

基于用户关联的汽车仪表板失效验证及优化设计

邓赛帮, 钱银超

(广州汽车集团股份有限公司汽车工程研究院, 广州 511434)

摘要:为解决某款汽车仪表板异响及失效问题,本文通过用户关联采集实际载荷谱,并基于损伤等效原理对载荷谱进行加速等效,生成台架载荷谱。以台架载荷谱为输入进行台架失效验证,复现了仪表板异响及失效问题,最终通过优化设计解决了该异响及失效问题。

关键词:汽车仪表板;用户关联;损伤等效;台架载荷谱;优化设计

中图分类号:U463.83⁺7

文献标志码:A

DOI:10.15917/j.cnki.1006-3331.2026.03.011

Failure Verification and Design Optimization of Automotive Dashboard Based on User Correlation

DENG Saibang, QIAN Yinchao

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

Abstract:To solve the problems of abnormal noise and failure in the instrument panel of a certain vehicle, the authors collect the actual load spectrum through user-correlated tests and accelerate it based on the principle of damage equivalence to generate a bench test load spectrum. With the bench load spectrum as input, bench failure verification is performed to reproduce the abnormal noise and failure of the instrument panel, and these problems are ultimately resolved through design optimization.

Key words:automobile instrument panel; user correlation; damage equivalence; bench load spectrum; design optimization

随着我国汽车研发技术水平的日益提升,国产汽车的市场占有率与日俱增,消费者对国产汽车的舒适性及可靠性也愈发重视。汽车仪表板是异响频发区域,其耐久可靠性直接影响驾乘舒适性与安全性。因此,设计中必须综合考虑耐久可靠性、乘员碰撞保护和人机工程要求。而仪表板在实际使用中能否满足这些要求,很大程度上取决于用户真实的使用场景。为此,从用户使用场景出发,开展基于用户关联的汽车仪表板正向开发至关重要^[1]。

本文采用用户关联方法解决某车型仪表板异响引发的客户投诉问题。该方法通过采集实际行驶载荷数据并生成台架载荷谱,成功复现了失效模式,并据此优化结构设计,最终解决了异响问题。同时,可将该方法推广至其他车型开发中,以期提升仪表板可靠性提供实践参考。

1 仪表板台架载荷谱生成

为研究仪表板异响及失效问题,需获取能够复现实际使用工况的台架载荷谱。获取台架载荷谱的具体流程如下:①通过数据采集仪器获取用户行驶过程中的载荷数据。②对载荷数据进行加速等效处理。③通过最大包络离散化和低频载荷谱等效转换,最终生成适用于台架试验的载荷谱^[2]。

1.1 用户关联及载荷谱采集

为准确复现仪表板在真实使用场景下的失效模式,需建立从用户实际驾驶到台架试验的载荷关联方法。

1.1.1 用户关联流程

基于用户关联的汽车仪表板加速试验,首先需调查用户的实际使用习惯,在此基础上开展试验场道路载荷谱采集,最后通过用户关联分析,将实测路谱转换为台架试验载荷谱^[3]。

收稿日期:2025-08-30。

第一作者:邓赛帮(1991—),男,硕士,工程师,主要从事车身内外饰疲劳仿真及可靠性设计相关工作。E-mail:dengsaibang29@gac.com.cn。

1.1.2 仪表板载荷谱采集

为获取仪表板载荷谱, 本文搭建了加速度数据采集系统。该系统主要由加速度传感器、数据采集器、信号传输线、电脑及 Ncode 软件构成。

通过 Ncode 软件得到的仪表板加速度载荷谱如图 1 所示。分析图 1 数据可知, 仪表板 Z 向加速度最大值为 $2.59g$, 而 X 向和 Y 向加速度最大值仅为 $0.7g$ 。这一结果表明车辆行驶过程中, 仪表板主要承受来自路面的 Z 向冲击载荷。因此, 本文选取仪表板 Z 向加速度进行后续的载荷谱加速转换与台架验证。

