

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.06.012

不同温度下的汽车仪表板异响 CAE 研究^{*}

谈婷婷^{1,2}, 杜建科^{1*}, 李洪亮², 李琦²

(1. 宁波大学 机械工程与力学学院, 浙江 宁波 315211; 2. 中国汽车技术研究中心有限公司, 天津 300300)

摘要:针对汽车仪表板在不同温度下存在的异响问题,对仪表板的主要材料进行了准静态拉伸试验。采用数字图像相关方法,得到了材料在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度下的弹性模量和泊松比,为仪表板有限元建模提供了材料参数;利用 Ziegler SSP-04 材料兼容试验机测定了材料摩擦副在不同温度下的异响风险指数和发生 Stick-slip 运动的脉冲率;应用 Optistruct 进行了瞬态响应分析,求解了相邻部件的相对位移;结合单个脉冲相对位移、相邻部件设计间隙等数据,对不同温度下的尖叫异响和敲击异响风险进行了识别,并在常温下进行了实车验证。研究表明:温度越高,相邻部件产生异响的风险越大;仿真结果与试验结果趋势基本一致,该仿真方法可用于车辆前期开发设计阶段的仪表板异响分析。

关键词:准静态拉伸试验;异响风险指数;相对位移;尖叫异响;敲击异响;数字图像相关

中图分类号:TH145;U463.7;U465.6

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)06-0665-06

Study on rattle and squeak in automobile instrument panel at different temperature based on CAE

TAN Ting-ting^{1,2}, DU Jian-ke¹, LI Hong-liang², LI Qi²

(1. School of Mechanical Engineering and Mechanics, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. China Automotive Technology and Research Center Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming at the risks of squeak and rattle in instrument panel(IP) at different temperature, the quasi-static tensile test was carried out on the main materials of the IP. The modulus of elasticity and Poisson's ratio of the materials at $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, $10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ and $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ were obtained by digital image correlation method, which provided material parameters for the finite element modeling of the IP. The risks of rattle and squeak priority number of the material pairs and the impulse rate between the two materials were measured by the Ziegler SSP-04 tester. The relative displacement of adjacent components was calculated with transient response analysis by using Optistruct. According to relative displacement of single impulse and the designed gap between two adjacent components, the risks of squeak and rattle at different temperature were identified, and the vehicle verification experiment was carried out. The results indicate that the higher the temperature is, the greater the risk of rattle and squeak of adjacent parts is. The two trends of the simulation results and the experimental values are basically consistent. It shows that the simulation method can be used to analyze the rattle and squeak of the IP during the early design stage of the vehicle development.

Key words: the quasi-static tensile test; risk priority number (RPN); relative displacement; squeak; rattle; digital image correlation (DIC)

收稿日期:2019-09-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(11672141)

作者简介:谈婷婷(1993-),女,湖北十堰人,硕士研究生,主要从事异响识别与控制方面的研究。E-mail:1770847438@qq.com

通信联系人:杜建科,男,教授,博士生导师。E-mail:dujianke@nbu.edu.cn

0 引 言

异响是两个或多个相邻部件在外力作用下,相互摩擦或撞击产生的声音,是组成汽车 NVH 问题的重要组成部分^[1]。异响仿真分析可分为直接法和间接法。间接法通过计算模态^[2]、刚度、传递函数等相关参数查找异响敏感区域;而直接法通过计算实际载荷作用下相邻部件的相对位移,判断是否会发生异响,分析结果更为直观,更有指导性。汽车仪表板是产生异响问题的主要部位之一。在汽车的生命周期内,会经历低温、常温或高温等多种不同温度工况下的驾驶阶段,温度会对材料特性有一定影响,进而影响仪表板的异响性能。笔者采用直接法对仪表板在不同温度下的异响进行分析。

朱才朝等人^[3]应用有限元和模态分析技术研究了汽车车身结构振动和车内噪声耦问题;李颖璐等人^[4]在汽车产品开发前期,结合 CAE 模态分析法找出了仪表板结构方面的弱点,并通过优化减少了由共振引起的异响问题;SHIN S H 等人^[5]提出了一种综合的试验方法,可用于降低车内仪表板总成的异响;TA-TARI M 等人^[6]认为对于可识别结构动态的座椅系统,可以使用 CAE 模型进行异响分析和控制;石建策等人^[7-8]对汽车内饰异响进行了分析,建立了一套完整的异响 CAE 分析流程。

