

任务模式变化对已定寿运输/轰炸类飞机疲劳可靠性影响



王创奇

中航西安飞机工业集团股份有限公司, 陕西 西安 710089

摘要: 本文通过梳理疲劳可靠性研究现状, 针对运输/轰炸类飞机任务模式变化, 分两个阶段讨论了影响疲劳可靠性的载荷因素, 从谱型、剖面、超低空飞行和特殊载荷等对载荷分散性影响较大的参数进行了分析, 提出了结合飞参数据和载荷相似性原理对定寿载荷谱修正的工程方法; 采用此方法得到的载荷谱, 通过与原始定寿载荷谱类比分析或补充试验, 既充分利用已定寿型号飞机试验结果避免重复试验, 又可获得具有相同分散性的高可靠度使用寿命, 对快速应对任务模式变化, 修订载荷谱和调整可靠性寿命具有重要参考价值。

关键词: 任务模式; 疲劳; 可靠性; 载荷; 飞机

中图分类号: V215.7

文献标识码: A

DOI: 10.19452/j.issn1007-5453.2022.06.005

随着国际安全形势的变化, 运输/轰炸类军用飞机任务模式呈现复杂性、多样化的特点, 影响可靠性寿命的载荷剖面、服役环境等参数明显变化, 如近海飞行、海外救援、挂载构型变化、训练需求变化等, 因此, 已给定使用寿命飞机疲劳可靠性受到了用户和工业部门的关注。目前, 国内外主要针对新型号飞机的寿命监控、虚拟试验等新技术开展研究, 缺少重新评估现役飞机使用变化的疲劳可靠性方法。由于飞机疲劳可靠性验证需要长时间和高费用, 在保持可靠性指标不变的情况下难以重新开展全尺寸耐久性试验验证和及时调整飞机使用寿命。

本文在利用已有成果基础上, 研究了任务模式变化对运输/轰炸类军用飞机疲劳可靠性的影响, 分析了谱型、任务剖面、超低空飞行, 以及特殊载荷等几个关键参数, 得到可行的工程修正载荷谱及寿命调整方法, 在飞机寿命能力提升、结构改进改型研制、安全可靠使用等方面, 具有重要的工程价值和现实意义。

1 疲劳可靠性应用现状

只要飞机产品批量生产和重复使用, 就必须考虑疲劳

可靠性。结构、材料、加工、装配、服役环境、维护, 不可避免存在差异或不稳定性, 均会导致结构繁杂的航空产品疲劳寿命存在差异。为了研究疲劳可靠性, 国内出现了许多理论、分析方法和模型^[1-10], 综合运用概率论、数理统计、疲劳学、断裂力学、材料力学等, 探索机群和试验个体之间的规律。近年来使用频次较高的疲劳可靠性分析方法有应力-强度干涉法、蒙特卡罗模拟法, 以及一次二阶矩法中的中心点法、改进一次二阶矩法、验算点法等; 分析模型有累积损伤模型、剩余强度模型和疲劳寿命模型。

基于结构疲劳可靠性分析方法或模型, 在给定结构可靠度下的结构疲劳寿命估算结果是工程应用目标, 因此分散系数作为可靠性寿命重要指标被广泛应用, 许多标准规范和手册指南^[11-13]均对分散系数取值及计算公式进行了描述, 并且认为其与寿命的分布函数、标准差、可靠性要求和载荷谱密切相关。为了区分分析和试验分散系数, 国内从不同角度开展了许多研究工作^[14-16]。对于服从对数正态分布的军用飞机寿命, 分散系数包含试件个数、置信度、可靠度和标准差 4 个参数, 并以中值寿命为基准。

为进一步研究结构分散性和载荷分散性, 将分散系数拆分为结构分散系数和载荷分散系数。研究表明, 用来表

收稿日期: 2022-03-22; 退修日期: 2022-04-15; 录用日期: 2022-05-11

引用格式: Wang Chuangqi. Influence of mission profile variation on fatigue reliability of life-tested transport or bombardment aircraft[J]. Aeronautical Science & Technology, 2022, 33(06): 28-33. 王创奇. 任务模式变化对已定寿运输/轰炸类飞机疲劳可靠性影响[J]. 航空科学技术, 2022, 33(06): 28-33.

