

文章编号: 1674—8247(2024)01—0007—06

DOI:10.12098/j.issn.1674-8247.2024.01.002

600 km/h 高速磁浮线路参数研究

伍卫凡

(中国铁路设计集团有限公司, 天津 300308)

摘 要:线路参数是铁路选线最基本的设计参数,不仅是列车安全、快速和舒适运行的技术保障,而且直接影响着铁路项目的工程造价及投资等重大问题。本文基于车线行驶动力学理论,以旅客乘坐舒适度要求为标准,对 600 km/h 高速磁浮铁路线路平纵断面参数进行研究,总结线路参数变化规律,提出 600 km/h 高速磁浮铁路线路设计参数建议值。研究成果可为高速磁浮铁路选线设计提供技术参考。

关键词:高速磁浮;线路参数;曲线半径;缓和曲线

中图分类号: U237; U212.32 **文献标志码:** A

Study on Track Parameters of 600 km/h High-speed Maglev

WU Weifan

(China Railway Design Corporation, Tianjin 300308, China)

Abstract: Track parameters are the most basic design parameters in the selection of railway routes and the technical guarantee ensuring the safety, speed, and passenger comfort of train operation. They directly affect significant aspects such as the engineering cost and investment of railway projects. Drawing on vehicle-track dynamic theory and prioritizing passenger comfort requirements, this paper investigates the horizontal and vertical alignment parameters for a 600 km/h high-speed maglev railway. It summarized the patterns of change in track parameters and offers recommended values for track design parameters specific to the 600 km/h high-speed maglev railway. The findings can provide technical reference for the route selection and design of high-speed maglev railway.

Key words: high-speed maglev; track parameters; curve radius; transition curve

近年来,磁浮铁路技术逐渐成为我国轨道交通领域的研究热点,中低速磁浮技术逐渐成熟并实现工程化应用,高速磁浮技术与工程试验也在逐渐深入^[1-5]。

作为一种新的轨道交通方式,高速磁浮铁路在线路设计和参数选取方面与轮轨铁路有很大的不同。科学合理地确定高速磁浮铁路线路参数取值,是列车安全、平稳、舒适运行的技术保障。我国相关学者对此有一些初步的研究成果。招阳^[6]等对不同速度、横

坡、纵坡等条件下的线路平、竖圆曲线参数进行了计算研究,得到了结合线路具体技术条件的参数合理匹配取值;苟智平^[7]从舒适度条件出发,提出了 500 km/h 高速磁浮线路平纵面设计参数的建议值;胡立成^[8]以车辆二系结构对线路的几何约束为基础,考虑制造和安装误差和旅客乘坐舒适度要求,对高速磁浮线路设计的最小平曲线半径和最小竖曲线半径进行了研究分析;谢毅^[9]等基于行驶动力学理论,从旅客舒适度角度出发,对 600 km/h 高速磁浮线路最小曲线半径

收稿日期:2023-11-10

作者简介:伍卫凡(1972-),男,教授级高级工程师。

基金项目:中国铁路设计集团有限公司科技开发项目(2023A0223807)

引文格式:伍卫凡. 600 km/h 高速磁浮线路参数研究[J]. 高速铁路技术,2024,15(1):7-12.

WU Weifan. Study on Track Parameters of 600 km/h High-speed Maglev[J]. High Speed Railway Technology, 2024, 15(1):7-12.

和缓和曲线长度进行了初步研究;还有学者应用行驶动力学理论,结合工程技术条件,对平曲线、竖曲线地段速度、圆曲线半径、缓和曲线长度和横坡等主要技术参数匹配关系进行了量化研究。

本文根据 TB 10630-2019《磁浮铁路技术标准(试行)》^[10],基于旅客乘坐舒适度要求,计算得出 600 km/h 高速磁浮铁路线路参数取值,研究成果可为后期高速磁浮交通的选线设计提供数据支撑和参考依据。

1 磁浮铁路舒适度指标

铁路车辆在轨道上运行时应首先确保安全性,在此基础上力求平稳、舒适地将旅客和货物运输至目的地。磁浮铁路采用悬浮非接触式车轨关系,从构造和技术上避免了轮轨铁路列车脱轨和倾覆的可能性,故磁浮铁路线路参数取值主要受旅客乘坐舒适度的影响。

