

# 空气弹簧在 100% 低地板轻轨车上应用可行性分析<sup>\*</sup>

范韶轩<sup>1†</sup> 戚壮<sup>1</sup> 莫荣利<sup>2</sup> 叶特<sup>2</sup>

(1. 石家庄铁道大学 机械工程学院, 石家庄 050043)(2. 中国中车株洲时代新材料科技股份有限公司, 株洲 412000)

**摘要** 基于多体动力学仿真软件 SIMPACK, 对某型采用纵向耦合边驱电机转向架的 100% 低地板轻轨车三模块编组建模, 在 MATLAB/Simulink 中对其中央悬挂部件空气弹簧的主气室、节流孔、附加气室建模. 对 100% 低地板轻轨车运行工况进行设定, 通过联合仿真的方式对空气弹簧在 100% 低地板轻轨车上应用可行性进行分析, 得到: 1) 空气弹簧应用到 100% 低地板车上后, 车辆蛇行失稳临界速度为 149km/h, 大于设计时速, 车辆有较好的运行稳定性. 2) 车辆运行时, 平稳性及最大加速度指标均小于 2.5, 车辆有较好的运行平稳性. 3) 车辆通过小半径曲线时, 轮重减载率、脱轨系数、轮轴横向力、轮轨横向力指标均小于评判标准限值, 车辆有较好的曲线通过能力. 4) 空气弹簧在通过工况设定的小半径曲线时, 各项性能指标均符合该型空气弹簧技术标准, 空气弹簧在 100% 低地板轻轨车上应用可行.

**关键词** 100% 低地板轻轨车, 空气弹簧, 稳定性, 平稳性, 曲线通过性

DOI: 10.6052/1672-6553-2020-026

## 引言

100% 低地板轻轨车是一种新兴的轻轨车辆. 与前几代低地板车相比, 100% 低地板轻轨车采用独立旋转车轮或小轮径轮对结构, 使车厢地板面得到完全贯通, 将地板面与轨面距离降到 350mm 以下, 更加方便乘客乘坐. 因为其性能先进、绿色环保、乘坐便捷且运营成本相对低廉, 国内外越来越多的学者开始对其进行研究. Sugiyama 研究了两轴独立旋转车轮转向架的线性稳定性、蛇行稳定性与振动特性, 指出由于该转向架较小的自导向能力, 无论直线还是曲线均会发生轮缘接触, 且对于曲线半径更小的轻轨车来说这种现象更加明显<sup>[1]</sup>; Opala 指出缺少自导向机构的低地板车转向架会发生导向不足、磨损严重的问题, 并以脱轨系数为重点参量, 研究了轻轨车通过曲线时的脱轨安全性<sup>[2]</sup>; Bracciali 研究了独立旋转车轮的轮轨接触问题, 介绍了一种以扭矩限制器来减少钢轨的滚动接触疲劳以及曲线钢轨的磨损<sup>[3]</sup>. 国内方面: 王欢等对几种具有代表性的车辆结构型式进行了分析, 指出了 100% 低地板轻轨车辆结构型式的发展方向, 并且提出了适合国产 100% 低地板轻轨车辆采用

的结构型式<sup>[4]</sup>; 李玉青等在 SIMPACK 软件中建立了一种采用小轮径传统轮对转向架的 100% 低地板轨道车辆模型, 对初始参数下车辆的稳定性和平稳性进行了分析, 并对初始参数进行优化, 进一步改善了车辆的动力学性能<sup>[5]</sup>; 刘方伟等运用 SIMPACK 软件建立了一种 100% 低地板有轨电车的动力学模型, 分析了该模型的运行稳定性、运行平稳性及曲线通过性等动力学性能, 证明该 100% 低地板有轨电车具有良好的运行稳定性和直线运行平稳性, 能安全通过城市小半径曲线<sup>[6]</sup>; 薛闯在 SIMPACK 软件中对某型纵向耦合独立轮 100% 低地板有轨电车动力学建模, 分析了独立旋转车轮与纵向耦合车轮的导向机理, 研究了车辆的动力学性能, 并对国内上线运营的某型纵向耦合独立轮 100% 低地板有轨电车进行线路实验, 与仿真数据进行对比, 为纵向耦合独立轮 100% 低地板有轨电车的发展提供了参考<sup>[7]</sup>.

以上文章通过建立模型对独立旋转车轮导向机理和 100% 低地板轻轨车动力学性能进行了研究, 为 100% 低地板轻轨车发展提供了理论指导, 但对车辆中央悬挂部件分析时均较为简略, 没有揭示出车辆运行时中央悬挂部件性能变化情况, 为了

2019-10-01 收到第 1 稿, 2020-03-12 收到修改稿.

