

单机寿命监控技术指南

DANJI SHOUMING JIANKONG JISHUZHINAN

刘文珽 王智 隋福成 等编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

单机寿命监控技术指南

刘文琰 王智 隋福成 等编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书共9章,介绍了单机寿命监控管理的方法与实施技术。书中以当前应用最为广泛、技术相对成熟的基于载荷(应变)的单机寿命监控管理方法为主体,在阐明国外广泛采用的基于关键部位的应力、应变疲劳单机寿命监控技术的同时,结合我国国情提出了针对飞机结构整体的基于当量损伤的单机寿命监控技术,给出了单机监控疲劳分散系数和基于单机寿命管理的单机结构延寿技术方面的研究成果,同时针对现有条件下起落架与相关结构和座舱盖单机监控的工程方法,以及保证结构完好率目标的飞机结构寿命管理技术,介绍了初步研究成果,并概述了作为发展方向的结构健康监测技术的现状。

本书适合飞机设计和使用部门的工程技术人员及管理人员阅读,也可作为高等院校相关专业的师生参考书。

图书在版编目(CIP)数据

单机寿命监控技术指南/刘文琰,王智,隋福成等编
著. —北京:国防工业出版社,2010.4
ISBN 978-7-118-06780-4

I. ①单... II. ①刘... ②王... ③隋... III. ①飞机—寿命—监视控制—指南 IV. ①V215.5-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 042362 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 286 千字

2010 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 38.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店: (010)68428422

发行邮购: (010)68414474

发行传真: (010)68411535

发行业务: (010)68472764

《单机寿命监控技术指南》

编审委员会

主 编 刘文琰

副主编 王 智 隋福成

主 校 王 磊 贺小帆

编 委 (按姓氏笔画排列)

王成波 王佳莹 王勇军 王 智

王 磊 刘小冬 刘文琰 朱青云

李京珊 张 洪 陈 亮 严 钢

周 丽 陆 华 贺小帆 董彦民

隋福成 薛 军

主 审 李 明

副主审 (按姓氏笔画排列)

张立新 罗乖林 黄季墀 曹奇凯

谭申刚

前 言

为确保飞机在整个使用寿命期内的安全,达到长寿命、高可靠性的设计目标,必须实现飞机结构完整性要求。结构完整性的实现贯穿于飞机设计、制造和使用的全过程,而部队管理起着必不可少的重要作用。飞机的寿命可靠性管理是部队管理中最为重要的组成部分,当前,飞机的寿命可靠性管理已经由传统的“机群管理”发展为“单机管理”,单机寿命监控技术则是实现单机寿命可靠性管理的技术基础。基于单机寿命监控的单机寿命管理的要求与方法已明确列入我国 GJB 67. 6A—2008《军用飞机结构强度规范第 6 部分:重复载荷、耐久性和损伤容限》,美国国防部联合使用规范指南 JSSG2006—1998《飞机结构》、美国国防部标准 MIL—STD—1530C(USAF)—2005《飞机结构完整性大纲》和英国 DEF STAN 00 970《飞机设计要求》等国内外规范(标准),已在航空发达国家的飞机研制与使用中贯彻执行,并已在我国得到初步应用,成为我国飞机寿命管理发展的必然趋势。贯彻单机寿命管理不仅可以确保飞机使用安全,而且可以大幅度提高飞机机群的总体寿命水平,对于提高部队战斗力和降低使用成本具有重大意义,军事、经济效益十分显著。

为对我国全面贯彻单机寿命监控与管理提供必要的技术支持,并为单机寿命监控管理技术的发展与应用奠定坚实的基础,在飞机结构强度技术相关专题研究中,组织有关航空院校、飞机设计研究所和空军研究所的专家和技术人员,在消化吸收国外研究与应用成果,总结国内以往相关研究工作基础上,结合我国国情,对单机寿命监控与管理的关键技术进行了较为系统深入的理论与试验研究,取得了重要成果。本书就是在总结上述研究成果的基础上编著的。

本书以当前应用最为广泛、技术相对成熟的基于载荷(应变)的单机寿命监控管理方法为主体,系统阐述了相关方法与实施技术,在阐明国外广泛采用的基于关键部位的应力与应变疲劳单机寿命监控技术的同时,结合我国国情提出了针对飞机结构整体的基于当量损伤的单机寿命监控技术。本书给出了单机监控疲劳分散系数和基于单机寿命管理的单机结构延寿技术的研究成果,同时针对现有条件下起落架与相关结构和座舱盖单机监控的工程方法,以及以保证机队结构完好率为目标的飞机结构寿命管理技术,介绍了初步研究成果。为使读者

