doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2022.01.020

城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究

白佳薇，张　琦，鲁　放
（北京交通大学交通运输学院，北京 100044）

摘　要：虚拟编组技术的发展为改进城市轨道交通快慢车组织提供可能，有望缓解传统模式中慢车旅行时间增加、线路通过能力损失等问题。分析虚拟编组技术下列车运行的典型作业过程，给出虚拟编组条件下车站间隔时间的计算公式。提出虚拟编组技术下无越行和有越行两种快慢车的运行组织策略，对比不同组织模式下列车的开行效果，并进行案例分析。计算结果表明，虚拟编组有越行条件下的快慢车运行，可缩短列车追踪间隔时间，在一定客流条件下缩短乘客旅行时间；虚拟编组无越行条件下的快慢车运行相比有越行条件下，可进一步缩短慢车的停站时间与快车的旅行时间，但列车服务频率有所降低。

关键词：城市轨道交通；虚拟编组；快慢车；运输组织模式
中图分类号：U231　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1672-6073(2022)01-0126-08

Skip-stop Operation Organization Plan of Virtual Coupling Trains in Urban Rail Transit

BAI Jiawei, ZHANG Qi, LU Fang
(School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044)

Abstract: The development of virtual coupling technology offers the possibility of improving the traditional skip-stop operation organization in urban rail transit. This is expected to alleviate the problems of increased travel time of slow trains and loss of line passing capacity in traditional operation. This paper analyzes the typical operation process using virtual coupling technology and provides a formula for calculating the station interval time under the virtual coupling condition. The two strategies of skip-stop operation organization under virtual coupling technology are analyzed. The decision as to whether to implement overtaking is examined, and through the analysis of examples, the study compares the effect of train operation under different organization modes. The results show that the skip-stop operation organization under virtual coupling (with overtaking) reduces the train tracking interval time and the passenger travel time under certain passenger flow conditions. Furthermore, with the application of virtual coupling technology, the skip-stop operation with overtaking further reduces the stopping time of slow trains and the travel time of fast trains compared with when no overtaking is implemented.

Keywords: urban rail transit; virtual coupling; skip-stop operation; transportation organization

---

收稿日期：2021-06-10　　修回日期：2021-10-22
第一作者：白佳薇，女，硕士研究生，从事交通运输规划与管理研究，20120769@bjtu.edu.cn
通信作者：张琦，女，副教授，博士生导师，qzhang6@bjtu.edu.cn
基金项目：北京市自然科学基金-丰台轨道交通前沿研究联合基金资助(L201013)；同济大学道路与交通工程教育部重点实验室开放基金(K201904)
引用格式：白佳薇，张琦，鲁放. 城市轨道交通虚拟编组列车快慢车组织方案研究[J]. 都市快轨交通，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.

1 研究背景

我国大城市轨道交通线网规模日渐扩大，以“站站停”为主的运营组织模式无法满足不同层次乘客的出行需求。上海、广州、成都等国内超大型城市借鉴国外成功经验，已经建设了快慢车运行的城市轨道交通线路。快慢车运行虽然能减少远距离乘客的旅行时间，但仍存在慢车乘客旅行时间增加、运行图不平行铺画而造成通过能力损失等问题，虚拟编组这一新技术的发展有望改进传统的快慢车运行模式。

虚拟编组技术是指使用无线通信代替机械联挂，通过车-车之间的无线通信，使后车获取前车的运行状态[1]，实现相同或不同型号列车在运营过程中实时、快速地重联或解编。城轨线网应用虚拟编组技术后，同一线路上的不同车次列车可根据运营需求，在车站停车状态下或在区间不停车状态下，进行动态重联或解编(见图 1)[2]。这种实时在线的解编模式不仅缩短了列车追踪间隔，更带来了运行组织模式的革新。

