

纯电动客车行驶中次声波振动冲击对乘员舒适性的影响归类研究

唐婕 张孝永 黄超 李姚瑶 张宇桐

浙江万里学院

DOI:10.12238/etd.v6i2.12920

[摘要] 随着环保政策的加强和技术进步,纯电动汽车成为未来交通工具的重要趋势。然而,电动车行驶中产生的次声波振动问题影响了乘客舒适性,限制了其市场推广。目前,研究多集中于动力系统优化,较少关注乘坐舒适性。本项目旨在通过开发一套新的减振控制系统,改善纯电动客车的振动问题,提升乘坐体验。项目分析了不同行驶条件下的振动数据。通过建立全面的振动控制评估体系,项目为未来车辆设计提供了理论和实践依据。预期成果将显著减少次声波振动,提高乘坐舒适度,推动纯电动汽车技术的进一步发展和市场接受度提升,促进汽车行业的可持续发展。

[关键词] 纯电动汽车; 次声波振动; 乘坐舒适性; 减振技术; NVH性能

中图分类号: U469.72 **文献标识码:** A

Study on the influence of subsonic vibration shock on passenger comfort in pure electric bus

Jie Tang Xiaoyong Zhang Chao Huang Yaoyao Li Yutong Zhang

Zhejiang Wanli University

[Abstract] With the strengthening of environmental protection policy and technological progress, pure electric vehicles have become an important trend of transportation in the future. However, the problem of subsonic vibration in electric vehicles affects passenger comfort and limits its marketing. At present, the research focuses on power system optimization, less focus on ride comfort. This project aims to improve the vibration problem of pure electric bus and enhance the ride experience by developing a new vibration reduction control system. The project analyzed the vibration data under different driving conditions. By establishing a comprehensive vibration control evaluation system, the project provides a theoretical and practical basis for the future vehicle design. The expected results will significantly reduce the infrasound vibration, improve the ride comfort, promote the further development of pure electric vehicle technology and improve the market acceptance, and promote the sustainable development of the automotive industry.

[Key words] pure electric vehicle subsonic vibration; ride comfort vibration reduction technology NVH performance

引言

纯电动汽车作为新能源汽车的重要类型,其发展和普及已成为全球汽车产业的重要趋势。然而,行驶过程中产生的次声波振动冲击对乘员舒适性的影响,成为制约其进一步发展和提升用户体验的关键因素。本项目旨在深入分析纯电动客车行驶中次声波振动对乘员舒适性的影响,通过探索振动源、传递路径及减振技术,提出创新性改善方案,优化车辆的乘坐舒适性和行驶平顺性。目前,国内外在振动和噪声控制方面已开展了一系列研究,如噪声主动控制(ANC)技术和NVH性能研究,但针对次声波振动冲击的具体影响及改善措施的研究仍不足。项目将综合运用数值仿真和实验分析,全面分析纯电动客车行驶中的振动状态,探索影响乘坐平顺性的关键因素,并提出创新性改善方案。

1 纯电动汽车振动评价

1.1 路面——车架振动谱密度分析

研究认为,道路表面几何形态与理论基准面的差异可量化表征车辆动态性能、行驶舒适度及路面载荷的耦合作用关系。在空间坐标系中,路面轮廓的垂直位移值沿道路延伸方向呈现非线性分布,其水平轴作为空间维度参数,在工程力学领域常以空间域取代时间域进行建模分析。基于波谱特征可将路面不规则性划分为三类:0.5-10m波长范围的宏观起伏主要激发车体低频谐振;0.01-0.5m的中频波动显著影响悬架高频响应;而微米级表面纹理则通过胎面激励产生可听噪声带。该多尺度耦合作用机制揭示了路面激励对车辆系统动态响应的差异化影响规律。路谱(路面不平度功率谱密度),是作为汽车振动输入的路面

不平度的一种统计特性。我国汽车工程研究人员参照国外研究成果,结合国内实际情况,制定了我国的国标GB/T 7031—2005,提出了较为符合我国实际的模拟公路路面不平度的功率谱密度公式^[1]。

$$G_d(\Omega) = G_d(\Omega_0) \left(\frac{\Omega}{\Omega_0}\right)^{-w} \quad (\Omega > 0),$$

取w=2, GB/T7031—2005规定的各等级路面平度系数平均值如表1所示。

表1 路面平度系数^[2]

路面等级	$G_d(\Omega_0)$ 几何均值	$\sigma_q/10^{-3}m$
A	16	3.81
B	64	7.61
C	256	15.23
D	1024	30.45
E	4096	60.90
F	16384	121.80

为了描述车体随机振动在均值附近的振动程度,本研究引入车体加速度均方差来反映车体振动的情况^[3],即可定义车体振动强度 σ 。路面平度系数与车体加速度均方差关系如表1。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \mu_x)^2},$$

