

悬挂式单轨车辆的倒 T 形辙叉道岔通过性能*

孟 姝 黄 海 王伯铭

(西南交通大学机械工程学院, 610013, 成都)

摘 要 [目的] 悬挂式单轨交通系统具有良好的发展前景, 对于其车辆过道岔的动力学性能研究目前较少, 需对此进行研究。[方法] 采用 UM(多体动力学) 软件建立车辆动力学模型, 以车体最大振动加速度、走行轮最大垂向力、导向轮及稳定轮最大垂向力、车体及悬吊梁最大侧滚角为主要评价指标, 针对应用于悬挂式单轨交通系统的倒 T 形辙叉道岔, 进行悬挂式单轨车辆道岔通过性能研究。[结果及结论] 倒 T 形辙叉道岔结构的导向轨面不平顺较大, 悬挂式单轨车辆在通过曲线道岔时, 很难保证导向轮的导向力不超过安全限值。针对此问题提出了一种导向轨面补偿装置。应用此导向轨面补偿装置后, 悬挂式单轨车辆可以以 15 km/h 的速度安全通过半径为 50 m 的倒 T 形辙叉道岔, 动力学性能有明显改善。

关键词 悬挂式单轨车辆; 倒 T 形辙叉道岔; 动力学性能

中图分类号 U270.1⁺1:U232

DOI:10.16037/j.1007-869x.2024.01.019

Passing Performance of Inverted T-shaped Frog Turnouts for Suspended Monorail Vehicles

MENG Shu, HUANG Hai, WANG Boming

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, 610013, Chengdu, China)

Abstract [Objective] The suspended monorail transportation system holds promising prospects, yet researches on the dynamics performance of vehicle passing through turnouts remain relatively scarce, requiring comparison for further exploration. [Method] A vehicle dynamics model is established using the multi-body dynamics software UM. The main evaluation indicators include the carbody maximum vibration acceleration, the running wheel maximum vertical force, the maximum vertical force of guide and stable wheels, and the maximum lateral roll angle of carbody and suspension beam. The passing performance of suspended monorail vehicles through inverted T-shaped frog turnouts applied in the suspended monorail transportation system is studied. [Result & Conclusion]

The structure of the inverted T-shaped frog turnouts causes significant guiding rail surface irregularity, making it difficult to ensure that the guiding force of the guide wheels does not exceed the safety limit when a suspended monorail vehicle is passing through curved segment turnouts. To solve this problem, a guiding rail surface compensation device is proposed. After applying this device, the suspended monorail vehicle can safely pass through inverted T-shaped frog turnout with a 50 m radius structure at a speed of 15 km/h, leading to a noticeable improvement in the dynamics performance.

Key words suspended monorail vehicle; inverted T-shaped frog turnout; dynamics performance

悬挂式单轨交通系统具有造价低、安全性高、地形适应性强的特点, 非常适合在中小型城市作为主要的公共交通形式, 也适用于景区的旅游交通。

文献[1]利用 ADAMS 软件分析了悬挂原件参数和侧风对车辆运行性能的影响; 文献[2]分析了导向轮预压力、侧风和抗侧滚止挡角度对车辆性能的影响; 文献[3]等分析了车桥耦合系统的共振问题; 文献[4-5]等通过车桥耦合动力学研究, 对悬挂式车桥系统进行了优化改进。目前, 对于悬挂式单轨交通系统道岔结构的研究较多, 而对悬挂式单轨车辆在道岔通过性能方面的研究较少。

本文基于对称式橡胶轮胎箱型轨道梁结构, 对于悬挂式单轨车辆通过倒 T 形辙叉道岔的动力学性能进行分析研究, 并提出一种导向轨面补偿装置, 以改善车辆通过道岔时的动力学性能。

1 建立车辆与道岔的仿真模型

本文所研究的悬挂式单轨车辆采用单电机双轴驱动, 其电机布置在转向架的中央, 能大幅减小转向架的点头惯量和摇头惯量, 提高列车运行平稳性。

* 四川省科技支撑计划项目(2016GZ0337)

本文采用 UM(多体动力学)软件建立动力学仿真模型。建立模型时,将构架、驱动电机、车体、悬吊梁、吊架均视为刚体,不考虑受力造成的轻微变形;走行轮、导向轮及稳定轮均采用 FIALA 轮胎力元来模拟轮胎与轨道之间的接触关系,减振器元件采用线性阻尼力元模拟;抗侧滚止挡和横向止挡根据真实情况设置相应的特性曲线。悬挂式单轨车辆仿真的主要参数如表 1 所示,所建悬挂式单轨单电机双轴驱动转向架车辆动力学模型如图 1 所示。

