

文章编号:1006-1355(2018)02-0077-06

# 传动系扭振对MPV车内轰鸣声影响的控制研究

王 昆<sup>1</sup>, 苏 彬<sup>2</sup>, 吉丽超<sup>2</sup>, 李戌斌<sup>1</sup>, 庞崇剑<sup>1</sup>, 吕兆平<sup>1</sup>

(1. 上汽通用五菱汽车有限公司, 广西 柳州 545000;

2. 西门子工业软件(北京)有限公司, 北京 100102)

**摘要:**为解决传动系扭振所导致的MPV车内轰鸣声问题,以某型国产前置后驱MPV为研究对象,建立传动系扭振AMESim仿真模型,利用飞轮端角加速度实测数据与飞轮及曲轴惯量乘积作为系统输入,激励模型,进行强迫响应分析,通过对比关键点扭振仿真结果与试验结果验证模型的有效性,利用此模型研究对象车型传动系扭振特性,分析传动系关键参数对系统的灵敏度,主要通过调整离合器的刚度及阻尼进行传动系扭振的优化。试验工况下的结果表明:低刚度、低阻尼离合器可以有效降低传动系扭振,改善提升车内声振舒适性,对车内轰鸣问题具有较好优化效果,峰值降低多达5.5 dB(A),从而解决了由于传动系扭振引发的NVH问题。

**关键词:**振动与波;传动系;扭振;车内轰鸣声;MPV;NVH

中图分类号:TU112.3;U467.4.93

文献标志码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2018.02.016

## Study on the Control of MPV Interior Booming Induced by Torsional Vibration of Driveline Systems

WANG Kun<sup>1</sup>, SU Bin<sup>2</sup>, JI Lichao<sup>2</sup>, LI Shubin<sup>1</sup>,  
PANG Chongjian<sup>1</sup>, LV Zhaoping<sup>1</sup>

(1. SAIC-GM-Wuling Automobile Co. Ltd., Liuzhou 545000, Guangxi China;

2. Siemens Industry Software (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100102, China)

**Abstract:** The MPV interior booming caused by torsional vibration of drivelines is studied. With a domestic FR-MPV as an object, the AMESim simulation model for torsional vibration analysis of the driveline is built. With the product of the measured flywheel angular acceleration and the crankshaft inertia as the input, the forced vibration response is analyzed. The model is verified by comparing simulation and test results of the torsional vibration at some key points. Then, the model is used to study the characteristics of the torsional vibration of the driveline and analyze the sensitivity of some key parameters. The driveline torsional vibration is optimized by adjusting clutch's stiffness and damping. The results show that decreasing the clutch stiffness and damping can effectively reduce the torsional vibration of the driveline, reduce the internal booming and improve the interior acoustic comfort. By using the new clutch with low stiffness and damping, the peak value of the interior booming is reduced by 5.5 dB(A). Thus, the NVH problem caused by driveline torsional vibration is solved.

**Keywords:** vibration and wave; driveline system; torsional vibration; interior booming; MPV; NVH

MPV(Multi-Purpose Vehicles)既有轿车的舒适性又有客车的宽敞性,同时又具有排量小、成本低、功能多、适用于家庭用户等优点,被广大消费者尤其是中国消费者所认可接受<sup>[1-2]</sup>。自2013年以来,在我国汽车市场MPV需求量急剧上涨的同时,消费者在低噪声与高舒适性方面也对MPV提出了更高的要求,而MPV较之于轿车,体积、重量都相对较大,

所以MPV的车内噪声控制一直是各学者研究的热点,也是企业需要解决的核心技术难题之一。车内噪声品质直接影响乘员乘坐汽车时的噪声舒适性,同时也决定了汽车产品的档次高低,其不仅是顾客评价和购买汽车时必须考虑的一个非常重要的因素,同时也是汽车企业竞争力的体现。

国产MPV的动力传动系布置形式大多采用前置后驱,主要由发动机、离合器、变速器、传动轴、后桥、半轴及车轮等组成,这些部件共同组成了一个扭转振动系统,整个传动系可以看作是一个多质量的弹性系统,具有多个固有频率。车辆行驶过程中,因

