

雨流计数法在整车载荷谱分析中的应用

赵晓鹏¹, 姜 丁², 张 强², 朱先民¹

1. 军事交通学院汽车工程系, 天津 300161

2. 军事交通运输研究所, 天津 300161

摘要 基于当前广泛应用的雨流计数法的原理, 在全程实测某型越野车在某试验场各强化路段载荷谱的基础上, 对载荷谱进行预处理, 然后给出了基于雨流计数法的载荷谱压缩、外推、叠加与时域重构的应用实例。结果表明通过雨流计数法能在基本保持原载荷谱疲劳损伤的同时, 明显地压缩载荷谱的时间历程, 为下一步快速、高效地进行室内道路模拟试验打下了基础。

关键词 车辆可靠性; 雨流计数法; 载荷谱; 随机载荷

中图分类号 U467

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2009)03-0067-07

Application of Rain-flow Counting Method in the Analysis of Load Spectrum

ZHAO Xiaopeng¹, JIANG Ding², ZHANG Qiang²,
ZHU Xianmin¹

1. Department of Automobile Engineering, Academy of Military Transportation, Tianjin 300161, China

2. Institute of Military Transportation, Tianjin 300161, China

Abstract The rain-flow counting method is discussed in this paper. Based on the loading spectra of a vehicle obtained from a standard test ground testing, a method is proposed for treating the actual measured data for load histories. The examples of the compression and extrapolation of loading spectra based on rain-flow counting are given, where the time scale is reduced remarkably. Then different roads in the test ground are combined to simulate the customer road. This research can pave the way for road simulation in a further step.

Keywords vehicle reliability; rain-flow counting method; loading spectra; stochastic load-spectrum

0 引言

车辆载荷谱是进行车辆零部件可靠性试验研究的重要

依据之一, 掌握载荷谱的变化规律是进行疲劳试验、疲劳寿命估计和疲劳设计的先决条件。在工程实际中, 许多车辆零部件的工作载荷是随机的。随机载荷是一种不规则的、不能重复的、随时间变化的载荷。在对零部件进行疲劳可靠性分析时, 只能使用统计分析方法对随机载荷进行分析与描述, 即通过实测或参考有关资料对载荷-时间历程进行统计分析^[1]。常用的统计分析方法主要有计数法和功率谱法^[2]。由于使汽车零部件产生疲劳损伤的主要原因是载荷幅值和载荷循环次数, 因而常用计数法进行分析^[3]。

把一个随机过程的载荷-时间历程简化成一系列的全循环或半循环, 从而得到相应载荷幅值和载荷循环次数的过程称为计数法。计数法的种类很多, 如峰值计数、量程计数、穿级计数和雨流计数等, 对于同一载荷-时间历程采用不同的计数法进行计数, 所得的结果可能相差很大。

常用的计数法可分为两大类: 单参数计数法和双参数计数法。单参数计数法只考虑载荷循环中的一个变量, 直观简单, 但不够严密和精确, 既得不到载荷的频率变化信息, 也没有载荷发生次序的信息, 不能描绘载荷循环特性, 因而只是对随机载荷的近似描述。双参数计数法可以记录载荷循环中的两个参量, 能记录载荷循环的全部信息, 是一种较好的计数方法^[2]。建立二维载荷谱需要得到均值与幅值的全部信息, 只有采用双参数计数法才能满足要求。双参数计数法有雨流法、程对法、程均-对法等。由于雨流法在计数原理上与实际工作载荷对金属零件的循环应力-应变较相似, 有坚实的力学基础, 具有较高的正确性, 计数方法便于用计算机完成, 也易于实现自动化与程序化, 因而得到广泛的应用, 近年来被认为是最高效的计数方法^[4]。

收稿日期: 2008-11-21

作者简介: 赵晓鹏, 研究方向为军用车辆电子技术, 电子信箱: zxpzxp007@163.com; 姜丁 (通信作者), 教授, 研究方向为车辆电控技术, 电子信箱: jd_cn1955@yahoo.com.cn

1 雨流计数法

雨流计数法主要用于工程领域,特别在疲劳寿命计算中运用非常广泛。雨流计数法又称为“塔顶法”,是 20 世纪 50 年代由英国 M. Matsuiski 和 T. Endo 考虑了材料应力-应变过程提出来的,他们认为塑性的存在是疲劳损伤的必要条件,且其塑性性质表现为应力-应变的迟滞回线。雨流计数法主的优点是,在计数原则上有一定的力学基础。其主要功能是把实测载荷历程简化为若干个载荷循环,供疲劳寿命估算和编制疲劳试验载荷谱使用。它以双参数法为基础,考虑了动强度(幅值)和静强度(均值)两个变量,符合疲劳载荷本身固有的特性。把载荷-时间历程数据记录转过 90°,时间坐标轴竖直向下,数据记录犹如一系列屋面,雨水顺着屋面往下流,故称为雨流计数法。