<sup>\*</sup> 河北省高等学校青年拔尖人才计划项目(BJ2017001), 河北省自然科学基金青年科学基金项目(A2018210064)

<sup>†</sup> 通讯作者 E-mail: fsx0701@163.com

进一步探究100%低地板轻轨车动力学性能,同时研究空气弹簧在100%低地板车上应用的可行性,本文针对某型采用纵向耦合边驱电机转向架的100%低地板轻轨车进行分析,在动力学仿真软件SIMPACK中对车辆三模块编组建模,在MATLAB/Simulink软件中对空气弹簧建模,通过联合仿真的方式研究车辆动力学性能变化情况及空气弹簧性能变化情况,以为100%低地板轻轨车设计发展提供理论参考。

## 1 车辆动力学建模

因为车辆编组后是一个复杂的非线性系统,所以建模时根据普遍的动力学建模思路对车辆进行一些假定:

1)将车辆考虑为多刚体系统,忽略车体、轮对等部件的柔性。

2)只考虑轨道上的不平顺高频激励,忽略如路基、轨道等弹性变形产生的低频激励。

3)车辆默认做匀速运动,忽略牵引、制动时大蠕滑影响。

4)只对如减振器等有强非线性作用特性的部件做非线性建模,将一系弹簧等近似为线性力元。

### 1.1 转向架结构及建模

该型低地板车采用纵向耦合边驱电机转向架,具体结构包括:构架、抗侧滚扭杆、单牵引拉杆、二系垂向减振器、空气弹簧、轴桥、横向止挡单元、二系横向减振器、弹性车轮及一系弹簧。其中,构架为H型,车轮采用独立旋转弹性车轮,一系弹簧采用叠层橡胶堆,二系弹簧采用空气弹簧;在构架侧梁前端布置横向减振器,垂向减振器、单牵引拉杆以及抗侧滚扭杆均安装在构架底部,横向止挡单元安装在构架中部内侧。

动力学建模时轮轨关系采用多点接触理论,其轮轨接触力通过Kalker简化蠕滑(FASTSIM)进行计算。在初步动力学计算中,Kalker权重系数设置为1.0,正常工况下轮轨间摩擦系数设置为0.3。

转向架动力学模型如图1所示:

### 1.2 车辆编组建模

采用上图转向架对车辆进行三模块编组,在SIMPACK软件中用43号Bushing力元对车间铰接进行模拟,动车1(Mc1)与拖车(T)、拖车与动车2(Mc2)下部铰接设置为固定铰:限制 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 三个方向自由度;动车1与拖车上端铰设置为自由铰:限

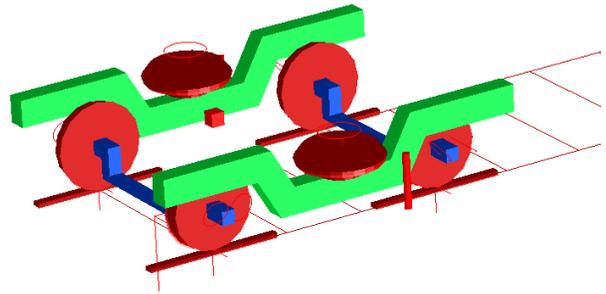


图1 转向架动力学模型

Fig.1 The model of bogie dynamics

制 $Y$ 方向自由度;拖车与动车2上端设置为转动铰:限制 $X$ 、 $Y$ 方向自由度;建模完成后车辆自由度如表1所示,整车结构如图2所示:

表1 车辆自由度表

Table 1 DOF of Vehicle

body/ constraint	$X$	$Y$	$Z$	$\Phi$	$\theta$	$\delta$
Vehicle body×3	○	○	○	○	○	○
Frame×3	○	○	○	○	○	○
Axle box×12	×	×	×	×	○	×
Wheels×12	○	○	×	×	○	○
Free hinge of Vehicle body	○	×	○	○	○	○
Fix hinge of Vehicle body	×	×	×	○	○	○
Rotary hinge of Vehicle body	×	×	○	○	○	○

表中 $X$ 为车辆伸缩运动, $Y$ 为车辆横移运动, $Z$ 为车辆沉浮运动, $\Phi$ 为车辆侧滚运动, $\theta$ 为车辆点头运动, $\delta$ 为车辆摇头运动,○表示自由度保留,×表示自由度被限制。

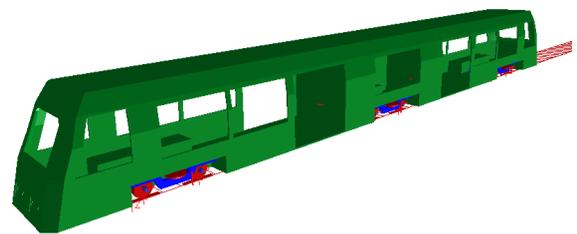


图2 整车动力学模型

Fig.2 The model of vehicle dynamics

## 2 空气弹簧模型

如图3所示,空气弹簧主要由主气室、应急橡胶弹簧、附加气室和节流孔组成。工作时车体载荷作用于主气室上盖板,使主气室发生弹性变形,主气室内气体通过节流孔与附加气室内气体产生交换生成压力差,为车体提供垂向支撑力,同时因为其垂向柔性,使得高频振动被过滤实现减振。

