

基于有限元分析的DFR法

陈滨琦¹ 曾建江¹ 贾建东² 童明波¹

(1. 南京航空航天大学飞行器先进设计技术国防重点学科实验室, 南京, 210016)

(2. 成都飞机工业(集团)有限责任公司技术中心, 成都, 610091)

摘要:以名义应力为参数量的细节疲劳额定值(Detail fatigue rating, DFR)法进行疲劳可靠性分析的关键之一在于获取钉孔附近真实的名义应力, 解析法难以分析复杂结构和载荷下的应力分布, 不便于工程应用。本文参考了连接件及周边平衡载荷系的等效方法, 提出了用于DFR法分析的有限元法名义应力的求解。编制了基于有限元分析的DFR法分析软件FEM-DFR, 对MSC. Nastran输入输出文件进行后处理, 自动完成DFR法疲劳寿命的相关计算。算例结果表明本文提出的基于有限元分析的DFR法算法合理, 编制的FEM-DFR软件通用、有效。

关键词:疲劳可靠性; 细节疲劳额定值; 有限元; 名义应力

中图分类号: V222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-2615(2012)06-0888-05

DFR Method Based on Finite Element Analysis

Chen Binqi¹, Zeng Jianjiang¹, Jia Jiandong², Tong Mingbo¹

(1. Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense-Advanced Design Technology of Flight Vehicles, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

(2. Research and Development Center, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co. Ltd., Chengdu, 610091, China)

Abstract: The real nominal stress around pin holes is the key to fatigue reliability analysis using detail fatigue rating (DFR) method. The stress cannot be obtained easily by analytical method under complex structures and loading boundaries. Therefore analytical method is not convenient for engineering applications. A new method for calculating the nominal stress is raised based on equivalent method of loads balance system in the region of the hole. To get the true nominal stress, finite element method is applied to DFR method. Setting an interface with MSC. Nastran, a fatigue reliability calculating software, which termed FEM-DFR, is given. The results show that the fatigue life estimation is in agreement with the experimental data, and the software is universal and effective.

Key words: fatigue reliability; detail fatigue rating (DFR); finite element analysis; nominal stress

大量研究表明, 飞机结构的疲劳破坏是飞机的主要破坏形式, 而飞机结构是由许多零件通过紧固件连接起来的, 在疲劳作用下, 连接件的疲劳破坏大多从紧固孔处开始, 所以连接件的寿命通常控制了飞机结构的疲劳寿命^[1-2]。细节疲劳额定值(Detail fatigue rating, DFR)法是在总结结构细节疲劳特性的统计特性的基础上形成的一种以名义应力为参数量的疲劳寿命解析分析方法, 是一种极佳的工程实用方法, 因其方便、简捷、可靠的优势和大量

实验数据的支持, 应用非常普遍^[3-11]。

使用DFR法进行疲劳可靠性分析关键在于准确地得到紧固件载荷分布, 找到危险铆钉或者螺栓位置、分析钉传载荷比、确定细节疲劳额定强度以及求出名义应力。工程上常用解析法进行连接件内力分析, 能得到较准确的结果, 但只能对简单、规则连接件进行计算, 难以计算空间结构, 并对结构作整体分析, 但是对结构作整体分析往往很有必要^[12]。采用有限元方法, 则可以对绝大多数结构元

件进行模型简化,通过对结构进行准确的模拟得到精确的载荷分布。张成成等人将有限元获得的紧固件及周边平衡载荷系进行等效,获取等效应力严重系数(Stress severity factor,SSF)值,经验证该方法简单有效^[13]。

本文参考了连接件及周边平衡载荷系的等效方法,提出了基于有限元分析名义应力的求解,用于进行基于有限元分析的 DFR 法疲劳寿命计算。并在此基础上,关联了有限元分析软件 MSC. Nas-tran,编制了基于有限元分析的 DFR 法分析软件 FEM-DFR,对有限元分析结果进行后处理,自动完成 DFR 法疲劳寿命的相关计算。算例分析表明本文提出的基于有限元分析的 DFR 法算法合理,编制的 FEM-DFR 软件通用、有效。