对作为发展方向的基于结构健康监测的单机管理思想有一定的了解,本书还概要介绍了飞机结构健康监测技术。应该说,本书较为全面系统地阐述了单机寿命监控管理的技术方法,反映了单机寿命监控管理技术的国际先进水平和国内的最新研究成果。

本书共9章,第1章阐述了飞机寿命可靠性管理思想的发展,单机寿命监控的意义与技术途径,综述了国外相关技术发展与应用情况,并概述了作为单机寿命监控基础与前提条件的飞机结构基准使用寿命评定;第2章介绍了单机使用的飞参数据处理技术;第3章给出了单机结构疲劳分散系数的国外相关研究结论,并结合国内所进行的试验研究给出了选取建议;第4章系统阐述了基于当量损伤的单机寿命监控技术;第5章全面介绍了基于关键部位损伤的单机寿命监控技术;第6章介绍了关于起落架与相关结构及座舱盖单机寿命监控的技术途径与当前条件下监控的工程方法;第7章分两个层次分别介绍了采用单机寿命监控及单机疲劳分散系数实现达到机群基准使用寿命时的疲劳延寿方法和通过损伤容限技术与耐久性经济修理实现达到单机寿命结论后的进一步延寿方法;第8章介绍了通过对飞机使用的控制进行单机寿命管理、通过调整维修计划实施单机寿命管理的方法,以及对应的专检及机载设备匹配措施,并介绍了关于保证机队结构完好率为目标的寿命管理技术的初步研究结果;第9章概述了飞机结构健康监测的研究现状、发展趋势、主要技术和初步应用。

本书可为飞机设计和使用部门的技术人员和管理人员从事单机寿命监控和管理提供重要的技术工具,对促进我国飞机单机寿命管理思想的贯彻和应用以及飞机寿命管理技术水平的提高具有重要的促进作用;对于高等院校相关专业的师生也有重要的参考价值。

在本书编写过程中,空军装备部综合计划部给予了大力支持与热心指导,主审李明院士和各位副主审在百忙中审查了全部文稿,提出了十分宝贵的建议,在此一并表示衷心感谢。

我们清醒地知道,单机寿命监控技术尚在不断发展,其内容的完善,特别是在我国的推广应用还有很长的路要走,加之我们水平所限,本书难免有不足之处,敬请读者批评指正。

编著者

2010年1月

目 录

术语符号	1
第1章 绪论	7
1.1 单机寿命监控的意义与技术途径	7
1.1.1 飞机(结构)的使用寿命	7
1.1.2 飞机(结构)寿命可靠性管理	8
1.1.3 单机寿命监控的意义	11
1.1.4 单机寿命监控的技术途径	12
1.2 飞机结构基准使用寿命评定概述	17
1.2.1 相关概念	17
1.2.2 飞机结构基准使用寿命评定的主要技术途径	18
1.3 国外单机寿命监控技术发展与寿命管理情况综述	20
1.3.1 监控技术的发展	20
1.3.2 美国海军飞机与空军飞机的寿命管理方法	22
1.3.3 加拿大飞机的寿命管理方法	26
1.3.4 英国空军飞机的寿命管理与监控	29
1.3.5 荷兰飞机的寿命管理与监控	31
1.3.6 德国军用飞机的寿命管理与监控	32
1.3.7 其他国家飞机的寿命管理与监控	32
参考文献	33
第2章 飞参数据处理技术	37
2.1 引言	37
2.2 飞参记录系统的构成、分类及发展历程	38
2.2.1 飞参记录系统的构成和分类	38
2.2.2 飞参记录系统发展历程	39

2.3	飞参数据处理方法	40
2.3.1	某型飞机飞参记录系统介绍	41
2.3.2	监控参数的选取	41
2.3.3	监控参数伪数据的去除	42
2.3.4	监控参数采样率的处理	44
2.3.5	飞行时间的计算	47
2.3.6	载荷数据有效峰谷点的获取	49
2.3.7	当量过载与外挂重量	51
2.4	单机飞参数据处理结果	54
	参考文献	55
第3章	单机结构疲劳分散系数研究	57
3.1	引言	57
3.2	概念与定义	57
3.2.1	疲劳分散系数的概念	57
3.2.2	相关规范关于疲劳分散系数的规定	58
3.2.3	机群定寿的疲劳分散系数	58
3.2.4	单机监控的疲劳分散系数	59
3.3	各国关于军用飞机结构疲劳分散系数的规定与分析	59
3.3.1	分散系数的计算公式	59
3.3.2	对数寿命标准差 σ_0 的选取	60
3.3.3	各国规范关于耐久性(疲劳)试验分散系数的规定	60
3.4	载荷历程差异性对应的疲劳分散系数研究	61
3.4.1	某型飞机载荷历程差异性对应的疲劳分散系数研究	61
3.4.2	国外有关载荷历程差异性对应疲劳分散系数的研究 结论	69
3.4.3	载荷差异性对应的疲劳分散系数取值的初步结论	70
3.4.4	载荷差异性对应疲劳分散系数取值的验证	70
3.5	单机结构疲劳分散系数的选取	72
3.5.1	单机监控飞机疲劳分散系数选取技术研究的目的 及意义	72
3.5.2	单机结构疲劳分散系数选取的技术途径	72

