

文章编号:1674-8190(2021)01-024-06

基于频率雨流计数法的发动机振动疲劳 载荷谱编制

李斌潮¹, 唐靖², 殷之平²

(1. 西安航天动力研究所 液体火箭发动机技术国防科技重点实验室, 西安 710100)

(2. 西北工业大学 航空学院, 西安 710072)

摘要: 传统雨流计数法适用于常规疲劳载荷计算, 不能保留振动疲劳的频率信息, 但是频率对于振动疲劳十分重要, 因此在传统雨流计数法的基础上提出一种频率雨流计数法。以某型号发动机试车振动加速信号为例, 采用振动疲劳载荷谱的编制方法, 编制振动信号功率谱、载荷-频次载荷谱、振动疲劳载荷谱, 对频率雨流计数法进行验证。结果表明: 采用本文方法编制的载荷谱能够反映发动机实际工作载荷, 满足实验室疲劳试验载荷谱要求。

关键词: 振动疲劳; 载荷谱; 发动机; 雨流计数法; 功率谱密度

中图分类号: V231.9

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.003

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



The Load Spectrum Compilation of Engine Vibration Fatigue Based on Frequency Rain-flow Counting Method

LI Binchao¹, TANG Jing², YIN Zhiping²

(1. National Key Laboratory of Science and Technology on Liquid Rocket Engines, Xi'an Aerospace Propulsion Institute, Xi'an 710100, China)

(2. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: The traditional rain-flow counting method is suitable for conventional fatigue load calculation, and cannot retain the frequency information of vibration fatigue. Frequency is very important for vibration fatigue. Therefore, a frequency rain-flow counting method based on the traditional rain flow counting method is proposed. Taking a certain type of engine test vibration signal as an example, the load spectrum compilation method of vibration fatigue is used to compile the vibration signal power spectrum, load-frequency spectrum, and vibration fatigue load spectrum, and the frequency rain-flow counting method is verified. The results show that the compiled load spectrum can reflect the practical working load of engine, and satisfy the load spectrum requirements of the laboratory fatigue test.

Key words: vibration fatigue; load spectrum; engine; rain-flow counting method; power spectral density

收稿日期:2020-03-01; 修回日期:2020-07-29

通信作者:唐靖,348880124@qq.com

引用格式: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 Binchao, TANG Jing, YIN Zhiping. 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. (in Chinese)

0 引言

发动机在实际工作中受气流影响,会产生结构组部件振动,这种振动现象一般不会引起结构快速破坏,而是造成结构疲劳损伤^[1-3]。振动引起的结构疲劳损伤会导致结构性能逐渐退化,当损伤累积到一定程度,结构会发生破坏^[4]。

载荷谱作为飞机定延寿命、结构可靠性的基础,通过对飞机正常工作载荷时间历程信息进行数据处理,编制能够反映飞机实际工作载荷下的实验室加速载荷谱^[5]。N. W. M. Bishop 等^[6]在频域下使用功率谱密度函数对振动疲劳寿命分析;赵凯华^[7]编制了 SCR 箱体的弯曲振动载荷谱;钟响亮^[8]对多轴随机振动加速度疲劳载荷谱的时域载荷谱和频域功率谱进行研究,并分析随机振动疲劳载荷谱加速方法;王肇喜等^[9]通过对三轴振动的疲劳损伤与单轴依次加载进行对比,计算出三轴振动等效载荷谱;王志会等^[10]确定航空发动机振动试验载荷并编制正弦振动疲劳谱。上述文献主要研究了振动疲劳的频域功率谱和时域载荷谱,频域功率谱能够有效反映数据的能量和频率信息,时域载荷谱只能反映原始数据的幅值、均值、载荷频次信息。结构发生共振会造成疲劳寿命缩短,但编制的时域载荷谱不能保留频率信息。

本文在传统雨流计数法的基础上提出一种适用于振动疲劳的频率雨流计数法,采用振动疲劳载荷谱的编制方法编制适用于振动环境下发动机可靠性试验的振动疲劳载荷谱,并对编制的载荷谱进行验证。

