

F-16 翼承舱壁(WCTB)上端隔框腹板圆弧 断裂力学和风险分析方法

2017 Aircraft Structural Integrity Program Conference
November 27 – November 30 2017
Lockheed Martin
Mark Ryan IFG Structural Integrity

©2017 LOCKHEED MARTIN CORPORATION. ALL RIGHTS RESERVED.
DISTRIBUTION A. APPROVED FOR PUBLIC RELEASE: DISTRIBUTION UNLIMITED.
REF# HAFB 75ABW-2017-0452 (AER201711003)



Chengdu United Methodology Design Co., Ltd.
成都优迈达科技有限公司

成都优迈达科技有限公司

地址：成都高新区高朋大道 3 号东方希望大厦 B 座 2 楼 205/207/209 室

技术咨询电话：028-85506078-8018

<http://www.uni-cax.com> <http://www.umd-cax.com>

Email: info@umd-cax.com

目录

1 WCTB 上端隔框腹板	3
1.1 背景	3
1.2 裂纹扩展情况	4
1.3 分析技术	4
2 SIF 求解方案	5
2.1 背景	5
2.2 将 SIF 应用于 WCTB 上端隔框腹板圆弧开裂	6
3 风险分析	8
3.1 背景	8
3.1.1 风险分析的任务	8
3.1.2 风险分析的方法	8
3.1.3 风险分析的历程	9
3.2 WCTB 上端隔框腹板的风险分析	9
3.2.1 输入	9
3.2.2 详细分析过程:	9
3.2.2 结论:	10
4 结论	11

