

Research on Idle Jitter Control of a Light Truck Steering Wheel Based on Sensitivity Analysis

Yue Zhang¹, Kexin Niu², Huibin Li¹

¹School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing

²Beiqi Foton Motor Co., Ltd., Beijing

Email: zhangyuejob58@126.com, niukexin@foton.com.cn, huibinli@163.com

Received: Aug. 8th, 2017; accepted: Aug. 22nd, 2017; published: Aug. 31st, 2017

Abstract

The steering wheel of a light truck has a jitter problem in the idle condition. We used modal test to analyze the jitter reason under idle condition. It is found that the modal frequency of the steering wheel is close to the second order ignition frequency of the engine so the resonance of the steering wheel appears. In order to reduce the steering wheel vibration, we combined with the finite element analysis method and sensitivity analysis method. We adjusted the structure of the steering wheel and the thickness of the instrument panel beam to optimize the structure, thereby changing the natural frequency of the steering wheel. Measures works and the natural frequency was far from the second order ignition frequency of the engine. Finally, the effectiveness and rationality of the improvements were verified through tests.

Keywords

Steering Wheel, Sensitivity Analysis, Modal Analysis, Idling Vibration

基于灵敏度分析的某轻卡方向盘怠速抖动治理研究

张月¹, 牛可心², 李惠彬¹

¹北京理工大学机械与车辆学院, 北京

²北京福田汽车股份有限公司, 北京

Email: zhangyuejob58@126.com, niukexin@foton.com.cn, huibinli@163.com

收稿日期: 2017年8月8日; 录用日期: 2017年8月22日; 发布日期: 2017年8月31日

摘要

某轻型载货汽车方向盘在怠速工况下抖动严重,利用模态试验分析其怠速抖动原因,发现方向盘模态频率与发动机二阶点火频率接近,引起共振现象。为降低方向盘振动,结合有限元分析方法和灵敏度分析,调整方向盘结构和仪表台横梁管柱的厚度,对转向系统进行结构优化,从而改变方向盘的固有频率,远离发动机的二阶点火频率,减小共振。最后通过试验验证了改进措施的有效性。

关键词

方向盘,灵敏度分析,模态分析,怠速抖动

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

汽车的 NVH 性能作为评价整车舒适性的重要指标[1],越来越受到汽车厂商的关注。汽车在启动、停车以及在城市道路行驶遇到红绿灯时,发动机怠速运转,方向盘抖动严重影响了驾驶员的舒适性。前人在研究怠速方向盘的抖动问题时,提出了不同的解决方案:谢暴等利用振动测试与模态分析方法研究怠速抖动原因,进行结构优化和方向盘轻量化设计[2];侯锁军等采用传递路径方法分析方向盘抖动原因,计算各传递路径对方向盘抖动的贡献量,找出发动机激励和悬置系统固有频率之间存在的耦合问题[3];谭万军等对转向系统进行 ODS 分析,找出方向盘摆振的激励源、传递路径及转向系统的结构弱点,从激励源、传递路径和接受体三方面控制摆振[4]。

本文针对某轻型载货汽车怠速时方向盘抖动现象进行治理和研究,通过模态试验和怠速工况加速度测试实验,结合 Hypermesh 和 Nastran 求解器进行有限元分析,在前人研究的基础上,增加了对转向系统不同部位的模态的灵敏度分析,对零件密度和厚度进行优化设计[5],改进了方向盘的结构,从而改变了转向系统的固有频率,降低了方向盘的抖动。

2. 转向系统模态分析及摸底试验

根据某轻型载货汽车公司提供的方向盘图纸参数,建立三维模型,对约束条件下的轻卡转向系统进行有限元模态分析,识别模态参数,得到固有频率和振型[6];进行锤击法模态试验分析[7],与有限元模态分析结果进行对比,并进行转向系统振动加速度测试试验。

