

压气机叶片疲劳可靠度及寿命的预测方法

南京航空航天大学 乐晓斌* 高德平 何明鉴

【摘要】 提出在缺乏零件工作载荷谱时, 进行该零件疲劳可靠性设计计算的方法。用使用过一段时间后的零件进行疲劳试验, 根据这些试验数据统计出剩余疲劳损伤强度, 利用它确定该零件在工作寿命期间的总疲劳损伤量。然后用疲劳累积损伤可靠性模型进行零件疲劳可靠性设计计算。并以航空发动机压气机工作叶片为例, 说明如何使用剩余疲劳损伤强度预测叶片的可靠度或寿命。

关键词: 压气机 叶片 可靠性 寿命

分类号: V 231. 95

1 前言

在实际疲劳问题中, 由于零件的形状、工作环境和工况十分复杂; 或由于难于进行测试等原因, 难于获得某些零件的工作载荷谱。对于这些零件, 用工作过一段时间后尚未失效的零件再进行疲劳试验比测这些零件的工作载荷谱要方便的多。例如航空发动机压气机工作叶片, 要获得较合理较全面的工作叶片的工作载荷谱是相当困难的, 常用工作过 100, 200 或 300 小时的压气机工作叶片进行疲劳试验。通过试验来弥补未知工作载荷谱的缺陷。如何用工作过一段时间后的零件的疲劳试验数据来间接表述零件的工作载荷谱及间接确定零件的疲劳损伤, 如何进行这类零件的疲劳可靠性设计计算是实际应用中一项十分有益且重要的科研工作。针对这种实际应用情况, 提出用剩余疲劳损伤强度进行这类零件疲劳可靠性设计计算的方法。

2 疲劳损伤强度、剩余疲劳损伤强度、寿命及可靠度之间的关系

2.1 疲劳累积损伤的概率模型

在工作载荷作用下, 经过一定的时间后, 零件会发生疲劳失效。对于零件的疲劳失效, 在一定的工作载荷谱作用下, 无法预知零件何时产生疲劳失效; 在指定的寿命下, 也无法预知在何种工作载荷谱作用下零件会在指定的寿命时产生疲劳失效。以上事实说明如下几点: (1) 零件的疲劳失效属于随机事件; (2) 零件本身具有一定的抵抗疲劳损伤的固有能力和; (3) 零件在工作载荷作用下, 在工作时会产生一定的疲劳损伤; (4) 当零件已产生的总疲劳损伤量超过零件本身具有的抵抗疲劳损伤的固有能力和时, 零件便产生疲劳失效。

本文把零件疲劳失效处理成随机事件, 并用随机变量对其进行描述。用零件的疲劳损伤强度 K 和零件的总疲劳损伤量 D 这两个随机变量来描述零件的疲劳失效。

零件的疲劳损伤强度 K 是零件材料固有的一种疲劳性能参数, 它反映零件在使用前所具有的抵抗疲劳损伤的固有能力和, 可通过零件的疲劳试验数据确定。零件的总疲劳损伤量 D 是

在工作载荷谱作用下,在工作寿命期内,零件已产生的总疲劳损伤量,它反映零件已遭受的疲劳损伤程度,可通过工作载荷谱及工作寿命确定。

当 $K > D$ 时,零件不产生疲劳失效,即零件的疲劳可靠度 R 的概率方程为

$$R = P(K > D) \quad (1)$$

假设某一零件在不同的试验应力水平下进行了 n 次疲劳试验,获得 n 组疲劳试验数据 $(\sigma_{Ti}, N_{Ti}, i = 1, 2, \dots, n)$ 。用这 n 组疲劳试验数据可获得该零件疲劳损伤强度 K 的 n 个样本值 $(K_i, i = 1, 2, \dots, n)$ 。

$$m = \frac{- \left[\sum_{i=1}^n \ln \sigma_{Ti} \ln N_{Ti} - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln \sigma_{Ti} \right) \left(\sum_{i=1}^n \ln N_{Ti} \right) \right]}{\sum_{i=1}^n (\ln \sigma_{Ti})^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n \ln N_{Ti} \right)^2} \quad (2)$$

$$K_i = N_{Ti} (\sigma_{Ti})^m \quad (3)$$

式中 m 是零件疲劳性能的一个参数,即 $S-N$ 曲线的斜率。 m 值也是反映零件疲劳性能随机性的一个参数,由于零件的疲劳损伤强度 K 已经反映了零件疲劳性能的随机性,故可以把 m 看作一个常数。