征制造、加工、材料及几何尺寸等因素不确定性标准差和用来表征载荷谱来源、编谱子样、训练大纲与实际飞行差异、机群内不同使用情况等因素不确定性标准差存在较强关联性^[17-19]。

2 任务模式变化对载荷的影响

从飞机研制到批量交付,往往需要 10~20 年;从飞机疲劳验证试验开始到验证评定结束,往往也需要 10 年左右,因此,假定结构分散性基本保持不变的情况下,疲劳可靠性主要受载荷分散性影响。按照实际使用情况变化,载荷分散性分为两个阶段,第一阶段是飞机研制/定寿阶段,该阶段载荷分散性主要基于设计使用载荷谱假设,载荷谱来源飞行实测数据,疲劳可靠性应用也主要针对该阶段;第二阶段是飞机服役、改型/寿命提升阶段,该阶段载荷分散性主要基于服役载荷谱,载荷谱需要从飞参数据统计分析中获取,任务模式变化的影响主要针对第二阶段。假设载荷谱分散性不受载荷变化影响^[20],那么,为利用定寿结果,需考虑两个方面因素:一是如何保持载荷分散性的一致性;二是如何进行载荷谱修正,以反映任务模式变化。载荷分散性是由定寿载荷谱决定的,因此要保持一致性,需要在谱型、剖面、任务段类型、载荷来源等方面进行影响分析,以便给出的载荷谱既符合服役载荷谱,又能充分利用定寿载荷谱。

3 任务模式变化影响分析及修正

3.1 谱型

不同谱型,寿命和损伤分布不同^[21-22],即使载荷谱按照“飞续飞”编制,也会因任务类型、任务段合并与简化方法不同导致载荷顺序变化;按照累积损伤理论,损伤一定情况下,载荷顺序不同会导致寿命差异。以“飞续飞”谱为例,高载截取/低载截除、损伤当量化折算方法、峰值/谷值随机参数是影响载荷分散性的关键要素。为减少谱型影响,补充分析和改进验证试验尽可能地应沿用原先编谱方法和随机参数,避免为缩短周期而简化成等幅谱和改变谱块大小。通常,在当量化折算时,可保持载荷级数相同;采用“乘同余法”实现任务段随机数列时可选择近似的参数。

3.2 任务剖面

受未来的威胁环境和作战需求变化的影响,任务模式变化是必然的,导致剖面飞行时间、高度和剖面类型变化,从而影响载荷变化。如通过任务系统改进升级使已定寿飞机增加新的任务系统和任务剖面,增加新挂载构型,从单一

