

一种飞机结构日历寿命延寿方法

刘文琰 王忠波

(北京航空航天大学 航空科学与工程学院, 北京 100083)

摘 要: 针对若干现役飞机年飞行小时数较低的情况, 提出了一种充分发挥其疲劳寿命潜力的日历寿命延寿方法. 通过对达到日历总寿命的结构损伤状况分析, 以一般环境下疲劳定寿结论和日历寿命指标为前提, 以考虑腐蚀环境的寿命评定技术为基础, 依据飞机的飞行和修理记录, 确定结构的疲劳裕度和继续使用年限, 从而给出各种典型使用情况下的日历延寿结论. 该方法为老龄和现役飞机达到日历总寿命后继续安全有效地服役提供了明确可行的技术途径.

关 键 词: 使用寿命; 疲劳; 腐蚀; 延寿; 日历寿命

中图分类号: V 215.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-5965(2005)06-0642-05

Approach of calendar life extension for aircraft structures

Liu Wenting Wang Zhongbo

(School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: To extend service life of existing aircrafts approaching the end of their original life at the expiration of calendar life while fatigue life is far from running out due to low operation, a calendar life extension approach was proposed based on evaluating technique for life system of aircraft structures under corrosive condition. Methods of identifying candidates for life extension were discussed. Accumulated damage caused by fatigue and corrosion was analyzed to separate the candidates into different classes. On the basis of fatigue life evaluated in general environment (at room temperature and in laboratory air) and expected calendar repair intervals, the remaining fatigue life that considering the effects of corrosion and continued service years were calculated from loading and repair histories using fatigue life evaluation approach in corrosive environment, from which service life was reliably extended for typical operation. Life extension results along with repair schemes for a wing of a fighter shows effectiveness of the approach.

Key words: service life; fatigue; corrosion; life extension; calendar life

使用寿命是飞机的重要性能指标, 结构作为飞机设备的载体, 其使用寿命是决定飞机使用寿命的基础. 近年来随着新型飞机的设计、制造和采购费用的急剧增加, 老龄飞机及现役飞机结构的延寿问题越来越引起工程界的关注^[1,2].

飞机结构的使用寿命指标包括用飞行小时数(或起落数)表示的疲劳寿命和用日历(使用)年限表示的日历寿命, 两者均包含首翻期、修理间隔与总寿命, 并以先达到为准的原则控制飞机结构的

首翻、大修和总寿命的终结. 因此, 飞机结构的延寿也包括着疲劳寿命延寿和日历寿命延寿. 然而, 在飞机的使用载荷/环境不同, 特别是每年飞行强度(飞行小时数)不同时, 在某些条件下结构的寿命体系以疲劳寿命为主, 而在另外一些条件下则以日历寿命为主^[3]. 当前, 我国多数机种由于年飞行强度较低, 仅有 50 ~ 90 飞行小时, 而日历寿命要求较长, 接近 30 年, 使得日历寿命与疲劳寿命严重不匹配, 日历寿命成为控制飞机结构使用寿

命的主要指标.对于这些飞机,在达到其日历总寿命时,可能仅消耗疲劳寿命的40%~60%.同时,一大批飞机的服役年限已达到或接近日历寿命设计指标,其实际飞行小时和起落次数也都低于相应的疲劳寿命指标^[4].在这种情况下,充分发挥疲劳寿命潜力而延长日历寿命就成为一个迫切需要解决的工程实际问题.它对提高部队战斗力、降低军事费用有着重要的意义.

本文在腐蚀条件下飞机结构疲劳寿命和日历寿命分析与评定技术发展与应用^[3-6]的基础上,发展了一种与上述需求相适应的日历延寿技术.

1 达到日历寿命指标结构状况分析

对于以日历寿命为控制指标的飞机结构,当其达到日历总寿命时,由于使用和修理的不同将处于不同的损伤状态.经过较全面的腐蚀和疲劳损伤检查并在对飞机的飞行履历记录和修理记录初步分析的基础上,可以确定结构能否实现日历延寿和日历延寿的大致范围(以下日历延寿简称为延寿).飞机结构的总体损伤状况取决于各个关键件的损伤状况,按关键件的种类主要分为疲劳关键件(部位)的损伤分析和腐蚀失效关键件(部位)的损伤分析.对于腐蚀关键件来说,其腐蚀损伤情况是结构能否进行延寿的基本前提,而对疲劳关键件来说,疲劳损伤的程度和修理次数决定了可能的延寿范围.

