

车辆用户载荷谱试验场关联强化试验方法*

韩 愈¹, 孟广伟¹, 门玉琢²

(1. 吉林大学机械学院 长春, 130025) (2. 长春工程学院机电工程学院 长春, 130022)

摘要 研究了某车辆用户用法与试验场强化试验之间的载荷谱关联特性。根据用户损伤与试验场损伤相等的原理, 建立车辆在试验场内的耐久性考核试验方法。通过一辆已安装传感器的车辆, 采集真实汽车用户和试验场强化路的相关试验数据, 应用雨流计数法获得疲劳载荷谱分布矩阵, 并计算产生的疲劳伪损伤。利用市场调查统计用户的路面比例和装载质量, 结合采集的用户实际使用数据, 应用蒙特卡洛方法对汽车用户实际用法载荷谱的疲劳损伤进行仿真计算, 确定涵盖 90% 汽车用户的疲劳载荷谱(雨流循环分级矩阵)。对比用户用法与试验场损伤载荷谱获得试验场强化试验技术参数, 制定与试验场强化组合路面、试验里程、试验车速相关的试验方法。实际应用结果表明, 该方法可准确预报车辆承载结构的潜在故障, 有效缩短试验里程及产品研发周期。

关键词 材料疲劳; 汽车试验场; 蒙特卡洛仿真; 用户关联性

中图分类号 U467.1; TH12

引 言

汽车耐久性试验是考核和评价车辆耐久性的一种重要手段, 传统的试验基础大多数偏向于强度试验而不是寿命试验, 都是为了保证在最差工况下车辆构件不发生断裂, 且能满足一般的工程要求。这些试验基本上依赖于经验、习惯, 没有合理地考虑用户的情况, 主要靠推测而不是基于科学原理^[1]。若将汽车试验场不同路段混和而成的组合道路与用户用途目标道路关联起来, 就可在试验场复现用户道路上的载荷输入, 从而达到加速试验的目的。汽车试验场与用户关联性研究中, 涵盖 90% 汽车用户使用情况的目标疲劳载荷谱, 对问题研究尤为关键^[2-8]。传统的算法是利用市场调查数据和在用户道路采集的载荷谱, 通过简单的数学平均来确定汽车用户目标疲劳载荷谱。

笔者通过传感器采集车辆用户实际使用的相关数据, 应用雨流循环计数方法统计载荷谱分布, 求出涵盖 90% 汽车用户实际使用的载荷分级雨流循环矩阵。利用 90% 用户载荷谱的疲劳损伤与试验场的损伤进行对比, 制定车辆在试验场内的耐久性考核试验方法。

1 结构的疲劳损伤

车辆承载结构的疲劳损伤是由于应力-应变的疲劳滞回循环而引起的损伤源附近材料的反复塑性变形。每个疲劳滞回循环都给构件造成一定量的疲劳损伤, 整个时域载荷历程总损伤可通过累加每个循环引起的损伤得到。如果承载结构的输入载荷相同, 那么所引起的疲劳损伤在理论上也应相同, 因为各部位所承受的载荷与汽车的输入载荷信号成比例。如果已知用户实际使用环境中载荷输入, 可以在试验场按一定的比例混合各种路面重现这一载荷。汽车用户与试验场关联机理是: 目标用户车辆产生的损伤与汽车试验场耐久性试验产生的损伤相等^[6-8]。

载荷-寿命之间的 $S-N$ 幂函数公式^[9-10]为

$$S = S_0 (N_f)^b \quad (1)$$

其中: S 为载荷幅值; S_0 为材料常数; N_f 为载荷幅值 S 对应的疲劳寿命; b 为载荷-寿命曲线斜率。

展开式(1)疲劳寿命为

$$N_f = (S/S_0)^{\frac{1}{b}} \quad (2)$$

由 Miner 线性累积损伤理论计算的疲劳损伤为

* 国家自然科学基金资助项目(51378075)