用 K 的 n 个样本值进行统计分析,可获得零件疲劳损伤强度 K 的分布规律及分布参数。作者曾对数十种材料的疲劳损伤强度进行过统计分析,用对数正态分布拟合疲劳损伤强度 K 是合适的,故一般可以认为 K 服从对数正态分布,那么

$$\ln K = N(\mu_{\ln K}, \nu_{\ln K}) \quad (4)$$

$$\mu_{\ln K} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln N_{Ti} + \frac{m}{n} \sum_{i=1}^n \ln \sigma_{Ti} \quad (5)$$

$$\nu_{\ln K} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\ln N_{Ti} + m \ln \sigma_{Ti} - \mu_{\ln K})^2} \quad (6)$$

式中 $\mu_{\ln K}, \nu_{\ln K}$ 为 K 的对数正态分布的均值和均方差。

零件的总疲劳损伤量 D 由工作载荷谱和工作寿命确定。若已知零件的工作载荷谱和工作寿命,则可确定零件的总疲劳损伤量,用式(1)便可进行零件的疲劳可靠性设计计算。当不知道零件的工作载荷谱,本文提出如何利用使用过一段时间后的零件的疲劳试验数据来确定零件的总疲劳损伤量的方法。

2.2 剩余疲劳损伤强度 K_r 与总疲劳损伤量 D 的关系

为了便于说明剩余疲劳损伤强度 K_r 与总疲劳损伤量 D 的关系,暂且假设零件的疲劳损伤强度 K 是个常数。假设某一零件在工作应力 σ_1 作用下,产生疲劳失效的循环次数是 N_1 ,那么此零件的疲劳损伤强度 $K_1 = N_1 \sigma_1^m$ 。若该零件已工作了几个循环 ($n_1 < N_1$),用工作过 n_1 个循环的零件,在试验应力 σ_1 作用下再进行第二次疲劳试验,当进行了 n_2 个循环时 ($n_1 + n_2 = N_1$) 零件产生疲劳失效。也就是说,零件在工作 n_2 次循环以前还具有的剩余疲劳损伤强度为 $K_r = n_2 \sigma_1^m$,零件在进行第二次疲劳试验前已产生的疲劳损伤量为 $D_1 = K - K_r = N_1 \sigma_1^m - n_2 \sigma_1^m = n_1 \sigma_1^m$ 。以上说明,可用零件的剩余疲劳损伤强度确定该零件在进行第二次疲劳试验时零件已产生的总疲劳损伤量。

定义:零件的剩余疲劳损伤强度 K_r 是零件在使用一段时间后与参照时刻的零件相比,该零件还具有的抵抗疲劳损伤的能力,它可用使用过一段时间后的一批零件的疲劳试验数据计

算确定。

某类零件在工作 t 时间后,再拿这批零件进行疲劳试验。假设在不同的应力水平下共进行了 n_r 次试验,得出 n_r 组疲劳试验数据 $(\sigma_{ri}, N_{ri}, i = 1, 2, \dots, n_r)$ 。用这 n_r 组试验数据可以计算出零件的剩余疲劳损伤强度 K_r 的样本值 $(K_{ri}, i = 1, 2, \dots, n_r)$ 。对 K_r 的 n_r 个样本值进行统计分析,便可得出 K_r 的分布规律及分布参数。

