

附加质量对变速器壳体模态的影响

时松青,徐传燕*,慈长凯,邢其森

山东交通学院汽车工程学院,山东 济南 250357

摘要:为分析附加质量对变速器壳体模态的影响,以某微型汽车的变速器壳体为例,用传感器模拟变速器壳体的附加质量,设置7种模态试验方案,分析相同附加质量作用于不同测点、不同附加质量作用于相同测点及附加质量不同分布方式下变速器壳体固有频率的变化。采用模态置信度、模态相位共线性和平均相位偏移验证模态试验数据的有效性和可靠性。结果表明:变速器壳体厚度不均匀,不同测点下相同附加质量对壳体固有频率的影响不同,壳体薄壁处振型较大,固有频率较小;同一测点的附加质量越大,变速器壳体的固有频率越小;附加质量均匀分布于变速器壳体时,固有频率较小。在模态试验中,应优先考虑采用非接触式传感器及轻质传感器测试变速器壳体等薄壁构件,附加质量应均匀分布到结构中,并尽量避开振型节点和振型幅值较大区域。

关键词:变速器壳体;模态试验;附加质量;固有频率;模态影响

中图分类号:U463.212

文献标志码:A

文章编号:1672-0032(2024)01-0001-06

引用格式:时松青,徐传燕,慈长凯,等.附加质量对变速器壳体模态的影响[J].山东交通学院学报,2024,32(1):1-6.

SHI Songqing, XU Chuanyan, CI Changkai, et al. Influence of additional mass on transmission housing modal[J]. Journal of Shandong Jiaotong University, 2024, 32(1): 1-6.

0 引言

随汽车平顺性要求的提高,汽车运行过程中的噪声、振动和声振粗糙度(noise, vibration and harshness, NVH)性能越来越受消费者和主机厂的重视^[1]。汽车动力系统的振动和噪声对整车NVH性能的影响较大,变速器是汽车动力系统的重要组成部分,为避免变速器啸叫、敲击等噪声问题,变速器壳体的固有频率应尽量避开发动机产生的激励频率^[2-5]。测试整车NVH性能时,要求变速器壳体模态合理^[6]。Wolfram等^[7]采用模态试验法测量变速器壳体的振动模式;王毅等^[8]对某款纯电动车两挡双离合自动变速器进行模态仿真与试验,分析轴承动态力,研究壳体的振动特性;江会仙等^[9]分析变速器壳体的模态振型特征和动态特性,对比前7阶振型,确定其刚度薄弱环节;任波等^[10]采用模态试验法分析重型变速器壳体的动态特征,认为橡胶轮胎支撑可模拟某些大型构件自由模态试验的边界条件,验证了结构模态分析技术对结构动态特性分析的有效性;Starvin等^[11]分析变速器壳体激励的来源,提取、记录和比较壳体的固有频率和模态振型,确保壳体在工作范围不满足谐振条件。

进行模态试验时,需在被测物体上安装传感器和磁座等测量设备。刚度较小的被测物体所用接触传感器及安装座的质量作为被测物体的附加质量,影响被测物体的模态试验结果。周桓等^[12]通过对直升机桨叶布置不同数量的传感器进行模态试验,发现附加质量越大,桨叶的各阶频率越小;陈明等^[13]分别

收稿日期:2023-04-27

基金项目:山东省自然科学基金面上项目(ZR2020ME126)

第一作者简介:时松青(1997—),女,山东菏泽人,硕士研究生,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:448084583@qq.com。

*通信作者简介:徐传燕(1981—),女,山东临沂人,副教授,工学博士,硕士研究生导师,主要研究方向为机械设备故障诊断,E-mail:xcy@sdjtu.edu.cn。

采用蜂蜡式和磁力座式将传感器安装于某车型车门钣金件,分析附加质量对模态试验结果的影响;董明哲等^[14]建立制动底板及附加拾振传感器的有限元模型,分析传感器的结构、布置数量及位置对轻质扁平结构的模态影响;赵峰等^[15]考虑不同附加质量和不同安装位置对悬臂梁结构模态的影响。分析附加质量对变速器壳体模态影响的研究较少,变速器壳体是典型的薄壁结构,传感器的质量及安装位置均影响其模态。