表 1 悬挂式单轨车辆仿真的主要参数

Tab.1 Main parameters in suspended monorail vehicle simulation

参数	数值
车体质量/t	≤13.2
车辆长度/m	9.73
转向架质量/t	≤3.3
空气弹簧垂向刚度/(MN/m)	0.129
空气弹簧垂向阻尼/(kNs/m)	15
抗侧滚减振器阻尼/(kNs/m)	500
垂向减振器阻尼/(kNs/m)	6
横向减振器阻尼/(kNs/m)	62
前后转向架中心距/m	6.6
走行轮垂向力允许值/kN	39.8
导向轮、稳定轮的径向力允许值/kN	22.0

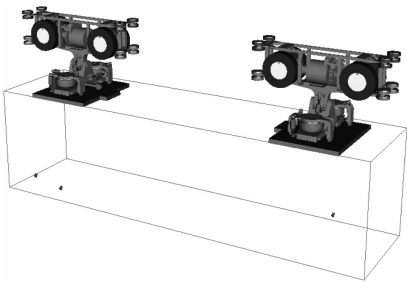
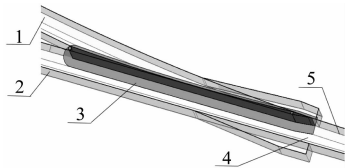


图 1 悬挂式单轨单电机双轴驱动转向架车辆动力学模型
Fig.1 Dynamics model of suspended vehicle with monorail single-motor dual-axle drive bogie

受 UM 软件的局限性限制,将道岔模型测量数据换算成不平顺激励来模拟道岔对车辆动力学性能的影响。为了更加直观地研究道岔对车辆动力学的影响,不平顺激励只包含道岔结构本身的不平顺,不包含由轨道制造或建设产生变形而造成的不平顺。

以文献[6]的悬挂式单轨道岔结构为参考,选择辙叉和走行轨面一体的倒 T 形辙叉道岔结构,取

道岔曲线半径为 50 m。倒 T 形辙叉道岔的三维模型如图 2 所示。位于道岔中间的可动倒 T 形辙叉,通过转动到不同位置来引导列车进入不同线路,并能在列车通过道岔的时候提供走行轨面支撑。

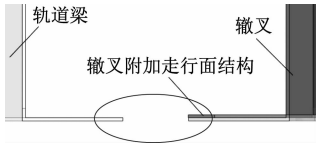


注:1—曲线区域;2—直线区域;3—辙叉;4—走行轮部分悬空处;5—直线曲线混合区域。

图 2 倒 T 形辙叉道岔三维模型
Fig.2 3D model of inverted T-shaped frog turnout

受轨道结构的限制,车辆在接触倒 T 形辙叉的时候会出现走行轮部分悬空的情况。经过静态分析,走行轮悬空的影响可忽略不计,故本文不考虑其造成的走行轮力学性能变化。

当倒 T 形辙叉转动时,两侧导向面需要相互贴合,因此在走行轮部分悬空会造成导向轨面的不平滑,将在车辆通过时产生较大的横向力,对车辆的运行性能有很大影响。此外,由于倒 T 形辙叉转动后需要由两侧轨道梁的走行面来支撑,所以走行轨面在此处也是不平滑的。倒 T 形辙叉附加的走行面不平顺如图 3 所示。本文暂不考虑实际使用中为保证辙叉正常转动所需要预留的安装间隙,只考虑走行面钢板的厚度。根据文献[7],轨道梁钢板厚度取为 14 mm。



注:圈出部分右侧钢轨比左侧钢轨高出一个钢板厚度(14 mm)。

图 3 倒 T 形辙叉附加的走行面不平顺示意图
Fig.3 Diagram of running surface irregularity attached to inverted T-shaped frog

通过对道岔模型的测量,可以得到相应的不平顺数据。图 4 为车辆通过道岔的示意图。当车辆通过直线道岔时,需要对右侧的走行轨面、导向轨面和稳定轨面添加相应的不平顺激励。当车辆通过曲线道岔时,需要对左侧的走行轨面、导向轨面和稳定轨面添加相应的不平顺激励。