1.1 雨流计数原理

雨流计数法有下列规则。

1) 将谱历程曲线旋转 90°放置,如图 1 所示^[5]。将载荷历程看作多层屋顶,假想有雨流滴沿最大峰或谷处开始往下流。若无屋顶阻拦,则雨滴反向,继续流至端点。

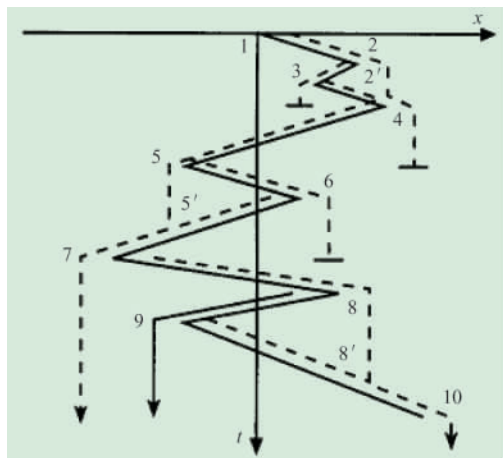


图 1 雨流计数法

Fig. 1 Rain-flow counting method

2) 起始于波谷的雨流,遇到比它更低的谷值便停止;起始于波峰的雨流,遇到比它更高的峰值便停止。

3) 当雨流遇到来自上面屋顶流下的雨时就停止流动,并构成了一个循环^[5]。

4) 根据雨滴流动的起点和终点,画出各个循环,将所有循环逐一取出来,并记录其峰谷值^[5]。

5) 每一雨流的水平长度可以作为该循环的幅值^[5]。

雨流计数法在实际计数过程中一般都采用四峰-谷值比较法。近年来,随着技术的发展,在其基础上又出现了改进的四峰-谷值法、等效载荷法等。

1.2 雨流法计数过程

雨流计数法的主要功能是把经过峰谷值检测和无效幅值去除后的实测载荷历程数据以离散载荷循环的形式表示出来。任何长度的时域信号都可以缩减成一个雨流矩阵和留数,而且

可以还原成一段连续时域信号,具体计算过程如图 2 所示。

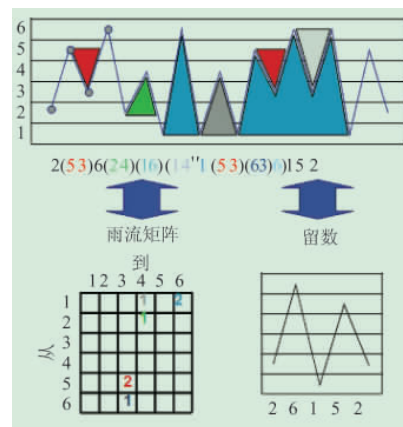


图 2 雨流计数法计算过程

Fig. 2 Procedure of rain-flow counting method

2 整车载荷谱的采集和预处理

在进行室内道路模拟试验时,振动试验台的输入数据是在道路试验场实际试车时采集而得。为了使某型越野车在室内台架试验中产生的振动状况与实际道路行驶时所产生的振动状况相同,需要采集该型越野车的实际载荷谱信号,即建立其道路谱数据库。试验路面及车速按照试验大纲相应的可靠性试验规范执行,测试部位为车轮轴、轴垂直方向车梁上对应位置以及其他敏感点。某试验场的特定路面包括高速跑道、石块路、砂石路、卵石路、扭曲路、搓板路(带角度搓板、错位搓板、直搓板 3 种)、波浪路、急速转弯路段以及各种坡道。试验车辆在各种典型路段上行驶,测量装置安装在轴头、悬上等感兴趣部位,以获得测点的载荷谱。

2.1 测点布置及试验仪器设备

第 1 组测点包括左前轴三向加速度(垂直、纵向、侧向)、右前轴三向加速度(垂直、纵向、侧向)、左中轴垂直加速度、右中轴垂直加速度、左后轴垂直加速度、右后轴垂直加速度。

第 2 组测点包括左前悬上垂直加速度、右前悬上垂直加速度、左中悬上垂直加速度、右中悬上垂直加速度、左后悬上垂直加速度、右后悬上垂直加速度。

第 3 组测点包括左前轴纵向应变、左前轴侧向应变、右前轴纵向应变、右前轴侧向应变、左中桥纵向应变、右中桥纵向应变、左后桥纵向应变、右后桥纵向应变。

载荷谱的获取是通过全程连续实测车轴、悬上部位在某试验场强化路上的加速度、应变信号得到的。试验用车为运行状况良好的该型越野汽车。道路载荷谱信号的采样和数据处理采用比利时 LMS SCADAS SCM05 数据采集前端记录仪和 LMS Test. Lab 数据采集系统。随车在某汽车试验场进行强化路全程、分段测试,测试里程约 5 000 km,根据采样定理,采样频率定为 1 024 Hz,得到车轴、悬上的加速度-时间历程、应变-时间历程。大鹅卵石路上左中轮、右中轮、左后轮、右后轮轮轴某次的加速度-时间历程如图 3 所示。