收稿日期: 2014-01-06; 修回日期: 2014-02-24

$$D = n_1/N_{f1} + n_2/N_{f2} + \dots + n_i/N_{fi} \quad (3)$$

其中: D 为疲劳累积损伤; n_i 为第*i*级载荷 S_i 作用下的循环数; N_{fi} 为第*i*级载荷 S_i 作用下的寿命。

联合式(2)与式(3)得

$$D = \left[\frac{1}{S_0} \right]^m \sum_{i=1}^k n_i S_i^m \quad (4)$$

其中: k 为载荷等级; $m = -1/b = 5$ 。

略去式(4)中的材料常数项并开 m 次方根,除以每个用户路面采集样本的行驶里程得到的相对伪损伤为

$$D_r = \sqrt[m]{\sum_{i=1}^k n_i S_i^m} / d \quad (5)$$

其中: D_r 为加速度、位移、微应变数据信号累积相对伪损伤作用下的循环次数; d 为试验采集车辆在用户路面实际行驶里程。

2 用户调查及道路载荷样本采集

汽车用户的实际使用工况情况可通过市场调查和用户道路谱采集得到。对用户和潜在用户用法进行调查、访问,内容主要包括用户使用的路面类型比例、行驶车速、交通状况、车辆负荷情况、行驶道路种类、各种道路上行驶里程、驾驶员的驾驶习惯以及各种典型道路所在地区等。

根据路面不平度等级,笔者将用户路面划分为 A-B 级、C 级、D 级及 E 级以上路面。调查用户实际使用的每种路面行驶里程百分比及用户装载质量,统计结果见表 1。用户道路载荷采集样本见表 2。在车辆承载主要部件布置传感器,详细位置见表 3。

表 1 用户调查数据表
Tab. 1 Customer surveys data

调查 序号	路面等级百分比/%				装载质量/kg	
	A-B 级	C 级	D 级	E 级以上	满载	空载
1	10	20	10	60	3 000	100
2	15	70	0	15	4 500	50
3	20	30	15	35	1 500	0
4	20	35	15	30	7 000	200
5	20	30	15	35	1 000	100
6	25	30	15	30	1 000	150
7	60	20	10	10	4 000	100
8	10	10	0	80	1 500	50
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
1 360	10	10	0	80	2 500	0

表 2 用户道路试验样本

Tab. 2 Customers road test samples

载荷 工况	样本数量/个				装载 /kg
	A-B 级	C 级	D 级	E 级以上	
满载	54	42	35	54	3 500
空载	40	31	22	41	0

表 3 试验测量测点分布

Tab. 3 Test position distribution

测量位置	前桥	后桥	纵梁	变速箱壳体	横梁
测量参数	微应变	微应变	微应变	微应变	微应变
测量位置	后桥	前桥	传动轴支撑	前减震器	后减震器
测量参数	加速度	加速度	加速度	加速度	加速度

3 蒙特卡洛仿真

由于市场调查和用户采集所得到的数据有限,无法做到无限逼近用户真实的使用情况,可用蒙特卡洛方法拟合仿真用户数据的真实分布^[11-14]。

蒙特卡洛方法是指根据统计概率函数,产生符合统计特征的随机数,模拟随机现象,并进行分析、预测,如 19 世纪后半叶蒲丰(Buffon)通过随机投针试验对 π 值的估算。

图 1 中,在平面上画有相互距离均为 $2a$ 的平行线束,向平面上随机投一枚长为 $2l$ 的针,为了避免针与两平行线同时相交,假定 $a < 2l < 2a$ 。设 M 为针的中点, y 为 M 与最近平行线的距离, ϕ 为针与平行线的交角, $0 \leq y \leq a$, $0 \leq \phi \leq \pi$ 。很明显,针与平行线相交的重要条件是 $y \leq l \sin \phi$,如图 2 所示。

相交的概率为

$$p = \frac{1}{\pi a} \int_0^\pi d\phi \int_0^{l \sin \phi} dy = \frac{1}{\pi a} \int_0^\pi l \sin \phi d\phi = \frac{2l}{\pi a} \quad (6)$$

