

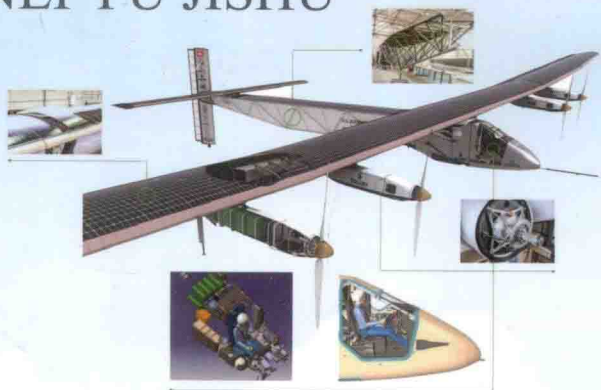


✈ 何宇廷 等著

飞机结构寿命控制

原理与技术

FEIJI JIEGOU SHOUMING KONGZHI
YUANLI YU JISHU



国防工业出版社

National Defense Industry Press

飞机结构寿命控制 原理与技术

何宇廷 等著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

飞机结构的寿命通常用疲劳寿命和日历寿命表示。本书在梳理了飞机结构疲劳定寿方法的基础上,探讨了现阶段飞机结构寿命管理模式中存在的不足,提出了飞机结构寿命控制的概念并界定了其内涵。将飞机结构关键件划分为疲劳关键件、腐蚀关键件和腐蚀疲劳关键件三类典型结构形式,建立了飞机结构疲劳/耐久性安全寿命的延寿方法,提出了飞机结构日历安全寿命的概念及确定方法,阐述了飞机结构寿命包线的基本原理,并从结构剩余寿命预测、结构服役/使用寿命监控、放宽结构服役/使用寿命限制(延寿)、结构服役/使用寿命调控、结构设计/修理材料优选方法等方面介绍了服役飞机结构寿命的控制技术。飞机结构寿命控制技术体系的建立和发展,为在保证飞行安全的前提下进一步释放飞机结构的服役/使用寿命潜力,实现对飞机结构服役/使用寿命的主动控制提供了思路和方法。

本书是一本明确提出和系统阐述飞机结构寿命控制原理与技术的著作,可为航空工程领域的本科生、研究生以及飞行器设计和使用部门的工程技术人员和管理人员提供参考,还可以作为其他从事海洋装备、船舶、火车、桥梁以及地面大型机械设备等设计与使用人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构寿命控制原理与技术/何宇廷等著. —北京:国防工业出版社,2017.2
ISBN 978-7-118-10995-5

I. ①飞… II. ①何… III. ①飞机—结构寿命—研究 IV. ①V221

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 274807 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 28½ 字数 555 千字

2017 年 2 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 118.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

前言

PREFACE

飞机的寿命主要是由飞机结构的寿命决定的。飞机结构安全、稳定、可靠地工作是保证飞行安全的前提,而飞机结构的寿命指标是衡量飞机结构能否经济可靠地服役/使用的重要技术指标。飞机的设计、加工和制造过程赋予了飞机结构基本的寿命品质。一架交付使用的飞机,其结构的基本寿命品质是一定的。然而,飞机是在一定的条件和技术要求下使用的,服役环境的腐蚀程度和飞行科目的载荷强度等对飞机最终的服役/使用寿命周期(服役/使用寿命限制)具有至关重要的影响。通过把握环境、载荷对结构寿命的影响规律,对飞机使用计划进行合理的调整,并合理制定维修计划,一方面可以在保证飞行安全的前提下将飞机结构寿命潜力发挥到最大,另一方面可以根据实际使用需求调控飞机结构的实际服役/使用寿命指标,从而实现飞机结构服役/使用寿命的主动控制。

