

基于试验场特征路面的载荷谱数据有效性分析方法研究

杨清淞, 王明明, 彭红伟

中汽研汽车检验中心(天津)有限公司, 天津

收稿日期: 2022年5月11日; 录用日期: 2022年7月20日; 发布日期: 2022年7月27日

摘要

本文研究了试验场特征路面的载荷谱数据在时域、频域和关联域的特征, 通过上述特征来分析载荷谱数据的有效性, 并提出了几种修正数据的方法, 为载荷谱数据有效性分析提供了更为全面的思路。

关键词

载荷谱, 有效性分析

Research on Validity Analysis Method of Load Spectrum Data Based on Characteristic Pavement of Proving Ground

Qingsong Yang, Mingming Wang, Hongwei Peng

CATARC Automotive Test Center (Tianjin) Co. Ltd., Tianjin

Received: May 11th, 2022; accepted: Jul. 20th, 2022; published: Jul. 27th, 2022

Abstract

This paper studies the characteristic pavement of proving ground of the load spectrum data in the time domain, frequency domain and correlation domain, analyzes the validity of the load spectrum data through the above characteristics, and puts forward several methods to modify the data, which provides a more comprehensive idea for the validity analysis of the load spectrum data.

Keywords

Load Spectrum, Validity Analysis

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

车辆在行驶过程中会受到来自内部和外部的载荷作用，这些载荷的大小、频次等特征影响着车辆的寿命。如果车辆在使用过程中达不到合理的使用寿命，不但会影响消费者带来使用或者安全问题，也会给制造商带来困扰：失效导致的召回、保修成本和负面印象都会使制造商的利益受损。换句话讲，良好的耐久性有益于产品质量、公司利益和用户满意度，所以各制造商都把车辆的耐久性作为车辆评价的重要组成部分。

耐久性可以解释为一台整车、一个系统或一个零件在预期维护水平下、预期使用条件下，在预期使用寿命期间维持其预期功能的能力。对于车辆结构件耐久性来说，引发疲劳损伤的载荷特性比极端碰撞载荷和噪声载荷更为重要。要想正确的评估车辆结构件的疲劳耐久性，需要将用户使用载荷与车辆设计载荷进行有效对应，并且使用物理实验和数值模拟的方法针对不同的特性进行分析、优化和验证。这些分析、优化和验证的基础是车辆的载荷特征，不管是用户载荷还是试验载荷，车辆的载荷特征是否准确有效直接关系到后续分析、优化和验证的准确性，尤其是车辆结构件试验载荷的试验频次动辄几千次、几十万次，所以试验载荷的准确性尤为重要[1]。

2. 试验场特征路面载荷谱采集

试验场特征路面一般都是在实际使用道路中出现的具有典型特征的环路。车辆在通过这些环路的载荷水平会大大高于车辆在平缓道路上的载荷水平。在这样的特征路面上行驶会缩短车辆耐久性的验证时间、提高验证效率，所以制造商都会将用户使用载荷与试验场特征路面载荷进行关联，并使用试验场特征路面载荷代替用户载荷在物理实验和数值模拟作为输入载荷，以此来缩短研发时间[2]。

本文的载荷谱数据为某型 SUV 试验车及某型商用车以特定车速和满载状态下，通过北京交通部汽车试验场的特征路面时车轮六分力传感器、加速度传感器、拉线位移传感器、力传感器、应力应变片等传感器的响应信号。

为了保证道路载荷谱数据的有效性，在采集数据之前应该保证各传感器的性能良好，但是在采集过程中传感器难免受到各种因素干扰导致的信号误差。所以在道路载荷谱采集试验完成后，需要对载荷谱数据进行分析与处理[3]、[4]，保证信号的准确性。

3. 时域特征分析

载荷谱数据采集的是时域信号，所以先从时域特征上分析信号的有效性。时域特征一般可分析传感器极性、信号漂移、偏移、毛刺等现象[5]。

1) 传感器极性分析

传感器的极性即传感器的正负方向，一般情况下车辆的受力方向定义与企业标准或者行业标准相关，国内的企业基本都遵循右手定则规定车辆的受力方向，如图 1 所示，也有部分企业定义与其他企业不同，在这不多做赘述，只是工程师在采集信号时需有明确的极性定义。

