

文章编号:1000-582X(2010)04-014-07

汽车平顺性客观评价方法

张志飞,徐中明,贺岩松

(重庆大学 a. 机械传动国家重点实验室; b. 机械工程学院,重庆 400044)

摘要:现行国标 GB4970-1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》与国际上通行的振动评价方法有一定差异,而且国内对汽车平顺性的特点研究不够深入。分析了国际上的几种振动评价方法。进行汽车平顺性道路试验,测量驾驶员坐垫处、靠背处、脚以及坐垫转动等 10 个轴向的振动,以期全面分析汽车平顺性的特点,进而提出合理的客观评价方法。试验表明座椅垂向振动加权系数 w_k 和 w_b 对振动评价指标影响很小;利用时域法分析得振动的峰值因子在 4~8 之间;分析了各轴向振动所占的比重,发现坐垫垂向振动、靠背前后振动和坐垫俯仰角振动对振动舒适性影响较大。试验分析表明现行汽车平顺性国家标准对汽车中人体所承受的振动约低估了 3 dB。结合试验结果,提出了一种简便有效的测量方法。

关键词:汽车;平顺性;振动;测量;评价

中图分类号:U461.4;X827

文献标志码:A

Objective evaluation methods of automobile riding comfort

ZHANG Zhi-fei, XU Zhong-ming, HE Yan-song

(a. State Key Laboratory of Mechanical Transmission;

b. College of Mechanical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: There is much difference between GB4970-1996 *Method of random input running test-Automotive ride comfort* and international evaluation methods, and the characters of automobile riding comfort is not discussed in detail. The measurement and evaluation methods are discussed. The ten-axis vibrations exposed to human body in automobile are measured throughout road testing, and then the characteristic of automobile riding comfort is analyzed. An objective measurement and evaluation method of automobile riding comfort are presented. The results show that the difference generated by frequency weighting factors w_k and w_b is very little. The crest factor of vibration in automobiles is about 4~8 by time-domain analysis. The percentage of each axis vibration is calculated, the results show that vertical vibration (z -axis) at seat surface, horizontal vibration (x -axis) at backrest and pitch vibration (rx axis) at seat surface are most important for comfort. The evaluation method in GB4970-1996 underestimates the vibration expose on the human body about 3 dB, which should be revised. Based on the results, a simple and convenient method for measuring vibration on automobiles is presented.

Key words: automobiles; riding qualities; vibration; measurements; evaluation

收稿日期:2009-12-30

基金项目:重庆市科委重点攻关项目资助(2008AB6018)

作者简介:张志飞(1983-),男,重庆大学博士,研究方向为车辆系统动力学及控制,(Tel)13527498383,

(E-mail)cquzzf@cqu.edu.cn。

汽车使人体暴露在全身振动环境中,影响着人的舒适性、工作效率乃至健康,即汽车平顺性。因此如何科学、合理地评价汽车平顺性是十分有意义的,其评价方法包括主观评价和客观评价。但是主观评价复杂、差异大,不利于工程实用,因此人们致力于寻找合理的客观评价方法。

我国的汽车平顺性国家标准是借鉴国际上关于振动评价的标准建立的^[1-3],但与国际标准^[4-5]有一定差异。国内对汽车平顺性的研究大多参考国际标准进行分析^[6-14],对汽车平顺性的特点分析不够深入。因此通过试验分析了汽车平顺性的特点,对比了振动评价方法的差异性,提出了合理的汽车平顺性客观评价方法。

1 人体全身振动评价方法

汽车平顺性主要由于人体暴露在全身振动环境中而引起的。人体对振动的响应是十分复杂的,自20世纪30年代以来进行了大量的研究^[1],几种影响较大的评价方法有:

1) ISO2631-1974/1985^[4],用1/3倍频带加速度均方根值给出了在1~80 Hz范围内人体对振动响应的暴露极限、疲劳—工效降低极限和舒适降低极限。在20世纪90年代以前得到了广泛应用,但后续研究认为它所采用三个界限和1/3倍频带分别评价法不合理,现在使用得较少。

2) 吸收功率法^[16-17],1968年Lee R. A.和Pradko F.提出了人体对振动的响应与人体所吸收的能量有关,以人体与振动系统接触部位的力和速度信号来计算吸收功率,以此来评价。按定义,其测量较为复杂,多用在基础研究中。研究表明吸收功率与加速度均方根值有关,可用类似频率加权系数的方法表述。主要被美国、北约军方所采用^[13]。

