

文章编号: 100028055(2009) 062127205

微动疲劳寿命可靠性分析方法

崔海涛, 汪 震, 温卫东, 徐 颖
(南京航空航天大学 能源与动力学院, 南京 210016)

摘 要: 针对结构的微动疲劳问题, 发展了一种寿命可靠性分析方法. 在微动条件下, 接触区域处于多轴应力状态, 采用基于临界平面法的多轴疲劳参数对结构的微动疲劳寿命进行预测. 在确定性寿命计算的基础上, 考虑弹性模量、摩擦系数以及寿命预测模型中材料常数的随机性, 利用响应面方法, 结合 Monte Carlo 模拟技术获得结构微动疲劳寿命可靠性模型. 最后将此方法用于燕尾榫结构的微动疲劳寿命可靠性分析, 验证了所提出方法的可行性和有效性.

关 键 词: 微动疲劳寿命; 可靠性; 临界平面法; Monte Carlo 法; 燕尾榫

中图分类号: V233 文献标识码: A

Reliability analysis method of fretting fatigue life
CUI Ha2tao, WANG Zhen, WEN We2dong, XU Ying
(College of Energy and Power Engineering,
Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: A fretting fatigue reliability analysis method was developed. The contact area was in a mult2axial stress state under fretting conditions. The mult2axial fatigue parameter based on the critical plane was used to predict the fretting fatigue life. On the basis of calculating determinate life, the randomness of modulus of elasticity, friction coefficient and material constant in the life model were considered, and the fretting fatigue life reliability model was obtained by Monte Carlo simulation method along with the response surface method. Finally, the method was applied to analyze fretting fatigue life reliability of dovetail joint, proving the feasibility and validity of this method.

Key words: fretting fatigue life; reliability; critical plane; Monte Carlo method; dovetail joints

微动疲劳失效常常造成关键部件的提前断裂, 导致严重的事故, 特别是在各种螺栓连接、发动机榫连接结构中表现得尤为突出. 因此结构微动疲劳寿命可靠性评估具有重要的工程意义. 针对疲劳可靠性问题人们已经进行了广泛的研究, Kandarpa^[1] 等将寿命预测模型中的材料常数考虑为随机变量, 发展了一种随机的应变-寿命预测模型, 并用二次二阶矩法分析了带槽口试件在等幅循环疲劳载荷下寿命的可靠性. 目前, 针对微动疲劳寿命可靠性分析方法的研究, 国外开展了初步的研究工作. 其中, Zhang^[2] 等利用一次二阶矩方法, 结合多轴 Smith-Watson-Topper (SWT) 参数对铆钉搭接结构进行了寿命可靠性分析, 证明了此方法的可行性. Ni^[3] 等研究了焊接头的微动疲劳可靠性问题, 利用概率 Miner 准则, 结合概率应变寿命曲线, 发展了一种基于应变的概率疲劳寿命预测方法, 这种方法适用性较广, 但概率应变寿命曲线一般较难获得. Liao^[4] 等利用单轴

SWT 参数预测了飞机机身结构微动疲劳寿命,并拟合了响应面用于可靠性分析,获得了微动疲劳寿命的概率分布,与试验数据基本吻合.国内关于微动疲劳寿命可靠性研究方面的有关文献相对较少.对于燕尾榫结构的微动疲劳研究目前国内外还都主要集中在寿命预测方法以及微动疲劳破坏机理方面,对微动疲劳寿命可靠性的研究很少.本文以多轴微动疲劳寿命预测模型为基础,结合计算机仿真技术建立结构微动疲劳寿命可靠性分析方法.以弹性模量、摩擦系数和寿命预测模型参数等为随机变量,对燕尾榫结构进行微动疲劳寿命可靠性分析.

1 微动疲劳寿命可靠性分析方法

微动疲劳寿命可靠性的分析方法是:首先建立微动疲劳寿命预测模型;其次确定随机变量,结合可靠性分析方法进行微动疲劳寿命可靠性分析.本文首先建立基于多轴疲劳参数的微动疲劳寿命预测模型,然后以 Monte2Carlo 方法进行结构可靠性分析,从而发展了一种微动疲劳寿命可靠性的分析方法.

