

文章编号:1674-8190(2014)02-182-05

基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法

陆山, 夏佳峰

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘要: 为了研究大应力体积对航空发动机轮盘低周循环疲劳破坏的影响, 提高轮盘概率寿命预估精度, 针对应变体方法对中、长寿命轮盘预测精度不准的缺陷, 提出基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法。该方法以最大主应变平面为临界面的 SWT 模型为基础, 结合考虑尺寸效应的体方法, 且不需要进行平均应力修正。通过对某风扇盘进行概率寿命分析, 得到的轮盘中值寿命与试验结果吻合良好, 预测精度高于应变点方法、应力修正系数法得到的结果。表明基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法可以用来预估航空发动机轮盘概率寿命。

关键词: SWT 模型; 体方法; 尺寸效应; 概率; 疲劳寿命; 轮盘

中图分类号: V232.3

文献标识码: A

Volume Method Based on the SWT Model for the Analysis of the Probability Life

Lu Shan, Xia Jiafeng

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: To study the high stress volume effect on the low cycle fatigue damage of disk, and improve the forecasting precision in the life of disk, considering the deficiency of precision in forecasting the medium and long life of disks by the volume method based on the strain life, a volume method based on the SWT model for analysis of the probability life of disk is proposed. The method is based on the SWT model which regards the maximum principal strain plane as critical plane, combining with the volume method in which the size effect are considered, and it is unnecessary to consider the correction of mean stress. Then the fatigue probability life of a fan disk is analyzed using the given method. The results of computational median life agree well with the experimental one, and forecasting precision is higher than the result by the point method based on the strain life and the method of stress correction coefficient. It is shown that volume method based on the SWT model can be used to estimate the medium and long probability life of aero-engine fan disks.

Key words: SWT model; volume method; size effect; probability; fatigue life; disk

0 引言

轮盘是航空发动机的关键件, 其主要失效模式为低周循环疲劳失效。影响低周循环疲劳寿命的主要原因包括尺寸效应、平均应力和多轴效应。在进行轮盘寿命预估时, 采用不同的方法得到的精度也不同。唐俊星等^[1]通过随机化的 Manson-Cofin 公式, 建立考虑载荷、几何分散影响的应变疲劳

概率模型, 应用响应面法与蒙特卡洛法结合得到轮盘低循环疲劳寿命的可靠度。李玉春等^[2]利用应力场强法对构件进行寿命估算, 效果较为理想, 但对于体积的选取依赖经验, 且只能得到中值寿命。唐俊星^[3]提出了考虑尺寸效应的应变疲劳寿命可靠性分析方法, 对某涡轮盘进行概率寿命分析, 预测结果与试验结果吻合良好, 但是采用该方法对某风扇盘进行概率寿命分析得到的结果远高于其试验寿命。高阳等^[4]应用 SWT 模型对某涡轮盘中心孔的疲劳寿命进行预测, 得到的计算结果与试验结果较接近。SWT 模型不需要考虑平均应力的影响, 比较简单, 但没有考虑尺寸效应的影响。

收稿日期: 2013-12-06; 修回日期: 2014-01-03

通信作者: 夏佳峰, xj0914@126.com

为了研究大应力体积对航空发动机轮盘低循环疲劳破坏的影响,提高轮盘概率寿命预估精度,本文提出基于 SWT 模型的考虑尺寸效应的概率寿命分析体方法,并预测某轮盘的疲劳寿命可靠性。

1 基于 SWT 模型的体方法

1.1 SWT 模型

Socie 认为材料低周循环疲劳的断裂形式分为剪切型和拉伸型两种。对于拉伸型破坏,Socie 以最大主应变幅平面为临界面,得到 SWT 寿命预测模型^[5]

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (1)$$

式中: σ_{\max} 为最大主应变平面上的最大拉应力; $\Delta \epsilon_1$ 为最大主应变范围; σ_f' 为材料疲劳强度系数; b 为材料疲劳强度指数; ϵ_f' 材料疲劳延性系数; c 为材料疲劳延性指数。

式(1)的损伤参量中含有应力应变项,可以看作是能量的体现,且与应变概率寿命模型相比的优点是不需要进行平均应力修正。

1.2 损伤参量数据库的建立

根据应变概率寿命模型^[1],本文对 SWT 模型建立随机化的疲劳寿命概率模型

$$\sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2} = 10^{-b\mu_1 \sigma_1} \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + 10^{-\mu_2 \sigma_2} \sigma_f' \epsilon_f' (2N_f)^{b+c} \quad (2)$$

