

试验场载荷特征分析与标准化方法研究^{*}

RESEARCH ON THE LOAD CHARACTERISTIC ANALYSIS AND STANDARDIZATION METHOD OF PROVING GROUND

施闯闯^{**1} 赵礼辉^{***1,2} 顾振飞³ 叶沛³ 翁硕¹ 郑松林^{1,2}

(1. 上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

(2. 上海理工大学 机械工业汽车底盘机械零部件强度与可靠性评价重点实验室, 上海 200093)

(3. 上海汽车集团股份有限公司技术中心 试验与认证部, 上海 201800)

SHI ChuangChuang¹ ZHAO LiHui^{1,2} GU ZhenFei³ YE Pei³ WENG Shuo¹ ZHENG SongLin^{1,2}

(1. College of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(2. Machinery Industry Key Laboratory for Mechanical Strength & Reliability Evaluation of Auto Chassis Components, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

(3. Test Validation, SAIC Technology Center, Shanghai 201800, China)

摘要 针对车辆载荷的采集必须在样车试制完成后才能进行,产品开发阶段往往缺乏必要载荷数据的问题,开展了试验场耐久规范下的载荷谱标准化研究。首先,对国内某试验场不同车型道路实测载荷谱的特征分析,明确了不同车型载荷雨流循环频次分布的一致性。其次,综合载荷频次分布和损伤区间分布的差异性,对比了传统概率分布模型和极值分布模型在雨流循环建模的有效性,通过载荷频次及损伤分布,验证了超越阈值分布模型在载荷建模方面的合理性。最后,对不同车型载荷的归一化,建立了对象试验场的标准化载荷模型,并通过对比标准化载荷重构谱与试验场实际道路谱的雨流循环、相对损伤以及关键零部件台架试验寿命,验证了该标准化载荷模型的有效性和合理性。该标准化载荷谱及载荷谱标准化方法可为新车型在早期开发阶段提供准确有效的载荷数据,从而保证产品可靠性与耐久性水平。

关键词 标准化载荷 试验场 载荷特征 极值理论 损伤等效

中图分类号 U461.7

Abstract In view of the problem that the collection of vehicle load must be completed after the prototype car is completed, and the necessary load data are often lacking in the product development stage, the standardization of load spectrum under the endurance criterion of the proving ground is studied in this paper. Firstly, the characteristics of the measured load spectrum of different vehicle types in a domestic proving ground are analyzed, and the consistency of the frequency distribution of rainflow cycles for different vehicle types is clarified. Furthermore, the validity of the traditional probability distribution model and the extreme value distribution model in the rainflow cycle modeling is compared by synthesizing the difference of load frequency distribution and damage interval distribution. Through load frequency and damage distribution, the rationality of the exceeding threshold distribution model in load modeling is verified. Finally, the standardized load model of the proving ground is established by normalizing the loads of different types of vehicles. The validity and rationality of the standardized load model are verified by comparing the rainflow cycle, pseudo-damage and fatigue life of the standardized load spectrum with the measured load spectrum in proving grounds. The standardized load spectrum and load spectrum standardization method can provide accurate and effective load data for new vehicle in the early development stage, so as to ensure product reliability and durability level.

Key words Standardized load; Proving ground; Load characteristics; Extreme value theory; Damage equivalence

Corresponding author: ZHAO LiHui, Email: pheigoe@126.com, Tel/Fax: +86-21-55270456

The project supported by the National Natural Science Foundation of China (No.51705322), and the Automotive Industry Technology Development Fund of Shanghai (No.1624).

Manuscript received 20190828, in revised form 20191021.

^{*} 20190828 收到初稿, 20191021 收到修改稿。国家自然科学基金项目(51705322), 上海汽车工业科技发展基金(1624)资助。

^{**} 施闯闯, 男, 1994年7月生, 河南濮阳人, 汉族。上海理工大学机械工程学院硕士研究生, 研究方向为现代汽车设计理论、结构耐久性与可靠性评价方法。

^{***} 赵礼辉(通信作者), 男, 1985年1月生, 山东青岛人, 汉族。上海理工大学机械工程学院副教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向车辆结构耐久性评价与轻量化设计。

引言

基于试验场载荷谱的台架试验是考核整车、各子系统及零部件可靠性与耐久性的重要途径之一^[1]。由于载荷谱需要在样车试制完成后才能实际采集,而新车型在早期开发阶段依据全新设计试制的样车还没有出现,难以在开发初期对产品进行可靠性与耐久性验证^[2]。

标准化载荷谱包含特定类别结构的载荷特征,常应用于一类或类似结构部件,可大大缩减计算时间和试验成本^[3]。飞机工业是早期标准化载荷谱的主要推动者,自上世纪 70 年代开始,一系列的标准化载荷谱陆续制定和实施。自 20 世纪 80 年代开始,标准化载荷谱在汽车工业中逐步应用。德国 LBF 研究所曾通过对十辆不同性能等级、不同驱动类型、不同悬架形式的车辆载荷进行研究,指出车辆总体载荷分布的差异性主要取决于运行工况,而与车辆本身特性关联较小^[4]。自上世纪末,欧美汽车工业通过相互联合已制定出包括 CARLOS multi^[5]、CARLOS PTM^[6]、CARLOS PTA^[7] 和 CARLOS TC^[8] 等在内的一系列整车或关键零部件标准化载荷谱。

