

# 汽车试验场中度标准搓板路的强化系数<sup>\*</sup>

李文亮<sup>1,2</sup>, 高利<sup>1</sup>

(1. 北京理工大学机械与车辆学院 北京, 100081) (2. 交通运输部公路科学研究院 北京, 100088)

**摘要** 为了进一步提高试验场可靠性强化试验及结果评价的合理性, 利用有限元仿真的方法和 Smith-Watson-Topper 疲劳寿命预测理论, 分析了不同车速、车辆质量及轴距条件下试验样车前地板部件的疲劳寿命, 计算了中度标准搓板路的强化系数, 绘制了  $K-v$ ,  $K-m$  和  $K-L$  曲线, 探讨了车速、质量及轴距对强化系数的影响。绘制了  $K-v-m$  和  $K-v-L$  曲面, 给出了  $K-v-m$  和  $K-v-L$  回归模型。研究结果把强化系数扩展到了强化区间, 揭示了强化系数随着车速、车辆质量及轴距变化的规律。根据强化系数的变化可对试验规程适当修正, 进而得到更加准确的评价结果。

**关键词** 汽车试验场; 搓板路; 强化系数; 有限元法

**中图分类号** U467.5<sup>+</sup>1

## 引言

车辆强化试验是考核车辆产品可靠性的基本试验方法, 是车辆在比正常使用环境苛刻的条件下进行的寿命试验。强化系数的研究和估算是制定试验规范和对强化试验结果进行科学评价的关键, 强化系数是指试验对象在实际使用中的寿命与强化试验中的寿命之比。应用虚拟试验场技术对可靠性试验进行研究, 可以进一步缩短试验周期, 降低成本, 同时可以获得足够的、可重复的数据。研究表明, 无论是轮心载荷还是其他测量点处载荷, 预测载荷与试验测量载荷有着不错的一致性<sup>[1-3]</sup>。曹正林等<sup>[1]</sup>应用虚拟试车场技术建立了某轿车整车柔性虚拟试车场仿真模型, 解决虚拟试车场技术运用中的轮胎模型、橡胶衬套刚度、路面模型和整车模型计算效率等关键技术。周炜等<sup>[4]</sup>采用虚拟试车场技术研究得到了搓板路强化曲线。文献<sup>[5-7]</sup>利用整车在虚拟路面的仿真分析, 对零部件的疲劳寿命进行预测, 进而计算强化系数。文献<sup>[8-13]</sup>采用测量算法研究了强化系数, 对汽车主要零部件承受的载荷、应力或应变进行测量, 根据疲劳损伤相等原则, 通过统计分析用疲劳损伤理论来估算强化系数。文献<sup>[14]</sup>通过故障统计的方法研究了强化系数, 提出在大多数情况下强化系数是随行驶里程起点、行驶里程区间长度不同而变化的, 可表示为行驶里程的函数。对新车

定型试验来说, 起点和终点固定, 强化系数也是定值。

上述研究中强化系数是一个固定的值, 或只定性分析了强化系数随车速的变化<sup>[4]</sup>, 据此制定的试验场可靠性强化试验规范亦只能适用于具体的车型, 且试验车速发生变化后, 试验规范无法调整, 缺乏适用性, 导致试验结果误差增大。试验场可靠性试验的强化系数受车速、质量及轴距等因素的影响, 是一个变化的量, 以某样车前地板部件为例, 研究车速、质量及轴距对搓板路强化系数的影响, 对试验场可靠性试验规范的制修订具有重要意义。

## 1 疲劳寿命估算理论

### 1.1 Smith-Watson-Topper 方程

软件疲劳寿命 (virtual proving ground, 简称 VPG) 预测算法采用 Smith-Watson-Topper 方程, 考虑了平均应力的影响。公式如下

$$\sigma_{\max} \epsilon_a = \frac{\sigma_f'^2}{E} (2N_f)^{2b} + \epsilon_f' \sigma_f' (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

