan Design for Virtually Coupled Trains in Urban Rail Transit

YOU Ting¹, MA Fayun², MIAO Feng², XU Gongde², YANG Zhongping¹

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044;

2. CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266031)

Abstract: Virtual coupling technology realizes “virtual connection” of vehicles through vehicle to vehicle (V2V) wireless communication technology. Since there are no mechanical coupling devices such as coupler between vehicles, dynamic marshalling and unmarshalling can be carried out during the operation of vehicles, so as to realize flexible transportation mode based on passenger flow. Based on the comprehensive optimization of passenger travel time and train transportation efficiency, the optimization method of virtually coupled trains operation plan is proposed in this paper. Then, by taking an urban rail transit line as an example, the optimization design results are given according to the original-destination (OD) data of morning peak passenger flow. Comparing the virtual coupling optimization plan with the current plan, the virtual coupling optimization scheme can not only ensure the transportation efficiency, but also effectively shorten the passengers travel time and improve the service quality of rail transit.

Keywords: urban rail transit; virtual coupling; train operation plan; passenger travel time; transportation efficiency

1 研究背景

近年来, 城市轨道交通运输压力逐年增大, 虚拟编组技术因其可以有效缩短列车追踪间隔、提高运输

效率等优点得到广泛关注。1999年, Bock U等率先提出列车车辆之间不依靠机械车钩, 而是通过车-车(vehicle to vehicle, V2V)无线通信技术实现连挂的“Virtual coupling (VC)”概念, 其车辆能够以相同速度、

收稿日期: 2022-07-04 修回日期: 2022-09-08

第一作者: 游婷, 女, 硕士研究生, 从事列车虚拟编组技术的研究, 20121515@bjtu.edu.cn

引用格式: 游婷, 马法运, 苗峰, 等. 城市轨道交通虚拟编组列车优化运行方案研究[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(1): 36-42.

YOU Ting, MA Fayun, MIAO Feng, et al. Optimal operation plan design for virtually coupled trains in urban rail transit[J].

Urban rapid rail transit, 2023, 36(1): 36-42.

极小追踪间隔协同运行,如图1所示^[1]。

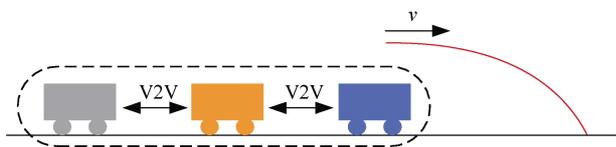


图1 虚拟编组列车运行示意

Figure 1 Schematic of virtually coupled trains

2015年,欧洲Shift2Rail计划提出将虚拟编组技术作为欧洲铁路的重要研究方向,正式掀起了虚拟编组技术的研究热潮^[2-3]。目前,国内外有关虚拟编组技术的研究主要集中在虚拟编组技术应用前景分析和列车运行控制等方面,以缩短列车追踪间隔,提高线路利用率^[4-8]。虚拟编组列车由于车辆之间没有车钩连接,可以实现更加灵活的运输模式,以应对客流时空分布不均衡的问题。在客流高峰时期,虚拟编组技术可以实现多个车辆快速连挂,形成长编队列车进站载客,以满足运输需求。而在客流平峰期,虚拟编组列车可以通过减少编组数量实现小编队运行,减少运行能耗,提高运输效率。

虚拟编组技术灵活的编组形式给列车运行方案设计带来巨大挑战。目前,有关虚拟编组列车运行方案的研究还在起步阶段。Lee提出了一种生成虚拟编组列车运行方案的算法,在该算法中每辆车按照固定的周期性停站方案运行,没有考虑不同车站客流量差异的影响,不具实用性^[9]。Gallo等人提出一种用于虚拟编组列车的优化模型,以优化单向环线的列车数量,避免列车运力浪费^[10]。在此基础上,Gallo等人又以更复杂的Y型线路为对象,优化列车运行线路以满足乘客出行需求,减少乘客滞留^[11]。但在所提两种模型中均没有讨论列车越站行驶等场景,同时忽略了时间成本,未能体现虚拟编组的关键优势。白佳薇等人对虚拟编组列车分别在有越站线路和没有越站线路条件下的快慢车运行展开了讨论,分析了虚拟编组技术在传统快慢车运输组织模式中应用的技术优势,但未对其运行方案的制定展开研究^[12]。

