



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

强宝平 编著

飞机结构强度 地面试验

GROUND TESTING
FOR AIRCRAFT STRUCTURE

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

飞机结构强度地面试验

强宝平 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书是根据我国飞机结构强度地面试验几十年的研究成果和经验编著,全书依据飞机结构强度规范要求,从航空结构强度地面试验专业包含的静强度试验、动强度试验、耐久性损伤容限/疲劳试验、热强度试验、噪声控制与声疲劳试验、考虑气候化学环境的飞机结构地面强度试验等方面,叙述了航空结构强度地面试验的技术原理和发展历程,以及飞机结构强度地面试验在飞机新型号研制过程中的地位和作用。

本书可供从事飞机结构强度研究的科研、生产和管理人员参考,也可作为高等院校相关专业的教材。

图书在版编目 (C I P) 数据

飞机结构强度地面试验 / 强宝平编著. -- 北京:
航空工业出版社, 2014. 11

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0398 - 0

I. ①飞… II. ①强… III. ①飞机—结构强度—强度
试验—地面试验 IV. ①V22

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 262291 号

飞机结构强度地面试验

Feiji Jiegou Qiangdu Dimian Shiyan

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 11 月第 1 版

2014 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 26.5

字数: 680 千字

印数: 1—2000

定价: 150.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。



中国航空工业集团公司董事长

前 言

飞机结构强度是飞机型号平台的基础，直接影响着飞机的性能、成本、安全性、可靠性、舒适性和适航性。我国飞机结构强度的设计技术随着我国航空工业的发展而逐步发展和提高，飞机结构强度技术关注和研究的范畴也随着我国航空工业发展的需求和科学技术的发展而不断丰富拓展，并在多个型号的研制中得到应用，但是，如何检验和验证设计、制造的飞机结构强度是否满足设计指标，符合规范和标准的要求，就需要开展飞机结构强度地面试验工作，在实验室通过科学合理的手段来模拟飞机在使用中的受载情况，对飞机结构强度进行考核，以证明飞机结构强度是满足设计指标的，符合规范和标准要求的，强度是合格的。只有飞机结构强度经过地面验证试验是合格的，飞机才能转入试飞阶段，完成试飞后才能定型批量生产。

飞机结构强度地面试验是飞机研制过程中不可或缺的、非常重要的一环，因为飞机的飞行安全关乎着人民的生命和财产安全。因此，飞机结构强度地面试验，需要相应的专门组织、设施、技术和管理流程来组织实施。我国非常重视飞机结构强度地面试验，20 世纪 60 年代就建立了飞机结构强度研究的专门机构——中国飞机强度研究所，从事飞机结构强度预先研究和飞机结构强度地面试验工作。多年来，中国飞机强度研究所在实践中学习探索，形成了自己完整和有效的飞机结构强度标准、规范，建立了自己的飞机结构强度地面鉴定与验证试验方法和体系，为我国航空工业和国防事业做出了重大贡献。

本书是根据我国飞机结构强度地面试验几十年的研究成果和经验编著，全书依据飞机结构强度规范要求，从航空结构强度地面试验专业包含的静强度试验、动强度试验、耐久性损伤容限/疲劳试验、热强度试验、噪声控制与声疲劳试验、考虑气候化学环境的飞机结构地面强度试验等方面，叙述了航空结构强度地面试验的技术原理和发展历程，以及飞机结构强度地面试验在飞机新型号研制过程中的地位和作用。编者多年来一直从事飞机结构地面强度试验工作，作为飞机型号试验的领导和组织者几乎参与了我国所有飞机的强度地面试验，本书是编者的团队工作的结晶，也是编者多年工作的总结。本书在编著过程中得到了编者的团队的大力支持和帮助，他们提供了大量的素材、数据和图表，特别是胡律行同志通览了全书，并提出了许多宝贵意见，宁玲和张妍同志完成了书稿的录入和编排工作，在此表示诚挚的谢意。

尽管本书的编者做了很大努力，希望使读者了解到飞机结构强度地面试验在飞机研制过程的重要作用，飞机结构强度地面试验的原理、方法和内容，以及飞机结构强度地面试验还要做大量的工作这一事实，但由于编者水平有限，不尽人意之处在所难免，希望读者予以指正。

