

空气悬架城市客车平顺性评估及优化

彭倩^{1,2}, 胡小生¹, 刘金武¹, 韩锋钢^{1,2}, EMMANUEL Matsika³

(1. 厦门理工学院 机械与汽车工程学院, 福建 厦门 361024;

2. 厦门威迪思汽车设计与服务有限公司, 福建 厦门 361024;

3. 纽卡斯尔大学 轨道交通研究中心, 泰恩-威尔郡 纽卡斯尔 NE1 7RU)

摘要: 利用 ADAMS/CAR 建立空气弹簧城市客车多体动力学模型, 研究车速和随机路面对客车平顺性的影响. 采用 Behnken 盒式正交试验设计方法, 对悬架参数进行灵敏度分析及优化, 进而提升平顺性. 研究表明: 前悬弹簧刚度和前后悬减震器阻尼对平顺性影响较显著; 当前悬弹簧刚度、减震器阻尼降低, 以及后悬减震器阻尼增加时, 整车平顺性得到较明显的提升.

关键词: 城市客车; 空气悬架; 平顺性; 悬架参数; ADAMS/CAR

中图分类号: U 461.4

文献标志码: A

据统计, 2010 年底, 全国地级及以上城市公共汽(电)车营运车辆达到 45.8 万辆, 并以每年 2 万辆的速度增长, 累计客运总量达 670.1 亿人次^[1]. 平顺性是客车整体性能的关键因素, 它不仅关系着乘客的身体健康, 还涉及整车结构的可靠性, 对车辆行驶安全有着重大影响^[2]. 国内外学者对客车平顺性进行了一些有益的研究. 杨启耀等^[3]提出了一种基于神经网络的空气悬架参数优化方法. 刘星^[4]利用遗传算法进行某客车悬架阻尼参数和分段线性化的空气弹簧特性曲线匹配. Wang 等^[5]利用经验初估法, 在多工况下, 对阻尼和刚度进行匹配, 研究空气悬架参数对平顺性的影响. 然而, 以上研究主要面向高速客车, 对低速行驶的城市客车涉及较少. 全铝车身客车是未来公共交通发展的趋势^[6], 轻量化的全铝车身, 车辆簧上质量减小势必影响整车平顺性. 对该类客车的平顺性还有待进一步地深入研究. 本文以 12 m 全铝车身空气弹簧城市客车为对象, 对随机路面下客车的平顺性及性能优化方法进行研究^[7-8].

1 方法与材料

1.1 整车仿真模型

基于城市客车三维实体模型, 获取建模所需硬点、部件质量及转动惯量等参数, 利用 ADAMS/CAR 分别建立各个子系统, 并装配成整车仿真模型. 在建模过程中, 提出以下 3 点简化和假设. 1) 除轮胎、阻尼元件、弹性元件和橡胶元件外, 其他部件均看作刚体. 2) 不考虑发动机的激励作用及座椅阻尼. 3) 轴套连接忽略内部部件之间的摩擦力.

在整车仿真模型中, 前后悬采用四连杆空气弹簧非独立悬架, 发动机及传动系统集成在 powertrain 子系统, 全铝车身简化为刚性球体模型, 转向系统类型为循环球式液压助力. 车辆平顺性主要关注低频范围内的振动, 因而使用满足悬架系统频率达到 15 Hz 的 PAC2002 轮胎^[9], 并加载 ADAMS/CAR 四柱激振试验台.

1.2 路面模型

利用 ADAMS/CAR 提供的路面生成器创建随机不平路面模型. 路面生成器根据 Sayers 经验公式

收稿日期: 2015-06-03

通信作者: 彭倩(1982-), 男, 讲师, 博士, 主要从事整车性能评估与分析的研究. E-mail: pengqian603@163.com.

基金项目: 国家外专局高端外国专家项目(GDT20153600065); 福建省教育厅 JK 项目(JK2014036); 厦门理工学院高层次人才项目(YJK13002R)

开发,并采用粗糙度表达各种类型随机路面. Sayers 数学模型为

$$G_d(n) = G_e + \frac{G_s}{(2\pi n)^2} + \frac{G_a}{(2\pi n)^4}.$$
 (1)

式(1)中: $G_d(n)$ 为空间频率 n 与空间功率谱密度的函数; G_e 为白噪声的位移功率谱密度; G_s 为白噪声的速度功率谱密度; G_a 为白噪声的加速度功率谱密度.