1.1 多轴微动疲劳寿命预测模型

在微动条件下,接触区域处于复杂的应力状态,利用多轴疲劳参数预测微动疲劳寿命往往会得到更加合理的结果.目前常用的多轴疲劳参数大多是基于临界平面法的.所谓临界平面,就是疲劳破坏最有可能发生的平面. Smith^[5] 等认为疲劳裂纹萌生主要是受正应力或正应变的影响,并提出了 SWT 参数为

W= R_{max}E (1)

其中 R_{max} 为最大应力, E 为应变幅值. Szolwinski 和 Farris^[6] 定义参数组合 R_{max} E 最大的平面为临界平面,并用试验验证了此参数预测微动疲劳寿命的有效性. 本文采用 Farris^[7] 提出的一种通用寿命预测模型为

W= A(N)^{-b} (2)

式中 A 和 b 为系数, N 为微动疲劳寿命. 该模型可以较好地描述微动疲劳寿命和微动综合损伤参数之间的关系,且拟合系数较少.

1.2 可靠性分析方法

1.2.1 Monte2Carlo 模拟方法

Monte2Carlo 模拟方法是一种进行可靠性分析比较有效的方法,其使用范围广,并且它的理论

基础是大数定理,可以应用于各种非线性系统.但缺点是为了获得足够精确的结果就必须进行大量的抽样模拟试验,这将严重影响 Monte2Carlo 方法的计算效率,对于比较复杂结构的非线性有限元分析,计算量将是无法估量的.响应面方法可以较好地解决这一问题,它通过一系列确定性试验拟合一个响应面来模拟真实的极限状态曲面,该响应面可以用数学方程来模拟,从而用该响应面方程来代替有限元模型进行失效模式分析,可以大大节约计算和分析时间.本文利用响应面模型代替了 SWT 参数的有限元计算从而建立起微动疲劳概率寿命预测模型,为 Monte2Carlo 模拟方法的实施奠定了基础.

工程中一般采用二阶多项式响应面模型^[8],其数学表达式如下:

y= a₀+ ∑_{i=1}ⁿ a_ix_i+ ∑_{i=1}ⁿ ∑_{j=1}ⁿ a_{ij}x_ix_j (3)

式中 n 为输入变量的维数, a₀, a_i, a_{ij} 为多项式系数,其数值根据已知设计点信息采用最小二乘法来确定.对于具有 n_s 个设计点生成的响应面模型,为了检验模型的适应能力,对其进行预测能力的估计,一般采用的方法是进行 R² 分析和 R_a² 分析. R² 和 R_a² 用于衡量模型的拟合程度,二者越接近于 1,说明拟合效果越好.通常要求二者均在 0.9 以上.

1.2.2 模拟结果的分析处理

对 Monte2Carlo 模拟仿真结果首先做出直方图来初步判断抽样值的分布类型.对于三参数 Weibull 分布,一般采用概率加权矩法^[9] 进行分布参数估计,其概率加权矩的表达式为

M_{1,0,k}= C / (1+ k) + G#(1+ 1/B) / (1+ k)^{1+ 1/B} (4)

式中 C 为 Weibull 分布位置参数, B 为形状参数, G 为尺度参数, #(,) 为伽玛函数; k 为加权矩阶数.为确定 Weibull 分布中的 3 个参数,通常取 k= 0, 1, 3, 建立方程组进行求解.

对于拟合得到的参数,还需要进行假设检验,以确定所假设的分布是否正确.常用的拟合优度检验方法有 V² 检验和 Kolmogorov2Smirnov(K2S) 检验,其中 K2S 检验比较常用.如果检验通过,则可以得到在一定置信度条件下的微动疲劳可靠度为

R(t)= exp[- (t-C/G)^B] (5)

11 3 微动疲劳可靠性分析的程序实现

图 1 为结构微动疲劳可靠性分析程序流程图, 以多轴微动疲劳寿命预测模型为基础, 选择抽样方法构建多轴疲劳参数的响应面模型代替其有限元计算, 从而建立概率寿命预测模型; 利用 Mont2Carlo 模拟方法进行抽样计算, 再结合概率加权矩法以及 K2S 检验方法进行假设分布的拟合检验. 主程序采用 Python 语言编制, 多轴疲劳参数的确定性有限元计算是通过在 Python 语言调用 MSC1 Marc 软件实现的, 响应面模型的构建、Monte2Carlo 模拟和分布检验程序均是采用 Matlab 语言编写, 在 Python 语言中调用 Matlab 程序实现其功能.

