

侧向风作用下跨座式单轨车辆运行平稳性研究

赵树恩, 刘浙, 杜子学, 李玉玲

重庆交通大学机电与汽车工程学院, 重庆 400074

摘要 针对侧向风作用下跨座式城市单轨车辆的运行平稳性问题, 利用多体动力学软件Adams建立跨座式单轨车辆“车体—轮胎—轨道梁”耦合系统动力学模型, 基于空气动力学原理, 研究了侧向风风压中心随着车辆运动过程的变化情况, 并对不同车速、风速、轨道梁线形下跨座式单轨车辆在侧向风作用时的运行平稳性进行仿真计算和对比分析, 结果表明, 车速和风速的变化对在侧向风条件下的跨座式单轨车辆横向加速度影响很大, 会进一步影响车辆的运行平稳性, 且当车速或风速过大时, 车辆不满足平稳性指标, 会发生失稳现象。

关键词 跨座式单轨车辆; 运行平稳性; 侧向风; 仿真

中图分类号 U232

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.22.006

Riding Stability of Urban Straddle-type Monorail Vehicles Under Lateral Wind

ZHAO Shuen, LIU Xi, DU Zixue, LI Yuling

School of Mechatronics & Automotive Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract This research focuses its attention on the riding stability of straddle-type monorail vehicles under the lateral wind condition by means of the multi-body dynamics analysis software Adams to set up a "car body-tire-track beam" coupled system model for the straddle-type monorail vehicle. Then, based on the principles of aerodynamics and considering that the wind pressure center changes as a result of the movement of the vehicle, calculation and contrastive analysis of the riding stability of straddle-type monorail vehicle under various car speeds, wind speeds and track shapes are performed through simulation. Finally, the conclusion is arrived at that changes of car speed and wind speed can exert a great influence on the transverse acceleration of straddle-type monorail vehicles affected by lateral wind, and an excessive speed of vehicle or wind may result in imbalance of the vehicle, which can possibly act as a reference for further exploring the crosswise riding stability and safety of straddle-type monorail vehicle under lateral wind.

Keywords straddle-type monorail vehicle; riding stability; lateral wind; simulation

随着城市化进程的加快, 道路拥堵、环境污染、交通安全等问题日益成为城市发展的难题。轨道交通以其大载客量、高速、准点、节约空间及能源等特性, 已逐渐成为中国城市轨道交通发展的主流。在城市轨道交通系统中, 跨座式单轨交通(straddle type monorail transit)是一种以电机为动力源, 转向架骑跨在PC轨道梁上, 并借助橡胶充气走形轮与轨道梁顶

面摩擦驱动、导向轮和稳定轮与轨道梁侧面接触实现车辆导向和稳定运行的新型轨道交通制式。由于跨座式单轨车辆一般行驶在距地面7~19 m、宽度为850 mm的轨道梁上, 且车辆走行轮轮距仅有400 mm, 因此, 侧向风的作用将会严重影响跨座式单轨车辆的运行平稳性乃至运行安全性。

近年来许多学者对跨座式单轨车辆的动力学特性开展

收稿日期: 2014-04-21; 修回日期: 2014-06-27

基金项目: 重庆市教委科学研究项目(KJ120415); 重庆交通大学博士基金项目(101137); 重庆市科委科研项目(cstc2014jcyA1384)

作者简介: 赵树恩, 副教授, 研究方向为车辆系统动力学及综合控制, 电子信箱: zse0916@163.com

引用格式: 赵树恩, 刘浙, 杜子学, 等. 侧向风作用下跨座式单轨车辆运行平稳性研究[J]. 科技导报, 2014, 32(22): 42-46.