旅客乘坐舒适度主要取决于列车爬坡、转弯时产生的侧向加速度、法向加速度及相应的冲击等。根据上海磁浮示范线经验,参考我国磁浮铁路技术标准,各舒适度指标限值如表 1 所示。

表 1 舒适度限值表

项目	一般情况		困难情况	
最大启动/制动加速度 $a_x/(\text{m/s}^2)$	1.0		1.5	
最大侧向加速度 $a_y/(\text{m/s}^2)$	指向曲线 外侧	1.0	指向曲线 外侧	1.25
	指向曲线 内侧	0.5	指向曲线 内侧	0.5
最大法向加速度 $a_z/(\text{m/s}^2)$	凸曲线	0.5	凸曲线	0.6
	凹曲线	1.0	凹曲线	1.2
纵向加速度时变率 $\dot{a}/(\text{m/s}^3)$	0.5			
侧向加速度时变率 $\dot{a}/(\text{m/s}^3)$	0.5		1.0(线路控制点)	
法向加速度时变率 $\dot{a}/(\text{m/s}^3)$	0.5		1.0(线路控制点)	
合成加速度时变率 $\dot{a}/(\text{m/s}^3)$	1.0			

2 高速磁浮列车行驶动力学模型

磁浮列车在平竖曲线重叠情况下的受力分析如图 1 所示。建立 y 轴、 z 轴方向上的磁浮列车受力平衡方程:

$ma_y + mg\cos\beta\sin\alpha = F_v\sin\alpha + F_H\cos\alpha$ (1)

$mg\cos\alpha\cos\beta + F_H\sin\alpha = F_v\cos\alpha + N + ma_z$ (2)

式中: m ——磁浮列车质量(kg);
 v ——运行速度(km/h);
 α ——线路横坡角($^\circ$);
 β ——线路纵坡角($^\circ$).

$N \approx mg$ (3)

$F_H = \frac{m(v\cos\beta/3.6)^2}{R_H}$ (4)

$F_v = \frac{m(v/3.6)^2}{R_v}$ (5)

式中: N ——沿竖曲线法向的支持力(N);
 F_H ——平曲线上所受离心力(N);
 F_v ——竖曲线上所受离心力(N).

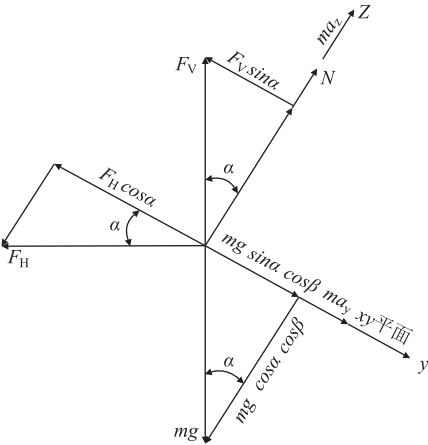


图 1 高速磁浮列车受力分析示意图

线路选线时,应综合考虑列车运行的平稳性和旅客乘坐舒适性,各项加速度不得超过规定限值。通过选择适当的线路参数,保证尽可能小的侧向加速度和法向加速度。在正常运营中,允许最大牵引和制动加速度 a_x 为 $1.5 m/s^2$ 。

根据式(1)可得出侧向加速度:

$a_y = \frac{(v/3.6)^2}{R_H}\cos\alpha\cos^2\beta - \left[g\cos\beta + \frac{(v/3.6)^2}{-R_v}\right]\sin\alpha$ (6)

根据式(2)可得出法向加速度:

$a_z = \frac{(v/3.6)^2}{R_H}\sin\alpha\cos^2\beta + \left[g\cos\beta + \frac{(v/3.6)^2}{-R_v}\right]\cos\alpha - g$ (7)

式中: a_y ——侧向加速度(m/s^2);
 a_z ——法向加速度(m/s^2);
 R_H ——平曲线半径(m);
 R_v ——竖曲线半径(m).