1 双轴载荷下的名义应力

如图 1 所示为紧固孔在双轴载荷作用下的应力场情况。传统上认为双轴载荷作用下的名义参考应力为

$$\sigma_{\text{ref}} = \frac{\sqrt{(P_{px} + P_{sx})^2 + (P_{py} + P_{sy})^2}}{(W - d)t} \tag{1}$$

式中: P_{px} 、 P_{py} 分别为参考坐标系下 X、Y 方向的旁路载荷; P_{sx} 、 P_{sy} 分别为参考坐标下 X、Y 方向的钉转载荷; W 为孔附近的有效宽度; d 为钉孔直径。

图 1 中 φ 为 X 向外载 $P_{px} + P_{sx}$ 和 Y 向外载 $P_{py} + P_{sy}$ 的合力方向与总体坐标系 X 轴的夹角;而 θ 为双向钉转载荷 P_{sx} 和 P_{sy} 的合力方向(即钉转载荷合力 P_{dc})与总体坐标系 X 轴的夹角。而工程上对名义应力的定义可以看出,单轴情况下钉转载荷与外载及旁路载荷的方向应该是一致的,这与传统意义上双轴名义应力的求解不符。

钉转载荷方向只有一个,即 X、Y 上钉转载荷的合力方向。钉在挤压孔边时仅会沿着合力方向去挤压孔边,不可能同时挤压两个方向。并且 X、Y 方

向的定义为建模或者结构几何的参考坐标系,并不能完全反映实际情况下结构细节的受力情况。

因此本文认为用于名义应力计算的坐标系,应该以钉传方向为参考方向,将用于结构分析的总体坐标系,转化为用于名义应力分析的局部坐标系,以钉传方向为 X 轴,将整体坐标系沿着 X 轴旋转 θ 角度,形成局部坐标系 $X'OY'$ 。在 $X'OY'$ 坐标系下,仅在 X' 方向下有钉转载荷, Y' 向没有钉转载荷。最后,分别求解 X' 向和 Y' 向的名义应力。

2 基于有限元分析的 DFR 法

2.1 DFR 值的确定

紧固件细节结构的许用值 DFR 与 DFR_{base} 、工艺参数和相似细节数等相关,如式(2)所示。

$$\text{DFR} = \text{DFR}_{\text{base}} \cdot A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot U \cdot R_c \tag{2}$$

式中: DFR_{base} 为规定的典型结构对应的最基本的 DFR 值,与材料、载荷传递、板厚、紧固件直径和间距相关; A 、 B 、 C 、 D 、 E 、 U 为修正系数; R_c 为构件疲劳额定系数。

图 2 所示受载模型承受双向拉压载荷。设 $\sigma_x > |\sigma_y|$,孔边的应力状态为

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi} &= \sigma_{\varphi x} + \sigma_{\varphi y} = \\ &\sigma_x(1 - 2\cos(2\varphi)) + \sigma_y(1 + 2\cos(2\varphi)) = \\ &\sigma_x + \sigma_y - 2(\sigma_x - \sigma_y)\cos(2\varphi) \end{aligned} \tag{3}$$

当 $\varphi_{\text{max}} = 90^\circ$ 和 270° 时取极大值, $\sigma_{\varphi\text{max}} = 3\sigma_x - \sigma_y$ 。
应力集中系数

$$K_{ts} = \frac{\sigma_{\varphi\text{max}}}{\sigma_x} = 3 - \frac{\sigma_y}{\sigma_x} \tag{4}$$

细节疲劳额定值及其修正系数

$$\text{DFR}_{\sigma} = \text{DFR}_{\sigma 0} \frac{3}{3 - \frac{\sigma_y}{\sigma_x}} \tag{5}$$

