

# 高速磁浮线路平纵面设计参数的建议

苟智平

中国中铁二院工程集团有限责任公司，土建二院，成都 610031

摘要：结合高速磁浮铁路系统的技术特点，分析磁浮线路平纵断面设计参数的确定方法与原则，通过借鉴高速轮轨铁路平纵断面设计参数的研究方法，从舒适度条件出发，提出了高速磁浮线路平纵断面设计参数的建议值，为高速磁浮线路平纵断面设计提供科学参考。

关键词：高速磁浮系统；线路；平纵断面；设计参数

中图分类号：U237

文献标识码：A

文章编号：1672-4747(2007)04-0099-06

## Parameters of the Line Plane and Profile Design for the High-Speed Maglev-Train

GOU Zhi-ping

2<sup>th</sup> Civil Engineering Department,

China Railway 2<sup>th</sup> Engineering Group Co.Ltd, Chengdu 610031, China

Abstract: Starting with analysis of the main factors of high-speed maglev-train system, through adopting the research methods of high-speed railway, analyzing the principles and the methods of high-speed maglev-train, and considering the condition of comfortable, the author proposed the parameter values of the line plane and profile design for the high-speed maglev-train. The results will be a reference for the design of high-speed maglev-train.

Key words: High-speed maglev-train, railway line, line plane and profile, design parameters

### 0 引言

磁浮线路平纵面设计参数是一项系统工程,也是

线路可行性研究的一项重要组成内容,属于综合性技术决策优化问题。高速磁浮铁路的运行速度被设计为400~550 km/h,其平、纵面设计参数的确定对线路

收稿日期：2006-10-13.

作者简介：苟智平（1981-），四川泸州人，硕士，中国中铁二院工程集团有限责任公司土建二院线路所助理工程师，研究方向：城市志城际有轨交通及磁浮交通工程。

的工程量、工程与运营投资等具有重大影响。

## 1 平面设计参数

平面设计参数包括：曲线半径、缓和曲线长度、夹直线长度等。

### 1.1 曲线半径

曲线半径包括最大曲线半径与最小曲线半径。

#### 1.1.1 最大曲线半径

最大曲线半径的确定,关系到线路的测设、施工、养护、检测、维修等能否达到要求的精度。根据国外高速铁路和我国准高速铁路的测设经验,适当提高检测系统的处理功能,对  $R = 12\ 000\text{ m}$  左右半径的曲线,其方向和曲率可以准确检测。但对更大半径的曲线,由于曲率太小,此时外界的干扰信号可能大于曲率测试信号,能否将真实信号准确地提取还有一定的技术难度<sup>[1]</sup>。

综合考虑线路测设精度和轨道检测精度,并参考国外铁路实验线上最大曲线半径情况及其最新发展动态。高速磁浮线路的最大曲线半径不宜大于  $12\ 000\text{ m}$ ,个别不大于  $14\ 000\text{ m}$ 。

#### 1.1.2 最小曲线半径

由于在磁浮铁路系统中采用了列车环抱线路的

构造,避免了列车的脱轨和倾覆,因此,磁浮铁路的平面最小曲线半径主要由舒适条件限制<sup>[2]</sup>。

平面曲线半径对乘坐舒适性的影响主要通过旅客所受到的自由侧向加速度来反映。在一定的线路条件(线路纵向坡度为  $\beta$ , 超高横坡为  $\alpha$ )下,与行车速度匹配的平面曲线半径按旅客不产生自由横向加速度的条件进行推算的。当存在未被平衡的侧向自由加速度时,圆曲线半径按公式(1)计算:

$$R_H = \frac{\left( \frac{V}{3.6} \right)^2 \times \cos \alpha \times \cos^2 \beta}{a_y + \left[ g \times \cos \beta + \frac{(V/3.6)^2}{-R_v} \right] \times \sin \alpha} \quad (1)$$

公式(1)表明,磁浮铁路最小曲线半径受行车速度  $V$  (km/h)、横坡角  $\alpha$  ( $^\circ$ )、纵坡角  $\beta$  ( $^\circ$ ), 允许未被平衡的侧向加速度  $a_y$  ( $\text{m/s}^2$ )和竖曲线半径  $R_v$  (m)等因素的影响。