磁浮铁路选线时根据冲击(加速度随时间的变化率,又称“加速度时变率”)的限值来确定缓和曲线长度。为提高旅客乘坐舒适度,应尽可能减小冲击值。

3 高速磁浮线路平面参数研究

3.1 曲线半径

最小平曲线半径是线路主要设计标准之一,它与

磁浮铁路行车安全、旅客乘坐舒适度等行车质量指标,行车速度、运行时间等技术指标和工程费、运营费等经济指标有关。影响线路平面最小曲线半径的因素主要是列车构造要求、舒适度要求和轨道梁制造安装要求。上海磁浮示范线运行的德国 TR08 型磁浮车辆最小构造半径为 350 m,由舒适度确定的平曲线半径计算公式:

$$R_H = \left| \frac{(v/3.6)^2 \cos \alpha \cos^2 \beta}{a_y + \left[g \cos \beta + \frac{(v/3.6)^2}{-R_v} \right] \sin \alpha} \right| \quad (8)$$

由式(8)可知,由舒适度确定的平曲线半径主要受纵断面坡度、竖曲线半径、横坡角及侧向加速度 4 个因素的影响。600 km/h 条件下平面曲线半径与纵断面坡度、竖曲线半径、横坡角及侧向加速度的变化关系如图 2 所示。

由图 2 可知,纵断面坡度、竖曲线半径对平面曲线半径影响较小,横坡角及侧向加速度对平面曲线半径影响较大,且随着横坡角和侧向加速度的增大,平面曲线半径均呈减小现象。另外,当侧向加速度大于 0.41 m/s^2 时,侧向加速度变化对平曲线半径影响也较小。因此,影响平曲线半径的主要因素应为横坡角的取值,竖曲线半径可按 ∞ 、纵坡角可按 0 考虑。此时,平曲线半径计算公式可简化为:

$$R_H = \left| \frac{(v/3.6)^2 \cos \alpha}{a_y + g \sin \alpha} \right| \quad (9)$$

上海高速磁浮示范线横坡设置允许值一般不超过 12° 。相关研究成果表明,轮轨系统客运专线实设超高允许值为 200 mm,对应横坡角为 7.7° ;当实设超高大于 200 mm 时,列车在曲线上停车时,部分旅客感到站立不稳,行走困难且有头晕不适之感。因此,磁浮铁路技术标准(试行)中规定区间最大横坡角一般为 8° ,困难为 12° 。

横坡角分别为 0° 、 8° 、 12° ,侧向加速度分别为 1.0 m/s^2 和 1.25 m/s^2 情况下,不同运行速度条件下平曲线半径与侧向加速、横坡角的变化规律如图 3 所示。

由图 3 可知,对于某一横坡角和侧向加速度,速度越大,所需要的平面曲线半径也越大;对于某一速度和横坡角,侧向加速越大或横坡角越大,所需要的平面曲线半径也越小。因此,平面曲线半径计算时,侧向加速度一般情况下取 1.0 m/s^2 ,困难情况下取 1.25 m/s^2 。此时,与设计速度匹配的平面最小曲线半径如表 2 所示。

