

连接件振动疲劳寿命分析的应力严重系数法*

华一畅¹, 姚卫星^{1,2}, 黄杰¹

(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. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室 南京, 210016)

摘要 针对连接件振动疲劳涉及的应力集中以及接触非线性问题, 借鉴准静态疲劳分析的应力严重系数(stress severity factor, 简称 SSF)法对于应力集中以及接触问题的分析方式, 将其推广到随机振动, 采用等效 SSF 模型计算应力响应, 提出连接件振动疲劳寿命分析的 SSF 法。算例验证结果显示, 2 个载荷谱激励下, 振动疲劳寿命的计算误差分别为 27.3% 和 30.7%。结果表明, SSF 法具有快速、高精度的特点, 能够达到工程中快速评估连接件振动疲劳寿命的需求。

关键词 连接件; 振动疲劳; 应力严重系数法; 寿命估算
中图分类号 O324; TH128

引言

机械结构在振动环境中工作时, 振动疲劳强度是结构设计的关键因素之一^[1]。由于连接件需要在结构上开孔, 造成结构的不连续, 孔边存在应力集中问题, 易发生疲劳失效。在工程设计过程中, 采用快速有效的方法对连接件进行振动疲劳寿命估算至关重要。目前, 对于线性结构, 一般采用频域法进行疲劳寿命评估^[2-4], 通过从频域中定义加载过程, 计算得到危险部位应力谱密度, 采用应力幅值概率密度分布模型结合疲劳寿命累积损伤理论计算振动疲劳寿命。对于单自由度非线性随机振动, 一般采用随机平均法^[5]、Fokker-Planck-Kolmogorov (FPK) 方程法^[6]、Monte Carlo 法^[7]等方法进行研究, 但对于非线性复杂结构的振动疲劳寿命评估, 目前尚缺乏有效的工程方法。

飞机是通过连接件将大量零部件连接起来的复杂结构, 连接件振动疲劳涉及接触非线性, 不能通过频域法计算^[8]。以往有关连接件振动疲劳的研究主要是通过试验方法来来进行。Grimsmo 等^[9]使用静态和动态加载的方式对梁柱螺栓连接件结构进行疲劳试验, 对比了不同加载方式对失效模式的影响。Eriten 等^[10]通过模态试验分析螺栓组中螺栓数量以及螺栓的分布形式对结构阻尼和结构振型的影响, 为螺栓组的动力学设计提供指导。高金贺^[11]对 LY12 铝合金材料铆接接头以及 TC4 钛合金焊接接头进

行振动疲劳试验, 分析了接头处疲劳裂纹的扩展方式对试验件疲劳寿命的影响。肖寿庭等^[12]研究了随机载荷激励下不同配合间隙螺栓连接件的疲劳寿命。张振等^[13]通过试验, 研究了螺栓的刚度、阻尼随着损伤演化的变化规律, 提出螺栓长期耐久性的设计方法。除了以上试验方法, 文献[14-15]通过时域方法计算连接件在随机载荷激励下的响应。时域法一般采用谐波叠加法获得随机振动的时域激励样本, 通过瞬态动力学方法得到结构危险部位应力响应时间历程, 运用雨流计数法获得每次循环的应力峰谷值, 计算危险部位振动疲劳寿命。时域激励样本的取样频率和取样长度决定了时域法的计算精度^[16]。由于瞬态动力学分析计算量大, 耗时较长, 因此无法满足工程需求。

笔者提出一种连接件振动疲劳寿命分析方法, 该方法基于准静态疲劳的 SSF 法对于应力集中以及接触问题的分析方式, 将其推广到随机振动, 形成了连接件振动疲劳寿命分析的 SSF 法。经过算例分析验证, 振动疲劳寿命分析速度快, 精度高, 达到工程中快速评估连接件振动疲劳寿命的需求。

1 振动疲劳寿命分析的 SSF 法

1.1 准静态疲劳的 SSF 法

SSF 是指连接件孔边局部最大应力与名义应力

* 国家自然科学基金资助项目(52075244)