以某型 SUV 六分力左前轮 X 方向力和 Y 方向扭矩(图 2)、拉线位移传感器(图 3)和稳定杆连杆力数据(图 4)为例分析传感器极性。在图 2 中的车速曲线可以看出车辆先加速再制动，Fx 受力在加速时向前，与 x 轴正向相反，为负值；制动时受力向后，与 x 轴正向相同，为正值。根据右手定则，My 在加速度时

为正，制动时为负，可以看出图 2 中六分力左前车轮 F_x 和 M_y 与定义相同，极性正确，同理可利用转向等其他工况分析其他通道的极性。对于底盘某些杆件和拉线位移传感器而言一般以拉伸和压缩定义其正负，如下面图 3 所示，在车辆制动过程中，存在制动“点头”现象，前面减振器行程缩短，后面减振器行程伸长，图可知拉线位移传感器极性正确，图 4 显示的是扭曲路时稳定杆连杆的受力，两侧稳定杆连杆受力一般都是方向相反，一边受拉一边受压，可根据拉线位移传感器观察受压和受拉，得知目前稳定杆连杆受力方向为受压为正，极性修正的方法极其简单，只需要将被修正曲线乘以-1 即可。

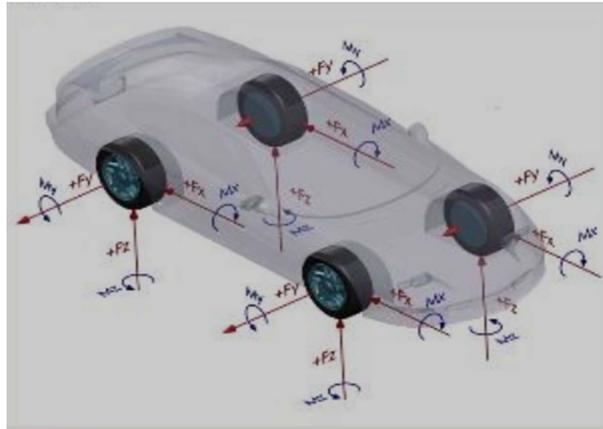


Figure 1. Right hand rule coordinate system of vehicle

图 1. 车辆右手定则坐标系

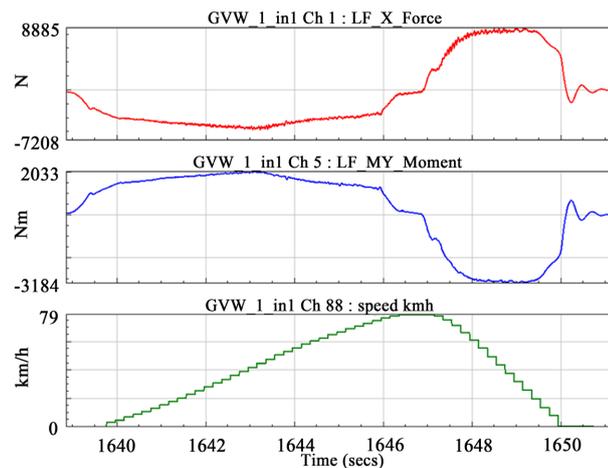


Figure 2. F_x and M_y curves of WFT in vehicle acceleration and braking

图 2. 车辆加速和制动中六分力 F_x 和 M_y 曲线

2) 典型误差现象

典型误差现象包括信号偏移、信号漂移、毛刺、削顶现象，如下面图 5~8 为某型 SUV 载荷谱数据中存在问题的通道。图 5 为信号偏移，表现是信号初始值不在零位，修正方法将数据减去初始值即可。不过不能一概的认为传感器初始不在零位就必须修正，对于某些特殊信号就不需要进行修正，比如静止状态下车轮六分力的 Z 方向力就反映了整车的配载状况，在水平静止状态下四个车轮六分力的 Z 向载荷应与除去四个轮胎总成的整车车重基本相当，用公式可表达为：

