

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2022.04.001

双半挂汽车列车操纵稳定性典型工况研究^{*}

王锐¹, 黄超智¹, 周金应¹, 熊万全¹, 张浩²

(1.中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122;2.交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要:针对双半挂汽车列车在行驶过程中容易发生失稳的问题,对双半挂汽车列车进行操纵稳定性实车及仿真试验研究。通过 TruckSim 软件构建双半挂汽车列车仿真模型并进行单车道变换试验,与实车试验结果对比验证仿真模型的有效性;在此基础上,对样车进行蛇行试验、稳态回转、转向盘角阶跃输入等典型工况仿真分析。结果表明,蛇形试验中,随着试验车速的增加,各车辆单元的各项响应参数增长速率明显增大,试验车速达到 65 km/h 时部分车轮已发生离地现象;稳态回转试验中,样车具有一定的不足转向特性,各车辆单元侧向加速度最大值均在 3.14 m/s² 左右;转向盘角阶跃输入工况中,车辆对转向盘转角输入反应迅速,但各项参数波动幅度较大;各项试验中参数后部放大效应明显。

关键词:汽车;双半挂汽车列车;操纵稳定性;典型工况

中图分类号:U469.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2022)04-0001-06

双挂汽车列车作为大容量、高效率、低成本的先进车型,在经济、环境、社会等方面均具有明显的效益。双半挂汽车列车作为双挂汽车的一种,它由牵引车和两辆半挂车组成,各车辆单元通过鞍座进行铰接,国外称之为 B-double 列车。双半挂汽车列车在传统半挂汽车列车的基础上增加一节车辆单元,具有车身长、铰接点多、载质量大、质心高等特点,实际运行中更易发生侧翻、折叠、甩尾等失稳状况。目前国内部分企业已试制了双半挂汽车列车产品,但

在操纵稳定性方面缺少深入研究。对双半挂汽车列车操纵稳定性进行研究对于后续制定相关标准、提升行车安全性具有重要意义。

1 国内外相关试验方法及评价指标

1.1 国外试验方法及评价指标

国外发达国家对汽车列车操纵稳定性的试验研究较早,并形成了较完善的标准体系(见表 1)。

评价指标方面,国外常用汽车列车操纵稳定性

表 1 国外汽车列车操纵稳定性主要试验标准

组织机构	标准及法规
国际标准化组织 ISO	ISO 11012:2009《Heavy commercial vehicles and buses—Open-loop test methods for the quantification of on-centre handling—Weave test and transition test》
	ISO 11026:2010《Heavy commercial vehicles and buses—Test method for roll stability—Closing-curve test》
	ISO 14791:2000《Road vehicles—Heavy commercial vehicle combinations and articulated buses—Lateral stability test methods》
	ISO 14792:2011《Road vehicles—Heavy commercial vehicles and buses—Steady-state circular tests》
	ISO 14793:2011《Road vehicles—Heavy commercial vehicles and buses—Lateral transient response test methods》
美国汽车工程师协会 SAE	SAE J2179《A test for evaluating the rearward amplification of multi-articulated vehicles》
	SAE J2180《A tilt table procedure for measuring the static rollover threshold for heavy trucks》
澳大利亚国家运输委员会 NTC	PBS Scheme《The standards and vehicle assessment rules》

^{*} 基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(2021-9036b)

评价指标有后部放大系数、静态侧翻阈值、载荷转移率、横摆阻尼、直线行驶偏移量、过车过冲、高速稳态偏移量、低速偏移量。

1.2 国内试验方法及评价指标

中国最早出台的汽车操纵稳定性试验标准为

GB/T 6323—1986《汽车操纵稳定性试验方法》，该标准主要适用于 M、N 和 G 类车辆，其他类型汽车可参照执行。通过借鉴国外标准，中国汽车列车操纵稳定性标准得到进一步完善，相关标准见表 2。