3.5.3 对单机结构疲劳分散系数选取的建议	73
3.6 单机寿命分散系数在单机寿命监控中的应用	75
参考文献	75
第4章 基于当量损伤的单机寿命监控技术	77
4.1 引言	77
4.2 技术途径	77
4.3 当量损伤的概念及计算方法	78
4.3.1 当量损伤的定义及一般公式	78
4.3.2 当量损伤的计算方法	79
4.3.3 损伤指数的选取技术	84
4.4 单机当量损伤计算	86
4.4.1 以一次飞行为基本单元的当量损伤计算	86
4.4.2 以单机过载谱为基本单元的当量损伤计算	87
4.5 监控控制参数	88
4.6 基于当量损伤的单机寿命监控技术的适用范围	89
4.6.1 适用条件	89
4.6.2 应变疲劳问题的影响	89
4.7 基于当量损伤的单机寿命监控技术试验验证	93
4.8 示例	94
参考文献	96
第5章 基于关键部位损伤的单机寿命监控技术	97
5.1 引言	97
5.2 技术途径	98
5.3 关键部位单机应力谱	98
5.3.1 由飞参数据确定关键部位单机应力谱	99
5.3.2 由应变数据确定单机关键部位应力谱	114
5.4 单机指定使用区间的疲劳损伤率	116
5.4.1 用于疲劳损伤率计算的疲劳分析方法	116
5.4.2 以基准谱下关键部位寿命结论为依据计算疲劳损伤率	118
5.5 单机已飞历程导致关键部位的疲劳寿命消耗	119

5.6 单机结构关键部位的剩余寿命	120
参考文献	120
第6章 起落架与相关结构及座舱盖的单机寿命监控	122
6.1 起落架与相关结构单机寿命监控	122
6.1.1 引言	122
6.1.2 起落架与相关结构单机寿命监控方法	130
6.1.3 基于重量参数的起落架与相关结构单机寿命监控工程方法	133
6.1.4 起落架单机寿命监控示例	144
6.2 座舱盖单机寿命监控	146
6.2.1 引言	146
6.2.2 座舱盖单机寿命监控方法	153
6.2.3 座舱盖单机寿命监控示例	162
参考文献	163
第7章 基于单机寿命监控与管理的单机结构延寿技术	164
7.1 概述	164
7.1.1 飞机结构疲劳延寿的意义	164
7.1.2 单机寿命监控与管理对结构疲劳延寿的主要作用	164
7.1.3 基于单机寿命监控与管理对结构疲劳延寿的前提条件	165
7.1.4 基于单机寿命监控与管理的飞机结构疲劳延寿的含义与主要内容	165
7.2 达到机群基准使用寿命的单机结构疲劳延寿技术途径	167
7.2.1 以机群基准使用寿命为基础的单机结构疲劳延寿技术途径	167
7.2.2 引入单机分散系数延寿的技术途径	170
7.3 达到单机寿命结论后的进一步延寿	172
7.3.1 前言	172
7.3.2 进一步延寿的前提条件	173
7.3.3 基于损伤容限技术的安全裂纹扩展周期进一步延寿	174
7.3.4 基于经济修理的进一步延寿	175