了研究,取得较丰硕的成果。其中Lee等^[1,2]建立了15自由度的单轨车辆模型,分析了车速、垂向载荷等参数变化对车辆运行平稳性及舒适度的影响,研究表明跨座式单轨车辆有着良好的运行平稳性,但这些研究并没有将侧向风对车辆运行平稳性的影响考虑进来。而目前针对侧向风作用下的车辆稳定性研究又主要集中在高速列车和公路汽车领域,对单轨车辆在侧向风作用下的运行平稳性研究鲜有涉及。本文以重庆轨道交通3号线为例,利用多体仿真软件Adams,建立跨座式单轨“车体—轮胎—轨道梁”耦合系统动力学模型,基于空气动力学理论,对车辆行驶过程中的侧向风作用载荷进行分析,研究车辆在跨长江段以及最小正线轨道半径段运行时,侧向风作用下的运行平稳性。

1 跨座式单轨车辆多体系统动力学模型

1.1 模型的建立

城市跨座式单轨车辆既有别于公路汽车,又与传统钢轮钢轨车辆有着明显的差异。图1所示为跨座式单轨车辆拓扑结构图,由车体和前、后2个转向架构成。转向架为无摇枕特殊构造的跨座式2轴转向架,车体与前、后转向架构架之间通过由空气弹簧、中心销、中心销座、横向油压减振器(与轨道面成45°安装在车体与转向架构架之间)、牵引橡胶堆以及横向止挡组成的中央悬挂系统(也称二系悬挂系统)分别在垂向、侧向、纵向连接。转向架跨坐在PC轨道梁上,牵引电机驱动走行轮(走行轮为充入压力880 kPa氮气的无内胎钢丝圈橡胶轮胎)旋转,利用安设在转向架两侧的导向轮和稳定轮来导向和稳定车体(导向轮、稳定轮为充入压力980 kPa氮气的尼龙斜裁带内胎的橡胶轮胎),车辆运行过程中,走行轮始终与轨道梁顶面接触。

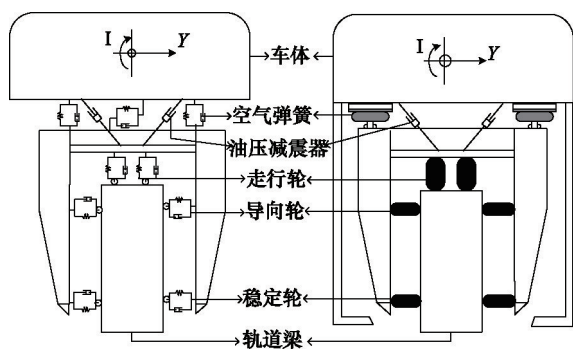


图1 跨座式单轨车辆拓扑结构

Fig. 1 Straddle type monorail vehicle topology diagram

结合图1所示的单轨车辆拓扑结构图,利用多体仿真软件Adams建立如图2所示的跨座式单轨“车体—轮胎—轨道梁”耦合系统动力学仿真模型,表1为单轨车辆主要技术参数。



图2 跨座式单轨车辆耦合仿真三维模型

Fig. 2 Coupled three-dimensional simulation model of straddle type monorail vehicle

表1 跨座式单轨车辆主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of straddle type monorail vehicle

参数	数值	参数	数值
走行轮轴距/m	1.500	走行轮垂向刚度/(N·m ⁻¹)	1.2×10 ⁶
走行轮自由半径/m	1.006	走行轮侧偏刚度/(N·m ⁻¹)	60000
导向轮轴距/m	2.500	橡胶堆刚度/(N·m ⁻¹)	4.9×10 ⁵
导向轮轴距/m	1.570	橡胶堆阻尼/(Ns·m ⁻¹)	4.9×10 ⁴
导向轮、稳定轮自由半径/m	0.730	导向轮、稳定轮径向刚度/(N·m ⁻¹)	9.8×10 ⁵
车体单侧面积/m ²	35.199	导向轮、稳定轮径向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	3120
车体质量/kg	1.2×10 ⁴	油压减振器刚度/(N·m ⁻¹)	9.81×10 ⁶
转向架质量/kg	5600	空气弹簧垂向刚度/(N·m ⁻¹)	1.6×10 ⁵
车体长度/m	14.8	空气弹簧垂向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	4.54×10 ⁴
走行轮垂向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	3740	空气弹簧纵(横)向刚度/(N·m ⁻¹)	10 ⁵
走行轮侧向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	1870	空气弹簧纵(横)向阻尼/(Ns·m ⁻¹)	1000

1.2 模型的验证

为了验证本文中建立的模型的准确性,本文以跨座式单轨车辆模型无风条件下分别在5、7、9、11 km/h匀速运行在直线轨道时的头车车体质心垂向、横向加速度,经过10 Hz低通高频波后,与重庆单轨线路实测数据加速度幅值对比^[3],验证模型的正确性。表2为仿真实验数据和实测数据幅值对照表。

