

关于航空发动机结构声疲劳寿命 估算方法的探讨

金奕山, 李 琳

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘要: 噪声载荷是一种高频、宽带随机载荷, 在低循环疲劳寿命预测中被广泛采用的时域计数法很难直接利用。根据现有的累积疲劳损伤理论, 噪声载荷下结构疲劳寿命分析的关键在于如何在频域中获得雨流循环的概率密度函数。本文对从疲劳应力功率谱密度出发获得寿命估算所需要的应力峰值或应力雨流循环幅值的概率密度函数的方法进行了分析与比较, 并对发动机结构声疲劳分析中值得深入研究及发展的方法给出了建议。

关键词: 航空、航天推进系统; 声疲劳; 寿命估算; 雨流循环; 概率密度

中图分类号: V231.95

文献标识码: A

Sonic Fatigue Life Prediction of Aeroengine Structure

JIN Yi-shan, LI Lin

(Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: Sonic loading is a high frequency, broadband random process. Basic cycle counting methods, which are prevalently used in time domain, are difficult to be applied. According to present cumulative fatigue damage theories, the key to structure fatigue life analysis under sonic loading is to obtain the probability density function (pdf) of rainflow ranges directly from frequency domain. This paper analyzes some frequency domain approaches, which can obtain the pdf of rainflow ranges from fatigue stress power spectral density (PSD) data. Some suggestions of promising method for aeroengine structural sonic fatigue analysis are given.

Key words: aerospace propulsion system; sonic fatigue; life prediction; rainflow ranges; pdf

1 前 言

声疲劳是结构在声载荷的激励下, 因结构中快速交变应力作用, 致使结构产生疲劳破坏的现象。这种快速交变应力是由噪声激励引起结构振动而产生的。航空发动机是一个功率强大而且分布复杂的噪声源, 几乎所有的部件都能产生噪声, 处于这种宽频带高能级声激励环境中的发动机薄

壁机匣结构, 如燃烧室机匣、尾喷管筒体等极易发生疲劳破坏。早在七十年代中期, 美国空军在其燃气涡轮发动机结构设计准则中就明确规定了必须进行声疲劳设计的几种基本构件, 主要有燃烧室机匣、加力燃烧室机匣、尾喷管、混合器等等, 足以说明在发动机薄壁机匣结构强度设计中抗声疲劳设计的重要性。

声疲劳问题最早是在飞机结构上发现并引起

收稿日期: 2002-07-17; 修订日期: 2002-10-27

基金项目: 航空科学基金资助项目(99C51078)

作者简介: 金奕山(1971-), 男, 浙江浦江人, 北京航空航天大学能源与动力工程学院博士生。

重视的。传统的声疲劳寿命估算方法大多需要一条均方根应力与循环寿命的关系曲线。国外经过大量试验,对典型构件的 $S_{rms}-N$ 曲线已经有了一些积累,但与常规的疲劳 $S-N$ 曲线相比,在质量上、数量上还相差很远。随着飞机结构日趋复杂和大量新材料的应用,这些曲线已不能满足工程上的要求。Miles 根据 Miner 累积损伤理论,假定损伤应力峰值为窄带过程,提出了在频域估算疲劳寿命的闭合公式算法^[1]。但航空发动机机匣结构属于薄壁筒体结构,与飞机结构强度分析中主要考虑的板式结构不同,其模态密度较高,高频宽带噪声载荷可以在很宽的频带范围内激起结构的响应,其应力响应过程是宽带随机过程,以往假定损伤应力为窄带过程的飞机结构声疲劳分析方法不再适用。本文对从宽带疲劳应力功率谱密度(PSD)出发获得寿命估算所需要的应力雨流循环幅值的概率密度的方法进行了分析与比较,并对发动机结构声疲劳分析中值得深入研究及发展的方法给出了建议。

2 结构声疲劳寿命估算中的 关键问题

P-M 累积损伤理论虽然忽略了加载次序及载荷间相互作用的影响,但由于其形式简单、便于应用而广泛用于实际工程之中。根据这一理论,结构(材料)的损伤可表示为:

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} \quad (1)$$

式中: n_i 第 i 级应力水平下的循环次数; N_i 第 i 级应力水平下的疲劳寿命。

根据 P-M 理论,由随机振动理论推导出累积损伤率为^[2]:

$$E[D] = K^{-1} E[M_T] \int_{-\infty}^{\infty} s^b p_p(s) ds \quad (2)$$

式中: $E[M_T]$ 为损伤事件的平均发生率; $p_p(s)$ 为损伤事件的概率密度函数; K, b 为材料 $S-N$ 曲线中确定的常数 ($NS^b = K$)。

