

基于乘坐舒适性的单轴式单轨列车线路平面最小曲线半径及曲线限速研究^{*}

杜子学 皮 阳 杨 震

(重庆交通大学机电与车辆工程学院, 400074, 重庆)

摘 要 [目的] 单轴式单轨列车实际运营时运行稳定性及乘坐舒适性较差, 需从线路角度出发, 研究单轴式单轨列车平面最小曲线半径及曲线限速的合理取值。[方法] 建立了单轴式单轨列车的车轨耦合动力学模型, 并验证了该模型的合理性。介绍了单轨列车运行平稳性及乘坐舒适性的评价方法。基于不同等级乘坐舒适度要求, 提出了单轴式单轨列车线路平面最小曲线半径建议取值区间, 通过仿真分析验证了所提建议取值区间的合理性。为实现线路与曲线通过速度的协调匹配, 进一步研究得到了单轴式单轨列车在小曲线区段下的限速值。[结果及结论] 设计速度一定时, 线路平面最小曲线半径主要由曲线区段的最大超高角、未被平衡的列车横向振动加速度允许值决定。列车运行速度小于等于 80 km/h 时, 单轴式单轨列车线路平面最小曲线半径按 320 m 取值, 小曲线区段下的列车限速按 $4.30\sqrt{R}$ (R 为曲线半径) 取值。

关键词 跨座式单轨; 单轴式单轨列车; 运行平稳性; 乘坐舒适性; 平面最小曲线半径; 曲线限速

中图分类号 U232

DOI: 10.16037/j.1007-869x.20230744

Minimum Horizontal Curve Radius and Curve Speed Limit of Single-axle Monorail Train Lines Based on Ride Comfort

DU Zixue, PI Yang, YANG Zhen

(College of Electromechanical and Vehicle Engineering, Chongqing Jiaotong University, 400074, Chongqing, China)

Abstract [Objective] To address the issues of poor operational stability and ride comfort in the actual operation of single-axle monorail trains, it is aimed to investigate the rational values of minimum horizontal curve radius and curve speed limit for single-axle monorail trains from the perspective of track alignment. [Method] A vehicle-track coupled dynamics model for the single-axle monorail train is established, and the model's validity is verified. The evaluation methods for operational stability and ride comfort of monorail trains are intro-

duced. Based on requirements for different ride comfort levels, a recommended value range for the minimum horizontal curve radius of single-axle monorail train lines is proposed. The rationality of recommended value ranges is verified through simulation analysis. To achieve the coordinated alignment of track and curve-passing speed, the speed limit of single-axle monorail train in small-radius curve sections is further investigated. [Result & Conclusion] For a given design speed, the minimum horizontal curve radius of the line is primarily determined by the maximum over-height angle in the curve section and the unbalanced allowable train lateral vibration acceleration. When the train operating speed is less than or equal to 80 km/h, the minimum horizontal curve radius of 320 m for a single-axle monorail train line is adopted, together with a train operating speed limit of $4.30\sqrt{R}$ (where R is the curve radius) in small-radius curve sections.

Key words straddle monorail; single-axle monorail train; operational stability; ride comfort; minimum horizontal curve radius; curve speed limit

跨座式单轨是通过单根轨道支持、稳定和导向, 车体采用橡胶轮胎骑在轨道梁上运行的轨道交通制式。目前, 部分城市的跨座式单轨线路采用了全自动运行方案^[1-3]。跨座式单轨列车根据转向架制式的不同, 可划分为单轴式单轨列车、双轴式单轨列车两类。运营实践发现, 单轴式单轨列车的横向稳定性较双轴式单轨列车差^[4-5], 而列车运行平稳性主要受车辆设计参数和线路设计参数的影响^[6-11], 尤其是单轨线路的平面曲线参数, 直接影响列车的运行平稳性及乘客的乘坐舒适性^[12-15]。

本文结合单轴式单轨列车的结构特点, 对单轴式单轨列车线路的平面最小曲线半径进行计算, 并对未被平衡的列车横向加速度允许值等计算参数进行研究, 以得到满足不同等级乘坐舒适性要求单

^{*} 城市轨道交通车辆系统集成与控制重庆市重点实验室课题 (CKLURTSIC-KFKT-212002)