表2 加速度幅值对比

Table 2 Acceleration scale comparison

对比内容	车速/(km·h ⁻¹)	仿真数据/(mm·s ⁻²)	实测数据/(mm·s ⁻²)
垂向加速度幅值	5	-6~6	-3~5
	7	-6~7	-4~5
	9	-9~9	-7~6
	11	-9.5~10	-7~6
横向加速度幅值	5	-6~6	-4~5
	7	-7.5~7	-5~5
	9	-8~9	-6~4
	11	-9~11	-6~3

通过仿真数据与实测数据对比可知,模型仿真加速度幅值大小与重庆实测数据在趋势和幅值上基本吻合。因此,可以应用仿真的方法研究跨座式单轨车辆的动力学性能。由此验证模型的正确性,保障进一步研究工作的准确性。

2 侧向风模型

2.1 风压中心位置

依据实际自然风、环境风与行驶车辆间相互作用的真实情况,将车辆受侧向风作用过程分为如图3所示的3个时段:1) 车辆开始驶入侧向风带;2) 车辆完全进入侧向风带;3) 车辆驶离侧向风带。显然,1)、3)时段的风压中心在车辆纵向、垂向的相对位置是随时间变化的,而2)时段的风压中心在车辆纵向、垂向的位置则是相对固定的^[4]。

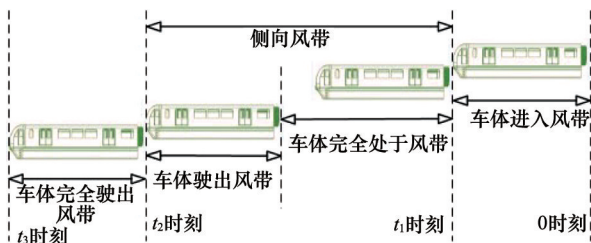


图3 单轨车辆穿过侧向风带阶段

Fig. 3 Stage diagram of monorail vehicle passing through the lateral wind area

在以往汽车或高速列车的侧向风稳定性仿真研究中,大多数研究者将风压中心假设为车身坐标系中一个不随时间变化的固定点,而这种假设对于车速相对较低、车身长度较长的城市跨座式单轨车辆而言与实际情况不符。

为分析车辆运行过程中风压中心的变化情况,将图3所示的侧向风作用阶段细分为7个区间,并选取7个离散的风压中心,它们均作用于车辆的纵向对称面上,且位于同一垂直高度^[5]。表3所示为侧向风作用时,7个离散段及各个时段结束时刻对应的风压中心在车辆行驶方向上的位置 x_0 。由于每个时刻的风压中心在行驶方向上的位置为对应时刻的侧向风区内车体的几何中心处。故在Adams中对这7个阶段的

表3 各时段结束时刻对应风压中心的位置

Table 3 Location of the wind pressure center at each ending time

区间	时间段/s	结束时刻风压中心距车体形心距离/m
1	0~ t_4	-5.825
2	t_4 ~ t_5	-1.025
3	t_5 ~ t_1	-0.8
4	t_1 ~ t_2	0
5	t_2 ~ t_6	0.8
6	t_6 ~ t_7	2
7	t_7 ~ t_3	6.375

风压中心在行驶方向上的位置用时变函数 X_0 来替代,其中 X_0 的表达式为

$$X_0 = \text{step}(\text{time}, 0, d_i, t_4, d_4) + \text{step}(\text{time}, t_4, d_4, t_5, d_5) + \text{step}(\text{time}, t_5, d_5, t_1, d_e) + \text{step}(\text{time}, t_1, d_e, t_2, d_e) + \text{step}(\text{time}, t_2, d_e, t_6, d_6) + \text{step}(\text{time}, t_6, d_6, t_7, d_7) + \text{step}(\text{time}, t_7, d_7, t_3, d_i)$$

