

# 基于频域分析的机载液压驱动装置疲劳 寿命预测方法研究

刘继军<sup>1</sup>, 喻琴<sup>2</sup>, 李刚<sup>2</sup>

(1. 中国飞机强度研究所 强度与结构完整性全国重点实验室, 西安 710065;

2. 庆安集团有限公司航空设备研究所, 西安 710077)

**摘要:** **目的** 采用时域雨流法和 4 种频域振动疲劳分析方法对机载液压驱动装置的危险部位进行寿命预测及频域方法适用性研究。**方法** 首先通过有限元随机振动分析得到该结构耳片危险区域的应力 PSD, 计算的谱宽系数都集中在 0.3~0.35, 是窄带和宽带分界区域。然后运用 4 种典型的载荷谱估计模型, 即三区间法、基于 Dirlik 雨流幅值经验模型、用于窄带过程的 Rayleigh 分布模型、Weibull 分布模型, 得到危险位置的疲劳寿命安全系数。接着将应力 PSD 映射为应力-时间序列, 并基于雨流计数法得到疲劳寿命安全系数。最后以时域疲劳预测结果基准, 对 4 种频域方法的适用性进行讨论。**结果** 预测结果显示, Dirlik 方法预测的 9 个安全系数最为可靠, Rayleigh 法结果一般, 三区间法和 Weibull 法最差。**结论** 在窄带和宽带分界区域的谱宽系数, 建议采用 Dirlik 方法, 不建议采用三区间法和 Weibull 法。

**关键词:** 驱动装置; 谱宽系数; 三区间法; Weibull 分布; Dirlik 模型; 雨流计数法

中图分类号: V19; O346.2 文献标志码: A 文章编号: 1672-9242(2024)09-0120-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2024.09.016

## Fatigue Life Prediction Method of Airborne Hydraulic Drive Based on Frequency Domain Analysis

LIU Jijun<sup>1</sup>, YU Qin<sup>2</sup>, LI Gang<sup>2</sup>

(1. National Key Laboratory of Strength and Structural Integrity, Aircraft Strength Research Institute of China, Xi'an 710065, China; 2. Institute of Aviation Equipment, Qing'an Group Corporation Limited, Xi'an 710077, China)

**ABSTRACT:** The work aims to employ the time domain rainflow method along with four frequency domain vibration fatigue analysis techniques to forecast the lifespan of critical locations in an onboard hydraulic drive and study the suitability of frequency domain method. Initially, the finite element random vibration analysis was carried out to obtain the stress PSDs in the critical areas of tabs of the structure. The calculated spectral width coefficients were uniformly clustered within 0.3 to 0.35, marking the transition zone between narrowband and broadband. Subsequently, four representative load spectrum estimation models, namely the three-interval method, the Dirlik rainflow amplitude empirical model, the Rayleigh distribution model and the Weibull distribution model for narrowband processes, were utilized to determine the fatigue life safety factors at the critical locations. The stress PSDs were then transformed into stress-time series, and the fatigue life safety factors were calculated by the

收稿日期: 2024-08-08; 修订日期: 2024-09-03

Received: 2024-08-08; Revised: 2024-09-03

引文格式: 刘继军, 喻琴, 李刚. 基于频域分析的机载液压驱动装置疲劳寿命预测方法研究[J]. 装备环境工程, 2024, 21(9): 120-125.

LIU Jijun, YU Qin, LI Gang. Fatigue Life Prediction Method of Airborne Hydraulic Drive Based on Frequency Domain Analysis[J]. Equipment Environmental Engineering, 2024, 21(9): 120-125.

rainflow counting method. Lastly, the suitability of the four frequencydomain methods was deliberated against the benchmark of the timedomain fatigue prediction outcomes. The findings indicated that the nine safety factors derived from Dirlik's method were the most trustworthy, with generally reliable results from Rayleigh's method and notably inferior outcomes from the three-interval and Weibull methods. In the transition zone between narrowband and broadband, the Dirlik method is recommended over the three-interval and Weibull methods.

