

文章编号: 1674—8247(2024)01—0017—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.004

高速及超高速磁悬浮线路平面设计参数研究

黄成名¹ 鲍慧明² 张继鹏¹ 王英杰²

(1. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055; 2. 北京交通大学, 北京 100044)

摘要:超高速磁悬浮作为一种新兴的交通工具,正在逐步从理论研究向试验验证阶段发展。本文从磁悬浮轨道的原理和特点等方面出发,对比分析了高速磁悬浮和超高速磁悬浮交通的制式差异和线路平面设计参数取值差异,并且用动力学仿真手段对其进行了验证。首先,从高速磁悬浮现行规范和超高速磁悬浮研究资料出发,分析了最小曲线半径和最小缓和曲线长度的影响因素和计算方法,得到不同速度下的平面设计参数取值;随后,运用车辆-线路系统动力学仿真手段计算了动力学指标与曲线半径和缓和曲线长度的关系。研究表明:超高速磁悬浮设计速度为1 000 km/h时,最小圆曲线半径取18 800 m、最小缓和曲线长度取1 340 m较为合理。

关键词:磁悬浮;动力学;线路设计;Simpack;超高速;参数分析

中图分类号:U237;U212.33 **文献标志码:**A

Study on Planar Design Parameters for High-speed and Ultra-high-speed Maglev Lines

HUANG Chengming¹ BAO Huiming² ZHANG Jipeng¹ WANG Yingjie²

(1. China Railway Engineering Design and Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, China;

2. Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Ultra-high-speed maglev, an emerging transportation technology, is transitioning from the realm of theoretical research into the stage of experimental validation. This paper started by outlining the foundational principles and distinguishing features of maglev rail transit, then compared the distinctions in system architecture and the values of horizontal alignment parameters between high-speed maglev and ultra-high-speed maglev systems, and verified these comparisons and distinctions by employing dynamic simulation analysis. Firstly, this study reviewed current specifications and research materials related to ultra-high-speed maglev technology, and analyzed the factors influencing and the methods for calculating the minimum curve radius and the minimum transition curve length for high-speed maglev systems, to obtain the parameter values at different speeds. Following this, the study employed dynamic simulation tools for vehicle-track systems to evaluate the relationship between dynamic performance indicators and both the curve radius and the transition curve lengths. The findings indicate that for ultra-high-speed maglev systems designed to operate at speeds of 1 000 km/h, a minimum circular curve radius of 18 800 m and a minimum transition curve length of 1 340 m are considered to be practical and reasonable.

Key words: maglev; dynamics; line design; Simpact; ultra-high-speed; parameter analysis

收稿日期:2023-11-09

作者简介:黄成名(1982-),男,高级工程师。

引文格式:黄成名,鲍慧明,张继鹏,等. 高速及超高速磁悬浮线路平面设计参数研究[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):17-22.

HUANG Chengming, BAO Huiming, ZHANG Jipeng, et al. Study on Planar Design Parameters for High-speed and Ultra-high-speed Maglev Lines [J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):17-22.

随着交通强国战略的实施,超高速磁悬浮交通系统作为跨时代的交通工具,在国内受到广泛关注。磁悬浮列车是利用电磁铁产生的磁力悬浮、牵引和导向的新型交通工具,运行速度可达1 000 km/h。相比于传统轮轨交通系统和航空系统,磁悬浮列车具有速度较快、环保节能、平稳性好等优点,因此发展磁悬浮交通对我国运输事业的建设具有重要战略意义^[1]。