收稿日期: 2020-10-14; 修回日期: 2020-12-22

的比值,是一个反映连接件孔疲劳品质的无量纲参数,文献[17]对SSF法做了详细介绍,该方法为一种计算常幅加载下连接件疲劳寿命的工程方法。从物理概念上讲,SSF是一个考虑了孔加工质量和配合情况的应力集中系数,因此其可看作为名义应力法中理论应力集中系数经过孔表面质量系数与孔填充系数修正得到,即

$$SSF = \alpha\beta K_T \quad (1)$$

其中: K_T 为理论应力集中系数,一般采用3维接触有限元分析后获得的拟合公式计算^[18]; α 为孔表面质量系数; β 为孔填充系数。

疲劳缺口系数 K_f 是指应力比 $R=-1$ 时光滑试件疲劳强度和缺口试件疲劳强度的比值。对于连接件,在疲劳载荷的反复作用下,孔边发生塑性变形,这导致局部应力的重新分配,缓解了应力集中的严重程度,此时危险部位的实际应力与采用SSF推导出的应力差异很大。笔者假设孔边缺口附近的应力梯度是一个定值,采用距离缺口根部为 a 处的应力描述缺口的疲劳强度,对SSF进行了修正。连接件的 K_f 计算公式为

$$K_f = 1 + \frac{SSF - 1}{1 + a/\rho} \quad (2)$$

其中: a 为材料常数,与材料极限强度相关,可以通过文献[17]中曲线查取或者经验公式计算获得; ρ 为缺口根部曲率半径。

由 K_f 和名义应力的乘积,再结合对应材料 $K_T=1$ 的S-N曲线,即可得到疲劳寿命。

1.2 振动疲劳载荷下的SSF法

对于任意一个连接件,可以等效为一个无孔完整件通过两节点采用弯曲单元连接上下板中面对应的分析模型。振动疲劳等效SSF模型如图1所示。

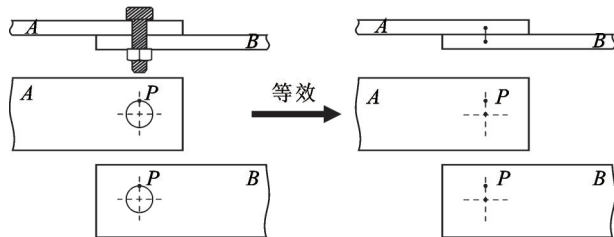


图1 振动疲劳等效SSF模型

Fig.1 Equivalent SSF model of vibration fatigue

首先确定疲劳危险点 P ,对于过渡配合, P 点位于孔边接近于 90° 处,在过盈配合或间隙配合时,可能偏离 $2\sim 5^\circ$,但最大应力相差不多^[17]。因此,笔者

认为取 90° 处对于不同的配合情况误差不会太大。

根据图1所示的等效模型,对无孔的完整模型进行随机振动分析,获取 P 点的应力响应谱,该谱即为连接件振动疲劳名义应力响应谱,由此计算名义应力幅值分布 $p(S)$,连接件疲劳寿命可以采用式(3)来计算,即

$$T = \frac{1}{v \int_{S_{se}/K_f}^{\infty} \frac{p(S)}{N(SK_f)} dS} \quad (3)$$

其中: S_{se} 为材料疲劳极限; v 为单位时间应力循环数, $v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$, m_2 和 m_4 分别为名义应力响应谱2阶、4阶谱距。

K_f 根据式(2)计算, $p(S)$ 一般采用Dirlik模型^[19]或者王明珠模型^[20]获得,王明珠模型的表达式为

$$p(S) = \sum_{i=1}^3 w_i \alpha_i \beta_i^{-\alpha_i} S^{\alpha_i-1} \exp\left(-\left(\frac{S}{\beta_i}\right)^{\alpha_i}\right) \quad (4)$$

其中: α_i 和 β_i 分别为Weibull分布的形状参数和尺度参数; w_i 为权重系数; γ_i 为不规则因子。

α_i, β_i, w_i 和 γ_i 的经验表达式为

$$\begin{cases} \alpha_1 = 2 - \epsilon \\ \alpha_2 = \alpha_3 = 2 \\ \beta_1 = \sqrt{2} \sigma (\gamma_1 - \gamma_2) / (\gamma_1 + \gamma_2) \\ \beta_2 = \sqrt{2} \sigma \gamma_2 (1 - \gamma_1) / (1 - \gamma_2) \\ \beta_3 = \sqrt{2} \sigma \\ w_1 = 2\sqrt{2} \gamma_2 (\gamma_1 - \gamma_2) / (1 + \gamma_2^2) \\ w_2 = \gamma_2 (1 - \gamma_2 - w_1 + w_1^2) / (1 - 2\gamma_2 + \gamma_1 \gamma_2) \\ w_3 = 1 - w_1 - w_2 \end{cases} \quad (5)$$

