文章编号：1006-1355(2021)01-0150-05

汽车仪表板异响仿真优化及试验研究

朱翔麟，许 翔，谢 然，张 华，李文奇

（广州汽车集团股份有限公司 汽车工程研究院，广州 511434）

摘 要：为在产品开发前期识别出某SUV仪表板的异响风险，利用仿真方法对其进行典型路谱下的频率响应分析，采用E-line法计算仪表板总成相邻部件之间的相对位移，结合部件间的间隙尺寸信息识别潜在的敲击异响风险点，并且计算风险率。总结导致相对位移较大的原因，结合工程经验及设计要求考虑方案的可实施性，提出控制异响的优化方案。仿真计算结果表明改进方案有良好的抑制敲击异响的效果。在样车调教阶段，进行整车四立柱异响主观评价试验，验证了仿真分析方法的有效性。

关键词：声学；仪表板；异响；E-line法；四立柱异响试验

中图分类号：U463.837 **文献标志码：A** **DOI编码：**10.3969/j.issn.1006-1355.2021.01.028

Numerical Optimization and Experimental Study on the Rattle of an Automobile Instrument Panel

ZHU Xianglin, *XU Xiang*, *XIE Ran*, *ZHANG Hua*, *LI Wenqi*

(Automotive Engineering Institute, Guangzhou Automobile Group Co., Ltd., Guangzhou 511434, China)

Abstract : To identify the risk region of rattle of a SUV instrument panel during vehicle preliminary design stage, finite element method is adopted to analyze the frequency response under typical road spectrum condition. The relative displacement along a gap between two adjacent components is calculated applying the E-line method. Combined with DTS data, risk areas are identified and risk rates are calculated. The cause of relative displacement is also summarized. Then, considering engineering experience, design requirements and feasibility, an optimization scheme to control the rattle is proposed. The results of simulation show that the optimization scheme can effectively control the rattle. The full-vehicle four-poster S&R subjective test is conducted under road spectrum condition and the（S&R）effectiveness of the E-line method is verified.

Key words : acoustics: instrument panel; squeak and rattle; E-line method; four-poster test

异响性能是汽车NVH性能的重要组成部分，是影响乘坐舒适性的关键因素之一。仪表板作为整车内饰中的重要组成部分，其异响性能直接影响着乘客对汽车品质的印象，当其相邻部件在激励下产生相对移动时，可能引起摩擦异响与敲击异响[1]（Squeak and rattle, S&R）。为了在产品开发前期预防异响问题，一些学者总结出系统的异响分析方法，如对结构模态、刚度、灵敏度的控制。甘志常[2]认为仪表板模态频率如果与发动机怠速激励频率重合，将因振动产生异响。在开发前期须对仪表板系统进行模态优化工作，并进行了相关的模态试验。郭佑民等[3]对仪表板进行了模态、灵敏度分析，并对比了道路、四通道主观评价结果，展示了一套系统性的仪表板异响问题评估与优化设计方法。李颖琎等[4]通过对仪表板结构刚度进行优化来减少部件之间发生碰撞和摩擦的机会，避免共振现象的发生。魏秋君[5]利用仿真方法对仪表板卡扣安装点进行振动传递分析，判断可能产生异响的卡扣位置，通过优化来降低卡扣安装点的速度响应，从而减少异响的发生。

利用仿真分析，计算模态、刚度、灵敏度等相关参数，均为间接的控制异响问题的方法，其优点是成本低、计算简单及对模型要求低，但这些方法无法直观地显示异响结果，并且需要经验判断异响的情况。本文采用一种新的异响仿真方法——异响评价线（S&R evaluation line）法，简称E-line法。该方法可在产品开发前期，通过输入试验场典型路面路谱进行频响分析，计算部件间的相对位移，结合评估部位的设计间隙，判断异响风险[6-7]。该方法将仿真结果与实际问题直接关联，直观地显示邻近系统、部件的异响的情况，分析的结论更有指导性。