本文对某微型汽车的变速器壳体进行模态试验,分析传感器的不同质量及不同安装位置对变速器壳体的模态影响,为准确获取变速器壳体的模态参数和以模态参数为基础的故障诊断等提供依据。

1 变速器壳体模态试验

模态试验是测量结构上某些点受到动态输入力后的输出响应。本文通过锤击法对变速器壳体进行模态试验,主要试验仪器包括:动态数据采集仪 SCANDAS、数据采集分析系统 LMS Test. Lab、PCB 三向加速度传感器和 PCB 力锤。

模态分为自由模态和约束模态,分别揭示试件不具有和具有指定边界条件的动态特征^[16]。自由-自由边界条件表示大地对变速器壳体无任何约束,一般要求实际支撑刚体的固有频率小于第1阶弹性体模态固有频率的 $1/10 \sim 1/5$ ^[17-18]。变速器壳体的材料为铝合金,质量为1 950 g,平均壁厚为6 mm。采用柱坐标系建立变速器壳体的几何模型,从壳体圆心位置向外(径向)为 x 方向,切向为 y 方向,向上为 z 方向。综合考虑变速器壳体基本结构特征和模态阶次,确定测点的数量和位置,环绕变速器壳体表面建立7圈测点,共49个测点,定义测点1为坐标原点,变速器壳体传感器的测点位置如图1所示。为避免几何边界条件的影响,试验模拟自由-自由边界条件,采用足够柔软、具有较低支撑刚度和阻尼的弹性绳将变速器壳体悬吊于悬架水平位置。在壳体测点位置胶粘加速度传感器,采用尼龙锤头的力锤,通过人工激励获取壳体的振动信号,移动力锤敲击变速器壳体测点,响应传感器位置作为模态参考点,其位置固定不动。

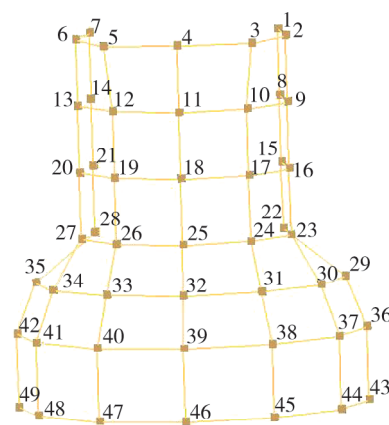


图1 变速器壳体传感器的测点位置

每个 PCB 三向加速度传感器(附带磁座)的质量为23.4 g,灵敏度为100 mV/g。设置7种试验方案,每种方案的传感器数量及安装位置如表1所示。在数据采集分析系统 LMS Test. Lab 中设置通道、锤击击波及量程,根据力锤敲击力选择合适的带宽^[19]。设置试验分析频率为2 048 Hz,采样频率间隔为1 Hz;为提高试验信噪比,降低数据误差,每个测点锤击3次,取采集信号的平均结果,设置过载和双击等无效锤击自动拒绝功能。变速器壳体模态试验布置(以方案6为例)如图2所示。

表1 变速器壳体模态试验方案

试验方案	传感器数量/个	测点位置	总附加质量/g
1	1	14	23.4
2	1	18	23.4
3	1	42	23.4
4	1	49	23.4
5	3	7, 25, 38	70.2
6	5	1, 11, 26, 30, 49	117.0
7	5	42	117.0

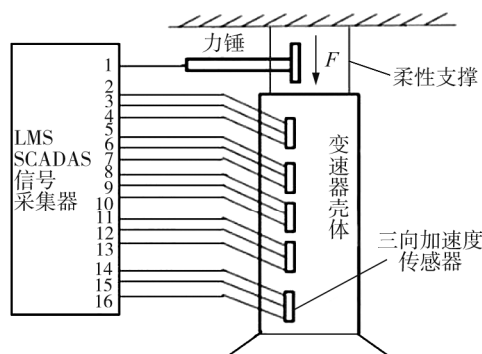


图2 试验方案6中变速器壳体模态试验布置

2 试验结果

2.1 模态参数识别

最小二乘复频域法(least squares complex frequency domain method, LSCF)抗干扰能力强,参数自动识别精度较高,广泛应用于模态试验进行模态参数识别^[20-21]。采用 LSCF 提取 7 种试验方案的变速器壳体模态参数,各阶固有频率如表 2 所示,模态振型如图 3 所示。

