

飞机单机寿命监控中瞬时油量的确定方法研究

张泰峰¹, 杨晓华¹, 柴志起², 郑有区²

(1. 海军航空工程学院 青岛校区, 山东 青岛 266041;

2. 中国人民解放军92492部队, 海南 乐东 572528)

摘要: 实施单机寿命监控能够有效体现飞机寿命的差异性。针对飞参数据中瞬时油量数据缺失的问题, 提出了采用平均油耗率和相似原理来估算飞机瞬时油量的方法, 进而对飞机的损伤情况进行计算。通过对具体飞机大量飞参数据的处理及结果分析, 讨论了油量确定方法的影响因素和适用范围, 为相关飞机实施单机寿命监控提供了技术基础。

关键词: 飞机结构; 寿命监控; 飞参数据; 损伤

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2013.03.003

中图分类号: V216.6; V233.2 **文献标识码:** A

文章编号: 1672-9242(2013)03-0008-04

Study of Instantaneous Fuel Volume Determination Methods in Single Aircraft Fatigue Life Monitoring

ZHANG Tai-feng¹, YANG Xiao-hua¹, CHAI Zhi-qi², ZHENG You-qu²

(1. Qingdao Branch of Navy Aeronautic Engineering Academy, Qingdao 266041, China;

2. Unit 92492 of PLA, Ledong 572528, China)

Abstract: Implementation of single aircraft life monitoring can reflect the difference of aircraft life. To solve the problem of lacking instantaneous fuel volume data among flight data, a method to estimate aircraft instantaneous fuel volume was put forward, which employed average fuel consumption rate and similarity principle, and then aircraft damage was figured out. The influencing factors and the application scope of the fuel volume determination method were discussed through processing large quantity of flight data of concrete aircrafts and analyzing the results. The purpose was to provide supporting technology for monitoring individual aircraft fatigue life of relevant aircrafts.

Key words: aircraft structure; life monitoring; flight data; damage

随着现代电子技术的发展, 飞行参数记录仪(FPR)广泛应用于现代飞机上, 已经能够用较低成本长时间较完整地监测每架飞机的使用情况与载荷^[1], 从而为实施单机寿命监控提供了可能。单机寿命监

控就是在通过疲劳试验和分析确定出飞机寿命指标的同时, 对每架飞机在实际使用过程中的飞行载荷参数进行记录, 根据记录结果实时计算出每架飞机关键危险部位处的累积损伤, 并将计算结果与飞机

收稿日期: 2013-01-27

作者简介: 张泰峰(1976—), 男, 满族, 辽宁大连人, 硕士, 讲师, 主要研究方向为材料的腐蚀与疲劳。

寿命指标的总损伤度进行比较,以此监控飞机寿命的消耗情况^[2-6]。由于各种原因,尽管我国部分飞机安装了飞参记录仪,但是并没有记录瞬时油量这一关键参数。瞬时油量在飞机飞行过程中不断变化,会对飞机瞬时质量有直接的影响,进而会影响单机损伤计算结果。因此,如何充分利用现有数据对这些机型进行有效监控是迫切需要解决的问题。

1 飞机当量过载的计算

在进行飞机疲劳分析和损伤计算时,需要对实测的法向过载进行当量化处理,即折算成相对标准起飞质量下的过载,计算公式见式(1)^[7]。

$$n_{d1}=n_{sc} \cdot m_{ss}/m_{bz} \quad (1)$$

式中: n_{d1} 为飞机的当量过载; n_{sc} 为飞参数据的实测瞬时过载; m_{ss} 为飞机飞行中的瞬时质量; m_{bz} 为飞机的标准起飞质量。 n_{sc} 由飞参数据中法向过载历程经过滤波后得到; m_{bz} 根据不同机型的数据确定,一般取其标准作战质量; m_{ss} 则体现了飞机质量随时间的变化,其计算式见式(2)。

$$m_{ss}=m_1+m_2+m_3 \quad (2)$$

式中: m_1 为空机和飞行员质量; m_2 为剩余燃油质量; m_3 为飞机的外挂质量。

m_1, m_3 可以通过判断非参数数据各个挂点的开关量得到。开关量若为“1”则表明该挂点有外挂,结合该次飞行的训练科目得到其挂弹类型,便可得到该挂点的外挂质量;若某挂点的开关参量为“0”,则该挂点无外挂,即此挂点外挂质量是0,把所有挂点的外挂质量求和即得到本次飞行的 m_3 。 m_2 在飞机

