

# 基于多参数特征保留的载荷谱加速耐久性编辑<sup>\*</sup>

郑国峰<sup>1,2</sup>, 肖攀<sup>1,2</sup>, 刘晓昂<sup>3</sup>, 林鑫<sup>1,2</sup>

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司 重庆, 401122)

(2 重庆市汽车底盘性能工程技术研究中心 重庆, 401122)

(3. 河北工业大学机械工程学院 天津, 300401)

**摘要** 为了得到时间更短加载效果相同的加速耐久性试验载荷谱,提出了基于多参数特征保留的载荷谱编辑方法。该方法同时考虑载荷谱的损伤、功率谱密度以及统计参数等信息,对零部件载荷谱的时间进行压缩。以汽车悬架螺旋弹簧的载荷谱为例,采用该方法进行缩减,同时从多个参数特征方面与传统的基于损伤保留的编辑方法所得到的载荷谱进行对比。为了进一步验证编辑效果,采用编辑谱和原始谱对弹簧进行疲劳仿真。结果表明,该方法能够有效缩短汽车零部件的载荷谱,可得到与原始载荷谱具有相同加载效果的编辑载荷谱。

**关键词** 小波变换;多参数特征;载荷谱编辑;悬架弹簧

**中图分类号** TB123; TH135<sup>+</sup>.1

## 引言

汽车零部件的载荷谱反映产品服役过程的载荷-时间历程,是部件进行耐久可靠性设计的基础。准确的部件载荷信息输入是高质量零件产品输出的前提。在实际情况下,零部件服役过程中的载荷谱时间较长,需要通过损伤保留的原则对载荷谱的时间进行压缩,且保证压缩后载荷全部特征信息与原载荷谱保持一致<sup>[1]</sup>,进而保证加载效果基本相同。

对零件载荷谱进行加速耐久性编辑,目前主要有传统的基于损伤保留的时域编辑方法和基于时-频变换的频域编辑方法<sup>[2]</sup>。其中,时域内的编辑方法以文献[3-5]的研究较为典型。文献[3-4]提出的时域内基于两参数的载荷谱编辑方法以损伤和功率谱密度为载荷谱中影响结构疲劳的两个关键参数,通过保证载荷谱编辑前后两个参数的保留量,对零件载荷谱进行加速耐久性编辑。文献[5]认为多次采集的载荷谱中,标准差最小的采集其载荷谱最为稳定,通过对所有工况采集到的载荷谱利用最小标准差组合,选出零件服役过程中真实的载荷谱。为了达到加速的目的,对载荷谱幅值设置阈值,得到时间更短但稳定的载荷谱。近年来,频域内的编辑方

法得到广泛研究,比较典型的有:Oh等<sup>[6]</sup>将小波变换运用到零件载荷谱的分析中,分别研究了小波变换时所采用的小波函数以及小波变换过程中对目标载荷谱分解的层数等对载荷谱分析带来的影响。Abdullah等<sup>[7-8]</sup>利用dbN小波函数对零件载荷谱进行加速耐久性编辑,通过考虑保留编辑前后载荷谱的统计参数(均方根和峰值系数),实现对载荷谱时间的压缩。Putra等<sup>[9-11]</sup>通过小波变换获取载荷谱的累积功率谱密度,基于累积功率谱密度的分布情况,通过设置阈值识别出载荷谱损伤贡献大的部分,并基于所设计算法提取出损伤贡献大的载荷谱片段,获得时间更短的编辑载荷谱。对于已有的研究,时域内编辑方法兼顾了损伤与功率谱密度两个维度的参数信息;频域内编辑方法仅考虑了损伤与统计参数,未能兼顾损伤分布、能量分布及统计参数等多个维度的信息,对载荷谱进行编辑。

笔者提出的频域内兼顾多参数特征保留的载荷谱编辑方法,同时考虑载荷谱的损伤、功率谱密度以及统计参数等维度的信息,对零部件的载荷谱进行压缩,得到时间更短、且与原始载荷谱相同加载效果的编辑载荷谱。以汽车悬架弹簧的载荷谱为例,通过采用所提出的编辑方法进行编辑,同时采用时域方法对弹簧载荷谱进行编辑,从多个参数特征对编辑前后载荷谱的变化情况进行对比。对汽车悬架弹

<sup>\*</sup> 重庆市自然科学基金面上资助项目(cstc2019jcyj-msxmX0789);国家自然科学基金资助项目(51705128)  
收稿日期:2018-08-16;修回日期:2019-03-06

簧进行疲劳仿真,进一步验证经过缩减的载荷谱与采集到的原始载荷谱的加载效果。结果表明:所提出的频域内基于多参数特征保留的载荷谱编辑方法,能够实现对载荷谱的加速耐久性编辑。

## 1 基于小波变换的兼顾多参数特征保留的载荷谱编辑方法

对零件载荷谱的编辑,传统的方法往往只考虑对载荷谱所携带损伤量的保留。钱立军等<sup>[3]</sup>提出了时域内基于损伤和功率谱密度两个参数的载荷谱编辑方法。除了损伤和功率密度,影响载荷谱对零件加载效果的因素还包括载荷谱的统计参数(均值)等。根据金属疲劳的理论可知,施加不同均值的载荷,对零件疲劳寿命影响较大。因此,兼顾载荷谱的损伤、功率谱密度以及统计参数,从频域出发,提出了基于小波变换的多参数特征保留的载荷谱编辑方法<sup>[2]</sup>。