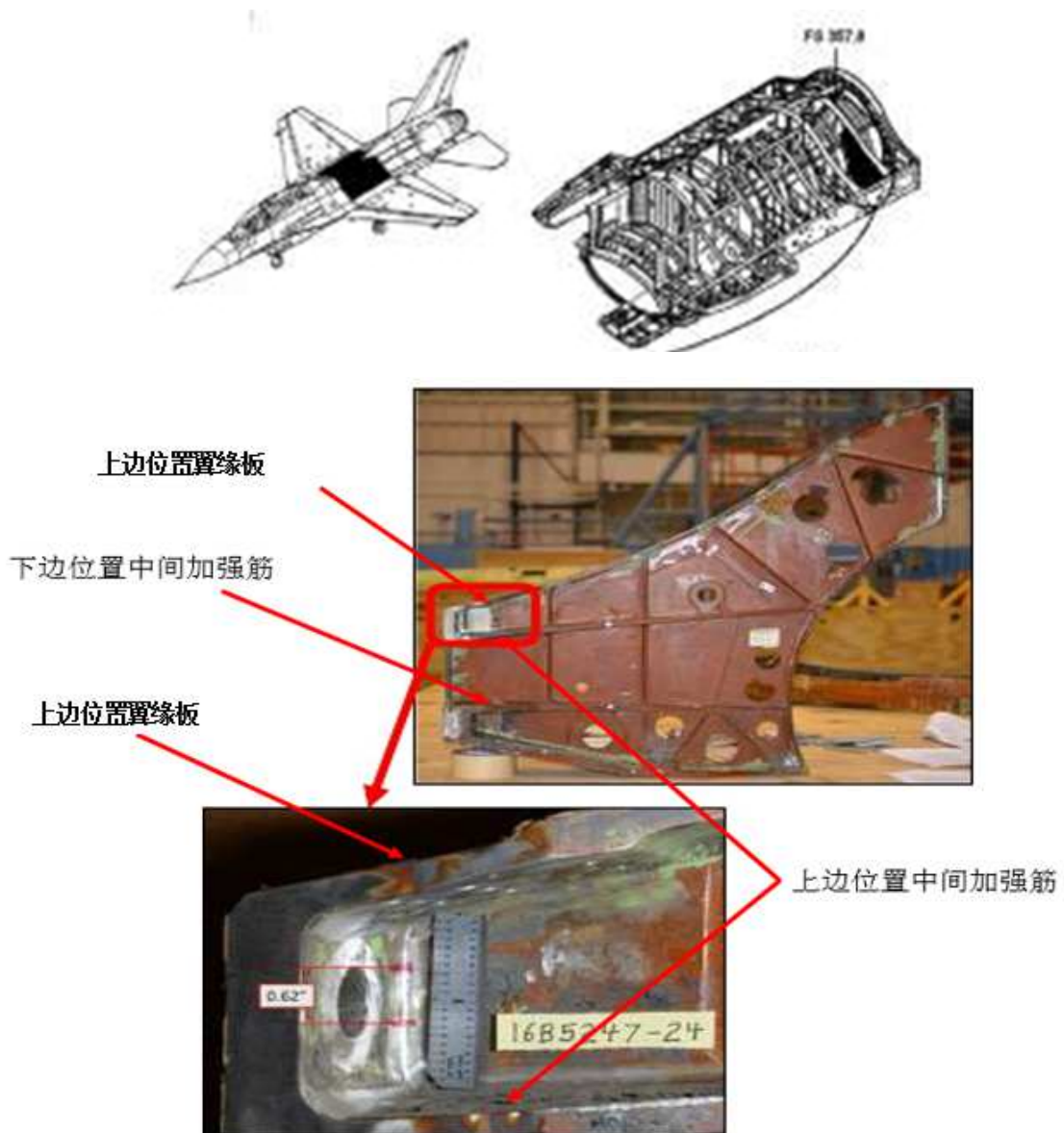
1 WCTB 上端隔框腹板

1.1 背景

F-16飞机翼承舱壁裂纹首次被发现在2015年，开裂情况：

- 多位客户报告称其翼承舱壁上端隔框腹板圆弧处开裂。
- 在机身的左侧和右侧，前后区域均有裂纹发现。
- 在之前和之后批次的飞机都有。

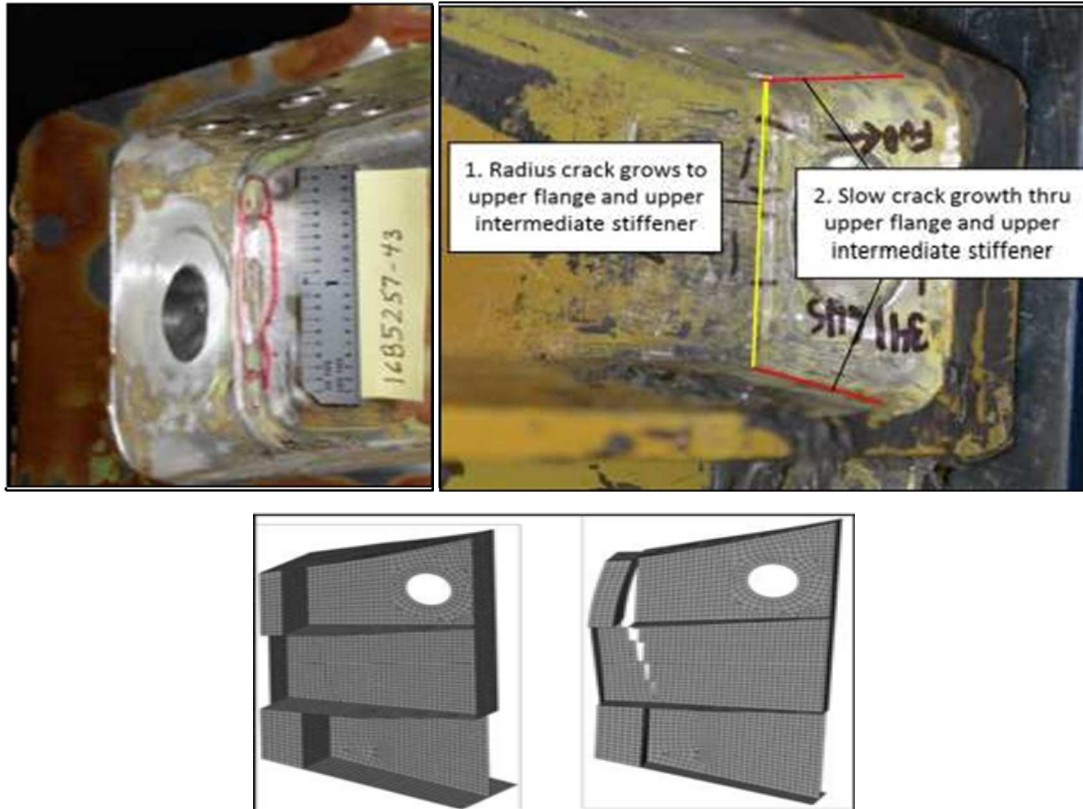
在Block 50全尺寸耐久性试验(FSDT)的拆解时发现多处裂缝，型号FS 325/341/357机身左右侧，前后区域，共发现十处裂纹。



