

文章编号: 1674—8247(2024)01—0023—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.005

400 km/h 高速铁路通过能力计算方法研究

黄辉林¹ 周心怡² 崔衍渠¹

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 成都 610031; 2. 中国铁路成都局集团有限公司, 成都 610000)

摘 要: 本文旨在研究全高速模式下基于扣除系数法的 400 km/h 高速铁路的通过能力计算方法。首先, 对不同运行图铺画方式下的扣除系数进行了深入分析, 并确定了其计算方法。在群组中列车数量一定的情况下, 停站数量较少时按停站列车成组铺画不越行, 扣除系数较小; 停站数量较多时按成组不停站列车越行停站列车铺画, 扣除系数较小。然后, 进一步提出了基于扣除系数法的通过能力计算方法, 并对影响通过能力的主要因素进行了敏感性分析。结果显示, 区间追踪间隔时间的变化对通过能力的影响最为显著。此外, 本文还探讨了扣除系数与 400 km/h 高速铁路列车和线路间的内在联系, 并通过构造算例, 验证了计算方法的正确性和有效性。这一研究为提高高速铁路的运营效率提供了理论支持和实践指导。

关键词: 400 km/h 高速铁路; 扣除系数; 通过能力; 越行

中图分类号: U292.5+2

文献标志码: A

Study on Calculation Method for Carrying Capacity of 400 km/h High-speed Railways

HUANG Huilin¹ ZHOU Xinyi² CUI Yanqu¹

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, China;

2. China Railway Chengdu Bureau Group Co., Ltd., Chengdu 610000, China)

Abstract: This paper aims to study the method for calculating the carrying capacity of 400 km/h high-speed railway under the full high-speed mode based on the deduction coefficient method. Firstly, an in-depth analysis was conducted on the deduction coefficients under different train operation diagramming methods, and their calculation method was determined. When the number of trains in a group was fixed, a smaller deduction coefficient was obtained if fewer stops were involved and block trains were diagrammed without overtaking, while a smaller deduction coefficient was achieved through overtaking of stop trains by non-stop trains if there were many stops. Furthermore, a method for calculating the carrying capacity based on the deduction coefficient method was proposed, and a sensitivity analysis of the main coefficients affecting the carrying capacity was carried out. The results show that the change of section tracking interval time has the most significant impact on the carrying capacity. Moreover, this paper explored the intrinsic relationship between the deduction coefficient and 400 km/h high-speed railway trains and lines, and validated the correctness and effectiveness of the calculation method through constructed examples, providing theoretical support and practical guidance for improving the operational efficiency of high-speed railways.

Key words: 400 km/h high-speed railway; deduction coefficient; carrying capacity; overtaking

收稿日期: 2023-11-03

作者简介: 黄辉林(1993-), 男, 工程师。

引文格式: 黄辉林, 周心怡, 崔衍渠. 400 km/h 高速铁路通过能力计算方法研究[J]. 高速铁路技术, 2024, 15(1): 23-28.

HUANG Huilin, ZHOU Xinyi, CUI Yanqu. Study on Calculation Method for Carrying Capacity of 400 km/h High-speed Railways[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1): 23-28.

随着“四纵四横”高速铁路网各线路相继建成通车,“八纵八横”高速铁路网快速推进,我国已建成网络覆盖范围广泛、运营长度较长的高速铁路网,覆盖了 93% 的 50 万以上人口城市,总长达到 5 万 km。庞大的高速铁路网不仅缩短了主要经济区间的时空距离,也实现了主要城市与周边城市的快速通达,为旅客提供了高效、快速、便捷的服务,极大地带动了沿线地区及高速铁路相关产业的发展,形成了一整套世界领先的高速铁路技术,为我国经济社会发展,全面建成小康社会做出了突出贡献。为了进一步推动高速铁路技术进步,探索更高速度下动车组运用条件,巩固我国在高速铁路技术上的领先地位,我国正逐步推进 400 km/h 高速铁路研究工作。

现有针对 400 km/h 高速铁路的研究主要集中在移动装备和工程建设领域^[1],如新型复兴号高速综合检测列车在济郑、郑渝、福厦高速铁路开展了明线、隧道高速运行和高速交会等不同工况下的动力学、空气动力学、阻力、噪声等 60 余项科学试验,创下了相对速度 891 km/h 的高速铁路交会世界纪录,为 CR450 高速度等级中国标准动车组的研制奠定了坚实的基础;而肩负着我国更高速度高速铁路试验任务的成渝中线高速铁路于 2022 年底全面开工建设^[2]。但却鲜有针对 400 km/h 高速铁路运输组织方面的研究,本文旨在通过分析 400 km/h 高速铁路不同运行图铺画方式下的通过能力,总结计算方法,为今后 400 km/h 高速铁路运输组织设计提供理论支撑。