用 G_e, G_s, G_a 定义相应国标路面. 其中, B 级随机路面轮廓,如图 1 所示. 图 1 中: s_1 为横向位移; s_2 为纵向位移.

1.3 平顺性试验方案与评价

全铝车身客车轴距为 6 100 mm,满载质量为 17 000 kg,质心坐标(mm)为 (4 000,0,800). 悬架初始设计参数,如表 1 所示. 表 1 中: m 为簧上质量; K 为弹簧刚度; C 为减震器阻尼; n 为偏频; ψ 为相对阻尼系数.

表 1 悬架初始参数
Tab. 1 Initial suspension parameters

项目	m/kg	$K/\text{N} \cdot \text{mm}^{-1}$	$C/\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{mm}^{-1}$	n/Hz	ψ
前悬	5 150	150	11.79	1.22	0.30
后悬	10 200	170	11.84	1.30	0.28

结合汽车平顺性试验方法、评价指标与限值,考虑城市客车行驶车速和路面,设定 5 种车速分别为 10,20,30,40,50 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,两种路面分别为 B 级,C 级路面,共制定 10 组试验方案. 在此基础上,分析车速和随机路面对客车平顺性的影响规律. 当车速为 30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$,城市客车加权振级限值为 106 时,评估该车平顺性的好坏.

在一般行驶工况下,客车的加速度峰值系数小于 9,故采用平顺性基本评价方法. 利用加速度时间历程频谱分析法获得功率谱密度,并离散 1/3 倍频加权函数,得加权加速度均方根值及其加权振级为

$$a_w = [\int_{0.5}^{80} W^2(f)G_a(f)df]^{1/2},$$
 (2)

$$L_{aw} = 20\lg(a_w/a_0).$$
 (3)

式(2),(3)中: a_0 为参考加速度的均方根值, $a_0=10^{-6} \text{ m}$; L_{aw} 为加权振级; $W(f)$ 为垂向加权函数,其表达式为

$$W(f) = \begin{cases} 0.5, & 0.5 < f < 2, \\ f/4, & 2 < f < 4, \\ 1, & 4 < f < 12.5, \\ 12.5/f, & 0 < f < 2. \end{cases}$$
 (4)

对加权函数 1/3 倍频离散化,导入 ADAMS/CAR 处理得到加权函数曲线,如图 2 所示.

2 仿真结果与分析

客车后轴上方车身测量点加权加速度均方根值和加权振级随速度变化曲线,如图 3 所示. 该曲线通过式(2),(3)处理后,分别得到加权加速度均方根值 a_w 和相应的加权振级 L_{aw} .

由图 3 可知:随着速度增加, a_w 和 L_{aw} 保持相近的增长趋势,且 C 级路面的 a_w, L_{aw} 高于 B 级路面. 当速度(v)为 20 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,B 级路面的 a_w 略大于 C 级路面,这是因为簧下质量与车身发生共振. 但是, a_w 仍然较小,对整车平顺性影响不大. 当速度为 30 $\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$ 时,C 级路面的加权振级 L_{aw} 为 106.26,而客车平顺性指标与限值为 106^[8]. 这表明该车在此工况下的平顺性不够理想,还有待进一步优化.

