

悬挂式单轨交通线路适应性研究与分析

刘文龙¹, 徐延海²

(1. 西华大学 汽车与交通学院, 四川 成都 610039; 2. 汽车测控与安全四川省重点实验室, 四川 成都 610039)

摘 要: 在虚拟样机仿真平台下开展悬挂式单轨车辆动力学性能仿真实验, 以分析多工况条件下线路适应性的变化规律, 空车和重车两种载荷条件与线路适应性之间的影响关系. 结果显示: 在直线工况下, 平稳性指标满足 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范》的规定, 最大振动加速度符合国际联盟颁布的 UIC—513《铁路运输国际标准》规定, 表明在直线工况下该制式车辆具有较好的线路适应性. 在曲线工况下, 导向轮导向力最大值未超过轮胎最大负荷值, 符合车辆安全运行标准. 但是, 在重车运行条件下导向力合力较大, 建议降速运行.

关键词: 悬挂式单轨车辆; 动力学; 平稳性; 舒适性; 安全性

中图分类号: U260.2+2 **文献标志码:** A **doi:**10.13705/j.issn.1671-6833.2017.01.015

0 引言

悬挂式单轨交通以其车身尺寸小、空间适用性强等特点逐渐成为目前及未来阶段城市轨道交通的研究热点. 目前, 德国与日本应用较广泛^[1-2], 但国内尚无实际工程应用. 由于该交通系统中车辆在空中运行的特点, 决定了对其线路进行适应性研究成为亟待解决的问题. 其中, 文献[3]中 Zboński 通过动力学仿真的方法对车辆曲线通过性能作了分析研究. 文献[4]在缓和曲线线型的研究基础上提出了新的设计方法. 以上两个文献所使用的方法由于受限于国内复杂的城市结构和载客量的要求, 并不能全部为国内所采用. 文献[5]基于传统铁路车辆轮轨的关系, 对车辆在不同线路上的动力学性能进行了深入研究. 但是, 由于悬挂式单轨车辆采用橡胶轮胎而与传统铁路车辆结构不同, 该方法无法真实反映出悬挂式单轨车辆受线路设计的影响. 笔者采用动力学方法对某型悬挂式单轨车辆在空车和重车两种状态下表现出的动力学性能进行了研究分析, 为悬挂单轨交通工程在国内的实际应用提供部分数据上的参考依据.

1 车辆参数

图 1 是悬挂式单轨交通系统结构简图, 从图 1 可以看出, 该交通系统中主要由车辆和线路组成. 其中, 由开口为 780 mm × 1 100 mm 的下开口式箱型梁组成线路系统的轨道梁部分^[6-7], 每节车辆由转向架和车体组成, 每个转向架设置有走行轮、导向轮、稳定轮、构架等结构. 走行轮通过两个半轴连接在齿轮箱上, 与轨道梁走行面接触并承担整车系统的垂向力, 其中齿轮箱下端通过铰接点与构架连接, 上端与电机固定在一起. 导向轮

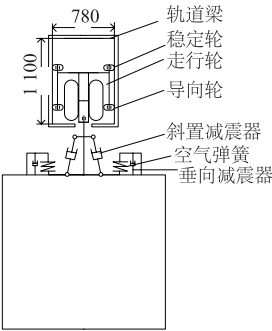


图 1 悬挂式单轨交通系统结构简图
Fig. 1 Simple figure of suspension monorail transportation systems

收稿日期:2016-11-10; 修订日期:2016-12-30

基金项目:四川省科技支撑项目(2016GZ0346, 2013GZ0147); 四川省科技计划项目(2015GZ0150); 西华大学创新基金(ycej2016085)

通信作者:徐延海(1970—), 男, 湖北黄冈人, 西华大学教授, 博士, 博士生导师, 主要从事整车性能测试与仿真等方面的研究, E-mail: xuyanhai@mail.xhu.edu.cn.

在车辆运行过程中主要是使车辆被迫导向. 其中, 走行轮、导向轮和稳定轮均为实心式橡胶轮胎. 为了缓冲车辆运行过程中由横向运动带来的车体晃动, 在车体与构架上安装了空气弹簧、横向减震器和垂向减震器. 结合以上对悬挂式单轨车辆组成分析, 给出车辆技术参数见表 1 所示.