收稿日期：2020-03-26

作者简介：朱翔麟（1993-），女，辽宁省辽阳市人，工程师，主要研究方向为噪声与振动控制。

E-mail: zhuxianglin@gacrnd.com

本文针对某SUV的仪表板总成，利用CAE分析技术结合E-line方法进行敲击异响的识别与控制，提出了修改卡扣连接以及增加限位筋的优化方案，降低了敲击异响风险率，通过四立柱异响主观评价试验证明了优化方案的有效性。

1　异响识别与评估方法

1.1　E-line方法

汽车敲击异响的主要激励源是通过悬架系统传递来的路面激励。在外界激励的作用下，相邻两物体会发生碰撞产生类似咔嗒声的敲击声。敲击异响主要与部件之间接触面法向运动有关[8]。因此以相对位移为主要评价参数进行敲击异响识别与分析。

为了得到准确的相对位移值，在部件间隙处建立一条以节点对组成的异响评价线，称为E-line。E-Line上节点对的其中一个节点位于待评价部件的表面上，另一个节点位于其相邻部件的表面上。每一个节点对都定义在各自沿部件表面建立的局部坐标系当中，局部坐标系Z向为相邻部件间隙方向，局部坐标系*XY*平面为相邻部件接触平面。对每一个节点对，定义C-BUSH单元来连接两部件。C-BUSH单元可以定义刚度，是一种弹性连接单元，其两端节点的位移将被用于敲击异响的仿真分析当中。E-line法采用*Z*向（接触面法向）位移作为敲击异响分析的指标。

相对位移只有在时域内获取和分析才有意义，所以使用瞬态响应分析方法计算模型的相对位移。通过实际路面采集的路谱信号进行频响分析，频率响应能定量地表征模型或者系统的特点，得到的结果是由带有幅值和相位的向量构成，它可以作为一个频率响应函数。计算得到两组件间隙方向的相对位移值后，与间隙尺寸信息（DTS）文件中的间隙尺寸信息比较，判断是否有敲击异响风险。

1.2　风险率

为了对异响问题进行量化分析，利用风险率来评判结构是否达到目标要求。风险率的评估主要根据“小概率事件”基本思想以及“3σ”原则概率统计方法，“小概率事件”认为事件发生的概率小于5 %，则该事件在一次试验中是不会发生的。正态分布的“3σ”原则是把区间（μ-3σ，μ+3σ）看作是随机变量*X*实际可能的取值区间，*X*落在（μ-3σ，μ+3σ）以外的概率小于千分之三，所以在实际问题中常认为该事件是几乎不可能发生的。

DTS文件中的间隙公差满足以间隙*G*为均值，以公差T为3σ的正态分布假设，计算相对位移在该正态分布的概率即为风险率。评价方法为：风险率小于1 %为小风险，1 %～10 %为中等风险，大于10 %为大风险。对风险率超过1 %的间隙进行结构优化。

2　仪表板异响仿真分析

采用Hyper Works SnRD平台进行异响分析，该平台可自动从OptiStruct求解器得到的结果文件中判断出异响的危险点，简化了从模型创建到结果可视化的整个异响仿真流程。

2.1　仪表板异响仿真模型

本文分析的异响仿真模型为带仪表板系统的整备车身模型，如图1所示。其中仪表板系统包含仪表板总成、副仪表板总成、仪表板横梁总成等。

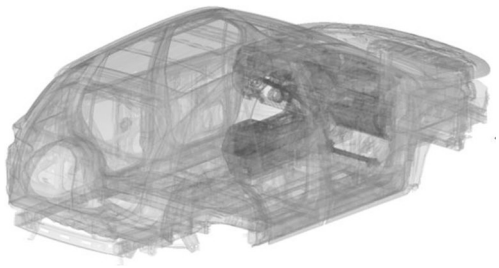


图1　带仪表板系统的整备车身模型

首先确定敲击异响分析的重点关注部位，例如，硬质材料与硬质材料相互碰撞可能产生敲击声。然后采用Hyper Works的SnRD模块对仪表板所关注的各间隙建立E-line，如图2所示。同时获取相邻部件的DTS数据，即间隙和公差，以便后处理时直接与相对位移对比。如IP23为检修口与驾驶下饰板边界，间隙值为1.5 mm，公差为0.5 mm。IP25一键启动面板与驾驶下饰板边界，间隙值为0.5 mm，公差值为0.5 mm。