式中: μ_1 、 μ_2 为相关系数是 λ 的标准正态随机变量。

记 $\sigma_{\max} \frac{\Delta \epsilon_1}{2}$ 为 SWT 损伤参量 P_d ,针对不同 P_d ,采用 Monte Carlo 法模拟得到寿命分布 N_f 。为便于工程应用,减少数据操作,将得到的 $P-N$ 曲线拟合成对数正态分布,只存储对数正态分布的均值和标准差两个数据,可根据标准正态分布函数计算给定寿命失效概率。从而可以建立不同损伤参量与对数寿命均值和标准差的数据库。

1.3 考虑尺寸效应的疲劳寿命可靠性分析方法

高阳等^[4]采用 Weibull 串联系统理论^[6],以标准试棒为例,将等直棒沿轴向 n 等分,推导出每一

小块体积失效概率为

$$P_f(V_i) = 1 - [1 - P_f(V_{ref})]^{V_i/V_{ref}} \quad (3)$$

式中: V_i 为等直棒等分后每一小块的体积; V_{ref} 为标准试棒试验段的总体积; $P_f(V_i)$ 为每一小块体积的失效概率; $P_f(V_{ref})$ 为标准试棒失效概率。

给定寿命条件下,每一小块体积的失效概率可以通过与该体积应力应变状态相同的等直棒失效概率转换得到。因此,对任何一个复杂受力体,可以划分成许多应力不等的小子块,在每个小子块内可近似认为是均匀应力应变场。通过式(3)可求得给定寿命下的每一小子块的失效概率,再根据串联系统理论,求得该复杂受力体失效概率。

1.4 结构等损伤参量体积分级累积

按照式(3)计算小块体积失效概率时,要求每个小子块为近似均匀应力应变场。而对于复杂结构有限元网格划分的各个单元是比较自然的离散子块,如果单元网格尺寸较大或者应力集中严重,在单元内的应力应变相差就会比较大。

因此,对给定结构危险部位的单元按照 SWT 损伤参量不同进行细分,得到结构等损伤参量体积分级累积分布。单元按照 SWT 损伤参量细分能够在一定程度上减少单元网格尺寸较大或应力集中严重带来的误差。单元内如果网格尺寸较大或网格出现畸形,则会造成同一单元节点损伤参量值相差较大,按照 SWT 损伤参量细分,相当于对单元网格进行细分。考虑尺寸效应的体方法在一定程度上能缓解有限元网格粗细对结果造成的影响。

基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法流程如图 1 所示。

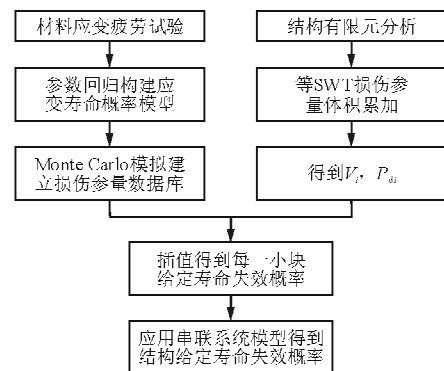


图 1 基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法流程
Fig. 1 Analysis of the probability life with the volume method based on the SWT model

2 某 TC11 风扇盘的概率寿命预测

2.1 TC11 风扇盘概况

某风扇盘材料为 TC11, 试验温度为室温, 盘上装有 33 个叶片, 试验转速谱为 1.5~9.235~1.5 kr/min。风扇盘 1/33 扇段实体模型及分网如图 2 所示。

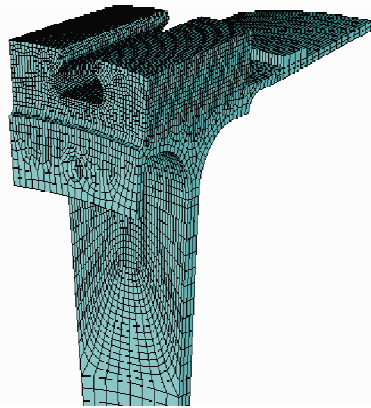


图 2 风扇盘 1/33 扇段有限元网格划分

Fig. 2 1/33 fan disk model and finite element mesh

2.2 TC11 材料疲劳性能参数

根据 TC11 低周试验数据^[7], 采用最小二乘法拟合得到疲劳性能参数, 如表 1 所示。

表 1 TC11 材料疲劳寿命参数

Table 1 Fatigue parameters of material TC11

参数	数值	参数	数值
σ_f'	2 488.8	b	-0.136 4
ϵ_f'	0.885 9	c	-0.827 3
σ_1	0.260 8	σ_2	0.116 8
λ	-0.107 3		

本文采用常温循环对称应力应变曲线, 得到 TC11 在常温下的循环应力应变曲线^[7]

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + (0.463\ 6 \times 10^{-9} \sigma)^{7.462\ 7} \quad (4)$$