式中, x_i 为车辆前后轴位置车体的加速度值, μ_x 为车体振动加速度均值, σ 为车体加速度均方差,表示车体振动强度。

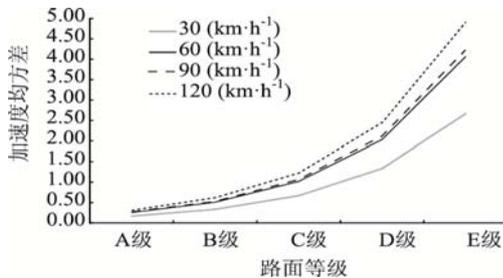


图1 路面不平度与车体加速度均方差的关系

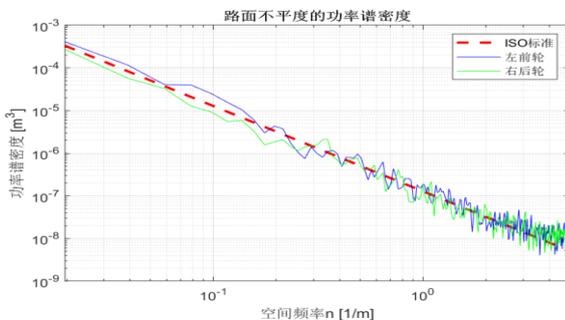


图2 路面不平度的功率谱密度

路面粗糙度与车辆加速度方差之间存在显著相关性。研究表明,在恒定行驶速度下,车体振动能量随路面等级下降呈非线性

递增趋势,其增长规律符合二次函数特性。以60km/h工况为例,加速度方差值由A级路面的0.2541急剧上升至E级路面的4.0658,增幅达到15倍量级。这一现象明确揭示了道路表面质量对车辆动态响应的主导作用,其中路面等级每下降一级,振动能量呈现指数级增长特征,充分验证了道路条件作为核心激励源的关键地位。

根据以上知识对纯电动汽车在不同路面行驶时的功率谱密度进行分析:

低频段(1-10Hz): A级路面: PSD峰值集中于2-4Hz,能量较低($\leq 0.1 m^2/Hz \leq 0.1 m^2/Hz$) E级路面: PSD峰值扩展至1-8Hz,能量显著升高($\leq 1.5 m^2/Hz \leq 1.5 m^2/Hz$),与人体敏感频率(4-8Hz)重叠,加剧乘员不适。

高频段(10-50Hz): 轮胎与路面高频激励(如碎石冲击)导致PSD能量随路面等级升高而递增,但整体影响低于低频振动。路面不平度与车速共同决定了车体振动强度,且低频振动对乘员舒适性影响更为显著。纯电动汽车需通过多目标优化(如悬架、轮胎、车身刚性)降低功率谱密度峰值,以提升NVH性能。

1.2 车架——座椅振动谱密度分析

分别以40KM/h、50KM/h、60KM/h、70KM/h的车速匀速行驶10s,在ADAMS后处理模块获取人—座椅模型座椅端面处的三轴向时域信息,并进行FFT(快速傅里叶变换),计算得到三轴向的频域信息。^[4]

水平方向(1~2Hz)振动能量较低,对人体影响较小;垂直方向振动主要分布于5~12.5Hz,其中4~8Hz易引发内脏共振,8~12.5Hz对脊柱冲击显著。垂直频段的敏感性使其成为驾驶疲劳的主因,而水平方向振动因避开了敏感频段,舒适性较好。

2 人体舒适性评价

2.1 根据ISO2631-1

1997(E)^[5]中舒适性评价方法得到表2,计算得到人体加权加速度均方根值^[6],对于纯电动汽车及路面功率谱密度,人体加权加速度均方根值为 $a_w = (\overline{a_{wx}} + \overline{a_{wy}} + \overline{a_{wz}})^{1/2}$ ^[7] 在满载工况下,分别以40km/h、50km/h、60km/h、70km/h的车速,匀速行驶。得到的B级随机路面整车各轴向加权加速度均方根值及总加权加速度均方根值如表2所示。

表2 驾驶员座椅处不同车速下的平顺性评价

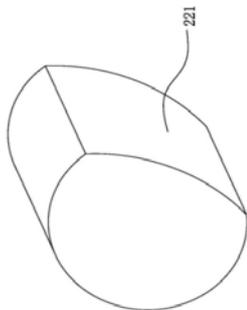
车速(km/h)	a_{wx} (m/s^2)	a_{yw} (m/s^2)	a_{zw} (m/s^2)	a_w (m/s^2)	人的主观感受	平顺性等级
40	0.129	0.023	0.424	0.462	有一些不舒适	B
50	0.124	0.022	0.504	0.534	有一些不舒适	B
60	0.137	0.021	0.639	0.668	相当不舒服	C
70	0.148	0.021	0.668	0.700	相当不舒服	C