1 400 km/h 高速铁路扣除系数

计算铁路通过能力最常用的方法主要是扣除系数法,扣除系数是指在基础运行图上,因铺画一列不同种列车所造成的基础列车能力的损失数量^[3]。显然,扣除系数的取值与列车停站次数、停站时间、停站列车与不停站列车间的排列方式、停站列车间停站次序等因素都有关系,扣除系数法能够直观地描述各相关量间的定量关系。我国高速铁路目前主要采用“全高速 + 下线”模式^[4],即在高速度等级线路上仅开行单一速度的高速度等级列车,有跨线需求时,高速度等级列车下线至低速度等级线路按低速度等级继续运行的模式。因此,本文将在全 400 km/h 列车的运输组织模式下,以不停站列车作为基准,研究停站列车与不停站列车不同的铺画方式扣除系数的计算方法。

1.1 停站列车与不停站列车均衡铺画扣除系数

均衡铺画方式^[5]即将停站列车与不停站列车间

隔排列,交错运行的运行图铺画方式。采用此种方式时,停站列车间、不停站列车间时间间隔基本一致,停站时段分布较为均衡。高速铁路旅客出行较为分散,因此均衡铺图有利于旅客运输组织。假设在一个客运区段,停站列车与不停站列车按均衡铺画的方式配布运行线,则两列不停站列车间运行一列停站列车,若停站次数为 m 次,每次停站时间均为 $t_{\text{站}}$,如图 1 所示。

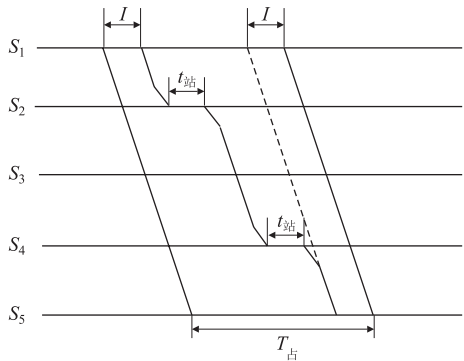


图 1 停站列车与不停站列车均衡铺画示意图

停站列车扣除系数为:

$$\varepsilon_{\text{均}} = \frac{T_{\text{占}}}{I} - 1 = \frac{m(t_{\text{停}} + t_{\text{站}} + t_{\text{起}})}{I} + 1 \quad (1)$$

式中: $\varepsilon_{\text{均}}$ ——运行图均衡铺画时停站列车扣除系数;
 $T_{\text{占}}$ ——停站列车占用的运行图时间(min);
 I ——追踪间隔时间(min);
 m ——停站次数(次);
 $t_{\text{停}}$ ——列车停车附加时分(min);
 $t_{\text{站}}$ ——列车停站时间(min);
 $t_{\text{起}}$ ——列车起车附加时分(min)。

可以看出,运行图均衡铺画情况下,停站列车扣除系数与列车停站次数、停站时间正相关,与追踪间隔时间负相关,在能力需求不高,追踪间隔较大时,对能力影响较小。

1.2 停站列车成组铺画扣除系数

成组铺画方式即将停站方式相似的列车按追踪运行的方式成组排列。我国长期的高速铁路运营经验表明,当组内停站列车采用“递远递停”的停站策略^[6],即前行车优先在前方车站停车,后行车优先在后方车站停车的方式成组铺画时,总运行图占用时间最小。假设在一个客运区段,相同停站次数的停站列车按“递远递停”的方式成组排列,则两列不停站列车间运行 n 列停站列车,若每列车停站次数均为 m 次,每次停站时间均为 $t_{\text{站}}$,如图 2 所示。

停站列车扣除系数为:

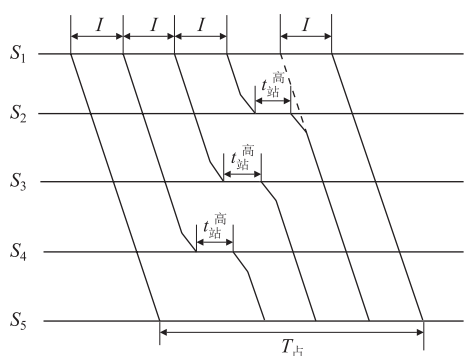


图2 停站列车成组追踪运行示意图

$$\varepsilon_{\text{组平}} = \left(\frac{T_{\text{占}}}{I} - 1 \right) / n = \frac{m(t_{\text{停}} + t_{\text{站}} + t_{\text{起}})}{nI} + 1 \quad (2)$$

