

异质列车速度目标值选取对直通区段通过能力的影响

李泽文

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司, 200092, 上海//工程师)

摘 要 不同层次轨道交通间的直通运营具有减少乘客出行时间、节约土地资源等优势。该模式下,在直通区段上运行的不同层次或不同技术标准(如速度目标值、车辆制式等)的列车互称为异质列车。在分析车站追踪间隔计算原理及方法的基础上,将组合周期时间作为计算直通区段通过能力的主要依据,建立了直通区段通过能力计算模型,并运用回归分析方法得到不同站间距下列车速度目标值与旅行速度的相关关系。研究表明:直通区段通过能力与异质列车的速度目标值组合具有相关性。在部分参数取值给定的条件下,随着两种异质列车速度目标值差值的增大,直通区段通过能力有所减小。

关键词 轨道交通;多网融合;直通运营;区段通过能力;列车速度目标值;列车追踪间隔

中图分类号 U292.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.03.006

Influence of Heterogeneous Train Speed Target Value Selection on Through-Section Carrying Capacity

LI Zewen

Abstract Rail transit through-operation at different levels features passenger travel time reduction and land resource saving. In this mode, trains with different operation levels or different technical standards (such as speed target value, vehicle systems) running in the through-section are called heterogeneous trains. Through analyzing the calculation principle and method of station tracking interval, the combined cycle time is taken as the main basis for calculating the carrying capacity in through-section, and the calculation model of through-section carrying capacity is established. The relation between speed target value and travelling speed with different station spacing is inferred by applying regression analysis method. The study shows that the carrying capacity in through-section is related to the combination of heterogeneous train speed target values. Under the condition that some parameter values are given, as the difference between the speed target values of two heteroge-

neous trains increases, the carrying capacity in through-section would decrease.

Key words rail transit; multi-network integration; through-operation; section carrying capacity; train speed target value; train tracking interval

Author's address Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co., Ltd., 200092, Shanghai, China

目前,建设多网融合的轨道交通体系是都市圈轨道交通发展的必然趋势。直通区段是指在互相连通的分属不同层次的两条或多条轨道交通线路上可供列车共线运营的区段。直通区段是不同层次轨道交通间实现互通运营的关键因素之一,在直通区段上运行的不同层次或不同技术标准(如速度目标值、车辆制式等)的列车互称为异质列车。例如,在地铁和市域铁路的直通区段中,地铁列车和市域铁路列车互称异质列车。

列车速度目标值的选取,将直接影响异质列车的列车追踪间隔及旅行速度,其中:列车追踪间隔是计算通过能力的主要数据基础;旅行速度的差异会导致各异质列车在直通区段的通过时间有所不同,从而导致直通区段的通过能力产生折减。此外,平均站间距也是影响列车旅行速度的重要因素^[1],应结合列车速度目标值一并考虑。基于此,本文选取了2种异质列车的多个速度目标值组合,计算并分析直通区段通过能力的变化情况。

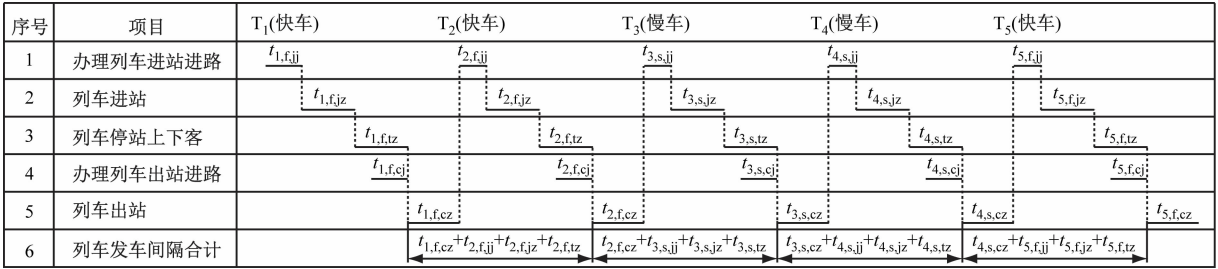
1 直通区段车站追踪间隔的计算

本文仅选取2种不同轨道交通层次的直通区段进行研究,将直通区段中速度目标值较大者称为快车,速度目标值较小者称为慢车。快车及慢车在直通区段内追踪运行,其通过能力受限于区间追踪间隔与车站追踪间隔的较大值。结合既有研究,考虑到列车停站时间的影响,车站追踪间隔往往大于区