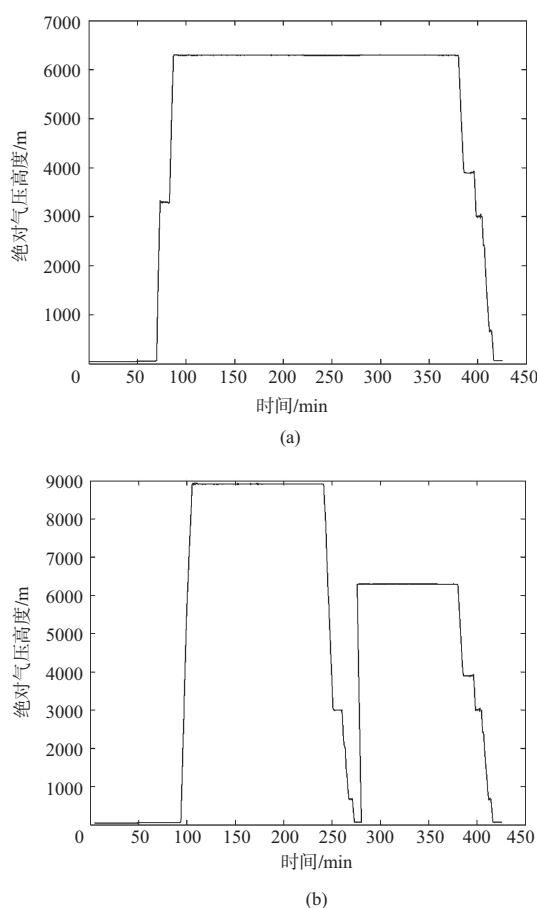


图1 单一飞行到复杂剖面

Fig.1 Single flight becoming complicated profile

飞行到复杂剖面变化。图1是某型机近年来由单一科目训练演变为复合科目训练“高度-时间”飞参数据图。由图1可知,在相同训练时间内,高度从单一的中空飞行变为高空、中空复合飞行,并且出现了一次墩起落,这种复杂多变的任务模式必然产生更多的机动载荷,阵风载荷和机动载荷出现顺序和大小也将会明显不同;同时增压载荷变化频次成倍增加。即使是运输类飞机阵风载荷,剖面的影响也是明显的^[23]。军用运输/轰炸类在假设载荷环境相似情况下,需要利用“阵风谱形状相似准则以及每次飞行机动循环数近似相同准则”^[24]原理,结合飞参数据识别技术^[25],借鉴在原定寿载荷谱基础上进行载荷谱插值。实测数据表明,环境相似情况下小子样实测获取的载荷数据也具有明显的相似性,如图2所示。因此,对于复杂剖面按照相似性进行修正是可行的,并尽可能按照低空、中空、高空剖面任务段分别进行。

3.3 超低空飞行

出现超低空任务段是必须考虑的。根据 GJB 67.2A 以

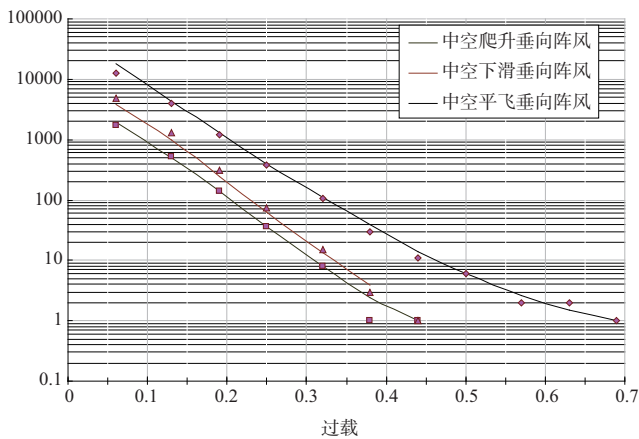


图2 小子样实测中空剖面相似性

Fig.2 Similarity of medium-altitude flight profile for small sampling measured data

及 NACA-TN-4332, 低空飞行任务段的阵风载荷较强^[26-27]。为进一步辨识低空飞行载荷的占比,统计了含突防训练科目服役飞机一年的飞参数据,其中含至少有一次低空突防架次飞行起落的低空段过载明显高于中高空平飞段,如图3所示。对比较大载荷出现的频次,超低空飞行大载荷明显增多,相同时间内出现频次平均约为中高空平飞段的2.8倍左右。为保证载荷谱一致性,用相似性原则和损伤等效在平飞谱上进行修正,避免相对保守的理论计算谱和仿真分析^[28]。除用飞参过载数据进行相似性修正外,超低空任务段损伤等效处理上,需考虑时间、过载同时修正,包括一定放大倍数超越曲线高载外推和取值。

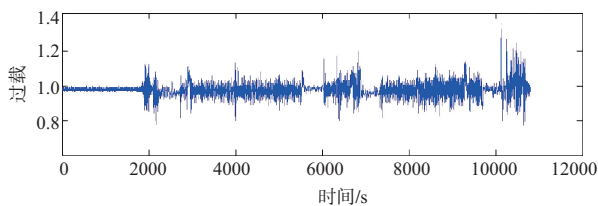


图3 超低空飞行过载飞参数据

Fig.3 Flight load data of ultra-altitude flight

3.4 特殊载荷和新载荷来源

为适应任务模式变化,新任务和结构局部改进使原本影响不明显的载荷转化为结构新的损伤源,如新增局部外凸物导致的流场突变;大重量起降导致起落架载荷加重;高度引起操纵钢索预张力温度环境变化等。新的载荷往往难以通过实测获取,需用专业软件进行补充分析。搜救和救援任务将带来近海低空和高温高原气候环境。研究表明,春季阵风强度常常是冬季的3倍;在同样高度飞行,山地垂

