

基于广义 S 变换的汽车零部件载荷谱编辑方法

刘湘楠¹, 于超凡¹, 石伟^{2,3}, 钱学朋^{2,3}

(1. 湖南科技大学机电工程学院, 湖南湘潭 411201; 2. 诺博橡胶制品有限公司, 河北保定 072550;
3. 河北省汽车减震与密封橡胶产品技术创新中心, 河北保定 072550)

摘要: 现有的基于 S 变换的汽车零部件载荷谱编辑方法存在时频分辨率缺乏自适应性的问题, 影响载荷谱能量的时频聚集性, 并进一步影响载荷谱编辑效果。为解决此问题, 以汽车橡胶悬架为研究对象, 基于广义 S 变换理论, 探索广义 S 变换方法在汽车零部件载荷谱编辑领域的应用。采用广义 S 变换方法开展悬架载荷谱时频分析, 以获取载荷能量在不同时间和频率下的分布信息; 计算载荷谱的累积功率谱密度, 并采用遗传算法确定累积功率谱密度的阈值, 以识别载荷谱中损伤贡献量较小的时间片段; 删除识别到的载荷时间片段, 得到缩减载荷谱。与基于 S 变换的载荷谱编辑方法进行比较, 研究发现, 基于广义 S 变换方法获得的缩减载荷谱的时间压缩量较大, 且缩减载荷谱在统计参数、功率谱密度、雨流计数、疲劳寿命及损伤分布等方面均与原始载荷谱基本吻合。结果表明, 广义 S 变换方法适用于编辑汽车零部件载荷谱, 可为提高汽车零部件的耐久性台架试验效率提供一种有效手段。

关键词: 载荷谱编辑; 广义 S 变换; 耐久性; 时频分析; 台架试验

中图分类号: U467 **文献标志码:** A **DOI:** 10.16385/j.cnki.issn.1004-4523.202404024

Load spectrum editing method for automotive components based on generalised S-transformation

LIU Xiangnan¹, YU Chaofan¹, SHI Wei^{2,3}, QIAN Xuepeng^{2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China;
2. Nobo Rubber Products Co., Ltd., Baoding 072550, China;
3. Hebei Automotive Rubber AVS & Sealing Tech Center, Baoding 072550, China)

Abstract: Existing S-transform-based load spectrum editing methods for automotive components suffer from the problem of lack of adaptivity in time-frequency resolution, which affects the time-frequency aggregation of load spectrum energy and leads to poor editing results. To solve this problem, based on the theory of generalised S-transform (GST), the application of GST method in the field of automobile components load spectrum editing is explored. The GST method is used to perform time-frequency analysis of the mount load spectrum to obtain the distribution information of the load energy on the time and frequency axes. The accumulative power spectral density (APSD) of the load spectrum is calculated, and a genetic algorithm is used to determine the threshold value of the APSD in order to identify the time segments of the load spectrum with smaller damage contributions. The time segments of the load spectrum with small damage contributions are identified and removed, and the remaining load time segments are spliced to obtain a compressed load spectrum. Comparing with the load spectrum editing method based on S-transform, it is found that the time compression of the compressed load spectrum obtained based on the GST method is larger, and the compressed load spectrum basically matches with the original load spectrum in terms of statistical parameters, power spectral density, rainflow counts, fatigue life and damage distribution. The results show that the GST method is suitable for editing the load spectrum of automotive components. It can provide an effective means to improve the efficiency of durability bench tests of automotive components.

Keywords: load spectrum editing; generalised S-transform; durability; time-frequency analysis; bench tests

收稿日期: 2024-04-09; 修订日期: 2024-05-11

基金项目: 湖南科技大学科研启动项目(E523D9)

耐久性台架试验可为预测汽车零部件薄弱环节的疲劳寿命提供先验信息,是汽车零部件在设计 and 制造过程中的关键环节^[1]。载荷谱作为零部件耐久性台架试验的输入,直接影响试验的效率和试验结果的准确性。实际上,试验场采集的原始载荷谱中包含了大量对零部件损伤贡献较小的低幅值高循环载荷分量^[2]。在进行零部件耐久性台架试验的过程中,若以原始载荷谱为加载数据,将会导致试验周期延长,耗费大量的时间和资源。因此,有必要研究一种合理有效的载荷谱编辑方法,以缩短原始载荷谱的时间长度,进而提高汽车零部件耐久性台架试验的效率。

