

内嵌式中低速磁浮线路平面最小曲线半径

姜梅¹ 寇峻瑜¹ 汪洋²

(1. 中铁二院工程集团有限责任公司, 610031, 成都; 2. 四川发展成都市新筑路桥机械股份有限公司, 611430, 成都)

摘要 [目的] 内嵌式中低速磁浮系统作为一种新型的轨道交通制式,其车辆及轨道系统依靠非接触式支撑运行,且车辆走行机构内嵌于轨道梁内,因此需针对其车线匹配原理、车辆和轨道梁结构特点,研究线路平面最小曲线半径取值,以支撑工程设计。[方法] 介绍了内嵌式中低速磁浮系统的特点;介绍了平面最小曲线半径取值的基本原理;基于车辆行驶动力学理论,分析了内嵌式中低速磁浮线路的旅客舒适度标准及平面最小曲线半径取值。[结果及结论] 在列车运行速度一定的情况下,平面最小曲线半径主要取决于横坡角允许值和未被平衡离心加速度允许值。在参考国内外其他轨道交通制式的试验结果、相关标准规定、传统中低速磁浮系统实际建设运营情况的基础上,建议最大横坡角不大于 8° ,最大未被平衡离心加速度在一般和困难情况下分别不大于 0.4 m/s^2 和 0.6 m/s^2 。当内嵌式中低速磁浮系统设计速度为 200 km/h 时,线路平面最小曲线半径一般和困难情况下分别可取为 $1\,800\text{ m}$ 和 $1\,600\text{ m}$ 。

关键词 内嵌式中低速磁浮; 线路; 平面最小曲线半径

中图分类号 U266.4

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.02.027

Planar Minimum Curve Radius for Embedded Medium-low Speed Maglev Lines

JIANG Mei¹, KOU Junyu¹, WANG Yang²

(1. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., 610031, Chengdu, China; 2. Sichuan Development Chengdu Xinzhu Road & Bridge Machinery Co., Ltd., 611430, Chengdu, China) **Abstract** [Objective] As a new type of rail transit, the embedded medium-low speed maglev system relies on non-contact support for vehicle and track systems, and the vehicle running mechanism is embedded within the track beam. Therefore, it is crucial to study the values of the minimum curve radius in the planar layout, considering the vehicle-track matching principles and the structural characteristics of both vehicle and track beam, to support engineering design. [Method] The characteristics of embedded medium-low speed maglev systems are introduced, together with the basic principles for determining the values of the planar minimum curve radius. Based on the theory of vehicle ride dynamics, passenger comfort standards and the determination of planar minimum curve

radius for embedded medium-low speed maglev lines are analyzed. [Result & Conclusion] Under a constant train operating speed, the planar minimum curve radius mainly depends on the allowable values of the transverse slope angle and the unbalanced centrifugal acceleration. Referring to the test results of other rail transit systems, relevant standards, and the actual construction and operation of conventional medium-low speed maglev systems worldwide, it is suggested that the maximum transverse slope angle should not exceed 8° , and the maximum unbalanced centrifugal acceleration should be no more than 0.4 m/s^2 in general and 0.6 m/s^2 under challenging conditions. For an embedded medium-low speed maglev system designed with a speed of 200 km/h , the recommended values for the planar minimum curve radius are generally $1\,800\text{ m}$ and $1\,600\text{ m}$ under normal and challenging conditions, respectively.