1 振动疲劳损伤理论

1.1 疲劳累积损伤理论

根据 Miner 疲劳线性累积损伤理论,假设结构在循环载荷下发生的疲劳损伤是线性累积,达到某一阈值结构会发生疲劳破坏^[11],疲劳累积损伤 D 可表示为

$$D = \sum_{i=1}^n D_i = \sum_{i=1}^n \left[\frac{n(S_i)}{N(S_i)} \right] \quad (1)$$

$$n(S_i) = E[p] T p(S_i) \Delta S_i \quad (2)$$

式中: $N(S_i)$ 为应力水平 S_i 时的疲劳破坏循环数; T 为随机响应作用时间; $n(S_i)$ 为 T 时间内应力水平 S_i 下的循环数; $p(S_i)$ 为应力水平 S_i 时的功率谱密度(PSD)函数。

工程上材料疲劳性能采用 S-N 曲线:

$$S^m N = C \quad (3)$$

式中: m 、 C 为材料常数。

联立式(2)、式(3), $D=1$ 时结构发生疲劳破坏,结构的疲劳寿命为

$$T = \frac{C}{E[p] \sum_{i=1}^n S_i^m p(S_i) \Delta S_i} \quad (4)$$

1.2 雨流计数法

在时域分析过程中,选取合适的循环计数方法十分重要,工程中通常选择雨流计数法。雨流计数法计数处理过程如图 1 所示,将原始载荷一时间数据旋转 90°,假设每个峰谷值从内部开始有雨水往下流,根据雨滴流动的痕线,加上适当的规则便可对此谱进行计数。

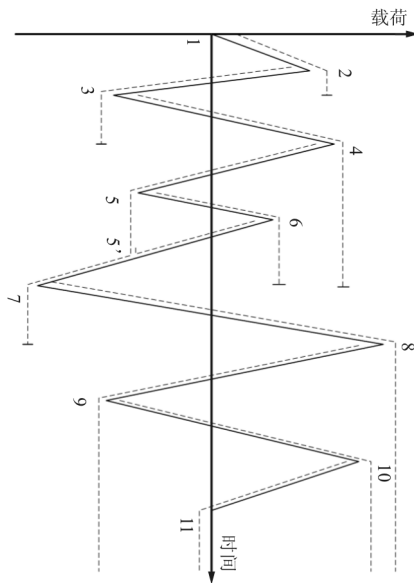


图 1 雨流计数法

Fig. 1 Rainflow counting method

1.3 频率雨流计数法

在传统雨流计数法上进行扩展得到基于振动疲劳的频率雨流计数法(如图 2 所示),传统雨流计数法只考虑应力-应变迟滞回线,频率雨流计数法则考虑了频率的影响。根据国内外学者对振动疲劳的定义,当频率与结构固有频率接近或相同时产生的损伤为振动疲劳损伤^[12]。基于振动疲劳的频率雨流计数法在进行计数时记录峰值时刻,计算相邻峰值间的时间差 Δt ,即可求得该峰值对应的频

率 F 。

$$S_{\text{Amp}}^i = \frac{S_{\text{Peak}}^i - S_{\text{Valley}}^i}{2} \quad (5)$$

$$F^i = \frac{1}{t_{S_{\text{Peak}}^{i+1}} - t_{S_{\text{Peak}}^i}} \quad (6)$$

式中： S_{Peak} 、 S_{Valley} 为波峰、波谷的幅值； i 为峰谷值频次； $t_{S_{\text{Peak}}^i}$ 为 S_{Peak}^i 对应的时间刻度。

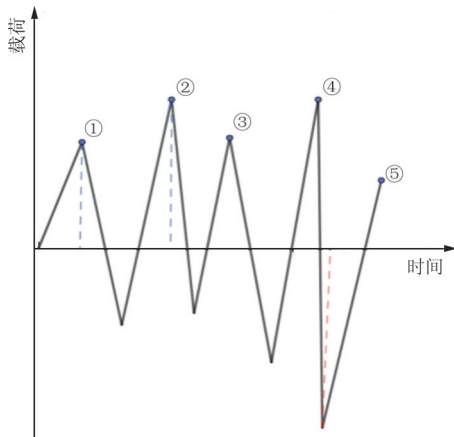


图 2 频率雨流计数法

Fig. 2 Rainflow counting method with frequency

频率信息(即对应时刻)可以实现载荷谱从载荷—循环次数转换成载荷—时间的转换,并保留最小谷值的时刻。

2 振动载荷编制流程

针对振动疲劳,采用振动疲劳载荷谱的编制方法,主要思路就是对于振动数据进行统计时,记录每个峰值的时刻,获得每个峰谷值对应时刻的频率。此编制方法编制后的载荷谱形式为载荷—时间,保留峰谷值(应力幅值)和对应频率,是时域和频域的耦合形式。振动疲劳载荷谱的编制方法的流程图如图 3 所示。

