

# 随机谱载荷下无人机机翼外挂物悬挂挂架的损伤容限分析

隋立军<sup>1,2</sup>, 孙有朝<sup>1</sup>, 冯宇<sup>3</sup>

(1. 南京航空航天大学民航学院, 南京, 210016; 2. 中国民用航空适航审定中心西安航空器审定中心, 西安, 710065; 3. 空军工程大学航空工程学院, 西安, 710038)

**摘要** 机翼外挂物悬挂挂架结构的损伤容限分析是确保结构安全、实现预期目标任务的重要内容, 目前针对无人机机翼外挂物悬挂挂架的损伤容限分析及研究较少。以大展弦比无人机机翼组合探头挂架为例, 进行了机翼外挂物悬挂挂架损伤容限分析。根据机翼组合探头挂架的结构设计特征, 建立了挂架的有限元分析模型, 通过疲劳载荷工况应力分析确定了疲劳危险点, 采用随机编谱方式, 获得了分析部位的损伤容限载荷谱。基于断裂力学, 采用 Runge-Kutta 方法来估算裂纹扩展行为, 得到了分析部位的裂纹扩展曲线, 获得了裂纹扩展特性。分析结果表明, 该挂架的分析部位的裂纹扩展寿命为 11 615 250 次飞行起落, 满足预期的剩余强度值设计要求, 可根据裂纹扩展寿命制定检查间隔。

**关键词** 随机谱; 无人机; 外挂物; 挂架; 损伤容限分析

**DOI** 10.3969/j.issn.1009-3516.2021.03.005

**中图分类号** V215.5 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2021)03-0029-04

## A Damage Tolerance Analysis of UAV's Wing External Store Mounting Pylon under Random Spectrum

SUI Lijun<sup>1,2</sup>, SUN Youchao<sup>1</sup>, FENG Yu<sup>3</sup>

(1. College of Civil Aviation, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; 2. Airworthiness Certification Center of CAAC, Xi'an Aircraft Certification Center, Xi'an 710065, China; 3. Aeronautics Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

**Abstract** The damage tolerance analysis of wing external store mounting pylon structure is an important content to ensure the safety of structure and achieve the expected target mission. At present, nobody cares to make inquiries about the damage tolerance analysis and research on the UAV wing external store mounting pylon. Taking a high-aspect-ratio UAV wing combined probe pylon as an example, the damage tolerance analysis of the wing external store mounting pylon is made. According to the structural design features of wing combined probe pylon, a finite element analysis model of pylon is established, and the fatigue analysis dangerous points are determined by stress analysis of fatigue load conditions. And the random

**收稿日期:** 2020-12-17

**作者简介:** 隋立军(1986—), 男, 山东青岛人, 博士生, 研究方向: 航空器结构强度设计研究。E-mail: ljsui@163.com

**通信作者:** 孙有朝(1965—), 男, 河南南召人, 教授, 博士生导师, 研究方向: 航空器适航审定与可靠性。E-mail: sunyc@nuaa.edu.cn

**引用格式:** 隋立军, 孙有朝, 冯宇. 随机谱载荷下无人机机翼外挂物悬挂挂架的损伤容限分析[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2021, 22(3): 29-32. SUI Lijun, SUN Youchao, FENG Yu. Damage Tolerance Analysis of UAV's Wing External Store Mounting Pylon under Random Spectrum[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2021, 22(3): 29-32.

spectrum compilation method is adopted to obtain the damage tolerance load spectrum of the analyzed part. Based on the fracture mechanics, the Runge-Kutta method is used to estimate the crack propagation behavior, obtaining the crack growth characteristics and curve of the analyzed part. The analysis results show that the crack propagation life of the analyzed part of the pylon is 11,615,250 flight cycles, meeting the expected design requirements of residual strength value. And the inspection interval can be determined according to the crack propagation life.

**Key words** random spectrum; unmanned aerial vehicle; external store; pylon; damage tolerance analysis

外挂物悬挂挂架是无人机载机平台的重要接口和关键结构,主要用于悬挂安装各类导弹、炸弹、鱼雷、电子吊舱等任务及作战系统,并确保预期战术战技性能指标的实现<sup>[1]</sup>。常见的挂架包括机身挂架和机翼挂架等,对于大展弦比无人机来说,因机翼翼展较大,因而外挂物悬挂挂架多布置在机翼结构上,而且常布置多组对称挂架。