### 1.1 小波变换

小波变换将母小波函数进行平移和尺度变换后,与载荷谱  $x(t)$  进行内积运算,实现对目标载荷谱的时频变换<sup>[12-13]</sup>,其中连续小波变换为

$$W_x(a, \tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \varphi^* \left( \frac{t-\tau}{a} \right) dt \quad (1)$$

其中:  $a$  为控制小波函数的伸缩;  $\tau$  为控制小波函数的平移;  $\varphi(t)$  为母小波函数,  $\varphi^*(t)$  表示复共轭函数。

### 1.2 载荷谱的特征参数

#### 1.2.1 载荷谱损伤量

零件载荷所携带的损伤信息可通过雨流计数,提取载荷谱中对零件损伤贡献的载荷循环,基于零件材料的疲劳特性曲线和线性损伤累积准则,计算载荷累积损伤,如式(2)~(3)所示。

$$N_f = \alpha S^{-\beta} \quad (2)$$

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_{\beta}} \quad (3)$$

其中:  $S$  为幅值;  $n_i$  为载荷谱中对幅值的循环次数;  $\alpha$  与  $\beta$  为材料常数。

通常要求经过编辑后的载荷谱保留 90%~95% 的损伤量,可认为与原始载荷谱具有相同的加载效果。

#### 1.2.2 载荷谱统计参数

载荷谱的统计参数有多个,但对零件损伤有显

著影响的有均值和峰值系数。均值为影响零件疲劳寿命的关键因素。研究表明,在不同载荷比  $R$  下,材料表现出不同的疲劳寿命特性<sup>[14]</sup>。峰值系数为统计四阶矩,表征概率密度分布曲线高低的无量纲幅值域特征参数<sup>[2]</sup>。均值和峰值系数可通过式(4)与式(5)求得

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N x_j \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{\text{NRMS}^4} \sum_{j=1}^4 (x_j - \bar{x})^4 \quad (5)$$

其中:  $N$  为载荷谱的数据量总数;  $\bar{x}$  为载荷谱的均值。

要求经过缩减载荷谱的上述统计参数与原载荷谱的误差不超过 15%。

#### 1.2.3 载荷谱功率谱密度

载荷谱的功率谱密度(power spectrum density,简称 PSD)反映随机载荷谱的功率随频率的变化情况,是一个衡量载荷谱能量分布的物理量。功率谱密度是目标信号自相关函数的傅里叶变换,可通过式(6)求得

$$\text{PSD} = \int_{-\infty}^{+\infty} \varphi_{xx}(\tau) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (6)$$

其中:  $\varphi_{xx}(\tau)$  为目标信号的自相关函数。

对于两个随机载荷谱的功率谱密度,可通过采用 Pearson 相关系数  $r$  的值来判断两者的吻合度。Pearson 相关系数的实质是衡量两组数据集在对角线两边的分布情况,可通过式(7)求得

$$r = \frac{M \sum_{i=1}^M x_i y_i - \sum_{i=1}^M x_i \sum_{i=1}^M y_i}{\sqrt{M \sum_{i=1}^M x_i^2 - \left( \sum_{i=1}^M x_i \right)^2} \sqrt{M \sum_{i=1}^M y_i^2 - \left( \sum_{i=1}^M y_i \right)^2}} \quad (7)$$

其中:  $x_i, i=1, 2, \dots, M$  ( $M$  为数据总数)表示一个载荷谱的功率谱密度;  $y_i, i=1, 2, \dots, M$  表示另一个随机载荷谱的功率谱密度。

对两个随机载荷谱的功率谱密度进行拟合,并使拟合的截距设为 0。拟合得到的曲线与  $y=x$  越接近,且 Pearson 相关系数越大,则说明两条曲线越吻合。定义 Pearson 相关系数为功率谱密度吻合程度的指标,当  $r=0.99$  时,认为两条功率谱密度曲线有较好的吻合程度。

### 1.3 基于多参数特征保留的载荷谱编辑算法

编辑算法具体步骤<sup>[6-11]</sup>如下:

1) 零件载荷谱导入。导入零部件载荷谱

$x(t)$ , 载荷采样点数值以  $x_j$  表示, 对应时间点记为  $t_j$  ( $j=1, 2, \dots, M$ ,  $M$  为采样点总个数)。

2) 对零件载荷谱进行小波分解。利用 dBN 小波函数对载荷  $x(t)$  进行小波分解, 并对分解得到的高频小波系数进行重构, 得到  $n$  个不同尺度下的高频小波分量  $D_{i,j}$  (其中:  $i=1, 2, \dots, n$ , 为小波分解的层数;  $j=1, 2, \dots, M$ , 为高频小波分量中的采样点数)。

