

军用飞机结构使用寿命研究概述

谭登驰¹ 陈跃良² 杨茂胜²

(1 海军装备部重庆军事代表局, 重庆 410016; 2 海军航空工程学院青岛分院, 青岛 266041)

摘要: 使用寿命是军用飞机的重要性能指标, 而飞机结构的使用寿命是决定飞机使用寿命的基础。文章对飞机结构的寿命体系进行了介绍并探讨了影响飞机结构使用寿命的因素, 对目前国内外研究现状进行了回顾, 对管理飞机寿命的日历寿命体系评定技术进行了分析, 在此基础上指出后续研究中应重点解决的几个关键问题。

关键词: 飞机结构; 腐蚀环境; 使用寿命; 飞行强度; 评定技术

中图分类号: V215.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-3919(2007)04-0037-06

Summary research on service life of military aircraft structure

TAN Deng-chi¹, CHEN Yue-liang², YANG Mao-sheng²

(1 Chongqing Office of Navy, Chongqing 410016, China)

(2 Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao Branch, Qingdao 266041, China)

Abstract: service-life is the important performance index of military aircraft. And also the service-life of aircraft structure is the base of determination about aeroplane service life. In this article, Life system of aircraft structure and the current status at home and abroad were presented. Some factors affecting the service life of military aircraft structure was discussed. Also the evaluation method was analyzed. At last several key problems and their technical settlement were expounded emphatically.

Key words: aircraft structure; corrosive environment; service life; flight frequency; evaluation method

1 飞机结构的寿命体系

1.1 使用寿命是飞机的重要性能指标

飞机是一种大型、复杂的先进装备。对军用飞机而言, 要实现它所承担的作战使命, 显示强大的作战威力, 必须在飞行高度、速度、航程、机动性、敏捷性、电子作战能力、武器装备以及隐身等诸多方面具有先进的性能指标, 同时必须满足长寿命、高可靠性、高经济性的综合指标。先进的作战性能伴随着研制周期加长及昂贵的研制费用和制造成本, 要使所研制的军用飞机型号在用户所要求的时间区段内用尽量少的飞机数量完成所承担的作战使命, 使用寿命的长短是一个关键问题。满足安全可靠条件下的长寿命是经济性最重要的保证。因此, 使用寿命已成为飞机研

收稿日期: 2007-03-25; 修回日期: 2007-05-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50675221); 总装“十一五”预研课题(513270301)

作者简介: 谭登驰(1963-), 男, 工程师, 研究方向: 飞机结构疲劳寿命; (410016) 重庆市50号信箱海军装备部重庆军事代表局航空装备处。

制中不可缺少的重要性能指标^[1]。

1.2 飞机结构使用寿命指标

飞机结构是飞机装备的载体,是军用飞机实施作战任务、发挥作战能力的基础和基本前提。由于构成飞机结构的各部件及每个部件的各构件之间的组合和连接形式相当复杂,关键构件的检查、修理乃至局部更换要比飞机各个系统的零件及机载设备复杂得多,通常需要在大修时实施。因此,飞机的进厂大修时间主要取决于结构,而各系统和机载设备的检修和更换力争与结构大修相协调。由于飞机各个系统机载设备在飞机总寿命期内可以进行更换,只有飞机机体结构达到了总寿命才意味着飞机总寿命的终止,因此,飞机的总寿命主要由整机结构的总寿命决定。由此可见,飞机结构的使用寿命是决定飞机使用寿命的基础,飞机结构使用寿命的评定对飞机使用寿命评定起着决定性作用。

飞机结构使用寿命包含两个主要指标,一个是飞行小时数或飞行起落次数,另一个是用使用年限表示的日历寿命,以先达到者作为飞机结构到寿的判据。飞行小时数和起落次数主要用疲劳定寿法确定,目前我国已形成了一套较为完整、可靠的分析方法。日历寿命的确定则需要考虑地面停放环境、空中飞行环境和载荷的综合作用,属于结构力学、金属学、材料学、腐蚀学等多学科交叉的一个新的研究领域^[2],目前还未有一种被业内人士所公认为是最有效的分析方法。