笔者对仪表板的组成材料进行拉伸试验,结合 DIC 方法得到不同温度下材料的弹性模量和泊松比,并作为有限元模型的材料参数输入;通过材料兼容试验机测得不同温度下材料摩擦副发生粘滑运动的脉冲率;在不同温度下,对仪表板潜在异响风险部位进行 CAE 分析,并在常温下进行试验验证。

1 异响的形成机理及评价方法

1.1 尖叫异响的形成机理

并非所有的相对运动都会产生噪声,只有当物体表面接触形成摩擦副,并发生不稳定的摩擦粘滑运动(Stick-slip),才会产生尖叫异响。Stick-slip 效应会引起运动部件的速度产生单个或连续跳跃,造成部件的张弛冲击振动,产生冲击振动噪声^[9]。

一个施加正弦激励的 Stick-slip 简化模型,其运动方程可以写为:

$$m\ddot{x} + kx = p - F_f \quad (1)$$

式中: F_f —摩擦力。

可以进一步表示为:

$$\begin{cases} |F_f| \leq \mu_s mg (\dot{x} = 0) \\ F_f = \mu_d mg \cdot \text{sgn}(\dot{x}) (\dot{x} \neq 0) \end{cases} \quad (2)$$

式中: μ_s —静摩擦系数; μ_d —动摩擦系数; $\text{sgn}(\dot{x})$ —符号函数(指出参数的正负号)。

当 $\mu_s mg$ 不为0时,就会发生 Stick-slip 现象,在时域内表现为一段粘着的时间,经过傅里叶变换后,频域内既存在和激励力波形一样的基本频率,同时会有更高的频率成分出现^[10]。

摩擦副异响声压级随温度的变化如图1所示。

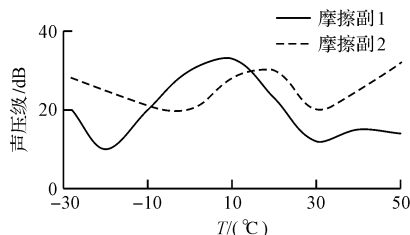


图1 摩擦副异响声压级随温度的变化

部件相对运动相互摩擦产生的尖叫声随温度的变化而变化,温度对尖叫异响的影响是非线性的。

1.2 敲击异响的形成机理

在路面激励下,硬质材料与硬质材料相互作用会产生敲击异响。空间不足和结构设计不合理等都会产生敲击异响,温度引起的部件质量、材料变形或紧固件松动等制造装配问题也会导致敲击异响。

物体间发生撞击的时间非常短,此时的冲击激励可以用函数(时域值)表示为:

$$\begin{cases} \delta(t - t_0) = 0 (t \neq t_0 \text{ 时}) \\ \int_{-\infty}^{\infty} \delta(t - t_0) dt = 1 \end{cases} \quad (3)$$

经过傅里叶变换后,频域值可表示为:

$$F(\omega) = \int \delta(t - t_0) e^{-j\omega t} dt = 1 \quad (4)$$

在频域上,如果激励力表现形式为 δ 函数形式,部件的所有频率都可以被激励起来。

若激励力是半个正弦波,表达式为:

$$y = \begin{cases} \sin \frac{\pi t}{t_0} & (0 < t < t_0) \\ 0 & (t > t_0) \end{cases} \quad (5)$$

经过傅里叶变换后,其频域表达式为:

$$F(\omega) = \int_0^{t_0} \sin \frac{\pi t}{t_0} e^{-j\omega t} dt = \frac{e^{-j\omega t_0} \pi \cos(\pi t_0) + j e^{-j\omega t_0} \omega \sin(\pi t_0) - \pi}{(\omega^2 - \pi^2) t_0} \quad (6)$$

车身部件发生碰撞的激励大多介于脉冲激励和正弦激励之间,是一种宽频带的激励谱;产生的敲击声频

率也是一种宽频带的。

1.3 异响评价方法

根据异响的形成机理,尖叫异响主要关注的是接触摩擦的平面切向方向,而敲击异响则是间隙方向。一般取计算所得相对位移前 30% 的大幅值的平均值作为该节点对的相对位移。