按照列车运行速度的不同,可将磁悬浮线路分为中低速磁悬浮线路、高速磁悬浮线路和超高速磁悬浮线路。中低速磁悬浮线路的列车运行速度不超过160 km/h,其代表是北京地铁S1线和长沙磁浮快线。高速磁悬浮线路的列车运行速度不超过600 km/h,其代表是上海磁浮示范运营线。超高速磁悬浮线路是指运行速度超过600 km/h,最高速度达到1 000 km/h的磁悬浮线路,一般运行在真空管道中,目前大多处于构想和规划阶段,其代表为马斯克提出的Hyperloop^[2],以及我国正处于建设阶段的高速飞车大同试验线。针对中低速磁悬浮线路,米隆^[3]等基于舒适度指标,计算了缓和曲线的线型和长度建议取值。易思蓉^[4]等基于车线动力学理论,计算了速度为200 km/h的磁悬浮线路的最小竖曲线半径取值。针对高速磁悬浮线路,代一帆^[5]等研究了高速磁悬浮线路设计中,平、竖曲线重叠参数对舒适性的影响规律。谢毅^[6]等从舒适性的角度出发,计算了速度为600 km/h的高速磁悬浮线路最小曲线半径及缓和曲线长度取值。针对超高速磁悬浮线路,吴昊^[7]等计算了真空管磁悬浮线路的平面参数合理取值。规范及技术标准方面,目前已有中低速和高速磁悬浮线路的技术标准,尚无超高速磁悬浮线路技术标准。

本文根据高速和超高速磁悬浮交通系统的特点,比较了两种线路的悬浮制式差异,对比了线路平面主要参数,并采用车辆-线路动力学仿真模型对平面主要参数取值进行了检算,可为超高速磁悬浮线路设计提供参考。

1 高速及超高速磁悬浮制式差异

磁悬浮线路的悬浮制式有常导电磁悬浮、电动磁悬浮、超导磁悬浮和永磁与电磁混合悬浮等^[8]。考虑到速度、安全、经济等多方面的要求,高速磁悬浮线路和超高速磁悬浮线路在悬浮制式选择上有若干异同点。

1.1 高速磁悬浮制式

目前,上海磁浮示范运营线是世界上唯一一条商业运行的高速磁悬浮线路,其采用的制式为常导电磁

悬浮。现行规范中对于高速磁悬浮线路也只有针对常导电磁悬浮制式的条文。因此,此处只阐述常导电磁悬浮的情形。

高速磁悬浮线路所用的常导电磁悬浮是指车辆在常温下,利用车辆底部的电磁铁和磁性轨道之间的电磁力实现悬浮,悬浮间隙在10 mm左右,必须通电以维持悬浮状态。

TB 10630-2019《磁浮铁路技术标准》^[9]中规定,高速磁浮交通轨距不大于2 800 mm,CJJ/T 310-2021《高速磁浮交通设计标准》^[10]规定高速磁浮交通轨距为2 800 mm。

1.2 超高速磁悬浮制式

超高速磁悬浮车辆需运行在低气压的真空管中,其采用的悬浮制式为超导磁悬浮。超导磁悬浮是指车辆上安装有超导体,轨道为永磁体,车辆和轨道之间通过磁通钉扎效应产生悬浮和导向力,其悬浮间隙为10~30 mm,无需通电也可维持悬浮状态^[11]。

超高速磁悬浮线路的轨距与真空管的直径有关。其中,邓自刚团队建立的磁悬浮高速试验线中真空管道的直径为4.2 m^[12];某试验线的真空管道内径约为4 m^[13];吴昊计算时采用的管道内径为5.6 m,轨距为1 900 mm;大同试验线的管道内径为5.7 m,轨距为1 950 mm。

综上所述,高速磁悬浮和超高速磁悬浮悬浮制式的主要区别如表1所示。

表1 悬浮制式对比表

类型	高速磁悬浮	超高速磁悬浮
悬浮力来源	电磁铁	超导体
悬浮状态	通电时	无需通电
悬浮间隙/mm	10	10~30
轨距/mm	2 800	1 950

由表1可知,相比于高速磁悬浮,超高速磁悬浮主要有悬浮间隙较大、轨距较小的特点,在超高速磁悬浮线路设计时应予以考虑。

2 线路平面主要参数对比

2.1 曲线半径参数

高速及超高速磁悬浮线路的平面曲线半径与轨道梁的制造和施工条件有关,均由式(1)计算:

$$R_H \geq \left| \frac{(v/3.6)^2 \times \cos\alpha \times \cos^2\beta}{a_y + [g\cos\beta - (v/3.6)^2/R_V] \sin\alpha} \right| \quad (1)$$