Key words embedded medium-low speed maglev; line; planar minimum curve radius

内嵌式中低速磁浮系统是利用电磁力实现列车悬浮于轨道梁内,由直线电机产生牵引力直接驱动的一种交通系统。相比传统的环抱“F轨”形式的中低速磁浮系统^[1],内嵌式结构磁浮系统在车辆走行机构和轨道梁结构形式上有所不同,相应的直线感应电机安装位置也存在区别。在我国开展内嵌式中低速磁浮项目之初,暂无相关设计标准及规范,仅在德国建设有一条全长为 816 m 的内嵌式磁浮试验线。为支撑我国第一条内嵌式中低速磁浮试验线的建设,亟需针对线路关键技术参数进行研究。平面曲线半径是决定线路平面方案的重要控制参数,对列车运行安全性、旅客乘坐舒适度、技术经济性、维修工作量等均有较大的影响。基于此,本文根据内嵌式中低速磁浮系统的结构特点,结合我国抱轨式中低速磁浮运营线相关情况,基于行驶动力学理论对内嵌式中低速磁浮线路平面最小曲线半径取值进行分析研究。本文研究可为内嵌式中低速磁浮系统的线路选线及平面曲线参数设计提供借鉴。

1 内嵌式中低速磁浮系统特点

内嵌式中低速磁浮系统一般由 2~6 节车厢组成,每节车厢包括车体、下部结构梁和走行机构等。车体下部结构中安装有车载蓄电池、控制系统、冷却及空调设备等。车体下部结构通过弹簧系统与走行机构连接,走行机构分为 5 个悬浮架。走行机构、反应轨(M 轨)、直线电机感应板、供电滑行轨均布设于轨道梁内,这样可以有效阻挡列车运行时产生的机械振动噪声、电气设备噪声及电磁辐射外扩,减少列车对周边环境的影响。一个悬浮架包括两个悬浮框,悬浮磁铁、直线电机和支撑滑橇由悬浮框承载。当电磁铁断电时,列车将通过支撑滑橇在供电滑行轨上停留或滑行。

轨道梁的标准长度为 24 m,由 4 片长度为 12 m 的钢筋混凝土 C 型预制单元梁构成,单元梁之间通过横梁连接,每片 C 型单元梁内还安装有反应轨、供电滑行轨。轨道梁由 C 型单元梁通过预应力体系和后浇混凝土张拉组装而成,单元梁采用工厂化预制,通过专用设备打磨、加工功能件安装面,以保证各部件的安装精度。根据实际项目情况,轨道梁长度可进行灵活调整,如 6 m、12 m、18 m 等。供电滑行轨既可为正常运行时的磁浮列车供电,也可作为列车利用支撑滑橇制动时的承载机构。轨道梁底部两片单元梁中间的钢格栅走道可作为紧急救援通道,全线无需额外设计救援通道。内嵌式中低速磁浮系统及 24 m 标准跨轨道梁结构示意图如图 1 所示。

2 平面最小曲线半径取值基本原理

结合内嵌式中低速磁浮车辆相关参数及结构特点,并考虑轨道梁加工制造及系统公差等要求,提出与内嵌式中低速磁浮系统相适应的平面最小曲线半径建议值。

2.1 满足磁浮车线构造几何条件

从内嵌式中低速磁浮车辆的几何构造来看,平面最小曲线半径的设置应保证列车悬浮架能以自由外接形式通过曲线。根据内嵌式中低速磁浮系统的原理特点,车辆相邻悬浮架之间采用铰接形式,其走行机构在 50 m 曲线半径路况下,仍能紧密地沿着轨道运行。内嵌式中低速磁浮车辆走行机构过曲线时的结构运动关系示意图如图 2 所示。