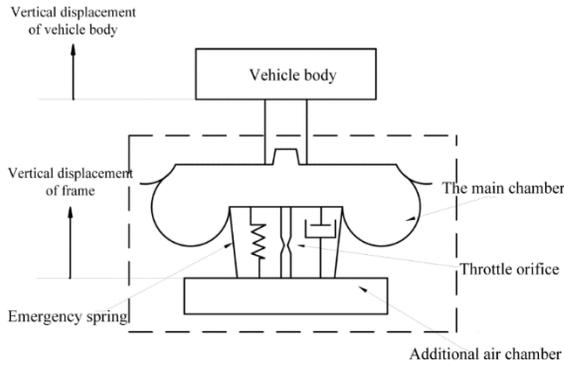


图3 空气弹簧模型

Fig.3 The model of air spring

## 2.1 主气室及附加气室数学表达式

空气弹簧主气室为密闭橡胶气囊,其内部状态变化为等熵过程<sup>[8]</sup>,初始条件时得到其状态方程:

$$P_{g0} \left( \frac{V_{g0}}{m_{g0}} \right)^n = P_g \left( \frac{V_g}{m_g} \right)^n \quad (1)$$

其中,  $P_{g0}, V_{g0}, m_{g0}$  为初始状态时气体压强、体积、质量;  $P_g, V_g, m_g$  为空气簧工作时气室内气体压强、体积、质量;  $n$  为气体多变指数,一般外部激振较小时值为1,较大时为  $n = k = 1.4$ ,  $k$  为空气比热比,由空气定压比热与定容比热比值取得.

将空气簧气室内气体视为理想气体,则其工作时主气室内各状态变量满足:

$$P_g V_g = \frac{m_g}{M_g} RT_g \quad (2)$$

$$\frac{T_g}{T_{g0}} = \left( \frac{P_g}{P_{g0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (3)$$

其中,  $R$  为理想气体常数;  $T_g, m_b, M_b$  为空气簧工作时温度、气体质量、摩尔质量;  $P_{g0}, T_{g0}$  为初始状态主气室压强、温度;考虑温度变化对气室内气体状态影响,联立式(2), (3)得:

$$\dot{P}_g = -\frac{nRT_{g0}}{V_g} \left( \frac{P_g}{P_{g0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \dot{m}_g - \frac{nP_g}{V_g} \dot{V}_g \quad (4)$$

影响橡胶气囊体积变化的因素主要有:载荷作用产生的气囊垂向形变和气室内压强变化产生的气囊径向形变,则可得:

$$\dot{V}_g = A_c \dot{h} + \frac{\partial V_g}{\partial P_g} \dot{P}_g \quad (5)$$

其中,  $h, A_c$  为工作时空气弹簧高度和高度变化产生的体积变化率.

由于工作条件影响,空气弹簧有效面积随其工作高度变化而变化,可得:

$$S_e = \frac{\pi}{4} (d_e + k_e h)^2 \quad (6)$$

其中,  $d_e, k_e$  为有效面积直径和有效直径随高度变化率.

由以上公式可推导出空气弹簧垂向力方程:

$$\dot{F} = (P_g - P_0) \dot{S}_e + \dot{P}_g S_e \quad (7)$$

其中,  $P_0$  为标准大气压力,  $P_0 = 1.01 \times 10^5 \text{ Pa}$ .

因为附加气室内气体环境与主气室基本相同,则附加气室气体状态方程为:

$$\dot{P}_t = -\frac{nRT_{t0}}{V_t} \left( \frac{P_t}{P_{t0}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \dot{m}_t \quad (8)$$

其中,  $T_{t0}, P_{t0}$  分别为初始状态下附加气室温度和压强,  $P_t, V_t, m_t$  为空气簧工作时附加气室压强、体积和气体质量.

## 2.2 节流孔数学表达式

节流孔在主气室和附加气室连接管路上,主要作用是影响两气室的气体交换能力.通过节流孔的气体质量流量由下式表达:

$$\frac{P_2}{P_1} > 0.518$$

$$G = AP_1 \sqrt{\frac{1}{RT_1} \frac{2k}{k-1} \left[ \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \cdot \text{sgn}(P_2 - P_1) \quad (9)$$

$$\frac{P_2}{P_1} < 0.518$$

$$G = AP_1 \left( \frac{2}{k+1} \right) \sqrt{\frac{2k}{k+1} \frac{1}{RT_1}} \cdot \text{sgn}(P_2 - P_1) \quad (10)$$

式中, 0.518 为临界压力比,  $G, A, R$  为通过节流孔气体质量流量, 节流孔有效流通面和通用空气常数<sup>[9]</sup>.

$$R = 286.9 \text{ J} (K_g K)$$

$$P_1 = \max(P_g, P_t), \text{ Pa}$$

$$P_2 = \min(P_g, P_t), \text{ Pa}$$

$$T_1 = \max(T_g, T), \text{ K}$$

综合以上公式,在 Simulink 软件中建立空气弹簧模型如图4所示:

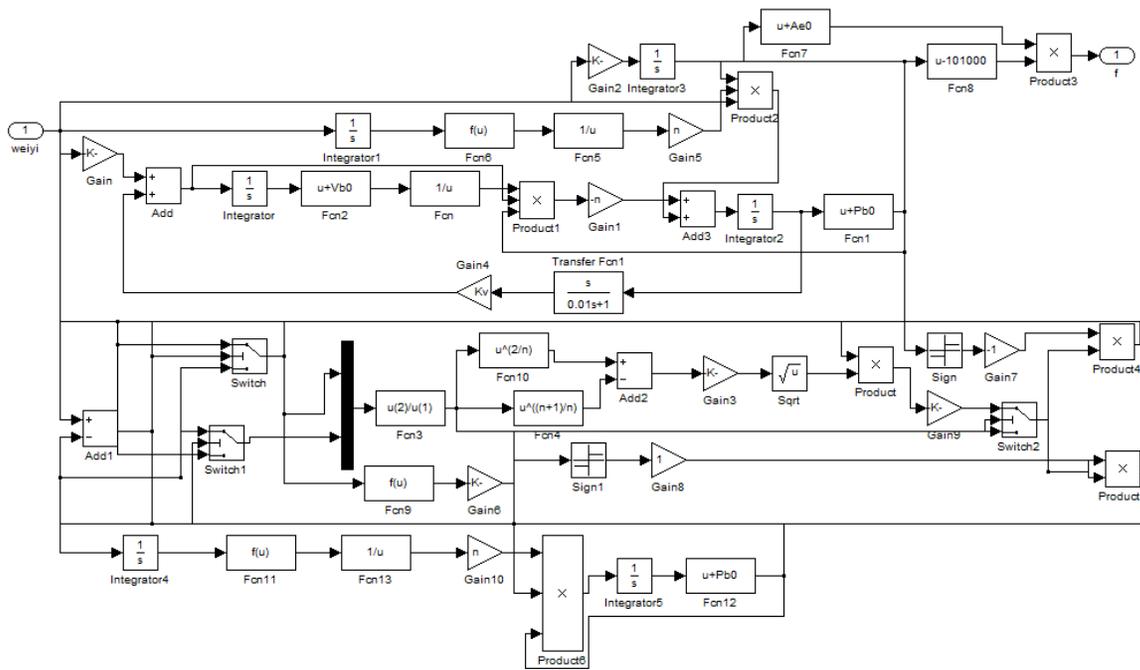


图4 空气弹簧Simulink模型

Fig.4 The Simulink model of air spring

### 3 工况设置及评判标准

#### 3.1 工况设置

100%低地板车服务于城市轨道交通系统,运行环境多样,既能在地面运行,又能通过高架,还能

通过小半径曲线( $R=20$ )和大坡度( $60‰-70‰$ )地段<sup>[10]</sup>.为了探究空气弹簧在100%低地板车应用后性能变化情况,对100%低地板轻轨车运行环境进行模拟,曲线工况设置如表2所示:

表2 曲线工况设置表  
Table 2 Curve condition

V/(km/h)	Length of straight track/m	Length of transition track/m	Radius of circular track/m	Length of circular track/m	Supereleva/m
15	100	30	50	50	0
20	100	60	80	50	0
25	100	60	120	60	0
30	100	80	150	100	0

#### 3.2 评判标准

##### (1)空气弹簧评判标准

根据选用空气弹簧产品技术规范要求<sup>[11,12]</sup>,所选空簧能承受最大载荷为125kN,垂向最大变形为拉伸40mm、压缩60mm,最大载荷下内压为 $0.622 \pm 3\%$ MPa.

##### (2)100%低地板车动力学参数评判标准

100%低地板轻轨车应符合GB/T5599-85《铁道车辆动力学性能评定和试验鉴定规范》,其动力学性能主要包括运行稳定性、直线平稳性和曲线通过性.

##### 1)运行稳定性

车辆最大设计时速为70km/h,稳定性指标应大于设计时速的10%.

##### 2)直线平稳性

车辆在运行中车体的横向加速度和垂向加速度不能超过下列限制:

$$\text{横向加速度} \leq 2.5\text{m/s}^2$$

$$\text{垂向加速度} \leq 2.5\text{m/s}^2$$

车辆的运行平稳性还应通过平稳性指标进行评定,平稳性指标按下式计算:

$$W = 7.08 \sqrt[10]{\frac{A^3}{f}} F(f) \quad (11)$$

式中,  $A$  为加速度 ( $\text{cm/s}^2$ ), 其值为  $A = Z_0(2\pi f)^2$ ,  $f$  为振动频率,  $F(f)$  为与振动频率相关的加权系数.

根据标准规定,  $W < 2.5$  时平稳性等级为 1 级, 评定结果为优;  $2.5 < W < 2.75$  时平稳性等级为 2 级, 评定结果为良;  $2.75 < W < 3$  时平稳性等级为 3 级, 评定结果为合格;  $W > 3$  时平稳性等级为 4 级, 评定结果为不合格.

### 3) 曲线通过性

车辆通过曲线时, 为了保证车辆的运行安全性, 其主要动力学指标应满足以下标准:

#### a) 轮轨横向力

根据 GB5599-85 规定, 车辆通过曲线时其轮轨横向力需满足下述指标:

$$Y \leq 19 + 0.3Q_{st} \quad (12)$$

式中,  $Y$  为轮轨横向力,  $Q_{st}$  为车轮静态载重. 本文所采用 100% 低地板轻轨车动力转向架需满足  $Y \leq 30.352 \text{ kN}$ , 非动力转向架需满足  $Y \leq 28.704 \text{ kN}$ .

#### b) 轮轴横向力

根据 GB5599-85 规定, 车辆通过曲线时其脱轨系数需满足下述指标:

$$H \leq 0.85 \times \left( 10 + \frac{Q_{st1} + Q_{st2}}{2} \right) \quad (13)$$

式中,  $H$  为轮轨轴力,  $Q_{st1}$ 、 $Q_{st2}$  分别为左、右车轮的静态载重. 本文采用 100% 低地板轻轨车动力转向架需满足  $H \leq 40.65 \text{ kN}$ , 非动力转向架需满足  $H \leq 35.67 \text{ kN}$ .