现有的载荷谱编辑方法主要分为两类:时域编辑法和时频编辑法。时域编辑法通过对载荷谱进行等间距加窗,计算每个窗口内载荷产生的损伤量,然后设定合适的阈值,识别并删除低于阈值的小损伤窗口片段,从而实现载荷谱缩减^[3]。在时域编辑法的研究方面,花菲菲等^[4]以车轮轴头为研究对象,提出了一种基于真实损伤保留的汽车零部件载荷谱编辑方法。研究发现,原始载荷谱和缩减载荷谱在损伤保留量、功率谱密度及雨流计数等方面基本相同,验证了时域真实损伤保留编辑方法的有效性。于佳伟等^[5]以副车架为研究对象,提出了一种基于伪损伤保留的汽车零部件载荷谱编辑方法,通过对比原始载荷谱与缩减载荷谱之间的功率谱密度、统计参数及穿级计数,验证了时域伪损伤保留编辑方法的有效性。尽管时域编辑法能够实现载荷谱缩减,但载荷谱编辑效果与窗长相关。目前,窗口长度的设置大多基于经验^[4-5]。

为了解决时域编辑法存在的不足,时频分析方法逐渐被应用于汽车零部件载荷谱编辑。在时频编辑法研究方面,朱茂桃等^[6]提出了一种基于短时傅里叶变换的汽车后拉杆悬置载荷谱编辑方法,并通过耐久性台架试验,验证了缩减载荷谱和原始载荷谱具有相同的加载效果。SHANGGUAN等^[7]提出了一种基于小波变换汽车下摆臂前衬套载荷谱编辑方法。研究发现,采用小波变换编辑方法获得的缩减载荷谱在统计参数、功率谱密度及穿级计数等方面均与原始载荷谱保持高度一致。董国疆等^[8]以汽车转向节为研究对象,提出了一种基于S变换的汽车零部件载荷谱编辑方法,并与基于时域损伤保留、短时傅里叶变换及小波变换等编辑方法进行比较,验证了基于S变换的载荷谱编辑方法的优越性。姚凌云等^[9]针对S变换编辑法的阈值设定问题,以汽车转向节为研究对象,提出了一种基于S变换双阈值的汽车零部件载荷谱编辑方法,并与传统的基于S变换的载荷谱编辑方法进行比较,结果表明,基于

S变换双阈值的载荷谱编辑方法具有更好的编辑效果。然而,S变换方法时频分辨率缺乏自适应性,影响载荷谱能量的时频聚集性,并进一步影响载荷谱编辑效果。为了克服S变换方法的局限性,DJUROVIĆ等^[10]提出了一种具有自适应时频分辨率特性的非平稳信号分析方法,称为广义S变换方法。目前,广义S变换方法已经成功地应用于非平稳信号故障特征提取和地震旋回特征分析等领域^[11-12]。但对基于广义S变换的载荷谱编辑方法的研究还不够深入,没有成熟的方法和理论。

基于上述问题,本文基于广义S变换理论,提出一种基于广义S变换的汽车零部件载荷谱编辑方法,旨在为提高汽车零部件的耐久性台架试验效率提供一种有效手段,从而加快汽车零部件的耐久性评估过程,为汽车制造业的产品研发和质量控制提供技术支持。

1 汽车零部件载荷谱采集

在试验场强化路面开展整车耐久性测试,是获取零部件载荷谱的有效手段。本文以某SUV汽车为测试对象,在试验场强化路面开展整车耐久性测试。典型的强化路面包括比利时路、搓板路、国情路、坑凹路、卵石路以及制动路等。在悬置主动侧布置PCB三分力传感器,以采集悬置载荷谱。图1为悬置实物及传感器位置图。

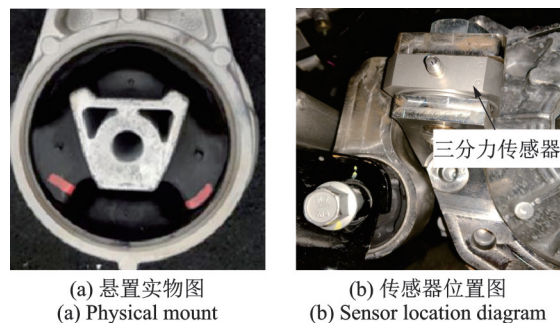


图1 悬置实物及传感器位置图

Fig. 1 Physical mount and sensor location diagram

对于汽车橡胶悬置,其路面随机激励的频率范围一般低于50 Hz^[13]。为了确保数据的准确性和全面性,根据奈奎斯特采样定理^[13],设定采样频率为1000 Hz,采样时长为279.46 s。考虑到所研究的悬置主要承受Z向载荷作用,因此仅对Z向载荷谱 F_z 进行分析。此外,为了降低高频噪声对载荷谱编辑效果的影响,对实测载荷谱进行了低通滤波(50 Hz)处理^[14],得到预处理后的悬置载荷谱,如图2所示。