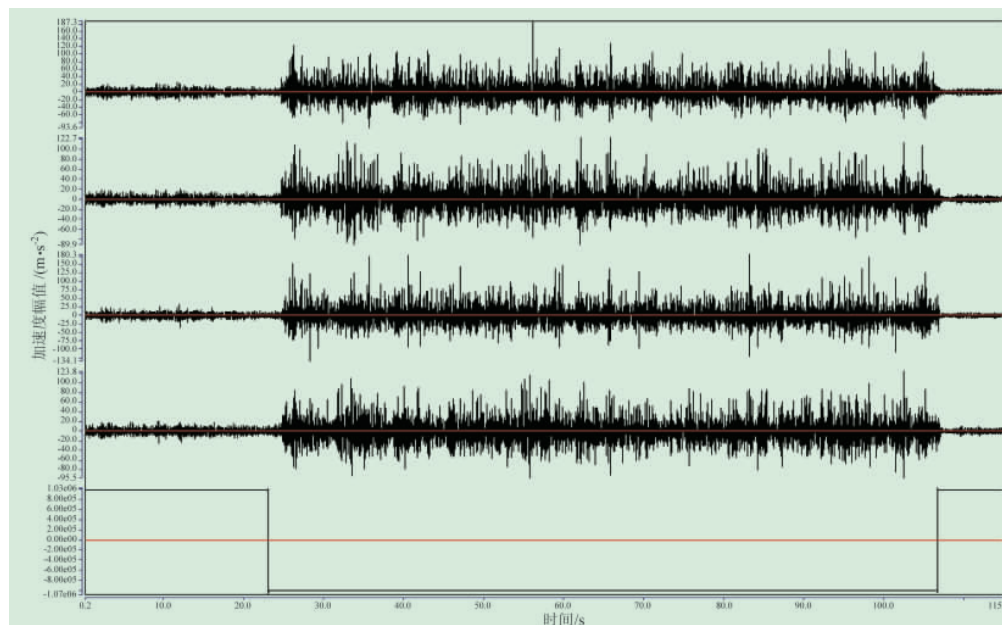


图 3 大鹅卵石路上左中轮、右中轮、左后轮、右后轮轮轴信号
Fig. 3 Load-time history of rear wheels on cobble road

2.2 载荷谱的预处理

载荷谱采集完成后,需要对加速度测点、应变测点的载荷-时间历程进行数据平稳性检验、各态历经性检验、正态分布检验和测量精度检验,并且需要在信号检验分析前作预处理,以剔除奇异项和消除趋势项。名义上试验路段每一循环的载荷是一样的,但实际上是不同的,因此在理论上为了精确地获得载荷的平均值,需进行无限次测量。但实际上这也是不现实的,所以由 3 名试车员各测 5 次。目的是以尽可能

少的测量次数,达到足够的精度。

轴头上所采集到的振动信号利用计算机进行处理,在处理时要进行低通滤波,消除高于 50 Hz 的部分。根据经验,这部分的振动对汽车的强度和耐久性影响非常小,可忽略不计。整车在某汽车试验场强化路大鹅卵石路段试验时,左后轮轮轴的载荷谱经过剔除奇异项、消除趋势项、低通滤波等预处理前后的时间历程对比如图 4 所示,频域对比如图 5 所示,雨流均幅值对比如图 6 所示。