表 1 车辆结构组成参数
Tab. 1 The parameter of vehicle structure

mm			
项目	参数	项目	参数
车体长度	10 292	走行轮定距	1 730
车辆高度	3 538	导向轮定距	2 754
车体质量	20 600	稳定轮定距	2 410
车辆定距	6 600	走行轮直径	520
转向架固定轴距	1 370	导向轮直径	280
车体外侧最大宽度	2 300	稳定轮直径	280

2 车辆性能评价标准

2.1 乘坐舒适性指标

参照 UIC—513《铁路运输国际标准》^[8] 研究车辆乘坐舒适性的方法. 将车辆运行过程中由路面不平度引起的车体最大振动加速度与乘员主观舒适性感觉建立了关系, 并将车辆运行过程中横向和垂向最大加速度值以小于 2.5 m/s^2 作为较好动力学性能的评价标准, 若超过该指标, 证明车辆在该线路上不适宜运行.

2.2 平稳性指标

参照 GB/T 5599—1985《铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范》^[9] 的规定, 评价车辆运行平稳性比较常用的指标是 sperling 平稳性指标. 车辆平稳性等级如表 2 所示, 计算公式:

$$W = 7.08 \sqrt[10]{\frac{A^3}{f} F(f)}, \tag{1}$$

式中: W 为平稳性指数; A 为加速度, m/s^2 ; f 为频率, Hz ; $F(f)$ 为频率修正系数.

表 2 车辆平稳性等级
Tab. 2 Vehicle stability level

平稳性等级	评定结果	平稳性指数 W
一级	优	< 2.5
二级	良好	$2.5 \sim 2.75$
三级	合格	$2.75 \sim 3.0$

2.3 安全性指标

悬挂式单轨车辆在通过导向轮被迫转向过程中, 导向轮会产生一定的压缩量. 但是当存在过大的压缩量时, 会导致轮胎快速磨损甚至爆裂引起

运行安全事故. 笔者在给出车辆曲线段行驶性能评价时, 把轮胎由压缩引起的最大径向力做为评价指标, 将仿真过程中轮胎最大径向力与轮胎允许的最大负荷值进行对比分析. 当最大径向力小于最大负荷值时, 视为曲线通过性能较好; 当最大径向力大于最大负荷值时, 视为曲线通过性能较差. 经查阅 GB/T 16622—1996《实心轮胎系列》得到本次导向轮胎最大负荷值为 24.21 kN .

3 计算模型

3.1 车辆仿真模型

利用多体动力学仿真软件 ADAMS 建立如图 2 所示的悬挂式单轨交通动力学仿真模型^[10-11].

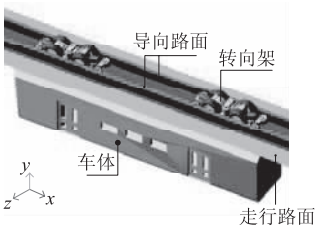


图 2 悬挂式单轨车辆仿真模型
Fig. 2 The dynamic simulation model of vehicle

3.2 仿真线路

悬挂式单轨车辆曲线通过性能研究时, 车辆通过曲线时要考虑离心力, 通过曲线时轨道梁对单辆车所能提供的最大离心力公式为:

$$F_{\max} = M_3 \frac{v_{\min}^2}{R_{\min}}, \tag{2}$$

式中: v_{\min} 为最小曲线半径曲线限速, km/h ; R_{\min} 为最小曲线半径, m ; M_3 为单辆编组车辆超载工况质量, kg .

控制在曲线上通过的最大限制速度为:

$$v_{\max} = 3.6 \times \sqrt{\frac{F_{\max} R}{M_2}}, \tag{3}$$

式中: F_{\max} 为通过曲线时轨道梁对单辆车所能提供的最大离心力, kN ; R 为曲线半径, m .

根据我国 CJJ96—2003《地铁限界标准》^[12] 规定, 假设车辆在缓和曲线上匀速运动, 缓和曲线长度计算公式为:

$$L = \frac{v^3}{28R}, \tag{4}$$

式中: L 为缓和曲线长度, m ; R 为圆曲线半径, m ; v 为车辆通过曲线的运行速度, $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$.

参照文献[13]中给出的缓和曲线长度取 5 的整数倍的原则, 得到本文缓和曲线长度取值及曲线线路设置见表 3、表 4 所示.