其中:  $\sigma_{\max}$  为最大应力值;  $\epsilon_a$  为应变幅度;  $b$  为疲劳强度指数;  $c$  为疲劳延性指数;  $\epsilon_f'$  为疲劳延性系数;  $\sigma_f'$  为疲劳强度系数;  $2N_f$  为载荷反向次数 (失效的半周期数)。

\* 交通运输部应用基础研究资助项目 (2013319223180); 中央及公益性科研院所基本业务费专项资金资助项目 (2012-9005)

收稿日期: 2013-11-13; 修回日期: 2014-02-28

式(1)中,  $\sigma_{max}$  用来修正平均应力的影响。如果应力和应变是从线弹性分析中得到,那么需要经过 Ginka 能量密度法计算得到真实的应力和应变,才能应用到方程中。

### 1.2 强化系数的计算

采用一般沥青路面替代用户路面进行强化系数的估算,设沥青路的强化系数为 1,则计算公式为

$$K = N_l / N_q = S_l / S_q \quad (2)$$

其中:  $N$  为寿命(周次);  $S$  为寿命(里程);  $K$  为强化系数;下标  $l, q$  分别表示沥青路面和强化路面。

## 2 可靠性试验仿真模型

仿真所用整车模型是在某车型白车身的基础上,增加了发动机、悬架和轮胎等构成。根据汽车道路试验的特点,在不影响计算要求和精度的前提下,应尽可能地减少模型的单元数,以减小运算成本。前悬架选择 MCPHERSON 液压减振器 A-ARM,后悬架选择 MCPHERSON 液压减振器 H-ARM,并创建用于车身疲劳和寿命分析的轮胎模型。表 1 为整车具体参数。考虑到试验过程中车辆的自身载荷,在驾驶员与副驾驶员位置、前后车门和行李箱等部位加载了集中质量,并施加重力作用。

表 1 整车有限元模型参数

Tab. 1 Car FE model configurations

质量/ kg	长×宽×高/ mm	节点数	单元数	部件数
1 062	4 283×1 692× 1 423	68 626	65 138	212

路面模型依据试验场路面数据建立,试验场搓板路分为标准搓板路和交错搓板路两种类型。标准搓板路又根据波长、波峰的不同分为重度搓板路、中度搓板路和轻度搓板路 3 种形式。由于研究方法相同,只选取中度搓板路建模进行研究。表 2 为实测得到的中度标准搓板路特征参数。

表 2 中度标准搓板路特征参数

Tab. 2 Characteristic parameter of typical roads

路面类型	波长/mm	波峰/mm
中度标准搓板路	580	25

系统有限元模型如图 1 所示。设定轮胎和路面的接触为点-面(NODES\_TO\_SURFACE)普通接触。在沥青路上的仿真试验和搓板路只是路面形式不同,仿真设置完全一样。

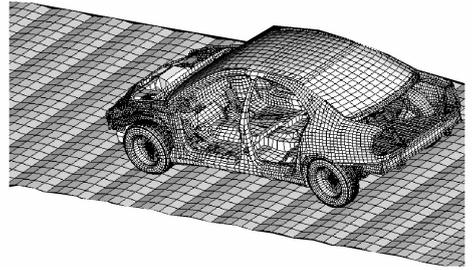


图 1 轿车-搓板路系统的有限元模型  
Fig. 1 Car-washboard system FE model

通过 B 柱和中央通道  $x, y, z$  方向的加速度对比分析表明,建立的汽车-搓板路仿真模型能够较真实地再现试验结果,所建模型和仿真数据有较高的精度<sup>[6]</sup>。

## 3 车速、质量及轴距对强化系数的影响

### 3.1 车速与质量对强化系数的影响

设仿真车速为 30, 40, 50, 60 和 70 km/h,每一速度下对应 890, 998, 1 062, 1 140 和 1 220 kg 等 5 种质量。应用 VPG 软件对样车前地板不同工况下的疲劳寿命进行预测,根据式(2)计算强化系数,如表 3 所示。其中车速的变化参照交通运输部公路交通试验场试验规范,质量的变化参照某汽车公司轿车的质量。

