

基于扣除系数的快慢车模式下线路通过能力计算

郑翔¹ 李晨林^{2*} 徐行方³

(1. 广州地铁设计研究院股份有限公司, 510030, 广州; 2. 中铁第一勘察设计院集团有限公司, 710043, 西安;

3. 同济大学交通运输工程学院//第一作者, 高级工程师)

摘要 快慢车组合运行可以较好地适应市郊线路客流在时空分布上的不均衡性。为研究快慢车模式下各因素对通过能力的影响机理, 结合快慢车模式运输组织的自身特点以及扣除系数法的思想本质, 定量给出了不同条件下各因素对通过能力的扣除系数取值, 提出了基于扣除系数的快慢车模式下的市郊线路通过能力计算方法。以上海轨道交通 16 号线为例, 对不同越行次数、越行地点和停站地点等因素下的通过能力进行了计算分析。

关键词 市郊线路; 快慢车模式; 扣除系数法; 通过能力

中图分类号 U292.5

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2022.01.008

Calculation of Line Passing Capacity under Express/Local Mode Based on Removal Coefficient

ZHENG Xiang, LI Chenlin, XU Xingfang

Abstract The combined operation of express/local trains can better adapt to the unbalanced spatial-temporal distribution of passenger flow on suburban lines. In order to study the mechanism of various factors influencing the passing capacity under express/local mode, considering the characteristics of express/local mode transport organization and the ideological essence of removal coefficient method, the removal coefficient value of each factor of the passing capacity in different conditions under express/local mode are quantitatively presented. A calculating method of suburban line passing capacity under express/local mode based on removal coefficient is proposed. Taking Shanghai Rail Transit Line 16 as an example, the passing capacity with factors including different quantities and locations of overtaking is calculated.

Key words suburban line; express/local mode; removal coefficient method; passing capacity

First-author's address Guangzhou Metro Design & Research Institute Co., Ltd., 510030, Guangzhou, China

随着中心城区与郊区间客流的日益增多以及

客流出行分布特征上的差异, 给线路的运输组织带来了新的挑战。采用快慢车模式可以较好地适应客流在时空分布上的不均衡性, 提升客运服务质量。快慢车模式下的线路通过能力计算相对复杂, 越行站位置、越行次数和停站时间等对通过能力都有一定程度的影响, 因此有必要对快慢车模式下的线路通过能力计算方法进行深入研究。本文拟采用扣除系数法定量给出不同条件下各因素对通过能力的扣除系数取值, 并结合实例进行计算, 为快慢车模式下的线路通过能力计算提供借鉴。

1 快慢车模式下的线路通过能力计算特点分析

1.1 市郊线路与高铁通过能力计算的区别

由于运输组织模式的不同, 快慢车模式下的线路通过能力计算与高速铁路主要存在以下 3 点区别。

1) 基本列车不同。高速铁路的基本列车为高速不停站列车, 而快慢车模式下的基本列车为站站停慢车, 非基本列车停站产生的影响有所不同。如图 1 a) 所示, 若后行列车为高速不停站列车, 则前车的停站可能会对其造成影响, 运行线需要后移;

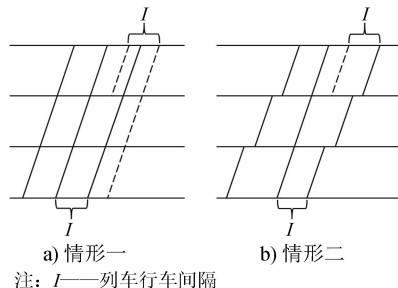


图 1 停站对后行不同基本列车的影响

Fig. 1 Influence of station-stopping on different following basic trains

如图1b)所示,若后行列车为站站停慢车,则前车的停站可能不会对后续列车造成影响。

2) 列车区间运行时分不同。列车旅行时间差会影响通过能力,高速铁路采用的是多种速度等级列车共线运行的运输组织模式,不同速度等级列车在同一区间的运行时分不同。但市郊线路快车和慢车在同一区间的运行时分相同,两者的旅行时间差主要为列车停站时间。