国内汽车列车操纵稳定性评价指标主要包括静

表 2 国内汽车列车操纵稳定性主要试验标准

类别	标准名称
国家标准	GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》
	GB/T 14172—2009《汽车静侧翻稳定性台架试验方法》
	GB 18565—2016《营运车辆综合性能要求和检验方法》
	GB/T 25979—2010《道路车辆 重型商用汽车列车和铰接客车 横向稳定性试验方法》
交通行业标准	GB/T 26778—2011《汽车列车性能要求及试验方法》
	JT/T 884—2014《营运车辆抗侧翻稳定性试验方法 稳态圆周试验》
汽车行业标准	JT/T 1178.2—2019《营运货车安全技术条件 第 2 部分：牵引车辆与挂车》
	QC/T 480—1999《汽车操纵稳定性指标限值与评价方法》

态侧倾阈值、横摆角速度、侧向加速度、后部放大系数、直线行驶轨迹偏移量等。虽然转化了部分国外汽车列车操纵稳定性标准，但仍存在标准不完善、评价指标限值缺失等情况。

2 双半挂汽车列车仿真模型构建及试验验证

2.1 样车参数

选取某企业试制的双半挂汽车列车作为试验样车，样车外廓尺寸、轴荷等均满足 GB 1589—2016《汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值》的要求，其基本参数见表 3。

表 3 试验样车的基本参数

车辆单元	参数名称	参数值
汽车列车	最大允许总质量/kg	73 000
	长×宽×高/mm	21 974×2 550×3 800
	最高车速/(km·h ⁻¹)	88
牵引车	驱动形式	6×4
	轴数	3
第一节半挂车	轴数	3
第二节半挂车	轴数	3

2.2 样车仿真模型构建

通过 TruckSim 仿真软件建立试验样车仿真模型，模型包含车体、空气动力学、转向系、制动系、传动系、轮胎、车轴、悬架、牵引装置、载荷等子系统(见图 1)。

2.3 实车测试系统搭建

测试系统主要由 IMC 陀螺仪、IMC 陀螺仪终端、RT陀螺仪、数据采集模块、方向盘力角度仪、方

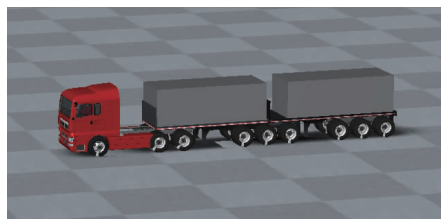


图 1 双半挂汽车列车动力学模型

向盘力角度仪终端、计算机(PC)等组成(见图 2)。其中:IMC 陀螺仪安装在牵引车上,用于测量牵引车质心位置相关动力学参数;IMC 陀螺仪终端用于接收 IMC 陀螺仪的数据并通过 CAN 信号传输到数据采集模块;2 个 RT 陀螺仪分别安装在 2 节挂车上,分别测量第一节挂车、第二节挂车质心位置的力学参数;RT 陀螺仪的参数通过 CAN 信号传输到数据采集模块并与牵引车数据保持同步;方向盘力角度仪用于测量方向盘转角、操纵力、力矩等参数;方向盘力角度仪终端用于接收方向盘力角度仪数据并通过模拟量信号传输到数据采集模块。最后将数据采集模块中的数据导入 PC 端进行后处理。

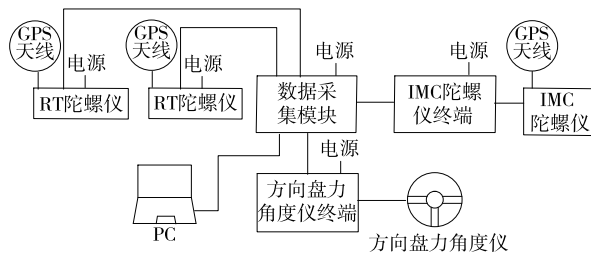


图 2 双半挂汽车列车操纵稳定性测试系统

2.4 仿真模型验证

通过单车道变换试验对双半挂汽车列车仿真模型进行验证。单车道变换试验按 GB/T 25979—2010《道路车辆 重型商用汽车列车和铰接客车 横向稳定性试验方法》进行,该试验主要针对汽车列车提出,侧重于汽车列车横向稳定性评价,为开环试验。试验过程中,通常对车辆转向盘施加一个完整的正弦转角输入,测量转向盘转角、纵向车速、侧向加速度等参数。试验车速设置为 60 km/h,转向盘转角最大值为 60° ,转向频率为 0.2 Hz。实车试验及仿真试验结果见图 3~6。