用 N 表示投针次数, v 表示其中针与平行线相交次数,由贝努里(Bernoulli)定理知,当 N 充分大时,频率接近于概率

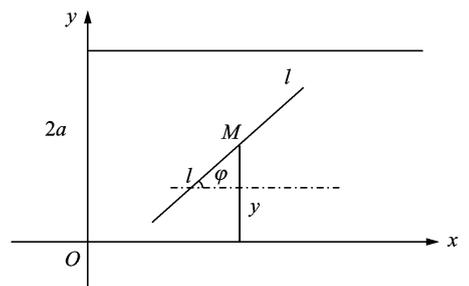


图 1 蒲丰随机投针简图

Fig. 1 Buffon random casting needle sketch

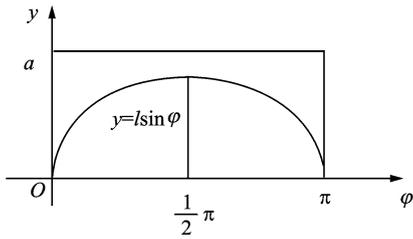


图2 蒲丰随机投针概率求解图

Fig. 2 Buffon random casting needle probability calculating sketch

$$v/N = 2l/\pi a \quad (7)$$

于是有

$$\pi \approx 2lN/\pi a v \quad (8)$$

裴鹿成等试验了几十万次,得到 $\pi \approx 3.14$ 。

笔者通过对用户载荷谱的概率统计,依据用户载荷谱的概率分布生成同分布的随机数,利用市场调查统计用户的路面比例和装载质量,结合采集的用户实际使用数据,应用蒙特卡洛方法对汽车用户实际用法载荷谱的疲劳损伤进行仿真计算,确定涵盖90%汽车用户的疲劳载荷谱。

通过 Box-Muller 变换,产生2组均匀分布于(0,1)上的独立随机数 r_1 和 r_2 ,将它们作下列变换

$$y_1 = \sqrt{-2\ln r_1} \sin(2\pi r_2) \quad (9)$$

$$y_2 = \sqrt{-2\ln r_1} \cos(2\pi r_2) \quad (10)$$

求逆变换

$$r_1 = \exp\left[-\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)\right] \quad (11)$$

$$r_2 = \frac{1}{2\pi} \arctan \frac{y_2}{y_1} \quad (12)$$

y_1, y_2 的联合分布的密度函数为

$$f(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi} \exp\left[-\frac{1}{2}(y_1^2 + y_2^2)\right] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_1^2}{2}\right) \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{y_2^2}{2}\right) \quad (13)$$

概率密度分布函数 y_1 与 y_2 相互独立,且服从标准正态分布,即 $y_i \sim N(0, 1)$ 。

$$x_i = \mu + \sigma \left[(-2\ln r_1)^{\frac{1}{2}} \cos(2\pi r_2)\right] \quad (14)$$

对均值 μ 、方差为 σ^2 的正态分布随机变量 x_i 通过式(14)求得。根据 Lindeberg-Levy 独立同分布随机变量的中心极限定理,当 n 足够大时,蒙特卡洛仿真值 $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$ 近似地服从正态分布 $N(\mu, \sigma^2/n)$,

则对于任意的 $t_\alpha (t_\alpha > 0)$, 有

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\left|\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i - \mu\right| \leq t_\alpha \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) =$$

$$\int_{-t_\alpha}^{t_\alpha} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 1 - \alpha \quad (15)$$

其中: α 为显著性水平。

因此,蒙特卡洛仿真误差为

$$\epsilon = t_\alpha \sigma / \sqrt{n} \quad (16)$$

对于给定的显著性水平 α , t_α 可通过查标准正态分布函数数值表求得,所以蒙特卡洛仿真误差由方差和抽样次数决定。

利用式(14)产生服从正态分布的随机样本,仿真拟合用户道路疲劳损伤的载荷谱分布,最后求出涵盖90%汽车用户使用情况的疲劳损伤载荷谱,即分级雨流循环矩阵。抽样次数越多,统计量的平均值越接近真实值。

4 用户道路载荷谱分布拟合

以某车型后桥测点微应变信号为例,研究用户道路载荷谱样本概率分布,并根据分布生成对应的随机数,利用蒙特卡洛方法进行用户道路载荷谱分布拟合仿真。

4.1 用户道路载荷谱分布检验

利用采集满载 A-B 级路面的数据进行雨流计数统计,并根据式(4)计算该测点的相对伪损伤,具体数值见表4。通过检验,表4中的相对伪损伤数值服从正态分布。

表4 满载 A-B 路面伪损伤样本

Tab. 4 A-B road false damage samples

序号	相对伪损伤	序号	相对伪损伤	序号	相对伪损伤
1	143	19	206	37	123
2	170	20	236	38	141
3	190	21	204	39	162
4	201	22	216	40	158
5	216	23	184	41	174
6	218	24	178	42	153
7	205	25	161	43	175
8	171	26	174	44	226
9	217	27	130	45	203
10	221	28	159	46	223
11	223	29	162	47	140
12	225	30	198	48	163
13	215	31	178	49	232
14	214	32	209	50	204
15	252	33	262	51	202
16	235	34	132	52	213
17	226	35	135	53	145
18	199	36	132	54	108