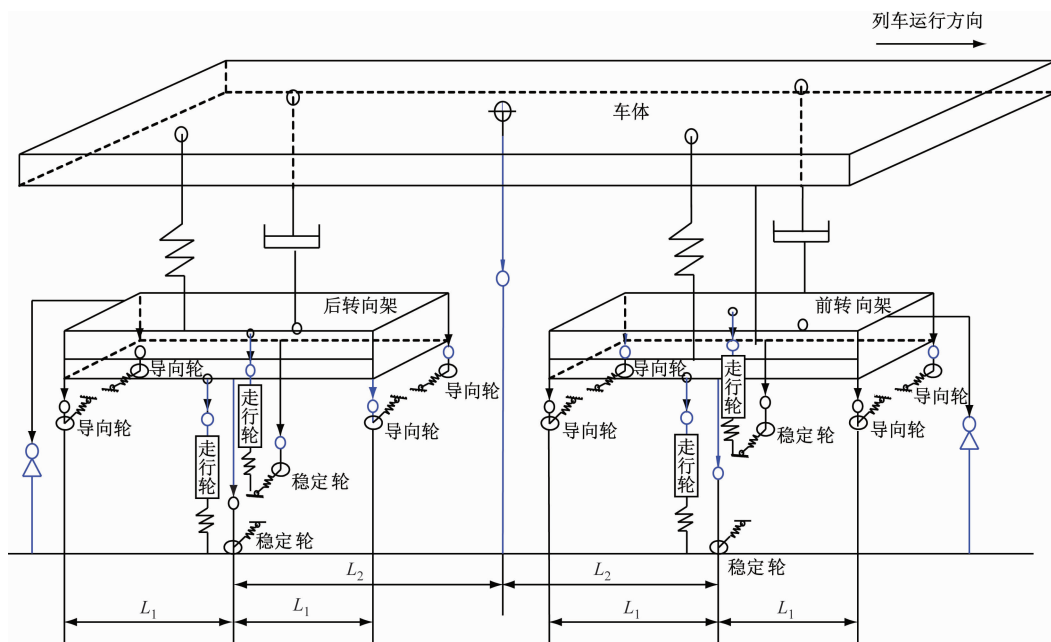
轴式单轨列车的线路平面最小曲线半径建议取值。

1 建立单轴式单轨列车车轨耦合动力学模型

1.1 单轴式单轨列车动力学模型

基于车辆的结构特点^[16]对其进行适当简化,建

立了单轴式单轨列车多刚体动力学模型,如图 1 所示。该模型忽略了车体、转向架的弹性(即将车体、转向架视为刚体),采用线性弹簧来模拟沙漏簧及空间杆系,以 Fiala 轮胎模型来模拟走行轮及水平轮系,阻尼按黏性阻尼计算。



注: v —列车运行速度; L_1 —车辆轴距的一半; L_2 —车辆定距的一半。

图 1 单轴式单轨列车多刚体动力学模型

Fig. 1 Multi-rigid body dynamics model of single-axle monorail train

1.2 跨座式单轨线路模型

根据 GB 50458—2008《跨座式单轨交通设计规范》以及对曲线限速的研究,本文进一步建立了跨座式单轨的线路模型,如图 2 所示。图 2 中:前后直线段长度、前后缓和曲线长度均为 50 m,圆曲线长度为 130 m,线路超高率最大允许值 $i_{\max} = 12\%$ 。

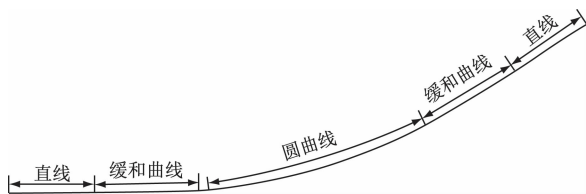


图 2 跨座式单轨线路模型

Fig. 2 Straddle monorail line model

1.3 单轴式单轨列车车轨耦合动力学模型验证

为验证所建车轨耦合动力学模型的准确性,本研究对实车进行了试验分析。根据 GB/T 5599—2019《机车车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》

的要求,在直线线路上进行了测试,测试车速 $v_{cs} = 15 \text{ km/h}$ 。将试验测得的列车横向振动加速度、计算仿真得到的列车横向振动加速度进行对比,其结果如图 3 所示。由图 3 可知:二者总体变化趋势一致,局部存在差异,但二者的差异较小。由此可认为,本文所建的车轨耦合动力学模型是合理的。

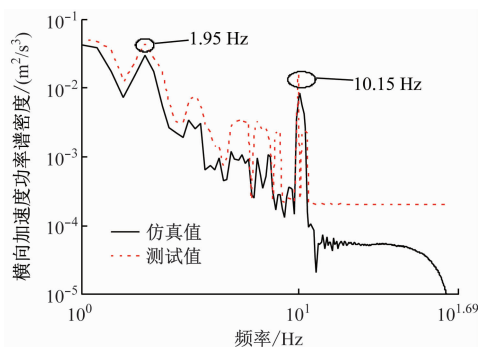


图 3 列车横向振动加速度的测试值与仿真值对比

Fig. 3 Comparison of testing and simulation values of train transverse vibration acceleration