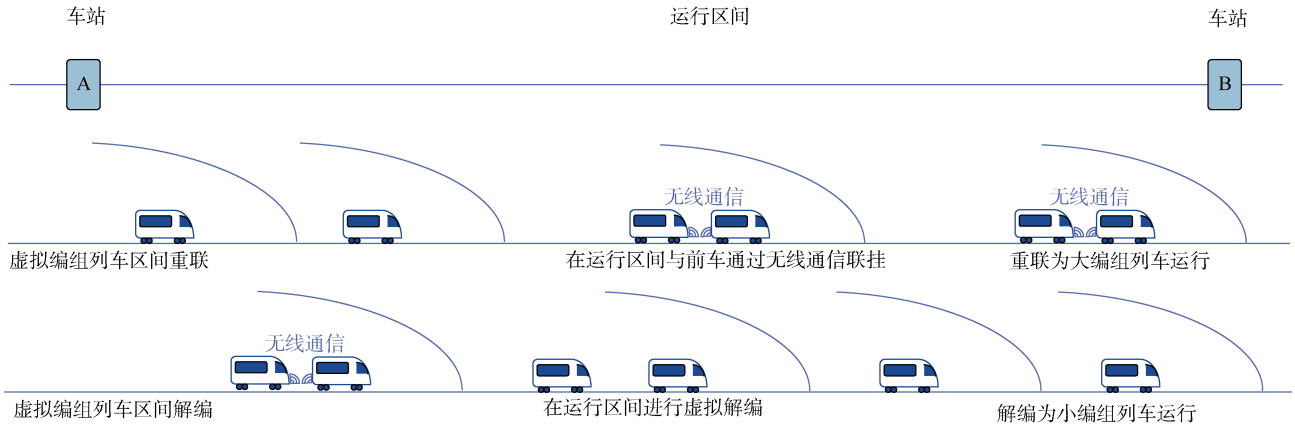

图 1　虚拟编组列车的虚拟解编联挂

Figure 1　Train marshaling/unmarshaling realized through the technology of virtual coupling

虚拟重联列车的雏形来自于 Bock 等提出的“virtually coupled train formations(虚拟重联列车编队)”设想[3]，列车不再通过物理车钩进行联挂，而是通过车与车之间的无线通信保持一定的距离运行(见图 2)。国内外许多学者研究讨论了虚拟编组的基本概念，实现了虚拟编组所需要的技术支持，并指出虚拟编组技术因其前所未有的灵活性，将彻底改变轨道交通现有的运营模式[4-7]。SCHUMANN T[8]在日本新干线上通过 DFSimu 模拟器，对东京—大阪区段运用虚拟编组进行模拟运行，结果显示虚拟编组能够提升线路通过能力。荀径等[9]围绕虚拟重联运行仿真和性能衡量，提出了虚拟重联模型和改进的车站追踪模型，从制动距离和车站通过能力的角度，研究了虚拟编组列车的运行性能。针对虚拟编组技术对车站和线路通过能力的具体影响，Liu 等[10]提出了一种虚拟编组技术下的智能调度与协调控制方法，用于车站进站和离站操作的有效时空路径规划，验证结果表明，该方法可以显著提高车站的通行能力。Wang 等[11]分别对列车在物理联挂和虚拟编组条件下的操作组织和技术特征进行分析，提出适用于城市轨道交通、郊区铁路等线路通过能力的计算方法。

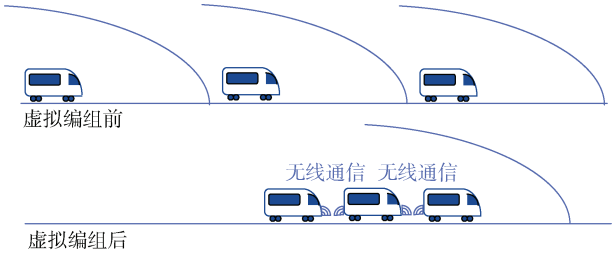

图 2　虚拟编组前后的对比

Figure 2　The comparison between before and after virtual coupling

国内外针对虚拟编组的既有研究主要集中于车站和线路的通过能力、车辆和相关列车运行控制领域，对虚拟编组技术支持下的列车运行组织模式的研究尚在起步阶段。本研究针对传统快慢车运行组织模式中存在的问题，分析了虚拟编组技术支持快慢车组织模式的技术优势，提出了虚拟编组技术应用下传统快慢车组织模式的突破与创新，并通过算例分析了虚拟编组条件下快慢车运行的优势。

2 虚拟编组技术下典型作业过程

2.1 虚拟重联和虚拟解编作业过程

2.1.1 虚拟重联作业

虚拟编组条件下的虚拟重联作业可以分为车站重联和区间重联两种方式。

1) 车站重联。前车到站停车时等待后方列车进站，在车站重联后以虚拟重联状态发车(见图 3)。如果采用车站重联的方式，则需考虑列车的车站追踪间隔，在适当延长前车停站时间的同时，配合提高后车区间运行速度等措施，以保证后车追上前车。

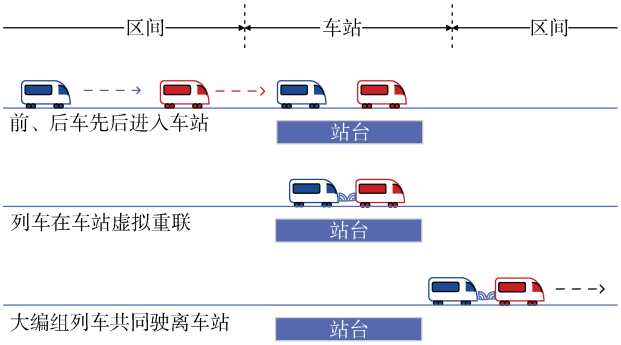

图 3 车站重联

Figure 3 Marshaling realized at the station

2) 区间重联。后车在区间追踪前方列车，并以重联状态进入车站(见图 4)。如果采用区间重联，后车相对于前车而言，相对距离变小，相对速度变大，更容易产生危险，对列车安全运行的要求较高。同时，由于重联过程中前、后车均处于运行状态，所以需要综合考虑列车的追踪间隔、区间运行速度，以及线路长度是否满足区间重联的要求。