式中, t_3 时刻为车辆全部离开侧风区的时刻; t_4 、 t_5 分别为单轨车辆前、后轴进入侧向风区时刻; t_6 、 t_7 分别为单轨车辆前、后轴离开侧向风区时刻; d_3 、 d_4 、 d_5 、 d_6 、 d_7 分别为时刻 t_3 、 t_4 、 t_5 、 t_6 、 t_7 对应的风压中心在车辆行驶方向上的位置。 d_i 、 d_e 、 d_c 分别为车头前端、车尾后端和车体几何形心在行驶方向上的位置。由7个step函数组合就可以实现在侧向风作用时风压中心随车辆在侧向风区位置的变化而变化。

2.2 侧向风载荷

对于跨座式单轨车辆而言,由于其行驶环境的多样性,在行驶过程中经常受到侧向自然阵风和环境阵风的袭扰(如穿越隧道、过江、会车以及车辆驶过轨道两旁高层建筑密集的区域),从而影响车辆行驶的平稳性^[6]。

根据重庆市实际气象情况,将本文所分析的侧向风载荷确定为阶跃变化的理想非稳态自然阵风。在模拟侧向阵风对车辆运行平稳性的研究中,主要以侧向气动力和由其产生的横摆力矩为侧向作用载荷,在计算侧风作用于车体的外加载荷时,假定侧向风垂直车体侧面作用于车体(风向角为 90°)。车辆在完全驶入侧向风带(t_1 ~ t_2)时段,车辆受到的空气侧向力 $F_{y,0}$ 为^[7]

$$F_{y,0} = \frac{1}{2} \rho S_y C_y (v^2 + u^2) \quad (1)$$

式中, ρ 为空气密度, kg/m^3 ; S_y 为车辆侧向面积, m^2 ; C_y 为空气侧向力系数; v 为车辆运行速度, m/s ; u 为侧向风速, m/s 。

当车辆进入和离开侧向风带时,其所受侧向力可近似表示为式(2)所示的函数^[8]

$$F_y = \begin{cases} \left[\frac{t(t-2t_3)}{2t_1(t_1-2t_3)} + \frac{t(t-2t_4)}{2t_1(t_1-2t_4)} \right] F_{y,0} & t \in (0, t_1) \\ \left[\frac{(t-t_3)(t+t_3-2t_7)}{2(t_2-t_3)(t_2+t_3-2t_7)} + \frac{(t-t_3)(t+t_3-2t_6)}{2(t_2-t_3)(t_2+t_3-2t_6)} \right] F_{y,0} & t \in (t_2, t_3) \end{cases} \quad (2)$$

根据表3划分的7个阶段,计算出每个时间段内对应的风压中心所受的侧向气动力。为更方便准确地将风载输入单轨车辆动力学模型,根据力系的平移和等效替换原理将各个风压中心对应的侧向气动力向车体形心转化,并乘以各阶段对应风压中心到车体纵截面形心的距离,即可得到由侧向气动力产生的横摆力矩^[9]。当风速为 10 m/s ,车速为 60 km/h 时,按照侧向气动力 F_y 和横摆力矩 T_y 的变化曲线(图4),可以看到,车辆在第 10 s 开始进入侧向风带;在 10 s ~ t_4 阶段,侧向气动力和横摆力矩都迅速增大;完全处于侧向风区(t_1 ~ t_2)阶段,侧向气动力最大,但横摆力矩为 0 ;在车辆刚刚出风区(t_2 ~ t_6)阶段,由于车体受力面积减少,侧向气动力开始下降,而横摆力矩却由于风压中心的后移而变大。

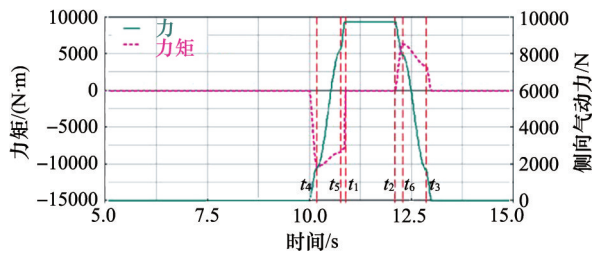


图4 侧向气动力与力矩随车辆运行变化

Fig. 4 Lateral aerodynamic force and moment changing diagram

3 侧向风作用下车辆运行平稳性仿真

3.1 车辆运行平稳性评价指标

由于当前国内外还没有确立较全面的跨座式城市单轨交通车辆运行平稳性评价体系,本文参考钢轮钢轨车辆相关评价标准,对侧向风作用下跨座式单轨车辆运行平稳性进行评价。目前国内外均采用斯佩林平稳性指标来评定轨道车辆的运行品质,车辆运行平稳性指标的经验公式^[10]为