由此可见,噪声载荷下疲劳寿命分析的关键在于如何在频域中获得损伤事件的概率密度函数 $p_p(s)$ 和损伤事件的发生率 $E[M_T]$ 。通常情况下,对于窄带随机过程, $E[M_T]$ 为零穿越的速率 $E[0] = (m_2/m_1)^{1/2}$; 而对于宽带随机过程, $E[M_T]$ 为应力峰值出现的速率 $E[P] = (m_4/m_2)^{1/2}$, 其中 m_n 为响应功率谱的 n 阶谱矩。

对于低循环疲劳问题,损伤事件是由计数法

进行统计的。常用的计数法不下十种,其中峰值计数法物理意义明确、数学表达简单,是目前广泛应用的比较成熟的方法。雨流循环计数法最早由 Matsuiski 和 Endo 在 1968 年提出,是被普遍认为能够更好地反映损伤过程的方法。然而对于由噪声引起的宽带高频随机振动应力过程,这些计数法很难直接应用。原因在于所有的计数法都是针对时域信号的统计,而声疲劳应力的刻画是频域上的功率谱密度。虽然可以采用 Monte-Carlo 方法从功率谱密度直接模拟疲劳应力的时间历程,再用计数法对应力循环进行统计,但这是一项费时、费力的工作,对于高频声疲劳来说更是如此。因此声疲劳寿命分析的关键在于如何从声疲劳应力的功率谱密度直接获得损伤事件发生的概率密度。有研究表明,峰值计数法过高地估算了损伤,对疲劳寿命的预测偏于保守,有必要将雨流循环计数法引入声疲劳分析^[4]。对于窄带平稳高斯过程,可根据随机振动理论,从功率谱密度推导出雨流循环幅值的概率密度函数。而对于宽带过程,一些学者用引入修正系数的方法将窄带公式推广到宽带随机应力过程^[3],但其精度和适用范围仍需进一步研究。Dirlik 则通过计算机模拟,对七十种不同形状的功率谱进行了研究,给出了由功率谱密度估算雨流循环概率密度函数的经验公式^[5]。该公式应用方便,对于工程应用具有很大的参考价值。但该式仅针对平稳 Gauss 过程计算其雨流循环幅值的概率密度,在应用上有一定的局限性。

1987 年 Rychlik 对雨流循环提出了新的定义^[6],而且用严格的数学语言加以描述,并证明了新定义与原始定义的等价性,为在频域中分析雨流循环提供了一个理论基础。

3 雨流循环概率密度的频域理论

Bishop 在 Rychlik 关于雨流循环新定义的基础上做了进一步简化,见图 1,并在此基础上提出一种在频域中计算雨流循环概率密度的理论方法^[7]。

根据 Bishop 关于雨流循环的定义,在峰值点 1 形成幅值为 σ 的雨流循环必须有以下三个事件同时发生:

(1) Y_1 事件:信号由 4 点出发到达 1 点,到达之前不能超过 1 点水平。两点之间可有任意个峰谷值点。

(2) Y_2 事件:信号由 1 点出发到达 2 点,其间不能超过 1 点水平也不能低于 2 点水平。到达之

前可有任意个峰谷值点。

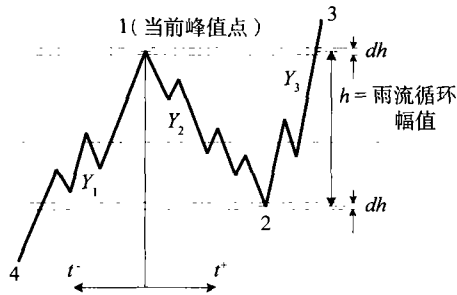


图 1 雨流循环 Bishop 定义

Fig. 1 Bishop's definition of a rainflow range cycle

(3) Y_3 事件: 信号由 2 点出发到达 3 点, 到达之前不能低于 2 点水平。其间可有任意个峰谷值点。

这三个事件被看作是三个独立的事件, 因此雨流循环概率密度函数可由这三个事件同时发生的概率确定, 即:

$$p_{RR}(h) = \frac{2.0}{dh} \sum_{ip=h+1}^{\infty} Y_1(ip, kp) \times Y_2(ip, kp) \times Y_3(ip, kp) \times p(ip) \quad (3)$$