式中: R_H ——平面曲线半径(m);

v ——车辆运行速度(km/h);

α ——横坡角(°);

β ——纵坡角,上坡为正($^{\circ}$);
 α_y ——允许侧向加速度(m/s^2);
 g ——重力加速度(9.81 m/s^2);
 R_v ——竖曲线半径,上凸为正(m)。

由式(1)可知,最小曲线半径与列车速度、允许的侧向加速度、横坡、纵坡及竖曲线半径取值有关。TB 10630-2019《磁浮铁路技术标准》中规定,最大横坡为 12° ,最大允许侧向加速度为 1.25 m/s^2 。CJJ/T 310-2021《高速磁浮交通设计标准》也沿用了此值。较大的横坡可以更好地适应地形,从而降低选线难度。高速磁悬浮车辆运行在开放空间中,最大横坡主要与轨道梁部件受力、制造工艺等因素有关;超高速磁悬浮线路具有轨距较小、悬浮间隙较大等特点,同时考虑横坡对最小曲线半径取值的影响,本文取 α 为 8° 、 12° 、 16° 进行研究。

利用式(1)计算不同速度下横坡 α 为 8° 、 12° 、 16° 时的最小平面曲线半径,其中 β 取 0 , R_v 取 ∞ ,计算结果如表2所示。

表2 最小平面曲线半径取值表(m)

$v/(\text{km/h})$	400	600	800	1 000	1 200
$\alpha = 8^{\circ}$	4 700	10 500	18 700	29 200	42 100
$\alpha = 12^{\circ}$	3 700	8 300	14 700	22 900	33 000
$\alpha = 16^{\circ}$	3 000	6 800	12 000	18 800	27 000

由表2可知,速度为 600 km/h 以内时,最小平面曲线半径不超过 $10 500 \text{ m}$;速度为 $1 000 \text{ km/h}$ 时,最小平面半径超过了 $18 800 \text{ m}$ 。

2.2 缓和曲线参数

2.2.1 缓和曲线线型

CJJ/T 310-2021《高速磁浮交通设计标准》中规定,直线和圆曲线之间、圆曲线和圆曲线之间缓和曲线线型为正弦型,无夹直线的反向曲线采用一波正弦型缓和曲线连接。根据吴昊研究结果,超高速磁悬浮线路的缓和曲线线型同样推荐采用一波正弦型。

2.2.2 最小缓和曲线长度

CJJ/T 310-2021《高速磁浮交通设计标准》规定缓和曲线最小长度需满足横坡扭转率、侧向加速度时变率和法向加速度时变率的要求。

(1) 横坡扭转率

按规范中横坡扭转率限值要求,最小缓和曲线长度按式(2)计算:

$$L_{S_{\min}} = 2 \left| \frac{\alpha_e - \alpha_a}{\Delta \alpha_{\max}} \right| \quad (2)$$

式中: $L_{S_{\min}}$ ——缓和曲线最小长度(m);

α_a 、 α_e ——缓和曲线起、终点扭转角($^{\circ}$);

$\Delta \alpha_{\max}$ ——最大横坡扭转率($^{\circ}/\text{m}$)。

横坡扭转率与车辆运行速度有关,速度越高,允许的最大扭转率越低,且最大扭转率不超过 $0.05^{\circ}/\text{m}$ 。最大横坡扭转率可按式(3)计算:

$$\Delta \alpha_{\max} = 1.5 \left| \frac{\alpha_e - \alpha_a}{v} \right| \quad (3)$$

由式(3)计算得到的各速度下横坡扭转率如表3所示。

表3 横坡扭转率取值表($^{\circ}/\text{m}$)