#### c) 脱轨系数

根据 GB5599-85 规定, 车辆通过曲线时其轮轴横向力需满足下述指标:

$$\frac{Y}{Q} \leq 1.0 \quad (14)$$

式中,  $Y$  为爬轨侧车轮的横向力,  $Q$  为爬轨侧车轮的垂向力.

#### d) 轮重减载率

根据 GB5599-85 规定, 车辆通过曲线时其轮重减载率需满足下述指标:

$$\frac{\Delta Q}{\bar{Q}} \leq 0.6 \quad (15)$$

式中,  $\Delta Q$  为两侧车轮的轮重减载量,  $\bar{Q}$  为两侧车轮的平均轮重.

## 4 联合仿真

工况设置后, 通过 SIMSAT 联合仿真接口将 Simulink 中建立的空簧模型与 SIMPACK 中车辆动力学模型联合仿真. 联合仿真过程如图 5 所示: 车辆在轨道激励作用下输出车体与构架相对位移, 作用于空气弹簧主气室, 空气弹簧通过节流孔与附加气室进行气体交换输出垂向力对车辆支撑.

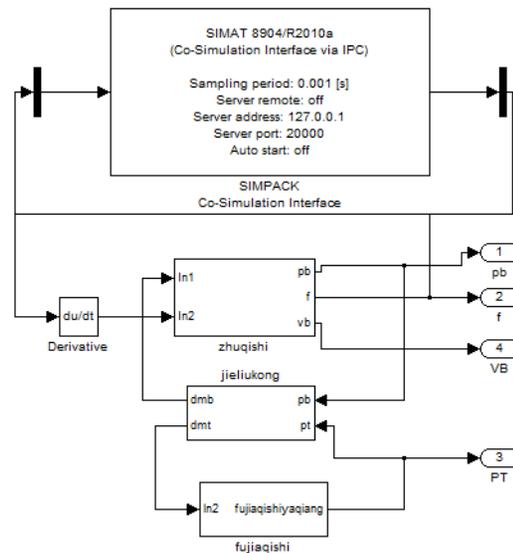


图5 联合仿真示意图

Fig.5 The diagram of co-simulation

### 4.1 100%低地板车动力学联合仿真结果

#### 1) 运行稳定性

运行稳定性是机车车辆运行安全的重要指标之一, 通常以轮对产生蛇行运动时的临界速度对其进行评判, 在轨道上设置一段激励, 保持之后轨道线路水平光滑, 车轮通过激励后产生横移, 其自动对中情况如图 6 所示:

由图 6 可知当车辆速度达到 149km/h 时, 车轮产生横向位移在平直光滑轨道上不能自动对中, 车辆产生蛇行失稳, 其数值远大于 80km/h, 车辆有较好的运行稳定性.

#### 2) 运行平稳性

为反应车辆运行平稳性, 在两动车司机室及拖车地板面上处设置传感器, 对车体加速度进行测量, 同时为更好反映空气弹簧减振性能, 车辆运行时采用线路条件相对较差的美国 V 级谱作为轨道激励, 测量结果如图 7 所示:

由图 7 可知在车辆以 20km/h~70km/h 速度运行时, 动、拖车平稳性及最大加速度指标均随速度增

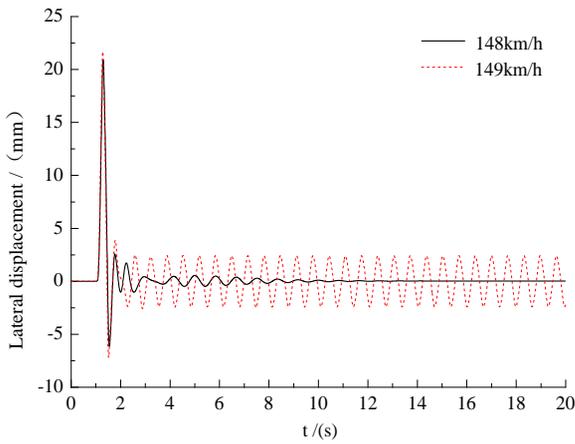


图6临界速度计算结果

Fig.6 The calculation results of critical speed

大而增大,最大值皆小于 2.5,评定结果为优,空气弹簧应用到 100% 低地板车上后,能有效衰减振动,提高车辆乘坐舒适性.

### 3)曲线通过性

曲线通过性主要包括:脱轨系数、轮重减载率、轮轨横向力、轮轴横向力四种指标,为反映车辆曲线通过安全性,现根据表(2)设置工况,选用美国 V 级谱作为轨道激励,选取导向车轮结果如图 8 所示:

车辆在四种工况运行后,动车轮重减载率指标最大值为 0.35,拖车轮重减载率最大值为 0.24,均小于评判标准限值 0.6;动车脱轨系数指标最大值为 0.78,拖车脱轨系数最大值为 0.73,均小于评判标准限值 1.0;动车轮轴横向力指标最大值为 7.27kN,拖车轮轴横向力指标最大值为 8.50kN,均小于各自评判标准要求 40.65kN 和 35.67kN;动车轮轨横向力指标最大值为 18.20kN,拖车轮轨横向力指标最大值为 23.12kN,均小于评判标准指标限值 30.352kN 和 28.704kN.空气弹簧应用到 100% 低地板轻轨车上后,车辆有较好的曲线通过性.

