

加筋板在复杂载荷下的振动疲劳寿命分析

熊家林¹, 王轲¹, 周苏枫²

(1. 南京航空航天大学 机械结构力学及控制国家重点实验室, 南京 210016;

2. 中国飞机强度研究所, 西安 710065)

摘要: **目的** 研究航空工程结构部件——加筋板在准静态载荷和随机动载荷联合加载下的振动疲劳寿命预估问题。**方法** 针对某铣制铝合金缺口加筋板, 建立有限元模型, 并采用时域法进行静动联合加载下的疲劳寿命分析。首先将准静态载荷分解为静力与正弦激励, 以静力结果作为平均应力修正 $S-N$ 曲线, 再采用随机响应分析计算动载荷单独作用下结构危险点的应力 PSD 函数, 通过逆傅里叶变换法, 提取随机加载过程中的时域信号后, 应用 Von Mises 等效准则, 将其与正弦激励时域样本进行叠加, 得到疲劳分析应力谱, 再结合 Miner 线性累积理论和雨流循环计数法, 计算得加筋板结构静动联合加载下的疲劳寿命。**结果** 通过有限元仿真分析计算, 得到加筋板在静动载荷共同作用下的疲劳寿命, 对比试验寿命, 误差基本在两倍界以内。**结论** 由仿真与试验的结果对比说明, 该方法可以有效预估试验件在静动载荷联合加载下的疲劳寿命, 并能进一步推广到类似载荷下的疲劳寿命预估问题。

关键词: 加筋板; 复杂载荷; Von Mises 应力; 振动疲劳; 寿命预测

中图分类号: TJ85

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)09-0012-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.09.003

Vibration Fatigue Life Analysis of Stiffened Plates under Complex Loads

XIONG Jia-lin¹, WANG Ke¹, ZHOU Su-feng²

(1. State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. China Aircraft Strength Research Institute, Xi'an 710065, China)

ABSTRACT: This paper aims to study the vibration fatigue life prediction of aeronautical engineering structural component-stiffened plate under the combined loading of quasi-static load and random dynamic load. A finite element model is established for a milled aluminum alloy notched reinforced plate, and the fatigue life analysis under combined static and dynamic loading is carried out by using the time domain method. Firstly, the quasi-static load is decomposed into static force and sinusoidal excitation, and the static force result is used as the average stress to correct the $S-N$ curve, and then the random response

收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-07-30

Received: 2022-06-24; Revised: 2022-07-30

基金项目: 国家自然科学基金(51775270); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51775270); Jiangsu University Advantageous Discipline Construction Project Funding Project

作者简介: 熊家林(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为结构疲劳寿命预估。

Biography: XIONG Jia-lin (1998-), Male, Postgraduate, Research focus: structural fatigue life prediction.

通讯作者: 王轲(1967—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为复杂结构动力学。

Corresponding author: WANG Ke (1967-), Male, Doctor, Associate professor, Research focus: complex structural dynamics.

引文格式: 熊家林, 王轲, 周苏枫. 加筋板在复杂载荷下的振动疲劳寿命分析[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 012-017.

XIONG Jia-lin, WANG Ke, ZHOU Su-feng. Vibration Fatigue Life Analysis of Stiffened Plates under Complex Loads[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 012-017.

analysis is used to calculate the stress PSD function of the dangerous point of the structure under the action of dynamic load alone. After the time domain signal in the random loading process is extracted by the inverse Fourier transform method, the Von Mises equivalent criterion is applied to superimpose it with the sinusoidal excitation time domain sample to obtain the fatigue analysis stress spectrum. Combined with Miner's linear accumulation theory and the rain flow cycle counting method, the fatigue life of stiffened plate structure under combined static and dynamic loading is calculated. Through finite element simulation analysis and calculation, the vibration fatigue life of the stiffened plate under the combined action of static and dynamic loads is obtained, and the life error of the comparative test is basically within twice the bounds. The comparison between the calculation and the experimental results shows that the method can effectively predict the fatigue life of the test specimen under the combined static and dynamic load, and can be further extended to the fatigue life prediction problem under similar loads.