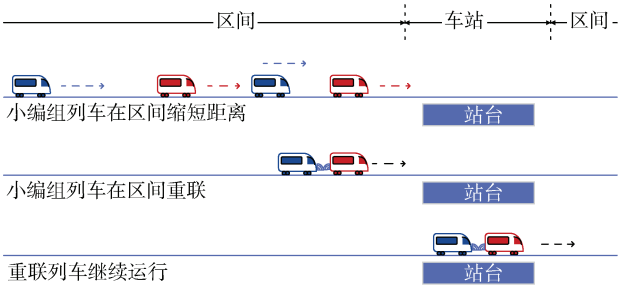

图 4 区间重联

Figure 4 Marshaling realized in the interval

2.1.2 虚拟解编作业

与虚拟重联类似，虚拟重联列车的虚拟解编方式有车站解编和区间解编两种。

1) 车站解编(见图 5)。在车站进行乘客乘降作业的同时，大编组列车虚拟解编为小编组列车，利用调整停站时间等措施，使前、后车在一定时间范围内保持足够的安全距离继续运行。

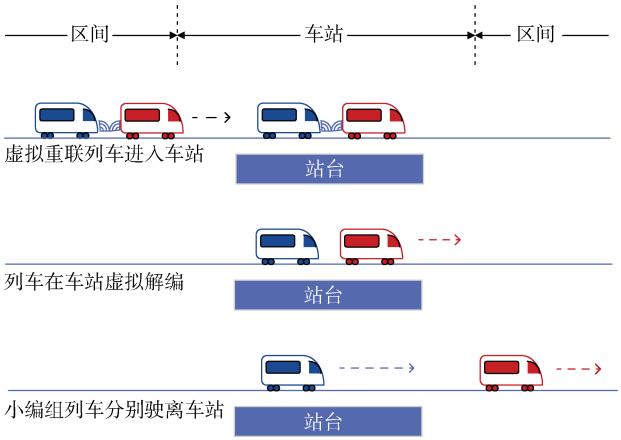

图 5 车站解编

Figure 5 Unmarshaling realized at the station

2) 区间解编(见图 6)。由于处于虚拟重联状态的两列车在区间内均以一定的速度运行，因此在区间虚拟解编需要通过前车加速或后车减速的方式制造速度差，保持一定时间后，即可产生足够的安全距离。但是，这种方法对区间长度、列车性能等有一定要求，需要根据具体的线路条件进行决策。

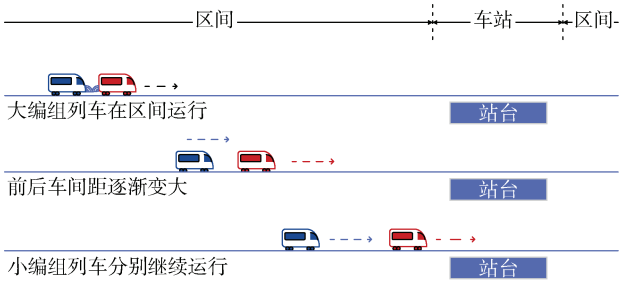

图 6 区间解编

Figure 6 Unmarshaling realized in the interval

2.2 虚拟编组技术下车站间隔时间计算

在传统 CBTC 模式下，前后车在车站内的安全间距最小值为前车驶出当前车站，并通过安全间隔 S_l，后车以最高运行速度运行至距车站近端距离为制动距离加反应距离[12]，如图 7 所示。

假定列车加/减速度均为 a，整车长度 S_t，列车安全停车间隔 S_l，列车区间最高允许运行速度为 v_{max}，根据文献[12]，列车车站内的追踪间隔 T_d 可由前车从车站完全驶出并通过安全间隔区段 S_l 的时间 T_f、司机和设备等的响应时间 T_r、后车制动所需时间 T_b 以及列车停