式中： $\varepsilon_{\text{组平}}$ ——成组列车平均扣除系数；

$T_{\text{占}}$ ——1组停站列车占用运行图总时间(min)；

n ——1组停站列车的列车数(列)；

I ——追踪间隔时间(min)；

m ——每列停站列车停站次数(次)；

$t_{\text{停}}$ ——列车停车附加时分(min)；

$t_{\text{站}}$ ——列车停站时间(min)；

$t_{\text{起}}$ ——列车起车附加时分(min)。

可以看出,停站列车成组铺画情况下,停站列车平均扣除系数与列车停站次数、停站时间正相关,与追踪间隔时间、每组列车的列车数负相关。当 $n=1$ 时, $\varepsilon_{\text{组平}} = \varepsilon_{\text{均}}$,此时每组停站列车仅一列,即停站列车与不停站列车均衡铺画,可见,停站列车与不停站列车均衡铺画是停站列车成组铺画的一种特殊情况。当 $n>1$ 时, $\varepsilon_{\text{组平}} < \varepsilon_{\text{均}}$,表明停站列车成组铺画有利于降低平均扣除系数,提升线路通过能力。

1.3 不停站列车越行停站列车扣除系数

采取不停站列车越行停站列车的运行图铺画方式时,停站列车在部分车站需避让不停站列车,列车在站停留时间较普通停站会延长。为避免被越行列车在站停留时间过长,对旅行速度造成过大的影响,降低旅客运输服务质量,考虑停站列车每次停站最多被越行1次,且营业停站时间小于被越行所需要的技术作业时间(车站到通间隔时间与车站通发间隔时间

$$\varepsilon_{\text{组平}} - \varepsilon_{\text{越平}} = \frac{(t_{\text{停}} + t_{\text{站}} + t_{\text{起}})m + (2I - I_{\text{到通}} - I_{\text{通发}} - t_{\text{停}} - t_{\text{起}})n - (I_{\text{到通}} + I_{\text{通发}} + t_{\text{停}} + t_{\text{起}})}{nI} \quad (4)$$

式(4)中,起停车附加时分、到通间隔时间、通发间隔时间、追踪间隔时间对于同一线路上同种列车一般为定值,根据列车牵引计算和现场查定所得,与列车的牵引制动性能、列车搭载的列控系统参数、线路

之和)。为有效利用运行图时间,停站列车同样成组按“递远递停”方式排列。假设在一个客运区段,则两列不停站列车间运行 n 列停站列车,若每列车停站次数均为 m 次,每次停站均待避一列不停站列车,如图3所示。

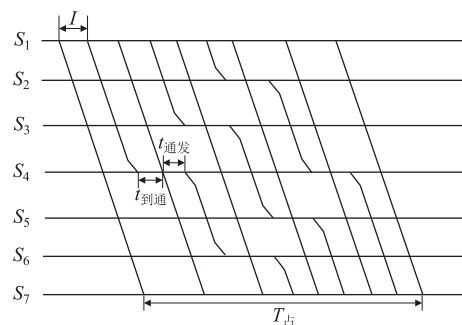


图3 列车成组越行示意图

停站列车平均扣除系数为：

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{越平}} &= \left(\frac{T_{\text{占}}}{I} - 1 - m \right) / n \\ &= \frac{(n+1)(t_{\text{停}} + I_{\text{到通}} + I_{\text{通发}} + t_{\text{起}})}{nI} - 1 \end{aligned} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{\text{越平}}$ ——不停站列车平均扣除系数；

$T_{\text{占}}$ ——越行列车与被越行列车占用总运行图时间(min)；

n ——停站列车的列车数(列)；

m ——每列停站列车被越行次数(次)；

I ——追踪间隔时间(min)；

$t_{\text{到通}}$ ——车站到通间隔时间(min)；

$t_{\text{通发}}$ ——车站通发间隔时间(min)；

$t_{\text{停}}$ ——列车停车附加时分(min)；

$t_{\text{起}}$ ——列车起车附加时分(min)。

可以看出,在不停站列车越行停站列车的情况下,停站列车扣除系数与列车停站次数正相关,与追踪间隔时间、每组停站列车的列车数负相关。

1.4 越行对通过能力的影响分析

式(2)、式(3)计算了在保证沿线车站服务频率基本相同的情况下停站列车按成组铺画不被越行和被越行两种情况下停站列车平均扣除系数,通过比较二者大小,即可定量比较两种方式的能力大小,即：