根据表 3 绘制  $K-v$  曲线,如图 2 所示。

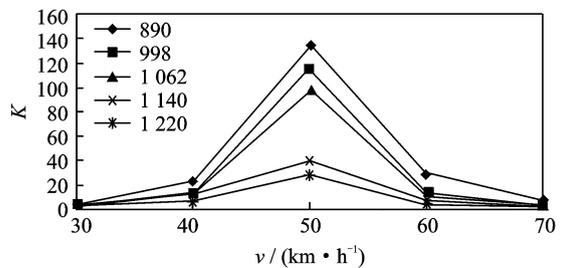


图 2 不同质量下的  $K-v$  曲线  
Fig. 2  $K-v$  curves under different masses

由图 2 可看出,各质量下的强化系数总体变化趋势一致,随着车速从 30 km/h 增加到 70 km/h,强化系数经历了一个先增大后减小的过程,并同时在车速 50km/h 时达到峰值,且明显大于其他车速时的强化系数。

从表 3 和图 2 分析可以得到:车速为 30~40 km/h 时,强化系数增长缓慢<sup>[15]</sup>;40~50 km/h 时强化系数迅速增加并达到峰值;50~60 km/h 时迅速减小;60~70 km/h 减小缓慢。60 与 40 km/h 的强化作用相当;70 与 30 km/h 的强化作用相当;

70 km/h时最小的强化系数已经小于 1,即已经没有强化效果。可以预测,车速很低或很高时,搓板路将失去强化作用。

表 3 不同车速和质量下搓板路强化系数

Tab. 3 Enhancement coefficient of washboard under different velocities and masses

车速/ (km·h <sup>-1</sup> )	样车 质量 /kg	前地板疲劳寿命 N(周次)×10 <sup>5</sup>		强化 系数 K
		沥青路	搓板路	
30	890	607.110 6	299.831 8	2.02
	998	434.603 8	126.439 9	3.44
	1 062	402.736 8	103.225 9	3.90
	1 140	396.930 7	106.451 3	3.73
40	1 220	372.103 5	102.776 2	3.62
	890	138.768 1	6.375 344	21.77
	998	98.616 3	8.508 106	11.60
	1 062	92.317 68	8.115 987	11.36
50	1 140	87.239 48	8.151 91	10.70
	1 220	80.992 18	14.103 41	5.74
	890	54.133 05	0.407 837 3	134.05
	998	40.104 8	0.351 208 2	114.19
60	1 062	36.517	0.369 379 2	98.86
	1 140	34.355 47	0.796 310 8	43.14
	1 220	32.805 89	1.111 065	29.53
	890	28.587 9	0.996 972 3	28.67
70	998	20.434 4	1.622 825	12.60
	1 062	18.687 34	2.108 679	8.86
	1 140	17.354 83	2.990 361	5.80
	1 220	16.245 24	4.519 926	3.60
	890	14.181 48	1.937 548	7.32
	998	10.079 84	2.824 644	3.57
	1 062	8.837 483	5.515 336	1.60
	1 140	8.854 206	12.440 75	0.71
1 220	9.564 766	15.287 56	0.63	

设道路某周期波动波长为  $\lambda$ ,汽车通过该路段时的车速为  $v$ ,则该波长  $\lambda$  对汽车产生周期性激励,其激励的频率  $f^{[16]}$  为

$$f = v/\lambda \quad (3)$$

将车速和中度标准搓板路的波长带入式(3),计算得到不同车速搓板路对车辆的激励频率,如表 4 所示。

表 4 不同车速下搓板路激励频率

Tab. 4 Excitation frequency of washboard road under different velocities

$v/(km \cdot h^{-1})$	30	40	50	60	70
$f/Hz$	14.4	19.2	24.0	28.7	33.5

对于样车被测部件前地板,搓板路引起的主要是  $z$  方向的振动,如图 3 所示。车速为 50 km/h

时,搓板路的激励频率为 24.0 Hz,前地板中心位置  $z$  方向的振动加速度明显比其他车速时的振动加速度大,使得搓板路强化作用最为苛刻<sup>[17]</sup>,见图 4。