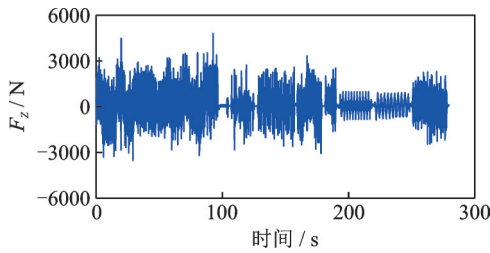


图 2 悬置载荷谱

Fig. 2 Mount load spectrum

2 广义 S 变换和载荷谱编辑方法

载荷谱编辑旨在缩短原始载荷谱的时间长度,其核心技术在于精准地定位并移除对零件损伤贡献量较小的载荷分量。考虑到零件的损伤量通常与载荷能量成正比例关系,因此,如何获取载荷能量分布和有效地识别并删除载荷谱中能量低的载荷分量,是进行载荷谱编辑的关键。本节基于广义 S 变换理论,提出一种基于广义 S 变换的汽车零部件载荷谱编辑方法。

2.1 广义 S 变换

载荷谱是一种典型的非平稳信号,采用时频分析方法可有效获取载荷能量的分布信息^[6-12]。短时傅里叶变换和小波变换是载荷谱编辑领域两种常用的时频分析方法^[6-7]。对于给定的载荷谱 $x(t)$,其短时傅里叶变换和小波变换的数学表达式分别为^[6-7]:

$$F(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \varphi(t - \tau) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

$$W(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \omega(t - b, a) dt \quad (2)$$

式中, $F(\tau, f)$ 为短时傅里叶变换时频矩阵; t 为时间; f 为频率; τ 为窗函数在时间轴上的位置; $\varphi(t - \tau)$ 为短时傅里叶变换的窗函数; $\omega(t - b, a)$ 为小波变换的窗函数,又称为小波基函数; a 和 b 分别为尺度参数和平移参数; $W(a, b)$ 为小波变换时频矩阵。

S 变换是由短时傅里叶变换演变而来的时频分析方法,其数学表达式为^[8]:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) g(t - \tau, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

$$g(t - \tau, f) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \quad (4)$$

式中, $S(\tau, f)$ 为 S 变换时频矩阵; $g(t - \tau, f)$ 为高斯窗函数; σ 为高斯窗函数的标准差,决定了窗长,且 $\sigma = 1/|f|$ 。

由式(1)~(4)可知, S 变换与短时傅里叶变换的区别在于高斯窗函数的窗长随频率发生变化,这有效地解决了短时傅里叶变换因窗长不变引起的时

间分辨率和频率分辨率两者不可兼顾的缺陷。此外, S 变换弥补了小波变换中小波基函数及分解层数的选取缺乏自适应性的缺陷。然而,由式(4)可知, S 变换的窗函数标准差 σ 定义为频率的倒数,使其时频分辨率缺乏自适应性。为了提高载荷谱能量的时频聚集性,本文引入广义 S 变换分析悬置载荷谱。其中,广义 S 变换的数学表达式为^[10]:

$$S_p(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \frac{|f|^p}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^{2p}}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

式中, $S_p(\tau, f)$ 为广义 S 变换时频矩阵; 参数 p 的取值范围为 $0 < p \leq 1$ 。

由式(5)可知,参数 p 的取值影响载荷谱能量的时频聚集性。当 $p=1$ 时,广义 S 变换即可转变为 S 变换; 当 $p \neq 1$ 时, STANKOVIC^[15] 定义了聚集性度量值 $M(p)$ 来确定参数 p 的取值。其中, $M(p)$ 的数学表达式为:

$$M(p) = \left(\sum_{l=1}^n \sum_{k=1}^m |S_p(l, k)|^{\frac{1}{2}} \right)^2 \quad (6)$$

式中, n 为采样时间点总数; m 为采样频率的数量; $S_p(l, k)$ 为离散广义 S 变换在 (l, k) 处的取值,其中 $l=1, 2, \dots, n; k=1, 2, \dots, m$ 。

$M(p)$ 取值越小,表明载荷谱能量的时频聚集性越高^[15]。因此,为了获取良好的载荷谱编辑效果,可选择最小 $M(p)$ 对应的 p 值作为最优参数。

2.2 基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法

以图 2 所示的悬置载荷谱为例,提出一种基于广义 S 变换理论的汽车零部件载荷谱编辑方法。该方法主要分为三步:基于广义 S 变换的载荷谱时频分析;识别小损伤贡献量的载荷时间片段;获取缩减载荷谱。