外挂物悬挂挂架的设计通常需要考虑结构强度、气动性能、操纵稳定性、控制、电气多个专业<sup>[2-3]</sup>,目前相关学者针对有人机外挂物悬挂挂架的设计开展了广泛而较深入的研究,提出了外挂物悬挂挂架气动载荷设计方法<sup>[4]</sup>;分析了外挂物悬挂挂架对载机平台气动特性<sup>[5]</sup>、颤振特性<sup>[6]</sup>及动力学特性<sup>[7]</sup>的影响;开展了相关结构分析与优化设计<sup>[8]</sup>、静强度<sup>[1]</sup>及疲劳强度分析<sup>[9]</sup>计算,总结提出了静力试验关键技术<sup>[10]</sup>等。无人机机载机平台领域目前相关研究集中在平台本体<sup>[11-12]</sup>,外挂物悬挂挂架研究较少,目前仅针对武器系统挂架、光电载荷挂架、机载雷达挂架等<sup>[13-14]</sup>外挂物悬挂挂架开展了刚度、静强度有限元分析,鲜见相关疲劳及损伤容限的研究。

本文针对大展弦比无人机机翼组合探头挂架,建立了挂架有限元分析模型,根据损伤容限分析载荷谱,开展了基于断裂力学的损伤容限分析,为该挂架的疲劳定寿和检查间隔制定提供了依据。

## 1 挂架分析模型及疲劳应力分析

### 1.1 有限元模型的建立

根据结构数模,使用 ABAQUS 有限元分析软件进行建模,单元类型为 C3D8R 实体单元。建模范围包括 11 肋~15 肋间翼盒、13 肋组合探头挂架及对接接头,如图 1 所示。长桁、前后梁缘条和翼肋缘条均通过连接单元与蒙皮连接,肋腹板、前后梁与上下缘条均通过连接单元连接。接头与蒙皮、加强板及角盒间采用螺栓进行连接,建立真实接触关系。

建模忽略部分次要或不影响结构应力的倒角,应力严重区域的孔边与倒角为主要分析对象,并对网格进行了细化。

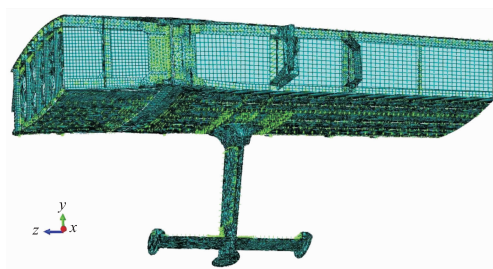


图 1 有限元模型

根据结构的实际连接情况,施加模型的边界条件和载荷,具体见图 2。图 2 中右侧 15 肋为约束端,将 15 肋处蒙皮和长桁的六自由度进行约束。A、B、C 3 个空间坐标点为组合探头各个部分的质心位置,施加对应的集中惯性载荷。在总体有限元模型中提取与细节模型边界相对应的单元节点力或应力,通过插值,加载到图 2 模型中对应位置的节点。

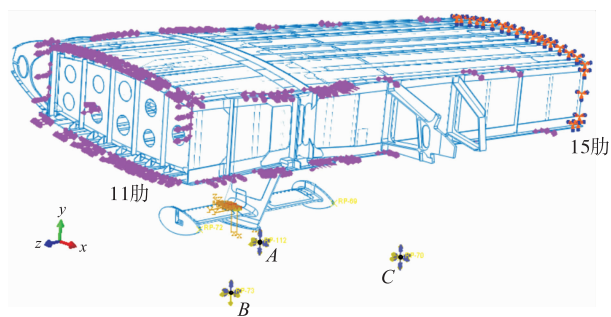


图 2 载荷与边界条件

### 1.2 疲劳应力分析

挂架疲劳分析共包含 68 种疲劳载荷工况(包括各任务段的“1g”载荷  $L_{1g}$ 、“每 g”载荷  $L_g$  等)。通过施加 68 种工况进行应力分析,根据应力分布和结构特征,以名义应力值为筛选要素,考虑结构应力突变和结构不连续的区域(如孔边、倒角等),综合评估确定了疲劳分析细节和危险点位置,见表 1 和图 3。

表 1 疲劳分析危险点

序号	疲劳分析细节	危险点及节点编号	所在部件
1#	竖直过渡梁与接头连接孔	孔 Node 277678	竖直过渡梁
2#	竖直过渡梁与加强肋连接孔	孔 Node 117921	竖直过渡梁
3#	竖直过渡梁与加强肋连接 R 区	R 区 Node 188685	加强肋
4#	加强肋连接孔	孔 Node 189033	加强肋