目前,我国飞机寿命管理面临着四大难题。第一,我国飞机主要采用飞机交付使用时给定的基准疲劳寿命和基准日历寿命指标来控制飞机的首翻期、翻修间隔期与总寿命。但是,基准疲劳寿命和基准日历寿命是与飞机设计时预期的基准使用条件密切相关的,它不能反映各单架飞机在实际服役/使用过程中经历的载荷/环境—时间历程对飞机结构的影响,从而导致了我国现役飞机常常面临着严峻的疲劳寿命与日历寿命不匹配的问题。第二,由于对飞机结构日历寿命研究不够深入,没有可靠的日历寿命预测模型与方法,从而导致了我国飞机剩余日历服役/使用寿命预测困难的局面。第三,现代飞机的造价越来越昂贵,为节省经费,在使用中逐步延长飞机的服役/使用寿命或放宽服役/使用寿命限制是世界各国通用的做法。由于目前在飞机延寿理论与模型方面研究不够深入,使得如何在不影响飞行安全的情况下进一步释放飞机的服役/使用寿命潜力、延长服役/使用寿命限制值缺乏足够的理论支撑。第四,由于我国的单机寿命监控处于起步阶段,所采用的飞机结构累积损伤计算模型等还比较粗略,尤其是载荷、腐蚀环境耦合等作用对飞机结构材料损伤机理和损伤演化规律等方面的研究还不够深入,从而导致飞机结构在服役/使用中的失效问题还时有发生。

作者着眼于解决这些非常紧迫的问题,在国家“973”计划、国家“863”计划、国家自然科学基金、陕西省自然科学基金基础研究计划以及相关重点型号合作项目的支持下,开展了长期的理论研究和试验研究,提出了飞机结构寿命控制的概念并界

定了内涵。将飞机结构关键件划分为疲劳关键件、腐蚀关键件和腐蚀疲劳关键件三类典型结构形式,结合作者的教学科研工作,建立了飞机结构疲劳/耐久性安全寿命的延寿方法——当量延寿法,给出了飞机结构日历安全寿命的概念及确定方法,阐述了飞机结构寿命包线的基本原理;并从结构剩余寿命预测、结构服役使用寿命监控、放宽结构服役使用寿命限制、飞机使用/维修计划调整、结构选材方法等方面介绍了飞机结构寿命控制技术,以在保证飞行安全的前提下进一步释放飞机结构的服役/使用寿命潜力,或者结合使用、维修计划措施的调整实现飞机结构实际服役/使用寿命指标的调整以达到预期的目标,从而实现飞机结构服役/使用寿命管理由传统的“定寿消耗”模式向“主动控制”模式转变。

全书内容共分五篇。第一篇为飞机结构寿命控制概述,主要介绍和评述了飞机结构寿命的相关概念及飞机结构寿命的管理现状,提出了飞机结构寿命控制的基本概念并界定了内涵,介绍了飞机结构疲劳载荷谱与环境谱在寿命控制中的作用和基本编制方法。第二篇是飞机结构疲劳关键件的寿命控制原理与技术,主要介绍基准疲劳/耐久性安全寿命的确定、飞机结构疲劳分散系数、疲劳关键件剩余疲劳寿命预测与服役/使用寿命监控、飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿(放宽服役/使用寿命限制)的当量延寿法以及基于检查修理次数的延寿方法和飞机结构疲劳关键件实际服役/使用寿命调控技术等内容。第三篇是飞机结构腐蚀关键件寿命控制原理与技术,介绍了飞机结构日历安全寿命的概念及确定方法,建立了飞机结构腐蚀关键件服役/使用日历寿命监控方法。第四篇是飞机结构腐蚀疲劳关键件寿命控制原理与技术,阐述了飞机结构寿命包线的基本原理,结合该理论方法分别从结构剩余寿命预测、腐蚀疲劳关键件疲劳寿命与日历寿命双参数寿命监控、放宽飞机结构服役/使用寿命限制等方面介绍了基于寿命包线的飞机结构寿命控制技术,并给出了基于日历安全寿命和寿命包线原理的腐蚀疲劳关键件定寿示例。第五篇是飞机整机结构寿命控制原理与技术,建立了基于结构损伤状态的飞机服役/使用计划调整方法,提出了基于损伤度的结构维修判据,介绍了飞机结构的维修措施,提出了基于材料系列性能指标的飞机结构选材方法,给出了飞机整机与机群寿命控制的基本方法,并初步研究了飞机结构寿命控制软件系统。