2.1. 转向系统有限元模态分析

有限元方法的重要理论依据是离散化,其基本思想是把连续的几何结构体离散成数目有限的单元,各单元通过节点相互连接,并由节点来传递单元之间的相互作用力,从而可以将连续体看作这些有限单元的组合物。对各单元进行受力分析,列出有关节点位移的线性平衡方程组,并通过计算机求出节点位移,再运用弹性力学的相关原理,求解各个单元的应变和应力。由于离散后节点的数量是有限值,对连续结构体的无限自由度求解就转变为对离散结构体的有限自由度求解,即简化为可用数值方法求解的结构性问题[8]。对方向盘进行结构有限元分析,基于有限元分析理论对方向盘进行设计优化,是解决方向

盘抖动问题的有效途径。

通过 Pro-E 建立转向系统与仪表板横梁结合的三维数模, 导入 Hypermesh 中进行前处理, 转向系统按实际情况进行连接, 在横梁两端施加约束, 并将转向器简化为质量点添加在转向传动轴尾部, 模拟实际情况。将转向系统划分为 116585 个网格, 通过 Nastran 求解器进行模态计算[9]。约束状态下转向系统的前四阶固有频率如表 1 所示。

2.2. 试验模态分析

采用锤击试验方法, 对约束状态下的转向系统进行模态试验, 通过频域法进行模态分析。分别在方向盘的中心、12 点、3 点、6 点、9 点, 转向轴, 转向传动轴, 转向万向节, 转向器等九个位置处布置 BZ1102 加速度传感器, 如图 1(a)所示, 共九个测点。加速度信号通过 BZ2015 电荷电压滤波积分放大器传递到 INV306U 信号采集处理分析仪, 使用 DFC 系列聚能力锤在转向盘的三个位置进行敲击, 使用 DASP 软件进行数据采集和分析, 从而识别转向系统垂直方向、左右方向和前后方向等三个方向的模态参数。约束状态下的转向系统垂直方向前四阶固有频率如表 1 所示。经对比可知, 有限元模态和试验模态的固有频率和振型基本一致, 其中第三阶试验模态的振型如图 1(b)所示, 其中红色轨迹为转向系统原始状态, 蓝色轨迹为转向系统发生变形之后的状态, 可以看出第三阶模态振型为方向盘点头运动。

2.3. 振动测试试验

对该轻卡怠速工况下方向盘 12 点位置处进行了三个方向的加速度测试试验, 怠速抖动方向盘三个方向的加速度有效值如表 3 所示。方向盘 12 点位置怠速工况垂直方向的振动加速度时域信号和频域信号如图 2 所示。从频域信号可以看出, 方向盘在 25 Hz 左右有明显的峰值, 该频率为发动机的二阶点火频率。

Table 1. Modal parameters and modes of steering system

表 1. 转向系统模态参数与振型

| 阶数 | 振型 | 有限元模态频率(Hz) | 试验模态频率(Hz) | 相对误差(%) |
|----|----------|-------------|------------|---------|
| 1 | 相对横梁俯仰运动 | 7.62 | 6.73 | 13.2 |
| 2 | 相对横梁左右运动 | 8.66 | 8.60 | 0.7 |
| 3 | 方向盘点头运动 | 25.89 | 25.13 | 3.0 |
| 4 | 相对横梁左右运动 | 42.80 | 40.56 | 5.5 |

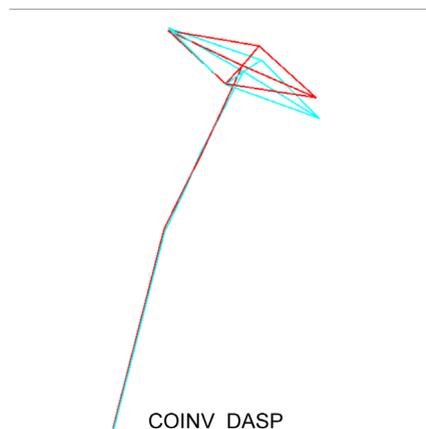


Figure 1. Curve: (a) sensor layout diagram of steering system; (b) the third modes of steering system by hammer test (25.13 Hz)

图 1. (a) 转向系统传感器布置示意图; (b) 锤击试验转向系统第三阶模态振型(25.13 Hz)

