

文章编号: 1000 8055(2008)11-2016-05

同应力多危险部位失效相关轮盘疲劳寿命可靠度分析方法

马双员, 陆 山

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 提出了考虑失效相关性的同应力多危险部位轮盘应变疲劳寿命可靠度分析方法. 引入广义强度和广义应力建立轮盘应变疲劳寿命可靠性模型, 采用 H-L 法计算轮盘单失效部位可靠度. 针对发动机轮盘常存在同应力多危险部位的特点, 当考虑多失效部位相关性时, 采用 Hohenbichler M 积分法对轮盘疲劳寿命可靠度进行计算. 最后通过某轮盘应变疲劳寿命分析说明该方法的有效性. 探讨了轮盘失效功能函数相关系数和应变寿命模型中材料随机变量相关系数关系, 以及轮盘失效功能函数相关系数和轮盘疲劳概率寿命规律.

关 键 词: 轮盘; 应变寿命; 多危险部位; 相关性; 系统可靠度

中图分类号: TB114.3; V231.95

文献标识码: A

Analysis method for the strain fatigue life reliability of a disk concerning failure correlation of multi critical sites in the same stress level

MA Shuang-yuan, LU Shan

(School of Power and Energy,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: In order to calculate strain fatigue life reliability of a disk more accurately, considering the failure correlation of the disk with multi critical sites in the same stress level, a method for analysis of strain fatigue life reliability was proposed. A strain fatigue life reliability interfere model based on generalized strength and generalized stress was set up, and H-L method was used to evaluate the fatigue life reliability at a failure site. As a fan disk usually contains multi critical sites in the same stress level, the strain fatigue life reliability of the disk concerning multi failure sites correlation was acquired through the Hohenbichler's integral method. Finally, an example of strain fatigue life analysis of the disk was given to demonstrate the efficiency of the method. The relationship of the correlation coefficient between the failure functions and the correlation coefficient between random variables in the stair life model is discussed. Also the relationship of the correlation coefficient between the failure functions and the probabilistic fatigue life of the fan disk concerning multi failure sites correlation is illustrated.

Key words: disk; strain life; multi critical sites; correlation; system reliability

收稿日期: 2007 10 30; 修订日期: 2008 04 07

作者简介: 马双员(1979-), 男, 河北唐山人, 硕士生, 主要从事航空发动机寿命可靠性研究.

低循环疲劳是航空发动机故障的主要形式, 据统计它约占发动机故障总数的 20%。发动机轮盘工作时承受着高温和高机械负荷, 低循环疲劳是造成发动机盘类零件寿命消耗的主要原因之一, 是发动机寿命设计的关键件之一。从疲劳机理上来说采用应变疲劳寿命模型分析轮盘寿命更合适。

20 世纪 90 年代以来国内外发展的 AMV 法、CPFI 法、载荷强度干涉法, 主要是假定应变幅 (或应力幅) 服从某种分布, 与实际情况有一定出入。文献[1] 采用应力-强度干涉法和模糊概率积分法计算涡轮盘的可靠度, 文献[2-3] 通过随机化的 Manson Coffin 公式建立考虑载荷、几何尺寸及材料分散性的应变疲劳寿命概率模型, 应用响应面和蒙特卡罗相结合的方法求解轮盘低周疲劳寿命可靠度, 两种分析方法都得到了较好的结果。上述分析中轮盘的同应力危险部位往往有多处, 如涡轮盘轴连接销钉孔有 16 个^[4], 风扇盘榫槽危险部位有 33 个^[2,5], 但目前轮盘寿命可靠性分析方法没有考虑同应力水平多危险部位寿命可靠性分析的特殊问题, 所得结果相当于全盘只有一个危险部位或多个危险部位完全相关。目前在发动机同级叶片系统强度可靠性方面已开始考虑失效相关性^[6]。