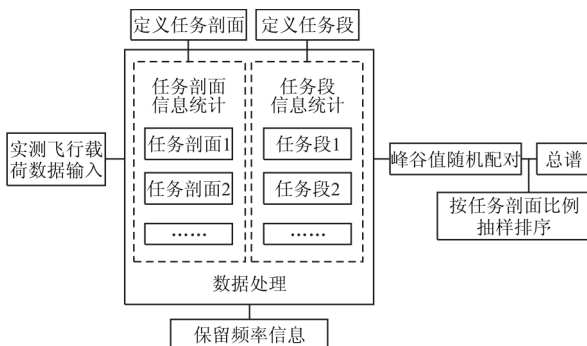


图 3 振动疲劳载荷编制流程

Fig. 3 Vibration fatigue load compilation process

3 原始信号分析

3.1 实测振动信号分析

本文发动机主要部件的随机振动数据来自加速度信号,传感器采样频率为 12 800 Hz,采样时间为 321 s(如图 4 所示)。原始数据具有明显分段特性,对数据处理需要分段进行,按照发动机工作工况和数据整体变化趋势可以将数据分为开机段、稳定工作段、关机段。开机段为开机后 2 s 内出现较大脉冲数据段,关机段为关机前 2 s 出现较大脉冲数据段,其余数据为稳定工作段。

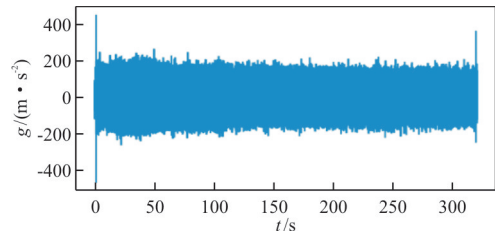


图 4 原始振动加速度信号

Fig. 4 The original vibration acceleration signal

3.2 频谱分析

由于随机振动具有不确定性,一般采用功率谱密度函数描述随机振动下结构的应力响应,可以表示为

$$G(f) = W(f)H^2(f) \quad (7)$$

式中： $W(f)$ 为结构在某点的激励的功率谱密度函数； $H(f)$ 为结构应力的频响函数。

功率谱密度函数的 k 阶谱惯性矩定义为

$$m_k = \int_0^\infty f^k G(f) df \quad (8)$$

当 $k=0$ 时,随机过程的响应均方根值表示为

$$\sigma = \sqrt{m_0} = \sqrt{\int_0^\infty G(f) df} \quad (9)$$

随机信号峰值频率期望值 $E[p]$ 表示为

$$E[p] = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (10)$$

以 1 s 振动信号数据为例进行快速傅里叶变换(如图 5 所示),并且根据振动实际工况进行滤波处理,保留主要频段内的振动信号,根据功率谱选择滤波方式以及滤波范围。

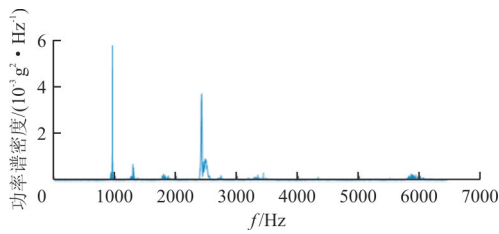
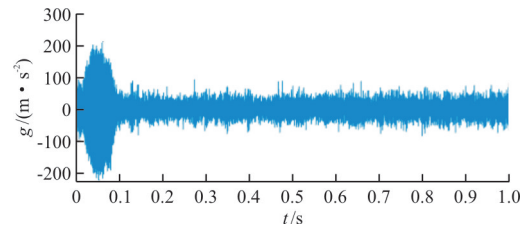


