

高速铁路通过能力计算方法研究

吕苗苗^{1,2,3} 倪少权^{1,2,3} 陈钉均^{1,2,3}

1. 西南交通大学, 交通运输与物流学院, 成都 610031
2. 西南交通大学, 全国铁路列车运行图编制研发培训中心, 成都 610031
3. 综合交通运输智能化国家地方联合工程实验室, 成都 610031

摘要: 基于我国高速铁路采用不同速度等级列车混跑的运输组织模式, 提出了高速铁路通过能力计算方法, 讨论了不同等级列车越行区段选取方法及列车共用停站分组方法。在此基础上, 提出了低等级列车扣除系数与列车停站扣除系数具体取值方法, 最后计算了胶济客运专线通过能力, 对通过能力计算方法进行了验证。

关键词: 高速铁路; 通过能力; 计算方法; 胶济客运专线

中图分类号: U292.5

文献标识码: A

文章编号: 1672-4747(2016)01-0019-06

DOI: 10.3969/j.issn.1672-4747.2016.01.004

High-speed Railway Carrying

Capacity Calculation Method

LV Miao-miao^{1,2,3} NI Shao-quan^{1,2,3} CHEN Ding-jun^{1,2,3}

1. School of Transportation and Logistics, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
2. National Railway Train Diagram Research and Training Center, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China
3. National and Local Joint Engineering Laboratory of Comprehensive Intelligent Transportation, Chengdu 610031, China

收稿日期: 2015-04-27。

基金项目: 中央高校基本科研业务费青年百人计划项目(2682014BR026); 四川省科技创新苗子工程(2015044), 国家自然科学基金资助项目(61273242、61403317); 铁道部科技计划项目(2014X004-D、2015X008-B)。

作者简介: 吕苗苗(1986-), 女, 汉族, 山西太原人, 西南交通大学交通运输与物流学院讲师, 博士, 研究方向: 铁路运输组织优化。

Abstract: Based on the domestic high-speed railway transportation organization model that different speed grade trains operated on the same railroad, a high-speed railway carrying capacity calculation method was proposed. Furthermore, the selection overtaking section selection method of the different speed grade trains and the train stop grouping method were discussed. Then, the value determining method for low-grade train deduction coefficient and train stopping deduction coefficient was developed. Finally, Jiaozhou-Jinan passenger dedicated line carrying capacity was calculated. The result shows that the carrying capacity calculation method is validated.

Key words: High-speed railway; carrying capacity; calculation method; Jiaozhou-Jinan passenger dedicated line

0 引言

为合理配置铁路资源以及科学运营管理,安全、合理地组织好多种速度列车共线运行,有必要对高速铁路通过能力计算方法进行深入分析与研究。目前,国内外主要采用三种通过能力计算方法:①德国采用平均最小间隔时间法。该方法首先分析每一个区段列车的实际运行状态,然后再根据列车的晚点概率、符合一定质量要求下允许列车晚点的时间、各种列车类别的平均最小列车间隔时间、晚点列车平均进入晚点时间、给定反映列车运行工作质量要求水平的允许列车后效晚点时间总值等条件来共同确定区间通过能力的取值^[1]。最小时间间隔法可以解决对于列车种类较多、分布比较分散、平图特性不强、弹性较弱等方面的缺点,但是,这种方法在分析列车之间的越行情况时,对参数的影响比较复杂,计算也相对复杂。它必须以某同类线路或与自身相同的运输组织方式运营一段时间后,获得一定数量的样本值,计算出具有代表性的参数值后才能真正使用。我国高速铁路采用不同速度等级列车共线运行的运输组织模式,这种模式下不同速度列车产生的时差和列车停站是影响高速铁路通过能力的两个最主要因素,如果以平均最小间隔法来计算,在过程中反应不出这两个因素究竟是如何影响通过能力,所以目前该方法在实际运用时仍具有一定的局限性。②计算机模拟法。该法的主要优点是不仅具有图解的功能,还有分析计算的功能。但由于计算机铺画的可行方案一般数量都很多,在繁多的可行

