

文章编号:1006-1355(2015)06-0095-05

惯量盘在治理扭振引致车内轰鸣声中的应用

李洪亮¹, 邓江华¹, 向伟², 杨明亮², 吴昱东²

(1. 中国汽车技术研究中心 汽车工程研究院, 天津 300162;
2. 西南交通大学 汽车工程研究所, 成都 610031)

摘要:针对某前置后驱型微型车传动系扭振引致的车内低频轰鸣声问题,建立扭振当量计算模型,对传动系的扭振特性进行分析。基于该模型研究微型车传动系抗扭振设计中,传统扭振减振器(TVD)转动惯量与扭转刚度对传动系扭振响应的影响规律。并基于对传统TVD的功能、结构分析,找到使用金属惯量盘替代TVD的可行性依据,并实施惯量盘设计、试制,开展针对性的整车试验。试验结果表明,安装适当的金属惯量盘可以有效减小微型车传动系扭振响应,在重点关注的1 500 r/min附近降低车内噪声约9 dB(A),有效提升整车NVH性能。

关键词:声学;微型车;传动系;扭振;惯量盘

中图分类号:TB533⁺2

文献标识码:A

DOI编码:10.3969/j.issn.1006-1355.2015.06.021

Application of Inertial Plate to Control of Booming Noise Caused By Torsional Vibration

LI Hong-liang¹, DENG Jiang-hua¹, XIANG Wei²,
YANG Ming-liang², WU Yu-dong²

(1. Automotive Engineering Research Institute, China Automotive Technology & Research Center, Tianjin 300162, China;
2. Institute of Automotive Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The interior low-frequency booming noise of an FR mini-car induced by driveline's torsional vibration was studied. The equivalent computational model for torsional vibration analysis was established. And the torsional vibration characteristics of the driveline were analyzed. Based on the model, the influence of the moment of inertia and the torsional stiffness of the traditional vibration damper (TVD) on the torsional vibration response of the driveline was analyzed. Based on the functional and structural analyses of the TVD, the feasibility for replacing the TVD by the metallic inertial plate in the mini-car's driveline was verified. Then, the inertial plate was designed and prepared and the entire mini-car test was carried out. The results show that properly installed metallic inertial plate can effectively reduce the torsional vibration response of the mini-car's driveline. The interior noise of the mini-car at about 1 500 r/min speed of the engine can be reduced by 9 dB (A). And the NVH performance of the entire vehicle is greatly improved.

Key words: acoustics; minivan; driveline; torsional vibration; inertial plate

前置后驱型(FR)微型车动力传动系统一般由发动机、离合器、变速器、传动轴、后桥、半轴及车轮等组成,这些部件都具有一定的转动惯量及扭转刚度,共同形成了一个扭转振动系统,有着自身固有的动态特性。车辆在行驶过程中,受发动机输出转矩

波动、传动部件之间的冲击力、行驶阻力等的作用,动力传动系统易产生扭转振动,甚至出现扭转共振现象。强烈的扭振会引起后桥发生俯仰和侧倾,进而导致主减速器安装点产生很大的动态力。根据驱动桥及悬架的不同安装形式,这些力通过副车架或者直接作用到车身上,激励车身结构振动并辐射噪声,频率一般分布在40 Hz~120 Hz之间而造成“轰鸣”的主观感受^[1-3]。

安装扭转减振器(Torsional Vibration Damper, TVD)是治理汽车传动系扭振的常用措施。典型的TVD结构如图1所示,其主要由内外钢圈及橡胶三

收稿日期:2015-06-02

基金项目:天津市重点项目(4TXSYJC00457)

作者简介:李洪亮(1974-),男,河南人,研究员级高级工程师。主要研究方向:汽车NVH控制技术。

E-mail: lihongliang@catarc.ac.cn

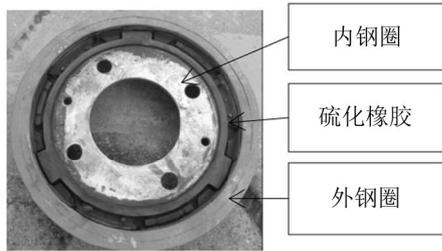


图1 TVD结构外形

部分组成,工艺制造上主要通过橡胶硫化的方法将内外钢圈连接在一起。

安装TV D实质是将适当的附加惯量(主要由内外钢圈提供)、刚度及阻尼(主要由橡胶材料提供)引入传动系统中,从而改变系统的固有动态特性^[4],达到降低扭振及其引致的车内轰鸣声的效果^[5,6]。由于目前汽车传动系用TV D的弹性部分几乎均由橡胶材料制成,受汽车传动系恶劣工作环境影响,橡胶材料容易老化变性,致使TV D刚度及阻尼特性难以保持,往往导致传动系抗扭振性能降低,在长期使用中引起更严重的整车NVH问题。