本文针对虚拟编组列车的技术特点,提出乘客旅行时间与列车运输效率综合最优的虚拟编组列车运行方案优化方法,并基于实际城市轨道交通线路客流数据,给出早高峰时期的虚拟编组运行方案设计结果。

2 虚拟编组列车连挂与解编场景分析

虚拟编组技术通过V2V无线通信可将多个基本

运输单元连挂成一个编组列车。如图2所示,基本运输单元既可以是独立的车辆(图2(a)),也可以是由若干车辆通过车钩或虚拟编组技术连挂成组的列车(图2(b)、(c))。其中,图2(a)即为由一个独立车辆构成的基本运输单元,也是虚拟编组最小运输单元。



图2 虚拟编组列车基本运输单元示意

Figure 2 Basic transport units of virtually coupled trains

采用最小运输单元可以根据客运需求更加精准灵活地调配运力,最大程度地满足乘客的直达需求。因此本文主要以最小运输单元为基础,研究车辆的虚拟编组运行。

车辆的虚拟连挂和解编主要发生在车站区间,根据虚拟编组列车车站作业是否需要避让线可将作业场景分为两类。

2.1 无需避让线的虚拟编组列车作业

图3为无避让线情况下的车辆虚拟连挂和解编过程示意图。如图3(a)所示,越行车辆在驶入车站时,可以与前方停站的车辆实时连挂,构成一个虚拟编组列车,一同驶离车站。图3(b)为虚拟编组列车解编示意图,编组中的越行车辆在车站快速通过不停车,停站车辆与越行车辆实时解编,并减速进站停车。

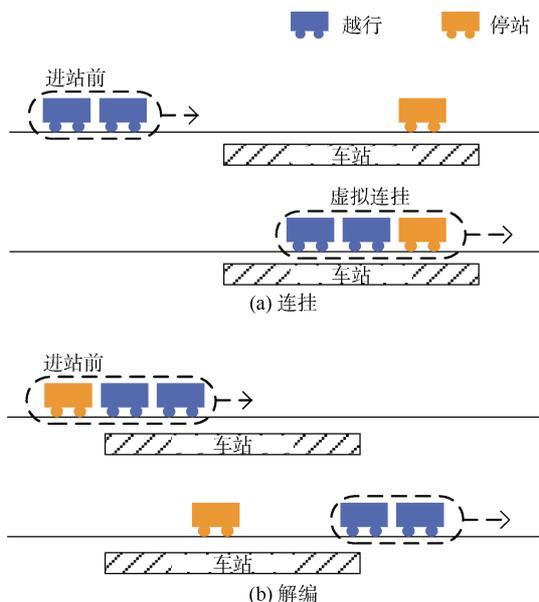


图3 无避让线下的虚拟编组列车车站作业示意

Figure 3 Operation in station without the avoidance line for virtually coupled trains

2.2 依靠避让线的虚拟编组列车作业

由于虚拟编组列车内部车辆的停站方案各不相同，车辆在车站可能超车行驶。以虚拟编组列车进站为例，存在以下两类超车场景：

图 4(a)为第一类场景。在此类场景中，虚拟编组列车中前面部分车辆进站停车，而剩余车辆快速通过不停车，因而必须借助避让线实现后方车辆越行。

图 4(b)为第二类场景。在此类场景中，虚拟编组列车内部车辆的停站方案各不相同，交错出现。其原理同第一类场景，需要借助避让线实现避让。但其内部存在多个车辆的相互解编，作业程序相对复杂，且实际运行中车辆间会相互影响，在制定运行方案时应尽量避免此类场景的出现。