2 单轨列车运行平稳性及乘坐舒适性评价方法

2.1 列车运行平稳性评价方法

列车运行平稳性是车辆振动性能的综合反映。参考 GB/T 5599—2019 的规定,列车运行平稳性评价结果为“优、良好、合格”时,其列车运行平稳性指数 W 分别为“(0, 2.50]、(2.50, 2.75]、(2.75, 3.00]”。

列车运行过程中,列车最大振动加速度可以有效反映车体受轮轨力作用产生的最大冲击振动。该指标可用于评价列车运行的稳定性及安全性,列车最大振动加速度的评价方法参考 TB/T 2360—1993《铁道机车动力学性能试验鉴定方法及评定标准》,列车运行平稳性评价结果为“优秀、良好、及格”时,列车的横向最大振动加速度分别为“1.47 m/s²、1.96 m/s²、2.45 m/s²”,列车的垂向最大振动加速度分别为“2.45 m/s²、2.95 m/s²、3.63 m/s²”。

2.2 列车乘坐舒适性评价方法

乘坐舒适性的评价方法可参考 ISO(国际标准化组织)颁布的 ISO 2631-1:1997 标准。由于该标准中各级别乘坐舒适度的取值范围存在交叠,文献[17]根据该标准的测试要求,对振动频率为 0.5 ~ 80.0 Hz 的列车横向振动加速度数据进行滤波处理,以进一步优化限值区间。文献[17]的结论:乘坐舒适度等级为“非常舒适、舒适、较舒适、不舒适”时,对应的列车横向振动加速度(单位为 m/s²)取值区间分别为“(0, 0.315]、(0.315, 0.500]、(0.500, 0.800]、(0.800, 1.250]”。

3 跨座式单轨线路平面最小曲线半径研究

3.1 平面最小曲线半径计算

跨座式单轨列车通过线路曲线区段时的受力情况如图 4 所示。当质量为 m 的单轨列车在超高为 h 的曲线区段上行驶时,车体的主要受力包括轨道梁的支持力 F_N 、车体重力 G ($G = mg$, g 为重力加速度)、车体的离心力 F_L 。

设线路的曲线半径为 R , θ 为曲线区段的超高角, θ_{\max} 为曲线区段的最大超高角,列车振动加速度为 a ,则车体横向受力关系为:

$$F_L - F_N \sin \theta = m(v/3.6)^2/R - mg \tan \theta = ma \quad (1)$$

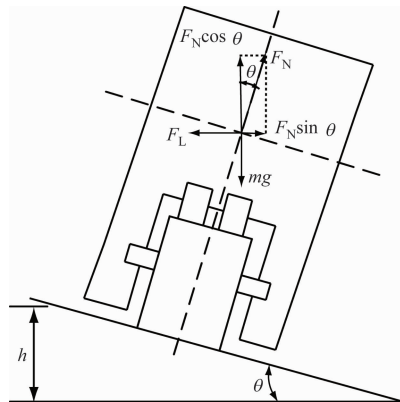


图4 跨座式单轨列车通过线路曲线区段时的受力情况

Fig. 4 Forces on straddle monorail trains when passing through line curved sections

$\theta > \theta_{\max}$ 时,会产生未被平衡的横向加速度 a_L , 其计算式为:

$$a_L = (v/3.6)^2/R - g \tan \theta_{\max} \quad (2)$$

$\theta \leq \theta_{\max}$ 时,不会产生未被平衡的列车横向振动加速度,此时 v 、 R 、 θ 的计算式为:

$$(v/3.6)^2/R = g \tan \theta \quad (3)$$

由此可得到跨座式单轨线路平面最小曲线半径 $R_{\min, pm}$ 的计算式为:

$$R_{\min, pm} = (v_{\max}/3.6)^2/(a_{Ly} + g \tan \theta_{\max}) \quad (4)$$

式中:

a_{Ly} —未被平衡的列车横向振动加速度允许值,单位 m/s²;

v_{\max} —列车的最高运行速度,单位 km/h。

式(4)中, $\theta_{\max} = 6.843^\circ$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 。由式(4)可知,在设计速度 v_{sj} 一定的情况下, $R_{\min, pm}$ 主要取决于 θ_{\max} 和 a_{Ly} 。

