

文章编号:1006-2106(2014)12-0096-05

地铁快慢车模式系统能力损失原则研究^{*}

陈福贵 汤 珏^{**}

(中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031)

摘要:研究目的:随着城市轨道交通线网骨干线建成,需要向外围组团或卫星城建立快速联系通道,快慢车组合运营模式逐渐在轨道交通市域线中开始研究、运用。组织快慢车混合运行能充分发挥轨道交通的经济效益,其运输能力也可得到有效利用。但快慢车组合运营模式的缺点是运营组织复杂,一定程度降低了系统能力,因此本文将重点分析快慢车模式下系统能力的损失问题。

研究结论:通过研究,得出以下结论:(1)快车不停站所节约的时间可取 1 min(含慢车停站时间),即快车每通过 1 个站,相比慢车节约 1 min;(2)在传统平行成对的运行图基础上,提出快慢车组合运营对系统能力损失的影响公式;(3)本研究成果可以为今后城市轨道交通越行方案研究和实施提供参考。

关键词:城市轨道交通;行车组织;快慢车模式;系统能力损失

中图分类号:U292 文献标识码:A

Research on the Principle of System Capacity Loss in the Mode of Express/ Slow Urban Rail Transit

CHEN Fu-gui, TANG Jue

(China Railway Eryuan Engineering Group Co. Ltd, Chengdu, Sichuan 610031, China)

Abstract: **Research purposes:** As urban rail transit network backbone lines were constructed, the peripheral group or satellite city construction fast channel now were demanded, and the express/slow train organization mode gradually began to be studied and applied in the urban rail transit. This kind of train organization mode can give full play to the economic benefits of rail transit, and also the transport capacity can also be used efficiently. But the express/slow train organization mode is complex, it would reduce the system capability to a certain extent, so it is necessary to analyze the system capability loss problem.

Research conclusions: Through the research, this paper draws the following conclusions: (1) The express train which does not stop at station, will save time about 1 min (including idle stop time); (2) In the run chart based on traditional parallel paired, this paper put forward the express/slow train operation effect on system capacity loss formula; (3) The research results can provide the reference for research and implementation for city rail transit line scheme in future.

Key words: urban rail transit; train organization; express/slow train organization; system capacity loss

目前轨道交通的运营模式主要有两种,一种是站站停的普通运营模式,这也是城市轨道交通普遍采用的模式;另一种是快慢车组合运营模式,快车与站站停列车(以下简称慢车)组合的越站运行模式,这种模式

在国铁中广泛采用,但在我国城市轨道交通中运用较少。随着城市轨道交通线网骨干线建成,需要向外围组团或卫星城建立快速联系通道,快慢车运营模式逐渐在轨道交通市域线中开始研究、运用。

^{*} 收稿日期:2014-02-01

基金项目:中铁二院工程集团有限责任公司 2013 年司控科研项目[院计划 13164137(13-15)]

^{**} 作者简介:陈福贵,1981 年出生,男,工程师;汤珏,1984 年出生,男,工程师。

快慢车组合运营模式,慢车在全线各站点均有停靠,主要服务于沿线各站点乘客的上下要求;快车则是在重要站点停靠,主要是解决大组团间的长运距乘客的快速出行需求,通过不停车过站以提高过站速度和减少停站时间来实现快速的目的。不仅节约了乘客个人的出行时间和出行成本,对社会而言,也将创造大量的社会效益。因此,组织快慢车混合运行能充分发挥轨道交通的经济效益,其运输能力也可得到有效利用。但快慢车组合运营模式的缺点是运营组织复杂,一定程度降低了系统能力,同时也增加了慢车乘客的旅行时间。本文重点探讨分析快慢车模式下系统能力的损失问题。

1 快车不停站节约时间

1.1 快车不停站节约时间测算

在假设快慢车均采用同一种车型的前提下,快车由于不停站以一定的限速(通常为 55~60 km/h)通过站台,相比慢车停站所节约的时间,可以分解为三部分:

一是,慢车从高速制动进站与快车限速过站的时间差,可称为“制动时间差”;

二是,慢车停站与快车不停站的时间差,即慢车的停站时间;

三是,慢车启动出站与快车限速过站的时间差,可称为“启动时间差”。

由此可以有以下定义:

$$t_{\text{节约}} = t_{\text{制动}} + t_{\text{启动}} + t_{\text{停站}} \tag{1}$$

式中 $t_{\text{节约}}$ ——快车不停站所节约的时间;