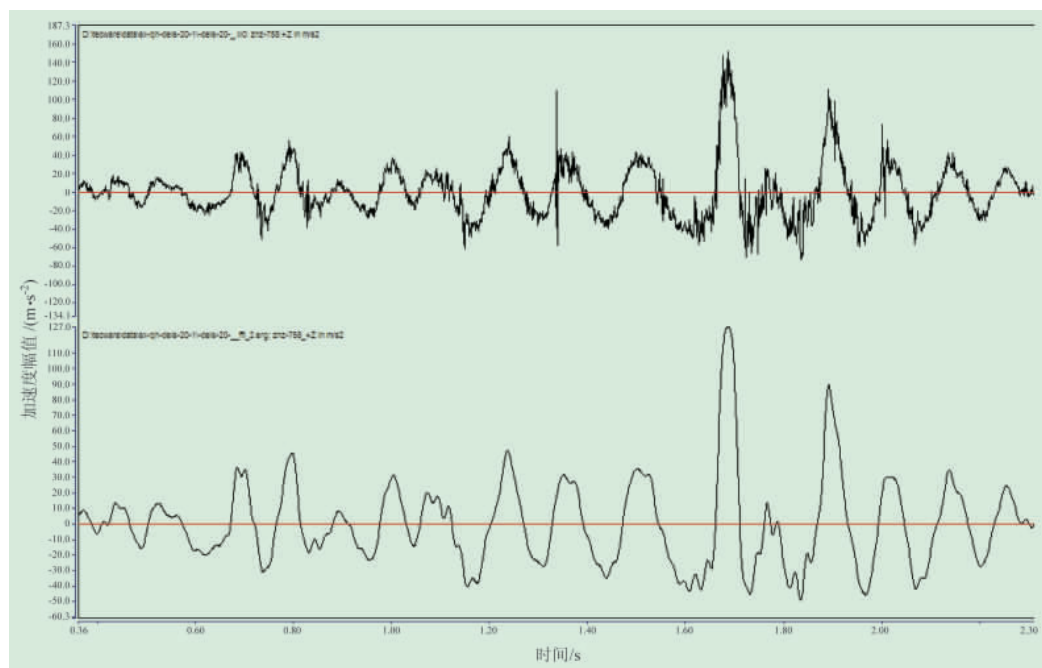


图 4 低通滤波前后时间历程对比
Fig. 4 Load-time history comparison

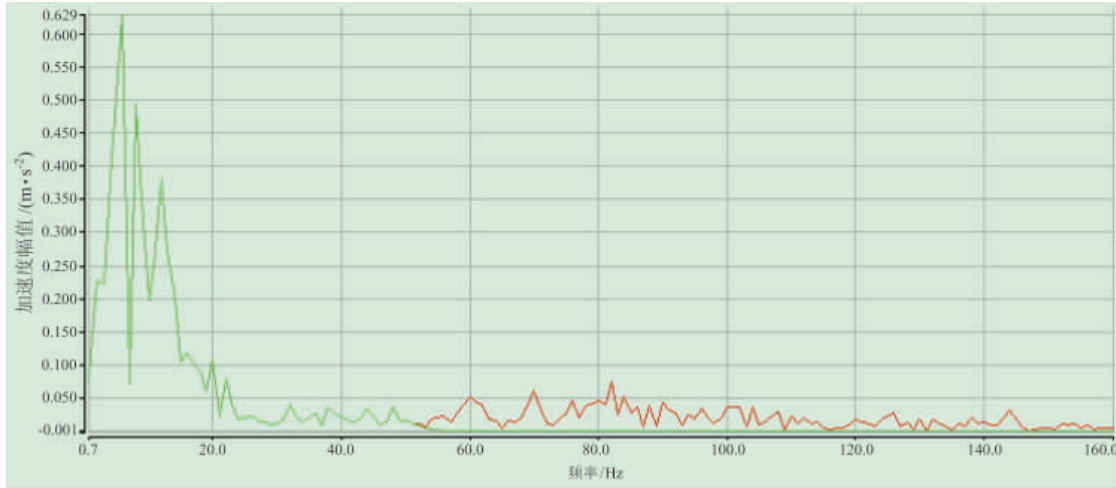
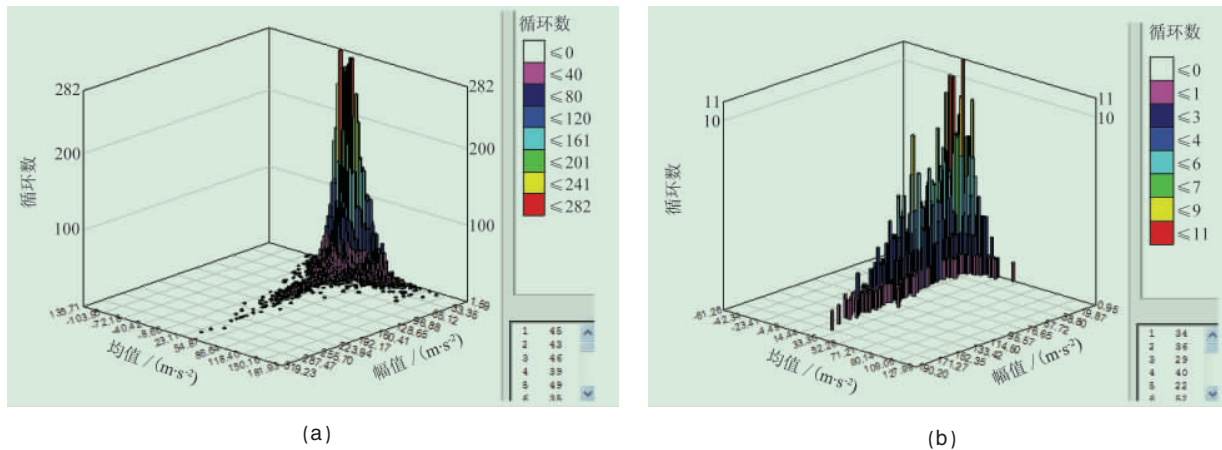


图 5 低通滤波前后频域对比

Fig. 5 Frequency domain comparison



(a)

(b)

图 6 低通滤波前(a)后(b)雨流均幅值

Fig. 6 Rain-flow matrices before (a) and after (b) low pass

3 基于雨流统计的整车载荷谱的分析、压缩、外推与时域重构

3.1 载荷谱样本的统计选择

由于所采集的道路载荷谱-时间历程是一个随机过程,而其中每个样本的应变-时间历程具有一定的离散性,因此,在实际的工程实践中,只能采集一定数目的样本,再从中选取出具有代表性的样本,也就是得到成活率为 50% 的损伤样本^[6]。

