

新标准下汽车平顺性虚拟道路试验系统与评价方法*

张小龙¹ 潘登¹ 盛丹丹¹ 冯能莲² 曹成茂¹

(1. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036; 2. 密歇根大学机械工程系, Ann Arbor 48109)

摘要: 基于 CAN 和 TCP/IP 总线搭建了包括座椅上方测点角速度信号测量的虚拟测试系统, 基于 LabVIEW 设计了上位机程序, 状态机构架保证了程序易读易维护, 队列方式实现采样和数据处理并行执行提高了程序运行效率。整个系统具有集成度高、传感器体积小易于安装、易于功能扩展的特点。对国内外 4 个平顺性法规进行了对比分析, 利用搭建的测试系统进行了系统实车试验。研究表明: 测试系统工作稳定可靠; 座椅上方角速度信号对评价指标的影响随车速的提高而增大, 在车速达 70 km/h 时已接近 20% (ISO 标准), 不应忽略; 加速度功率谱密度函数的估计方法、原始信号采样频率等对评价指标影响大, 相对而言, 时域法比较稳定可靠, 但确定符合频域频率加权的滤波器是难点。

关键词: 汽车 平顺性 评价方法 测试系统 数据处理

中图分类号: U461.4; N945.16 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0045-07

Virtual Roadway Test System and Evaluation Method for Vehicle Ride Comfort Based on New Test Regulation

Zhang Xiaolong¹ Pan Deng¹ Sheng Dandan¹ Feng Nenglian² Cao Chengmao¹

(1. School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China

2. Department of Mechanical Engineering, University of Michigan, Ann Arbor 48109, USA)

Abstract: A virtual test system used to measure angular velocity on the top of driver seat was constructed based on CAN and TCP/IP bus. The program running in PC was designed based on LabVIEW, of which the status machine structure ensured the program to be easily read and maintained, and the queue structure increased efficiency of program implementing data sampling and processing in parallel. The system had the characteristics of high degree of integration, small size of sensors, convenient installation and function expansion on the spot. Four ride comfort regulations at home and abroad were comparatively analyzed and the test system constructed was used and verified in road way tests. The influence of angular velocity on the top of driver seat on evaluation index increased with the vehicle velocity, and it neared 20% (ISO standard) when the vehicle velocity reached 70 km/h so that it could not be ignored. Additionally, the estimation method of acceleration PSD (power spectral density) and sampling frequency of original signal had a major impact on the evaluation index. Relatively speaking, the time domain method was more stable and reliable. However, it was difficult to determine the filter accorded with frequency domain weighting.

Key words: Vehicle Ride comfort Evaluation method Test system Data processing

引言

汽车平顺性表征汽车行驶过程中因车身振动引

起的乘员舒适性及保持货物完好的性能, 对其进行实车测试与评价具有重要意义^[1]。目前汽车平顺性研究多采用理论建模与仿真的方法, 但由于道路、

悬架和座椅等建模存在偏差而不能实现平顺性定量的准确评价^[2-4]。2009年我国对汽车平顺性试验方法法规进行了修订,主要增加了测点、修订了评价指标计算方法等^[5]。目前平顺性试验研究主要基于修订前的标准进行,不能满足现有法规进行评价的要求,且通常构建的测试系统采用了压电式加速度传感器-多通道电荷放大器-普通数据采集器等分散结构,体积庞大,同时存在可靠性问题^[6-7]。在评价方法方面,我国汽车平顺性新修订法规确定了单轴向加速度均方根值的频率域数据处理方法,法规同时也引入了时间域数据处理方法,但没有给出加速度时间历程信号的加权滤波器参数的确定方法。现有文献主要基于频率域的数据处理方法,对时间域处理研究不够深入^[7-9]。另外,我国新标准与国外同类标准另一不同之处是舍去了座椅上方角速度信号测量,而这一参数对评价结果的影响需要量化分析。

本文研究新标准下的汽车平顺性分布式道路试验系统,采用先进传感器(包括角速度传感器)和CAN、TCP/IP数据传输方式,进一步提高系统的集成度、可靠性和扩展能力,同时基于该系统进行道路试验并对试验数据分析,探索平顺性评价指标构建和数据处理方法的合理性。