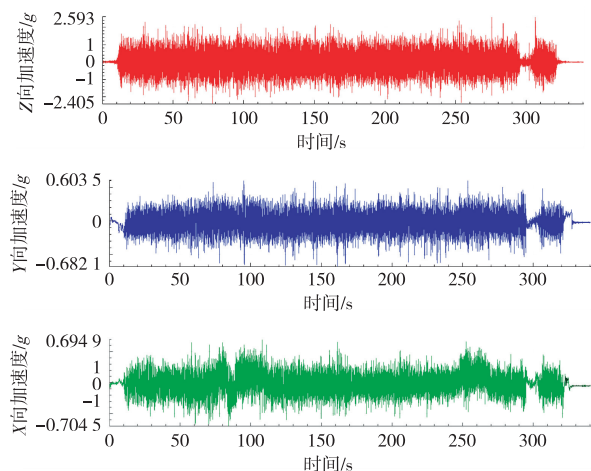


图1 仪表板加速度载荷谱

1.2 载荷谱加速等效

台架试验的原始载荷谱源于实车采集的加速度信号, 而直接使用原始谱进行试验的周期过长。为缩短试验周期、加快产品开发进程, 需对原始载荷谱进行编制, 从而生成加速载荷谱。

依据 Miner 线性累积损伤理论对原始载荷谱进行加速等效处理, 可在保持累积损伤不变的前提下缩短试验时间。该理论通过计算载荷循环产生的累积损伤来评估疲劳寿命。其计算过程如下: ①根据雨流计数结果, 计算交变载荷的应力幅值计算对应的失效循环次数 N_i 。②结合线性损伤理论, 计算出 n_i 次循环所产生的损伤 $D_i = n_i / N_i$ 。③以此类推, 最终得到总损伤 D 。线性损伤理论的计算公式如式 (1) 所示^[4-5]。

$$D = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (1)$$

式中: l 为交变载荷应力幅的总数量; i 为应力幅值的级数序号; n_i 为第 i 个交变载荷应力幅下的循环次数; N_i 为第 i 个交变载荷应力幅下的失效寿命。

载荷谱加速等效遵循损伤等效原则, 即零部件在承受不同载荷下产生的应力相等时, 其所受损伤也等效。整个加速等效过程在 Ncode 软件中完成, 具体步骤如下: ①利用加速度载荷谱分别计算冲击响应谱 (Shock Response Spectrum, SRS) 与疲劳损伤谱 (Fatigue Damage Spectrum, FDS)。SRS 描述结构在交变载荷作用下峰值响应随频率的变化历程, 用于评估结构对不同频率冲击载荷的峰值响应特性; FDS 描述基于时域载荷换算成的线性累积损伤随频率的变化历程, 用于表征该段信号对结构造成的损伤效果^[6]。②按照规范循环合成得到总的 FDS 和极限响应谱 (Extreme Response Spectrum, ERS)。③基于损伤等效原则, 结合仪表板台架试验标准, 设定台架试验时间为 16 h 并进行等效加速, 生成如图 2 所示的仪表板台架试验加速载荷谱。

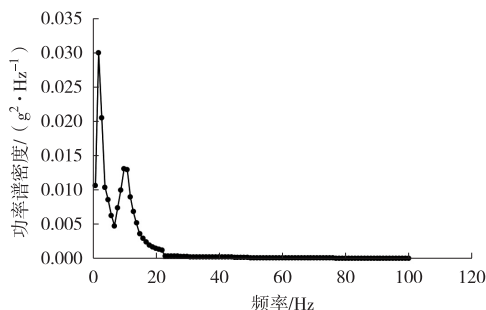


图2 仪表板台架加速载荷谱

1.3 载荷谱最大包络离散化

通过损伤等效原则生成的仪表板台架试验加速载荷谱表现为连续频谱, 但实际台架加载需要离散化的载荷信号, 因此需对该载荷谱进行离散化处理。离散化的原则包括以下两点^[7]: ①保留原载荷谱在各频率下的功率谱密度峰值; ②确保离散化后的载荷谱能够复现结构件在每个频率下的振动特性。依据该原则生成的仪表板最大包络离散化及台架试验加速载荷谱如图 3 所示。