KEY WORDS: stiffened plate; complex load; Von Mises stress; vibration fatigue; life prediction

在航空航天领域, 振动疲劳是引起结构破坏与失效的主要因素之一^[1]。加筋板作为飞机承载结构的基本构件, 组成机身蒙皮、隔框、机翼和尾翼翼面等部件, 在气流扰动、突风载荷、着陆撞击以及特殊机动等环境载荷作用下, 部件易出现振动疲劳, 从而导致结构断裂或产品失效^[2]。为应对疲劳失效问题, 国内外学者开展了一系列关于振动疲劳的研究。Przekop 等^[3]基于雨流计数法及累计损伤理论, 采用不同的平均应力模型对铝合金板进行了疲劳寿命估算。胡海涛等^[4]根据应变响应建立了随机激励下铝板的疲劳损伤模型, 并改进了失效准则。周凌波^[5]分别采用时域法与频域法对加筋板等航空典型结构件进行了随机激励下的振动疲劳寿命计算, 并比较试验结果, 进行了验证与分析。

目前, 对恒定幅值与变幅循环载荷对应的结构疲劳寿命预估方法已经日渐成熟, 但航空飞行器在工作过程中常常受到准静态载荷与动态载荷的共同作用, 受静拉伸载荷影响, 结构微观裂纹被拉伸, 晶粒结构削弱, 同时, 在多轴载荷作用下等效应力幅值提高, 导致疲劳裂纹扩展速率增大^[6]。经典振动疲劳算法(如 Dirlik 法等)不适用于此类寿命预估^[7], 为综合考虑静动载荷联合加载的影响, 本文以铝合金加筋板为研究对象, 建立有限元模型, 由谱响应分析得到关键点的功率谱密度函数, 再通过逆傅里叶变换法提取结构动态响应的时域历程曲线, 并与准静态载荷下的时域样本叠加, 雨流循环处理后, 得到用于寿命预估的应力谱, 同时考虑平均应力效应, 结合 Goodman 公式修正 S-N 曲线, 进而计算出结构的疲劳寿命。

1 理论分析

1.1 时域模拟方法

通过频率响应分析可求得随机动载荷下结构的应力功率谱密度函数, 将 PSD 函数曲线转换成载荷时间历程, 即可进一步计算结构疲劳寿命^[8]。常用的时域模拟方法有三角级数法、线性滤波法、逆傅里叶

变换法等, 本文选用逆傅里叶变换法, 因为它基于功率谱离散数值模拟方法建立, 而且比三角级数法精度更高^[9-10]。首先对随机过程的功率谱密度函数进行离散采样, 并设置功率谱密度函数的频率的上限 f_u 和下限 f_l , 采样时间间隔为 Δt , 采样时间长度为 T 。由于采样点数必须是 2 的整数幂, 故首先确定采样点数 N :

$$2^{m-1} < N < 2^m \quad (1)$$

由此可以确定实际采样点数 N_s 、实际总采样时间 T_r 和频率间隔 Δf :

$$N_s = 2^m, T_r = N_s \Delta t, \Delta f = \frac{1}{T_r} \quad (2)$$

再由频率上、下限得到其对应的采样点数:

$$N_l = \frac{f_l}{\Delta f}, N_u = \frac{f_u}{\Delta f} \quad (3)$$

当满足采样定理时, 可以推出:

$$N_u < \frac{N_s}{2} \quad (4)$$

确定采样点数后, 可构造出频谱, 对应时域信号 $x(n)$ 的频谱幅值 $X(k)$ 为:

$$|X(k)| = |\text{DFT}[x(n)]| = N_s \sqrt{S(f_k) \Delta f}, k = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (5)$$