3.2 缓和曲线长度

缓和曲线是线路平面设计的主要参数之一。为

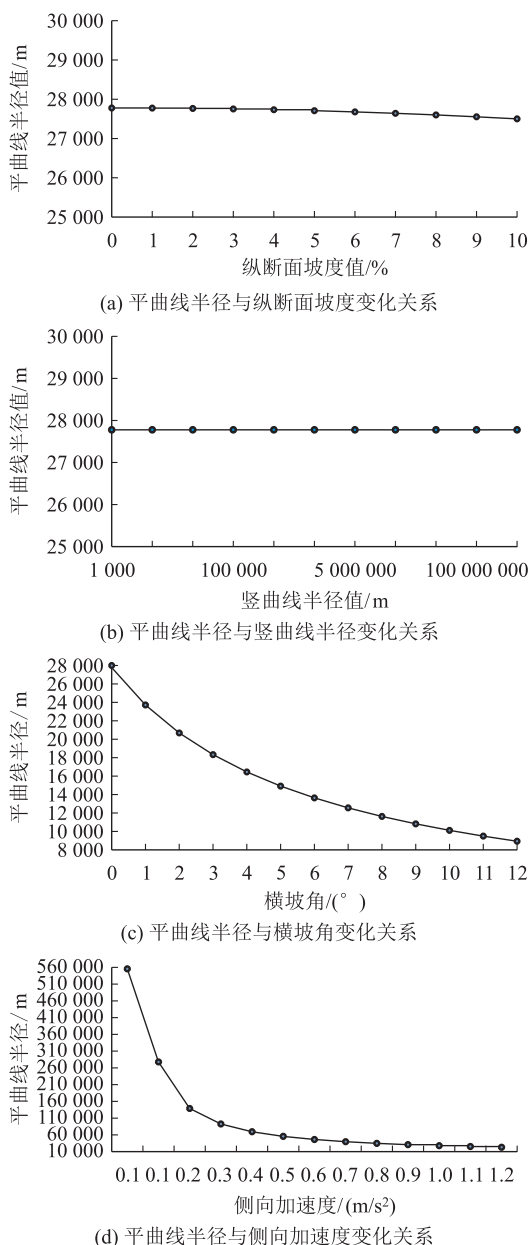


图 2 高速磁浮平面曲线半径影响因素分析图

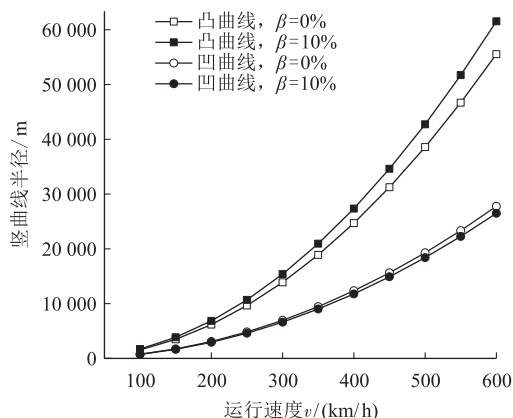


图 3 平曲线半径影响规律图

表 2 平面最小曲线半径表(m)				
行车速度/(km/h)	一般情况		困难情况	
	8°	12°	8°	12°
100	650	650	650	650
200	1 300	1 000	1 200	950
300	2 950	2 250	2 650	2 100
400	5 200	4 000	4 700	3 700
500	8 100	6 250	7 350	5 750
600	11 650	8 950	11 000	8 300

保证列车运行的安全和旅客乘坐舒适度的要求,缓和曲线应有足够的长度。但过长的缓和曲线将影响平面选线和纵断面设计的灵活性,引起工程投资的增大^[11]。因此,缓和曲线长度的选择应因地制宜,从长到短,合理选用。由于行车动力学及制造技术的原因,磁浮列车缓和曲线的计算,取决于侧向加速度时变率、法向加速度时变率及最大允许横坡扭转率等相关参数的取值。

(1) 超高横坡为:

$$\alpha = \alpha \times \left[\frac{L}{L_e} - \frac{1}{2\pi} \times \sin\left(\frac{L}{L_e} \times 2\pi\right) \right]$$

(10)

式中: L ——左右侧定子中心距(m);

L_e ——缓和曲线长度(m)。

(2) 由侧向加速度时变率要求的缓和曲线最小长度为:

$$L_{\min} = \left| 2 \times \frac{a_{ye}SGN(R_{He}) - a_{ya} \times SGN(R_{Ha})}{\dot{a}_{y\max}} \times \frac{v}{3.6} \right|$$

(11)

式中: L_{\min} ——缓和曲线最小长度(m);

a_{ye} ——缓和曲线终点的侧向加速度(m/s^2);

a_{ya} ——缓和曲线起点的侧向加速度(m/s^2);

$\dot{a}_{y\max}$ ——最大侧向加速度时变率(m/s^3);

SGN ——数值的正负号;

R_{He} ——缓和曲线终点的曲线半径(m);

R_{Ha} ——缓和曲线起点的曲线半径(m);

v ——行车速度(m/s)。

(3) 由法向加速度时变率要求的缓和曲线最小长度为:

$$L_{\min} = \sqrt[3]{(v/3.6)^3 \times b_G \times 4\pi^2 \times \frac{|\alpha_e - \alpha_a|}{\rho \times \dot{a}_{z\max}}}$$

(12)

式中: α_e ——缓和曲线终点扭转角($^\circ$);

α_a ——缓和曲线起点扭转角($^\circ$);

b_G ——车体宽度(m);

$\dot{a}_{z\max}$ ——最大法向加速度时变率(m/s^3)。

(4) 由横坡扭转率要求的最小缓和曲线长度为:

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

(13)