式中,  $\alpha$  值由舒适条件决定,参照德国与上海磁浮线路设计参数,其最大值一般可取  $12^\circ$ , 特殊情况下可取  $16^\circ$ ; 在站坪线上为保证停车时的舒适性,其  $\alpha$  不大于  $3^\circ$ ;  $a_y$  亦由舒适条件确定,其最大值在区间正线上取  $1.5\ \text{m/s}^2$ , 在道岔区(此时不设超高横坡,)可取  $2.0\ \text{m/s}^2$ 。表1为不同横坡条件下的最小曲线半径,其中,  $\beta = 0$ 、 $R_v = \quad$ 、 $a_y = 1.5\ \text{m/s}^2$ 。

表1 不同横坡条件下的最小平曲线半径计算值

Tab.1 Calculation values of the minimum radiuses under different transverse grades

$V/(\text{km/h})$	$R_v/\text{m}$							
	$4^\circ$		$8^\circ$		$12^\circ$		$16^\circ$	
	计算值	采用值	计算值	采用值	计算值	采用值	计算值	采用值
200	1 411	1 420	1 068	1 070	854	8 60	707	710
300	3 179	3 180	2 408	2 410	1 927	1 930	1 595	1 600
350	4 330	4 330	3 282	3 300	2 627	2 630	2 175	2 180
400	5 661	5 670	4 293	4 300	3 437	3 440	2 846	2 850
450	7 172	7 180	5 441	5 450	4 358	4 360	3 610	3 610
500	8 864	8 870	6 730	6 730	5 392	5 400	4 467	4 500

### 1.2 缓和曲线

区间正线平面缓和曲线的长度是平面设计中的

重要指标。它的作用是实现线路曲率和超高横坡的过渡。

### 1.2.1 缓和曲线线型

由于磁浮列车速度很高,缓和曲线的线型选择必须保证列车动力学指标的平稳变化,尤其是在缓和曲线的起终点处<sup>[3]</sup>。德国经过研究,认为正弦型缓和曲线可使线路的曲率、横坡、自由横向加速度、横向加速度的变化率等指标随时间和路程连续稳定地变化。我国上海磁浮实验线区间正线的平面缓和曲线亦采用正弦型缓和曲线。因此,建议高速磁浮线路的缓和曲线类型选择正弦型。

### 1.2.2 缓和曲线长度

缓和曲线的长度由线路允许的最大扭转率、最大横向冲击和最大垂向冲击确定。正弦型缓和曲线的计算式为<sup>[4]</sup>：

最大扭转率条件：

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

最大横向冲击条件：

$$L_{\min} = \left| 2 \times \frac{\alpha_{ye} \times \text{SGN}(R_{He}) - \alpha_{ya} \times \text{SGN}(R_{Ha})}{\dot{\alpha}_{y\max}} \times \frac{v}{3.6} \right| \quad (3)$$

最大垂向冲击条件：

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

缓和曲线长度根据上述三个条件计算取其最大值。

式中,  $\Delta\alpha_{(\max)}$  为允许最大扭转率;  $\dot{\alpha}_{y\max}$ 、 $\dot{\alpha}_{z\max}$  为允许最大横向和垂向冲击;  $\alpha_a$ 、 $\alpha_e$  分别为缓和曲线起、终点的超高横坡值;  $\alpha_{ya}$ 、 $\alpha_{ye}$ , 分别为缓和曲线起、终点的横向加速度;  $b_G$  为乘客距线路中心线的最大距离(最外侧座位中心距线路中心线的侧向距离);  $\rho$  为角度到弧度的换算因子;  $V$  为列车运行速度;  $R_{Ha}$ 、 $R_{He}$  分别为缓和曲线起、终点处的平曲线半径;  $\text{SGN}$  为符号取值函数。