2.3 风扇盘有限元弹塑性应力分析

通过有限元分析软件 ANSYS, 采用图 2 所示的有限元模型, 对风扇盘进行弹塑性有限元分析。风扇盘最大转速下的第一主应力云图如图 3 所示。

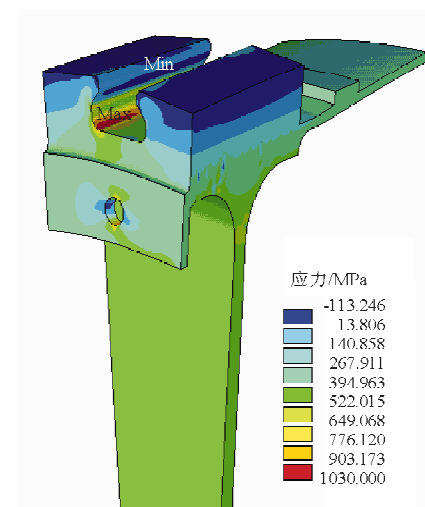


图 3 风扇盘最大转速下第一主应力云图

Fig. 3 The first principal stress distribution of fan disk under the maximum rotate speed

从图 3 可以看出: 加载状态下最大第一主应力点在榫槽根部, 因此把风扇盘榫槽作为危险部位。

2.4 风扇盘概率寿命分析

分别提取风扇盘榫槽部位节点加卸载第一主应力和第一主应变, 计算得到其第一主应变幅, 从而求得作为损伤参量 P_d 的值, 之后可插值^[8]得到单元内任一点 SWT 损伤参量值。

对单元按损伤参量进行细分, 得到榫槽关于损伤参量的体积分布, 如图 4 所示。

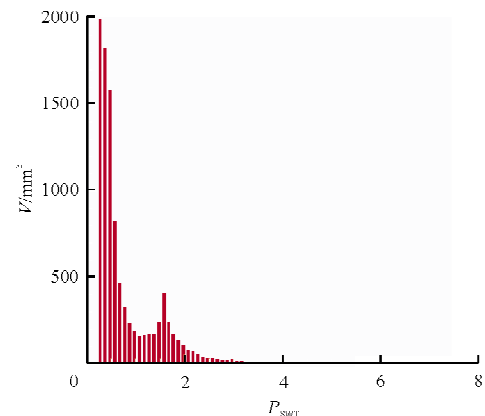


图 4 榫槽体积随 SWT 损伤参量大小分布

Fig. 4 Distribution of the fan disk mortise volume with SWT damage parameter

从图 4 可以看出, 风扇盘榫槽大部分体积的

SWT 损伤参量值都小于 3。由于损伤参量值低,对于轮盘疲劳寿命计算,这部分体积可以认为是安全的,对轮盘疲劳寿命没有贡献。选取损伤参量值大于 3 的体积作为危险体积,对轮盘进行概率寿命分析。

本文采用的是直径(D)为 6 mm、等直段长度为 $3D$ 的标准等截面直棒,参考体积 V_{ref} 为 508 mm^3 。通过式(3)可以计算 TC11 每一小子块体积的给定寿命 N_f 下的失效概率

$$P_f(V_i) = H(N_f, P_{di}, V_i) \quad (5)$$

式中: P_{di} 为小块体积内的 SWT 损伤参量值; V_i 为小块体积; H 函数以寿命 N_f 、 P_{di} 、 V_i 自变量,计算出给定寿命 N_f ,在损伤参量 P_{di} 作用下,小块体积 V_i 的失效概率。

对于 TC11 盘榫槽体积(V_{sys}),其给定寿命 N_f 下的失效概率为

$$\begin{aligned} P_f(V_{sys}) &= 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_f^i) \\ &= 1 - \prod_{i=1}^n [1 - H(N_f, P_{di}, V_i)] \quad (6) \end{aligned}$$

以标准等截面直棒作为参考体积,计算 TC11 风扇盘榫槽部位疲劳寿命概率曲线,如图 5 所示。

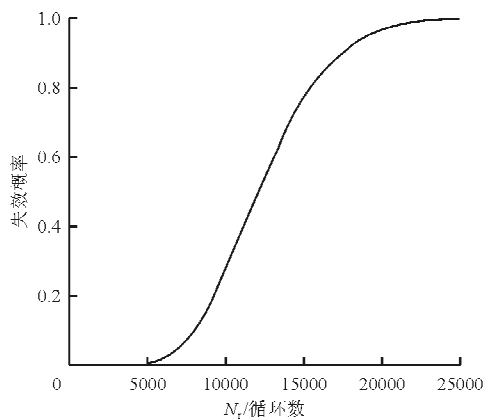


图 5 风扇盘榫槽疲劳寿命概率曲线

Fig. 5 Fatigue life probability curve of the fan disk mortise

将采用基于 SWT 模型体方法计算的风扇盘概率寿命结果与应变寿命点方法、应变寿命体方法^[9]、应力修正系数法^[10]的计算结果进行对比,如表 2 所示。

表 2 不同寿命方法预测 TC11 盘榫槽部位概率寿命

Table 2 Different methods for estimating the probability life of TC11 fan disk mortise