**KEY WORDS:** driver; spectral bandwidth coefficient; three-interval method; Weibull distribution; Dirlik model; rainflow counting method

平稳随机载荷下的疲劳寿命预测通常采用计算简便、工程适应性强的频域分析方法<sup>[1-6]</sup>。频域下振动疲劳寿命计算方法是基于振动应力响应的功率谱密度函数(后面简称 PSD)开展的。PSD 作为描述平稳各态历过程的最重要参数,利用 PSD 可以获得随机应力信号的均方根值、谱矩、峰值概率分布和峰值频率等信息。频域方法的核心步骤是载荷谱估计模型,是影响寿命预测精度的主要因素之一。载荷谱估计模型的主要作用就是将 PSD 变换为应力幅值概率密度函数(后面简称 PDF)<sup>[7-9]</sup>,主要有 Bendat 模型<sup>[10]</sup>、Wirsching 和 Light 修正模型<sup>[11]</sup>、Dirlik 模型<sup>[12]</sup>、Rayleigh 分布模型、Weibull 分布模型、Zhao 和 Baker 模型<sup>[13]</sup>等。这些模型各有适用范围,如 Rayleigh 分布模型更适合窄带(谱带宽系数  $\varepsilon < 0.30$ )的寿命预测;Wirsching 方法更适合宽带(谱带宽系数  $\varepsilon > 0.35$ <sup>[14]</sup>)寿命预测;而 Dirlik 模型在窄带宽带

的寿命预测适用性较强,工程经常采用,见图 1。近年进一步研究发现,航空结构(如炮舱、进气道等)普遍存在非平稳、非高斯载荷,这可能导致结构响应是非高斯的,仅靠 PSD 不足以描述,从而导致较短的疲劳寿命<sup>[15]</sup>。非平稳、非高斯随机激励下的振动疲劳寿命预测成为一个研究热点,如 Jiang 等<sup>[16]</sup>研究了平稳非高斯随机激励下结构振动加速度的测试方法;Tong 等<sup>[17]</sup>和 Zheng 等<sup>[18]</sup>提出了一种非平稳非高斯激励信号的仿真方法,可用于测试结构在非平稳激励下的振动疲劳寿命;Lei 等<sup>[19]</sup>针对非高斯随机振动试验,提出了一种新颖的功率谱与峰度分离控制策略;Li 等<sup>[20]</sup>基于结构动力学理论和模态叠加原理,推导了非平稳非高斯激励下结构振动响应应力的计算公式。总之,目前关于非平稳、非高斯随机激励下结构的振动疲劳寿命预测及相关试验方法仍然没有普遍的方法。

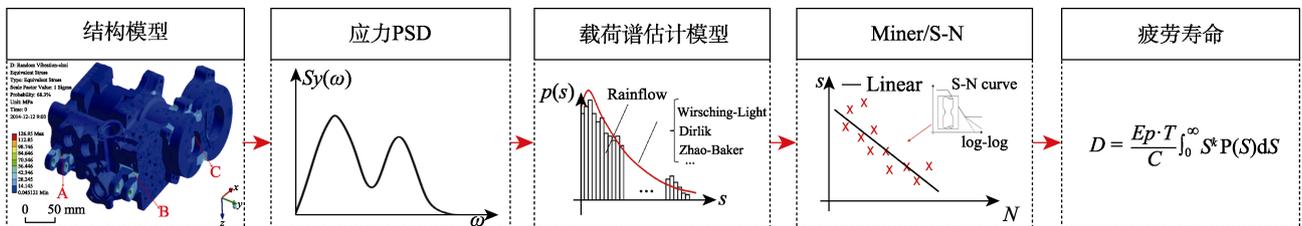


图 1 频域下结构寿命预测过程

Fig.1 Structural life prediction process in frequency domain

另外,载荷谱估计模型的计算对象是单轴应力或应力分量合成标量的 PSD,所以随机振动下的寿命预测方法还有一个重要的问题就是应力状态或多轴应力合成等效单轴应力的问题,该领域的研究尚没有完全成熟<sup>[21-24]</sup>。假定单个应力分量的 Gauss 过程,可用 PSD 描述,按照 J2 强度准则,应力分量合成的 von Mises 等效应力是非线性的,则等效应力是非 Gauss 过程,仅 PSD 不足以描述该随机过程和预测寿命,即平稳随机振动的理论与方法不再有效。目前常用以下 3 种解决办法:设法将应力分量从频域转换至时域,求得 von Mises 应力-时间历程;建立基于模态 von Mises 应力的频率响应函数,通过模态叠加法求得 von Mises 应力响应的 PSD;von Mises 应力幅值和均值的联合概率分布规律研究。