如当  $V = 500 \text{ km/h}$ ,  $R = 6000$  时, 采用的参数为: 纵坡等于 0、 $\Delta\alpha_{\max} = 0.15^\circ/\text{m}$ 、 $\dot{\alpha}_{y\max} = 0.5 \text{ m/s}^3$ 、 $\dot{\alpha}_{z\max} = 0.5 \text{ m/s}^3$ 、 $\alpha_a = 0$ 、 $\alpha_e = 12^\circ$ 、 $\alpha_{ya} = 0$ 、 $\alpha_{ye} = 1.5 \text{ m/s}^2$ , 计算得最小缓和曲线长度为  $L = 850 \text{ m}$ 。当

速度一定,曲线半径不同时,可减少超高横坡值,从而可以减少缓和曲线长度。

### 1.3 最小夹直线与圆曲线长度

高速轮轨铁路夹直线(夹曲线)最小长度的确定原则是:以“列车在缓和曲线出入口(即夹直线或圆曲线的起终点)产生的振动不致叠加”为限制,它与列车振动、衰减特性和列车运行速度有关。

我国目前既有轮轨干线一般地段夹直线最小长度取  $0.6 \sim 0.78 V_{\max}$ ;“京沪高速铁路设计暂行规定”中要求:一般条件下  $L \geq 0.8 V_{\max}$ ;困难条件下  $L \geq 0.6 V_{\max}$ ;国外最高运营速度为  $200 \sim 350 \text{ km/h}$  高速铁路最小夹直线与圆曲线长度大约为  $0.4 \sim 1.0 V_{\max}$ 。同时,高速铁路轨道检测时为了判明直线或圆曲线时,必须要有一定的长度,一般应大于  $50 \text{ m}$ 。综上所述,建议高速磁浮线路的最小夹直线与圆曲线长度  $1.0 V_{\max}$ , 困难条件下  $0.8 V_{\max}$ 。

## 2 纵断面设计参数

纵断面设计参数包括:最大坡度值、坡度连接、最小坡段长等。

### 2.1 最大坡度值

线路坡度的大小,对于适应地形,减小桥隧工程数量,降低工程投资具有重要的意义<sup>[5]</sup>。

磁浮铁路的驱动力只受直线电机功率控制,即主要受供电电压和电流控制,不因坡度的增大而降低。电流在变电站至开关站的输送过程和列车长度范围内存在电压降,而由于技术经济原因不可能无限扩大电缆截面和提高电气绝缘性能,从而不能无限提高高端电压。因此,磁浮铁路直线电机的功率主要受变电站间距、开关站间距和列车长度限制<sup>[4]</sup>。

列车在  $i = \text{tg}\alpha$  坡道上运行时,驱动力将用以克服运行阻力和重力引起的下滑力。实现图 1 所示的静力平衡:

$$F - W = P \cdot g \cdot \sin\alpha \quad (5)$$

则

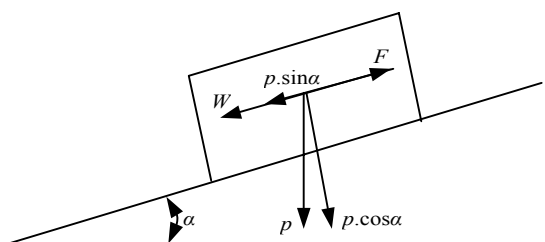


图1 磁悬浮铁路在坡道上的受力分析

Fig.1 Force analysis of Maglev-train on a slope

$$\sin \alpha = \frac{F - W}{P \cdot g}$$

式中： $F$ ——直线电机能实现的驱动力（kN）；

$W$ ——列车运行的基本阻力（kN）；

$P$ ——列车质量（t）。

6 辆编组的磁浮列车（定员最多可达 688 人，总重 382 t），以在开关站间距为 1 km 时的情况为例，当列车速度达 400 km/h 时，可实现的驱动力为 290 kN。此时列车运行阻力为 102 kN。将富余的驱动力用于克服坡度阻力，则坡度可达到 5%。若考虑适当降低速度以适应地形，则坡度还可继续加大。图 2 给出不同速度下所允许的临界坡度  $i^*$ 。