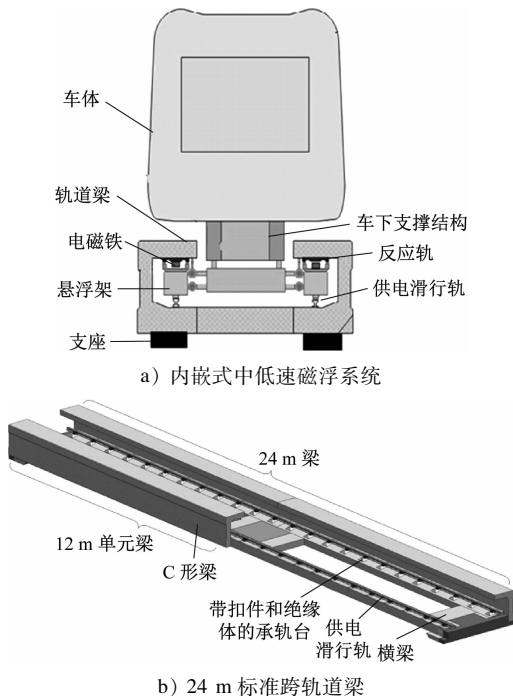


图 1 内嵌式中低速磁浮系统及 24 m 标准跨轨道梁结构示意图

Fig. 1 Diagram of embedded medium-low speed maglev system and the 24 m standard transverse track beam structure

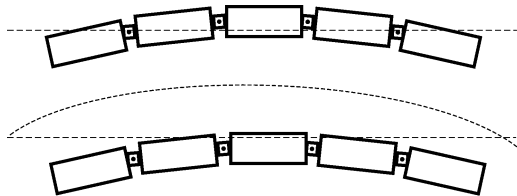


Fig. 2 Diagram of the structural motion relationship when vehicle running mechanism negotiates the curve

2.2 满足旅客乘坐舒适度要求

在轮轨系统中,线路平面最小曲线半径主要由行车安全性、旅客舒适度和内外轨磨耗均衡等条件确定。内嵌式磁浮车辆走行机构完全内置于轨道梁内,且其电磁力随着悬浮间隙的增大而增大,故几乎不存在列车脱轨和倾覆的危险。同时,车辆与轨道之间为非接触性配合,也不存在磨耗问题。因此,内嵌式中低速磁浮系统的平面最小曲线半径主要取决于旅客舒适度。

在平曲线和竖曲线重叠的情况下,作用在磁浮列车上的力主要有列车自身重力、轨道对列车的支持力、曲线运动所产生的离心力。当列车车体处于稳定悬浮状态时,若在平面条件下存在未被平衡离心加速度 a_y (单位 m/s^2),则平行于轨面方向(y 方

向)存在以下关系式:

$$ma_y \geq F_H \cos \alpha + F_V \sin \alpha - mg \sin \alpha \cos \beta \quad (1)$$

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

$$F_V = m \frac{(v / 3.6)^2}{R_V} \quad (3)$$

式中:

F_H ——磁浮列车在平曲线上受到的离心力,单位 N;

F_V ——磁浮列车在竖曲线上受到的离心力,单位 N;

m ——列车质量,单位 kg;

α ——轨道梁横坡角,单位($^{\circ}$);

β ——轨道梁纵坡角,单位($^{\circ}$);

g ——重力加速度,单位 m/s^2 ;

R_H ——平曲线半径,单位 m;

R_V ——竖曲线半径,单位 m;

v ——列车运行速度,单位 km/h 。

由式(1)一式(3)可知:当线路平纵断面设计参数与磁浮列车运行速度绝对匹配时,才能保证 a_y 为 0。在实际列车运行过程中,这种情况一般较难实现,一般通过限制 a_y 不超过其最大允许值 $a_{y \max}$ 即可。满足旅客舒适度要求的平面最小曲线半径 $R_{H \min}$ 可以表示为:

$$R_{H \min} \geq \left| \frac{(v/3.6)^2 \cos \alpha \cos^2 \beta}{a_y + \left[g \cos \beta + \frac{(v/3.6)^2}{-R_V} \right] \sin \alpha} \right| \quad (4)$$

根据内嵌式中低速磁浮系统相关资料及德国内嵌式磁浮试验线建设情况,列车运行时满足的线路最大纵坡一般不大于 100‰。根据式(4)可知,纵坡对于平曲线半径的影响很小,偏于安全考虑,可取 $\beta = 0^{\circ}$ 。