的飞行过程中,随着燃油的消耗,是一个随着时间递减的量。

由于部分机型无法从飞参数据中获取 m_2 的变化历程,因此进行单机损伤计算时需要从飞机飞行中的剩余燃油量进行估算。

2 利用平均油耗率估算剩余油量

发动机的平均油耗率表示发动机在设计的平均工况下单位时间消耗的燃油量。设某型发动机平均油耗率为 ϕ ,起飞前飞机的总加油量为 S ,则飞行过程中 t 时刻的瞬时油量记录记为方法一,见式(3)。

$$m_2(t)=S-\phi \cdot (t-t_0) \quad (3)$$

式中: t_0 为飞行的起始时间。

实际上,发动机的平均油耗会受到产品质量、使用方法和外部条件等多种因素的影响,为了体现出这种差异性,对式(3)进行改进。设飞机一次飞行总飞行时间为 $\Delta t_{\text{总}}$,飞行结束后的剩余油量为 S_z ,并假设飞行过程中剩余燃油量线性递减,则飞行中 t 时刻的瞬时油量记录记为方法二,见式(4)。

$$m_2(t)=S-\frac{(S-S_z)}{\Delta t_{\text{总}}} \cdot (t-t_0) \quad (4)$$

为了验证方法的适用性,选择飞参数据中均包含有瞬时油量参数的A,B,C,D共4型飞机在不同起飞质量下的损伤量进行对比计算,结果见表1。为使结果更贴近真实情况,选择计算时间为2 a。表1中, D_3 为基于飞参实测瞬时油量计算出的损伤值,并将其记为1。 D_1 和 D_2 为分别按方法一和方法二计算出的损伤值与实际损伤值的比值。为了体现起飞质量

表1 4型机不同方法计算出的损伤值

Table 1 The calculated damage results of four aircraft types by different methods

起飞 质量	机型A 损伤值				机型B 损伤值				机型C 损伤值				机型D 损伤值			
	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4	D1	D2	D3	D4
M1	0.981	0.985	1	0.994	0.962	0.969	1	0.995	0.966	1.221	1	0.992	1.203	1.016	1	0.994
M2	0.983	0.988	1	0.994	0.970	0.971	1	0.994	1.134	1.112	1	0.993	1.341	1.066	1	0.992
M3	0.978	0.989	1	0.993	0.972	0.980	1	0.992	0.911	0.984	1	0.993	0.936	1.230	1	0.992
M4	0.994	0.997	1	0.996	0.983	0.989	1	0.996	0.833	0.816	1	0.991	0.968	0.951	1	0.992
M5	1.114	1.071	1	0.992	1.084	1.066	1	0.991	1.217	1.157	1	0.990	1.311	0.942	1	0.991
M6	1.162	1.178	1	0.993	1.137	1.128	1	0.990	1.263	0.996	1	0.993	1.109	0.900	1	0.993
M7	1.220	1.151	1	0.991	1.192	1.163	1	0.991	1.004	0.836	1	0.991	1.271	0.981	1	0.992

的影响,选取了4类飞机的7种起飞质量,并与各飞机的标准起飞质量相比,比值按从小到大的顺序记为 $M_1 \cdots M_7$,且记 $M_4=1$,即 M_4 代表4型机的标准起飞质量。

表1的结果表明,对于A,B两型机而言,当飞机起飞质量低于标准起飞质量时(M_1, M_2, M_3), D_1 值基本上低于实际损伤值 D_3 ;在高于标准起飞质量(M_6, M_7)的情况下, D_1 值则要高于实际损伤值 D_3 。同时用方法二计算出来的结果则普遍接近于真实值 D_3 。对于C型机和D型机而言, D_1 和 D_2 的计算结果普遍与 D_3 相差较大,而且基本上没有规律可言。对飞机最终的损伤值有直接影响的是飞机的载荷历程,这说明了两方面的问题。