收稿日期:2017-07-05

作者简介:王昆(1984-),男,河南省沈丘市人,工程师,硕士,主要研究方向为汽车噪声与振动控制。

E-mail: 646333407@qq.com

受发动机输出扭矩波动、传动部件运动的冲击、行驶阻力等的作用,动力传动系会产生扭转振动响应,当外界激励频率与固有频率吻合时,甚至还会激发传动系的扭转共振,强烈的扭转振动会通过车架传递或者直接作用到车身,激发车内振动与噪声<sup>[1]</sup>,导致较差的车内声振舒适性。

目前各学者在传动系扭振问题上已经有较多的研究,刘辉等分析了影响MPV整车噪声的因素,提出了通过传动轴和后桥的配平衡方法来降低传动系噪声,通过试验对比分析验证了该方法降噪的有效性<sup>[4]</sup>;曾锐对某微型客车动力传动系的扭振特性及其对车辆振动噪声的影响进行了研究<sup>[5]</sup>;康强等为解决车内轰鸣声问题,建立了该车传动系统扭振当量模型,通过传动系统扭振模态计算得到其模态信息,使用发动机激励力驱动当量模型进行扭振强迫响应分析与扭振测试,验证了理论模型的有效性,明确了引起该车轰鸣声主要原因是传动系统扭振<sup>[6]</sup>;李玲等认为某非承载式SUV在1700 r/min出现的噪声来源为传动系扭振,通过采取加装扭转减振器(TVD)的措施,有效地抑制了传动系扭振,改善了车内轰鸣声<sup>[7]</sup>;王东等首先分析了传动系扭振引发车内噪声的机理,然后建立了传动系扭振理论当量模型并进行自由振动计算,验证了其有效性,基于此模型研究了对象车型传动系扭振特性,实验表明通过减小经后桥及后悬架向车身传递的扭振激励可以有效改善低转速工况下车内轰鸣声问题<sup>[8]</sup>;陈志勇和Zu等对装有双质量飞轮的传动系在发动机启停工况下的扭振特性进行了研究,设计了一套阻尼可调的半主动控制式的磁流变液双质量飞轮装置,有效地降低了启停工况下最大扭矩和相对转角<sup>[9-10]</sup>;王媛文等采用了传递路径分析和模态实验相结合的方法,研究了车内轰鸣声的激励源,提出了一系列通过降低扭转交变力矩的方式改善车内噪声品质的措施并进行了实验验证<sup>[11]</sup>;Liu等针对汽车加速过程中出现的噪声问题,设计了离合器3自由度扭振模型,研究了多级离合器阻尼器和齿轮侧隙的非线性特性,基于分析结果提出了一种离合器动力学的优化方法,并进行了仿真和实验验证<sup>[12]</sup>;石月奎等针对MPV车型在高速行驶工况下出现的轰鸣声问题,对不同的噪声来源采取不同的解决方法,提高了乘坐舒适性<sup>[13]</sup>;李文武建立了样车动力传动系统的AMESim 1D仿真模型并验证了其有效性,基于此模型,分析了传动轴加入惯量盘后对传动系扭振模态和扭振响应的影响<sup>[14]</sup>。通过改进车身结构与在传动轴输入端加装扭转减振器两种降噪途径来降低车内轰鸣噪声。试验结果表明这两种方式均有效降低了试验工况下的车内轰鸣

噪声;吴昱东等建立了某型国产前置后驱新型微型客车传动系扭振分析模型,得到传动系扭振特性,通过测试结果验证模型的正确性,分析了关键部件扭转刚度对传动系扭振模态的灵敏度,并提出了通过适当降低驱动半轴扭转刚度实现降低微车传动系扭振的方法<sup>[15]</sup>。

