

doi: 10.7690/bgzd.2016.07.004

军用飞机寿命指标使用及控制分析

李 连¹, 刘 清^{1,2}, 苏 涛¹, 王志远²

(1. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 2. 中国人民解放军 91055 部队, 浙江 台州 318050)

摘要: 针对目前航空兵部队在军用飞机使用控制中普遍存在根据经验选用寿命指标的问题, 对其寿命指标使用及控制进行分析。从 4 个常用寿命指标对飞机使用的可靠性影响进行详细分析, 给出各自的使用时机。同时, 为提高军用飞机使用可靠性和充分发挥其寿命潜力, 从控制角度出发, 给出使各寿命指标协调一致的控制方案。结果表明: 该分析实用、可行, 可为相关研究提供一定的参考。

关键词: 军用飞机; 寿命指标; 使用分析; 可控性; 可靠性

中图分类号: TJ85 **文献标志码:** A

The Usage and Control Analyzed of Military Aircraft Life Indicator

Li Lian¹, Liu Qing^{1,2}, Su Tao¹, Wang Zhiyuan²

(1. Naval Aeronautical Engineering Institute, Yantai 264001, China; 2. No. 91055 Unit of PLA, Taizhou 318050, China)

Abstract: Because the problem that aviation unit has generally chosen life indicator based on the experience in the usage control of military aircraft, the usage and control of life indicator were analyzed. Analyzed the effect of four main life indicators on aircraft operational reliability, and calculated the applied occasion. As while, to improve the operational reliability and fulfill its potential, it proposed corresponding control option. The results showed that the analysis are practical and feasible and can provide certain references to related research.

Keywords: military aircraft; life indicator; usage analysis; controllability; reliability

0 引言

军用飞机寿命指标是航空兵机务保障部队对所属装备进行定检、大修以及退役等维护保障工作的基础。国家军队标准 GJB775.1—1989《军用飞机结构完整性大纲·飞机要求》明确规定, 军用飞机使用寿命包括疲劳寿命和日历寿命 2 类控制指标, 二者同等重要, 以先到者为准^[1]。这 2 类指标中, 常用的主要有飞行时间、飞机起落次数以及飞机日历寿命(年限)3 项指标。但据了解, 航空兵部队在飞机的使用控制上, 并不是同时使用这 3 项指标, 通常情况下, 只使用了其中的飞行时间和飞机日历寿命(年限)2 项指标, 甚至有些部队只使用飞行时间 1 项指标对飞机的使用进行控制。除此之外, 基于单机监控技术的疲劳寿命管理方法还给出了当量飞行时间的疲劳寿命指标。如何对这些寿命指标的使用进行控制, 目前尚未见到有文章详细介绍; 因此, 笔者从提高军用飞机使用可靠性和充分发挥其寿命潜力的角度出发, 对如何使用和控制当前军用飞机常用寿命指标进行详细分析, 并给出相关结论。

1 军用飞机常用寿命指标及其控制方法

1.1 军用飞机常用寿命指标

从军用飞机结构失效模式来看, 主要有载荷造

成的疲劳破坏和环境造成的腐蚀损伤 2 类^[2]。这与 GJB775.1—1989《军用飞机结构完整性大纲·飞机要求》规定的“军用飞机使用寿命主要包括疲劳使用寿命和日历使用寿命两类指标”是一致的。其中:

1) 疲劳寿命指标^[3]。主要反映飞机结构在使用载荷作用下抵抗疲劳破坏的能力。军用飞机使用载荷主要包括外部气流引起的气动载荷和飞机完成机动动作造成的机动载荷, 其中机动载荷是影响歼击机、歼击轰炸机等小型军用飞机结构损伤的主要载荷。目前, 疲劳使用寿命各国一般都是通过全机疲劳寿命试验值除以相应分散系数加以确定, 理论方法相对成熟^[4]。