近年来我国载荷谱的标准化工作也取得了一定的进展,在不同工程领域初步得到了应用。郭虎等用威布尔分布拟合得到了汽车前桥在试验场各路面应力幅的分布函数^[9]。付海龙根据石油井架载荷样本统计特性,发现概率分布曲线呈现偏厚尾特征^[10]。尤爽等针对工程车辆的载荷特点,用极值分布拟合工程车辆作业载荷,并据此预测作业中可能出现的极值载荷^[11]。上述的载荷统计研究均是以频次拟合效果作为评价准则,针对高频次小载荷是拟合关键,而对低频次大载荷拟合误差较大,并且未考虑载荷的损伤拟合效果。汽车结构件在车辆运行过程中所承受的随机载荷按照实际作用效果可分为:损伤载荷、强化载荷和无效载荷^[12],载荷的损伤作用效果与应力成幂函数关系,即低频次大载荷对损伤起主导作用。若单以载荷频次拟合效果作为评价分布模型的依据,必然导致载荷损伤作用效果的偏差。

因此本文以载荷的损伤作用效果为评价目标,通过试验场载荷分析确定同一试验场载荷分布的相似性,分析传统概率密度函数与极值理论函数在载荷损伤等效建模方面的优劣性,基于不同车型载荷数据的归一化建立国内某试验场标准化载荷,从而在产品开发初期提供可靠的载荷数据,以缩短开发时间、提高开发质量。

1 试验场载荷及特征分析

试验场路况下不同部件的激励载荷表现为不同形式,概括而言主要有轮心六分力、硬点位置加速度、悬架位移信号、易损件关键部位应变信号等。因此,通过五个试验车型采集以上四种载荷,作为整体载荷分析基础数据,其中前两个车型用于建立标准化载荷模型,后三个车型用于验证标准化结果的有效性。鉴于汽车各结构所受的载荷主要由路面向车轮传递的外部激励引起,载荷特征分析及标准化过程以六分力为主,辅以部分关键位置应变信号。图 1 为两个车型左前轮轮荷-时间历程,在 F_x 、 F_y 和 F_z 三个方向上,不同车型载荷极值接近。

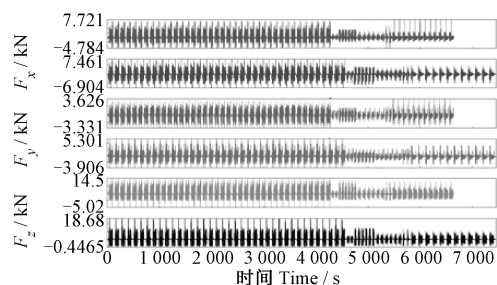


图 1 两车型左前轮 F_x 、 F_y 和 F_z 向载荷谱

Fig.1 Load spectrum of F_x , F_y and F_z directions of left front wheels of two vehicles

1.1 幅值分布

两车型左前轮 F_x 、 F_y 、 F_z 向力和前稳定杆应变的幅值分布如图 2 所示。可以看到,在该试验场规范下两车型载荷幅值分布具有相似性;不同车型载荷幅值的极值不同,但载荷频次最高点出现在相近幅值位置;且随着幅值绝对值增大,载荷频次同步下降。

1.2 雨流循环

雨流计数是基于材料的应力—应变循环特性和记忆特性,认为塑性的存在是疲劳损伤的必要条件。对试验场实测载荷谱雨流计数,采用均值等效转换,取阈值 2% 删去过渡与连接路段不造成损伤的无效载荷。两车型左前轮 F_x 、 F_y 、 F_z 向力和前稳定杆应变的雨流循环频次分布,如图 3 所示,可以发现:雨流变程的最大值不同,但载荷频次最高点出现在相近变程位置,且随着变程增大频次呈相同趋势递减,表明该试验场规范下两车型的雨流循环频次分布具有相似性。

1.3 损伤分布

车辆行驶过程中,宏观力及力矩作用下,具体结构不同位置将依据几何特征产生应力/应变响应,但由于实际零件的几何强度相关性,为了定量比较不同车型载荷损伤效果,本文以宏观载荷结合预定义的 S-N 曲线依据 Miner 线性损伤累积准则计算伪损伤^[13]。考