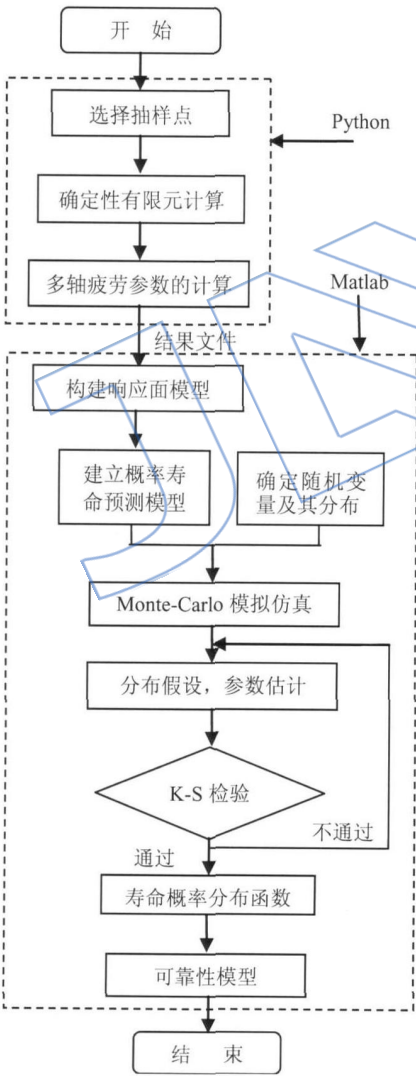


图 1 结构微动疲劳可靠性分析程序流程图
Fig1 Flow chart of reliability analysis for structural fretting fatigue

2 某燕尾榫模型件微动疲劳寿命可靠性分析

某燕尾榫模型件结构如图 2 所示, 榫头和榫槽材料均为 TC11 钛合金. 本文仅考虑叶片的离心力, 分别施加 11, 13, 15 kN 和 16 875 kN 的集中力. 选用 MARC 软件进行榫连接结构的弹塑性接触计算. 将燕尾榫模型件结构简化为二维平面模型, 视为平面应力问题. 由于模型的对称性, 只需建立 1/2 模型, 有限元网格模型如图 3 所示.

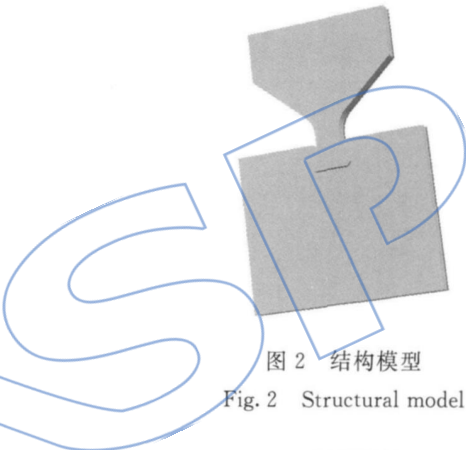


图 2 结构模型
Fig. 2 Structural model

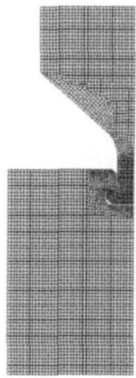


图 3 有限元网格模型图
Fig. 3 FEM mesh model

榫槽模型件的底端固定, 对称面施加对称约束, 榫头模型件上端施加均布拉力, 图 4 为网格自适应划分后的接触区网格图, 图中给出了相应的节点编号. 接触单元个数为 61, 接触区长度约 41 73 mm, 接触单元长度约 77 Lm. 有限元分析结果表明: 4 种工况下 SWT 参数的最大值都出现在 59 号节点处, 位于榫槽接触区末端. 表 1 为各工况下的最大 SWT 参数值以及试验寿命, 试验寿命为引用文献[10]的某燕尾榫模型件的低周微动疲劳试验结果.

表 1 各工况下 SWT 参数值以及试验寿命^[10]

Table 1 Value of SWT parameter and the fatigue life by experiment

工况	最大载荷/ kN	最大应力 $R_{m,ax}$ / MPa	应变幅值 E_a	SWT 参数 W/ MPa	试验寿命/ 次
1	11(R= 0.1)	629	0.002 58	11 62	73800
2	13(R= 0.1)	742	0.003 15	21 34	44975
3	15(R= 0.1)	838	0.003 80	31 18	27980
4	16 875(R= 0.089)	888	0.004 32	31 84	21497

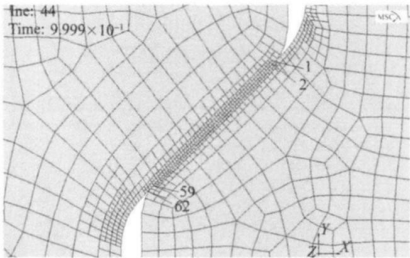


图 4 网格自适应划分后的网格以及节点编号
Fig 4 Mesh and node number by aut2mesh

由表 1 中前 3 种工况下的数据对式(2)进行拟合,得到微动疲劳寿命预测模型如式(6)所示

$$W= 39791.2 @N^{-0.016957} \tag{6}$$

将表 1 中第 4 种工况下的 SWT 参数代入式(6)得到其低周微动疲劳寿命为 21 599,与试验值相比,误差为 0.5%,验证了模型的有效性.