$v/(\text{km/h})$	400	600	800	1 000	1 200
$\alpha = 8^{\circ}$	0.030	0.020	0.015	0.012	0.010
$\alpha = 12^{\circ}$	0.045	0.030	0.023	0.018	0.015
$\alpha = 16^{\circ}$	0.050	0.040	0.030	0.024	0.020

(2) 侧向加速度时变率

参照《高速磁浮交通设计标准》,对于正弦型缓和曲线,取最不利情况,满足最大侧向加速度时变率限值 0.5 m/s^3 要求的缓和曲线最小长度如式(4)所示。

$$L_{S_{\min}} = \frac{v}{0.9} \quad (4)$$

(3) 垂向加速度时变率

参照《高速磁浮交通设计标准》,对于正弦型缓和曲线,取最不利情况,满足最大垂向加速度时变率限值 0.5 m/s^3 要求的缓和曲线最小长度如式(5)所示。

$$L_{S_{\min}} = \frac{v}{3.6} \sqrt[3]{\frac{4\pi^3 \times b_c \times |\alpha_e - \alpha_a|}{0.5 \times 180}} \quad (5)$$

式中: b_c ——车体宽度(按 3 m 考虑)。

由式(3)~式(5)计算得到的满足横坡扭转率、侧向加速度时变率和垂向加速度时变率要求的最小缓和曲线长度如表4所示。

表4 最小缓和曲线长度表(m)

约束条件	$v/(\text{km/h})$	400	600	800	1 000	1 200
横坡扭转率	$\alpha = 8^{\circ}$	540	800	1 070	1 340	1 600
	$\alpha = 12^{\circ}$	540	800	1 070	1 340	1 600
	$\alpha = 16^{\circ}$	640	800	1 070	1 340	1 600
侧向加速度时变率	任意 α	450	670	890	1 120	1 340
垂向加速度时变率	$\alpha = 8^{\circ}$	360	540	720	900	1 070
	$\alpha = 12^{\circ}$	410	620	820	1 030	1 230
	$\alpha = 16^{\circ}$	450	680	900	1 130	1 350
综合取值	$\alpha = 8^{\circ}$	540	800	1 070	1 340	1 600
	$\alpha = 12^{\circ}$	540	800	1 070	1 340	1 600
	$\alpha = 16^{\circ}$	640	800	1 070	1 340	1 600

由表4可知,高速磁悬浮线路和超高速磁悬浮线路的最小缓和曲线长度主要由横坡扭转率决定;速度在 600 km/h 以上时,横坡为 8° 、 12° 、 16° 时的最小缓

和曲线长度相同,速度为1 000 km/h时最小缓和曲线长度为1 340 m。

3 动力学仿真对比分析

为了研究高速及超高速磁悬浮线路参数的计算取值的合理性,本文利用多体动力学软件进行了动力学仿真对比分析。利用建立的超高速磁悬浮车辆和高速磁悬浮车辆模型,设置了相应的曲线半径和缓和曲线长度等线路参数,计算了两种车辆在不同参数下的运行状态。对两种车辆运行过程中的车辆振动加速度和电磁力指标进行统计,分析其动力学性能受曲线半径和缓和曲线长度影响的规律,并验证上文计算取值是否合理。

3.1 曲线半径影响分析

模拟一段“缓和曲线+圆曲线+缓和曲线”的线路,选取以下参数进行计算:

(1)超高速磁悬浮:圆曲线转向角为 50° ,缓和曲线长度为1 340 m,轨距为1.38 m,圆曲线上横坡为 16° ,车辆运行速度为1 000 km/h。

(2)高速磁悬浮:圆曲线转向角为 50° ,缓和曲线长度为800 m,轨距为2.8 m,圆曲线上横坡为 12° ,车辆运行速度为600 km/h。

计算得到的高速磁悬浮各动力学指标与曲线半径的关系如图1所示,超高速磁悬浮各动力学指标与曲线半径的关系如图2所示。

由图1可知,车辆振动加速度、悬浮力和导向力均随着曲线半径的增大而减小;曲线半径从4 000 m增大到8 000 m时,各指标下降较快,8 000 m后继续增大时各指标下降较慢,故上文计算得到的最小曲线半径为8 300 m处于拐点附近,取值较为合理。