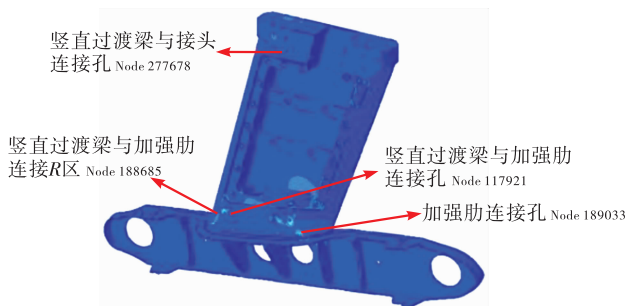


图 3 疲劳分析危险点

经计算,4#危险点即加强肋连接孔(Node 189033)的应力水平最高,68种工况中最危险工况为105工况,该工况应力云图见图4。根据结构连接形式,该连接孔周围还有其他临近孔,且孔边应力水平仅次于1#~3#危险点,4#危险点是挂架结构中最危险的部位。因此,本文以4#危险点为对象开展分析计算。

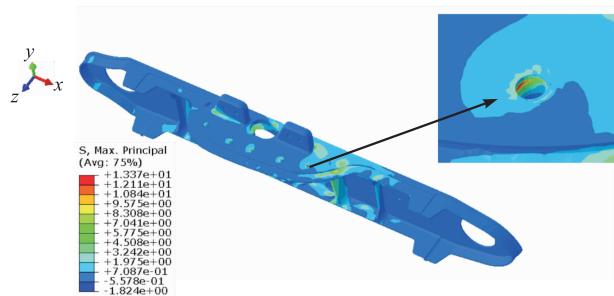


图 4 加强肋连接孔(Node 189033)105工况应力云图

## 2 挂架损伤容限分析

### 2.1 损伤容限分析载荷谱

挂架预期飞行任务剖面包含了高空和低空2种类型,根据不同飞行高度及航程的组合,细化编制组成  $A_1$ 、 $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$ 、 $E_1$ 、 $A_2$  共6种典型飞行类型的载荷谱,并按照随机加载次序交替出现载荷的峰值和谷值。载荷的峰值和谷值是根据68种疲劳载荷工况按下述公式计算得到<sup>[9]</sup>:

$$L_p = L_{1g} + L_g \Delta g K \quad (1)$$

$$L_v = L_{1g} - L_g \Delta g K \quad (2)$$

式中: $L_p$ 为载荷峰值; $L_v$ 为载荷谷值; $L_{1g}$ 为“1g”载荷; $L_g$ 为“每g”载荷; $\Delta g$ 为过载增量; $K$ 为动态放大系数,仅在计算垂向载荷时需要考虑,侧向载荷不需考虑。

将载荷峰谷值按6种典型飞行类型随机排列得到飞-续-飞随机载荷谱,每一个重复加载谱块为3000次飞行起落。4#危险点部位的损伤容限分析载荷谱见图5。

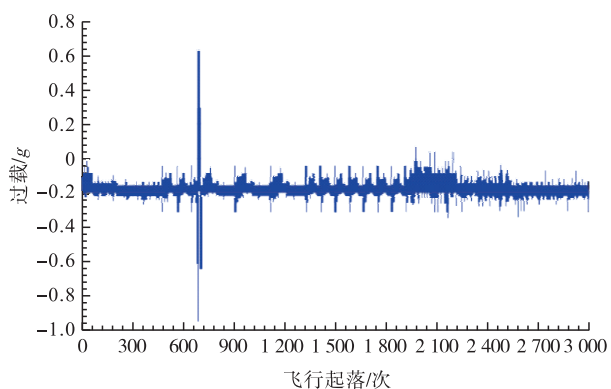


图 5 损伤容限分析载荷谱

### 2.2 开裂模式及裂纹扩展模型

连接孔及临近位置共5个共线孔。根据图4中应力分析结果,孔5的位置为应力最高的位置。因孔处零件的厚度较大,考虑加工装配过程中的制造缺陷,假定开裂模式为孔边角裂纹。因临近位置的孔应力水平相当,可能出现多部位损伤,因此假设每个孔边均存在缺陷,并取应力最高的孔5一侧孔边角裂纹为主缺陷,孔1~孔5的其他缺陷均为次缺陷<sup>[15]</sup>,见图6。

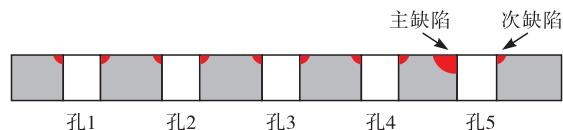


图 6 开裂模式

本文采用 Runge-Kutta 方法来估算裂纹扩展<sup>[9]</sup>,即根据初始的裂纹长度计算裂尖应力强度因子值,使用 Runge-Kutta 方法在飞行起落数上进行数值积分,得到裂纹长度的增量,再以新裂纹长度更新计算裂尖应力强度因子值,由此迭代计算裂纹长度,得到裂纹长度与飞行起落数的关系曲线。