$$W = 7.08 \left[\frac{A^3}{f} F(f) \right]^{0.1} \quad (3)$$

式中, W 为平稳性指标; A 为车辆振动加速度, g ; f 为振动频率, Hz ; $F(f)$ 为频率修正系数。

由于车辆在线路上运行时的振动是随机的,而式(3)是某一固定频率的等幅振动。因此,从车体上测得的侧向加速度包含了车辆振动的整个自然频率,需将其按频率分组,统计出每一频率中不同加速度的平稳性指标值,即整车总平稳性指标

$$W = (W_1^{10} + W_2^{10} + \dots + W_n^{10})^{\frac{1}{10}} \quad (4)$$

表4为中国铁路客车的运行平稳性评价等级。

表4 客运轨道车辆平稳性评价等级

Table 4 Passenger rail vehicle's stability evaluation level

平稳性等级	评价	平稳性指标
1级	优	<2.5
2级	良	2.5~2.75
3级	合格	2.75~3.0

3.2 基于侧向风作用下的车辆平稳性仿真分析

对于轨道列车而言,侧向风对头车的影响最大,故可以通过对列车头车运行平稳性分析来评价整列车在侧向风作用下的运行平稳性^[11]。本文分别对不同车速、风速、线形情况下跨座式单轨车辆头车在侧向风作用时的运行平稳性进行研究。其中直线轨道的长度为 $L=500$ m,曲线轨道几何参数为:直道 $L_1=100$ m,弯道半径 $r=100$ m,弯道圆心角 $\theta=60^\circ$,弯道超高值 $h=0.0408$ m,直线道 $L_2=160$ m。

3.2.1 直线段不同风速时车辆质心侧向加速度

在直线轨道上,时间设置为 18 s,步数设置为 1500 步。

前 10 s 为加速阶段,单轨车辆在第 10 s 时以稳定的速度 v_0 匀速驶入长度为 50 m 的侧向风风带。当车速 v_0 为 60 km/h 时,分别以 $u_1=12$ m/s、 $u_2=15$ m/s、 $u_3=20$ m/s 的侧向风风速作用于车体,车体质心处的侧向加速度 a_y 如图 5 所示。

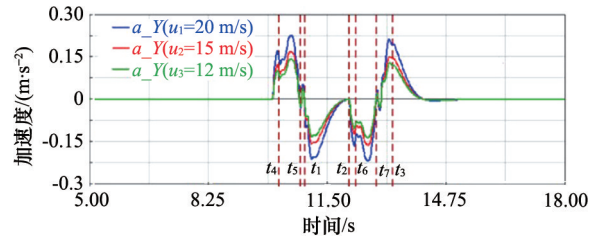


图5 不同风速下车辆侧向加速度变化

Fig. 5 Lateral accelerations of monorail vehicle under different wind speeds

由图 5 可以看出,在 0~10 s 内车辆未进入风区,车体侧向加速为 0,进入风区后,车体侧向加速度会受到风速的影响,风速越大,车体侧向加速度变化越剧烈。其中,在 $t_4 \sim t_5$ 、 $t_7 \sim t_3$ 这两个阶段受侧向风影响最大,出现侧向加速度的峰值。这表明在车辆刚进风区和车辆即将离开风区阶段,侧向风对车辆的侧向加速度影响最大。

根据仿真得到相关频域曲线,将其导入到 Matlab 中计算^[12],当单轨车辆在直线段轨道上以 60 km/h 的车速行驶时,在 12 m/s 侧向风作用下车体侧向平稳性指标 $W=2.0709$;在 15 m/s 的侧向风的作用下车体侧向平稳性指标 $W=2.5607$;在 20 m/s 的侧向风作用下车体侧向平稳性指标 $W=3.3008$ 。由表 4 可知,单轨车辆以 60 km/h 的速度匀速行驶时,在受到风速为 12 m/s 的侧向风作用的情况下车辆的平稳性较好,乘客稍能感觉到车体的振动。当车辆受到风速为 15 m/s 的侧向风作用时,车辆平稳性能有待改善但仍满足要求。当车辆受到风速为 20 m/s 的侧向风作用时,车辆的运行平稳性很差,此时,已不能满足车辆平稳运行的条件。