对于尖叫异响,可以将仿真得到的最大主峰峰值与试验所得脉冲率的倒数(即单个脉冲相对滑动位移)进行比较,当满足以下不等式时,认为会发生尖异响:

$$Max\ principal\ P2P(30\%) \geq 1/Impulse\ Rate\ (7)$$

对于敲击异响,一般将相邻部件在局部坐标系下间隙方向的最大相对位移和部件之间的最小间隙(即 Gap-Tolerance) 进行比较,满足下列不等式时,会发生敲击异响:

$$Max\ Relative\ displacement\ Z(30\%) \geq Gap-Tolerance\ (8)$$

2 参数获取

2.1 仪表板材料性能参数

在汽车仪表板中,大量使用 PP + EPDM_T20、PP_T20、PC/ABS 和 HDPE。为获取这些仪表板材料在不同温度下的性能参数,笔者对这 4 种材料进行准静态拉伸试验。

材料静态拉伸试件如图 2 所示。

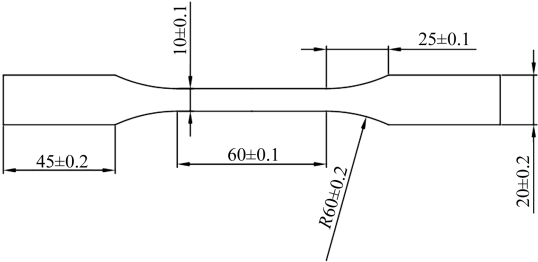


图2 材料静态拉伸试件

笔者结合 DIC 方法,得到了不同材料随温度变化的弹性模量和泊松比,为异响 CAE 分析有限元建模提供材料参数的试验数据。

本试验采用型号为 CMT-5205GD 的电子万能试验机,最大试验力为 200 kN; 高低温试验箱可提供 -70 ℃ ~ 150 ℃ 稳定的温度环境。试验之前,在试件表面喷斑,待其完全干燥后在环境箱内进行拉伸试验,使用 CCD 相机 2 s 拍摄记录一次变形。

对数字图像进行分析求解,得到不同温度下,材料的弹性模量 E、泊松比 μ 如表 1 所示。

表 1 材料的弹性模量 E、泊松比 μ

温度/(℃)	材料名称	E/MPa	μ
-30	PP + EPDM_T20	4 130	0.08
	PC/ABS	3 700	0.40
	PP_T20	3 900	0.25
	HDPE	1 100	0.45
10	PP + EPDM_T20	3 520	0.26
	PC/ABS	3 530	0.33
	PP_T20	3 430	0.42
	HDPE	980	0.46
23	PP + EPDM_T20	3 100	0.30
	PC/ABS	3 400	0.40
	PP_T20	2 060	0.33
	HDPE	890	0.46
50	PP + EPDM_T20	1 800	0.32
	PC/ABS	3 280	0.41
	PP_T20	1 600	0.40
	HDPE	740	0.48

2.2 RPN 和脉冲率

研究仪表板接触材料的摩擦特性对识别尖叫异响很有必要。笔者采用德国 Ziegler SSP-04 材料兼容试验机,可测得材料摩擦副产生 Stick-slip 运动的脉冲率和风险指数(risk priority number, RPN)。RPN 通常按照材料对发生尖叫异响的倾向程度分为高风险(6 ~ 10)、无风险(1 ~ 3)和临界(4 ~ 5,有一定风险)3 类。

将这两个部件放在环境舱内,通过设置调节试验时温度、湿度、压力和运动速度大小,可以测量不同温度 and 不同工况下 RPN 和脉冲率。

本次试验中,4 种工况的力和速度参数如表 2 所示。

表 2 4 种工况的力和速度参数

工况	法向力/N	滑动速度/(mm · s ⁻¹)
一	10	1
二	40	1
三	10	4
四	40	4

本次试验测试温度包括低温 -30 ℃ 和 10 ℃、常温 23 ℃ 和高温 50 ℃。

本文关注的材料对为 PC/ABS 和包覆材料 PVC 在不同温度和工况下的摩擦特性,其 RPN 值和脉冲率如表 3 所示。

表 3 RPN 值和脉冲率

温度/(℃)	工况	RPN	脉冲率
- 30	一	2	0.000 0
	二	2	0.000 0
	三	2	0.000 0
	四	2	0.016 7
10	一	4	0.341 7
	二	6	0.775 0
	三	3	0.125 0
	四	3	0.066 7
23	一	9	15.066 7
	二	10	4.175 0
	三	5	1.683 3
	四	6	0.866 7
50	一	9	8.066 7
	二	10	1.866 7
	三	8	5.000 0
	四	9	2.383 3

