

基于损伤等效的振动疲劳试验载荷转换

尹翔鸿, 王轲, 陈国平, 杨立兵

(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)

摘要: **目的** 使用简谐激励替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验。**方法** 利用有限元仿真计算某典型铝合金试验件在简谐激励和随机平直谱激励下的疲劳寿命, 分析2种工况下试验件寿命相等时激励的等效关系。进行一组定频激励试验和一组谱激励试验, 对比试验结果, 验证在某典型铝合金试验件上利用简谐激励替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验的可行性。**结果** 通过试验与仿真技术, 对2024-T4铝合金试验件在一定频率非共振简谐激励和随机平直谱激励作用下的振动疲劳寿命规律进行研究, 得出了不同激励作用下试验件寿命相同时载荷的等效关系。**结论** 基于损伤等效, 工程中可以简谐激励代替随机平直谱激励进行振动疲劳试验, 从而解决了一类振动疲劳试验加载困难的问题, 实现振动疲劳的试验加速。

关键词: 振动疲劳; 损伤等效; 简谐激励; 谱响应; 疲劳加速试验

中图分类号: TJ85

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2022)09-0001-06

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2022.09.001

Load Conversion of Vibration Fatigue Test Based on Damage Equivalence

YIN Xiang-hong, WANG Ke, CHEN Guo-ping, YANG Li-bing

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

ABSTRACT: The purpose of this paper is to use simple harmonic excitation instead of random flat spectrum excitation to carry out vibration fatigue test. This paper calculates the fatigue life of a typical aluminum alloy test piece under simple harmonic excitation and random flat spectrum excitation by finite element simulation, and analyzes the equivalent relationship of the two kinds of excitation when the life of the test piece is equal under the two working conditions. Then the paper carries out a set of constant frequency excitation tests and a set of spectral excitation tests to verify the feasibility of using simple harmonic excitation instead of random flat spectral excitation to carry out vibration fatigue test on a typical aluminum alloy test piece by comparing the test results. Through the study of the vibration fatigue life law of 2024-t4 aluminum alloy test piece under certain frequency non-resonant simple harmonic excitation and random straight spectrum excitation with test and simulation technology, this paper obtains the equivalent relationship of load when the test piece has the same life under different excitation. Based

收稿日期: 2022-06-24; 修订日期: 2022-07-22

Received: 2022-06-24; Revised: 2022-07-22

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: 尹翔鸿(1997—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为结构细节疲劳寿命。

Biography: YIN Xiang-hong (1997-), Male, Postgraduate, Research focus: fatigue life of structural details.

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: 尹翔鸿, 王轲, 陈国平, 等. 基于损伤等效的振动疲劳试验载荷转换[J]. 装备环境工程, 2022, 19(9): 001-006.

YIN Xiang-hong, WANG Ke, CHEN Guo-ping, et al. Load Conversion of Vibration Fatigue Test Based on Damage Equivalence[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(9): 001-006.

on damage equivalence, simple harmonic excitation can be used to replace random straight spectrum excitation in vibration fatigue test in engineering, so as to solve the problem of difficult loading of a kind of vibration fatigue test and realize the acceleration of vibration fatigue test.

KEY WORDS: vibration fatigue; damage equivalent; harmonic excitation; spectral response; accelerated fatigue test

疲劳试验加速方法的研究始于 20 世纪 60 年代^[1]。Nelson 提出了一系列统计分析方法及 Weibull 分布和对数正态分布下恒定应力加速寿命试验方法的最优设计^[2]。