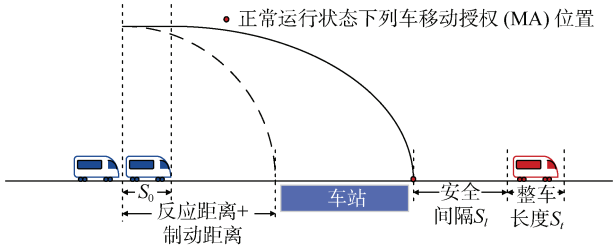

图 7　CBTC 下列车追踪间隔

Figure 7　Train tracking interval under computer-based train control system

站时间 T_p 共 4 个部分组成。为方便计算，假设在不考虑速度限制的情况下，列车匀加速至安全区段尽端时的速度为 v_f，即 $\sqrt{2a(S_l+S_t)}=v_f$，则具体计算公式如下：

$$T_b=\frac{v_{\max}}{a} \tag{1}$$

$$T_d=\begin{cases} T_r+T_b+T_p+\sqrt{\dfrac{2(S_l+S_t)}{a}} & (v_f\leqslant v_{\max}) \\ T_r+T_b+T_p+\dfrac{2a(S_l+S_t)+v_{\max}^2}{2av_{\max}} & (v_f>v_{\max}) \end{cases} \tag{2}$$

相比传统 CBTC，虚拟编组条件下前后列车可共享线路资源。由于虚拟编组支持协同制动，移动授权位置可定位至前车车尾甚至是车身(见图 8)，安全距离与传统模式相比进一步缩短，理论上可以为 0，即后车可以在前车未出清保护区段的情况下追踪进站，缩短追踪间隔。在实际运用中考虑安全余量，安全间隔区段 S_l 可取 2 m。

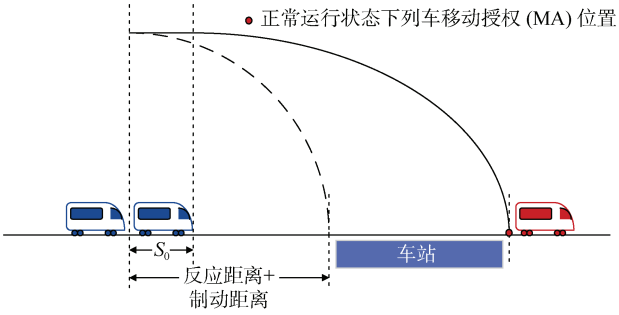

图 8　虚拟编组下列车追踪间隔

Figure 8　Train tracking interval using virtual coupling technology

因此，在虚拟编组条件下，列车车站内追踪间隔 T_d 的计算与传统 CBTC 模式相似，有

$$T_d=T_r+T_b+T_p+\sqrt{\frac{2(S_l+S_t)}{a}} \tag{3}$$

取列车区间最大运行速度 $v_{\max}$=100 km/h、a=1.1 m/s^2、停站时间 T_p=30 s 进行计算，虚拟编组下列车车站内的追踪间隔可由传统城轨列车的 90 s 缩短至 72 s。

虚拟编组条件下列车的追踪进站，后车可以在车站前区间适当降速行驶，待前车启动后，后车可立即进站。虚拟编组的应用，可尽快将后方站台资源空出，以便增加线路车辆密度。

3　基于虚拟编组的快慢车运行组织

3.1　虚拟编组在快慢车运行组织中的优势

快慢车运行是一种运输组织方法，它根据线路的客流特点以及通过能力情况，在开行传统“站站停”列车的基础上，加开“跨站停”快速列车。一般情况下，快慢车的技术速度大致相同，但由于快车停站较少，其全程旅行时间较短。

当采用快慢车共线运行的组织模式时，现有的运行方式一般会组织快车在越行站越行。从运输组织和保证快车运行速度的角度考虑，一般采用快车从正线越行、慢车在越行站设置的站线待避的方式[13]。快慢车运行有利于提高线路的运输效率，缩短了快车乘客的旅行时间；但同时增加了慢车乘客的候车时间和总旅行时间，降低了慢车乘客的服务水平[14]，并因运行图的不平行铺画而造成线路通过能力的损失。

在虚拟编组技术应用条件下，快车和慢车可以在始发站以虚拟重联状态发车，运行过程中可依据各自的停站方案及线路的具体条件，选择适当的车站或区间进行虚拟重联与虚拟解编作业，从而实现快慢车的共线运行。

虚拟编组技术的应用，可以缓解传统快慢车运行存在的问题。虚拟编组下快车和慢车可以在区间虚拟重联运行，缩短区间追踪间隔时间，提升运输能力，从而部分抵消传统快慢车组织中不平行运行图铺画导致的线路通过能力损失。同时，由于虚拟编组技术可以缩短车站间隔时间，所以慢车待避快车越行时间可较传统模式进一步缩短。

3.2　基于虚拟编组的快慢车组织策略

在虚拟编组条件下，快慢车组织模式可结合传统模式中快车在越行站越行慢车的方式，也可以不使用越行线，直接采用列车在区间或车站进行虚拟重联解编的方式，以保证快慢车共线运行。