方案中进行比选和优化时,比较复杂,冗余度较大,一般只能应用专家系统方法或借助人机对话的方式来寻求近似最优解或者满意解^[2]。③扣除系数法。扣除系数法在我国高速铁路普遍采用,其最初应用于以货物列车运行为主的单线半自动闭塞区段,后经研究逐步推广到双线自动闭塞区段。但随着铁路运输的不断发展,若要使用扣除系数法计算高速铁路的通过能力,需要对扣除系数法的适用范围进行分析并对原有方法进行改进。因扣除系数法适应性强,有较完备的理论基础和实践经验,鉴于此,论文以扣除系数法为基础,充分考虑高速铁路列车组成、运输组织形式及运行图特征,寻找适用于高速铁路通过能力的计算方法。

1 高速铁路通过能力计算方法研究

目前,我国高速铁路采用不同速度等级旅客列车共线运营的运输组织模式^[3,4],而且服务质量要求较高,传统以货物列车为基准的通过能力计算方法显然不适用于高速铁路,应深入研究与高速铁路运营特点相适应的通过能力计算方法。

1.1 高速铁路平行运行图通过能力

如不考虑一切外在因素,只要有时间列车就可以运行,但全日内有些时间段不能被利用,因此,高速铁路平行运行图通过能力应为全日最大通过列车列数或对数减去一日内不能被有效利用时间内所能通过的列车列数或对数,如下式所示:

$$N = \frac{1440}{I} - \frac{T_w}{I} - \frac{60S}{V_{高}I} - \frac{T_f}{I} \quad (1)$$

式中， N 表示平行运行图通过能力； T_w 表示维修天窗时间（min）； I 表示高速铁路列车最小追踪间隔时间（min）； S 表示高速铁路客运区段长度（km）； $V_{高}$ 表示高等级高速列车在区段内平均运行速度（km/h）， T_f 表示由于受到高速列车有效到发时间的限制，除天窗和“三角区”外，在运行图中不能被利用的无效时间段（min）。

公式由四部分组成，第一部分为一日内可以铺画的高等级高速列车列数或对数；第二部分为天窗时间内可以铺画的高等级高速列车列数或对数；第三部分为由于天窗造成的空费“三角区”内所能铺画的高等级高速列车列数或对数；第四部分为由于受到高速列车有效到发时间的限制，一日内除天窗和“三角区”外，列车运行图中不能利用的无效时间段内所能铺画的高等级高速列车列数或对数。

1.2 多种速度列车共线运输组织模式下的通过能力

在多种速度列车共线运输组织模式下，列车的停站与不同等级列车间的速差导致高速铁路运行图为非平行运行图。因此，计算多种速度列车共线运输组织模式下高速铁路通过能力时，需从平行运行图能力中扣除由于列车停站、列车速差所造成的能力损失：

$$N_{混} = N - n_{停}\epsilon_{停} - n_{低}\epsilon_{低} + n_{低} \quad (2)$$

式中： $N_{混}$ 表示多种速度列车共线运行条件下的通过能力（对）； $\epsilon_{停}$ 表示高速列车停站一次需从平行运行图中扣除的不停站高等级列车列数或对数； $n_{停}$ 表示高速铁路运行图中单方向高速列车停站的平均次数； $\epsilon_{低}$ 表示铺画一列或一对低等级高速列车，由于速差需从平行运行图中扣除的不停站高等级列车列数或对数； $n_{低}$ 表示列车运行图中低等级高速列车列数或对数；其他符号意义同上。