针对疲劳试验加速方法,国内学者做出了大量的研究。秦桂骧^[3]给出了简谐振动疲劳试验和随机振动疲劳试验的加速因子以及加速因子的应用条件。谢里阳^[4]通过试验从微观和宏观分析了疲劳损伤的等效性问题。唐文等^[5]利用振动疲劳基本理论分别推导了简谐振动和随机振动的疲劳损伤等效关系,分析了不同应力状态下疲劳损伤等效关系的差异。周凌波^[6]根据估算随机振动疲劳寿命的常用频域法,推导出了随机载荷 PSD 函数曲线形状保持不变时,应力均方根与振动疲劳寿命的幂函数公式,进而提出了一种通过同比例提高载荷功率谱量级加速振动疲劳试验的方法。茆诗松等^[7-8]和葛广平等^[9]研究了指数分布和威布尔分布下恒加速试验的最优设计问题。陈东生等^[10]研究得出陀螺电机在不同试验条件下的加速系数,提出了组合加速应力的加速寿命试验方案。针对此问题, Watkins^[11]、Meeker^[12]和 Zhang 等^[13]也做了大量研究。

尽管工程技术人员和学者对振动疲劳试验加速方法已做出大量的工作,但由于振动疲劳问题的复杂性,振动疲劳试验加速方法^[14]仍需进一步被研究。本文提出一种利用简谐激励代替随机平直谱激励进行振动疲劳试验的方法,通过仿真算例给出了随机平直谱激励 PSD 函数值与简谐激励幅值在试验件寿命相等时的比例关系,最后通过试验说明方法的可行性。

1 基于损伤等效的振动疲劳试验理论

本文基于损伤等效^[15]的研究思想,对于非共振简谐振动,当作用在结构上的载荷为简谐载荷时,如果其他条件不变,只改变简谐载荷的幅值,则结构上振动疲劳危险点的应力 S 与简谐载荷的幅值 A 成正比。

简谐载荷作用下结构的振动疲劳寿命为:

$$T = CK^{-m} f^{-1} A^{-m} \quad (1)$$

式中: K 是与简谐载荷频率 f 有关的常数。

随机载荷通常以 PSD 函数的形式给出^[16]。设结构上危险点的应力频响函数为 $H(f)$, 随机载荷的 PSD 函数为 $W(f)$ 。当随机载荷的 PSD 函数曲线形状不变, PSD 函数值同比例提高到原来的 N 倍时,危险点应力均方根 σ 和随机载荷均方根 A_{RMS} 均提高到原来的 $\sqrt{N}$ 倍。当平直谱激励的 PSD 函数曲线形状不变时,

危险点应力均方根 σ 和随机载荷均方根 A_{RMS} 之比是常数,记为 K_{RMS} 。

利用宽带分析法可得随机过程的疲劳寿命 T_{DK} :

$$T_{\text{DK}} = K_{\text{DK}} K_{\text{RMS}}^{-m} A_{\text{RMS}}^{-m} \quad (2)$$

式中: K_{DK} 和 K_{RMS} 均是随机载荷的 PSD 函数曲线形状有关的常数。

对于约束形式和载荷加载方式完全相同的同一个结构,当分别加载简谐载荷和随机载荷时,结构上的危险位置可能相同。假设结构的简谐振动疲劳寿命和随机振动疲劳寿命可分别由式(1)和(2)计算,两式中的指数 m 有可能相同^[17]。此种情况下,当简谐振动疲劳寿命 T 和随机振动疲劳寿命 T_{DK} 相同时:

$$\frac{A}{A_{\text{RMS}}} = \frac{K_{\text{RMS}}}{K} \left\{ \frac{Cf^{-1}}{K_{\text{DK}}} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (3)$$

$$\frac{S_{\text{RMS}}}{\sigma} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left\{ \frac{Cf^{-1}}{K_{\text{DK}}} \right\}^{\frac{1}{m}} \quad (4)$$

式中: S_{RMS} 为危险点简谐应力均方根。

式(3)和式(4)表明,当一个结构约束形式和所受的载荷加载方式完全相同,分别对其作用一个频率保持不变的简谐载荷和 PSD 函数曲线形状保持不变的随机载荷,且结构的疲劳寿命相同时,简谐载荷幅值和随机载荷均方根之比可能为常数,结构危险点简谐应力均方根与随机应力均方根之比也可能为常数。因此,当结构约束形式和载荷加载方式相同时,基于损伤等效,可以用简谐载荷代替随机载荷进行振动疲劳试验,以解决随机载荷加载困难的问题。对 2024-T4 铝合金试验件有限元模型分别施加 30 Hz 简谐加速度和 10~40 Hz 平直加速度功率谱,计算 2 种工况下试验件的振动疲劳寿命,并寻找两载荷等效关系,最后通过 2 组试验验证在此铝合金试验件上利用 30 Hz 简谐加速度激励替代 10~40 Hz 平直加速度功率谱的可行性。