不使用越行线的虚拟编组快慢车运行过程如图 9 所示，大编组列车(快车在前)在区间或车站解编为小编组列车，快车不停站通过部分车站，追赶前方列车，在

区间或车站与前车虚拟重联为大编组列车(快车在后)。

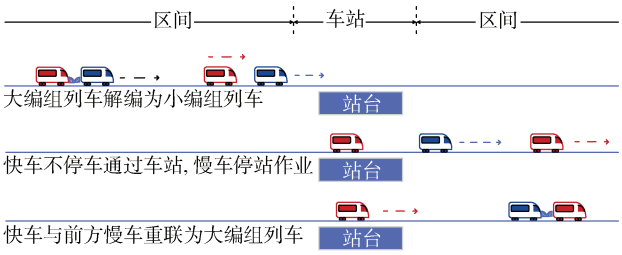

图 9　虚拟编组(无越行)快慢车运行

Figure 9　Skip-stop operation applying virtual coupling (no overtaking)

不使用越行线的快慢车运行模式，对线路越行设备的要求较低，不要求线路设置专门的越行线，列车在正线上即可完成快、慢车共线运行。但由于快车在运行过程中由“领头”(在前)变为“跟随”(在后)，所以列车只能进行一组解体、联挂，快慢车组织方式无法在全线范围内采用。因此，需要综合考虑列车的运行速度、停站方案及线路的具体条件，以判断该种模式是否适用。同时，由于快、慢车解编重联需要一定的运行速度差异，列车运行图仍存在不平行铺画的问题，因此对线路通过能力有一定的损失。

使用越行线的快慢车运行模式与传统技术下的快慢车越行类似：慢车进入越行站侧线停车，待后方快车越行后继续前进，但需要列车在区间或车站进行虚拟解编、重联。大编组列车(慢车在前快车在后)在区间或车站解编为小编组列车，具体过程如图 10 所示。到达越行站后，慢车驶入侧线停车，进行乘客的乘降作业；快车不停站快速通过正线，并与前方列车在区间或车站进行虚拟联挂，联挂为大编组列车共同运行。这种快慢车运行组织模式可与前述不使用越行线的组织模式结合使用。

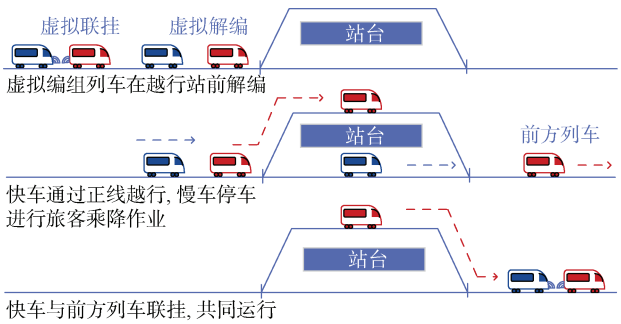

图 10　虚拟编组(有越行)快慢车运行

Figure 10　Skip-stop operation applying virtual coupling (with overtaking)

3.3　虚拟编组技术应用的保障措施

虚拟编组技术在为传统的快慢车运输组织带来新思路的同时，也为车站管理带来了难度，因此需要增加相应的车站、列车保障措施，以保证车站工作的正常开展。

1) 在客流组织方面，由于列车在运行过程中会发生虚拟解编，重联列车之间不互相连通，因此车站与列车需做好乘客的引导工作。在乘客上车前，通过车站广播、工作人员引导等方式，减少乘客错乘；乘客上车后，及时提醒乘客所在车厢的到站情况，帮助错乘乘客及时下车换乘。

2) 在设施设备方面，虚拟编组技术改变了列车的运行模式，存在同一线路不同车站的停靠列车编组不同的现象，所以部分车站的站台、屏蔽门等设施设备应满足虚拟重联列车在站进行乘客乘降作业的要求。

4　快慢车组织策略算例分析

下面运用前述快慢车组织策略进行算例分析，对比站站停方案、传统快慢车方案、虚拟编组条件下快慢车方案的列车开行效果，分析列车服务频率、乘客旅行时间等指标。

4.1　算例条件

假设某轨道交通线路共设 9 个车站，其线路具体信息与 A—I 方向某高峰时段(1 h)客流 OD 如表 1、2 所示。其中，B、F 为具备越行条件的车站，E、H 为大客流站，快车可能在越行站越行慢车，快、慢车停站时间最短为 30 s。

表 1　线路及停站信息

Table 1　Line and stop information

车站编号	区间距离/m	是否快车停站点	备注
A	3 309	是	起点站
B	3 386	否	越行站
C	1 615	否	
D	3 354	否	
E	4 576	是	大客流站
F	2 712	否	越行站
G	1 331	否	
H	2 441	是	大客流站
I		是	终点站

