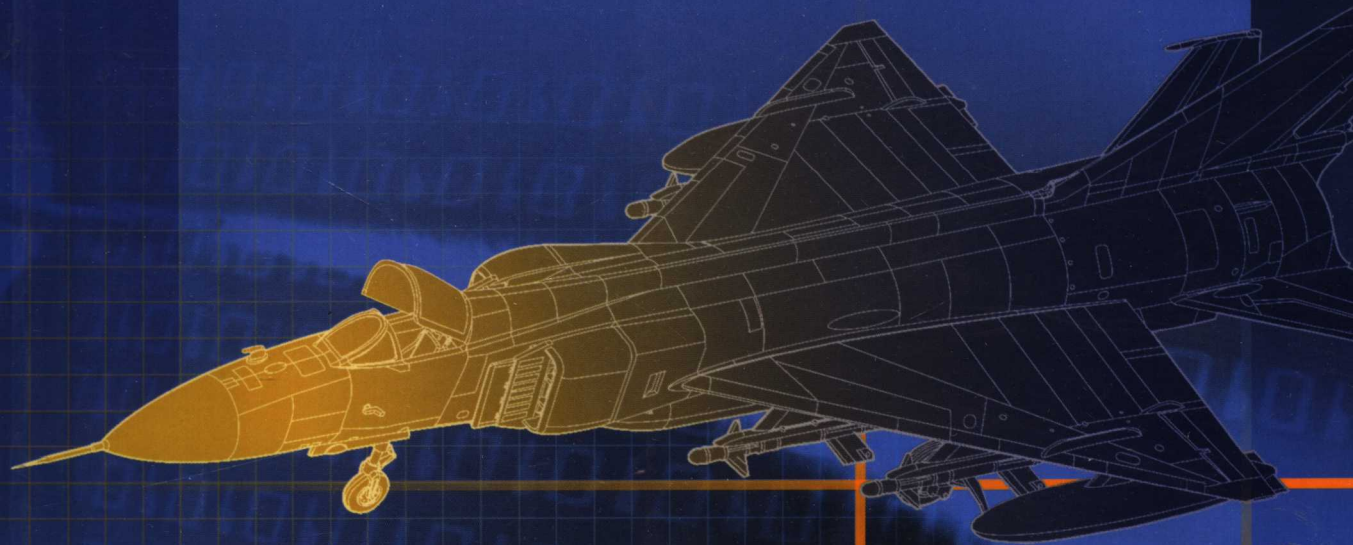


飞机结构典型故障 分析与设计改进

● 孙 聪 王向明 著



航空工业出版社

责任编辑：李苏楠

封面设计：王楠

ISBN 978-7-80183-931-2



9 787801 839312 >

定价：38.00元

飞机结构典型故障 分析与设计改进

孙 聪 王向明 著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

结构故障是飞机研制和使用过程中所暴露的主要故障形式之一,严重的结构故障会影响飞机研制进程或飞机的正常使用。本书针对我国自行研制的歼击机所暴露的11种重大结构故障,用现代飞机结构设计技术,深入分析了故障或失效机理,论述了设计改进依据,通过实施效果评价,提炼出值得借鉴的经验教训,依据充分、内容翔实、分析结论合理可信,具有很强的针对性和典型性,工程实用性强,对现役飞机改进、新机研制、提高结构设计水平具有重要指导意义和重要参考价值。

本书非常适合飞机结构设计员、外场维护人员、高校相关专业师生工作和教学参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构典型故障分析与设计改进/孙聪,王向明著.

北京:航空工业出版社,2007.4

ISBN 978-7-80183-931-2

I. 飞… II. ①孙…②王… III. ①歼击机—故障诊断
②歼击机—结构设计 IV. V271.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第043000号

飞机结构典型故障分析与设计改进

Feiji Jiegou Dianxing Guzhang Fenxi yu Sheji Gaijin

航空工业出版社出版发行

(北京市安定门外小关东里14号 100029)