现有对于TV D性能方面的研究主要集中在结构及耐久性能的角度,缺乏对其替代措施的发掘。因此,找寻替代TV D以克服上述缺陷的扭振治理措施具有现实的工程应用价值。金属惯量盘以其加工方便且性能参数易于保证的优势成为潜在的选择对象。对此,这里依托某FR微型车传动系统进行了TV D作用机理研究,对其附加惯量及刚度参数进行了灵敏度分析,以获得使用惯量盘替代TV D的可行性依据,在做了抗扭性能仿真分析的基础上,设计并试制了转动惯量为 $0.018 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ 的惯量盘,通过整车NVH性能试验,验证了惯量盘对于改善扭振引致整车轰鸣问题的有效性。

1 传动系扭振分析

1.1 当量模型建立

对传动系扭振特性的研究,多采用分布质量或集中质量模型,分布质量模型计算精度高但更耗时^[7]。采用多自由度的集中质量模型,即根据简化前后系统的动能和势能保持不变的原则,将传动系简化为由无弹性的惯性盘和无质量的弹性轴组成的当量系统,建立相应的力学模型和数学模型^[8]。与其他模型相比,当量模型具有参数关系清楚、计算简单的优点。

基于所研究的微型车传动系统基本结构及参数,建立从发动机曲轴到车轮的动力传动系扭振当量模型。根据传动系实际结构特点,参照文献[9]中的轴段划分及当量等效原则,将整个系统等效为一

定自由度的扭转振动模型。图2所示为三档对应的动力传动系扭振当量模型示意图。

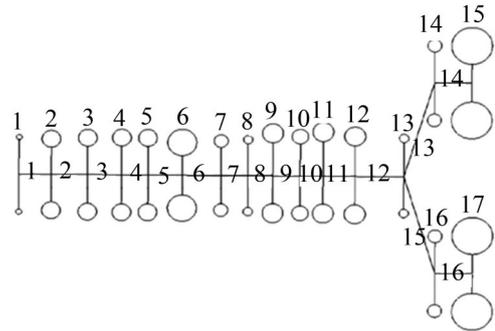


图2 动力传动系扭振当量模型(变速器位于三档)

表1给出变速器位于三档时整个动力传动系统的划分方法及各部分的等效转动惯量和扭转刚度。限于篇幅,其他档位模型及数据不再赘述。

表1 传动系各部件参数(变速器位于三档)

| 编号 | 转动惯量部件名称 | 转动惯量/ $\text{kg}\cdot\text{mm}^2$ | 扭转刚度/ Nm/rad |
|----|---------------------|--------------------------------------|--------------------------|
| 1 | 发动机自由端 | 141 | 20 883.49 |
| 2 | 曲轴第一曲拐 | 5 386 | 99 891.12 |
| 3 | 曲轴第二曲拐 | 5 512 | 99 891.12 |
| 4 | 曲轴第三曲拐 | 5 512 | 99 891.12 |
| 5 | 曲轴第四曲拐 | 5 421 | 45 362.60 |
| 6 | 飞轮+离合器主动端 | 85 200 | 2 109.55 |
| 7 | 离合器从动盘+变速器输入轴前段 | 1 171 | 3 155.81 |
| 8 | 变速器输入轴后段+常啮合齿轮对 | 551 | 89 160.87 |
| 9 | 各档主从动齿轮+变速器输出轴前段 | 2 332 | 5 340.25 |
| 10 | 变速器输出轴后段+第一传动轴前半段 | 1 592 | 15 831.01 |
| 11 | 第一传动轴后半段+第二传动轴前半段 | 2 898 | 28 871.35 |
| 12 | 第二传动轴后半段+主减速器输入轴 | 2 722 | 1 919.67 |
| 13 | 主减速器齿轮+差速器+半轴前半段 | 547 | 278.06 |
| 14 | 左半轴一半+左车轮一半 | 11 722 | 331.63 |
| 15 | 左车轮一半+车身平移质量的当量转动惯量 | 1 554 162 | 303.06 |
| 16 | 右半轴一半+右车轮一半 | 11 722 | 331.63 |
| 17 | 右车轮一半+车身平移质量的当量转动惯量 | 1 554 162 | — |