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飞机结构寿命研究和管理提供技术支撑,以在保证飞行安全的前提下最大限度地释放飞机结构的寿命潜力,并实现飞机结构实际服役/使用寿命的主动控制。同时,本书也可作为从事海洋装备、船舶、火车、桥梁以及地面大型机械设备等设计与使用人员在从事相关装备寿命工作时的参考书。

在本书的撰写和出版过程中,得到了中国人民解放军总装备部、空军、空军工程大学有关领导和机关的大力支持;张福泽、钟群鹏、陈一坚、唐长红、闫楚良、傅祥炯、张恒喜、黄季墀、薛景川、蒋祖国、刘文珽、姚卫星、傅志高、陈志伟、王智、

陈跃良、谭申刚、曹奇凯、王向明、刘小冬、陶春虎、董登科、舒成辉、王新波、李亚智、刘道新、李曙林、程礼、王卓健和郭基联等进行了有益的讨论并提出了建设性的意见；在全机疲劳试验验证工作中，空军装备部可靠办和空军装备研究院航空所宋海平课题组提供了无私的帮助；杜旭、李昌范、陈涛对本书的文字工作提供了帮助，作者在此一并表示衷心的感谢！

本书由何宇廷主笔，张腾、崔荣洪、高潮和张海威参加了部分章节的撰写工作，最后由何宇廷统稿。由于作者水平所限，加之飞机寿命问题的复杂性，书中难免有错误和不当之处，敬请各位读者提出宝贵意见。

著 者

2015 年 6 月

目录

Contents

第一篇 飞机结构寿命控制概述

第1章 概述	3
1.1 背景概况	3
1.2 与飞机结构寿命相关的基本概念	7
1.3 飞机结构寿命的管理现状	13
1.4 现阶段我国飞机结构寿命工作中存在的不足	19
第2章 飞机结构寿命控制的概念与内涵	26
2.1 飞机结构寿命控制的概念	26
2.2 飞机结构寿命控制的分类与研究范畴	28
2.3 飞机结构服役历程分析与结构关键件划分	30
第3章 飞机结构载荷/环境谱概述	34
3.1 飞机结构载荷/环境谱在结构寿命控制中的地位	34
3.2 飞机结构载荷谱的编制方法简介	35
3.3 飞机结构环境谱和载荷—环境谱编制方法简介	60

第二篇 飞机结构疲劳关键件寿命控制原理与技术

第4章 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命基本原理	69
4.1 飞机结构寿命的表征	69
4.2 飞机结构疲劳寿命与耐久性寿命之间的关系	72
4.3 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命的表征形式	73
4.4 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命的定寿原理与方法	79

第5章 飞机结构疲劳分散系数分析	97
5.1 各国采用的疲劳分散系数及表达式	97
5.2 美国民用飞机结构疲劳分散系数确定方法	99
5.3 同一载荷谱和不同载荷谱下的飞机结构疲劳分散系数	101
5.4 不同材料(结构)的对数疲劳寿命标准差统计分析及疲劳分散系数 ...	108
5.5 飞机结构疲劳分散系数的应用	111
第6章 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命常用延寿方法	113
6.1 领先使用法	114
6.2 相似结构类比法	116
6.3 试验验证法	117
6.4 试验/使用数据统计法	118
6.5 常用延寿方法存在的不足	119
6.6 结构疲劳延寿中容易存在的误解	119
第7章 飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法——当量延寿法	125
7.1 当量延寿法的基本思想	125
7.2 新机结构初始疲劳/耐久性安全寿命——当量服役/使用疲劳寿命的 确定原理	128
7.3 初步放宽飞机结构当量服役/使用疲劳寿命限制	130
7.4 再次放宽飞机结构当量服役/使用疲劳寿命限制	155
7.5 当量延寿法的模拟试验件疲劳试验验证	175
7.6 当量延寿法的全机疲劳试验验证	183
7.7 当量延寿法在飞机结构疲劳安全寿命延寿目标确定中的应用	185
7.8 相关改型机群飞机当量延寿的基本思想	191
第8章 基于检查修理次数的飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法	195
8.1 基于检查修理次数的飞机结构疲劳安全寿命延寿原理	195
8.2 基于检查修理次数的飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法 ...	196
8.3 基于检查修理次数的飞机结构疲劳/耐久性安全寿命延寿方法的 示例分析	201
第9章 飞机结构疲劳关键件实际服役/使用寿命调控技术	204
9.1 飞机结构疲劳关键件剩余疲劳安全寿命预测	204
9.2 飞机结构疲劳关键件服役/使用寿命监控技术途径	212