根据数理统计理论,当子样较小时,可以使用 Rossow 法来确定个体所对应的母体存活率的估计量。在载荷谱样本选择中,每个样本的损伤向量则作为整个排序子样的个体,对应目标个体的母体存活率估计值的 50%。对于本问题而言,实际上就是对所得的 15 个损伤向量进行排序,找到一个中值向量,该向量所对应的循环的信号,就是最终所需要的目标载荷谱。

如果直接对各损伤向量求模进行再排序,由于各通道损伤值数量级有一定差距,结果可能是某个或某几个损伤较大

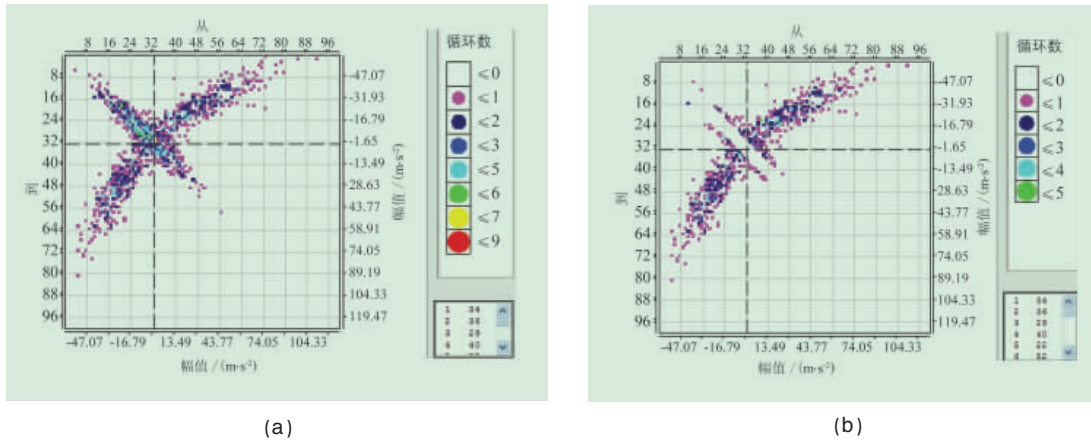
通道在整个排序中所占权重过大。为了解决这个问题,首先求出均值损伤向量,若第 i 个损伤向量为 Y_i ,则均值损伤向量 Y_m 为

$$Y_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i$$

其中 n 为损伤向量个数。各损伤向量对应值与均值损伤向量相减,得到差值向量 $Y'_i = Y_i - Y_m$ 。然后求出各差值向量的模并进行排序,其最小值所对应的损伤向量实质上是距均值损伤向量最近的向量,也即为综合考虑各通道影响,对损伤向量进行排序所得到的中值向量^[6]。

3.2 雨流矩阵的压缩(基于雨流矩阵分析的小载荷删除)

删除损伤小的数据段。以加速试验,该车配载 80%,时速 20 km/h 在大鹅卵石路面试验时左后轮轴头加速度-时间信号为例,删除雨流循环计数中幅值变化小于 $2g$ 的循环,也是对疲劳贡献不大的小载荷,删减前后雨流对比如图 7 所示,删减前后时域信号对比如图 8 所示,删减前后疲劳损伤对比如图 9 所示。



(a) (b)
图 7 小载荷删减前(a)后(b)加速度-时间历程雨流矩阵

Fig. 7 Rain-flow matrices before (a) and after (b) RainEdit

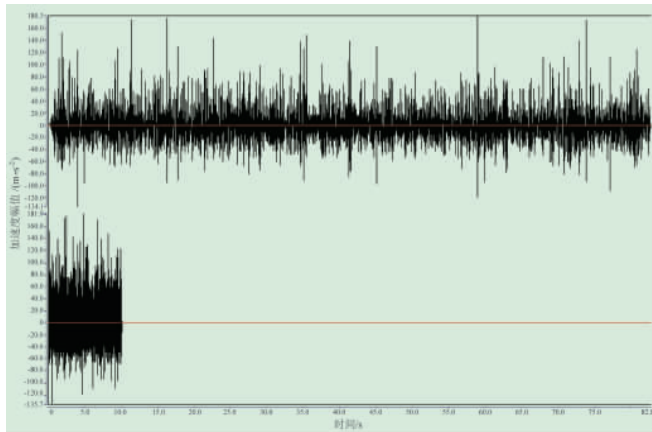


图 8 小载荷删减前后时域信号对比
Fig. 8 Load-time history comparison

3.3 压缩后雨流矩阵的外推、叠加与时域重构 (目标载荷谱模型的建立)

在实际载荷谱的采集过程中,一般只能进行短时间(距离)的测试,而进行疲劳寿命分析过程中,需要知道全寿命载荷谱,这就需要将短距离的载荷谱向长距离外推。

以该型越野车配载 80%, 时速 20 km/h 在大鹅卵石路面试验时左右轮轴头加速度-时间信号为例,外推 10 倍前后雨流均幅值对比如图 10 所示,累积循环计数对比如图 11 所示。