3) 载荷损伤片段的识别。对所有尺度下的高频小波分量进行平方和

$$A(D_j) = \sum_{i=1}^n D_{i,j}^2 \quad (8)$$

其中:  $j=1, 2, \dots, M$ , 为累计小波分量平方和数据点。

累积小波分量平方和  $A(D_j)$  一定程度上反映出原始载荷中对应时间段对零件加载的强度, 因此通过对累计小波分量平方和设置阈值, 识别出原始信号幅值较大的循环。对累计小波分量平方和设置阈值, 取阈值步长为

$$D = \frac{\max(A(D_j)) - \min(A(D_j))}{m} \quad (9)$$

则第  $k$  个阈值为

$$A(D^k) = \frac{m-k}{2} D \quad (10)$$

根据上述阈值, 当满足判断条件  $A(D^j) > A(D^k)$  时, 定位累积小波分量平方和所对应的时间  $t_j$ , 该时间对应的原载荷即为具有损伤贡献的大循环; 当第  $i$  个累积小波分量平方和小于第  $k$  个阈值时, 则判断下一个累积小波分量平方和是否大于第  $k$  个阈值, 依次循环判断。

4) 损伤片段的识别与提取。通过提取累计小波分量平方和的上包络线, 并判断累计小波分量平方和在  $A(D^j)$  点处的单调性, 确定损伤片段的时间  $T_j$ 。图 1 为基于累计小波分量平方和的包络线损伤识别。

根据图 1, 累计小波分量平方和在  $t_{j-a}$  时刻单调性改变(由调减变为单调增), 在  $t_{j+b}$  时刻单调性改变(单调减变单调增), 其中,  $a$  与  $b$  分别为累计小波分量平方和的包络线在  $t_j$  时刻前后的单调性改变时所包含数据点个数, 因此可定位到原始载荷中时间轴  $T_j(t_{j-a} \sim t_{j+b})$  为损伤贡献较大的片段<sup>[2]</sup>。

5) 损伤片段的拼接。基于步骤 4 识别出的损伤片段, 采用半正弦波将载荷片段连接起来即可得到编辑信号。

6) 编辑载荷谱的确定。步骤 3 划分的所有阈

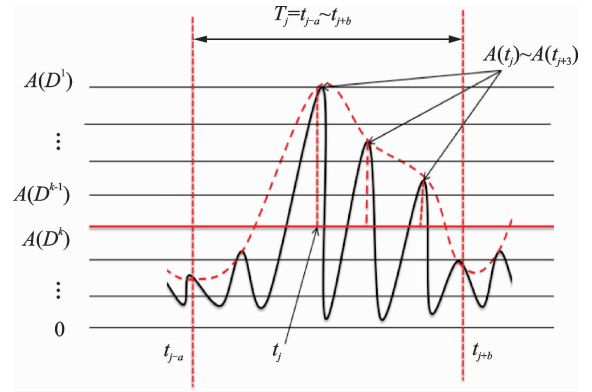


图 1 基于累计小波分量平方和的包络线损伤识别法  
Fig. 1 The damage segment identification based on the envelope of the accumulative of the wavelet component

值步均对应一个编辑载荷谱, 其中有一个载荷谱与原始载荷谱作用效果最为接近, 通过与原始信号多个维度进行对比(损伤、统计参数(均值、峰值系数)及功率谱密度), 然后筛选出来。

计算缩减信号  $y_k(t)$  的损伤  $D_k$ 、均值  $(\bar{x})_k$  与峰值系数  $(K)_k$  及功率谱密度吻合程度的指标  $(R^2)_k$ , 与原始信号相应的参数进行对比。判断缩减载荷谱与原始载荷谱的损伤、统计参数误差及功率谱密度吻合程度指标。若损伤保留量大于 90%, 统计参数误差小于 15%, 且功率谱密度吻合程度指标  $R^2 > 0.99$ , 3 个判断条件中任意一个不满足, 则  $k=k+1$ , 返回步骤 3, 判断下一个阈值对应的载荷谱是否满足上述条件; 3 个判断条件均满足, 则编辑信号  $y_k(t)$ ,  $k=1, 2, \dots, m-1$  即为所求。

7) 完成信号编辑工作。

综上, 基于多参数特征保留的载荷谱编辑算法, 其核心是对载荷谱的损伤片段的识别。对于损伤片段的提取采用了包络线提取法, 通过从多个维度与原始载荷谱进行对比, 确定了最终的编辑载荷谱。

## 2 载荷谱编辑方法的应用

### 2.1 汽车零部件载荷谱采集

笔者以悬架弹簧为例, 进行载荷谱采集和编辑方法的介绍。对弹簧的载荷谱采集, 采用贴片应变片的方式实现, 电阻应变片的粘贴位置需要通过有限元分析确定。通过有限元分析, 确定应力最大点(即疲劳热点)。若应力最大点在弹簧外表面, 可将应变片直接粘贴在应力最大点处; 若应力最大点出现在弹簧内表面, 可将应变片粘贴在相应的外表面或附

近。通过粘贴电阻应变片并组桥,采用标定建立力与桥路输出的关系,并对力与桥路输出电压进行拟合,得到弹簧的标定系数。通过标定系数,即可获取弹簧在试车场路面工况下的受力情况。

### 2.1.1 汽车减震器弹簧载荷谱采集

弹簧的下端固定在减震器的托盘上,上端固定在减震器上支座。对弹簧进行有限元分析,根据边界情况,分别在弹簧下端面施加固定约束,上端面施加位移约束。某汽车悬架弹簧刚度为37.5 kN/m,材料为高强度弹簧钢,材料属性如表1所示。