达到日历总寿命时,飞机结构存在的腐蚀状况大致可分为如下3种情况(分析过程如图1所示):

1) 飞机结构发生了大范围 and 严重的腐蚀,使

得大多数腐蚀关键件的使用功能丧失或修理是不经济的,其中部分关键件是无法修理的,而且若采用更换关键件的方法不但费用难以承受,工程上也难以实现;

2) 飞机结构的腐蚀范围较大也较严重,存在个别腐蚀关键件的使用功能丧失或修理是不经济的,但可以更换,其他部件和部位则可予以经济修理;

3) 飞机结构的腐蚀情况相对上面2种情况都轻的多,不但局限于一定范围内,而且可全部进行经济修理.

对于第1种情况,毫无疑问必然要确定飞机寿命的终止.对于第2种情况,是否进行关键件的更换将不仅仅是一个技术问题,还涉及经费、战备需要、管理等各个方面的综合考虑.由于腐蚀关键件的日历寿命评定通常只进行能否达到预定的日历寿命指标的检验^[3],因此在合理的日历保障体系下,前面2种情况很少发生,工程中常常遇到的是第3种情况,即腐蚀关键部位在达到日历总寿命时通常能够予以经济修理而继续使用一或两个日历修理间隔,但需指出,由于腐蚀修理间隔时间随修理次数的增加会递减,因此腐蚀关键件的修理也是有一定限度的.

与腐蚀关键件能进行多次修理并在每次大修时都予以实施不同的是,对于战斗机结构而言,疲劳关键件允许修理的次数通常为一次,一般不超过两次,而且只在飞行小时数达到疲劳修理指标时或虽未达到但不能保证安全使用至下一次进厂修理时才予以实施.例如,对于只修理一次的结构在首翻时通常将只检查而不修理,因此,达到日历总年

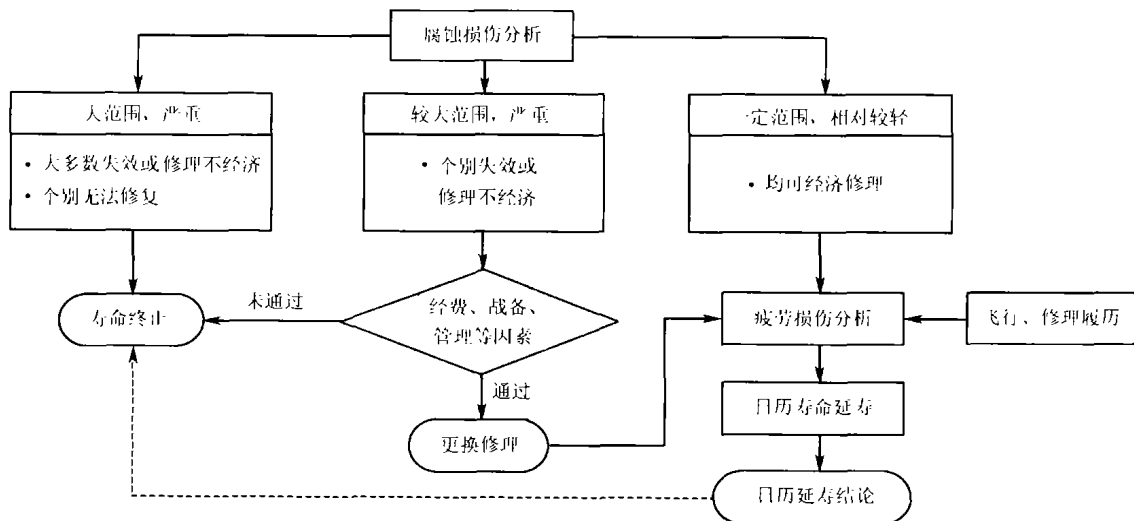


图1 达到日历总寿命时结构状况分析过程

限时由于飞行和修理履历的不同,疲劳关键件可能没有实施过修理,或是实施过一次修理,于是结构的延寿范围相应的分为:

1) 年飞行强度(飞行小时数)很低,以致达到日历总寿命时疲劳关键部位只经过检查而未进行过疲劳修理,无疑此时结构具有较大的延寿潜力,即结构可供延寿考虑的疲劳寿命包括修理前疲劳寿命减去实际飞行小时数和修理后至总寿命的年飞行小时数;

2) 年飞行强度较上一种情况稍大,达到日历总寿命时疲劳关键部位在此前的进厂大修中实施过一次修理,此时,可供延寿考虑的疲劳寿命仅为疲劳寿命指标中修理后至总寿命的飞行小时数减去上次修理后的实际飞行小时数。