强宝平

2014 年 6 月

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 飞机设计思想的演化历程	(1)
1.2 飞机地面强度试验发展概况	(2)
1.2.1 静强度试验发展概况	(2)
1.2.2 疲劳试验发展概况	(5)
1.2.3 动力学试验发展概况	(7)
1.2.4 热强度试验发展概况	(13)
1.3 飞机地面强度试验依据	(17)
1.4 飞机地面强度试验意义	(20)
1.5 飞机地面强度试验分类	(21)
1.5.1 专业分类	(21)
1.5.2 性质分类	(22)
1.5.3 尺度分类	(22)
1.6 飞机地面强度试验流程	(22)
1.6.1 试验规划	(23)
1.6.2 试验设计	(23)
1.6.3 试验安装	(23)
1.6.4 调试	(24)
1.6.5 试验	(24)
1.6.6 试验总结	(24)
第2章 飞机结构静强度试验	(25)
2.1 飞机结构静强度试验要求及“积木式”划分	(25)
2.1.1 飞机结构静强度试验要求及依据	(25)
2.1.2 “积木式”的设计验证试验方法	(29)
2.2 材料、元件及细节试验	(31)
2.2.1 试验的目的及意义	(31)
2.2.2 试验的主要对象及考核内容	(31)
2.2.3 试验的技术要求、依据性文件及注意事项	(32)
2.2.4 典型的试验项目及技术简介	(37)
2.2.5 试验中常用的配套设备、仪器以及相关技术	(42)
2.3 结构组件试验	(43)
2.3.1 结构组件试验目的及意义	(43)
2.3.2 试验的主要对象及考核内容	(43)

2.3.3	试验的技术要求、依据性文件及注意事项	(44)
2.3.4	典型的试验项目及技术简介	(46)
2.3.5	试验中常用的配套设备、仪器	(53)
2.4	部件静强度试验	(55)
2.4.1	试验目的	(56)
2.4.2	试验项目及考核内容	(56)
2.4.3	试验技术	(57)
2.4.4	典型部件试验	(61)
2.5	全机静强度试验	(64)
2.5.1	试验目的	(65)
2.5.2	试验规划	(65)
2.5.3	试验设计	(67)
2.5.4	静强度试验程序	(73)
2.5.5	试验件检查和修复	(76)
2.5.6	静强度试验报告	(76)
2.5.7	试验主要设备和基础设施	(76)
2.6	ARJ 21 - 700 飞机静强度验证试验	(80)
2.6.1	试验简介	(80)
2.6.2	试验流程	(90)
2.6.3	试验设备	(91)
2.6.4	试验加载方法	(92)
2.6.5	试验支持	(93)
2.6.6	试验规模	(96)
2.6.7	试验程序	(97)
2.6.8	适航管理	(99)
2.6.9	试验质量控制	(99)
2.6.10	试验技术创新	(100)
第3章	飞机结构耐久性/损伤容限试验	(103)
3.1	飞机结构耐久性/损伤容限试验要求及“积木式”划分	(103)
3.1.1	飞机结构耐久性/损伤容限试验依据及要求	(103)
3.1.2	飞机结构耐久性/损伤容限试验分类	(107)
3.2	载荷谱简化及加重技术	(107)
3.2.1	试验载荷谱类型	(107)
3.2.2	载荷谱简化和加重方法	(108)
3.2.3	载荷谱简化及加重的可行性	(110)
3.2.4	载荷谱简化及加重准则	(110)
3.3	材料、元件及细节试验	(111)
3.3.1	试验目的及主要对象	(111)
3.3.2	试验实施	(112)