2) 日历寿命指标。主要反映飞机地面停放中维护活动及腐蚀环境对飞机结构造成的损伤。由于影响飞机结构的腐蚀因素多, 交互作用复杂; 因此, 国内外仍未能建立起一套相对完善的飞机日历定寿理论及方法。这一情况在我国最为严重, 目前部队使用的飞机日历使用寿命一般为科研单位凭经验给定出的“暂定”日历使用寿命, 可靠性有待商榷^[5]。

根据机型和使用环境不同, 还可将上述 2 类指标细分为以下 8 项^[2]:

- ① 飞行时间;
- ② 飞行起落次数;

收稿日期: 2016-03-26; 修回日期: 2016-05-05

作者简介: 李 连(1965—), 男, 山东人, 博士, 教授, 从事装备管理信息与应用研究。

- ③ 使用年限(日历寿命);
- ④ 机场滑行次数;
- ⑤ 机场起飞次数;
- ⑥ 舰上起飞次数;
- ⑦ 着陆(舰)次数;
- ⑧ 当量飞行时间。

其中: ⑤、⑥、⑦主要针对舰载飞机使用, 由于我国航空母舰发展较晚, 目前仅有歼-15 舰载飞机一种, 与众多的陆基飞机相比, 基数很小, 因此, 在寿命指标上可作为个例考虑; ④在军用飞机实际使用中实施次数相对飞行次数可以忽略, 可以不予考虑; ①、②、③为军用飞机使用寿命中最基本、最重要, 也是最常用的 3 大指标; 随着单机寿命监控技术的发展, 特别是在军用小型飞机中①项不能抓住疲劳损伤本质的情况下, ⑧的地位越来越重要。

1.2 军用飞机常用寿命指标控制方法

由于军用飞机设计以可靠性为目标, 而载荷疲劳损伤与环境腐蚀损伤都将对军用飞机结构造成破坏, 致使其使用可靠性降低; 因此, 疲劳使用寿命指标与日历使用寿命指标二者具有同等重要的地位。根据“木桶原理”的“短板效应”, 在军用飞机使用寿命控制上, 其进厂大修(翻修)或退役的依据可表示为:

$$(T'_{FH} - T_{FH})(T'_{TN} - T_{TN})(T'_{CL} - T_{CL}) = 0 \quad (1)$$

式中: T_{FH} 为反映军用飞机疲劳损伤的飞行时间指标; T_{TN} 为反映军用飞机疲劳损伤的飞行起落次数指标; T_{CL} 为反映军用飞机环境腐蚀损伤的日历寿命指标; T'_{FH} 、 T'_{TN} 、 T'_{CL} 分别表示厂家给定飞机首翻期或翻修间隔或退役飞行时间、飞行起落次数和飞机日历寿命数据值。

根据式 (1) 可知: 飞行时间 T_{FH} 、飞机起落次数 T_{TN} 和日历寿命 T_{CL} 3 项指标中任意一个达到给定值时, 都意味着飞机需进厂翻修或退役。从军用飞机使用控制角度看, T_{FH} 、 T_{TN} 2 项指标与军用飞机执行作战、训练任务有关, 对航空兵部队属可控指标; 而 T_{CL} 指标主要取决于飞机防腐设计和服役环境有关, 部队难以对其实施控制, 只能被动使用。同时, 某些具备单机寿命监控技术手段的部队开始采用当量飞行时间指标 T_{DH} 对飞机使用进行控制。

2 军用飞机寿命指标使用分析

2.1 飞行时间指标使用分析

根据《空军飞行条例》规定, 飞行时间是指飞

机从起飞离地开始到降落着陆所经历的时间段, 通常精确到分钟。从这个角度考虑, 该指标主要反映飞机滞空时间的长短。但如果从疲劳损伤的角度考虑, 则会出现以下问题。

根据 Miner^[6]线性累积损伤理论, 飞机结构在等幅载荷 S_p 下经历 n 次循环, 造成的累积疲劳损伤可表示为:

$$D = \frac{n}{N_p} \quad (2)$$

式中: N_p 为飞机结构在载荷水平 S_p 发生破坏所需循环次数, 且 $S_p^m N_p = \text{Const}$ 。而在变幅载荷 S_i 下经历 n 次循环, 造成的累积疲劳损伤可表示为