$$K_{ri} = N_{ri} (\sigma_{ri})^m \quad (7)$$

在计算零件剩余疲劳损伤强度时,式(7)中的 m 值必需使用式(3)计算的 m 值,即必需用确定剩余疲劳损伤强度的参照时刻的零件的疲劳试验的 m 值。例如:有未使用、使用过 t_1 时间及使用过 t_2 时间的零件的三组疲劳试验数据。在确定使用过 t_2 时间后的零件的剩余疲劳损伤强度时,若以未使用过的零件为参照时刻的零件,则必需用未使用过的零件的疲劳试验数据计算的 m 值;若以使用过 t_1 时间的零件为参照时刻的零件,则必需用使用过 t_1 时间后的零件的疲劳试验数据计算的 m 值。这是因为:虽然使用过一段时间的零件的疲劳试验数据按式(3)可以拟合出一个 m_r 值,但此时的 m_r 值不仅含有材料本身随机性的影响,而且还包含了在使用期间载荷的随机性的影响,故不能用来计算此时零件的剩余疲劳损伤强度;再者按剩余疲劳强度的定义,计算剩余疲劳损伤强度时必需使用参照时刻的零件的 m 值(本文均以未使用过的零件为参照时刻的零件)。该零件在进行第二次疲劳试验时,或在工作 t 时间后,零件已产生了一定的疲劳损伤量 D_r ,即

$$D_r = K - K_r \quad (8)$$

D_r 也是随机变量,其分布规律和分布参数可按此式由 K 和 K_r 的分布规律和分布参数确定。

零件的工作载荷每时每刻都在变化,具有随机性。某一零件在确定其工作性质后,虽然工况多变,但若以一个足够长的时间为一个统计单位(如对于工程机械的零件,可以一年为一个统计单位;对于航空发动机的零件,可以 100 小时为一个统计单位),可认为在每个统计单位时间内,工作载荷具有各态历经性,即在每个统计单位时间内,工作载荷谱的统计规律是相同的(这一假设对大多数工作零件是能满足的)。根据这一假设,可由式(8)确定在一个统计单位内,零件的疲劳损伤量 D_r 为

$$D_r = (1/t) (K - K_r) \quad (9)$$

此时,可以利用剩余疲劳损伤强度来确定在工作寿命 T 内,零件的总疲劳损伤量 D 。零件的总疲劳损伤量 D 为

$$D = (T/t) (K - K_r) \quad (10)$$

2.3 用零件的剩余疲劳损伤强度进行零件疲劳可靠性计算

根据式(1),用零件的剩余疲劳损伤强度计算零件疲劳可靠度和预测零件疲劳可靠性寿命的基本概率方程为

$$R = P[K > (T/t) (K - K_r)] \quad (11)$$

根据式(11),可利用未使用过的及使用过一段时间后的零件的疲劳试验数据,在缺乏零件的工作载荷谱时,进行零件的疲劳可靠度计算及预测零件疲劳可靠性寿命。

3 压气机工作叶片疲劳可靠性计算

以压气机工作叶片为例,利用剩余疲劳损伤强度进行压气机叶片可靠度计算及预测叶片在指定可靠度下的疲劳寿命。引起压气机工作叶片疲劳失效的主要因素是振动引起的高周疲

劳。因此叶片振动引起的高周循环应力是导致叶片疲劳损伤的主要原因^[3]。下面仅考虑叶片振动引起的高周循环应力对疲劳损伤的影响。

算例: 导致某压气机的工作叶片疲劳失效的主要原因是叶片振动引起的高周循环应力。叶片的振动应力具有随机性, 但以 100 工作小时为统计单位, 振动应力的统计规律是相同的。用实际工作叶片进行疲劳试验, 由新叶片及工作 300 小时后的叶片的疲劳试验数据统计出的叶片疲劳损伤强度 K 和叶片剩余疲劳损伤强度 K_r 的分布规律均为对数正态分布, $m = 16.3322$, 新叶片 K 和工作 300 小时的叶片 K_r 的均值分别为 118.6632 和 118.3982, 而均方差分别为 0.1995 和 0.1116 (应力单位 MPa)。