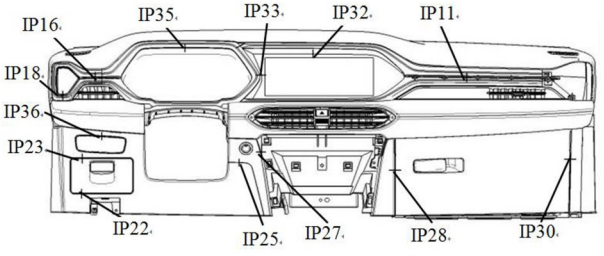


图2　仪表板有限元分析边界示意图

每条E-line由CBUSH单元和RBE3单元连接的节点对组成。为了使计算出的相对位移更符合实际，对每个节点对建立局部坐标系，定义接触平面为*XY*平面，接触面的法向为Z向，如图3所示。分析敲击异响时，CBUSH单元在局部坐标*X*、*Y*、*Z*向的刚度值均设置为0。

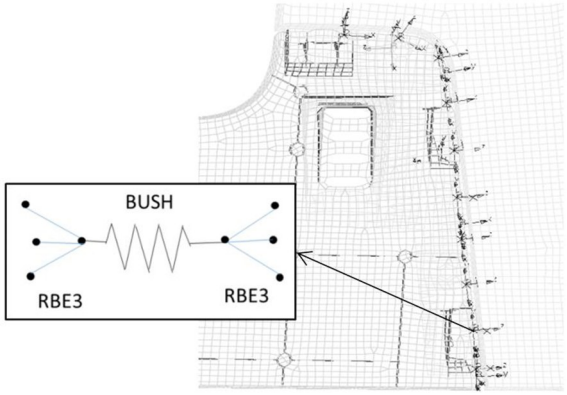


图 3 E-line建模

2.2 路谱采集

在试验场典型路面进行实车载荷采集，对每个车身减震器安装点测取*XYZ*三向加速度信号，然后进行滤波迭代等处理，得到在有限元模型中加载的时域强迫位移信号，如图4所示。

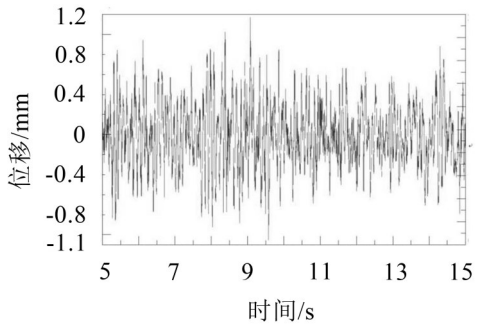


图 4 位移激励信号

位移信号的加载点为有限元模型中的减震器安装点。SnRD模块会在加载点处自动生成SPC和SPCD两种约束，此时需要将SPC下的约束变为全约束，SPCD下的约束方向为加载方向，选择XYZ向加载。

2.3 求解设置

本次异响分析需要设置两个工况，一个工况为模态求解，另一个工况为时域内的频率响应计算。设置求解频率范围0 Hz～80 Hz。设置输出响应类型为节点位移。

前处理完成后，提交OptiStruct求解器计算。计算完成后将结果文件导入HyperView进行后处理。

2.4 结果分析

在敲击异响分析结果中，只取较大的部分相对位移值，因此引入百分比峰值概念，将E-line时域上计算的相对位移结果进行排序，取前30 %的最大值求得均值，即为该E-line上最大的相对位移值。分析边界中各节点在载荷激励下的相对位移云图如图5所示。