3.2 基于乘坐舒适性的平面曲线最小半径计算

列车运行过程中,乘坐舒适性的优劣主要由 a_L 决定。由试验数据^[18]可知:列车横向振动加速度均方根值 a_H 与 a_L 间存在线性关系,建议二者的比例系数 k 取 1.2。

结合式(4),可得到 $R_{\min, pm}$ 与 a_H 的关系式为:

$$R_{\min, pm} \approx (v_{\max}/3.6)^2/(a_H/k + g \tan \theta_{\max}) \quad (5)$$

在 v 不变的情况下,可按照不同等级的舒适性需求,确定 $R_{\min, pm}$ 的取值范围。以 $v = 80 \text{ km/h}$ 为例进行计算,并根据不同等级的乘坐舒适性需求划分 $R_{\min, pm}$ 取值区间,可得到 a_L 与 $R_{\min, pm}$ 的关系。 $v = 80 \text{ km/h}$ 时,基于不同等级乘坐舒适度要求的 $R_{\min, pm}$ 建议取值区间如图 5 所示。

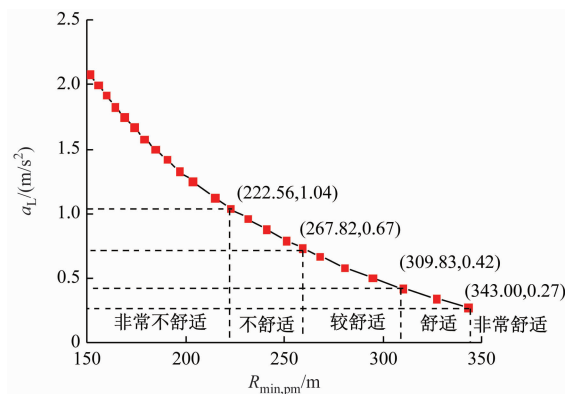


图5 $v=80$ km/h 时基于不同等级乘坐舒适度要求的 $R_{\min,pm}$ 取值区间

Fig.5 Value interval of $R_{\min,pm}$ based on different levels of ride comfort requirements for $v=80$ km/h

如图5所示,当跨座式单轨线路以“较舒适”这一等级进行线路设计时,符合要求的 $R_{\min,pm}$ 取值范围为 $(267.82, 309.83]$ 。进一步基于“非常舒适”“舒适”“较舒适”3个等级的要求,对跨座式单轨线路的 $R_{\min,pm}$ 进行设计,得到不同 v_{sj} 下满足舒适性要

求的 $R_{\min,pm}$ 理论取值区间,如表1所示。

表1 不同 v_{sj} 下 $R_{\min,pm}$ 的理论取值区间

Tab.1 Theoretical value interval of $R_{\min,pm}$ for different v_{sj}

$v_{sj}/$ (km/h)	$R_{\min,pm}$ 的理论取值区间/m		
	非常舒适	舒适	较舒适
80	>343.00	$(309.83, 343.00]$	$(267.82, 309.83]$
70	>262.62	$(237.22, 262.62]$	$(205.05, 237.22]$
65	>226.44	$(204.54, 226.44]$	$(176.80, 204.54]$
60	>192.95	$(174.28, 192.95]$	$(150.65, 174.28]$
50	>133.99	$(121.03, 133.99]$	$(104.62, 121.03]$
45	>108.53	$(98.03, 108.53]$	$(84.74, 98.03]$
40	>85.76	$(77.46, 85.76]$	$(66.96, 77.46]$

基于现行的行业标准与单轨线路的实际运营情况,正线最小曲线半径 $R_{\min,zx}$ 为 100 m,车场线最小曲线半径 $R_{\min,ccx}$ 为 50 m。因此,基于“较舒适”的乘坐舒适性等级进行线路设计,可得到在线路一般条件($a_{Ly}=0.42$ m/s²)、线路困难条件($a_{Ly}=0.67$ m/s²)不同 v_{sj} 下 $R_{\min,pm}$ 的取值,如表2所示。

表2 不同 v_{sj} 下 $R_{\min,pm}$ 的取值

Tab.2 Values of $R_{\min,pm}$ with different v_{sj}

线路条件	不同 v_{sj} 下的 $R_{\min,pm}/m$					
	$v_{sj}=80$ km/h	$v_{sj}=70$ km/h	$v_{sj}=65$ km/h	$v_{sj}=60$ km/h	$v_{sj}=50$ km/h	$v_{sj}=45$ km/h
线路一般条件	320	240	210	180	130	100
线路困难条件	290	220	190	160	110	100