由图2可知,车辆振动加速度、悬浮力和导向力大致随着曲线半径的增大而减小;曲线半径从15 000 m增大到19 000 m时,各指标下降较快,19 000 m后继续增大时各指标下降较慢,故上文计算得到的最小曲线半径为18 800 m处于拐点附近,取值较为合理。

3.2 缓和曲线长度影响分析

模拟一段“缓和曲线+圆曲线+缓和曲线”的线路,选取以下参数进行计算:

(1)超高速磁悬浮:圆曲线转向角为 50° ,曲线半径为18 800 m,轨距为1.38 m,圆曲线上横坡为 16° ,车辆运行速度为1 000 km/h。

(2)高速磁悬浮:圆曲线转向角为 50° ,曲线半径为8 300 m,轨距为2.8 m,圆曲线上横坡为 12° ,车辆

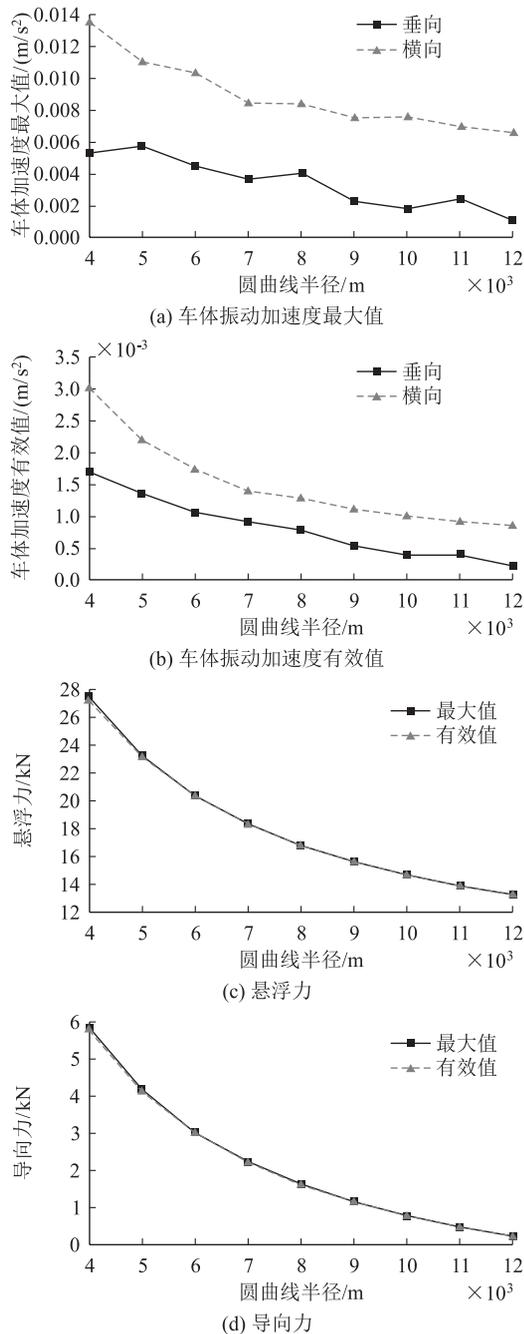


图1 高速磁悬浮动力学指标与曲线半径关系图

运行速度为600 km/h。

计算得到的高速磁悬浮各动力学指标与缓和曲线长度的关系如图3所示,超高速磁悬浮各动力学指标与缓和曲线长度的关系如图4所示。

由图3可知,车体垂向加速度和车体横向加速度随着缓和曲线长度的增大而减小,且下降速度逐渐变缓,下降拐点出现在800 m附近;悬浮力和导向力的有效值随着曲线半径的增大而减小,最大值先减小后增大,但拐点都在600 m和800 m之间,而上文计算