本文将采用上述第 2 种方式,即 Segalman 等<sup>[25]</sup>在 1998 年提出的计算 von Mises 应力的 RMS(应力均方根值)和 PSD 计算方法,对随机振动下某型机载液压驱动装置的寿命进行估算。该结构危险区的应力 PSD 的谱宽系数集中在 0.3~0.35,是窄带和宽带分界的模糊区域,选用 4 种寿命预测模型对其进行对比分析。

## 1 频域振动疲劳寿命预测原理

振动疲劳寿命预测既可在时域也可在频域下进行,但对于随机振动引起的寿命计算,频域方法在效率上有很大优势。频域振动寿命预测原理主要包括材料疲劳-寿命本构、损伤累积模型、应力幅分布<sup>[26]3</sup>

个方面的内容。

材料疲劳-寿命本构就是指材料  $S-N$  曲线或方程, 一般形式如下:

$$S^m \cdot N_S = C \quad (1)$$

式中:  $N_S$  表示材料在应力幅值为  $S$  循环作用下引起破坏的循环次数,  $1/N_S$  则表示该应力幅循环 1 次产生的损伤量; 参数  $m$  和  $C$  分别表示疲劳强度系数和疲劳强度指数, 是材料特性常数。

在工程应用中, 振动疲劳损伤计算大多采用 Palmgren 和 Miner 的线性累计损伤模型, 即把每个应力幅  $N_S$  循环作用产生的损伤累加在一起。在随机振动中, 因为应力幅是非确定性的, 所以总疲劳损伤用数学期望的形式表示:

$$D = E \left[ \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_{S,i}} \right] = \frac{1}{C} E \left[ \sum_{i=1}^n S_i^m \right] = \frac{\bar{n}}{C} E[S^m] \quad (2)$$

式中:  $\bar{n} = E(n)$  表示在时间段  $T$  内计数的应力循环的平均次数。

对于稳态高斯随机过程, 可通过如下计算获得:

$$\bar{n} = \nu_p T \quad (3)$$

式中:  $\nu_p$  表示期望峰值频率, 可通过应力 PSD 的四阶矩和二阶矩比值获得。

根据随机变量的高阶矩定义:

$$E[S^m] = \int_0^{\infty} S^m p(S) dS \quad (4)$$

式中:  $p(S)$  为应力幅概率密度函数。

将式 (3)、(4) 代入式 (2) 得到:

$$D = \frac{\nu_p T}{C} \int_0^{\infty} S^m p(S) dS \quad (5)$$

一般认为, 当  $D=1$  时, 结构发生疲劳破坏, 从而可以计算出发生疲劳寿命  $T$ 。但在工程实践中, 根据材料和适用场景等,  $D$  也可取大于 1 的数值<sup>[27]</sup>。

针对线性平稳高斯随机振动, 工程中也常用由 Steinberg 提出的  $3\sigma$  法或三区间法来估算寿命, 认为载荷谱估计模型与应力均方根值密切相关<sup>[28-29]</sup>, 总疲劳损伤表示如下:

$$D = T \nu_0^+ \left( \frac{0.683}{N_{1\sigma}} + \frac{0.271}{N_{2\sigma}} + \frac{0.043}{N_{3\sigma}} \right) \quad (6)$$

式中:  $N_{1\sigma}$ 、 $N_{2\sigma}$  和  $N_{3\sigma}$  分别表示 1、2、3 倍应力均方根值 (RMS)  $\sigma$  时应力幅在  $S-N$  曲线上对应循环次数;  $\nu_0^+$  为应力以正斜率通过均值的平均频率。