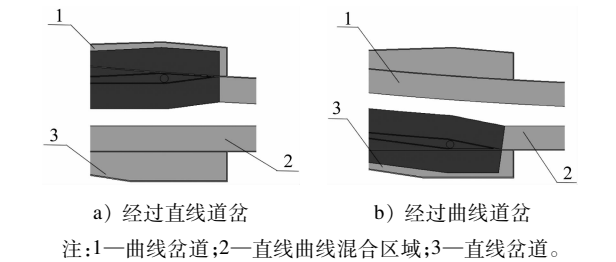


图 4 车辆过岔示意图

Fig. 4 Schematic diagram of vehicle passing through turnouts

本文研究的曲线道岔线路情况比具有缓和曲线的实际条件更为恶劣,其采用直线—圆曲线—直线的设置方式,不设置缓和曲线,对应的线路长度为 50 m、30 m、50 m。由于道岔不平顺数据量较大,考虑篇幅限制,不再列出三维模型测量后转化的不平顺数据。

根据 GB 5599—2019《机车车辆动力学性能评定及试验鉴定规范》规定,悬挂式单轨车辆的加速度观测点设置在距转向架中心 1 000 mm 处一侧车体地板面上。车辆通过速度为 v ,前观测点标记为

F,后观测点标记为 B,具体观测点位置如图 5 所示。

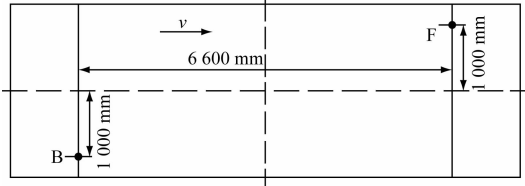


图 5 悬挂式单轨车辆平稳性观测点

Fig. 5 Observation point of suspended monorail vehicle stability

2 悬挂式单轨车辆的道岔通过性能

相对于道岔结构所造成的不平顺激励,轨道和道岔本身的不平顺非常小,本研究忽略不计。在车辆通过直线道岔时,若走行轮最大垂向力数值未逼近极限值,则认为能够安全通过。

采用 UM 软件对曲线半径为 50 m 的道岔进行动力学计算,得到不同载荷状态下车辆通过不同道岔的评定指标数据,如表 2 所示。由表 2 进一步分析车辆的道岔通过性能。

表 2 不同载荷状态下车辆通过不同道岔时的评定指标数据

Tab. 2 Data of evaluation indicators for vehicle passing through different turnouts under different loading states										
道岔类型	载荷状态	$v/$ (km/h)	车体垂向最大振动加速度/(m/s^2)		车体横向最大振动加速度/(m/s^2)		走行轮垂向力最大值/kN	导向力最大值/kN	稳定力最大值/kN	车体最大侧滚角/($^\circ$)
			测点 F	测点 B	测点 F	测点 B				悬吊梁最大侧滚角/($^\circ$)
直线道岔	空载	15	0.931	1.096	0.386	0.276	28.4	5.6	4.3	
		10	0.676	0.768	0.313	0.261	26.7	5.3	4.2	
		5	0.426	0.399	0.174	0.204	24.9	5.0	4.2	
	满载	15	0.706	0.673	0.287	0.262	33.7	5.6	4.2	
		10	0.494	0.471	0.240	0.251	32.4	5.3	4.2	
		5	0.317	0.266	0.145	0.188	30.7	5.0	4.2	
曲线道岔	空载	15	0.796	1.096	2.464	2.208	27.7	26.2	21.0	2.18
		10	0.514	0.768	1.472	1.182	26.7	22.9	13.9	1.02
		5	0.303	0.399	0.640	0.593	26.0	20.5	8.8	0.47
	满载	15	0.739	0.673	2.381	2.056	33.3	28.3	21.2	2.40
		10	0.494	0.471	1.271	1.159	32.3	25.4	14.2	1.04
		5	0.263	0.251	0.550	0.545	31.7	22.9	9.2	0.51

无论是直线道岔还是曲线道岔,悬挂式单轨车辆在空载和满载状态下通过时的车体垂向振动加速度和横向振动加速度均未超过 2.50 m/s^2 ,符合相关要求。

在满载状态下,车辆经过直线道岔时的走行轮垂向力最大值为 33.7 kN,小于走行轮的垂向力允

许值(39.8 kN)。导向力和稳定力的最大值也远远小于导向轮和稳定轮的径向力允许值(22.0 kN)。由此判断,车辆可以实现正常通过直线道岔。

当空载状态车辆以 15 km/h 速度通过曲线道岔时,走行轮垂向力最大值为 27.7 kN,小于走行轮的垂向力允许值 39.8 kN。然而,当空载状态车辆

以 15 km/h 和 10 km/h 速度通过曲线道岔时,导向力最大值均高于径向力允许值(22 kN),不符合标准要求。当空载状态车辆以速度 5 km/h 通过时,导向力最大值仅为 20.5 kN,低于 22 kN,说明车辆可以安全通过。