发行部电话:010-64978486 010-64919539

北京国邦印刷有限责任公司印刷

全国各地新华书店经售

2007年4月第1版

2007年4月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:14

字数:359千字

印数:1—2500

定价:38.00元

《飞机结构典型故障分析与设计改进》

编 审 人 员

主 编 孙 聪 王向明

副主编 王 彤 李戈岚

主 审 顾诵芬 李 明 张福泽 陈一坚 宋文骢 李 天

副主审 季晓光 王永庆 章怡宁 黄季墀 杨 旭 曹奇凯 张 爽

编 委 孙 聪 王向明 王 彤 李戈岚 吴宏伟 张宝才 耿玉新

刘利阳 韩 涛 郑春红 魏金龙 毕世权 孙彦鹏 王彦红

马 维 王 进 张春平 倪艳红 张国良 岳 声 景绿路

朱天文 许广兴 李红恩

序

歼 8 飞机是中国航空研究院成立后设计的第一种超声速歼击机。沈阳飞机设计研究所是歼 8 飞机的总设计师单位，负责全系统集成和全部机体结构设计。歼 8 飞机设计始于 1965 年，1969 年 7 月 5 日首飞成功，但因当时政治、经济条件的限制，一直拖到 1979 年底才设计定型。歼 8 原型机于 1982 年开始装备部队。1981 年起又开始改成两侧进气的歼 8 II 飞机设计，1984 年首飞，1988 年设计定型，1990 年装备部队；1992 年又为歼 8 II 装上了空中受油装置，以后又陆续改进航电和武器系统，现均已装备部队。最早期服役的飞机已历时 20 多年，飞行数千小时。歼 8 飞机从北疆到海南、从沿海到内陆沙漠的空、海军部队都有配备。它们经受了严寒、酷暑、海水、盐雾和沙漠干旱的考验，在严峻的环境条件下，承担起捍卫祖国领空的任务。

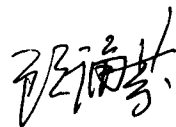
歼 8 飞机的结构设计沿袭了米格飞机的格局。1961 年，中国航空研究院建院方针中最重要的一条就是在摸透米格-21 飞机的基础上再进行新飞机的设计工作。当时中苏关系已破裂，在仿制米格-21 飞机时，苏联只提供了图样和强度计算报告，没有任何苏联专家来提供技术支持。我们只有 20 世纪 50 年代来华的苏联专家提供的一些有关新强度规范与已公开的 1947 年苏联飞机强度规范的差别。我们有的结构应力分析手段是当时沈阳飞机设计研究所强度室主任冯仲越同志主持下建立的“力法”、“位移法”程序及气动弹性专业组长管德同志主持下建立的一套飞机气动弹性分析方法。这就是我们开展歼 8 飞机结构设计的一些基础手段。我们的结构设计和强度计算是分开的，结构设计的同志只管飞机构造和粗略的强度估算；强度计算的同志根据已画成的结构件图再进行应力分析。当时结构设计只注重静强度，对于长时间在严酷环境条件下，经受振动和往复载荷情况下构件的强度，除对舱盖玻璃外，别的构件都没有考虑。总之，构件的细节按传统的设计方法是顾及不到的。

对于构件抗疲劳、抗腐蚀、抗环境变化的细节设计不是靠 MSC. Nastran 等程序都能解决的，因此国外大的飞机公司都有自己公司内部的零件设计手册，规定了细节设计的原则、方法和图册。早在 1958 年，沈阳飞机设计研究所的前身——112 厂设计室，在我国飞机设计事业奠基人徐舜寿同志领导下，组织设计室结构设计人员编成了一本《飞机零件设计原则》，但可惜的是，1956 年 10 月设计室才成立，我们只设计了歼教 1 和初教 1，当时都没有装备部队使用。因此，在 20 世纪 80 年代编《飞机设计手册》时也形不成一个可信的飞机细节设计指南类的材料。

这次沈阳飞机设计研究所的同志，将他们遇到的歼 8 等飞机在长期使用中，发生的飞机局部结构因振动、腐蚀、温度交变以及疲劳等造成的结构局部损坏，对从载荷、材料到结构形式各方面进行了有理论又有试验验证的分析，并提出了合理的解决方案。这里涉及的材料从铝合金、钛合金到复合材料，这些典型构件是各种飞机都会有的，无疑对已有飞机局部结构损坏的防范和新飞机的细节设计都具有重要的参考价值。