间追踪间隔,是制约线路区段通过能力的瓶颈^[2-3]。基于此,本文首先对车站追踪间隔的计算方法进行研究。

根据不同的开行方案,直通区段内共存在4种不同的车站追踪间隔,分别为:慢车与慢车间的追踪间隔、快车与快车间的追踪间隔、慢车与快车间的追踪间隔,以及快车与慢车间的追踪间隔。图1

为直通区段内某车站的接发车作业流程图。设第1列列车 T_1 为快车、第2列列车 T_2 为快车、第3列列车 T_3 为慢车、第4列列车 T_4 为慢车、第5列列车 T_5 为快车;设 T_3 与 T_4 之间的车站追踪间隔为 $I_{s,s}$ 、 T_1 与 T_2 之间的车站追踪间隔为 $I_{f,f}$ 、 T_4 与 T_5 之间的车站追踪间隔为 $I_{s,f}$ 、 T_2 与 T_3 之间的车站追踪间隔为 $I_{f,s}$ 。



注: $t_{1,f,jj}$ 、 $t_{2,f,jj}$ 、 $t_{3,s,jj}$ 、 $t_{4,s,jj}$ 、 $t_{5,f,jj}$ ——分别为 T_1 — T_5 办理进站进路时间; $t_{1,f,jz}$ 、 $t_{2,f,jz}$ 、 $t_{3,s,jz}$ 、 $t_{4,s,jz}$ 、 $t_{5,f,jz}$ ——分别为 T_1 — T_5 的进站时间; $t_{1,f,tz}$ 、 $t_{2,f,tz}$ 、 $t_{3,s,tz}$ 、 $t_{4,s,tz}$ 、 $t_{5,f,tz}$ ——分别为 T_1 — T_5 的停站上下客时间; $t_{1,f,cj}$ 、 $t_{2,f,cj}$ 、 $t_{3,s,cj}$ 、 $t_{4,s,cj}$ 、 $t_{5,f,cj}$ ——分别为 T_1 — T_5 办理出站进路时间; $t_{1,f,cz}$ 、 $t_{2,f,cz}$ 、 $t_{3,s,cz}$ 、 $t_{4,s,cz}$ 、 $t_{5,f,cz}$ ——分别为 T_1 — T_5 出清站台并驶出安全防护区段所用时间。

图1 直通区段内某车站的接发车作业流程示意图

Fig. 1 Flow chart of train reception and departure operation of a station in through-section

由图1可知,4种车站追踪间隔的计算公式分别为:

$$I_{s,s} = t_{3,s,cz} + t_{4,s,jj} + t_{4,s,jz} + t_{4,s,tz} \tag{1}$$

$$I_{f,f} = t_{1,f,cz} + t_{2,f,jj} + t_{2,f,jz} + t_{2,f,tz} \tag{2}$$

$$I_{s,f} = t_{4,s,cz} + t_{5,f,jj} + t_{5,f,jz} + t_{5,f,tz} \tag{3}$$

$$I_{f,s} = t_{2,f,cz} + t_{3,s,jj} + t_{3,s,jz} + t_{3,s,tz} \tag{4}$$

2 直通区段通过能力的定义及计算

2.1 线路通过能力的计算

线路通过能力是指轨道交通线路某方向1 h内通过的最大列车数,其计算公式为:

$$N = \frac{3\ 600}{I} \tag{5}$$

式中:

N ——轨道交通线路某方向1 h内通过的最大列车数,列/h;

I ——列车最小追踪间隔,s。

2.2 直通区段通过能力的定义

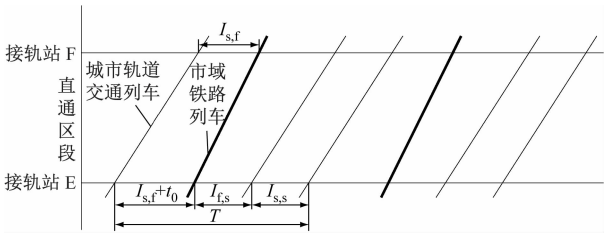
直通区段通过能力是指在某种固定设备(如通信、信号设备等)及行车组织水平下,1 h内在直通区段某方向上通过的各层次异质列车最大列车数之和^[4]。

2.3 直通区段通过能力的计算方法

本文仍以2种异质列车为研究对象进行分析。

在一定的线路条件下,旅行速度与速度目标值之间符合一定的比例关系^[5]。由于异质列车速度目标值等参数存在差异,2种异质列车在直通区段并非平行运行,因此,直通区段通过能力也将随之有所变化。