图一：机翼连接隔框腹板裂纹情况

1.2 裂纹扩展情况

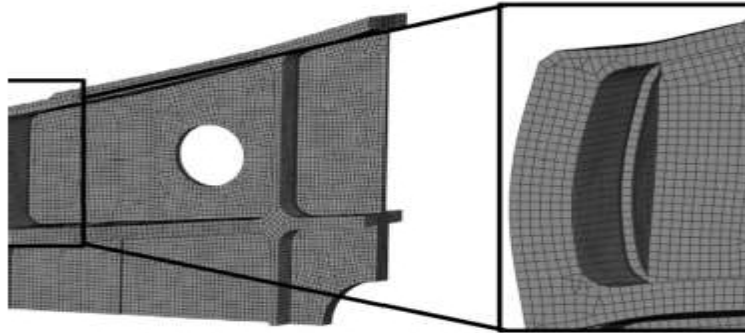
裂纹从WCTB上端隔框腹板圆弧处开始出现。裂纹扩展到上部翼缘板和上边位置的中间加强筋，裂纹一直向下扩展到下边位置的中间加强筋，一旦裂纹贯通下边位置的中间加强筋，则该部件就会失效。



图二 裂纹扩展示意图

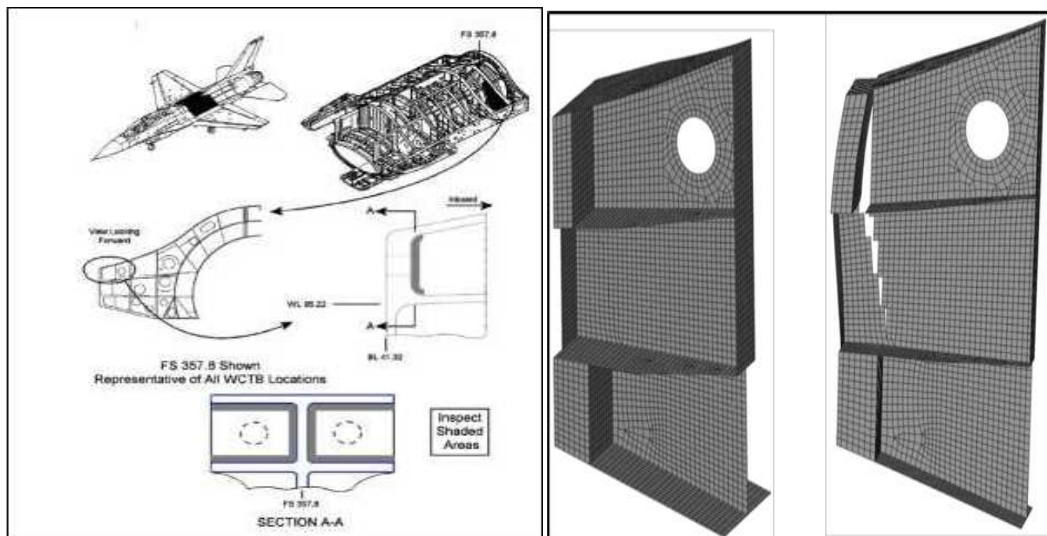
1.3 分析技术

- 1) 对上端隔框腹板圆弧的裂纹扩展模型进行分析，得到F-16的一些型号耐久性寿命较短的结论；
- 2) 对此展开裂纹止裂研究，显示裂纹扩展并贯彻上部翼缘板和上边位置的中间加强筋时，裂纹处于稳定的扩展状态；
- 3) 应力强度因子（SIF）分析，该计算考虑了裂纹稳定扩展并贯彻上部翼缘板和上边位置的中间加强筋；
- 4) 基于SIF结果的裂纹扩展分析，确定了上端隔框圆弧失效后的剩余寿命；



图三 有限元网格局部细节图

- 5) 剩余强度分析，计算结果表明上部舱壁局部失效后，其附近的机身框架结构能够继续承受荷载；
- 6) 风险分析，考虑上部舱壁附近机身框架结构的剩余强度，进而确定飞机失效的风险。