沈阳飞机设计研究所同志这种踏实认真、不求名利的科研作风是值得倡导的。写这样的材料不会有什么惊天动地的大奖，但其作用不仅对新入门的结构设计员，而且对使用维护人员也都是十分有用的。希望他们能继续发扬这种求真务实、默默无闻、甘愿奉献的精神，能扩展到更多飞机上，继续出版第二集、第三集。

中国科学院院士
中国工程院院士
歼 8 II 飞机总设计师



2007 年 1 月 14 日

前 言

国内自主设计歼击机始于20世纪60年代中期,受我国航空技术发展状况限制,当时的飞机结构基本上是按静强度规范设计的,没有条件去全面考虑疲劳载荷、振动载荷和腐蚀环境的影响,而飞机在服役中所暴露的结构故障大多数发生在这些技术领域。造成飞机结构故障的原因有很多,其中主要原因是随着飞机性能的提高,对机体结构的要求越来越苛刻,例如轻质、长寿命、低成本、多功能等。而这些要求在技术上往往是相互矛盾的,一般只能采取兼顾、折中的办法予以解决。

本书所搜集的结构故障实例,大部分源自飞机的性能试飞和服役中暴露出的技术问题。从专业建设和积累设计经验出发,本书依据现代飞机结构设计技术,深入分析故障或失效机理,论述设计改进依据,通过实施效果评价,切实解决了典型疑难故障。

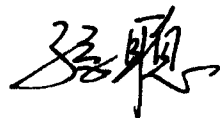
本书没有采取就事论事或者粗浅的“解决了”问题的办法来对待,而是通过故障攻关,提炼出值得借鉴和反思的问题与经验教训,加深对飞机结构设计技术的理解,并提升到新的认识高度,为将来的新型号研制和使用提供了新的依据,这是本书最大的特点,也是工程应用界容易被忽视的,更是工程人才培养中不可或缺的重要组成部分。

本书具有很强的针对性和典型性,工程实用性强,依据充分、内容翔实、分析结论合理可信,在国内并不多见。该书的出版将对工程技术人员、管理人员、相关专业院校师生具有重要的应用和参考价值。

我们特别感谢著名航空专家顾诵芬院士、李明院士、张福泽院士、陈一坚院士、宋文骢院士、李天院士在百忙中抽出宝贵时间主审本书,特别感谢顾诵芬院士亲自为本书作序、陈一坚院士生病期间撰写审阅意见;同时感谢沈阳飞机设计研究所季晓光副所长、王永庆总设计师,章怡宁、黄季墀、杨旭、曹奇凯、张爽等副总设计师对本书的审阅;感谢航空工业出版社史晋蕾编审等同志和领导为本书出版所付出的努力与支持。

另外在本书编写过程中,引用了中国航空工业失效分析中心、中国一航飞机强度研究所、中国一航北京航空制造工程研究所、中国一航北京航空材料研究院以及中国一航沈阳飞机设计研究所非结构专业等单位的部分研究报告结论、试验研究结果及有关专家的技术观点,鉴于篇幅所限,不能逐一注出,在此一并表示感谢。

由于本书编写人员大多承担着多项科研工作,工作繁忙,加之对具体技术的认识与理解有限,在内容和文字上可能存在不当之处,请读者批评指正。



2007年1月

目 录

第1章 总 论

1.1 历史回顾与认识	(1)
1.2 飞机结构故障形式及其危害	(2)
1.3 故障成因分析方法	(3)
1.3.1 产品失效致因论	(3)
1.3.2 飞机结构故障或失效的原因	(4)
1.3.3 故障分析方法	(5)
1.4 故障治理方法	(6)
1.5 值得反思的问题	(7)