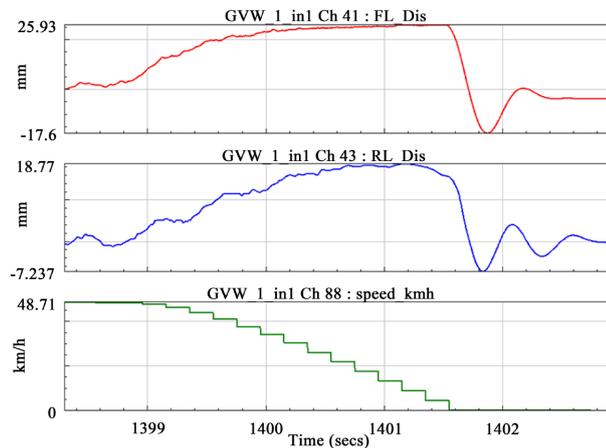


Figure 3. Curves of displacement transducer in vehicle braking
图 3. 车辆制动位移传感器变化曲线

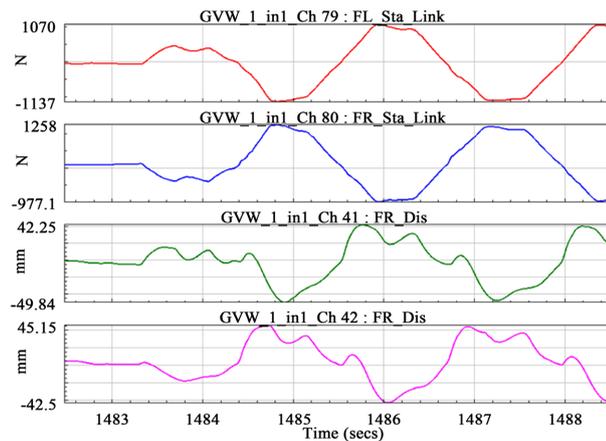


Figure 4. Curves of force on stabilizer rod
图 4. 稳定杆拉杆力曲线

$$G \approx \sum_{i=1}^4 F_{zi} + G_{tire}$$

式中 F_{zi} 为四轮六分力在静止状态下的垂向示数。

图 6 信号漂移是比较常见的信号误差,表现为信号零位随其他参数(比如温度、时间)变化而产生变化,多发在应变通道上,因为应变片尤其是 1/4 桥路测量的时候没有温度补偿,很容易出现温漂,对于漂移的修正有很多种方法,比如数据拟合、高通滤波等,下面介绍另一种方法消除漂移,将图 6 第一条曲线取结构平均生成第二条曲线,公式如下:

$$y_i = \frac{1}{m+1} \sum_{k=i-m/2}^{i+m/2} X_k$$

其中, m 为结构长度,控制曲线平滑程度,这些参数要与信号干扰量的特性相兼容,将两条曲线做差之后得到第三条曲线,即为修正后的数据曲线。

图 7 中为信号毛刺,表现为信号突变[6],产生原因较多,需要分析突变产生的原因,是干扰、噪声,还是外界突加载荷的响应,如确认突变为无效信号,可利用软件将毛刺以平滑曲线替代,虽然毛刺可由程序进行自动修正,但是最好由工程师分析清楚产生毛刺的原因,防止消除掉一些正常的峰值信号。