2 延寿技术途径

2.1 前提条件

1) 飞机使用环境为弱腐蚀环境,地面停放腐蚀与空中腐蚀疲劳弱相关,前者的影响占主导地位,后者的影响相对很小,空中飞行时间在总时间中的比例很小,采用以地面停放时间为主的统一的时间坐标;

2) 有一般环境下的疲劳寿命评定结论,用修理间隔 N_{ci}^* ($i = 1, \dots, n$) 表示,其中 $i = 1$ 表示首翻期, $i = n$ 表示最后一次修理至总寿命的间隔;

3) 有原定和延寿预期的日历寿命修理间隔 T_{ci} ($i = 1, \dots, n, n+1, \dots, n+l$), l 是延寿预期的修理间隔总数;

4) 每架飞机的飞行训练科目比例均按《飞行大纲》进行,即飞机结构的疲劳载荷谱是相同的;

5) 日历寿命指标主要由腐蚀关键件确定,在合理的日历寿命保障体系下,腐蚀关键件在达到日历总寿命时能够通过经济修理而继续使用 1~2 个日历修理间隔。

2.2 技术途径

1) 日历延寿主要针对疲劳寿命指标,由一般环境下的疲劳定寿结论和日历寿命指标,根据飞行和修理情况的不同区分不同的延寿范围;

2) 按损伤相当的原则,由考虑腐蚀环境的疲劳寿命评定方法^[5],通过引入腐蚀影响系数 $m(T)$,将腐蚀条件下的年飞行小时数 ΔN_j 等损伤地折算为一般环境下的年飞行小时数 ΔN_j^* ,从而计算达到日历总寿命时一般环境下疲劳寿命指标的寿命裕度;

3) 确定腐蚀关键部位在日历总寿命经过经济修理后的日历修理间隔,通常可采用加速腐蚀试验的方法^[3];

4) 综合考虑腐蚀条件下疲劳裕度、疲劳修理情况和延长后的日历修理间隔,以先达到为准的原则确定关键部位的延寿结论;

5) 综合飞机各关键部位的延寿结论,给出整机的延寿结论。

3 延寿方法与结论

3.1 延寿方法

以疲劳关键件允许修理一次的结构为例,对允许修理两次的情况可参照本节方法做更为细致的分析。

1) 对于达到日历总寿命而未进行过疲劳修理的结构,其疲劳裕度为

$$N_R^* = \sum_{i=1}^2 N_{ci}^* - \sum_{j=1}^{T_1} \Delta N_j^* \quad (1)$$

其中 $T_1 = \sum_{i=1}^3 T_{ci}$ 为日历总寿命。

飞机不经疲劳修理而能够继续飞行的年限 T_R 为由下式确定的最大整数

$$\sum_{j=1}^{T_R} \Delta N_j^* \leq N_R^* \quad (2)$$

其中

$$\Delta N_j^* = \Delta N / m(T_j) \quad (3)$$

式中 ΔN 是预期的年平均飞行强度,可由该型机的最后几年的使用情况外推或直接由使用方提出。

继续飞行年限 T_R 并不是最后的延寿结果,如果 T_R 的值较低,如只有 2~3 年,那么在腐蚀修理后很快又要进行疲劳修理,这显然在工程上是很不经济的,因此引入如下准则:

$$T_R \geq T_{th} \quad (4)$$

式中 T_{th} 为由使用方确定的日历修理年限门槛值,通常应不低于 4 年。若式(4)成立,则在达到日历总寿命时安排一次飞机的进厂大修,但只进行腐蚀关键件的修理,飞机大修后寿命指标体系变为疲劳裕度和疲劳修理间隔 N_R^* , N_{cs}^* , 日历修理间隔 T_{cs} , T_{cs} 。若式(4)不成立,那么应在进厂大修后同时修理腐蚀关键件和疲劳关键件,相应地修理后的寿命体系为疲劳修理间隔 N_{cs}^* 和日历修理间隔 T_{cs} 。

2) 对于在日历总年限前进行过一次疲劳修

理的结构,其疲劳裕度为

$$N_R^* = N_{c3}^* - \sum_{j=1}^{T_{c3}} \Delta N_j^* \quad (5)$$

如果由该裕度确定的继续飞行年限 T_R 能够满足式(4),则飞机在日历总年限时应进行一次进厂修理,实施腐蚀修理,修理后的寿命体系为疲劳裕度 N_R^* 和日历修理间隔 T_{c4} ;若不能满足式(4),原则上应确定飞机结构的寿命终止。

3.2 延寿结论

针对飞行、修理情况和预期的腐蚀条件下飞行强度的不同典型组合,允许修理一次结构的延寿结论为:

1) 对于达到日历总寿命而未进行过疲劳修理的结构

① 当飞行小时数相当低而且预期的年飞行强度 ΔN 也很低,以致继续飞行年限 $T_R > T_{c4} + 1$,那么在日历总年限时只进行腐蚀关键件的修理.修理后若以每年 ΔN 飞行小时飞行,则日历修理间隔 T_{c4} 是使用寿命的控制指标,即 T_{c4} 年后需再次进厂大修,但要在腐蚀修理的同时实施疲劳关键件的修理.飞机通过增加这两次修理,可以将日历总寿命提高 $(T_{c4} + T_{c5})$ 年.为充分利用结构的疲劳寿命,在日历修理间隔 T_{c4} 可将年飞行强度提高为 N_R^* 和 T_{c4} 确定的年飞行强度界限值 $J^{[3]}$.

② 当飞机的飞行小时数很低且预期的年飞行强度 ΔN 使继续飞行年限满足 $T_{c4} - 1 \leq T_R \leq T_{c4} + 1$,认为疲劳裕度 N_R^* 和日历修理间隔 T_{c4} 在年飞行强度为 ΔN 时是匹配的.于是在日历总年限时安排飞机的腐蚀修理,修理后若每年以 ΔN 飞行小时飞行,则经过 $\min(T_R, T_{c4})$ 年后飞机应进行疲劳和腐蚀的全面修理.再次修理后的寿命指标体系为疲劳修理间隔 N_{c3}^* 飞行小时和日历修理间隔 T_{c5} 年.通过两次修理亦可将日历总寿命提高 $[T_{c4}(\approx T_R) + T_{c5}]$ 年.

③ 飞行小时数较低且在预期的年飞行强度 ΔN 下继续飞行年限满足 $T_{th} \leq T_R < T_{c4} - 1$,仍需要在日历总年限时安排飞机的腐蚀修理.修理后若每年以 ΔN 飞行小时飞行,则使用寿命的控制指标为疲劳裕度 N_R^* ,经过 T_R 年即需要进行飞机的疲劳和腐蚀修理.通过两次修理可使日历总寿命提高 $(T_R + T_{c5})$ 年.

④ 若继续飞行年限 $T_R < T_{th}$,那么在日历总年限时需要安排腐蚀和疲劳的全面修理.通过一次修理一般可使日历总寿命提高 T_{c4} 年.同时计算

T_{c4} 年对应的飞行强度界限值 J ,以指导飞机的使用.

2) 对于达到日历总寿命经过一次修理的结构

① 若 $T_R > T_{c4} + 1$,则在日历总年限只进行腐蚀修理.修理后以每年 ΔN 飞行小时飞行 T_{c4} 年后应确认结构的寿命终止,即将日历总寿命延长 T_{c4} 年.为充分利用结构的疲劳寿命,可将 ΔN 提高为由 N_R^* 和 T_{c4} 确定的飞行强度界限值 J .

② 若 $T_{c4} - 1 \leq T_R \leq T_{c4} + 1$,则 N_R^* 和 T_{c4} 在年飞行强度为 ΔN 时相匹配.日历总年限腐蚀修理后若每年以 ΔN 飞行小时飞行,则经过 $\min(T_R, T_{c4})$ 年后应确认飞机结构的寿命终止,即将日历总寿命延长 $T_{c4}(\approx T_R)$ 年.

③ 若 $T_{th} \leq T_R < T_{c4} - 1$,在日历总年限腐蚀修理后若每年以 ΔN 飞行小时飞行,则 T_R 年后由疲劳寿命指标确定结构寿命的终止,即日历总寿命只能延长 T_R 年.

④ 若 $T_R < T_{th}$,原则上应在日历总年限时确定飞机结构的寿命终止.

4 应用实例

某系列飞机机翼采用梁式结构,已给出一般环境下的疲劳定寿结论为:首翻期 1 200 飞行小时,对结构进行检查,但不修理;首翻后大修间隔 1 000 飞行小时;总寿命 3 000 飞行小时.日历寿命指标为:10 年首翻;首翻后 9 年大修,总寿命 28 年.机翼主梁根部螺栓孔和副梁接头下耳片耳孔为腐蚀环境下的疲劳关键危险部位.由试验确定了结构的 $m(T)$ 分别为

$$\text{主梁 } m(T) = 0.962(1 - 0.0351T^{0.6695})$$

$$\text{副梁 } m(T) = 0.982(1 - 0.02796T^{0.7831})$$

某架该型飞机经过 28 年飞行没有进行过疲劳修理,其飞行记录见表 1.