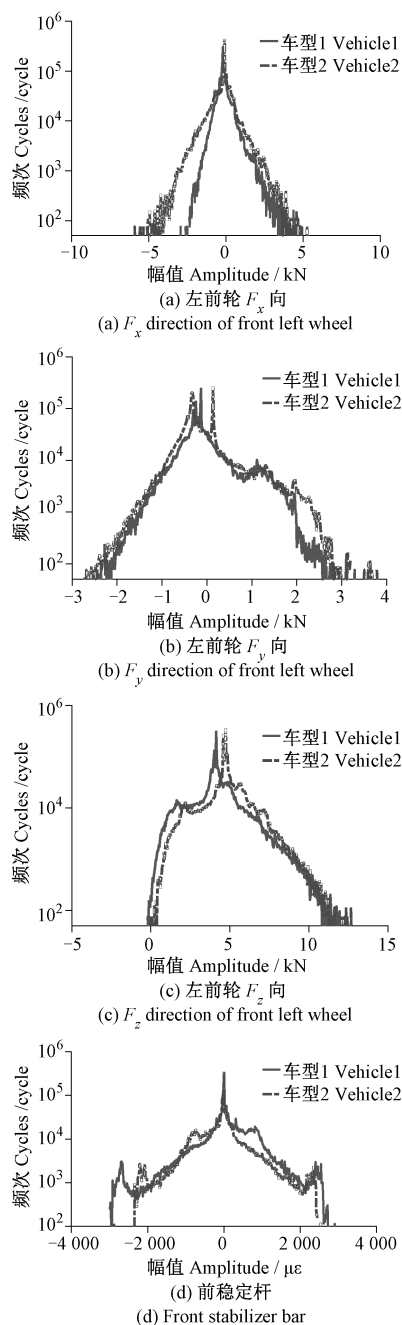


图 2 两车型载荷幅值分布

Fig.2 Amplitude distribution of load of two vehicles

虑实际宏观载荷较大(10^4 级), $S-N$ 曲线截距取 2.5×10^5 , 同时由于汽车车身及底盘等关键承载零件多是焊接件, $S-N$ 曲线的反斜率指数取 3^[14]。

两种车型不同载荷的损伤累积分布如图 4 所示。从图中可以看出, 对不同车型所有载荷而言前三级载荷损伤累积均较慢, 前三级损伤之和小于总损伤的 5%, 从第四级载荷开始损伤迅速累积。进一步, 对不同车型载荷雨流频次和损伤比例分布比较可以发现, 同一试验场规范下雨流及损伤分布趋于一致, 如图 5 所示(鉴于篇幅, 仅给出左前车轮垂向载荷 F_z)。因此, 基于试验场规范下不同车型载荷及损伤分布的相

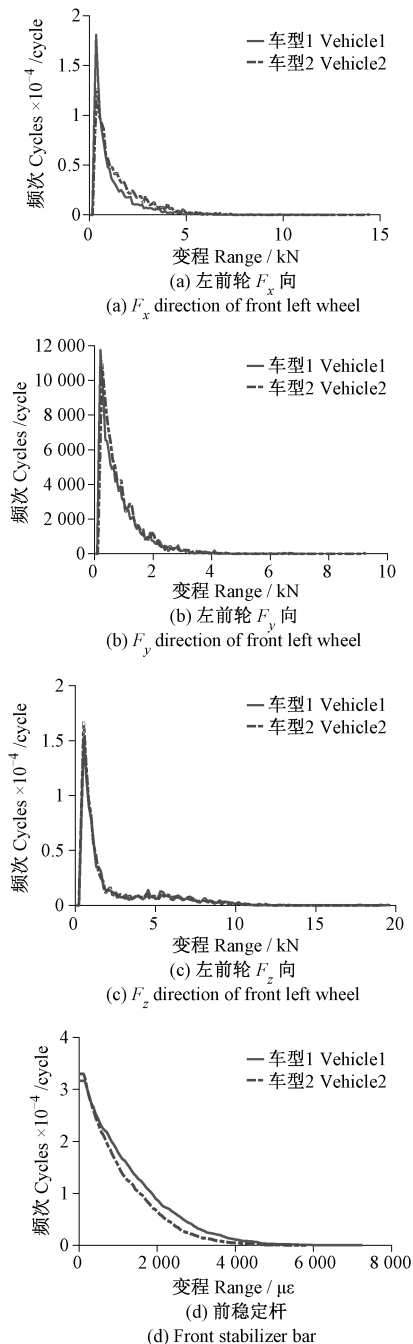


图 3 两车型雨流循环分布

Fig.3 Rainflow distribution of two vehicles

似性, 可以通过建立标准化载荷的形式, 有效减少载荷采集频次。然而, 结合图 5 载荷频次分布中最高频次载荷为前 5 级载荷, 而最大损伤载荷区间为 10~18 级载荷, 基于传统概率密度函数单纯通过频次分布建立载荷分布模型, 难以准确表征载荷损伤特征。

2 载荷统计方法

目前, 较为常用的车辆载荷统计模型包括威布尔分布、对数正态分布和正态分布, 在海洋船舶作业中还常用瑞利分布和指数分布。关于此类模型的建模方法可参考文献[15-16], 如前文所述以上单纯通过载荷频

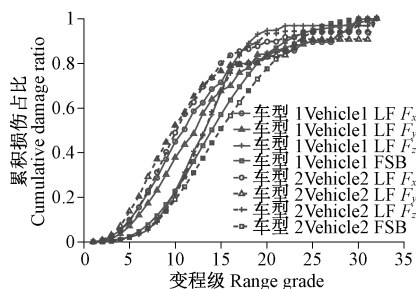
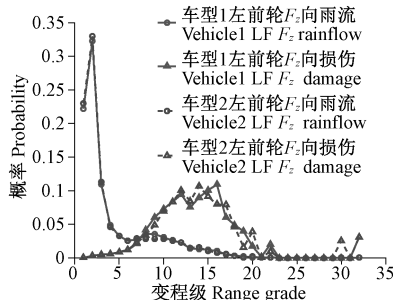