本文为解决国产某型MPV设计研发过程中3档全油门加速(WOT)工况下存在的车内轰鸣声问题,首先通过主观判断和客观测试确定轰鸣声来源为传动系扭振,然后应用AMESim软件建立传动系1D仿真模型,利用飞轮端角加速度(实测数据)与飞轮及曲轴惯量乘积作为系统输入,驱动模型进行强迫响应分析,将关键点扭振仿真结果与试验结果进行对比从而验证模型有效性,在对标结果良好的模型基础上,对传动系关键参数进行灵敏度分析,最终通过调整离合器的刚度及阻尼进行传动系扭振的优化。

## 1 问题描述及原因

该型MPV动力传动系统采用前置后驱形式,发动机为1.5 L自然吸气汽油发动机,5挡手动变速器。在3档WOT工况时,车内乘员位置在多个转速下均存在轰鸣声,且主观感觉存在较为明显的压耳感,有从前排至后排逐渐升高的趋势。采用LMS Test. Lab软件对车内噪声数据进行采集,通过客观测试得到不同乘员位置在该工况下的噪声声压级曲线(总声压级及2阶、4阶和6阶噪声),如图1所示。

3档WOT工况时,在低转速段内(1 000 r/min~3 000 r/min范围内)该车存在3个主要轰鸣点,分别在转速为1 000 r/min、1 650 r/min和2 350 r/min附近。在1 000 r/min附近,3排座椅位置噪声均以发动机2阶激励为主要贡献;在1 650 r/min附近,中排与后排噪声以发动机2阶激励为主要贡献,前排在发动机2阶和4阶激励下噪声均较高;在2 350 r/min附近,中排噪声较为突出,中排及后排在该轰鸣点以发动机2阶激励为主要贡献。

根据经验,传动系扭转振动对后驱车辆车内振动噪声存在较大影响,初步怀疑车内轰鸣声的主要贡献可能是传动系扭振,所以对样车进行传动系扭振测试。图2为加速工况下传动系扭振测试结果,可以看出:

(1) 噪声峰值处对应的转速下,后桥输入轴振动同样表现为峰值特性,轰鸣问题与后桥输入轴振动强相关,说明传动系对其有贡献;