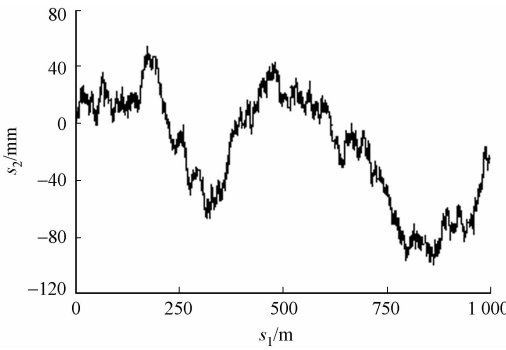


图 1 B 级随机路面轮廓
Fig. 1 Class B random road profile

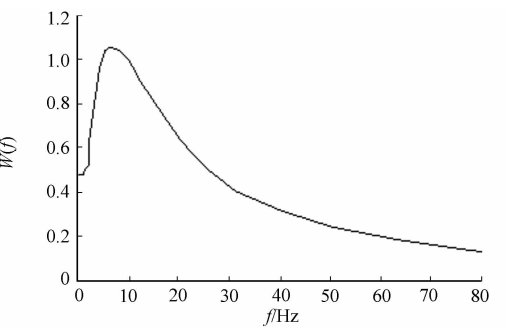


图 2 垂向加权函数离散曲线
Fig. 2 Discreted curve of vertical weighting function

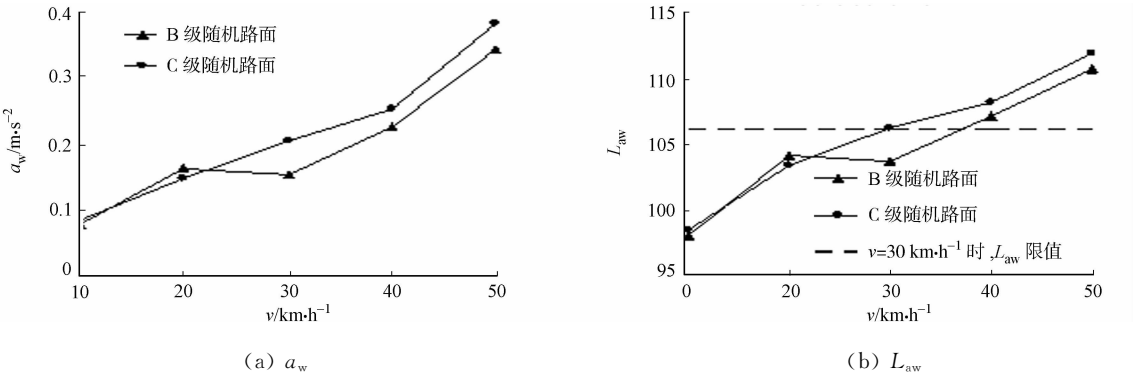


图 3 各参数随车速变化图

Fig. 3 Variation diagram of parameters with vehicle velocity

3 优化试验分析

3.1 优化方法

基于 ADAMS/INSIGHT 优化悬架弹性参数和阻尼参数,考虑空气弹簧刚度和减震器阻尼非线性特性,采用数值点插值拟合法进行优化,其本质是对弹性元件和阻尼元件的特性文件插值点重组拟合.优化试验方案,如图 4 所示.

因素水平及约束条件范围,如表 2 所示.表 2 中: K_f , K_r 分别为前、后弹簧刚度; C_f , C_r 分别为前、后悬减震器阻尼.由表 2 可知:偏频变化范围较小,试验因素均在约束条件范围内.因此,采用 K_f , K_r , C_f , C_r 作为优化因素,以设计因素的水平范围变化 $\pm 20\%$ 和相对阻尼系数(0.2~0.4)为约束条件^[10].以 Z 轴向加权加速度均方根值 a_w 最小值为优化目标,对 4 因素 3 水平 Behnken 盒式试验矩阵进行 27 次迭代.在 ANOVAI 工具箱中,对近似数学模型进行拟合优度分析, R^2 为 0.997 35, R^2_{adj} 为 0.994 25,均大于 0.9,说明近似数学模型拟合较好; $R/V>10$,说明拟合结果可靠度高^[11].