式中: $\text{DFR}_{\sigma 0}$ 与 DFR_{σ} 分别为修正前后的细节疲劳额定值。从中可知:在双向载荷作用下,细节危险

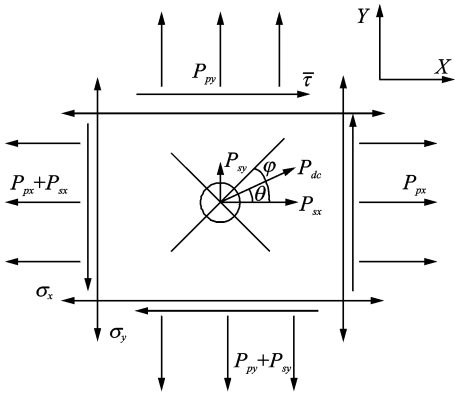


图 1 双轴载荷下紧固孔附近应力场

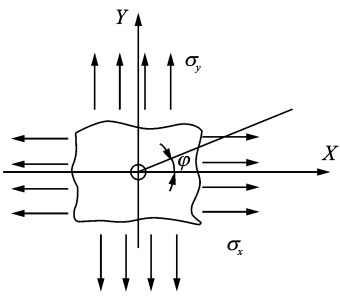


图 2 双向(拉、压)受载模型

部位不变;当 $\sigma_y>0$ 时,DFR 值提高; $\sigma_y<0$ 时,DFR 值降低。

2.2 有限元模型名义应力的求解

对于任意的连接件细节,可以从细节有限元分析结果中获得钉传载荷以及钉周围附近节点上的载荷在总体坐标系下 X、Y 方向上的节点力。本文参考了连接件及周边平衡载荷系的等效方法,在此基础上进行了双向名义应力的求解。取出钉节点周围的单元形成一个闭合的区域 Ω ,如图3所示,在该区域内满足力平衡,将周围节点转化为以钉传载荷方向为 X 轴的局部坐标系上,如图4所示,在局部坐标系 $X'OY'$ 下继续满足力平衡条件^[13]。

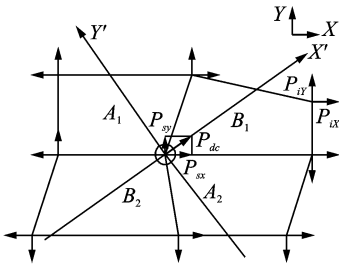


图3 孔边周围节点力平衡

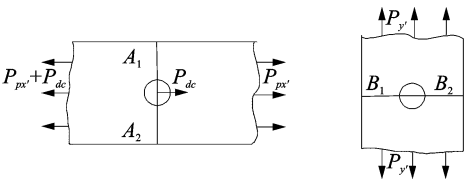


图4 连接件在局部坐标系下受力情况

此时在局部坐标系下 X' 方向的参考名义应力为

$$\sigma_{xref} = \frac{P_{dc} + P_{px'}}{(A_1 + A_2 - d)t}$$
 (6)

并且 X' 方向上的钉传载荷比为

$$\frac{R_1}{P} = \frac{P_{dc}}{P_{dc} + P_{px'}}$$
 (7)

Y' 方向的参考名义应力为

$$\sigma_{yref} = \frac{P_{py'}}{(B_1 + B_2 - d)t}$$
 (8)

对于 $P_{py'}=0$ 的情况按照单轴情况确定 DFR 值;对于 $P_{py'}\neq 0$ 的情况按照双轴拉压的疲劳分析方法进行 DFR 值的确定。

2.3 FEM-DFR 软件

本文在 2.1 和 2.2 节基础上,编写了专用于有限元分析后进行 DFR 法的疲劳寿命计算软件

FEM-DFR,该软件具备细节应力分析与 DFR 法寿命估算功能。细节应力分析功能建立了与 MSC. Nastran 输入输出文件关联的接口,进行细节应力分析的后处理工作。DFR 法寿命估算功能根据疲劳分析方法进行不同结构型式的疲劳可靠性分析。FEM-DFR 软件的主要计算流程如图5所示。