(2) 后桥输入轴扭角量级在轰鸣处均高于 $0.2^\circ$ ,存在由于扭振激励引起车内轰鸣的可能。

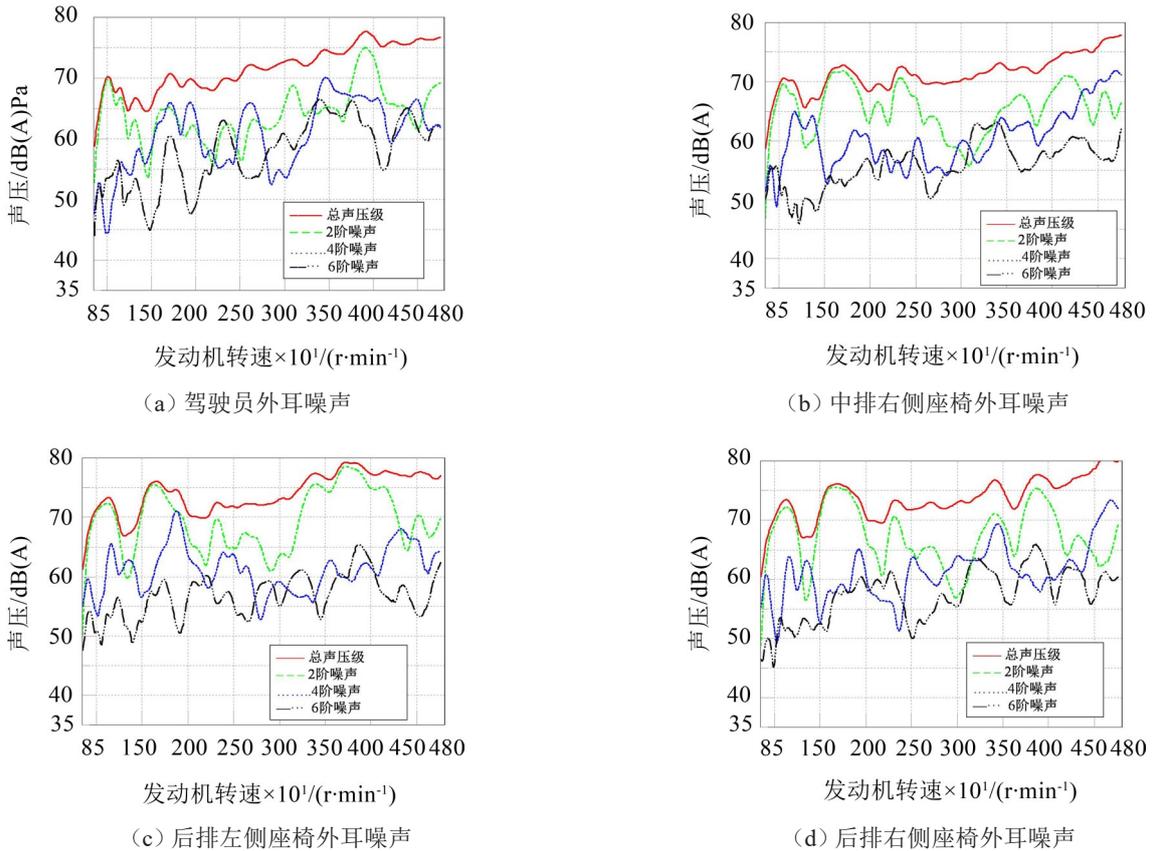


图1 3档WOT工况时噪声

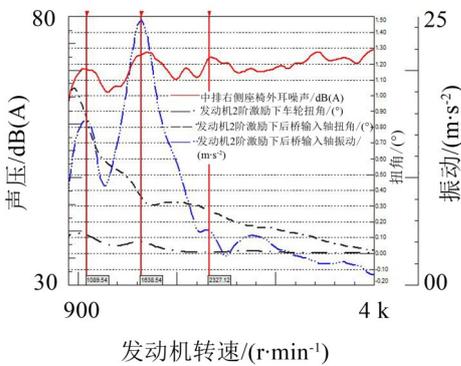


图2 3档WOT工况下传动系扭振测试结果

所以综上可基本推断车内轰鸣声的主要贡献是传动系扭振。

## 2 传动系扭振特性分析

通过噪声测试和传动系扭振测试,确定对象车型3档WOT工况下的轰鸣声问题主要由传动系扭振引致,为有效分析传动系的扭振特性,同时为改进措施提供依据,需要利用AMESim软件对传动系进行仿真建模分析,通过强迫响应分析验证仿真模型的准确性和有效性。一般情况下离合器参数对传动系扭振具有较大影响,所以需要研究分析离合器关键参数对传动系扭振的灵敏度。

### 2.1 传动系扭振模型建立

通过系统强迫响应分析可以计算得到传动系在发动机扭矩波动激励作用下的响应情况,并对传动系的整改及分析提供理论依据。考虑到阻尼结构的存在对于系统的响应幅值有较大影响,因此,在进行强迫响应分析时,须充分考虑各部件阻尼特性对计算结果的影响,式(1)为考虑阻尼影响的强迫振动力学模型。

$$[I]\{\ddot{\theta}\} + [C]\{\dot{\theta}\} + [K]\{\theta\} = \{M\} \quad (1)$$

式中 $[I]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ 、 $\{M\}$ 、 $\{\theta\}$ 分别为转动惯量、扭转阻尼、扭转刚度、激励力矩、角位移矩阵。

基于此力学模型,利用AMESim建立完整的传动系统仿真模型,主要由发动机、变速器、传动轴、主减速器、差速器等部分组成。

### 2.2 传动系扭振模型验证

为了进行强迫振动计算,就必须获取系统的激励扭矩从而驱动模型。车辆在行驶过程中,整个传动系存在发动机激励、齿轮间隙的作用、路面激励等多种激励,在针对传动系的扭振分析中,发动机激励是最主要的形式,因此,本文忽略其它形式的激励,仅将发动机激励扭矩作为系统输入。发动机激励扭矩可通过式(2)计算得到,将该激励扭矩输入到LMS Imagine. Lab环境以激励仿真模型,并且对比