图4 两车型累积损伤占比

Fig.4 Cumulated damage ratio of two vehicles

图5 试验场两车型左前轮 F_z 向雨流和损伤比例分布Fig.5 Rainflow and damage probability distribution in F_z direction of left front wheel of two vehicles in proving ground

次的建模方式极易忽略高应力水平载荷的损伤,导致载荷偏弱,结构设计偏于危险。本文以极值理论为基础,通过超越阈值(Peak Over Threshold, POT)模型的广义 Pareto 分布 (Generalized Pareto Distribution, GPD) 建立载荷分布模型,通过准确地拟合低频次中间载荷与大载荷对应的尾部分布^[17] 保留原始载荷损伤。

2.1 GPD 模型

一个形状参数为 $\xi \in R$, 尺度参数为 $\sigma > 0$ (位置参数 $\mu = 0$) 的二参数 GPD 分布,其分布尾部(1 减去分布函数)为

$$\bar{G}(x, \xi, \sigma) = \begin{cases} (1 + \xi x / \sigma)^{-1/\xi} & \xi \neq 0 \\ e^{-x/\sigma} & \xi = 0 \end{cases} \quad (2)$$

其中

$$D(\sigma, \xi) = \begin{cases} [0, \infty) & \xi \geq 0 \\ [0, -\sigma/\xi) & \xi < 0 \end{cases} \quad (3)$$

POT 模型 GPD 是以超出某一设定阈值 u 的观测值 X_i 为基础进行参数估计和分布拟合。因此 GPD 模型可以与损伤分布相对应,对于小于一定变程的载荷损伤贡献量较小,予以忽略。

2.2 阈值确定准则

GPD 拟合超出量时,存在阈值 u 的选择问题, u 值太大,只有很少几个超出量,估计量的方差就较大; u 太小,超出量分布与 GPD 相差较大,估计量成为有偏

估计。

考虑关联损伤分布选取阈值,重点拟合对损伤起主导作用的损伤载荷。各通道以拟合 100%、95% 和 90% 的损伤载荷作为阈值选取标准,其中 1~24 通道分别为左前、右前、左后、右后车轮 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 向力(矩),第 25 通道为前稳定杆应变信号。可见车型 1 在 100% 损伤阈值标准下各通道损伤复现效果最为准确且稳定,如图 6 所示。重复方法分析 Vehicle2 车型,结果相同。因此阈值选取拟合 100% 的损伤载荷。

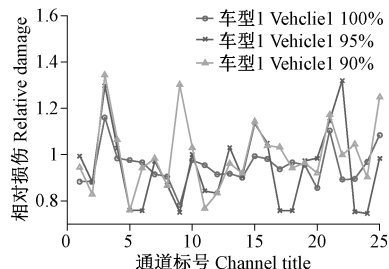


图6 100%、95%和90%阈值标准下损伤比值

Fig.6 Damage ratio under 100%, 95% and 90% threshold criteria

3 试验场载荷建模

3.1 载荷变程拟合

分别用 GPD、正态分布、双参数威布尔分布、指数分布、对数正态分布和瑞利分布拟合两车型载荷变程;采用极大似然法估计参数。

拟合结果如图 7 所示。对比分析两车型六种分布模型拟合曲线与实测载荷直方图可以看到:

- (1) 相比实测载荷,正态分布和瑞利分布低估小载荷和大载荷频次,高估中间载荷频次;
- (2) 威布尔分布低估小载荷频次,高估中间载荷频次,大载荷频次估计介于正态分布与 GPD 之间;
- (3) 指数分布对高频次小载荷估计好,中间载荷匹配好,低估大载荷频次;
- (4) 对数正态分布对小载荷频次估计好,低估中间载荷频次,高估大载荷频次;
- (5) GPD 引入阈值,对超过阈值部分的中间载荷和大载荷频次估计好。

3.2 损伤效果检验

通过对比拟合载荷与实采载荷间的相对损伤来分析各个统计模型拟合的准确性。两车型各通道相对损伤如图 8 所示,可以看到:

- (1) GPD 在损伤等效上最为准确且稳定,各通道损伤比值均在 1 附近,且波动较小;其次是威布尔分布拟合较好,但损伤比值均小于 1,各通道波动与 GPD 相当;

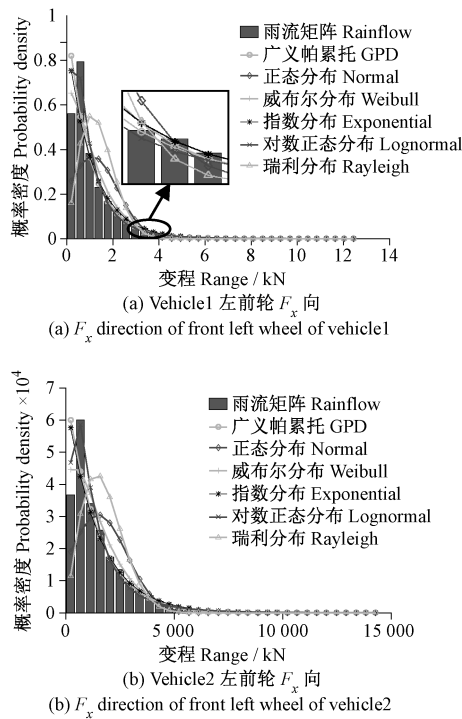


图 7 两车型各分布模型拟合结果

Fig.7 Fitting results of distribution models of two vehicles

(2) 指数分布和对数正态分布大部分通道损伤比值大于 1, 且波动较大;