## 2 载荷谱估计方法

对于一般情形, 应力分布对应的幅值概率密度函数获取是振动疲劳寿命预测的核心步骤, 一般通过载荷谱估计方法, 从应力 PSD 转换而来。除了上述简

单的  $3\sigma$  法对应的载荷谱估计, 本文还将应用下面 3 种载荷谱估计方法, 用于后续寿命预测对比研究。

### 2.1 基于 Dirlik 雨流幅值经验模型

Dirlik 雨流幅值经验模型得到应力幅值概率密度模型:

$$p(S) = \frac{1}{\sigma_x} \left[ \frac{G_1}{Q} e^{-\frac{Z}{Q}} + \frac{G_2}{R^2} e^{-\frac{Z^2}{2R^2}} + G_3 Z e^{-\frac{Z^2}{2}} \right] \quad (7)$$

$$\text{其中: } G_1 = \frac{2(\chi_m - \gamma^2)}{1 + \gamma^2}, \quad G_2 = \frac{1 - \gamma - G_1 + G_1^2}{1 - R},$$

$$G_3 = 1 - G_1 - G_2, \quad R = \frac{\gamma - \chi_m - G_1^2}{1 - \gamma - G_1 + G_1^2}, \quad Q =$$

$$\frac{1.25(\gamma - G_3 - G_2 R)}{G_1}, \quad \chi_m = \frac{m_1}{m_0} \sqrt{\frac{m_2}{m_4}}, \quad \gamma = \frac{m_2}{\sqrt{m_0 m_4}}; m_0、$$

$m_1$ 、 $m_2$ 、 $m_4$  分别为应力功率谱密度函数的零、一、二、四阶谱矩;  $Z = S/\sigma_x$ , 且为正规化的幅值或峰值范围;  $\sigma_x$  为相应的均方根值。

$$\sigma_x = \begin{cases} \sqrt{m_0}, S \text{ 表示幅值时} \\ 2\sqrt{m_0}, S \text{ 表示范围时} \end{cases} \quad (8)$$

当  $S$  表示峰谷值应力范围时, 采用的  $S-N$  曲线是峰谷值应力范围-寿命曲线, 这里选择  $S$  表示幅值。

### 2.2 用于窄带过程的 Rayleigh 分布模型

用于窄带过程的 Rayleigh 分布模型的幅值概率密度函数:

$$p(S) = \frac{S}{\sigma_x^2} \cdot \exp\left(-\frac{S^2}{2\sigma_x^2}\right) \quad (9)$$

### 2.3 Weibull 分布模型

在 Rayleigh 分布中, 引入形状参数得到 Weibull 分布模型, 其幅值概率密度函数为:

$$p(S) = \alpha \cdot \beta^{-\alpha} \cdot S^{\alpha-1} \cdot \exp\left(-\frac{S^\alpha}{\beta^\alpha}\right) \quad (10)$$

式中:  $\alpha$  为形状参数, 控制曲线形状发生变化; 尺度参数  $\beta$  反映了雨流幅值分布中幅值的主要变化范围。 $\alpha$ 、 $\beta$  分别为:

$$\alpha = 2 - 1.174\varepsilon \quad (11)$$

$$\beta = k_\beta \cdot \sigma_x \quad (12)$$

$$k_\beta = 1.545\sqrt{1 - \varepsilon^2} - 0.1531 \quad (13)$$

## 3 机载液压驱动装置寿命预测

在某型液压伺服装置产品耐振性设计验证中, 被监测的主要频率有明显左移 (减小) 趋势, 试验暂停。检查后发现产品一个连接耳片内侧边缘处有明显可

视裂纹 (如图 2 所示), 试验终止。为了分析预测该机载液压装置的寿命, 并进一步改进结构, 参考图 1 中频域下结构寿命预测过程进行。



图 2 机载液压驱动装置连接耳片裂纹  
Fig.2 Crack on connecting tag of airborne hydraulic drive

首先建立结构的有限元模型, 分别加载航向、侧向和垂向 3 个方向的基础运动的随机振动耐久谱, 分别得到相应的随机振动响应。综合考虑结构 von Mises 应力的 RMS 云图最大值处和连接耳片, 选取 3 个位置区域 (耳片 A、耳片 B 和耳片 C) 典型危险位置 (如图 3 所示), 分别计算得到 3 个振动下对应的 von Mises 应力 PSD。耳片 C 区域典型危险位置的应力 PSD 如图 4 所示。