飞轮端及后桥输入轴侧2阶振动。

$$TICE = J \cdot \ddot{n} \quad (2)$$

式中： $J$ 为飞轮侧上游转动惯量， $\ddot{n}$ 为飞轮端角加速度的试验数据。

如图3所示，飞轮端2阶转速波动仿真与测试结果重合度较好，后桥主减输入轴2阶转速的仿真与测试结果虽有差别但变化趋势一致，特别是在本文所关注的低转速范围内重合较好，同时总体误差也在可接受的范围之内，从而说明仿真模型对标结果良好，可以用于传动系扭振问题的研究。

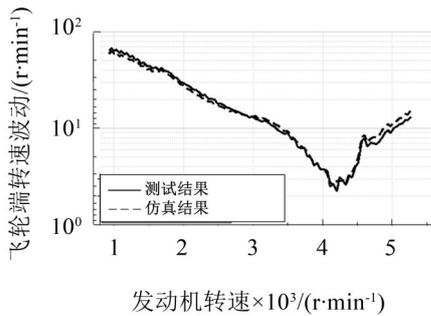
### 2.3 离合器扭转刚度及阻尼的灵敏度分析

以往的研究分析表明，离合器参数对传动系扭振具有较大影响，合理调整优化之后在一定程度上可以削减传动系的低频扭振，因此基于对标结果良

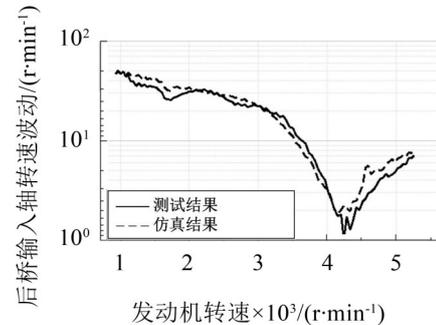
好的模型，通过仿真分析离合器刚度和阻尼对后桥输入轴扭振的影响。

图4为离合器刚度分别在原始状态及增大和减少各30%时对变速器输入轴扭振的影响分析图，从图4(a)可以看出，更改离合器刚度对于扭振没有较为明显的影响，主要是由于摩擦环节占据主要贡献。当在仿真中取消摩擦环节时，降低离合器刚度在低转速存在优化效果，如图4(b)所示。

两条来自其他项目的摩擦力矩曲线如图5所示。最大值分别为10 Nm(Nominal)与5 Nm(Best case)，而SGMW的基础数据最大值为26 Nm(Baseline)。图6为离合器阻尼特性对后桥输入轴扭振的影响分析图，可以看出，阻尼特性对中间转速区间存在较大影响，当降低阻尼值时后桥输入轴扭振得到明显改善。

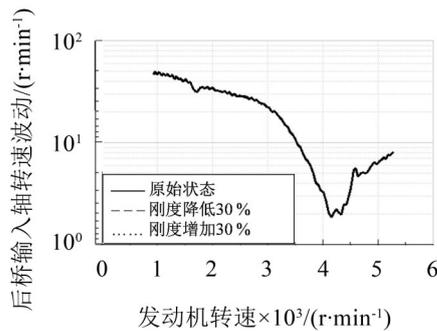


(a) 飞轮端2阶转速波动仿真与测试结果

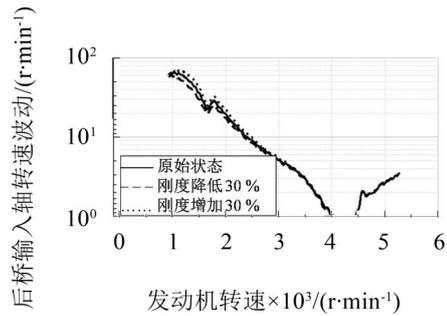


(b) 后桥输入轴2阶转速波动仿真与测试结果

图3 三档WOT工况下仿真与测试结果对比



(a) 有摩擦环节



(b) 无摩擦环节

图4 离合器刚度对后桥输入轴扭振的影响分析

## 3 优化设计与验证

通过离合器的扭转刚度及阻尼对传动系扭振的灵敏度分析，发现降低离合器刚度和阻尼可以有效地降低传动系扭振，因此采用具有低刚度、低阻尼的新离合器片，其参数如表1所示。

仿真模型中应用新的离合器扭转刚度和阻尼参数，同样使用飞轮端角加速度(实测数据)与飞轮及曲轴惯量乘积作为系统输入，仿真结果如图7(a)所示，后桥扭振在1 500 r/min~4 000 r/min转速范围内