2.2.1 基于广义 S 变换的载荷谱时频分析

首先,定义参数 p 的取值间隔为 0.01,将每个 p 值依次代入式(5),然后对载荷谱进行时频分解,得到不同 p 值对应的时频矩阵:

$$s_{m \times n}^p = \begin{bmatrix} S_1^p \\ S_2^p \\ \vdots \\ S_m^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} s_{11}^p & s_{12}^p & \cdots & s_{1n}^p \\ s_{21}^p & s_{22}^p & \cdots & s_{2n}^p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1}^p & s_{m2}^p & \cdots & s_{mn}^p \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,矩阵行向量为采样频率;矩阵列向量为采样时间;矩阵元素 s_{ik} 为复数,包含了特定时刻、特定频率下对应的载荷幅值及相位信息。

结合式(6)和(7),计算得到聚集性度量值。图 3 为聚集性度量值的变化曲线。由图 3 可知,当 $p=0.34$ 时,利用广义 S 变换获得的载荷谱能量的时频聚集性最优。

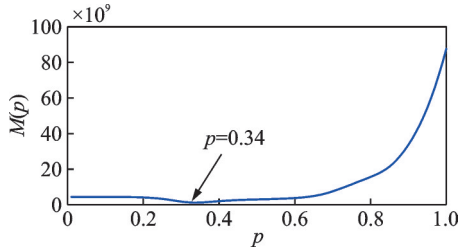


图 3 聚集性度量值的变化曲线
Fig. 3 Variation curves for aggregation metrics

将最优参数 p 值代入式(5),采用广义 S 变换方法得到载荷谱的时频矩阵,并结合周期图法^[16],采用下式得到同一时刻、不同频率下的载荷功率谱密度:

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ \vdots \\ P_m \end{bmatrix} = \frac{1}{n} \begin{bmatrix} |F(S_1)| \\ |F(S_2)| \\ \vdots \\ |F(S_m)| \end{bmatrix}^2 \quad (8)$$

$$F(S_k) = \int_{-\infty}^{+\infty} S_k e^{-i2\pi ft} dt \quad (9)$$

式中, $P_k (k=1, 2, \dots, m)$ 表示时刻 k 对应的载荷功率谱密度; $F(S_k)$ 为向量 S_k 的傅里叶变换。

将同一时刻、不同频率下的功率谱密度累加,即可得到该时刻载荷谱对应的累积功率谱密度。图 4 为悬置载荷谱对应的累积功率谱密度分布。累积功率谱密度描述了载荷能量随时间的变化趋势。累积功率谱密度越大,说明该时刻的载荷能量越大,对零件的损伤贡献量也越大。

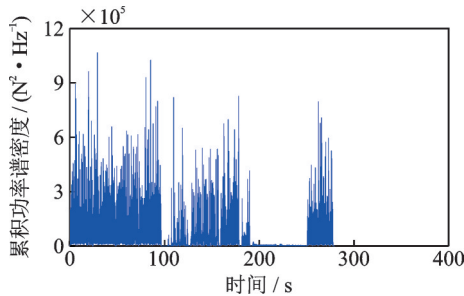


图 4 悬置载荷谱的累积功率谱密度分布
Fig. 4 Accumulative power density distribution spectral of mount load spectrum

2.2.2 识别小损伤贡献量载荷时间片段

通过设定阈值能够有效地识别出对零件损伤贡献量小的载荷时间片段。本文采用遗传算法^[6]对累积功率谱密度阈值进行寻优。遗传算法的参数设置如表 1 所示。在实际工程应用中,要求编辑前后载荷谱统计参数(均值、均方根和峭度)之间的相对误差不高于 15%^[6]。因此,本文定义载荷谱阈值优化模型的数学表达式为:

$$\begin{cases} \min c(e) = L_y/L_x \\ \text{s.t. } U(x) - 0.15 \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, $c(e)$ 为缩减前后载荷谱的时间压缩比; L_x 和 L_y 分别为原始载荷谱和缩减载荷谱的时间长度; e 为设计变量,本文定义为累积功率谱密度的阈值; $U(x)$ 为缩减载荷谱与原始载荷谱之间统计参数的相对误差。

表 1 遗传算法的参数设置

Tab. 1 Parameter setting of the genetic algorithm			
种群大小	最大遗传代数	交叉概率	突变概率
10	100	0.7	0.01