1 平顺性试验数据处理与评价方法

汽车平顺性测试和评价流程包括测点与测试参数确定、传感器选型、测试系统构建、系统试验与数据处理等阶段。在路面小激励情况下处理得到的总加权加速度均方根 a_w 作为最终评价指标,并根据其与人体主观感觉的对应关系确定人体的主观感受,如图1所示。

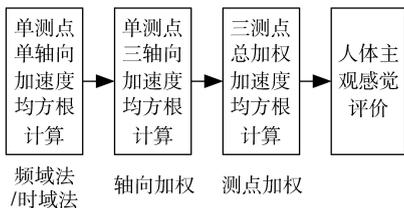


图1 小激励输入下平顺性测试数据处理流程

Fig.1 Data processing scheme of ride comfort test data on little amplitude input

综合对比分析国内外汽车平顺性试验方法与评价标准:ISO 2631—1:1997^[10](下文简称ISO标准)、英国BS 6841:1987^[11](下文简称BS标准)、德国VDI 2057—1:2002^[12](下文简称VDI标准)和中国GB/T 4970—2009^[5](下文简称GB/T标准)可得出:

(1)测点相同,但测量参数选择不同。3个测点

为座椅上方、座椅靠背及驾驶员脚部位置,仅GB/T标准舍去了座椅上方3向角速度的测量,仅测量3测点共9个轴向线加速度。

(2)法规尚未明确大路路面激励输入下评价指标与人体感受的对应关系。国外标准基于试验过程中的信号峰值系数 C_F 反映路面激励程度, C_F 定义为轴向加权加速度的峰值与加权加速度均方根的比值。我国GB/T标准首先通过在路面放置确定形状的三角形凸块激励方式区别大小激励试验,即随机输入试验和脉冲输入试验。

(3)大路路面激励下峰值系数阈值和评价指标不同。ISO标准中 C_F 阈值为9,BS标准中 C_F 为6。 C_F 大于阈值时,ISO及BS标准评价指标分别为振动剂量值 V_{DV} 及均四次方根值 r_{mq}

$$V_{DV} = \left(\int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

$$r_{mq} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a_w^4(t) dt \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

式中 $a_w(t)$ ——加权加速度时间历程, m/s^2

T ——振动作用时间, s

GB/T标准脉冲输入试验中,在 $C_F < 9$ 时采用各轴向最大(绝对值)加速度响应与车速对应关系进行评价,在 $C_F \geq 9$ 时采用 V_{DV} 评价。

(4)法规对采样过程和轴向加速度均方根时域与频域计算方法没有具体给出。4项标准中主要给出了基于功率谱密度函数(简称PSD)的方法(下文简称频域法)计算轴向加权加速度均方根,也推荐对加速度时间历程加权滤波得到加权加速度时间历程后积分开方求加速度均方根的方法(下文简称时域法),但时域法中确定符合频域法频率加权的滤波器是难点,法规中没有给出。另外,法规中对频域法涉及的PSD计算方法也没有给出,实际上PSD估计方法对评价指标影响很大。

(5)单轴向频带加权系数不同,主要是BS标准。ISO标准、BS标准和GB/T标准中总加权加速度均方根与人的主观感觉对应关系均相同,VDI标准略有不同。

2 硬件系统

搭建的数据采集系统如图2所示,主要由传感器、数据采集装置、便携式计算机和电源4部分组成。主要传感器和设备技术参数如表1所示。

9测量自由度传感器VN100安装于座椅上方用于测量三向角速度^[13]。三向ICP加速度传感器安装于座椅上方、座椅靠背、驾驶员脚部位置,用于测量线加速度。GPS速度传感器用于测量车体速度和