表 2　A—I 方向某高峰时段(1 h)客流 OD

Table 2　Peak hourly OD (origin-destination) Passenger flow in A-I direction　　人次

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	总计
A	0	281	192	227	1243	109	151	1 343	1 169	4 715
B		0	172	211	132	111	214	228	228	1 296
C			0	196	188	132	128	231	316	1 191
D				0	98	211	169	237	263	978
E					0	205	116	1 018	891	2 230
F						0	191	237	213	641
G							0	213	207	420
H								0	212	212
I									0	0
总计	0	281	364	634	1661	768	969	3 507	3 499	11 683

4.2　组织方案

在上述运营条件下，按照运行站站停列车、传统快慢车、虚拟编组条件下快慢车 3 种模式进行分析。站站停列车与传统快慢车是轨道交通常用的两种运行模式，在此不做赘述。虚拟编组条件下的快慢车组织方案可以根据快车是否利用越行线越行前方慢车，分为虚拟编组(有越行)条件下的快慢车运行、虚拟编组(无越行)条件下的快慢车运行。

为方便研究，降低问题复杂度，作如下假设：①车站站台长度满足重联列车在站停靠的要求。②独立运行的列车采用 6 编组 B 型车，车辆定员 230 人，最大允许满员 327 人[15]。③直达 OD 间的乘客优先选择乘坐快车，其他乘客选择乘坐慢车，在快车无法满足客流需求时，乘客可选择乘坐慢车；若快、慢车均无法满足客流需求，则该部分客流流失；不考虑快车与慢车间的换乘行为。

快慢车运行组织的具体方案为：

1) 传统快慢车运行如图 11 所示，快、慢车先后从 A 站发出，按照停站方案停车，快车在 F 站越行前方慢车。

2) 虚拟编组(有越行)条件下的快慢车运行，即虚拟编组条件下快车借助越行站越行前方慢车的运行模式，如图 12 所示。快车与慢车虚拟联挂为大编组列车(快车在前、慢车在后)，驶出 A 站后，在 A-B 区间内利用速度差，虚拟解编为快车和慢车。快车在 D 站追上前方慢车，与在 D 站等待的慢车虚拟重联为大编组列车(慢车在前、快车在后)。列车在大客流站 E 站进行乘客乘降作业的同时进行虚拟解编，乘降作业完成后，慢车和快车保持一定的安全间隔，先后驶离车站。后慢车在越行站 F 站等待规避快车，待快车通过一定安全距离后，再驶离车站。

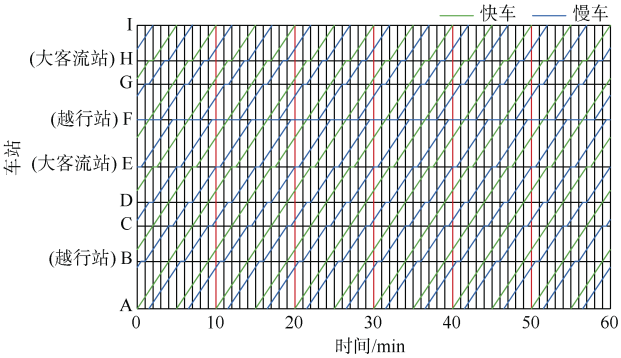

图 11　传统快慢车运行图

Figure 11　Schematic of traditional skip-stop operation diagram

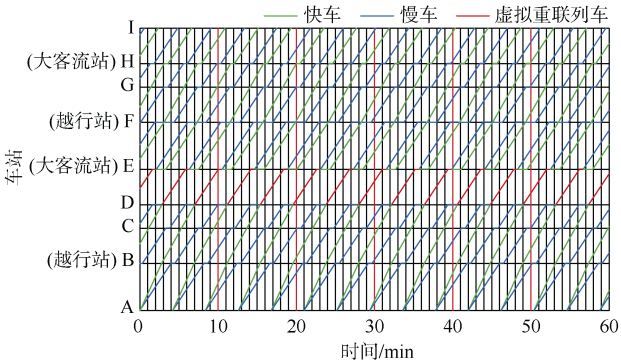

图 12　虚拟编组(有越行)条件下的快慢车运行图

Figure 12　Schematic of skip-stop operation diagram applying virtual coupling (with overtaking)

3) 虚拟编组(无越行)条件下的快慢车运行(见图 13)，直接通过虚拟编组列车在车站和区间虚拟联挂、解编的方式，实现列车的快、慢车运行。也就是说，虚拟重联列车(快车在前，慢车在后)在 A-B 区间虚拟解编后，不在区间或车站发生越行。最终快车在 G 站追上前方