第2章 复合材料调节板前缘断裂故障分析及设计改进

2.1 引论	(10)
2.1.1 进气道复合材料调节板结构设计概况	(10)
2.1.2 复合材料调节板前缘断裂故障	(12)
2.2 复合材料调节板前缘结构失效分析	(14)
2.2.1 设计载荷	(14)
2.2.2 复合材料调节板结构强度分析	(15)
2.2.2.1 计算模型	(15)
2.2.2.2 计算分析结果	(16)
2.2.3 复合材料调节板结构研制阶段的验证试验结果	(17)
2.2.3.1 高温静力试验	(18)
2.2.3.2 高温振动试验	(18)
2.2.4 复合材料后调节板装机及领先试飞	(19)
2.2.5 结构失效分析	(20)
2.2.5.1 失效的定性分析	(20)
2.2.5.2 破坏部位的失效计算分析	(20)
2.2.5.3 机理分析	(25)
2.2.6 故障再现试验	(25)

2.2.7 故障分析结论	(26)
2.3 调节板前缘结构设计改进	(27)
2.3.1 已破损后调节板的处理	(27)
2.3.2 已装机或装配的后调节板设计改进	(27)
2.3.3 已生产制件但未装配的后调节板设计改进	(27)
2.3.4 后续生产的后调节板设计改进	(28)
2.4 调节板结构改进实施效果	(28)
2.5 经验教训	(28)

第3章 歼8飞机后减速板断裂故障治理

3.1 引论	(29)
3.1.1 歼8飞机后减速板结构设计概况	(29)
3.1.1.1 减速板的功能	(29)
3.1.1.2 歼8飞机后减速板结构形式	(29)
3.1.2 减速板结构失效情况	(30)
3.2 减速板失效分析	(31)
3.2.1 后减速板的载荷	(31)
3.2.2 后减速板强度计算	(32)
3.2.3 断口宏观形貌	(32)
3.2.4 成分分析	(32)
3.2.5 断口微观形貌	(33)
3.2.6 载荷、环境分析	(34)
3.2.7 失效分析结论	(34)
3.3 后减速板结构设计改进	(35)
3.3.1 后减速板设计改进原则	(35)
3.3.2 后减速板结构设计改进依据	(35)
3.3.3 后减速板结构设计改进	(36)
3.3.3.1 后减速板结构设计	(36)
3.3.3.2 改进方案的试飞测试与试验验证	(36)
3.4 后减速板改进的实施效果	(39)
3.5 经验教训	(40)

第4章 歼8飞机第42框腐蚀损伤与综合治理

4.1 引论	(41)
4.1.1 第42框结构概况	(41)
4.1.2 第42框下框段腐蚀损伤	(42)
4.2 第42框下半框腐蚀开裂失效分析	(43)
4.2.1 下半框结构强度分析	(43)
4.2.2 下框段断口综合分析	(44)

4.2.2.1	下框段腐蚀断裂的宏观形貌	(44)
4.2.2.2	下框段腐蚀断裂的微观形貌	(44)
4.2.2.3	能谱分析	(45)
4.2.2.4	低倍和显微组织	(45)
4.2.2.5	力学性能测试	(46)
4.2.2.6	材料成分分析	(46)
4.2.3	飞机使用环境分析	(47)
4.2.3.1	飞机使用环境分类	(47)
4.2.3.2	潮湿空气环境	(47)
4.2.3.3	海洋大气环境	(48)
4.2.3.4	工业大气环境	(48)
4.2.3.5	机上腐蚀环境	(49)
4.2.4	使用维护分析	(50)
4.2.5	下半框腹板的材料特性	(50)
4.2.6	油箱材料及其涂层	(51)
4.2.7	腐蚀机理分析	(52)
4.2.8	失效分析结论	(52)
4.3	第42框下半框腐蚀故障修理	(53)
4.3.1	下半框腐蚀故障修理的指导思想	(53)
4.3.2	下半框修理原则	(53)
4.3.2.1	等强度原则	(53)
4.3.2.2	等刚度原则	(53)
4.3.2.3	疲劳强度原则	(54)
4.3.2.4	腐蚀控制原则	(54)
4.3.2.5	重量控制原则	(54)
4.3.2.6	工艺性和经济性原则	(54)
4.3.3	下半框腐蚀故障修理方案	(55)
4.3.3.1	下半框腐蚀故障修理的总体方案	(55)
4.3.3.2	下半框腐蚀损伤检测	(55)
4.3.3.3	结构损伤的去除	(56)
4.3.3.4	加强件设计与装配	(58)
4.3.3.5	结构表面防护措施	(61)
4.3.4	修复方案的试验验证	(62)
4.3.5	验证试验结果和结论	(62)
4.3.5.1	刚度试验	(62)
4.3.5.2	静强度试验	(63)
4.3.5.3	疲劳强度试验	(63)
4.4	下半框补强修理、改进设计的效果	(64)
4.4.1	修理后第42框达到寿命指标要求	(64)