表 2 7 种试验方案的变速器壳体前 5 阶模态固有频率

试验 方案	固有频率/Hz					试验 方案	固有频率/Hz				
	第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶		第 1 阶	第 2 阶	第 3 阶	第 4 阶	第 5 阶
1	524.484	588.487	869.987	969.650	1 183.808	5	515.587	586.991	849.866	963.500	1 183.160
2	535.169	589.077	872.111	973.525	1 186.807	6	504.514	549.720	840.213	934.416	1 165.569
3	530.124	583.124	868.212	960.707	1 182.994	7	521.288	577.019	864.154	958.564	1 181.814
4	511.880	557.019	844.063	948.615	1 176.194						

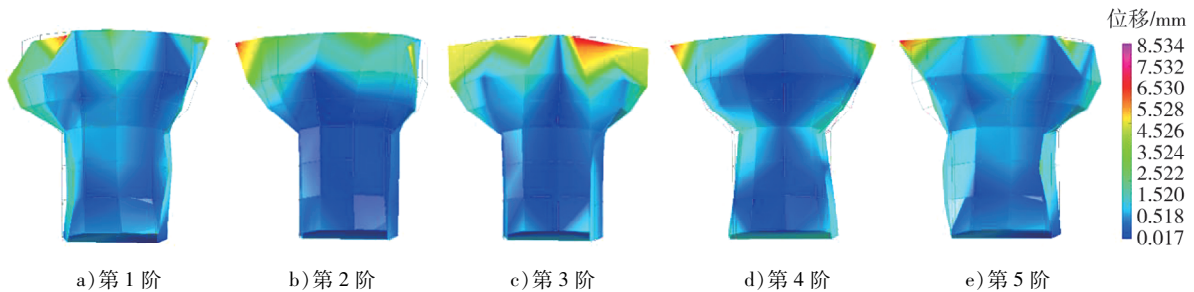


图 3 变速器壳体前 5 阶模态振型

2.2 模态结果分析

2.2.1 相同附加质量作用于不同测点

对比试验方案 1~4 中变速器壳体第 1~5 阶固有频率的变化,分析相同附加质量作用于不同测点对变速器壳体模态的影响。由图 3、表 2 可知:试验方案 2 测点 18 处变速器壳体较厚,振幅较小,各阶固有频率较大;试验方案 4 测点 49 处变速器壳体较薄,振幅较大,各阶固有频率较小;试验方案 1 测点 14 和试验方案 3 测点 42 处变速器壳体相较其他 2 个测点壁厚适中,各阶固有频率位于试验方案 2、4 间。变速器壳体厚薄不均匀,不同测点下相同的附加质量对变速器壳体模态的固有频率影响不同,壳体较厚处,模态振幅较小,各阶固有频率较大,反之,各阶固有频率较小。

2.2.2 不同附加质量作用于相同测点

对比试验方案 3 和试验方案 7 中变速器壳体第 1~5 阶固有频率的变化,分析相同测点下不同附加质量对变速器壳体模态的影响。由表 2 可知:试验方案 7 中变速器壳体第 1~5 阶固有频率均小于试验方案 3,第 1~5 阶固有频率分别小 8.836、6.105、4.058、2.143、1.180 Hz,前 2 阶固有频率相差较大。说明随附加质量增大,变速器壳体的固有频率减小;同一测点下,不同附加质量对各阶模态的影响程度不同,附加质量对变速器壳体第 1 阶固有频率影响最大,结合图 3 可知测点 42 位于或接近第 1 阶最大模态振型处。

2.2.3 附加质量的分布方式

对比试验方案 5~7 中变速器壳体前 5 阶固有频率的变化,分析附加质量的不同分布方式对变速器壳体模态的影响。由表 2 可知:试验方案 5、6 中附加质量均匀分布的情况下,附加质量越大,固有频率越小;试验方案 7 中变速器壳体的固有频率较大,第 1~5 阶固有频率比试验方案 6 分别大 16.774、27.299、