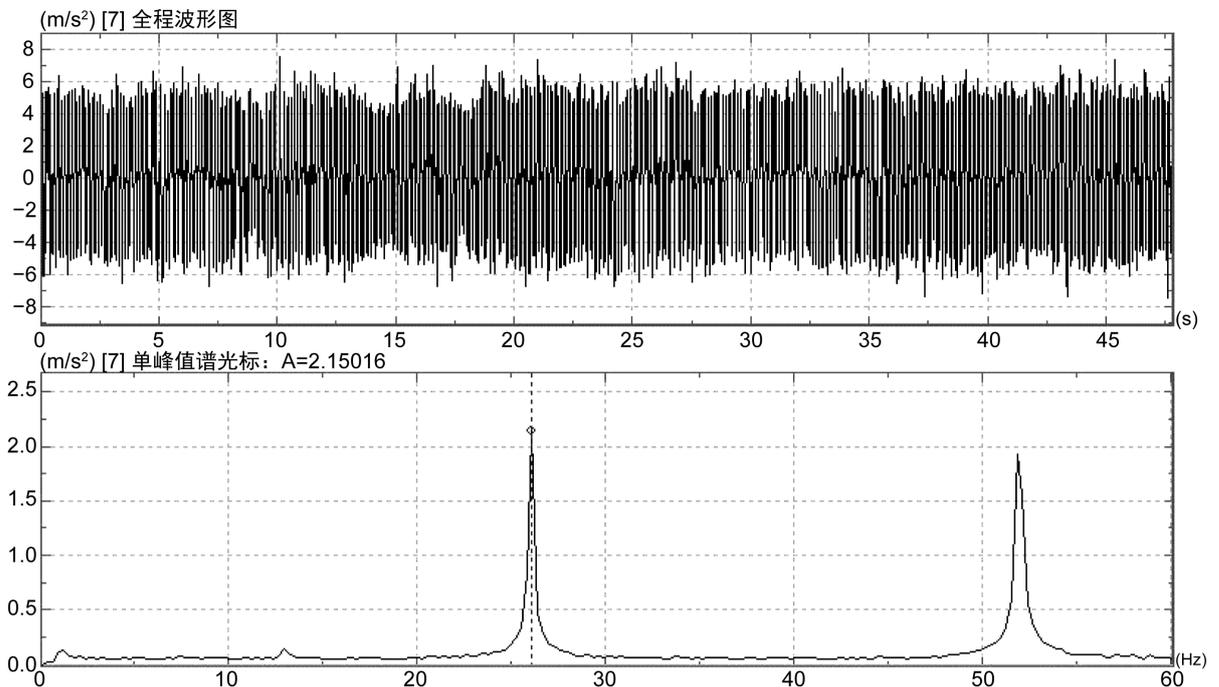


Figure 2. Curve: vertical acceleration signal diagram on the 12 point of the steering wheel

图 2. 方向盘 12 点垂直方向加速度信号示意图

3. 方向盘抖动原因分析及改进方案

经过对方向盘的有限元模态分析和锤击法模态试验分析, 识别其固有频率模态参数, 根据仿真和试验得到的结果, 寻找激励源, 进一步提出改进方案, 优化方向盘的结构, 降低振动。

3.1. 方向盘抖动原因分析

对方向盘振动进行传递路径分析可知, 汽车在怠速时, 其最大的激励源就是动力总成的振动, 即动力总成通过悬置系统传递到副车架和车身, 然后传递到转向支撑和方向盘[2]。

动力总成的激励源是由于往复运动的惯性力引起的, 以点火阶次为主, 该轻卡为四冲程发动机, 点火频率的计算公式为:

$$f = \frac{n}{60 \times 2} \times z \quad (1)$$

其中, f 为发动机点火频率, n 为发动机的转速, z 为发动机的气缸数目[10]。

该轻卡发动机怠速转速为 750 r/min, 由式(1)计算得, 发动机二阶点火频率为 25 Hz, 与模态分析得到的方向盘垂直方向的第三阶固有频率 25.13 Hz 较为接近, 发动机怠速运转时振动传递到转向系统, 引发共振现象, 是引起方向盘抖动的主要原因[2]。