4.4.2 提高飞机完好率 解除飞行限制	(64)
4.5 经验与教训	(64)

第5章 歼8飞机腹鳍结构故障分析与治理

5.1 引论	(66)
5.1.1 歼8飞机腹鳍结构设计概况	(66)
5.1.2 腹鳍结构裂纹与螺栓断裂故障	(68)
5.2 腹鳍结构失效分析	(70)
5.2.1 设计载荷	(70)
5.2.2 腹鳍结构强度分析	(71)
5.2.3 导流片故障形式归类与设计更改措施	(72)
5.2.4 腹鳍结构失效分析	(74)
5.2.4.1 腹鳍设计综合分析	(74)
5.2.4.2 载荷环境分析	(77)
5.2.4.3 腹鳍结构失效分析结论	(78)
5.3 腹鳍根部结构设计改进	(78)
5.3.1 腹鳍结构改装设计原则	(78)
5.3.2 增加腹鳍内伸接头的设计改进	(78)
5.3.3 其他改进措施探索研究	(81)
5.3.4 腹鳍改装地面测试对比试验	(82)
5.3.5 腹鳍改装飞行测试对比试验	(83)
5.3.5.1 飞行测试参数	(83)
5.3.5.2 飞行测试状态	(83)
5.3.5.3 4种腹鳍状态试飞情况	(83)
5.3.5.4 飞行测试结论	(84)
5.3.6 重量、重心变化情况	(84)
5.3.7 改装方案综合对比	(85)
5.3.7.1 各改装方案的结构对比	(85)
5.3.7.2 各改装方案的工艺对比	(85)
5.3.7.3 各方案综合对比结论	(86)
5.4 腹鳍结构改进实施效果	(86)
5.4.1 外场飞机腹鳍改装	(86)
5.4.2 改装后腹鳍故障统计	(86)
5.5 经验教训	(87)

第6章 歼8飞机后机身尾尖结构故障综合治理

6.1 引论	(89)
6.1.1 后机身尾尖结构设计概况	(89)
6.1.2 后机身尾尖裂纹故障	(96)

6.2 尾尖结构失效分析	(99)
6.2.1 总体布局方面的问题	(99)
6.2.2 发动机喷流高温环境的影响	(100)
6.2.3 振动与噪声环境的影响	(104)
6.2.4 装配载荷的影响	(104)
6.2.5 结构设计的影响	(105)
6.3 尾尖结构故障综合治理	(105)
6.3.1 去除尾尖的综合治理方案	(105)
6.3.1.1 主要技术依据	(105)
6.3.1.2 试飞测试验证	(106)
6.3.2 去尾尖方案的技术关键	(113)
6.3.3 去尾尖方案结构设计	(113)
6.3.3.1 尾尖结构改进方案	(113)
6.3.3.2 伞舱结构协调更改设计	(115)
6.3.4 试飞考核验证	(116)
6.3.4.1 飞行测温对比试验	(116)
6.3.4.2 小尾尖加装大挡板对飞机加速性的影响	(118)
6.3.5 根治尾尖多发性故障解决方案研究结论	(118)
6.4 去除尾尖改装实施效果	(119)
6.4.1 歼 8 系列飞机尾尖结构改装	(119)
6.4.2 飞行使用考核	(120)
6.4.3 结论	(120)
6.5 经验教训	(121)