式中: DFT 表示离散傅里叶变换; N_s 为实际采样点数; Δf 为频率间隔。随机信号频谱的相位具有随机性, 通过在 (0,1) 内生成均匀随机序列 $\{u_k\}$, 从而生成在 (0, 2π) 内均匀分布的随机序列 $\{\phi_k\}$:

$$\phi_k = 2\pi u_k, k = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (6)$$

随机信号频谱前半部分表示为:

$$X(k) = \phi_k |X(k)| = \phi_k K_s \sqrt{S(f_k) \Delta f}, k = 0, 1, 2, \dots, N_s/2 \quad (7)$$

根据频谱对称性推导得到完整的 $X(k)$, 再进行逆傅里叶变换可得到其对应的时域随机信号:

$$x(n) = \frac{1}{K_s} \sum_{k=0}^{K_s-1} X(k) e^{j2\pi k n / K_s}, n = 0, 1, 2, \dots, N_s - 1 \quad (8)$$

1.2 平均应力修正及多轴等效

当结构承受准静态拉伸载荷作用时，应力比 $R \neq -1$ ，载荷可等效为静态拉力与正弦激励的叠加。首先考虑静拉力的影响，将结构承受静力时危险点的应力看作是平均应力，利用平均应力模型修正材料的疲劳极限。从相关文献^[11-13]可知，Goodman 方程形式简单，且应用性强，故本文采用 Goodman 方程进行修正：

$$S_f = \frac{S_a}{(1 - S_m/\sigma_b)} \tag{9}$$

式中： S_f 为疲劳极限， S_a 为应力幅值； S_m 为应力均值， σ_b 为材料的强度极限。

当结构同时承受准静态载荷与随机动载荷时，危险部位一般表现为多轴应力状态。为考虑多轴应力的影响，本文采用 Von Mises 等效应力准则将多轴应力响应转化为单轴应力^[14]。在平面应力状态下，Von Mises 应力表示为：

$$\sigma_v^2 = \sigma_{eq}^2(t) = \sigma_{xx}^2(t) + \sigma_{yy}^2(t) - \sigma_{xx}(t)\sigma_{yy}(t) + 3\sigma_{xy}^2(t) \tag{10}$$

式中： σ_{eq} 为 Von Mises 等效应力； σ_{xx} 、 σ_{yy} 为正应力分量； σ_{xy} 为剪应力分量。

依据 Von Mises 等效准则，在经过 IFFT 变换得到随机激励下危险点的应力时间历程后，将其与准静态载荷中的正弦激励响应进行叠加，得到等效 Von Mises 应力响应谱。随后运用雨流计数法，对响应谱进行循环计数处理，再结合 Miner 线性损伤累积理论以及修正后的 S-N 曲线来预估结构的疲劳寿命。