待测信号确定后,需要测量车辆使用环境下所有的典型路面、事件的载荷输入,并用雨流计数技术将每一个通道的信号转化为循环载荷范围分布矩阵,其数学表达为

$$[X_i] = [x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}]^T \quad (1)$$

然后,根据目标用途计算各种试验路面及事件的比例,按比例叠加成一个目标载荷范围及均值分布矩阵,其数学表达为

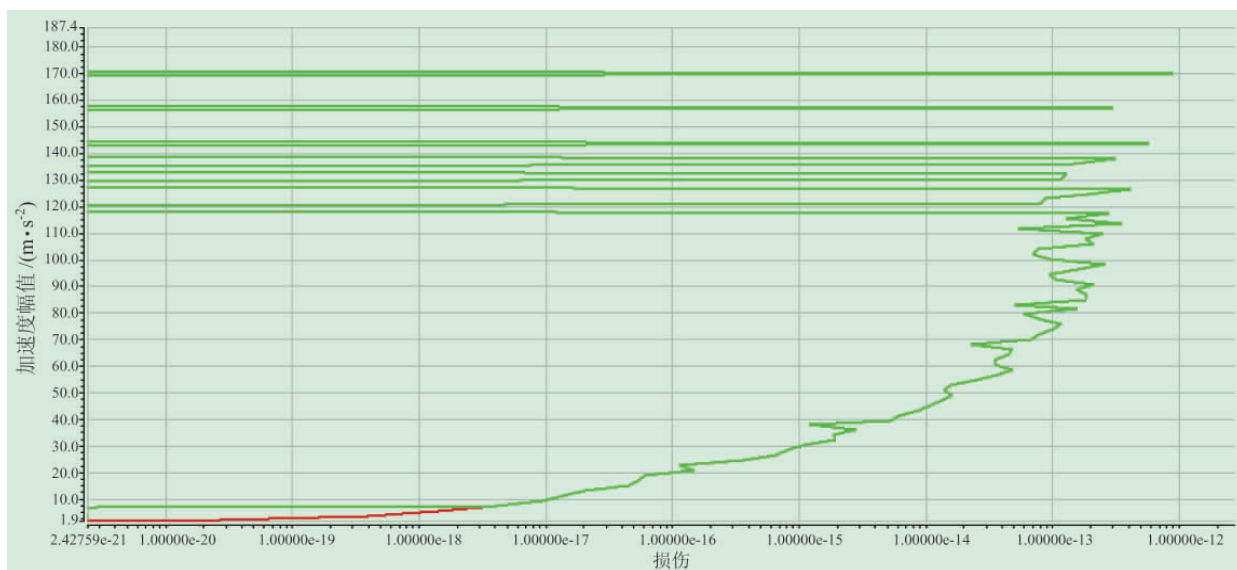
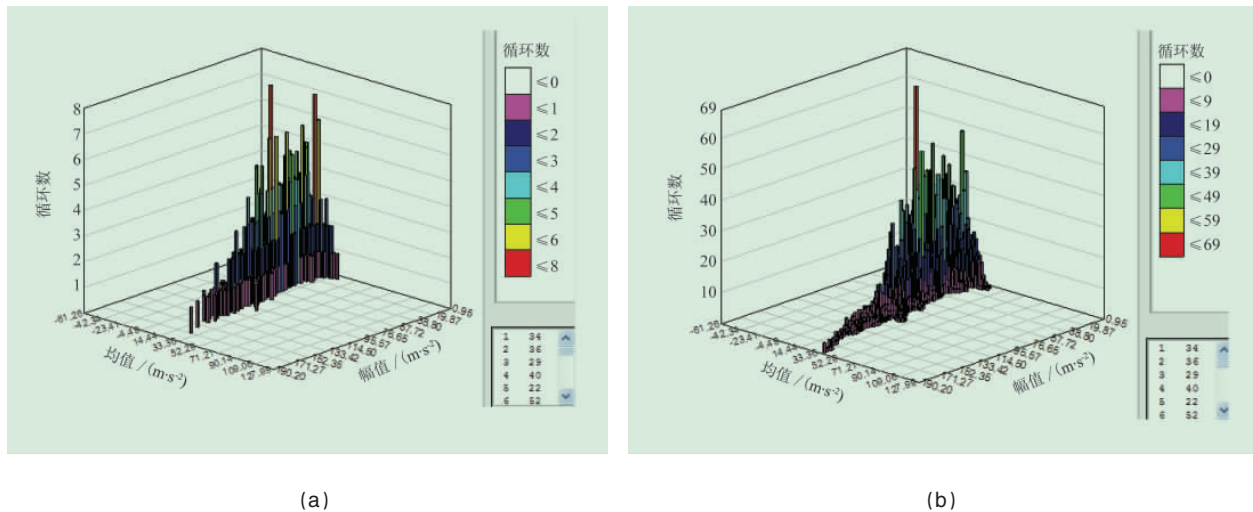