图 5 振动加速度功率谱

Fig. 5 Vibration acceleration power spectrum

从图 5 可以看出:信号频率主要分布在 950~970 Hz, 1 250~1 350 Hz, 1 750~1 950 Hz, 2 400~2 550 Hz, 其中 950~970 Hz 为基频频率, 且基频具有最大幅值, 因此 950~970 Hz 也是主频, 1 750~1 950 Hz 为谐波频率, 功率谱幅值比约等于 $2^2 = 4$; 能量集中在低频部分 0~3 000 Hz, 3 000 Hz 后能量较小。

因此在编制载荷谱时,可以忽略高频部分,采用 0~3 000 Hz 带通滤波,滤波结果如图 6 所示,一次完整试车 321 s 滤波后数据如图 7 所示。



(d) 滤波后局部原始数据

图 6 0~3 000 Hz 带通滤波

Fig. 6 0~3 000 Hz bandpass filtering

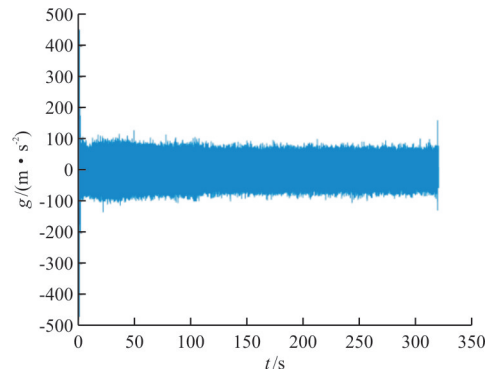
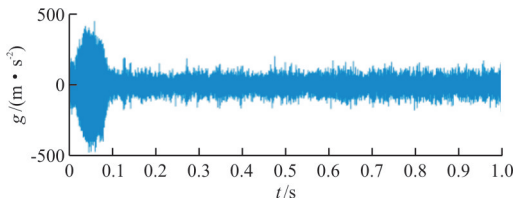
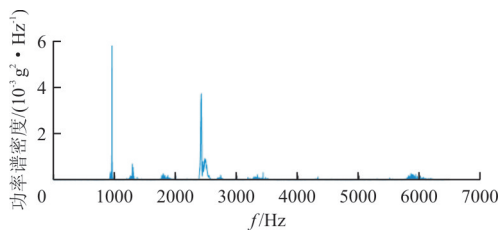


图 7 滤波后完整数据

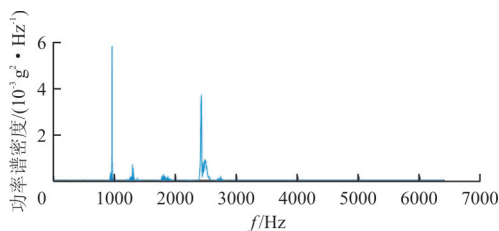
Fig. 7 Filtered data



(a) 局部原始数据



(b) 原始数据功率谱



(c) 滤波后功率谱

4 振动疲劳载荷谱的编制

4.1 频域功率谱

由功率谱密度结果编制的适用于发动机振动载荷谱如表 1 所示。

表 1 频域功率谱

Table 1 Frequency domain power spectrum

频率/Hz	功率谱密度/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)	频率/Hz	功率谱密度/ ($g^2 \cdot Hz^{-1}$)
961	0.005 827 0	1 797	0.000 265 9
962	0.001 731 0	1 803	0.000 277 1
964	0.000 696 7	1 827	0.000 214 9
965	0.000 783 2	1 875	0.000 208 8
1 293	0.000 262 3	2 420	0.003 459 0
1 294	0.000 174 6	2 422	0.003 617 0
1 295	0.000 702 6	2 423	0.003 657 0
1 307	0.000 557 3	2 426	0.003 728 0

4.2 振动疲劳载荷谱

通过对传统雨流计数法提取的时域幅值,划分

载荷级,确定载荷发生频次。将处理后数据按照 0.5g 过载划分载荷级,统计结果如表 2 所示,生成载荷谱如图 8 所示。

表 2 时域统计结果

Table 2 Statistical results of time domain

载荷级	频次	累计频次
[0~5)	3 763	3 763
[5~10)	4 462	8 225
[10~15)	5 696	13 921
[15~20)	8 462	22 383
[20~25)	13 121	35 504