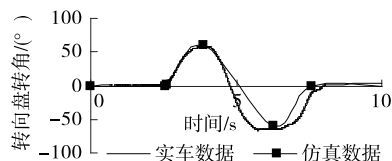


图 3 转向盘转角变化曲线

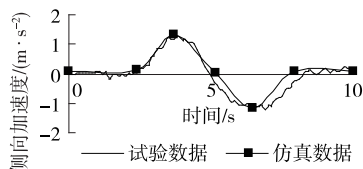


图 4 牵引车质心侧向加速度变化曲线

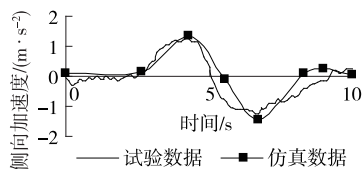


图 5 第一节挂车质心侧向加速度变化曲线

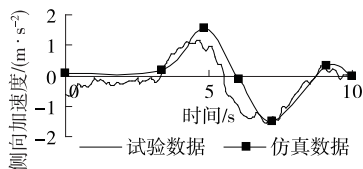


图 6 第二节挂车质心侧向加速度变化曲线

从图 3~6 可看出:在给转向盘一个 60° 的正弦波输入后,牵引车、第一节挂车、第二节挂车的质心侧向加速度均呈正弦波变化。实车试验和仿真试验中牵引车质心侧向加速度峰值分别为 1.21 m/s^2 、 1.23 m/s^2 ,第一节挂车质心侧向加速度峰值分别为 1.26 m/s^2 、 1.44 m/s^2 ,第二节挂车质心侧向加速度峰值分别为 1.55 m/s^2 、 1.57 m/s^2 ,质心侧向加速度呈后部放大状态,各车辆单元实车数据和仿真数据误差较小。实车试验过程中受人为因素或设备因素

等的影响,试验数据存在波动和突变情况。总体来说,仿真模型精度较高,能较好地反映实车性能。

3 双半挂汽车列车操纵稳定性典型试验工况分析

3.1 蛇形试验

蛇形试验主要按 GB/T 6323—2014《汽车操纵稳定性试验方法》进行,是车辆以固定速度连续绕桩行驶的过程,为闭环试验。通过蛇形试验测量转向盘转角、横摆角速度、车身侧倾角等参数,侧重于考核车辆综合性能,对评价车辆变道、转向等稳定性具有重要意义。

3.1.1 基准车速

根据 GB/T 6323—2014,对于最大总质量大于 15 t 的 N3 类车辆,蛇形试验的标桩间距和基准车速分别为 50 m、50 km/h。在 TruckSim 中设置对应标桩间距及试验车速,试验车辆为满载。试验结果见图 7~10。