式中: ip, kp 分别为雨流循环峰谷值所对应的应力级别, $h = ip - kp$ 为雨流循环幅值, $Y_1(ip, kp)$, $Y_2(ip, kp)$, $Y_3(ip, kp)$ 分别为三个独立事件发生的条件概率, $p(ip)$ 为 ip 级的峰值概率。

因此, 计算雨流循环概率密度的问题就转化为如何得到三个独立的条件概率。这三个事件可以用 Markov 链模型来描述, 见图 2。对于平稳 Gauss 随机过程来说, 由于整个过程分别关于时间和均值对称, 事件 Y_1, Y_2, Y_3 可以采用相同的手法来处理。这样, 问题就进一步转化成为如何获得迟早转移进状态 1 和状态 2 的吸收概率。

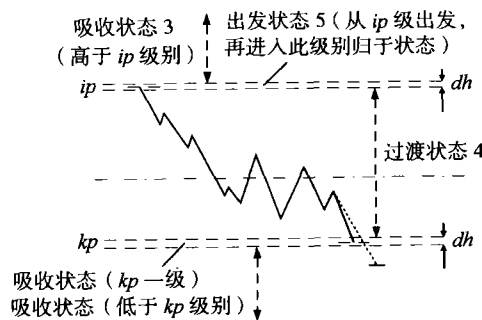


图 2 雨流循环 Markov 链模型

Fig. 2 The Markov Chain model used to characterize a rainflow range cycle

对于平稳 Gauss 过程, 应用 Kowalewski 提出的相邻峰谷值联合概率分布的近似公式可以得到峰谷值的一步转移概率, 进而应用 Markov 链理论经过多步转移就可以得到上述两个吸收概率。具体计算过程如下:

(1) 由 Kowalewski 的相邻峰谷值联合概率分布近似公式计算峰谷值一步转移概率。

$$P_{\min, \max}(\alpha_1, \alpha_2) = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{4m_0\gamma^2 \sqrt{2\pi m_0(1 - \gamma^2)}} \times \exp\left\{\frac{-1}{8m_0\gamma^2(1 - \gamma^2)}[\alpha_1^2 + \alpha_2^2 + 2\alpha_1\alpha_2(2\gamma^2 - 1)]\right\} \quad (4)$$

式中: α_1 为谷值, α_2 为峰值, m_n 是功率谱密度函数的 n 阶谱矩, $\gamma = m_2/\sqrt{m_0 m_4}$ 为不规则因子。

(2) 用 Markov 链模型计算两个吸收过程的多步转移概率 f_j^i, f_{ij} 表示由级别 j 转移至状态 i 的吸收概率。

(3) 计算 Y_1, Y_2, Y_3 三个条件概率:

$$Y_2 = f_{ip}^1$$

考虑整个过程关于时间对称:

$$Y_1 = f_{ip}^1 + f_{ip}^2$$

考虑整个过程关于均值对称:

$$Y_3 = f_{ip+h-ip}^{1*} + f_{ip+h-ip}^{2*}$$

其中: tp 是信号均值的 2 倍, 状态 1^* 是级别 $tp - ip$, 状态 2^* 是低于 $tp - ip$ 的所有级别。

(4) 按下式计算幅值为 h 的雨流循环概率密度:

$$p_{RR}(h) = \frac{2.0}{dh} \sum_{ip=h+1}^{nts} (f_{ip}^1 + f_{ip}^2) \times (f_{ip}^1) \times (f_{ip+h-ip}^{1*} + f_{ip+h-ip}^{2*}) \times p(ip) \quad (5)$$

式中: nts 为离散级别总数。

研究表明, 该方法得到的结果与原始信号直接计数的结果吻合很好, 仅在低幅值范围有些差异, 这主要是由 Kowalewski 公式近似性造成的^[7]。由于相邻峰谷值联合概率分布在该方法中是一个相当独立的部分, 因此一旦这部分理论有任何进展, 都会立刻给 Bishop 方法带来进步。

4 数值分析

我们对某一结构的响应分别用窄带过程理论、Dirlik 经验公式和雨流循环的频域理论对结构的疲劳损伤及疲劳寿命进行了分析。该结构响应功率谱密度由下式刻画:

$$G(f) = AH_s^6 \times \frac{\exp\left[-\frac{1050}{(2\pi T_D f)^4}\right]}{T_D^4 (2\pi f)^5 \left\{ \left[1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right]^2 + \left(\frac{2\xi f}{f_n}\right)^2 \right\}} \quad (6)$$