的平纵断面条件、线路的闭塞分区划分等都有直接关系^[7]。目前运营速度400 km/h的CR450动车组列车仍在研制阶段,暂没有详细的牵引制动参数以及配合搭载的列控系统参数。因此,暂参考现有的350 km/h

高速铁路相关参数取值进行估算,京沪高速铁路目前列车最快运行速度 350 km/h,追踪间隔时间为 4 min,到通间隔时间为 3 min,通发间隔时间为 2 min,停车附加时分分为 3 min,起车附加时分分为 3 min,停站时间为 2 min^[8]。考虑到 CR450 动车组将采用大量先进技术和材料,牵引制动性能较现有列车应有所提高,假设通过新技术的应用和列控系统的优化,400 km/h 高速铁路各项间隔和起停附加时分能够与目前京沪高速铁路保持一致。将各参数代入可得:

$$\varepsilon_{\text{组平}} - \varepsilon_{\text{越平}} = \frac{8m - 3n - 11}{4n} \tag{5}$$

在各项间隔时间、起停附加时分和停站时间确定的情况下,两种方式的扣除系数差仅和每组列车数量及停站次数有关。计算部分不同 m 、 n 取值时对应的 $\varepsilon_{\text{组平}} - \varepsilon_{\text{越平}}$ 的值,如表 1 所示。可见在每组中列车数量一定时,停站数量较少时按停站列车成组铺画不越行,扣除系数较小,停站数量较多时按成组不停站列车越行停站列车铺画扣除系数较小。

表 1 扣除系数比较表

n	m	$\varepsilon_{\text{组平}} - \varepsilon_{\text{越平}}$	n	m	$\varepsilon_{\text{组平}} - \varepsilon_{\text{越平}}$
1	1	-1.5	4	1	-0.9
	2	0.5		2	-0.4
	3	2.5		3	0.1
	4	4.5		4	0.6
	5	6.5		5	1.1
2	1	-1.1	5	1	-0.9
	2	-0.1		2	-0.5
	3	0.9		3	-0.1
	4	1.9		4	0.3
	5	2.9		5	0.7
3	1	-1.0	6	1	-0.9
	2	-0.3		2	-0.5
	3	0.3		3	-0.2
	4	1.0		4	-0.1
	5	1.7		5	0.5

2 400 km/h 高速铁路通过能力计算与分析

2.1 通过能力计算方法

高速铁路通过能力计算方法可在假定的平行运行图满图上扣除因列车停站、越行造成的能力损失,最终得到在一定的运输组织方式下的区段通过能力,可通过式(6)计算:

$$N = N_{\text{平}} - N_{\text{停}} \varepsilon + N_{\text{停}}$$
$$= \frac{1\,440 - T_{\text{w}} - T_{\text{三角}}}{I} - \sum_{i=1}^k n_i (\varepsilon_i - 1) \tag{6}$$

式中: $N_{\text{平}}$ ——平行运行图通过能力(对/d);
 $N_{\text{停}}$ ——停站列车数量(次);
 ε ——停站列车扣除系数;
 T_{w} ——天窗时间(min);
 $T_{\text{三角}}$ ——天窗两侧无法行车的三角区时间(min);
 n_i ——第 i 组停站列车数量(列);
 ε_i ——第 i 组停站列车扣除系数,根据运行图结构的不同可为上述 $\varepsilon_{\text{组平}}$ 或 $\varepsilon_{\text{越平}}$ 。

2.2 通过能力的影响因素分析

由式(2)、式(3)可知,扣除系数的取值虽然与列车运行速度没有直接的联系,但追踪间隔时间、到通间隔时间、通发间隔时间、起停附加时分等时间取值^[9],均需要结合 400 km/h 列车的牵引制动性能和搭载的列控参数,并针对不同的线路平纵断面条件采用牵引计算和现场查定所得,不同的取值直接影响到扣除系数的大小以及最优运行图铺画方式的选择。因此,准确计算 400 km/h 高速铁路的通过能力核心仍是准确查定各项参数的取值。基于停站列车成组铺画方式,调整不同的影响因素,计算对应的通过能力,如表 2 所示。可见,追踪间隔对线路通过能力的影响最为明显,显著高于其他影响因素。