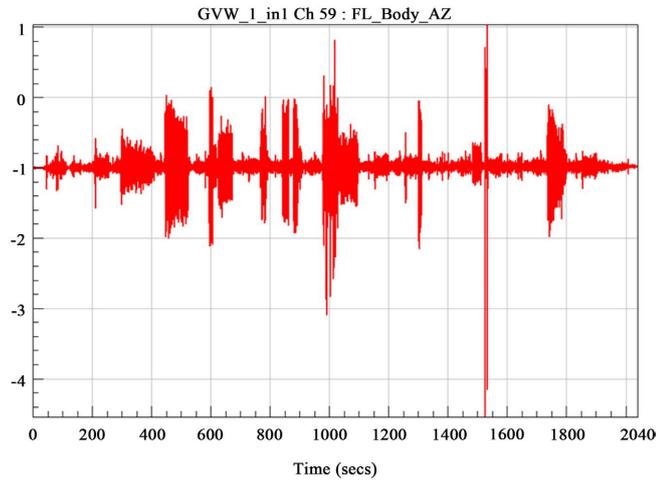


Figure 5. Signal deviation

图 5. 信号偏移

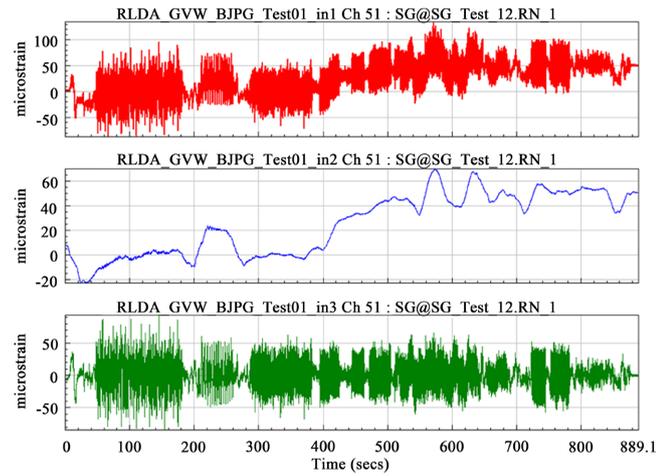


Figure 6. Signal drift

图 6. 信号漂移

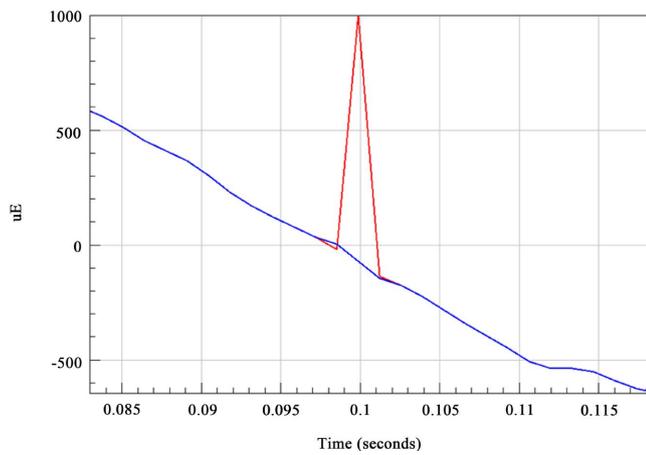


Figure 7. Signal spike and revise

图 7. 信号毛刺及修正

图 8 为最大值受限现象，造成原因一般为在设置数据采集器参数时量程过小造成的，这种现象有时从时域上看不是特别容易发现，可以通过计算通道的穿级计数来观察数据的幅值分布，由图 9 和图 10 中的穿级计数结果对比可以看出，图 9 中幅值出现在 ± 10 g 左右的频次比较高，说明数据在 10 g 时出现最大值受限。最大值受限现象基本无法修正，应修改设置之后重新采集信号。