表1 SAE1045 碳钢的材料属性

Tab.1 The material properties of the SAE 1045 steel

参数	数值	单位
抗拉极限强度	751	MPa
弹性模量	207	GPa
泊松比	0.27	—
屈服强度	516	MPa

为了验证所建立弹簧有限元模型的精度,在加载端施加10mm的位移,获得弹簧支反力与加载位移之间的关系,拟合得到弹簧的刚度。对比仿真得到的刚度与实际刚度,验证弹簧有限元模型的准确性。图2为弹簧有限元及刚度分析结果。

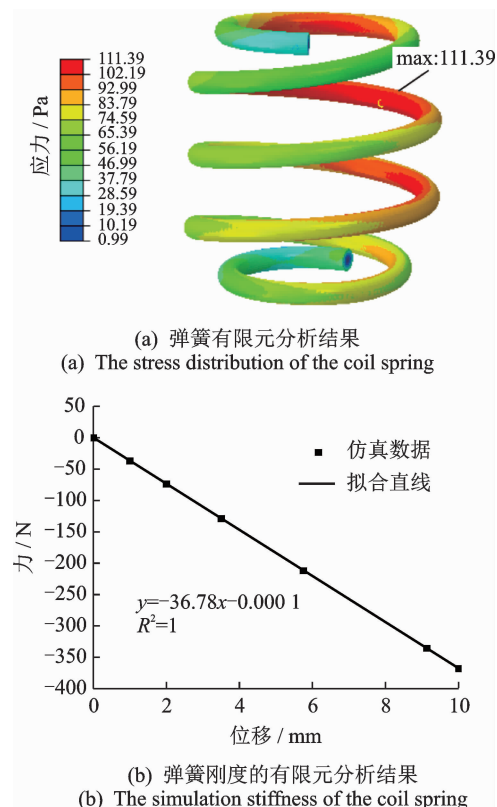


图2 弹簧有限元及刚度分析结果

Fig.2 The stress and stiffness of the coil spring

根据有限元分析结果,提取弹簧支反力随加载位移变化的仿真数据并进行拟合,得到弹簧仿真刚度为36.78kN/m,这与实际刚度的误差为1.92%,满足工程要求。说明所建立的有限元模型准确,可用于后续的强度和疲劳分析。

根据图2,弹簧的最大应力出现在弹簧内表面,这与文献[15-17]的结论吻合。由于弹簧内表面不适合电阻应变片的粘贴,将应变片贴在弹簧中部的外表面上,如图3所示。将所贴应变片组成半桥,进行标定。标定试验在静态标定台上进行,对弹簧等间隔步长从加载至3kN,然后卸载,标定台将同步输出加载力和桥路电压信号。对输出力和电压进行拟合,拟合直线的斜率即为标定系数。为了保证结果的重复性,将标定重复3次进行,将每次拟合的系数求平均值,得到标定系数值为 $2.0415 \times 10^{-3}$ 。

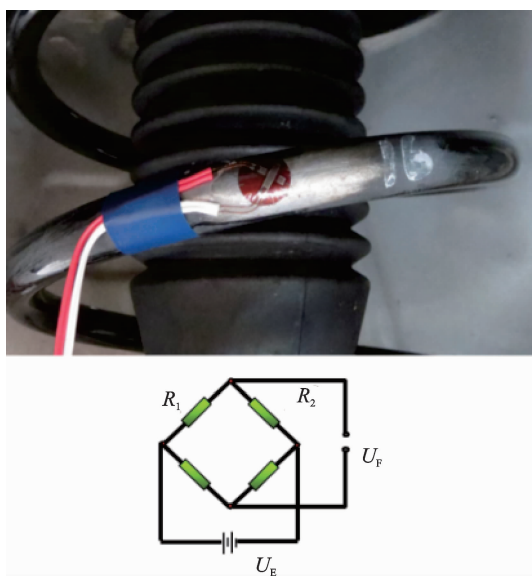


图3 弹簧应变片粘贴及组桥方式

Fig.3 The position of the strain gauge and the bridge method

### 2.1.2 弹簧载荷谱采集及结果

经过标定后的弹簧安装到减振器上,将减振器装车,在试验场典型路面上,汽车在重载条件下采集得到弹簧的力载荷谱。采用eDAQ数据采集系统进行载荷谱采集。为了提高采集信号的质量,将采样率设置为1024Hz。图4为典型路况采集得到的载荷谱,总时间为350s。