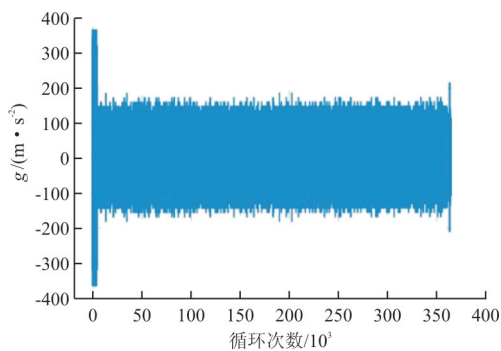


图 8 不含频率载荷谱

Fig. 8 The load spectrum without frequency

将频率特征与上述载荷谱进行耦合,转换成振动疲劳的载荷谱。由于统计的结果保留了频率的特征,即每对加速度峰谷值对应频率如表 3 所示。

表 3 载荷谱部分数据

Table 3 Partial data of load spectrum

$g/(m \cdot s^{-2})$		频率/Hz
峰 值	谷 值	
343.096	-343.096	711
33.349	-33.349	1 066
33.349	-33.349	1 280
55.474	-55.474	1 280
55.474	-55.474	914
55.474	-55.474	1 066
143.973	-143.973	1 280
99.724	-99.724	1 280
33.349	-33.349	1 066

从表 3 可以看出:频率雨流计数法提取的频率信息和频谱分析结果相吻合,从而验证了该方法的可行性。由频率的定义可知频率为时间间隔的倒

数,因此可以将频率转换为时间,载荷谱的形式从载荷-循环次数变成载荷-时间形式,具体思路是根据上述频率数据,求出每对峰谷值发生的时间,最后将所有峰谷值按照时间进行连接,如图 9 所示,最后的载荷谱形式变成了载荷-时间,载荷谱时间为 0~196 s。相对于原始数据的 321 s,转换的载荷谱时间只有 196 s,原因是在进行载荷谱数据处理时删除了大量的小幅值载荷以及将损伤小的载荷等效成上一级载荷,并缩短疲劳试验所需时间。

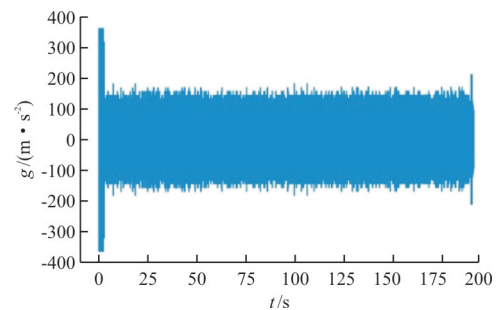


图 9 载荷-时间形式的载荷谱

Fig. 9 Load spectrum in load-time form

5 结 论

(1) 频率雨流计数法提取的频率与功率谱下主要信号功率对应的频率吻合度较好,验证了该方法的可行性。

(2) 编制的载荷谱能够很好保留高载的发生次序,而且考虑了高载迟滞效应,为后续发动机振动疲劳试验和数值仿真研究提供数据支持。

(3) 本文给出振动载荷谱编制方法适用于工程中类似结构的振动疲劳寿命评估,为后续发动机主要组部件的振动疲劳寿命评估、可靠性试验提供指导意义。

参考文献

- [1] MEI C, ABDEL-MOTAGALY K, CHEN R. Review of nonlinear panel flutter at supersonic and hypersonic speeds [J]. Applied Mechanics Reviews, 1999, 52(10): 321-332.
- [2] ONG C C. Flutter of a heat shield panel; NASAC R-122855 [R]. US: BELLCOMM Inc., 1971.
- [3] 夏巍,倪樵,杨智春. 超声速飞行器壁板非线性颤振响应分析的时域法与频域法对比研究[J]. 固体力学学报, 2010, 31(4): 417-421.
XIA Wei, NI Qiao, YANG Zhichun. Compare of time do-