1) 由于A,B两型机本身机动性都较差,其载荷历程变化幅度有限。在这种情况下,发动机的油耗率更多会因起飞质量的变化而产生变化,计算结果也证明了采用平均油耗率计算飞机的瞬时油量对飞机的起飞质量很敏感。 D_2 和 D_3 普遍比较接近则说明了对于机动性差的飞机而言,其飞行历程中油量的总体变化趋势可以按线性递减进行估算,但需要正确确定起始油量和剩余油量。表2列出了用方法一、方法二及飞参记录的实际油量计算出飞机损伤的计算时间。可以看出,由于算法过程简单,在保证一定计算精度的前提下,在大批量处理飞参数据时计算效率较高。

表2 不同方法的计算时间

Table 2 The calculation times by different methods

机型	计算时间/s		
	方法一	方法二	用实际油量计算
A	241	253	644
B	207	222	596
C	349	401	692
D	312	396	724

2) C型机和D型机都属于机动性较好的飞机,因此对当量过载产生主要影响的不仅仅是剩余油量,还包括其实际的载荷历程。由于飞机机动性变化较大,其发动机工作状态变化也可能较大,因此式(4)中假设瞬时油量线性递减这一条件有可能是成立的,这说明用平均油耗率计算出的剩余油量对

飞机机动性能可能会相当敏感。

为了进一步研究机动性能对该方法计算结果的影响程度,选取了5型机2a的飞参数据进行计算,其最大限制使用过载 $n_{y_{\max, sy}}$ 分别为8,7,4.5,3.8,2.8,并与实际损伤值之间的误差进行了对比,结果如图1所示。2a的时间长度在一定程度上平衡了由于飞行训练强度水平、飞行科目等所造成的差异性,因此图1的结果定性表明了飞机机动性能越高,飞行中可能的过载变化就越大,从而造成按平均油耗率计算当量损伤结果误差较大。该方法的适用范围是比较有限的,有必要找到一种新方法来解决在飞行参数中没有记录瞬时油量数据时进行单机损伤监控的问题。

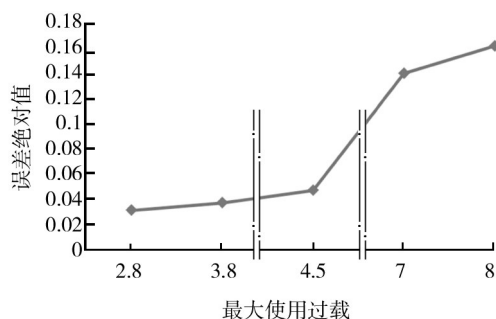


图1 最大使用过载与损伤计算结果误差

Fig. 1 The limit load factor and deviation of damage results

3 利用相似原理估算瞬时燃油消耗率

相似原理建立了发动机在不同工作状态下各参数的换算关系^[8]。使用的基本假设是:

- 1) 发动机中所有部件都在自动模化区工作;
- 2) 不存在与外部介质的热交换,且气体的绝热指数、比热容和气体常数都不随气体温度、湿度及混合气体的成分而变化;
- 3) 在燃烧室内不考虑物理-化学过程的相似;
- 4) 迎面气流的速度场、压力场及温度场等都是相似和稳定的。