当 α 、 β 、 a_y 等参数保持不变时,分析竖曲线半径对平曲线半径的影响。由于凹曲线和凸曲线方向分别与重力方向相同和相反,即 R_V 取值分别小于 0 和大于 0,这说明在同等条件下,式(4)中凹曲线对应的分母比凸曲线更大,此时的平曲线半径较小,即以凹曲线为最不利条件来计算平面最小曲线半径。 R_V 越大,所对应的平曲线半径就越小,偏于安全考虑,可取 $R_V = \infty$ 。

因此,式(4)可以化简为:

$$R_{H \min} \geq \left| \frac{(v/3.6)^2 \cos \alpha}{a_{y \max} + g \sin \alpha} \right| \quad (5)$$

由式(5)可知,当列车运行速度一定时,平面最小曲线半径直接由曲线地段轨道梁横坡允许值和未被平衡离心加速度允许值共同决定。

3 舒适度控制指标取值分析

3.1 横坡角

列车在平曲线上停车或低速行驶时,如果设置的横坡角过大,会使旅客有种向曲线内侧翻转的感觉。因此,所设置的横坡角应不影响旅客舒适度或让旅客没有明显的内翻感觉。

3.1.1 国内试验情况

根据中国铁道科学研究院 1980 年的试验研究,当列车停在超高 $\geq 200 \text{ mm}$ 的曲线上时,部分旅客站立不稳、行走困难并伴有头晕现象。因此,国内相关规范一般规定轮轨系统实设超高不应大于 200 mm,即横坡角为 7.7° 。

3.1.2 国内外相关标准

除了东海道新干线的最大超高为 200 mm 外,日本其余线路的最大超高均为 180 mm。德国和法国线路的最大超高同样均为 180 mm。

我国现行轨道交通设计规范中的最大超高及横坡角如表 1 所示。基于列车在曲线上临时停车时的旅客舒适度,高速铁路最大设计超高取 175 mm,跨座式单轨轨道梁最大超高率取 12%。同时,考虑运营养护实际情况,市域(郊)铁路、城际铁路、地铁快线的最大超高采用 150 mm。综合考虑列车运行的导向稳定性和乘坐舒适度,中低速磁浮线路的最大横坡角不宜大于 6° 。在正常运行过程中,高速磁浮列车不存在运行速度与横坡角严重不匹配的问题,且设有专用辅助停车区,旅客舒适度可以保证,因此,TB 10630—2019《磁浮铁路技术标准(试行)》中规定正线的最大横坡角为 12° 。

综上所述,除了高速磁浮的横坡角设置偏大外,其他轨道交通制式线路所允许的最大横坡角均处于 $4.574^{\circ} \sim 6.843^{\circ}$ 范围,小于中国铁道科学研究院试验得出的 7.7° 限值。

3.1.3 国内外磁浮线路建设情况

对于传统抱轨式中低速磁浮系统,根据我国长沙磁浮快线、北京地铁 S1 线及日本东部丘陵线的建设情况^[2],线路的最大横坡角为 6° 。运营实践证明,该值可以满足列车运行安全性和旅客乘坐舒适度的要求。

对于内嵌式中低速磁浮系统,德国内嵌式磁浮

表 1 我国现行轨道交通设计规范中的最大超高及横坡角

Tab.1 Maximum superelevation/transverse slope angle in current rail transit design specifications in China			
规范名称	适用轨道交通制式	最大超高/mm	最大横坡角/(°)
TB 10621—2014《高速铁路设计规范》	高速铁路	175	6.656
TB 10098—2017《铁路线路设计规范》	高速铁路	175	6.656
	城际铁路	150	5.711
TB 10624—2020《市域(郊)铁路设计规范》	市域(郊)铁路	150	5.711
GB 50157—2013《地铁设计规范》	地铁	120	4.574
CJJ/T 298—2019《地铁快线设计标准》	地铁快线	150	5.711
GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》	跨座式单轨	—	6.843
CJJ/T 262—2017《中低速磁浮交通设计规范》	中低速磁浮	—	6.000
TB 10630—2019《磁浮铁路技术标准(试行)》	中低速磁浮	—	6.000
	高速磁浮	—	12.000