$t_{\text{制动}}$ ——制动时间差;

$t_{\text{启动}}$ ——启动时间差;

$t_{\text{停站}}$ ——慢车的停站时间。

快慢车过同一车站的速度曲线($V-S$)示意如图 1 所示。

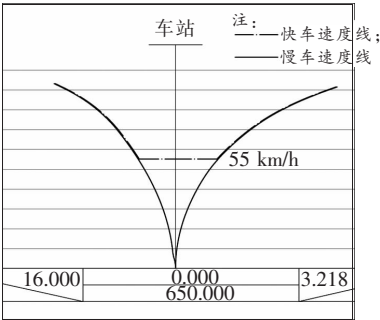


图 1 快车过站与慢车停站的速度曲线($V-S$)示意图

通常而言,快车在车站范围的速度曲线与慢车有

所区别,其余部分速度曲线应该基本一样,因此,可以通过对各种车型、不同站间距的列车模拟牵引计算,归纳出快、慢车的“制动时间差”和“启动时间差”。

根据不同的最高速度列车,以站间距分别为 1 000 m、1 500 m…4 000 m,每 500 m 递增,分别对快、慢车做牵引计算,列车限速过站(55 km/h)与列车停站所引起的区间运行时间差统计如表 1~表 4 所示,其中广州地铁 2 号线车辆的平均时间差为 13 s,深圳地铁 3 号线车辆的平均时间差约 18 s,深圳地铁 11 号线车辆的平均时间差约 17 s,香港机场线车辆的平均时间差约 16 s。

表 1 广州地铁 2 号线 80 km/h

站间距/m	慢车/s	快车/s	时间差/s
1 000	73	59.4	13.6
1 500	94	81.5	12.5
2 000	120	107.1	12.9
2 500	142	129.6	12.4
3 000	168	154.8	13.2
3 500	191	178.0	13.0
4 000	216	203.3	12.7

表 2 深圳地铁 3 号线 100 km/h

站间距/m	慢车/s	快车/s	时间差/s
1 000	77	59.0	18.0
1 500	94	75.6	18.4
2 000	112	94.1	17.9
2 500	132	113.5	18.5
3 000	151	132.8	18.2
3 500	169	151.0	18.0
4 000	189	171.0	18.0

表 3 深圳地铁 11 号线 120 km/h

站间距/m	慢车/s	快车/s	时间差/s
1 000	74	58.6	15.4
1 500	90	73.4	16.6
2 000	106	89.1	16.9
2 500	121	104.2	16.8
3 000	137	119.5	17.5
3 500	153	135.8	17.3
4 000	168	151.1	16.9

表 4 香港机场线 140 km/h

站间距/m	慢车/s	快车/s	时间差/s
1 000	76	60.9	15.1
1 500	93	77.5	15.5
2 000	110	93.8	16.3
2 500	125	109.5	15.5
3 000	141	125.5	15.5
3 500	156	139.9	16.1
4 000	171	154.6	16.4

通过牵引计算可以看出,各种车型在不同的站间距条件下,快车所节约的“制动时间差”与“启动时间差”合计约为 15~20 s。

考虑在城市轨道交通中,快车选取的越行车站客流量不大,慢车的平均停站时间可按 30 s 计。以上合计快车不停站节约时间 45~50 s。

可见,若慢车停站时间固定,快车不停站所节约的总时间也相对固定,只与车辆本身性能、过站限速有关,可基本忽略线路条件差异。

1.2 提高列车过站速度的必要性和可行性分析

由于快车限速过站不仅降低了快车通过效率,同时通过列车模拟实验表明,限速过站相比高速通过,列车起制动需要产生额外的能耗,提高过站速度可以有效节约列车能耗,因此在快慢车组合模式下提高列车过站速度是十分必要的。

目前国内地铁设计规范中,考虑了列车停站工况与车站站台边缘缝隙不宜过大的要求,通常情况下进站列车车头进入站台端部的速度与出站列车启动加速至列车车尾离开站台端部的速度在 55~60 km/h(与列车长度有关)之间,故以 55~60 km/h 作为列车过站速度限制。