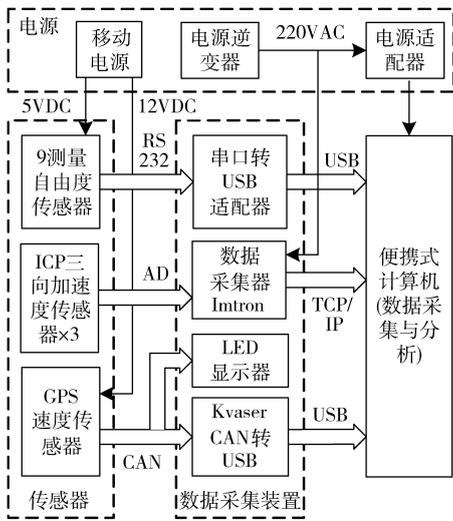


图 2 系统硬件结构框图

Fig. 2 Principle scheme of system hardware structure

行驶轨迹^[14]。所有传感器体积小、现场安装方便。

数据采集装置中 Imtron 集成了 3 块 4 通道 BNC 接口的 ICP 模块,同时采集 9 个轴向线加速度信息,并通过 TCP/IP 传输数据至上位机。Kvaser CAN 转 USB 设备以 250 kb/s 波特率采集 GPS 数据。其中 LED 显示器实时显示车速和位置信息。

系统选用了一块移动电源用于向传感器和数据采集设备供电,其中 ICP 加速度传感器 2 mA 恒电流由 Imtron 模块提供。便携式计算机采用 12 V DC 转 220 V AC 逆变器供电,供电来自车上点烟器。

3 软件架构

3.1 基于状态机的上位机软件

上位机软件主要实现数据采集过程控制和数据后处理,基于 LabVIEW 平台,设计了设备初始化、连

表 1 传感器与设备性能参数

Tab. 1 Performance parameters of sensors and equipments

传感器与设备	精度与性能	数据传输 物理接口	数据更新 速率	配置数据 协议	供电 形式
GPS 速度传感器/英国 Racelogic RLVB 10SPS	兼容 CAN2.0B 协议,速度精度 0.2 km/h,定位精度 2.5 m rms	CAN × 1 RS232 × 1	10 Hz	NEMA 语句 GGA, VTG	
多功能显示器/英国 Racelogic RLVB DSP03	兼容 CAN2.0B 协议,实时显示	CAN × 1			移动电源
9 测量自由度传感器/美国 VectorNav VN100 SMT	角速度量程: ± 2 000(°)/s(x、y、z 向)	RS232 × 1	最大输出频率 200 Hz	VNYMR 语句	
ICP 线加速度传感器/美国 PCB 公司 356B41 × 2(座垫式), 356A16 × 1	量程: ± 10 g(356B41) ± 50 g(356A16) 带宽: 0.5 ~ 1 000 Hz(356B41) 0.5 ~ 4 500 Hz(356A16) 灵敏度: 标定确定,约 100 mV/g	AD × 9			ICP 模块 恒流 2 mA
数据采集器/瑞典 KvaserAB 公司 Kvaser USBcan II	兼容 CAN2.0B 协议	CAN × 2 USB × 1			USB 供电
数据采集器/德国 Imtron 50 - ZE/T - DE	插卡式结构,支持多种模块	BNC × 16 TCP × 1	单通道 20 kHz		220 V AC

接数采、配置参数、断开数采、停止采集、数据回放、报告生成及退出程序等 8 个状态,运用状态机控制数据流,状态变换由前面板控件触发或程序编程指定,其中数据采集程序流程如图 3 所示。3 个设备采用了 3 个队列,其中加速度信息队列数据类型为双精度,角速度和 CAN 信息队列数据类型都是字符串。程序中通过改变控件属性使其使能与不使能来控制按键顺序以避免可能存在的前面板控件误操作。

3.2 集成库函数的数据交互

上位机采用 TCP 方式(Imtron 数据采集器)和 USB 方式(Kvaser 设备)实现与设备的数据交互,利用与 LabVIEW 兼容的库函数实现。串口转 USB 设备在上位机中虚拟成一个串口,其编程与通常串口

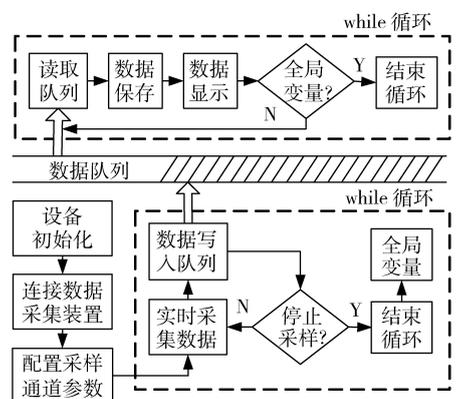


图 3 数据采集程序流程图

Fig. 3 Diagram of data acquisition program

编程相同。

在连接 Imtron 数采时,通过查询其 ddl 配置文

件(需通过 DASoft 软件进行识别生成)判断其是否与上位机正确连接。同时为了便于生成应用程序在其他计算机上运行,设计了通过判断当前程序状态的方式寻找配置文件,避免因程序处于不同状态而连接出错。连接数采程序框图如图 4 所示,其中 AvailableSystemInfos 显示该数据采集器系统信息,包括通道性质与数目等。