试验结果显示:PC/ABS 和 PVC 在低温 - 30 ℃ 无风险,相互接触不会产生尖叫异响,所以该温度下无需进行尖叫异响的 CAE 分析;在 10 ℃、23 ℃ 和 50 ℃ 均为高风险,说明该材料不兼容,容易产生异响风险,对发生 Stick-slip 运动的脉冲率求倒,即可得到在 10 ℃、23 ℃ 和 50 ℃ 温度下单个脉冲相对位移的范围分别为 1.290 3 mm~2.926 5 mm、0.066 4 mm~1.153 8 mm、0.124 mm~0.535 7 mm。该相对位移的范围值可作为仪表板是否存在尖叫异响的判断依据。

3 不同温度下的异响仿真分析

3.1 异响仿真建模

笔者使用有限元软件 Hyperworks 的异响分析专用模块 SNRD 进行分析,该软件利用实际载荷条件,沿潜在异响问题的边界创建评估线(evaluation line, E-Line),计算相邻两部件的相对位移,直接判断风险部位是否会发生敲击异响或尖叫异响。

仪表板和半截车身的有限元模型如图 3 所示。

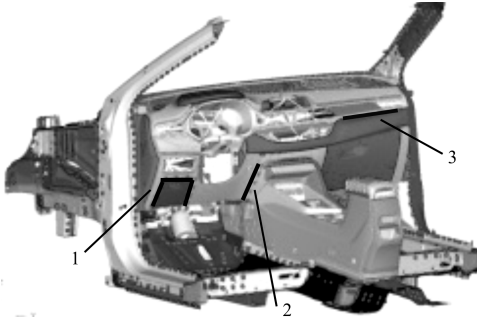


图 3 仪表板和半截车身的有限元模型

1 - ELine9000019;2 - ELine1039010;3 - ELine2400011

主要分析边界为 E-Line9000019、E-Line1039010 和 E-Line2400011。

间隙尺寸信息(DTS)如表 4 所示。

表 4 间隙尺寸信息(DTS)

E-Line	主动件	从动件	间隙/	公差/
			mm	mm
9000019	左下护板本体	储物盒盖板	0.5	±0.25
1039010	仪表板本体	左下护板本体	0.5	±0.25
2400011	中央装饰板本体	右包覆饰板本体	0	0

E-Line9000019 和 E-Line1039010 边界处两相邻部件的最小间隙均为 0.25 mm,可能存在敲击异响风险;E-Line2400011 边界处两相邻部件间隙为 0,相互接触。由材料兼容性试验可知,中央装饰板本体材料 PC/ABS 与右包覆饰板本体的包覆材料 PVC 不兼容,相互接触存在尖叫异响风险。

对存在风险的边界处创建 E-Line,E-Line 建模方法如图 4 所示。

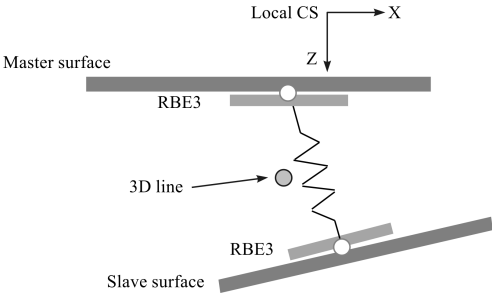


图 4 E-line 建模方法

首先,笔者在两相邻部件之间建立一条曲线(3D line)用来定义一系列节点对,两节点分别位于不同的部件上,中间用可定义刚度值的弹性连接单元 CBUSH 模拟,3D line 和这些节点对就构成了 E-Line。另外,需要将节点对定义在沿主面创建的局部坐标系中,其 z 向指向相邻部件的间隙方向,xy 平面为接触摩擦平面。

分析尖叫异响时需定义 CBUSH 沿局部坐标系 z 向刚度值 1 000 N/mm,因此,可以忽略该方向的相对位移,瞬态响应分析所得的节点对相对位移就被绘制在局部坐标系 xy 平面上;在此基础上,笔者定义峰峰值的主方向,再将局部坐标系进行变换,使其 x 向与峰峰值的主方向重合,峰峰值的最大值即为最大主峰峰值,用于评价尖叫异响。

笔者利用比利时路面上采集的路谱信号进行激励,计算频率为 0~80 Hz,瞬态响应分析可以输出模型上所有节点的位移,后处理即可得到 E-Line 上节点对在局部坐标系下的相对位移。