上述假设条件在通常情况下都是可以满足的。设某发动机在标准大气条件下用 n_{cor} 转速工作时,其推力为 R_{cor} ,燃油消耗率为 sfc_{cor} ,则在飞行中 t 时刻发动机的燃油消耗率见式(5)。

$$sfc = sfc_{cor} \sqrt{\frac{t_{总0}^*}{288}} \quad (5)$$

式中: $t_{\text{总0}}^*$ 为发动机进口总温,是时间的函数,可根据飞参数据获得其变化过程。飞机 t 时刻的剩余燃油量见式(6)。

$$m_2(t) = S - \int_0^t sfc(t) dt \quad (6)$$

式中: S 为每次飞行前加注的燃油总量。

在确定了A,B,C,D共4型机所使用的发动机 sfc_{cor} 后,结合4型机飞参数据确定 $t_{\text{总0}}^*$ 随时间的变化历程,利用式(6)计算飞机的瞬时剩余油量,从而计算飞机的损伤值,结果列于表1。每个机型损伤值的第4列,用 D_4 表示。

采用上述方法对图1中的5型机进行了计算,其结果误差如图2所示。

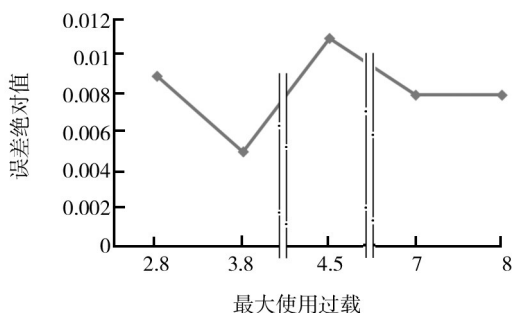


图2 不同油量确定方法的损伤计算结果误差

Fig. 2 The deviation of damage results by different fuel quantity determination methods

由表1的结果可以看出,相比较于 D_1 和 D_2 , D_4 的结果与 D_3 的结果更加吻合,这证明了该方法的可信性。由于飞机的起飞质量与发动机油耗率有着直接关系,而该方法在计算过程中引入了 $t_{\text{总0}}^*$ 这一参数,在一定程度上准确表征了飞行中发动机实时工作状态,因此其估算的发动机瞬时油耗值更加贴近于真实值,该方法对同一飞机不同起飞质量表现出了非常好的适用性。

飞机机动性能与发动机的性能状态有直接关系。对于机动性能较好的飞机而言,由于飞行中发

动机推力变化的幅度可能较大,因此瞬时油耗率的变化范围同样较大,此时采用平均油耗率估算飞机的剩余油量会出现较大偏差。图2的结果说明,该方法计算结果对于不同机动性的飞机而言精度非常稳定,误差率控制在1.5%以内,表现出了非常好的适用性。

4 结语

1) 从提高计算效率的角度来看,对于使用过载在4以下的飞机,可以采用平均油耗率计算的方法,通过确定其起始油量和最终剩余油量,按线性递减的规律进行估算。然而该方法不适用于机动性较高的飞机。

2) 从适用范围来看,采用相似原理估算发动机的瞬时耗油率进而对飞机的瞬时剩余燃油进行折算的方法对于机型不敏感,而且其计算精度较高。通过该方法,可以解决飞参数据中没有记录瞬时油量的飞机单机寿命监控问题。

参考文献:

- [1] 陈志伟,朱青云,薛军,等. 战斗机单机寿命监控中起飞质量的影响[J]. 航空学报,2009,30(4):678—682.
- [2] 朱青云,王智,薛军,等. 单机疲劳损伤影响因素研究[J]. 机械强度,2010,32(4):681—685.
- [3] 张泰峰,孙文胜,杨晓华,等. 飞机结构单机寿命监控的几个关键问题的研究[J]. 装备环境工程,2011,8(6):6—9.
- [4] 许磊,张凤鸣. 缺失飞参数据填补的组合方法研究[J]. 计算机工程与应用,2010,46(21):210—215.
- [5] 曲建岭,唐昌盛,李万泉. 基于飞参数据的监控算法研究[J]. 自动化仪表,2009,30(2):15—17.
- [6] 朱青云,王智,薛军,等. 单机疲劳损伤影响因素研究[J]. 机械强度,2010,32(4):32—36.
- [7] 刘文琰,王智,隋福成,等. 单机寿命监控技术指南[M]. 北京:国防工业出版社,2010.
- [8] 邓明. 航空燃气涡轮发动机原理与构造[M]. 北京:国防工业出版社,2008.