试验线的最大横坡角为 8°。

3.1.4 横坡角推荐取值

上海磁浮列车示范运营线的最大横坡角为 12°,其安全系数大、安全性高,该横坡角值高于国际通用交通系统的舒适度标准,这主要得益于其优越的车辆悬挂性能。

传统抱轨式中低速磁浮系统的轨距为 1.86 m 或 2.00 m,小于内嵌式磁浮系统的轨距 2.16 m。当列车面对侧风或不均匀载荷时,内嵌式磁浮系统因轨距更宽而使得列车走行相对更稳定,因此其横坡角可以采用较大值。同时,当列车停留在曲线上时,车内旅客的舒适度感受,以及列车在该倾斜状态下的相关部件可靠性等要求,也是最大横坡角设置应考虑的因素。

综合考虑旅客舒适度要求及内嵌式磁浮系统结构特点,初步建议内嵌式中低速磁浮线路的最大横坡角不大于 8°。

3.2 未被平衡离心加速度

曲线地段设置横坡角是为了平衡列车通过曲线时产生的侧向离心加速度。当列车实际运行速度高于与该横坡角完全匹配的速度时,就会产生未被平衡的离心加速度。在一定范围内,允许存在适当的未被平衡离心加速度,但不应影响列车运行安全性和旅客舒适度,且主要满足舒适度要求^[3]。

3.2.1 ISO(国际标准化组织)评价指标要求

国际标准化组织于 1997 年制定了 ISO 2631-1:1997《机械振动与冲击 人体暴露于整体振动评价——第 1 部分:一般要求》,提出了用总加权振动加速度均方根值表示振动与人体舒适度感觉之间

的关系,其中,1 级、2 级、3 级舒适度条件下的振动加速度值分别为:小于 0.315 m/s²、0.315 ~ 0.630 m/s² 和 0.500 ~ 1.000 m/s²,对应的评定结果分别为舒适、有点不舒适和相当不舒适。

3.2.2 国内外试验情况

国内外对于未被平衡离心加速度的测试结果如表 2 所示。对于不同国家而言,未被平衡离心加速度取值有一定差异,但旅客可承受的加速度限值基本均为 0.3 ~ 1.2 m/s²,且以 0.4 ~ 0.8 m/s² 为主。

表 2 国内外对于未被平衡离心加速度的测试结果
Tab.2 Test results of unbalanced centrifugal acceleration in China and worldwide

项目	测试结果
我国曲线线路测试	$a_y = 0.40 \text{ m/s}^2$ 时,旅客稍有感觉,列车平稳通过; $a_y \geq 0.80 \text{ m/s}^2$ 时,旅客有明显的 discomfort
英国和美国线路测试	$a_y = 0.40 \sim 1.00 \text{ m/s}^2$ 为允许值
日本线路测试	$a_y = 0.78 \text{ m/s}^2$ 为限值
德国线路测试	$a_y = 0.65 \text{ m/s}^2$ 时,旅客无不良反应
法国和意大利线路测试	$a_y = 0.85 \text{ m/s}^2$ 时,旅客没有 discomfort
UIC(国际铁路联盟)测试	$a_y = 1.16 \text{ m/s}^2$ 时,绝大多数旅客没有 discomfort

3.2.3 我国相关标准规定

我国现行轨道交通设计规范中的欠超高和未被平衡离心加速度允许值如表 3 所示。其中,高速铁路欠超高取值根据中国铁道科学研究院开展的旅客实测舒适度试验和专家评定意见综合选定,市域(郊)铁路和城际铁路参照执行。普通地铁车厢