其中: ϵ 为带宽系数。

连接件振动疲劳寿命分析流程如图2所示,具体步骤如下:

1) 建立如图1所示的等效SSF模型,根据模态试验结果进行模型校验;

2) 对等效SSF模型进行随机振动分析,确定危险部位,提取危险部位的名义应力响应谱;

3) 基于名义应力响应谱,采用王明珠模型计算危险部位名义应力幅值概率密度函数 $p(S)$;

4) 通过有限元方法或者经验公式计算应力集中系数 K_T ,经过 α 与 β 修正得到连接孔的应力严重系数SSF,根据式(2)计算连接孔的缺口疲劳系数 K_f ;

5) 根据线性累积损伤理论,结合材料S-N曲线,采用式(3)估算连接件振动疲劳寿命。

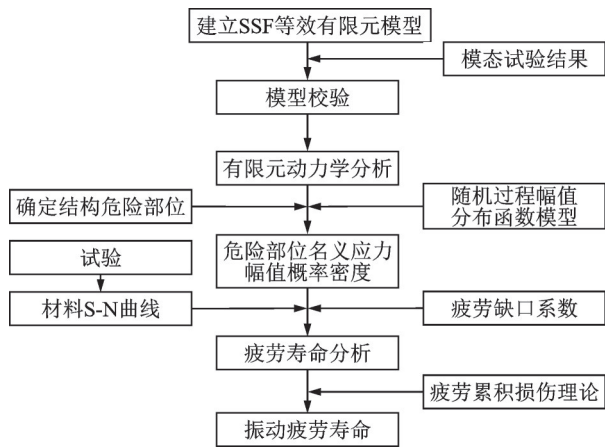


图 2 连接件振动疲劳寿命分析流程

Fig.2 Analysis process of vibration fatigue life of joints

2 算例分析

2.1 试验件与试验结果

连接件振动疲劳试验参考文献[21],试验件为双排螺栓连接起来的2块连接板,双排螺栓连接板如图3所示。右侧接头为厚度2.84 mm的304不锈钢板材,左侧带板为厚度4 mm的LY12CZ铝合金板材。板间连接螺栓是4个6 mm标准螺栓,材料为30CrMnSiA合金钢。带板左侧4 mm的孔加装配重块质量0.17 kg。

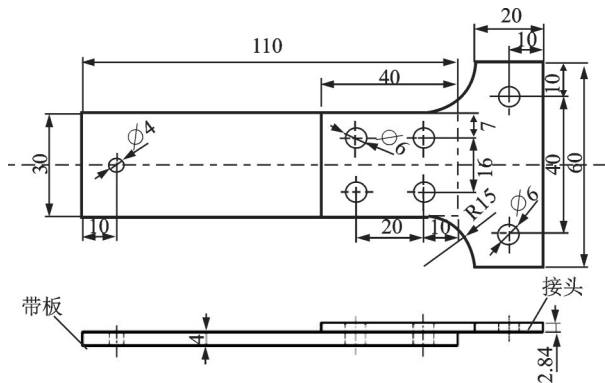


图 3 双排螺栓连接板(单位:mm)

Fig.3 Double row bolted plate(unit:mm)

使用压条和螺栓将连接板通过右端2个直径为6 mm的孔固支在振动台上,压条边缘对齐接头过渡圆弧右端。图4为试验现场图。

模态试验采用锤击法,双排螺栓试验件模态试验结果如表1所示,其中模态阻尼比通过半功率谱密度法计算得到。

振动疲劳试验载荷谱分别为 S_{L1} 、 S_{L2} ,双排螺栓连接件振动疲劳载荷谱如图5所示。疲劳破坏部位在304不锈钢接头靠近夹持端的一排螺栓孔边处,表2为双排螺栓连接件振动疲劳试验寿命结果。