基于上述当量模型,进行自由振动计算,获取该车传动系统各档位的模态频率,如表2所示。

表2 传动系扭振模态

| 变速器 档位 | 模态频率/Hz | | | | | |
|-----------|---------|-----|------|------|------|-------|
| | 第1阶 | 第2阶 | 第3阶 | 第4阶 | 第5阶 | 第6阶 |
| 1档 | 1.6 | 3.3 | 33.9 | 36.6 | 68.8 | 151.9 |
| 2档 | 1.6 | 5.4 | 32.5 | 36.9 | 61.8 | 178.9 |
| 3档 | 1.6 | 6.5 | 30.3 | 36.9 | 54.2 | 203.5 |
| 4档 | 1.6 | 8.3 | 28.2 | 36.9 | 53.8 | 210.9 |
| 5档 | 1.6 | 8.9 | 26.7 | 36.9 | 52.5 | 211.1 |

1.2 当量模型校验

为验证传动系扭振当量模型及其算法的有效性,在整车半消声室转鼓试验台上,针对该前置后驱车进行了传动系扭振及整车噪声同步测试,分别获取了主观感受较为严重的3、4、5档,全油门加速工况下的相关数据。试验环境及测点布置情况如图3—图5所示。



图3 半消声室整车转鼓试验



图4 磁电扭振传感器布置位置



图5 声压传感器布置位置

扭振测试采用磁电式传感器,测量飞轮启动齿圈、传动轴输入端和主减速器输入端的扭转角速度随发动机转速的变化,并记录该车3、4、5档全油门加速时主减速输入端2阶扭振角速度峰值的频率,如图6所示,与模态计算分析结果进行对比。

从表3的对比结果可以看出,各档位下传动系模态计算分析结果与测试分析结果(第4阶与第5阶扭振模态)相对误差较小,最大不超过5%。因此,所建立的传动系扭振当量计算模型较为准确,可用于该车传动系扭振问题的分析与诊断。

1.3 扭振特性分析

从图6及表3可以看出,当汽车行驶时转速位于系统4、5阶模态频率所对应的发动机转速1 100 r/min、1 560 r/min附近时,传动系出现扭转共振现象,同时整车噪声测试结果也表明,在该转速下第三排中间乘客测点出现较大的噪声幅值,因此可以判定该噪声主要由传动系扭振引起,对于该噪声的治理可以通过扭振的治理进行。

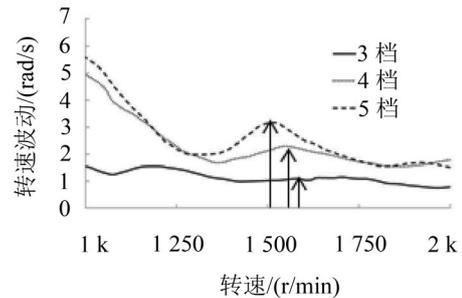


图6 扭振测试情况

表3 传动系模态计算与测试结果对比

| | 第4阶扭振模态/Hz | | | 第5阶扭振模态/Hz | | |
|----|------------|------|-------|------------|-------|-------|
| | 计算值 | 测试值 | 相对误差 | 计算值 | 测试值 | 相对误差 |
| 3档 | 36.9 | 38.5 | 4.2 % | 54.2 | 56.3 | 3.7 % |
| 4档 | 36.9 | 37.3 | 1.1 % | 52.8 | 50.47 | 4.6 % |
| 5档 | 36.9 | 37.5 | 1.6 % | 52.5 | 52.4 | 0.2 % |

2 TVD分析与替代可行性依据

TVD是常用的汽车传动系抗扭振机构,这里从其传动系扭振响应的影响规律入手,研究其功能与结构关系,并以此提出扬长避短的替代解决方案。

由于该微型车传动系存在37 Hz及53 Hz附近的扭振模态,尤其是53 Hz的扭振模态,对传动系扭振响应及微型车车内噪声影响极大,因此初步考虑在微型车主减速器输入端安装频率为53 Hz的TVD对该车传动系扭振进行抑制。使用强迫振动当量模型仿真获取了TVD转动惯量与传动系扭振强迫响应的变化规律,如图7所示。TVD的转动惯量对传动系扭振响应影响十分显著,随着转动惯量的增长,传动系扭振响应峰值向低频偏移,但低频处扭振响应峰值的幅值明显升高。当TVD转动惯量增加至 $0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$,在发动机转速高于1 000 r/min的范围内,传动系扭振响应整体都得到了降低。

图8所示是仿真获取的在保持TVD转动惯量($0.03 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)不变时,随TVD扭转刚度变化,传动系扭振响应的变化规律。从图中可以看出,当TVD转动惯量不变时,扭转刚度的变化对TVD抗扭振效果影响较小。