2.2.3 获取缩减载荷谱

载荷谱编辑方法认为低于阈值的载荷分量对零部件造成的损伤可以忽略不计。利用遗传算法确定累积功率谱密度的最优阈值为 2167.53 N²/Hz,识别并删除低于阈值的载荷时间片段,然后将剩余时间片段拼接,进而获得缩减载荷谱。图 5 为基于广义 S 变换方法获得的悬置缩减载荷谱。对比图 2 和 5 可知,基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法能够将悬置载荷谱时长由 279.46 s 缩短至 220.42 s,时间约减少 21.13%。

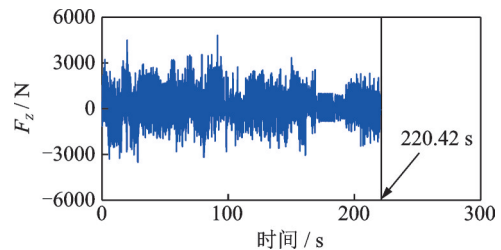


图 5 基于广义 S 变换方法获得的悬置缩减载荷谱
Fig. 5 Mount compressed load spectrum obtained by the generalised S-transform based method

2.3 基于 S 变换的载荷谱编辑方法

采用 S 变换方法对悬置载荷谱进行分析,求解其累积功率谱密度,并采用遗传算法确定其阈值,识别并删除低损伤贡献量载荷时间片段,然后将剩余时间片段拼接获得缩减载荷谱。图 6 为基于 S 变换编辑方法获得的缩减载荷谱。

对比图 2 和 6 可知,基于 S 变换的载荷谱编辑方法可将悬置载荷谱时长由 279.46 s 缩短至 236.19 s,时间约减少 15.48%。

综上,相较于现有的基于 S 变换的载荷谱编辑方法,基于广义 S 变换方法得到的缩减载荷谱的时间压缩比例更大。结果表明:对于本文所研究的悬置载荷谱,广义 S 变换方法具有更优的时频聚集性,能够更好地识别载荷谱中的低幅值载荷分量。

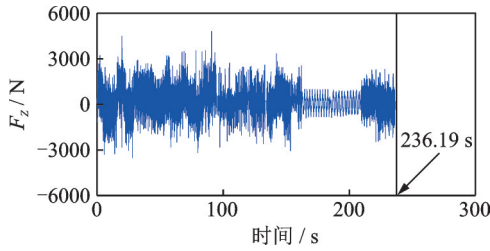


图6 基于S变换方法获得的悬置缩减载荷谱

Fig. 6 Mount compressed load spectrum obtained by the S-transform based method

3 载荷谱编辑效果评价

对载荷谱缩减效果进行评价是载荷谱缩减过程不可或缺的环节。本节从统计参数、功率谱密度、雨流计数、疲劳寿命及损伤分布等方面对两种编辑方法的缩减效果进行评价。为了便于描述,定义基于广义S变换和基于S变换两种编辑方法获得的缩减载荷谱分别为缩减载荷谱 I 和缩减载荷谱 II。

3.1 统计参数

均值、均方根及峭度是评价载荷谱编辑效果时常用的三种统计参数^[17]。分别计算原始载荷谱、缩减载荷谱 I、缩减载荷谱 II 的统计参数,结果如表 2 所示。以原始载荷的统计参数为基础,分别计算两种缩减载荷与原始载荷谱之间的相对误差,结果如表 3 所示。由表 3 可知,采用两种编辑方法获得的缩减载荷谱与原始载荷谱之间统计参数的相对误差均在规范范围($\leq 15\%$)之内,表明两种载荷谱编辑方法得到的缩减载荷谱均与原始载荷谱具有良好的一致性^[18]。

表2 编辑前后悬置载荷谱的统计参数

Tab. 2 Statistical parameters of mount load spectra before and after editing

载荷谱	均值/N	均方根值/N	峭度
原始载荷谱	182.14	722.88	4.60
缩减载荷谱 I	208.93	796.68	3.94
缩减载荷谱 II	208.89	784.96	3.95

表3 编辑前后悬置载荷谱统计参数之间的相对误差

Tab. 3 Relative errors of statistical parameters mount load spectra before and after editing

载荷谱	均值 误差/%	均方根值 误差/%	峭度 误差/%
缩减载荷谱 I	14.71	10.21	-14.28
缩减载荷谱 II	14.69	8.59	-14.13

3.2 功率谱密度

功率谱密度可以反映载荷谱能量随频率的变化信息^[19]。图7为载荷谱编辑前后功率谱密度分布情况。由图7可知,缩减载荷谱与原始载荷谱变化趋势基本一致。由于缩减载荷谱相较于原始载荷谱时间更短,因此,缩减载荷谱中的载荷能量值有所上升。即缩减载荷谱的功率谱密度相对于原始载荷谱会出现上移现象,但整体变化趋势基本相同。此外,相较于缩减载荷谱 II,缩减载荷谱 I 的时间压缩量更大,因此缩减载荷谱 I 的功率谱密度上移量更大。