为提高 Monte Carlo 模拟效率,利用完全二次多项式响应面模型代替有限元法进行 SWT 参数的计算.选取弹性模量 E 和摩擦系数 f 为设计变量,根据中心复合抽样法对 SWT 参数进行抽样计算,利用完全二次多项式作为回归模型,用最小二乘法进行回归分析,得到响应面模型如式(7)所示

$$W= 41.60- 71.33 @10^{-5}E+ 61.79f+ 21.79 @10^{-10}E^2- 21.10 @10^{-5}Ef- 11.29f^2 \tag{7}$$

对此响应面模型进行 R² 及 R_a² 分析,求得 R²= 11 00000, R_a²= 0.99999,说明此二次多项式响应面模型与实际有限元计算模型一致性较好,具有较强的适应性.将 SWT 的响应面模型代入式(2)得到低周微动疲劳概率寿命预测模型如式(8)所示

$$A(N)^{-b}= 41.60- 71.33 @10^{-5}E+ 61.79f+ 21.79 @10^{-10}E^2- 21.10 @10^{-5}Ef- 11.29f^2 \tag{8}$$

本文参照文献[11]中各参数的分布类型和分布参数,模型中所有随机变量分布类型及其分布参数如表 2 所示.

表 2 低周微动疲劳概率寿命预测模型中的随机变量分布
Table 2 Distribution of the variables in low cycle fatigue (LCF)under fretting model

随机变量	E/ MPa	f	A	b
均值	120 000	0.5	39791.2	0.016957
标准差	3 600	0.025	791.584	0.006957
分布形式	正态	正态	正态	正态

对式(8)所表示概率寿命预测模型进行 10000 次 Monte Carlo 模拟.将仿真试验数据进行排序分组,做出寿命频率直方图,如图 5 所示.

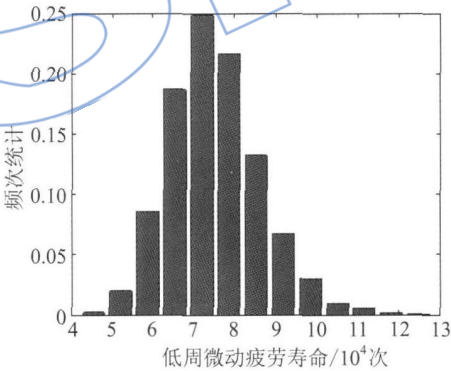


图 5 低周微动疲劳寿命频率直方图

Fig 5 Statistical graph of LCF life under fretting

由图 5 可以看出,寿命的分布呈偏态,因此假设燕尾榫模型件的微动疲劳寿命服从三参数 Weibull 分布.采用概率加权矩法进行参数估计,求得 3 个参数值分别为 C= 51 099, B= 21 362, G= 27061.

本文在显著性水平 A= 0.01 的条件下,用 K2 S 检验方法对试验数据进行检验,结果表明:假设成立,即在置信度为 99% 条件下,某燕尾榫模型件的低周微动疲劳寿命服从上述三参数的 Weibull 分布.进一步可得到微动疲劳寿命的可靠度为

$$R(t)= \exp\left[-\left(\frac{t-C}{G}\right)^B\right]= \exp\left[-\left(\frac{t-51099}{27061}\right)^{21362}\right] \tag{9}$$

图 6 给出了可靠寿命与可靠度之间的关系,并给出了可靠度分别为 50%, 99% 和 99.87% 时对应的微动疲劳寿命. 由图 6 可以看出,可靠度增大必然导致可靠寿命的降低. 当可靠度在[0.5, 1]范围内时,随着可靠度的增加,低周微动疲劳寿命的降低对提高可靠度的贡献越来越小;当可靠度达到一定水平时(如 90%), 要想进一步提高可靠度,则需要降低更多的设计寿命.