3) 对冗余时间的要求不同。由于高铁列车具有固定车次和时间,为了满足列车正点率的要求,以及满足跨线列车的运营要求,列车间需要设置一定的冗余时间。而快慢车模式下,旅客随到随乘,且无跨线列车,因此对冗余时间的要求没有高铁的高。

1.2 扣除系数法适用性分析

扣除系数法是我国铁路长期以来计算通过能力的一种方法,在实践中取得了良好效果,其基本思想基于3个假设:运行图平图特性强、紧密铺画和非基本列车数量少^[3]。

可以将快慢车模式下的列车运行图看成是在站站停列车中加开快车,即以平行运行图为基础;一般以周期形式铺画,列车运行方案规律性强,列车运行图上的时间能被充分利用,能够实现紧密铺画;在一个周期内快慢车一般以一定比例开行,快车数量少于慢车。因此,采用扣除系数法研究快慢车模式下的线路通过能力计算具有合理性。

2 快慢车模式下的线路通过能力扣除系数取值研究

2.1 快车扣除系数 $\varepsilon_{\text{快}}$

快车扣除系数 $\varepsilon_{\text{快}}$ 是指开行一列快车需从平行运行图中扣除的慢车列数。在不考虑快车停站的情况下,快慢车旅行时间差只与慢车停站时间 $t_{\text{停站}}$ 及起停附加时分 $t_{\text{起}}$ 和 $t_{\text{停}}$ 有关。设快车不停站通过一次比慢车节约的时间为 $t_{\text{节}}$,则有:

$$t_{\text{节}} = t_{\text{停站}} + t_{\text{起}} + t_{\text{停}} \quad (1)$$

为便于计算与分析,本文用 $t_{\text{节}}$ 代替运行图中慢车的停站时间,此时,快慢车运行线相互平行,并假设:①各项最小行车间隔时间均为 I ;②每次越行时,慢车停站时间为 $I+I$;③ $t_{\text{节}}$ 取值为 $0 \sim I$ 之间;④慢车停站时间固定;⑤运行图紧密铺画。

以下分别研究 k 个中间站,不考虑越行和越行1~2次情况下 $\varepsilon_{\text{快}}$ 的取值方法。

2.1.1 不考虑越行情况下的 $\varepsilon_{\text{快}}$ 取值方法

图2为快慢车模式下不考虑越行情况的列车运行图。

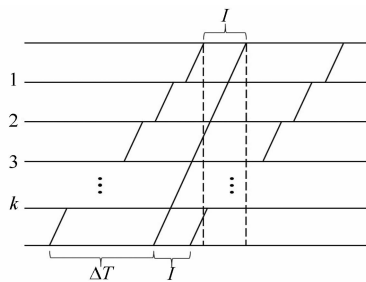


图2 快慢车模式下不考虑越行情况的列车运行图

Fig. 2 Diagram of train operation without considering overtaking under express/local mode

如图2所示,当在平行运行图中插入1列不停站、无越行快车时,由其引起的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = t_{\text{慢}} + I - t_{\text{快}} = t_{\text{差}} + I = kt_{\text{节}} + I \quad (2)$$

式中:

$t_{\text{快}}, t_{\text{慢}}$ ——分别为快慢车旅行时间;

$t_{\text{差}}$ ——快慢车旅行时间之差。

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = 1 + kt_{\text{节}} / I \quad (3)$$

而若有 m 列快车成组追踪运行,则由其引起的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = t_{\text{慢}} + I + (m - 1)I - t_{\text{快}} \quad (4)$$

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / mI = 1 + kt_{\text{节}} / mI \quad (5)$$