3.2 分析结果

E-Line 上的节点对在不同温度下产生的相对位移如表 5 所示。

表5 E-Line 上的节点对在不同温度下产生的相对位移

温度 /(℃)	节点对	E-Line9000019 /mm	E-Line1039010 /mm	E-Line2400011 /mm	温度 /(℃)	节点对	E-Line9000019 /mm	E-Line1039010 /mm	E-Line2400011 /mm
-30	1	0.055 2	0.496 3	-	10	1	0.055 8	0.596 3	0.255 7
	2	0.094 5	0.314 1	-		2	0.104 6	0.344 8	0.135 4
	3	0.137 9	0.226 9	-		3	0.143 0	0.218 8	0.124 3
	4	0.045 1	0.187 7	-		4	0.060 8	0.195 8	0.155 0
	5	0.119 4	0.246 1	-		5	0.114 5	0.272 5	0.173 9
	6	0.077 7	0.315 6	-		6	0.070 4	0.382 8	0.195 9
	7	0.076 3	0.382 6	-		7	0.078 1	0.474 9	0.224 1
	8	0.065 0	0.490 7	-		8	0.074 6	0.628 6	0.218 7
	9	0.078 5	0.574 5	-		9	0.080 4	0.731 6	0.209 7
	10	0.064 0	0.645 8	-		10	0.089 6	0.816 3	0.198 7
温度 /(℃)	节点对	E-Line9000019 /mm	E-Line1039010 /mm	E-Line2400011 /mm	温度 /(℃)	节点对	E-Line9000019 /mm	E-Line1039010 /mm	E-Line2400011 /mm
23	1	0.078 9	0.785 1	0.274 0	50	1	0.095 4	0.836 2	0.347 9
	2	0.134 0	0.439 8	0.154 3		2	0.180 8	0.450 1	0.239 7
	3	0.158 7	0.253 7	0.140 1		3	0.268 6	0.235 8	0.198 6
	4	0.062 2	0.226 3	0.173 3		4	0.136 2	0.244 8	0.205 4
	5	0.133 6	0.347 0	0.180 5		5	0.143 2	0.384 9	0.186 2
	6	0.088 8	0.510 5	0.189 2		6	0.096 5	0.586 6	0.172 5
	7	0.097 5	0.640 1	0.213 4		7	0.176 3	0.755 6	0.196 1
	8	0.090 0	0.844 7	0.204 2		8	0.170 6	1.008 9	0.194 2
	9	0.094 4	0.996 3	0.193 2		9	0.172 5	1.204 2	0.182 6
	10	0.120 6	1.106 5	0.182 5		10	0.170 5	1.338 6	0.164 9

E-Line9000019 处节点对最大相对位移在 50 ℃时超过两部件间的最小间隙,会发生敲击异响;在 -30 ℃、10 ℃和 23 ℃时,最大相对位移均小于部件最小间隙,不会发生敲击异响;同理,E-Line1039010 处在 -30 ℃、10 ℃、23 ℃和 50 ℃时都会发生敲击异响。对于 E-line 2400011,根据材料兼容性试验研究结果,在 10 ℃时节点对最大相对位移值小于 PVC-PC/ABS 材料摩擦副单个脉冲产生相对位移,不会发生尖叫异响;而在 23 ℃和 50 ℃时大于单个脉冲产生的相对位移,会产生尖叫异响,且随着温度升高,最大相对位移也越大。

根据不同温度下的异响分析结果可以看出:同一边界,在温度较低的情况下,不会产生异响,随着温度升高,产生异响的风险会随之增大。

针对分析结果,笔者提出建议:(1)增大左下护板本体和储物盒盖板之间以及仪表板本体之间的间隙,以减小高温时发生敲击异响;(2)在部件内板增加卡扣或加强筋数量,使部件连接更加紧固,提高部件刚度,达到减小甚至消除仪表板本体与左下护板本体间的敲击异响;(3)更换右侧饰板本体表面的包覆材料消除尖叫异响,前提是保证更换后的材料与 PC/ABS 兼容,相互接触不会产生尖叫异响。

4 实验及结果分析

笔者选择在常温下对仪表板异响问题进行试验验证,测点布置如图 5 所示。

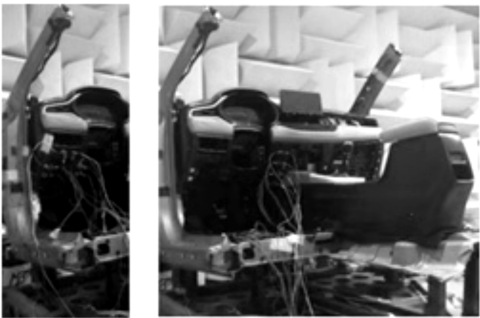


图5 测点布置

试验时将仪表板安装在半截车身上,并固定在振动台上,采用 MB Dynamic 公司的激振系统,用比利时路谱信号进行激励;在 E-Line9000019、E-Line1039010 上选取适量节点对进行布点,用加速度传感器测得每一个节点的加速度,然后将信号进行积分和滤波处理,即可得到每一个节点对在局部坐标系下的相对位移。