从高速铁路通过能力计算公式中可以看出，计算通过能力关键要确定 $\epsilon_{停}$ 、 $\epsilon_{低}$ 两个扣除系数的取值。

以下内容将重点讨论两个扣除系数的具体取值。

2 高速铁路通过能力扣除系数取值研究

2.1 $\epsilon_{低}$ 取值研究

低等级列车在区段被越行时，对通过能力的影响可由图1表示：

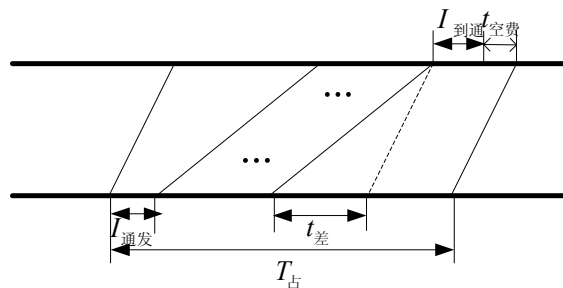


图1 低等级列车在区段被越行示意

Fig. 1 Low-level train overtaking in a running section

由图1所示可知

$$T_{占} = (m-1)I + t_{差} + 2I + t_{空费}$$

式中， m 表示追踪运行的低等级列车数； $t_{差}$ 表示在越行区段，不同等级列车运行时分差； $t_{空费}$ 表示由于列车分布造成的列车实际时间间隔与标准列车追踪时间间隔之差；其他参数意义同前。

另外，为了方便计算，设 $I_{通发} = I_{到通} = I$ ，则低等级列车的扣除系数为：

$$\epsilon_{低} = \frac{T_{占} - I}{mI} = \frac{mI + t_{差} + t_{空费}}{mI} = 1 + \frac{t_{差} + t_{空费}}{mI} \quad (3)$$

从公式可看出，低等级列车的扣除系数取决于 $t_{差}$ 、 $t_{空费}$ 、 m 、 I ，其中， I 取决于运营技术标准， $t_{空费} \in (0, I)$ 。由于低等级列车被高等级列车越行时，低等级列车追踪比例越大停站时间越长，为了保证低等级列车运行质量，在站等待时间要控制在合理时间范围内，所以一般情况下， m 取值范围可确定。鉴于此，本论文重点讨论 $t_{差}$ 取值。

$t_{差}$ 表示越行区段内不同速度等级列车时分差，由于不同等级列车在各区间运行时分固定，因此， $t_{差}$ 的取值取决于最小越行区段的选取。

为保证低等级列车在全程的旅行速度，低等级列

车不能被高等级列车频繁越行，相邻越行站间应有一定的距离，此距离可能大于最大的站间距。通过分析，本论文从列车服务质量的角度出发，提出了最小越行区段的计算原理：

设低等级列车最快的运行时间为 $t_{运}$ ，低等级列车在线路运营所规定的最长旅行时间为 $t_{旅}$ ，低等级列车被越行时的平均停站时间为 $t_{停}$ ，由此，可推导出低等级列车最多被越行的次数 $n = \frac{t_{旅} - t_{运}}{t_{停}}$ 。设线路总长为 $l_{全}$ ，则最小越行区段距离 $l_{越} \approx \frac{l_{全}}{n+1}$ ，结合具体的线路车站分布情况，即可推导出线路最小越行区段。

2.2 $\varepsilon_{停}$ 取值研究

(1) 高速列车停站基本扣除系数分析

高速列车在区段内停站一次，将引起旅行时间增加 Δt 。 Δt 由三部分时间组成，即：

$$\Delta t = t_1 + t_2 + t_3 \quad (4)$$

式中： t_1 表示高速列车停车附加时间 (min)； t_2 表示高速列车营业停时 (min)； t_3 表示高速列车起动附加时间 (min)。

高速列车停站一次需从平行列车运行图中扣除的不停站高速列车为 $\varepsilon_{停}^{基} = \frac{\Delta t}{l}$ 列，可以直观看出，列车的停站时间越长对通过能力影响越大。