第 7 章 准全尺寸疲劳试验翼身组合体翼根结构设计改进

7.1 引论	(122)
7.1.1 准全尺寸疲劳试验翼身组合体翼盒结构与试验概况	(122)
7.1.1.1 准全尺寸翼身组合体研制背景	(122)
7.1.1.2 准全尺寸翼身组合体外翼结构设计概况	(122)
7.1.1.3 准全尺寸翼身组合体疲劳试验加载特点	(124)
7.1.2 准全尺寸翼身组合体翼根结构疲劳断裂概况	(125)
7.2 翼根结构失效分析	(125)
7.2.1 翼根裂纹宏观特点	(125)
7.2.2 失效部位结构特征分析	(127)
7.2.3 失效部位计算分析	(127)
7.2.4 疲劳开裂处断口分析	(128)
7.2.4.1 断口宏观形貌	(128)
7.2.4.2 断口微观分析	(128)
7.2.5 组织检查	(130)

7.2.6	化学成分分析	(130)
7.2.7	材料拉伸性能测试与分析	(130)
7.2.8	表面加工质量检查	(130)
7.2.9	下带板疲劳开裂综合分析	(131)
7.2.10	下带板疲劳寿命估算	(131)
7.2.10.1	沿垂直于板厚方向疲劳裂纹扩展寿命计算	(131)
7.2.10.2	沿长度方向的疲劳裂纹扩展寿命计算	(133)
7.2.10.3	断口疲劳萌生寿命及疲劳裂纹长度与循环周次之间的定量分析	(134)
7.2.10.4	断口疲劳应力范围和最大疲劳应力定量分析	(135)
7.2.10.5	断口定量分析结果的综合分析	(137)
7.2.11	失效分析结论	(137)
7.3	翼根结构细节设计改进	(137)
7.3.1	翼根结构细节设计改进原则	(137)
7.3.2	翼根下带板过渡圆角 R 处结构改进	(138)
7.3.3	下对接带板设计计算分析	(139)
7.3.3.1	下对接带板结构形式	(139)
7.3.3.2	耳片载荷与应力计算	(140)
7.3.4	翼根结构细节改进的试验验证	(141)
7.3.4.1	改进方案典型试验件设计	(141)
7.3.4.2	典型件试验验证与结论	(143)
7.4	翼根结构细节设计改进的实施效果	(144)
7.4.1	搭接板—圆头钉方案准全尺寸翼身组合体疲劳试验	(144)
7.4.2	搭接板—埋头钉方案准全尺寸翼身组合体疲劳试验	(144)
7.4.3	翼根外观细节改进与验证	(145)
7.4.3.1	研究背景	(145)
7.4.3.2	改进实施内容	(145)
7.4.3.3	计算分析与试验验证	(145)
7.5	经验教训	(146)

第8章 平尾静力试验断裂失效与设计改进

8.1	引论	(148)
8.1.1	平尾结构设计概况	(148)
8.1.2	平尾静力试验断裂失效概况	(148)
8.2	平尾结构断裂故障失效分析	(151)
8.2.1	平尾结构传力特点与结构选材	(151)
8.2.2	平尾根部连接结构特点	(152)
8.2.3	平尾结构失效分析	(152)
8.2.3.1	平尾根部边肋后段搭接区钉孔加工质量检查	(152)
8.2.3.2	平尾构件失效断口分析	(155)

8.2.3.3 主承力构件材料成分、性能与组织检查	(159)
8.2.4 平尾静力试验数据分析	(159)
8.2.4.1 位移分析	(159)
8.2.4.2 破坏情况应变分析	(160)
8.2.5 失效分析结论	(160)
8.3 平尾复合材料结构补强设计改进与实施效果	(161)
8.3.1 补强设计原则	(161)
8.3.2 补强设计改进	(161)
8.3.2.1 试验飞机右平尾补强设计	(161)
8.3.2.2 平尾根部局部设计改进	(162)
8.3.3 补强设计改进实施效果	(162)
8.3.4 试验结果分析与结论	(163)
8.4 批生产飞机平尾结构改进设计	(163)
8.5 经验教训	(164)