2.1.2 越行1次情况下的 $\varepsilon_{\text{快}}$ 取值方法

设快车在中间站 i 越行,其中 $i=1, 2, \dots, k$ 。经分析,运行线是否满足要求的关键在于起始站以及 i 站的列车时间间隔是否满足 I 的约束,这取决于 i 站与起始站之间共 $k-i+1$ 个 $t_{\text{节}}$ 的总和,以下根据 $t_{\text{节}}$ 的取值分两种情况进行讨论。

1) 第一种情况—— $0 < t_{\text{节}} \leq I / (k-i+1)$ 时:快慢车模式下越行1次时第一种情况的列车运行图如图3所示。

此时,若第2列慢车按起始站发车间隔 I 来铺画,会导致越行点 i 站的发车间隔不足 I 。合理的铺画方式是从 i 站倒推,如图3所示。开行快车造成的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = \Delta T^* + [I - (k - i + 1)t_{\text{节}}] \quad (6)$$

式中:

ΔT ——慢车与越行快车在越行站的发车间隔。

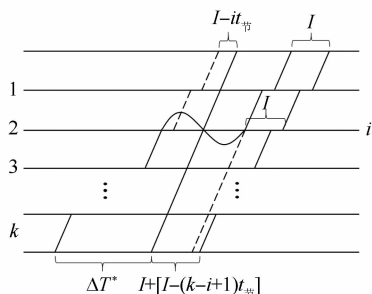


图3 快慢车模式下越行1次时第一种情况的列车运行图
Fig. 3 Diagram of train operation in the first case when overtaking once under express/local mode

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = 2 - t_{\text{节}} / I \quad (7)$$

2) 第二种情况—— $I / (k - i + 1) < t_{\text{节}} < I$ 时: 快慢车模式下越行1次时第二种情况的列车运行图如图4所示。

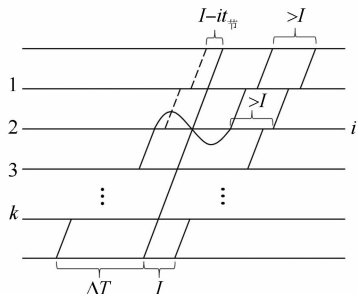


图4 快慢车模式下越行1次时第二种情况的列车运行图
Fig. 4 Diagram of train operation in the second case when overtaking once under express/local mode

同理,此种情况下合理的铺画方式是按起始站发车间隔 I 紧密铺画,如图4所示。开行快车造成的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = t_{\text{慢}} + (I - it_{\text{节}}) - t_{\text{快}} \quad (8)$$

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = 1 + (k - i) t_{\text{节}} / I \quad (9)$$

2.1.3 越行2次情况下的 $\varepsilon_{\text{快}}$ 取值方法

设快车分别在在中间站 i 和 j 越行,越行1次与2次的区别在于:前者快慢车之间无其他列车发出;而后者如图5所示,慢车1与快车之间还有慢车2,因此需保证慢车1与慢车2的行车间隔满足要求。

经分析,慢车1与慢车2在 j 站之前的时间间隔为 $(j - i) t_{\text{节}}$,则有:

$$I / (j - i) \leq t_{\text{节}} < I \quad (10)$$

接下来应关注慢车3运行线的铺画,设慢车3与慢车2在 j 站的时间间隔为 I_j ,则慢车3与快车在

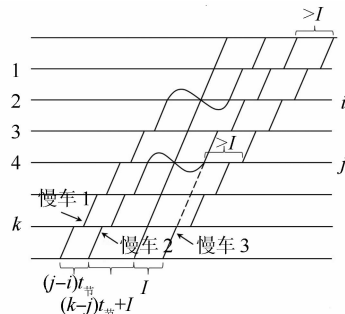


图5 快慢车模式下越行2次时第一种情况的列车运行图
Fig. 5 Diagram of train operation in the first case when overtaking twice under express/local mode