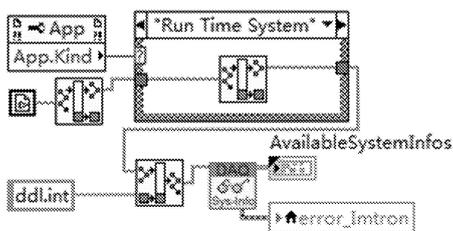


图 4 连接数采程序框图

Fig. 4 Block diagram of connecting data acquisition device

对 Kvaser 的参数配置包括选择采样通道与波特率,而对 Imtron 数据采集器则需进行各通道采样率、块大小及灵敏度等信息的配置。分别调用 Kvaser 设备库函数中 KvCanSetStdBusParams. vi 与 Imtron 数据采集器库函数中 SendMeasConfig. vi 将已配置信息写入到硬件设备中。

为了避免每次试验重复配置,设计了参数记忆功能。读取当前次配置参数子 vi 前面板控件的设置值并保存成 inf 格式文件,便于下次执行配置参数子 vi 时调用该配置文件,即实现对上次参数配置的还原。保存当前次试验参数值程序如图 5 所示。

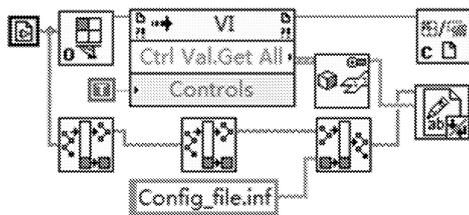


图 5 配置信息保存程序框图

Fig. 5 Block diagram of saving configuration info

为了保证 3 种设备采集数据的同步性,通过操作软件前面板控件触发设备同时采集与停止。同步采集数据程序框图如图 6 所示。分别采用 VISA Read. vi, kvCanRead. vi 及 ReadMeasData. vi 函数读取 Imtron 数采、Kvaser 数采和串口转 USB 适配器数据,并写入 3 个队列中,其中 MeasData 与 MeasDataLength 为线加速度数据及数据长度, CAN_Id 与 CAN_Data 分别为该条 GPS 语句对应 Id 与数据内容, VN100 中包含角速度数据。

3.3 基于队列的数据处理与保存

数据采集过程中程序一方面将从设备获取的数据写入队列,同时从队列中读取数据进行数据保存、预处理和显示,两者并行进行。这种方式可有效保

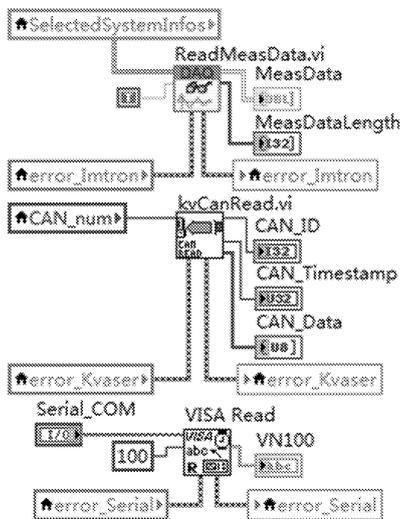


图 6 同步采集数据程序框图

Fig. 6 Block diagram of synchronous collecting data

证采样过程进行有序和采样数据可靠保存。数据以文本格式存储,对保存的文件数据离线处理生成详细报告。

依据法规 GB/T 标准中提供的脉冲输入与随机输入试验条件下不同的评价指标计算方法,分别计算信号的最大值与加权加速度均方根,数据处理程序如图 7 所示。图中 Measdata 为所采集的加速度或角速度数据(其中角速度数据通过解析 VNYMR 数据得出),Sensitivity 与 Frequenz 分别为所配置各通道的灵敏度与采样频率,weighting 为各通道对应测量轴向的加权系数,Max 为该通道信号最大绝对值,Spectrum 为该通道信号对应的 1/3 倍频谱值。