(2) 不同停站方案下高速列车停站扣除系数分析

在列车运行区段内，列车停站对通过能力的影响不仅与停站时间有关，而且与列车停站方案密切相关。如果高等级列车成组停站中后行列车停站不能利用前行列车停站所产生的空隙（见图 2），多个停站可看成是相互独立的，此种情况下，列车停站扣除系数与基本扣除系数相同，即 $\varepsilon_{停}^{不利} = \varepsilon_{停}^{基} = \frac{\Delta t}{l}$ ，这是高等级列车停站扣除系数的上限。

如果高等级列车成组停站中后行列车停站能够有效利用前行列车停站所产生的空隙（如图 3 所示），则多个列车停站在列车运行图中占用的总时间等于一个列车停站所占用的时间，此种情况下，列车停站

扣除系数为 $\varepsilon_{停}^{有利} = \frac{\Delta t}{kl}$ 。式中， k 为最有利停站方案下在运行图中共用一次停站时间的列车停车总次数。

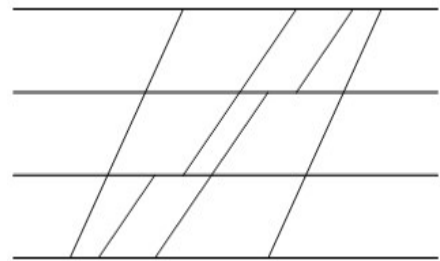


图 2 最不利情况下列车停站方案

Fig. 2 Train stop scheme under the most unfavorable case

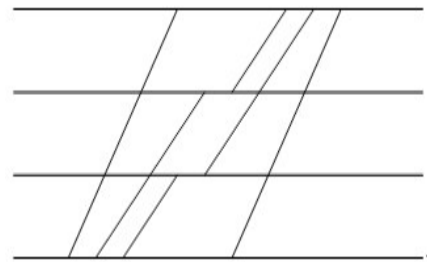


图 3 最有利情况下列车停站方案

Fig. 3 Train stop scheme under the most favorable case

从上述分析可看出，针对不同的运行图结构，其停站扣除系数的取值不同，本论文基于上述基本理论，重点讨论不同运行图结构下停站扣除系数的具体取值。

如图 4 所示，列车停站组合较多，没有一定的规律，但通过分析可知，第一列列车首次停车在区段近方，后续列车不能利用其停站所产生的空隙，则此次停站可看成单独一组。第一列列车第二次停车所占用的时间可被后续第二列车首次停车、第三列列车首次停车、第四列列车首次停车所利用，则此 4 次停站可看成一组。以此类推，原图的停站方案可分为 6 组，可推导出原图中共用一次停站时间的列车停车平均次数：

$$k = \frac{n}{z} = \frac{13}{6}$$

式中， n 为列车运行图中停站总次数； z 为因列车停站共用停站时间而分组的组数。

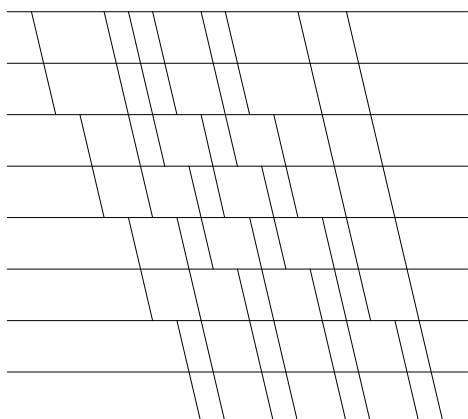


图 4 列车停站方案示意图

Fig. 4 Train stop scheme

可推导出图 4 列车停站扣除系数 $\varepsilon_{\text{停}} = \frac{\Delta t}{kI} = \frac{z\Delta t}{nI} = \frac{6\Delta t}{13I}$ 。

因此可推导出，列车停站需从平行运行图中扣除

$$n_{\text{停扣}} = n_{\text{停}} \varepsilon_{\text{停}} = n \frac{\Delta t}{kI} = n \frac{\Delta t}{\frac{n}{z} I} = \frac{6\Delta t}{I}$$

