

含置信度叶片疲劳寿命可靠性试验技术

南京航空学院 庄忠良 高德平 鲁启新

摘 要

本文指出在进行叶片可靠性试验时,不仅要考虑可靠度指标要求,还必须综合考虑置信度、可靠度、小样特性和模拟试验技术等等因素。从这一观点出发,本文提出了一种较合理的确定叶片疲劳寿命的可靠性试验。这种技术也适用于其它零件的疲劳寿命试验。

一、前 言

当已知一个母体的失效或修复特性的统计分布时,可以计算具有某种特性的小样发生的概率。但是,对一个母体内各项特性都进行测量可能性不大,因为这样做既费时又费钱。尤其是这种测量对试件有破坏的话,更是如此。因此需要有根据一组给定小样数据对母体内各项特性都进行估计的统计处理方法,随着子样容量增加,测量的子样参数和母体参数就会比较趋于一致。尽管不能肯定某一个小样是否能代表母体,但是把某种可信程度与某一小样特性联系起来通常是可能的。这种可信程度称为置信度,记为 C 。其值在0至1之间。

根据 Bayes 的非参量方程,可靠度 R 和置信度 C 有如下关系式^[8]:

$$R_c = (1 - C)^{1/(n+1)} \quad (1)$$

其中 R_c 为在置信度 C 下的可靠度, n 为小样容量。可见在小样一定的情况下,若可靠度 R 增加,则置信度 C 下降。工程上追求的是二者同时增加,这就给我们提出了一个问题,即在进行可靠性试验时,必须综合考虑可靠度、置信度、小样容量和模拟试验技术等等因素,以追求一种较优的疲劳寿命试验技术,这正是本文的目的所在。

二、一定置信度的小样选取法

在机械零件寿命可靠性试验中,为了推断该零件的疲劳寿命特征,常从一批零件中抽出一部分个体来进行试验。一般来说,抽取的小样数目愈多,用小样特性代表母体特性的可靠性就愈大。具体机械零件的可靠度就是存活率。在试验中选取太多的子样代表母体特性有时是不现实的,但小样太少又缺乏代表性。因此如何选取小样是可靠性试验中的一个重要问题。

当把试验小样所确定的可靠度应用于对母体的推断时,可靠度就与置信度发生了关系。

对于单侧情况,如图1所示,有下列公式,式中 α 为

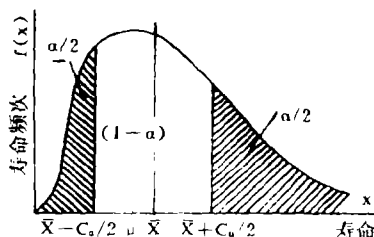


图1 寿命与寿命频次关系

显著度, $1-\alpha$ 为置信度。

$$P\{P(x \leq \bar{x} + C_{\alpha/2}) \geq R\} = \alpha/2$$

或

$$P\{P(x \geq \bar{x} - C_{\alpha/2}) \geq R\} = \alpha/2 \quad (2)$$

对双侧情况

$$P\{P(\bar{x} - C_{\alpha/2} \leq x \leq \bar{x} + C_{\alpha/2}) \geq R\} = \alpha \quad (3)$$

因此, 用小样寿命的对数平均值 $\bar{x}_t$ 来代替母体寿命的对数期望值 μ_1 有一定差异。其相对误差百分比为 $(\bar{x}_t - \mu_1) / \mu_1 \times 100\%$ 。这个误差在试验中要有一定的限制。例如不大于 7%。由于试验数据的随机性, 故用 (2)、(3) 式的概率表达式更为合理。

由于 μ 是取决于 $f(x)$ 的一个固定常数, 置信区间 $[\bar{x} - C_{\alpha/2}, \bar{x} + C_{\alpha/2}]$ 的大小取决于小样的选取。假设在给定应力水平下寿命 x 是服从对数正态分布。此假设在试验数据统计处理中已得到了证明。根据 t 分布理论,

$$P[-t_{\alpha/2, \gamma} \leq (\bar{x}_t - u_1) / (s_t / \sqrt{n}) \leq +t_{\alpha/2, \gamma}] = 1 - \alpha \quad (4)$$