23. 941、24. 148、16. 245 Hz。

传感器测点位置、附加质量及分布方式对薄壁结构模态的影响均不可忽略,变速器壳体等薄壁且结构复杂的部件应优先考虑采用非接触式传感器,无法采用非接触式传感器时,应尽量采用轻质传感器。布置传感器时将附加质量分布到整个结构中,避免分布在局部区域,尽量避开振型节点和振型幅值较大区域。安装时最好直接固定(胶粘等)在被测结构上,减少安装夹具(磁座、螺栓等),避免移动传感器,保证数据的一致性。

2.3 模态结果验证

通过计算模态置信度(modal assurance criterion, MAC) E_{MAC} 、模态相位共线性(modal phase collinearity, MPC) E_{MPC} 和平均相位偏差(average phase deviation, MPD) E_{MPD} 等检验模态参数识别结果的准确性^[22-23]。 E_{MAC} 是模态振型向量间的点积,可表明模态振型向量几何上的相关性。一般认为 $E_{MPC} \geq 90\%$ 且 $E_{MPD} \leq 15^\circ$ 时,该模态振型相位的离散度为低,即模态振型识别结果为不复杂^[24]。变速器壳体模态振型的 E_{MAC} 矩阵柱状图如图4所示, E_{MPC} 和 E_{MPD} 如表3所示。