根据上述疲劳寿命估算理论及方法，本文基于时域法完成静动联合加载下加筋板的疲劳寿命估算，具体工作流程如图 1 所示。

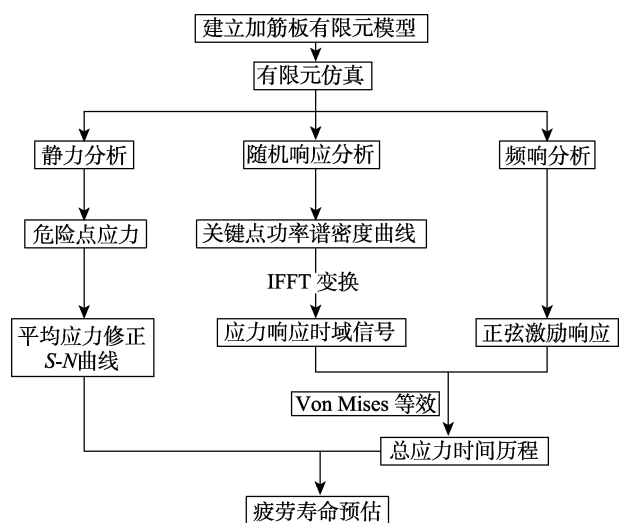


图 1 加筋板疲劳寿命仿真分析流程

Fig.1 Flow chart of fatigue life simulation analysis of stiffened plate

2 有限元分析

2.1 模型建立

采用 Hypermesh 软件，建立铣制加筋板有限元模型，如图 2 所示。该加筋板由两侧厚板、中间筋条以及底部薄板构成，壁板整体长 800 mm，宽 600 mm，总厚度为 20 mm。沿长度方向均布 3 根矩形筋条，筋条长宽为 500 mm×18.5 mm，厚度为 1.5 mm。中间筋条位于零件对称面上，其中部含有 V 形缺口，缺口深度为 5 mm，张开角度呈 45°，底部半径为 0.2 mm。构件材料均采用 7075-T7451 铝合金，弹性模量为 72 GPa，泊松比 0.3，密度为 2 800 kg/m³。

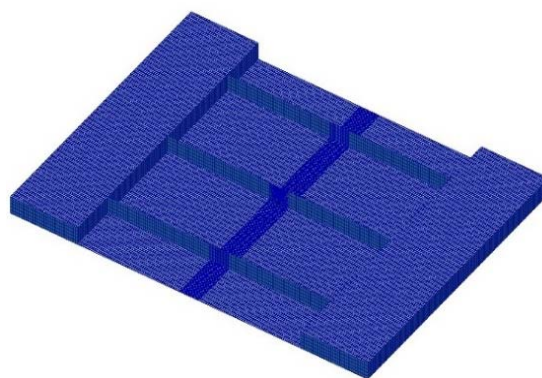


图 2 加筋板有限元模型

Fig.2 Finite element model of stiffened plate

为缩短计算时间，提高计算精度，忽略螺栓孔和铆钉的影响，底部薄板与筋条采用四节点壳单元，两端厚板选用八节点体单元，壳单元与体单元通过共节点连接，模型单元总数为 96 920，节点数为 99 191。由于在加筋板中部含有 V 形缺口，加载时存在明显的应力集中，具有较高的应力梯度^[15]。为准确计算缺口危险点应力值，对缺口部位及其附近网格进行加密处理，将缺口处单元尺寸控制在 0.1 mm×0.1 mm 左右，并以缺口处为起点，由细小网格逐渐向粗网格过渡，缺口处网格如图 3 所示。

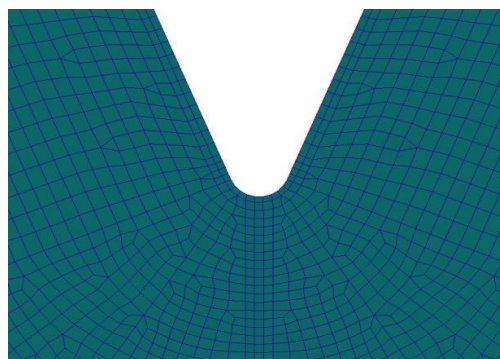


图 3 缺口附近网格

Fig.3 Grid diagram near the notch

2.2 静力及频响分析

根据实际载荷及约束条件, 固支加筋板结构左侧厚板, 简支右侧厚板, 放开 X 方向 (即平行于加强筋长度方向) 位移。结构右侧端面承受应力比为 0.02、频率为 0.5 Hz 的准静态载荷, 载荷大小为 5 t。将准静态载荷分解为静态拉力与正弦载荷, 载荷表达式为 $24\ 010\sin(\pi t)+24\ 990$, 两者分别通过 Nastran 静力分析和频率响应分析进行计算^[16]。

为模拟载荷加载方式, 选用 RBE2 单元将加筋板右端侧面的节点与板外一个中心点相连, 并在此中心点上施加载荷。通过静力学仿真计算, 得到试件在静态拉力作用下的响应及危险点应力大小, 将静力结果用于修正 $S-N$ 曲线。同时, 为得到正弦载荷作用下的结构响应, 对结构进行频响分析。首先在相同节点上施加大小为正弦激励幅值、范围为 0.1~1 Hz 的力平直谱, 分析得结构在稳态激励下的响应, 取 0.5 Hz 下的危险点应力幅值来构造时域样本, 用于后续寿命计算。由于缺口附近存在应力集中, 所以危险部位皆位于缺口根部, 静力分析和频响分析得出的危险点应力分别为 213.247、204.88 MPa。