飞机结构的疲劳寿命和日历寿命均包括首翻修、修理间隔与总寿命。但是,腐蚀环境的作用同时影响着疲劳寿命与日历寿命,并与飞机每年的飞行小时数(年飞行强度)密切相关。因此,日历寿命与疲劳寿命二者存在着一定的相互制约关系。在不同的年飞行强度及使用环境下,有时首翻、大修及总寿命均由使用年限决定,有时又均由疲劳寿命决定;而有些时候会出现比较复杂的情况,例如首翻取决于使用年限,第二次大修取决于考虑腐蚀影响后的疲劳寿命,而总寿命的终止又可能取决于疲劳寿命;当然还会有其他可能。与此同时,在首翻和大修时对结构的裂纹与腐蚀修理要求不同,也会给后续的使用寿命情况产生一定的影响。考虑到这种情况,先达为准的原则已很难适应明确判断飞机结构首翻、大修及总寿命的要求。为使用户便于对飞机的大修与总寿命进行管理,需要建立综合考虑日历寿命和计及腐蚀影响的疲劳寿命的使用寿命体系,一般称为日历寿命体系。

2 影响飞机结构使用寿命的因素

决定飞机结构寿命的使用条件,主要包含飞机结构在使用中所承受的载荷—时间历程,以及在地面停放和飞行中的环境—时间历程,简称为载荷条件和腐蚀条件。用载荷谱描述的载荷—时间历程是飞机结构疲劳寿命的主要因素,用环境谱描述的环境—时间历程则是决定飞机结构日历寿命的主要因素。环境腐蚀影响飞机结构的疲劳寿命,从而影响结构疲劳关键件所对应的日历寿命;特别是对由于腐蚀可能导致功能失效或无法修复的关键件而言,其日历寿命更是直接取决于腐蚀条件。腐蚀条件对飞机结构寿命的影响如下所述。

2.1 腐蚀条件对飞机结构疲劳寿命的影响

腐蚀条件对飞机结构的疲劳寿命有着不可低估的影响。总体来说,包括两个方面:一是飞机在地面停放时,由于机场自然环境等因素,导致各疲劳关键件及关键部位处于一定的局部腐蚀环境之中,随着地面停放年限的增加,腐蚀的作用使这些构件的疲劳品质不断下降,从而降低疲劳

寿命；二是空中飞行时，由于空中环境与载荷的共同作用而使疲劳损伤加剧，使疲劳寿命下降。

2.2 腐蚀条件对飞机结构日历寿命的影响

首先，腐蚀条件影响飞机结构的疲劳寿命，而疲劳关键件的日历寿命与疲劳寿命及年飞行强度有关，因此，腐蚀条件会使疲劳关键件的日历寿命修理间隔及总寿命相应地降低。其次，对于腐蚀失效关键件，其日历寿命的修理间隔必须保证在关键件所处的环境下结构不会产生造成功能失效的腐蚀，或者由于腐蚀而造成结构无法实施有效的经济修理。因此腐蚀条件是决定这类关键件日历寿命的决定性因素。对军用飞机而言，地面停放时间要远大于空中飞行时间，后者通常不会超过总使用时间的2%~3%，而空中环境通常要弱于地面环境，因此，这类关键件的日历寿命主要取决于地面停放腐蚀。

2.3 腐蚀条件对飞机结构使用寿命的综合影响

由于腐蚀条件同时影响着飞机结构疲劳寿命和日历寿命，因此，疲劳寿命和日历寿命指标存在着一定的制约关系。在飞机寿命期内的使用地域、腐蚀条件和年飞行强度不发生显著变化的情况下，有些情况其使用寿命以疲劳寿命为主，即飞机结构的首翻、大修及总寿命由飞行小时数控制；而另一些情况则以日历寿命为主，即飞机结构的首翻、大修及总寿命由使用年限控制。决定上述不同情况的主要因素就是腐蚀条件年飞行强度。因而，必须弄清腐蚀条件与年飞行强度对飞机结构使用寿命的影响，分别给出疲劳寿命与日历寿命的首翻期、修理间隔与总寿命，以及在给定的腐蚀条件下，在怎样的年飞行强度范围内，使用寿命是以疲劳寿命还是以日历寿命为主要控制指标，或是二者必须综合判断。