- main method with frequency domain method in nonlinear flutter analysis for panels of supersonic airplane[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(4): 417-421. (in Chinese)
- [4] 冯斌. 液体火箭发动机试验数据处理方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2013.
FENG Bin. Research on processing technology of the liquid rocket engine testing data[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2013. (in Chinese)
- [5] 李五一, 阎楚良, 田兆锋, 等. 基于 VC++ 的飞机载荷谱数据可视化技术[J]. 振动·测试与诊断, 2012, 32(3): 458-461.
LI Wuyi, YAN Chuliang, TIAN Zhaofeng, et al. Data visualization of aircraft load spectrum based on VC++[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012, 32(3): 458-461. (in Chinese)
- [6] BISHOP N W M, SHERRAT F. Fatigue life prediction from power spectral density data[J]. Environmental Engineering, 1999(4): 14-16.
- [7] 赵凯华. 柴油机 SCR 系统振动测试与载荷谱制取[D]. 济南: 山东大学, 2017.
ZHAO Kaihua. Vibration test & load spectrum for diesel SCR system[D]. Jinan: Shandong University, 2017. (in Chinese)
- [8] 钟响亮. 多轴随机振动加速疲劳载荷谱编制方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZHONG Xiangliang. Research on accelerated fatigue spectrum editing methods of multi-axial random vibration[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017. (in Chinese)
- [9] 王肇喜, 蒋刚, 王小卫. 基于疲劳损伤等效的随机振动试验谱裁剪技术研究[C]// 第十二届全国振动理论及应用学术会议. 南宁: 中国振动工程学会, 2017: 809-818.
WANG Zhaoxi, JIANG Gang, WANG Xiaowei. Control spectrum clipping technique of random vibration based on fatigue damage equivalence[C]// The 12th Vibration Theory and Application Conference. Nanning: Chinese Vibration Engineering Society, 2017: 809-818. (in Chinese)
- [10] 王志会, 刘海年, 翟月, 等. 航空发动机转速传感器振动试验载荷确定及应用[J]. 航空发动机, 2016, 42(3): 82-87.
WANG Zhihui, LIU Hainian, ZHAI Yue, et al. Formulation and application for vibration test loading spectrum of an aeroengine revolution transmitter[J]. Aeroengine, 2016, 42(3): 82-87. (in Chinese)
- [11] 赵霞军, 张伟, 赵铭. 机载电子设备随机振动频域法疲劳仿真分析[J]. 西安航空学院学报, 2019, 37(3): 48-52.
ZHAO Xiajun, ZHANG Wei, ZHAO Ming. Simulated analysis of random vibration fatigue of an electronic equipment based on frequency domain method[J]. Journal of Xi'an Aeronautical University, 2019, 37(3): 48-52. (in Chinese)
- [12] 姚卫星. 结构疲劳寿命分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
YAO Weixing. Structural fatigue life and analysis[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2004. (in Chinese)
- [13] 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 Fantao, HU Yuyu. 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. (in Chinese)
- [14] 金奕山, 李琳. 随机振动结构 Von Mises 应力过程峰值概率密度函数的研究[J]. 应用力学学报, 2006, 23(4): 645-648, 701.
JIN Yishan, LI Lin. Peak probability density function of von mises stress process[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2006, 23(4): 645-648, 701. (in Chinese)
- [15] LU Pengmin, ZHAO Banghua, YAN Junmao. Efficient algorithm for fatigue life calculations under broad band loading based on peak approximation[J]. Journal Engineering Mechanics, 1998(5): 232-236.
- [16] KAM J C P. Recent development in the fast corrosion fatigue analysis of offshore structures under random wave loading[J]. International Journal of Fatigue, 1990, 12(6): 458-468.
- [17] 沙云东, 郭小鹏, 张军. 基于应力密度函数和功率谱密度的随机声疲劳寿命预估方法研究[J]. 振动与冲击, 2010, 29(1): 162-166, 244.
SHA Yundong, GUO Xiaopeng, 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): 162-166, 244. (in Chinese)

作者简介:

李斌潮(1984—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:火箭发动机强度试验。

唐靖(1996—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空结构疲劳。

殷之平(1978—),男,博士,副教授。主要研究方向:疲劳与断裂。

(编辑:丛艳娟)