9.3 飞机结构疲劳关键件实际服役/使用寿命调控方法	218
----------------------------------	-----

第三篇 飞机结构腐蚀关键件寿命控制原理与技术

第10章 飞机结构日历安全寿命定寿原理与方法	225
10.1 飞机结构日历安全寿命的概念	226
10.2 飞机结构防护体系日历安全寿命的确定原理与方法	228
10.3 飞机结构防护体系日历寿命可靠度的确定原理与方法	233
10.4 飞机结构基体日历安全寿命的确定原理与方法	237
10.5 飞机结构日历安全寿命的确定原理与方法	241
第11章 飞机结构腐蚀关键件服役/使用日历寿命控制技术	245
11.1 实际服役状态下飞机结构腐蚀关键件的单机寿命监控技术	245
11.2 飞机结构腐蚀关键件实际日历寿命调控技术	248

第四篇 飞机结构腐蚀疲劳关键件寿命控制原理与技术

第12章 飞机结构安全寿命包线基本原理	251
12.1 飞机结构安全寿命包线的基本概念与内涵	251
12.2 飞机结构安全寿命包线的建立方法	257
12.3 飞机结构安全寿命包线的拓展——飞机结构安全寿命包面	260
第13章 飞机结构腐蚀疲劳关键件服役/使用寿命监控技术	263
13.1 当前我国飞机结构腐蚀疲劳关键件的寿命监控方法	263
13.2 基于飞机结构安全寿命包线的腐蚀疲劳关键件剩余寿命预测方法	264
13.3 腐蚀疲劳关键件疲劳寿命与日历寿命双参数寿命监控(跟踪)技术途径	268
13.4 服役状态下飞机结构应力腐蚀关键件的单机寿命监控方法	272
第14章 飞机结构腐蚀疲劳关键件基准服役/使用寿命延寿技术	275
14.1 以试验及可靠性分析为基础的安全寿命包线扩展	276
14.2 以结构大修为基础的结构安全寿命包线扩展	279
14.3 以试验及可靠性分析为基础的安全寿命包线扩展示例(新母体	

分析)	281
第 15 章 飞机结构腐蚀疲劳关键件实际服役/使用寿命调控技术	287
15.1 服役环境调整策略	288
15.2 飞行任务调整策略	288
15.3 飞行航线调整策略	289
第 16 章 飞机结构腐蚀疲劳关键件服役/使用寿命评定示例	290
16.1 结构研究对象	290
16.2 用于寿命评定的结构模拟件加速试验	291
16.3 结构防护体系日历安全寿命的确定	295
16.4 结构安全寿命包线的建立	298
16.5 考虑大修的結構服役/使用寿命限制	301
16.6 飞机结构安全寿命包线模型的试验测试	308

第五篇 飞机整机结构寿命控制原理与技术

第 17 章 飞机整机结构基准服役/使用寿命确定原理	317
17.1 基于损伤度的飞机结构维修判据	317
17.2 飞机结构大修策略与整机基准服役/使用寿命确定原理	318
第 18 章 飞机整机结构实际服役/使用寿命控制技术	324
18.1 飞机整机结构寿命控制流程	324
18.2 常用飞机结构服役/使用计划调整方法	328
18.3 机群飞机服役/使用计划调整的工具——机群飞机寿命控制图	331
18.4 基于结构状态的飞机服役/使用计划调整示例	333
第 19 章 飞机结构维修措施及修理后服役/使用寿命评定方法	338
19.1 飞机结构维修的意义	338
19.2 飞机结构维修思想的演化	339
19.3 飞机结构的检查维护措施	340
19.4 飞机结构的修理准则	344
19.5 飞机结构修理的一般措施	346
19.6 飞机结构修理后服役/使用寿命评定方法	356