列（对）高等级列车，如图 5 所示。

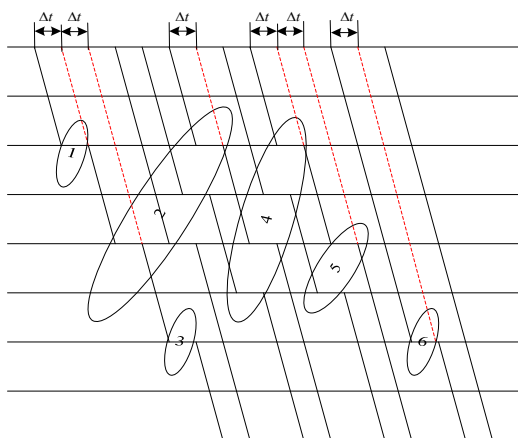


图 5 列车停站分组方案示意图

Fig. 5 Trains stop grouping scheme

根据上述分析可知，列车停站扣除系数的取值关键是要确定列车停站分组，其分组的原则为同一组列车停站在运行图中共用一个停站时间。根据分析，本论文提出运行图停站分组的确定方法为：将所有列车的所有停站作为一个大的集合并且按照列车时间次序进行排序，从第一列车的首次停站开始依次序向后续列车停站搜索，如后续列车停站能够在运行图中与

其共用一个停站时间，则该后续列车停站与前述停站分为一组，并且将已分组列车停站从停站集合中删除，这样搜索直至第一列没有共用停站时间的列车为止；接下来从第一列车的第二次停站开始，按照上述方法继续向后续列车停站搜索，直至所有列车的所有停站都被分组为止。

3 胶济客运专线通过能力计算

3.1 胶济客运专线运营情况

胶济客运专线车站分布按站顺分别为济南、济南东、章丘、周村东、淄博、临淄、青州市、昌乐、潍坊、昌邑、高密、胶州北、即墨、青岛，线路全长大约 361km，采用时速 200km/h 的动车组与 120km/h 的普通客车共线运行的运输组织模式，采用“V”型维修天窗，天窗时长 240min。目前，胶济客专开行动车组 28 对，其旅行时间约为 174.5min，其他旅客列车 31 对，其旅行时间约为 244min。

3.2 胶济客运专线 $\varepsilon_{\text{低}}$ 取值

由于篇幅所限，这里重点讨论最小越行区段的选取，以确定 $t_{\text{差}}$ 。

已知低等级列车最快的运行时间 $t_{\text{运}}=244\text{min}$ ，规定的旅行时间约为 $t_{\text{旅}}=320\text{min}$ ，根据公式 $n = \frac{t_{\text{旅}} - t_{\text{纯}}}{t_{\text{停}}}$ 、

$l_{\text{越}} \approx \frac{l_{\text{全}}}{n+1}$ ，可推导出胶济客运专线最小越行区段长度

$l_{\text{越}} \approx 95\text{km}$ 。在胶济客专线路中，站间距最大为潍坊—昌邑区间，最小越行区段长度远远大于此区间。鉴于此，在此区间附近寻找越行区段。淄博与潍坊车站为大客运站，所有列车途径均停，青州、高密为较大客运站，有 1/3 列车停车，因车站到发线限制，低等级列车不能在办理高等级列车客运用作业的车站被越行，全线可分为几个大区段，结合计算出的最小越行区段长度，可推出胶济客专通过能力最小越行区段为临淄—昌邑。由区间运行标尺可计算出，在此越行区段， $t_{\text{普客}} = 63\text{min}$ ， $t_{\text{动}} = 37\text{min } 15\text{s}$ ，可计算出胶济客运