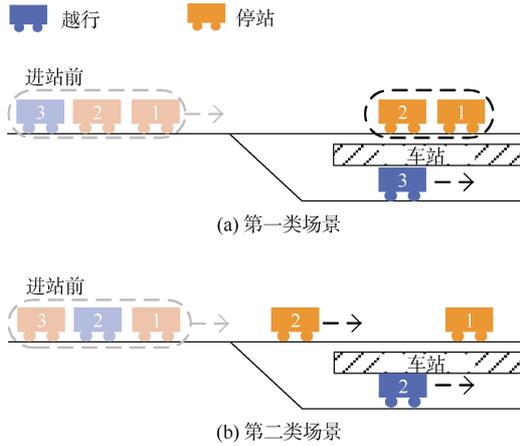


图 4 依靠避让线的虚拟编组列车进站场景

Figure 4 Arrival scenes of virtually coupled trains requiring the avoidance line

图 5 为本文提出的一种潮汐避让站的布局示意图。在潮汐避让站中，车站除了一条上行线和一条下行线外，

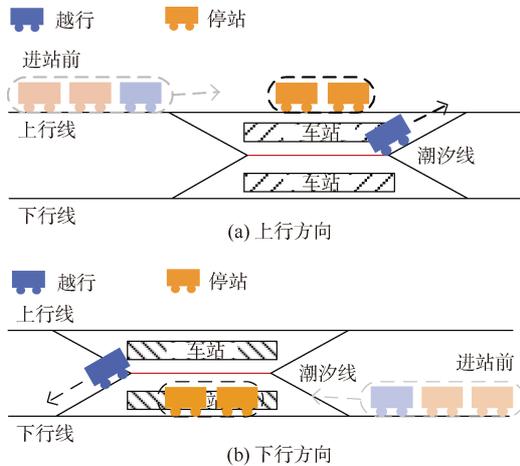


图 5 潮汐避让站布局示意

Figure 5 Layout of tide avoidance station

还有一条潮汐线。潮汐线通过道岔分别与两条正线相接。

当上行方向因客流增多而行驶车辆增多时，上行车辆中的越行车辆可以临时快速通过潮汐线，实现越站行驶，而在同一方向的停站车辆可以在站台停车载客，如图 5(a)所示。同理，当下行方向车辆增多时，也可通过占用潮汐线的方式实现越站行驶，如图 5(b)所示。依据客流分布情况，潮汐线上车辆行驶方向可以不同，一般在早、晚高峰时期出现。

3 虚拟编组列车运行方案

为了更好地适应不同车站客流分布不均衡的情况，本文以若干车辆构成的虚拟编组列车为研究对象，研究其优化运行方案。如图 6 所示，列车在始发站以虚拟编组的方式持续发车，发车间隔为 h_0 ，其中每辆车拥有不同的停站方案。虚拟编组列车中所有车辆的停站方案构成一个运行方案，下一列虚拟编组列车的运行方案将重复上一列车。如图 7 所示，虚拟编组列车 2 中车辆 B1、B2、B3 的停站方案与虚拟编组列车 1 中车辆 A1、A2、A3 的停站方案一一对应。车辆在实际运行中可以根据运行方案的不同，借助避让线完成必要的连挂和解编作业。对于虚拟编组列车中的每辆车，其全线的停站方案将通过优化算法求解得出。