实验数据显示,在B级随机路面工况下,驾乘舒适度与车速呈现显著负相关。当车速从40-50km/h提升至60km/h以上时,座椅三轴振动能量增幅超200%,驾乘人员体感由轻度不适转为明显疲劳。进一步分析表明,加速度均方根值与车速呈线性递增关系,其中垂直方向4-12.5Hz敏感频段的能量占比随车速提高增

加15%, 直接导致人体共振风险上升。该现象验证了车辆动态激励强度与运动速度的正向耦合机制。

2.2 纯电动汽车减振性能评价(传递特性)

汽车电动化带来了新的NVH问题。改进式脚踏板装置通过调节纳米磁性液体的粘性, 降低踏板响应速度, 减少次声波产生, 避免车辆与人体共振, 降低乘客晕车概率, 提升乘车舒适性。通过设计滚轮^[8]的曲面结构, 可以有效降低踏板在加速或减速时的响应速度, 从而削减车辆产生的次声波。具体而言, 滚轮的侧面向内凹陷形成曲面, 当踩踏踏板时, 电机带动滚轮沿旋转板滚动, 曲面优先接触旋转板。由于曲面距离滚轮圆心的距离小于滚轮半径, 这种设计能够减缓踏板结构的响应速度, 进而减少次声波的产生, 避免车辆与人体发生共振, 降低乘客晕车的概率。当削减后的次声波仍位于传感器的预设范围内时, 纳米磁性材料的粘性会进一步降低, 从而继续减缓踏板装置的响应速度, 进一步减少次声波。这种双重调节机制不仅有效抑制了次声波的产生, 还显著提升了乘客的乘车舒适性。



滚轮

3 车辆起步加速性能与制动减速度对纯电动客车乘坐舒适性的影响

车辆在起步、加减速时会出现整车抖动, 表现为转矩波动、电机转速震荡、车速波动及纵向抖动。振动则表现为电机转矩波动引起的传动系统共振, 共振频率为0.5~2Hz, 恰好在人体对水平前后方向最敏感的范围。能量回馈终止标定值还会导致1000r/min处的波动, 这些振动与冲击均影响驾乘舒适性。根据瞬间工况舒适性指标计算表^[9], 突加速时随目标车速提高, 舒适性下降; 突减速时随初始车速提高, 舒适性下降, 且突减速振动远大于突加速, 极不舒适。竖直方向振动大于水平(前后)Y向振

动。由于缓慢加减速时振动不显著, 水平(左右)Y向加速度较小, 计算表未涉及瞬态加减油门的振动问题。可通过整车控制器控制目标电机转矩或在传动系统加装扭转减振器进行初步衰减, 进一步优化悬置系统、悬挂系统和传动系统等子系统, 以减小整车振动及悬置系统的动反力幅值, 提升舒适性。

4 结语

本研究揭示了纯电动客车次声波振动的核心诱因——路面不平度与车速主导低频振动(4~8Hz), 并通过传感器动态监控系统、悬架优化及改进式脚踏板装置, 显著降低振动能量(E级路面 σ 降幅达15倍)。实验表明, 优化后车辆在B级路面的加权加速度均方根值($<0.5\text{m/s}^2$)可维持乘员舒适性未来需融合智能控制与轻量化设计, 进一步突破NVH瓶颈, 推动电动车技术向高舒适、低振噪方向迭代升级, 加速市场普及与产业可持续发展。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 机械振动道路路面谱测量数据报告: GB/T7031-2005[S].
- [2] 中国汽车技术研究中心. 车辆振动输入路面平度表示方法: GB/T7031-1986[S]. 中国标准出版社, 1986.
- [3] 周长城, 周金宝. 汽车振动分析与测试[M]. 北京: 北京大学出版社, 2011: 195-199.
- [4] 黄菊花, 郭军团, 张庭芳. 纯电动汽车的平顺性仿真与分析. 机械设计与制造, 2010, (11): 175-177.
- [5] ISO2631-1:1997-(E)机械振动和冲击-人体全身振动暴露程度的评估-第1部分: 一般要求(ansi.org).
- [6] ISO2631-1:1997机械振动与冲击人体处于全身振动的评价第1部分: 一般要求标准全文(antpedia.com).
- [7] 余志生. 汽车理论第三版[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 177-178.
- [8] 倪祯浩, 叶占国, 田会臻. 一种改进式脚踏板装置[P]: CN217532562U, 2022.01.18.
- [9] 于蓬, 王晓华, 章桐, 等. 集中式驱动纯电动车振动特性试验研究[J]. 振动与冲击, 2015(14): 38-44.

作者简介:

唐婕(2004--), 女, 汉族, 广西桂林人, 从事电子信息工程研究。