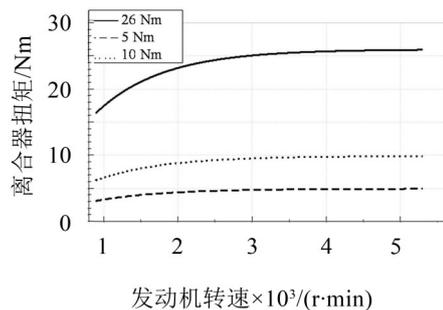


图5 不同摩擦力矩曲线

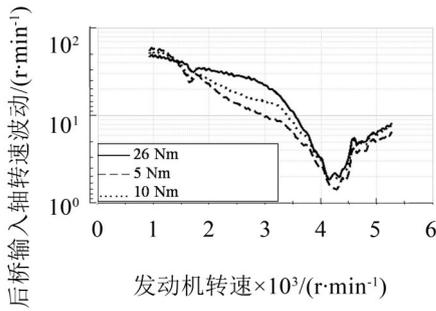
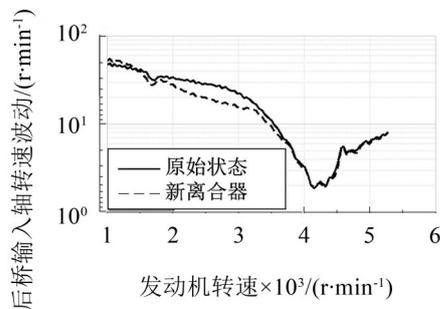


图6 离合器阻尼对后桥输入轴扭振的影响分析

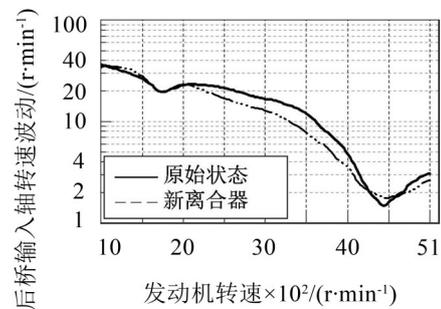
有明显优化效果。

在仿真分析结果的基础上,使用新的离合器样件进行测试试验,图7(b)为新型离合器使用后与原状态下后桥输入轴扭振结果对比,试验结果与仿真反映的趋势一致,再次说明了仿真模型的有效性。