在显著水平 0.05 下检验假设^[15-17]。在用户 A-B 级路面产生的相对伪损伤样本 X 的概率密度为

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left\{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right\} \quad (17)$$

这里 $n=54$ 。利用最大似然法估计未知参数和的值为

$$\hat{\mu} = \bar{x} = \frac{1}{54} \sum_{j=1}^{54} x_j = 187.79$$

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\hat{\sigma}^2} = \frac{1}{54} \sum_{j=1}^{54} (x_j - \bar{x})^2 = 36$$

将式(17)写为

$$\hat{f}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \times 36} \exp\left\{-\frac{(x-187.79)^2}{2 \times 1298}\right\} \quad (18)$$

将连续型随机变量 X 的可能取值分成 13 个区间: $A_i = (a_i, a_{i+1}] (i=1, 2, \dots, 13)$, 则有概率

$$\hat{p}_i = \hat{P}\{a_i < X \leq a_{i+1}\} = \hat{F}(a_{i+1}) - \hat{F}(a_i) = \Phi\left(\frac{a_{i+1} - 187.81}{36}\right) - \Phi\left(\frac{a_i - 187.81}{36}\right) \quad (19)$$

皮尔逊 χ^2 检验结果为

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^7 \frac{(n_i - n\hat{p}_i)^2}{n\hat{p}_i} = 5.848 \quad (20)$$

由于估计了 2 个未知参数,所以 χ^2 的自由度为 $k-2-1=4$ 。对于 $\alpha=0.05$,查 χ^2 分布表,得拒绝域为

$$\chi^2 \geq \chi^2(k-2-1) = \chi^2_{0.05}(4) = 9.488$$

$$\chi^2 = 5.848 < 9.488 = \chi^2_{0.05}(4)$$

所以在显著水平下接受假设,即可以认为后桥测点微应变信号,在用户 A-B 级路面产生的相对伪损伤服从正态分布。

同理,可以证明其他测点、不同载荷、不同路面的用户载荷谱样本相对伪损伤也服从正态分布。

4.2 用户道路载荷谱程序编制

根据用户市场调查统计数据 and 少量用户道路载荷谱样本计算其相对损伤,通过蒙特卡洛方法仿真拟合用户道路疲劳载荷谱分布,获得涵盖 90% 汽车用户使用情况的疲劳载荷谱,即分级雨流循环次数。图 3 为拟合仿真程序流程图。图 4 为用户不同载荷、不同路面的相对伪损伤分布和拟合后得到的用户道路疲劳载荷谱分布曲线。

4.3 90% 用户载荷谱确定

在图 4 中,取 90% 概率点所对应的分级雨流循环数据作为后桥测点微应变信号的目标疲劳载荷谱,如图 5 和表 5 所示,其中忽略小信号幅值对相对伪损伤计算的影响。