式中: H_s 为有效波高; T_D 为波浪主周期; A 为标尺系数; f_n 为结构固有频率。

该公式是 Wirsching P H^[3] 在研究海浪作用下海洋平台结构响应时给出的。其研究目的是将平台结构的响应分解为若干个平稳随机过程, 每个过程的功率谱密度由相应的有效波高、波浪主周期及其所占的时间比例用上式确定。由于该式可以描述宽带随机过程, 而且是一个确定性的表达式, 便于不同方法间的分析、比较, 因此, 在宽带随机疲劳损伤的研究中被普遍采用。

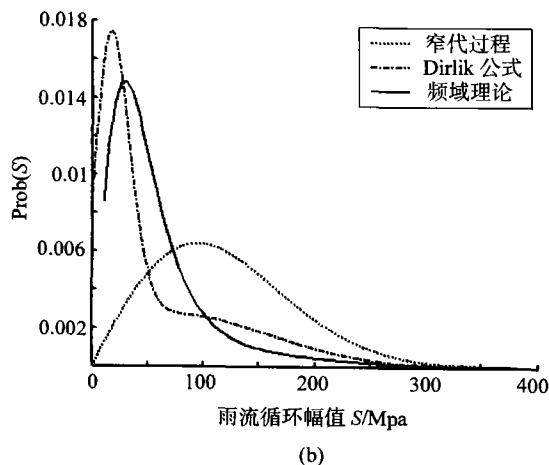
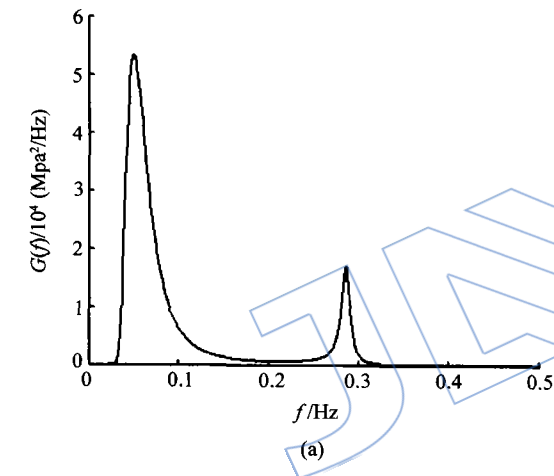


图 3 第一种响应功率谱及雨流循环幅值的概率密度曲线

Fig. 3 Structure response PSD and its Rayleigh, Dirlik and Bishop rainflow range probability density functions

图 3 和图 4 分别给出了两组不同参数所对应的结构响应功率谱和根据不同理论所绘制的雨流循环幅值的概率密度曲线。

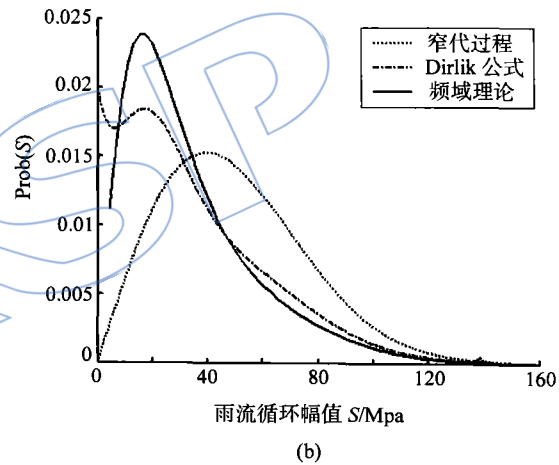
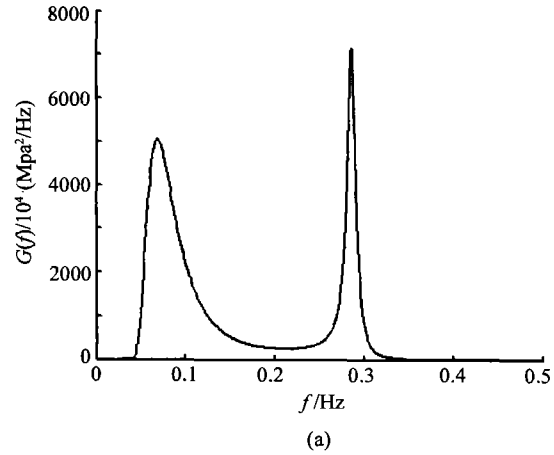