第 20 章 基于系列性能指标的飞机结构材料优选方法	360
20.1 材料系列性能指标的概念与计算方法	360
20.2 材料系列性能指标在飞机结构选材中的应用	362
20.3 应用示例	366
第 21 章 飞机结构寿命控制软件系统简介	370
21.1 基于安全寿命包线的飞机结构剩余寿命预测软件开发	370
21.2 飞机结构寿命控制软件功能设计	374
附录 I 疲劳寿命统计分析基础知识	377
I.1 基本概念	377
I.2 正态分布	379
I.3 威布尔分布	382
I.4 抽样分布	384
I.5 参数估计	386
I.6 假设检验	389
I.7 分布的拟合优度检验	395
I.8 最小试件数检验	396
附录 II 国内外常用航空材料疲劳寿命对数标准差	399
II.1 LY12CZ 铝合金板材及连接件	399
II.2 LY12CS 铝合金板材	401
II.3 40CrNiMoA 钢棒材	403
II.4 30CrMnSiNi2A 钢棒材	404
II.5 30CrMnSi2A 钢棒材	405
II.6 2024 - T3 铝合金板材及连接件	406
II.7 7050 - T7451 铝合金板材及连接件	409
II.8 2524 - T3 铝合金铆接件	412
II.9 AL - Li - S - 4 铝合金铆接件	412
II.10 6156 - T6 铝合金铆接件	413
II.11 2198 - T8 铝合金铆接件	413
II.12 2524 - T3 和 7150 - T77511 铝合金铆接件	414
II.13 6156 - T6 和 6056 - T4511 铝合金铆接件	415
II.14 AL - Li - S - 4 和 2099 - T83 铝合金铆接件	415
II.15 2198 - T8 和 2196 - T8511 铝合金铆接件	416

II. 16 T700/QY8911 复合材料单向板	416
附录 III 随机选取的 9 组试验数据	419
附表 1 正态分布检验中计算统计量 W 的系数 $\alpha_{k,n}$	424
附表 2 正态分布检验中统计量 W 的 γ 分位数 Z_γ	427
附表 3 正态总体均值、方差的置信区间与单侧置信区间	428
附表 4 标准正态分布的分布表	429
附表 5 χ^2 分布的上分位表	431
附表 6 F 分布的上分位表	433
附表 7 t 分布的上分位表	440

第 一 篇

飞机结构寿命控制概述

本篇介绍了本书相关的研究背景,总结与分析了目前国内外飞机结构服役/使用寿命的管理现状,并从相关问题出发,提出了飞机结构寿命控制的概念,明晰了飞机结构寿命控制的研究范畴;基于飞机结构的服役/使用历程分析,将飞机结构划分为疲劳关键件、腐蚀关键件和腐蚀疲劳关键件三类,明确了本书的主要研究对象,并对飞机结构载荷/环境谱进行了简要的介绍。

第 1 章

概 述

1.1 背景概况

飞机作为一种现代化的交通工具已显著改变了人们的生活。对一架飞机而言,飞机的机体结构在整个系统中发挥着最基础的承载平台作用,其他的部件,包括发动机、雷达系统、液压系统、控制系统、武器系统、其他功能系统等,均属于机载系统,是可以在机体平台上进行拆卸、更换、升级的。因此,机体结构是飞机最基础、最重要的系统之一,其直接影响飞机的使用安全。飞机的使用期限(服役/使用寿命)主要由飞机结构的使用期限决定,对其开展研究具有重要的现实意义。

