文章编号：1006-1355(2018)03-0094-05+103

传动系扭振影响车内低频声振舒适性的作用机理

康 强[1,2]，李 洁[1]，顾鹏云[2]，左曙光[3]

（1. 浙江汽车工程学院，杭州 310000； 2. 浙江吉利汽车研究院有限公司，浙江 宁波 315000；
3. 同济大学 汽车学院，上海 201800）

摘 要：以某车型为研究对象，针对车内低频（20 Hz～100 Hz）声振舒适性问题的研究与解决，对其传动系布置及构造加以解析。在此基础上，界定进行车内声振舒适性分析研究所依托的“对象系统”，合理划分、组织其子系统并明确其动态特性有效信息，进而揭示出车辆加速过程中发动机中低转速范围内的传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理，并通过实验验证了机理判断的合理性，从而为车内声振舒适性的改进提供了依据和线索。另一方面，依托典型车型具体问题的机理研究，从中归纳总结出处理此类问题的一般性原则，可推广应用于同类车型问题的研究和解决，为后续进一步研究形成规范化的技术解决方案打下基础。

关键词：振动与波；传动系；扭振；声振舒适性；影响机理

中图分类号：U463.2 **文献标志码**：A **DOI编码**：10.3969/j.issn.1006-1355.2018.03.017

Impact Mechanism of Drivetrain Torsional Vibration on the Car's Low Frequency Interior NVH Performance

KANG Qiang[1,2], *LI Jie*[1], *GU Pengyun*[2], *ZUO Shuguang*[3]

（1. Zhejiang Automotive Engineering Institute, Hangzhou 310000, China;
2. Geely Automobile Research Institut Co. Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang Cahina;
3. School of Automobiles, Tongji University, Shanghai 201800, Cahina）

Abstract: The low frequency (20 Hz-100 Hz) interior NVH problem of a car is studied. The layout and structure of the drivetrain of the car are analyzed. On this basis, the "object system" used in the analysis of the interior NVH is defined. The valuable information of subsystems' dynamic characteristics are classified reasonably. The impact mechanism of drivetrain torsional vibration on the car's low frequency interior NVH performance is discovered and verified experimentally. Some valuable clues to solve the low frequency interior NVH problem are proposed. Besides, the general principles for dealing with such a problem are summarized, which can be applied to the similar cars. This study may provide a good foundation for the technical solution of standardization for this kind of problems in the future.

Keywords: vibration and wave; drivetrain; torsional vibration; noise vibration and harshness (NVH); mechanism of influence

扭振作为汽车传动系最重要的动力学响应形式之一，对传动系本身的平稳、安全运行有着直接影响。长期以来，国内外研究者在此相关领域开展了大量研究，针对扭振现象的测试与分析、成因与特性等提出深刻见解[1–8]，并寻求出一系列控制扭振的技术手段[9–12]，在工程实践中得到应用和检验。

另一方面，随着环境意识与用车品味的不断提升，近年来汽车用户对车内声振舒适性的要求日渐苛刻。而汽车传动系扭振除直接影响传动系自身的平稳、安全运行外，还引致车内的振动与噪声，进而影响车内声振舒适性。即意味着，对传动系扭振问题的研究与解决同样也是改善车内声振舒适性的重要方面，由此必将涉及与之相关的诸多车辆构造系统的动态特性分析与综合，具有相当的复杂性。近年来，此类研究工作也取得一定的进展，针对一些车型的具体问题取得了技术成果[13–14]，并可对同类研究提供启发和借鉴。然而，由于车型构造设计及产品制造品质的诸多差异，上述研究还远远不能覆盖纷繁复杂的问题现状，工程领域迫切需要不断扩展、深化针对各类具体车型问题的研究，并归纳总结出相对简捷的问题处理原则以形成高效且具有一定普适性的规范化技术解决方案。显然，这些均须以澄清