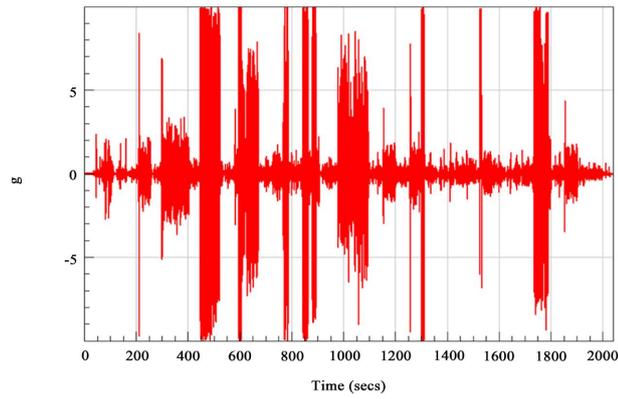


Figure 8. Max value limited
图 8. 最大值受限现象

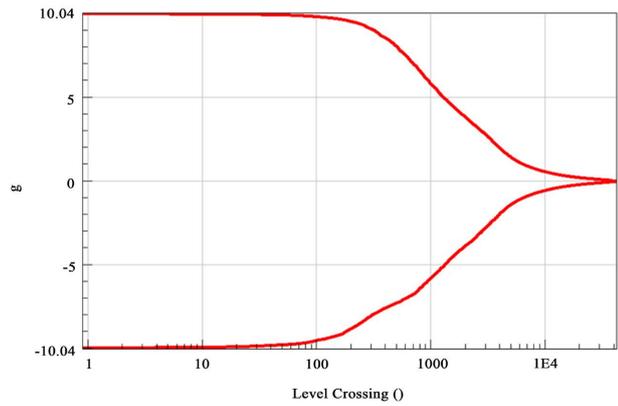


Figure 9. Level crossing counting of max value limited
图 9. 最大值受限现象穿级计数

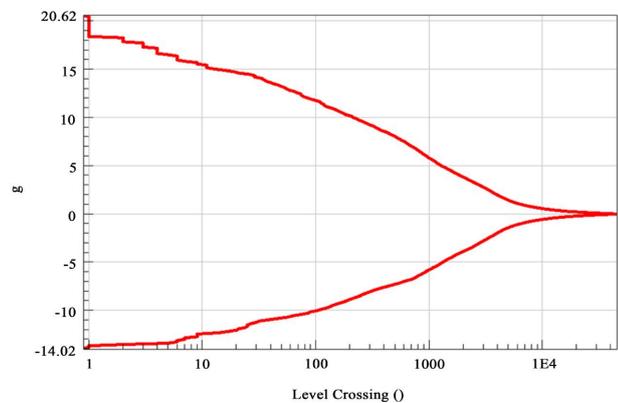


Figure 10. Normal level crossing counting
图 10. 正常穿级计数

4. 频域特征分析

在正常的道路载荷谱采集试验进行时，由于存在许多干扰因素，比如驾驶员车速控制和试验场其他车辆干扰，所以对同一路面一般采集 3 次以上的数据。对同一特征路面来说，在同一车速和载荷下同通道的频域分布应该是近似的，我们可以利用这一现象进行载荷谱数据的有效性分析[7]。图 11 为正常情况下某特征路面同通道频域重复性。图 12 为某型商用车的车身加速度时域信号，对于经验不丰富的工程师来说很难从时域上发现其中的问题。但是从图 13 中 3 次采集频域重复性对比不难发现该通道频域重复性比较差，经检查为该传感器粘贴不牢固导致。