3) BS6841-1987(英国标准)^[15],英国标准组织在1987年颁布的测量与评价方法。

4) ISO2631-1997^[5],ISO在1997年颁布的测量与评价方法,是现行标准。

尽管存在一些争议^[18-22],目前被广泛认可和使用的全身振动评价标准主要有ISO2631-1997、英国标准BS6841-1987,前者是以后者为蓝本制定的,只有部分内容差异。

1.1 BS6841-1987

BS6841给出了坐姿、立姿、卧姿下人体受振图(如图1),立姿和卧姿只考虑支承面的三轴向振动,坐姿考虑坐垫支承面3个线振动和3个角振动,以及靠背和脚支承面处3个线振动。

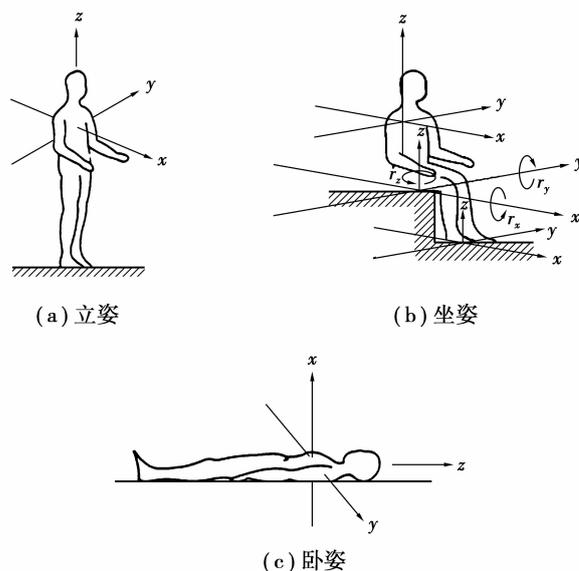


图1 人体坐标系

BS6841认为人体对振动的反应与频率有关,给出了频率加权系数,它受振动轴向、部位的影响,还与评价振动对人体的影响有关。

BS6841按照振动对人体的影响,从健康、行为、舒适、感知和晕车5个方面给出了评价指南。汽车平顺性是针对健康人在汽车振动环境中的舒适性,因此主要讨论评价舒适性的方法。

评价振动对舒适性的影响时,它以加权加速度均方根值rms作为指标,规定测量时间不少于60s。

$$\text{rms} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a^2(t) dt \right)^{1/2}, \quad (1)$$

式中: $a(t)$ 是按频率加权系数滤波后的加速度时域信号,单位是 ms^{-2} , T 为暴露时间,以s为单位。

对于多轴振动,应按照轴向加权系数 k_i 计算其合成值,如式(2)。评价舒适性时,坐姿人体各轴的轴加权系数和频率加权系数见表1。

$$\text{rms} = \left(\sum_{i=1}^N (k_i \times \text{rms}_i)^2 \right)^{1/2}. \quad (2)$$

附录中指出,当峰值因子大于6时(峰值因子是加权加速度时间历程的峰值与加权加速度均方根值的比值),rms低估了振动,应采用均四次方根植rmq作为评价指标,计算如式(3)。

$$\text{rmq} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4}. \quad (3)$$

附录中给出了加权加速度均方根值与舒适性的关系,见表2。

表 1 各轴的频率加权系数和轴加权系数

部位	频率加权系数		轴加权系数
	BS6841	ISO2631	
坐垫 x 向	w_d		1
坐垫 y 向	w_d		1
坐垫 z 向	w_b	w_k	1
坐垫 R_x 向	w_c		0.63
坐垫 R_y 向	w_c		0.4
坐垫 R_z 向	w_c		0.2
靠背前后 x 向	w_c		0.8
靠背左右 y 向	w_d		0.5
靠背垂直 z 向	w_d		0.4
脚 x 向	w_b	w_k	0.25
脚 y 向	w_b	w_k	0.25
脚 z 向	w_b	w_k	0.4

表 2 不舒适程度与加权加速度均方根值的关系

加权 rms/($m \cdot s^{-2}$)	不舒适程度
< 0.315	没有不舒适
$0.315 - 0.63$	有一点不舒适
$0.5 - 1$	比较不舒适
$0.8 - 1.6$	不舒适
$1.25 - 2.5$	很不舒适
> 2.0	极不舒适