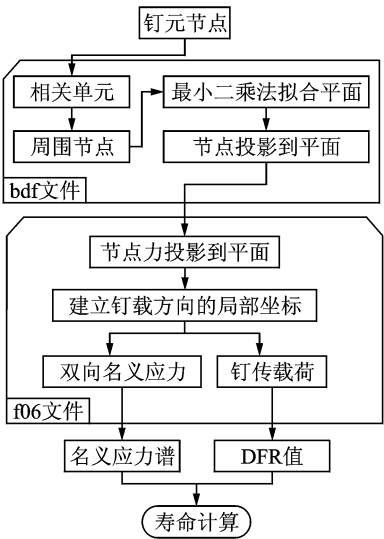


图5 FEM-DFR 软件流程

首先对 MSC. Nastran 输入文件 bdf 文件进行数据处理,根据钉元节点搜索与钉元节点相关的单元,获取相关单元上的所有节点及对应的坐标位置。考虑到网格可能出现翘曲等因素,用最小二乘法进行平面的拟合,再将所有节点投影到该平面上。

然后对输出文件 f06 文件进行载荷分析,查找所有节点在有限元分析中总体坐标系下的 X、Y 向载荷,求取钉元节点所受的合力(即钉传载荷)以及合力与 X 向的夹角 θ 。将总体坐标系 XOY 旋转 θ ,建立钉传方向的局部坐标系 $X'OY'$,并将每个节点的载荷转化到局部坐标系上。分别计算 X' 和 Y' 向的名义应力以及钉传载荷。如此循环读取疲劳分析所对应的有限元工况下的 f06 文件,编制名义应力谱。

最后根据不同结构型式进行相应的疲劳可靠性分析,完成寿命计算。

3 算 例

3.1 常幅载荷下元件可靠性寿命分析

图6所示元件由两个试片反向铆接,元件材料为 7050-T7451,在表1所示常幅谱下进行试验,表2

为试验结果。根据疲劳试验结果计算出安全疲劳寿命 $N_{95/95}$,与表3基于解析法和有限元法的DFR法的计算结果对比可得,两种方法差别不大,均与试验结果吻合较好。

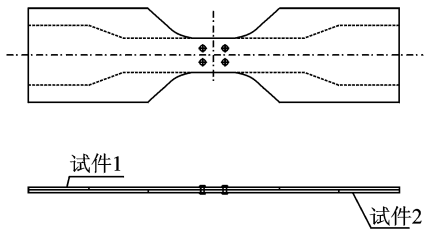


图6 常幅载荷下元件

表1 常幅载荷谱

级数	S_{\max}/MPa	S_{\min}/MPa	循环数
1	100	0	5 500
2	120	0	1 250
3	140	0	120

表2 试验结果

试件号	寿命	试件号	寿命
1	212 970	5	288 540
2	123 660	6	206 100
3	185 490	7	295 410
4	233 580		

表3 常幅载荷下元件疲劳寿命分析

疲劳寿命分析方法	寿命
试验计算结果 $N_{95/95}$	81 028
基于解析法的DFR法	67 692
基于有限元分析的DFR法	71 653

3.2 转轴支座结构可靠性寿命分析

某型机前起落架舱转轴支座结构受载形式较为复杂,运用解析法较难获得各危险紧固孔细节载荷分布情况。本文建立了图7所示转轴支座结构有

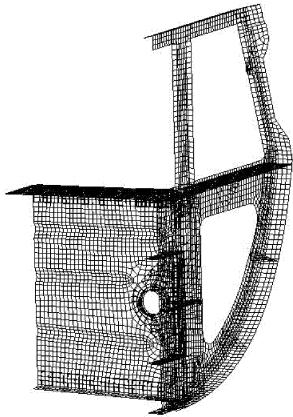


图7 转轴支座有限元模型

限元模型,起落架舱壁板、转轴支座、框与型材用壳元进行模拟,螺栓和铆钉用弹簧元进行模拟,起落架承受的载荷通过多节点约束进行施加。有限元计算完成后,在FEM-DFR软件中进行相关参数设置,求得在95%的置信度和98.99%的可靠度下疲劳寿命为10万次起落。