收稿日期：2017-09-14

作者简介：康强（1986–），男，江西省抚州市人，博士，主要研究方向为汽车噪声与振动控制。
E-mail: kangqiangok@163.com

传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理为基础。

现阶段，提升车内声振舒适性演变为车辆厂商吸引和稳定用户的至关重要的技术竞争手段。在对某典型车辆的车内声振舒适性改进研发中，确认其传动系的扭振影响占据主导，表现为车辆加速过程中发动机中低转速范围内的传动系扭振导致车内强烈的声振响应，且前期的经验性改进措施对此收效甚微。因此，这里极有必要深入研究其机理从而为声振舒适性改进提供依据和线索，并从中归纳总结出处理相关问题的普适性原则，为后续进一步形成规范化技术解决方案打下基础。

1　典型车型及其车内声振舒适性

1.1　车型传动系布置及构造解析

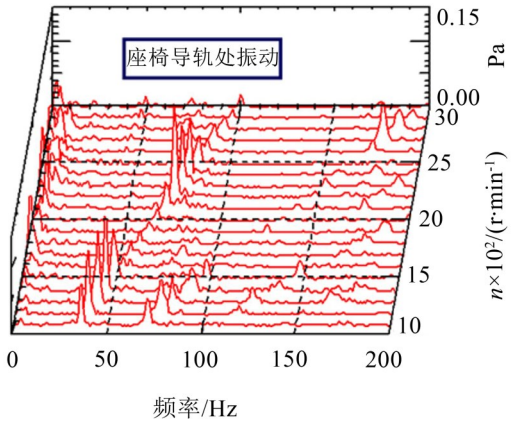
某前置后驱乘用车，其传动系由离合器、变速器、传动轴与万向节、主减速器、差速器及左右半轴构成。其中，离合器、变速器与发动机组合在一起构成动力总成，由弹性悬置元件连接于车体上。传动轴为两段式结构，采用十字轴式万向节相连接，并在前段传动轴的后端近万向节处设置弹性中间支承与车体连接。而主减速器、差速器及左右半轴则被封装于后桥桥壳内，再通过后悬架弹簧及内含弹性衬套的悬架导向杆系与车体连接。可见，动力总成、传动系与车体之间通过弹性连接，整体上构成一个形式完备的减、隔振系统，这就是进行车内声振舒适性分析研究所依托的“对象系统”，包括作为声、振激励源的动力总成及传动系本身，作为激励对象的车体，以及作为激励传递路径的动力总成悬置、传动轴中间支承、后悬架弹簧与导向杆系等构造。如应用得当，则能有效抑制动力总成及传动系动态激励向车内的传递。对此，解决问题的一般思路与方法无外乎是对“源”、“路径”及“对象”的治理，并应立足于整个系统（这一点非常重要，但却很容易被忽视）开展综合分析与评价，以有效协调其局部与整体、内部与外部的矛盾。

1.2　车内声振舒适性的问题现象及分析

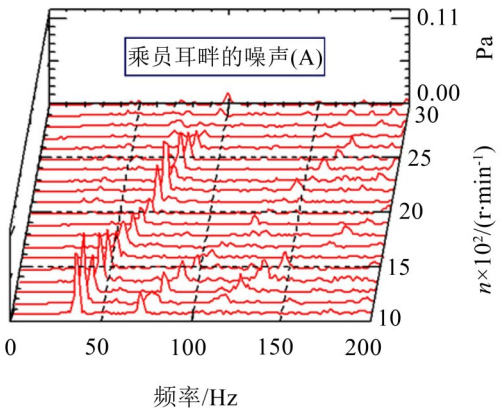
该车型量产后存在较为强烈的车内振动与噪声，如图1所示。具体问题现象为：车辆平直路面加速行驶过程中，发动机在900 r/min～1 500 r/min的中低转速范围内，车内振动加剧并伴随压迫耳膜的低频轰鸣声，并以变速器3、4挡为甚，至发动机转速达1 800 r/min左右时现象缓解。另一方面，此问题现象的出现与车速无明显关系，在车辆减速过程中发动机反向经历同样的转速范围时无此现象，在驻车空挡时也无此现象。事实上，类似问题亦普遍存在于多种同类车型中，甚至包括一些原装进口车型，这在一定程度上暗示着问题的广泛性与复杂性。