1.2 ISO2631—1997

ISO2631—1997 与 BS6841 在评价振动对舒适的影响时基本一致,区别在于。

1)评价指标及其使用条件略有不同。

BS6841 以加速度均方根值 rms 和均四次方根值 rmq 为指标进行评价。ISO2631—1997 给出了基本评价方法和辅助评价方法:

①基本评价方法:即加权加速度均方根值 rms,计算如 1 式。

②辅助评价方法:运行加速度均方根值和振动剂量值 VDV。

运行加权加速度均方根值,主要针对瞬态振动或间歇性的瞬态振动,即在整個时间内,求出短时间 τ 内的加权加速度均方根值 $a_w(t_0)$, $a_w(t_0)$ 的最大值即最大瞬态振动值 MTVV。

振动剂量值的定义如式(4)。振动剂量值和

BS6841 中规定的 rmq 相差暴露时间的 $1/4$ 次幂,二者的关系见式(4)。

$$VDV = \left(\int_0^T a^4(t) dt \right)^{1/4} = \text{rmq} \times T^{1/4} \quad (4)$$

2)评价指标的使用条件略有不同。

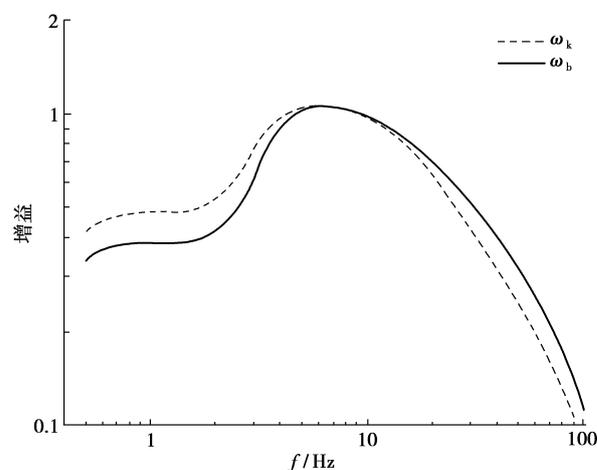
BS6841 以峰值因子为 6 来区分 rms 和 rmq。而 ISO2631 则规定,当峰值因子 > 9 或满足下式(5)时,用辅助评价方法评价振动。

$$\text{ratio_Vr} = \frac{VDV}{\text{rms} \times T^{1/4}} \geq 1.75, \quad (5)$$

$$\text{或} \frac{MTVV}{\text{rms}} \geq 1.5.$$

3)频率加权系数不同

评价舒适性时,ISO2631 和 BS6841 采用的频率加权系数见表 1。座椅面垂向、脚支承面 3 轴向的频率加权系数不一致,ISO2631 采用 w_k ,BS6841 采用 w_b ,分别为图 2 中的虚线和实线。可见二者差别很小,但也存在争论^[18]。

图 2 w_b 和 w_k 的比较

2 汽车平顺性评价方法

对于汽车平顺性,M. J. Griffin 等人在 1978 年利用 ISO2631—1974 标准进行评价^[23]。目前国外多依据 ISO2631、BS6841、吸收功率法这几种方法评价汽车平顺性^[19, 24]。

而国内对汽车平顺性的评价从 20 世纪 80 年代开始展开,吉林工业大学、长春汽车研究所和西安公路交通大学等单位开展了大量工作,并依据吸收功率法和 ISO2631—1985 制定了 GB4970—1985《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》。

西安公路交通大学的马广发探讨了 ISO2631 中

存在的问题,并对国标的修订提出了建议^[7]。清华大学赵六奇等介绍了 ISO2631-1997 的草案,引用国外的汽车平顺性试验结果对汽车平顺性的评价方法提出了建议^[9]。

现行国家标准 GB4970-1996《汽车平顺性随机输入行驶试验方法》^[2]正是在 ISO2631-197 草案的基础上建立的。它规定试验时测量坐垫上 3 个线振动,以三轴向加权加速度均方根值的矢量和为评价指标:

$$a_{uw} = [(1.4a_{xw})^2 + (1.4a_{yw})^2 + a_{zw}^2]^{\frac{1}{2}} \quad (6)$$

式中, a_{xw} 、 a_{yw} 和 a_{zw} 分别是 x 向、 y 向和 z 向的加权加速度均方根值。

国内对汽车平顺性的研究也较多,陈荫三等人对卧铺客车振动进行了评价^[10],杜子学、郑郎等人提出了汽车综合振动舒适度的概念^[11-12],唐传茵等人利用模糊数学和概率论把客观指标和主观感觉相结合^[14],但大都以 GB4970 为依据。