3.2.2 直线段不同车速时车辆侧向加速度变化

直线轨道上,时间设置为 20 s,步数设置为 2000 步,前 10 s 为车辆加速阶段。10 s 后有风速为 $u=15$ m/s 的稳态侧向风,分别吹向以速度 $v=36$ 、60、90 km/h 匀速行驶的跨座式单轨车辆,侧向风带长度为 50 m。车体质心处的侧向加速度 a_y 的变化情况如图 6 所示。

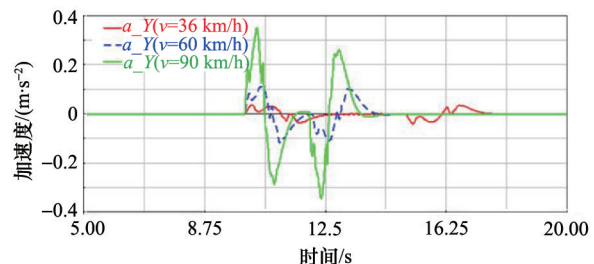


图6 不同车速下车辆侧向加速度变化

Fig. 6 Lateral accelerations of monorail vehicle under different vehicle speeds

由图6可以看出,随着车速的增加,车体侧向加速度的峰值也在增加,而且这种增加并不是线形的,车速越高,变化幅度越大。将图6中的3条曲线分别做快速傅里叶变换得到不同车速下的频域响应曲线。通过Matlab计算得到,当风速 $u=15$ m/s时,车速为 $v=36、60$ km/h时平稳性指标 W 均低于2.5,此时车辆侧向平稳性优良,当车速继续增大至 $v=90$ km/h时,平稳性指标 $W=3.6010$,参考表4,此时车辆的侧向平稳性已经不符合要求,应立即减速。

3.2.3 曲线段不同风速时车辆侧向加速度

曲线段轨道上,侧向风有两种方向,从内侧向外(沿曲线的曲率半径方向,远离曲率中心)和从外侧向内(沿曲线的曲率半径方向,指向曲率中心)。由于在曲线段轨道车辆要受到离心力作用本身侧向加速度已经比直线轨道上大,故在曲线轨道内只研究稳定车速 v 为36 km/h时侧向风分别以 $u=12、15、20$ m/s的风速从内侧向外吹向车体时的情况,得到车体质心处的侧向加速度 a_y 的变化情况如图7所示。

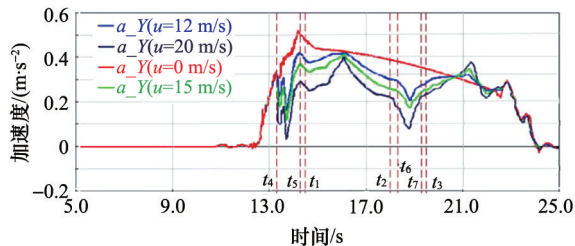


图7 曲线段不同风速下车辆侧向加速度变化

Fig. 7 Lateral accelerations of monorail vehicle under different wind speeds on a curve track segment

由图7可以看出,0~12.5 s车辆进入弯道,第13 s时车辆开始进入侧向风作用区域。通过相同的方法将频域转换曲线导入Matlab中计算得到,在正线最小轨道半径下(跨座式单轨车辆在正线能通过的最小曲线半径为100 m),车速 v 为36 km/h时,侧向风速分别为 $u=12、15、20$ m/s时对应的平稳性指标 W 依次分别为3.2375、3.0770、2.2297。与无风状态下相比较,由内侧向外吹的侧向风风速越大,越能够减小车体在弯道时的车体侧向加速度,改善车辆的侧向运行平稳性。在刚刚进入风区($t_4\sim t_1$)阶段和离开风区($t_2\sim t_7$)阶段,侧向风的缓和和作用最明显。需要说明的是,本文中针对曲线段上单轨车辆平稳性的分析是基于特定的轨道形式、特定方向的侧向风下的计算结果,实际跨座式单轨车辆受侧向风的影响,特别是在实际线路中不同形式的曲线轨道以及侧向风的风速和方向不断变化的情况下,单轨车辆的运行平稳性问题还需进一步深入分析。