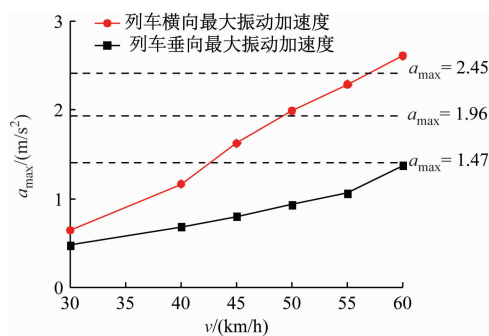
3.3 平面最小曲线半径取值合理性验证

3.3.1 仿真验证

根据上文所述评价方法,对列车运行平稳性进行评价。仿真时采用 A 级路面谱模拟轨道梁的不平顺度,线路工况设置如图2所示。仿真验证得到不同 v 下列车横向最大振动加速度、列车垂向最大振动加速度仿真结果如图6所示,不同 v 下列车运行平稳性指数 W 仿真结果如图7所示。

由图6、图7可知:单轴式单轨列车在曲线区段行驶时,列车的横向最大振动加速度、垂向最大振动加速度随 v 的增加急剧变大,列车运行平稳性指数 W 随 v 的增加而增加。进一步分析 $v=50$ km/h、 $v=55$ km/h、 $v=60$ km/h 3种速度工况下单轴式单轨列车的动力学性能,得到这3种速度工况下单轴式单轨列车动力学性能评价结果,如表3所示。

由上述分析可知:单轴式单轨列车运行在 $R_{\min,pm}=130$ m 的曲线区段时,为保证列车运行平稳



注: a_{\max} —列车最大振动加速度。

图6 不同 v 下列车横向、垂向最大振动加速度

Fig.6 Maximum vibration acceleration of train in transverse and vertical direction at different v

性及乘坐舒适性在“良好”等级,须满足 $v < 50$ km/h。对比表2中 $R_{\min,pm}$ 的建议取值, $v=50$ km/h 时, $R_{\min,pm}=130$ m 可保证乘坐舒适性在“舒适”等级内。计算结果与仿真结果一致,说明了本文提出的基于乘坐舒适性的单轴式单轨列车平面最小曲

线半径取值具有合理性。

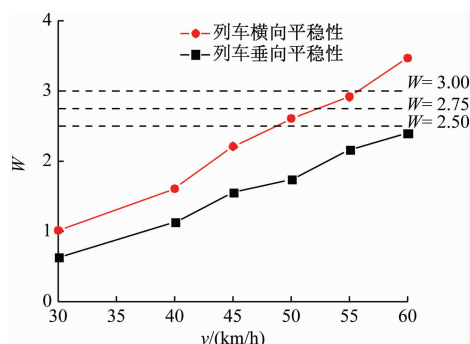


图7 不同 v 下列车运行平稳性指数

Fig.7 Train operational stability index at different v

表3 3种速度工况下单轴式单轨列车动力学性能评价结果

Tab.3 Evaluation results of single-axle monorail train dynamics performance under three speed conditions

$v/(km/h)$	$a_{max}/(m/s^2)$		W	
	垂向	横向	垂向	横向
50	优秀	良好	优	良好
55	优秀	良好	优	及格(接近不及格)
60	优秀	不及格	优	不及格

3.3.2 与城市道路的适配性研究

跨座式单轨线路一般以高架形式沿城市主干道和公路敷设,因此,跨座式单轨线路的线型设置是否合理,可基于 JTG D20—2017《公路路线设计规范》及 CJJ 193—2012《城市道路路线设计规范》予以判断。

根据表2的 $R_{min,pm}$ 取值,以 $v=80\text{ km/h}$ 为例,满足“较舒适”等级要求的 $R_{min,pm}=320\text{ m}$ 。该值小于 JTG D20—2017 中设计速度大于等于 80 km/h 的最小曲线半径(公路线路),也小于 CJJ 193—2012 中设计速度大于等于 60 km/h 的最小曲线半径(城市道路)。由此,可认为 $v=80\text{ km/h}$ 条件下,采用单轴式单轨列车的线路, $R_{min,pm}=320\text{ m}$ 可以满足绝大部分城市道路的线型要求,本文建议的取值合理。