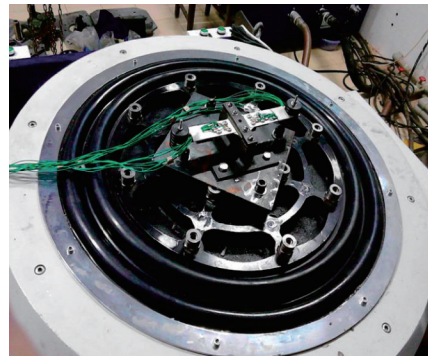


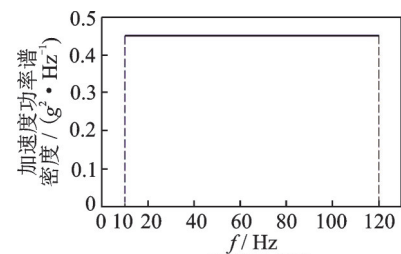
图 4 试验现场图

Fig.4 Test site diagram

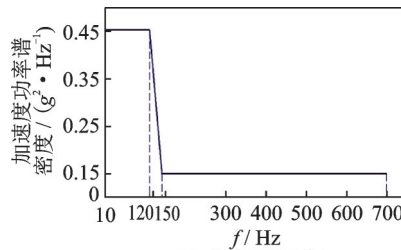
表 1 双排螺栓试验件模态试验结果

Tab.1 Modal test results of double-row bolts specimen

阶数	固有频率/Hz	模态阻尼比/%
1	70.11	6.64
2	641.12	1.53



(a) 疲劳载荷谱 S_{L1}
(a) Fatigue load spectrum S_{L1}



(b) 疲劳载荷谱 S_{L2}
(b) Fatigue load spectrum S_{L2}

图 5 双排螺栓连接件振动疲劳载荷谱

Fig.5 Vibration fatigue load spectrum of double-row bolted joints

表 2 双排螺栓连接件振动疲劳试验寿命结果

Tab.2 Vibration fatigue test life results of double-row bolted joints

载荷谱	试验寿命	平均寿命
S_{L1}	182.19, 156.41, 197.23, 139.51	168.84
S_{L2}	137.55, 160.02, 116.37, 125.13	134.81

2.2 连接件有限元模型

2.2.1 有限元模型建立

根据图1所示的振动疲劳SSF法的等效方法建立完整板连接件有限元模型,SSF法等效有限元模

型如图6所示。接头右侧固支端通过多点约束(multipoint constraint, 简称MPC), 将固支端所有节点与创建的非独立节点耦合, 约束非独立节点除了 z 方向平动的所有自由度, 施加 z 方向的加速度, 以此来模拟基础激励的加载。螺栓连接采用等效弯曲单元连接上下2板中面对应的节点简化。配重通过在带板的上下2个面对称布置4个相同的集中质量进行模拟。

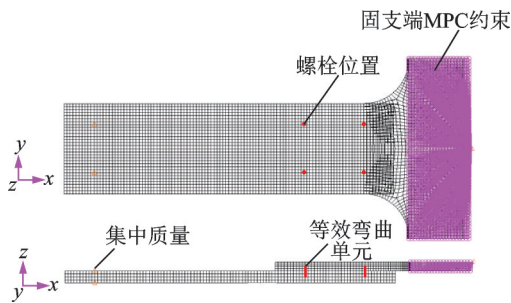


图6 SSF法等效有限元模型
Fig.6 Equivalent finite element model of SSF method

2.2.2 有限元模型校验

为了验证有限元模型建模质量, 确保模型的有效性以及计算精度, 一般需要对结构的固有频率进行校验, 将结构前2阶固有频率作为结构有限元模型校验的标准, 表3为固有频率试验值与计算值比较。结构1阶和2阶模态分别如图7, 8所示。