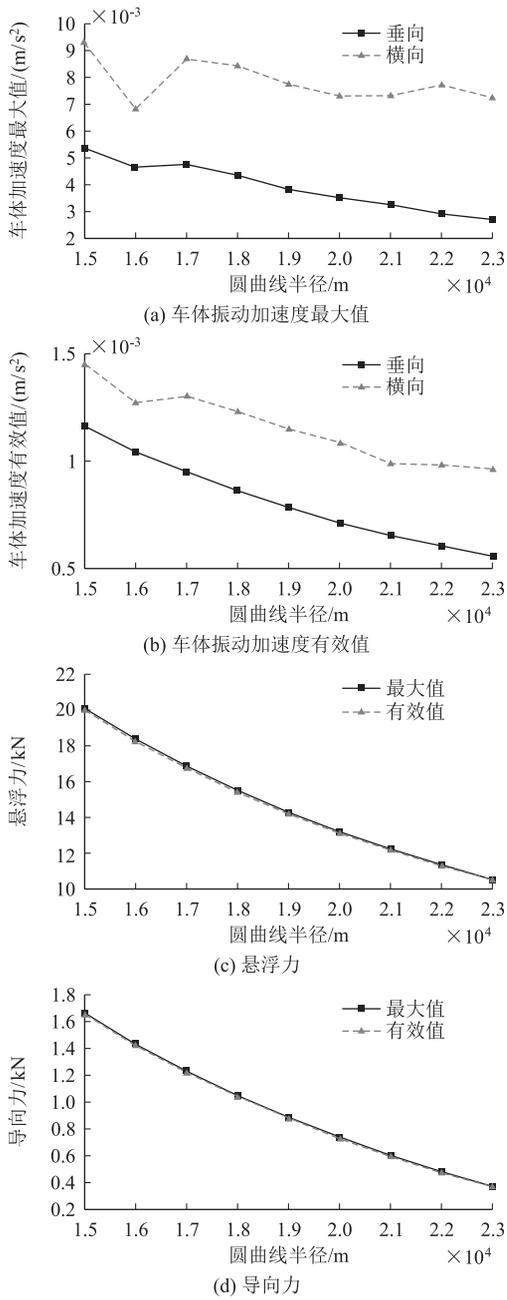


图 2 超高速磁悬浮动力学指标与曲线半径关系图

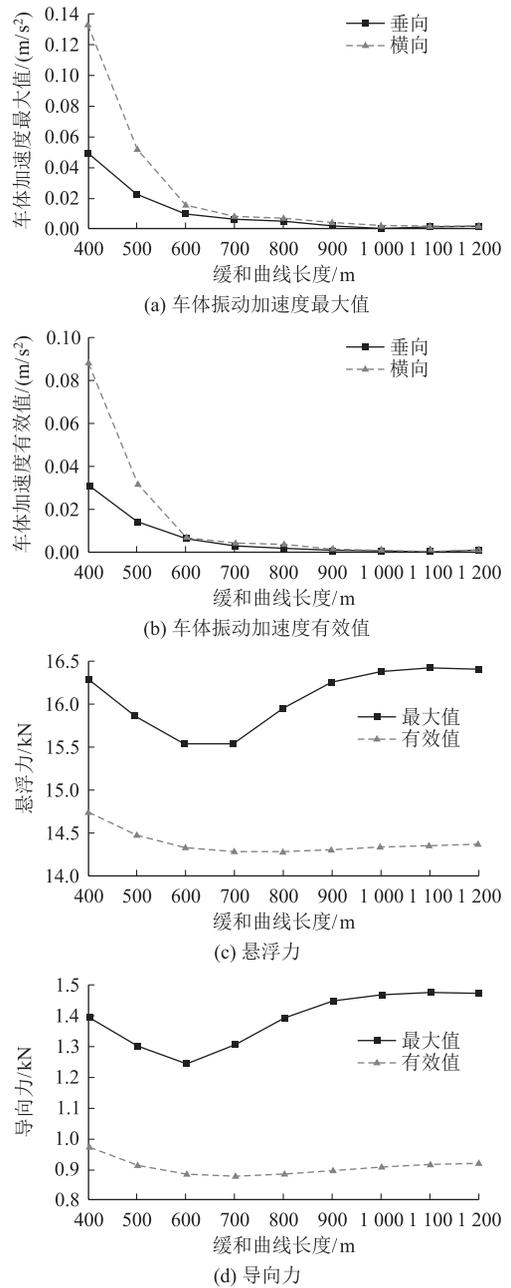


图 3 高速磁悬浮动力学指标与缓和曲线长度关系图

得到的最小缓和曲线长度 800 m 处于拐点附近,取值合理。

由图 4 可知,超高速磁悬浮动力学指标与缓和曲线长度的关系与高速磁悬浮类似,上文计算得到的最小缓和曲线长度 1 340 m 同样处于拐点附近,取值合理。

综上所述,从动力学评估角度出发,对于超高速磁悬浮线路,最小圆曲线半径取 18 800 m、最小缓和曲线长度取 1 340 m 合理;对于高速磁悬浮线路,最小圆曲线半径取 8 300 m、最小缓和曲线长度取 800 m 合理。

4 结论