4 单轴式单轨列车曲线限速研究

若实际施工中不能按照 v_{sj} 要求来设置曲线半径时,应降低 v ,以保证曲线通过性。由于单轴式单轨列车的超高设置采用超高率而非超高值,需要将二者进行转换。设单轴式单轨列车的超高率为 i ,最大超高率为 i_{max} ,欠超高率为 i_q ,最大欠超高率允许值为 $i_{q,max}$ ($i_{q,max}=5\%$),左右走行轮中心定距为 S ,则二者转换的计算式为:

$$i = \tan \theta = h/S \quad (6)$$

$$i_q = a_{Ly}/g \quad (7)$$

结合式(4),可得到 $R_{min,pm}$ 与 i_{max} 、 $i_{q,max}$ 的关系式为:

$$R_{min,pm} = v_{max}^2 / [127(i_{q,max} + i_{max})] \quad (8)$$

代入相关参数,可得到单轴式单轨列车的曲线限速 v_{lim} 与 R 的关系式:

$$v_{lim} = 4.65\sqrt{R} \quad (9)$$

考虑实际运行情况,可将 v_{lim} 与 R 的关系式调整为:

$$v_{lim} = 4.30\sqrt{R} \quad (10)$$

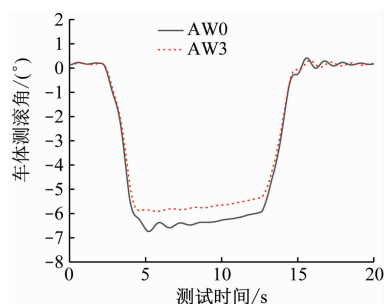
不同条件下单轴式单轨列车的 v_{lim} 如表4所示, v_{lim} 可根据计算值向下取整且应低于列车的设计速度。由表4可知:在 $i_q=5\%$ 、 $R_{min,pm}=100\text{ m}$ 时, $v_{lim}=43.00\text{ km/h}$;在 $i_q=5\%$ 、 $R_{min,pm}=150\text{ m}$ 时, $v_{lim}=52.66\text{ km/h}$ 。这些计算结果均与表2中 $R_{min,pm}$ 建议取值一致。

表4 不同条件下单轴式单轨列车的 v_{lim}

Tab.4 v_{lim} for single-axle monorail trains under different conditions

$i_{max}/\%$	$i_q/\%$	不同 R 下的 $v_{lim}/(km/h)$			
		$R=50\text{ m}$	$R=100\text{ m}$	$R=150\text{ m}$	$R=200\text{ m}$
12	0	27.61	39.04	47.82	55.21
12	5	30.41	43.00	52.66	60.81

为验证本文提出的 v_{lim} 是否合理,以 $R=100\text{ m}$ 、 $v_{lim}=43.00\text{ km/h}$ 的工况为例,选取车体侧滚角及受力状态最差的转向架导向力矩2个指标,对单轴式单轨列车的曲线通过性进行分析。车体侧滚角的仿真结果如图8所示。转向架导向力矩的仿真结果如图9所示。



注:AW0—空载;AW3—超载;车体侧滚角与曲线方向相反取正值,与曲线方向相同取负值。

图8 车体侧滚角仿真结果

Fig.8 Simulation results of carbody side roll angle

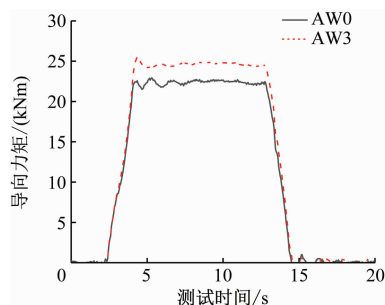


图9 转向架导向力矩仿真结果

Fig.9 Simulation results of bogie guiding moment

由图8、图9可知:基于单轴式单轨列车的曲线通过性评价指标限值^[19],计算得到车体的最大侧滚角为 6.734° ,小于行业规定的 10° ^[20];计算得到列车转向架导向力矩的最大值为25.13 kNm,没有超过限值61.87 kNm。由此可认为,单轴式单轨列车具有良好的曲线通过性,本文提出的跨座式线路曲线限速值是合理的。

5 结论

1) 设计速度 v_{sj} 时, $R_{\min,pm}$ 主要取决于 θ_{\max} 及 a_{Ly} 。

2) 在 $v = 80 \text{ km/h}$ 下,基于不同的舒适性等级要求, $R_{\min,pm} = 320 \text{ m}$ 的取值是合理的。