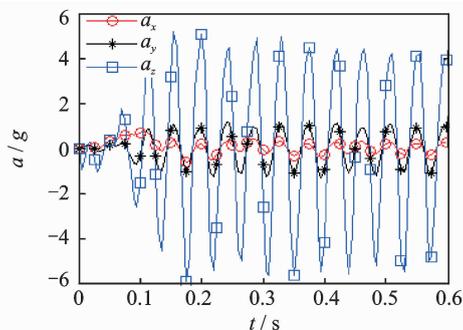


图 3 车速为 50 km/h 的前地板加速度

Fig. 3 Acceleration of front floor at velocity of 50 km/h

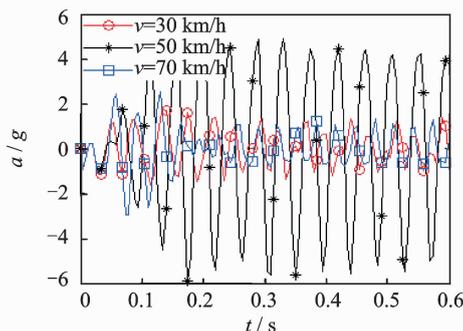


图 4 不同速度下的前地板  $z$  方向加速度

Fig. 4  $z$ -Acceleration of front floor under different velocities

根据表 3 绘制  $K-m$  曲线,如图 5 所示。

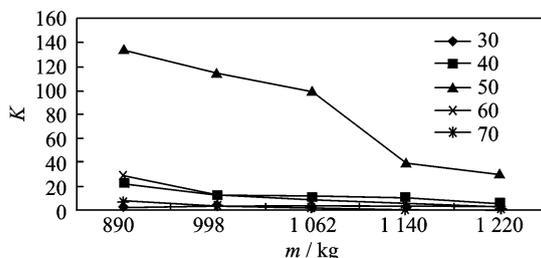


图 5  $K-m$  曲线

Fig. 5  $K-m$  Curve

由图 5 分析可以看出,各质量下的强化系数总体变化趋势一致,随着质量的增大,强化系数总体呈缓慢下降趋势。

车辆质量变化是改变车身质量得到的,被测部件上集中质量的分布及大小均未改变。将车辆简化为单自由度线性振动系统,路面不平度作为系统激励,对于相同的搓板路来说,路面不平度位移输入相同,即系统激励相同。随着质量的增加,车辆垂直振动受到抑制,引起的损伤减小,疲劳寿命增加。分析表 3 疲劳寿命数据可知,对于搓板路试验,随着车辆

质量的增加,前地板疲劳寿命总体呈缓慢增大的趋势,强化系数随着车辆质量的增加而缓慢减小,与理论分析一致。

表 5 不同车速和轴距下搓板路强化系数

Tab. 5 Enhancement coefficient of washboard under different velocities and wheelbases

车速/ (km· h <sup>-1</sup> )	轴距/ mm	前地板疲劳寿命 N(周次)×10 <sup>5</sup>		强化 系数 K
		沥青路	搓板路	
30	2 625	387.92	103.331 2	3.75
	2 685	402.736 8	103.225 9	3.90
	2 710	400.143	99.267 64	4.03
	2 750	405.492 8	45.152 45	8.98
40	2 625	91.009 7	32.478 28	2.80
	2 685	92.317 68	8.115 987	11.36
	2 710	93.428 10	7.272 444	11.51
	2 750	94.502 06	5.134 145	18.41
50	2 625	35.622 42	1.872 283	19.03
	2 685	36.517	0.369 379 2	98.86
	2 710	36.288 19	0.299 693 1	82.59
	2 750	36.829 91	0.277 668 5	132.64
60	2 625	17.966 25	3.832 297	4.69
	2 685	18.687 34	2.108 679	8.86
	2 710	18.402 42	1.749 935	10.52
	2 750	18.658 11	1.121 703	16.63
70	2 625	8.793 612	6.978 7	1.26
	2 685	8.837 483	5.515 336	1.60
	2 710	8.851 361	4.196 951	2.11
	2 750	8.901 3	2.998 005	2.97