内一般站立乘客多,站立密度较高,未被平衡离心加速度取 0.4 m/s^2 ,中低速磁浮也参照执行。而最高运行速度为 $100\sim120\text{ km/h}$ 的地铁快线车厢座椅采用全横列式或纵横混合布置的方式,最大欠超高可取为 75 mm 。

表 3 我国现行轨道交通设计规范中的欠超高和未被平衡离心加速度允许值

Tab. 3 Allowable values of deficient superelevation/unbalanced centrifugal acceleration in current rail transit design specifications in China					
规范名称	适用轨道交通制式	欠超高允许值/mm		未被平衡离心加速度允许值/(m/s^2)	
		一般情况	困难情况	一般情况	困难情况
TB 10621—2014 《高速铁路设计规范》	高速铁路	60	90	0.39	0.59
TB 10098—2017 《铁路线路设计规范》	高速铁路	60	90	0.39	0.59
	城际铁路	80	110	0.52	0.72
TB 10624—2020 《市域(郊)铁路设计规范》	市域(郊)铁路	60	90	0.39	0.59
GB 50157—2013 《地铁设计规范》	地铁	61	61	0.40	0.40
CJJ/T 298—2019 《地铁快线设计标准》	地铁快线	61	75	0.40	0.49
GB 50458—2008 《跨座式单轨交通设计规范》	跨座式单轨	—	—	0.49	0.49
CJJ/T 262—2017 《中低速磁浮交通设计规范》	中低速磁浮	—	—	0.40	0.40
TB 10630—2019 《磁浮铁路技术标准(试行)》	中低速磁浮	—	—	0.40	0.40
	高速磁浮	—	—	1.25	1.25

总体来看,除了高速磁浮系统允许采用的未被平衡离心加速度较大(1.25 m/s^2)外,其他制式允许的未被平衡离心加速度基本都处于 $0.4\sim0.6\text{ m/s}^2$,满足 ISO 2631-1:1997 标准,多年的运营实践经验证明该取值范围是合理的。

3.2.4 未被平衡离心加速度推荐取值

综合考虑其他轨道交通制式的相关试验结果、标准规定,我国既有抱轨式中低速磁浮交通的相关研究成果,初步建议满足旅客舒适度要求的内嵌式中低速磁浮系统最大未被平衡离心加速度一般情况下不宜大于 0.4 m/s^2 ,困难情况下不应大于 0.6 m/s^2 。

4 平面最小曲线半径取值分析

当最大未被平衡离心加速度分别取为 0.4 m/s^2 和 0.6 m/s^2 、最大横坡角取为 8° 时,根据式(5)可以求得一般情况及困难情况时,不同列车运行速度下的平面最小曲线半径,如表 4 所示。同时,结合线路测试、施工和养护维修便利性等要求,平曲线半径宜取整为 50 m 或 100 m 的倍数。

表 4 不同列车运行速度下的平面最小曲线半径
Tab. 4 Minimum planar curve radius at different train operating speeds

列车运行速度/ (km/h)	平面最小曲线半径/m	
	一般情况 ($a_y=0.4\text{ m/s}^2$)	困难情况 ($a_y=0.6\text{ m/s}^2$)
200	1 800	1 600
190	1 600	1 400
180	1 400	1 300
170	1 300	1 200
160	1 100	1 000
150	1 000	900
140	850	800
130	750	700
120	650	600
110	550	500
100	450	400

5 新筑股份内嵌式中低速磁浮综合试验线概况

我国第一条内嵌式中低速磁浮综合试验线位

于成都市新津区工业园区内,由中铁二院工程集团有限责任公司牵头完成该项目的工程设计。项目分两期实施,其中线路全长为 3.6 km 的一期工程已建设完成,最高设计速度为 160 km/h,并预留设计速度为 200 km/h 的工程条件,二期工程将延伸至线路全长为 4.6 km。该试验线正线为单线,全线采用高架敷设,最大横坡角和纵坡分别为 8° 和 100‰。