式中: $\Delta\alpha_{\max}$ ——线路允许最大扭转率($^\circ/\text{m}$)。

600 km/h 情况下,横坡扭转率、侧向加速度时变率及法向加速度时变率确定的最小缓和曲线长度如图 4 所示。

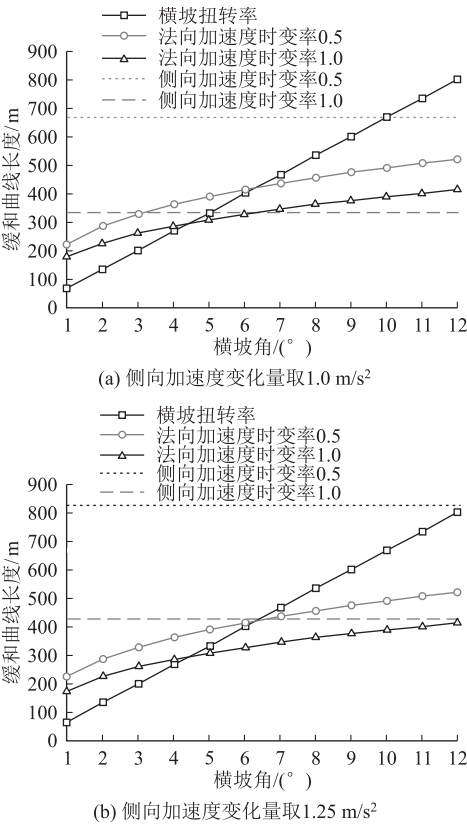


图 4 缓和曲线长度计算结果图

由图 4 可知:

(1) 对于侧向加速度,最小缓和曲线长度与横坡角变化无关,仅与侧向加速度变化量及侧向加速度时变率有关。对于横坡扭转率和法向加速度时变率,两者确定的最小缓和曲线长度均随横坡角的增大而增大。

(2) 当侧向加速度变化量为 1.0 m/s^2 时,最小缓和曲线长度与侧向加速度时变率、横坡角均有关系。侧向加速度时变率取 1.0 m/s^3 且当横坡角大于 6° 时,最小缓和曲线长度由横坡角确定,随横坡角的增大而增大;侧向加速度时变率取 0.5 m/s^3 且当横坡角大于 10° 时,最小缓和曲线长度由横坡角确定,随横坡角的增大而增大。

(3) 当侧向加速度变化量为 1.25 m/s^2 时,最小缓和曲线长度与侧向加速度时变率、横坡角均有关系。侧向加速度时变率取 1.0 m/s^3 且当横坡角大于 6° 时,最小缓和曲线长度由横坡角确定,随横坡角的增大而

增大;侧向加速度时变率取 0.5 m/s^3 时,最小缓和曲线长度与横坡角变化无关。

(4) 侧向加速度变化量和侧向加速度变化率对最小缓和曲线长度影响较大,而侧向加速度变化率是影响旅客乘坐舒适度的主要参数,一般不超过 0.5 m/s^3 ,仅在线路控制点时可采用 1.0 m/s^3 。因此,为减小缓和曲线长度,建议曲线半径计算时侧向加速度不超过 1.0 m/s^2 。

综上所述,最小缓和曲线应根据设计速度、曲线半径和地形条件,满足允许侧向加速度时变率、允许横坡扭转率和允许法向加速度时变率要求,600 km/h 高速磁浮最小缓和曲线长度计算如表 3 所示。

表 3 600 km/h 时最小缓和曲线长度表(m)							
横坡角 (°)	侧向加速度时 变率		法向加速度时 变率		横坡 扭转	建议值	
	一般	困难	一般	困难		一般	困难
2	667	333	287	228	133	667	333
4			361	287	267	667	333
6			414	328	400	667	400
8			455	361	533	667	533
10			491	389	667	667	667
12			521	414	800	800	800

4 线路纵断面参数

4.1 竖曲线半径

为保证列车在变坡点的安全运行以及满足乘客的舒适性要求,应在磁浮线路纵断面变坡处设置竖曲线,以缓和纵向变坡处因行车动量变化而产生的冲击作用。根据铁科院相关研究成果及试验数据,高速轮轨铁路竖曲线半径由旅客舒适度要求控制,且乘客舒适度允许的离心加速度一般为 $0.4/s^3$,困难情况下为 $0.5/s^3$ 。高速磁浮线路竖曲线半径的主要影响因素为车辆构造、旅客舒适度和系统公差。高速磁浮由磁浮车辆构造所决定的竖曲线最小半径为 530 m,此外,由于高速磁浮采用“以直拟曲”的办法进行定子排布,为减小设计占用的误差比重,竖曲线半径一般不宜过小。