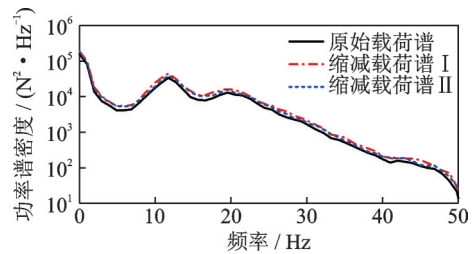


图7 悬置载荷谱功率谱密度分布对比

Fig. 7 Comparison of mount load spectrum power spectral density distribution

3.3 雨流计数

雨流计数属于双参数计数方法,通过对载荷谱中的峰谷值(range)、均值(mean)及其相应频次(cycles)进行计数分析,进而直观地表现出载荷分量的统计特征^[20]。分别对原始载荷谱、缩减载荷谱 I 和缩减载荷谱 II 进行雨流计数,结果如图 8 所示。由图 8 可知,原始载荷谱中低幅值载荷分量的最高循环次数为 506 次,缩减载荷谱 I 和缩减载荷谱 II 中低幅值载荷分量的最高循环次数分别为 117 次和

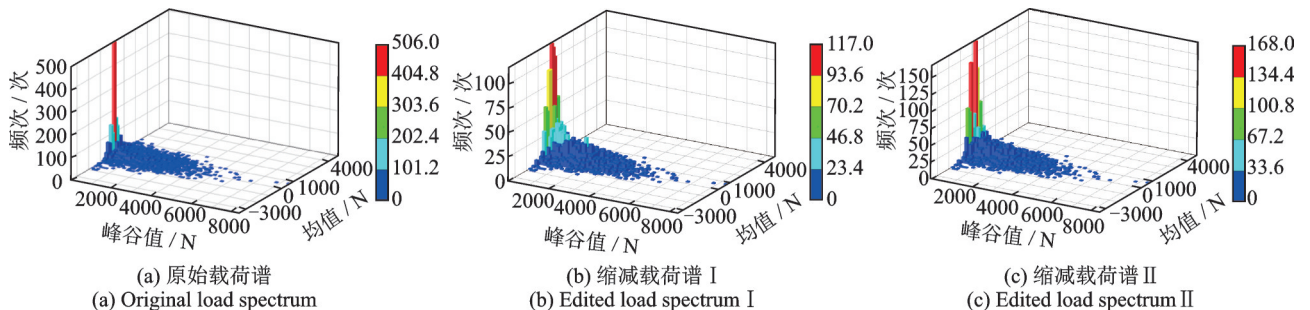


图8 悬置载荷谱雨流计数分析

Fig. 8 Mount load spectrum rainflow count analysis

321 次。结果表明,相较于现有的 S 变换载荷谱编辑方法,采用基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法能够删除原始载荷谱中较多的低幅值载荷循环次数。

3.4 悬置疲劳仿真分析

为进一步验证缩减载荷谱与原始载荷谱具有相同的加载效果,对悬置进行疲劳仿真分析。分别以原始载荷谱、缩减载荷谱 I 和缩减载荷谱 II 作为疲劳载荷输入,计算悬置的疲劳寿命及损伤分布。主要步骤如下:

首先,建立悬置有限元模型,并对其施加 Z 向单位载荷,得到单位载荷下悬置的应变响应结果;其次

将有限元分析的结果文件(.fil)输入到疲劳分析软件 Ncode 的 Designlife 模块中;最后将载荷谱映射到悬置的单位载荷上,对悬置进行疲劳仿真。其中,用于计算悬置疲劳寿命的 S-N 曲线如下式所示^[21]:

$$S = 16.799N^{-0.327} \quad (11)$$

式中,S 表示对数应变振幅;N 为疲劳寿命次数。

图 9 为不同载荷谱下悬置疲劳仿真结果。

由图 9 可知,采用原始载荷谱、缩减载荷谱 I、缩减载荷谱 II 加载后的悬置的疲劳寿命及损伤分布基本一致,进一步验证了所提方法的有效性。此外,在不同的载荷谱加载条件下,悬置结构中的疲劳失效危险点位置保持一致,均位于节点 33689。