2 仿真算例

2.1 几何模型

试验件材料为常用航空材料 2024-T4 铝合金。试验件的几何尺寸如图 1 所示。为了增大试验件振动疲劳危险区域的弯曲应力,试验件末端装有配重块(材料为 Q235A 钢)。

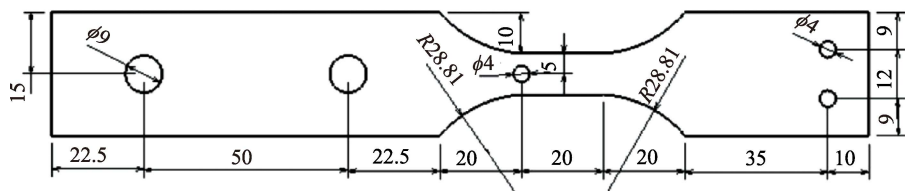


图 1 构型尺寸 (单位: mm)
Fig.1 The dimensions of configuration (unit: mm)

2.2 有限元模型及边界条件

根据试验件的几何模型, 在 HyperMesh14.0 中划分有限元网格如图 2 所示。试验件采用 4 节点 2D 壳单元, 配重块采用 8 节点六面体单元, 试验件和配重块采用共节点方式连接。为模拟约束, 试验件与夹具连接的所有节点设置为 RB2 多点约束。有限元模型包括 9 127 个节点、4 308 个 4 节点 2D 单元、4 160 个 8 节点六面体单元和 1 个 MPC 单元。

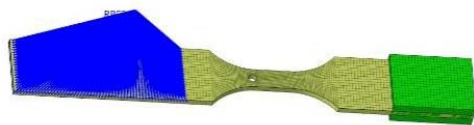


图 2 试验件有限元模型
Fig.2 Finite element model of test piece

将建立好的模型导入 Patran, 对其施加与模态试验时试验件上相同的约束条件, 即对模拟的 MPC 单元施加固支约束。由 Nastran 计算出试验件固有振型和固有频率, 将前两阶弯曲振型的固有频率与试验测得的固有频率相对比, 见表 1。由表 1 可知, 有限元计算得到的试验件固有频率与模态试验结果相差很小, 可知有限元模型是合理的。

表 1 固有频率仿真值与试验值对比			
Tab.1 The comparison of the natural frequency simulation value and the experimental value			
振型阶次	固有频率/Hz		误差/%
	仿真值	试验值	
一阶	25.0	24.4	2.6
二阶	465.4	450.8	3.2

2.3 振动疲劳寿命仿真计算

30 Hz 简谐加速度激励下, 利用 2024-T4 铝合金 S-N 曲线, 由危险点应力幅值可以计算出试验件的振动疲劳寿命。经频响分析可得, 幅值为 1g 的 30 Hz 简谐加速度作用下, 试验件的 Von Mises 应力幅值云图如图 3 所示。由图 3 可以看出, 试验件的简谐振动疲劳危险点是 Node 84, 该点的 Von Mises 应力幅值是 36.7 MPa。根据简谐振动载荷与响应的正比关系可以推算出: 幅值为任意值的 30 Hz 简谐加速度作用下,

试验件的 Von Mises 应力幅值云图与图 3 是相似的, 危险点是 Node 84, 并且可以计算出危险点 Node 84 的 Von Mises 应力幅值。