表3 固有频率试验值与计算值比较

Tab.3 Comparison of test value and calculated value of natural frequency

阶数	试验结果/Hz	有限元结果/Hz	误差/%
1	70.11	71.4	1.8
2	641.12	626.9	2.2

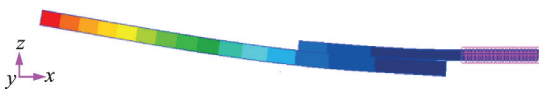


图7 结构1阶模态
Fig.7 First order mode of structure

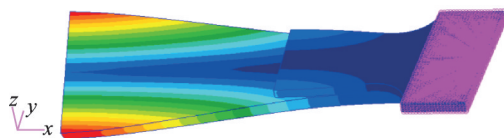


图8 结构2阶模态
Fig.8 Second order mode of structure

由表3可见, 结构1阶、2阶的固有频率试验值与计算值非常接近, 相对误差不超过3%。结构阻

尼根据锤击法试验结果, 与实际情况一致。经过校核, 该有限元模型反映了实际试验过程中连接件结构动力学特征, 可用于连接件振动疲劳寿命预测。

2.3 振动疲劳寿命分析

2.3.1 K_t 的计算

对于双排螺栓连接板, 在面外弯曲载荷作用下, 螺栓主要受到轴向拉压载荷, 横向剪力很小, 因此可以忽略螺栓剪力对孔边应力的影响, 此时孔边危险点应力集中系数近似等于带中心圆孔的有限宽板承受垂直于板平面的弯曲载荷时的应力集中系数^[22], 结合连接件孔细节尺寸, 得到孔边危险点毛面积应力集中系数 $K_T=2.41$ 。经过孔表面质量系数(铰孔, $\alpha=1.0$)和孔填充系数(螺栓连接件, $\beta=0.75$)的修正^[17], 应力严重系数 $SSF=1.81$ 。对于304不锈钢, $\sigma_b=570$ MPa, 根据文献[17]中曲线查取, $a=0.254$ mm, 孔边危险部位 $\rho=3$ mm, 代入式(2), 得到 $K_t=1.74$ 。

2.3.2 危险点名义应力功率谱计算

采用模态法进行频率响应分析, 根据频率响应分析结果计算结构随机振动响应, 载荷谱 S_{L1}, S_{L2} 激励下结构应力均方根值分别如图9和图10所示。

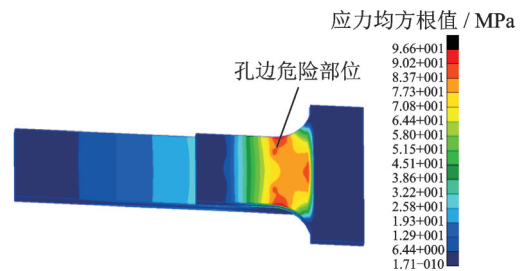


图9 载荷谱 S_{L1} 激励下结构应力均方根值
Fig.9 Root mean square value of structural stress under load spectrum S_{L1} excitation

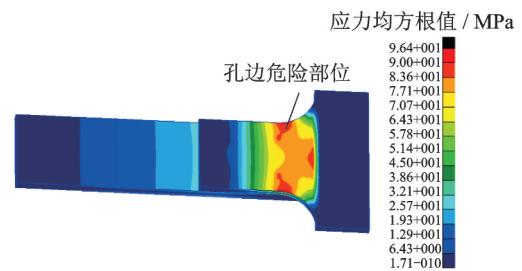


图10 载荷谱 S_{L2} 激励下结构应力均方根值
Fig.10 Root mean square value of structural stress under load spectrum S_{L2} excitation

载荷谱 S_{L1} 作用下, 危险点名义应力响应均方根值为 81.36 MPa; 载荷谱 S_{L2} 作用下, 危险点名义应力

响应均方根值为 80.73 MPa。载荷谱 S_{L1} , S_{L2} 激励下危险点名义应力谱分别如图 11 和图 12 所示。

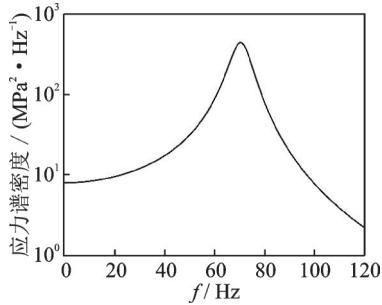


图 11 载荷谱 S_{L1} 激励下危险点名义应力谱

Fig.11 Nominal stress spectrum of danger point under load spectrum S_{L1} excitation

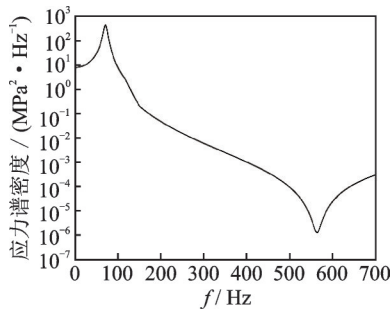


图 12 载荷谱 S_{L2} 激励下危险点名义应力谱

Fig.12 Nominal stress spectrum of danger point under load spectrum S_{L2} excitation