3.3.3 典型的试验项目及技术简介	(113)
3.4 结构组件耐久性/损伤容限试验	(117)
3.4.1 结构组件试验目的及意义	(117)
3.4.2 试验的主要对象及考核内容	(117)
3.4.3 试验的技术要求、依据性文件及注意事项	(117)
3.4.4 典型的试验项目及技术简介	(119)
3.5 部件级耐久性/损伤容限试验	(122)
3.5.1 试验目的	(123)
3.5.2 试验项目及考核内容	(123)
3.5.3 试验技术	(124)
3.5.4 典型部件试验	(126)
3.6 全机疲劳/耐久性和损伤容限试验	(141)
3.6.1 试验目的	(141)
3.6.2 试验规划	(141)
3.6.3 试验设计	(145)
3.6.4 无损检测	(148)
3.6.5 试验过程控制及损伤处理	(150)
3.6.6 试验安全保护	(152)
3.6.7 结构剩余强度试验	(153)
3.6.8 疲劳和损伤容限试验报告	(153)
3.7 ARJ 21-700 飞机静力/疲劳试验	(153)
3.7.1 引言	(153)
3.7.2 试验简介	(154)
3.7.3 试验流程	(155)
3.7.4 试验设备(一体化框架)	(156)
3.7.5 试验支持	(158)
3.7.6 试验规模	(159)
3.7.7 试验载荷施加方法	(159)
3.7.8 载荷谱编制	(163)
3.7.9 试验程序	(164)
3.7.10 试验适航管理	(166)
3.7.11 试验质量控制	(166)
第4章 飞机结构动强度试验	(168)
4.1 起落架试验	(168)
4.1.1 起落架落振试验	(168)
4.1.2 摆振试验技术	(177)
4.1.3 起落架机轮刚度试验	(182)
4.1.4 减摆器阻尼特性试验	(185)
4.2 冲击动力学试验	(187)

4.2.1	离散源撞击试验	(187)
4.2.2	框段坠撞试验	(199)
4.2.3	结构水平冲击试验	(203)
4.3	全机地面振动试验	(209)
4.3.1	试验目的	(209)
4.3.2	试验依据	(209)
4.3.3	试验要求	(209)
4.3.4	试验方法	(210)
4.3.5	试验程序	(213)
4.3.6	试验设备	(219)
4.3.7	ARJ 21-700 飞机全机地面振动试验	(224)
4.3.8	伺服弹性地面试验	(233)
第5章	飞行器结构热强度试验	(242)
5.1	热强度试验基本原理	(242)
5.2	热强度试验特点	(243)
5.3	热强度试验系统构成	(243)
5.4	热强度试验工作程序	(244)
5.5	热环境模拟方法	(246)
5.5.1	辐射加热	(246)
5.5.2	对流加热	(249)
5.5.3	传导加热	(251)
5.6	热强度试验控制技术	(252)
5.6.1	热强度试验控制原理	(252)
5.6.2	热强度试验控制系统构成	(253)
5.6.3	热强度试验控制方法	(254)
5.6.4	加热加载联合控制系统	(255)
5.7	热强度试验标定	(255)
5.7.1	热流密度计位置系数测定	(256)
5.7.2	热流密度损失项测定	(256)
5.8	热强度试验测量技术	(256)
5.8.1	温度测量	(256)
5.8.2	热流密度测量	(258)
5.8.3	高温应变测量	(259)
5.8.4	位移测量	(260)
5.9	典型结构热强度试验	(263)
5.9.1	结构传热试验	(263)
5.9.2	结构瞬态热应力/热刚度试验	(265)
5.9.3	结构热屈曲试验	(269)
5.9.4	结构热疲劳试验	(270)

5.9.5 结构高温蠕变试验	(271)
第6章 振动噪声环境下结构强度试验	(273)
6.1 振动环境试验	(273)
6.1.1 振动环境试验要求	(273)
6.1.2 振动环境试验方法	(273)
6.1.3 振动环境试验实例	(274)
6.2 振动与温度环境试验	(274)
6.2.1 振动与温度环境试验要求	(274)
6.2.2 振动与温度环境试验方法	(274)
6.2.3 振动与温度环境试验实例	(275)
6.3 振动与静力载荷环境试验	(276)
6.3.1 振动与静力载荷环境试验要求	(276)
6.3.2 振动与静力载荷环境试验方法	(277)
6.3.3 振动与静力载荷环境试验实例	(279)
6.4 结构声疲劳试验	(280)
6.4.1 结构声疲劳试验要求	(280)
6.4.2 结构声疲劳试验方法	(281)
6.4.3 声疲劳加速试验方法	(284)
6.4.3 声疲劳试验实例	(285)
6.5 噪声与温度环境试验	(285)
6.5.1 噪声与温度环境试验设计	(286)
6.5.2 噪声与温度试验方法	(286)
6.5.3 噪声与温度环境试验实例	(288)
6.6 振动—噪声—温度环境试验	(290)
6.6.1 振动—噪声—温度环境试验目的	(290)
6.6.2 振动—噪声—温度环境试验方法	(290)
6.6.3 振动—噪声—温度环境试验要求	(291)
6.7 动态疲劳试验	(294)
6.7.1 动态疲劳试验的一般要求	(294)
6.7.2 试验设备及测量仪器	(295)
6.7.3 试验项目和试验程序	(297)
6.7.4 试验过程	(297)
6.7.5 试验数据记录和处理	(299)
6.8 弹舱结构空腔噪声试验	(300)
6.8.1 弹舱结构空腔噪声试验要求	(300)
6.8.2 空腔共鸣试验方法	(300)
6.9 油箱结构晃振试验	(301)
6.9.1 油箱结构晃振试验要求	(301)
6.9.2 油箱结构晃振试验方法	(301)