图 9 小载荷删减前后疲劳损伤对比
Fig. 9 Damage comparison



(a)

(b)

图 10 10 倍外推前(a)后(b)雨流均幅值图

Fig. 10 Rain-flow matrices before (a) and after 10 times extrapolation (b)

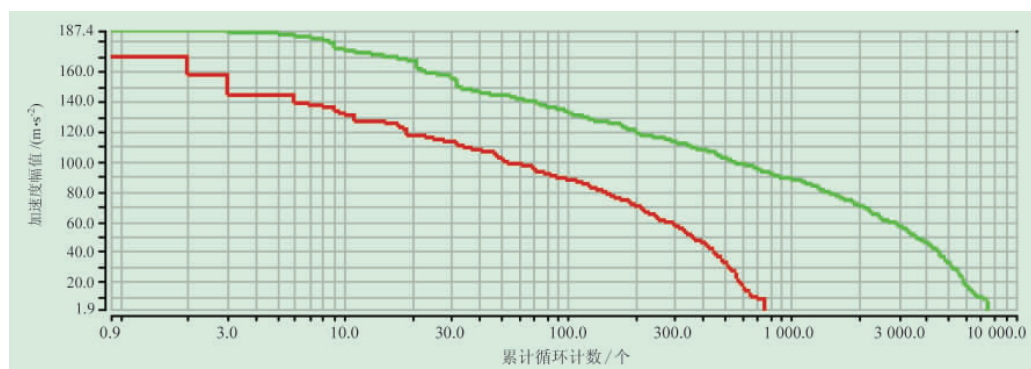


图 11 10 倍外推前后累计循环计数对比图

Fig. 11 Cumulative cycle count comparison

$$\sum_{i=1}^n A_i [X_i] = [Y] \quad (2)$$

式中 $x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in}$ 分别为对应于第 i 种路面或事件, 范围值落在第 1, 2, $\dots$, n 区间中的循环数^[7]。

假如路面和事件的总数为 m , 那么有 m 个这样的矩阵。

式中 A_i 为第 i 种路面或事件的比例系数。

以该型越野车配载 80%, 时速 20 km/h 在大鹅卵石路面时, 左右轮轴头加速度-时间信号 10 倍外推后, 与在石板路试验时左右轮轴头加速度-时间信号 3 倍外推后, 按 50%:50% 的比重叠加后累积损伤与各路况原累积损伤对比如图 12 所示。比例叠加后, 时域信号与各路况原时域信号比如图 13 所示。

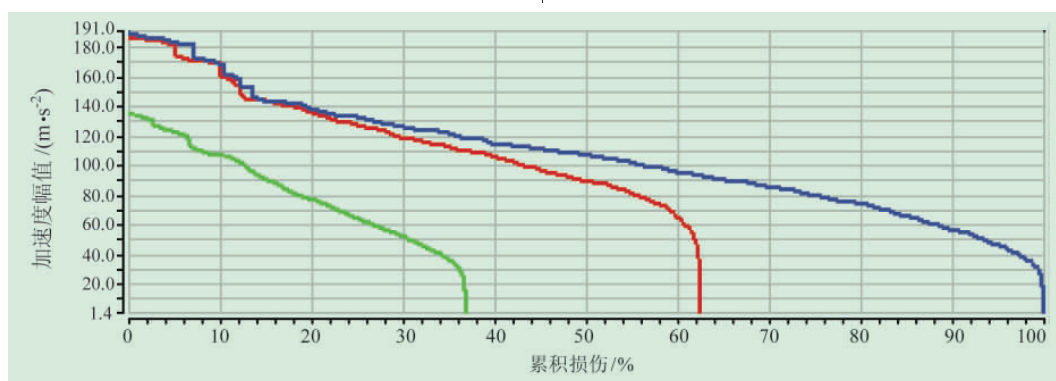


图 12 叠加后累积损伤与各路况原累积损伤对比图

Fig. 12 Cumulative damage after superposition (blue line) and comparison with original cumulative damage (red and green lines)