始发站的时间间隔为 $I + [I_j - (k - j + 1) t_{\text{节}}]$ 。

1) 当 $k - j + 1 \geq j - i$ 时,在 $I / (j - i) \leq t_{\text{节}} < I$ 的前提下:

$$(k - j + 1) t_{\text{节}} \geq I \quad (11)$$

因此,此种情况下应按照两者在始发站的发车间隔 I 紧密铺画,如图5所示。此时,开行1列快车造成的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = 2I + (j - i) t_{\text{节}} + (k - j) t_{\text{节}} - 2I \quad (12)$$

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = (k - i) t_{\text{节}} / I \quad (13)$$

2) 当 $k - j + 1 < j - i$ 时,由于 $k - j + 1 \geq 1$,则有:

$$I / (j - i) < I / (k - j + 1) \leq I \quad (14)$$

以下进行分类讨论:

当 $I / (j - i) \leq t_{\text{节}} < I / (k - j + 1)$ 时,此时,应保证慢车3与慢车2在 j 站的时间间隔为 I ,如图6所示。

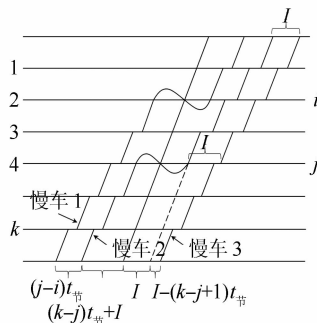


图6 快慢车模式下越行2次时第二种情况的列车运行图
Fig. 6 Diagram of train operation in the second case when overtaking twice under express/local mode

开行一列快车造成的额外占用时间 ΔT 为:

$$\Delta T = (k - i) t_{\text{节}} + [I - (k - j + 1) t_{\text{节}}] \quad (15)$$

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = 1 + (j - i - 1) t_{\text{节}} / I \quad (16)$$

当 $I / (k - j + 1) \leq t_{\text{节}} < I$ 时,此情况与图5一样,

$\varepsilon_{\text{快}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{快}} = \Delta T / I = (k - i) t_{\text{节}} / I \tag{17}$$

虽然本文只分析了越行 0~2 次情况,但对于更多越行次数,该方法同样适用,只需明确运行图紧密铺画的制约点,并在不同的 $t_{\text{节}}$ 取值范围下确定快车额外占用时间。

2.2 停站扣除系数 $\varepsilon_{\text{停}}$

停站扣除系数 $\varepsilon_{\text{停}}$ 是指快车每停站一次需从原有平行运行图中扣除的慢车列数。由于基本列车不同,快慢车模式下快车停站的影响主要取决于其停站地点和停站时间。图 7 为快慢车模式下的快车停站影响示意图。

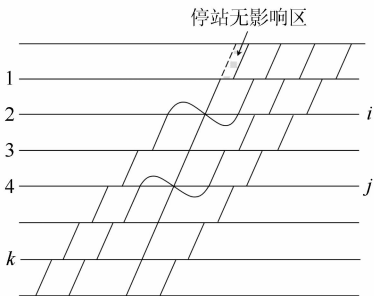


图 7 快慢车模式下的快车停站影响示意图
Fig. 7 Schematic diagram of the impact of express train stopping format under express/local mode

如图 7 所示,若快车在 2 至 k 站中某一站停站时间为 $t_{\text{快,停站}}$,则运行线往后平移了 $t_{\text{快,停站}} + t_{\text{起}} + t_{\text{停}}$ 。由于原先越行点 i 站和 j 站的通发间隔均为 I ,为了满足快车停站的需要,后续列车运行线均需往后平移 $t_{\text{快,停站}} + t_{\text{起}} + t_{\text{停}}$ 。则该次停站的 $\varepsilon_{\text{停}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{停}} = (t_{\text{快,停站}} + t_{\text{起}} + t_{\text{停}}) / I \tag{18}$$