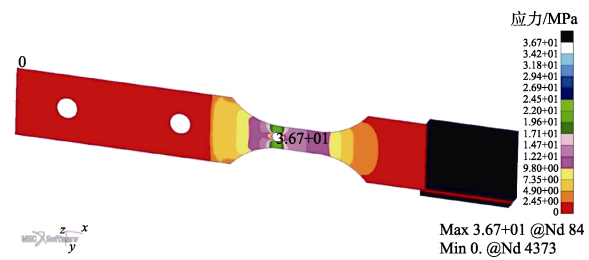


图 3 试验件 Von Mises 应力幅值云图
Fig.3 Stress amplitude cloud diagram of test piece Von Mises

疲劳寿命计算采用宽带分布法^[18], 根据 Dirlik^[19]法可得出损伤 D_{DK} 和寿命 T_{DK} 。由金属材料手册^[20]查出 2024-T4 铝合金 S-N 曲线的幂函数公式, 见式 (5)。

$$S=2\ 620N^{-0.191}$$

(5)

30 Hz 简谐振动疲劳寿命仿真结果见表 2。

表 2 简谐振动疲劳寿命仿真计算结果		
Tab.2 Simulation results of simple harmonic vibration fatigue life		
简谐加速度幅值/g	危险点 VonMises 应力幅值/MPa	试验件振动疲劳寿命/s
7	256.9	6 360
7.5	275.3	4 430
8	293.6	3 160
8.5	312.0	2 300
9	330.3	1 700

对模拟 MPC 单元 Z 方向施加 10~40 Hz 平直加速度功率谱, 其他方向施加固支约束, 在 MSC.Random 中对试验件进行随机分析。随机载荷是 PSD 函数值为 0.014 g²/Hz 的 10~40 Hz 平直加速度功率谱, 有限元模型 Von Mises 应力云图如图 4 所示。由图 4 可知, 试验件危险点是 Node 84, 该节点 Von Mises 应力 RMS 是 95.5 MPa。

在 PSD 函数值为 0.014 g²/Hz 的 10~40 Hz 平直加速度功率谱作用下, 有限元模型的随机振动疲劳寿命云图如图 5 所示。由图 5 可以看出, Node 84 的疲劳寿命最小, 随机振动疲劳的危险点也是 Node 84。因

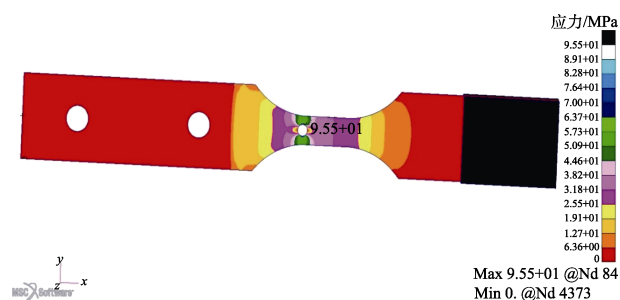


图4 有限元模型 Von Mises 应力 RMS 云图
Fig.4 Stress RMS cloud diagram of finite element model Von Mises

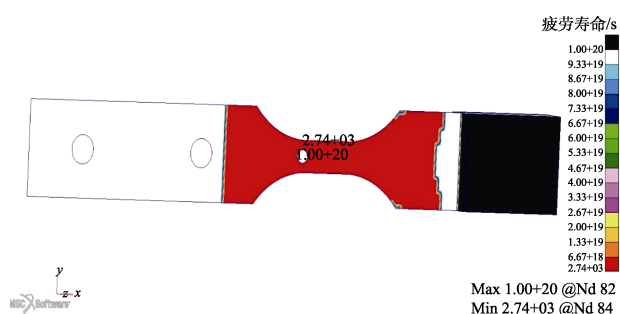


图5 试验件随机振动疲劳寿命云图
Fig.5 Cloud diagram of random vibration fatigue life of test parts

此, 30 Hz 简谐加速度作用下和 10~40 Hz 平直加速度功率谱作用下, 试验件的危险点相同。10~40 Hz 平直加速度功率谱作用下试验件随机振动疲劳仿真寿命的计算结果见表 3。