表 3 缓和曲线长度取值

Tab.3 Length of transition curve

m

曲线半径	30	40	50	60	70	80	90	95
最短长度	26.1	30.2	33.7	37.0	40.0	42.7	45.3	46.5
本文选择长度	30.0	35.0	35.0	40.0	40.0	45.0	50.0	50.0

表 4 曲线线路设置

Tab.4 Curve line design

m

线路类型	直线	缓和曲线	圆曲线	线路类型	直线	缓和曲线	圆曲线
R30	100	30	30	R70	100	45	70
R40	100	35	40	R80	100	45	80
R50	100	35	50	R90	100	50	90
R60	100	40	60	R95	100	50	100

4 仿真结果分析

4.1 测量点设置

在评测车辆平稳性指标时,测量车体垂向和横向加速度的传感器设置在车厢乘客区内转向架正下方一侧 1 000 mm 的 B 点,为了更准确地对车辆平稳性做出评价,测量点设置增加了驾驶室室内的 A 点,平稳性各测量点的位置和尺寸如图 3 所示.

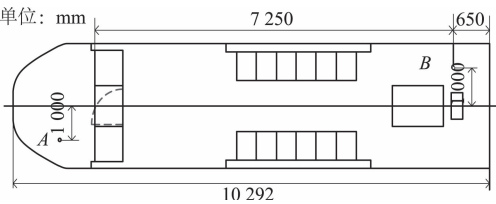


图 3 平稳性测量点俯视图

Fig.3 The smoothness of measurement point vertical view

4.2 直线工况

在空车和重车两种条件下,设定车辆速度变化范围为 10 ~ 50 km/h,从仿真后处理文件中得到两种工况下垂向平稳性 W_z 、横向平稳性 W_y 、垂向最大加速度 z 与横向最大加速度 y . 仿真结果参数随车辆运行速度变化如图 4、图 5 所示. 分析空车工况下图 4(a)、(b)与重车工况下图 5(a)、(b)仿真结果中各参数变化可知,两种工况下,直线路段上仿真得到的平稳性指标及最大加速度数值均随车辆运行速度增加逐渐增大,其中,平稳性指标符合 GB5599—85 标准中一级的标准,最大加速度数值未超过 UIC—513《铁路运输国际标准》的规定.

4.3 曲线工况

在空车和重车两种工况下,车辆通过不同的曲线半径时,通过车辆的导向力最大值的变化,分析悬挂式单轨车辆曲线通过时动力学性能. 各参数随曲线半径的变化见图 6 和图 7.

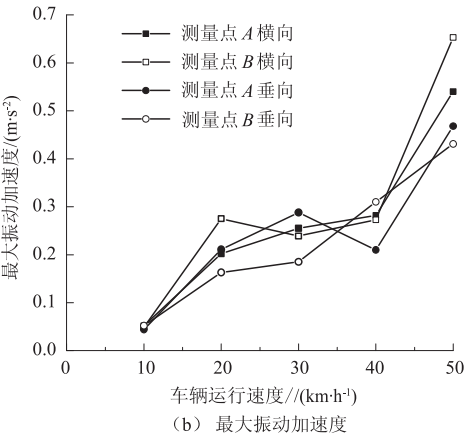
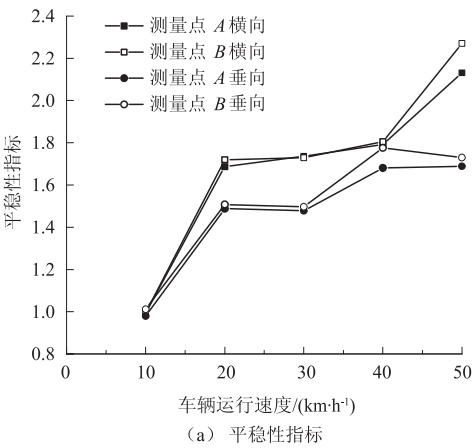


图 4 空车工况下平稳性参数随车辆运行速度变化曲线

Fig.4 Stability parameters change with vehicle speed under empty condition

分析图 6 和图 7 中可以看出,在空车工况下,车辆以限速通过曲线,导向力最大值未超过导向轮橡胶轮胎可以提供的最大负荷值;在重车工况下,车辆以限速通过曲线时,导向力最大值未超过导向轮可以提供的最大负荷值,但导向力合力较大,对轨道梁及转向架构架强度要求较高,因此考虑重车工况下列车通过曲线时降速运行.