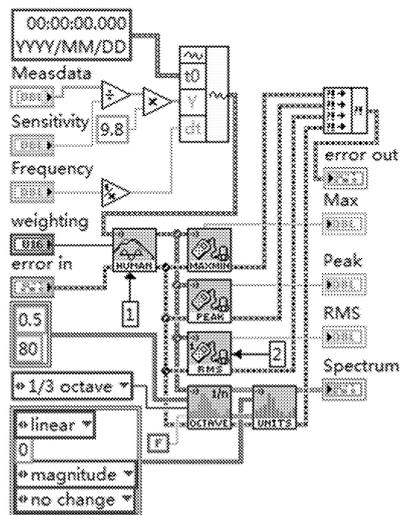


图 7 基于队列的实时数据处理程序框图

Fig. 7 Block diagram of data processing based on queue

随机输入试验条件下,可根据用户需要对各通道加速度数据进行加权加速度均方根实时运算,并提取各测点加权加速度均方根,从而计算出表征整车平顺性的总加权加速度均方根;脉冲输入试验条

件下,需要根据峰值系数的大小,确定评价指标为振动信号最大值或振动剂量值 VDV。

3.4 基于时域算法的评价指标计算

关于随机输入试验条件下的评价指标,ISO 标准中提出了时域与频域两种方法,但具体计算方法没有给出。由于通用编程软件难以实现在时域内对信号进行频率加权,国内平顺性研究中很少采用时域方法进行数据处理^[9]。LabVIEW 中 Sound and vibration 模块提供相应的时域处理函数,如 SVT Human Vibration weighting filter. vi 与 SVL RMS Level. vi,本文基于这两个函数完成时域法评价指标的计算。图 7 中①为 SVT Human Vibration weighting filter. vi 实现对信号加权处理,②为 SVL RMS Level. vi 完成对信号求均方根运算。

4 实车试验

按图 2 结构框图搭建了实车道路试验系统,先后装在三台乘用车上进行 GB/T 标准中要求的随机输入试验和脉冲输入试验。随机输入试验于合肥市高新区某新建空旷路段进行,沥青路面平直。脉冲输入试验于安徽农业大学校内进行,选取南北向一条带有 2 个减速带的平直沥青道路为试验路段。试验设备与传感器如图 8 所示。

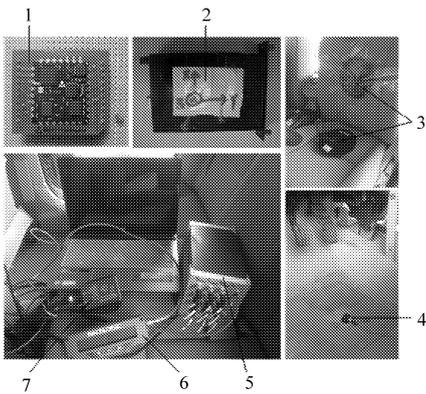


图 8 试验设备与传感器

Fig. 8 Test equipments and sensors

- 1. VN 100 芯片 2. VN 100 封装 3. 座垫式 ICP 三向加速度传感器
- 4. 脚部 ICP 三向加速度传感器 5. Imtron 数据采集器 6. 多功能显示器
- 7. GPS 速度传感器

4.1 随机输入试验与数据处理

随机输入试验中,车辆以 40、50、60、70 km/h 的车速各行驶 3 min 左右,各段车速范围内有效数据样本时间均符合法规要求。GB/T 标准中确定数据频域分辨率 Δf 不大于 0.2 Hz,试验中采样频率设置为 2 kHz,但进行频率法计算时将数据再抽样成 500 Hz,此时频域分辨率是 0.122 1 Hz,符合要求。