表3 平直谱随机振动疲劳寿命仿真计算结果
Tab.3 Simulation results of flat spectrum random vibration fatigue life

平直加速度功率谱 PSD 函数值/(g ² ·Hz ⁻¹)	危险点 Von Mises 应力 RMS/MPa	试验件振动 疲劳寿命/s
0.016	101.3	1 130
0.014	94.7	2 838
0.012	87.7	6 320
0.010	80.1	11 810
0.008	71.6	21 712
0.006	62.0	46 238
0.004	50.6	134 508

设 10~40 Hz 平直加速度功率谱的 PSD 函数值为 A_{PSD} , 试验件危险点随机 Von Mises 应力均方根为 σ , 试验件危险点随机振动疲劳寿命为 T_{DK} , σ 与 $\sqrt{A_{\text{PSD}}}$ 呈线性关系, 由表 3 可拟合出 $\sigma-\sqrt{A_{\text{PSD}}}$ 直线, 见式 (6)。

$$\sigma = 801.10\sqrt{A_{\text{PSD}}} \quad (6)$$

σ 与 T_{DK} 可拟合为相关系数 r^2 为 0.996、指数为 -0.191 的幂函数曲线:

$$\sigma = 478.85T_{\text{DK}}^{-0.191} \quad (7)$$

由式 (5) 得:

$$S_{\text{RMS}} = 967.51T^{-0.191} \quad (8)$$

式中: S_{RMS} 和 T 分别为 30 Hz 简谐加速度作用下试验件危险点的 Von Mises 应力均方根和简谐振动疲劳寿命。

当 30 Hz 简谐加速度下的试验件疲劳寿命 T 和 10~40 Hz 平直加速度功率谱下的试验件疲劳寿命 T_{DK} 相等时, 由式 (7) 和式 (8) 可得:

$$S_{\text{RMS}} = 2.02\sigma \quad (9)$$

设 30 Hz 简谐加速度的幅值为 A , 由表 2 可得:

$$S_{\text{RMS}} = 26.09A \quad (10)$$

把式 (6) 和式 (10) 带入式 (9) 得:

$$A_{\text{PSD}} = 0.000\ 26A^2 \quad (11)$$

式 (9) 和式 (11) 表明, 对于该 2024-T4 铝合金试验件, 30 Hz 简谐加速度下试验件的疲劳寿命 T 和 10~40 Hz 平直加速度功率谱下试验件的疲劳寿命 T_{DK} 相等时, 试验件的危险点相同, 危险点应力均方根之比为 2.02, 10~40 Hz 平直加速度功率谱 PSD 函数值与 30 Hz 简谐加速度幅值的平方之比为 0.000 26。因此可以得出, 基于损伤等效, PSD 函数值为 0.000 26 A^2 的 10~40 Hz 平直加速度功率谱与幅值为 A 的 30 Hz 简谐加速度可以相互等效。即在某些情况下, 利用简谐激励替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验, 以解决试验载荷难以加载的问题是可行的。

3 试验验证

利用上述 2024-T4 铝合金试验件进行振动疲劳试验^[21-25]。试验一共分为 2 组: 一组简谐振动疲劳寿命试验, 载荷设置为 3 个不同幅值的 30 Hz 简谐加速度; 另一组为随机振动疲劳寿命试验, 载荷设置为 4 个 PSD 函数值不同的 10~40 Hz 平直加速度功率谱。根据 2 组试验数据拟合出的幂函数公式指数是否相同, 验证是否能用简谐激励替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验。振动疲劳寿命试验使用的设备有 UD H560B-16 振动台、cDAQ-9178NI 采集系统等。工况 1—3 的 30 Hz 简谐加速度幅值 A 、危险点平均应力幅值 S 、试验件平均振动疲劳寿命 T 见表 4。

表4 简谐振动疲劳寿命试验结果
Tab.4 Results of simple harmonic vibration fatigue life test

工况	30 Hz 简谐加 速度幅值 A/g	危险点平均应力 幅值 S/MPa	试验件平均振动 疲劳寿命 T/s
1	8	276.1	1 395
2	7.5	257.7	1 865
3	7	241.8	2 610