### 3.2 轴距及车速对强化系数的影响

设仿真车速为 30,40,50,60 和 70 km/h,每一速度下对应 2 625,2 685,2 710 和 2 750 mm 这 4 种轴距。应用 VPG 软件对样车前地板不同工况下的疲劳寿命进行预测,根据式(2)计算强化系数,如表 5 所示。其中车速的变化参照试验场试验规范,轴距的变化参照某汽车公司轿车的轴距。根据表 5 绘制 K-v 曲线,如图 6 所示。

随着车速的变化,各种轴距下的强化系数随车

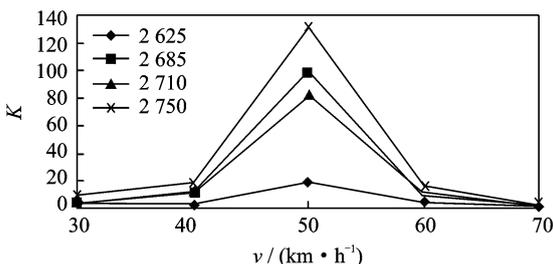


图 6 K-v 曲线

Fig. 6 K-v curve

速的变化规律与各种车辆质量下的强化系数变化规律完全相似。由图 5 可以看出,各轴距下的强化系数变化趋势一致。随着速度的增大,强化系数经历了一个先增大后减小的过程,并同时在 v=50 km/h 时达到峰值。车速在 30~40 km/h 时,强化系数增长缓慢;40~50 km/h 时强化系数迅速增加并达到峰值;50~60 km/h 时迅速减小;60~70 km/h 时减小缓慢;60 与 40 km/h 的强化系数相当;70 与 30 km/h 的强化系数相当。根据表 5 绘制 K-L 曲线,如图 7 所示。

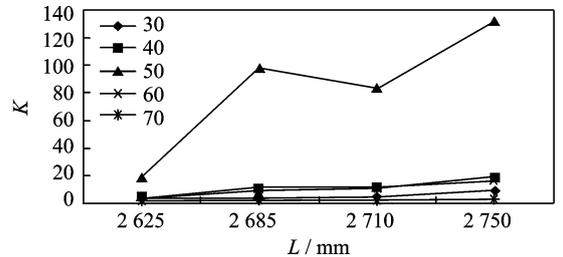


图 7 K-L 曲线

Fig. 7 K-L curve

由图 6 可以看出,各车速下的强化系数总体变化趋势一致,与质量对强化系数的影响相反。随着轴距的增大,强化系数总体呈上升趋势。车速为 50 km/h 时,随着轴距的变化,强化系数出现波动,先增后减再增,但总体呈增大趋势。

将车辆简化为单轨车辆模型,当轴距为搓板路波长的整数倍时,即  $\lambda=L/n(n=1,2,\dots)$ ,前后轮受到不平整激励相位相同,因而增加了车辆的垂直振动。当轴距为半波长的奇数倍时,即  $L=\frac{\lambda}{2}(2n-1)(n=1,2,\dots)$ ,此时一个车轮在波峰一个车轮在波谷,车辆垂直振动被抑制<sup>[18]</sup>。

轴距的变化范围为 2 625~2 750 mm,搓板路波长为 580 mm,轴距在 2 610~2 900 mm(搓板路半波长的 9 倍至波长的 5 倍)变化时,车辆振动应逐渐加强,疲劳寿命相应减小。分析表 5 中疲劳寿命数据可知,对于搓板路试验,随着车辆的轴距从 2 625 mm 增加至 2 750 mm,测点疲劳寿命总体呈缓慢减小的趋势,与理论分析一致。对于普通沥青路试验,车辆轴距的增加对测点疲劳寿命影响很小,或总体呈非常微弱的增大趋势,从而导致了强化系数随着车辆轴距的增加而变大。