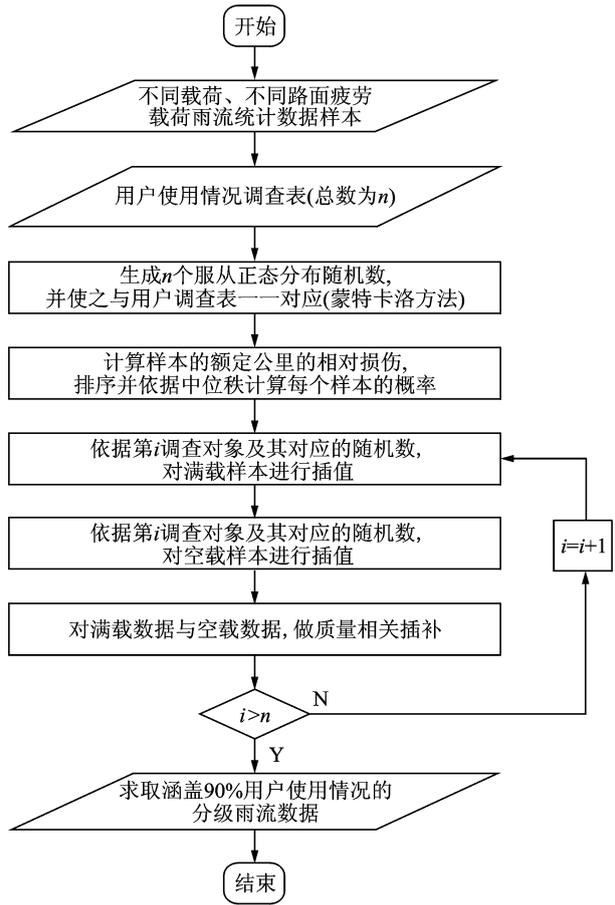


图 3 程序流程图

Fig. 3 Program flow diagram

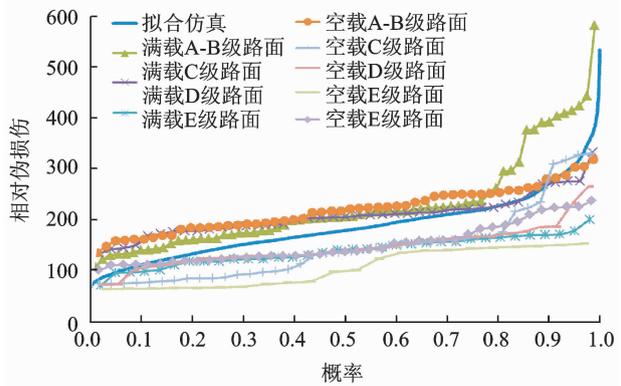


图 4 用户道路疲劳载荷谱分布拟合仿真

Fig. 4 Customers road fatigue spectrum simulation

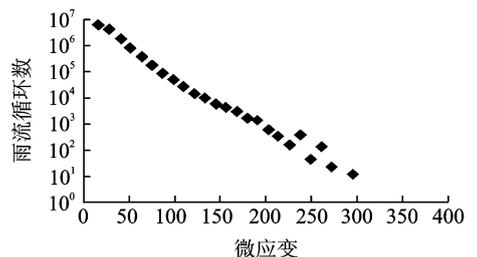


图 5 涵盖 90% 汽车用户的雨流循环载荷谱

Fig. 4 Fatigue load spectrum including 90% customers usage

表5 涵盖90%汽车用户使用情况的载荷谱

Tab.5 Fatigue load spectrum including 90% customers usage

序号	幅值分级	疲劳滞回循环数	序号	幅值分级	疲劳滞回循环数
1	17	6 101 868	17	203	621
2	29	4 154 102	18	214	348
3	41	1 816 843	19	226	156
4	52	812 922	20	238	385
5	64	381 886	21	249	44
6	75	177 802	22	261	135
7	87	85 794	23	272	22
8	99	48 702	24	284	0
9	110	27 687	25	296	12
10	122	15 076	26	307	0
11	133	9 855	27	319	0
12	145	5 955	28	330	0
13	157	4 305	29	342	0
14	168	2 961	30	354	0
15	180	1 594	31	365	0
16	191	1 396			

5 耐久性试验方法制定

利用90%汽车用户使用情况的分级雨流矩阵,依据Miner疲劳线性累计损伤理论,利用式(3)计算车辆用户目标里程疲劳损伤。通过调整汽车试验场的路面种类、行驶车速及行驶里程,使得车辆在试验场产生的损伤与用户目标里程损伤相等,达到强化试验的目的。试验技术研究流程如图6所示。

综合上述分析,建立的用户与试验场等损伤相关模型为

$$\begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \dots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \dots & X_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ X_{n1} & X_{n2} & \dots & X_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中:Y_j为车辆参数部件j的设计目标疲劳损伤;X_{ij}为在试验场第i工况试验对车辆参数j的损伤;A_i为试验场第i工况试验的重复数。