若快车选择在 1 站停站,由于后行慢车也在 1 站停站,则快车在一定停站时间范围内不会影响后续列车。将该时间范围定义为停站无影响区。此时 $\varepsilon_{\text{停}}$ 取值为:

$$\varepsilon_{\text{停}} = \begin{cases} 0, & 0 \leq t_{\text{快,停站}} \leq t_{\text{停站}} \\ (t_{\text{快,停站}} - t_{\text{停站}}) / I, & t_{\text{快,停站}} > t_{\text{停站}} \end{cases} \tag{19}$$

由此可见,快车停站扣除系数的取值需要结合停站地点和停站时间具体确定。

2.3 基于扣除系数的通过能力计算方法

根据前文对 $\varepsilon_{\text{快}}$ 和 $\varepsilon_{\text{停}}$ 两种扣除系数取值的研究,提出基于扣除系数的快慢车模式下的线路通过能力计算方法,步骤如下:

1) 确定某条市郊线路列车最小行车间隔时间

I ,计算平图最大通过能力 N :

$$N = 3\,600 / I (\text{列} / \text{h}) \tag{20}$$

2) 设 1 h 内成组开行的快车列车数为 n ,不成组开行的快车列车数为 m ,结合每列快车的越行特点,先不考虑快车停站,计算两种类型快车的扣除系数 $\varepsilon_{\text{快}}$,得到不考虑快车停站时线路最大通过能力 N_1 :

$$N_1 = N - \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{\text{快}i} - 1) - \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{\text{快}j} - 1) \tag{21}$$

3) 考虑快车停站情况,设共停站 p 次,分析每次停站特点并计算其扣除系数,最后计算考虑停站时线路最大通过能力 N_2 :

$$N_2 = N - \sum_{i=1}^m (\varepsilon_{\text{快}i} - 1) - \sum_{j=1}^n (\varepsilon_{\text{快}j} - 1) - \sum_{k=1}^p \varepsilon_{\text{停}k} \tag{22}$$

3 上海轨道交通 16 号线通过能力计算

3.1 16 号线概况及相关计算参数

16 号线北起龙阳路站,南至滴水湖站,全线设有 13 座车站,分别在惠南东站、野生动物园站和航头东站设置了越行线。16 号线目前采用快车大站停、慢车站站停的运行方案,其中快车全程共停靠 6 站。与通过能力计算有关的参数取值如表 1 所示。

表 1 上海轨道交通 16 号线通过能力计算相关参数
Tab.1 Relevant parameters of Shanghai Rail Transit Line 16 passing capacity calculation

参数	取值
列车最小行车间隔时间 (含追踪、到到、发发、到通和通发等间隔)	3 min
慢车停站时间	30 s
起车附加时分	10 s
停车附加时分	10 s

注:到到间隔——前后两列车到达同一车站的最小间隔时间;发发间隔——前后两列车从同一车站发出的最小间隔时间;到通间隔——前一趟慢车到达车站至后一趟快车通过该站时的最小间隔时间;通发间隔——前一趟快车通过车站至后一趟慢车从该站发出的最小间隔时间。

3.2 通过能力计算分析

为分析越行次数、越行地点、停站地点和停站时间等因素对通过能力的影响,设定了 9 种运行方案进行比较。为了计算分析方便,本文设定每一种运行方案下非成组快车的越行特点是相同的,该方法同样适用于计算不同越行和停站特点下的通过能力。

以滴水湖至龙阳路方向为例,11 种不同运行方案下通过能力计算结果如表 2 所示。

表 2 上海轨道交通 16 号线不同运行方案的通过能力计算分析表

Tab. 2 Analysis of passing capacity in different operation schemes of Shanghai Rail Transit Line 16