计算方法	$N_{99.87\%}$	$N_{50\%}$	$N_{50\%}/N_{99.87\%}$
应变寿命点方法	4 354	15 237	3.499 5
应变寿命体方法	11 742	43 836	3.733 0
应力修正系数法	2 125	13 675	6.435 3
SWT 模型体方法	4 453	12 019	2.699 1

TC11 风扇盘榫槽部位试验终止寿命约为 9100 个循环。从表 2 可以看出,采用应变体方法预估风扇盘中值寿命达到了试验寿命的 4.8 倍,而采用基于 SWT 模型的体方法计算概率寿命仅为试验中值寿命的 1.32 倍。应变体方法对中、长寿命轮盘预估精度不高,而基于 SWT 模型体方法则弥补了其不足,并且基于 SWT 模型体方法与应变点方法、应力修正系数法相比预测风扇盘精度最好。

3 结 论

(1) 考虑应力梯度引起的尺寸效应,提出了基于 SWT 模型的概率寿命分析体方法。

(2) 用基于 SWT 模型体方法对某风扇盘进行概率寿命分析,计算中值寿命为试验的 1.32 倍,而应力修正系数法和应变点方法计算的结果与试验结果之比大于 1.5。表明基于 SWT 模型体方法预估轮盘寿命的精度最好,可以用来预估航空发动机轮盘概率寿命。

(3) 基于 SWT 模型体方法弥补了原应变体方法对中、长寿命轮盘预测结果不理想的缺陷,并且由于不需要进行平均应力,计算相对于应变体方法简单方便。

参考文献

- [1] 唐俊星, 陆山. 轮盘应变疲劳寿命可靠性分析方法[J]. 推进技术, 2005, 26(4): 344-347.
Tang Junxing, Lu Shan. Reliability analysis method for the strain fatigue life of a disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2005, 26(4): 344-347. (in Chinese)
- [2] 李玉春, 姚卫星, 温卫东. 应力场强法在多轴疲劳寿命估算中的应用[J]. 机械强度, 2002, 24(2): 258-261.
Li Yuchun, Yao Weixing, Wen Weidong. Applications of stress field in multiaxial fatigue life estimate[J]. Journal of

- Mechanical Strength, 2002, 24(2): 258-261. (in Chinese)
- [3] 唐俊星. 含夹杂粉末盘概率寿命三维仿真方法与应用[D]. 西安: 西北工业大学, 2008.
Tang Junxing. 3D Simulation method of probabilistic life of powder metallurgy disk containing inclusions and application [D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2008. (in Chinese)
- [4] 高阳, 白广忱, 张瑛莉. 涡轮盘多轴低循环疲劳寿命可靠性分析[J]. 航空学报, 2009, 30(9): 1678-1682.
Gao Yang, Bai Guangchen, Zhang Yingli. Reliability analysis of multiaxial low cycle fatigue life for turbine disk[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2009, 30(9): 1678-1682. (in Chinese)
- [5] Smith R N, Watson P, Topper T H. A stress-strain function for the fatigue of metal[J]. Journal of Materials, 1970, 5(4): 767-778.
- [6] Weibull W. A statistical distribution function of wide applicability[J]. Journal of Applied Mechanics, 1951, 18(2): 293-297.
- [7] 牟园伟, 陆山. 轮盘低周疲劳概率寿命预估模型[J]. 推进技术, 2012, 33(2): 288-292.
Mu Yuanwei, Lu Shan. Low cycle fatigue probabilistic life prediction models for fan disk[J]. Journal of Propulsion Technology, 2012, 33(2): 288-292. (in Chinese)
- [8] 高德平. 机械工程中的有限元法[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1993.
Gao Deping. The finite element method in mechanical engineering[M]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University Press, 1993. (in Chinese)
- [9] 王春光. 基于应变寿命模型体方法的风扇盘概率寿命分析[D]. 西安: 西北工业大学, 2010.
Wang Chunguang. Research on the volume method for probabilistic life analyses of disk and imitation specimen [D]. Xi'an; Northwestern Polytechnical University, 2010. (in Chinese)
- [10] 杨剑秋, 陆山. 中长寿命轮盘应力寿命及可靠性分析方法[J]. 航空动力学报, 2007, 22(6): 991-995.
Yang Jianqiu, Lu Shan. Methods for stress based life and its reliability analyses of discs with medium-long and long life[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(6): 991-995. (in Chinese)

作者简介:

陆山(1955—),男,教授,博导。主要研究方向:航空发动机结构、强度、疲劳寿命和可靠性分析。

夏佳峰(1989—),男,硕士研究生。主要研究方向:航空发动机疲劳寿命和可靠性分析。

(编辑:赵毓梅)