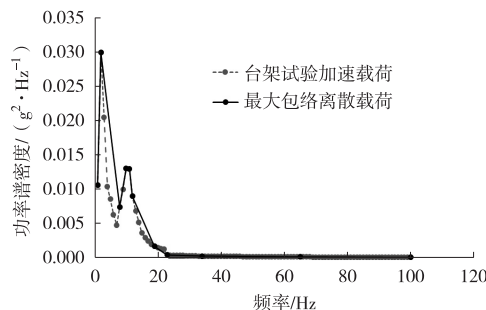


图3 仪表板最大包络离散化及台架试验加速载荷谱

1.4 低频载荷谱等效转换

由于振动试验台架无法有效加载低于 5 Hz 的功率谱密度(Power Spectral Density, PSD),需将低频能量重新分配至高频段进行加载,并计算重新分配后的均方根(Root Mean Square, RMS)。转换过程中需遵循能量等效原则,即保持总能量一致(即总均方根值不变)^[8]。低频载荷谱等效转换流程如图 4 所示。

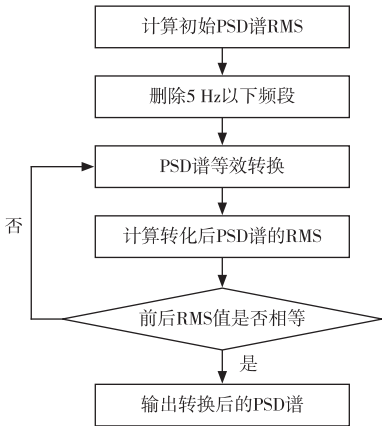


图 4 低频载荷谱等效转换流程图

1.5 台架载荷谱生成

仪表板耐久试验采集的原始载荷谱经载荷谱加速等效、最大包络离散化、低频载荷谱等效转换等处理后,生成仪表板台架载荷功率谱密度,作为台架加载的最终载荷形式。仪表板台架载荷功率谱密度如图 5 所示。

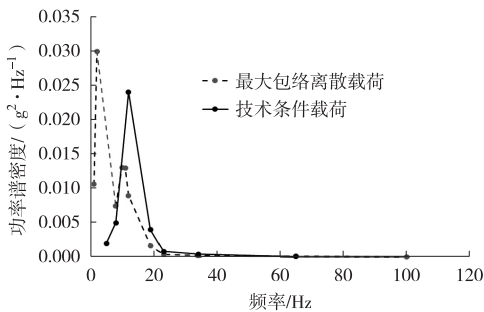


图 5 仪表板台架载荷功率谱密度

2 基于台架载荷的仪表板失效验证

为验证仪表板台架载荷谱的有效性,并复现用户实际使用过程中出现的储物盒异响问题,本文开展了仪表板振动耐久台架试验。试验过程中,先用螺栓将仪表板及其车身连接支架固定在台架上。然后,输入生成的台架载荷谱进行加速验证,以模拟实车工况。仪表板振动耐久台架试验如图 6 所示。

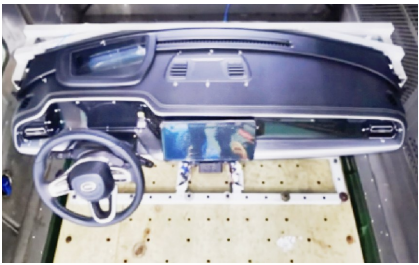


图 6 仪表板振动耐久台架试验

用户实际使用过程中,仪表板最常见的失效形式是螺栓松动,螺栓松动会引发异响。因此台架试验应重点关注螺栓松动问题。图 7 为仪表板系统与车身螺栓连接位置及编号示意图,其中 $L_1 \sim L_5$ 分别为 5 个螺栓的编号。

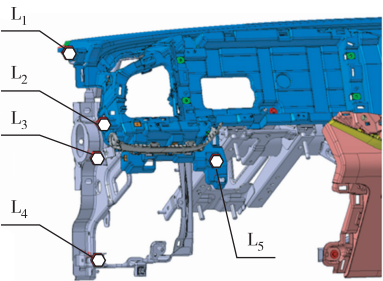


图 7 仪表板系统与车身螺栓连接位置及编号示意图

通过测量仪表板与车身连接螺栓在试验前后的扭矩发现,耐久试验后螺栓 $L_1 \sim L_5$ 均发生了扭矩衰减,具体衰减情况见表 1。其中,位于储物盒附近的螺栓 L_1 扭矩衰减最为严重,变化率高达 94%,已接近完全失效状态。这一现象与市场调研中发现的储物盒异响问题高度吻合。本次台架试验成功复现了该异响问题,从而验证了所生成的仪表板台架载荷谱的有效性。