6.9.3 油箱结构晃振试验实例	(302)
第7章 复合材料结构试验	(303)
7.1 “积木式”验证试验方法	(304)
7.2 材料许用值	(305)
7.2.1 预浸料类材料许用值	(305)
7.2.2 夹层结构类材料许用值	(306)
7.2.3 胶黏剂类材料许用值	(307)
7.3 设计许用值	(307)
7.3.1 预浸料类设计许用值试验	(307)
7.3.2 夹层结构疲劳损伤特性试验	(313)
7.4 连接试验	(313)
7.4.1 复合材料连接结构的特殊性	(313)
7.4.2 机械连接结构的“积木式”试验	(315)
7.4.3 胶结连接结构“积木式”试验	(322)
7.5 稳定性试验	(328)
7.5.1 元件级稳定性试验	(329)
7.5.2 壁板稳定试验	(330)
7.5.3 盒段级稳定性综合验证试验	(334)
7.5.4 部件及全尺寸结构稳定性试验	(335)
7.6 耐久性/损伤容限试验	(335)
7.6.1 缺陷尺寸确定原则和方法	(335)
7.6.2 各种损伤形式的模拟	(338)
7.6.3 复合材料结构疲劳—损伤门槛值确定方法	(339)
7.6.4 耐久性/损伤容限验证要求	(340)
7.6.5 耐久性/损伤容限验证实例	(342)
第8章 飞机结构地面强度试验损伤检测	(344)
8.1 飞机地面强度试验损伤检测概况	(344)
8.1.1 地面强度试验损伤检测的特点	(344)
8.1.2 各阶段损伤检测目的	(345)
8.1.3 地面强度试验损伤检测类型	(345)
8.1.4 地面强度试验中损伤检测的一般要求	(346)
8.1.5 地面强度试验中损伤检测工作的组织与实施	(347)
8.2 结构地面强度试验中的无损检测方法 with 选取原则	(349)
8.2.1 目视检测	(349)
8.2.2 涡流检测	(349)
8.2.3 液体渗透检测	(349)
8.2.4 磁粉检测	(350)
8.2.5 射线照相检测	(350)
8.2.6 超声检测	(351)

8.2.7 敲击检测技术	(353)
8.2.8 机械阻抗及谐振检测	(353)
8.2.9 红外热成像检测	(354)
8.2.10 激光剪切散斑检测	(354)
8.2.11 声发射实时监测	(354)
8.2.12 损伤检测方法选择的原则	(355)
8.3 飞机金属结构的损伤检测	(356)
8.3.1 多层搭接结构	(356)
8.3.2 接头结构	(361)
8.3.3 焊接结构	(363)
8.3.4 声发射监测技术	(364)
8.4 复合材料结构的损伤检测	(366)
8.4.1 复合材料的分类及缺陷形式	(366)
8.4.2 强度试验中典型复合材料结构的无损检测技术	(366)
8.5 断口分析	(374)
8.5.1 断裂类型	(375)
8.5.2 断裂失效原因	(377)
8.5.3 断裂机理与典型形貌	(377)
8.5.4 断口分析方法	(381)
8.5.5 分析项目与目的	(381)
8.5.6 断口分析样品的制备	(382)
8.5.7 裂纹源及裂纹扩展方向	(382)
8.5.8 疲劳寿命反推	(383)
8.5.9 复合材料断口宏观分析	(387)
第9章 飞机结构地面强度试验过程质量控制	(389)
9.1 飞机结构地面强度试验过程控制	(389)
9.1.1 试验策划质量控制	(389)
9.1.2 试验设计质量控制	(391)
9.1.3 试验准备质量控制	(392)
9.1.4 试验实施质量控制	(394)
9.1.5 试验总结质量控制	(396)
9.1.6 军代表对飞机地面结构强度试验的质量监督	(397)
9.2 飞机结构地面强度试验风险管理	(398)
9.2.1 飞机地面结构强度试验风险识别	(398)
9.2.2 飞机地面结构强度试验风险估计	(398)
9.2.3 飞机结构地面强度试验风险应对	(400)
9.2.4 飞机结构地面强度试验风险监控	(400)
9.3 飞机结构地面强度试验计量保证	(401)
9.3.1 组织机构与职责	(401)