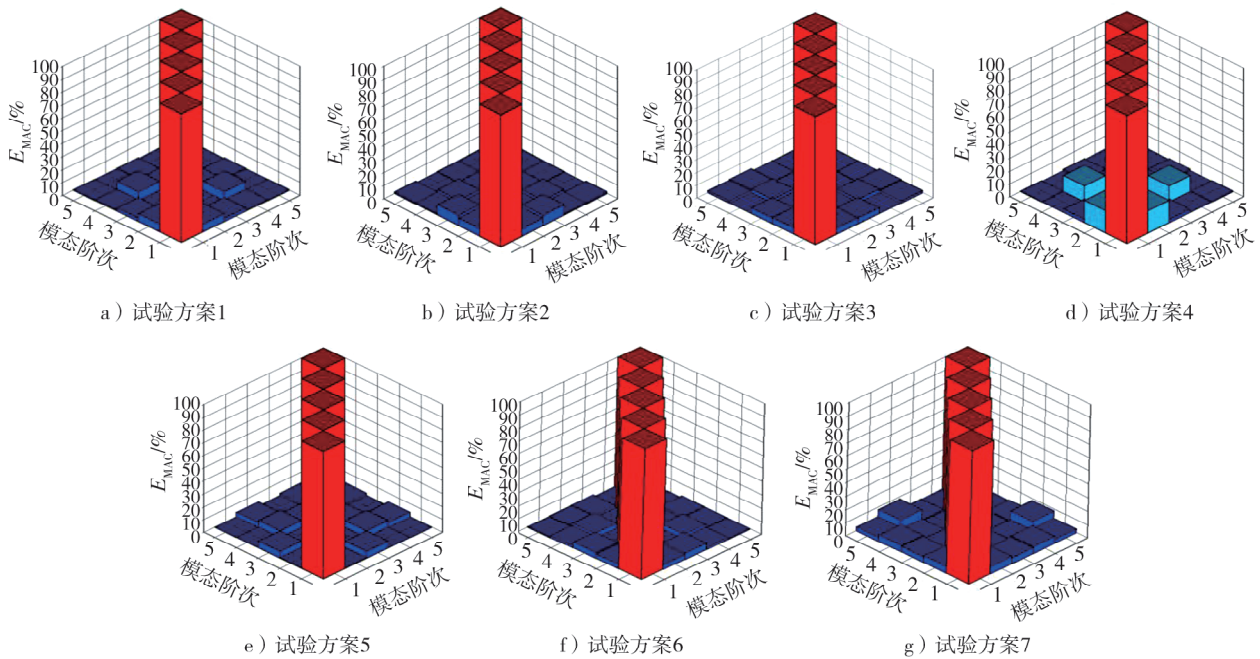


图4 变速器壳体模态振型的 E_{MAC} 矩阵柱状图

表3 变速器壳体模态振型的 E_{MPC} 和 E_{MPD}

试验 方案	$E_{MPC}/\%$					$E_{MPD}/(^\circ)$				
	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶	第5阶	第1阶	第2阶	第3阶	第4阶	第5阶
1	99.359	99.473	98.605	97.004	99.673	4.584	4.271	6.910	10.479	3.426
2	99.802	99.763	98.945	99.416	99.508	2.556	2.895	5.927	4.516	4.452
3	99.391	99.335	98.726	97.492	98.554	4.645	4.900	6.976	9.619	6.950
4	99.827	99.695	98.978	98.768	96.870	2.614	3.437	6.017	6.910	11.091
5	99.952	99.915	98.915	99.849	99.814	1.259	2.034	6.265	2.420	2.452
6	98.628	99.877	99.606	99.704	99.692	7.017	2.015	3.767	3.230	3.288
7	96.799	99.324	98.801	95.371	99.237	11.465	5.703	6.707	14.856	5.387

由图4可知:变速器壳体 E_{MAC} 矩阵柱状图的主对角线元素(各阶振型向量与自己的点积)为1,非主对角线元素(不同阶振型向量的点积)约为0,说明变速器壳体不同阶振型的相关性较小,独立性较

好^[25-27]。由表3可知:试验提取的变速器壳体模态的 $E_{MPC}>95.000\%$, E_{MPD} 较小,说明试验模态接近于真实模态。试验模态分析结果相对可靠,提取的试验模态为有效模态,非虚假模态。

3 结束语

采用传感器模拟附加质量,对某微型汽车变速器壳体进行模态试验,分析相同附加质量作用于不同测点、不同附加质量作用于相同测点及附加质量不同分布方式时变速器壳体固有频率的变化,计算模态置信度、模态相位共线性和平均相位偏差,验证模态试验结果的正确性和有效性。通过对比试验结果可知,附加质量及附加质量位置对变速器壳体模态的固有频率均有不同程度的影响,由于变速器壳体厚薄不均匀,不同测点下相同的附加质量对其模态的影响不同,壳体较厚处,模态振幅较小,各阶固有频率较大,反之,固有频率较小;同一测点下附加质量越大,变速器壳体模态的各阶固有频率越小;附加质量均匀分布于变速器壳体时,各阶固有频率较小。

在保证试验要求的前提下,应尽量减少传感器的数量,采用质量较小的传感器或非接触式传感器,减少安装夹具,尽量避开模态振型节点和振幅较大区域。

参考文献:

- [1] 相象文,张国宁.基于路面激励噪声的车身NVH性能优化[J].山东交通学院学报,2022,30(3):14-19.
- [2] 郑光泽,刘子谦,冯楠.变速器壳体模态识别与优化研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2016,30(1):15-19.
- [3] 杨啟梁,任波,李瑾宁,等.某重型变速器壳体的结构动力学优化[J].机械设计与制造,2020(11):90-93.
- [4] 李金明,姜超,刘飞涛,等.变速器壳体刚度对其系统的影响[J].上海汽车,2014(11):46-48.
- [5] 洪亮,刘成武,黄键,等.某大型客车变速器壳体动态特性与强度分析[J].福建工程学院学报,2013,11(6):534-537.
- [6] 吕孟理,卢剑伟,季明微,等.某变速器壳体模态与异常振动分析[J].汽车实用技术,2017(17):120-121.
- [7] WOLFRAM W, MARCO P, GERHARD B. Vibration measurements on a car transmission housing[J]. Proceedings of SPIE,1994,2358:365-376.
- [8] 王毅,陈勇,代青林,等.纯电动汽车两挡自动变速器壳体振动特性研究[J].机械传动,2023,47(9):81-88.
- [9] 江会仙,翁建生.基于Romax的变速箱建模及模态分析[J].现代机械,2014(4):32-34.
- [10] 任波,杨啟梁,胡深.某重型变速器壳体的动态特性分析[J].中国测试,2019,45(7):51-55.
- [11] STARVIN M S, NAIR V, GANESH K C, et al. Modal analysis of transmission housing using finite element modeling for various assembly conditions[C]//International Conference on Advances in Design, Materials, Manufacturing and Surface Engineering for Mobility. [S.l.]:Society of Automotive Engineers, 2020:241-245.
- [12] 周桓,王宇奇,任航航.传感器附加质量对直升机桨叶模态试验的影响[J].直升机技术,2022(1):54-57.
- [13] 陈明,李绍磊,曹晓雪.基于附加质量的模态测试分析[J].汽车科技,2014(6):43-46.
- [14] 董明哲,张立军,应华飞,等.附加拾振传感器对轻质扁平结构模态试验结果的影响分析[J].汽车工程学报,2014,4(2):93-98.
- [15] 赵峰,曹树谦,王良文,等.附加质量对结构模态影响实验研究[C]//第十二届全国振动理论及应用学术会议论文集.南宁:中国振动工程学会,2017:792-800.
- [16] 袁敏刚,陈晓峰,尹晓飞.基于模态分析的乘用车变速器壳体振动优化设计[J].机械工程与自动化,2012(6):80-82.
- [17] KUMAR A, PTIL P. Modal analysis of heavy vehicle truck transmission gearbox housing made from different materials [J]. Journal of Engineering Science and Technology, 2016,11(2):252-266.
- [18] 海伦,拉门兹,萨斯.模态分析理论与试验[M].白化同,郭继忠,译.北京:北京理工大学出版社,2001.
- [19] 孟丽雪,徐传燕,李珊,等.制动盘重根模态识别[J].山东交通学院学报,2022,30(1):1-8.
- [20] 郭艳丽,范羽飞.最小二乘复频域法在洗衣机模态测试上的应用[J].日用电器,2018(2):41-45.
- [21] LIN C S. Frequency-domain approach for the parametric identification of structures with modal interference[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019,33(9):4081-4091.
- [22] 王舒玉,侯之超,苏卫东,等.无水与充水塑料燃油箱的振动试验模态分析[J].汽车安全与节能学报,2019,10(2):

226-232.

- [23] 马维金,张琳,张纪平,等.基于DASP的变速箱壳体振动模态试验与分析[J].机械传动,2015,39(3):116-119.
- [24] 孟礼.某汽车座椅的结构分析与模态优化[D].重庆:重庆大学,2018.
- [25] 谢小平,韩旭,吴长德,等.基于PolyMAX方法的某轿车白车身实验模态分析[J].汽车工程,2009,31(5):440-443.
- [26] 周长峰,张家豪,刘立邦,等.制动盘自由模态仿真与试验对比及模态置信度研究[J].山东科学,2021,34(6):106-111.
- [27] 周思达,曹博运,周小陈.结构应变模态参数辨识的最小二乘复频域方法[J].噪声与振动控制,2017,37(6):17-22.

Influence of additional mass on transmission housing modal

SHI Songqing, XU Chuanyan^{*}, CI Changkai, XING Qisen

School of Automotive Engineering, Shandong Jiaotong University, Jinan 250357, China

Abstract: To analyze the influence of the additional mass on transmission housing modal, taking the transmission housing of a compact car as an example, the sensor is used to simulate the additional mass of the transmission housing, and seven modal test schemes are set up to analyze the changes of the intrinsic frequency of the transmission housing under the same additional mass acting on different measurement points, different additional masses acting on the same measurement points, and different additional mass distributions. The validity and reliability of the modal test data are verified by modal confidence criterion, modal phase collinearity and average phase offset. The results show that the thickness of the transmission housing is uneven, and the influence of the same additional mass acting on the different measurement points on the transmission housing modal is different. The modal shape at the thin wall of the transmission housing is larger, and the intrinsic frequency is smaller. The larger the additional mass at the same measurement point is, the smaller the intrinsic frequency of the transmission housing modal is. When the additional mass is evenly distributed in the transmission housing, the intrinsic frequency is small. For thin-walled structural parts such as transmission housings, preference should be given to non-contact sensor and lightweight sensor in the modal test, the additional mass should be evenly distributed into the structure, and the nodes and areas with large mode amplitude should be avoided as much as possible.

Keywords: transmission housing; modal test; additional mass; intrinsic frequency; modal influence

(责任编辑:赵玉真)