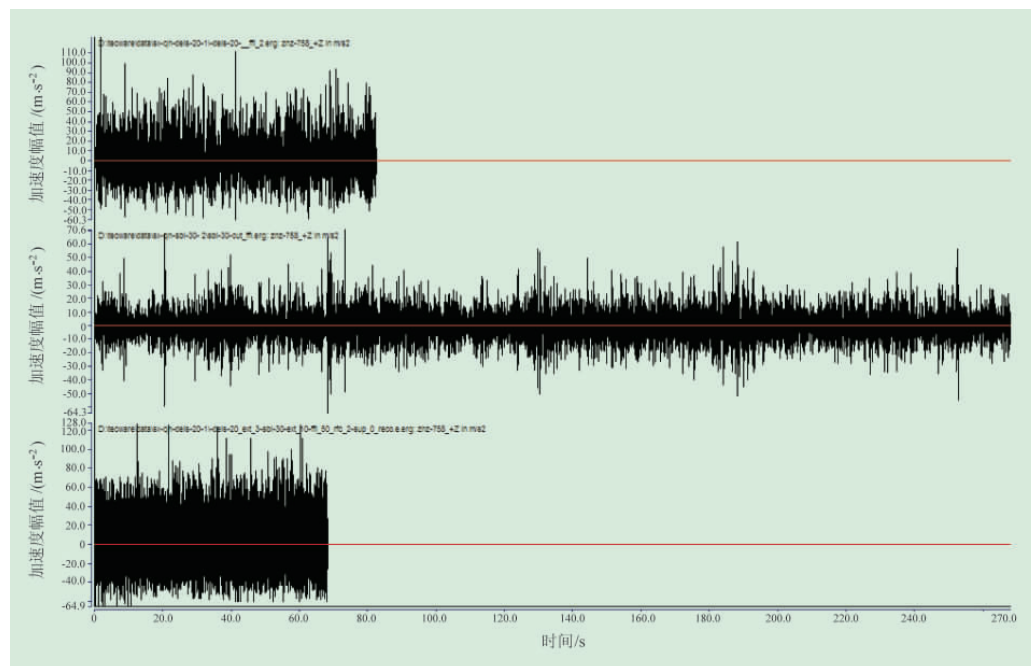


图 13 叠加后信号重构与各叠加信号时域信号对比

Fig. 13 Load-time history after superposition compared with original signals

4 结论

车辆结构疲劳载荷谱是车辆结构寿命预测、设计、优化的重要依据,因此整车结构疲劳载荷谱的采集与处理具有极其重要的意义。从总体上看,这次采集的 300 多个该型越野车整车载荷谱除少数由于数据记录有误外都比较理想,这为该型越野车整车道路模拟试验提供了准确、可靠的依据。而在车辆载荷谱的分析、处理中,雨流计数法作为双参数分析方法中的一种,在载荷谱的压缩、外推、叠加和重构中被广泛应用,能在基本保持原载荷谱疲劳损伤的同时极大地缩减时域历程,使得传统上需要在试车场花费数千小时才能完成的耐久性试验在实验室内只需几周便可完成。同时工程实践也证明其处理结果与实际结果取得了较好的一致。

参考文献 (References)

- [1] 李鹏. 汽车试验场道路强化系数的研究 [D]. 吉林: 吉林大学汽车工程学院, 2006.
Li Peng. Research on enhancement test coefficient for automobile proving ground [D]. Jilin: College of Automobile Engineering, Jilin University, 2006.
- [2] 周家泽, 管昌生. 机械零件随机疲劳载荷的统计分析方法 [J]. 襄樊职业技术学院学报, 2003, 2(4): 4-7.
Zhou Jiaze, Guan Changsheng. *Journal of Xiangfan Vocational and Technical College*, 2003, 2(4): 4-7.
- [3] 王宏伟, 邢波, 骆红云. 雨流计数法及其在疲劳寿命估算中的应用[J]. 矿山机械, 2006, 34(3): 95-97.
Wang Hongwei, Xing Bo, Luo Hongyun. *Mining & Processing Equipment*, 2006, 34(3): 95-97.
- [4] 肖生发, 左惟炜, 沈德平. 轻型车后桥二维载荷谱及其疲劳寿命预测

[J]. 汽车工程, 2002, 24(4): 343-347.

Xiao Shengfa, Zuo Weiwei, Shen Deping. *Automotive Engineering*, 2002, 24(4): 343-347.

- [5] 董乐义, 罗俊, 程礼. 雨流计数法及其在程序中的具体实现[J]. 航空计测技术, 2004, 24(3): 38-40.

Dong Leyi, Luo Jun, Cheng Li. *Aviation Metrology & Measurement Technology*, 2004, 24(3): 38-40.

- [6] 彭为, 靳晓雄, 孙士伟. 道路模拟试验中道路载荷谱的选择方法[J]. 上海工程技术大学学报, 2004, 18(1): 6-9, 16.

Peng Wei, Jin Xiaoxiong, Sun Shiwei. *Journal of Shanghai University of Engineering Science*, 2004, 18(1): 6-9, 16.

- [7] Ensor D F. 林晓斌 译. 关联用户用途的试车技术 [J]. 中国机械工程, 1998, 9(11): 24-26.

Ensor D F. Lin Xiaobin trans. *China Mechanical Engineering*, 1998, 9 (11): 24-26.

(责任编辑 赵佳)

《科技导报》“书评”栏目征稿

“书评”栏目由《中华读书报》“书评周刊”主编王洪波先生主持,发表图书评论文章,被评论的图书以高级科普、学术专著及科学文化图书为主,兼顾科学精神、科学方法、科技哲学、科学人文、科学家传记、经典科学著作、科学通俗读物、科学道德等内容的图书。欢迎投稿,择优刊登。每篇书评以 2 100 字左右为宜,需配书影,并含书名、作者、出版单位、出版年份、定价等信息。栏目责任编辑:陈广仁;投稿邮箱:chenguangren@cast.org.cn。