国内在汽车平顺性评价方面主要存在以下问题:

1) 峰值因子的研究少。BS6841、ISO2631 都提出了以峰值因子作为区分振动评价方法的重要依据,但国内很少有人计算振动的峰值因子,仅限于借鉴国外的数值。这是由于仅从频域法计算无法得到峰值因子,而时域法分析又很少。

2) 对于座椅支承面以外的振动关注很少。汽车中的坐姿人体,应考虑 12 轴向的振动,而目前国内仍然只考虑座椅支承面的 3 个线振动,没能全面体现汽车中的振动。

3) 轴向加权系数。GB4970-1996 采用的轴加权系数与 ISO2631 种评价舒适性的不一致,与评价健康的一致,另外 ISO2631 中指出若无法测出靠背振动时,可将座椅面水平振动的系数修正为 1.4。但 GB4970 的依据并不明确,而且国内对平顺性的评价多依据表 2 给出的客观值与舒适之间的联系。

3 汽车平顺性评价试验与分析

为了解决汽车平顺性评价所存在的问题,并分析 w_k 和 w_d 的区别,进行汽车平顺性试验。选择郊区平直沥青道路。采集时间 90 s。试验车速为 30、40、50 和 60 km/h,试验共进行了 10 组。

按照坐姿模型,应该测量 12 个轴向的振动,实际测试时按如下方法进行:

1) 驾驶员坐垫、靠背的 3 个线振动,采用坐垫传感器来测量。

2) 以座椅下方支架的振动来代表脚的振动。

3) 坐垫处 3 个角振动不易测量,以车身上的角振动近似坐垫处的角振动,利用 2 个加速度传感器计算角振动。

受试验条件限制,脚的 x 轴向振动(前后)和坐垫处 Rz 振动(横摆)没有测量。所有传感器的频率范围低至 0.1 Hz,满足要求。

利用时域法分析数据,即根据频率加权系数设计数字滤波器,对加速度时间信号进行滤波,可得到峰值因子、rms、VDV 等指标。

3.1 w_k 和 w_d 的区别

对坐垫 z 向加速度信号分别按照 w_k 和 w_d 滤波计算加权加速度均方根值 a_{wk} 和 a_{wd} ,结果见表 3。以 a_{wk} 为基准,二者的相对差值在 5%左右,若对于 10 轴振动的矢量和, w_k 和 w_d 的造成的差别只有 2%,而且对峰值因子的影响也很小,因此 w_k 和 w_d 的影响很小,后面的分析均采用 w_k 。

表 3 w_k 和 w_d 的区别

工况	$a_{wk}/(\text{ms}^{-2})$	$a_{wd}/(\text{ms}^{-2})$	相对差值/%
1	0.1715	0.1610	6.52
2	0.1467	0.1399	4.86
3	0.1487	0.1432	3.84
4	0.1764	0.1710	3.16
5	0.1606	0.1556	3.21
6	0.1605	0.1548	3.68
7	0.1910	0.1846	3.47
8	0.1825	0.1760	3.69
9	0.1998	0.1879	6.33
10	0.1820	0.1729	5.26

3.2 汽车中人体振动的特点

计算了 10 个工况下各轴向振动的峰值因子和 ratio_Vr,其平均值和标准偏差见表 4。驾驶员所承受的各轴向振动的峰值因子基本在 4~8 之间,小于 9。各轴向的 ratio_Vr 值基本在 1.5 左右,小于 1.75。

按照 ISO2631,应该采用基本评价方法评价。按照 BS6841,应以均四次方根值 rmq 来评价峰值因子超过 6 的振动,以 rms 评价峰值因子低于 6 的振动,但是对于这种包含不同峰值因子的多轴振动,如何计算其矢量和,仍无定论。因此建议依据 ISO2631,采用加权加速度均方根值为评价指标。