2.3 随机响应分析

加筋板试件在工作过程中受到的载荷通常具有随机性, 为得到结构在随机载荷作用下的响应, 对试件进行随机响应分析^[17]。为模拟真实的载荷及边界条件, 将试件一端固支, 另一端简支, 并在垂直于板面的方向施加单位力激励, 加载频率范围为 120~155 Hz。采用模态叠加法进行频响分析, 模态阻尼系数为 0.023, 计算得应力响应的频响函数。之后以图 4 中试验实测的功率谱密度曲线作为随机振动输入条件, 分析得到结构动响应功率谱密度, 再由应力分布云图确定随机激励下危险点位置, 进而提取危险点的功率谱密度曲线, 用于计算疲劳寿命。危险点 RMS 分布云图如图 5 所示。

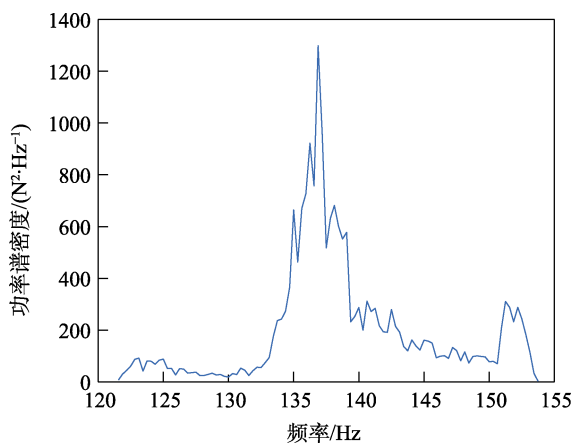


图 4 输入随机载荷功率谱
Fig.4 Input random load power spectrum

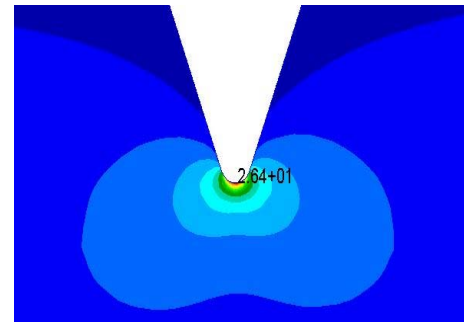


图 5 危险部位应力 RMS 值分布
Fig.5 RMS value of stress at dangerous parts

3 疲劳寿命分析

根据局部应力应变法疲劳理论可知, 材料失效发生在应力均方根值最大的临界单元处, 此处材料的失效寿命可认为是结构的疲劳寿命^[18]。从应力均方根响应云图中可以看出, 铝合金加筋板中应力 RMS 值最大的单元是筋条缺口根部中间单元, 提取该单元处应力响应 PSD 曲线, 并通过逆傅里叶变换法得到危险部位应力-时间曲线。

试验时, 加筋板左端固定夹持, 右端简支于夹具上, 采用非对称正弦波加载, 同时在板中部施加垂直于板面的随机载荷, 故计算振动疲劳寿命时需考虑静动联合加载造成的疲劳损伤。以 5 t 准静态载荷叠加随机激励为例, 首先根据静力分析结果进行 $S-N$ 曲线修正, 已知 7075-T7451 铝合金 $S-N$ 曲线^[19]的幂函数表达式系数为 $C=1.03\times 10^{29}$, $m=9.62$, 采用 Goodman 公式修正后得 $C=5.63\times 10^{26}$ 。修正后, 对随机动载荷作用下的危险点功率谱密度进行时域模拟, 得到的应力-时间历程如图 6 所示。同时, 根据 0.5 Hz 下危险部位频响分析应力结果, 编制其时域内的正弦应力谱。最后, 采用 Von Mises 等效应力准则将各个应力分量时域响应叠加, 求解出静动联合加载下的等效 Von Mises 应力-时间历程, 如图 7 所示。