当满载状态车辆以 15 km/h 速度通过曲线道岔时:走行轮垂向力最大值为 33.3 kN,小于走行轮的垂向力允许值(39.8 kN);导向力和稳定力最大值分别为 28.3 kN 和 21.2 kN,其中导向力最大值高于径向力允许值(22 kN)。即使满载状态车辆仅以 5 km/h 的速度通过曲线道岔,其导向力最大值也达到了 22.9 kN,超过了 22 kN。因此,在曲线半径为 50 m 的倒 T 形辙叉道岔上,车辆速度须低于 5 km/h,使得导向力最大值低于 22 kN,才能安全通过。

3 导向轨面补偿装置

为了优化车辆过岔时的动力学性能,提高悬挂式单轨车辆的过岔速度,使倒 T 形辙叉道岔具有实际运用的可行性,本文提出了一种位于辙叉前端的导向轨面补偿装置,其结构如图 6 所示。

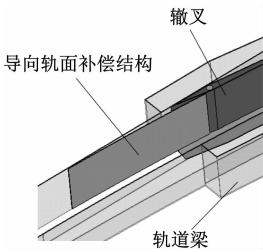


图 6 辙叉前端导向轨面补偿装置结构示意图

Fig. 6 Diagram of frog front guiding rail surface compensation device structure

在轨道梁上方安装一个伸缩装置,当辙叉转动到一侧的时候,对应侧的导向轨面补偿结构便会从轨道梁上方向下移动,补偿辙叉前端结构造成的导向轨面不平滑。车辆直线通过道岔时的导向轨面补偿装置与此类似。

对增加导向轨面补偿装置后的道岔模型进行测量,得到新的道岔不平顺数据。将新的道岔不平顺数据添加到 UM 软件中重新进行动力学计算,可以得到车辆以 15 km/h 速度通过道岔时的评定指标数据如表 3 所示。

表 3 增加导向轨面补偿装置后车辆以 15 km/h 速度通过道岔时的评定指标数据

Tab. 3 Evaluation index data of vehicle passing through turnouts at a speed of 15 km/h after adding guiding rail surface compensation device

道岔类型	车辆状态	车体垂向最大振动加速度/(m/s ²)		车体横向最大振动加速度/(m/s ²)		走行轮垂向力最大值/kN	导向力最大值/kN	稳定力最大值/kN	车体最大侧滚角/(°)	悬吊梁最大侧滚角/(°)
		测点 F	测点 B	测点 F	测点 B					
直线道岔	空载	0.848	1.096	0.386	0.333	28.4	4.1	3.5		
	满载	0.706	0.673	0.287	0.304	33.7	4.0	3.4		
曲线道岔	空载	0.734	1.096	0.698	1.257	28.3	17.5	8.0	2.12	1.92
	满载	0.706	0.673	0.609	0.986	33.5	18.0	8.1	2.33	2.01

由表 3 可知,在曲线半径为 50 m 的倒 T 形辙叉道岔上,空载状态和满载状态下的悬挂式单轨车辆以 15 km/h 的速度通过直线道岔和曲线道岔时,其车体的垂向最大振动加速度和横向最大振动加速度均未超过 2.50 m/s²。

在车辆满载状态下经过直线道岔的时候,走行轮垂向力最大值为 33.7 kN,小于走行轮的最大允许垂向力 39.8 kN。在车辆满载状态下通过曲线道岔时,导向力最大值为 18.0 kN,稳定力最大值为 8.1 kN,均小于径向力允许最大值(22 kN)。

通过对比表 2 及表 3 中速度为 15 km/h 时的车辆运行评定指标数据可知,增加导向轨面补偿装置

后,悬挂式单轨车辆通过直线道岔时各项数值差别不大,通过曲线道岔时导向力最大值、稳定力最大值及车体横向最大振动加速度均得到了明显改善,其余数值无明显变化。这说明设置导向轨面补偿装置能有效改善悬挂式单轨车辆通过倒 T 形辙叉曲线道岔的平稳性。

4 结论

1) 倒 T 形辙叉道岔结构造成的导向轨面不平顺较大,悬挂式单轨车辆虽然可以安全通过直线道岔,但在通过曲线道岔时,导向轮所承受的导向力非常大,即使降低通过道岔的运行速度,也很难保