2.3.3 $p(S)$ 的计算

$p(S)$ 根据式 (4), (5) 王明珠模型获得, 载荷谱 S_{L1} 和 S_{L2} 激励下危险点名义应力幅值概率密度函数 $p(S)$ 如图 13 所示。

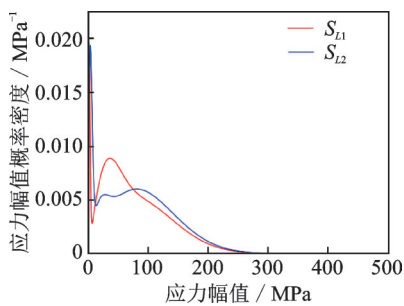


图 13 载荷谱 S_{L1} 和 S_{L2} 激励下危险点名义应力幅值概率密度函数 $p(S)$

Fig.13 Probability density function $p(S)$ of nominal stress amplitude at danger point under load spectrum S_{L1} and S_{L2} excitation

2.3.4 振动疲劳寿命计算

采用三参数 Weibull 公式 $N = S_f(S - S_{se})^b$ 描述材料的 S-N 曲线, 对于连接件, 失效部位材料为 304

不锈钢, $S_f = 2.24 \times 10^9$, $S_{se} = 159$ MPa, $b = -2$ 。根据式 (3) 计算连接件振动疲劳寿命, 表 4 为振动疲劳寿命计算结果。

表 4 振动疲劳寿命计算结果

Tab.4 Calculation results of vibration fatigue life

激励谱	试验寿命/min	计算寿命/min	误差/%
S_{L1}	168.84	122.7	27.3
S_{L2}	134.81	93.5	30.7

由表 4 可见, 疲劳寿命计算结果与试验寿命误差很小, 说明采用笔者提出的方法可以较好预测连接件疲劳寿命。在建模时采用 SSF 等效模型, 只需要建立完整件模型, 不需要建立孔边细节模型。采用频域法计算应力响应, 考虑了钉的填充作用和孔表面加工质量的影响, 寿命计算精度高。

该模型疲劳寿命计算流程耗时约 5 min, 时间主要集中在采用频域法计算危险点名义应力响应部分。对于相似复杂度的模型, 采用传统时域方法根据取样频率的不同计算时间最少为 1 h^[15]。因此, 说明本方法在保证计算精度的情况下相较于时域方法更加快速高效, 能够达到工程中快速评估连接件振动疲劳寿命的需求。

3 结 论

1) 针对连接件振动疲劳涉及的应力集中以及接触非线性问题, 笔者提出一种简化建模的方法, 采用没有开孔的完整板计算名义应力响应, 通过弯曲单元模拟螺栓连接。将准静态疲劳寿命分析的 SSF 法推广到振动疲劳寿命计算中, 形成了连接件振动疲劳寿命分析的 SSF 法。

2) 经过算例分析, 在 2 个载荷谱 S_{L1} 和 S_{L2} 激励下, 振动疲劳寿命的计算误差分别为 27.3% 和 30.7%。结果表明, 该方法计算精度高, 且相比于传统时域方法更加快速高效, 达到工程中预测连接件振动疲劳寿命的要求。

参 考 文 献

[1] MRŠNIK M, SLAVIČ J, BOLTEŽAR M. Frequency-domain methods for a vibration-fatigue-life estimation-application to real data[J]. International Journal of Fatigue, 2013, 47:8-17.

[2] BENASCIUTTI D, TOVO R. Spectral methods for lifetime prediction under wide-band stationary random processes[J]. International Journal of Fatigue, 2005,