直阵风载荷约为平坦地带的3倍以上^[29]。通常,考虑单一飞行性能安全,大重量起飞飞行亦受到气温和季节限制。大部分特殊任务情况导致的载荷发生变化需按照相似性判别方法^[30],合理利用已有研究对新出现的载荷来源进行必要调整,保证高载荷截取和载荷出现频次更加符合载荷情况。

4 结论

为应对任务模式变化,已定寿飞机后续使用应重新评价其疲劳可靠性,主要是载荷修正。单机寿命监控和数字孪生(Digital Twin)等新技术推进将会对未来飞机使用提供新的途径。从可靠性出发,所有手段只有建立了包括结构几何模型、材料属性、生产、检验、使用维护等飞机产品数据与通过力学分析、空气动力以及当量损伤计算等产生的理论模型映射关系才能实现。从工程应用出发,利用已定寿型号结果,考虑使用载荷影响,根据主要影响因素进行加权分析,对已有定寿运输/轰炸机寿命指标修订给出具有相同可靠度的定量结果。无论是采用类比法还是采用DFR法,目前工程可用的手段均只有在试验验证定寿数据的基础上进行分析才较为可靠。任务模式变化主要影响载荷,为使寿命可靠性不降低,可从以下方面进行修订:

(1) 谱型对寿命影响明显,尽可能采用相似性原理对载荷修正,即使是“飞续飞”谱也应尽可能用相同的随机参数和载荷级数,以保持谱型一致性。

(2) 充分利用飞参数据,按照剖面及任务段相似性修正载荷;飞参数据最小样本量至少应满足各飞行类型的子样大小;飞行基本数据、重量数据应满足剖面识别,过载数据应满足过载超越曲线相似插值,姿态数据应满足重心位置修正和载荷识别等。

(3) 超低空飞行载荷必须进行考虑,可以用同一剖面飞参数据统计获取平飞(巡航)段和超低空飞行段放大系数,并按损伤进行次数和过载外推放大。

(4) 特殊载荷和环境修正是必要的,特别是近海低空和高温高原气候环境影响。

AST

参考文献

- [1] 高镇同,熊峻江. 疲劳可靠性[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2000.
Gao Zhentong, Xiong Junjiang. Fatigue reliability [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2000. (in Chinese)