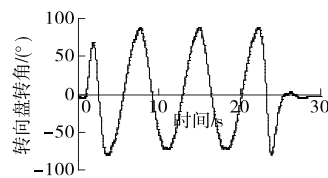


图 7 蛇形试验中转向盘转角变化曲线

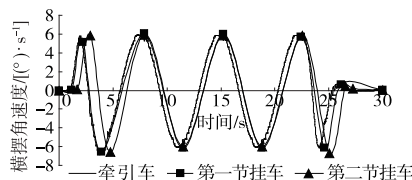


图 8 蛇形试验中质心横摆角速度变化曲线

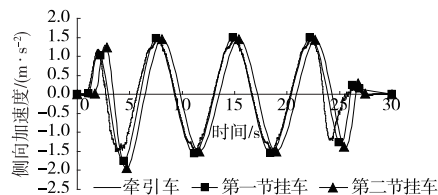


图 9 蛇形试验中质心侧向加速度变化曲线

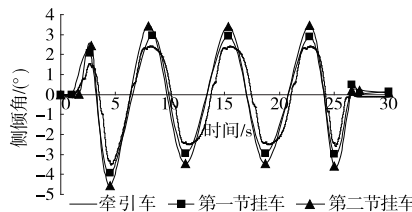


图 10 蛇形试验中质心侧倾角变化曲线

对蛇形试验数据进行处理,取中间区段4个有效峰值计算平均值,得到平均转向盘转角峰值为 79.73° ;牵引车、第一节挂车、第二节挂车的平均横摆角速度峰值分别为 $5.97 (^{\circ})/\text{s}$ 、 $6.11 (^{\circ})/\text{s}$ 、 $5.92 (^{\circ})/\text{s}$,平均侧向加速度峰值分别为 1.52 m/s^2 、 1.52 m/s^2 、 1.47 m/s^2 ,平均侧倾角峰值分别为 2.48° 、 3.03° 、 3.54° 。数据显示,在 50 km/h 基准车速下,试验样车各项曲线变化趋势基本一致,车辆处于稳定可控状态。对于平均横摆角速度峰值,第一节挂车相对于牵引车有一定后部放大现象,但第二节挂车数据相对于牵引车更小。对于平均侧向加速度峰值,牵引车和挂车数据相差较小,且第二节挂车数据

比牵引车数据小。另外,未滤波之前侧向加速度波动较大,表明该工况下侧向加速度变化更敏感。平均侧倾角峰值出现明显的后部放大现象。综上,一方面,在较低试验车速下,横摆角速度和侧向加速度后部放大现象不明显,出现折叠、甩尾、侧滑等事故的可能性较小;另一方面,侧倾角后部放大明显,第二节挂车更易提前发生侧翻。

3.1.2 其他车速

对试验样车进行更高车速下蛇形试验,试验车速分别取为 55 km/h 、 60 km/h 、 65 km/h 。试验结果见表4。

从表4可看出:随着试验车速的增加,各车辆单

表4 不同车速下蛇形试验结果

试验车速/ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	平均转向盘 转角峰值/ $(^{\circ})$	平均横摆角速度峰值/ [$(^{\circ}) \cdot \text{s}^{-1}$]			平均侧向加速度 峰值/($\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$)			平均侧倾角 峰值/ $(^{\circ})$		
	牵引	牵引	第一节	第二节	牵引	第一节	第二节	牵引	第一节	第二节
	车	车	挂车	挂车	车	挂车	挂车	车	挂车	挂车
50	79.73	5.97	6.11	5.92	1.52	1.52	1.47	2.48	3.03	3.54
55	80.11	6.17	6.32	6.15	1.52	1.57	1.52	2.68	3.24	3.77
60	85.64	6.47	6.65	6.54	1.67	1.76	1.76	3.08	3.65	4.18
65	95.49	7.12	7.19	7.26	1.94	2.03	2.03	3.86	4.46	5.00
50~55 km/h 增长率	0.48	3.35	3.44	3.89	0.00	3.29	3.40	8.06	6.93	6.50
55~60 km/h 增长率	6.90	4.86	5.22	6.34	9.87	12.10	15.79	14.93	12.65	10.88
60~65 km/h 增长率	11.50	10.05	8.12	11.01	16.17	15.34	15.34	25.32	22.19	19.62

元的平均转向盘转角峰值、平均横摆角速度峰值、平均侧向加速度峰值、平均侧倾角峰值等增长速率明显增大,后部放大系数显著增加,车辆发生失稳的可能性大大增加。试验车速为 65 km/h 时,试验过程中部分轮胎发生严重离地现象,试验中应严格控制车速,做好防侧翻措施。

3.2 稳态回转试验

稳态回转试验主要根据 GB/T 6323—2014 开展,是试验车辆在固定转向盘转角的情况下绕圆行驶的过程,主要考核车辆的转向特性。试验车辆进行稳态回转的过程中,可能会表现出过度转向、中性转向或不足转向特性。不足转向车辆的转弯半径会逐渐增大,车辆开发过程中应保证车辆具有一定的不足转向特性。