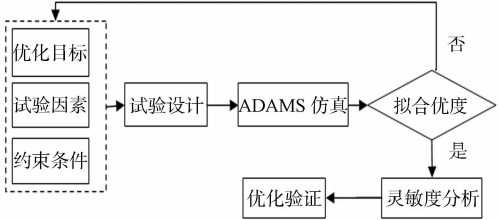


图 4 优化试验流程图

Fig. 4 Flowchart of optimization experiment

表 2 因素水平及约束条件范围

Tab. 2 Factor levels and range of constraint conditions

试验因素	因素水平	变化范围	n/Hz	ψ
$K_f/N \cdot mm^{-1}$	0.8~1.2	120.00~180.00	1.09~1.33	0.22~0.40
$C_f/N \cdot s \cdot mm^{-1}$	0.8~1.2	9.44~14.15	—	—
$K_r/N \cdot mm^{-1}$	0.8~1.2	136.00~204.00	1.16~1.42	0.21~0.38
$C_r/N \cdot s \cdot mm^{-1}$	0.8~1.2	9.48~14.21	—	—

3.2 刚度和阻尼灵敏度分析

试验因素对响应的灵敏度,如图 5 所示.图 5 中: $K_f>C_r>C_f>K_r$. K_f , C_f 对试验响应的影响为正,即增加 K_f , C_f 时,目标响应有增大趋势; C_r 为 -12.91,即增加 C_r 时,目标响应有降低的趋势. K_r 仅为 1.03%,由此可见,后悬弹簧刚度对加速度响应不够显著^[12].

3.3 刚度和阻尼参数对平顺性的影响

悬架参数 K_f , K_r , C_f , C_r 优化前分别为 15.00, 170.00, 11.79, 11.84, 优化后分别为 120.00, 170.00, 9.44, 14.21. 由此可知: K_f , C_f 减小了 20%; C_r 增加了 20%; K_r 不变.

前后悬空气弹簧特性曲线,如图 6 所示.图 6 中: s 为弹簧位移; F 为弹簧作用力.对于前后悬弹簧刚度曲线,保持

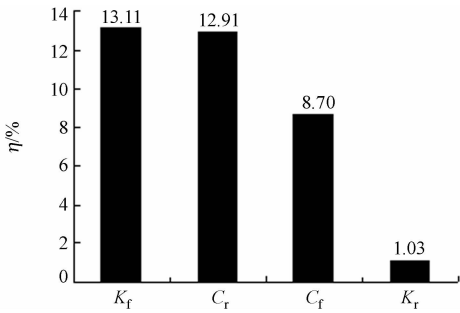


图 5 试验因素对响应灵敏度的影响

Fig. 5 Effect of test factors on the response sensitivity

插值点 X 轴坐标不变, 优化曲线相对于初始位置变化斜率, 对优化后 Y 轴坐标点重新拟合, 可获得优化前后的刚度性能差异. 由图 6 可知: 前悬弹簧刚度曲线初始位置斜率增加 20%, 且在优化前后均保持非线性特性; 后悬弹簧刚度曲线无明显变化.

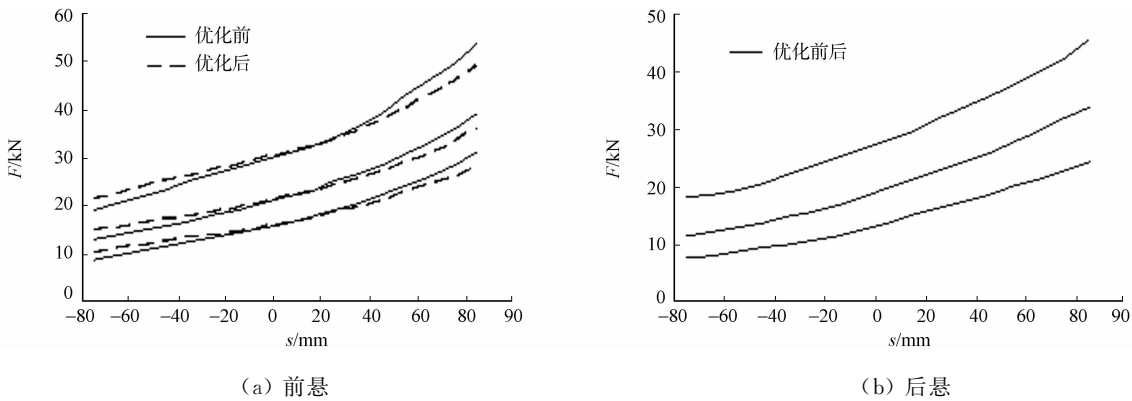


图 6 空气弹簧的特性曲线

Fig. 6 Characteristic curves of air spring

前后悬减震器特性曲线, 如图 7 所示. 对于前后悬减震器阻尼曲线, 保持插值点 X 轴坐标不变, 优化插值点 Y 轴坐标, 再对优化后的 Y 轴坐标重新拟合, 可获得优化前后的阻尼特性差异. 前后悬减震器阻尼曲线 Y 轴坐标分别减小 20% 和增大 20%.