如果想进一步提高快车过站速度,需针对国内各类型地铁车辆不同故障状况下的设备限界做进一步的资料调查和理论分析研究,以确保列车通过站台区域

的安全性。

经过列车模拟牵引计算,列车过站速度由 55 km/h 提高至 80 km/h 后,快车越站一次可以进一步节约 10 s 左右;且列车能耗也可以进一步节约,例如平均站间距 2.0 km 的区间高速过站可以节约列车能耗 10%。

因此,结合 1.1 节研究成果,在快慢车组合的运营模式中,快车不停站所节约的总时间可按 1 min 取值,以此作为快慢车系统能力损失的研究前提条件。

2 系统能力损失原则研究

2.1 以慢车为主的模式

该模式是以开行慢车为主,根据长途直达或点对点客流情况,适当加开部分快车的运营模式。由于快车的速度线斜率较大,因此,在保证一定发车密度的情况下,快车将会超越前面的慢车,发生越行的站点需要设置待避线。

图 2 为慢车中加开快车示意图,在传统站站停运行图中加入 1 对快车,快车不能在连续 2 个车站越行相邻的慢车。原因如下:若慢车在连续的车站被越行,由于前小节所述快、慢车在各区间的速度斜率相差很小,将导致前后慢车到发间隔过短(如图中圆圈所示),即小于列车最小车站追踪间隔。

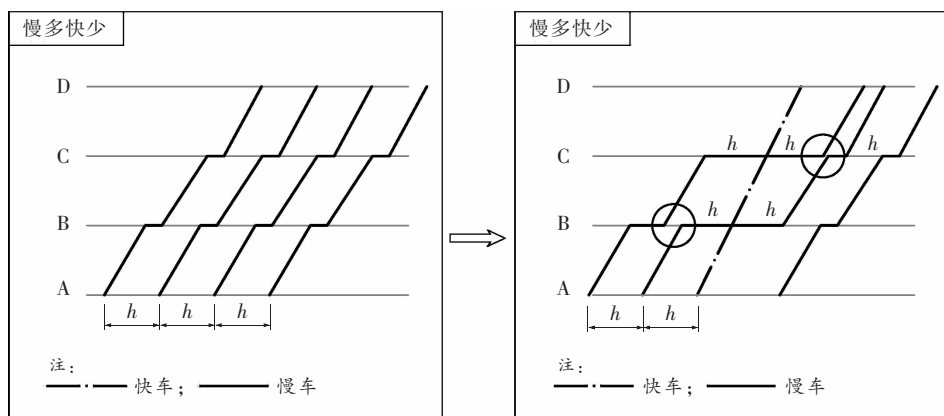


图 2 慢车中加开快车示意图 1

因此,应确保前后慢车不在相邻的车站被越行,如图 3 所示。

发生越行时,由前慢后快的发车间隔变成了前快后慢,挤占了第二列慢车的发车间隔。如图 3 所示,假定 h 是系统最小行车间隔,增加 1 列快车后,到达 D 站时,由原来运行图上的 $3h$ 的间隔增加为 $3h + t_{\text{节约}}$,系统的能力损失即为 $t_{\text{节约}}$ 。且每增加 1 对快车,这个

能力损失时间也同样增加 $t_{\text{节约}}$ 。由此可以得到以下系统能力的建议计算公式:

$$N = \frac{60 - n_{\text{快}} \times t_{\text{节约}}}{h} \quad (\text{对/h}) \quad (2)$$

式中 h ——最小行车间隔(min);

$t_{\text{节约}}$ ——快车不停站所节约的时间(min);