表4 各轴向振动的峰值因子和 ratio_Vr 的平均值

部位	峰值因子		ratio_Vr	
	平均值	标准差	平均值	标准差
坐垫 x 向	6.43	1.09	1.60	0.12
坐垫 y 向	5.85	0.98	1.50	0.10
坐垫 z 向	5.73	1.07	1.44	0.10
坐垫 Rx 向	4.59	0.53	1.35	0.03
坐垫 Ry 向	5.29	1.03	1.41	0.09
靠背前后 x 向	5.66	0.70	1.43	0.07
靠背左右 y 向	5.16	0.68	1.45	0.09
靠背垂直 z 向	6.71	1.82	1.67	0.23
脚 y 向	6.49	2.23	1.42	0.11
脚 z 向	6.68	0.80	1.47	0.09

3.3 rms 和 rmq 的区别

ISO 和 BS 标准中给出了 rmq 和 rms 的近似关系, 比值为 1.4。根据试验, 分析各轴向振动的 rmq 与 rms, 图 3 给出了其散点图, rmq 与 rms 近似线性关系, 比值约为 1.4, 与标准一致。

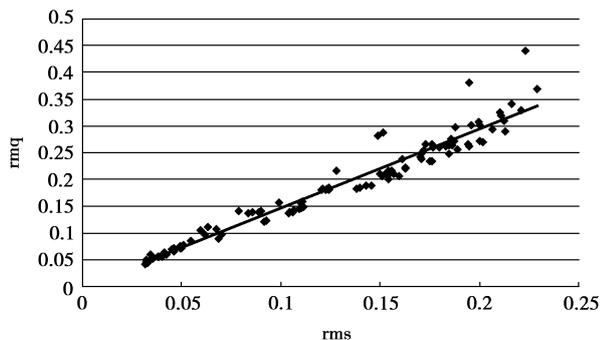


图3 rmq 与 rms 的关系

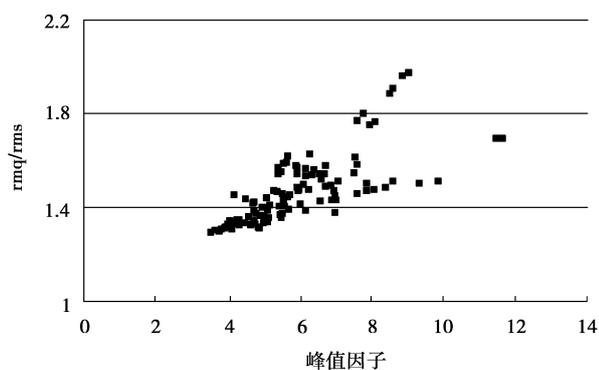


图4 rmq/rms 与峰值因子

将比值 rmq/rms 与峰值因子相联系(如图 4), 发现峰值因子越大, rmq 与 rms 的比值越大。

3.4 汽车平顺性的评价

按照 ISO2631 计算 10 个轴向振动的矢量和 a_{v1} , 按照 GB4970 计算坐垫三轴向振动加权加速度均方根值的矢量和 a_{v2} , 结果见表 5。 a_{v2} 只是 a_{v1} 的 67.4% 左右, 按照振级的计算方法(式 7), 二者相差 3 dB, 说明 GB4970 低估了人体实际承受的振动。

$$L_a = 20\lg(a/a_0) = 20\lg(a/10^{-6})。 \quad (7)$$

表5 GB4970 与 ISO2631 的对比

工况	$a_{v1}/(\text{ms}^{-2})$	$a_{v2}/(\text{ms}^{-2})$	$a_{v2}/a_{v1}(\%)$
1	0.284 1	0.185 6	65.3
2	0.253 2	0.166 7	65.8
3	0.245 4	0.163 2	66.5
4	0.291 1	0.197 6	67.9
5	0.272 3	0.179 9	66.1
6	0.268 2	0.181 9	67.8
7	0.319 2	0.216 6	67.9
8	0.306 2	0.212 6	69.4
9	0.351 4	0.245 2	69.8
10	0.333 0	0.223 8	67.2

计算加权后的各轴向 rms_i 与总的 rms 的比值 (pct_rms_i), 如图 5 所示。

$$\text{pct_rms}_i = \frac{k_i \text{rms}_i}{\left(\sum_{i=1}^N (k_i \text{rms}_i)^2\right)^{1/2}}。$$