经过反复测试、评价、对比分析与经验判断，确认上述问题与传动系非稳态运行的动态激励间存在很强的相关性。但由于前期工作中对导致车内声振舒适性问题的作用机理并不清晰，致使一些本应奏效的抗扭振技术手段（如调整轴系扭转刚度、施加扭转型动力吸振器等）失去具体的针对性，以至收效甚微并使工作方向陷入混乱。

为摆脱这种被动局面，须从揭示机理的角度寻求突破。这就需要对构成上述对象系统的各个子系统加以界定和组织。需要注意的是，这与其自然状态的构造形式并非僵化对应。这里，按照主导运动形式的不同，将发动机旋转轴系、离合器旋转元件及内置扭转减振器、变速器各挡轴系、各段传动轴及万向节、主减速器旋转元件、差速器旋转元件以及左右半轴归于“旋转系”，将“发动机活塞”、“动力总成-悬置系统”、“受轴系约束的后桥与悬架总成”以及“车身系统”等归于“非旋转系”。显然，与前者相容的动力学响应形式为“扭振”及（或）“非扭振”，而后者仅



（a）座椅导轨的振动



（b）乘员耳畔的噪声

图1　车内振动与噪声

为“非扭振”。其动态行为的相互作用将来自发动机活塞运动的动态激励最终转化为车内声振响应，如图2所示。

而对于此处的问题，前期已排除了“路面不平度”、“路面滚阻”和“空气动力”的影响。进一步，就需要分门别类地采用适当的测试、分析手段，明确相关子系统的动态特性，为澄清其内在联系进而揭示机理创造条件。

有必要说明的是，对于这里所研究的典型车型，由于受现实因素制约，针对其“动力总成-悬置系统”声振舒适性的后期整改恐难以落实。鉴于这种情况，并为使问题得到一定简化，可将其从对象系统中剔除。

2 相关子系统的动态特性

显然，面向相关子系统动态特性的研究应以车内声振舒适性问题的解决为目标。体现在工况条件的定义上，就须以车内声振舒适性的具体问题现象为导向。这里针对所研究的典型车型，将主导性的工况条件定义为：车辆在平直路面行驶，变速器各挡位（1～5挡及倒挡）半油门加速，使发动机至少历经700 r/min～3 000 r/min的转速提升区间，并重点关注900 r/min～1 800 r/min的相关信息。在试验研究中，可采用底盘测功机并配合油门执行器确保工况的精确性与可重复性，且便于和分析研究相对比。事实上，图1所示的车内振动与噪声信息即由此测试获得。另一方面，图1还明确了问题的频率范围基本限于20 Hz～100 Hz的低频段内，这正是车内Booming的重要特征。

在上述工况及频率范围内，针对图2所示的各个子系统（剔除了“动力总成-悬置系统”），立足问题研究与解决的具体需求，采用必要的测试、分析手段，得到其动态特性有效信息如表1所示。其中扭振模态（50 Hz传动系扭振模态）通过建模计算获得，非扭振模态（40 Hz后桥刚体俯仰模态）及顶棚（40 Hz、50 Hz左右局部模态）和背门模态（50 Hz左右局部模态）通过模态试验获得，扭振及非扭振响应通过实车试验测得。

3 传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理

3.1 机理的揭示

立足图2的“内在的联系”，并依据表1的“有效信息”，再结合相关理论与经验，即可做出如下判断：

排除：不在所关注频率范围（20 Hz～100 Hz）内的因素——“旋转系”的非扭振动态行为（模态及响应），以及对后期整改而言“不可控”的因素——车内声腔模态，以进一步简化问题分析；

（1）“旋转系”在发动机活塞运动激励下产生扭振，一方面在50 Hz（对于本文的四缸发动机，主阶次为2阶，故频率乘以30位对应发动机转速，即1 500 r/min）左右出现扭振模态共振响应，另一方面在40 Hz（对应发动机转速1 200 r/min）附近低频范围出现相对强烈的非扭振模态响应；