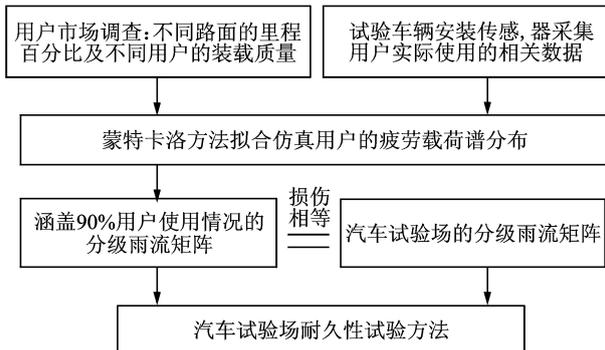


图6 试验流程图

Fig.6 Testing flow diagram

以某车型为例,利用式(21)求得用户路面与试验场的当量比例系数为11.2。用户耐久性目标里程25万公里产生的损伤与试验场行驶2.23万公里损伤等效,计算结果见图7。

由于试验场强化环路种类的有限性,无法完全模拟用户路面的构成,导致在试验场耐久性试验中会出现个别测点误差较大。

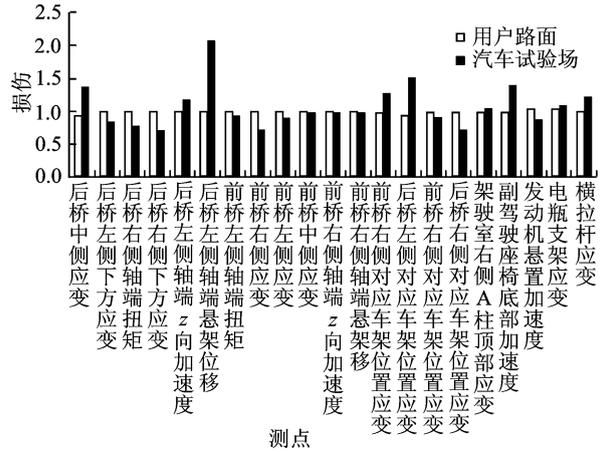


图7 车辆不同测点的用户路面与试验场损伤

Fig.7 Customers' damage and PG damage distribution with different testing position

另外,如果取图4中60%概率点所对应的分级雨流循环数据作为测点信号的目标疲劳载荷谱,用户耐久性目标里程25万公里产生的损伤与试验场行驶约1.7万公里损伤等效,此时一些路况较差的用户耐久性目标里程将小于25万公里;相反,如果取99%概率点所对应的分级雨流循环数据作为测点信号的目标疲劳载荷谱,用户耐久性目标里程25万公里产生的损伤与试验场行驶约7万公里损伤等效。显然此时车辆为保守设计,为了满足车辆耐久性要求,车辆部件尺寸将会加厚或加粗,导致没有必要的成本浪费。

通过市场调查统计、比较市场故障数据与试验场强化环路耐久试验的结果是否具有 consistency,可以验证上述方法的有效性^[18]。图8试验场和市场的

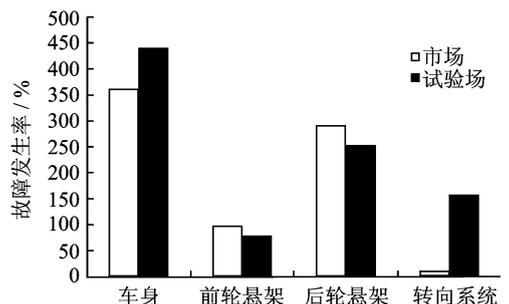


图8 试验场和市场的车辆发生故障率比较

Fig.8 PG and customers' vehicle failure rate comparison

车辆发生故障率对比,得出所提出的方法,试验场耐久性试验可以做到对车辆耐久性的有效考核。

6 结束语

根据蒙特卡洛方法和结构疲劳损伤理论,对某车型用户道路疲劳载荷谱分布进行拟合仿真,确定了涵盖90%汽车用户使用情况的分级雨流循环矩阵。根据用户损伤与试验场损伤等效的原理,建立了试验场强化试验模型,通过90%用户的疲劳载荷谱计算的损伤与试验场的损伤进行对比,制定了某车型在试验场耐久性强化试验方法。应用结果表明,该方法能有效缩短车辆的耐久性强化试验里程。