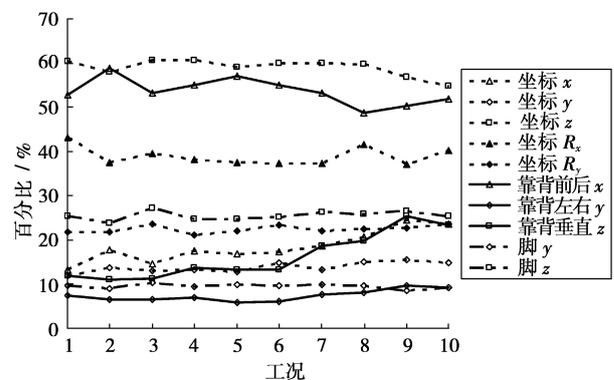


图5 各轴向振动的 pct_rms

坐垫 z 向、靠背 x 向和坐垫 R_x 向的 pct_rms 最大, 平均值分别为 58.9%、53.6% 和 38.9%, 脚 z 向、坐垫 R_y 向、坐垫前后方向的振动其次, 其余各轴向振动的 pct_rms 均在 10% 以下。随着车速的增加, 坐垫 z 向、靠背 x 向振动所占的比例有变小的趋势, 坐

垫 x 向、靠背水平振动则有增加的趋势,其他轴向振动变化较小。

表6 各轴向 rms 所占的比例

部位	pct_rms 的平均值/%
坐垫 x 向	18.4
坐垫 y 向	13.8
坐垫 z 向	58.9
坐垫 R_x 向	38.9
坐垫 R_y 向	22.4
靠背前后 x 向	53.6
靠背左右 y 向	7.4
靠背垂直 z 向	16.1
脚 y 向	9.5
脚 z 向	25.5

评价汽车平顺性时,若测量所有轴向振动,会给试验增加难度,因此应寻找近似方法,同时满足评价的精度和试验的方便性。考虑如下几种方案:

1)考虑坐垫 z 向、靠背 x 向、坐垫 x 向角振动以及脚 z 向振动,合成振动约占总振动的 92%,但随车速增加在变小。

2)考虑坐垫、靠背的 3 个线振动,坐垫 x 向角振动以及脚 z 向振动,其合成振动约为总振动的 97%,且不随车速变化而变化。

3)考虑坐垫、靠背的 3 个线振动,脚 z 向振动,其合成振动约为总振动的 88%,且不随车速变化而变化。

第 3 种方案的合成振动与总振动的比值最稳定(88%左右),不受车速影响,测试方便,且坐垫处、脚的振动对分析汽车悬架、座椅特性有帮助。因此推荐测量靠背、坐垫的 3 个线振动和脚的 z 向振动,并除以 0.9 进行修正,以此来评价平顺性。

4 结 论

通过对试验数据的分析,得出以下结论:

1)坐垫垂直轴向的频率加权系数 ω_k 和 ω_b 对汽车平顺性评价结果影响很小。

2)汽车等速行驶时,人体承受振动的峰值因子一般低于 9, ratio_Vr 也在 1.75 之下,按照 ISO2631,应该采用基本评价方法——加权加速度均方根值来评价振动对人体的影响。

3)汽车中人体承受的振动中,坐垫垂向、靠背前

后和坐垫俯仰角振动所占比例较大。

4)现行国家标准 GB4970—1997 低估了人体承受的振动,需将加权加速度均方根值除以 0.67 进行修正。

5)结合试验数据,提出测量坐垫、靠背 3 线振动和脚 z 向振动,计算合成振动,并除以 0.9 作为指标来评价汽车中人体承受的振动。

文中的试验数据较少,因此上述结论尚需大量试验数据进行检验和修正,以更好地指导汽车平顺性的评价。

参 考 文 献:

- [1] 余志生. 汽车理论[M]. 北京:机械工业出版社,2009.
- [2] 长春汽车研究所. GB 4970—1996 汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1996.
- [3] 长春汽车研究所. GB 4970—1985 汽车平顺性随机输入行驶试验方法[S]. 北京:中国标准出版社,1985.
- [4] International Standard Organization. ISO 2631-1—1985 Evaluation of human exposure to whole-body vibration-Part1: General requirements[S]. [s. l.]: ISO, 1985.
- [5] International Standard Organization. ISO 2631-1—1997 Mechanical vibration-Measurement and evaluation of human exposure to hand-transmitted vibration-Part 1: General requirements[S]. [s. l.]: ISO, 1997.
- [6] 王秉刚,张志光,孟祥符. 对汽车平顺性物理量评价指标的试验验证及讨论[J]. 汽车技术,1982(3):2-7. WANG BING-GANG, ZHANG ZHI-GUANG, MENG XIANG-FU. Discussion and experimental validation of evaluation physical indexes of automotive riding comfort. Automobile Technology, 1982 (3): 2-7.
- [7] 马广发. 汽车平顺性的试验研究及评价指标的探讨——随机输入法[J]. 汽车工程,1983(1):20-27. MA GUANG-FA. The test and evaluating criterion of automotive ride—a random input method [J]. Automotive Engineering, 1983(1):20-27.
- [8] 卢士富. 关于国际标准 ISO2631 的认识和修改[J]. 长安大学学报:自然科学版,1993,13(4):58-63. LU SHI-FU. About the understanding and amendment of international standard ISO 2631 [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 1993, 13(4):58-63.
- [9] 赵六奇,刘锋. 参照国际标准 ISO 2631 的新草案修订汽车平顺性的评价方法[J]. 汽车工程,1993,15(6):371-377. ZHAO LIU-QI, LIU FENG. Revise the Evaluation Method of Vehicles Ride Performance with Reference to the New ISO 2631 Draft[J]. Automotive Engineering, 1993,15(6):371-377.