（2）“旋转系”在50 Hz左右的扭振模态共振响应通过相关传递路径（后桥及悬架相关元件、传动轴中间支承、动力总成悬置等），进一步激励车身结构振动，并分别在此频率附近与顶棚、背门形成共振响应；

（3）“旋转系”在40 Hz附近的低频范围内，所出现的非扭振模态共振响应实际上已经超越了其在50 Hz左右的扭振共振响应幅值。而这一相对强烈的非共振响应导致了“受轴系约束的后桥与悬架总成”在其40 Hz左右的刚体模态频率处产生共振响应，进而又激发了车身顶棚40 Hz左右的共振响应；

（4）综合顶棚、背门在50 Hz左右的共振响应，以及顶棚在40 Hz左右的共振响应，不难对图1所示的车内声振现象作出合理解释。

综上，揭示出传动系扭振影响车内声振舒适性

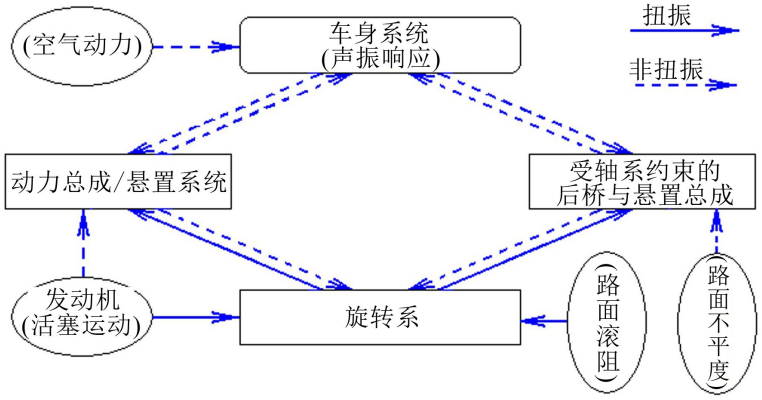


图2 子系统动态行为与车内声振响应间的内在联系

表1 子系统动态特性有效信息

子系统分类		主导运动形式	判断导向	有效信息
非旋转系	发动机活塞	非扭振	激励:<—>	<—>
	“旋转系”	扭振、非扭振	模态:<—> 响应:<—>	[扭振模态]50 Hz左右，对应转速1 500 r/min左右 [非扭振模态]其模态频率不在所关注的范围内 [扭振响应]在1 300 r/min以下的低转速区，扭振响应相对强烈，高于1 500 r/min的“转速共振”响应峰值 [非扭振响应]:<—>
	受轴系约束的后桥与悬架总成(内含传动轴中间支承)		模态:<—> 响应:<—>	[非扭振模态]40 Hz左右，“刚体俯仰”振型 [非扭振响应]:<—>
非旋转系	车身系统	非扭振	模态:<—> 响应:见图1	[非扭振模态]顶棚:40 Hz、50 Hz左右局部模态 背门:50 Hz左右局部模态 车内声腔模态:<不可控> [非扭振响应]:见图1