如需考虑轮盘同应力多危险部位的相关性, 本文针对发动机轮盘同应力水平多危险部位的特点, 基于文献[2-3] 寿命可靠性分析方法, 建立广义应力-强度干涉模型, 然后采用 H-L 法计算轮盘单一失效部位疲劳寿命可靠度。再针对轮盘的多危险部位处于同样应力水平的特点, 在考虑多危险部位失效相关性的前提下, 应用 Hohenbichler M 一次多维正态积分法^[7] 计算整个轮盘的疲劳寿命可靠度。

1 轮盘同应力多危险部位应变疲劳寿命可靠度计算方法

1.1 单危险部位轮盘应变疲劳寿命可靠度计算

若航空发动机轮盘存在多个相同名义应力的危险部位, 并制约着整个轮盘的寿命。基于随机化的 Manson Coffin 公式^[2], 在考虑平均应力影响情形下, 单危险部位应变疲劳寿命可靠性的广义强度可以表示为

$$\Delta \epsilon^R = 2 \times \left[\left(\frac{\sigma_f'}{E} \times 10^{u_1 \alpha_1} - \frac{\sigma_m}{E} \right) \cdot (2N_f)^b + \frac{\sigma_f'}{E} \times 10^{u_2 \alpha_2} (2N_f)^c \right]$$

(1)

式中 σ_f' 为疲劳强度系数, σ_f 为疲劳延续系数, b 为疲劳强度指数, c 疲劳延续指数, σ_m 为平均应力, N_f 为疲劳寿命, E 为材料弹性模量, u_1, u_2 是相关系数为 r 的标准正态分布^[2], α_1, α_2 分别为弹、塑性线标准差估计。

在分析轮盘危险部位低周疲劳寿命可靠度时, 需要考虑轮盘几何形状等随机因素对寿命的影响。一般单危险部位应变疲劳可靠性的广义应力可以表示为

$$\Delta \epsilon^S = f(R, \omega, E)$$

(2)

式(2)中 R 为危险部位尺寸参数, ω 为转速, E 为材料弹性模量。 $f(R, \omega, E)$ 可根据轮盘有限元计算数据采用响应面法^[23] 回归得出其显式。

应变疲劳失效功能函数可表示为

$$g = \Delta \epsilon^R - \Delta \epsilon^S = g(R, \omega, E, u_1, u_2)$$

(3)

极限状态方程表示为

$$g = \Delta \epsilon^R - \Delta \epsilon^S = 0$$

(4)

把(4)式中相关变量先转换为相互独立变量后, 可通过 H-L 法^[8] 计算单一失效部位应变疲劳寿命可靠性指标 β 。

1.2 同应力多危险部位轮盘应变疲劳寿命可靠度计算

失效相关是结构系统的普遍特征。发动机轮盘存在同样应力水平的多个危险部位, 由于材料的分散性和加工工艺水平限制, 轮盘多个危险部位的材料、载荷、几何尺寸存在分散性; 又由于不同危险部位同属一个盘, 且通常用一把刀具加工, 因此多危险部位疲劳寿命又存在一定的相关性。简单地用最危险部位的疲劳寿命可靠度作为整个轮盘的疲劳寿命可靠度估计是不够精确地。如任意两个同样应力水平的失效部位的功能函数相关系数用 ρ_g 表示, 在考虑相关性时, 可根据 Hohenbichler M 的一次多维正态积分公式^[7] 计算具有 n 个相同应力危险部位轮盘疲劳寿命的失效率

$$P_{fs} = \Phi(\beta, \rho_g) = \int_{-\infty}^{\infty} \phi(t) \left[\Phi \left(\frac{\beta - \sqrt{\rho_g} t}{\sqrt{1 - \rho_g}} \right) \right]^n dt$$

(5)

式中 β 为单失效部位疲劳寿命可靠性指标, $\phi(\cdot)$ 为标准正态分布的密度函数, $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

失效部位的功能函数一般为非线性, 在计算功能函数相关系数 ρ_g 时, 可对功能函数进行一阶泰勒展开。然后再把两功能函数中相关变量转化为独立变量, 最后可以导出两功能函数 g_1, g_2 的相关系数 ρ_g 的表达式

$$\rho_g = \frac{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{P^*}^2 \alpha_i^2 \rho_i}{\sum_{i=1}^5 \left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{P^*}^2 \alpha_i^2} \quad (6)$$