证导向轮导向力不超过安全限值。

2) 在增加了导向轨面补偿装置后,悬挂式单轨车辆在通过曲线道岔时,导向轮和稳定轮所承受的径向力大大减小,低于导向轮和稳定轮的径向力允许最大值。悬挂式单轨车辆可以以 15 km/h 的速度安全通过 50 m 半径结构的倒 T 形辙叉道岔。

参考文献

- [1] 曹恺. 基于 ADAMS 的悬挂式单轨车辆悬挂参数优化和侧风影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2015.
CAO Kai. The effect of crosswind and the parameter optimization of the suspended monorail car based on ADAMS[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015.
- [2] 郑开锋. 带机械差速器的悬挂式单轨转向架设计及动力学仿真分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2019.
ZHENG Kaifeng. Design and dynamics simulation analysis of suspended monorail bogie with mechanical differential[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [3] JIANG Y, WU P, ZENG J, et al. Researches on the resonance of a new type of suspended monorail vehicle-bridge coupling system based on modal analysis and rigid-flexible coupling dynamics[J]. Vehicle System Dynamics, 2021, 59(1): 135.
- [4] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. An improved dynamic model of sus-

pending monorail train-bridge system considering a tyre model with patch contact[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 144: 106865.

- [5] HE Q, CAI C, ZHU S, et al. Key parameter selection of suspended monorail system based on vehicle-bridge dynamical interaction analysis[J]. Vehicle System Dynamics, 2020, 58(3): 339.
- [6] 谢倩. 悬挂式单轨系统轨道梁结构优化设计研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
XIE Qian. Research on optimization design of track beam structure of suspended monorail system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [7] 代丰, 李忠继, 林红松, 等. 悬挂式单轨道岔结构设计研究[J]. 铁道标准设计, 2021, 65(6): 17.
DAI Feng, LI Zhongji, LIN Hongsong, et al. Research on design of suspended monorail turnout structure[J]. Railway Standard Design, 2021, 65(6): 17.

· 收稿日期:2021-08-05 修回日期:2021-11-15 出版日期:2024-01-10
Received:2021-08-05 Revised:2021-11-15 Published:2024-01-10
· 通信作者:孟姝, 硕士研究生, 939346497@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 105 页)

- LI Hongmei, QIAN Xiao, ZHAO Xiaoping. Field measurements of pile-anchor supporting structures in sandy cobble soils in Chengdu[J]. Soil Engineering and Foundation, 2012, 26(4): 112.
- [5] WANG J H, XU Z H, WANG W D. Wall and ground movements due to deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2010, 136(7): 985.
- [6] 王卫东, 徐中华, 王建华. 上海地区深基坑周边地面变形性状实测统计分析[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(11): 1659.
WANG Weidong, XU Zhonghua, WANG Jianhua. Statistical analysis of characteristics of ground surface settlement caused by deep excavations in Shanghai soft soils[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(11): 1659.
- [7] 蔡景萍. 土岩组合地层地铁深基坑地面变形规律研究[J]. 中外公路, 2015, 35(4): 23.
CAI Jingping. Study on surface deformation law of subway deep foundation pit in soil-rock combination stratum[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2015, 35(4): 23.
- [8] 李少波. 厦门地区地铁深基坑变形特征实测统计分析[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(增刊1): 376.
LI Shaobo. Statistical analysis on deformation characteristics of deep foundation pit in Xiamen Metro project[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(S1): 376.

- [9] 谢锡荣, 王立峰, 韦康, 等. 土岩组合地层地铁深基坑开挖性状分析及预测[J]. 地下空间与工程学报, 2020, 16(增刊1): 247.
XIE Xirong, WANG Lifeng, WEI Kang, et al. Analysis and prediction of excavation behavior of metro deep foundation pit in soils underlain by rock[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2020, 16(S1): 247.
- [10] PECK R B. Deep excavations and tunneling in soft ground[C]// Proceedings of 7th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Mexico: Sociedad Mexicana de Mecanica, 1969: 225.
- [11] 张向东, 刘刚, 李军. 土岩组合地区基坑开挖对扩展基础桥墩沉降影响研究[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2018, 29(2): 115.
ZHANG Xiangdong, LIU Gang, LI Jun. Study on influence of foundation pit excavation on settlement of spread foundation piers in soil-rock combined area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2018, 29(2): 115.

· 收稿日期:2021-07-01 修回日期:2021-11-29 出版日期:2024-01-10
Received:2021-07-01 Revised:2021-11-29 Published:2024-01-10
· 通信作者:冯虎, 硕士研究生, 1042938786@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