以 100 小时为统计单位, 叶片在工作寿命 T 内的总疲劳损伤量 $D = (T/3)(K - K_r)$ 。根据式(11)有

$$R = P[K > (T/3)(K - K_r)] \quad (12)$$

式(12)中, K 和 K_r 的分布规律和分布参数都已知, 可进行给定工作寿命 T 时的可靠度计算及在指定可靠度 R 时叶片的疲劳可靠性寿命计算。根据式(12)编程计算, 计算结果是: 指定寿命 T (小时) 分别为 100, 200, 300, 400, 500 时, 叶片的可靠度为 0.9999997, 0.9996, 0.9912, 0.9606, 0.9072; 指定可靠度 R 为 0.9999, 0.999, 0.99, 0.9 时叶片的疲劳寿命(小时)分别为 172.5, 221.4, 306.6, 511.6。

4 结束语

提出了在缺乏零件工作载荷谱时, 利用剩余疲劳损伤强度进行零件疲劳可靠度和疲劳可靠性寿命的计算方法。对难于测量或难于获得零件工作载荷谱的疲劳问题, 发展了进行该类零件疲劳问题的可靠性理论分析方法和实用的疲劳可靠性计算方法。为了能较准确地利用剩余疲劳损伤强度确定零件的总疲劳损伤量, 在选择试验零件时, 必需注意两组不同时间的零件的时间间隔。如当以未使用过的零件为参照时刻的零件时, 另一组零件必需至少使用过一个统计单位的时间(如对于工程机械的零件, 必需使用一年以上; 对于航空发动机的零件, 必需使用 100 小时以上)。但也不应选用使用时间间隔太长的零件进行疲劳试验, 因为若使用时间太长, 零件已产生的疲劳损伤量过大, 在使用期间已失效的零件较多, 这会影响利用剩余疲劳损伤强度计算零件的总疲劳损伤量的准确性。以使用过多长时间的零件进行疲劳试验较为合适, 这要在实践中探讨和积累经验。作者认为: 使用过的时间至少大于一个统计单位的时间, 小于可靠度 $R = 0.99$ 时的疲劳寿命期较为合适。如本文算例, 叶片的时间在 100 小时到 306 小时之间较好。

参 考 文 献

- 1 乐晓斌 机械零件疲劳可靠性设计的研究: [学位论文] 上海交通大学, 1993
- 2 乐晓斌 疲劳损伤累积理论的一种新表达方法 机械强度, 1993, (4)
- 3 涡喷 6 发动机寿命研究报告第四章 压气机 I 级工作叶片的寿命研究 航空工业部发动机管理局, 1988

(责任编辑 王震华)

restrictions induced by explicit boundary treatments and, meanwhile, preserve all the important features of the scheme such as non-oscillation and high resolution. The implicit solver effectively accelerates the convergence rate of the high-resolution scheme. The comparison of cascade flow calculations under various inflow conditions with the corresponding experiments demonstrates the accuracy and efficiency of the proposed solver.

Key words Cascade flow Numerical computation High resolution Implicit methods

NEAR SOUND FIELD ANALYSIS OF A ROTATING SOURCE

Ju Hongbin

(Dept. of Engineering Mechanics Tsinghua University, Beijing 100081)

Zhong Fangyuan

(Shanghai Jiaotong University)

ABSTRACT On the basis of moving source radiation theory, this paper discusses the sound solution of a rotating source in frequency domain. Emphasis is laid on near sound field which has three "additional sources" in contrast to far field. The computation reveals that the near sound field produced by these "additional sources" distributes in discrete viewing angles. Radial and axial deviations affect sound field respectively around the rotating plane and axial area, and their maximum connections have different characteristics. The analysis is proved preliminarily by a fan experiment.