方案编号	单独开行 快车数/列	成组开行 快车数/列	越行 次数/次	越行地点	停站地点	停站时间/s	$\varepsilon_{快1}$	$\varepsilon_{快2}$	$\varepsilon_{停}$	通过能力 (列/h)
①	0	0	0				0	0	0	20.00
②	3	0	0				4.06	0	0	10.82
③	1	2	0				4.06	2.53	0	13.88
④	3	0	1	航头东站			2.67	0	0	14.99
⑤	3	0	1	野生动物园站			2.11	0	0	16.67
⑥	3	0	1	惠南东站			1.72	0	0	17.84
⑦	3	0	2	航头东站、惠南东站			1.83	0	0	17.51
⑧	3	0	2	航头东站、野生动物园站			1.67	0	0	17.99
⑨	3	0	2	惠南东站、野生动物园站			1.11	0	0	19.67
⑩	3	0	1	航头东站	新场站	45	2.67	0	0.36	13.91
⑪	3	0	1	航头东站	罗山路站	45	2.67	0	0	14.99

通过对表 2 的分析,可以得到以下 6 点结论:

1) 开行无越行、不成组快车对线路通过能力影响最大。每开行 1 列无越行、不成组快车会从平图中扣除 4.06 列慢车,此扣除系数最大。若每小时开行 3 列不成组快车,线路通过能力仅约为平图通过能力的一半。

2) 组织快车成组运行可有效提高线路通过能力。对比方案②和③,在开行快车数量相同的情况下,组织 2 列快车成组运行可以使线路通过能力增加 3.06 列/h,同时其扣除系数相对于不成组时减小了 1.53。

3) 组织快车越行可有效提高线路通过能力。对比方案②、④、⑤、⑥和⑦,在快车越行 1 次和 2 次时,线路通过能力相对无越行时增加显著,最多可增加 7.02 列/h。

4) 相对于越行 1 次,越行 2 次总体上能提高线路通过能力。但方案⑥和⑦为例外,这主要与各项计算参数取值有关。

5) 快车在不同地点停站会对通过能力造成不同程度的影响。对比方案⑧和⑨,若安排快车在新场站停站 45 s,会产生停站扣除系数 0.36,这使得通过能力降低 1.08 列/h;而若安排在罗山路站停站 45 s,则不会对通过能力产生影响。

6) 对比方案④、⑤、⑥、⑦、⑧和⑨,不考虑快车停站,当快车在惠南东站和野生动物园站越行时的快车扣除系数最小,为 1.11,此种方案下的线路通过能力损失最小。

4 结语

通过对快车扣除系数和停站扣除系数的研究,提出了快慢车模式下基于扣除系数的线路通过能

力计算方法,并结合上海轨道交通 16 号线实例进行了通过能力的分析计算。计算结果表明,快车是否成组、越行次数和越行地点等会对快车扣除系数取值产生不同程度的影响,停站扣除系数会因停站地点和停站时间的变化而不同,两者共同影响线路通过能力。因此,在考虑采用快慢车组合开行方式的同时,应综合考虑各因素对线路通过能力的影响,结合工程实际和客流需求,采取最优的快慢车开行方式。

参考文献

[1] 倪少权,左大杰,王慈光. 高速铁路越行站分布对通过能力的影响[J]. 中国铁道科学,2005(3):7.
NI Shaoquan, ZUO Dajie, WANG Ciguang. Influence on the carrying capacity of overtaking station distribution of high-speed railway[J]. China Railway Science, 2005(3):7.

[2] 陈福贵,汤珏. 地铁快慢车模式系统能力损失原则研究[J]. 铁道工程学报,2014(12):96.
CHEN Fugui, TANG Jue. Research on the principle of system capacity loss in the mode of express/slow urban rail transit[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014(12):96.

[3] 张守帅,田长海,闫海峰. 扣除系数法在高速铁路通过能力计算中的适应性[J]. 交通运输系统工程与信息, 2017(2):148.
ZHANG Shoushuai, TIAN Changhai, YAN Haifeng. Adaptability of the removal coefficient method in calculation method of high-speed railway's passing capability[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2017(2):148.

[4] 吕苗苗,倪少权,陈钉均. 高速铁路通过能力计算方法研究[J]. 交通运输工程与信息学报,2016(1):19.
LYU Miaomiao, NI Shaoquan, CHEN Dingjun. High-speed railway carrying capacity calculation method[J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2016(1):19.