式(6)中 x_i 表示功能函数中各独立变量, ρ_i 表示功能函数 g_1 和 g_2 中的变量 x_i 的相关系数, $\left(\frac{\partial g}{\partial x_i} \right)_{P^*}$ 表示功能函数在 P^* 点(验算点)的偏导数值. 依据公式(6), 同应力水平多危险部位的功能函数相关系数 ρ_g 确定以后, 可直接依据公式(5)计算出轮盘疲劳寿命失效率, 进而求得轮盘疲劳寿命可靠度.

2 考虑相关性的某风扇盘榫槽应变疲劳寿命可靠度分析

某三级风扇盘在地坑试验载荷谱条件下, 计算其低循环应变疲劳寿命可靠性. 风扇盘试验温度为室温, 地坑试验转速谱 1 500-9 235-1 500 r/min 循环, 采用 TC11 等温锻盘坯标准试棒室温条件下对称循环疲劳数据, 材料密度 4.48×10^3 kg/m³, 泊松比 0.3. 该风扇盘通过 33 个燕尾槽装有 33 个风扇叶片, 燕尾槽底部 R 处是轮盘最薄弱部位, 容易萌生裂纹. 借助有限元分析软件 ANSYS 进行轮盘叶片系统接触弹塑性应力应变分析. 在有限元建模时, 为了减少计算量, 根据对称性, 模型选用包含一个燕尾槽、带一个叶片的 1/33 轮盘扇形段.

表 1 风扇盘裂纹萌生寿命分析随机变量参数
Table 1 Random variable parameters of the fan disc in crack initiation life analysis

随机变量	均值	标准差
E / MPa	122000	4430
ω / (1/s)	967	3.4
R / mm	2.5	0.033 3
弹性线应变幅	$(\sigma_f/E - \sigma_m/E)(2N_f)^b$	0.027 4
塑性线应变幅	$\varepsilon_f(2N_f)^c$	0.111

2.1 风扇盘单个榫槽疲劳寿命可靠度计算

对风扇盘榫槽进行有限元计算得出最危险点的应变幅, 采用响应面法进行应变幅拟合, 得到的单一危险点应变范围函数为

$$\Delta \varepsilon = 8.7718 \times 10^{-2} + 1.3184 \times 10^{-2} R^2 - 6.8053 \times 10^{-2} R + (2.2662 \omega - 1143.7)/E \quad (7)$$

利用 TC11 材料室温 $R = -1$ 的试验数据, 进

行随机化的 Mansor Coffin 公式参数拟合, 并考虑平均应力的影响, 可得应变寿命方程如下:

$$\Delta \varepsilon = 2[(0.0188 \times 10^{0.0274u_1} - 0.003736) \times (2N_f)^{-0.124} + 0.458 \times 10^{0.111u_2} (2N_f)^{-0.735}] \quad (8)$$

u_1 和 u_2 是相关系数 $r = 0.123$ 的标准正态分布^[2]. 将相关变量 u_1 , u_2 转换为相互独立变量, 方程(8)转换为

$$\Delta \varepsilon = 2[(0.0188 \times 10^{0.0274\frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1+Y_2)} - 0.003736) \times (2N_f)^{-0.124} + 0.458 \times 10^{0.111\frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1-Y_2)} (2N_f)^{-0.735}] \quad (9)$$

式中 $u_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1 + Y_2)$, $u_2 = \frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1 - Y_2)$, 相互独立变量 Y_1 , Y_2 均值均为 0, 方差分别为 $1+r$ 和 $1-r$.