6 结语

最小曲线半径是内嵌式中低速磁浮交通系统线路设计的主要技术标准之一,其值应结合速度目标值、行车安全性、旅客舒适度和轨道梁安装制造要求等因素综合确定。本文主要基于旅客舒适度控制指标,采用静力学理论分析手段,提出了最高设计速度为 200 km/h 的内嵌式中低速磁浮线路平面最小曲线半径取值。为确保线路技术参数取值的可靠性,后期还应结合内嵌式磁浮车线匹配联合仿真及实际线路动力学试验,对理论计算结果进行进一步的验证及优化研究。

参考文献

[1] 马卫华,罗世辉,张敏,等. 中低速磁浮车辆研究综述[J].

(上接第 146 页)

KONG Qingmei, WEN Sen, ZHAO Limin. Influence of shield lifting on supporting structure of pit during tunnel construction[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(8): 125.

[4] 宋林,李昌宁,范恒秀,等. 特殊环境下盾构吊装下井的基坑安全稳定性分析及检算方法研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2015, 12(1): 91.

SONG Lin, LI Changning, FAN Hengxiu, et al. Safety analysis of deep foundation pit and check-up method for shield lifting scheme under the special environment[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2015, 12(1): 91.

[5] 范国刚. 大直径盾构隧道盾构井顺作法与逆作法受力分析对比[J]. 现代隧道技术, 2015, 52(5): 158.

FAN Guogang. Comparison of forces applied on the working shafts of large-diameter shield tunnels by the bottom-up and top-down methods[J]. Modern Tunnelling Technology, 2015, 52(5): 158.

[6] 汪鹏程,文杰,邵长征,等. 基于数值分析的深基坑围护结构优化设计[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(9): 1248.

WANG Pengcheng, WEN Jie, SHAO Changzheng, et al. Optimization design of retaining structure of deep excavation based on nu-

merical analysis[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(9): 1248.

MA Weihua, LUO Shihui, ZHANG Min, et al. Research review on medium and low speed maglev vehicle[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2021, 21(1): 199.

[2] 张志洲,龙志强. 日本东部丘陵线磁悬浮系统技术综述[J]. 国外铁道车辆, 2005, 42(6): 7.

ZHANG Zhizhou, LONG Zhiqiang. Technological survey of the maglev system of the east hillside line in Japan[J]. Foreign Rolling Stock, 2005, 42(6): 7.

[3] 王靖. 中低速磁浮交通圆曲线参数动力学仿真研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.

WANG Jing. Dynamic simulation study of curve parameters of low & middle speed maglev train[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.

· 收稿日期:2021-11-29 修回日期:2022-01-25 出版日期:2024-02-10
Received:2021-11-29 Revised:2022-01-25 Published:2024-02-10

· 第一作者:姜梅,高级工程师,jiangmei@vip.126.com
通信作者:寇峻瑜,工程师,koujunyu312@163.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license

[7] 高涛,赵芮. 地铁车站盾构井处临时环梁计算优化分析[J]. 隧道建设, 2016, 36(5): 544.

GAO Tao, ZHAO Rui. Optimization analysis of calculation of temporary ring beam for shield hoisting shaft of metro station[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(5): 544.

[8] 于鑫. 成都地铁深基坑围护结构设计优化研究[J]. 现代城市轨道交通, 2019(6): 98.

YU Xin. Study on design optimization of deep foundation pit of Chengdu Metro[J]. Modern Urban Transit, 2019(6): 98.

[9] 禹化才. 隧道盾构法施工成本价格分析[J]. 铁路工程造价管理, 2003, 18(4): 8.

YU Huacai. Cost price analysis of shield tunneling[J]. Railway Engineering Cost Management, 2003, 18(4): 8.

· 收稿日期:2021-07-09 修回日期:2021-08-24 出版日期:2024-02-10
Received:2021-07-09 Revised:2021-08-24 Published:2024-02-10

· 通信作者:郭亮,高级工程师,414122311@qq.com

· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license