### 3.3 强化区间

同时考虑车速及质量的变化,绘制 K-v-m 曲

面,如图 8 所示。

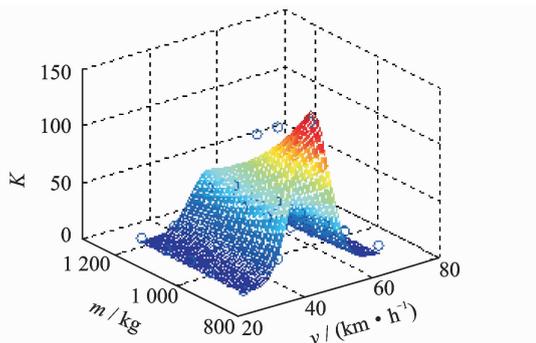


图 8 搓板路  $K-v-m$  曲面

Fig. 8  $K-v-m$  curved face

图 8 所示曲面为强化曲面或称为强化区间。当车速在 30~70 km/h、质量在 890~1 220 kg 变化时,强化系数在此曲面内变化。

回归经验公式为

$$K = a_1 \exp[(v - 50)^2 / a_2] / (a_4 m^{a_3} + a_5) \quad (4)$$

其中:  $a_1 \sim a_5$  为待定系数。

用最小二乘法求解,保留 2 位小数,得到  $a_1 = -1\ 682.26$ ;  $a_2 = -52.78$ ;  $a_3 = 4.32$ ;  $a_4 = -1.55 \times 10^{-12}$ ;  $a_5 = -3.37$ 。

cor 为模型计算的强化系数  $K_1$  与试验数据  $K_0$  的相关性系数

$$\text{cor} = \frac{\text{Cov}(K_0, K_1)}{\sqrt{D(K_0)} \sqrt{D(K_1)}} \quad (5)$$

其中:  $\text{Cov}(K_0, K_1)$  为  $K_0$  与  $K_1$  的协方差;  $D(K_0)$ ,  $D(K_1)$  为  $K_0$  与  $K_1$  的方差。

$$K_0 = \begin{bmatrix} 2.02 & 3.44 & 3.90 & 3.730 & 0 & 3.620 & 0 \\ 21.77 & 11.60 & 11.36 & 10.70 & 5.74 & & \\ 134.05 & 114.19 & 98.86 & 43.14 & 29.53 & & \\ 28.67 & 12.60 & 8.86 & 5.80 & 3.60 & & \\ 7.32 & 3.57 & 1.60 & 0.71 & 0.63 & & \end{bmatrix}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0.073 & 1 & 0.050 & 2 & 0.040 & 3 & 0.030 & 9 \\ 0.023 & 8 & 21.509 & 9 & 14.770 & 4 & 11.842 & 8 \\ 9.099 & 6 & 7.005 & 5 & 143.064 & 3 & 98.239 & 2 \\ 78.767 & 2 & 60.522 & 3 & 46.594 & 3 & 21.509 & 9 \\ 14.770 & 4 & 11.842 & 8 & 9.099 & 6 & 7.005 & 5 \\ 0.073 & 1 & 0.050 & 2 & 0.040 & 3 & 0.030 & 9 \\ 0.023 & 8 & & & & & & \end{bmatrix}$$

利用 Matlab 求解,  $\text{cor} = 0.98$ , 模型计算的数据与试验数据具有强相关性,表明拟合效果良好。同时考虑车速及轴距的变化,绘制  $K-v-L$  曲面,如图 9 所示。