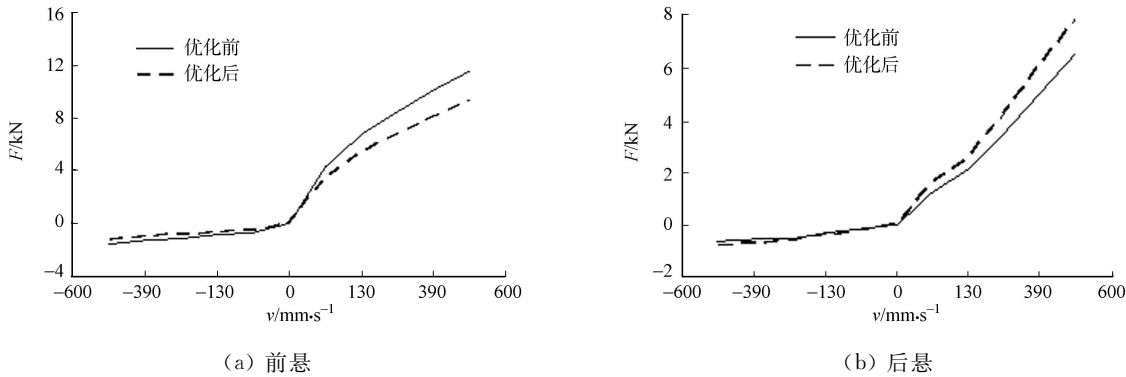


图 7 减震器的特性曲线

Fig. 7 Characteristic curves of damper

当车速为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, 优化前后垂向加速度及其功率谱密度曲线, 如图 8, 9 所示. 图 8, 9 中: a_z 为垂向加速度; $G_a(f)$ 为垂向加速度功率谱密度. 将优化后的属性文件替换到装配中, 针对 C 级随机路面, 分别在 $30, 50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 进行仿真分析, 得到优化前后加速度时域和频域曲线. 优化前后加速度及其功率谱密度曲线趋势基本相同, 优化后曲线峰值明显下降. 当速度为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, a_w 由 0.205 7 降低到 0.175 0, 变化幅度为 15%; L_{aw} 由 106.26 降低到 104.86, 低于国标限值 106. 当速度为 $50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, a_w 由 0.381 降低到 0.342, 变化幅度为 10%; L_{aw} 由 111.61 降低到 110.68.

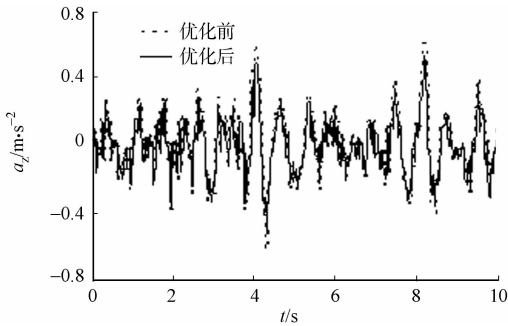


图 8 垂向加速度

Fig. 8 Vertical acceleration

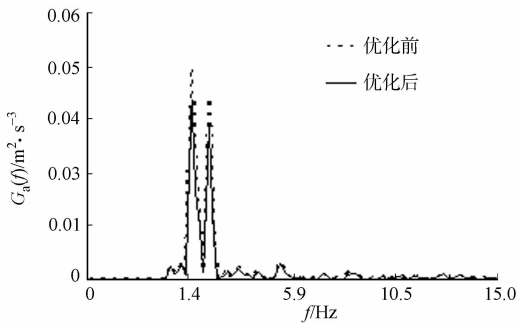


图 9 垂向加速度功率谱密度

Fig. 9 Vertical acceleration power spectral density

4 结 论

在不同工况下,对城市客车随机路面进行仿真分析和参数优化,得到以下 3 点结论.