S 与 A 的关系可拟合为直线, 拟合相关系数 r^2 为 0.998。 $S-A$ 拟合直线的表达式为:

$S=34.26A$ (12)
 S 与 T 可以拟合幂函数曲线, 拟合相关系数 r^2 为 0.996。拟合后可得到 S - N 幂函数公式:

$S=2\,570N^{-0.21}$ (13)

式 (13) 即为简谐振动疲劳寿命试验测得的 2024-T4 铝合金弯曲应力状态的 S - N 曲线幂函数公式。

把式 (12) 代入式 (13) 中得出 A - N 幂函数公式:
 $A=80.27N^{-0.21}$ (14)

式 (14) 表明, 在一定范围内, 简谐载荷幅值和疲劳寿命满足幂函数公式。

工况 4—7 的 10~40 Hz 平直加速度功率谱 PSD 函数值 P_{PSD} 、危险点平均应力均方根 σ 、试验件平均疲劳寿命 T_{RAN} 见表 5。

表 5 随机振动疲劳寿命试验结果
Tab.5 Results of random vibration fatigue life test

工况	10~40Hz 平直加速度功率谱 PSD 函数值 $P_{\text{PSD}}/(\text{g}^2\cdot\text{Hz}^{-1})$	危险点平均应力均方根 σ/MPa	试验件平均疲劳寿命 T_{RAN}/s
4	0.014	100.0	881
5	0.012	93.5	1 165
6	0.010	85.7	1 879
7	0.008	76.5	2 920

σ 和 $\sqrt{P_{\text{PSD}}}$ 可以拟合成直线, 拟合相关系数 r^2 为 0.999, 见式 (15)。

$\sigma=816.22\sqrt{P_{\text{PSD}}}$ (15)

σ 与 T_{RAN} 可以拟合幂函数曲线, 拟合相关系数 r^2 为 0.995, 见式 (16)。

$\sigma=413.27T_{\text{RAN}}^{-0.21}$ (16)

由 S 与 T 的拟合曲线可得:

$S_{\text{RMS}}=889.54T^{-0.21}$ (17)

当简谐振动疲劳寿命试验件的疲劳寿命 T 与随机振动疲劳寿命试验件的寿命 T_{RAN} 相等时, 由式 (16) 和式 (17) 可得:

$S_{\text{RMS}}=2.15\sigma$ (18)

把式 (12) 和 (15) 代入式 (18) 中得:

$A_{\text{PSD}}=0.000\,19A^2$ (19)

式 (18) 和式 (19) 表明, 当简谐振动疲劳试验件的寿命 T 与随机振动疲劳试验件的寿命 T_{RAN} 相等时, 试验件的危险点相同, 危险点应力均方根之比为 2.15, 10~40 Hz 平直加速度功率谱的 PSD 函数值与 30 Hz 简谐加速度幅值 A 平方之比为 0.000 19。基于损伤等效, PSD 函数值为 0.000 26 A^2 的 10~40 Hz 平直加速度功率谱与幅值为 A 的 30 Hz 简谐加速度可以相互等效。因此, 式 (18) 和式 (19) 验证了 2.3 节中用简谐载荷替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验的方法是可行的。

平直谱 PSD 函数值等效后的简谐载荷幅值与对

应的预估寿命见表 6。由表 6 可知, 等效前后 2 种加载方式下的寿命误差较小, 均在可接受的范围内, 进一步证明了方法的可行性。

表 6 2 种加载方式下的误差
Tab.6 Error under two loading modes

平直谱 PSD 函数值/ $(\text{g}^2\cdot\text{Hz}^{-1})$	等效简谐载荷幅值/g	随机振动寿命/s	简谐振动寿命/s	误差/%
0.014	8.6	2 838	3 103	9.3
0.012	8	6 320	4 527	28.4
0.010	7.3	11 810	7 314	38.1
0.008	6.5	21 712	13 428	38.2