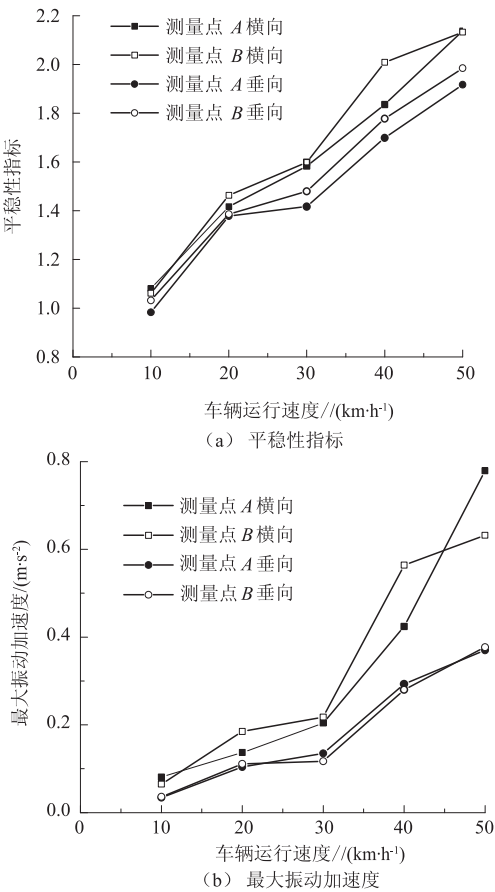


图 5 重车工况下平稳性参数随车辆运行速度变化曲线
Fig.5 Stability parameters change with vehicle speed under heavy condition

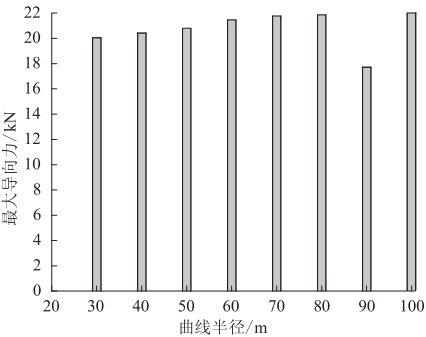


图 6 空车工况下导向力变化图
Fig.6 The force of leading guide under empty condition

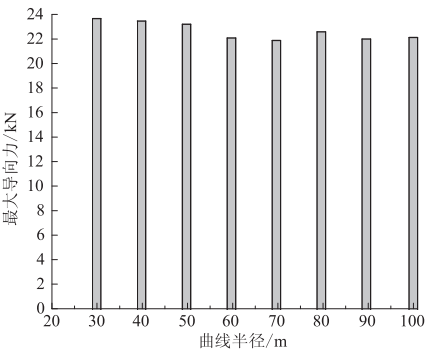


图 7 重车工况下导向力变化图
Fig.7 The force of leading guide under heavy condition

5 结论

1) 直线工况下,空车和重车两种条件下均表现出较好的动力学性能. 其中,车辆运行平稳性指标和振动加速度最大值均未超过标准取值,都能满足车辆运行平稳性和乘坐舒适性标准.

2) 曲线工况下,在车辆限速通过曲线条件下,空车和重车车辆系统中导向轮受力均超过最大负荷值. 但是,重车条件下的导向力值接近最大负荷值,不能完全满足车辆安全运行的标准,建议在该条件下降速通过.

3) 文中得到的动力学性能参数均为多体动力学软件仿真得到,由于仿真模型的建立与实际车辆存在偏差,所以,对于动力学性能参数需要进一步完善模型,做出研究分析.

参考文献:

[1] GUTAREVYCH V. A mathematical model study of suspended monorail [J]. Transport problems, 2012, 7 (3): 62 – 66.

[2] 铃木康夫. 千叶都市新型独轨 URBANFLYER 0 系列车的概要 [J]. 铁道车辆技术 (日), 2013, 190: 24 – 31.

[3] ZBOINSKI K. Dynamical investigation of railway vehicles on a curved track [J]. European journal of mechanics-A/solids, 1998, 17(6): 1001 – 1020.

[4] MIYAGAKI K, ADACHI M, SATO Y. Analytical study on effects of form in transition curve [J]. National geographic adventure, 2004, 41(S): 657 – 666.

[5] JIN Y, ISHIDA M, NAMURA A. Experimental simulation and prediction of wear of wheel flange ecomer [J]. Wear, 2011, 271(12): 259 – 267.

[6] 鲍玉龙. 悬挂式单轨交通系统车桥耦合振动仿真研究 [D]. 成都: 西南交通大学桥梁与隧道工程学院, 2015.

[7] 蒋咏志, 王月明, 谢倩. 一种悬挂式单轨转向架结构方案及分析 [J]. 机光电传动, 2015(6): 56 – 59.

[8] 国际铁路联盟. 评定与铁路车辆中振动有关的旅客舒适性导则: UIC—513 [S]. 北京: 国际铁路联盟标准, 1977

[9] 铁道车辆动力学性能评定和实验鉴定规范: GB/T 5599—1985 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1986.

(下转第 93 页)