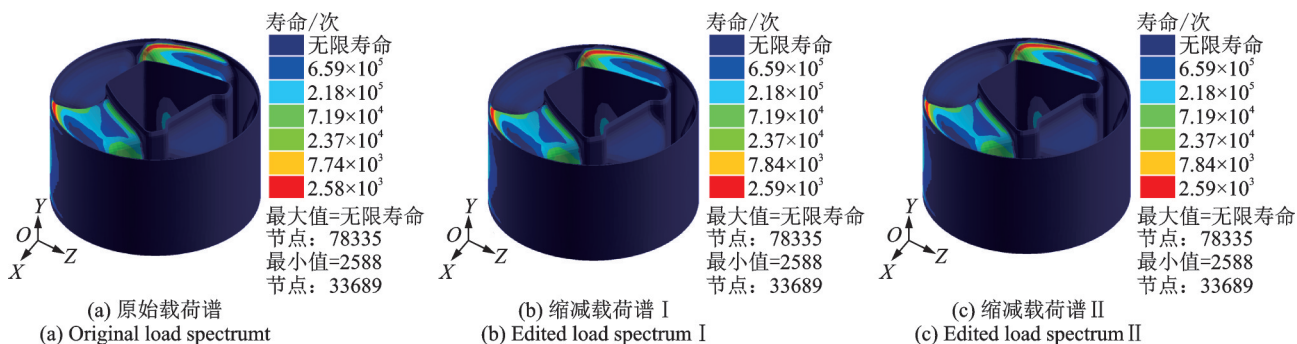


图 9 不同载荷谱下悬置疲劳寿命及损伤分布

Fig. 9 Mount fatigue life and damage distribution under different loading spectra

表 4 为不同载荷谱下悬置疲劳仿真结果。由表 4 可知,尽管缩减载荷谱可以达到与原始载荷谱基本一致的加载效果,但采用三种载荷谱进行耐久性台架试验所需时间不同。以悬置疲劳仿真获得的疲劳寿命值为基础,采用原始载荷谱作为耐久性台架试验的输入,所需时间约为 200.9 h,而采用基于广义 S 变换的缩减载荷谱与基于 S 变换的缩减载荷谱作为耐久性台架试验的输入,所需时间分别约为 158.5 和 169.8 h。相比基于 S 变换的编辑方法,采用基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法所得到的缩减载荷谱 I 的计算时间更短。因此,在进行悬置耐久性台架试验验证时,采用本文所提方法可以更大程度地提高试验效率。

表 4 不同载荷谱下悬置疲劳仿真结果

Tab. 4 Mount fatigue simulation results under different loading spectra

载荷谱类型	疲劳损伤	疲劳寿命/次	计算时间/h
原始载荷谱	3.86×10^{-4}	2588	200.9
缩减载荷谱 I	3.86×10^{-4}	2588	158.5
缩减载荷谱 II	3.86×10^{-4}	2588	169.8

4 结 论

(1) 提出了一种基于广义 S 变换的汽车零部件

载荷谱编辑方法。通过与现有的基于 S 变换的汽车零部件载荷谱编辑方法进行比较,发现基于广义 S 变换编辑法获得的缩减载荷谱的时间减少比例更大,约为 21.13%。

(2) 从统计参数、功率谱密度及雨流计数等方面分析载荷谱编辑方法的编辑效果。结果表明:采用基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法获得的缩减载荷谱,在统计参数、功率谱密度及雨流计数等方面,均与原始载荷谱保持了高度的一致性。

(3) 为验证本文所提出的基于广义 S 变换的载荷谱编辑方法的有效性,开展了悬置疲劳仿真分析。结果表明:采用本文所提方法获得的缩减载荷谱可以达到与原始载荷谱基本一致的加载效果,但采用原始载荷谱和缩减载荷谱进行耐久性台架试验所需时间不同。采用原始载荷谱作为耐久性台架试验的输入,所需时间约为 200.9 h,而采用基于广义 S 变换的缩减载荷谱 I 与基于 S 变换的缩减载荷谱 II 作为耐久性台架试验的输入,所需时间分别为 158.5 和 169.8 h。

参考文献:

- [1] 赵礼辉,李佳欣,井清,等.关联用户的汽车试验场耐久性评价路况循环确定方法研究[J].汽车工程,2020,42(1):127-133.