第9章 歼8飞机机翼第2梁腐蚀失效分析与修理

9.1 引论	(166)
9.1.1 歼8飞机机翼第2梁结构设计概况	(166)
9.1.2 第2梁结构腐蚀失效	(167)
9.2 歼8飞机第2梁腹板腐蚀失效分析	(168)
9.2.1 第2梁腐蚀形态	(168)
9.2.2 腐蚀环境	(168)
9.2.3 使用维护的影响	(168)
9.2.4 第2梁的设计选材及表面防护	(169)
9.2.4.1 结构材料	(169)
9.2.4.2 结构涂层系统	(169)
9.2.5 腐蚀失效分析结论	(169)
9.3 第2梁腹板补强修理	(169)
9.3.1 补强修理准则	(169)
9.3.2 腹板补强修理方案	(169)
9.3.3 腐蚀产物的去除及其表面防护	(170)
9.3.3.1 清除腐蚀产物	(170)
9.3.3.2 腐蚀部位修理后表面防护	(170)
9.4 第2梁腐蚀补强修理效果	(170)
9.5 经验教训	(172)

第10章 歼8飞机机翼第1梁耳片应力腐蚀控制

10.1 引论	(173)
10.1.1 机翼第1梁结构设计概况	(173)

10.1.2	第1梁接头耳片断裂故障	(174)
10.1.3	第1梁接头耳片工作环境	(175)
10.2	第1梁头部连接耳片失效分析	(175)
10.2.1	耳片强度计算分析	(175)
10.2.2	耳片结构选材	(176)
10.2.3	耳片断口形貌	(176)
10.2.3.1	断口宏观形貌	(176)
10.2.3.2	断口微观形貌	(177)
10.2.3.3	视频显微观察	(179)
10.2.4	材料成分分析与检测	(180)
10.2.5	失效分析结论	(181)
10.3	机翼第1梁耳片应力腐蚀控制	(182)
10.3.1	基本检查方法	(182)
10.3.2	外场腐蚀环境控制与耳片损伤修理	(182)
10.3.3	耳片抗应力腐蚀设计改进	(183)
10.4	经验教训	(184)

第11章 歼8飞机主起落架机轮半轴 裂纹故障分析及处理

11.1	引论	(185)
11.1.1	主起落架结构设计概况	(185)
11.1.2	主起落架机轮半轴故障概况	(186)
11.2	主起落架机轮半轴失效分析	(187)
11.2.1	主起落架机轮半轴受力分析	(187)
11.2.2	机轮半轴裂纹检测及断口分析	(188)
11.2.2.1	外场机轮半轴断裂检查	(188)
11.2.2.2	大修厂机轮半轴裂纹检查	(189)
11.2.3	主起落架机轮半轴疲劳试验结果	(190)
11.2.3.1	机轮半轴疲劳试验破坏部位	(190)
11.2.3.2	试验结果与使用情况差异分析	(190)
11.2.4	外场飞机使用特点分析	(191)
11.2.5	主起落架机轮半轴失效分析结论	(191)
11.3	主起落架机轮半轴结构设计改进	(191)
11.3.1	半轴结构设计改进原则	(191)
11.3.2	半轴结构细节设计改进	(191)
11.4	机轮半轴改进设计后寿命评估	(192)
11.4.1	半轴疲劳寿命对比结果	(192)
11.4.2	半轴损伤容限计算	(193)

11.5 经验教训	(193)
第 12 章 歼 8 飞机空速管断裂与前轮摆振故障治理	
12.1 引论	(195)
12.2 空速管故障与前轮摆振	(195)
12.2.1 空速管裂纹故障的规律和特征	(195)
12.2.2 前轮摆振的影响	(196)
12.3 前轮摆振分析	(197)
12.3.1 前轮摆振历史回顾	(197)
12.3.2 前轮摆振的特点和规律	(198)
12.3.3 前起落架两种型号减摆器的特点	(198)
12.3.4 前轮摆振分析	(199)
12.3.4.1 摆振计算与减摆器的阻尼特性	(199)
12.3.4.2 前起落架支柱结构差异	(199)
12.3.4.3 前轮载荷的影响	(200)
12.3.4.4 摆振分析结论	(200)
12.4 空速管故障解决途径	(200)
12.4.1 改变频率特性	(200)
12.4.2 改变前轮稳定距	(201)
12.4.3 降低轮胎压力、更换小型机轮	(201)
12.4.4 换装 ZJB-1A 型减摆器, 提高传扭件强度、刚度和耐磨性	(202)
12.5 减摆器换装实施效果	(202)
12.6 经验教训	(203)
附录 值得反思的问题及经验教训汇总	(204)
参考文献	(206)