4 结束语

本文针对解析法难以分析空间复杂结构紧固件附近应力场的问题,提出了基于有限元分析名义应力的求解,将有限元分析与DFR疲劳寿命分析相结合,关联了有限元分析软件MSC. Nastran,建立了从有限元分析到DFR法分析的一套方法,开发了FEM-DFR软件。经过算例验证本文提出的方法与试验结果和基于解析法的DFR法计算结果相符,验证了该算法的合理性,并且验证了FEM-DFR软件适用度,简化了分析步骤,便于工程应用。

参考文献:

[1] 孙侠生,董登科. 军用飞机结构耐久性/损伤容限分析与设计指南[M]. 西安:中国飞机强度研究所,2005.

[2] 郑晓玲,刘文琰,李令芳,等. 民机结构耐久性与损伤容限设计手册[M]. 北京:航空工业出版社,2003.

[3] Liu Yongshou,Liu Jun, Shao Xiaojun ,et al. Effect of roughness on fatigue life of open holes[J]. Key Engineering Materials,2007(348/349):757-760.

[4] Goranson U G. Fatigue issues in aircraft maintenance and repairs[J]. International Journal of Fatigue,1997,19(1):S3-S21.

[5] Mohaghegh M. Evolution of structures design philosophy and criteria[J]. Journal of Aircraft,2005,42(4):814-831.

[6] 贺小帆,刘文琰,向锦武. 基于DFR的疲劳加速腐蚀因子模型与分析[J]. 应用力学学报,2008,25(3):445-449.

He Xiaofan,Liu Wenting,Xiang Jinwu. Acceleration corrosion factor for fatigue critical components based on the DFR: Modeling and analysis[J]. Journal of Applied Mechanics,2008,25(3):445-449.

[7] 王长江,姚卫星. 引入三参数S-N曲线的DFR法[J]. 南京航空航天大学学报,2010,42(3):294-297.

Wang Changjiang,Yao Weixing. DFR method with three-parameter S-N curve[J]. Journal of Nanjing

University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42 (3):294-297.

[8] 刘永寿,袁修开,刘军,等. 结构细节疲劳额定值DFR及其试验方法的研究[J]. 实验技术与管理,2008,25 (1):27-29.
Liu Yongshou,Yuan Xiukai,Liu Jun,et al. Research on structure detail fatigue rating DFR and testing method[J]. Experimental Technology and Management,2008,25(1):27-29.

[9] 马军,孙秦. 磁悬浮列车走行机构关键部件DFR法疲劳寿命估算[J]. 机械设计与制造,2008(6):38-40.
Ma Jun,Sun Qin. Fatigue life estimation of the key part of the maglev running frame based on DFR method[J]. Machinery Design & Manufacture,2008 (6):38-40.

[10] 杨玉恭,薛景川,焦坤芳,等. 飞机结构腐蚀疲劳分析中的DFR法[J]. 机械强度,2004,26(S):52-54.
Yang Yugong,Xue Jingchuan,Jiao Kunfang,et al. DFR method in corrosive fatigue analysis of aircraft structure[J]. Journal of Mechanical Strength,2004, 26(S):52-54.

[11] 李戈岚,薛俊川. DFR法在军机结构寿命分析中的重要作用[J]. 飞机设计,2008,28(6):35-37.
Li Gelan,Xue Junchuan. The important effect of the method of DFR in the life analysis for military aircraft structure[J]. Aircraft Design,2008,28(6):35-37.

[12] 袁华生,徐仲年. 使用PATRAN/NASTRAN软件进行连接件内力分析[J]. 民用飞机设计与研究,2003 (2):15-18.

[13] 张成成,姚卫星,叶彬. 连接件疲劳寿命分析的等效SSF法[J]. 航空学报,2009,30(2):271-275.
Zhang Chengcheng,Yao Weixing,Ye Bin. Equivalent stress severity factor approach for fatigue of multi-fastener plate[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2009,30(2):271-275.