3.2. 方向盘灵敏度分析

灵敏度作为导数信息, 反映出结构设计变量或参数对目标或约束函数影响的变化梯度, 即表达关注指标对结构参数的敏感程度。利用灵敏度可以寻找最优解的方向, 建立准则方程, 构造迭代计算公式。通常通过优化不同零件的材料和厚度, 罗列出各零件的目标函数对变量的导数。灵敏度最大的零件, 是整体结构中最关键的零件[11]。

本文以提高第三阶固有频率为优化目标，以转向系统质量小于上限值为约束条件，以转向系统四个部位的厚度为设计变量，通过 Hypermesh 12.0 中的 Optistruct 模块计算得出重量和模态频率对四个厚度变量的灵敏度值。四个部位分别是方向盘骨架、转向管柱支撑、仪表台横梁、转向柱与仪表台横梁连接处，计算得出四个变量的质量灵敏度 S_m ，模态频率灵敏度 S_p ，相对灵敏度 S_p/S_m ，如表 2 所示，柱状图如图 3 所示。

从表 2 可以看出，转向系统对仪表台横梁管柱厚度的相对灵敏度最大，适当调整该零件厚度，即可在成本最少的情况下，最大限度提高第三阶固有频率。结合质量灵敏度，即可在第三阶固有频率显著提升的同时使转向系统质量的增幅控制在合理范围内。

3.3. 改进方案

通过对转向系统的模态分析与灵敏度分析，提出改进方案。根据文献，修改零件提高固有频率的常用方法有：改变选用的材料，采用密度小、杨氏模量数值高的材料；改变各构件的形状和厚度[11]。根据这两个方向，在 Hypermesh12.0 中的 Optistruct 模块中，对转向系统各部位进行了密度和厚度优化。

3.3.1. 方向盘结构优化

由密度优化的结果显示，方向盘密度调整为原密度的 0.12 至 0.23 倍，可以有效提高第三阶固有频率，优化后的方向盘质量由 2.16 kg 降至 0.49 kg。转向系统有限元模态分析的第三阶模态频率由 25.89 Hz 提升至 27.17 Hz，相对原始状态提升了 4.9%，振型如图 4(a)所示，第三阶固有频率远离了发动机的二阶点火频率 25 Hz，可以有效避免怠速时的共振现象。

3.3.2. 加粗仪表台横梁

对仪表台管柱的厚度优化结果显示，管柱厚度由 4 mm 调整为 10 mm。原仪表台横梁管柱内径为 41

Table 2. Different parts of the steering wheel sensitivity table

表 2. 方向盘不同部位灵敏度数值表

| 编号 | 部位 | $S_m(t/mm)$ | $S_p(Hz/mm)$ | $S_p/S_m(Hz/t)$ |
|----|---------------|-------------|--------------|-----------------|
| 1 | 方向盘骨架 | 2.10E-05 | 1.17E-03 | 5.57E+01 |
| 2 | 转向管柱支撑 | 3.11E-04 | 1.72E-02 | 5.53E+01 |
| 3 | 仪表台横梁 | 1.68E-03 | 9.94E-01 | 5.92E+02 |
| 4 | 转向管柱与仪表台横梁连接处 | 1.09E-04 | 2.92E-02 | 2.68E+02 |