式中 $\bar{x}_t$ 为小样对数平均寿命, u_1 为母体对数平均寿命, s_t 为小样对数寿命标准差, n 为小样尺寸, $(1-\alpha)$ 为置信度, γ 为自由度。从而有:

$$\sqrt{n} (\bar{x}_t - u_1) / s_t = \pm t_{\alpha/2, \gamma} \quad (5)$$

(5) 式可改写成:

$$(\bar{x}_t - u_1 / \bar{x}_t) / (s_t / \bar{x}_t) = \pm t_{\alpha/2, \gamma} / \sqrt{n} \quad (6)$$

对于给定的置信度 $(1-\alpha)$, 从 (6) 式可知, 右端仅与 n 有关。因此, 以 n 为横坐标, 以 $(\bar{x}_t - u_1 / \bar{x}_t) / (s_t / \bar{x}_t)$ 为

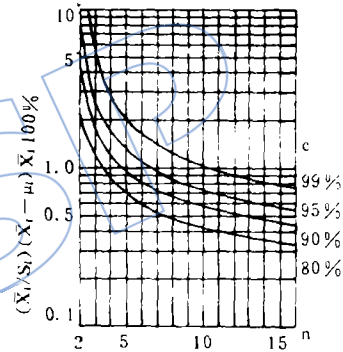


图2 不同置信度下子样大小的选取曲线

纵坐标, 就可以通过查 t 分布表得到在不同置信度下的关系曲线 (图2)。例如, 取置信度为 95%, 相对误差为 6.5%, 进行模拟寿命试验, 在原始块谱下变异系数 $s_t / \bar{x}_t$ 为 8%, 在加速连块谱下变异系数 $s'_t / \bar{x}_t$ 为 7%。查图2可以分别得到 9 和 7 个叶片。然后对所选取的这两组小样分别进行原始块谱和加速块谱疲劳试验, 所得结果列入表 1 和表 2 中。由表中数据求得在原始块谱下变异系数为 6.9% ($< 7\%$), 可见所选取的小样尺寸能满足 95% 置信度的要求。

表1 原始块谱的叶片疲劳试验结果

试件号	最大应力 MPa	循环寿命 10^6	对数寿命 $\lg N$	中秩 (%)	存活率 (%)	统计量
001	663.4	0.404	5.606	7.14	92.59	$\bar{x}_t = 6.346$ $s_t = 0.233$ $n = g$ 相关系数 $r = 0.954$
002	663.4	0.417	5.620	18.06	81.94	
003	663.4	1.818	6.260	28.71	71.29	
004	663.4	1.899	6.278	39.35	60.65	
005	663.4	2.050	6.312	50.00	50.00	
006	663.4	4.430	6.646	60.65	39.35	
007	663.4	4.793	6.681	71.29	29.71	
008	663.4	4.848	6.686	81.94	18.06	
009	663.4	10.673	7.028	92.59	7.41	

表2 加速块谱的叶片疲劳试验结果

试件号	最大应力 MPa	循环寿命 10^6	对数寿命 $\lg N$	中秩 (%)	存活率 (%)	统计量
011	729.8	0.883	4.946	9.43	90.57	$\bar{x}_1 = 5.212$ $s_1 = 0.132$ $n = 7$ 相关系数 $r = 0.9017$
012	729.8	0.924	4.966	22.95	77.05	
013	729.8	0.948	4.977	36.48	63.52	
014	729.8	0.997	4.998	50.00	50.00	
015	729.8	1.375	5.138	63.52	36.48	
016	729.8	5.297	5.723	77.05	22.95	
017	729.8	5.592	5.748	90.57	9.43	

三、可靠性叶片疲劳模拟试验技术

在进行可靠性设计中,应尽量选用好的材料,注意加工工艺和表面处理方法的选取,选择合理结构,通过可靠性预测和维修性预测等技术努力提高产品的可靠性,同时,应在产品的各个阶段上通过可靠性试验来验证产品的可靠性和安全性。可靠性试验要求试验能充分保证的可靠性,首先所使用的试验方法必须能很好地模拟实际使用条件。

可靠性试验分为现场试验和模拟试验两大类。模拟试验又有破坏性试验和非破坏性试验之分。叶片疲劳寿命试验属破坏性试验,又可分为正常使用状态试验、加速寿命试验。所谓正常使用状态的寿命试验,它主要涉及到外场载荷(随机载荷)模拟技术,该技术主要包括:

(1) 随机载荷的再现技术;(2) 模拟块谱试验技术,其详细介绍可参见文献[3]。

为了提高块模拟技术的可靠性,首先要建立等效损伤的块谱划分数学模型。即如何将随机载荷的累积频次

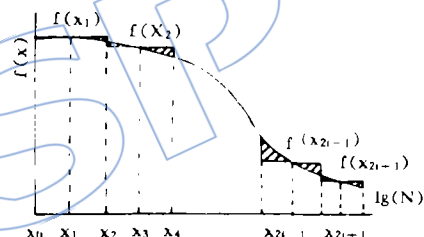


图3 块谱划分示意图

曲线 $f(x)$ 离散为阶梯状块谱(图3)。根据疲劳等损伤原理,可推得最佳块谱划分数学模型如下:

$$\begin{cases} 2x_{2i-1} - x_{2i-2} - x_{2i} = 0 & (i = 1, 2, \dots, n) \\ 2f(x_{2i}) - f(x_{2i-1}) - f(x_{2i+1}) = 0 & (i = 1, 2, \dots, n-1) \end{cases} \quad (7)$$

(7)式的第一式和 Ravishankar 的论点一致。但是必须与推导出的第二式联立方能求解。借助计算机可将载荷数据存库待试验时调用。

另外一个重要的问题是实现块模拟试验,必须设计和建立一个精度较高、可靠性较好、自动化程度较高的块模拟试验加载系统^[4]。块模拟平板叶片的疲劳寿命试验结果见表1和表2。

四、加速块谱试验和可靠性分析

疲劳试验是一种相当费时的试验,对于块模拟试验也不例外。因此,努力探求一种可靠的加速疲劳试验以节省试验时间是很有必要的。块模拟试验有二种加速方案:(1) 增大载荷,保持块谱各级循环次数不变。(2) 增加各级循环次数,保持载荷大小不变。

对方案1而言,类似于恒幅疲劳寿命试验的 P-S-N 曲线,块模拟试验也能由增加应力水平达到试验加速的目的,由此产生与 P-S-N 曲线相应的块谱下的复合循环的 P-S-N 曲

线。应力水平的提高是将块谱中各级载荷均同乘以同一个载荷加速因子。如果改变这个因子, 就可以获得不同应力水平下的一系列块谱, 于是通过试验则可得到复合循环的 P-S-N 曲线, 且具有一定的置信度。由此还可以推出叶片在其他应力水平下块谱的疲劳寿命。

加速块谱试验的可靠与否, 需对加速块谱子样寿命和原始块谱子样寿命进行统计对比分析, 以证明块谱试验技术的可靠性, 由于子样参数 $\bar{x}_i$, s_i 都具有随机性, 因此不能用常规的相对误差对比来确定它们的试验精度和可靠程度, 而要用统计学的方法对比二者的方差和均值。方差对比目的在于, 当试验条件改变时两组小样观测值的标准差是否有显著差异, 它们之间是否存在有条件误差。当抽样来自正态母体, 则方差对比亦称为“F 检验”。

双边 F 检验的具体步骤如下:

(1) 假设 $H_0 (\sigma_1/\sigma_2=1)$ $H_A (\sigma_1/\sigma_2 \neq 1)$ $H_D (\sigma_1/\sigma_2 = \rho_1)$;

(2) 确定两类误差 α 、 β ;

(3) 求 (S_1^2/S_2^2) 和 $\rho_1 = \sqrt{F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \cdot F_{\beta, n_2-1, n_1-1}}$;

(4) 按下式求两个临界点

$$\begin{cases} (S_1^2/S_2^2)_{c1} = F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} \\ (S_1^2/S_2^2)_{c2} = F_{1-\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = 1/F_{\alpha/2, n_2-1, n_1-1} \end{cases} \quad (8)$$

(5) 若 $(S_1^2/S_2^2)_{c2} \leq (S_1/S_2)^2 \leq (S_1^2/S_2^2)_{c1}$ 则接受 H_0 假设, 即假设的两个母体的标准差无显著差异。否则就排除 H_0 假设。