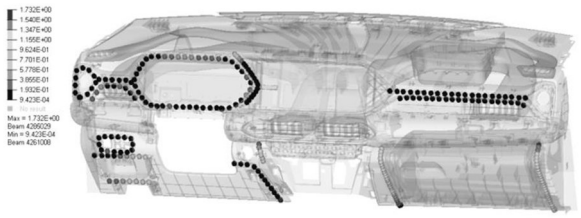


图 5 相对位移分析结果

由于分析敲击异响，提取每条间隙的*Z*向最大相对位移值，根据DTS文件中对应的间隙公差值，计算风险率，如表1所示。

表 1 IP各边界敲击风险评估汇总表/mm

边界	间隙	公差	相对位移	风险率/(%)
IP11	0.3	0.3	0.01	0.14
IP16	0.3	0.3	0.01	0.14
IP18	0.3	0.3	0.01	0.14
IP22	2	0.5	0.02	0.00
IP23	1.5	0.5	0.07	0.00
IP25	0.5	0.5	0.12	1.13
IP27	1.5	1	0.11	0.00
IP28	2	1	0.16	0.00
IP30	2	1	0.09	0.00
IP32	0.2	0.2	0.01	0.22
IP33	0.5	0.5	0.01	0.16
IP35	0.2	0.2	0.08	3.59
IP36	0.3	0.3	0.05	0.62

由上表可知，在典型异响试验路面的激励下，主仪表板分析边界IP25、IP35的相对位移风险率较高，大于1 %，需要进行优化。

3 优化措施

3.1 结果改进方案

适用于敲击异响的优化方向主要有：加强结构整体刚度；优化卡扣的连接位置；调整初始间隙值；增加限位结构。根据对上述结果分析总结导致相对位移较大的原因，结合工程经验及设计要求考虑方案的可实施性，提出如下改进方案：

（1）针对组合仪表护板和装饰亮条之间相对位移超标，在装饰亮条内部如图6所示位置增加限位结构，限制边界在整体坐标系下*X*向的相对位移。该山字形限位筋厚度1.2 mm，并设计导向斜面，有利于增加限位筋强度。

（2）在一键启动面板增加一处螺钉与IP骨架连接，如图7所示。来加强结构局部刚度，减小此处产生间隙的变形。将上述改进方案同时实施后，重新进行计算分析。

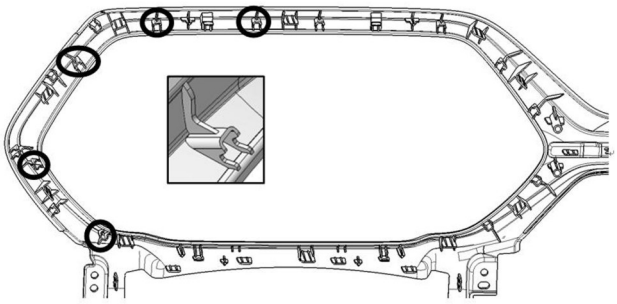


图 6 边界IP25优化方案

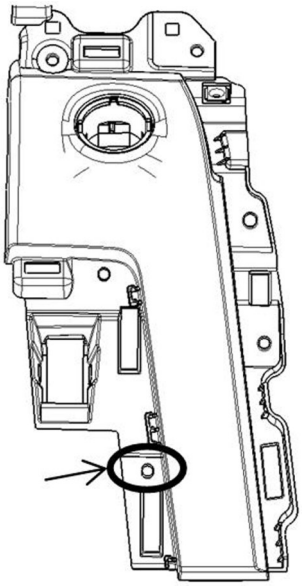


图 7 边界IP35优化方案

3.2 优化后结果分析

图8、图9表示分析边界IP25、IP35各节点对的相对位移，在Rattle分析中只关注Z向曲线，虚线、实线分布表示优化前和优化后的Z向曲线相对位移值。从上述折线图中可以看到：提出的改进方案起到了抑制组合仪表护板和装饰亮条间隙，一键启动面板和驾驶侧下护板间隙的相对位移作用。采用以上优化方案后边界IP25、IP35的敲击异响风险率小于1 %，存在敲击异响危险的区域消除，说明上述改进方案有良好的抑制敲击异响的效果，分析结果见表2。