## 2.2 零部件载荷谱编辑及结果分析

### 2.2.1 零件载荷谱编辑结果

采用不同编辑方法编辑载荷谱如图5所示。基于多参数特征保留的编辑方法对载荷谱进行编辑,

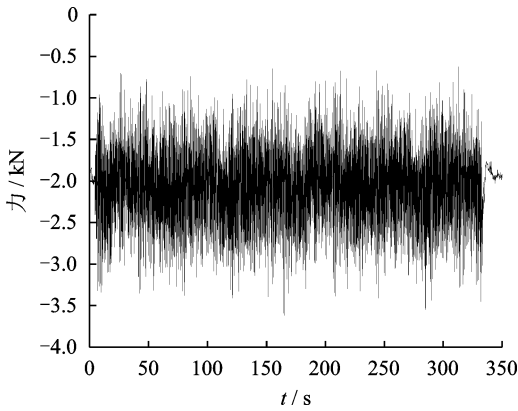
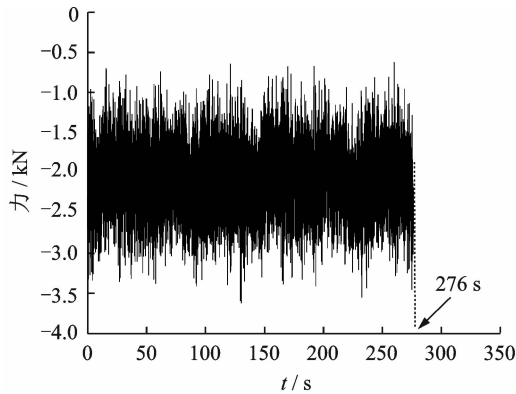


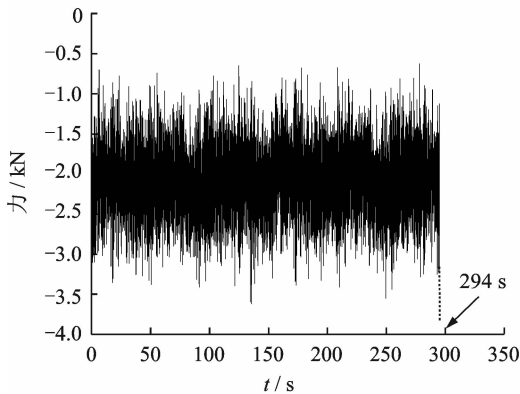
图 4 典型路况螺旋弹簧载荷谱

Fig. 4 Coil spring load spectrum of typical pavement

其中第 3 步对螺旋弹簧载荷谱累积小波分量平方和划分阈值,取阈值  $A=1.3455 \times 10^5 \text{ N}^2$ ,可实现弹簧载荷谱的编辑,得到的编辑结果如图 5(a)所示,时间为 276s。采用传统方法对弹簧载荷谱的编辑结果如图 5(b)所示,编辑过程在 nCode 中完成,得到的载荷谱时间为 294s。



(a) 基于多参数特征保留的编辑方法编辑载荷谱  
(a) Edited load spectrum based on the multi-parameter index retained method



(b) 基于损伤保留编辑方法编辑载荷谱  
(b) Edited load spectrum based on damage-retained method

图 5 采用不同编辑方法编辑载荷谱

Fig. 5 Edited load spectrum based on different method

### 2.2.2 载荷谱参数特征及分析

经过编辑后载荷谱的参数特征变化情况如表 2~4 所示。表 2 为载荷谱编辑后损伤与时间保留量。根据表 2 可知,经过两种方法编辑后,得到的编辑载荷谱损伤保留量均满足高于 90% 的要求。其中,笔者提出的编辑方法得到的编辑载荷谱时间保留量仅为原始载荷谱的 78.86%,而传统方法得到的编辑载荷谱时间保留量为原始载荷谱的 84.00%。可见,所提出的编辑方法能够获取时间更短、损伤保留更多的编辑载荷谱。

表 2 载荷谱编辑后损伤与时间保留量

Tab. 2 The damage and time retention of the edited load spectrum %

编辑方法	载荷谱	损伤保留量	时间保留量
基于多参数特征保留编辑方法	编辑载荷谱 I	90.01	78.86
基于损伤保留编辑方法	编辑载荷谱 II	91.34	84.00

表 3 载荷谱编辑前后统计参数

Tab. 3 The statistics of the load spectrum before and after edited

载荷谱	均值/N	峰值系数
原始载荷谱	-2 065.4	3.05
编辑载荷谱 I	-2 079.1	2.75
编辑载荷谱 II	-2 072.5	2.54

表 4 载荷谱编辑前后统计参数变化量

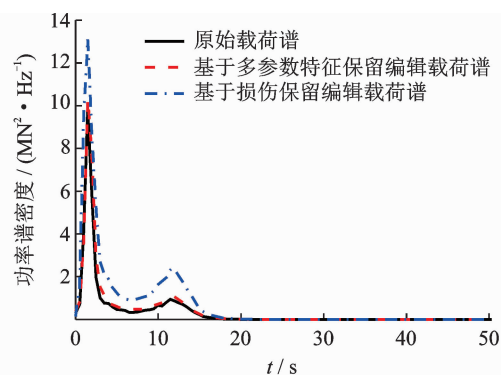
Tab. 4 The error between the edited load spectrum and original %

载荷谱	均值变化量	峰值系数变化量
编辑载荷谱 I	0.66	9.83
编辑载荷谱 II	0.34	16.72

表 3 为载荷谱编辑前后统计参数。表 4 为载荷谱编辑前后统计参数变化量。根据表 3 与表 4 可知,笔者提出编辑方法所得到的编辑载荷谱,编辑前后统计参数的误差均能满足小于 15% 的要求。传统方法得到的编辑载荷谱,峰值系数的变化超过 15%。峰值系数误差较大的主要原因:载荷谱编辑目的是将载荷谱中幅值较小的循环予以删除,这对载荷谱的均值影响较小,但对载荷谱幅值的分布影响较大。原始载荷谱的幅值服从正态分布,当幅值较小的循环被删除后,在均值附近的分布变化较大,从而使正态分布的形状发生变化,因此两个编辑载荷的峰值系数与原始载荷谱有较大的误差。