4.1.1 功率谱密度估计方法对评价指标的影响

不考虑坐垫位置测点角速度信号。采用改进周期图法即 welch 法计算 PSD,样本长度 L 为 2 048,图 9 为车速 40 km/h 座椅上方测点汽车前进 x 方向同一组试验数据进行 PSD 估计时,选择同样的汉宁窗,但窗长度(不同窗长度对应样本分段)和重叠数据长度(段间重叠)不同的计算结果。4 种组合下 PSD 曲线与横坐标间所包围的面积基本相同,约 $0.010 4 \text{ m}^2/\text{s}^4$,但峰值和横跨的频率范围随样本分段数增加分别减小和增大,最后导致计算的总加权加速度均方根 a_v 相差也大,最大相差约 33.8%。原始数据处理前进行了小波滤波以减小噪声的影响^[15]。

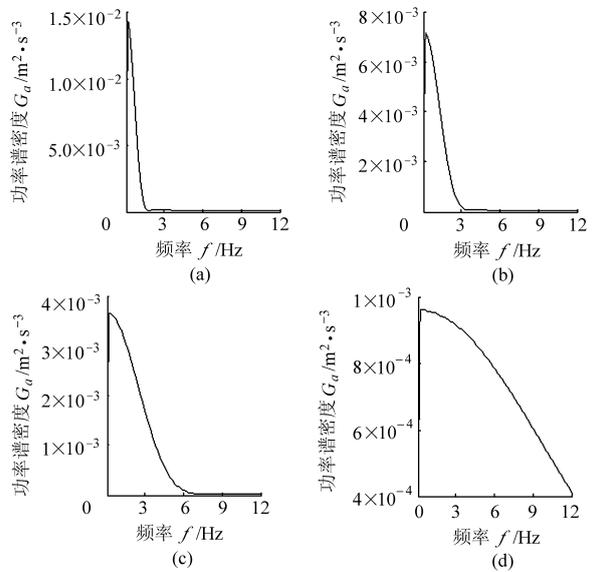


图 9 实车数据窗函数长度和重叠长度不同时 PSD 计算结果

Fig. 9 PSD curves of different window width and overlapping length

- (a) 窗函数长 L ,重叠 $L/2$, $a_v = 0.174 6 \text{ m/s}^2$
- (b) 窗函数长 $L/2$,重叠 $L/4$, $a_v = 0.224 2 \text{ m/s}^2$
- (c) 窗函数长 $L/4$,重叠 $L/8$, $a_v = 0.233 6 \text{ m/s}^2$
- (d) 窗函数长 $L/16$,重叠 $L/32$, $a_v = 0.200 26 \text{ m/s}^2$

4.1.2 评价指标频域法和时域法计算结果对比

时域法基于 LabVIEW 中 Sound and vibration 模块函数计算,见 3.4 节。频域法采用图 9c 的计算方法。模拟产生频率 10 ~ 60 Hz、幅值 1 V 的正弦信号,并分别以 1 kHz、500 Hz、400 Hz、300 Hz、200 Hz 和 100 Hz 等进行采样,每次采样样本长度为 2 048 点。计算结果如图 10 所示,图中 F_{st} 为时域算法正弦波的采样频率, F_{sf} 为频域算法正弦波采样频率。时域法对原始信号采样频率不敏感。

由图 10 可以看出,时域方法对幅值相同、频率不同的信号的衰减随频率增大而加强,符合人体对

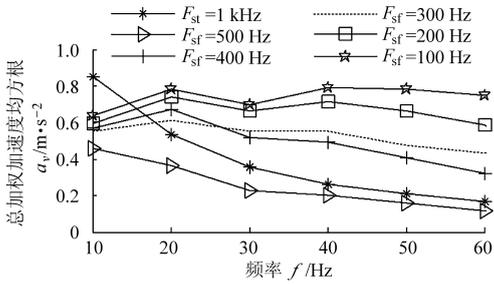


图 10 不同频率正弦波信号的时域与频域计算结果
Fig. 10 Calculated results of sine waves with different frequencies in time and frequency domain

振动的响应和主观感觉。频域法中 500 Hz 采样组数据计算结果在正弦信号 40 Hz 以上时与时域法结果相接近,二者在正弦信号低频时相差较大。其他频域法采样组数据计算结果与信号频率间关系不显著甚至相反。由此可见,原始信号采样频率对频域法计算结果影响很大,而对时域法计算结果影响不大;时域法对高频信号的频率加权滤波结果符合人体对振动的感觉,而频域法的这种趋势受采样频率影响大,且变化趋势间有明显差异。因此本文采用时域算法对随机输入试验下数据进行处理。