对叶片疲劳试验, 由表 1 可知, n_1 为 9, n_2 为 7, s_1 等于 0.23385, s_2 等于 0.13167, 设 $\alpha = \beta = 10\%$, 查 F 分布表得: $F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = F_{0.05, 8, 6} = 4.15$ 和 $F_{\beta, n_2-1, n_1-1} = F_{0.10, 6, 8} = 2.67$

所以: $\rho_1 = \sqrt{4.15 \times 2.67} \approx 3$, 说明小样大小尚可。

$$S_1^2/S_2^2 = (0.23385 \div 0.13167)^2 = 3.154$$

利用 (8) 式求得两临界点为:

$$(S_1^2/S_2^2)_{c1} = F_{\alpha/2, n_1-1, n_2-1} = F_{0.05, 8, 6} = 4.15$$

$$(S_1^2/S_2^2)_{c2} = 1/F_{\alpha/2, n_2-1, n_1-1} = 1/F_{0.05, 6, 8} = (3.58)^{-1} = 0.279$$

可见, 有 $(S_1^2/S_2^2)_{c2} \leq (S_1^2/S_2^2) \leq (S_1^2/S_2^2)_{c1}$ 成立, 故接受 H_0 假设, 即认为两组小样的母体方差相同, 说明块谱试验技术是可靠的。

参 考 文 献

- [1] 童均洲等, “可靠性和有效性评审程序手册”, 宇航出版社, 1985年2月。
- [2] 盐见弘, “可靠性工程基础”, 科学出版社, 1982年。
- [3] 鲁启新、庄忠良, “空测随机载荷的块模拟技术”, 航空学报, 第8卷, 第7期, 1987年。
- [4] 鲁启新、庄忠良, “程控振动疲劳试验系统” 航空动力学报, 第1卷, 第2期, 1986年。
- [5] C-S lu and Z-L zhuang, “An investigation of Simulated Flight Fatigue of TC4 Titanium Alloy Gas Turbine Blading”, Proceedings of Inter. Conf. on Fatigue of Engineering Structures and Materials, U. K. Sept. 1986.
- [6] Charles Lipson and Narendra J. Sheth, “Statistical Design and Analysis of Engineering Experiments”, Mc Graw-Hill Book Company, 1973.

AN OPTIMUM DESIGN OF CROSS-SECTIONAL SHAPE OF BEVEL GEAR

Guo Xinghui, Han Erzhong, Yan Shiyang
(*Northeastern University of Technology*)

ABSTRACT The optimum design of a high speed bevel gear has been accomplished. At first, the sensitivity matrix of natural frequencies of the bevel gear is obtained in relation to design variables. And then the optimum perturbation iteration procedure is applied to the dynamic optimum design of a high speed bevel gear. Some results satisfying frequencies constraints are obtained. The result with smallest weight is selected. And the effect of process accuracy on natural frequencies of the bevel gear are discussed. The results of the experiments on the bevel gear manufactured show that the optimum design is a success.

FRETTING FATIGUE

Stress distribution and prediction of crack location in dovetail joints

He Mingjian (*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT In reference to the research results of Oxford University in U. K., author designed a more simple dovetail joints specimen to model a blade to disc joint in a typical gas turbine and improved the analysis method. The specimen has been analysed and tested. The results are better than the previous ones of Oxford University.

Correctness and effectualness of the analysis method are verified by tests. The method enables to determine the stress and temperature fields in the contact surface and the nearby area, to estimate the state in interface (stick, slip, or separation), and to know how much energy consumed for friction in the contact surface. Therefore, it is possible to predict distribution of fretting damage along the interface and the location of crack which will spread.

RELIABILITY TESTING TECHNIQUE OF BLADING FATIGUE WITH CONFIDENCE LEVEL

Zhuang Zhongliang, Gao Deping, Lu Qixin
(*Nanjing Aeronautical Institute*)

ABSTRACT During reliability testing of blading fatigue, it is necessary to consider not only its reliability, but also its confidence, characteristics of specimens, simulation technique and so on simultaneously. In this view, a reliability testing technique with confidence level is presented which can estimate blading fatigue life more reasonably. This technique also can be applied to predicting fatigue life of other mechanical parts.