以城市轨道交通列车与市域铁路列车直通运营为例予以说明,2种异质列车在直通区段内的追踪运行图如图2所示。



注: I_0 ——在不考虑越行的情况下,除满足最小追踪间隔外,快车追踪慢车时还需多预留的冗余旅行时间,其值由2种异质列车的旅行速度共同决定。

图2 直通区段内2种异质列车追踪运行示意图

Fig. 2 Tracking operation diagram of two heterogenous trains in through-section

由图2可知:当城市轨道交通列车和市域铁路列车的开行比例为 $m:1$ 时(即连续开行 m 列城市轨道交通列车后开放1列市域铁路列车过轨运营),其开行方案共涉及3种车站追踪间隔,分别为 $I_{s,s}$ 、 $I_{s,f}$ 、

$I_{f,s}$ 。为方便运营管理,2 种异质列车宜成比例开行,本文将异质列车在某种开行比例下的组合周期时间 T 作为计算直通区段通过能力的主要依据^[6]:

$$T = (m-1)I_{s,s} + I_{s,f} + I_{f,s} + \left[l \left(\frac{1}{v_{gj}} - \frac{1}{v_{sy}} \right) 3600 \right] \quad (6)$$

式中:

l ——直通区段的线路长度,km;

v_{gj} ——城市轨道交通列车在直通区段某方向上的旅行速度,km/h;

v_{sy} ——市域铁路列车在直通区段某方向上的

$$N_{gj} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor m, & 3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T = 0 \\ \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor m + \left[\left(3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T \right) / I_{s,s} \right] + 1, & 0 < 3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T \leq (m-1)I_{s,s} \\ \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor m + m, & (m-1)I_{s,s} < 3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T < T \end{cases} \quad (8)$$

$$N_{sy} = \begin{cases} \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor, & 0 \leq 3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T \leq T - I_{f,s} \\ \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor + 1, & T - I_{f,s} < 3600 - \left\lfloor \frac{3600}{T} \right\rfloor T < T \end{cases} \quad (9)$$

由式(6)一式(9)可知,直通区段通过能力除与车站追踪间隔、开行比例有关外,还受到异质列车在直通区段上旅行速度的影响。

3 列车速度目标值、旅行速度及平均站间距之间的关系

3.1 不同平均站间距下列车速度目标值与旅行速度的关系

城市轨道交通(地铁、轻轨等)速度目标值多采用 80 km/h 及 100 km/h 2 个等级。而根据《市域铁路设计规范》,市域铁路的设计速度可分为 100 km/h、120 km/h、140 km/h、160 km/h 4 个等级^[7]。平均站间距是影响列车旅行速度的关键参数,本文通过列车的牵引仿真计算,得到不同平均站间距下列车速度目标值与列车旅行速度的关系,如图 3 所示。

3.2 不同列车速度目标值下旅行速度与平均站间距的关系

基于以上的牵引计算结果,本文运用回归分析方法,在 SPSS 软件中进行了多次回归试验,采用非线性二次拟合得到的输出结果较优。由此,得到不同列车速度目标值下旅行速度和平均站间距的关系如式(10)所示。试验得到本次拟合可决系数 R^2

旅行速度,km/h。

则直通区段通过能力 N_{it} 的计算式为:

$$N_{it} = N_{gj} + N_{sy} \quad (7)$$

式中:

N_{gj} ——1 h 内通过直通区段某方向的城市轨道交通列车的最大列车数,列/h;

N_{sy} ——1 h 内通过直通区段某方向的市场铁路列车的最大列车数,列/h。

式(7)中 N_{gj} 和 N_{sy} 的计算式分别为:

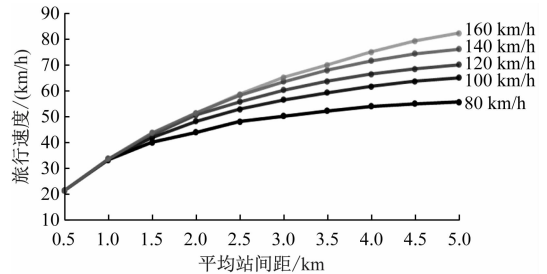


图 3 不同平均站间距下列车速度目标值与旅行速度的关系

Fig. 3 Relationship between train target speed and travelling speed under different average station spacings