的作用机理，如图3所示。

3.2 机理判断的合理性验证

为验证上述机理判断的合理性，有针对性地开展了相应的试验工作：

(1) 针对“车身系统”之顶棚：通过改变加强筋布置以增强顶棚刚度从而“消除”其40 Hz及50 Hz左右的局部模态，试验结果分别如图4(a)、(b)所示；

(2) 针对“车身系统”之背门：通过附加质量而“消除”其50 Hz左右的局部模态，试验结果如图4(c)所示；

(3) 针对“受轴系约束的后桥与悬架总成”：通过在后桥壳体上(主减速器输入端)安装动力吸振器而“消除”其40 Hz左右的刚体模态，试验结果如图4(d)所示；

(4) 针对“旋转系”之模态共振：通过在传动轴末端安装扭转型动力吸振器而“消除”其50 Hz左右的扭振模态，试验结果如图4(e)所示；

(5) 针对“旋转系”之非模态共振：通过增大上述(4)中的扭转型动力吸振器的转动惯量，扩展其有效频段到包含40 Hz的低频非共振区，试验结果如图4(f)所示。

上述试验结果表明，相关措施实施后均取得了预料中的效果。这不仅验证了机理判断的合理性，事实上还对车内声振舒适性整改进行了有价值的尝试。

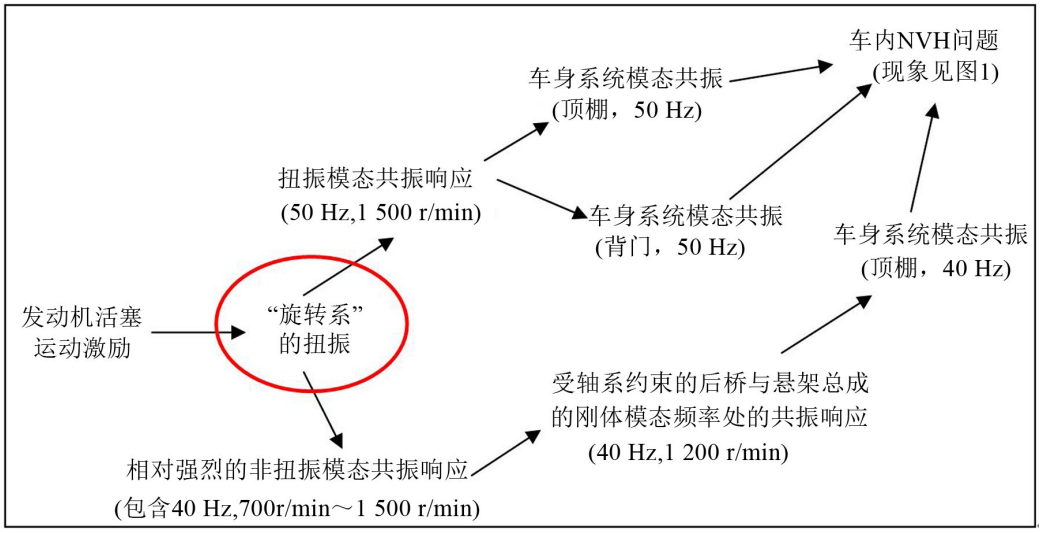


图3 传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理

4 揭示机理的处理原则

综上所述，在针对典型车型传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理揭示中，遵从了如下的处理原则：

（1）以车内声振舒适性的具体问题现象为导向，定义问题研究所依托的工况条件，一般包括：行车路况、车速控制方式及发动机转速范围等。同时，通过对具体问题现象的分析，明确问题的频率范围，作为后续研究的限制前提；

（2）以车型传动系布置及构造为依据，从系统观点出发，就对象系统所包含车辆构造的范围加以界定，即澄清动态激励的“源”、“路径”及“对象”，并合理划分各个子系统。一般情况下，“旋转系”、“非旋转系”是一个可行的划分标准，前者的激励与响应形式为“扭振”及“非扭振”，而后者仅为“非扭振”，其动态行为与车内声振响应的内在联系可由图2来描述；

（3）必要时，结合现实的技术性、经济性约束条件，就对象系统所包含车辆构造进行再确认，旨在剔除那些不满足现实约束条件的子系统，从而在一定程度上使问题得到简化；

（4）按照上述（1）所定义的工况条件，针对（2）及（3）所界定的对象系统的相关子系统开展声振测试、分析，涉及“扭振”及（或）“非扭振”情形下的“模态”及（或）“响应”信息，以明确子系统的动态特性，并参照表1的模式提取研究与解决问题的有效信息；

（5）立足图2的“内在的联系”，并依据表1的“有效信息”，再结合相关理论与经验，即可对传动系扭振影响车内声振舒适性的作用机理加以判断。在判断思维的过程中，需要回答如下两方面的核心问题：一方面，包括扭振在内的传动系动态激励是否会激起系统自身或其子系统的模态共振（含声腔模态及声振耦合模态）？如果是的话，如何破坏其共振条件？另一方面，除共振因素外，系统及其子系统是否受到较强的动态激励而导致相对剧烈的响应？如果是的话，有无消除的可能性？这些就是分析和解决问题的总的切入点；