$n_{\text{快}}$ ——快车开行对数(对/h)。

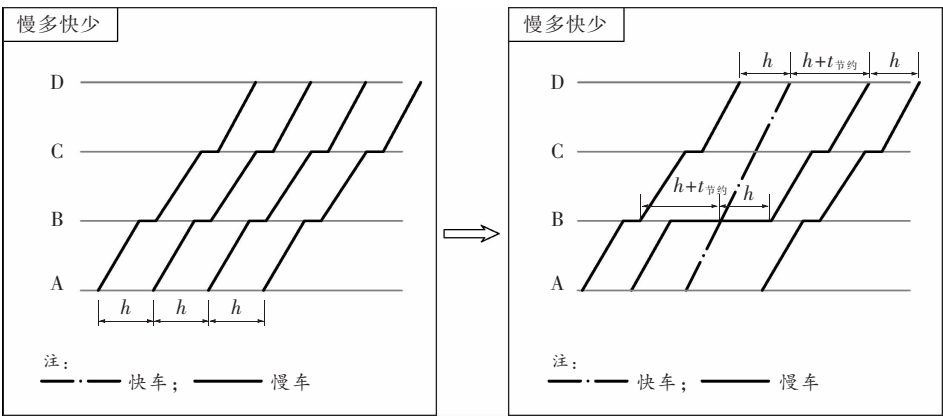


图 3 慢车中加开快车示意图 2

按上述系统能力的建议计算公式,当最小行车间隔为 2 min, $n_{\text{快}} = 12$ 对/h 时,系统最大开行对数为 24 对/h,此时快慢车比例为 12 对/h:12 对/h。

2.2 以快车为主的模式

该模式是以开行点对点的快车为主,为了增加轨道交通覆盖和客流培育,适当加开部分慢车的运营模式,应用范围相对较小。

图 4 为快车中加开慢车示意图,以快车运行图为基础,若加入 1 对慢车,则慢车之后的所有快车的发车间隔由原来的 h 至少变成 $2h$,且慢车在每个站均被越行 1 次,即所有中间站均设越行线。例如:当 $h = 2$ min,则快车最多开行 15 对/h,慢车为 7.5 对/h,快慢车的比例为 2 : 1,系统能力为 22.5 对/h(车站数足够多,且慢车每站只被越行 1 次)。

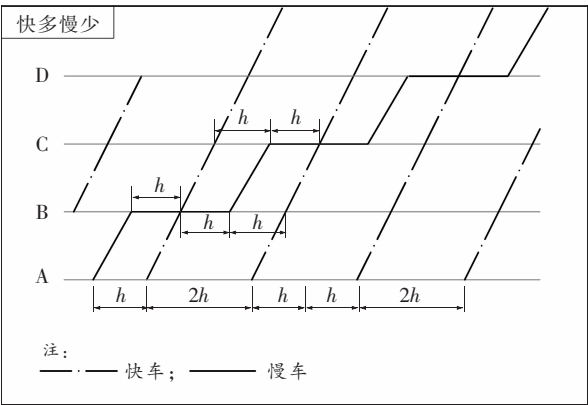


图 4 快车中加开慢车示意图(一次越行)

在快慢车比例为 2 : 1(图 4)的基础上,若要增加慢车的开行对数,需加大其中 2 列快车的发车间隔到 $2h + t_{\text{节约}}$,以保证前后慢车到、发间隔的追踪要求,慢车在 2 列大间隔的快车之间隔站被越行。当所有快车的间隔均拉开到 $2h + t_{\text{节约}}$,此时慢车之间的间隔也是

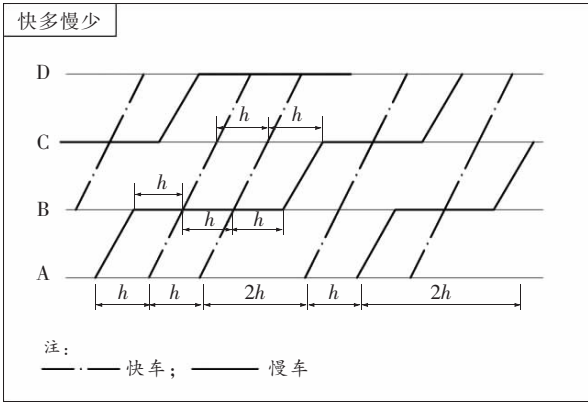


图 5 快车中加开慢车示意图(多次越行)

$2h + t_{\text{节约}}$,快慢车比例相同,与 2.1 节中以慢车为主的极限情况一样。

在快慢车比例为 2 : 1 的基础上,若要再增加快车的开行对数,则慢车在同一个站会被多次越行,如图 5 所示。可见加开 1 对快车,慢车在个别站被越行 2 次,等待时间增加 h 。

为了减少慢车停站等待时间,可以采用增设区间复线(区间增设 3 线或 4 线股道)的方式。局部增设 3 线段可在单方向节约慢车等待时间(如图 6 所示);同理,局部增设 4 线段可双向节约慢车的等待时间。

为了减少乘客的出行时间和降低土建投资,增设区间复线的一般设置原则为:

一是,为减少多数乘客的等待时间,在大客流断面的区间可增设 3 线或 4 线;