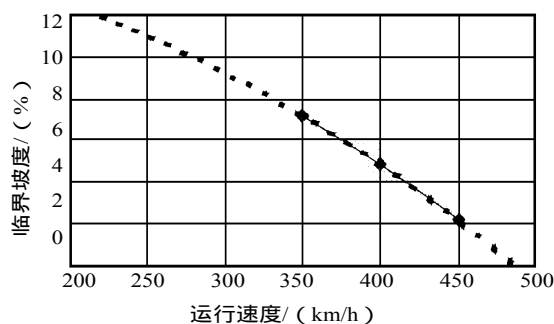


图2 6 辆编组不同速度下所允许的临界坡度

Fig.2 Critical grade of 6 Maglev-trains at different speeds

图 2 表明，在开关站间距为 1 km 的情况下，6 辆编组的磁浮列车在平道上可达到约 480 km/h 的速度。若为适应地形而适当采用较大的纵坡，则在 10% 的坡度时仍能保持不低于 280 km/h 的速度<sup>[2]</sup>。因此，在地形困难的情况下，磁浮铁路的线路坡度可达

10% 以上。目前尚未发现有其他限制磁浮铁路线路坡度的技术因素。一般认为，从旅客乘坐舒适度和不显著降低行车速度的角度考虑，磁浮铁路的最大坡度取 10%。

另外，国外客运专线，除日本的东海道新干线外，均不考虑坡度折减情况，且磁浮铁路的最大坡度可取 10%，故认为可不考虑坡度折减情况。

## 2.2 坡段间连接

### 2.2.1 相邻坡段间坡度差

由于在磁浮铁路系统中采用了列车环抱线路的构造，避免了列车的脱轨的危险，故相邻坡段的坡度差不受限制。

### 2.2.2 竖曲线半径

为了缓和变坡点坡度的急剧变化，使列车通过变坡点运行平稳和产生的附加加速度不超过允许值，相邻坡段的坡度差大于一定限度（2‰）时，应在变坡点处设置竖曲线联接。

由于磁浮列车速度较高，为保证列车在铅垂面上的运行平稳性，线路竖曲线设计应满足下列两个条件：

(1) 列车在竖曲线上运行时，法向加速度应保持在舒适条件允许的范围内；

(2) 直线坡段与竖曲线之间应实现平稳过渡，不能产生影响旅客舒适的冲击。

竖曲线半径的确定原则是尽可能的减小列车垂向加速度，其计算公式如下：

$$R_{V_{\min}} = \left| \frac{\left(\frac{v}{3.6}\right)^2 \times \cos \alpha}{g \times (\cos \alpha \times \cos \beta - 1) + \left(\frac{v}{3.6}\right)^2 \times \frac{\sin \alpha \times \cos^2 \beta}{R_H} - \alpha_{z \max}} \right| \quad (6)$$

式中， $\alpha_{z \max}$  为允许的最大垂向加速度； $R_H$  为竖曲线处的平曲线半径； $\alpha$ 、 $\beta$  为线路横坡角各纵坡角； $g$  为重力加速度； $v$  为列车运行速度； $R_{V_{\min}}$  为最小竖曲线半径。

根据公式 (6) 可以计算出最小竖曲线半径（见表 2）。公式中选用参数为：横坡角  $\alpha = 0$ ；上凸： $\alpha_{z \max} = -0.6 \text{ m/s}^2$ ；下凹： $\alpha_{z \max} = 1.2 \text{ m/s}^2$ 。

表 2 最小竖曲线半径计算

Tab.2 Minimum vertical curve radiuses at different speeds

运行速度/ (km/h)	最小竖曲线半径/m					
	线路纵坡为 0		线路纵坡为 5%		线路纵坡为 10%	
	上凸	下凹	上凸	下凹	上凸	下凹
200	5 144	2 572	5 244	2 542	5 570	2 460
300	11 574	5 787	11 800	5 722	12 533	5 535
350	15 754	7 877	16 061	7 788	17 058	7 533
400	20 576	10 288	20 978	10 172	21 636	9 996
450	26 042	13 020	26 550	12 874	27 383	12 651
500	32 150	16 075	32 778	15 894	33 806	15 618