考虑旅客乘坐舒适度要求,高速磁浮最小竖曲线半径 R_{Vmin} 计算公式如式(14)所示,最小竖曲线半径受行车速度、平曲线半径、允许最大法向加速度、横坡角、纵坡角等因素的影响,影响分析如图 5、图 6 所示。

$$R_{Vmin} = \left| \frac{(v/3.6)^2 \cos\alpha}{g(\cos\alpha\cos\beta - 1) + (v/3.6)^2 \frac{\sin\alpha\cos^2\beta}{R_H} - a_{zmax}} \right|$$

(14)

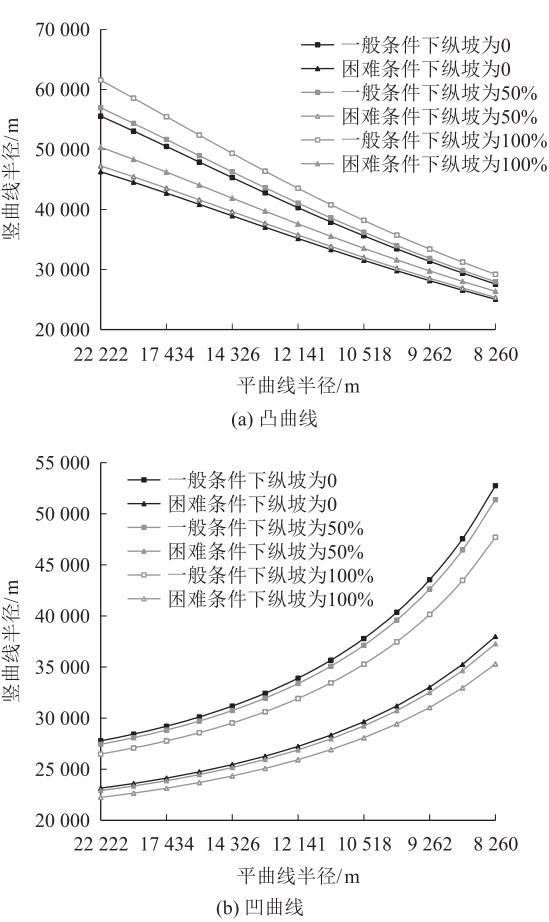


图 5 600 km/h 竖曲线与平曲线、纵坡角变化关系示意图

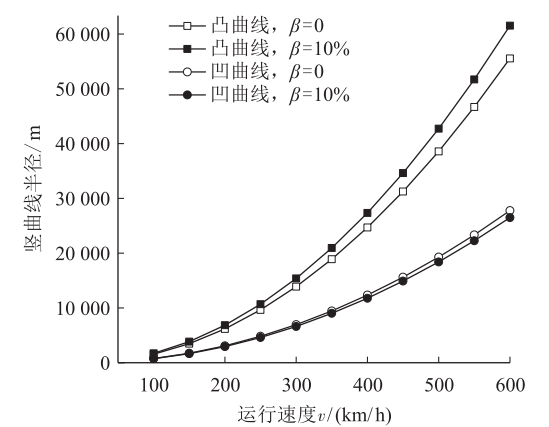


图 6 竖曲线与速度变化关系示意图

由图 5、图 6 可知:

(1) 纵坡对竖曲线半径的影响:对于凸曲线,法向加速度方向与重力加速度方向相反,纵坡越大,所要求的竖曲线半径越大,但随着纵坡的增加,其对竖曲线半径的影响程度降低;对于凹曲线,法向加速度方向与重力加速度方向一致,纵坡越大,所要求的竖曲线半径越小,且随着纵坡的增加,其对竖曲线半径的

影响程度增大。因此,竖曲线设计时,对于凸曲线,纵坡可考虑采用最大坡度;对于凹曲线,纵坡可考虑采用 0。

(2)平曲线对竖曲线半径的影响:对于凸曲线,平曲线半径越小,相应的横坡角越大,所要求的竖曲线半径越小;对于凹曲线,平曲线半径越小,相应的横坡角越大,所要求的竖曲线半径越大。因此,竖曲线设计时,对于凸曲线,平曲线半径可考虑采用直线;对于凹曲线,平曲线半径可考虑采用设计平面曲线半径。当然,为降低竖曲线长度,当凹曲线位于直线地段时,平曲线半径可根据实际情况采用 ∞ 。