二是,为减少土建规模,在区间长度较短、工程条件好的区间可增设 3 线或 4 线。

快车连续发车,同时在局部甚至全线均设置 4 线股道,以上两项措施综合起来可以提高列车开行对数,实现以开行快车为主的运营模式。但由于地铁一般敷

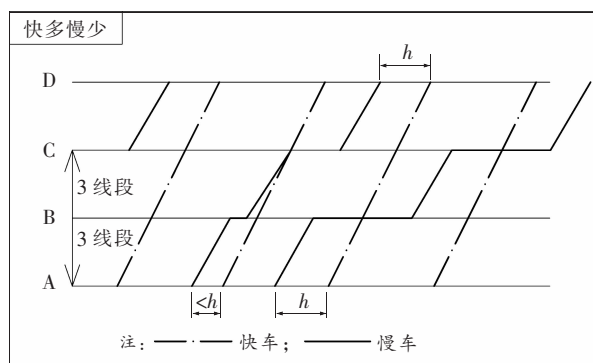


图 6 区间增设 3 线段的运行示意图

设方式为高架或地下,增设区间复线带来的投资费用增加较大,因此是否以工程代价换取时间需结合工程实际情况综合论证。

3 结论

本文通过对各种最高速度车型在不同的站间距条件下的模拟牵引计算,总结出由于快车限速过站与慢车停站的速度曲线,仅在车站范围有区别,因此,快车不停站所节约的时间与列车本身的性能、过站限速有关,而与线路条件的关系并不密切,可基本忽略线路条件的影响。经模拟测算,快车不停站所节约的时间可取 1 min(含慢车停站时间),即快车每通过 1 个站,相比慢车节约 1 min。

基于以上研究成果,本文在传统平行成对的运行图基础上,提出快慢车组合运营对系统能力损失的影响公式。在以慢车为主的运行图中,随着快车开行对数的增加,将使系统能力损失越大,该模式下系统最大开行对数为 24 对/h,此时快慢车比例为 12 对/h:12 对/h。本文同时提出以快车为主模式下的系统能力和越行点关系,考虑慢车在越行站仅被越行一次的情况下,系统能力为 22.5 对/h,此时快慢车的比例为 15 对/h:7.5 对/h,并针对该模式下慢车等候时间长及系统能力问题提出增设股道的一般原则。

通过本文的研究,可以形成快慢车组合运营的基本理论,在此基础上可以进一步研究越行点的确定原则、越行站配线方案设计、快慢车运行图铺画理论等,

形成较为完整的设计理论,希望可以为我国今后此类线路的行车组织设计及相关规范标准的制定提供参考。

参考文献:

- [1] 潘寒川,杨涛. 市域轨道交通快慢车组合运营的通行能力研究[J]. 城市轨道交通研究,2009(10):48-51.
Pan Hanchuan, Yang Tao. Express/Slow Train on Urban Rail Transit Line Based on Carrying Capacity [J]. Urban Mass Transit,2009(10):48-51.
- [2] 徐瑞华,陈普著,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(8):6-10.
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(8):6-10.
- [3] 宋键,徐瑞华,缪和平. 市域快速轨道交通线开行快慢车问题的研究[J]. 城市轨道交通研究,2006(12):23-27.
Song Jian, Xu Ruihua, Miao Heping. Problems of Operating the Express/Slow Train on the Regional Urban Rail Transit Line[J]. Urban Mass Transit,2006(12):23-27.
- [4] 徐吉庆,陈福贵,汤珏. 城市轨道交通越行方案行车组织设计[J]. 四川建筑,2012(2):75-77.
Xu Jiqing, Chen Fugui, Tang Jue. Train Organization Design of Overtaking Projects in Urban Rail Transit [J]. Sichuan Architecture,2012(2):75-77.
- [5] 王灏. 关于城市轨道交通快线发展的研究[J]. 都市轨道交通,2006(6):3-6.
Wang Hao. Development of the Urban Express Subway [J]. Urban Rapid Rail Transit,2006(6):3-6.
- [6] 胡志晖,饶雪平. 关于市域轨道交通快速功能设计的探讨——以上海市轨道交通 11 号线南段为例[J]. 交通与运输,2009(7):22-25.
Hu Zhihui, Rao Xueping. Discussion about Rapid Functional Design of Region Rail Transit - The Case of Rail Transit No. 11 of Shanghai [J]. Traffic Transportation,2009(7):22-25.

(编辑 赵立兰)