本文从磁悬浮轨道交通的基本原理、技术特点等方面出发,对比分析了高速磁悬浮和超高速磁悬浮交通的制式差异和线路平面参数差异,并且采用动力学仿真手段验证了规范公式计算结果的合理性,得到主要结论如下:

- (1) 在线路设计影响因素方面,相比于高速磁悬浮交通,超高速磁悬浮交通具有悬浮间隙较大、轨距较小的特点。
- (2) 利用规范理论公式推导得到高速磁悬浮最高

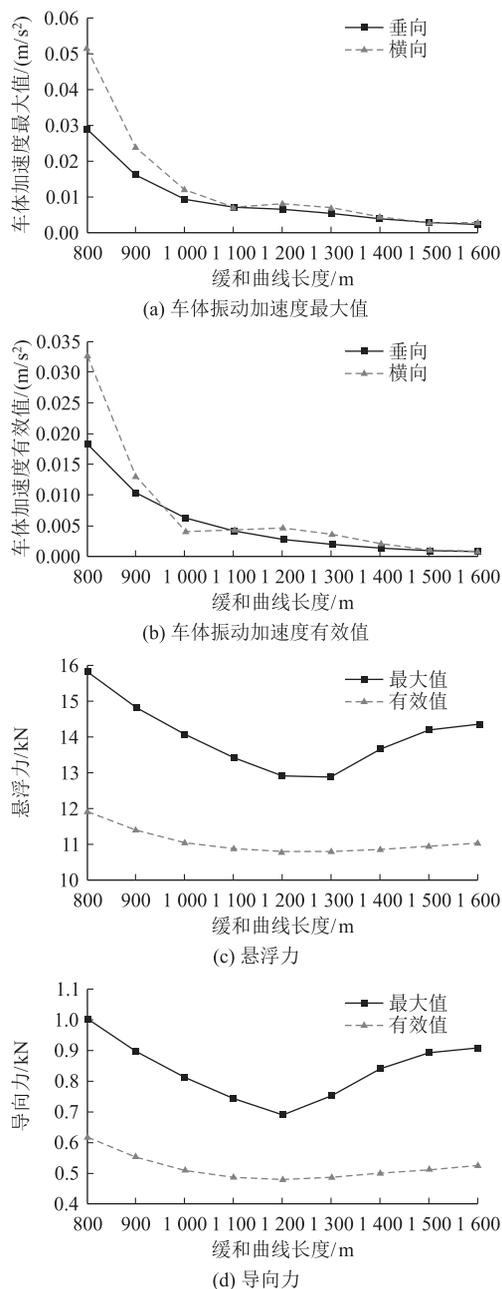


图4 超高速磁悬浮动力学指标与缓和曲线长度关系图

设计速度为 600 km/h 时,对应的圆曲线半径最小值为 8 300 m,缓和曲线最小长度为 800 m;超高速磁悬浮设计速度为 1 000 km/h 时,对应的圆曲线最小半径为 18 800 m,缓和曲线最小长度为 1 340 m。