4 结论

1) 以Adams动力学仿真软件和斯佩林车辆平稳性评价指标为基础,研究了跨座式单轨车辆在侧向风作用下的运行平稳性。通过仿真计算结果表明,侧向风作用下跨座式单轨车辆侧向加速度会发生显著改变,从而导致车辆运行平稳性

变化。

2) 直线段上车辆的侧向加速度和平稳性指标随侧向风作用和车速和风速的增大而增大,在侧向风速15 m/s、车速90 km/h及侧向风速20 m/s、车速60 km/h两种工况下,车辆的平稳性指标已经不符合要求,此时车辆应减速运行。曲线段上车辆侧向加速度受曲线轨道内侧的侧向风作用而有所缓和,并随着内侧侧向风风速的增大缓和作用越明显。

参考文献(References)

- [1] Lee C H, Kawatani M, Kim C W, et al. Dynamic response of a monorail steel bridge under a moving train[J]. Journal of Sound and Vibration, 2006, 294(3): 562-579.
- [2] 周君锋. 重庆跨座式单轨列车运行平稳性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
Zhou Junfeng. Research of Chongqing straddle-type monorail vehicle's ride index[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2007.
- [3] 左长永. 基于MD ADAMS的跨座式单轨车辆动力学性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2013.
Zuo Changyong. Study on dynamics performance of straddle-type monorail vehicle based on MD ADAMS[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2013.
- [4] 徐进, 邵毅明. 风压中心位置对汽车侧风稳定性影响的虚拟试验分析[J]. 中国机械工程, 2007, 18(15): 1877-1881.
Xu Jin, Shao Yiming. Virtual test analysis of the effect of wind pressure center on lateral wind steer stability[J]. China Mechanical Engineering, 2007, 18(15): 1877-1881.
- [5] Qin D, Xu Y, Zhu Q. Modeling and simulation study on crosswind stability of the high speed bus[J]. Noise & Vibration Worldwide, 2011, 42: 44-50.
- [6] Baker C J. The simulation of unsteady aerodynamic cross wind forces on trains[J]. Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics, 2010, 98: 88-99.
- [7] 田红旗. 列车空气动力学[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2007.
Tian Hongqi. Train aerodynamics[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2007.
- [8] 谷正气, 王和毅, 罗荣锋, 等. 计及风压中心漂移的汽车侧风稳定性研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2005, 32(3): 70-73.
Gu Zhengqi, Wang Heyi, Luo Rongfeng, et al. Study on automobile cross-wind stability in consideration of pressure center's shift[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences Edition, 2005, 32(3): 70-73.
- [9] 张喆. 侧风作用下重型载货汽车气动特性与稳定性的联合研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012.
Zhang Zhe. Joint research on heavy-duty truck aerodynamic characteristics and stability under crosswind effects[D]. Changchun: Jilin University, 2012.
- [10] 中华人民共和国国家标准局. GB/T5599-1985. 铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范[S]. 北京: 中国标准出版社, 1985.
The People's Republic of China National Bureau of Standards. GB/T5599-1985 Railway Vehicle Dynamic Performance Evaluation & Test Standard [S]. Beijing: Chinese Standard Press, 1985.
- [11] 郝艳红, 毛军, 高亮, 等. 横风作用下高速列车安全运行速度限值的研究[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(1): 78-84.
Xi Yanhong, Mao Jun, Gao Liang, et al. Research on the limited safe speed of a high-speed train under cross wind[J]. Journal of the China Railway Society, 2012, 33(1): 78-84.
- [12] 杜子学, 王行聪. 跨座式单轨列车平稳性研究[J]. 铁道机车车辆, 2009, 29(5): 56-59.
Du Zixue, Wang Xingcong. Research on stability simulation for straddle-type monorail vehicle[J]. Railway Locomotive & Car, 2009, 29(5): 56-59.

(责任编辑 吴晓丽)