(3)速度对竖曲线半径的影响:无论竖凸曲线还是竖曲线,竖曲线半径均随速度的增加而增加,且速度越大,竖曲线半径增加幅度越大;此外,对于某一速度,凹曲线所要求的竖曲线半径值小于凸曲线。

综上所述,最小竖曲线半径应根据设计速度、平面及纵断面条件,满足车辆构造、旅客舒适度和系统公差要求,600 km/h 高速磁浮最小竖曲线半径计算如表 4 所示。

表 4 最小竖曲线半径表

运行 速度/ (km/h)	凸曲线		凹曲线			
	一般 情况	困难 情况	一般情况		困难情况	
			$R_H = \infty$	$R_H = R_{Hmin}$	$R_H = \infty$	$R_H = R_{Hmin}$
100	1 710	1 400	772	1 465	643	1 055
150	3 847	3 149	1 736	3 297	1 447	2 375
200	6 839	5 598	3 086	5 860	2 572	4 221
250	10 686	8 747	4 823	9 157	4 019	6 596
300	15 387	12 596	6 944	13 186	5 787	9 498
350	20 944	17 145	9 452	17 948	7 877	12 928
400	27 355	22 393	12 346	23 442	10 288	16 886
450	34 621	28 341	15 625	29 669	13 021	21 371
500	42 742	34 989	19 290	36 628	16 075	26 384
550	51 718	42 337	23 341	44 320	19 451	31 925
600	61 549	50 385	27 778	52 744	23 148	37 993

4.2 竖缓和曲线长度

竖曲线缓和曲线采用回旋曲线,其最小长度主要由法向加速度时变率确定,要保证加速度变化不致过快,也就是加速度的变化时间就要足够长,缓和曲线需要有足够的长度。竖曲线缓和曲线的最小长度可按式(15)计算。

$$L_{min} = \left| \frac{\Delta a_z}{\dot{a}_{zmax}} \times \frac{v}{3.6} \right| \tag{15}$$

根据系统对舒适度的要求,考虑最不利的组合,

即在直缓点法向加速度为 0,缓圆点法向加速度达到最大值 α_{zmax} ,竖曲线缓和曲线最小长度如表 5 所示。

表 5 竖向缓和曲线最小长度表(m)

运行速度/(km/h)	一般情况		困难情况	
	凸曲线	凹曲线	凸曲线	凹曲线
100	28	56	17	33
150	42	83	25	50
200	56	111	33	67
250	69	139	42	83
300	83	167	50	100
350	97	194	58	117
400	111	222	67	133
450	125	250	75	150
500	139	278	83	167
550	153	306	92	183
600	167	333	100	200

5 结束语

本文基于列车行驶动力学理论,以旅客乘坐舒适度为指标,对高速磁浮线路平纵断面曲线半径和缓和曲线长度等参数进行了分析研究,提出了速度 600 km/h 高速磁浮铁路线路平纵断面参数的建议取值,研究成果对高速磁浮铁路线路设计及参数选取具有一定的指导意义。为了确保高速磁浮线路参数取值的可靠性和旅客乘坐舒适性,后续应在线路平纵断面设计的基础上,对空间线型组合序、旅客乘坐舒适度等进行动力学评估检验,进一步研究优化线路参数的取值。

参考文献:

[1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海: 上海科技出版社, 2003.
WU Xiangming. Maglev Train [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2003.

[2] 魏庆朝, 孔永健, 时瑾. 磁浮铁路系统与技术[M]. 2 版. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
WEI Qingchao, KONG Yongjian, SHI Jin. System and Technology for Maglev Transit [M]. 2nd ed. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.

[3] 胡叙洪, 伍卫凡. 磁浮交通技术与发展[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2021.
HU Xuhong, WU Weifan. Maglev Transportation Technology and Development [M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2021.

[4] 丁叁叁. 时速 600 公里高速磁浮交通系统[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2022.
DING Sansan. 600 km/h High-speed Maglev Transportation System [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 2022.

SUN Zongsheng, SHI Jin, SHEN Xiong. Research on Dynamics Calculation and Reasonable Values of Alignment Design Parameters at Overlapping Region of Vertical Curve with Horizontal Curve on High-speed Railway [J]. Railway Standard Design, 2013, 57(6): 1-4.