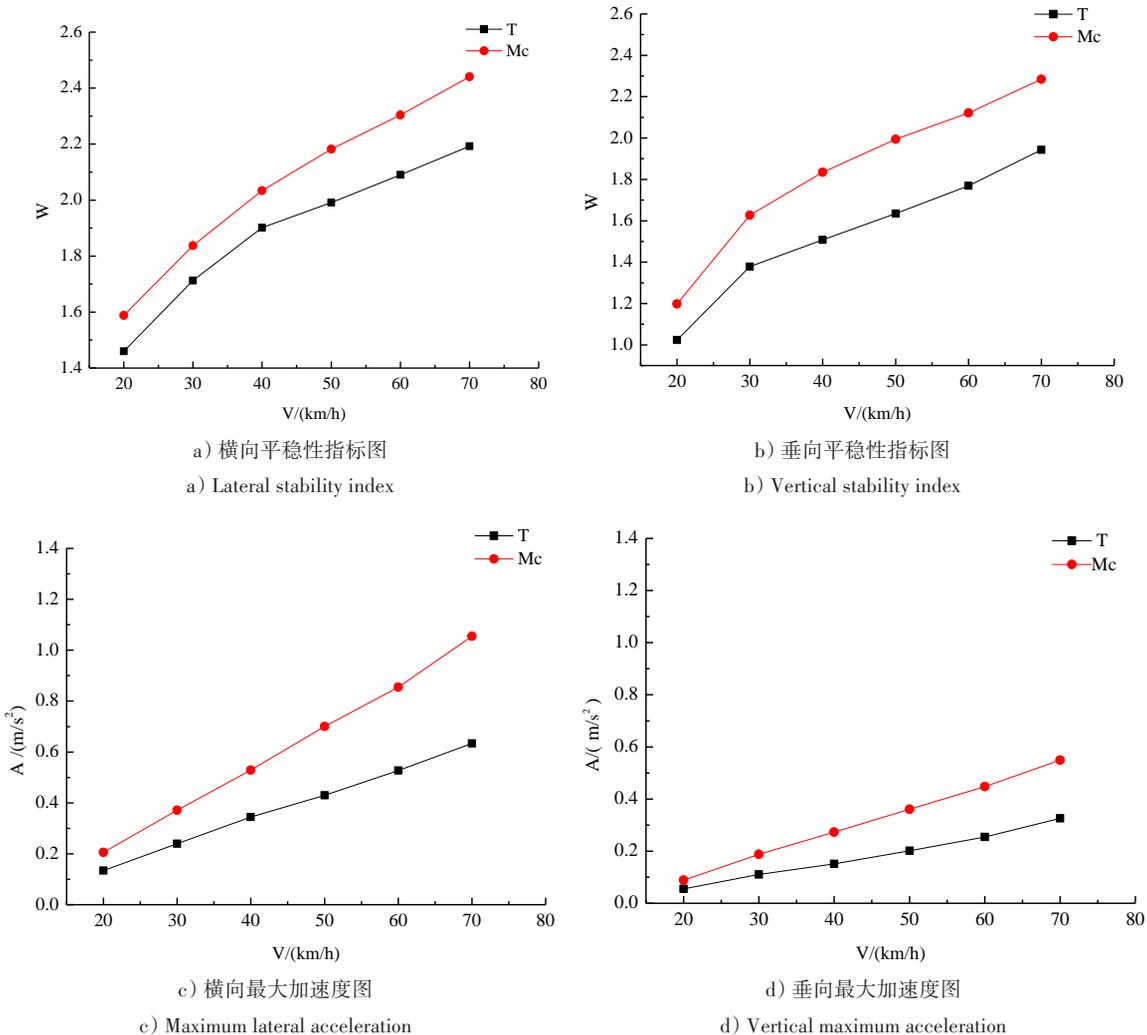


图7 平稳性指标图

Fig.7 The index of stability

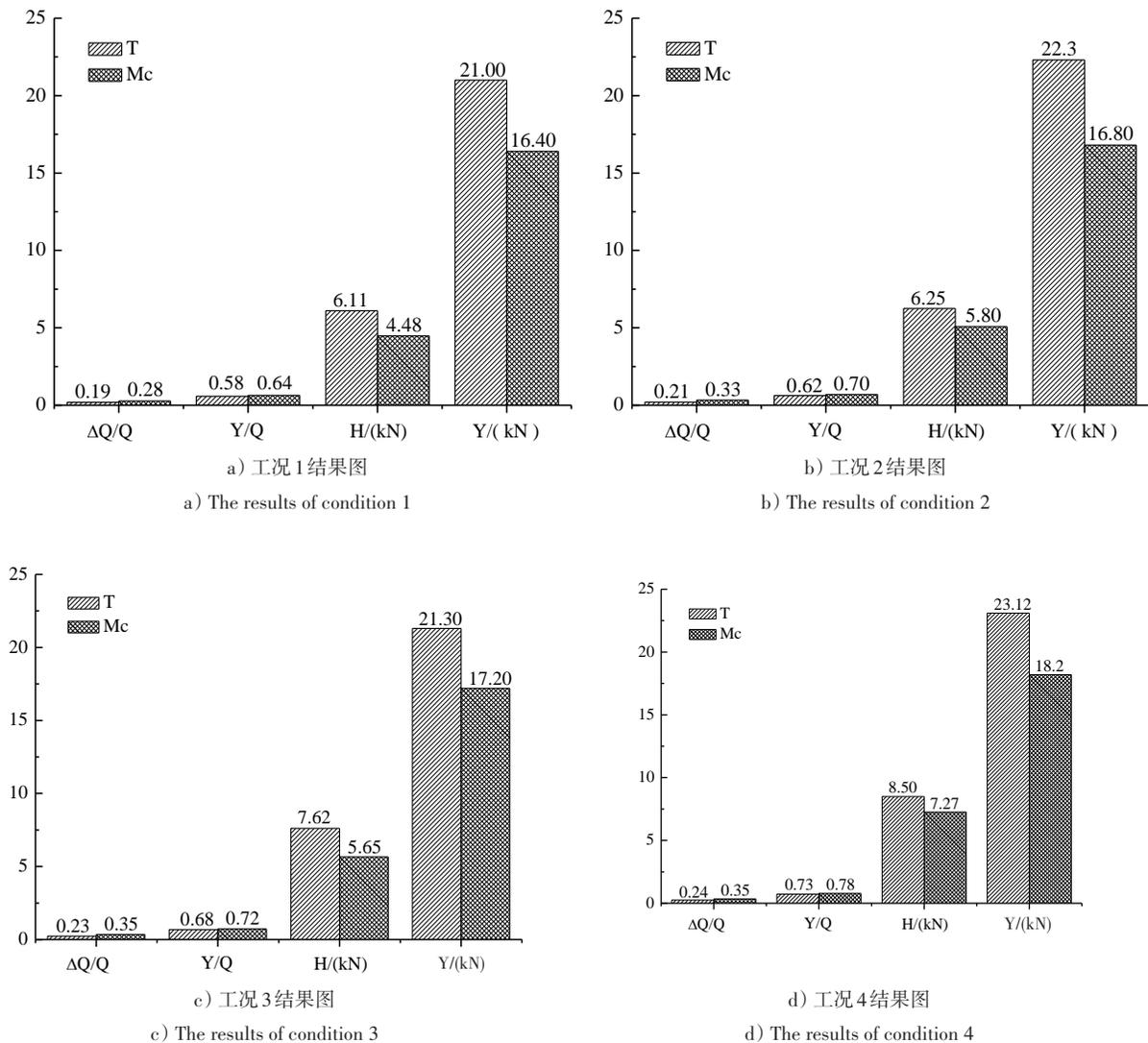


图8 曲线通过性指标图

Fig.8 The index of curve trafficability

#### 4.2 空气弹簧联合仿真结果

车辆完成曲线通过性评判后,提取空气弹簧各性能参数指标,结果如表3所示:在四种工况下,车辆空气弹簧垂向高度、主气室压强、所承受载荷均发生变化.工况1下,空气弹簧最大垂向变形为7mm,承受最大载荷为69.996kN,主气室压强最大为0.41542MPa;工况2下,空气弹簧最大垂向变形为9mm,承受最大载荷为70.126kN,主气室压强最大为0.41598MPa;工况3下,空气弹簧最大垂向变形为8mm,承受最大载荷为70.126kN,主气室压强最大为0.41612MPa;工况4下,空气弹簧最大垂向变形为7mm,承受最大载荷为71.749kN,主气室压强最大为0.42356MPa.四种工况下空气弹簧各项指标均符合其技术规范要求.

#### 5 结论

通过对100%低地板轻轨车模型和空气弹簧模型联合仿真可以得到以下结论:

1)空气弹簧应用到100%低地板轻轨车上后,车辆蛇行失稳临界速度达到149km/h,大于设计时速80km/h,车辆有较好的稳定性.

2)车辆运行时,平稳性及最大加速度指标均小于评判标准限值,车辆有较好的运行平稳性.

3)车辆通过小半径曲线时,轮重减载率、脱轨系数、轮轴横向力、轮轨横向力指标均小于评判标准指标,空气弹簧应用到100%低地板轻轨车上后,车辆有较好的曲线通过能力.

4)空气弹簧在通过设定的小曲线工况时,最大垂向变形量为9mm,承受最大载荷为71.749kN,主

表3 空气弹簧工作性能参数表

Table 3 Working performance parameters of air spring

conditions	1	2	3	4
Vertical deformation/mm	5	7	6	5
The air spring of Mc1				
Load/kN	41.148	41.226	41.235	41.407
The pressure of main chamber /MPa	0.27771	0.27804	0.27884	0.28734
Vertical deformation/mm	3	5	6	4
The air spring of T				
Load/kN	69.996	70.126	70.042	71.749
The pressure of main chamber /MPa	0.41542	0.41598	0.41612	0.42356
Vertical deformation/mm	7	9	8	7
The air spring of Mc2				
Load/kN	39.996	40.142	39.400	41.320
The pressure of main chamber /MPa	0.28594	0.28628	0.28647	0.2867

气室最大压强为0.42356MPa,均符合该型空气弹簧技术标准,空气弹簧可以应用在100%低地板轻轨车上.