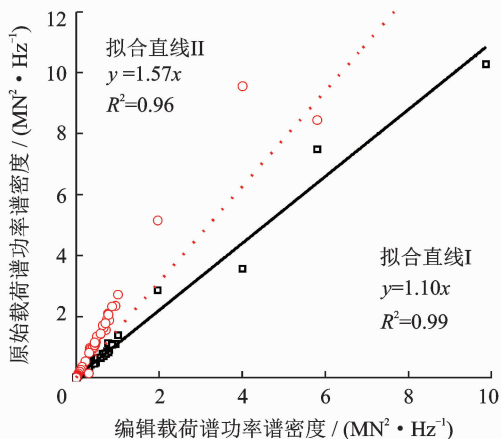
图 6 为载荷谱编辑前后功率谱密度及吻合指





(a) 载荷谱编辑前后的功率谱密度

(a) The PSD of load spectrum before and after edition



(b) 载荷谱编辑前后的吻合程度

(b) The consistency of load spectrum PSD before and after edition

图6 载荷谱编辑前后功率谱密度及吻合指标

Fig. 6 The PSD index of the load spectrum before and after edition

标。载荷谱编辑前后的功率谱密度如图6(a)所示,通过对编辑前后的功率谱密度绘制离散图,并对离散数据采用截距为0的线性拟合,拟合结果如图6(b)所示。

根据图6(a),基于多参数特征保留编辑方法得到的编辑载荷谱与原始载荷谱有较好的一致性,而基于损伤保留编辑方法得到的编辑载荷谱在低频与高频段与原始载荷谱均有差异。导致差异的主要原因在于:由于窗口尺寸的原因,基于损伤保留编辑方法同时删除小幅值循环和部分较大幅值的循环,而低频对应大幅值,从而低频有较大差异。

根据图6(b)可以说明两条编辑载荷谱的功率谱密度曲线与原始载荷谱功率谱密度曲线的差异。将原始载荷谱功率谱密度与基于多参数特征保留编辑载荷谱的功率谱密度组成的离散数据绘制图中,并对离散数据进行拟合。拟合得到直线的斜率为1.10,该直线与对角线直线 $y=x$ 有较好一致;拟合直线的Pearson相关系数为0.99,说明离散数据聚

集在拟合直线的两侧。将原始载荷谱功率谱密度与基于损伤保留编辑载荷谱的功率谱密度组成的离散数据绘制图中,并对离散数据进行拟合。拟合得到直线的斜率为1.57,该直线与对角线直线 $y=x$ 有较大偏差;拟合直线的Pearson相关系数为0.96,说明基于损伤保留编辑载荷谱与原始载荷谱的功率谱密度曲线有较大差异。

通过图6(a)与图6(b)可以判断采用基于多参数特征保留编辑方法所得到的编辑载荷谱,其能量分布与原始载荷谱具有较好的吻合,该编辑方法未改变载荷谱的能量分布,而基于损伤保留编辑方法改变了频谱特性。

综上,采用基于多参数特征保留编辑方法所得到的编辑载荷谱的参数(包括损伤、均值、峰值系数及功率谱密度等)均能与原始载荷谱具有较好的吻合,说明笔者提出的编辑方法得到的编辑载荷谱在损伤分布、统计参数和能量分布方面均能和原始载荷谱具有较好的一致性;所得到的编辑载荷谱时间更短,对零件的作用效果能够保持一致。

### 3 基于编辑载荷谱的疲劳仿真验证

将弹簧在nCode Designlife软件中进行疲劳仿真计算,将不同编辑方法所得到的编辑载荷谱以及原始载荷谱作为输入,计算弹簧的疲劳寿命及损伤分布,进一步验证编辑载荷谱与原始载荷谱的作用效果。对于具有相同作用效果的载荷谱,将得到相近或相同的弹簧疲劳寿命和损伤分布。

弹簧的疲劳仿真计算分两步进行。首先,对弹簧进行有限元仿真<sup>[18]</sup>。在Abaqus中对弹簧施加轴向的单位载荷,采用惯性释放分析方法获取弹簧的应力应变分布;其次,将静力学分析的结果导入nCode Designlife中,将随机载荷谱代替单位载荷,计算弹簧在随机载荷作用下的损伤和寿命分布情况,仿真结果如图7所示<sup>[19-20]</sup>。

根据图7,不同编辑方法所得到编辑载荷谱对弹簧的作用效果不同,其中笔者所提出的编辑方法得到的编辑载荷谱加载效果与原载荷谱加载效果保持一致,而传统方法得到编辑载荷谱与原载荷谱加载效果有较大差别,主要原因在于:基于多参数特征保留编辑载荷谱与原始载荷谱的损伤量、统计参数、以及能量分布均保持一致,使得弹簧的损伤和寿命基本相同;基于损伤保留的编辑载荷谱,虽然损伤量保持了90%以上,但统计参数中的峰值系数误差大于15%,尤其是功率谱密度曲线与原始载荷谱具有