选取(9)式为广义强度, (7)式为广义应力, 则榫槽应变疲劳寿命功能函数表达式为

$$g = 2[(0.0188 \times 10^{0.0274\frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1+Y_2)} - 0.003736) \times (2N_f)^{-0.124} + 0.458 \times 10^{0.111\frac{\sqrt{2}}{2}(Y_1-Y_2)} (2N_f)^{-0.735}] - 8.7718 \times 10^{-2} - 1.3184 \times 10^{-2} R^2 + 6.8053 \times 10^{-2} R - (2.2662 \omega - 1143.7)/E$$

为了利用文献[9]中分析结果并比较, 取轮盘疲劳寿命设计值 $N_f = 3\,870$. 采用 H-L 法及表 1 随机变量进行计算, 风扇盘单个榫槽疲劳寿命可靠度结果列于表 2, 3.

表 2 风扇盘榫槽疲劳寿命可靠度($N_f = 3\,870$)
Table 2 Life reliability of the fan disc mortise ($N_f = 3\,870$)

文献[9]	本文 H-L 法	相对差别
99.870%	99.879%	0.001%

表 3 风扇盘榫槽应变疲劳寿命($P_r = 99.87\%$)
Table 3 Strain fatigue life of the fan disc mortise ($P_r = 99.87\%$)

文献[9]	本文 H-L 法	相对差别
3870	3910	1.0%

2.2 考虑相关性多危险部位风扇盘寿命可靠度计算

风扇盘任意两个不同榫槽功能函数经独立化转换后可表示为

$$g_1 = g(R_1, \omega_1, E_1, Y_1, Y_2)$$
$$g_2 = g(R_2, \omega_2, E_2, Y_1, Y_2)$$

两榫槽功能函数的相关系数用式(6)求解.

疲劳寿命 $N_f = 3870$ 时, H-L 法计算单个榫槽疲劳寿命可靠性指标 $\beta = 3.033$. 同盘转速 ω 完全相同; 同盘的榫槽通常由同一把拉刀加工, 因此转角 R 差别很小; 同盘 E 差别不大. 同一毛坯, 认为盘的同应力多危险点的材料寿命参数相关性较大. 为简化计算, 又不失一般性, 此处取 R, ω, E 全相关 $\rho_\omega = 1.0, \rho_R = 1.0, \rho_E = 1.0$; 材料寿命参数 Y_1, Y_2 相关系数 $\rho_{Y_1} = \rho_{Y_2} = 0.7$. 由式(6)计算得 $\rho_g = 0.736$. 再根据公式(5), 可计算出考虑多榫槽($n = 33$)危险部位失效相关性时风扇盘疲劳寿命可靠度见表 4.

表 4 风扇盘寿命可靠度($N_f = 3870$)
Table 4 Life reliability of the fan disc($N_f = 3870$)

单失效部位	本文多失效部位相关	
文献[9]	$\rho_g = 1.0$	$\rho_g = 0.736$
可靠度/%	99.870	99.879
相对差别/%	—	0.009
		1.312

由表 4 可见: 当相关系数 $\rho_g = 1$ 时, 本文方法分析所得多危险部位轮盘疲劳寿命可靠性结果与文献[9]单危险部位疲劳寿命可靠度分析结果仅相差 0.009%, 说明了本文方法的正确性; 当相关系数 $\rho_g = 0.736$ 时, 本文方法分析可靠度结果和文献[9]结果相差 1.312%, 说明在工程应用中多失效部位相关性对轮盘寿命可靠度的影响不容忽视. 当 $\rho_\omega, \rho_{Y_1}, \rho_{Y_2}$ 保持不变, $\rho_R = \rho_E = 0.8$ 时, 轮盘的寿命的可靠度为 98.450%, 与 R, E 全相关模型可靠度相差 0.10%, R, E 相关性对轮盘寿命可靠度影响小. 当保持 R, ω, E 全相关, $\rho_{Y_1} = \rho_{Y_2} = 0.5$ 时, 轮盘的寿命的可靠度为 97.750%, 与 98.560% 相差 0.81%, 可见材料参数相关性是影响轮盘寿命可靠度的主要因素.