(3) 车辆-线路动力学仿真结果表明,规范得到平面参数取值比较合理。本文研究成果可为高速及超高速磁悬浮线路平面设计提供理论依据和技术指导。

参考文献:

[1] 熊嘉阳,邓自刚. 高速磁悬浮轨道交通研究进展[J]. 交通运输

工程学报, 2021, 21(1): 177-198.

XIONG Jiayang, DENG Zigang. Research Progress of High-speed Maglev Rail Transit [J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 177-198.

[2] 邓自刚,刘宗鑫,李海涛,等. 磁悬浮列车发展现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2022, 57(3): 455-474, 530.

DENG Zigang, LIU Zongxin, LI Haitao, et al. Development Status and Prospect of Maglev Train [J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2022, 57(3): 455-474, 530.

[3] 米隆,招阳,魏庆朝,等. 磁浮交通系统线路缓和曲线参数取值方法研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 92-95, 100.

MI Long, ZHAO Yang, WEI Qingchao, et al. Research on Alignment Parameters of High-speed Maglev Railway Transition Curve [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4): 92-95, 100.

[4] 易思睿,杨冬营,吴跃成. 200 km/h 中速磁浮最小竖曲线半径取值研究[J]. 高速铁路技术, 2022, 13(4): 24-29.

YI Sirong, YANG Dongying, WU Yuecheng. Study on Determining Minimum Radius of Vertical Curve for 200 km/h Medium Speed Maglev Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2022, 13(4): 24-29.

[5] 代一帆,刘万明. 高速磁浮平、竖曲线重叠地段线路参数研究[J]. 交通科学与工程, 2019, 35(2): 100-105.

DAI Yifan, LIU Wanming. Research on Alignment Parameters of High-speed Maglev at Horizontal and Vertical Curve Overlapped Region [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2019, 35(2): 100-105.

[6] 谢毅,寇峻瑜,余浩伟. 高速磁浮最小曲线半径及缓和曲线长度研究[J]. 铁道工程学报, 2020, 37(4): 43-48.

XIE Yi, KOU Junyu, YU Haowei. Research on the Minimum Plane Curve Radius and Transition Curve Length of High-speed Maglev [J]. Journal of Railway Engineering Society, 2020, 37(4): 43-48.

[7] 吴昊,王飞,郭牧凡,等. 真空管超高速磁浮交通系统平面曲线参数运动学分析[J]. 铁道标准设计, 2023, 67(9): 21-27.

WU Hao, WANG Fei, GUO Mufan, et al. Kinematic Analysis on Plane Curve Parameter of Vacuum Tube Ultra-high-speed Maglev Transportation System [J]. Railway Standard Design, 2023, 67(9): 21-27.

[8] 唐文冰,肖立业,王粟,等. 磁悬浮轨道交通中的磁悬浮导向方式研究综述[J]. 电工电能新技术, 2022, 41(5): 45-60.

TANG Wenbing, XIAO Liye, WANG Su, et al. Summary of Research on Levitation-guidance Modes in Maglev Rail Transportation Technology [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2022, 41(5): 45-60.

[9] TB 10630-2019 磁浮铁路技术标准[S].

TB 10630-2019 Standard for Technology of Maglev Railway[S].

[10] CJJ/T 310-2021 高速磁浮交通设计标准[S].

CJJ/T 310-2021 Standard for Design of High-speed Maglev Transit[S].

[11] 刘士宽,王磊,王路忠,等. 电动悬浮列车及车载超导磁体研究综述[J]. 西南交通大学学报, 2023, 58(4): 734-753.

(下转第 28 页)

- 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,柏赟,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.