- 1) 随着速度提高,加权加速度均方根值 a_w 和加权振级 L_{aw} 都有增大趋势;C 级随机路面的 a_w 和 L_{aw} 总体上高于 B 级随机路面.
- 2) 在 C 级路面,车速为 $30\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, L_{aw} 为 106.26,超出平顺性评价限值;车速为 $20\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时,簧下质量与车身发生共振,B 级路面 a_w 略大于 C 级路面, a_w 仍较小,对整车平顺性影响较小.
- 3) 前悬弹簧刚度 K_f ,后悬减震器阻尼 C_r ,前悬减震器阻尼 C_f 及后悬弹簧刚度 K_r 对平顺性影响依次逐渐减小.从优化分析来看,在前悬弹簧刚度和减震器阻尼减小 20%,后悬减震器阻尼增加 20%,后悬弹簧刚度不变条件下,平顺性优化效果最理想,此时,该车在 C 级路面车速为 $30,50\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, a_w 分别降低 15%和 10%.

参考文献:

[1] 中华人民共和国国务院. 国务院关于实施城市公共交通优先发展战略的指导意见[R]. 北京:国务院办公厅,2012: 1-2.

[2] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2007:221-236.

[3] 姚成. 全铝车身在纯电动公交客车车身上的应用研究[J]. 海峡科学,2010(12):91-93.

[4] 杨启耀,周孔亢,李敬东,等. 基于神经网络的空气悬架系统匹配优化[J]. 农业机械学报,2009(4):18-22.

[5] 刘星. 基于线性化方法的空气悬架客车参数匹配技术研究[D]. 镇江:江苏大学,2009:31-42.

[6] WANG Shao-hua, YIN Chun-fang, ZHAO Hua-wei. Matching of suspension damping and air spring based on multi-body dynamic model[J]. IERI Procedia,2012,3:15-21.

[7] 全国汽车标准化技术委员会. GB/T 4970—2009 汽车平顺性试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,2009:1-10.

[8] 全国汽车标准化技术委员会. QC/T 474—2011 客车平顺性评价指标及限值[S]. 北京:中国计划出版社,2011:1-2.

[9] 陈军. MSC. ADAMS 技术与工程分析实例[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:181-191.

[10] 胡延平,李亮,居刚,等. 基于响应曲面法的重卡悬架参数匹配优化[J]. 合肥工业大学学报:自然科学版,2013,9 (36):1053-1057.

[11] 江浩斌,刘强,耿建涛,等. 基于 ADAMS 和响应面法的汽车悬架阻尼优化与试验[J]. 汽车技术,2011(6):6-10.

[12] 李奇,张勇,张成,等. 灵敏度分析的客车车身模块重构与结构轻量化优化设计[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2015,36(4):378-379.

Evaluation and Optimization on the Ride Comfort of
a City Bus With an Air Spring Suspension

PENG Qian^{1,2}, HU Xiao-sheng¹, LIU Jin-wu¹,
HAN Feng-gang^{1,2}, EMMANUEL Matsika³

- (1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Xiamen University of Technology, Xiamen 361024, China;
- 2. Xiamen Vehicle Design and Service Company Limited, Xiamen 361024, China;
- 3. NewRail Centre, Newcastle University, Newcastle NE1 7RU, UK)

Abstract: A multi-body dynamic model of a city bus with an air spring was established using ADAMS/CAR, to investigate the effect of speed and random road on the ride comfort. An orthogonal experiment method of Behnken box was used to conduct sensitivity analysis and optimization on the suspension parameters, hence the ride comfort could be improved. The results show that front spring stiffness, front and rear suspension shock absorber damping have significant effects on ride comfort; besides, the performance of ride comfort rises obviously while front spring stiffness or absorber damping reduces and rear absorber damping increases.

Keywords: city bus; air spring suspension; ride comfort; suspension parameter; ADAMS/CAR