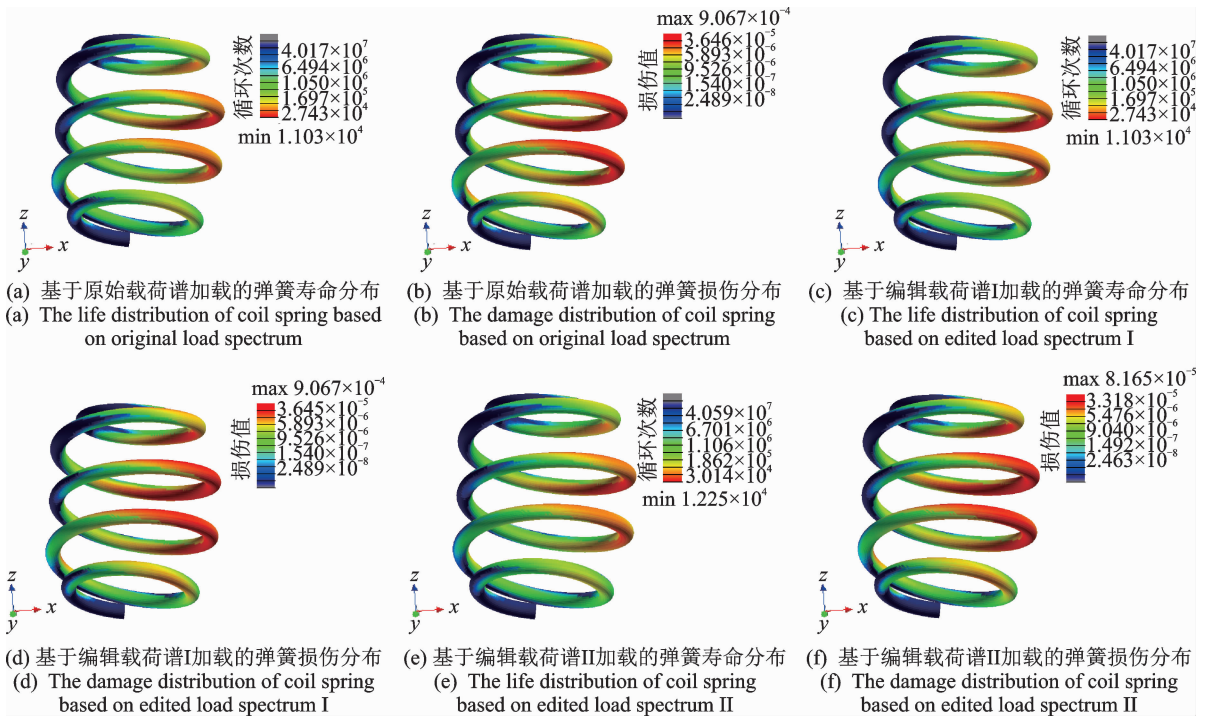


图 7 弹簧疲劳仿真计算结果

Fig. 7 The fatigue life and damage distribution of coil spring

较大的差异,使得弹簧的寿命误差高达 11%。

进行仿真计算时,采用 3 个谱作为输入,所用的计算时间不同,表 5 为弹簧的疲劳仿真计算结果。

表 5 弹簧的疲劳仿真计算结果

Tab. 5 The fatigue life and damage of the spring

加载谱	疲劳损伤值	循环次数	计算时间/s
原始载荷谱	$9.067 \times 10^{-5}$	$1.103 \times 10^4$	290
编辑载荷谱 I	$9.067 \times 10^{-5}$	$1.103 \times 10^4$	218
编辑载荷谱 II	$8.165 \times 10^{-5}$	$1.225 \times 10^4$	227

根据表 5,原始载荷谱作为弹簧疲劳仿真计算的输入,耗费了 290s 的计算时间;而采用基于多参数特征保留编辑载荷谱与基于损伤保留的编辑载荷谱作为弹簧疲劳仿真计算的输入,所使用的时间分别为 218s 和 227s。影响疲劳仿真计算时间的主要因素为输入载荷谱的数据量。载荷谱的时间越长,仿真计算的时间就越长。原始载荷谱所含的数据量为  $256\text{Hz} \times 350\text{s}$ ,而编辑载荷谱中的数据量分别为  $256\text{Hz} \times 276\text{s}$  和  $256\text{Hz} \times 294\text{s}$ ,因此,采用原始载荷谱加载的仿真计算时间大于采用基于多参数特征保留编辑载荷谱加载的仿真时间和基于损伤保留的编辑载荷谱加载的仿真时间。

弹簧的疲劳寿命仿真计算说明:a. 基于多参数特征保留编辑载荷谱可以达到与原始载荷谱基本一致的加载效果;b. 要得到加载效果相同的编辑载荷

谱,需同时满足损伤量、统计参数和能量分布等均能基本一致。

### 4 结 论

1) 基于多参数特征保留的编辑方法,通过载荷谱的累计小波分量平方和,识别出损伤贡献大的部分,通过对累积小波分量平方和划分阈值,可得到压缩载荷谱。

2) 兼顾载荷谱的损伤保留量、均值、峰值系数和功率谱密度,保留载荷谱编辑前后的参数特征,从损伤与能量分布方面与原始载荷谱保持一致,得到与原始信号加载效果相同的编辑载荷谱。