专线最小越行区段 $t_{\text{差}} = 28.75 \text{ min} \approx 29 \text{ min}$ 。

从上述分析可知，低等级列车的扣除系数 $\varepsilon_{\text{低}} = 1 + \frac{t_{\text{差}} + t_{\text{空费}}}{ml}$ ，由于 $t_{\text{空费}} \in [0, l]$ ，追踪运行的低等级列车数 $m \in [1, 2]$ ，可求得胶济客专低等级列车扣除系数 $\varepsilon_{\text{低}} = [2.45, 4.5]$ 。

3.3 胶济客运专线 $\varepsilon_{\text{停}}$ 取值

现行的胶济客专列车开行方案中，动车组列车共 28 对且平均每列车停 3 个站，所有列车均在淄博站与潍坊站停，按照前述列车停站分组方法可将所有在淄博站的列车停车划为一组，所有在潍坊站的列车停车划为一组。除此之外，每列车还有一次停站，相邻两列车的此次停站只存在两种关系：一种为共用停站时间，一种为相互独立。假设此两种情况出现的概率各为 50%，则 28 对列车的第三次停站（即除淄博站与潍坊站外的停站）可分为 14 组。由此可知，胶济客运专线运行图所有列车停站共分为 16 组，即 $z = 16$ 。

从上述分析可知，列车停站的扣除系数 $\varepsilon_{\text{停}} = \frac{\Delta t}{kl} = \frac{z\Delta t}{nl}$ ，

可求得胶济客专列车停站扣除系数 $\varepsilon_{\text{停}} = 0.12$ 。

3.4 胶济客运专线通过能力

根据上述分析，可知

$$N_{\text{混}} = N - n_{\text{停}}\varepsilon_{\text{停}} - n_{\text{低}}\varepsilon_{\text{低}} + n_{\text{低}}$$

式中， $n_{\text{低}}$ 表示列车运行图中低等级列车列数或对数。由胶济客运专线运行图可知在动车组列车和普速列

车互相干扰区域内，铺画的普速列车数为 13 列，故 $n_{\text{低}}$ 取值为 13。将 $\varepsilon_{\text{低}}$ 、 $\varepsilon_{\text{停}}$ 取值带入通过能力公式，可得 $N_{\text{混}} \in [64.5, 91]$ 。

值得注意的是，胶济客运专线通过能力计算过程中，在只有普速客车运行区域，采用了纯平行运行图能力，此部分能力利用受到跨局普速客车方案影响，不可能全部利用。结合目前胶济客专运营实际，在此区域仅铺画了普速客车 10 对左右，通过分析，胶济客运专线真正的通过能力 $N_{\text{混}} \in [46, 72.5]$ 。

4 结束语

(1) 由不同等级列车速差产生的扣除系数与列车在越行区段的时分差、低等级列车追踪比例密切相关。高速铁路列车服务质量较高，低等级列车不能频繁被越行，越行区段距离可能大于最大的站间距，论文从服务质量角度提出不同等级列车越行区段的计算方法，从而可推导出时分差。另外，低等级高速列车追踪比例越大，在被高等级列车越行时所产生的扣除系数明显越小，但低等级列车停站时间越长，越会严重影响低等级列车服务质量，因此，在编制列车运行图时要选择合理的低等级列车追踪比例。

(2) 高速列车停站方案对停站扣除系数影响较大，如后续列车能够利用前行列车停站时间，则停站扣除系数显著减小。因高速铁路高速列车停站次数较多，停站对通过能力带来的影响较大，鉴于此，编制高速铁路列车运行图时，应结合客流需求合理安排列车停站。

参考文献

- [1] 彭其渊, 魏德勇, 闫海峰等. 客运专线运输组织[M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [2] 段俊娥. 高速铁路通过能力计算方法改进研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2012.
- [3] 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, 26(3): 7-10.
- [4] 赵丽珍. 高速铁路区间通过能力计算与分析[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(6): 54-58.

(中文编辑: 刘婷婷)