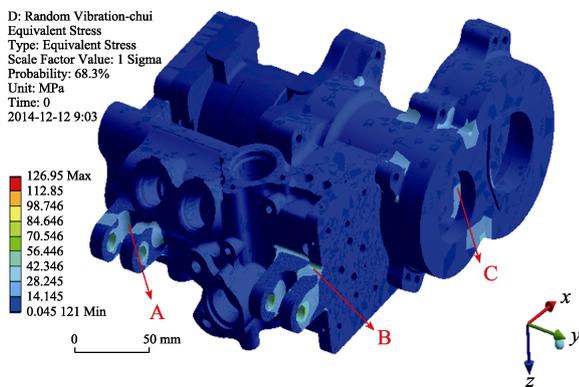


图 3 垂向随机振动 von Mises 应力的 RMS 云图  
Fig.3 RMS cloud map of von Mises stress under vertical random vibration

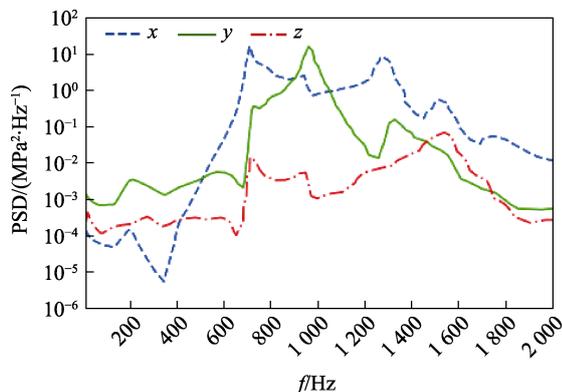


图 4 3 个振动下耳片 C 处的 PSD  
Fig.4 PSD at three vibrating lower tags C

按照图 1 过程, 获得关键区域的 PSD 后, 分别应用 Dirlik 雨流幅值经验模型、三区间法、Rayleigh 分布模型、Weibull 分布模型将其转换为应力 PDF, 然后即可根据 Miner 线性累积损伤准则进行结构的寿命计算。为了评价 4 种频域寿命预测方法, 同时运用了时域雨流计数法进行疲劳寿命计算<sup>[30]</sup>, 计算结果作为基准与 4 种频域计算结果进行比较。时域法疲劳寿命计算相对简单, 首先利用应力 PSD 生成应力-时间序列<sup>[31]</sup>, 然后用雨流计数法提取应力幅循环, 最后用式 (2) 直接计算疲劳损伤或寿命。由于 PSD 生成对应的时间序列是一对多的映射, 每次计算疲劳损伤或寿命都不同, 所以本文生成 20 个应力-时间序列样本, 并计算出疲劳损伤的平均值作为时域振动疲劳预测结果。

结构寿命计算参数需考虑几何参数 (表面系数、尺寸系数)、材料参数 (抗拉强度、材料疲劳极限、材料需用疲劳极限、S-N 曲线参数), 具体数值见表 1。

表 1 用于振动疲劳寿命材料参数  
Tab.1 Material parameters for vibration fatigue life

名称	计算公式及说明	数值
弹性模量 $E/\text{MPa}$		69 000
泊松比 $\nu$		0.33
表面系数 $K_a$	见注	0.87
尺寸系数 $K_b$	见注	0.84
抗拉强度 $S_b/\text{MPa}$	7050—T7451	490
材料疲劳极限 $\sigma^{-1}/\text{MPa}$	$\sigma^{-1}=0.19\sigma_b+19.6$	112.7
许用疲劳极限 $\sigma_A^{-1}/\text{MPa}$	$K_a \times K_b \times \sigma^{-1}$	82.4
S-N 曲线斜率 $B$	钢材为-3.92; 铝材为-3.32	-3.322
最大主应力为疲劳极限时的寿命 $N_0$	结构钢及铁基合金为 $10^7$	$1.0 \times 10^7$
材料参数 $m$	$-B$	3.32
材料参数 $C$	$N_0/S_{LA}^B$	$2.3 \times 10^{13}$

注: 表面系数  $K_a=a \cdot S_b$ ,  $S_b$  为抗拉强度, 机加工系数  $a$ 、 $b$  分别取值为 4.51、-0.265; 尺寸系数  $K_b=1.24d^{-0.107}$  ( $2.79 \text{ mm} \leq d \leq 51 \text{ mm}$ ) 或  $K_b=1.51d^{-0.157}$  ( $51 \text{ mm} \leq d \leq 254 \text{ mm}$ )