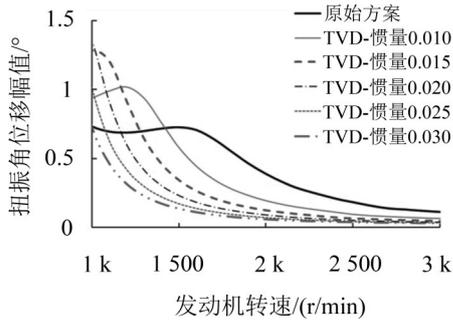


图7 扭转减振器转动惯量对传动系扭振响应的影响

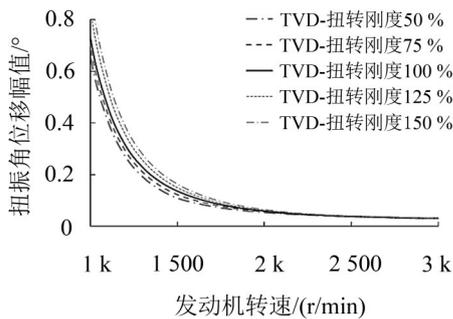


图8 橡胶刚度对传动系扭振响应的影响

综合图7与图8计算结果可以看出,在针对该微型车的传动系抗扭振设计中,传动系扭振响应对TVD转动惯量十分敏感,而TVD扭转刚度对传动系扭振响应影响相对很小。另一方面,由振动控制原理可知,阻尼的作用主要是将机械能转换为热能和声能,而对于系统固有频率的影响并不显著,又由于TVD的阻尼较小,因此在工程应用方面其对于振动能量的衰减可以近似忽略。显然,在不计扭转刚度与阻尼效应的前提下,TVD即相当于一个惯性元件。故可使用纯金属结构的惯量盘安装于微型车扭振响应较大的主减速器输入端,替代传统TVD治理该微型车传动系扭振及扭振引致的轰鸣问题。

3 惯量盘效果验证

3.1 惯量盘的设计、安装

相较于TVD,金属惯量盘在工艺上剔除了橡胶硫化环节从而简化了样件试制流程,更易于加工制造;在性能上避免了因硫化不均匀而导致结构整体动平衡难以保证的问题,降低了因使用TVD激发传动系弯扭耦合振动的可能性;在使用性方面回避了橡胶材料在长期使用中耐久性较差、性能不稳定等问题,从而杜绝了汽车在使用期间频繁更换TVD的现象。然而,因金属惯量盘缺少橡胶阻尼元件,无法达到快速吸收扭振能量的效果,致使在使用时可能会出现需引入“大质量”惯量盘的情形,不利于整车轻量化的需求,因此在惯量盘使用过程中须通过合

理设计以降低其不良影响。综上所述,实际工程应用中,在完善惯量盘的整车匹配工作、综合权衡各性能指标要求下,可以考虑使用金属惯量盘替代传统TVD。

结合某微车实车传动系结构、加工难度、安装容易度以及抗扭性能要求的情况下,设计了如图9所示可安装于主减速器输入端的金属惯量盘($0.018 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$)。与制造同转动惯量的TVD相比,惯量盘制造成本降低约80%。在保证相同安装条件下,即外形尺寸相同的情况下,惯量盘质量较TVD轻0.22 kg,更符合整车轻量化的要求。图10为在原有模型基础上通过仿真分析得到的惯量盘与TVD的抗扭振效果对比,可以看出,在转动惯量相同时,TVD的抗扭振效果略好于金属惯量盘,但其差距较小(2 000 r/min以下角位移幅值相差约 0.1°)。

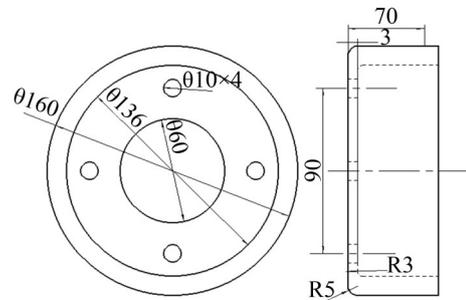


图9 金属惯量盘设计尺寸

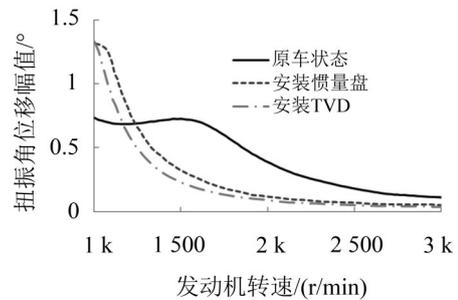


图10 惯量盘与扭转减振器的效果对比

表4反应的是在加装惯量盘前后,传动系敏感阶数模态频率的变化情况。从表中可以看出,使用惯量盘能有效地降低第5阶模态频率,进而使其避开发动机常用转速范围。该结果也说明了通过加装惯量盘进而改善系统模态分布的有效性。