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i} \quad (3)$$

式中: N_i 为飞机结构在载荷水平 S_i 发生破坏所需循环次数, 同样地 $S_i^m N_i = \text{Const}$ 。

此时, 假设飞行时间 T_{FH} 与经历的载荷循环次数 n 成正比关系:

$$T_{FH} \propto n, \quad (4)$$

则有以下结论:

1) 若 n 次循环载荷幅值变化不大, 此时可以近似地将这些载荷看作等幅载荷, 即造成的疲劳损伤可近似用式 (2) 计算。此时, 飞机结构疲劳损伤 D 与载荷循环次数 n 成正比关系:

$$D \propto n \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可知, 此时, 飞机小时数 T_{FH} 与飞机结构疲劳损伤 D 也成正比关系:

$$T_{FH} \propto D, \quad (6)$$

即, 此时飞行时间指标 T_{FH} 可以表征飞机结构的疲劳损伤程度 D 。

2) 若 n 次循环载荷幅值变化较大, 此时飞机结构造成的疲劳损伤只能由式 (2) 计算。此时, 飞机结构疲劳损伤 D 与载荷循环次数 n 将不再成正比关系, 即式 (5) 不再成立。同样, 式 (6) 也将不再成立。即, 此时飞机小时数指标 T_{FH} 不能表征飞机结构的疲劳损伤程度 D 。

引起军用飞机疲劳累积损伤的交变载荷主要由 2 部分构成。一是外部气流引起的阵风载荷, 它是造成轰炸机、运输机等军用大型飞机疲劳损伤的主要来源, 其幅值变化相对较小(如图 1 所示), 因此, 用飞行时间指标 T_{FH} 反映其疲劳寿命相对合理可行; 二是由飞行员操纵飞机完成各种机动动作引起的机

动载荷，它是造成歼击机、歼击轰炸机等小型飞机的疲劳损伤的主要来源，由于载荷变化相对剧烈(如图2所示)，因此飞行时间指标 T_{FH} 将不能很好地反映其疲劳损伤程度。