（6）上述机理判断的合理性须通过一定方式加以验证。

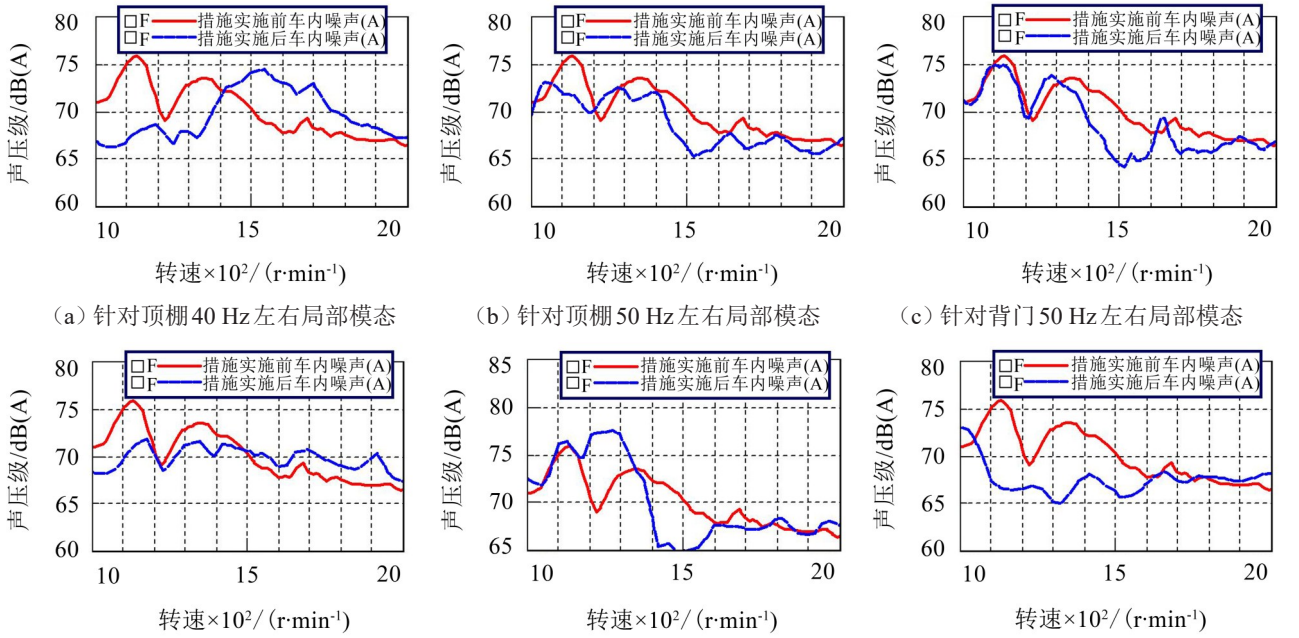
5 结 语

（1）针对一款具有前置后驱型传动系布置的典型车型，揭示出车辆加速过程中发动机中低转速范围内的传动系低频扭振影响车内声振舒适性的作用机理，从而为车内声振舒适性的改进提供了依据和线索。

（2）依托典型车型具体问题的机理研究，从中归纳总结出处理相关问题的普适性原则，可推广应用于同类车型问题的研究和解决。

参考文献：

[1] 周林，郑四发，连小珉. 加速工况下传动系统扭转振动分析[J]. **振动工程学报**，2010(6)：601-605.



（a）针对顶棚40 Hz左右局部模态　（b）针对顶棚50 Hz左右局部模态　（c）针对背门50 Hz左右局部模态

（d）后桥与悬架总成40 Hz左右刚体模态　（e）针对旋转系50 Hz左右扭振模态　（f）针对旋转系包含40 Hz的低频非共振区

图4 机理判断合理性的试验验证

（下转第103页）