4 结语

本文针对振动疲劳试验中因载荷复杂造成难以加载的问题做出了研究。首先基于损伤等效理论提出了一种利用简谐激励替代随机平直谱激励进行疲劳试验的方法。进而通过 MSC.Fatigue 对试验件进行疲劳寿命计算, 拟合出应力-寿命曲线, 得出 30 Hz 简谐加速度幅值与 10~40 Hz 平直加速度功率谱 PSD 值的等效关系。最后利用振动疲劳试验验证了这一方法是可行的, 从而解决了一类振动疲劳试验加载困难的问题。后续有必要进一步开展理论与试验研究, 更准确、可靠地获得以简谐激励替代随机平直谱激励进行振动疲劳试验的理论支撑。

参考文献:

[1] 陈循, 张春华, 汪亚顺, 谭源源. 加速寿命试验技术与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
CHEN Xun, ZHANG Chun-hua, WANG Ya-shun, et al. Accelerated life testing technology and application[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.

[2] MEEKER W. Accelerated Testing: Statistical Models, Test Plans, and Data Analyses[J]. Technometrics, 1991, 33: 236-238.

[3] 秦桂骧. 加速振动及其在标准设计中的应用[J]. 环境条件与试验, 1984, 2(5): 43-48.
QIN Gui-xiang. Accelerated Vibration and its Application in Standard Design[J]. Environmental Technology, 1984, 2(5): 43-48.

[4] 谢里阳. 疲劳损伤状态的等效性[J]. 机械强度, 1995, 17(2): 100-104.
XIE Li-yang. On the Equivalence of Fatigue Damage States[J]. Journal of Mechanical Strength, 1995, 17(2): 100-104.

[5] 唐文, 修建生, 方红荣, 等. 结构动力学疲劳损伤等效关系的研究[J]. 强度与环境, 2013, 40(6): 33-38.
TANG Wen, XIU Jian-sheng, FANG Hong-rong, et al. Research on Vibratory Fatigue Equivalency of Structure[J]. Structure & Environment Engineering, 2013,