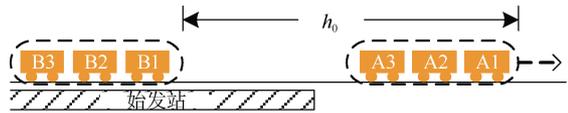


图 6 虚拟编组列车发车示意

Figure 6 Departure of virtually coupled trains

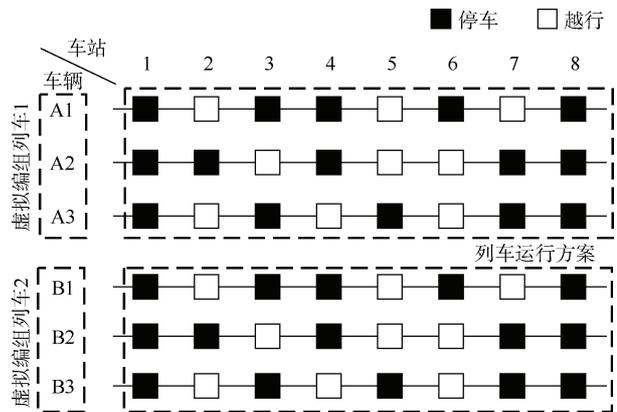


图 7 虚拟编组列车运行方案示意

Figure 7 Schematic of the operation plan for virtually coupled trains

3.1 前提假设

为了简化模型，前提假设如下：

1) 车辆在线路区间以相同的速度行驶,在车站区间相遇时将通过虚拟编组技术实现同步运行;

2) 所有车站均具有避让条件,车辆可在进入或离开车站时进行连挂和解编;

3) 忽略车辆连挂和解编的作业时间和在此过程中车辆的速度变化;

4) 所有车辆在各站的停站时间相同,且均在始发站和终点站停车;

5) 乘客均匀到达,且乘坐最近一辆直达车辆,不存在换乘。

3.2 设计原则

由于车辆在区间线路上可以相同的速度虚拟编组行驶,且每个站台均设有避让线并忽略了车辆编组和解编过程中的速度变化,因此车辆之间互不影响,可以独立设计每个车辆的停站方案。但车辆停站方案的不同,将极大影响乘客旅行时间。如果某一车站的停站车辆较少,那么在该站的乘客或是前往该站的乘客将会耗费更长的等车时间。但如果停站车辆数量过多,又会增加车上乘客的乘车时间。

为了满足相关运营要求以及所有乘客的出行需求,在设计列车运行方案时需满足一定的设计原则。

以下为本文采用的设计原则:

1) 虚拟编组列车运行方案必须满足全线该方向上所有乘客的出行;

2) 虚拟编组列车各车辆的平均运行时间尽可能短,且载客率不能超过最大载客率 ε_{\max} ;

3) 乘客旅行时间尽可能短,最长等车时间不能超过 $2h_0$ 。

3.3 虚拟编组列车运行方案优化模型

3.3.1 符号定义

为了方便模型描述,定义符号如下:

i, j : 指代车辆编号;

r : 指代车站编号;

x, y : 分别指代出发车站和目的车站;

L_{r-1}^r : 相邻两站的站间距离;

$p_{i,r}$: 车辆 i 在车站 r 上车的人数;

$q_{i,r}$: 车辆 i 在车站 r 下车的人数;

ω_i : 车辆 i 在全线的停站数量;

$t_{i,r}$: 车辆 i 驶出 r 站的时刻;

$m_{x,y}$: 单位时间从发车站 x 前往目的车站 y 的乘客数量;

$h_{x,y}(i, j)$: 从车站 x 出发到达目的车站 y 的车辆 i

与上一辆从车站 x 出发到达目的车站 y 的车辆 j 之间的发车时间间隔;

$\zeta_i(r)$: 布尔型变量,当车辆 i 在车站 r 停车时值为 1, 否则为 0;

n_i : 始发站虚拟编组车辆数;

N : 全线车站数量;

h_0 : 虚拟编组列车在始发站的发车时间间隔;

t_s : 车辆停站时间;

v_{avg} : 车辆平均旅行速度;

C_0 : 车辆定员人数;

ε_{\max} : 车辆最大载客率。

3.3.2 优化目标

本文从乘客和运营公司角度出发,优化乘客旅行时间和列车运输效率,以平衡乘客出行体验和企业运营成本。

1) 乘客旅行时间。在虚拟编组列车运行方案下,由于列车停站数量减少,乘客乘车时间将明显缩短。为此建立乘客旅行时间模型反映方案的优劣性,如公式(1)所示。

$$t_p = \sum_{x=1, x \neq y}^N \sum_{y=1}^N \sum_{i=1}^{n_i} [h_{x,y}(i, j) / 2 + \sum_{r=x+1}^{y-1} \zeta_i(r) t_s + \sum_{r=x}^{y-1} L_r^{r+1} / v_{\text{avg}}] \zeta_i(x) \zeta_i(y) m_{x,y} h_{x,y}(i, j) \quad (1)$$