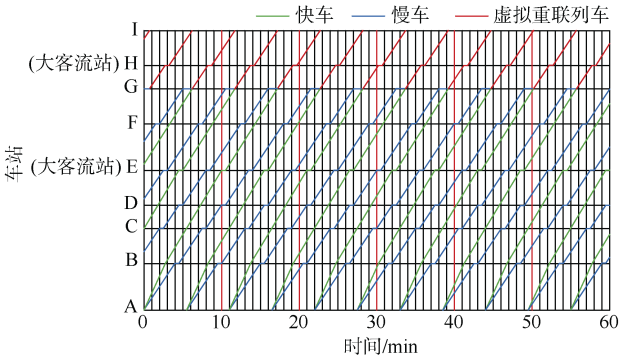

图 13　虚拟编组(无越行)条件下的快慢车运行图

Figure 13　Schematic of skip-stop operation diagram applying virtual coupling (no overtaking)

慢车，与在 G 站等待的慢车虚拟重联为大编组列车(慢车在前、快车在后)，共同驶向前方车站。由于快、慢车的先后顺序发生改变，该组织方式在运行过程中只能进行一组解体、联挂作业，与有越行条件的相比，具有一定的局限性。

4.3 结果分析

按照列车区间运行速度 80 km/h、不停站通过车站速度 60 km/h、传统快慢车列车追踪间隔 90 s、虚拟编组条件下快慢车列车追踪间隔 72 s，对不同模式下列车运行过程进行计算模拟，铺画运行图，并进行分析比较，其列车运行情况如表 3 所示。根据高峰客流 OD 数据进行计算，不同类型乘客的旅行时间如表 4 所示。

由表 4 可知，传统快慢车相比于站站停列车，增设了部分不停站运行的快车，减少了快车乘客的旅行时间，但慢车在越行站待避快车越行，增加了停站时间，导致慢车的旅行时间增加。

表 3 不同运输组织模式下的列车运行情况

Table 3 Train operation under different transportation organization modes

			站站停列车	传统快慢车(有越行)		虚拟编组条件下快慢车			
						有越行		无越行	
				快车	慢车	快车	慢车	快车	慢车
单列车区间运行时间(包含起停车附加时间)/min			24	24	24	21.3	24	21.7	24
停站时间/min			4.5	2	7.5	3.2	7.1	2	5.2
列车旅行时间/min			28.5	26	31.5	24.5	31.1	23.7	29.2
高峰小时大客流 OD 服务列车数/列	A—E	发车数	30	24 (快车：慢车=1：1)		15(重联大编组列车)		11(重联大编组列车)	
		到达数				14(重联大编组列车)		22(快车：慢车=1：1)	
	A—H	发车数				15(重联大编组列车)		11(重联大编组列车)	
		到达数				28(快车：慢车=1：1)		11(重联大编组列车)	
	A—I	发车数				15(重联大编组列车)		11(重联大编组列车)	
		到达数				29(快车：慢车=14：15)		11(重联大编组列车)	
	E—H	发车数				14(重联大编组列车)		22(快车：慢车=1：1)	
		到达数				28(快车：慢车=1：1)		11(重联大编组列车)	
	E—I	发车数				14(重联大编组列车)		22(快车：慢车=1：1)	
		到达数				29(快车：慢车=14：15)		11(重联大编组列车)	

表 4 高峰小时乘客旅行时间

Table 4 Passenger travel time during peak hours

	站站停列车		传统快慢车(有越行)		虚拟编组下快慢车			
					有越行		无越行	
	大客流 OD	其他客流 OD	大客流 OD	其他客流 OD	大客流 OD	其他客流 OD	大客流 OD	其他客流 OD
旅行时间/min	111 864.50	68 130.00	111 340.50	84 362.17	98 127.60	79 898.98	100 056.09	77 185.63
总旅行时间/min	179 994.50		195 702.67		178 026.58		177 241.72	
乘客数量/人次	5 664	6 019	5 664	6 019	5 664	6 019	5 388	6 019
人均旅行时间/min	19.75	11.32	19.66	14.02	17.32	13.27	18.57	12.82
总人均旅行时间/min	15.41		16.75		15.24		15.54	

虚拟编组(有越行)条件下的快慢车运行，由于虚拟编组技术的应用，列车车站追踪间隔由 90 s 缩短至 72 s，如图 14 所示，且部分运行线合并，列车区间追踪间隔进一步缩短，大大缩短了乘客的旅行时间。同时，慢车等待越行时间缩短，节省了部分乘客的旅行时间；但快、慢车在车站的重联，延长了慢车在重联车站的停站时间，增加了部分旅行时间。在上述客流条件下，由于因慢车等待时间缩短而节省的乘客旅行时间较长，虚拟编组(有越行)条件下慢车的人均旅行时间较传统快慢车的模式进一步缩短。

在虚拟编组技术支持的两种组织方式(见表 3)中，无越行条件下的快慢车运行相比有越行条件下的快慢车运行，进一步缩短了慢车的停站时间与快车的旅行时间，但由于快、慢车运行时间的差异，以及列车运行图的不平行铺画，列车服务频率降低。在车站乘客等待时间增加的同时，有部分乘客流失，人均旅行时间增加。