将参数代入式 (5),  $T=109.2 \text{ h}$  为振动时间, 可到各振动疲劳寿命预测方法的结构损伤因子  $D$ , 然后利用式 (14) 求得安全系数  $L$ , 见表 2。

$$L = \frac{1}{D} \tag{14}$$

从表 2 可知, 每种预测方法都对应 9 个安全系数 (每列), 以时域雨流法 (Rainflow) 为基准, Dirlik 方法的 9 个安全系数都大于雨流法, 三区间法的安全系数仅有 3 个大于雨流法, Rayleigh 法的安全系数有 6 个大于雨流法, Weibull 法安全系数仅有 2 个大于雨流法。显然, Dirlik 方法预测结果最好, 三区间法和 Weibull 法预测结果较差, 而 Rayleigh 法一般适用于

表2 振动疲劳寿命安全系数  
Tab.2 Safety factors of vibration fatigue life

位置	方向	谱带带宽系数	Dirlik	三区间	Rayleigh	Weibull	Rainflow
耳片 A	航向	0.363 8	1.793	1.53	1.63	1.512	1.60
	侧向	0.359 1	63.66	54.5	56.147	51.948	56.84
	垂向	0.479 1	2.701	2.24	2.297	2.172	2.41
耳片 B	航向	0.286 7	0.903	0.81	0.848	0.787	0.81
	侧向	0.330 4	15.242	14.7	13.663	12.502	13.61
	垂向	0.435 4	0.331	0.277	0.285	0.265	0.296
耳片 C	航向	0.211 1	4.404	4.04	4.232	3.982	3.93
	侧向	0.286 8	1023	882	949.84	874.06	913.4
	垂向	0.159 5	0.636	0.593	0.618	0.599	0.568

窄带的疲劳寿命预测,在窄带与宽带分界区的预测精度一般。三区间法的预测结果较差,主要是因为其方法自身缺陷,即载荷谱估计模型过于简单,仅依赖应力 RMS 值,没有充分考虑 PSD 构型的影响。Weibull 模型参数(主要是形状参数、尺度参数)选取比较复杂,变换形式多样,参数选取依赖长期数据积累,所以预测结果与模型参数选取关系紧密,使用难度大。

从安全系数看,耳片 A 危险区域在 3 个振动方向的安全系数较大,该区域无需改进;耳片 C 危险区域应根据垂直振动分析的主要参与模态运动受力模式,进行结构加强改进;耳片 B 危险区域则应综合考虑垂向和航向振动分析的主要参与模态运动受力模式,进行结构加强改进。

## 4 结论

本文采用时域雨流法和 4 种频域法对机载液压驱动装置进行了振动疲劳预测分析,主要完成工作和结论如下:

1) 通过有限元随机振动分析得到了该结构的耳片危险区域的应力 PSD,计算的谱宽系数都集中在 0.3~0.35,是窄带和宽带分界区域。

2) 该机载液压驱动装置的耳片 B 和 C 的危险区域局部结构应加强改进,结构改进设计可参考相应振动分析的主要参与模态的运动受力模式,改进后再按照本文分析步骤进行振动疲劳寿命验算。

3) 从安全系数或保守预测角度看,Dirlik 方法预测结果最为可靠;Rayleigh 法在窄带与宽带分界区的预测可靠性不高,源于其应力幅值 PSD 构型的简单描述,是正态分布的形状修正,但形状修正参数不易获取;三区间法最不可靠,没有充分考虑 PSD 具体谱型,另外根据试验实践,应力幅值在其 3~5 倍 RMS 也是频繁的,而这部分响应对结构损伤影响更大;Weibull 法预测可靠性依赖参数选取,而这些超参数源于先验的数据库积累。因此,一般工程应用中建议优先选择 Dirlik 方法,不建议选择三区间法和 Weibull 法, Rayleigh 法在窄带下可用。