(3) 正态分布和瑞利分布虽然各通道损伤比值波动幅度很小, 但是比值均小于 1, 且都在威布尔分布之下, 认为这两种分布拟合损伤效果最差。

结果表明: 针对该试验场, 基于极值理论的 GPD 模型最能准确且稳定地表征载荷频次和损伤特征, 可用作该试验场载荷谱标准化的载荷统计模型。

4 载荷谱标准化

4.1 试验场载荷标准化

尽管同一试验场规范下不同车型的雨流循环分布相似, 但由于整车参数的差异 (如车重、减震器阻尼等) 载荷极值差别较大。因此, 试验场载荷谱的标准化首先需要进行不同车型载荷的归一化, 以排除不同车型载荷极值的差异。归一化的方法是将各通道的变程除对应通道的最大变程值得到变程在 $[0 \sim 1]$ 范围的标准化载荷。以试验场两个车型的标准化载荷经加权平均后, 通过参数估计得到基于 GPD 的试验场的标准化载荷模型。

标准化载荷和两车型归一化的载荷分布如图 9 所示, 得到的载荷概率密度函数曲线基本一致, 从载荷频次的角度说明了标准化载荷模型的有效性。

4.2 雨流循环对比

为进一步验证标准化载荷谱的有效性, 通过车型

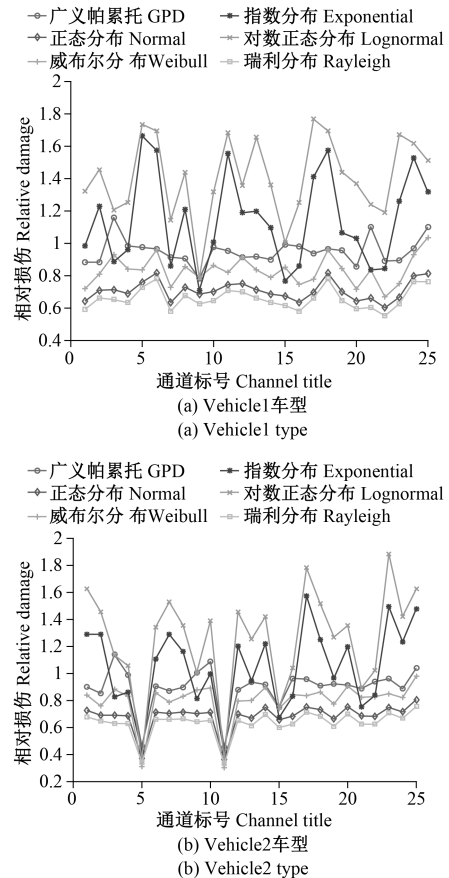


图 8 两车型各通道损伤等效检验

Fig.8 Equivalent damage testing for each channel of two vehicles

3、车型 4 和车型 5 三个车型不同载荷通道基于标准化载荷模型重构出的雨流循环与实测载荷雨流循环进行对比。图 10 为轮心力和前稳定杆应变的载荷雨流循环对比, 可以看到重构载荷谱与实测载荷谱间的雨流循环基本相同。

三个车型 25 通道重构谱与实测谱间的相对损伤, 如图 11 所示。可以看到: 各通道相对损伤均在 $0.6 \sim 1.6$ 之间, 且波动幅度较小。表明重构谱与实测谱间有近似相等的潜在损伤能力。

计算重构谱与实测谱间相对损伤的均值、标准差和变异系数来分析标准化载荷谱的精确度, 如表 1 所示。可以看到: 各车型均值皆接近于 1, 平均损伤误差最大仅为 17%, 远小于工程上 $0.5 \sim 2$ 倍损伤误差区间, 标准差和变异系数也较小。以上结果表明: 各通道基于标准化载荷模型反推的重构载荷谱能准确且稳定地复现实测载荷特性。从而验证了试验场标准化载荷模型的精确性和有效性。

以上, 通过载荷频次和相对损伤的对比, 进一步说明了基于部分车型 (2 个车型) 建立的标准化载荷谱同样适用于其它车型 (3 个车型), 从而表明了标准化载荷模型的普适性。