一般所说的飞机结构通常就是指飞机的机体结构,从飞机的功能部位来划分,飞机结构可以分为机身、机翼(外翼、中央翼等)、尾翼(垂尾、平尾等)、起落架等,每个部位又由几个到上万个零部件所组成;按照零部件的结构形式来划分,飞机结构又可以分为梁、隔框、翼肋、纵墙、桁条、蒙皮、轴、杆、标准件等。不同飞机结构的结构形式和所用材料各具特征,且位于飞机不同部位的结构受力特征和局部服役环境互不相同,导致不同结构的失效规律和失效机理千差万别;加之各类结构在失效后对飞行安全的影响程度不尽一样,且结构维护的难易程度和维修手段也有所区别,导致对不同结构的管理思想也可能不同。因此,对飞机结构的研究涉及多个领域的多个学科,是非常复杂的系统性研究内容。由于飞机结构不合理的设计、定寿、管理、维修所导致的飞行事故或安全隐患一直影响着人们的生活和生产。

1985年8月12日,日本航空公司的波音747飞机空难属于由修理不当所导致的飞行惨案。事故发生时该飞机正在执行东京飞往大阪的航班任务,飞机起飞后12min在7280m的高度垂尾损毁脱落,32min后撞山坠毁,导致520人遇难,成为航空史上单架飞机伤亡最惨重的空难事故。调查发现,飞机在进行尾部修补时需要两排铆钉,但维修人员只将损伤部位补了一排铆钉,使得蒙皮局部受到剪力过大,产生疲劳断裂^[1]。事后日本航空公司的董事长、数名高级主管和基层员工

引咎辞职,并导致一位资深维修经理羞愧自杀! 事故现场与断裂的飞机残骸如图 1.1 所示。

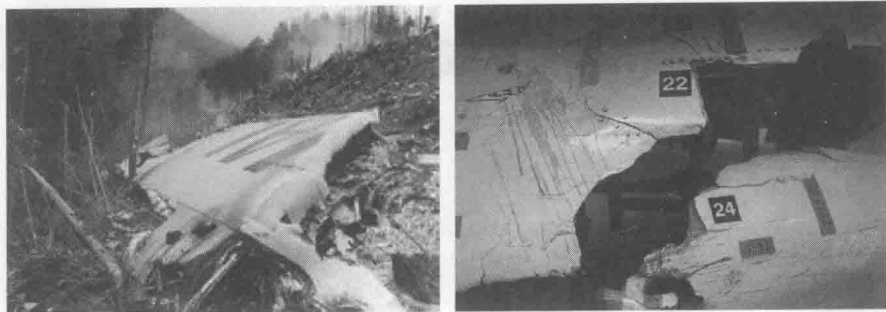


图 1.1 1985 年日本航空公司波音 747 飞机坠毁现场与飞机残骸

1988 年 4 月 28 日,美国 Aloha 航空公司的波音 737 飞机上机身剥离事故属于因管理(检查维护)不当所引发的飞行事故。事故飞机属于典型的老龄飞机,当时已服役/使用了 35493 个飞行小时,89090 个飞行起落,其在飞往夏威夷的航线中因增压舱 43 段上蒙皮搭接头出现多部位损伤(Multiple Site Damage, MSD)引发了上半机身完全剥离并导致一名空乘人员掉入大海,多名旅客受伤的灾难事故,如图 1.2 所示。由于当时的人们对 MSD 的危害性尚无完整的认识,导致对飞机结构的检查维护措施制定不到位。虽然事故当天一位女性乘客在登机前就已发现了引发事故的裂纹,但飞机维护人员却对此一无所知^[2,3]。

