

◇ 研究报告 ◇

某车型关门时安全带卷收器异响问题分析和优化

张 浩[†] 饶 刚 高小清 屈少举 邓 休

(东风汽车集团股份有限公司技术中心 武汉 430056)

摘要: 针对某车型在关门时车内出现的振颤异响问题,识别车内异常噪声产生原因为关门产生振动激励,经车身和安全带卷收器固定支架传递至卷收器本体,并引起卷收器内部异响。建立了车身和卷收器的系统动力学模型,分析了卷收器安装支架对振动传递特性的影响,完成了卷收器单体在台架上响度随频率变化的试验,获得了卷收器单体噪声的敏感频率。通过合理优化卷收器安装支架刚度,将振动传递峰值与卷收器敏感频率避开,有效地改善了异响问题,为同类问题的分析和优化提供了参考。

关键词: 关门;卷收器;异响;振动传递

中图法分类号: TB535

文献标识码: A

文章编号: 1000-310X(2024)06-1230-06

DOI: 10.11684/j.issn.1000-310X.2024.06.005

Analysis and optimization on abnormal noise caused by retractor when closing the door of a vehicle

ZHANG Hao RAO Gang GAO Xiaoqing QU Shaoju DENG Xiu

(Dong Feng Motor Corporation Technical Center, Wuhan 430056, China)

Abstract: Aiming at the issue of vibration and abnormal noise of a certain vehicle when closing the door, which was identified the cause was the vibration excitation generated by closing the door, then transmitted to the retractor through the body and seat belt bracket, and caused abnormal noise inside the retractor. A system dynamics model of the vehicle body and the retractor was established, and the impact of the installation bracket of the retractor on vibration transmission characteristics was analyzed. The loudness test of the belt retractor was completed with sweep excitation, and obtained the sensitive frequency of the belt retractor. By reasonably designed the stiffness of the seat belt bracket of the retractor, the vibration transmission peak is avoided from the sensitive frequency of the retractor, and the problem of abnormal noise is significantly improved. It provides a reference for the analysis and optimization of similar problems.

Keywords: Closing the door; Retractor; Abnormal noise; Vibration transmission

2023-06-14 收稿; 2023-08-09 定稿

作者简介: 张浩 (1991-), 男, 重庆云阳人, 硕士, 研究方向: 车辆振动与噪声控制。

[†] 通信作者 E-mail: zhanghao_0803@163.com

0 引言

卷收器是汽车安全带的重要部件,其产生的异响是车辆噪声的重要来源之一,严重影响乘坐舒适性。卷收器异响产生的激励主要来源道路或关门冲击,异响类型主要表现为两种:一种是卷收器敏感组件撞击异响;一种是卷收器的共振异响^[1]。

研究表明,卷收器的模态、安装点传递函数和单体振动噪声对卷收器异响具有重要影响。文献[2]通过计算机辅助工程分析,指出在关门瞬间卷收器产生共振会导致卷收器内部结构相互碰撞产生异响。文献[3]通过提升优化车身结构,降低了车身减振器安装点到卷收器安装点的异响敏感度,从传递函数上对异响进行了有效控制。文献[4]通过试验得出传递函数对卷收器异响声大小具有重要影响,卷收器异响水平方向的加速度阈值小于垂直方向的加速度阈值。

卷收器单体振动噪声控制主要通过合理的结构设计和声学包裹来优化。文献[5]对车感座的材料进行了研究,发现热塑性聚烯烃等软材料在中高频段的噪声水平明显低于硬材料。文献[6]在不改变结构和材料的基础上,在车感座内增加一层软垫,卷收器小球撞击噪声得到了明显改善。此外,卷收器异响主要通过空气传播至人耳,利用吸隔声材料对车感小球侧的端盖进行包裹也有明显的改善效果^[7]。目前,针对卷收器关门激励下的异响设计与控制研究还较少。本文通过计算卷收器的模态、车身结构传递函数和卷收器单体振动噪声,系统分析了卷收器异响的控制方法。以某SUV前门关闭时引起的卷收器异响为研究对象,基于振动传递理论分析,通过设计多种卷收器安装结构,验证了分析方法的准确性,为同类问题提供一定的参考。