为了便于分析, 取风扇盘疲劳寿命 $N_f = 3870, 0 < \rho_g < 1$ 时, 计算出风扇盘的失效率见图 1. 由图 1 可看出随着功能函数相关系数增大, 风扇盘疲劳寿命失效率减小. 原因是榫槽危险部位相关系数增大时, 表示榫槽的危险部位的加工工艺水平高、材料的分散性小. 当 ρ_g 趋近于 1 时, 风扇盘的多危险部位疲劳寿命失效率趋近于单失效部位疲劳寿命失效率.

根据以往分析经验, 材料是影响轮盘寿命的主要因素. 为了便于分析, 取定变量相关系数为 $\rho_{Y_1} = \rho_{Y_2}, \rho_\omega = 1.0, \rho_R = 1.0, \rho_E = 1.0$, 绘制

出 ρ_{Y_1}, ρ_{Y_2} 和 ρ_g 的关系(图 2). 由图 2 可见, 二者为线性关系, 原因是求解过程中已对功能函数进行线性化.

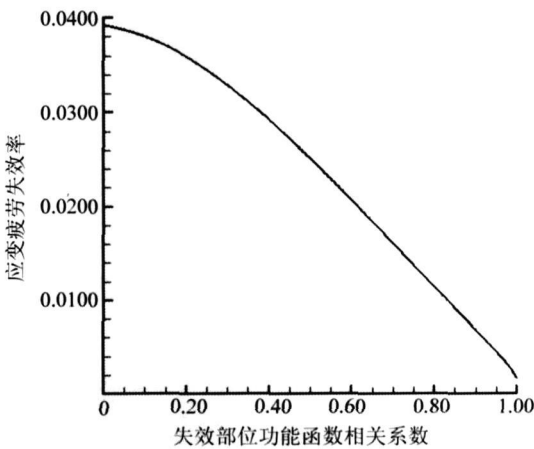


图 1 风扇盘失效率($N_f = 3870$)

Fig. 1 Failure probability of the fan disc($N_f = 3870$)

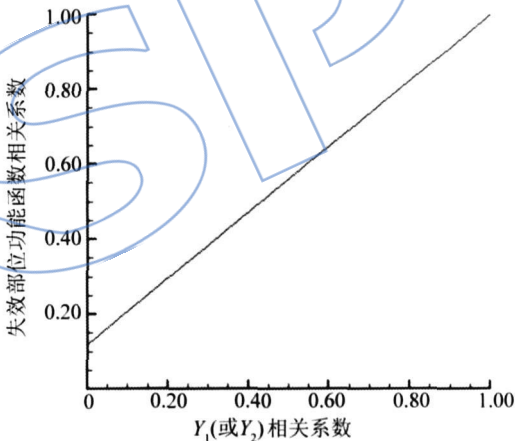


图 2 材料变量相关系数与功能函数相关系数关系

Fig. 2 Relation of the material's parameters relative to the correlation coefficient of disc's limit functions

取疲劳寿命可靠度为 99.87% 时, 榫槽功能函数相关系数和风扇盘疲劳寿命的变化规律见图 3.

由图 3 可见: 曲线与纵轴的交点 $\rho_g = 0, N_f = 2540$, 此时 $[\Phi(\beta_{2540})]^{33} = 0.9987$, 风扇盘疲劳寿命可靠度等于单失效部位疲劳寿命可靠度联乘积, 为多失效部位全独立情形; 当 $\rho_g = 1$ 时, $N_f = 3910$, 此时 $\Phi(\beta_{3910}) = 0.9987$, 风扇盘疲劳寿命可靠度等于单失效部位疲劳寿命可靠度, 为多失效部位全相关情形. 本文方法涵盖了以往轮盘寿命分析中失效全独立、或全相关分析模型. 当相关系数 $\rho_g \leq 0.4$ 时, 此时由图 2 可见 $\rho_{Y_1} = \rho_{Y_2} \leq 0.32$, 图 3 曲线下半段已接近水平直线, 风扇盘考虑多失效部位相关性概率疲劳寿命和多失效部位独立

串联模型概率疲劳寿命差别不超过 1%, 此时简化计算可用多失效部位串联模型估计风扇盘疲劳寿命可靠度.