式中第一项表示乘客等车时间,第二项和第三项为乘客乘车时间。其中第二项反映列车在中途车站停车给乘客带来的时间损失。在式(1)中, $m_{i,j}$ 信息可以由客流 OD(original-destination)数据得出。 t_s 在特定时间段一般为固定值。函数 $h_{x,y}(i, j)$ 和 $\zeta_i(r)$ 与车辆的运行方案息息相关。

$$h_{x,y}(i, j) = t_{i,x} - t_{j,x}, \quad i = 1, 2, \dots, n_i, \quad (2)$$

$$x = 1, 2, \dots, N, \quad y = 1, 2, \dots, N$$

列车停站数量越多,乘客的平均等车时间越短,但也会增加乘客旅行时间,因此需要综合优化运行方案,尽可能缩短乘客旅行时间。

2) 列车运输效率。本文主要通过列车运行时间和列车载客率综合反映列车运输效率。一个运行方案中所有车辆的运行总时间可以表示为:

$$t_c = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{r=1}^{N-1} (L_r^{r+1} / v_{\text{avg}} + \zeta_i(r) t_s) \quad (3)$$

列车减少停站数量可以有效减少乘客乘车损失时间,但与此同时可能因为列车停站数太少而不能装载更多乘客,降低列车的运输效率。因此,本文通过优

化列车平均载客率来保证列车的运输效率。虚拟编组列车各车辆离开车站时的载客量可以由式(4)和式(5)计算得到:

$$C_{i,r} = C_{i,r-1} + p_{i,r} - q_{i,r}, \quad r = 2, \dots, N, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (4)$$

$$C_{i,r} = 0, \quad r = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (5)$$

其中,

$$p_{i,r} = \sum_{y=r+1}^N \zeta_i(y) m_{r,y} h_{r,y}(i, j) \quad (6)$$

$$q_{i,r} = \sum_{x=1}^r \zeta_i(x) m_{x,r} h_{x,r}(i, j) \quad (7)$$

那么, 车辆 i 的实时载客率 $\varepsilon_{i,r}$ 以及在全线的平均载客率 $\bar{\varepsilon}_i$ 可以分别表示为

$$\varepsilon_{i,r} = C_{i,r} / C_0 \quad (8)$$

$$\bar{\varepsilon}_i = \sum_{r=1}^N \zeta_i(r) C_{i,r} / (\omega_i C_0), \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (9)$$

$$\omega_i = \sum_{r=1}^N \zeta_i(r), \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (10)$$

3.3.3 虚拟编组列车运行方案优化模型

$$\min Z = [t_p, t_c, -\bar{\varepsilon}_i]^T, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (11)$$

$$\zeta_i(1) \zeta_i(N) = 1, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^{n_t} \zeta_i(x) \zeta_i(y) \geq 1, \quad x = 1, 2, \dots, N \quad (13)$$

$$y = 1, 2, \dots, N$$

$$0 < h_{x,y}(i, j) \leq 2h_0, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (14)$$

$$x = 1, 2, \dots, N, \quad y = 1, 2, \dots, N$$

$$0 < \varepsilon_{i,r} < \varepsilon_{\max}, \quad i = 1, 2, \dots, n_t \quad (15)$$

$$r = 1, \dots, N$$

这是一个多目标优化问题, 模型的决策变量为每辆车的停站方案 $\zeta_i(r)$ 。约束条件式(12)用以保证车辆在首末站均停车; 式(13)用于保证任意两站都至少有一辆车停靠, 从而满足全线乘客的出行需求; 式(14)用以约束乘客最长等车时间; 式(15)限制了每辆车的载客人数。