1 问题描述

某SUV车型在开发阶段,在中大力度关闭前排车门时,车内产生了明显的共振声,严重影响了整车品质感。通过主观评价,发现异响来自车辆B柱下端,拆除卷收器零件后关门时异响消除,初步判断异响为关门时车门对车门框的激励,经车身传递至卷收器后,导致卷收器内部产生共振声。

为分析异响产生的具体原因,测试了关门工况下车内前排人员人耳处噪声,卷收器安装点螺栓和卷收器本体框架上的振动信号,如图1所示。为减小误差,分别进行了3次测试。



图1 关门卷收器振动测试

Fig. 1 Retractor vibration test when closing door

汽车关门声的能量主要集中在中低频,且在短时间内完成,采用小波分析具有很好的效果^[8]。测试完成后,截取关门瞬间所在的1 s时间段的噪声数据进行小波分析,得到的结果如图2所示。

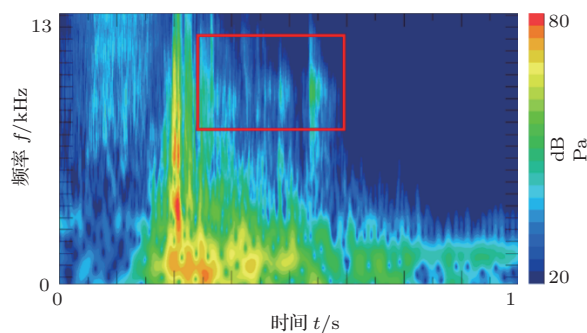


图2 卷收器异响噪声小波分析

Fig. 2 Wavelet analysis of abnormal noise in a retractor

从图2中可以看出,卷收器共振声在频率上主要集中在中高频段(对应红色矩形框区域),在关门撞击后持续时间约0.3 s,严重影响关门声品质。

对关门瞬间所在的1 s时间段的卷收器安装点的振动数据进行频谱分析,得到结果如图3所示。可以看出,关门产生的振动传递至卷收器安装点主要集中在28 Hz附近,超出其他频率峰值25 dB以上。

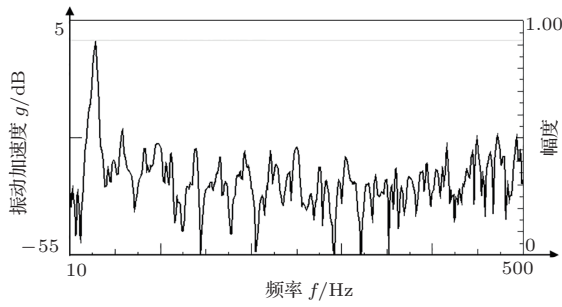


图3 卷收器安装点螺栓处振动

Fig. 3 Vibration spectrum analysis at bolt of retractor vibration

2 异响产生机理

车辆在关门瞬间,车门与车身撞击产生的撞击,该激励会引起门板、车身板件、门锁等结构产生振动和噪声,同时该振动经车身结构传递至卷收器支架,并引起卷收器振动产生噪声。因此,卷收器噪声与关门激励、振动传递和本体特性相关,可以通过式(1)进行分析:

$$P = \sum_{i=1}^n F_i H(\omega) \text{NTF}, \quad (1)$$

其中, P 为目标位置的总声压级, F_i 为第*i*个车门激励力, $H(\omega)$ 为门框至卷收器本体的振动传递函数,NTF为卷收器的噪声传递函数。

车辆在关门瞬间产生的激励主要为Y向,作用点集中于锁扣点,激励的频率主要集中于10 ~ 30 Hz 频段内^[9]。

2.1 振动传递

卷收器通过支架安装至车身上,为了便于分析振动传递,建立关门时动力学模型,如图4所示。

图4中, M 和 m 分别代表车身和卷收器的质量, K_1 和 K_2 分别为悬架系统和卷收器安装支架刚度, C_1 和 C_2 分别为悬架系统和卷收器安装支架阻尼。当系统在关门激励力 F_t 作用下,系统绕 O 点旋转。