3.2 惯量盘抗扭振效果验证

为验证惯量盘在实际工程应用中的抗扭振效果,试制并安装了如图11所示的惯量盘进行整车噪声测试,并将测试结果与车辆原始状态进行对比,对比结果如图12所示。从图12中可以看出,安装惯量盘后,在发动机转速为1 000 r/min至2 000 r/min范围内,车内噪声都有所减小,在重点关注的1 000

表4 加装惯量盘前后传动系敏感模态频率点变化情况

| | 第4阶扭振模态/Hz | | | 第5阶扭振模态/Hz | | |
|----|------------|-------|-----|------------|-------|--------|
| | 原状态 | 加装惯量盘 | 变化率 | 原状态 | 加装惯量盘 | 变化率 |
| 3档 | 36.9 | 36.9 | 0% | 54.2 | 43.5 | -19.7% |
| 4档 | 36.9 | 36.9 | 0% | 52.8 | 44.5 | -15.7% |
| 5档 | 36.9 | 36.9 | 0% | 52.5 | 43.9 | -16.4% |

r/min 以及 1 500 r/min 附近, 车内轰鸣声得到明显的改善(降低车内噪声约 9 dB(A)), 该微型车在发动机低转速范围内的传动系扭振问题得到了较好地治理。



图11 惯量盘实车安装

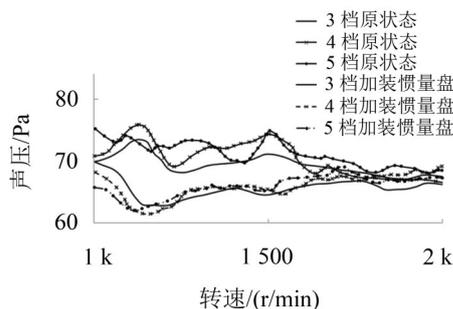


图12 车内噪声测试结果对比

4 结语

(1) 建立了某FR型微型车传动系扭振当量模型, 据以分析其传动系扭振特性以及传动系扭转共振对车内噪声的影响, 可以判定该车型车内低频轰鸣声由传动系扭振引起, 对于该问题的整改可通过扭振治理的方式进行。

(2) 分析了该车型传动系抗扭振设计中, TVD 转动惯量与扭转刚度对传动系扭振响应的影响规律, 寻找到使用金属惯量盘替代 TVD 的可行性依据: 相对于 TVD 扭转刚度, TVD 转动惯量对于传动系扭振响应的影响具有更大的敏感度, 且惯量盘还

具有加工方便、耐久性强的优点。

(3) 仿真分析表明同等转动惯量 ($0.018 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$) 的 TVD 抗扭性能略优于金属惯量盘 (转速在 2 000 r/min 以下角位移幅值相差约为 0.1°), 验证了使用惯量盘替代 TVD 抑制传动系扭振, 并通过实车试验验证了其效果, 结果表明, 在重点关注的 1 500 r/min 附近, 使用惯量盘能降低车内噪声达 9 dB(A)。

参考文献:

- [1] Kazuhide Togai, Michael Platten. Input Torque Shaping for Driveline NVH Improvement and Torque Profile Approximation Problem with Combustion Pressure[C]. FISITA 2012 World Automotive Congress, Vol. 13: Noise, Vibration and Harshness(NVH). 2012.
- [2] 吴光强, 栾文博. 汽车传动系相关 NVH 问题的动力学研究论述[J]. **机械工程学报**, 2013(24):108-115.
- [3] 任丽丽, 施善, 刘友波. 动力传动系统扭振振动的分析及控制[J]. **噪声与振动控制**, 2014, 34(3):20-25.
- [4] 史文库. 现代汽车新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013, 07:210-238.
- [5] Guangming Wu, Wenku Shi, Zhiyong Chen. Analysis of performance parameters of torsional vibration damper under various operating conditions[J]. **SAE2013-01**: 993-1000.
- [6] 康强, 吴昱东, 邓江华, 等. 扭转减振器应用于前置后驱汽车传动系统扭振研究[J]. **制造业自动化**, 2014(23):92-94.
- [7] 章春军. 汽车传动系统扭转振动研究与实验[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [8] 袁晨恒, 邓兆祥, 姜艳军, 等. 轿车传动系扭转振动模型分析与计算[J]. **重庆理工大学学报(自然科学版)**, 2010(7):18-22.
- [9] 王东. 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(4):73-76.