- 40(6): 33-38.
- [6] 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.
- [7] 刘瑞元, 茆诗松. 步进应力加速寿命试验的最优设计[J]. 应用概率统计, 2002, 18(1): 34-42.
LIU Rui-yuan, MAO Shi-song. Optimum Step-Stress Plans for Accelerated Life Testing[J]. Chinese Journal of Applied Probability and Statistics, 2002, 18(1): 34-42.
- [8] 茆诗松. 指数分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 应用数学学报, 1985, 8(3): 311-316.
MAO Shi-song. Statistical Analysis of Accelerated Life testing-Step-Stress Models under the Exponential Distribution Case[J]. Acta Mathematicae Applicatae Sinica, 1985, 8(3): 311-316.
- [9] 葛广平, 马海训. Weibull 分布场合下步进应力加速寿命试验的统计分析[J]. 数理统计与应用概率, 1992, 7(2): 31-35.
GE Guang-ping, MA Hai-xun. Statistical Analysis of Step Stress Accelerated Life Test under Weibull Distribution[J]. Mathematical Theory and Applied Probability, 1992, 7(2): 31-35.
- [10] 陈东生, 宋永刚, 徐强. 基于工程可靠性分析的陀螺电机加速寿命试验设计[J]. 导弹与航天运载技术, 2005(6): 38-41.
CHEN Dong-sheng, SONG Yong-gang, XU Qiang. Gyro Motor Accelerated Life Test Design Based on Engineering Reliability Analysis[J]. Missiles and Space Vehicles, 2005(6): 38-41.
- [11] WATKINS A J. Review: Likelihood Method for Fitting Weibull Log-Linear Models to Accelerated Life-Test Data[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1994, 43(3): 361-365.
- [12] MEEKER W Q. A Comparison of Accelerated Life Test Plans for Weibull and Lognormal Distributions and Type I Censoring[J]. Technometrics, 1984, 26(2): 157-171.
- [13] ZHANG C, CHUCKPAIWONG I, LIANG S Y, et al. Mechanical Component Lifetime Estimation Based on Accelerated Life Testing with Singularity Extrapolation[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2002, 16(4): 705-718.
- [14] 蒋瑜, 陶俊勇. 结构振动疲劳加速试验技术研究[J]. 装备环境工程, 2016, 13(5): 30-35.
JIANG Yu, TAO Jun-yong. Accelerated Vibration Fatigue Testing of Structures[J]. Equipment Environmental Engineering, 2016, 13(5): 30-35.
- [15] 蔡永明, 吴德锋, 王佳莹, 等. 一种基于应力损伤等效的耐久性计算方法: CN110489914A[P]. 2019-11-22.
CAI Yong-ming, WU De-feng, WANG Jia-ying, et al. A Durability Calculation Method Based On Stress Damage Equivalence: CN110489914A[P]. 2019-11-22.
- [16] 孟彩茹, 卢博友. 基于 PSD 的随机载荷下振动疲劳寿命估算[J]. 机械设计, 2009, 26(5): 73-75.
MENG Cai-ru, LU Bo-you. Estimation on Vibration Fatigue Life-Span under Random Loading Based on PSD[J]. Journal of Machine Design, 2009, 26(5): 73-75.
- [17] 李奇志, 陈国平, 王明旭, 等. 振动加速因子试验方法研究[J]. 振动测试与诊断, 2013, 33(1): 35-39.
LI Qi-zhi, CHEN Guo-ping, WANG Ming-xu, et al. Test Method of Vibration Acceleration Factor[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2013, 33(1): 35-39.
- [18] 朱学旺, 张思箭, 宁佐贵, 等. 宽带随机振动试验条件的加速因子[J]. 环境技术, 2014, 32(6): 17-20.
ZHU Xue-wang, ZHANG Si-jian, NING Zuo-gui, et al. Accelerated Testing Factor on Wideband Random Vibration[J]. Environmental Technology, 2014, 32(6): 17-20.
- [19] DIRLIK T. Application of Computers in Fatigue Analysis[D]. Warwickshire: University of Warwick, 1985.
- [20] 温秉权, 黄勇. 金属材料手册[M]. 北京: 电子工业出版社, 2009.
WEN Bing-quan, HUANG Yong. Metal Materials Manual[M]. Beijing: Publishing House of Electronics industry, 2009.
- [21] 王冬梅, 谢劲松. 随机振动试验加速因子的计算方法[J]. 环境技术, 2010, 28(2): 47-51.
WANG Dong-mei, XIE Jin-song. Acceleration Factor Calculation Method of Random Vibration Test[J]. Environmental Technology, 2010, 28(2): 47-51.
- [22] 王明珠. 结构振动疲劳寿命分析方法研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
WANG Ming-zhu. Research on Life Analysis Method for Structure Vibration Fatigue[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.
- [23] 卢彩玲, 康宁民, 郑应强. 对随机振动试验方法的探讨[J]. 环境技术, 2010, 31(6): 22-26.
LU Cai-ling, KANG Ning-min, ZHENG Ying-qiang. Study on Experiment Method for Random Vibration[J]. Environmental Technology, 2010, 31(6): 22-26.
- [24] 顾晓华, 陈怀海. 结构振动疲劳试验监测方法研究[J]. 机械制造与自动化, 2015, 44(2): 181-184.
GU Xiao-hua, CHEN Huai-hai. Research on Monitoring Methods in Structure Vibration Fatigue Test[J]. Machine Building & Automation, 2015, 44(2): 181-184.
- [25] 杨万均, 施荣明. 振动疲劳试验寿命确定方法研究[J]. 机械设计与研究, 2012, 28(2): 71-72.
YANG Wan-jun, SHI Rong-ming. Research on the Confirmation Method of Vibration Fatigue Experiment Life[J]. Machine Design & Research, 2012, 28(2): 71-72.

责任编辑: 刘世忠