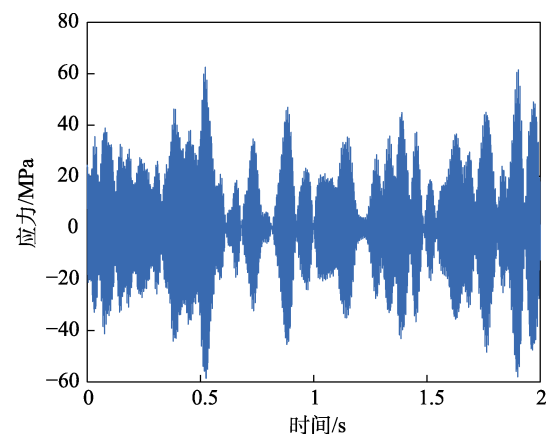


图 6 随机载荷下的危险点应力时间历程
Fig.6 Stress time history of dangerous point under random load

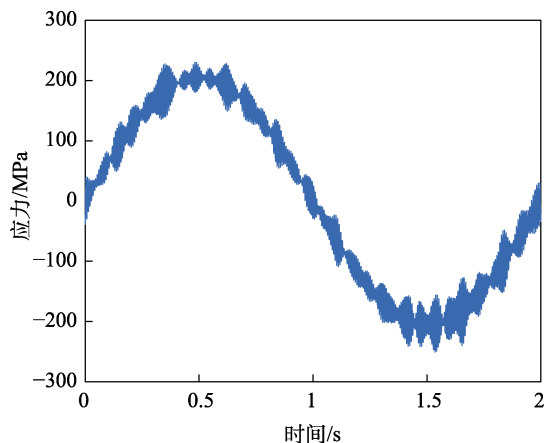


图7 叠加后的应力时间历程

Fig.7 Stress time history after superposition

采用雨流计数法对应力时域历程曲线进行循环计数处理。该方法以转换前后塑性功相同为准则,能如实再现变幅循环加载历程^[20-25]。通过雨流计数,可以逐次将构成较小滞后回线的较小循环从整个应力-时间历程中提取出来,并重新组合成全循环,使转化前后的载荷谱对材料所构成的疲劳损伤相互等效。将处理后的应力循环统计结果与修正后的材料疲劳寿命曲线代入 Miner 线性累计理论,可计算得静动联合加载下结构的疲劳寿命。对比试验结果,该方法计算疲劳寿命的误差基本在两倍界以内,计算结果与试验寿命见表 1。

表 1 不同工况下试验结果与寿命预测
Tab.1 Test results and life prediction under different working conditions

加载工况	试验 寿命/次	本文仿真 寿命/次	误差/ %
5 t 准静态载荷	21 938	32 433	47.83
5 t 准静态+随机载荷	9 912	7 040	28.97