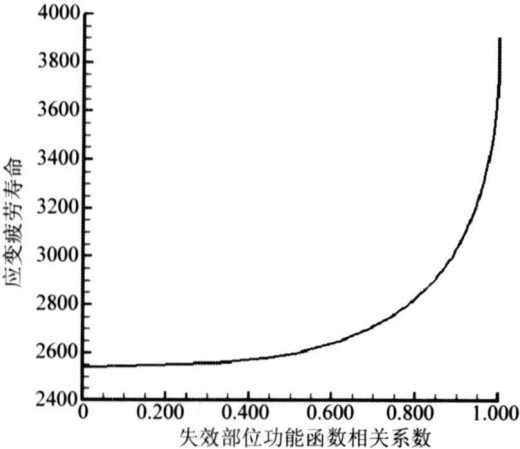


图 3 风扇盘应变疲劳寿命($P_r = 99.87\%$)

Fig. 3 Strain fatigue life of the fan disc($P_r = 99.87\%$)

3 结论

本文提出了考虑同应力水平多危险部位相关时, 轮盘应变疲劳寿命可靠度分析方法. 首先基于文献[2-3]方法, 定义了应变疲劳寿命可靠度分析的广义强度和广义应力, 建立了轮盘应变疲劳寿命可靠度分析模型; 其次运用 H-L 法计算单危险部位轮盘疲劳寿命可靠度; 最后在考虑同应力多危险部位失效相关的条件下, 分析轮盘疲劳寿命可靠度. 通过某风扇盘应变寿命可靠度分析, 所得轮盘寿命可靠度当 ρ_f 趋近于 1 时, 计算结果趋近于单危险部位轮盘寿命可靠度, 验证了本文方法的正确性, 同时说明单危险部位轮盘寿命可靠度分析方法是本文方法的特例. 本文以某风扇盘为例, 探讨了盘失效功能函数相关系数 ρ_f 和应变寿命模型中材料随机变量相关系数 ρ_{f1} 关系; 以及考虑多失效部位相关性时, 盘失效功能函数相关系数 ρ_f 和风扇盘概率疲劳寿命规律; 它们可供轮盘寿命可靠性设计时参考.

参考文献:

[1] 蒋向华, 杨晓光, 王延荣. 某型航空发动机涡轮盘结构可靠度计算[J]. 航空动力学报, 2005, 20(3): 407-412.
JIANG Xianghua, YANG Xiaoguang, WANG Yanrong. Structure reliability evaluation of a gas turbine disk [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(3): 407-412. (in Chinese)

[2] 唐俊星, 陆山. 某涡轮盘低循环疲劳概率寿命数值模拟[J]. 航空动力学报, 2006, 21(4): 706-710.
TANG Junxing, LU Shan. Numerical simulation of LCF probability life of a turbine disk [J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(4): 706-710. (in Chinese)

[3] 唐俊星, 陆山. 轮盘应变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)

[4] 鲁华平, 陆山, 唐俊星. 非对称循环疲劳寿命研究及涡轮盘可靠寿命分析[J]. 机械强度, 2007, 29(1): 92-96.
LU Huaping, LU Shan, TANG Junxing. Research on the unsymmetrical cyclic fatigue life and reliable life analysis of a turbine disk [J]. Journal of Mechanical Strength, 2007, 29(1): 92-96. (in Chinese)

[5] 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)

[6] 陆山, 高雅鹃, 吕文林. 考虑相关性的同级叶片系统强度可靠度分析方法[J]. 航空动力学报, 2008, 23(1): 17-20.
LU Shan, GAO Yajuan, LÜ Wenlin. Analysis method for same stage blade system strength reliability concerning the correlation [J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(1): 17-20. (in Chinese)

[7] Hohenbichler M, Rackwitz R. First order concepts in system reliability [J]. Structural Safety, 1983, 1: 177-178.

[8] 何水清, 王善. 结构可靠性分析与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993.

[9] 唐俊星, 陆山. 某风扇盘应变寿命可靠性分析[R]. 沈阳: 606 所技术报告, 2005.