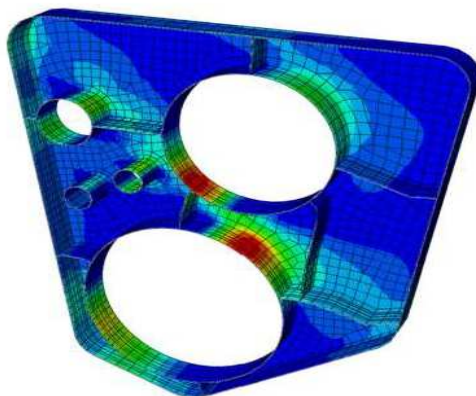
图四 裂纹在整个机身上的位置示意图

2 SIF 求解方案

2.1 背景

断裂力学建模和分析软件采用BEASY软件，该软件采用边界元法，只需要对裂纹表面进行建模，软件可以模拟裂纹的扩展，裂纹的扩展路径基于局部应力/几何。

Beasy是一款专门为裂纹扩展疲劳寿命分析开发的软件，整个建模的分析都是基于F-16已有的有限元网格和ABAQUS求解文件。

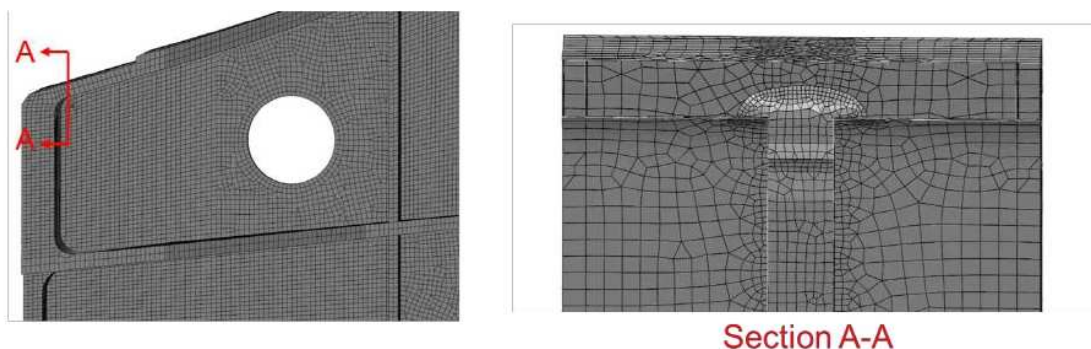


图五 BEASY裂纹扩展分析

SIF解决方案应用于上端隔框腹板的评估包括以下内容：

- 1) 生成裂纹扩展模型：在BEASY软件中，裂纹的每一个增量步扩展，都计算并输出沿裂纹扩展路径的应力强度因子。
- 2) 对裂纹进行止裂评定分析：一般情况下，单个裂纹的长度评估是指裂纹尖端抵达或刚好穿透相邻的较厚的截面（比如，一个加强筋）。
- 3) 获得临界裂纹长度和/或确定当前裂纹长度是否小于断裂韧性：即结构是否可以安全地维持在或低于特定的裂缝长度。

SIF裂纹止裂意味着裂纹停止生长。需要SIF值低于 $k_{\text{阈值}}$ ，这个SIF的 $k_{\text{阈值}}$ 通常 $< 5 \text{ ksi} \cdot \sqrt{\text{in}}$ ，在大多数情况下都不可能满足。于是倾向于将其保持在“处于稳定的裂纹扩展”状态，这通常会在厚度变化时发生，如大台阶或翼缘板/加筋板。