### 3 结束语

通过对高速磁浮线路平曲线半径、平面缓和曲线长度、最大纵坡、最小竖曲线半径和竖向缓和曲线长度等线路设计参数的确定方法和原则的分析,并根据

这些方法和原则,在不同参数取值情况下分别计算了最小平曲线半径、最小缓和曲线长度和最小竖曲线半径。通过对数据的分析,结合高速磁浮线路的技术经济特点,建议高速磁浮线路平纵断面设计选用的设计参数见表 3、表 4 所示:

表 3 高速磁浮线路平、纵面设计参数

Tab.3 Design parameters of the line plan and the profile of the high-speed Maglev-trains

速度目标值	最小曲线半径/m		推荐曲线半径/m		限制坡度/(‰)		最小竖曲线半径/m		缓和曲线长/m	最大横坡值/°
	一般地段	困难地段	小半径	大半径	上行坡度	下行坡度	凸曲线	凹曲线		
200	1 200	1 000	2 000	3 000	100	100	6 000	3 000	340	12
300	2 300	2 000	3 000	4 500	100	100	13 000	6 000	500	12
350	3 100	2 500	4 000	5 500	100	100	18 000	8 000	600	12
400	4 000	3 500	5 000	6 000	80	80	22 000	11 000	670	12
450	5 000	4 300	6 000	7 000	80	80	28 000	15 000	750	12
500	6 000	5 500	7 000	8 000	80	80	35 000	18 000	850	12

表 4 高速磁浮线路缓和曲线长度计算

Tab.4 Lengths of the transition curves of the high-speed maglev-train line

曲线半径/m	1 200	2 300	3 100	4 000	5 000	6 000	7 000	8 000	9 000	10 000	11 000	12 000	14 000
200	340	150	140	130	120	100	100	100	90	80	80	80	80
300	—	500	340	250	230	220	200	190	170	170	160	150	150
350	—	—	600	400	300	290	280	260	250	240	220	220	220
400	—	—	—	670	450	350	330	320	300	290	280	280	280
450	—	—	—	—	750	600	450	370	360	340	320	300	300
500	—	—	—	—	—	850	670	560	470	450	440	420	400

参考文献

- [1] 京沪高速铁路设计暂行规定. 中华人民共和国铁道部, 2003.
- [2] 梁红燕. 高速磁悬浮铁路线路平纵断面设计标准的研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2003.
- [3] 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, (8): 07-09.
- [4] 刘万明. 高速铁路主要技术经济问题研究[M]. 西南交通大学出版社, 2003.
- [5] 王玉泽. 高速铁路选线设计技术若干问题探讨[D]. 西南交通大学硕士学位论文, 2003.

上接第94页

参考文献

- [1] 钱清泉, 何正友, 吴超. 地铁主控系统的研究[J]. 世界轨道交通, 2005, (1): 20-23.
- [2] 村山一雄. JR 东日本公司的新干线综合运输管理系统 (COSMOS) [J]. 中国铁路, 2000, (11): 42-45.
- [3] 魏晓东. 城市轨道交通自动化系统与技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [4] 吴超. 地铁综合监控系统可靠性评估方法研究[D]. 西南交通大学硕士论文. 2005.
- [5] 朱继洲. 故障树原理和应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 1-11.
- [6] 魏选平, 卞树檀. 故障树分析法及其应用[J]. 计算机科学与技术, 2004, (3): 43-45.
- [7] 汪有涛, 沙基昌. 一种基于 BDD 求解 PIS 的新方法[J]. 系统工程与电子技术, 2000; 22(11): 75-77.
- [8] Ranzy A. New algorithm for fault tree analysis[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1993; 40: 203-211.
- [9] Zhang Xinyu, Sun Hairong. A BDD based algorithm for reliability analysis of phased mission system [J]. IEEE Trans on Reliability, 1999, 46(1): 50-60.
- [10] 吴超, 何正友, 钱清泉. 基于 BDD 技术和模糊集的故障树分析法的研究[J]. 西南交通大学学报, 2006, 41: 5-8