图8为使用新离合器后3档WOT工况下的前、

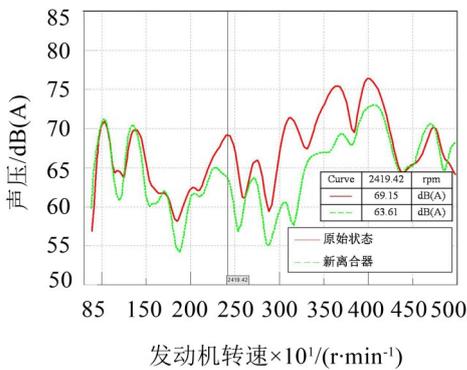


(a) 仿真结果

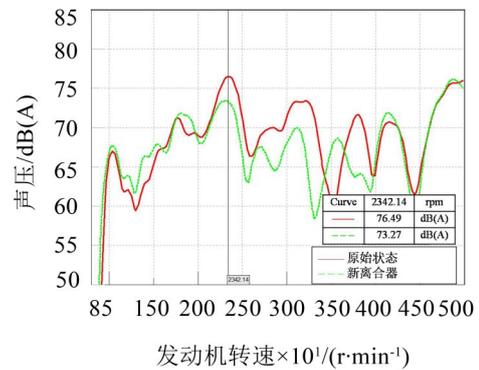


(b) 测试结果

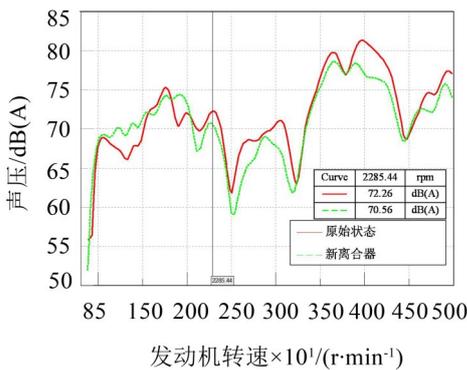
图7 新离合器使用前后仿真与测试结果



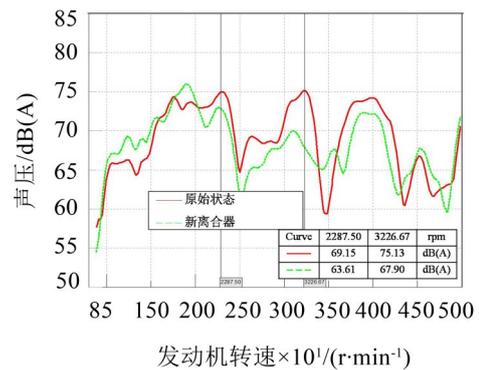
(a) 驾驶员外耳噪声



(b) 中排右侧座椅外耳噪声



(c) 后排左侧座椅外耳噪声



(d) 后排右侧座椅外耳噪声

图8 基于发动机2阶振动的噪声曲线

表1 新离合器片参数表

参数	原离合器片	新离合器片
驱动侧阻尼	18 Nm~26 Nm	8.58 Nm
驱动侧扭转刚度	12.9 Nm/degree	10.56 Nm/degree

中、后排基于发动机2阶振动的噪声曲线,新离合器对车内3排测点位置的噪声均存在改进效果,尤其是前排噪声改善最为明显,在转速2 419 r/min工况下2阶噪声降低多达5.5 dB(A)。

## 4 结语

(1) 通过主观评价和客观测试确定了国产某型MPV在3档WOT工况下车内轰鸣声主要是由传动系扭振引起,为此建立了传动系的AMESim 1D仿真模型,利用飞轮端角加速度(实测数据)与飞轮及曲

轴惯量乘积作为系统输入,驱动模型进行强迫响应分析,通过关键点扭振仿真结果与试验结果对比从而验证模型有效性;

(2)研究了离合器刚度和阻尼对传动系扭振的灵敏度,发现阻尼特性对中间转速区间存在较大影响,当降低阻尼值时后桥输入轴扭振得到明显改善;

(3)提出了通过降低离合器刚度和阻尼从而降低传动系扭振的方法,使用新型离合器后在后桥输入轴的扭振试验结果与仿真结果反映的趋势一致,再次说明仿真模型的有效性。使用新离合器样件后对整车进行噪声测试,发现新离合器对车内3排测点的噪声均存在改进效果,尤其是前排噪声改善最为明显,峰值处降低多达5.5 dB(A)。

#### 参考文献:

- [1] 徐洪飞. 中国微车市场现状及发展方向[J]. **商用汽车**, 2014(6): 10-13.
- [2] 周鹏, 杜金玲. CDV车型在中国的发展动向[J]. **汽车纵横**, 2014(5): 96-99.
- [3] SHIN S H, IH J G, HASHIMOTO T, et al. Sound quality evaluation of the booming sensation for passenger cars[J]. **Applied Acoustics**, 2009, 70(2): 309-320.
- [4] 刘辉, 卢强. 后驱型MPV传动系降噪试验研究[J]. **汽车科技**, 2007(02): 48-51.
- [5] 曾锐. 汽车动力传动系扭振分析及其对车辆振动影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.