3) 当线路条件不能满足 v 的要求时,应对曲线通过速度 v_{lim} 进行限制, v_{lim} 按 $4.30\sqrt{R}$ 取值。

参考文献

- [1] 郑磊, 蓝亮文. 跨座式单轨无人干预列车运行(GOA4)级全自动运行系统安全风险管控研究[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 81.
ZHENG Lei, LAN Liangwen. Research on safety risk management and control of straddle monorail GOA4 grade FAO system[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 81.
- [2] 郑磊, 谢夷飞. 跨座式单轨全自动运行系统运营场景优化[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(2): 94.
ZHENG Lei, XIE Yifei. Optimization of operation scenarios for straddle monorail FAO system[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(2): 94.
- [3] 何小宝, 胡伟, 刘勇, 等. 芜湖轨道交通项目跨座式单轨接触轨安装中的技术问题及解决措施[J]. 城市轨道交通研究, 2023, 26(8): 218.
HE Xiaobao, HU Wei, LIU Yong, et al. Technical issues and solutions in straddle monorail contact rail installation for the rail transit project in Wuhu[J]. Urban Mass Transit, 2023, 26(8): 218.
- [4] 辛亮, 杜子学, 杨震, 等. 单轴转向架跨座式单轨车辆的主
- 动控制研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2021, 40(7): 123.
- XIN Liang, DU Zixue, YANG Zhen, et al. Active control of the straddle-type monorail vehicle with single-axle bogie[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Science), 2021, 40(7): 123.
- [5] 杜子学, 许亮. 单轴转向架跨座式单轨车辆牵引平衡装置参数研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(7): 129.
DU Zixue, XU Liang. Research on traction balancing device parameters for single-axle bogie straddle-type monorail vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(7): 129.
- [6] 杜子学, 杨绪杰, 左长永. 单轨车辆乘坐舒适性与运行平稳性仿真和试验研究[J]. 城市轨道交通研究, 2014, 17(5): 37.
DU Zixue, YANG Xujie, ZUO Changyong. Analog simulation and experiment of passenger comfort and stability on monorail vehicles[J]. Urban Mass Transit, 2014, 17(5): 37.
- [7] 吕国敏, 杨百岭, 杜子学, 等. 新一代单轴跨座式单轨车辆的曲线通过性能[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(1): 87.
LYU Guomin, YANG Bailing, DU Zixue, et al. Curve-passing performance of new generation single-axle straddle monorail vehicle[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(1): 87.
- [8] 文孝霞, 韩轲, 杜子学. 单轴转向架跨座式单轨车辆悬挂系统参数优化分析[J]. 华侨大学学报(自然科学版), 2021, 42(6): 725.
WEN Xiaoxia, HAN Ke, DU Zixue. Optimization analysis of suspension system parameters of straddle monorail vehicle with single axle bogies[J]. Journal of Huaqiao University (Natural Science), 2021, 42(6): 725.
- [9] 杜子学, 文孝霞, 杨震, 等. 跨座式单轨车辆走行轮偏磨因子模型研究[J]. 西南交通大学学报, 2019, 54(2): 373.
DU Zixue, WEN Xiaoxia, YANG Zhen, et al. Study on partial-wear-factor model monorail vehicle running wheel[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2019, 54(2): 373.
- [10] 刘晓云, 刘俊, 周宇正. 跨座式单轨车辆基地咽喉区线路平面优化研究[J]. 铁道勘察, 2019, 45(2): 90.
LIU Xiaoyun, LIU Jun, ZHOU Yuzheng. Study on optimization of throat plane in straddle type monorail Depot[J]. Railway Investigation and Surveying, 2019, 45(2): 90.
- [11] 孙静. 单轴转向架跨座式单轨主要线路技术条件[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(7): 70.
SUN Jing. Major track technical conditions for straddle monorail with single axle vehicle bogie[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(7): 70.
- [12] 张学军, 余浩伟, 谢毅, 等. 基于乘客舒适度的悬挂式单轨平面圆曲线参数研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(2): 62.
ZHANG Xuejun, YU Haowei, XIE Yi, et al. Research on plane curve radius of the suspended monorail based on passenger comfort[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(2): 62.

(下转第105页)