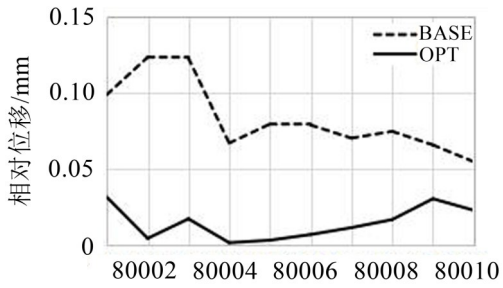


图 8 IP25优化前后相对位移折线图

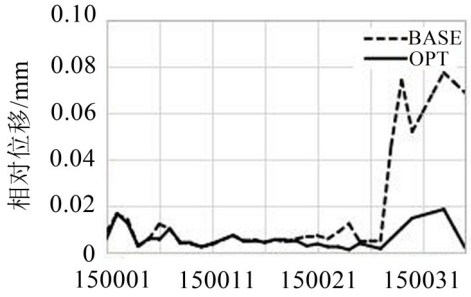


图 9 IP35优化前后相对位移折线图

表 2 优化后各边界敲击风险评估汇总表

边界	间隙方向相对位移最大值/mm	敲击异响风险率/(%)	目标值/(%)
IP25	0.031	0.24	<1
IP35	0.019	0.33%	<1

4 整车四立柱异响试验

将车辆固定在四立柱设备上，如图10所示。该激振台由四个激振器组成，分别为四个轮胎传递振动，本次试验采用实车采集的载荷谱为输入信号，专业评价人员可以坐在车内仔细并且清晰地听到异响发生的部位，与路试相比，可以对异响部位进行更精准的识别[9]。进一步确定异响根本原因，综合评估得出最可行并且成本最低的方案进行改进[10]。



图 10 整车四立柱激振台

为模拟车辆在极限气候下的异响情况，试验分为三种工况，分别是常温、低温和高温。在动态评价前，车辆应在环境仓中进行浸泡，浸泡是指把整车在将要试验的环境温度下静置。为使试验车上各个部件都能达到环境温度，车辆应在标准温度下放置一定时间，

对该车型的两台整车分别进行四立柱异响试验，记录出现问题的车辆与问题具体描述等信息。得到的动态评价试验结果中与仪表板有关的问题点共3项，其中问题1为装配问题，其余为设计问题，经整改后异响问题均消除。详细信息汇总如表3所示。

表 3 动态评价试验结果

序号	问题描述	原因分析	整改建议
1	常温、低温多媒体右侧出风口嗒嗒声	拨扭与横向格栅存在配合Z向存在间隙。	只有032车型对媒体右侧出风口在某一位置出现异响，怀疑单件问题，加强产品一致性管控。
2	仪表台内部线束敲击异响	仪表台内部线束未固定牢固，接插件未采取防异响措施，产生敲击异响。	1.按照约200 mm一个固定点方式对线束进行固定。2.线束外部包裹防异响胶带和海绵。3.接插件采用海绵包裹。
3	常温、低温手套箱锁舌锁槽敲击异响	手套箱在关闭状态下，锁舌与锁槽之间配合间隙过大，振动时发生磕碰	1.增大手套箱锁舌与锁槽之间的干涉量；2.增大缓冲块的压缩量。