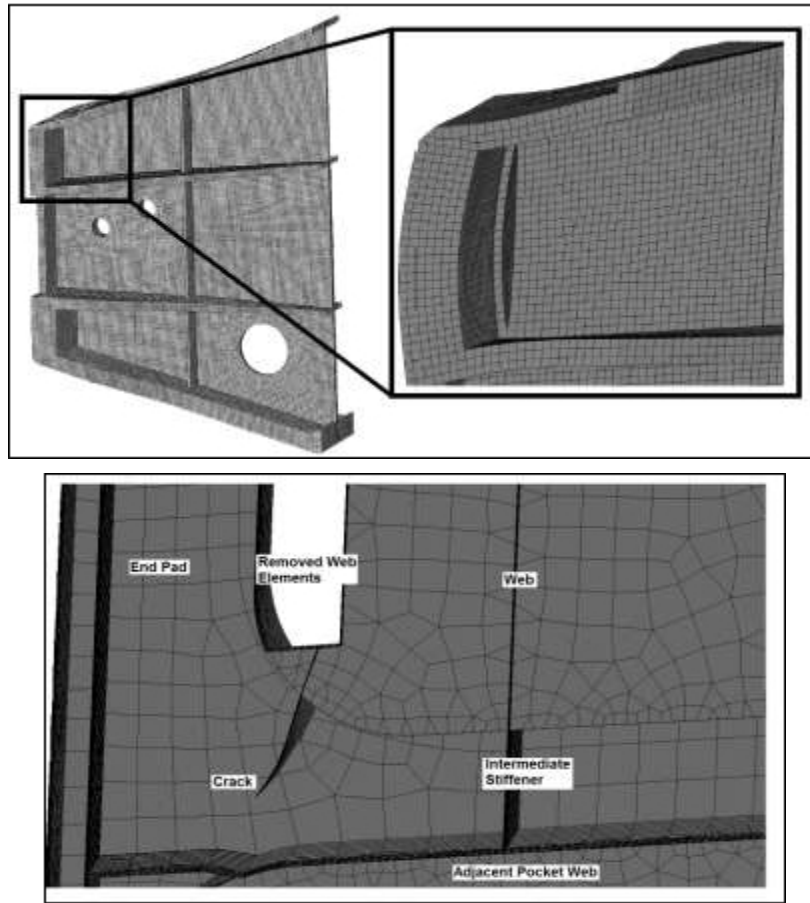
图六 裂纹附近网格截面图

2.2 将 SIF 应用于 WCTB 上端隔框腹板圆弧开裂

使用Beasy软件对F-16前后多个批次的舱壁进行了裂纹止裂/扩展研究：

- 1) 研究基于设计蓝图和安装修复规定。
- 2) 裂纹穿透了上部翼缘板和上边位置的中间加强筋时，假设腹板失效。

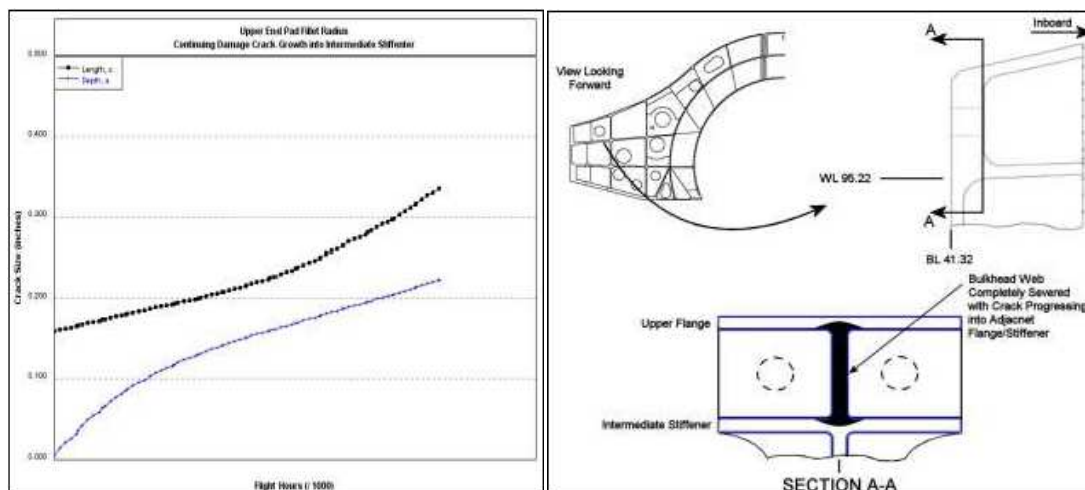
- 3) 研究表明：上端隔框腹板位置的裂纹尖端没有停止扩展。
- 4) 研究表明：翼缘板/加强筋的裂纹处于稳定的扩展状态。



图七 BEASY模型的剖视图，前视图

采用BEASY软件进行其他裂纹扩展模型分析

- Beasy软件的计算结果用于IMAT-CGRO中进行裂纹扩展分析。
- 裂纹扩展路径显示裂纹向上扩展到上边位置的中间加强筋。
- 舱壁的使用寿命：
 - ◇ 在上端隔框腹板圆弧位置失效后，翼承舱壁（WCTB）任然有剩余寿命。
 - ◇ 总寿命=隔框腹板圆弧位置寿命+上边位置中间加强筋寿命。