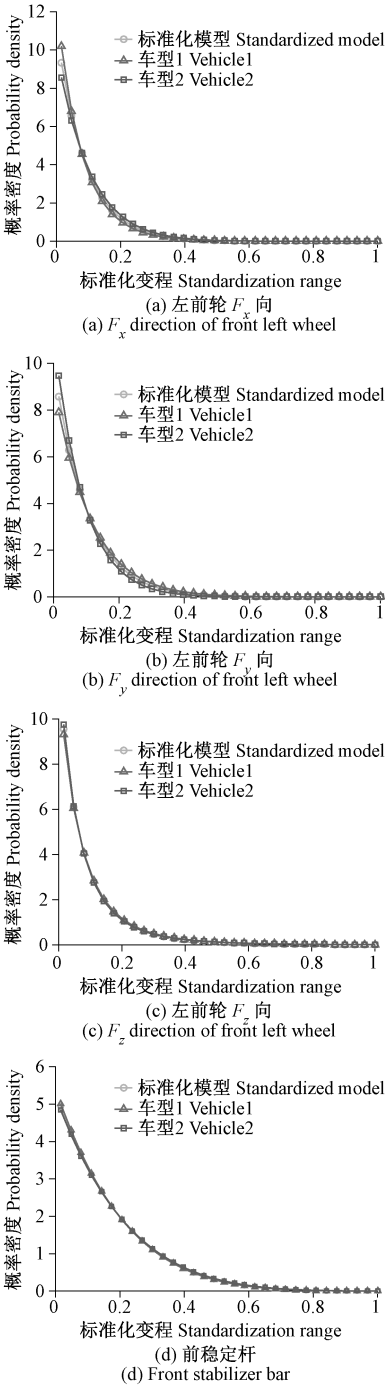


图9 标准化载荷 GPD 函数曲线
Fig.9 GPD function curve of standardized load

表 1 各通道相对损伤统计
Tab.1 Relative damage statistics of channels

评价参数 Evaluation parameter	车型 3 Vehicle3	车型 4 Vehicle4	车型 5 Vehicle5
均值 Mean	0.946 4	1.013 9	0.831 4
标准差 Standard deviation	0.235 6	0.287 5	0.101 0
变异系数 Coefficient of variation	0.248 9	0.283 6	0.121 5

4.3 道路载荷模拟试验验证

为了验证标准化载荷谱的合理性,针对车型 3 的多连杆后悬架拖曳臂进行台架试验。由于拖曳臂主要

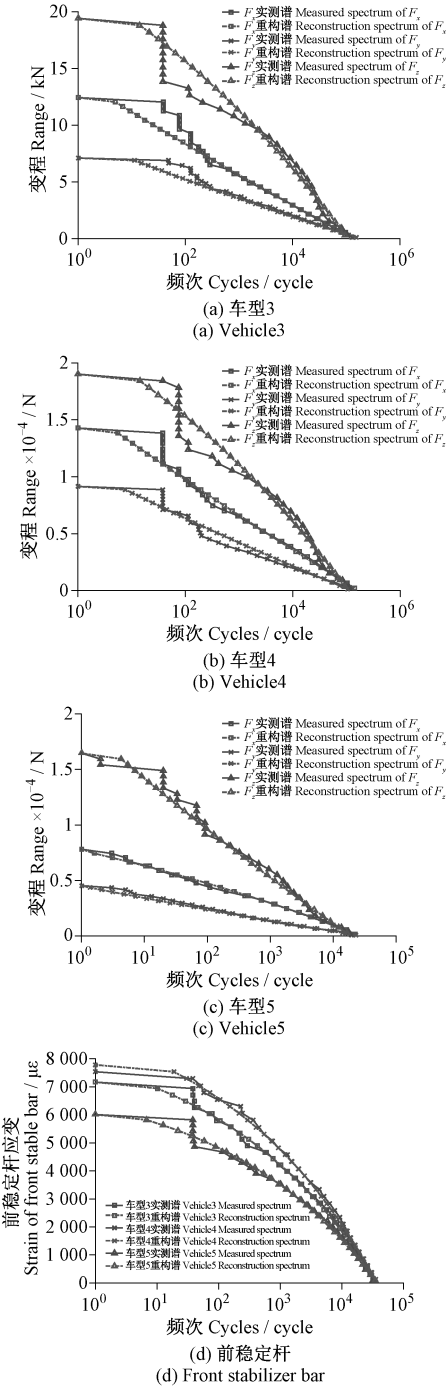


图 10 重构谱与实测谱雨流循环对比
Fig.10 Comparison of reconstructed spectrum and measured spectrum of rainflow circulation

承受纵向力,可不计横向力与垂向力作用影响,即只考虑 F_x 向载荷^[18]。试验台架搭建如图 12 所示,采用对拖曳臂后端加载的方法,液压作动缸加载面与拖曳臂平面偏距为实车轮心至拖曳臂平面的距离。为了使加载力始终与拖曳臂平面平行,同时保护作动缸不受侧向力,在作动缸与夹具之间增加直线导轨。分别选取试验场采集路谱和基于标准化载荷模型重构的载荷历程加载。