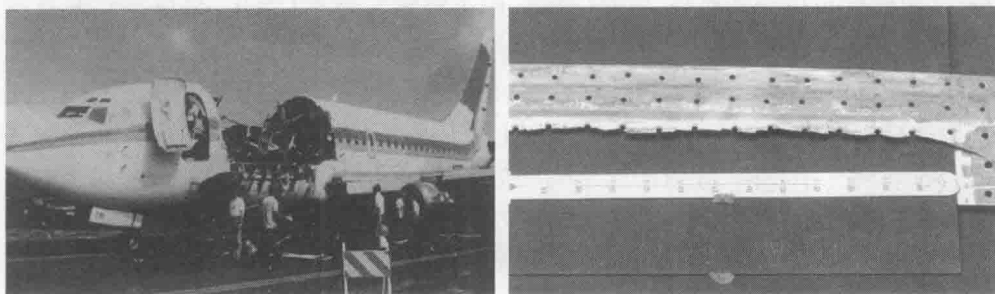


图 1.2 1988 年美国 Aloha 航空公司事故飞机及断裂部位

2002 年 5 月 25 日,中国台湾华航的 611 号波音 747 飞机空中解体属于修理和检查不当所导致的惨烈空难。飞机当时执行从台北飞往香港的任务,在爬升过程中解体坠入台湾海峡,机上 225 人全部罹难。调查发现,该架飞机于 1979 年 8 月 2 日出厂,但在刚使用 6 个月之后就发生了降落时机尾擦撞跑道的事故。当时华航的维护人员并未依照波音公司的手册要求对受损部位更换材料,而只是进行了简单的打磨和加强保护,甚至还对维修记录进行了造假。随着飞机在 22 年的使用中几万次的客舱增压减压过程,原来的受损部位产生裂纹并不断扩展,裂纹

长度在飞机失事时达到了惊人的 2.3m。

更为遗憾的是,因为检查不细,611 号飞机错过了最后一次远离死神的机会。1988 年,Aloha 航空波音 737 飞机机身剥离事故发生后,波音公司新的规范要求各航空公司用户加强对老龄飞机的腐蚀与裂纹检查,并重新评估飞机结构上已有的维修。2001 年,在事故发生的前一年,华航对 611 号飞机执行了新的检查程序;当初对机尾受损部位修理后贴补的盖板周围发现深棕色污渍,已经说明盖板下的结构可能已经开裂(此架飞机之前允许吸烟,深棕色污渍说明烟雾有渗出的可能),但检查人员并未留意这一细节。611 号飞机空中解体模拟图及事故残骸如图 1.3 所示。

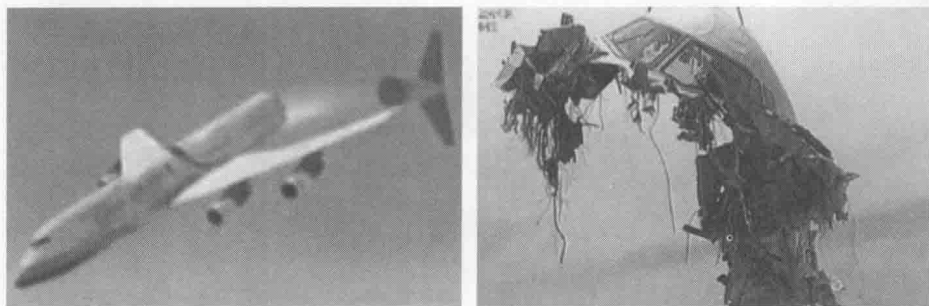


图 1.3 2002 年中国台湾华航飞机空中解体模拟图及事故残骸

与此不同的是,美国的 F-15 和 F-16 军用飞机机身大梁存在的裂纹,则属于因飞机结构不合理定延寿所引发的飞行事故或安全隐患。

2007 年 11 月 2 日,美国空军国民警卫队一架 F-15C 型战机在做大表速编队机动飞行时突然发生空中解体,事故的模拟过程如图 1.4 所示。该事故导致了 F-15 飞机大面积停飞检查。事故调查发现,F-15C 空中解体是由于机身大梁疲劳断裂所致。在对美国全球机队的所有 F-15 飞机停飞检查发现,400 余架 F-15A 至 D 型飞机中超过 50% 的飞机至少有一根机身大梁存在问题,已不能满足设计规范,其中,有 9 架飞机在大梁上发现危险的疲劳裂纹^[1,4,5]。



图 1.4 2007 年 F-15C 空中解体模拟图