- [2] 张磊,万一品,宋绪丁.常用疲劳可靠性分析方法概述[J].装备制造技术,2018(3):79-80.
Zhang Lei, Wan Yipin, Song Xuding. Overview of common fatigue reliability analysis methods[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2018(3):79-80. (in Chinese)
- [3] 王正刚.多级随机载荷作用下机械零件动态疲劳可靠性模型[J].机械设计与研究,2014(6):83-86.
Wang Zhenggang. Model of fatigue dynamic reliability of mechanical component under multi-stage random loads[J]. Machine Design and Research, 2014(6):83-86. (in Chinese)
- [4] 王正,王增全,何洪.随机载荷循环作用下的机械结构疲劳寿命预测模型[J].中国机械工程,2012(1):98-101.
Wang Zheng, Wang Zengquan, He Hong. Predicting model for fatigue life of mechanical structures under random cyclic load [J]. China Mechanical Engineering, 2012(1): 98-101. (in Chinese)
- [5] 郭盛杰,姚卫星.结构元件疲劳可靠性估算的剩余寿命模型[J].南京航空航天大学学报,2003(1):25-29.
Guo Shengjie, Yao Weixing. Reliability model for structural elements based on fatigue residual life [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2003(1): 25-29. (in Chinese)
- [6] 顾怡,吕海波.结构元件疲劳可靠性分析的累积损伤模型[J].机械强度,2000(3):228-230.
Gu Yi, Lyu Haibo. Reliability model for structural elements based on accumulated damage [J]. Journal of Mechanical Strength, 2000(3): 228-230. (in Chinese)
- [7] 赵永翔,王金诺,高庆.基于应变的疲劳可靠性分析新方法[J].机械工程学报,2002(1):27-30.
Zhao Yongxiang, Wang Jinnuo, Gao Qing. New method for strain-based fatigue reliability analysis[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2002(1):27-30. (in Chinese)
- [8] 易当祥,吕国志,周瑜.结构元件疲劳断裂可靠性分析的新方法[J].飞机设计,2004(12):17-22.
Yi Dangxiang, Lyu Guozhi, Zhou Yu. New approaches to structure elements fatigue and fracture reliability analysis [J]. Aircraft Design, 2004(12):17-22. (in Chinese)
- [9] 赵永翔,彭佳纯,杨冰,等.考虑疲劳本构随机性的结构应力疲劳可靠性分析方法[J].机械工程学报,2006(12):36-41.
Zhao Yongxiang, Peng Jiachun, Yang Bing, et al. Structural stress-based fatigue reliability analysis considering the random cyclic constitutions [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2006(12):36-41. (in Chinese)
- [10] 赵永翔.应变疲劳可靠性分析的新进展与展望[J].机械工程学报,2001(11):1-6.
Zhao Yongxiang. On the strain-based fatigue reliability analysis [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2001(11): 1-6. (in Chinese)
- [11] GJB 67.6A—2008;军用飞机结构强度规范 重复载荷、耐久性和损伤容限[S].中国人民解放军总装备部,2008.
GJB67.6A—2008. Military airplane strength specification repeated loads, durability and damage tolerance[S]. General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army, 2008. (in Chinese)
- [12] JSSG—2006; Joint service specification guide Aircraft structures[S]. USA. Department of Defense, 1998.
- [13] 孙侠生,董登科.军用飞机结构耐久性/损伤容限分析和设计指南[D].西安:中国飞机强度研究所,2007.
Sun Xiasheng, Dong Dengke. Military aircraft structure durability/failure tolerance analysis and design manual[D]. Xi'an: China Aircraft Strength Institute, 2007. (in Chinese)
- [14] 张福泽.疲劳分散系数的分类及其取值[J].航空学报,1987(6):B239-B243.
Zhang Fuze. The type and value of Scatter Factor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1987 (6): B239-B243. (in Chinese)
- [15] 高潮,何宇廷,侯波,等.飞机结构疲劳寿命分散系数研究[J].机械强度,2016(5):1076-1081.
Gao Chao, He Yuting, Hou Bo, et al. On fatigue life scatter factor for the aircraft structure [J]. Journal of Mechanical Strength, 2016(5):1076-1081. (in Chinese)
- [16] 熊峻江,王三平,郭爱民,等.复合材料疲劳可靠性研究[J].材料工程,2000(5):40-44.
Xiong Junjiang, Wang Sanping, Guo Aimin, et al. Fatigue reliability research of composite material[J]. Journal of Materials Engineering, 2000(5):40-44. (in Chinese)
- [17] 李唐,贺小帆,隋芳媛,等.战斗机机群载荷谱损伤分散系数确定方法[J].工程力学,2017(4):245-246.
Li Tang, He Xiaofan, Sui Fangyuan, et al. Fatigue scattering factor for load spectra in a fighter fleet [J]. Engineering Me-