图 13 为通过标准化载荷模型得到的重构载荷谱

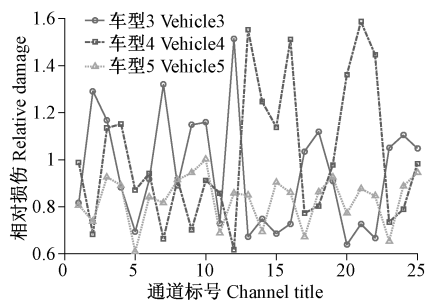


图 11 重构谱与实测谱各通道损伤比

Fig.11 Damage ratio of measured and reconstructed spectrum channels



图 12 台架试验

Fig.12 Bench test

编制成多级载荷谱,为了加速试验,删除最小两级载荷,为了避免加载次序因素,以保留的载荷为基础生成随机时间历程作为加载谱,如图 14 所示。

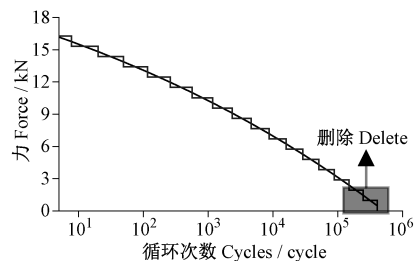


图 13 多级载荷谱

Fig.13 Multistage load spectrum

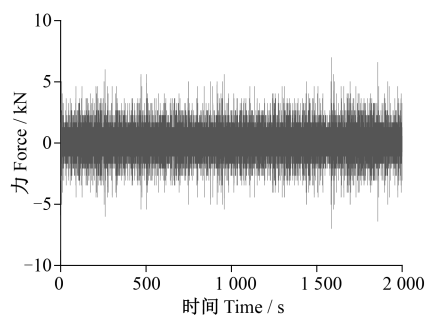
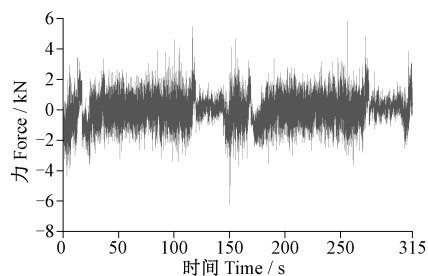


图 14 重构时间历程

Fig.14 Reconstructing time history

实际道路载荷以采集到的拖曳臂应变信号为基础,基于时域损伤编辑法删除过渡连接路段对其进行初步加速以缩短试验时间^[19],一个实际道路循环载荷时间历程如图 15 所示。

试验时分别以标准化载荷重构谱和实际道路谱为目标,通过 MTS 液压伺服试验系统自带的路谱载荷选

图 15 比利时路左后轮 F_x 载荷谱Fig.15 Load spectrum of LR_ F_x on Belgium road

代技术(Remote Parameter Control, RPC)生成驱动谱,进行随机载荷加载。为保证加载载荷的准确性,迭代允许误差设定为 0.01 倍 RMS。实际道路载荷下,目标谱与响应谱时间历程对比如图 16 所示。

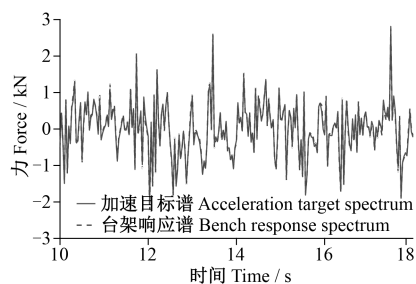


图 16 目标谱与响应谱对比

Fig.16 Comparison of target spectrum and response spectrum

选取同一批次 4 个零件分别在标准化载荷重构谱(No.1, No.2)和试验场实际道路谱(No.3, No.4)下进行疲劳试验,以拖曳臂出现 10 mm 长裂纹作为失效准则,如图 17 所示。表 2 汇总了两种载荷谱下拖曳臂疲劳寿命,其失效时间基本都在 80 个载荷循环左右,误差在 5% 以内,进而验证了标准化载荷谱的合理性。

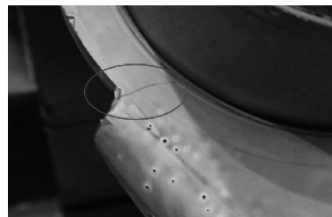


图 17 失效位置

Fig.17 Failure position

表 2 台架试验寿命

Tab.2 Fatigue life of bench

标准化载荷 重构谱 Reconstructed spectrum of standardized model	寿命 (谱块数) Repetitions	试验场实际道路谱 Road spectrum of proving ground	寿命 (谱块数) Repetitions
No.1	80	No.3	81
No.2	84	No.4	79

5 结论

本文结合同一试验场规范下不同车型的载荷雨流循环频次分布具有相似性,建立了对象试验场的标准化载荷模型。

1)通过对试验场道路载荷的分布特征分析,发现同一试验场规范下不同车型载荷分布的相似性。

2)采用传统概率分布模型和极值分布模型对试验场载荷统计;通过相对损伤验证各分布模型拟合的优劣性,结果表明基于极值理论的 GPD 模型最能准确且稳定的表征载荷频次和损伤特征。

3)经对载荷变程的归一化,建立了对象试验场的标准化载荷模型;通过对比重构谱与实测谱间的雨流循环、相对损伤以及关键零部件台架试验寿命,验证了标准化载荷模型的有效性和合理性。

该标准化载荷谱及载荷谱标准化方法可为新车型在早期开发阶段提供准确有效的载荷数据,从而保证产品可靠性与耐久性水平。

参考文献 (References)