为方便研究，笔者简化了问题的复杂度。在实际运营过程中，应具体考虑线路条件、列车停站方案、

发车频率以及乘客的精细化乘车行为等方面，进一步研究讨论虚拟编组的适用范围。

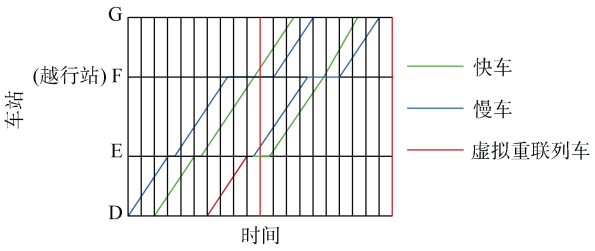

图 14　虚拟编组与传统快慢车的追踪间隔时间对比

Figure 14　Comparison of tracking interval time of two types of skip-stop operation with or without applying virtual coupling technology

5　结语

虚拟编组技术作为一种较为前沿的列车动态编组技术，将为城市轨道交通列车运行组织模式与作业过程带来突破与革新。笔者结合虚拟编组技术的特点，分析了虚拟编组技术应用下快慢车运行组织模式中越行作业过程和时间标准发生的改变，进一步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。

值得注意的是，虚拟编组技术尽管有望拓展和革新传统的快慢车运输组织模式，但也不可避免地增加了客流组织的难度。同时，其应用也需全面分析对具体运营条件的适应性。因此，应进一步研究虚拟编组技术应用下的列车运行计划编制与调整方法，分析其适用条件，并提出配套的客流组织技术，为该技术的工程应用提供决策支持。

参考文献

[1] 曹源，温佳坤，马连川．重大疫情下的列车动态编组与调度[J]．交通运输工程学报, 2020, 20(3): 120-128.
CAO Yuan, WEN Jiakun, MA Lianchuan. Dynamic marshalling and scheduling of trains in major epidemics[J]. Joural of traffic and transportation engineering, 2020, 20(3): 120-128.

[2] 宋志丹，徐效宁，李辉，等．面向虚拟编组的列控技术研究[J]．铁道标准设计, 2019, 63(6): 155-159.
SONG Zhidan, XU Xiaoning, LI Hui, et al. Study on virtual-coupling-orientated train control technique[J]. Railway standard design, 2019, 63(6): 155-159.

[3] BOCK U, BIKKER G. Design and development of a future freight train concept: “virtually coupled train formations”[J]. IFAC proceedings volumes, 2000, 33(9): 395-400.

[4] GOIKOETXEA J. Roadmap towards the wireless virtual coupling of trains[C]//International Workshop on Communication Technologies for Vehicles. 2016, 9669: 3-9.

[5] FLAMMINI F, MARRONE S, NARDONE R, et al. Towards railway virtual coupling[C]//IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference. Nottingham, 2018.

[6] AOUN J, QUAGLIETTA E, GOVERDE R. Exploring demand trends and operational scenarios for virtual coupling railway signalling technology[C]//IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems. 2020.

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

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

[9] 荀径，陈明亮，宁滨，等．虚拟重联条件下地铁列车追踪运行性能衡量[J]．北京交通大学学报, 2019, 43(1): 96-103.
XUN Jing, CHEN Mingliang, NING Bin, et al. Train tracking performance measurement under virtual coupling in subway[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2019, 43(1): 96-103.

[10] LIU L, WANG P, WEI W, et al. Intelligent dispatching and coordinated control method at railway stations for virtually coupled train sets[C]//IEEE Intelligent Transportation Systems Conference. Auckland, 2019: 607-612.

[11] WANG Y, LIU L, LIU J, et al. Carrying capacity calculation method of regional rail transit line based on flexible train formation[C]//IEEE 23rd International Conference on Intelligent Transportation Systems. Rhodes, 2020.

[12] 冯文慧．基于无线通信的城轨车辆运行控制系统关键技术研究[D]．南京：南京理工大学, 2017.
FENG Wenhui. Research on key technologies of CBTC system based on radio communication[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

[13] 毛保华，高自有，柏赟，等．城市轨道交通网络运营组织理论与方法[M]．北京：人民交通出版社, 2018: 206.

[14] 蒋天宇．考虑满载率均衡的城市轨道交通快慢车与多编组组合优化方案设计[D]．北京：北京交通大学, 2019.
JIANG Tianyu. Optimization for train operation plan of combination of express-local train and multi-group in urban rail transit considering the equilibrium of capacity rate[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2019.

[15] 周玮腾，韩宝明，杜恒，等．城市轨道交通行车调度[M]．北京：北京交通大学出版社, 2020: 22.

（编辑：王艳菊）