- [13] 刘文武, 赵才友, 贺利工, 等. 预制式浮置板轨道隔振器/剪力铰设计参数优化研究[J]. 铁道科学与工程学报, 2024, 21(11): 4497.
LIU Wenwu, ZHAO Caiyou, HE Ligong, et al. Optimization of design parameters for prefabricated floating slab track isolator/shear hinge[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2024, 21(11): 4497.
- [14] 李明航, 王文斌, 李喆, 等. 随机轮轨动态激励对钢弹簧浮置板轨道减振性能影响分析[J]. 工程力学, 2024, 41(增刊1): 292.
LI Minghang, WANG Wenbin, LI Zhe, et al. Analysis of vibration reduction effect of steel spring floating slab track induced by random wheel-track dynamic excitation[J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(S1): 292.
- [15] 王文波, 关庆华, 温泽峰. 车辆荷载下钢弹簧浮置板轨道振动特性分析[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(1): 212.
WANG Wenbo, GUAN Qinghua, WEN Zefeng. Vibration characteristics analysis of steel spring floating slab tracks under vehicle loads[J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(1): 212.
- [16] LU Y, SHEN D, SHAO H, et al. Investigation of concrete damage on a prefabricated steel spring floating slab track by finite element modelling[J]. Urban Rail Transit, 2024, 10(4): 376.
- [17] JIN H, WANG H, LI Z, et al. Vibration-reduction optimization of the point-supporting floating-slab track based on local resonance mechanism[J]. Journal of Vibration and Control, 2023, 29(5/6): 1176.
- [18] LU Y, SHEN D, SHAO H, et al. Numerical investigation on the failure mode of the upper shear hinge in steel spring floating slab track[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit, 2024, 238(6): 628.
- [19] 袁德浩, 张宏亮, 杨林, 等. 钢弹簧浮置板浸水条件下的减振效果[J]. 城市轨道交通研究, 2024, 27(12): 87.
YUAN Dehao, ZHANG Hongliang, YANG Lin, et al. Vibration reduction effect of steel spring floating slabs under water immersion conditions[J]. Urban Mass Transit, 2024, 27(12): 87.
- [20] 黄腾锋, 万灵, 黄强, 等. 考虑剪力铰与钢弹簧变刚度下浮置板轨道减振特性研究[J]. 噪声与振动控制, 2024, 44(2): 185.
HUANG Tengfeng, WAN Ling, HUANG Qiang, et al. Damping characteristics of floating slab track considering the existence of shear hinge and stiffness change of steel spring[J]. Noise and Vibration Control, 2024, 44(2): 185.
- 收稿日期:2025-03-25 修回日期:2025-04-16 出版日期:2025-07-10
Received:2025-03-25 Revised:2025-04-16 Published:2025-07-10
· 通信作者:瞿锋,高级工程师,1323951174@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

(上接第98页)

- [13] 郭士永, 黄成名, 胡江民, 等. 基于舒适度的悬挂式单轨平面曲线参数研究[J]. 铁道标准设计, 2019, 63(7): 46.
GUO Shiyong, HUANG Chengming, HU Jiangmin, et al. Research on plane curve parameter of suspended monorail based on comfort[J]. Railway Standard Design, 2019, 63(7): 46.
- [14] 戴宝锐, 吴定俊, 李奇, 等. 跨座式单轨列车通过公轨合建斜拉桥时的乘坐舒适性研究[J]. 城市轨道交通研究, 2018, 21(1): 88.
DAI Baorui, WU Dingjun, LI Qi, et al. Research on ride comfort of straddle-type monorail vehicle traveling on combined highway and railway cable-stayed bridge[J]. Urban Mass Transit, 2018, 21(1): 88.
- [15] 华祥安. 跨座式单轨车辆动力学性能评价标准关键问题研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2021.
HUA Xiang'an. Research on key issues of dynamic performance evaluation criteria for straddle monorail vehicles [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2021.
- [16] 文孝霞, 杜子学, 许丹洲, 等. 单轨车辆耦合动力学模型与振动响应特性[J]. 振动测试与诊断, 2017, 37(3): 462.
WEN Xiaoxia, DU Zixue, XU Zhouzhou, et al. The coupling dynamic model and vibration response of straddle type monorail vehicle[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2017, 37(3): 462.
- [17] 王海涌, 党建武, 王晓明. 基于舒适度的高速铁路线路设计与优化[J]. 铁道工程学报, 2014, 31(11): 30.
WANG Haiyong, DANG Jianwu, WANG Xiaoming. Design and optimization of high-speed railway lines based on comfort[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2014, 31(11): 30.
- [18] 柯斌, 易思蓉, 余浩伟. 悬挂式单轨系统线路平面曲线参数研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(5): 85.
KE Bin, YI Sirong, YU Haowei. Research on line plane curve parameters of suspension monorail system[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(5): 85.
- [19] 常聪. 基于磁流变阻尼器单轴转向架跨座式单轨列车半主动悬架控制及仿真分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
CHANG Cong. Control and simulation analysis of semi-active suspension for straddle type monorail vehicles based on magnetorheological dampers with single axle bogies [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [20] 唐飞. 悬挂式单轨车辆系统动力学参数优化研究[D]. 重庆交通大学, 2018.
TANG Fei. Research on optimization of dynamic parameters of suspended monorail vehicle system[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2018.
- 收稿日期:2023-09-03 修回日期:2024-05-05 出版日期:2025-07-10
Received:2023-09-03 Revised:2024-05-05 Published:2025-07-10
· 第一作者:杜子学,教授,aaadzx@163.com
通信作者:皮阳,硕士研究生,1278510653@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