4 结语

本文采用有限元方法,建立了铣制加筋板的有限元分析模型,并针对准静态与随机载荷联合加载的情况提出一种结构疲劳寿命预估方法。将准静态载荷分解为静力与正弦激励,从平均应力的角度来计算静应力情况下的疲劳极限,并修正 $S-N$ 曲线。通过 IFFT 变换将危险点 PSD 曲线转化为时域信号,并采用 Von Mises 应力准则将其与准静态时域响应合成疲劳载荷谱。最后,基于修正后的 $S-N$ 曲线,运用雨流循环计数法及线性累积损伤准则计算加筋板试件的疲劳寿命。对比试验所测与仿真分析的结果,寿命误差处于两倍界范围内,验证了此方法分析计算的可行性。该分析方法可用于静动联合加载下的疲劳耐久性设计和分析中,具有一定的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 王彬文, 陈先民, 苏运来, 等. 中国航空工业疲劳与结构完整性研究进展与展望[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 524651.
WANG Bin-wen, CHEN Xian-min, SU Yun-lai, et al. Research Progress and Prospect of Fatigue and Structural Integrity for Aeronautical Industry in China[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 524651.
- [2] 张钊, 张万玉, 胡亚琪. 飞机结构振动疲劳分析研究进展[J]. 航空计算技术, 2012, 42(2): 60-64.
ZHANG Zhao, ZHANG Wan-yu, HU Ya-qi. Development of Aircraft Structure Vibration Fatigue Life Study[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(2): 60-64.
- [3] PRZEKOP A, RIZZI S A, SWEITZER K A. An Investigation of High-Cycle Fatigue Models for Metallic Structures Exhibiting Snap-through Response[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(9): 1579-1598.
- [4] HU Hai-tao, LI Yu-long, SUO Tao, et al. Fatigue Behavior of Aluminum Stiffened Plate Subjected to Random Vibration Loading[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2014, 24(5): 1331-1336.
- [5] 周凌波. 航空典型结构件的随机振动疲劳寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
ZHOU Ling-bo. Random Vibration Fatigue Life Analysis of Aircraft Typical Structures[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2014.
- [6] 韩思宇. 多晶体内疲劳裂纹的多尺度扩展模型[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
HAN Si-yu. Multi-Scale Propagation Model of Fatigue Crack in Polycrystal[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [7] 张春玉, 张猛, 胡忠安. 基于随机振动方法的轨道客车设备疲劳分析[J]. 铁道技术监督, 2016, 44(10): 20-23.
ZHANG Chun-yu, ZHANG Meng, HU Zhong-an. Fatigue Analysis of Railway Vehicles Equipment Based on Random Vibration Method[J]. Railway Quality Control, 2016, 44(10): 20-23.
- [8] 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 Chun-yu, MU Rang-ke, MA Jun-feng, 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.
- [9] 杨中梁. 卫星的随机振动疲劳寿命预测方法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
YANG Zhong-liang. Research on Random Vibration Fatigue Life Prediction Method Based on the Satellite[D]. Changchun: Jilin University, 2017.
- [10] 姜丽丽. 基于傅里叶反变换的路面随机激励时域建模与仿真[D]. 长春: 吉林大学, 2007.
JIANG Li-li. Modeling and Simulation in Time Domain