4 案例分析

表 1 为某城市轨道交通线路早高峰时段(8:00-9:00)客流 OD, 全程共有 13 个车站。在现行列车运行方案中, 列车以 2 min 发车间隔从始发站连续发车并采用站站停车方案, 一辆列车跑完全程需要 39.5 min。为适应我国目前城市交通的站台条件, 假设虚拟编组列车最大编组数为 6, 最小运输单元为 1, 采用 A 型车辆。

由于虚拟编组列车各车辆在每个车站的状态只有停车和通过两种, 因此停站方案可以分别用 1 和 0 表示。从而每辆车的运行方案均可由一个二进制数表示, 其位数为车站数。但列车运行方案随着车辆数目及途经车站数量的增加呈明显的组合爆炸趋势, 很难利用传统优化方法求解。同时本文存在多个优化目标, 故采用计算复杂度较低、种群多样性好的快速非支配排序遗传算法 NSGA-II 进行求解。模型主要参数设置如表 2 所示。

表 1 某城市轨道交通线路高峰时段(8:00-9:00)客流 OD

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	16	32	48	44	48	36	48	48	48	48	2 176	2 180
2	4	0	12	32	20	48	8	44	48	48	48	1 272	1 276
3	16	8	0	36	32	48	36	48	48	44	48	2 096	2 096
4	36	12	8	0	4	44	16	48	48	48	48	1 556	1 556
5	44	16	40	20	0	32	12	48	48	44	48	1 948	1 948
6	40	16	36	32	8	0	12	44	48	48	48	1 832	1 836
7	16	16	40	48	16	28	0	4	24	28	44	956	960
8	48	20	44	40	32	48	16	0	24	24	48	1 900	1 900
9	44	40	48	48	32	48	16	36	0	16	44	2 292	2 296
10	32	12	44	44	28	48	16	32	24	0	24	1 856	1 860
11	44	16	36	36	8	44	4	40	40	24	0	700	708
12	520	220	636	548	292	848	104	696	1 752	880	2 000	0	40
13	528	228	648	540	296	848	96	700	1 748	860	2 000	36	0

表 2 优化模型参数设置

线路车站数 N /个	始发车编组数 n_t /辆	发车间隔 h_0 /min	车辆速度 v_{avg} /(km/h)	停站时间 T_s /s	额定载客量 C_0 /人	最大载客率 ε_{\max} /%
13	6	2	35	30	254	125

图 8(a)~(c)是发车间隔 $h_0=2 \text{ min}$, 初始种群数量为 500 个, 迭代 200 次后的帕累托前沿。其中, 乘客旅行时间和列车平均运行时间为虚拟编组运行方案与现行方案所需时间的比值。由图 8 可知, 随着列车运行时间缩短, 乘客旅行时间会有一定程度缩短, 但列车载客率也会随之降低。运营企业可以根据需求在乘客旅行时间和列车运输效率之间折中选择。