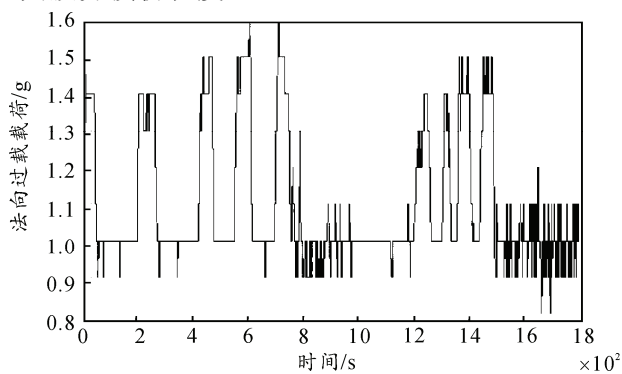


图1 阵风载荷变化

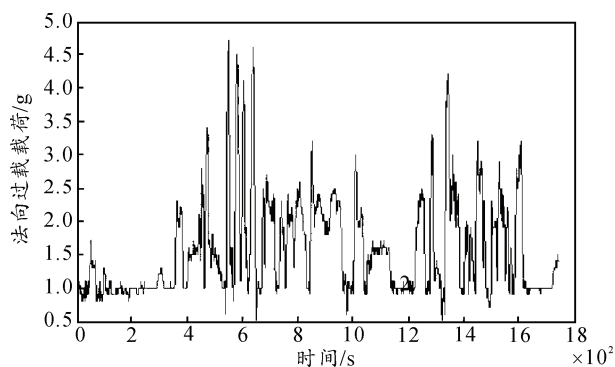


图2 机动载荷变化

由此可以得出结论：飞行时间指标 T_{FH} 作为疲劳使用寿命指标，在一定程度上可以表征飞机结构损伤程度，适用于民航飞机，军用运输机、轰炸机等大型飞机；但对于经常进行大载荷、大机动动作飞机的军用小型飞机，加之不能保证使用条件与基准使用条件一致，因此很难准确表征其结构损伤程度。

2.2 飞机起落次数指标

与飞行时间指标 T_{FH} 一样，飞机起落次数指标 T_{TN} 也是用于反映飞机疲劳损伤程度的一项重要指标，且二者之间有着比较紧密的联系。这在飞机疲劳寿命设计指标上就有体现。从表1可知，歼击机、歼击机轰炸机、强击机平均每个起落的飞行时间大约在60~70 min。

飞行时间指标 T_{FH} 与飞机起落次数指标 T_{TN} 这种关系也可通过实例验证。图3为某航空兵团自改装至今各架飞机的平均架次飞行时间。由图中可看出，24架飞机平均架次时间基本在1.0~1.2 h之间；且由图4还可看出，随着飞行次数的增加，飞行时间逐渐稳定并接近于1.0 h。

表1 美军部分飞机疲劳寿命设计指标^[2]

序号	飞机类型	飞行时间/h	飞机起落次数	平均架次时间/h
1	VF 歼击型	3 000	3 000	1.000
2	VA 歼击轰炸型	3 500	3 000	1.167
3	VA 强击型	4 000	3 500	1.143
4	VT 高级教练机	4 000	7 000	0.571
5	VW 空中警戒型	20 000	15 000	1.333
6	VR 运输型	20 000	15 000	1.333

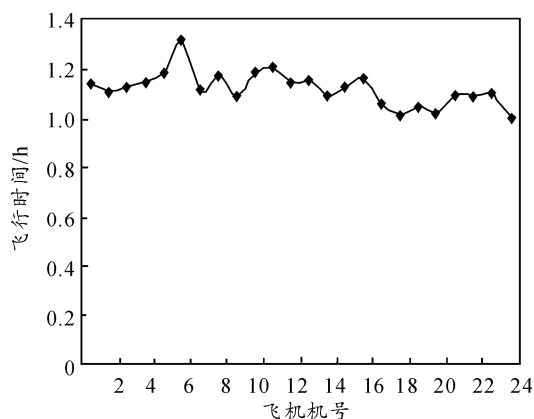


图3 某飞行团24架飞机平均架次时间

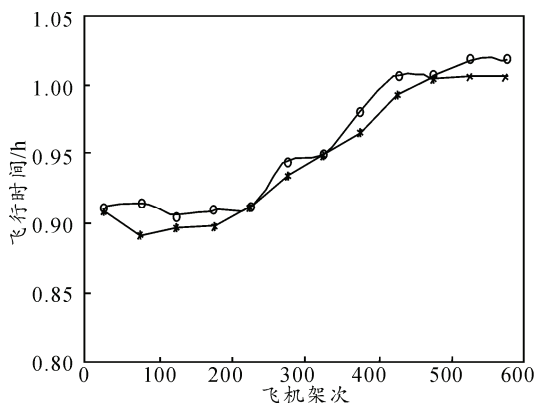


图4 某2架飞机平均架次时间随飞行时间增加变化情况

造成这2项指标存在如此正比关系主要有2方面原因：一是综合考虑军用小型飞机(歼击机、歼击轰炸机、强击机)的作战半径、续航时间、机动性能等多方面因素设计出来的；二是现有飞机训练大纲对飞行训练课目有明确规定，如我军某型飞机训练大纲中对特技课目训练时间规定为50 min，仪表、航行、空战类课目规定训练时间为60 min。