通过与仿真分析结果对比，发现采用改进方案后，各分析边界均未发生异响。为进一步验证仿真与试验的一致性，将样车调整至优化前状态，即拆卸一键启动面板处增加的螺钉，再次进行四立柱异响试验。发现在四立柱低温评价时，一键启动面板附近有嗒嗒声出现，将一键启动面板和驾驶侧下护板用毛毡隔离后异响消失。该问题点对应IP35间隙分析结果。直接验证了优化方案的有效性。

5 结 语

本文展示了一套系统性的仪表板敲击异响问题研究方法：

（1）在产品开发前期，仿真评估仪表板各间隙出现异响的风险率，通过增加限位结构与加强结构连接，控制部件间的相对位移，以减小敲击异响风险；

（2）在后期样车调教阶段，进行了整车四立柱异响试验，确认异响风险位置并查找原因，经整改后异响问题均消除；

（3）异响评估的各边界在试验中均未发生异响，与仿真结果相符。若未采用优化方案，边界IP35在四立柱低温评价时发生异响，进一步验证了该仿真分析方法的必要性。

因此，将该方法纳入到整车异响正向开发流程，可以在设计前期发现异响问题，提出改进方案，将大大减少后期验证阶段出现的问题，节省工程开发的费用和时间。

参考文献：

[1] 庞剑. 汽车车身噪声与振动控制[M]. 北京：机械工业出版社，2015.

[2] 甘志常. 仪表板系统模态研究[J]. 汽车与配件，2016（15）：64-65.

[3] 郭佑民，王晓，刘杨胜，等. 仪表板模块异响问题评估及设计优化[C]. 中国汽车工程学会年会，2009.

[4] 李颖琎，孙跃辉，咎建明，等. 汽车仪表板异响分析研究[C]. 中国汽车工程学会年会，2010.

[5] 魏秋君，宋凯，刘亚彬. 仪表板异响分析[C]. 中国汽车工程学会年会，2015.

[6] PAKIMAN A, MORIDNEJAD M, BAZINE S, et al. Relative displacement in closure gaps due to random excitation-correlating test and simulation using a 3D laser vibrometer and the E-line method[J]. VDI-Berichte, November 2014.

[7] BAZINE S. Defining global damping for an instrument panel by using a time domain correlation approach (E-LINE™)[D]. Department of Mathematical Modelling and Mechanics, Bordeaux, 2014.

[8] 石建策. 汽车仪表板异响CAE分析技术研究[D]. 长春：吉林大学，2017.

[9] 申超，彭宇明，杨明亮，等. 基于台架试验的汽车座椅异响评价方法探究[J]. 噪声与振动控制，2017，37（3）：101-106.

[10] 段文君，侯宝树，杨新明. 汽车内饰件异响问题诊断及设计优化[J]. 汽车工程师，2015，（10）：49-52.

（上接第149页）

[8] 崔庆霞，杨俭，袁天辰，等. 轨道交通车辆二系悬挂系统平稳性设计研究[J]. 计算机仿真，2019，36(8)：133-138.

[9] 陈志辉，翟婉明，朱胜阳，等. 基于准零刚度理论的悬挂式单轨车辆二系悬挂系统研究[J]. 振动与冲击，2019，38(2)：18-22+45.

[10] 李硕. 基于主动油气悬架的非线性建模及自适应控制研究[D]. 秦皇岛：燕山大学，2019.

[11] MOHEYELDEIN M M , ABD-EL-TAWWAB A M , ABD E K A , et al. An analytical study of the performance indices of air spring suspensions over the passive suspension [J]. Beni Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 2018 (7): 252-534.

[12] 王靖岳，郭胜，鄂加强. 非线性空气弹簧数学模型的研究[J]. 机械设计，36(6)：20-23.

[13] 赵玉壮，王宗诚，陈思忠. 基于滑模控制的空气悬架车高控制系统研究[J]. 北京理工大学学报，2014(11)：29-33+43.

[14] 李彪. 列车空气弹簧对车辆系统平稳性的影响研究[D]. 甘肃：兰州交通大学，2018.