- ZHAO Lihui, LI Jiabin, JING Qing, et al. Research on the method of determining road condition cycles of durability test of correlated user automobile test field[J]. *Automotive Engineering*, 2020, 42(1): 127-133.
- [2] LIU X N, ZHAO X Z, LIU X A, et al. A load spectrum editing method of time-frequency for rubber isolators based on the continuous wavelet transform[J]. *Measurement*, 2022, 198: 111374.
- [3] WEN C, XIE B, LI Z, et al. Power density based fatigue load spectrum editing for accelerated durability testing for tractor front axles[J]. *Biosystems Engineering*, 2020, 200(2): 73-88.
- [4] 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. Spectrum compilation for vehicle road simulation test based on time correlated fatigue analysis with damage editing method[J]. *Journal of Mechanical Strength*, 2015, 37(5): 964-971.
- [5] 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 accelerated testing method for the service-simulation fatigue test of automotive front sub-frame[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(22): 112-120.
- [6] 朱茂桃,吴新佳,郑国峰,等.基于短时傅里叶变换的汽车零部件耐久性载荷信号编辑方法[J]. *机械工程学报*, 2019, 55(4):126-134.
- ZHU Maotao, WU Xinjia, ZHENG Guofeng, et al. Load signal edition method based on the short-time Fourier transform to durability test of vehicle component [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2019, 55(4): 126-134.
- [7] SHANGGUAN W B, ZHENG G F, RAKHEJA S, et al. A method for editing multi-axis load spectrums based on the wavelet transforms[J]. *Measurement*, 2020, 162: 107903.
- [8] 董国疆,韩杰,张永强,等.基于S变换的汽车零部件疲劳载荷谱编辑法研究[J]. *中国公路学报*, 2021, 34(5): 204-214.
- DONG Guojiang, HAN Jie, ZHANG Yongqiang, et al. Fatigue load spectrum editing method for vehicle parts based on S transform[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2021, 34(5): 204-214.
- [9] 姚凌云,林勇杰,李丽.基于S变换双阈值法的汽车零部件载荷谱加速编辑[J]. *中国机械工程*, 2024, 35(2): 215-220.
- YAO Lingyun, LIN Yongjie, LI Li. Accelerated editing of automotive component load spectrum based on S-transform dual threshold method[J]. *China Mechanical Engineering*, 2024, 35(2): 215-220.
- [10] DJUROVIĆ I, SEJDIC E, JIANG J. Frequency-based window width optimization for S-transform[J]. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 2008, 62(4): 245-250.
- [11] LIU X N, HE K F. A new scheme for extracting fault features of rolling element bearings[J]. *Engineering Computations*, 2022, 39(8): 3038-3057.
- [12] 刘俊杰,陈兴华,吴昊杰,等.稀疏广义S变换及其在储层地震低频异常检测中的应用[J]. *石油地球物理勘探*, 2023, 58(3):690-699.
- LIU Junjie, CHEN Xuehua, WU Haojie, et al. Sparse generalized S-transform and its application to detection of low-frequency seismic anomalies in reservoirs[J]. *Oil Geophysical Prospecting*, 2023, 58(3): 690-699.
- [13] SHANGGUAN W B, ZHAO Y. Dynamic analysis and design calculation methods for powertrain mounting systems[J]. *International Journal of Automotive Technology*, 2007, 8(6): 731-744.
- [14] SONG Z J, LIU B, PANG Y W, et al. An improved nyquist-shannon irregular sampling theorem from local averages[J]. *IEEE Transactions on Information Theory*, 2012, 58(9): 6093-6100.
- [15] STANKOVIC L. A measure of some time-frequency distributions concentration[J]. *Signal Processing*, 2001, 81(3): 621-631.
- [16] ABDULLAH S, CHOI J C, GIACOMIN J A, et al. Bump extraction algorithm for variable amplitude fatigue loading[J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28(7): 675-691.
- [17] ZHOU Y F, LI H, LUO Z. An accelerated editing method of multiaxial load spectrums for durability testing[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2022, 270: 108569.
- [18] 李淑艳,杨世钊,翟友邦,等.基于小波变换的拖拉机PTO载荷加速编辑方法[J]. *振动与冲击*, 2021, 40(13): 167-173.
- LI Shuyan, YANG Shizhao, ZHAI Youbang, et al. Editing method of tractor PTO load acceleration based on wavelet transform[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2021, 40(13): 167-173.
- [19] BEHRENDT M, DANG C, BEER M. Data-driven and physics-based interval modelling of power spectral density functions from limited data[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2024, 208: 111078.
- [20] 董国疆,韩杰,颜峰,等.汽车底盘耐久性载荷加速编辑策略[J]. *机械工程学报*, 2020, 56(20): 164-173.
- DONG Guojiang, HAN Jie, YAN Feng, et al. Accelerating edition strategy of load spectrum for durability analysis of automotive chassis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2020, 56(20): 164-173.
- [21] LIU X N, ZHAO X Z, LIU X A. A unified probabilistic fatigue life prediction model for natural rubber components considering strain ratio effect[J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2023, 46(4): 1473-1487.

通信作者:刘湘楠(1992—),男,博士,副教授。

E-mail: lxn920613@hnust.edu.cn