分别为 0.982、0.992、0.996、0.999、0.999,表明拟合优度较好。

$$v_{\text{旅}} = \begin{cases} 15.593 + 18.147S_a - 2.079S_a^2, & v_{\text{max}} = 80 \text{ km/h} \\ 13.503 + 21.376S_a - 2.264S_a^2, & v_{\text{max}} = 100 \text{ km/h} \\ 11.820 + 23.757S_a - 2.467S_a^2, & v_{\text{max}} = 120 \text{ km/h} \\ 10.802 + 24.897S_a - 2.392S_a^2, & v_{\text{max}} = 140 \text{ km/h} \\ 11.238 + 23.911S_a - 1.965S_a^2, & v_{\text{max}} = 160 \text{ km/h} \end{cases} \quad (10)$$

式中:

$v_{\text{旅}}$ ——列车在直通区段运行的旅行速度,km/h;

v_{max} ——列车的速度目标值,km/h;

S_a ——直通区段的平均站间距,km。

4 算例分析

如图4所示,AB为地铁线路,CD为市域铁路线路。EF段为直通区段,设有 n 座车站。地铁列车与市域铁路列车在直通区段上的开行比例为2:1。本文暂不考虑快慢车越行。

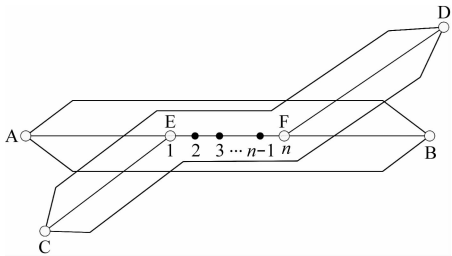


图4 直通区段运营算例示意图

Fig.4 Diagram of through-section operation calculation example

4.1 参数取值

直通区段长度 l 取8.5 km。直通区段车站站台有效长度、地铁列车长度及市域铁路列车长度均取186 m;直通区段内,快车及慢车均采用站站停模式,各站的停站时间均取30 s;列车的起动的加速度和制动减速度均取 0.9 m/s^2 [8]。

4.2 车站追踪间隔计算

基于上述参数取值,通过牵引仿真并根据式(1)一式(4)计算得到该直通区段内2种异质列车在不同速度目标值组合下的车站追踪间隔,如表1所示。

表1 直通区段内2种异质列车不同速度目标值组合下的车站追踪间隔

Tab.1 Station tracking interval under different target speed combinations of two heterogeneous trains in through-section

组合	慢车的速度目标值/(km/h)	快车的速度目标值/(km/h)	车站追踪间隔/s			
			$I_{s,s}$	$I_{f,f}$	$I_{s,f}$	$I_{f,s}$
组合1	80	100	97	100	100	97
组合2	80	120	97	104	104	97
组合3	80	140	97	109	109	97
组合4	80	160	97	114	114	97
组合5	100	100	100	100	100	100
组合6	100	120	100	104	104	100
组合7	100	140	100	109	109	100
组合8	100	160	100	114	114	100

4.3 速度目标值对直通区段通过能力的影响

n 与 S_a 的关系式为:

$$S_a = l / (n - 1) \tag{11}$$

当 $l = 8.5\text{ km}$ 时,可得到 n 与 S_a 的对应关系,如表2所示。

表2 车站数 n 与平均站间距 S_a 的对应关系
Tab.2 Corresponding relationship between number of stations (n) and average station spacing (S_a)

n /座	S_a /km
3	4.25
4	2.83
5	2.13
6	1.70
7	1.42
8	1.21
9	1.06

根据式(6)一式(10),计算得到2种异质列车各速度目标值组合在不同平均站间距下的直通区段通过能力,如表3所示。由表3可知:

- 1) 在平均站间距不变的情况下,随着2种异质列车速度目标值差值的逐渐增大,直通区段通过能力呈现先下降后逐渐趋于稳定的态势。采用本文所取的参数取值进行计算,可得到组合4在平均站间距为4.25 km时的直通区段通过能力最小,为23对/h;组合5(各种平均站间距下)的直通区段通过能力最大,为36对/h。
- 2) 地铁列车及市域铁路列车均采用站站停模式时,随着直通区段车站数量的增加(即直通区段平均站间距减小),直通区段通过能力呈现逐渐增大的态势。并且随着2种异质列车速度目标值差值的增大,由平均站间距变化引起的直通区段通过能力变化也愈发显著。
- 3) 进一步对2种异质列车的速度目标值之差相等时直通区段通过能力进行对比。如对组合2和组合7的直通区段通过能力角度进行分析,相比组合2,组合7的直通区段通过能力有所提高,即2种异质列车的速度目标值之差相等时,慢车选择较大速度目标值,可在一定程度提高直通区段通过能力。但2种异质列车速度目标值的确定还应结合2个层次轨道交通线路的功能定位、建设条件及工程造价等因素作进一步研究。