当车速在 30~70 km/h、其轴距在 2 625~2 750 mm 变化时,强化系数在此曲面内变化。

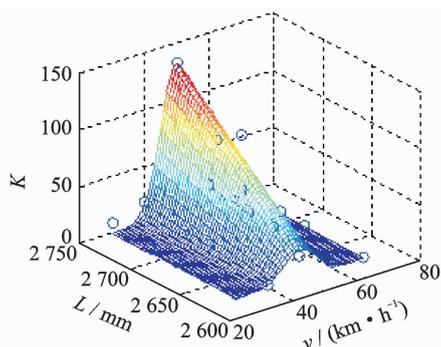


图 9 搓板路  $K-v-L$  曲面

Fig. 9  $K-v-L$  curved face

回归经验公式如下

$$K = b_1 \exp[(v - 50)^2 / b_2] (b_4 L^{b_3} + b_5) \quad (6)$$

其中:  $b_1 \sim b_5$  为待定系数。

用最小二乘法求解,保留 2 位小数,得到  $b_1 = -42.93$ ;  $b_2 = -48.44$ ;  $b_3 = 0.48$ ;  $b_4 = -2.6$ ;  $b_5 = 110$ 。

利用 Matlab 求解 cor。

$$K_0 = \begin{bmatrix} 3.75 & 3.90 & 4.03 & 8.98 & 2.80 & 11.36 \\ 11.51 & 18.41 & 19.03 & 98.86 & 82.59 \\ 132.64 & 4.69 & 8.86 & 10.52 & 16.63 \\ 1.26 & 1.60 & 2.11 & 2.97 \end{bmatrix}$$

$$K_1 = \begin{bmatrix} 0.006 & 5 & 0.019 & 9 & 0.025 & 5 & 0.034 & 3 \\ 3.197 & 6 & 9.757 & 1 & 12.467 & 7 & 16.777 & 6 \\ 25.194 & 5 & 76.879 & 5 & 98.236 & 9 & 132.195 & 9 \\ 3.197 & 6 & 9.757 & 1 & 12.467 & 7 & 16.777 & 6 \\ 0.006 & 5 & 0.019 & 9 & 0.025 & 5 & 0.034 & 3 \end{bmatrix}$$

$\text{cor} = 0.98$ , 模型计算的数据与试验数据具有强相关性,表明拟合效果良好。

## 4 结 论

1) 随着车速的增大,各质量和轴距下的强化系数变化趋势一致,强化系数经历了一个先增大后减小的过程,并同时在车速为 50 km/h 时达到峰值。质量和轴距的变化并未改变强化系数的变化趋势,说明车速对强化系数的变化起决定作用<sup>[19]</sup>。车速为 50 km/h 时,搓板路的激励频率为 24.0 Hz,搓板路强化作用最为苛刻。根据  $K-v$  曲线可以预测,车速很低或很高时,搓板路将失去强化作用。

2) 随着质量的增大,各车速下的强化系数变化趋势一致,强化系数呈下降趋势。被测部件质量不变。增加车身和车架质量,搓板路上被测部件垂直振动受到抑制,引起的损伤减小,搓板路强化作用减弱。根据  $K-m$  曲线可以预测,车速较高时,随着质量的增加,搓板路将失去强化作用。

3) 轴距为搓板路波长的整数倍时,搓板路强化作用增强,当轴距为半波长的奇数倍时,搓板路强化作用减弱。当轴距在相邻的半波长的奇数倍到波长的整数倍之间变化时,随着轴距的增大,强化系数呈上升趋势。

4) 同时考虑质量和车速的影响,绘制了  $K-v-m$  强化曲面,回归得到了  $K-v-m$  经验模型。同时考虑轴距和车速影响,绘制了  $K-v-L$  强化曲面,回归得到了  $K-v-L$  经验模型。经验模型揭示了强化系数随车速、质量及轴距变化的规律,对于试验规程修正具有重要意义。