7.3.5 全机疲劳延寿结论	183
参考文献	183
第8章 单机寿命管理关键技术	185
8.1 引言	185
8.2 单机寿命管理体系的建立	186
8.3 单机寿命管理的目标、控制参数和标准	187
8.3.1 管理目标	187
8.3.2 控制参数及意义说明	187
8.3.3 控制标准	188
8.4 维修计划调整技术	189
8.4.1 实际使用情况偏重时的调整	190
8.4.2 实际使用情况偏轻时的调整	190
8.4.3 实际与基准使用情况大致相当时的调整	191
8.5 单机寿命管理的实施程序	191
8.5.1 日常监控工作	191
8.5.2 定期监控工作	191
8.6 某型飞机单机寿命监控管理实例	192
8.7 单机延长大修间隔与总寿命对应的专检	196
8.7.1 专检的目的与要求	196
8.7.2 专检大纲的制定	197
8.8 单机寿命管理中结构与机载设备的匹配使用	198
8.8.1 机载设备寿命的分类和寿命指标确定原则	198
8.8.2 重新确定现役飞机机载设备寿命指标的一般方法	199
8.8.3 机载设备寿命的管理方法	200
8.8.4 基于机体延寿和单机寿命监控需求的机载设备 延寿方法	201
8.9 以保证机队结构完好率为目标的飞机结构寿命管理技术研究	205
8.9.1 意义与重要性	205
8.9.2 主要内容与技术途径	205
8.9.3 机队装备结构完好率定义与评估准则	206
8.9.4 机队装备结构完好率评估模型	207

8.9.5 管理的原则与方法	210
8.9.6 示例	211
参考文献	214
第9章 飞机结构健康监测技术	215
9.1 结构健康监测的意义与分类	215
9.1.1 结构健康监测的意义	215
9.1.2 结构健康监测的概念与任务	216
9.1.3 结构健康监测的主要技术分类	217
9.2 结构健康监测的国内外研究概况	218
9.2.1 结构健康监测研究现状	218
9.2.2 结构健康监测发展趋势	221
9.3 结构健康监测技术及应用	222
9.3.1 应力—应变法	222
9.3.2 直接监测法	226
9.3.3 间接监测法	231
9.3.4 结构健康监测实例	236
参考文献	245

术 语 符 号

PHM	Prognostics/Health Management, 诊断/健康管理系统
FLE	Fatigue Life Expended, 消耗寿命
ASIP	Aircraft Structural Integrity Program, 飞机结构完整性大纲
FSMP	Force Structural Maintenance Plan, 部队结构维修计划
L/ESS	Load/Environmental Spectra Survey, 载荷/环境谱测量
FLI	Fatigue Life Index, 疲劳寿命指数
FLEI	Fatigue Life Expended Index, 疲劳寿命消耗指数
FLMP	Fatigue Life Management Program, 疲劳寿命管理大纲
SLAP	Structural Life Assessment Program, 结构寿命评定项目
SLMP	Service-Life Management Plan, 使用寿命管理工作
TAA	Technical Airworthiness Authority, 技术适航局
FI	Fatigue Index, 疲劳损伤指数
SUMS	Structural Usage Monitoring System, 结构使用监控系统
FST	飞行训练学校
TWU	部队战术训练
RTFAT	特技表演大队
FMS	Fatigue Monitoring System, 疲劳监控系统
BFM	Basic Fatigue Monitoring, 基本疲劳监控
OLM	Operational Load Measurement, 使用载荷测量
SHM	Structural Health Monitoring, 结构健康监测
DI	Damage Index, 损伤指数
FLR	Flight Load Recorder, 飞行载荷记录器
MSR	机械式应变计
NLR	荷兰国家航空实验室
CSI	Crack Severity Index, 裂纹严重指数

VGH	速度、加速度、高度
IAT	Individual Aircraft Tracking, 单机跟踪
SAT	选择跟踪
TAT	阶段跟踪
FLEI	Fatigue Life Expended Index, 寿命消耗指数
EIFS	Equivalent Initial Flaw Size, 当量初始缺陷尺寸
IFQ	Initial Fatigue Quality, 原始疲劳质量
SSF	Stress Severity Factor, 应力严重系数
DCGA	Determinated Crack Growth Approach, 确定性裂纹扩展方法
g	飞机重心三向过载系数或加速度(文中未特殊说明均指法向过载系数或加速度)
V	速度
H	高度, 外表面对流热交换系数
G	重量
P	压力, 概率, 存活率或可靠度
Δg	法向过载变程
N_{th}	法向过载参数滤波的阈值
N_{50}	中值疲劳寿命
L_f	疲劳分散系数
$(L_f)_i$	载荷分散系数
$(L_f)_d$	结构状态分散系数
γ	置信水平
n	试件数, 机群容量
σ_0	对数寿命标准差
n_z	重心法向过载系数, 起落架侧向过载系数
n_y	重心测向过载系数, 起落架重向过载系数
$\sigma(\lg)$	关键部位在单位过载下的名义应力, MPa
F	净截面积
ΔG_i	第 i 次循环的过载变程
$G_{\max, i}$	第 i 次循环的过载峰值
$G_{\min, i}$	第 i 次循环的过载谷值