- 27(8):867-877.
- [3] 李德勇,姚卫星. 缺口件振动疲劳寿命分析的名义应力法[J]. 航空学报, 2011, 32(11):2036-2041.
LI Deyong, YAO Weixing. Nominal stress approach for life prediction of notched specimens under vibration loading[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2011, 32(11):2036-2041. (in Chinese)
- [4] 王明珠,姚卫星. 随机振动载荷下缺口件疲劳寿命分析的频域法[J]. 南京航空航天大学学报, 2008(4): 489-492.
WANG Mingzhu, YAO Weixing. Frequency domain method for fatigue life analysis on notched specimens under random vibration loading[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2008(4): 489-492. (in Chinese)
- [5] ZHU W Q. Recent developments and applications of the stochastic averaging method in random vibration[J]. Applied Mechanics Reviews, 1996, 49:S72.
- [6] CAUGHEY T K, MA F. The exact steady-state solution of a class of non-linear stochastic systems[J]. International Journal of Non-Linear Mechanics, 1982, 17(3):137-142.
- [7] HARNPORNCHAI N, PRADLWARTER H J, SCHNÖLLER G I. Stochastic analysis of dynamical systems by phase-space-controlled Monte Carlo simulation[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 1999, 168(1):273-283.
- [8] ROSS M, STEVENS B, KHAN M, et al. Fastener fatigue analysis using time domain methods for multiaxial random vibration[C]//Special Topics in Structural Dynamics. Orlando:SEM, 2019:17-36.
- [9] GRIMSMO E L, CLAUSEN A H, LANGSETH M, et al. An experimental study of static and dynamic behaviour of bolted end-plate joints of steel[J]. International Journal of Impact Engineering, 2015, 85:132-145.
- [10] ERITEN M, KURT M, LUO G, et al. Nonlinear system identification of frictional effects in a beam with a bolted joint connection[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2013, 39(1/2):245-264.
- [11] 高金贺. 飞机结构联接件振动损伤特性研究[D]. 沈阳: 沈阳航空工业学院, 2006.
- [12] 肖寿庭,傅祥炯,刘一兵. 随机载荷作用下锥形螺栓干涉配合的疲劳寿命增益[J]. 航空学报, 1993, 14(3):205-210.
XIAO Shouting, FU Xiangjiong, LIU Yibin. Fatigue life increment of interference fit tapered shank bolt connections under random loading[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1993, 14(3):205-210. (in Chinese)
- [13] 张振,肖毅,刘彦清,等. 基于振动疲劳试验的复合材料螺栓连接预紧力松弛特性[J]. 复合材料学报, 2016, 33(1):163-173.
ZHANG Zhen, XIAO Yi, LIU Yanqing, et al. Preload relaxation characteristics in composite bolted joints based on vibration fatigue test[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2016, 33(1):163-173. (in Chinese)
- [14] 朱光宇,郑保仲. 随机振动螺栓松动数值仿真分析[J]. 机械设计与制造, 2018(1):233-235.
ZHU Guangyu, ZHENG Baozhong. Numerical Simulation analysis of random vibration on bolt relaxing[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 233-235. (in Chinese)
- [15] 林利红,陈小安,缪莹赟. 接触非线性结构的随机振动数值仿真分析[J]. 中国机械工程, 2009, 20(11): 1352-1355, 1360.
LIN Lihong, CHEN Xiao'an, MIAO Yingyun. Numerical simulation analysis of random vibrations on contact nonlinear structure[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(11):1352-1355, 1360. (in Chinese)
- [16] 王明珠,姚卫星,孙伟. 结构随机振动疲劳寿命估算的样本法[J]. 中国机械工程, 2008, 19(8):972-975.
WANG Mingzhu, YAO Weixing, SUN Wei. Sample approach for fatigue life prediction of structures under random vibration[J]. China Mechanical Engineering, 2008, 19(8):972-975. (in Chinese)
- [17] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 科学出版社, 2019:174-216.
- [18] 飞机结构强度所. 航空结构连接件疲劳分析手册[M]. 西安: 飞机强度研究所, 1985:21-23.
- [19] DIRLIK T. Application of computers in fatigue analysis [D]. Coventry: University of Warwick, 1985.
- [20] 王明珠,姚卫星. 双峰应力谱密度雨流幅值分布[J]. 航空学报, 2009, 30(9):1666-1671.
WANG Mingzhu, YAO Weixing. Rainflow amplitude distribution of bi-modal stress power spectral density [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9):1666-1671. (in Chinese)
- [21] 崔泗鹏. 连接件振动疲劳寿命分析的SSF法[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [22] WALTER D P, DEBORAH F P. Peterson's stress concentration factors[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2008:383-384.



第一作者简介: 华一畅, 男, 1996年7月生, 硕士。主要研究方向为结构振动疲劳。

E-mail: hyc523012530@126.com