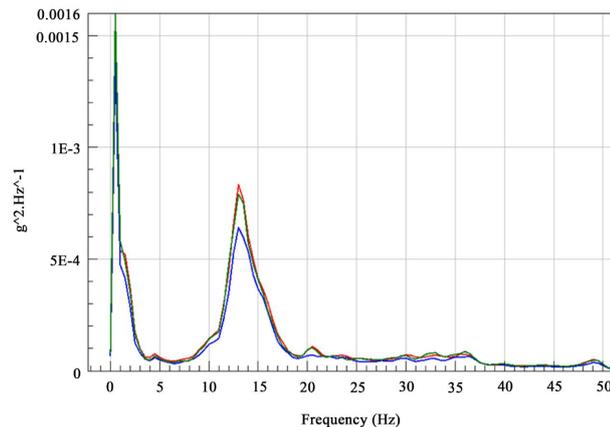


Figure 11. Frequency domain repeatability of a characteristic pavement

图 11. 某特征路面下频域重复性

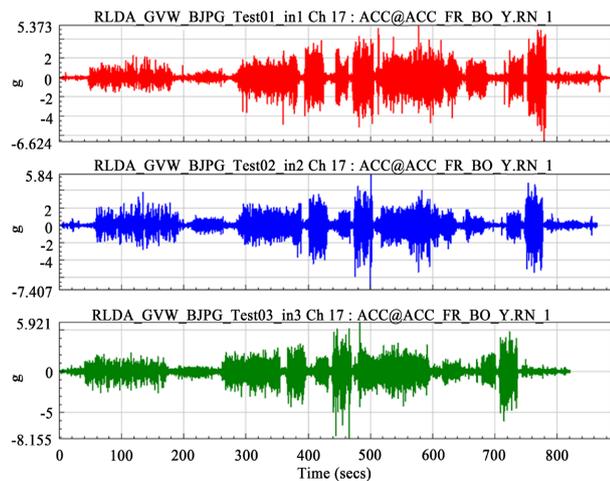


Figure 12. Time domain signal of vehicle body acceleration

图 12. 车身加速度时域信号

5. 关联域特征分析

对于传感器的数值正确性而言，除了定期校准和凭经验确认以外，还能根据通道之间的相互关联来互相确认数值正确性，毕竟两个或多个通道同时产生故障还能相互关联的情况基本不可能发生。比如上面提到的商用车车身加速度传感器，在转向过程中车身 Y 向加速度应该趋势一致，但是由图 14 可以看

出松动的加速度在转向时基本无响应。图 15 为某型 SUV 六分力 Z 向加速度与转向节 Z 向加速度曲线，经过相互对比可知二者数据均真实可信。

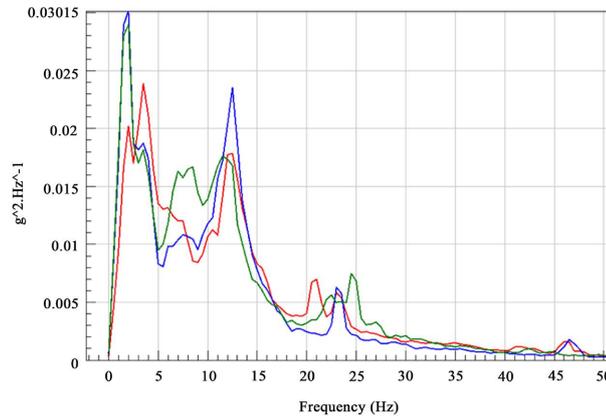


Figure 13. Frequency domain signal comparison of vehicle body acceleration

图 13. 车身加速度频域信号对比

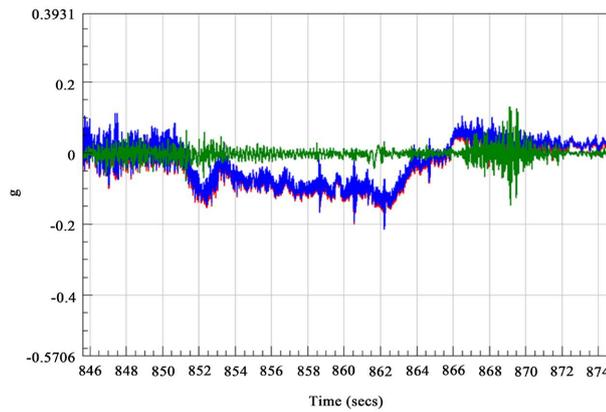


Figure 14. Y-direction acceleration curve of vehicle body

图 14. 车身 Y 向加速度曲线

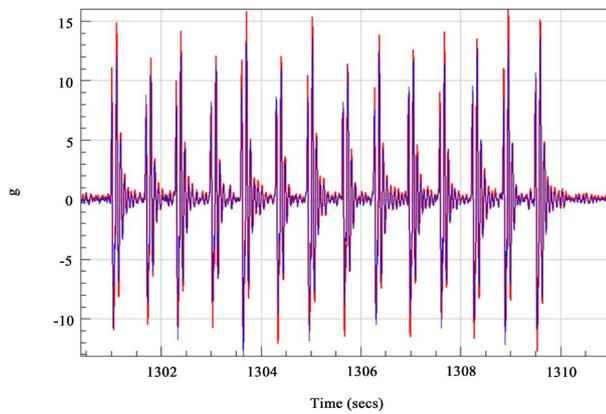


Figure 15. Z-direction acceleration of wheel force transducer and Z-direction acceleration of Steering knuckle