此时系统动力学方程为

$$\begin{cases} m\ddot{x} + C_2(\dot{x} - \dot{\theta}h) + K_2(x - \theta h) = 0, \\ J\ddot{\theta} - C_2(\dot{x} - \dot{\theta}h) - K_2(x - \theta h) - 2K_1\theta L - 2C_1\dot{\theta}L + M_t = 0, \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, x 为卷收器的位移, θ 为系统的旋转角速度, h 为卷收器安装点距旋转中心点 O 的高度, L 为

悬架与旋转中心点 O 的距离, M_t 为关门时车门撞击门框的激励力对旋转中心点 O 产生的力矩。

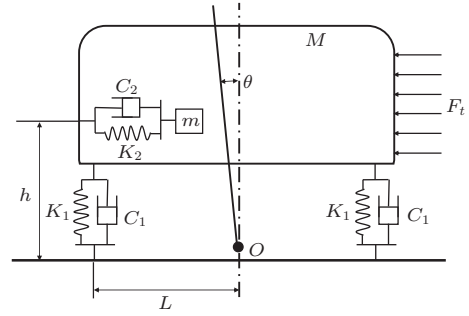


图4 车身与卷收器系统动力学模型

Fig. 4 System dynamic model of body and retractor

记 $H(\omega)$ 为激励力到卷收器的传递函数, $H_\theta(\omega)$ 为激励力到车身的传递函数,单位激励力矩为 $M_t = e^{i\omega t}$,从而有

$$\begin{cases} x = H(\omega)e^{i\omega t}, \\ \dot{x} = i\omega H(\omega)e^{i\omega t}, \\ \ddot{x} = -\omega^2 H(\omega)e^{i\omega t}, \end{cases} \quad (3)$$

以及

$$\begin{cases} \theta = H_\theta(\omega)e^{i\omega t}, \\ \dot{\theta} = i\omega H_\theta(\omega)e^{i\omega t}, \\ \ddot{\theta} = -\omega^2 H_\theta(\omega)e^{i\omega t}, \end{cases} \quad (4)$$

分别代入式(2)可得

$$H(\omega) = \frac{hA_1}{A_2A_3 - hA_1^2}, \quad (5)$$

式(5)中,

$$A_1 = i\omega C_2 + K_2,$$

$$A_2 = -m\omega^2 + i\omega C_2 + K_2,$$

$$A_3 = J\omega^2 - i\omega C_2h - K_2h - 2K_1L - 2i\omega C_1L.$$

依据上述理论可分析,改变卷收器安装支架刚度 K_2 可以影响关门激励力到卷收器的频响特性,如图5所示。可见,峰值 f_2 频率与图3中的峰值频率对应,说明支架刚度 K_2 对该系统的传递特性具有重要影响。同时,增加支架的刚度,即提升卷收器模态,频响特性曲线的第二个峰值由 f_2 后移到 f'_2 处,可以明显降低振动传递特性。实际工程中可以通过提升卷收器安装支架刚度或增加安装点数量等形式实现。

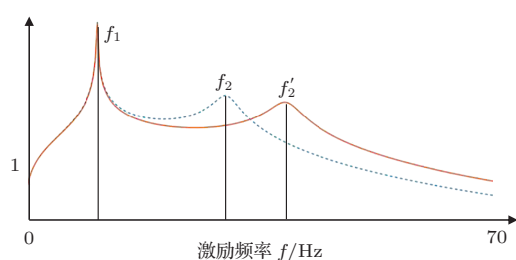


图5 关门激励力到卷收器的频响特性

Fig. 5 Frequency response characteristics of door closing excitation to retractor