由此可以得出结论：基于飞行时间指标 T_{FH} 与飞机起落次数指标 T_{TN} 存在较为一致的关系，在对飞机疲劳使用寿命进行控制时，只用飞行时间指标 T_{FH} 即可，可不用飞机起落次数指标 T_{TN} 。

2.3 飞机日历寿命指标

由式(1)可以看出：日历寿命指标 T_{CL} 不仅与疲

劳寿命指标 T_{FH} 、 T_{TN} 有着同等重要地位，且是反映飞机受环境腐蚀损伤的唯一指标。但在西方发达国家却很少有关飞机日历寿命问题的研究，究其原因主要有 2 个方面：

1) 技术发达国家十分注重防腐研究和飞机结构的防腐设计，相对疲劳寿命，其日历寿命问题不突出；

2) 技术发达国家飞机训练强度较高，疲劳寿命指标与日历寿命指标相匹配，通常将疲劳寿命指标作为控制飞机结构使用寿命的主要指标。

因此，飞机日历寿命指标 T_{CL} 主要用于我国飞机结构寿命管理，且在防腐技术没有更大进展的情况下，其使用与否主要取决于飞机的飞行强度。图 5 给出了不同飞行强度下日历寿命指标与疲劳寿命指标的关系。

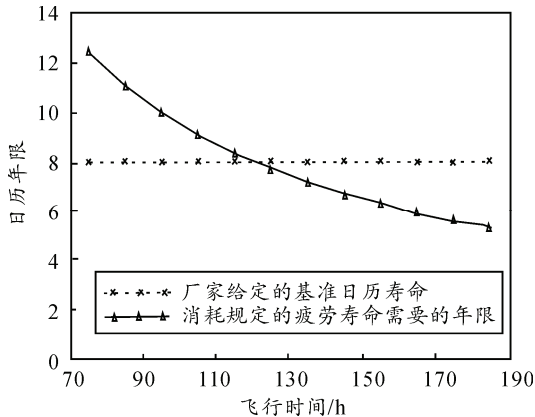


图 5 不同飞行强度下日历寿命与疲劳寿命的关系

由图 5 可以看出：假设某航空兵团某型飞机编制数为 24 架，给定的飞机首翻期日历寿命指标 T_{CL} 为 8 a，飞行时间指标 T_{FH} 为 1 000 h。如果飞机平均年度使用时间少于 125 h/a，此时，飞机的使用控制应主要以日历寿命指标 T_{CL} 为主；否则，如果飞机平均年度使用时间大于 125 h/a，则飞机的使用控制应主要以飞行时间指标 T_{FH} 为主。

结论：根据上述分析可知，飞机日历寿命指标 T_{CL} 选用与否由航空兵部队当前飞机使用强度决定。目前，随着我军航空兵训练强度的不断增大，飞机日历寿命先于疲劳寿命到寿的情况已有所改观，部分一线或三代机部队由于飞行强度大，只需对飞机疲劳寿命指标进行控制即可。

2.4 当量飞行时间指标

由于飞行时间指标 T_{FH} 不能准确反映飞机实际疲劳损伤情况，特别是军用小型飞机这一问题更为

突出；因此，随着飞行参数记录仪(FPR)的发展，目前各国逐渐开始推广单机寿命监控方法对飞机疲劳寿命进行管理。该管理方法使用的疲劳寿命指标为当量飞行时间 T_{DH} ，由于该指标是基于疲劳损伤折算而来的；因此，可以更为准确地反映飞机结构疲劳损伤程度。但在实际使用中，该指标并不能取代飞行时间指标 T_{FH} 作为唯一疲劳使用寿命指标，究其原因，主要有 2 个方面：

1) 飞机的服役疲劳使用寿命，包括首翻期、修理间隔和总寿命，都是厂家给定的、以飞行时间指标 T_{FH} 表示的飞机基准使用寿命，且厂家大多没有给出相应的当量飞行时间指标 T_{DH} 。