在 TruckSim 中对稳态回转试验进行设置,初始圆周半径设置为 25 m ,转向盘转角固定为 330° ,以 0.25 m/s^2 的纵向加速度由静止开始加速,试验时长设置为 60 s 。试验结果见图11~14。

从图11~14可看出:随着车速的增加,双半挂汽车列车各单元的行驶轨迹不断增大,表明该样车具有一定的不足转向特性;试验过程中,牵引车、第

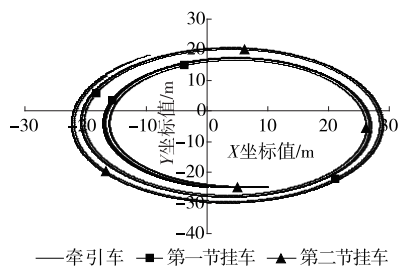


图11 稳态回转试验轨迹

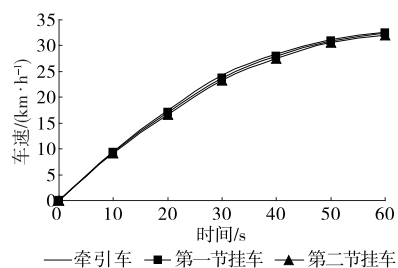


图12 稳态回转试验中车速变化曲线

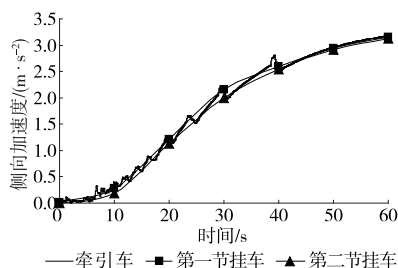


图 13 稳态回转试验中质心侧向加速度变化曲线

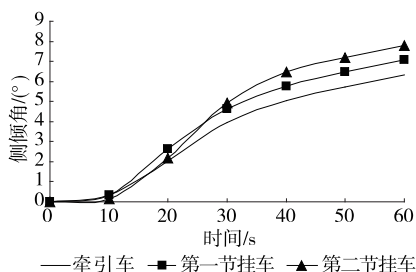


图 14 稳态回转试验中质心侧倾角变化曲线

一节挂车、第二节挂车的质心侧向加速度数据接近，最大值在 3.14 m/s^2 左右；牵引车、第一节挂车、第二节挂车的质心侧倾角之差在初始阶段呈增大状态，在后段差值基本稳定，但各车辆单元质心侧倾角数值仍呈增大趋势。

3.3 转向盘角阶跃输入试验

转向盘角阶跃输入试验是在试验车辆直线行驶一段时间后，迅速转动转向盘至预设值并固定数秒的过程。在给转向盘角阶跃输入后，试验车辆进入瞬态响应阶段，一段时间后逐步趋于稳态，主要考核车辆的时域响应特性。根据 GB/T 6323—2014，仿真试验中车速设置为 60 km/h ，直线行驶时间设置为 5 s ，起跃时间为 0.2 s ，转向盘转角为 90° 。试验结果见图 15~18。