笔者在 E-Line 上取相对应节点对,试验值与仿真值对比图如图 6 所示。

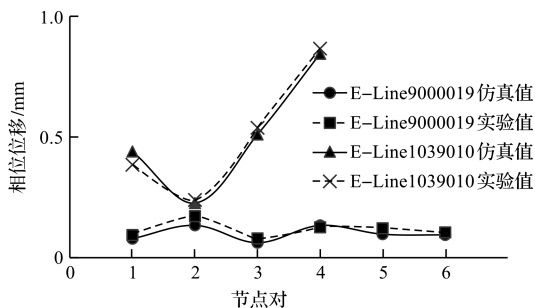


图 6 试验值与仿真值对比图

两条曲线趋势基本一致,且在左侧下护板与仪表板本体相邻位置缺少支撑部件,振动幅度较大,能够听到明显的敲击声;中央装饰板与右侧包覆饰板相邻位置听到有“吱吱”的异响,与仿真结果相同,可以认为异响仿真方法有效可行。

5 结束语

针对汽车仪表板在不同温度下存在的异响问题,笔者对仪表板的主要材料进行了准静态拉伸试验和材料兼容性试验。结论如下:

(1) 试验测得了不同温度下仪表板材料 PP + EPDM_T20、PP_T20、PC/ABS 和 HDPE 的弹性模量和泊松比,作为有限元模型的参数输入;同时测得了 PVC-PC/ABS 材料摩擦副的异响风险指数和脉冲率,为仪表板尖叫异响的识别提供了参考依据;

(2) 建立了不同温度下的异响 CAE 分析模型,利用瞬态响应分析对其进行了求解,结果显示: E-Line9000019 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不会发生敲击异响,在 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会发生敲击异响; E-Line1039010 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时均会发生敲击异响; E-Line2400010 在 $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时不会发生尖叫异响,在 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时会发生尖叫异响。随着温度升高,节

点对的最大相对位移也增大,产生异响的风险也随之增大;针对该结果提出了预防和减小异响发生的建议;

(3) 在常温 $23\text{ }^{\circ}\text{C}$ 设计了异响试验验证,仿真曲线与试验曲线趋势基本一致,说明异响仿真和试验具有良好的一致性,证明了该建模和仿真方法的可行性和仿真结果的可靠性。

参考文献 (References):

- [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] 李英平. 汽车车身模态分析实例研究[J]. 汽车技术,2007(6):15-17.
- [3] 朱才朝,秦大同,李润方. 车身结构振动与车内噪声声场耦合分析与控制[J]. 机械工程学报,2002,38(8):54-58.
- [4] 李颖琰,孙跃辉,咎建明,等. 汽车仪表板异响分析研究[J]. 汽车技术,2010(12):27-31.
- [5] SHIN S H, CHEONG C. Experimental characterization of instrument panel buzz, squeak, and rattle (BSR) in a vehicle[J]. **Applied Acoustics**, 2010,71(12):1162-1168.
- [6] TATARI M, FARD M, NASROLLAHZADEH N, et al. CAE characterization and optimization of automotive seat rattle noise[J]. **World Journal of Engineering & Technology**, 2014,2(3):201-210.
- [7] 石建策. 汽车仪表板异响 CAE 分析技术研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2017.
- [8] 崔晓鹏. 汽车车门系统异响的控制研究[D]. 长春:吉林大学汽车工程学院,2017.
- [9] 庞 剑, 谌 刚, 何 华. 汽车噪声与振动-理论与应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2005.
- [10] TRAPP M, CHEN F. Automotive buzz squeak and rattle-mechanics, analysis, evaluation and prevention[M]. Amsterdam:Elsevier,2012.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

谈婷婷,杜建科,李洪亮,等. 不同温度下的汽车仪表板异响 CAE 研究[J]. 机电工程,2020,37(6):665-670.

TAN Ting-ting, DU Jian-ke, LI Hong-liang, et al. Study on rattle and squeak in automobile instrument panel at different temperature based on CAE[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2020,37(6):665-670.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>