2.2 单体特性

卷收器单体在不同激励频率下具有不同的噪声大小,该特性可通过台架试验获得,并可结合主观评价与客观测试进行判断优劣。主观评价常用打分法进行,由专业工程师在现场进行评价打分。客观测试主要采用声压级或心理声学参数进行评估。在异响测试中,声品质参数响度(Loudness)、粗糙度(Roughness)、尖锐度(Sharpness)、抖动度(Fluctuation)是主要分析参数,其中响度可以很好地反映声音的变化,客观反映异响的主观评价水平^[10]。定义1 kHz、声压级为40 dB纯音的响度为1宋(Sone)。根据Zwicker响度计算模型,每个1/3倍频程对应Bark域上的特征响度计算为

$$N'(z) = 0.08 \left(\frac{E_{TQ}}{E_0} \right)^{0.23} \left[\left(0.5 + 0.5 \frac{E}{E_{TQ}} \right)^{0.23} - 1 \right]. \quad (6)$$

然后进行积分得到总响度:

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N'(z) dz, \quad (7)$$

式(7)中, E 为声音的激励, E_{TQ} 为绝对听阈下的激励, E_0 为基准声强下的激励, z 为临界带宽。

台架试验时,将卷收器按照实车安装姿态装在工装上,如图6所示。振动激励选择关门冲击方向,即整车Y向,激励频率为10~70 Hz扫频,在距离卷收器上方150 mm处布置传声器。

测试完成后,计算卷收器单体的响度特性曲线,如图7所示。从结果可以看出,卷收器单体响度在A、B、C三点,对应28 Hz、38 Hz、51 Hz附近存在明显峰值,且响度曲线在43 Hz以后呈明显增大趋势。

基于上述分析可知,卷收器异响原因在于关门产生激励传递至卷收器安装时,主要为以28 Hz为中心的频率成分,且卷收器本体特性在28 Hz存在

峰值,导致响应突出。因此,综合考虑振动传递和卷收器单体特性,将振动传递第二个峰值设计到40~43 Hz之间最为理想。

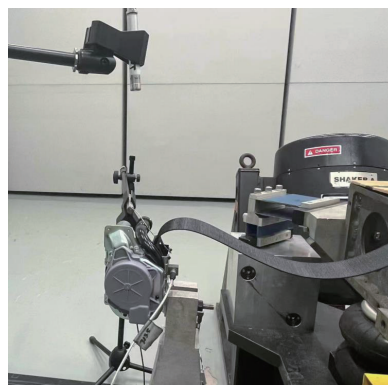


图6 卷收器单体噪声测试

Fig. 6 Noise test of retractor

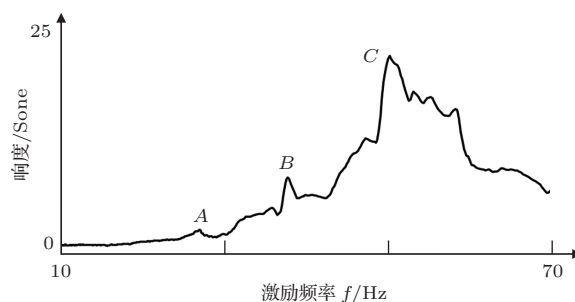


图7 卷收器单体响度曲线

Fig. 7 Loudness curve of the retractor

3 改善验证

3.1 问题改善对策

基于上述分析,本案例卷收器异响原因在于振动传递和卷收器特性峰值对应,考虑到工程实际情况,在不更改卷收器单体的情况下,提升卷收器支架刚度,将振动传递峰值设计到40~43 Hz之间。