3 国内外研究现状

目前大多数军用飞机所给出的使用寿命指标（飞行小时数和日历寿命）都是在实验室条件下确定的，没有充分考虑环境因素，事实上无论是空军的还是海军的飞机，都存在着较为普遍和严重的腐蚀问题。空军多数机型飞机都有不同程度的腐蚀，有的机型飞机腐蚀已经十分严重。某型飞机因多处严重腐蚀而停飞，某型飞机的主要承力件腐蚀也影响了飞行。海军飞机由于环境相对较为恶劣，腐蚀问题更为突出。如某型机最大腐蚀深度达315mm，最大腐蚀面积为 $230 \times 33 \text{mm}^2$ ；2001年3月12日，海军发现了XXX架歼XXX飞机42框下半框腹板腐蚀断裂问题，造成了大面积停飞抢修，严重影响了部队战斗力^[2]。

由于腐蚀的存在，使得地面停放的飞机疲劳寿命性能随着日历时间的延长而下降，而军用飞机的一个最大使用特点是地面停放时间长，一般占整个服役年限的97%~99%，有的甚至更高，这就导致了飞机的实际使用寿命要明显低于预期的设计目标值，促成了使用寿命的两大指标：飞行小时数和日历寿命严重不相符的现状。就目前我国军用飞机使用情况来看，由于平时省着用，飞行强度低，年均飞行小时数一般在50~90之间，在达到设计日历寿命时，所耗掉的疲劳寿命只有40%~60%，造成了巨大的浪费。为尽量发挥军用飞机的使用功效，提升部队的战斗力，必须使飞行小时寿命和日历寿命二者协调一致。这就要求在现有定寿理论、方法和技术基础上，引入飞行强度SUS这个参量，充分考虑在腐蚀环境条件下飞行强度对飞行小时寿命和日历寿命的影响，建立起三者之间的对应关系，从而对飞机使用寿命进行综合评定。

技术发达国家十分注重防腐研究及飞机结构的防腐设计，相对疲劳寿命而言，日历寿命问题

并不突出；另外发达国家军用飞机的飞行强度较高，疲劳寿命与日历寿命指标相匹配，疲劳寿命是控制飞机结构使用寿命的主要指标。因此，很小见到国外有关日历寿命研究方面的文献，相反，有关腐蚀寿命方面的研究却非常多。文献[3-6]对与腐蚀相关的标准和规范制定、加速腐蚀试验研究和腐蚀损伤的分析及评估技术等方面的成果做了相关的报道。

我国军用飞机老龄化比较严重，日历寿命指标是制约其使用寿命的关键因素。近些年来科技工作者在日历寿命的评估方面取得了一系列的成果：文献[7-8]研究了评定日历年限的环境腐蚀当量关系和当量环境谱；周希沅^[9]提出利用不同材料的环境当量折算曲线(COE)和环境试验结果来反映日历寿命；张福泽^[10]提出了基于腐蚀损伤曲线累积假设的有关金属机体腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法；张栋^[11]提出用腐蚀谱做构件腐蚀试验来测定腐蚀速度，再根据构件的腐蚀损伤容限来估算，以确定飞机结构的日历寿命；贺小帆等^[12]进行了疲劳寿命预腐蚀影响系数的通用性研究；董登科^[13]等提出了一种对无环境腐蚀介质影响下的结果进行修正的模型，用于计算有环境介质影响的飞机结构服役日历寿命的方法。