## 参考文献:

- [1] LIOU H Y, WU W F, SHIN C S. A Modified Model for the Estimation of Fatigue Life Derived from Random Vibration Theory[J]. Probabilistic Engineering Mechanics, 1999, 14(3): 281-288.
- [2] 沈民民, 史锐, 郭鹏飞, 等. 重复使用飞行器分布式连接结构振动及疲劳研究[J]. 中国机械工程, 2024, 35(1): 45-55.  
SHEN M M, SHI R, GUO P F, et al. Study on Vibration and Fatigue of Distributed Connection Structures of Reusable Aircrafts[J]. China Mechanical Engineering, 2024, 35(1): 45-55.
- [3] 王文静, 董子钰, 代森, 等. 高速列车撒砂装置振动特性及疲劳寿命研究[J]. 机械工程学报, 2023, 59: 1-10.  
WANG W J, DONG Z Y, DAI S, et al. Research on Vibration Characteristics and Fatigue Life of Sanding Device of EMU[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2023, 59: 1-10.
- [4] 揭小落, 李丽远, 胡由宏, 等. 热振环境下钛合金薄壁结构疲劳寿命[J]. 航空动力学报, 2023, 38(1): 55-60.  
JIE X L, LI L Y, HU Y H, et al. Fatigue Life of Titanium Alloy Thin-Walled Structure under Thermal Vibration Environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 55-60.
- [5] 张家旋, 李斌, 牛文超, 等. 基于自适应分数阶正位置反馈的垂尾振动主动控制[J/OL]. 兵工学报, 2023. [2023-11-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20231128.1156.002.html>.  
ZHANG J X, LI B, NIU W C, et al. Adaptive Fractional Order Positive Position Feedback for Vibration Control of Vertical Tail [J/OL]. ActaArmamentarii, 2023. [2023-11-28]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2176.TJ.20231128.1156.002.html>.
- [6] JIE X L, LI L Y, HU Y H, et al. Fatigue Life of Titanium Alloy Thin-Walled Structure under Thermal Vibration Environment[J]. Journal of Aerospace Power, 2023, 38(1): 55-60.
- [7] 白春玉, 牟让科, 马君峰, 等. 多轴应力响应下结构振动疲劳寿命预估的时域方法研究[J]. 机械科学与技术, 2013, 32(2): 289-293.