表 3 不同平均站间距下 2 种异质列车各速度目标值组合下的直通区段通过能力
Tab.3 Through-section carrying capacity of two heterogeneous trains in each target speed combination under different average station spacings

组合	慢车的速度目标 值/(km/h)	快车的速度目标 值/(km/h)	不同平均站间距 S_a 下的直通区段通过能力/(对/h)						
			$S_a=4.25$ km	$S_a=2.83$ km	$S_a=2.13$ km	$S_a=1.70$ km	$S_a=1.42$ km	$S_a=1.21$ km	$S_a=1.06$ km
组合 1	80	100	30	31	32	32	32	33	34
组合 2	80	120	27	28	29	29	30	31	32
组合 3	80	140	25	26	27	28	29	29	31
组合 4	80	160	23	26	26	27	29	29	31
组合 5	100	100	36	36	36	36	36	36	36
组合 6	100	120	32	33	33	33	33	34	34
组合 7	100	140	29	30	31	31	32	32	33
组合 8	100	160	27	29	30	31	31	32	33

5 结语

直通运营是发展都市圈轨道交通背景下提高轨道交通网络运输效率的有效途经,具备较强的研究价值,其中,直通区段通过能力是直通运营组织中应重点关注的问题。本文通过对直通区段内车站追踪间隔及通过能力进行计算,以直通区段内存在 2 种异质列车共线运行为例,研究了 2 种异质列车速度目标值选取对直通区段通过能力的影响。研究表明:2 种异质列车的速度目标值的差值不宜过大,且当慢车选择较大的速度目标值时可在一定程度提高直通区段通过能力;平均站间距是影响列车速度目标值能否得以实现的主要因素,应结合线路定位、时间目标及通过能力等因素综合确定,在满足乘客出行需求的同时,尽可能避免直通区段内站间距过大导致通过能力不足的情况。

参考文献

[1] 何肖,顾保南. 我国大陆各城市轨道交通线路旅行速度统计分析——基于中国城市轨道交通协会数据分析的研究报告之七[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 1.
HE Xiao, GU Baonan. Statistical analysis of travel speed of urban rail transit lines in China's mainland—report 7: analysis of data from China Association of Metros[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 1.
[2] 金娟,杨梅,王长林. 基于移动闭塞原理的地铁列车线路通过能力的研究[J]. 铁路计算机应用, 2008, 17(6): 7.
JIN Juan, YANG Mei, WANG Changlin. Research on carrying capacity for subway track based on principle of movable block[J].

Railway Computer Application, 2008, 17(6): 7.
[3] 毛保华. 城市轨道交通系统运营管理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2006: 171.
MAO Baohua. Operations and management for urban rail transit [M]. Beijing: China Communications Press, 2006: 171.
[4] 赵源,丁小兵,徐行方. 快慢车模式下城市轨道交通线路通过能力分析与计算方法[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(10): 16.
ZHAO Yuan, DING Xiaobing, XU Xingfang. Analysis and calculation of metro carrying capacity in express and local train mode [J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(10): 16.
[5] 王雨. 简析城市轨道交通工程速度目标值选择[J]. 铁路通信信号工程技术, 2019, 16(2): 64.
WANG Yu. Analysis of speed target value selection in urban rail transit project[J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2019, 16(2): 64.
[6] 徐瑞华,陈菁菁,杜世敏. 城轨交通多种列车交路模式下的通过能力和车底运用研究[J]. 铁道学报, 2005, 7(4): 6.
XU Ruihua, CHEN Jingjing, DU Shimin. Study on carrying capacity and use of rolling stock with multi-routing in urban rail transit[J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 7(4): 6.
[7] 中国铁道学会. 市域铁路设计规范: T/CRS C0101—2017[S]. 北京: 中国铁道出版社, 2017: 1.
China Railway Society. Code for design of suburban railway: T/CRS C0101—2017 [S]. Beijing: China Railway Publishing House, 2017: 1.
[8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2013.

(收稿日期: 2020-10-30)