- chanics, 2017(4):245-246. (in Chinese)
- [18] 贺小帆,董彦民,刘文斑. 结构和载荷谱分散性分离的疲劳寿命可靠性[J]. 航空学报, 2010(4):732-737.
- He Xiaofan, Dong Yanmin, Liu Wenting. Reliability analysis on fatigue life with separated structural and load spectrum scatters [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2010(4): 732-737. (in Chinese)
- [19] 王创奇,孟新意. 基于实测数据的疲劳分散系数取值研究[J]. 航空工程进展, 2020(6):394-399.
- Wang Chuangqi, Meng Xinyi. Research on the fatigue life scatter factor value based on measured data[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2020(6): 394-399. (in Chinese)
- [20] 张福泽. 使用载荷下的重谱能降低寿命不能降低疲劳分散系数[J]. 航空学报, 2013(18):1982-1997.
- Zhang Fuze. Heavy spectra under operational loads may reduce life but not fatigue scatter factor[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2013(18):1982-1997. (in Chinese)
- [21] 沈先钊,吴艳,陈德容,等. 5种疲劳计数方法对疲劳寿命预估的影响[J]. 湖北工学院学报, 2014(10):57-59.
- Shen Xianzhao, Wu Yan, Chen Derong, et al. The influences of five different counting methods on the estimation of fatigue lifetime [J]. Journal of Hubei Polytechnic University, 2014(10): 57-59. (in Chinese)
- [22] 钱洪新. 载荷谱型对疲劳损伤分布的影响[J]. 南京航空航天大学学报, 2001(6):241-244.
- Qian Hongxin. Effect of cyclic load type on distribution of fatigue cumulative damage [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2001(6):241-244. (in Chinese)
- [23] 朱俊贤,贺小帆,李玉海. 阵风载荷谱的损伤分散性研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2021, 47(10): 2129-2137.
- Zhu Junxian, He Xiaofan, Li Yuhai. Damage variation of gust load spectra [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2021, 47(10): 2129-2137. (in Chinese)
- [24] 潘庆荣. 编谱方法中阵风载荷谱形状相似准则的实现[J]. 民用飞机设计与研究, 2005(3):5-18.
- Pan Qingrong. Realization of similarity shape of gust load spectrum in TWIST method [J]. Civil Aircraft Design and Research, 2005(3):5-18. (in Chinese)
- [25] 闫楚良,杜晓坤,李五一,等. 运输类飞机阵风载荷与机动载荷识别算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2015(4):308-313.
- Yan Chuliang, Du Xiaokun, Li Wuyi, et al. Distinction algorithm between gust load and maneuver load of transport aircraft [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2015(4):308-313. (in Chinese)
- [26] GJB 67.2A—2008:军用飞机结构强度规范 飞行载荷[S]. 中国人民解放军总装备部, 2008.
- GJB67.2A—2008: Military airplane strength specification: Flight load[S]. General Armament Department of the Chinese People's Liberation Army, 2008. (in Chinese)
- [27] Harry P, Roy S. An approach to the problem of estimating severe and repeated gust loads for missile operations[R]. NACA, 1958:32.
- [28] 刘刚,洪冠新,金长江. 复杂地形上空超低空风场的工程仿真方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 193-196.
- Liu Gang, Hong Guanxin, Jin Changjiang. Engineering simulation method for airfield over complex terrain at minimum altitude [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(3):193-196. (in Chinese)
- [29] Bell C A, Dempster J B. Summary of flight load environmental data taken on B-52 fleet aircraft[R]. AIAA paper, 1970: 64-165.
- [30] 颜灿林,贺小帆,李玉海. 一种起落架载荷谱相似性判别方法[J]. 北京航空航天大学学报, 2019, 45(4):752-759.
- Yan Canlin, He Xiaofan, Li Yuhai. An approach for similarity discrimination on landing gear load spectrum [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2019, 45 (4):752-759. (in Chinese)

Influence of Mission Profile Variation on Fatigue Reliability of Life-Tested Transport or Bombardment Aircraft

Wang Chuangqi

AVIC Xi'an Aircraft Industry Group Company Ltd., Xi'an 710089, China

Abstract: By analyzing the progress of research on fatigue reliability in view of mission profile variation for transport or bombardment aircraft, this paper discusses the factors of load which influence the fatigue reliability by two steps. The analyses of parameters which contain spectrum type, mission profile, ultra-low altitude flight and special load have great influence on the dispersion of load. An engineering method combining flight parameter data and load similarity principle is proposed. The load spectrum obtained by this method can not only make full use of the test results of the aircraft with certain fatigue life, but also acquire high reliability fatigue life with the same disparity through load spectrum analogy analysis or supplementary test, which has important reference value in the aspects of correcting load spectrum, adjusting reliability fatigue life and replying variation of mission profile.

Key Words: mission type; fatigue; reliability; load; aircraft