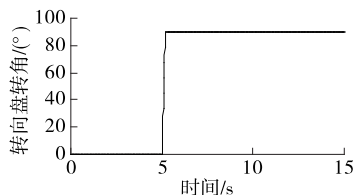


图 15 转向盘角阶跃输入试验中转向盘转角变化曲线

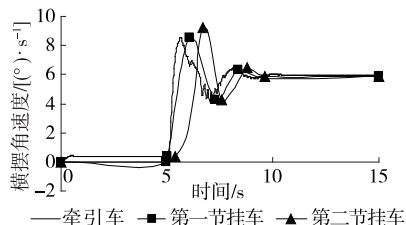


图 16 转向盘角阶跃输入试验中质心横摆角速度变化曲线

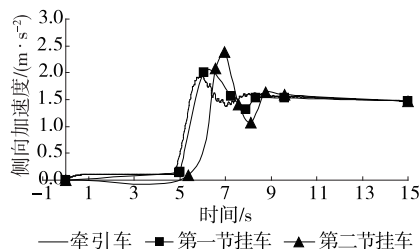


图 17 转向盘角阶跃输入试验中质心侧向加速度变化曲线

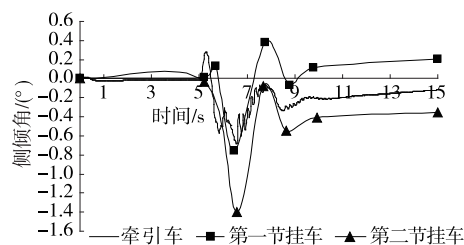


图 18 转向盘角阶跃输入试验中质心侧偏角变化曲线

从图 15~18 可看出：在给转向盘一个 90° 阶跃输入后，横摆角速度、侧向加速度、质心侧偏角等迅速增大，经过一段时间波动后逐渐趋于稳态；第一节挂车相对于牵引车、第二节挂车相对于第一节挂车，各项参数后部放大效应明显。

根据 GB/T 6323—2014 对试验数据进行进一步处理，主要计算参数如下：1) 横摆角速度响应时间，为横摆角速度首次达到 90% 稳态值的时间与转向盘转角达到 50% 预设值的时间之差。2) 横摆角速度峰值响应时间，为横摆角速度达到最大值的时间与转向盘转角达到 50% 预设值的时间之差。3) 横摆角速度超调量 σ ，按式(1)计算。4) 侧向加速度响应时间，为侧向加速度首次达到 90% 稳态值的时间与转向盘转角达到 50% 预设值的时间之差。5) 横摆角速度总方差 E_r ，按式(2)计算。6) 侧向加速度总方差 E_{ay} ，按式(3)计算。7) 汽车因素，为横摆角速度峰值响应时间与质心侧偏角稳态值的乘积。计算结果见表 5。

$$\sigma = \frac{r_{\max} - r_0}{r_0} \times 100 \quad (1)$$

式中： $r_{\max}$ 为横摆角速度最大值 $[^\circ/\text{s}]$ ； r_0 为横摆角速度稳态值 $[^\circ/\text{s}]$ 。

$$E_r = \sum_{k=0}^n \left(\frac{\delta_{\text{swk}}}{\delta_{\text{sw0}}} - \frac{r_k}{r_0} \right)^2 \times \Delta t \quad (2)$$

式中： n 为样本数量，采样时间截止到横摆角速度重新达到稳态； δ_{swk} 为转向盘转角瞬态值 $(^\circ)$ ； δ_{sw0} 为转向盘转角预设值 $(^\circ)$ ； r_k 为横摆角速度瞬态值 $[^\circ/\text{s}]$ ； Δt 为样本点的时间间隔， $\Delta t \leq 0.2 \text{ s}$ 。

表5 转向盘角阶跃输入试验结果

车辆单元	横摆角速度 响应时间/s	横摆角速度峰 值响应时间/s	横摆角速度 超调量/%	侧向加速度 响应时间/s	横摆角速度 总方差/s	侧向加速度 总方差/s	汽车因素 /[$^{\circ}$ ·s]
牵引车	0.20	0.33	44.18	0.43	0.18	0.13	0.04
第一节挂车	0.61	1.00	47.04	0.90	0.42	0.33	0.20
第二节挂车	1.03	1.55	63.95	1.28	0.84	1.01	0.54

$$E_{ay} = \sum_{k=0}^n \left(\frac{\delta_{swk}}{\delta_{sw0}} - \frac{a_{yk}}{a_{y0}} \right) \times \Delta t \quad (3)$$