参 考 文 献

- [1] 吴珂,虞明,郁工瑞. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究[J]. 汽车工程,1996,18(2):108-113.
Wu Ke, Yu Mmng, Yu Gongrui. Research of enhancement coefficient of automobile reliability enhancement test on proving ground[J]. Automotive Engineering, 1996,18(2):108-113. (in Chinese)
- [2] 郭虎,陈文华,樊晓燕,等. 汽车试验场可靠性试验强化系数的研究[J]. 机械工程学报,2004,40(10):73-81.
Guo Hu, Chen Wenhua, Fan Xiaoyan, et al. Research of enhancement coefficient of automobile reliability enhancement test on proving ground[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(10): 73-81. (in Chinese)
- [3] 门玉琢,于海波. 车辆性能仿真优化与强化试验方法[M]. 北京:人民交通出版社,2012:1-12.
- [4] 杨瑞峰. 汽车试验场概述[J]. 轮胎工业,2008,12(28):757-766.
Yang Ruifeng. The automobile test field of summary [J]. Tire Industry, 2008, 12 (28): 757-766. (in Chinese)
- [5] 姜华,余群,曹正清. 车辆加速寿命试验加速系数的探讨[J]. 农业机械学报,2000,31(6):94-97.
Jiang Hua, Yu Qun, Cao Zhengqing. Analysis of a vehicle acceleration factor in accelerated life test [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000,31(6):94-97. (in Chinese)
- [6] 王霄峰. 汽车可靠性工程基础 [M]. 北京:清华大学出版社,2007:22-24.
- [7] 何柏岩,王树新,高峰,等. 车辆道路行驶载荷谱测量及推断方法研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2005,13(4):424-429.
Ke Baiyan, Wang Shuxin, Gao Feng, et al. Study on the measurement and prediction method of vehicle road load spectrum[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2005, 13(4): 424-429. (in Chinese)
- [8] 门玉琢,于海波,韩愈. 用户相关汽车动力传动系可靠性试验新方法[J]. 振动与冲击,2013,32(11):25-34.
Men Yuzhuo, Yu Haibo, Han Yu. New method of automotive reliability test correlated with customers based on output energy of powertrain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013,32(11):25-34. (in Chinese)
- [9] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京:国防工业出版社,2003:50-54.
- [10] Carpinteri A, Spagnoli A. Size effect in S-N curves: a fractal approach to finite-life fatigue strength[J]. International Journal of Fatigue, 2009(31):927-933.
- [11] [以] A. 杜比. 蒙特卡洛方法在系统工程中的应用[M]. 卫军胡,译. 西安:西安交通大学出版社,1985:60-67.
- [12] 高惠璇. 统计计算 [M]. 北京:北京大学出版社,1995:51-60.
- [13] 徐钟济. 蒙特卡洛方法 [M]. 上海:上海科学技术出版社,1985:30-50.
- [14] 刘晓平,郑海起,祝天宇. 进化蒙特卡洛优化的 SVM 在故障诊断中的应用[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(1):115-118.
Liu Xiaoping, Zheng Haiqi, Zhu Tianyu. Support vector machines using evolutionary Monte Carlo parameter optimization and its application to fault diagnosis[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2011, 31(1):115-118. (in Chinese)
- [15] 李忠范,高文森. 数理统计与随机过程 [M]. 长春:吉林大学出版社,2000:146-190.
- [16] 高镇同. 疲劳应用统计学[M]. 北京:国防工业出版社,1986:30-34.
- [17] 郭虎,邓耀文,吴慧敏,等. 车辆随机载荷谱的统计分析[J]. 汽车科技,2003,6:43-45.
Guo Hu, Deng Yaowen, Wu Huimin, et al. Statistical analysis of vehicle random load spectrums[J]. Vehicle Science Tecnology, 2003,6:43-45. (in Chinese)
- [18] 日本自动车技术会. 汽车工程手册[M]. 中国汽车工程学会组,译. 北京:北京理工大学出版社,2010:67-70.



第一作者简介:韩愈,男,1979年7月生,博士研究生。主要研究方向为汽车可靠性。曾发表《基于用户车辆伪损伤分布的两种强化路对比》(《汽车技术》2013年第8期)等论文。
E-mail: hanyu@rdc.faw.com.cn