4.1.3 座椅上方测点角速度对评价指标的贡献

采用时域法计算总加权加速度均方根 a_v , 分别考虑和不考虑座椅上方测点角速度,角速度加权系数分别采用 ISO 标准与 BS 标准中的值,结果如表 2 所示。

表 2 随机输入试验评价指标计算结果

Tab. 2 Results of evaluation in random input test

车速 /km·h ⁻¹	总加权加速度均方根 $a_v / (m \cdot s^{-2})$				角速度 因素占 a_v 比例/%	
	仅考虑线 加速度		同时考虑线加 速度和角速度		BS	ISO
	BS	ISO	BS	ISO		
40	0.321	0.276	0.343	0.301	6.8	9.1
50	0.353	0.303	0.384	0.339	8.8	15.8
60	0.361	0.312	0.413	0.371	14.4	18.9
70	0.406	0.349	0.466	0.418	14.9	19.7

由表 2 可以看出:座椅上方测点角速度对总加权加速度值的影响随车速的提高而增大,在车速达到 70 km/h 时已接近 15% (BS 标准) 和 20% (ISO 标准)。根据法规中 a_v 与人体主观感觉对应关系表,车速 40 ~ 70 km/h 范围人体对车的总体感觉是有些不舒服 ($0.315 \text{ m/s}^2 a_v < 0.63 \text{ m/s}^2$),但与较不舒服的下限 0.5 m/s^2 已很接近,且测试值随不同车

型这种情况会有一些变化。故认为座椅上方测点角速度信息的影响在计算评价指标 a_v 时不应忽略。

4.2 脉冲输入试验与数据处理

脉冲输入试验车辆速度分别为 10、20、30、40、50、60 km/h,车匀速通过减速带各 5 次。依据 GB/T 标准采用最大加速度响应与车速对应关系评价,结果如图 11 所示,各车速下各通道峰值系数均小于 9, s 为座椅上方测点, b 座椅靠背测点, f 为驾驶员脚部测点。可以看出,在各车速下各轴向最大加速度响应均小于 9 m/s^2 ,但随车速增加最大加速度也增加。GB/T 标准中没有明确脉冲输入评价指标与人体感觉对应关系,但根据 ISO 标准认为试验工况对乘员健康没有危害 ($\dot{Z}_{\max} < 31.44 \text{ m/s}^2$)。试验过程中驾驶员感觉车速达到 30 km/h 时会有些不舒服。

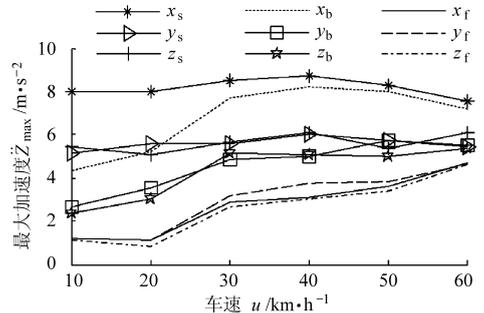


图 11 各通道最大加速度与车速对应关系

Fig. 11 Each axial curves of $\dot{Z}_{\max} - u$

5 结论

(1) 基于 CAN 和 TCP/IP 搭建的虚拟测试系统集成度高,同时采集线加速度和座椅上方测点角速度信息,满足国内外汽车平顺性测试法规要求。实车试验验证了系统的工作可靠性。

(2) 小路面激励输入试验总加权加速度均方根值是最终客观评价指标,但频域法计算时功率谱密度函数的估计方法、原始信号的采样频率等对计算结果影响很大,建议法规中进行明确以提高数据采样和处理的准确性。相对而言,时域法比较稳定可靠,但确定符合频域法频率加权的滤波器是难点,建议法规进行明确和统一。

(3) 座椅上方测点角速度对总加权加速度均方根的影响在车速 70 km/h 时已接近 20% (ISO 标准),且随车速提高而增加,进行最终评价时不宜忽略。但实际试验时需要选择易于安装的角速度测量传感器。

参 考 文 献

1 Paddan G S, Griffin M J. Evaluation of whole-body vibration in vehicles [J]. Journal of Sound and Vibration, 2002, 253(1): 195 ~ 213.