考虑到安全带卷收器与安全相关,在不更改原下安装支架的基础上,设计两个上支架方案如图8所示。其中图8(a)为原始状态,卷收器通过一个下支架固定安装。图8(b)为方案1,在原有下支架基础上,增加一个厚度1.5 mm、中空结构的上支架,与车身B柱内板采用螺钉连接,与卷收器采用铆接固定。图8(c)为方案2,支架与车身和卷收器的连接与方案1相同,上半部分相比方案1对中空结构进行了填补,下半部分增加了两条交叉筋。

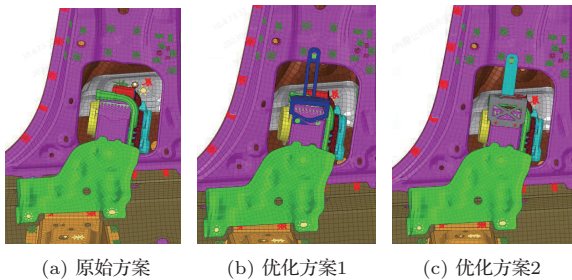


图8 卷收器支架原始方案与优化方案

Fig. 8 Original and optimized solutions of the retractor bracket

建立完整的卷收器有限元模型，其中织带按照原始状态进行质量等效处理，网格大小采用 $2\sim4\text{ mm}$ 。将卷收器模型固定到整车模型上进行有限元模态分析，在计算机仿真软件下计算各方案的模态频率如表1所示，方案1和方案2均有不同程度提升，其中方案1与设想相吻合。卷收器模态振型如图9所示，为卷收器绕着支架下端产生的Y向摆动。

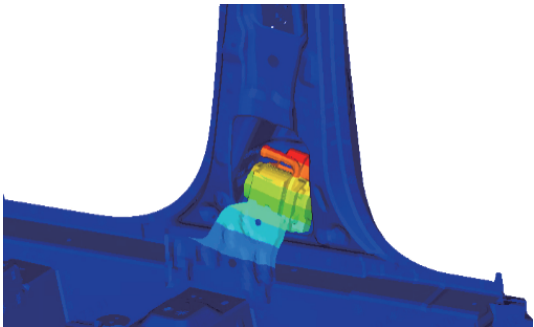


图9 前排卷收器模态振型

Fig. 9 Mode shape of retractor

表1 卷收器模态频率分析结果
Table 1 Modal frequency analysis results of retractor

方案	模态频率/Hz
初始	29
方案1	43
方案2	47

3.2 改善验证

制作方案1和方案2的样件进行实车评价验证，主观评价方案1可实现问题优化改善，方案2仍存在明显异响。优化后的噪声测试结果如图10所示，中高频的共振声已消除。

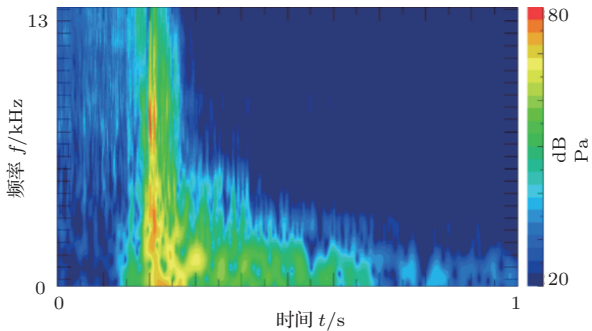


图10 改善后车内噪声小波分析

Fig. 10 Wavelet analysis of improved interior noise

对比原始状态、方案1和方案2的卷收器安装点的振动情况，如图11所示。原始方案因卷收器安装支架刚度较低，振动传递峰值在 28 Hz 存在明显峰值，且与敏感频率吻合，导致安装点振动和共振声均明显。方案2卷收器安装支架刚度过高，振动频率后移，卷收器在此激励下响应同样偏大。方案1通过合理设计卷收器安装支架刚度，将振动传递与卷收器敏感频率避开，有效地控制了异响。