R_i	第 i 次循环的循环特征
D	当量损伤
$(G_{\max})_{0i}$	与第 i 循环当量的脉动循环的最大过载
G_{xx}	限制过载
σ_s	屈服极限
$\sigma^*(lg)$	单位过载下的名义应力水平
K_f	疲劳缺口系数
ΔD_k	飞机在服役中第 k 次飞行导致的当量损伤增量
$N_{fd}(t_e)$	飞机服役至任意瞬时 t_e 前经历的总飞行次数
$D(t_e)$	飞机服役至任意瞬时 t_e 前累计的当量损伤增量
D_z	疲劳损伤基准
δ_r	方向舵偏度
ω_x	滚转角速率
ω_y	俯仰角速率
ω_z	偏航角速率
Ma	马赫数
α	攻角
δ_a	副翼偏度
γ	滚转角
θ	俯仰角
$d(\Delta t_e)$	给定使用区间 Δt_e 内导致关键部位的损伤率
$N_{fd}(\Delta t_e)$	给定使用区间 Δt_e 内的总飞行次数
ΔFH_k	给定使用区间 Δt_e 内第 k 次飞行的飞行时间
ΔD_k	给定使用区间 Δt_e 内第 k 次飞行导致关键部位的损伤增量
$d(Q)$	关键部位的季度损伤率
$d(Y)$	关键部位的年度损伤率
$d(T)$	关键部位的平均损伤率
$d(D)$	关键部位的基准损伤率
$FLEI(t_e)$	飞机服役至 t_e 时关键部位的疲劳寿命消耗指数
$D(t_e)$	飞机服役至 t_e 时导致关键部位的总损伤增量
S_f	反映结构关键部位固有差异性的分散系数

$EFH(t_e)$	飞机服役至 t_e 时关键部位的当量飞行小时数
$L_R(t_e)$	飞机服役至 t_e 时关键部位的剩余寿命
F_x, F_y, F_z	作用在起落架轮胎接地点处的载荷
P_x, P_y, P_z	作用在起落架轮轴中心 X, Y, Z 三个方向的载荷
a_c	临界裂纹长度
M_x, M_y, M_z	相对于 X, Y, Z 轴的力矩
M_{sha}	起落架刹车力矩
T_1	$X_1Y_1Z_1$ 与 XYZ 坐标系间的转换矩阵
T_2	$X_2Y_2Z_2$ 与 XYZ 坐标系间的转换矩阵
P_{ij}	停机载荷
G_{qf}	起落架基准谱编谱起飞重量
G_{zl}	起落架基准谱编谱着陆重量
R	飞机转弯半径
W	危险截面的抗弯模量
ζ	基准谱一个起落的基准损伤
ζ'	单机谱一个起落的基准损伤
n_y^{dl}	当量过载
ζ_{qf}	一个起落起飞段损伤
ζ_{zl}	一个起落着陆段损伤
G'_{qf}	实际飞行某个起落的起飞重量
G'_{zl}	实际飞行某个起落的着陆重量
ψ_{qf}	起飞情况单机谱与基准谱的比较损伤
ψ_{zl}	着陆情况单机谱与基准谱的比较损伤
ζ_{zs}	一个飞行起落的真实损伤
N_{GZ}	起落架与相关结构的基准使用寿命
N_{xh}	单机已飞历程座舱盖(或起落架)的消耗寿命
N_{sy}	单机座舱盖(或起落架)的剩余寿命
T	温度
t	时间
λ	热传导系数
c	定压比热

r	比重
δ	材料厚度
h	外表面对流热交换系数
ε_0	热辐射系数
C_0	玻尔兹曼常数
h'	内表面对流热交换系数
T_{NE}	舱内温度
V	飞行速度
P_{ju}	飞机表面局部压力
V_{ju}	飞机表面局部速度
T^*	定性温度
Re^*	相应于定性温度的雷诺数
T_{jb}	绝对壁温度
T_{ju}	飞机表面局部温度
Ma_{ju}	飞机表面局部马赫数
P_∞	自由流压力
$\bar{P}_k$	局部压力系数
T_∞	自由流温度
H	飞行高度
P_{qd}	气动载荷
q	速压
ξ_j	基准谱每飞行小时的当量损伤
S_{ij}	基准谱各级应力
n_{ij}	基准谱一个谱块对应的各级应力循环数
m	座舱盖透明件材料 S-N 曲线指数
N_j	基准谱一个谱块代表的飞行小时数
N_0	基准使用寿命(飞行小时数)
ξ_k	指定飞行科目(k)对应的每飞行小时当量损伤
S_{ik}	第 i 个科目谱的各次应力
n_{ik}	第 i 个科目谱的各级应力循环数
N_k	第 i 个科目谱代表的飞行小时数