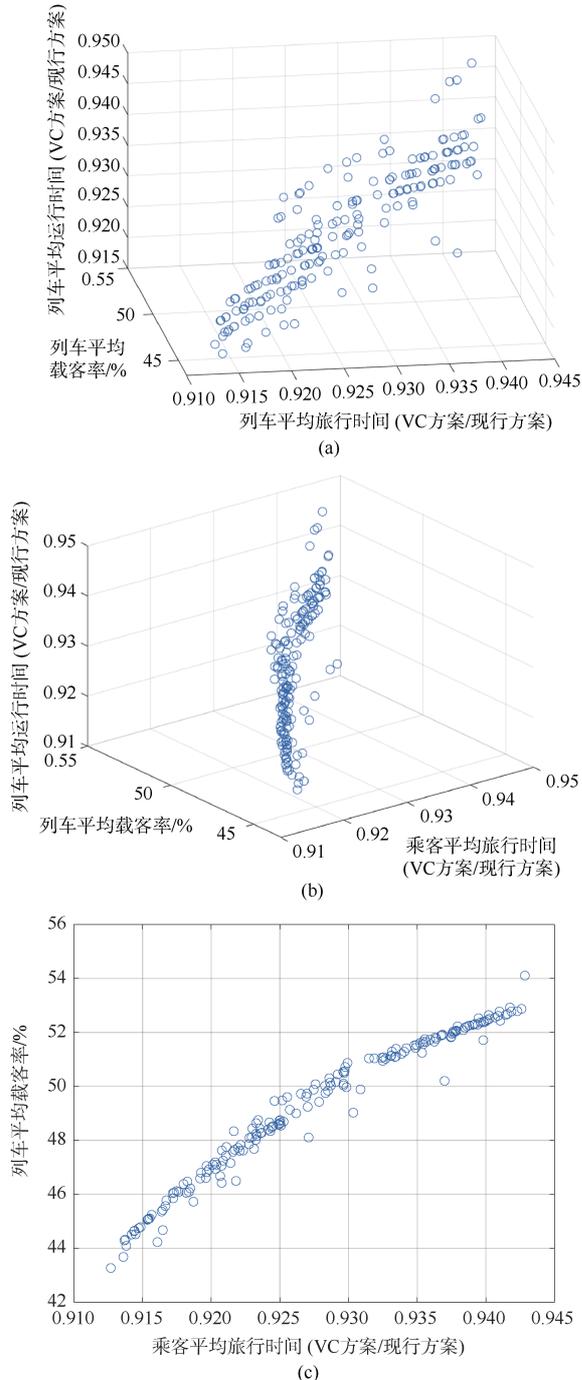


图 8 优化模型的帕累托前沿曲面

Figure 8 Pareto front of the proposed optimization model

表 3 为虚拟编组列车一组优化结果, 此时全线列车平均载客率为 51.14%, 相比现行运行方案, 全线乘客平均旅行时间减少 6.69%, 列车平均运行时间减少 6.67%。从表 3 可以看出, 在这组优化结果中, 虚拟编组列车中每辆车的运行方案各不相同, 会在不同的车站实行越站作业, 同时该方案能够满足全线所有乘客的乘车需求。

表 3 虚拟编组列车优化运行方案

Table 3 Optimal operation scheme for virtually coupled trains

车站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
车辆 1	1	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
车辆 2	1	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1
车辆 3	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1
车辆 4	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1
车辆 5	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	1
车辆 6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1

图 9 为在表 3 优化方案下的虚拟编组列车运行图, 6 辆车在始发站以虚拟编组列车的形式同时发车。编组中编号对应的车辆具有相同的运行方案, 如车辆 A1 和车辆 B1。同时, 虚拟编组列车在运行过程中会根据停站方案动态编组成不同的小编组列车。在此优化方案下, 一辆车跑完全线最快仅需 36 min, 相比现行站站停车方案节省 3.5 min, 有效提高了线路利用率。

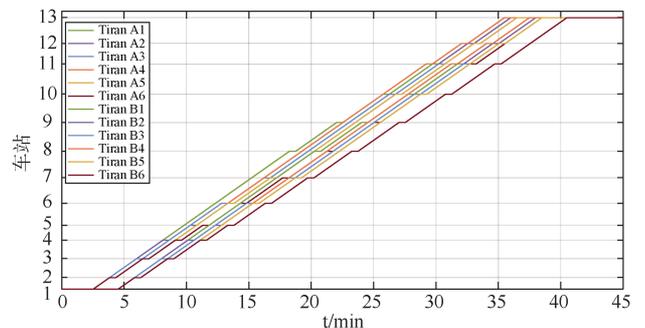


图 9 虚拟编组列车优化运行图

Figure 9 Optimized operating plan for virtually coupled trains

在表 3 优化方案下, 虚拟编组列车各车辆离开每站时的载客率如图 10 所示。从图中可知, 在此方案下, 每辆车的实时载客率均不超过 125%, 可满足实际运行要求。

5 结语

本文基于虚拟编组列车的技术特点, 分析了在有

无避让条件下的运行场景，提出一种虚拟编组列车运行方案优化模型。将模型优化结果与现行列车运行方案进行对比，结果表明，虚拟编组优化方案在保证列车运输效率的同时，可以有效缩短乘客旅行时间，提升轨道交通客运服务质量。