- 2 陈无畏, 祝辉. 基于状态识别的整车操纵性和平顺性的协调控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 121 ~ 129.
Chen Wuwei, Zhu Hui. Coordinated control of vehicle ride comfort and handling stability based on state identification [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6): 121 ~ 129. (in Chinese)
- 3 Uys P E, Els P S, Thoresson M. Suspension setting for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(2): 163 ~ 175.
- 4 Wang G, Yang W, Kang X, et al. A virtual test approach for vehicle ride comfort evaluation[C]. SAE Paper 2004-01-0232, 2004.
- 5 GB/T 4970—2009 汽车平顺性试验方法[S]. 2009.
GB/T 4970—2009 Method of running test—automotive ride comfort [S]. 2009. (in Chinese)
- 6 武一民, 韩亚平, 崔根群. 基于虚拟仪器的车辆振动测量分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 419 ~ 420.
- 7 宗长富, 陈双, 冯刚, 等. 基于频率加权滤波的汽车平顺性评价[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 1 517 ~ 1 521.
Zong Changfu, Chen Shuang, Feng Gang, et al. Evaluation of vehicle ride comfort based on frequency weighted filtering [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1 517 ~ 1 521. (in Chinese)
- 8 汤爱华, 欧健, 邓国红, 等. 汽车平顺性试验数据处理方法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(3): 92 ~ 96.
- 9 徐中明, 周小林, 余烽, 等. 汽车平顺性分析中时域法和频域法的对比[J]. 汽车工程, 2012, 34(4): 306 ~ 310.
Xu Zhongming, Zhou Xiaolin, Yu Feng, et al. Comparison between time and frequency domain method in vehicle ride comfort analysis [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4): 306 ~ 310. (in Chinese)
- 10 ISO 2631—1:1997. Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—part 1: general requirements[S]. 1997.
- 11 BS 6841: 1987. Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [S]. 1987.
- 12 VDI 2057. Human exposure to mechanical vibrations whole-body vibration[S]. 2002.
- 13 VectorNav Ltd. VN-100 UM001 user manual [M]. Ver1.1. VectorNav Ltd., 2009.
- 14 Racelogic Ltd. RLVB 10SPS 10 Hz speed sensor instruction manual [M]. Racelogic Ltd., 2007.
- 15 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 基于改进 RBF 网的汽车侧偏角估计方法试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 105 ~ 110.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Experimental research on vehicle sideslip angle estimation based on improved RBF neural networks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 105 ~ 110. (in Chinese)

(上接第 61 页)

- 7 孙佑攀, 廖宇兰, 陈丹萍. 4UMS-1 型木薯收获机的设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 89 ~ 92.
Sun Youpan, Liao Yulan, Chen Danping. Design of 4UMS-1 type cassava harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 89 ~ 92. (in Chinese)
- 8 Park S R, Yang S H. Analytical sensitivity analysis of geometric errors in a three-axis machine tool[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2012, 36(2): 165 ~ 171.
- 9 He Q S, Liu X, Xiao S F. Application of orthogonal experimental design on reliability and sensitivity analysis[J]. Advanced Materials Research, 2011, 211 ~ 212: 651 ~ 655.
- 10 Kiyong Yi, Choi K K, Kim N H, et al. Design sensitivity analysis and optimization for minimizing springback of sheet-formed part[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 71(12): 1 483 ~ 1 511.
- 11 田启华, 肖人彬, 钟毅芳, 等. 基于信息公理和模糊数学的设计方案评价方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 136 ~ 140.
Tian Qihua, Xiao Renbin, Zhong Yifang, et al. Evaluation schemes method for design based on information axiom and fuzzy mathematics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 136 ~ 140. (in Chinese)
- 12 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260 ~ 266.
Yu Jian, Fang Li, Cang Dingbang, et al. Evaluation of land eco-security in wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 260 ~ 266. (in Chinese)
- 13 郑健, 蔡焕杰, 王健, 等. 温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 124 ~ 129.
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Fuzzy evaluation to integration benefit of regulated deficit irrigation of mini-watermelon based on information entropy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 124 ~ 129. (in Chinese)
- 14 Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1 020 ~ 1 023.