图八 裂纹尺寸对疲劳寿命的影响

3 风险分析

3.1 背景

3.1.1 风险分析的任务

风险分析非常重要，可以避免对前/后批次所有飞机的上端隔框腹板端部圆弧处进行立即的检测。

—风险分析要考虑到特定客户和飞机的使用频率/使用严重程度以及差异性。

—检验数据用于确定平均无故障时间(MTF)和材料性能差异(MPV)。

✧ 如果没有检验数据，则MTF使用耐久性寿命， MPV则使用根据前期研究得到的缺省值。

—用于评估达到特定裂纹尺寸后的风险。

—用于确定最大的安全检修周期。

3.1.2 风险分析的方法

检查数据使用中位排名来增加机队故障和停航的权重，可采用贝纳德近似 (Benard's Approximation) 来进行计算：

$$\text{median rank}(\%) = \frac{i - 0.3}{N + 0.4}$$

检修周期使用对数正态分布表示。

在对数正态分布中使用危险函数 (Hazard Function) 来确定单次飞行时间中面临的失效风险。危险函数方程为：

$$R(t) = \frac{PDF(t)}{1-CDF(t)} \quad \text{瞬时故障率}$$

$$R(t, \Delta t) = \frac{CDF(t+\Delta t)-CDF(t)}{1-CDF(t)} \quad \text{一段时间内的风险}$$

3.1.3 风险分析的历程

风险分析包括以下三个历程：

—最早的风险分析采用单个舱壁的耐久性寿命作为平均无故障时间(MTF)。在初始分析中没有检验数据来证明调整MTF的合理性，导致飞机高风险飞行。

—随后开始采用飞机损伤风险分析，表示有两个或更多的舱壁故障数据，允许短时间的视觉检查间隔而不影响飞机飞行安排。

—采用SIF结果增加了用于风险分析的MTF，延长了初次检修和复检之间的时间，规划时间进行预定的表面涡流(SSEC)扫描，使得大多数飞机不再需要目视检查。

3.2 WCTB 上端隔框腹板的风险分析

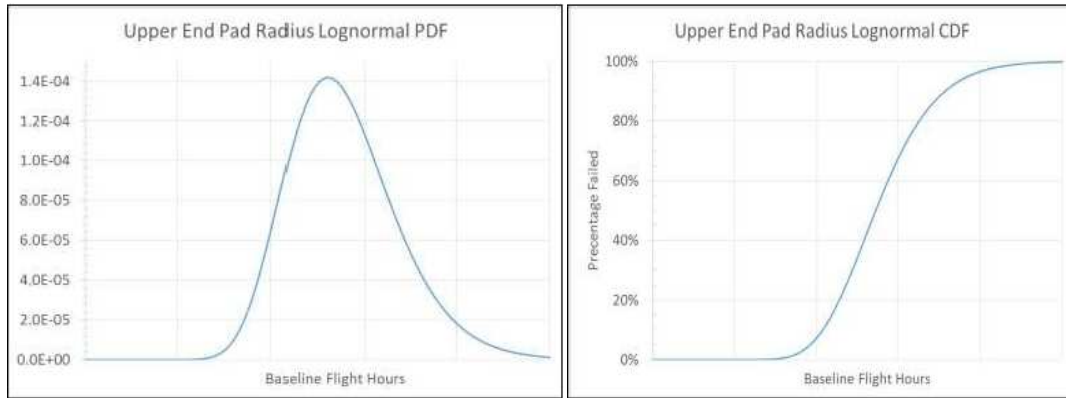
3.2.1 输入

针对WCTB上端隔框腹板进行风险分析，首先提取检验数据：多架飞机舱壁出现裂纹，未发现扩展到上边位置翼缘板或上边位置的中间加强筋。这些检验数据被用来确定对数正态分布。

进一步的损伤分析同时得到如下结果：上端隔框腹板端部圆弧完全断开后，裂纹扩展到上边位置翼缘板和上边位置中间加强筋，这一裂纹扩展过程的SIF计算结果。Beasy裂纹扩展分析结果表明，在上端隔框腹板端部圆弧失效后，结构仍有适当的寿命。

3.2.2 详细分析过程：

- 用概率方法确定平均无故障时间 (MTF)
- 用对数正态分布拟合检验数据，使上部隔框腹板圆弧寿命增加。
- 将Beasy计算得到的额外寿命添加到MTF中。
- MTF表示裂纹在隔框腹板内开始扩展并延伸到上边位置翼缘板和下边位置的中间加强筋的总时间。由于相邻隔框壁的MTF值相似，此MTF表示飞机无故障时间。