表 2 不同影响因素变化对应的通过能力表(对/d)

影响因素变化/min	-2	-1	0	1	2
追踪间隔	267	204	173	154	141
每组停站列车数	258	188	173	158	143
到通间隔、通发间隔、起车附加、 停车附加	203	188	173	158	143

进一步参考 Q/CR 471 - 2015《高速铁路列车间隔时间查定办法》对区间追踪间隔时间的计算方法,结合列车牵引计算软件进行研究,可以发现在相同车型和列控条件下,线路坡度对区间追踪间隔时间有较大的影响,下坡坡度越大、下坡坡长越长,区间追踪间隔时间则会越长^[10],相应的线路通过能力则会越小。因此在实际的线路设计过程中,应尽量减少长大下坡的使用,线路条件确实困难时应进行充分的综合比选后确定。

2.3 算例分析

构造一条连接两大核心城市 400 km/h 高速铁路,运营长度 281 km,共分布车站 6 座(含首末站),全部运行 400 km/h 高速列车,客流以 S1 站及其以远与 S6 站及其以远间的交流为主,以沿线各站往 S1 或 S6 的交流为辅,沿线各站间交流较少。因此,本段间列车开行方案以 S1、S6 间一站直达列车为主,但为了保证中间站服务频率,规定每站全日单向停车次数不

少于20次。为适应旅客出行习惯,有效运营时间为6:00—18:00。为了提高停站列车的旅行速度,停站列车均停2次,其余列车在本段均为一站直达列车。追踪间隔按4 min、到通间隔按3 min、通发间隔按2 min、停车附加时分按3 min、起车附加时分按3 min,营业停时均按2 min计算。

2.3.1 理论计算

(1) 按停站列车两列成组不越行

两列停站列车按“递远递停”的停站策略成组铺画,每组中 $m=2$, $n=2$,根据停站率要求,共计20组,将各参数代入式(2)中,可求得 $\varepsilon_{\text{组平}}=3$,代入式(6)中,可求得 $N=178$ 。

(2) 按停站列车两列成组被越行

两列停站列车按“递远递停”的停站策略成组铺画,每次停站均被一列不停站列车越行,每组中 $m=2$, $n=2$,根据停站率要求,共计20组,将各参数代入式(3)中,可求得 $\varepsilon_{\text{越平}}=3.125$,代入式(6)中,可求得 $N=173$ 。

2.3.2 运行图铺画验证

为了验证式(2)~式(4)的正确性,采用运行图铺画软件对上述两种停站策略的最优运行图进行铺画,按所有列车均为S1始发、S6终到考虑铺画单向列车运行图。

(1) 按停站列车两列成组不越行运行图

采用上述参数铺画停站列车两列成组不越行运行图。在递远递停的策略下铺画最优规格化运行图,共计铺画178列,所有列车平均旅行速度327.74 km/h。

(2) 按停站列车两列成组被越行

采用上述参数铺画停站列车两列成组被越行运行图。在递远递停的策略下铺画最优规格化运行图,共计铺画173列,所有列车平均旅行速度325.85 km/h。

(3) 对比分析

从运行图铺画结果可以看出:

①运行图铺画结果与计算结果基本一致,验证了式(2)~式(4)的正确性。

②由图4、图5可知,停站列车成组不越行时,停站列车与不停站列车间有一个较大的三角区,而停站列车成组越行时,该三角区较小,说明列车越行时,列车发车时刻分布更加均衡。

③由于越行情况下列车在站停留时间较长,停站列车旅速较低,导致整体运行图平均旅速较不越行时低。

④全图平均旅速较低主要由于所有列车在首末站均按始发终到考虑,旅行时间增加了起停附加

时间。

⑤在给定的参数下,两种方式通过能力差别较小,实际运用中可以结合始发终到站车站能力、旅行速度要求灵活选用。

3 结束语

本文定量分析了基于扣除系数法的400 km/h全高速模式下不同运行图铺画方式的通过能力计算方法,通过比较可知,在每个列车组中列车数量一定的情况下,停站数量较少时按停站列车成组铺画不越行,扣除系数小,通过能力大;在停站数量较多时按成组不停站列车越行停站列车,扣除系数小,通过能力大。基于本文提出的计算方法对影响通过能力的因素进行分析,发现追踪间隔时间对通过能力影响最为明显,提高通过能力首要是减小区间追踪间隔。最后,构造算例采用图解法进行实际运行图铺画,验证了本文所提计算方法的正确性,在未来的相关设计工作中可推广应用。