- [10] 陈荫三,高利. 卧姿人体承受全身振动降低舒适界限的研究[J]. 汽车工程,1991,13(4):208-213.
CHEN YIN-SAN, GAO LI. A study of reduced comfort boundary of human exposure to whole-body vibration at lying posture[J]. Automotive Engineering, 1991,13(4):208-213.
- [11] 杜子学. 基于乘用车型平顺性分析的新指标——汽车综合振动舒适度 $C_{(gv)}$ [J]. 西南交通大学学报, 2000,35(2):152-154.
DU ZI-XUE. A new index for ride quality analysis of automobiles; the coefficient of general vibration[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2000,35(2):152-154.
- [12] 郑郦. 汽车振动舒适性的测量与评价[J]. 客车技术与研究,2000,22(4):23-26.
ZHENG YUN. Measurement and evaluation of automotive vibration comfort[J]. Bus technology and research, 2000, 22(4): 23-26.
- [13] 吴志成,陈思忠,杨林等. 越野车辆平顺性评价方法研究[J]. 兵工学报,2007,28(11):1393-1396.
WU ZHI-CHENG, CHEN SI-ZHONG, YANG LIN, et al. Research on objective evaluation criterion for ride comfort of off-road vehicles [J]. Acta Armamentarii, 2007,28(11):1393-1396.
- [14] 唐传茵,张天侠,李华等. 汽车振动舒适性评价研究[J]. 振动与冲击,2008,27(9):158-161,166.
TANG CHUAN-YIN, ZHANG TIAN-XIA, LI HUA, et al. Evaluation of ride comfort of a vehicle[J]. Journal of Vibration and Shock, 2008,27(9):158-161,166.
- [15] British Standards Institution. BS6841—1987 Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [S]. [s. l.]: British Standards Institution, 1987.
- [16] LUNDSTROM R, HOLMLUND P. Absorption of energy during whole-body vibration exposure [J]. Journal of Sound and Vibration,1998,215(4):789-799.
- [17] LUNDSTROM R, HOLMLUND P, LINDBERG R. Absorption of energy during vertical whole-body vibration exposure [J]. Journal of Biomechanics,1998, 31(2):317-326.
- [18] GRIFFIN M J. A comparison of standardized methods for predicting the hazards of whole-body vibration and repeated shocks[J]. Journal of Sound and Vibration, 1998,215(4):883-914.
- [19] PADDAN G S, GRIFFIN M J. Evaluation of whole-body vibration in vehicles [J]. Journal of Sound and Vibration,2002,253(1):195-213.
- [20] AHN S J, GRIFFIN M J. Effects of frequency, magnitude, damping, and direction on the discomfort of vertical whole-body mechanical shocks[J]. Journal of Sound and Vibration,2008,311(1/2):485-497.
- [21] NEWELL G S, MANSFIELD N J. Evaluation of reaction time performance and subjective workload during whole-body vibration exposure while seated in upright and twisted postures with and without armrests [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008,38(5/6):499-508.
- [22] MEADA S, MANSFIELD N J, SHIBATA N. Evaluation of subjective responses to whole-body vibration exposure: effect of frequency content [J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2008, 38(5/6):1-7.
- [23] GRIFFIN M J. The evaluation of vehicle vibration and seats [J]. Applied Ergonomics,1978,9(1):15-21.
- [24] ELS P S. The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles [J]. Journal of Terramechanics,2005, 42(1):47-64.

(编辑 张小强)