### 2.3 裂纹扩展分析结论

该分析细节的材料为7050铝合金。假定孔边初始裂纹长度为1.25 mm<sup>[15]</sup>;可检裂纹长度依据检查方式确定,本文中假定为目视可检方式,对应长度为51.00 mm。由限制载荷计算确定的剩余强度要求值为16.20 MPa,由剩余强度要求值计算得到临界裂纹长度。

当初始裂纹长度为1.25 mm时,经过11 615 250

次飞行起落,裂纹达到剩余强度要求值 16.20 MPa 对应的临界裂纹长度 82.30 mm,裂纹扩展曲线见图 7。因裂纹在初始阶段扩展十分缓慢,长度基本不变,故图 7 的横坐标起点为目视可检裂纹尺寸 51.00 mm 对应的累计起落数。

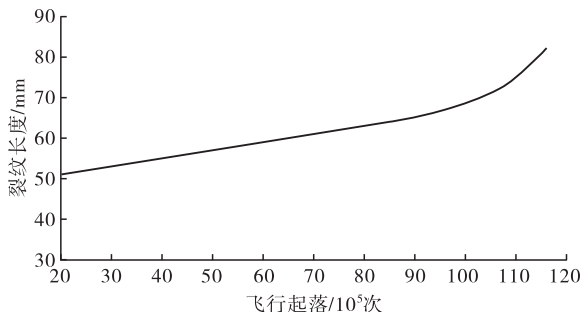


图 7 裂纹扩展曲线

根据损伤容限分析结论,加强肋连接孔(Node 189033)的裂纹扩展寿命为 11 615 250 次飞行起落,满足预期的设计要求,可根据裂纹扩展寿命制定检查间隔。

### 3 结论

本文以大展弦比无人机机翼组合探头挂架为研究对象,以典型疲劳危险点为例,编制了挂架结构随机载荷谱,开展了基于断裂力学的损伤容限分析,具体结论有:

1)获得了大展弦比无人机机翼组合探头挂架的加强肋连接孔(Node 189033)的损伤容限特性,为缓慢裂纹扩展结构。

2)通过分析计算,该疲劳危险点的剩余强度值对应的裂纹扩展寿命为 11 615 250 次飞行起落,满足预期的设计要求。

### 参考文献

[1] 童话.飞机挂架强度计算及优化设计[D].西安:西北

工业大学,2006:3.

- [2] 王哲.飞机吊舱设计技术研究[J].航空标准化与质量,2016(4):12-14.
- [3] 付友波,孟新意.机翼吊挂结构设计技术研究[J].现代制造技术与装备,2020(4):90-92.
- [4] 曲林锋,王成波,隋福成.机载悬挂物与悬挂装置连接部位的载荷计算方法[J].飞机设计,2013,33(4):31-34.
- [5] 王立强,敬代勇,张泽远.不同挂位外挂物气动特性数值模拟研究[J].弹箭与制导学报,2012,32(6):125-127.
- [6] 路涛骏.复杂连接特征下机翼-外挂系统的颤振研究[D].大连:大连理工大学,2019:10-12.
- [7] 雷晓波,张强,张永峰.固定翼飞机外挂物着陆冲击响应谱研究[J].飞行力学,2015,33(2):161-164.
- [8] 池福俭,秦建兵,李建平.基于 MD Nastran 的过渡梁结构优化分析[J].科学技术创新,2020(1):35-36.
- [9] 赵玉龙,赵翔,王峰会,等.随机载荷作用下机翼副油箱挂架的疲劳寿命分析及优化[J].航空制造技术,2016(7):66-68.
- [10] 宋波涛,池福俭,苗志桃.某飞机挂架试验方法及技术研究[J].科学技术创新,2019(14):28-29.
- [11] 陶于金,李沛峰.无人机系统发展与关键技术综述[J].航空制造技术,2014(20):34-39.
- [12] 朱永伟.无人机系统关键技术研究[D].北京:北京理工大学,2016:7-8.
- [13] 郭崇颖,吴斌,李岩.某无人机光电载荷挂架总体结构设计[J].工程与试验,2016,56(4):77-80.
- [14] 吴斌,荣海春,王呈顺,等.某无人机载雷达挂架结构设计[J].机械与电子,2019,37(12):26-29.
- [15] 郑晓玲.民用飞机金属结构耐久性与损伤容限设计[M].上海:上海交通大学出版社,2011:123-124.

(编辑:姚树峰)