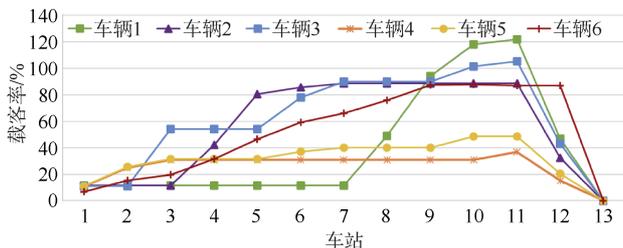


图 10 虚拟编组列车载客率变化曲线
Figure 10 Change curve of virtually coupled train load factors

同时，本文模型仍存在进一步改进的空间。首先，本文忽略了车辆连挂和编组作业对其他车辆的影响。其次，认为虚拟编组列车各车辆能够以非常小的距离协同运行，从而忽略了实际中因位置差异造成的时间不同步的问题。下一步将针对所得的优化运行方案，展开讨论列车在不同场景下的追踪问题，为未来虚拟编组技术的应用奠定基础。

参考文献

[1] BOCK U, VARCHMIN J. Enhancement of the occupancy of railroads using “virtually coupled train formations”[C]. World congress on railway research. Tokyo, 1999.

[2] MOVINGRAIL. D4.1 Market potential and operational scenarios for virtual coupling[EB/OL]. (2019-07-19) [2022-06-27]. <https://movingrail.eu/public-information/deliverables>.

[3] JOHAL K. The railway is full; how can we increase its capacity?[EB/OL].(2020-07-27)[2022-06-27]. <https://blog.bham.ac.uk/bcrr/2020/07/27/the-railway-is-full-how-can-we-increase-its-capacity/>.

[4] AOUN J, QUAGLIETTA E, GOVERDE R. Investigating market potentials and operational scenarios of virtual coupling railway signaling[J]. Transportation research record: Journal of the Transportation Research Board, 2020, 2674(8): 799-812.

[5] SCHUMANN T. Increase of capacity on the shinkansen high-speed line using virtual coupling[J]. International journal of transport development and integration, 2017, 1(4): 666-676.

[6] FELEZ J, KIM Y, BORRELLI F. A model predictive control approach for virtual coupling in railways[J]. IEEE transactions on intelligent transportation systems, 2019, 20(7): 2728-2739.

[7] 刘岭. 基于虚拟耦合的列车群体智能控制技术研究及展望[J]. 铁路通信信号工程技术, 2020, 17(2): 1-9.
LIU Ling. Research and prospect of intelligent control technology for virtually coupled train formation[J]. Railway signalling & communication engineering, 2020, 17(2): 1-9.

[8] XUN J, CHEN M, LIU Y, et al. An overspeed protection mechanism for virtual coupling in railway[J]. IEEE ACCESS, 2020, 8: 187400-187410.

[9] LEE B, CHAE S, CHOI H Y, et al. Skip and stop scheduling based on virtually coupled trains[J]. Journal of the Korean Society for Railway, 2020(23): 80-88.

[10] GALLO F, FEBBRARO A, GIGLIO D, et al. A mathematical programming model for the management of carriages in virtually coupled trains[C]. 2020 IEEE 23rd international conference on intelligent transportation systems. Rhodes, 2020.

[11] GALLO F, FEBBRARO A, GIGLIO D, et al. Planning and optimization of passenger railway services with virtually coupled trains[C]. 2021 7th international conference on models and technologies for intelligent transportation systems. Heraklion, 2021.

[12] 白佳薇, 张琦, 鲁放. 城市轨道交通虚拟编组列车慢车组织方案研究[J]. 都市轨道交通, 2022, 35(1): 126-133.
BAI Jiawei, ZHANG Qi, LU Fang. Skip-stop operation organization plan of virtual coupling trains in urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2022, 35(1): 126-133.

(编辑: 王艳菊)