式中: a_{yk} 为侧向加速度瞬态值(m/s^2); a_{y0} 为侧向加速度稳态值(m/s^2)。

表5中,横摆角速度响应时间为基本评价指标,其余参数均为建议获取指标。响应时间主要考核车辆的转向灵敏度,牵引车、第一节挂车、第二节挂车的横摆角速度响应时间分别为0.20 s、0.61 s、1.03 s,横摆角速度峰值响应时间分别为0.33 s、1.00 s、1.55 s,侧向加速度响应时间分别为0.43 s、0.90 s、1.28 s,各项响应时间较短,车辆对转向盘转角输入反应迅速,随动车辆单元相对于前一车辆单元的横摆角速度、侧向加速度响应时间滞后0.4 s左右,横摆角速度峰值响应时间滞后0.6 s左右。超调量和总方差主要考核车辆执行输入指令的精度,汽车因素侧重于综合评价。横摆角速度超调量、横摆角速度和侧向加速度总方差均表明,在转向盘 90° 阶跃输入工况下,各车辆单元横摆角速度都经历了较大波动,随动车辆单元波动幅度增长明显。

4 结论

在TruckSim中建立双半挂汽车列车仿真模型,选取单车道变换试验进行仿真分析与实车试验数据进行对比,验证仿真模型的有效性。在此基础上,对样车进行典型或极限工况仿真分析,得到如下结论:

(1) 蛇形试验中,在较低车速下,横摆角速度、侧向加速度未出现明显的后部放大现象,发生折叠、甩尾、侧滑等事故的可能性较小;侧倾角后部放大明显,第二节挂车更易提前发生侧翻。随着试验车速的增高,各车辆单元的参数增长速率明显增大,均出现后部放大现象,车辆发生失稳的可能性大大增加。在试验车速为65 km/h时,试验过程中部分轮胎发生严重离地现象。在双挂汽车列车实际行驶特别是转向变道过程中应严格控制车速。

(2) 稳态回转试验中,样车具有一定的不足转向特性,各车辆单元的侧向加速度最大值在3.14

m/s^2 左右,质心侧倾角之差在初始阶段呈增大状态,在后段差值基本稳定,但质心侧倾角数值仍呈增大趋势。

(3) 转向盘角阶跃输入试验中,车辆对转向盘转角输入反应迅速,随动车辆单元相对于前一车辆单元的参数响应滞后0.38~0.67 s;各项参数波动幅度较大,挂车摆动明显。在双挂汽车列车实际行驶过程中应避免急打方向,防止车辆失稳。

参考文献:

- [1] 于占波.模块化运输试点稳步推进,双挂汽车列车有望迎来发展[J].商用汽车,2016(8):72-73.
- [2] 中华人民共和国交通运输部综合规划司.交通运输部关于交通运输推进物流业健康发展的指导意见:交规划发[2013]349号[A].北京:中华人民共和国交通运输部,2013.
- [3] 国务院.国务院关于印发物流业发展中长期规划(2014—2020年)的通知:国发[2014]42号[A].北京:国务院,2014.
- [4] 全国汽车标准化技术委员会.汽车、挂车及汽车列车外廓尺寸、轴荷及质量限值:GB 1589—2016[S].北京:中国标准出版社,2016.
- [5] 中华人民共和国交通运输部运输服务司.交通运输部办公厅关于开展模块化中置轴汽车列车示范运行工作的通知:交办运[2018]46号[A].北京:中华人民共和国交通运输部,2018.
- [6] 黄超智.中置轴汽车列车操纵稳定性及其优化研究[D].北京:交通运输部公路科学研究所,2018.
- [7] 全国汽车标准化技术委员会.汽车操纵稳定性试验方法:GB/T 6323—2014[S].北京:中国标准出版社,2014.
- [8] 程源,张翼,李鹏,等.基于ADAMS的汽车操纵稳定性仿真试验研究[J].公路与汽运,2011(2):7-9.
- [9] 李傲伽,张炳力,程啸宇,等.一种氢燃料电池电混合城市客车试验循环典型工况研究[J].客车技术与研究,2020,42(6):1-4.
- [10] 周科,马玥.客车操纵稳定性试验研究[J].客车技术与研究,2014,36(2):58-62.

收稿日期:2022-03-04