表 1 28 年飞行记录

$T/\text{年}$	1	2	3	4	5	6	7
$\Delta N_j/\text{飞行小时}$	50	45	55	50	55	50	45
$T/\text{年}$	8	9	10	11	12	13	14
$\Delta N_j/\text{飞行小时}$	50	45	45	45	45	50	55
$T/\text{年}$	15	16	17	18	19	20	21
$\Delta N_j/\text{飞行小时}$	50	45	45	50	50	50	50
$T/\text{年}$	22	23	24	25	26	27	28
$\Delta N_j/\text{飞行小时}$	45	50	55	45	50	50	50

表 1 中日历延寿年限门槛值 T_{th} 取为 4 年, 预期的年飞行强度为 50 飞行小时, 延长的日历修理间隔为 8 年和 7 年。

日历延寿结论为: 在日历总寿命 28 年进厂大修, 只修理腐蚀关键件; 以每年 50 飞行小时 4 年后再次进厂大修, 同时修理疲劳关键件和腐蚀关键件; 飞机两次大修后日历年限超过 8 年, 日历总寿命延长 11 年以上。

5 结 论

提出了一种日历寿命为控制指标的飞机结构日历寿命延寿方法, 为实现老龄和现役飞机达到日历总寿命后继续安全有效地服役提供了明确可行的技术途径。

参考文献 (References)

- [1] Reinertsen R. Residual life of technical systems; diagnosis, prediction and life extension [J]. Reliability Engineering and System Safety, 1996, 54(1): 23 ~ 34
- [2] Sire R A, Hopkins S W. Analytical modeling for life extension of aging equipment [J]. International Journal of Fatigue, 1997, 19(1): 261 ~ 266
- [3] 李玉海. 腐蚀条件下飞机结构寿命体系评定技术研究[D]. 北京: 北京航空航天大学航空科学与工程学院, 2001
Li Yuhai. A research on evaluating technique for life system of aircraft structures under corrosive condition [D]. Beijing: School of Aeronautic Science and Technology, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001 (in Chinese)
- [4] 陈群志, 刘文琰, 陈志伟, 等. 腐蚀环境下飞机结构日历寿命研究现状与关键技术问题[J]. 中国安全科学学报, 2000, 10(3): 42 ~ 47
Chen Qunzhi, Liu Wenting, Chen Zhiwei, et al. Current status and key techniques of calendar life of aircraft structure under corrosive environment [J]. China Safety Science Journal, 2000, 10(3): 42 ~ 47 (in Chinese)
- [5] 刘文琰, 李玉海, 贾国荣. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命的评定与监控[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(3): 259 ~ 263
Liu Wenting, Li Yuhai, Jia Guorong. Evaluation and supervision of service life for aircraft structures under corrosive condition [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(3): 259 ~ 263 (in Chinese)
- [6] 贺小帆, 刘文琰, 蒋冬滨. 腐蚀条件下飞机结构使用寿命监控[J]. 北京航空航天大学学报, 2003, 29(3): 229 ~ 232
He Xiaofan, Liu Wenting, Jiang Dongbin. Service life supervision for aircraft structures under corrosive environment [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2003, 29(3): 229 ~ 232 (in Chinese)

我校与广州广重企业集团共建信息机械联合研发中心

2005 年 5 月 20 日, 我校与广州广重企业集团联合成立的“广重-北航信息机械联合研发中心”在广州市广重企业集团举行了隆重的揭牌仪式, 副校长费斌军教授、科技处洪杰处长、机械学院刘强院长等出席揭牌仪式。费斌军副校长与广重企业集团许扬先董事长一起为中心揭牌, 并在仪式上发表了讲话。广东省科技厅、广州市科技局、广州市机电资产经营公司等单位领导参加了揭牌仪式。

广重企业集团是华南地区大型机械制造骨干企业。产品涉及石油、化工、食品、环境保护、交通等领域的重型机械和轻工机械, 在设计、制造和营销方面居于国内先进水平, 在国内制造业居于重要位置。

联合研发中心的成立, 将在信息机械、先进机械加工设备以及先进焊接工艺技术装备的研究、技术攻关、产品研发、成果转化方面起到积极的推动作用, 对广东省机械装备科研成果的工程应用转化起到重要的支撑作用。同时, 也将对提高北航科研人员的工程实践能力起到重要的促进作用。

在广州期间, 费斌军副校长一行还同广东省、广州市领导进行了科技合作会谈, 达成进一步开展校地合作的意向。