- [1] 于佳伟,郑松林,冯金芝,等.某轿车前副车架服役载荷模拟试验加速方法研究[J].机械工程学报,2016,52(22):112-120.
YU JiaWei, ZHENG SongLin, FENG JinZhi, et al. Research on acceleration method of service load simulation test for front subframe of a car [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52 (22): 112-120 (In Chinese).
- [2] 马扎根,陈栋华,胡文伟,等.基于虚拟试验台的车身结构寿命预估与改进设计[J].汽车工程,2016,38(7):896-900.
MA ZhaGen, CHEN DongHua, HU WenWei, et al. Life prediction and improved design of body structure based on virtual test-bed [J]. Automotive Engineering, 2016, 38 (7): 896-900 (In Chinese).
- [3] Shanshan li, Weicheng cui, Jeom kee Paik. An improved procedure for generating standardised load-time histories for marine structures [J]. SAGE Publications, 2016, 230(2): 281-296.
- [4] Heuler P, Klätschke H. Generation and use of standardised load spectra and load-time histories[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27(8): 974-990.
- [5] Schütz D, Klätschke H, Heuler P. Standardized multiaxial load sequences for car wheel suspension components-car loading standard-CARLOS multi [J]. Darmstadt, Germany: Fraunhofer Institut für Betriebsfestigkeit (LBF). Report No. FB-201, 1994:112.
- [6] Schütz D, Klätschke H. Standardized load sequences for car powertrains with manual gears-car loading standard-CARLOS PTM [J]. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, Bericht, 1997: 7558.
- [7] Klätschke H. Standardized load sequences for car powertrains with automatic gears-car loading standard-CARLOS PTA [J]. Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit (LBF), Darmstadt, Report, 2002: 110310/110370.
- [8] Heuler P, Bruder T, Klätschke H. Standardised load-time histories-a contribution to durability issues under spectrum loading [J]. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik: Entwicklung, Fertigung, Prüfung, Eigenschaften und Anwendungen Technischer Werkstoffe, 2005, 36(11): 669-677.
- [9] 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 spectrum [J]. Automotive Science and Technology, 2003 (6): 43-45 (In Chinese).
- [10] 付海龙,邹龙庆,王珏.石油钻机井架载荷谱的编制[J].振动与冲击,2007(11):160-162.
FU HaiLong, ZOU LongQing, WANG Yue. Compilation of derrick load spectrum of oil drilling rig [J]. Journal of Vibration and Shock, 2007(11):160-162 (In Chinese).
- [11] 尤爽.轮式装载机载荷极值度量与时域外推方法研究[D].长春:吉林大学,2016:49-59.
YOU Shuang. Research on the load extremum measurement and time domain extrapolation method for wheeled loaders [D]. Changchun: Jilin University, 2016:49-59 (In Chinese).
- [12] 赵礼辉,郑松林,冯金芝.基于低载强化特性的疲劳寿命估计方法[J].机械工程学报,2013,49(8):115-122.
ZHAO LiHui, ZHENG SongLin, FENG JinZhi. Fatigue life estimation method based on low load reinforcement characteristics [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49 (8): 115-122 (In Chinese).
- [13] 郑松林,周亚捷,冯金芝,等.一种新的考虑伪损伤保留的道路载荷模拟试验加速方法[J].机械强度,2017,39(2):410-416.
ZHENG SongLin, ZHOU YaJie, FENG JinZhi, et al. A new acceleration method of road load simulation test considering pseudo-damage retention [J]. Journal of Mechanical Strength, 2017, 39 (2): 410-416 (In Chinese).
- [14] Hobbacher A. Recommendations for fatigue design of welded joints and components[M]. Welding Research Council, 2003: 78-79.
- [15] 陈爱雅,高镇同.二维随机疲劳载荷的统计处理及其应用[J].北京航空学院学报,1986(1):75-85.
CHEN AiYa, GAO ZhenTong. Statistical processing of two-dimensional random fatigue load and its application [J]. Journal of Beijing Aeronautical College, 1986 (1): 75-85 (In Chinese).
- [16] 凌静,高镇同.母体参数估计的 χ^2 最小值法[J].航空学报,1991(2):50-55.
LING Jing, GAO ZhenTong. χ^2 minimum method for estimating matrix parameters [J]. Journal of Aeronautics, 1991 (2): 50-55 (In Chinese).
- [17] 刘庆松.工程车辆传动系极值载荷度量方法及应用[D].长春:吉林大学,2014:25-35.
LIU QingSong. Method and application of extreme load measurement for transmission system of construction vehicles [D]. Changchun: Jilin University, 2014: 25-35 (In Chinese).
- [18] 胡勇.汽车后悬架拖曳臂台架疲劳试验失效分析及其改进[J].机械设计与研究,2018,34(4):172-176.
HU Yong. Failure analysis and improvement of fatigue test for truck rear suspension towing arm bench [J]. Mechanical Design and Research, 2018, 34 (4): 172-176 (In Chinese).
- [19] 花菲菲,郑松林,冯金芝,等.基于时域损伤编辑法的整车道路模拟试验谱编制[J].机械强度,2015,37(5):964-971.
HUA FeiFei, ZHENG SongLin, FENG JinZhi, et al. The whole lane road simulation test spectrum based on time-domain damage editing method is compiled [J]. Journal of Mechanical Strength, 2015, 37 (5): 964-971 (In Chinese).