2) 由于飞行时间指标 T_{FH} 与飞机起落次数指标 T_{TN} 存在一致性关系；因此，若飞行时间指标 T_{FH} 与当量飞行时间指标 T_{DH} 不一致时，在选用当量飞行时间指标 T_{DH} 的同时，必须选用飞机起落次数指标 T_{TN} 。

因此，当量飞行时间指标 T_{DH} 不能作为唯一疲劳使用寿命指标单独使用。

由此可以得出结论：基于上述分析，在选用当量飞行时间指标 T_{DH} 时，还必须同时选择飞行时间指标 T_{FH} 和飞机起落次数指标 T_{TN} 两者中的一种。考虑到飞行时间指标 T_{FH} 更为常用，一般应选用 T_{FH} 和 T_{DH} 2 个指标同时使用。

3 军用飞机寿命指标控制分析

对于军用飞机寿命指标的使用控制，最为理想的状况就是飞行时间 T_{FH} 、当量飞行时间 T_{DH} 和飞机日历寿命 T_{CL} 3 项指标协调一致，此时只需选择一项最易获取、最为常用的指标进行控制，即可达到提高飞机使用可靠性、充分发挥寿命潜力的目的。

3.1 可控性分析

为了通过航空兵部队对飞机使用的合理安排，使 3 项使用寿命指标能够协调一致，笔者将从指标可控角度对飞行时间 T_{FH} 、当量飞行时间 T_{DH} 和飞机日历寿命 T_{CL} 3 项指标进行分析。

1) 飞机日历寿命指标 T_{CL} 。

军用飞机的日历使用寿命一般由飞机结构的防腐设计和服务使用环境决定。从航空兵团对飞机的使用角度考虑，该指标是不可控的，其对飞机日历使用寿命的控制是被动控制的；因此，需控制飞行时间 T_{FH} 和当量飞行时间 T_{DH} 2 个指标向飞机日历

寿命指标 T_{CL} 保持一致。

2) 飞行时间指标 T_{FH} 。

军用飞机飞行时间指标 T_{FH} 反映飞机执行飞行训练任务的时间, 相对易于获取, 且由于军用飞机执行训练课目的时间基本一致或相差不大; 因此, 可以通过对飞机执行作战、训练任务次数的控制, 使该指标与日历寿命指标保持协调一致。但由于军用小型飞机特殊性, 各飞行训练课目对飞机造成的损伤相差很大, 因此同时控制该指标与当量飞行时间 T_{DH} 比较困难。

3) 当量飞行时间指标 T_{DH} 。

当量飞行时间指标 T_{DH} 的获取离不开飞行参数数据的执行, 获取相对不易。但在飞行训练课目损伤数据可获取的情况下, 通过对各飞行执行飞行训练课目的调整、控制, 可较为容易地实现该指标与飞行时间指标 T_{FH} 指标的协调一致。

因此, 为保持军用飞机, 特别是小型飞机 3 个指标的协调一致, 最为简便、可行的控制方案为: 通过对飞机执行飞行训练课目的控制, 使当量飞行时间指标 T_{DH} 与飞行时间指标 T_{FH} 协调一致; 通过飞机执行训练任务的数量的控制, 使飞行时间指标 T_{FH} 与飞机日历寿命指标 T_{CL} 保持协调一致。

目前, 随着我军航空兵训练强度的不断增大, 飞机日历寿命已不再是影响航空兵团飞机使用控制的主要因素; 因此, 应重点通过飞机在计划使用时间内执行飞行训练课目的控制, 使 T_{FH} 和 T_{DH} 2 个疲劳使用寿命指标协调一致。

3.2 可靠性分析

从军用飞机使用可靠度和寿命潜力发挥 2 个角度来看, 保持 2 项疲劳使用寿命指标协调一致具有重要意义。详细分析如下:

为使飞行时间 T_{FH} 和当量飞行时间 T_{DH} 保持协调一致, 首先定义当量损伤率 K 为

$$K = \frac{T_{DH}}{T_{FH}} \quad (7)$$

设飞行时间 T_{FH} 与当量飞行时间 T_{DH} 2 项指标协调一致时的基准当量损伤率为 K^* , 则当 $K=K^*$, 有下式成立。

$$R(T_{DH})=R(T_{FH}) \quad (8)$$

若 2 个疲劳使用寿命指标不一致, 则会出现以下 2 种情况:

1) 当 $K < K^*$ 或 $K \ll K^*$ 时, 飞机结构实际疲劳累积损伤量 $D(T_{DH})$ 小于或远小于飞行时间指标 T_{FH} 预计的疲劳累积损伤 $D(T_{FH})$, 即

$$R(T_{TD}) > R(T_{FH}) \text{ 或 } R(T_{TD}) \gg R(T_{FH}) \quad (9)$$

此时, 如按照 $T_{FH}=T'_{FH}$ 作为飞机进厂大修或退役的依据进行控制, 将影响飞机剩余寿命潜力的发挥; 如按照 $T_{DH}=T'_{DH}$ 作为飞机进厂大修或退役的依据进行控制, 则飞行起落次数指标上可能会出现 $T_{TN} > T'_{TN}$ 或 $T_{TN} \gg T'_{TN}$ 的情况, 影响飞机使用可靠性。

2) 当 $K > K^*$ 或 $K \gg K^*$ 时, 飞机结构实际疲劳累积损伤量 $D(T_{DH})$ 大于或远大于飞行时间指标 T_{FH} 预计的疲劳累积损伤 $D(T_{FH})$, 即

$$R(T_{TD}) < R(T_{FH}) \text{ 或 } R(T_{TD}) \ll R(T_{FH}) \quad (10)$$

此时, 如按照 $T_{FH}=T'_{FH}$ 作为飞机进厂大修或退役的依据进行控制, 继续使用飞机将变得不再安全; 如按照 $T_{DH}=T'_{DH}$ 作为飞机进厂大修或退役的依据进行控制, 则影响飞行起落次数指标寿命潜力发挥。

4 结束语

笔者通过对军用飞机常用寿命指标的使用控制分析, 得出了各寿命指标使用的时机和方法。同时, 为了提高军用飞机使用可靠性和充分发挥其寿命潜力, 需使控制各项指标使其协调一致, 而最为可行的控制方案为: 通过控制飞机执行任务内容, 使当量飞行时间指标与飞行时间指标协调一致; 通过控制飞机执行任务次数, 使飞行时间指标与飞机日历寿命指标保持一致, 而飞行起落次数指标无需控制, 其自然与飞行时间指标基本保持一致。

参考文献:

- [1] 陈群志, 吴志超. “飞-停” 比对飞机使用寿命消耗的影响研究[J]. 装备环境工程, 2010, 9(1): 1-4.
- [2] 蒋祖国, 田丁栓, 周占廷, 等. 飞机结构载荷/环境谱[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012: 24-25, 48-50.
- [3] 王智, 王磊, 王蔚. 飞机结构疲劳寿命与单机寿命监控管理[J]. 航空维修工程, 2011(4): 24-26.
- [4] 陈跃良, 张勇. 军用飞机结构日历寿命相关问题的思考[J]. 航空工程进展, 2010, 1(4), 311-316.
- [5] 陈群志, 杨蕊琴, 王逾涯, 等. 论飞机寿命研究的重要性及当前面临的问题[C]//第四届世界维修大会论文集. 海口: 第四届世界维修大会, 2008: 1632-1636.
- [6] 杨晓华. 腐蚀累积损伤理论研究与飞机结构日历寿命分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2002: 48-49.