表 1 优化前连接螺栓耐久试验扭矩对比及变化率

螺栓编号	试验前扭矩/(N·m)	试验后扭矩/(N·m)	变化率/%
L_1	3	0.18	94.0
L_2	3	0.92	69.3
L_3	3	0.48	84.0
L_4	3	0.33	88.9
L_5	3	1.28	57.3

3 仪表板结构优化设计

为解决汽车仪表板异响问题,提升用户体验和品牌形象,对仪表板结构进行了优化设计。根据仪表板台架试验和螺栓扭矩衰减测试结果,螺栓 L_1 和 L_4 处

的力矩衰减最为严重,需进行相应加强。优化方案是延长螺栓 L4 处的横梁,并将该横梁搭接到仪表板主体结构上。同时增加两个螺丝连接(L6 和 L7 为新增螺栓),使仪表板与车身的固定点由 5 个增至 7 个。优化后的仪表板系统与车身螺栓连接位置及编号示意图如图 8 所示。

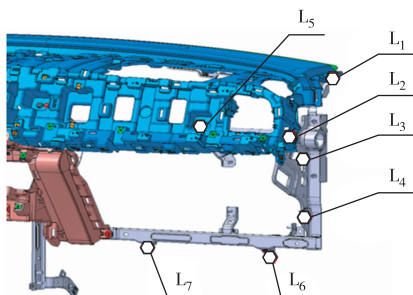


图 8 优化后的仪表板系统与车身螺栓连接位置及编号示意图

优化后的仪表板系统通过了台架耐久试验,试验过程中未出现异响问题。试验后对螺栓扭矩衰减情况进行了测试(见表 2),结果显示各螺栓扭矩变化率均降至 35%以内,衰减得到明显改善。同时,耐久试验后的仪表板系统结构、功能、性能均无异常。后续搭载整车的市场验证也表明,该优化方案有效解决了异响失效问题。

表 2 优化后连接螺栓耐久试验扭矩对比及变化率

螺栓编号	试验前扭矩/(N·m)	试验后扭矩/(N·m)	变化率/%
L ₁	3	2.39	20.3
L ₂	3	2.02	32.6
L ₃	3	2.08	30.6
L ₄	3	1.99	33.6
L ₅	3	1.96	34.6
L ₆	3	2.22	26.0
L ₇	3	2.36	21.3

4 结 论

本文以用户关联的汽车仪表板采集载荷谱为基础,通过损伤等效原理和载荷外推理论对载荷谱生成台架加速载荷谱,并基于该载荷谱对仪表板进行台架失效验证和优化设计,据此得出以下结论:

1) 基于加速载荷谱的仪表板台架试验能复现仪表板异响及螺栓失效问题,验证了台架载荷谱生成方法的有效性。

2) 通过对仪表板进行优化设计,解决了仪表板异响及失效问题,该验证方法可推广应用于其他车型仪表板开发流程中。

参考文献:

- [1] 朱翔麟,许翔,谢然,等. 汽车仪表板异响仿真优化及试验研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(1): 150-154.
- [2] 蓝力生. 基于损伤等效的螺旋弹簧疲劳试验加速载荷谱研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2022:28-36.
- [3] 钱银超,杨万庆,全锋,等. 用户关联汽车仪表板载荷谱正向开发方法研究[J]. 汽车零部件, 2024(1): 66-69.
- [4] 邓赛帮,谭东升,刘向征,等. 基于有限元理论的车门疲劳分析及优化[J]. 现代制造工程, 2019(6): 50-54.
- [5] 葛文韬,黄晖,段龙杨,等. 基于实测道路谱的纯电动轻卡电池包支架动态载荷仿真及疲劳分析[J]. 振动与冲击, 2020, 39(9): 267-273.
- [6] 郑国峰. 典型汽车部件载荷谱及加速耐久性编辑与实验方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2017:26-34.
- [7] 花菲菲,郑松林,冯金芝,等. 基于时域损伤编辑法的整车道路模拟试验谱编制[J]. 机械强度, 2015, 37(5): 964-971.
- [8] 钟响亮. 多轴随机振动加速疲劳载荷谱编制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017:27-38.