- BAI C Y, MU R K, MA J F, et al. Time Domain Analysis for the Estimation of Structure Vibration Fatigue Life under Multiaxial Stress Responses[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(2): 289-293.
- [8] 曹明红, 邵闯, 齐丕筹. 宽带随机振动疲劳寿命的频域分析与试验对比研究[J]. *机械科学与技术*, 2013, 32(6): 839-844.
- CAO M H, SHAO C, QI P Q. Comparison of the Frequency-Domain Analysis and the Test Results for a Wide-Band Random Vibration Fatigue Problem[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2013, 32(6): 839-844.
- [9] 喻琴, 杨世彦, 刘启华, 等. 液压驱动装置类产品的随机振动疲劳计算方法[C]// 第六届民用飞机航电国际论坛论文集. 上海: 中国航空学会, 2017.
- YU Qin, YANG Shiyuan, LIU Qihua, et al. Random vibration fatigue calculation method for hydraulic drive devices[C]// *Proceedings of the 6th International Forum on Civil Aircraft Avionics*. Shanghai: Chinese Society of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [10] BENDAT JS. Probability Functions for Random Responses: Prediction of Peaks, Fatigue Damage, and Catastrophic Failures[R]. NASA-CR-33, 1964.
- [11] WIRSCHING P H, LIGHT M C. Fatigue under Wide Band Random Stresses[J]. *Journal of the Structural Division*, 1980, 106(7): 1593-1607.
- [12] DIRLIK T, BENASCIUTTI D. Dirlik and Tovo-Benasciutti Spectral Methods in Vibration Fatigue: A Review with a Historical Perspective[J]. *Metals*, 2021, 11(9): 1333.
- [13] ZHAO W W, BAKER M J. On the Probability Density Function of Rainflow Stress Range for Stationary Gaussian Processes[J]. *International Journal of Fatigue*, 1992, 14(2): 121-135.
- [14] Lee YL, Pan J, Hathaway R, et al. *Fatigue Testing and Analysis: Theory and Practice*[M]. Britain: Butterworth-Heinemann, 2005.
- [15] PALMIERI M, ČESNIK M, SLAVIČ J, et al. Non-Gaussianity and Non-Stationarity in Vibration Fatigue[J]. *International Journal of Fatigue*, 2017, 97: 9-19.
- [16] JIANG Y, TAO J Y, ZHANG Y A, et al. Fatigue Life Prediction Model for Accelerated Testing of Electronic Components under Non-Gaussian Random Vibration Excitations[J]. *Microelectronics Reliability*, 2016, 64: 120-124.
- [17] TONG M N, ZHAO Y G, ZHAO Z. Simulating Strongly Non-Gaussian and Non-Stationary Processes Using Karhunen-Loève Expansion and L-Moments-Based Hermite Polynomial Model[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 160: 107953.
- [18] ZHENG Z B, DAI H Z, WANG Y Y, et al. A Sample-Based Iterative Scheme for Simulating Non-Stationary Non-Gaussian Stochastic Processes[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 151: 107420.
- [19] LEI W Y, JIANG Y, ZENG X, et al. Research on the Transmission Law of Kurtosis of SDOF System under Nonstationary and Non-Gaussian Random Excitations[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2022, 165: 108292.
- [20] LI F S, WU H, WU P B. Vibration Fatigue Dynamic Stress Simulation under Non-Stationary State[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2021, 146: 107006.
- [21] KOWALEWSKI J. On the Relationship between Component Life under Irregularly Fluctuating and Ordered Load Sequences[R]. DVL Report 249, 1963.
- [22] MACHA E. Spectral Method of Fatigue Life Calculation under Random Multiaxial Loading[J]. *Materials Science*, 1996, 32(3): 339-349.
- [23] PITOISET X, PREUMONT A. Spectral Methods for Multiaxial Random Fatigue Analysis of Metallic Structures[J]. *International Journal of Fatigue*, 2000, 22(7): 541-550.
- [24] 周兴广. 多轴随机振动环境的疲劳损伤机理浅析[J]. *航天器环境工程*, 2010, 27(6): 723-726.
- ZHOU X G. Fatigue Damage Methods under Multiaxial Random Vibration Environment[J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2010, 27(6): 723-726.
- [25] SEGALMAN D J, FULCHER C W G, REESE G M, et al. An Efficient Method for Calculating RMS von Mises Stress in a Random Vibration Environment[R]. Sandia Report, 1998.
- [26] 杨万均, 施荣明. 随机振动应力幅值的分布规律[J]. *机械设计与研究*, 2011, 27(6): 16-20.
- YANG W J, SHI R M. Research on Stress Amplitude Distribution of Random Vibration[J]. *Machine Design & Research*, 2011, 27(6): 16-20.
- [27] 姚起航, 姚军. 工程结构的振动疲劳问题[J]. *应用力学学报*, 2006, 23(1): 12-15.
- YAO Q H, YAO J. Vibration Fatigue in Engineering Structures[J]. *Chinese Journal of Applied Mechanics*, 2006, 23(1): 12-15.
- [28] 孟凡涛, 胡愉愉. 基于频域法的随机振动载荷下飞机结构疲劳分析[J]. *南京航空航天大学学报*, 2012, 44(1): 32-36.
- MENG F T, HU Y Y. Analysis of Aircraft Structural Fatigue under Random Vibration Loadings Based on Information in Frequency Domain[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2012, 44(1): 32-36.
- [29] 孟鑫, 王燕涛, 袁建强, 等. 某柴油车空调管路的疲劳寿命分析[J]. *现代制造工程*, 2021(1): 157-161.
- MENG X, WANG Y T, YUAN J Q, et al. Fatigue Life Analysis of Air Conditioning Pipeline System of a Diesel Vehicle[J]. *Modern Manufacturing Engineering*, 2021(1): 157-161.
- [30] LALANNE C. *Mechanical Vibration and Shock Analysis: Volume 4, Fatigue Damage*[M]. 3rd Edition. New York: John Wiley & Sons, Inc 2014.
- [31] GIUCLEA M, MITU A M, SOLOMON O. Generation of Stationary Gaussian Time Series Compatible with Given Power Spectral Density[J]. *Proc Rom Acad Ser A*, 2014, 15: 292-299.