### 参 考 文 献

- [1] 曹正林,李骏,郭孔辉. 基于虚拟试车场的轿车悬架耐久性强化试验仿真研究[J]. 机械工程学报,2012,48(10):123-127.  
Cao Zhenglin, Li Jun, Guo Konghui. Research on passenger car suspension durability using virtual proving ground[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(10): 123-127. (in Chinese)
- [2] Edara R, Shan S. Heavy vehicle suspension frame durability analysis using virtual proving ground[C] // 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Conference. Chicago: Society of Automotive Engineers, 2005: 1-9.
- [3] Zhang Yuan, Tang A, Palmer T, et al. Virtual proving ground-an integrated technology for full vehicle analysis and simulation[J]. International Journal of Vehicle Design, 2004, 10: 450-470.
- [4] 周炜,李文亮,郭志平,等. 汽车试验场搓板路强化系数研究[J]. 公路交通科技,2008,25(11):140-144.  
Zhou Wei, Li Wenliang, Guo Zhiping, et al. Study on enhancement coefficient of washboard road of automobile proving ground [J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2008, 25(11):140-144. (in Chinese)
- [5] 李文亮,周炜,郭志平. 汽车试验场搓板路可靠性强化试验仿真研究[C]//2008 中国汽车工程学会年会论文集. 北京:机械工业出版社,2008:1451-1455.
- [6] 门玉琢. 基于 ADAMS 的重型载货汽车可靠性仿真与试验研究[D]. 长春:吉林大学,2009.
- [7] 柳东坡. 基于虚拟试验场的某菱形车可靠性分析及抗疲劳优化设计[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [8] Smith K, Stornant R. Cumulative damage approach to durability route design[J]. Society of Automotive Engineers, 1979(2):3632-3641.
- [9] Bernhard G, Michael S, Mark P. Design of durability sequence based on rainflow matrix optimization[C] // International Congress & Exposition. Detroit: Society of Automotive Engineers, 1998:1-11.
- [10] Ledesma R, Jenaway L, Wang Y, et al. Development of accelerated durability tests for commercial vehicle suspension components[C] // 2005 SAE Commercial Vehicle Engineering Conference. Chicago: Society of Automotive Engineers, 2005:1-13.
- [11] 包铁成,程文平,杜青,等. 摩托车试验场道路可靠性试验强化系数[J]. 天津大学学报,2009,42(7):591-596.  
Bao Tiecheng, Cheng Wenping, Du Qing, et al. Enhancement coefficient of motorcycle reliability test on proving ground [J]. Journal of Tianjin University, 2009, 42(7): 591-596. (in Chinese)
- [12] 于海波. 汽车承载系试验场用户关联可靠性试验方法研究[D]. 长春:吉林大学,2008.
- [13] 李鹏. 汽车试验场道路强化系数的研究[D]. 长春:吉林大学,2007.
- [14] 姜华. 车辆强化试验加速系数的研究[D]. 北京:中国农业大学,2000.
- [15] 李荣利,陈升惠. 路面强化系数与路面激励及车速的关系研究[J]. 车辆与动力技术,1998,69(1):21-25.  
Li Rongli, Cheng Shenghui. Study on the relation between road excitation or vehicle velocity and road intensifying factor [J]. Vehicle & Power Technology, 1998, 69(1):21-25. (in Chinese)
- [16] 赵济海,王哲人,关朝芳. 路面不平度的测量分析与应用[M]. 北京:北京理工大学出版,2000:17-18.
- [17] 于国飞. HyperWorks 在汽车白车身模态分析中的应用[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(2):138-140.  
Yu Guofei. Modal analysis of body-in-white of multi-purpose vehicle car based on HyperWorks [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(2):138-140. (in Chinese)
- [18] 喻凡. 车辆动力学及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2010:130-131.
- [19] 卢凯良,张卫国,宓为建,等. 运用模态综合法的车桥自激激励耦合振动分析[J]. 振动、测试与诊断,2012,32(3):419-425.  
Lu Kailiang, Zhang Weiguo, Mi Weijian, et al. Coupled vibration analysis for self-excitation vehicle-bridge based on mode synthesis method [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 419-425. (in Chinese)



**第一作者简介:**李文亮,男,1985年2月生,助理研究员。主要研究方向为车辆安全与可靠性。曾发表《Influences of initial braking velocity and passenger capacity on mean fully developed deceleration》(《Applied Mechanics and Materials》2013, Vol. 281)等论文。  
E-mail: wl.li@rioh.cn