- [6] 康强, 吴昱东, 邓江华, 等. 某前置后驱乘用车传动系扭振模态理论计算及试验测试[J]. **汽车技术**, 2015(1): 40-43.
- [7] 李玲, 田率, 康菲, 等. 某非承载式SUV车内噪声问题的分析[J]. **噪声与振动控制**, 2015, 35(4): 85-88.
- [8] 王东, 闫兵, 王东亮, 等. 汽车传动系扭振引起的车内轰鸣声控制方法[J]. **噪声与振动控制**, 2015, 35(2): 73-76.
- [9] 陈志勇, 毛阳, 史文库, 等. 基于双质量飞轮的启停工况传动系扭振研究[J]. **北京理工大学学报**, 2016(1): 42-47.
- [10] ZU Q, CHEN Z, SHI W, et al. Torsional vibration semiactive control of drivetrain based on magnetorheological fluid dual mass flywheel[J]. **Mathematical Problems in Engineering**, 2015, 2015: 1-17.
- [11] 王媛文, 董大伟, 鲁志文, 等. 传动系扭振引起的车内轰鸣声实验[J]. **振动、测试与诊断**, 2016(1): 160-168.
- [12] LIU X, SHANG GUAN W, JING X, et al. Vibration isolation analysis of clutches based on trouble shooting of vehicle accelerating noise[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2016, 382: 84-99.
- [13] 石月奎, 徐丽梅, 张志红, 等. 某前置后驱车型车内噪声的改善研究[J]. **汽车科技**, 2016(1): 16-21.
- [14] 李文武. 某MPV车内轰鸣噪声试验分析与降噪[D]. 镇江: 江苏大学, 2016.
- [15] 吴昱东, 李人宪, 丁渭平, 等. 基于半轴扭转刚度调校的新型微客轰鸣声治理[J]. **噪声与振动控制**, 2016, 36(1): 70-74.

(上接第58页)

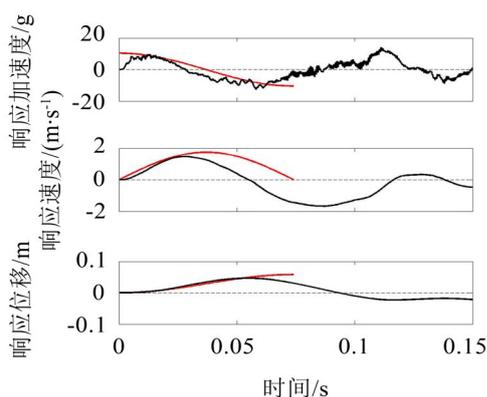


图12 工况3设计时程曲线与甲板安装环境对比  
实际安装位置处的冲击环境的有效性及其必要性。

## 4 结语

本文基于离散动力学理论,阐述了柔性甲板模拟器的设计方法。并将其应用到某型设备的冲击实验中,用于模拟作用在船底的水下爆炸产生的冲击

能量经船体结构向上层甲板的传递。实验结果表明:在冲击载荷直接作用的船底部分,加速度响应较大,而冲击脉宽很短;经柔性甲板模拟器传递后,脉宽增大,而加速度响应大大减小。

#### 参考文献:

- [1] 江国和, 沈荣瀛, 华宏星, 等. 舰船机械设备冲击隔离技术研究进展[J]. **船舶力学**, 2006, 10(1): 135-144.
- [2] 赵德博, 易伟建. 钢筋混凝土梁抗冲击性能和设计方法研究[J]. **振动与冲击**, 2015, 34(11): 1139-145.
- [3] 高德, 卢富德. 聚乙烯缓冲材料多自由度跌落包装系统优化设计[J]. **振动与冲击**, 2012, 31(3): 69-72.
- [4] 张健, 尹群, 孙彦杰. 一种新型舰船防护板的抗水下爆炸冲击性能研究[J]. **舰船科学技术**, 2007, 29(4): 35-38.
- [5] WANG ZHI GANG, FENG QI, WANG YU. Dynamic modeling and response analysis to impact of elastic floating raft system[J]. **Journal of Ship Mechanics**, 2005, 9(6): 113-125.
- [6] GJB1060.1-1991 舰船环境条件要求-机械环境[S]. 1991.