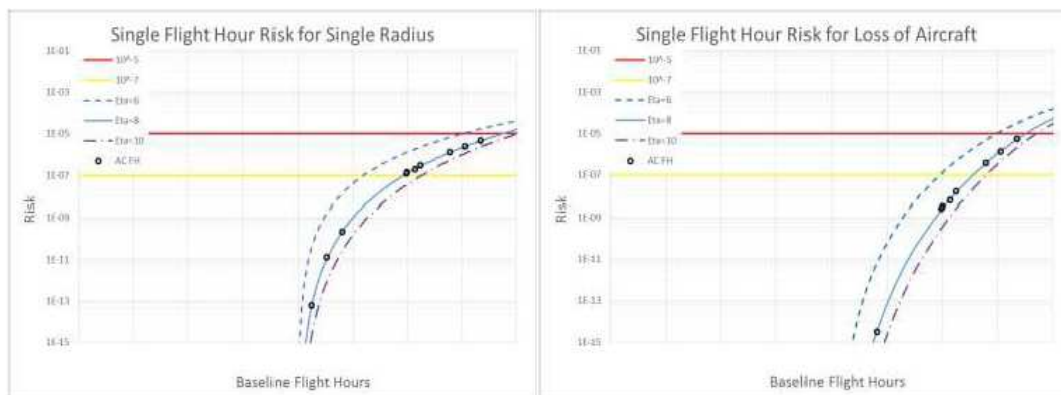
图九 上端隔框腹板对数正态概率分布以及累积分布

3.2.2 结论:

通过纳入检查数据和持续损伤分析，降低了计算结果的风险水平。这样就有更多的时间来规划初始检查和安排维修。此外，持续的损伤分析还允许在确定部队管理计划时具有更大的灵活性。可以单靠检查来管理，可以更好地协调和安装配件。

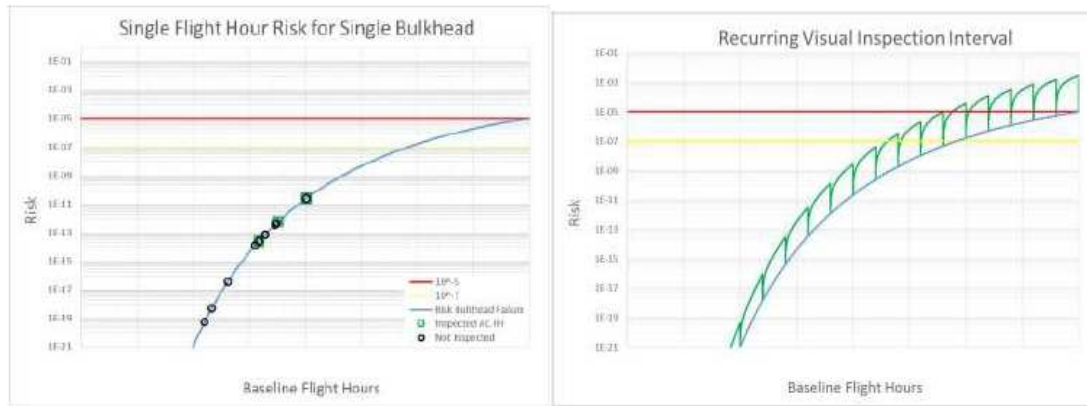


图十 单舱壁单次飞行时间风险



1. 初步分析

2. 残余应力核算



3. 隔框破坏后的寿命计算

2+3. 对损伤的视觉检查

图十一 风险分析进程

4 结论

1) 问题背景

F-16前/后多批次的飞机和Block 50 FSTD飞机的机翼连接舱壁上端隔框腹板圆弧处都发现了裂纹。但没有裂纹严峻到穿透上端隔框腹板圆弧，裂纹没有扩展到上边位置翼缘板或上边位置的中间加强筋。初始裂纹的扩展模型导致了一些客户飞机的使用寿命缩短。

2) SIF分析结果

Beasy软件用来计算沿裂纹扩展路径上的SIF值，上边位置翼缘板或上边位置中间加强筋显示出稳定的裂纹扩展状态，用IMAT-CGR0来确定上边位置翼缘板或上边位置中间加强筋的剩余寿命。

3) 风险分析结果

最初的风险分析方法会导致飞机在高风险下运行。SIF的计算结果允许更大的MTF，延长了“战隼”飞机初次检验的时间和复检的时间间隔。