本文研究基础是采用400 km/h单一速度运行,若存在400 km/h与350 km/h或300 km/h列车共线运行的情况,不同速度等级列车间存在速差,因此情况将变得更为复杂。后续的研究将进一步分析不同速度等级列车共线运营情况下,低速度等级列车成组追踪运行或被高速度等级列车越行对线路通过能力的影响和计算方法。

参考文献:

- [1] 寇峻瑜,余浩伟,谢毅,等. 400 km/h 高速铁路车站两端最小曲线半径与超高匹配关系研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(4): 74-78, 99.
KOU Junyu, YU Haowei, XIE Yi, et al. A Study on Matching Relation Between the Minimum Radius of Curve and Superelevation at Both Ends of a 400 km/h High-speed Railway Station [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(4): 74-78, 99.
- [2] 赵怡婧. 成渝中线高速铁路功能定位及运输需求研究[J]. 高速铁路技术, 2023, 14(3): 87-91, 96.
ZHAO Yijing. A Study on Functional Orientation and Transport Demand of the Middle Line of Chengdu-Chongqing High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2023, 14(3): 87-91, 96.
- [3] 彭其渊,客运专线运输组织[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
PENG Qiyuan. Transportation Organization of Passenger Special line [M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [4] 黄辉林. 京沪高速铁路跨线列车开行及换乘运输研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
HUANG Huilin. Study on Cross-line Train Operation and Transfer

Transportation of Beijing-Shanghai High-speed Railway [D].
Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[5] 郑金子,刘军. 不同运输组织模式下京沪高铁通过能力的研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2012, 12(4): 22 – 28.
ZHENG Jinzi, LIU Jun. Carrying Capacity of Beijing-Shanghai High-speed Railway by Different Transport Organization Patterns [J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2012, 12(4): 22 – 28.

[6] 吴浩. 基于停站方案优化的高速铁路通过能力利用研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2020.
WU Hao. Study on the High Speed Railway Passing Capacity Utilization Based on Stop Schedule Plan Optimization [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2020.

[7] 欧俊杰,柏赞,骆晖,等. 高速铁路闭塞分区布置优化研究 [J]. 铁道运输与经济, 2022, 44(7): 119 – 126.
OU Junjie, BAI Yun, LUO Hui, et al. Optimization on Block Section Layout of High Speed Railway [J]. Railway Transport and Economy, 2022, 44(7): 119 – 126.

[8] 金祖德. 提高京沪高速铁路通过能力的思考 [J]. 铁道运输与经济, 2013, 35(12): 19 – 22.
JIN Zude. Thoughts on Increasing Carrying Capacity of Beijing-Shanghai High-speed Railway [J]. Railway Transport and Economy, 2013, 35(12): 19 – 22.

[9] 林枫,刘敏,李博,等. 高速铁路区段通过能力计算与敏感度分析 [J]. 铁道运输与经济, 2021, 43(12): 16 – 20.
LIN Feng, LIU Min, LI Bo, et al. Carrying Capacity Calculation and Sensitivity Analysis of High Speed Railway Sections [J]. Railway Transport and Economy, 2021, 43(12): 16 – 20.

[10] 张小刚. 高速铁路连续长大坡道闭塞分区划分的研究 [J]. 铁路通信信号工程技术, 2022, 19(10): 9 – 13, 23.
ZHANG Xiaogang. Research on Block Section Division of Continuous Long Heavy Grades of High-speed Railways [J]. Railway Signalling & Communication Engineering, 2022, 19(10): 9 – 13, 23.

(上接第 22 页)

LIU Shixian, WANG Lei, WANG Luzhong, et al. Review on Electrodynamic Suspension Trains and On-board Superconducting Magnets [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2023, 58(4): 734 – 753.

[12] DENG Zigang, ZHANG Weihua, WANG Li, et al. A High-speed Running Test Platform for High-temperature Superconducting Maglev [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(4): 3600905.

[13] 何勇,刘成龙,杨雪峰,等. 真空管磁浮列车 T 形槽轨平顺度检测方法研究及应用 [J]. 测绘通报, 2019(6): 117 – 120.
HE Yong, LIU Chenglong, YANG Xuefeng, et al. Research and Application of T-shaped Groove Smoothness Detection Method for Evacuated Tube Maglev Train [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2019(6): 117 – 120.