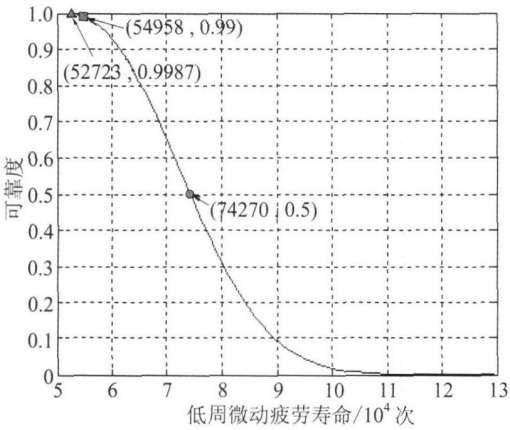


图 6 低周微动疲劳寿命与可靠度的关系图

Fig 6 Curve between LCF under fretting and reliability

3 结 论

本文以多轴微动疲劳寿命预测模型为基础,通过计算机仿真方法建立了一种微动疲劳寿命可靠性分析方法,并将其用于燕尾榫结构微动疲劳寿命可靠性分析. 具体结论如下:

- 1) 根据已有试验数据,拟合得到基于临界平面法的多轴疲劳 SWT 参数模型,用于燕尾榫结构微动疲劳寿命预测,并经与试验对比说明了其有效性.
- 2) 基于响应面法,建立了 SWT 参数的响应面模型. 将弹性模量、摩擦系数和寿命预测模型中的材料常数视为随机变量,建立了燕尾榫结构微动疲劳概率寿命预测模型.
- 3) 通过对微动疲劳概率寿命预测模型进行 Monte Carlo 模拟抽样计算,利用概率加权矩法确定了燕尾榫结构微动疲劳寿命可靠性模型. 结果表明:低周载荷作用下,燕尾榫结构微动疲劳寿命在置信度为 99% 时,服从 $C=51099$, $B=21362$ 和 $G=27061$ 的三参数 Weibull 分布.

参考文献:

[1] Kandarpa S, Spencer B F, Kirkner D J Reliability analysis of structural components utilizing the strain-life method [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1996, 53(5): 762774

[2] Zhang R X, Mahadevan S Probabilistic prediction of fretting fatigue crack nucleation life of riveted lap joints [R]. AIAA22000 16451

[3] Ni K, Mahadevan S Strain-based probabilistic fatigue life prediction of spot welded joints [J]. International Journal of Fatigue, 2004, 26: 762772

[4] Liao M, Shi G, Xiong Y Analytical methodology for predicting fatigue life distribution of fuselage splices [J]. International Journal of Fatigue, 2001, 23: 1772185

[5] Smith K N, Watson P, Topper T H A stress-strain function for the fatigue of metals [J]. Journal of Mechanics, 1970, 15: 762778

[6] Szolwinski M P, Harish G, Farris T N Comparison of fretting fatigue crack nucleation experiments to multiaxial fatigue theory life predictions [C] // Proceedings of the ASME Symposium on High Cycle Fatigue. Dallas, U. S. : [s. n.], 1997, 55: 442457

[7] Farris T N, Murthy H High-temperature fretting fatigue of single crystal nickel [R]. AFRI2 ML2WP2TR22006240811

[8] 程进 1 基于响应面法的几何非线性结构概率响应分析 [J]. 同济大学学报(自然科学版), 2006, 34(9): 114211511

CHENG Jin Probabilistic response analysis structures based on systematic of geometrically nonlinear response surface method [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2006, 34(9): 114211511 (in Chinese)

[9] 邓建, 古德生, 李夕兵 1 确定可靠性分析 Weibull 分布参数的概率加权矩法 [J]. 计算力学学报, 2004, 21(5): 6026131

DENG Jian, GU Dsheng, LI Xibing Parameters and quantile estimation for fatigue life distribution using probability weighted moments [J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2004, 21(5): 6026131 (in Chinese)

[10] 朱晶晶 1 榫连接结构低周微动疲劳寿命预测方法与试验研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2006

ZHU Jingjing Research on LCF fretting fatigue life prediction and experiment of dovetail joint [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2006. (in Chinese)

[11] 钱文学, 尹晓伟, 何雪泓, 等 1 压气机盘疲劳可靠性数字仿真分析 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2006, 27(9): 102210251

QIAN Wenxue, YIN Xiaowei, HE Xuehong, et al Digital simulation analysis of fatigue reliability of compressor disk [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2006, 27(9): 102210251 (in Chinese)