- for Random Road Excitation Based on Inverse Fourier Transform[D]. Changchun: Jilin University, 2007.
- [11] 沙云东, 郭小鹏, 张军. 基于应力概率密度和功率谱密度法的随机声疲劳寿命预估方法研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 162-165.
SHA Yun-dong, GUO Xiao-peng, ZHANG Jun. Random Sonic Fatigue Life Prediction Based on Stress Probability Density and Power Spectral Density Method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2010, 29(1): 162-165.
- [12] 张莉, 唐立强, 付德龙. 基于损伤累积理论的多轴疲劳寿命预测方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(4): 123-125.
ZHANG Li, TANG Li-qiang, FU De-long. An Evaluation Method of Fatigue Life under Multi-Axial Loading Based on Damage Accumulation Theory[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(4): 123-125.
- [13] 陈明, 邵飞, 俞海涛, 等. 基于平均应力的局部应力应变法疲劳寿命预测模型研究[J]. 装备制造技术, 2020(7): 57-60.
CHEN Ming, SHAO Fei, YU Hai-tao, et al. Research on Fatigue Life Prediction Model of Local Stress-Strain Method Based on Average Stress[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(7): 57-60.
- [14] 毕鑫. 基于多轴应力等效的振动疲劳寿命预估[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2019.
BI Xin. Life Prediction of Vibration Fatigue Based on Multiaxial Stress Equivalent[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2019.
- [15] 刘香, 王延荣, 田爱梅, 等. 考虑尺寸效应的缺口疲劳寿命预测方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(2): 429-437.
LIU Xiang, WANG Yan-rong, TIAN Ai-mei, et al. A Life Prediction Method for Size Effects on Notched Fatigue[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(2): 429-437.
- [16] 张颖, 王轲. 某梁结构静动联合加载疲劳研究试验件设计与分析[J]. 装备环境工程, 2018, 15(9): 12-15.
ZHANG Ying, WANG Ke. Design and Analysis of Test Pieces for Static and Dynamic Combined Fatigue of a Beam Structure[J]. Equipment Environmental Engineering, 2018, 15(9): 12-15.
- [17] 权凌霄, 赵文俊, 于辉, 等. 随机振动载荷作用下航空液压管路疲劳寿命数值预估[J]. 液压与气动, 2017(6): 43-48.
QUAN Ling-xiao, ZHAO Wen-jun, YU Hui, et al. Numerical Prediction for Aviation Hydraulic Pipeline Fatigue Life under Random Vibration Loading[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2017(6): 43-48.
- [18] 祝青钰, 隋明丽, 韩峰, 等. 基于修正的局部应力应变法估算连接件疲劳寿命[J]. 力学季刊, 2013, 34(3): 480-486.
ZHU Qing-yu, SUI Ming-li, HAN Feng, et al. Prediction of Fastenings Fatigue Life Based on Modified Local Stress-Strain Method[J]. Chinese Quarterly of Mechanics, 2013, 34(3): 480-486.
- [19] 任旭东, 姜大伟, 张永康, 等. 7050-T7451 铝合金试件的疲劳安全寿命估算[J]. 航空动力学报, 2011, 26(1): 185-190.
REN Xu-dong, JIANG Da-wei, ZHANG Yong-kang, et al. Estimation of Fatigue Safe Lives of 7050-T7451 Aluminum Alloy Samples[J]. Journal of Aerospace Power, 2011, 26(1): 185-190.
- [20] 田纵横, 甘进, 王一雯, 等. 基于雨流计数法的高低频复合疲劳试验研究[J]. 船舶工程, 2018, 40(10): 27-34.
TIAN Zong-heng, GAN Jin, WANG Yi-wen, et al. Study of High-and-Low Frequencies Fatigue Test Based on Rainflow Counting Method[J]. Ship Engineering, 2018, 40(10): 27-34.
- [21] 刘芬, 王建明, 李潇潇. 动车水箱焊缝随机振动疲劳寿命的时域法研究[J]. 材料保护, 2020, 53(8): 63-67.
LIU Fen, WANG Jian-ming, LI Xiao-xiao. Study on Random Vibration Fatigue Life of Weld Seam in Water Tank of Electric Multiple Unit Based on Time Domain Method[J]. Materials Protection, 2020, 53(8): 63-67.
- [22] 李斌潮, 唐靖, 殷之平. 基于频率雨流计数法的发动机振动疲劳载荷谱编制[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 24-29.
LI Bin-chao, TANG Jing, YIN Zhi-ping. The Load Spectrum Compilation of Engine Vibration Fatigue Based on Frequency Rain-Flow Counting Method[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 24-29.
- [23] 陈华, 胡伟平, 马爱军, 等. 基于振动响应特性的结构随机振动损伤分析[J]. 机械设计与研究, 2017, 33(3): 21-25.
CHEN Hua, HU Wei-ping, MA Ai-jun, et al. The Structural Fatigue Damage Analysis of Random Vibration Based on Response Characteristics[J]. Machine Design & Research, 2017, 33(3): 21-25.
- [24] 于志达, 欧阳昱, 卢耀辉, 等. 动态载荷作用下大型复杂结构的振动疲劳分析方法综述[J]. 装备环境工程, 2019, 16(11): 13-18.
YU Zhi-da, OUYANG Yu, LU Yao-hui, et al. Review of Vibration Fatigue Analysis Methods for Large Complex Structures under Dynamic Loads[J]. Equipment Environmental Engineering, 2019, 16(11): 13-18.
- [25] 陈震. 金属材料缺口件疲劳寿命预测方法研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2019.
CHEN Zhen. Study on Fatigue Life Prediction Method for Notched Metal Material Parts[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2019.

责任编辑: 刘世忠