图 4 第二种响应功率谱及雨流循环幅值的概率密度曲线

Fig. 4 Structure response PSD and its Rayleigh, Dirlik and Bishop rainflow range probability density functions

图 3 和图 4 所示的结构响应为宽带随机过程, 其功率谱密度曲线是典型的双峰谱。应用窄带过程理论得到的曲线无论形状上还是数值上都与其他方法的结果有很大差异, 说明对于宽带随机过程不能应用窄带理论进行分析。而应用 Dirlik 经验公式与 Bishop 频域理论得到的结果曲线比较接近, 仅在低幅值范围有比较显著的差异, 这也是由于前面我们提到的 Kowalewski 公式近似性造成的。但二者的总体趋势还是比较一致的。

Wirsching 曾对某海洋平台结构总结了可能发生的 11 种海况下的参数^[3], 将每组参数分别代入公式(6), 即可得到各种情况下的结构响应功率

谱。有了这些功率谱,再应用前述的概率密度频域理论,并结合公式(2)即可估算出结构损伤和寿命。现取材料常数 $K=1.23 \times 10^5$, $b=4.38$,分别应用窄带过程、Dirlik 经验公式和雨流循环的频域理论,结合公式(2)对该结构进行疲劳损伤与寿命估算,计算结果列于表 1。三种不同的理论与方法得到的结构最终寿命分别为 28 年,35.6 年和 47.5 年,而应用 Monte-Carlo 方法模拟时域历程进行分析,得到的平均寿命约为 42.5 年,可见对于宽带随机过程来说,Dirlik 经验公式与 Bishop 的频域理论方法对疲劳寿命的估算结果是可以接受的。与其类似,对于受高频宽带噪声载荷激励的航空发动机结构,只要获得了结构响应的功率谱,就可用同样的方法估算结构声疲劳寿命。

表 1 疲劳损伤计算结果

Table 1 Fatigue damage calculations for 11 sea states

海况	单位时间损伤 $\times 10^{-9}$		
	窄带过程理论	Dirlik 公式	频域理论
1	0.0187	0.0140	0.0081
2	0.0269	0.0202	0.0124
3	0.0559	0.0421	0.0273
4	0.1757	0.1335	0.0938
5	0.2846	0.2188	0.1656
6	0.2159	0.1684	0.1344
7	0.1570	0.1253	0.1050
8	0.1114	0.0924	0.0730
9	0.0751	0.0650	0.0427
10	0.0137	0.0125	0.0053
11	0.0001	0.0001	0.00002
总损伤	1.1349	0.8922	0.6677
寿命/年	28.0	35.6	47.5

5 结 论

对于用功率谱刻画结构应力响应的航空发动机结构声疲劳问题,由于响应功率谱具有高频宽带特征,不便采用 Monte-Carlo 模拟的方法,也不宜采用窄带过程理论。因此,从宽带功率谱中直接获得雨流循环概率密度是解决问题的关键。Dirlik 的经验公式简单、方便,不涉及复杂的随机振动理论,针对平稳 Gauss 过程具有很大的应用价值。而 Bishop 的理论方法从雨流循环的定义入手,思路简单、清晰,理论上只要得到相应的峰谷值联合概率分布,就可以应用于各种形式的随机过程,因而它是发动机结构声疲劳分析中值得深入研究及发展的一种方法。

参考文献:

- [1] 姚起杭,杨学勤. 飞机结构声疲劳设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,1998.
- [2] Lin Y K. Probabilistic Theory of Structural Dynamics[M]. McGraw-Hill Book Company,1976.
- [3] Wirsching P h,Light M C. Fatigue under Wide Band Random Stresses[J]. J Struct Div, ASCE,1980,106:1593-1607.
- [4] Miles R N. Effect of Spectral Shape on Acoustic Fatigue Life Estimates[J]. Journal of Sound and Vibration,1992,153(2): 376-386.
- [5] Bishop N W M, Frank Sherratt. Fatigue Life Prediction from Power Spectral Density Data, Part 2: Recent Developments [J]. Environmental Engineering,1989,2(2):11-15.
- [6] Rychlik I. A New Definition of the Rainflow Cycle Counting Method[J]. International Journal of Fatigue,1987,9(2):119-121.
- [7] Bishop N W M, Frank Sherratt. A Theoretical Solution for the Estimation of Rainflow Ranges from Power Spectral Density Data[J]. Fatigue and Fracture Engineering Materials and Structures,1990,13(4):311-326.