图 15. 六分力 Z 向加速度与转向节 Z 向加速度曲线

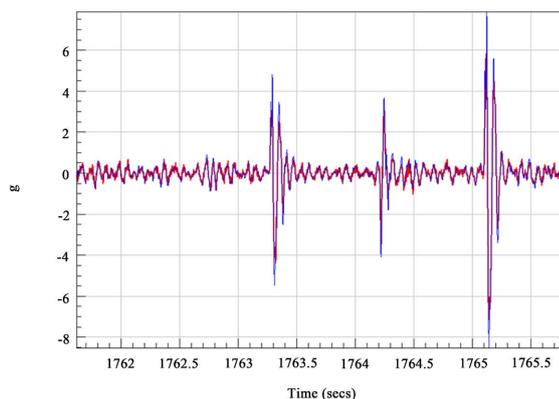


Figure 16. Second derivative of displacement signal and Z-direction acceleration of steering knuckle

图 16. 位移信号二阶导数与转向节 z 向加速度曲线

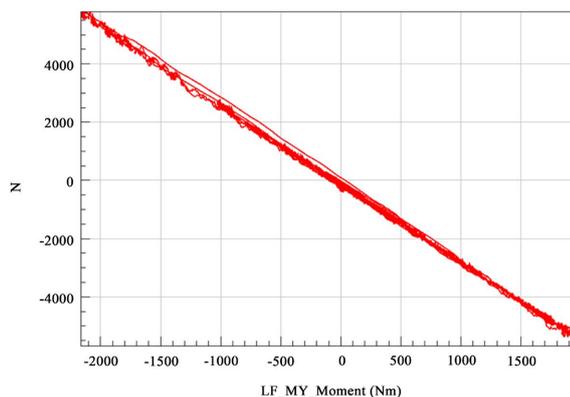


Figure 17. Correlation between WFT FX and My under acceleration and braking conditions

图 17. 加速和制动工况下六分力 Fx 与 My 相关性

以上两种是属于直接关联的通道之间对比进行验证分析，还能通过数值计算和相关性对比进行关联域的特征分析。图 16 显示的曲线为拉线位移传感器数据经过二阶求导和单位转换计算得出的曲线与转向节 Z 向加速度曲线的对比图，可以看出两条曲线在时域上基本吻合，可以确定两组信号均为有效信号。图 17 为某型 SUV 六分力传感器在加速和制动工况下 Fx 和 My 的相关性，由图可以看出，二者为线性负相关，可见二者数据为有效数据。

6. 结论

1) 传感器极性有效性可根据典型特征工况(加速、制动、转向等)下传感器响应信号进行分析，修正方法将数据乘以-1 即可；

2) 其他时域上的典型误差现象比如信号偏移、信号漂移、毛刺、最大值受限等比较容易发现，但是是否需要修正、如何进行修正需要工程师根据实际情况和工程经验综合分析；

3) 频域重复性为同通道的频域对比，通过对比可以发现一些在时域上比较难发现的问题，对同一特征路面来说，在同一车速和载荷下同通道的频域分布应该是近似的；关联域特征分析为不同通道之间的对比，可通过两种方式进行，一种是直接关联、一种是间接关联，直接关联只需要将相关通道在时域、频域对比即可，间接关联则需要计算后再进行对比。

参考文献

- [1] 帕·约翰内森, 等. 王涛, 等, 译. 车辆耐久性载荷分析导论[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2017.
- [2] 韩愈, 孟广伟, 门玉琢. 车辆用户载荷谱试验场关联强化试验方法[J]. 振动、测试与诊断, 2014, 34(6): 1088-1093.
- [3] 刘灵芝, 张冰战, 牛占占. 基于道路试验汽车载荷谱的采集与处理[J]. 安徽建筑大学学报, 2019, 27(6): 5.
- [4] 卿宏军, 韩旭, 陈志夫, 等. 某轿车结构载荷谱采集与分析[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2012, 39(12): 32-36.
- [5] 张英爽. 装载机传动系载荷谱的测取与应用研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2014.
- [6] 丰志强. 飞机机载设备振动/温度环境谱数据处理与程序设计[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2005.
- [7] 薛广进. 基于数理统计方法的轨道车辆载荷谱推断及校准[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.