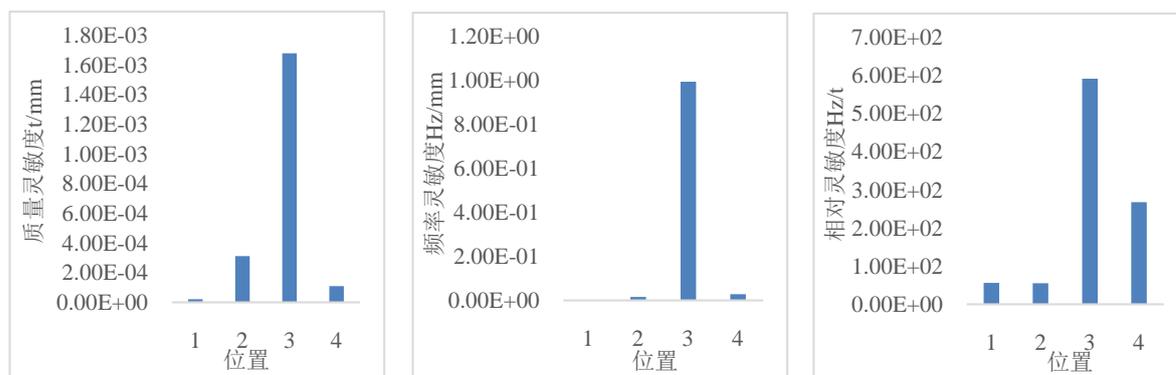


Figure 3. Curve: system result of standard experiment

图 3. 方向盘不同部位灵敏度柱状图

mm, 外径为 45 mm, 优化后的仪表台横梁内径为 40 mm, 外径为 50 mm。对改进后的方向盘, 并加粗横梁后的转向系统进行有限元模态分析, 转向系统的第三阶模态频率由 25.89 Hz 提升至 31.01 Hz, 相对原始状态提升了 19.8%, 振型如图 4(b)所示, 第三阶频率有了更加明显的提升, 可以减小共振现象。

4. 改进后试验验证

对方向盘的怠速抖动现象, 采取方向盘结构优化和加粗仪表台横梁两项措施。将改进方向盘结构定为方案一, 在方向盘改进的基础上加粗仪表台横梁定为方案二。分别结合两种方案, 对转向系统零件结构进行相应修改后, 安装在轻卡上进行锤击试验测试模态参数, 并通过振动测试试验测量方向盘 12 点的振动加速度有效值, 与原始状态的模态参数和加速度有效值进行对比, 验证改进方案的有效性。

4.1. 方案一试验验证

将改进后的方向盘替换原方向盘, 进行模态试验得到的垂直方向第三阶模态固有频率如表 3 所示, 第三阶模态频率由原始的 25.13 Hz 提升至 25.80 Hz, 偏离了发动机怠速的二阶点火频率。实验结果与有限元仿真有一定的误差, 这是因为有限元计算时方向盘骨架与转向柱之间采取刚性连接, 与实际情况有一定偏差。怠速工况下测试方向盘 12 点的振动加速度有效值如表 3 所示, 可见方案一对怠速工况下方向盘的抖动有一定的改善效果。

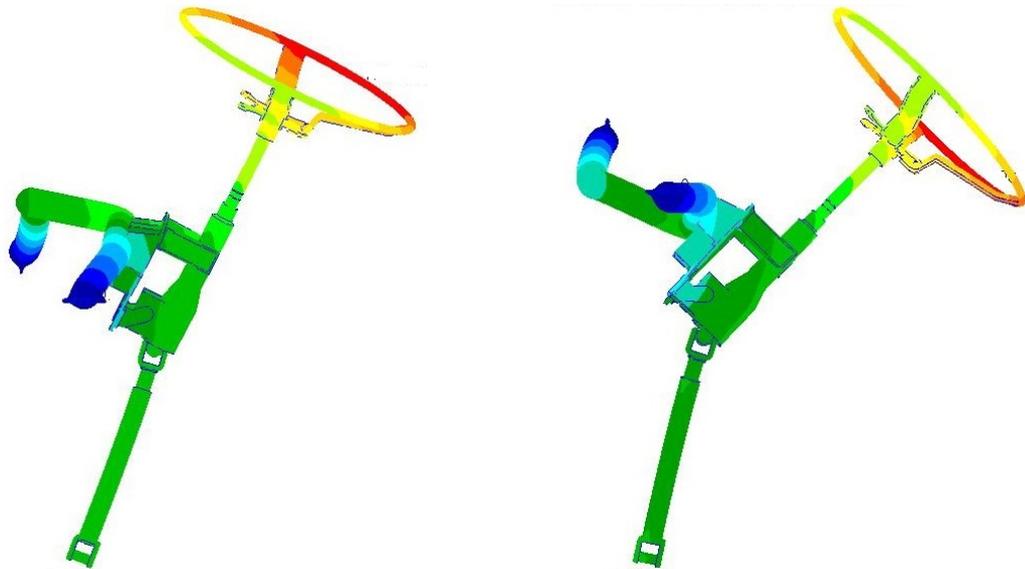


Figure 4. Curve: (a) the third-order natural frequency after improving the steering wheel (27.17 Hz); (b) the third-order natural frequency after improving the steering wheel and the pipe (31.01 Hz)