### 参 考 文 献

- Sugiyama H, Matsumura R, Suda Y, et al. Dynamics of independently rotating wheel system in the analysis of multi-body railroad vehicles. *Journal of Computational and Non-linear Dynamics*, 2011, 6(1): 601 ~ 619
- Opala M. Study of the derailment safety index Y/Q of the low-floor tram bogies with different types of guidance of independently rotating wheels. *Archives of Transport*, 2016, 38(2): 39 ~ 47
- Bracciali A, Megna G. Contact mechanics issues of a vehicle equipped with partially independently rotating wheel-sets. *Wear*, 2016, 366-367: 233 ~ 240
- 王欢,戴焕云,池茂儒. 国外100%低地板轻轨车动力转向架纵览. *铁道机车与动车*, 2007, 12: 1~6 (Wang H, Dai H Y, Chi M R. Overview of overseas 100% low floor tram motor bogie. *Diesel Locomotive*, 2007, 12: 1~6 (in Chinese))
- 李玉青,陈康,张江,等. 100%低地板轨道车辆的动力学分析. *铁道机车车辆*, 2016, 36(4): 67 ~ 71 (Li Y Q, Chen K, Zhang J, et al. The dynamic analysis of 100% low-floor railway vehicles railway. *Locomotive & Car*, 2016, 36(4): 67 ~ 71 (in Chinese))
- 刘方伟,李芾,徐凯,等. 100%低地板有轨电车动力学性能分析. *机械工程与自动化*, 2018, 78 ~ 80 (Liu F W, Li F, Xu K, et al. Dynamic performance analysis of 100% low-floor tram. *Mechanical Engineering and Automation*, 2018, 78~80 (in Chinese))
- 薛闯. 采用纵向耦合独立轮的低地板有轨电车动力学性能研究[硕士学位论文]. 成都:西南交通大学, 2018 (Xue C. Study on the dynamic performance of low-floor tram with longitudinally coupled independent wheels [Master Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018 (in Chinese))
- 戚壮. 高速动车组空气弹簧动力学特性及其故障模式研究[博士学位论文]. 成都:西南交通大学, 2015 (Qi Z. Research on dynamic characteristics and failure mode of air spring of high-speed EMU [Ph.D Thesis]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2015 (in Chinese))
- 王家胜. 带附加气室空气弹簧动力学特性研究[博士学位论文]. 南京:南京农业大学, 2009 (Wang J S. Research on dynamic characteristics of air spring with auxiliary chamber [Ph.D Thesis]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009 (in Chinese))
- 柳拥军,佟关林. 城市轨道交通车辆. 北京: 科学出版社, 2006: 8 ~ 9 (Liu Y J, Tong G L. Urban rail vehicles. Beijing: Science Press, 2006: 8 ~ 9 (in Chinese))
- TB/T 2841-2010, 铁道车辆用空气弹簧. 北京: 中国铁道出版社, 2010 (TB/T 2841-2010, Air spring for railway vehicle. Beijing: China Railway Publishing House, 2010 (in Chinese))
- TB/T 2843-2007, 机车车辆用橡胶弹性元件通用技术条件. 北京: 中国铁道出版社, 2010 (TB/T 2843-2007, General technical specification for elastic parts for railways. Beijing: China Railway Publishing House, 2007 (in Chinese))

## FEASIBILITY ANALYSIS OF AIR SPRING IN 100% LOW FLOOR LIGHT RAIL VEHICLE \*

Fan Shaoxuan<sup>1†</sup> Qi Zhuang<sup>1</sup> Mo Rongli<sup>2</sup> Ye Te<sup>2</sup>

(1.School of Mechanical Engineering, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

(2.CRRC Zhuzhou Times New Material Technology Co.,Ltd., Zhuzhou 412000, China)

**Abstract** A three-module marshaling model for a 100% low floor light rail vehicle with longitudinal coupled side-motor drive bogies was built by using the multi-body dynamics simulation software SIMPACK. The main plenum, orifice, and additional plenum of the central suspension air spring were modeled by MATLAB/Simulink. The operating conditions of the 100% low-floor light rail vehicles were set, and the feasibility of using air springs in the 100% low-floor light rail vehicle were analyzed by co-simulation combining SIMPACK and MATLAB/Simulink. The results indicated that both the vehicle stability and curve passing ability are improved after using the air spring. Specifically, the critical speed of hunting instability is increased to 149km/h, which is higher than the design speed. Both the stability and the maximum acceleration index are less than 2.5 as the vehicle runs. When the vehicle passes through a small-radius curve, all the wheel load reduction ratio, derailment coefficient, wheel lateral force, and wheel rail lateral force are less than the evaluation standard limit, and all the performance indices meet the technical standards of this type of air spring. Therefore, the application of air spring to the 100% low-floor light rail vehicle is feasible.

**Key words** 100% low floor light rail car, air spring, stability, stability, curve passing

---

Received 1 October 2019, revised 12 March 2020.

\* The project supported by the Young Talents Program of Hebei Colleges and Universities (BJ2017001), and the Hebei Natural Science Foundation Youth Science Foundation Project (A2018210064)

† Corresponding author E-mail: fsx0701@163.com