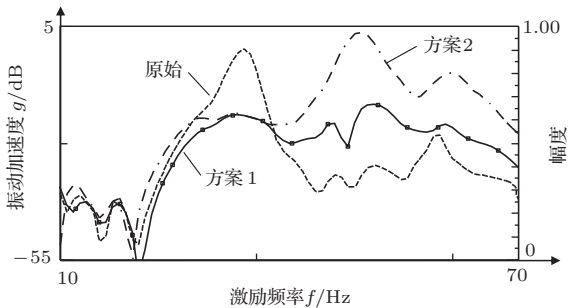


图11 各方案卷收器安装点振动对比

Fig. 11 Vibration comparison at the mount point of different schemes

4 结论

本文针对某车型前门关闭时的振颤异响问题，通过测试明确异响为关门产生的激励经车身传递至卷收器导致。进一步分析得到，车身传递函数和卷收器单体特性的峰值相近，导致车内异常噪声。通过合理设计卷收器支架刚度，避开车身传递函数峰值和卷收器敏感频率，制作样件进行改善验证，方案有效。

(1) 关门激励力传递至卷收器的振动传递函数受卷收器安装支架刚度的重要影响。

(2) 卷收器单体噪声响应特性与激励频率具有关联,在卷收器选型时应充分考虑。

(3) 避免关门激励频率与卷收器单体特性的敏感频率相近,可有效控制卷收器的噪声水平。

参 考 文 献

- [1] 朱文斌, 许翔, 田林, 等. 汽车安全带卷收器异响问题的研究[J]. 汽车零部件, 2019(5): 88–91.
Zhu Wenbin, Xu Xiang, Tian Lin, et al. Research on abnormal sound of seat belt retractor in automobile[J]. Automobile Parts, 2019(5): 88–91.
- [2] 马帅帅, 李广, 聂素祥, 等. 某乘用车前排安全带卷收器关门振响问题的研究[J]. 汽车零部件, 2017(4): 16–19.
Ma Shuaishuai, Li Guang, Nie Suxiang, et al. Research on the vibration problem of front seat belt retractor in a passenger car when closing the front door[J]. Automobile Parts, 2017(4): 16–19.
- [3] Guo Y, Gong X, Tu Z, et al. A systematic approach for rattle problem detection and prevention of seat belt retractors[C]. SAE China, 2012.
- [4] Payer J, Amort M, Girstmair J, et al. Seat belt retractor noise test correlation to 2DOF shaker test and real vehicle comfort[C]. SAE Technical Paper, 2018, 2018-01-1507.
- [5] Liu K, de Vilbiss T, Freeman M. Experimental analysis of rattle noise abatement in seatbelt retractor assembly[C]. Noise and Vibration Conference & Exposition, Michigan, 1999.
- [6] Machens K U J, Neumann J, Scholz J, et al. Ball sensor rattle: experimental and numerical sensitivity study for seatbelt applications[J]. The Journal of the Acoustical Society of America, 2017, 30(1): 3513–3513.
- [7] 赵淼淼. 汽车内饰材料吸音隔音性能的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2010.
- [8] 黄泽好, 陈华语, 邹艾宏, 等. 汽车关门声品质预测的MSA-SVR方法研究[J]. 噪声与振动控制, 2021, 41(3): 145–150.
Huang Zehao, Chen Huayu, Zou Aihong, et al. Study on MSA-SVR method for predicting the sound quality of vehicle door closing[J]. Noise and Vibration Control, 2021, 41(3): 145–150.
- [9] 刘哲, 高云凯, 徐翔, 等. 车门玻璃下位振动传递路径建模及优化分析[J]. 振动测试与诊断, 2021, 41(1): 69–75.
Liu Zhe, Gao Yunkai, Xu Xiang, et al. Transfer path modeling for door glass vibration and optimization analysis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2021, 41(1): 69–75.
- [10] 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.
Shen Chao, Peng Yuming, Yang Mingliang, et al. Research on the S & R evaluation method of automobile seats based on the BSR tests[J]. Noise and Vibration Control, 2017, 37(3): 101–106.