[2] 孙宗生. 高速铁路平竖曲线重合地段参数设置优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2013.

SUN Zongsheng. Study on Optimization of Parameter Setting in Overlapping Section of Horizontal and Vertical Curves of High-speed Railway [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2013.

[3] 王岗. 基于动力仿真的客货共线铁路平竖曲线重合设置研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.

WANG Gang. Research on Coincidence Setting of Horizontal and Vertical Curves of Passenger and Freight Railways Based on Dynamic Simulation [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

[4] 周素霞, 薛蕊. 缓和曲线线型对地铁车辆动力学参数的影响[J]. 北京交通大学学报, 2015, 39(3): 24-29.

ZHOU Suxia, XUE Rui. Influence of Transition Curves Act on Subway Wheel-rail Wear [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2015, 39(3): 24-29.

[5] TB 10621-2014 高速铁路设计规范[S].

TB 10621-2014 Code for Design of High Speed Railway [S].

[6] TB 10623-2014 城际铁路设计规范[S].

TB 10623-2014 Code for Design of Intercity Railway [S].

[7] TB 10098-2017 铁路线路设计规范[S].

TB 10098-2017 Code for Design of Railway Line [S].

[8] TB 10624-2020 市域(郊)铁路设计规范[S].

TB 10624-2020 Code for Design of Suburban Rail [S].

[9] DB44/T 2360-2022 城际铁路设计细则[S].

DB44/T 2360-2022 Design Guidelines for Intercity Railway [S].

[10] 练松良, 陈松林, 李向国. 客运专线竖曲线与平面曲线重叠的试验验证[J]. 铁道学报, 2005, 27(2): 75-79.

LIAN Songliang, CHEN Songlin, LI Xiangguo. Experimental Verification of Overlapping Vertical Curve and Plane Curve of Passenger Dedicated Line [J]. Journal of the China Railway Society, 2005, 27(2): 75-79.

[11] 谢毅, 时瑾, 林晓龙, 等. 400 km/h 高速铁路平竖重合地段线路方案动力学评估[J]. 高速铁路技术, 2021, 12(5): 1-7.

XIE Yi, SHI Jin, LIN Xiaolong, et al. Dynamic Evaluation of Railway Alignment in Horizontal and Vertical Overlapping Section of 400 km/h High-speed Railway [J]. High Speed Railway Technology, 2021, 12(5): 1-7.

[12] 胡建平. 300~350 km/h 客运专线平竖曲线重叠设置对舒适度的影响[J]. 高速铁路技术, 2010, 1(2): 34-39, 43.

HU Jianping. Vertical and Horizontal Curve Overlap Influence on Riding Comfort [J]. High Speed Railway Technology, 2010, 1(2): 34-39, 43.

(上接第12页)

[5] 易思蓉, 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.

[6] 招阳, 魏庆朝, 许兆义, 等. 高速磁浮线路圆曲线参数取值研究[J]. 北京交通大学学报, 2007, 31(4): 101-105.

ZHAO Yang, WEI Qingchao, XU Zhaoyi, et al. Research on Curve Parameters of High-speed Maglev Railway Route [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2007, 31(4): 101-105.

[7] 苟智平. 高速磁浮线路平纵面设计参数的建议[J]. 交通运输工程与信息学报, 2007, 5(4): 99-104.

GOU Zhiping. Parameters of the Line Plane and Profile Design for the High-speed Maglev-train [J]. Journal of Transportation Engineering and Information, 2007, 5(4): 99-104.

[8] 胡立成. 高速磁浮线路最小平竖曲线半径研究[J]. 城市轨道交通研究, 2010, 13(9): 43-47.

HU Licheng. Minimum Radius of Plane and Vertical Curves for High Speed Maglev Design [J]. Urban Mass Transit, 2010, 13(9): 43-47.

[9] 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.

[10] TB 10630-2019 磁浮铁路技术标准(试行)[S].

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

[11] 胡叙洪. 高速磁浮工程线路平面缓和曲线线型选择研究[J]. 铁道标准设计, 2005, 49(8): 7-9.

HU Xuhong. Study on Line Type Selection of Plane Transition Curve in High-speed Maglev Project [J]. Railway Standard Design, 2005, 49(8): 7-9.