Key words Sound Radiation Aeroacoustics Sound source Frequency analysis

NUMERICAL ANALYSIS OF FLOW AND LEAKAGE IN LABYRINTH SEAL

Huang Shoulong and Ma Yuyi

(National Lab. of Coal Combustion Huazhong University of Science & Technology, Wuhan, 430074)

Wu Xiaosong and Xu Chen

(Mechanical College, Nanjing University of Science & Technology)

ABSTRACT The unsteady Navier-Stokes equations are solved to predict numerically the internal flow of single-cavity labyrinth channel with depth-to-width ratios $H/W = 0.1, 0.3$ and 0.5 . The numerical results demonstrate the oscillation of the flow structure and fluctuation of the exit leakage rate. It is shown that the seal efficiency is relevant to the amplitude of leakage fluctuation, furthermore, the sequence of H/W from $0.3, 0.5$ to 0.1 is also the order of both increasing seal efficiency and increasing amplitude of leakage fluctuation. Also, the complex physics, including motion and mergences of vortex, migration of separation bubble, bending and impact of jet, is discussed, and the influence of impact effects on the increase of energy dissipation and decrease of leakage are analysed.

Key words Labyrinth seal oscillation flow Numerical analysis

METHOD FOR PREDICTING FATIGUE RELIABILITY AND LIFE OF COMPRESSOR BLADE

Le Xiaobin, Gao Deping, He Mingjian

(2nd Dept. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing, 100083)

ABSTRACT In engineering application of fatigue problem, it is very difficult to obtain some working parts' load spectrum due to some reasons. This paper provides method for predicting the fatigue reliability and life of the part without working load spectrum. Fatigue tests are carried out on the part that has worked for some time. Basing on the test data, the surplus fatigue damage strength of the part can be calculated. With its surplus fatigue

damage strength, we can determine its overall fatigue quantity in the working life. And based on the fatigue cumulative damage probabilistic model, the part's fatigue reliability and life can be predicted. An aeroengine compressor is taken for example to show how to use the surplus fatigue damage strength for predicting the blade's fatigue reliability and life.

Key words Compressors Blades Reliability Fatigue life

A NEW RELIABILITY ANALYTICAL METHOD FOR BENDING FATIGUE STRENGTH OF GEARS

Peng Xiongqi, Liu Geng, Wu Liyan

(5th Dept. Northwest Polytechnical University, Xian 710072)

ABSTRACT Based on the three-parameters reliability analysis model and the fatigue theory of gears, a new reliability analytical method for the bending fatigue strength of tooth root is proposed by use of blending stochastic finite element method. This method takes into account such random factors for the reliability of gears, as load, fatigue limit, the material parameters and radius chamfer of tool. Analyses completed with this method indicate: The radius chamfer of tool has unignorable effect on the reliability of gears' bending fatigue strength; In the linear elastic problems, the Young's modulus has no effect on the structure reliability; The Poisson ratio has a little leverage on the gears' reliability; But the gears' reliability reduces with the increase of variation coefficients of the above-mentioned random factors; So the gear's reliability will increase as the skewnesses of fatigue limit and the radius chamfer of tool rise. But the skewness of load has an inverse influence. This paper also considers the modified coefficient's (no random factor) effect on the gears' reliability.

Key words Stochastic finite element method Reliability Gears Bending fatigue

MEASUREMENT AND EXPRESSION OF MAIN CHARACTERISTICS OF NiTi SHAPE MEMORY ALLOY WIRES

Du Yanliang and Nie Jingxu

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT Experiments and analyses of the main characteristics of NiTi alloy wires were completed to research their ability in active detection and control of cracks growth as the special requirements of the intelligent material structures. The expressions of the main characteristics as recovery force and other parameters are deduced on the basis of measurements. The research results show that the NiTi alloy wires are very good functional materials for manufacturing the intelligent structures capable of actively detecting and controlling the growth of cracks and vibration.

Key words Shape memory alloys Characteristic measurement Recovery effect

OPTIMIZATION FOR REDUCING VIBRATION OF ENGINE PIPELINE **Lilun**

(4th Dept. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083)

ABSTRACT The paper deals with structural optimization for reducing vibration of engine pipeline. The method can give the best position, stiffness and damping of clips to be attached on condition that pipe system's structure has been given. Based on the finite element analysis of original structure, the analytical process is limited between the locations where are to be attached clips, excited points and dangerous points. It is not necessary to make again a finite element analysis for the improved system. An example for reducing the vibration of an engine pipeline is presented.

Key words Optimization Engine Pipelines Vibration