图 4. (a) 改进方向盘第三阶固有频率(27.17 Hz); (b) 改进方向盘且加粗横梁第三阶固有频率(31.01 Hz)

Table 3. Modal parameters and acceleration valid values test results

表 3. 模态参数及加速度有效值试验验证结果

| 方案 | 锤击试验第三阶模态参数 | | 方向盘 12 点振动加速度有效值 | | |
|-----|-------------|-------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| | 频率(Hz) | 偏离(%) | 垂直(m/s ²) | 左右(m/s ²) | 前后(m/s ²) |
| 原方案 | 25.13 | - | 2.76 | 5.22 | 6.40 |
| 方案一 | 25.80 | 2.7 | 1.03 | 1.18 | 1.82 |
| 方案二 | 27.77 | 10.5 | 0.70 | 1.02 | 0.89 |

4.2. 方案二试验验证

在更换方向盘后,又更换了仪表台横梁,模态试验得到的垂直方向第三阶模态参数如表 3 所示,第三阶模态频率由原始的 25.13 Hz 提升至 27.77 Hz,怠速工况下测试方向盘 12 点的振动加速度有效值如表 3 所示,可见方案二比方案一第三阶模态频率提高更为明显,振动加速度有效值也明显降低,减轻了方向盘的振动。因此方案二比方案一对方向盘抖动的改进效果更为明显,汽车厂商可以采取方案二对转向系统进行改进和生产。

5. 结论

1) 针对该轻卡方向盘抖动的问题,本文采用锤击试验和有限元分析方法,定量分析与定性分析相结合,找到了方向盘抖动的原因是发动机怠速工况二阶点火频率与方向盘第三阶固有频率接近,引发了共振现象。

2) 为了改善方向盘的抖动,对转向系统各部位进行厚度的灵敏度分析,确定对转向系统第三阶固有频率影响较大部位,并进行板件厚度优化和密度优化,确定两种改进方案。

3) 最终通过试验验证了方案二可以更好地改善方向盘的抖动。本文的研究成果可以应用在方向盘减振等研究中,为其他车型的减振提供参考。

参考文献 (References)

- [1] 高延龄,许洪国. 汽车运用工程[M]. 北京:人民交通出版社,2004:165-177.
- [2] 谢暴,陶其铭. 基于模态分析的汽车方向盘怠速抖动改进研究[J]. 装备制造技术,2010,1(3):14-16.
- [3] 侯锁军,史文库,毛阳. 应用传递路径分析方法对方向盘抖动贡献量的研究[J]. 西安交通大学学报,2013,47(3):132-136.
- [4] 谭万军,杨亮,吴行让,张硕. 基于 ODS 与试验模态分析的方向盘摆振优化[J]. 振动工程学报,2011,24(5):498-504.
- [5] 陈昌明,肖强. 白车身模态灵敏度分析及结构优化[J]. 山东交通学院学报,2009,17(2):1-5.
- [6] 纪广昊. 方向盘系统有限元建模及动静特性分析[D]:[硕士学位论文]. 沈阳:东北大学,2010.
- [7] 李惠彬. 振动理论与工程应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2006:201-222.
- [8] 龚曙光,边炳传. 有限元基本理论及应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2013:6-9.
- [9] 李增刚. Nastran 快速入门与实例[M]. 北京:国防工业出版社,2007:128-129.
- [10] 杨亮,吴行让,张硕,谭万军. 汽车怠速方向盘振动控制研究[J]. 噪声与振动控制,2011,31(5):80-85.
- [11] 邬广铭,史文库,刘伟,陈志勇,郭福祥,方德广. 基于模态灵敏度分析的客车车身优化[J]. 振动与冲击,2013,32(3):41-45.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2328-0530，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ojav@hanspub.org