4 飞机结构日历寿命体系评定技术

4.1 日历寿命体系评定的基础

首先，飞机结构日历寿命体系的评定，必须综合考虑受载荷和环境共同作用下结构的疲劳寿命所对应的日历年限，以及由于环境腐蚀造成结构功能失效或无法修复所对应的日历年限。其次，腐蚀源于环境，进行日历寿命体系评定必须提供环境谱，包括地面停放环境谱和空中飞行环境谱。地面停放环境谱不仅需要机场的自然环境，更需要结构关键件与关键部位所处的局部环境。环境谱的提供是日历寿命体系评定的一个基本的前提条件。最后，飞机的年飞行强度是评定地面停放腐蚀对结构疲劳寿命影响的重要因素，也是制约疲劳寿命与日历寿命的相互关系，形成日历寿命体系的重要纽带。因此，作为机群日历寿命体系评定的重要前提条件之一，必须提供该机种飞机的年飞行强度。

4.2 日历寿命体系评定的技术途径

1)在实验室环境下给定的飞机疲劳寿命基础上，引入腐蚀影响系数，将腐蚀环境下的飞行小时数等损伤的当量折算成为实验室环境下的飞行小时数，而以到达实验室环境下的使用寿命作为评定腐蚀环境下使用寿命的准则。

2)将地面停放造成的腐蚀损伤和空中飞行载荷谱造成的疲劳开裂损伤看作为两个相互独立的过程，从而使计算得以简化。地面停放腐蚀影响系数 C 与地面停放年限 T 有关，可用 $C-T$ 曲线描述；而空中腐蚀疲劳影响系数 K 则可依据构件的空中局部环境谱，通过各单一介质下腐蚀疲劳寿命系数 K_i 和该介质在空中环境谱中所占比例 y_i ，按百分比加权组合的方法加以确定。

3)在建立起实验室环境与腐蚀环境下疲劳寿命当量关系的基础上，引入飞行强度参量 SUS ，对飞机的使用寿命进行综合评定，构建飞行强度和飞行小时数、日历寿命三者间的对应关系，使寿命指标协调一致。

4.3 计算模型^[14]

(1)腐蚀条件下等损伤当量折算

以 N 表示飞行小时数，以 T 表示地面停放时间。引入腐蚀影响系数 m ，它综合反映了地面停

放使结构疲劳品质下降和飞行中空中环境腐蚀使疲劳损伤加剧对疲劳寿命的影响。由于构件疲劳品质不同时 m 值会发生变化, 因此, m 是地面停放时间 T 的函数, 应写为 $m(T)$ 。有关 $m(T)$ 的确定方法, 主要有两种^[15]: 一种是用结构关键部位模拟件来严格确定 $m(T)$ 的试验方法; 另一种是用空中环境腐蚀疲劳影响的分离化处理方法。

若飞机在腐蚀环境下时间间隔为 $\Delta T_j = T_j - T_{j-1}$ 内飞行了 ΔN_j 个飞行小时, 则与 ΔN_j 损伤相当的当量实验室环境条件下的飞行小时数为

$$\Delta N_j^* = \frac{\Delta N_j \Delta T_j}{\int_{T_{j-1}}^{T_j} m(T) d(T)} \quad (1)$$

若 ΔT_j 取得较短, 可以认为 ΔT_j 内 $m(T)$ 变化较小, 从偏安全的角度考虑, 可将式(1)简化为,

$$\Delta N_j^* = \frac{\Delta N_j}{m_j} \quad (2)$$

(2) 寿命综合评定

若实验室环境下的疲劳总寿命为 N_0 (飞机出厂时已给出), 第 j 年的年飞行强度为 SUS_j , 则由等损伤当量折算关系可得

$$\frac{SUS_1}{m(T_1)} + \frac{SUS_2}{m(T_2)} + \dots + \frac{SUS_k}{m(T_k)} = N_0 \quad (3)$$

即

$$\sum_{i=1}^k \frac{SUS_j}{m(T_j)} = N_0 \quad (4)$$

在飞行强度为定值 SUS 的情况下, 式(4)可进一步简化为

$$\sum_{i=1}^k \frac{1}{m(T_j)} = \frac{N_0}{SUS} \quad (5)$$

记 $f(T_j) = \sum_{i=1}^k \frac{1}{m(T_j)}$, 在机场环境一定的情况下, $f(T_j)$ 是一个只与时间 T 有关的函数, 因此