3) 通过弹簧疲劳仿真计算,进一步验证基于多参数特征保留的载荷谱加速耐久性编辑方法的有效性。

4) 可推广基于小波变换的兼顾多参数特征保留的编辑方法,运用到其他汽车零部件的多轴载荷谱的加速编辑中。

### 参 考 文 献

[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. Re-

- search on accelerated testing method for the service-simulation fatigue test of automouite front sub-frame [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(22):112-120. (in Chinese)
- [2] 郑国峰, 上官文斌, 韩鹏飞. 基于小波变换的汽车零部件加速耐久性载荷谱编辑方法研究[J]. *机械工程学报*, 2017, 53(8): 124-131.  
ZHENG Guofeng, SHANGGUAN Wenbin, HAN Pengfei. Study of load spectrum edition method based on the wavelet transform to the accelerated durability test of the vehicle component [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2017, 53(8): 124-131. (in Chinese)
- [3] 钱立军, 吴俊道, 杨炯年, 等. 基于室内道路模拟技术的整车加速耐久性实验的研究[J]. *汽车工程*, 2011, 33(2):91-96.  
QIAN Lijun, WU Jundao, YANG Jiongian, et al. A research on vehicle accelerated durability test based on indoor road simulation technology [J]. *Automotive Engineering*, 2011, 33(2): 91-96. (in Chinese)
- [4] 吴俊道. 车辆疲劳耐久性分析、实验与优化关键技术研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2012.
- [5] 于佳伟, 郑松林, 赵礼辉, 等. 整车室内道路模拟实验用载荷谱的编制方法研究[J]. *机械工程学报*, 2015, 51(14):93-99.  
YU Jiawei, ZHENG Songlin, ZHAO Lihui, et al. Research on spectrum development methodology for the vehicle indoor road simulation test [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2015, 51(14): 93-99. (in Chinese)
- [6] OH C S. Application of wavelet transform in fatigue history editing [J]. *International Journal of Fatigue*, 2001, 23:241-250.
- [7] ABDULLAH S, GIACOMIN J A, YATES J R. A mission synthesis algorithm for fatigue damage analysis [J]. *Proceedings of the IMechE, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2004, 218: 243-257.
- [8] ABDULLAH S, CHOI J C, GIACOMIN J A, et al. Bump extraction algorithm for variable amplitude fatigue loading [J]. *International Journal of Fatigue*, 2006, 28:675-691.
- [9] PUTRA T E, ABDULLAH S, SCHRAMM D, et al. Generating strain signals under consideration of road surface profiles [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, 60/61: 485-497.
- [10] PUTRA T E, ABDULLAH S, SCHRAMM D, et al. The need to generate realistic strain signals at an automotive coil spring for durability simulation leading to fatigue life assessment [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 94:432-447.
- [11] PUTRA T E, ABDULLAH S, SCHRAMM D, et al. Reducing cyclic testing time for components of automotive suspension system utilizing the wavelet transform and the fuzzy C-Means [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 90:1-14.
- [12] 李建平, 杨万年. 小波十讲 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004: 127-153.
- [13] 孙延奎. 小波分析及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 154-175.
- [14] 上官文斌, 王小莉, 叶必军. 应变比对填充天然橡胶疲劳特性影响的试验及其寿命预测方法研究[J]. *机械工程学报*, 2013, 49(8):49-56.  
SHANGGUAN Wenbin, WANG Xiaoli, YE Bijun. Experiment and fatigue life prediction of filled natural rubber emphasizing on the effect of strain ratio [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(8):49-56. (in Chinese)
- [15] PRAWOTO Y, IKEDA M, MANVILLE S K. Design and failure modes of automotive suspension springs [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2008, 15: 1155-1174.
- [16] LLANO-VIZCAYA L D, RUBIO-GONZALEZ C R, MESMACQUE G. Multiaxial fatigue and failure analysis of helical compression springs [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2006, 13:1303-1313.
- [17] HE B Y, WANG S X, GAO F. Failure analysis of an automotive damper spring tower [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2010, 17: 498-505.
- [18] KONG Y S, ABDULLAH S, SCHRAMM D, et al. Mission profiling of road data measurement for coil spring fatigue life [J]. *Measurement*, 2017, 107:99-110.
- [19] PANU P, PAK S L, RICHARD S C. Wavelet transform-based stress-time history editing of horizontal axis wind turbine blades [J]. *Renewable Energy*, 2014, 63: 558-575.
- [20] 郑国峰, 上官文斌, 韩鹏飞. 基于小波变换的汽车零部件加速耐久性多轴载荷谱编辑方法研究[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(10): 156-166.  
ZHENG Guofeng, SHANGGUAN Wenbin, HAN Pengfei. Study of multi-channel load spectrum edition method based on the wavelet transform to the accelerated durability test of the vehicle components [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(10): 156-166. (in Chinese)



**第一作者简介:**郑国峰,男,1989年8月生,博士生。主要研究方向为汽车底盘零部件载荷谱采集、用户关联及零部件耐久可靠性分析。曾发表《基于小波变换的汽车零部件加速耐久性多轴载荷谱编辑方法研究》(《机械工程学报》2018年第54卷第10期)等论文。  
E-mail:zhengguofeng1989@163.com