可以记为 $f(T_j)$, 由(5)式可得

$$f(T_j) \cdot SUS = N_0 \quad (6)$$

此即为飞行强度、日历寿命和实验室环境下飞行小时数三者间的函数关系式, 由此式可以对腐蚀条件下飞机结构的使用寿命进行综合评定, 使寿命指标协调一致。

5 亟待解决的问题

1) 建立材料-环境-时间与损伤度数据库。包括实验室环境和腐蚀环境下的试验数据, 以及服役条件下结构的腐蚀缺陷群的分布特征及其随时间演化的规律, 这对日历寿命研究是至关重要的;

2) 弄清飞行强度对服役寿命影响的内在规律, 建立飞行强度-服役区域定寿法。文献[10]提出了区域定寿法, 该方法虽然能解决目前飞机定寿一刀切的问题, 但即使是同一架飞机在同一区域服役, 由于飞行强度的不同, 其腐蚀损伤程度也不同, 因此其日历寿命也会有较大差别。所以在文献[10]的基础上, 建议采用飞行强度-服役区域定寿法更为合适;

- 3) 开展腐蚀条件下日历寿命分析的新方法研究, 以便科学合理地确定使用寿命;
- 4) 载荷/环境谱的编制方法的研究以及载荷/环境谱作用下裂纹形成和扩展的定量评估技术与结构细节设计技术。
- 5) 飞机结构腐蚀损伤检测技术的创新与应用。目前国内还很少有利用现有的无损检测手段检测飞机结构腐蚀损伤, 更没有外场可直接使用的腐蚀损伤检测设备, 这不利于尽早发现飞机结构腐蚀损伤的部位及缺陷尺寸大小、形状, 从而提高飞机结构使用寿命评定的准确性。

参考文献

- [1] 刘文斑, 李玉海, 等. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2004: 1-8.
- [2] 陈跃良, 段成美, 吕国志. 军用飞机日历寿命预测技术研究现状及关键技术问题[J]. 中国工程科学, 2002, 4(4): 69-74.
- [3] Simpson D L, Brooks C L. Tailoring the structural integrity process to meet the challenges of aging aircraft[J]. International Journal of Fatigue, 1999, (21): s1-s14.
- [4] Leifer J, Mickalonis J I. Prediction of aluminum pitting in natural waters via artificial neural network analysis[J]. Corrosion, 2000, 56(6): 563-571.
- [5] Hong H P. Application of the stochastic process to pitting corrosion [J]. Corrosion, 1999, 55(1): 10-16.
- [6] Rokhlin S I, Kin J Y, Nagy H, et al. Effect of pitting corrosion on fatigue crack initiation and fatigue life [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1999, 62(3): 425-444.
- [7] 陈群志, 李喜明, 周希沅, 等. 飞机结构典型环境腐蚀当量关系研究[J]. 航空学报, 1998, 19(4): 414-418.
- [8] 陈跃良, 段成美, 金平. 飞机结构局部环境加速腐蚀当量谱[J]. 南京航空航天大学学报, 2000, 21(3): 338-341.
- [9] 周希沅. 飞机结构的当量环境谱与加速试验谱[J]. 航空学报, 1996, 17(5): 613-616.
- [10] 张福泽. 金属机件腐蚀损伤日历寿命的计算模型和确定方法[J]. 航空学报, 1998, 20(1): 30-37.
- [11] 张栋. 飞机结构件在当量环境谱下加速腐蚀试验和日历寿命计算方法[J]. 航空学报, 2000, 21(3): 196-201.
- [12] 贺小帆, 刘文斑, 蒋冬滨. 疲劳寿命预腐蚀影响系数的通用性研究[J]. 机械强度, 2004, 26(1): 101-104.
- [13] 董登科, 王俊扬, 薛景川. 考虑环境腐蚀试验和日历使用寿命修正方法[J]. 结构强度研究, 1999, 18(2): 45-50.
- [14] 杨茂胜, 陈跃良, 郁大照. 考虑飞行强度影响的飞机使用寿命综合评定方法 [J]. 海军航空工程学报, 2007, 22(2).
- [15] 刘文斑, 李玉海等. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:航空工业出版社, 2004: 122-123.