9.3.2	计量器具管理	(401)
9.3.3	专用测试设备管理	(402)
9.3.4	试验现场管理	(402)
9.4	飞机结构地面强度试验适航管理	(402)
9.4.1	试验产品的适航批准标签	(403)
9.4.2	试验大纲审批	(403)
9.4.3	试验设施制造符合性检查	(403)
9.4.4	试验目击	(403)
9.4.5	试验报告审批	(403)
参考文献		(404)

第1章 概述

飞机被称为现代工业技术之花，研制过程技术复杂、工程浩大、费用不菲。其中，作为飞机基础平台的飞机结构，在飞机的研发中占据非常重要的地位。

自莱特兄弟发明第一架飞机至今，飞机结构地面强度试验贯穿于飞机发展的历史。随着飞机的性能要求迅速提高，以及飞机所经历的载荷、环境日趋严苛，飞机结构地面强度试验在飞机研制过程中的重要性日益明显。飞机结构使用中出现问题，特别是灾难性事故促进了飞机结构地面强度试验学科的不断完善和试验技术的不断发展。

现代飞机结构的研制普遍采用“积木式”验证策略，即从构成飞机结构的材料和元件性能测试开始，逐级对结构典型细节、组件、部件和全机结构的设计和分析进行充分的试验验证。

飞机地面强度试验的意义体现在以下几个方面：

- ①为飞机设计资料与设计工具提供试验依据；
- ②验证飞机结构设计分析的方法和模型；
- ③为飞机的首飞和持续试飞提供强度依据；
- ④为飞机结构定寿延寿及编制维护大纲提供试验依据；
- ⑤是型号定型或适航取证的必要条件之一。

近年来，计算分析和虚拟试验技术发展迅速，提升了数字化试验的能力，对物理试验进行了有益的补充。现行的军机规范和民用飞机适航条例均明确要求，飞机型号定型或适航取证的必要条件是通过了全尺寸结构验证试验。

1.1 飞机设计思想的演化历程

飞机地面强度试验是随着飞机设计思想的演化而不断发展和完善的，而飞机结构的设计思想来源于飞机的使用实践。

在飞机设计中首先引入的强度概念是始于20世纪30年代的静强度设计思想，那时的飞机结构都按静强度设计。随着飞机飞行速度和战术技术性能要求的提高，要求采用阻力系数较小的薄翼型，使气动弹性问题变得突出起来，因此要求结构不仅要具有足够的静强度，而且还应具有足够的刚度，因此提出了刚度设计概念。

20世纪50年代初期，由于英国的“彗星”号喷气客机接连出现疲劳引起的灾难性事故，使设计人员认识到疲劳问题的重要性，增加了疲劳（安全寿命）设计概念。20世纪60年代末—70年代初出现的多起飞机机体断裂事故，使设计人员进一步认识到疲劳设计还不能保证安全，从而增加了以断裂力学为基础的损伤容限设计概念。1975年以后，美国空军（USAF）提出了用耐久性（经济寿命）设计概念来取代原来的疲劳（安全寿命）设计思想，并在这一基础上提出了飞机结构完整性大纲和飞机强度规范。

随着科学技术的高速发展,飞机结构越来越复杂,包括电子元件、零构件等越来越多,使用环境越来越复杂。而且飞机的各项性能指标要求有了很大的提高,传统的抗疲劳设计如安全寿命设计、破损安全设计以及损伤容限设计等确定性方法都不足以保证飞机结构的安全性和可靠性,只有充分考虑影响结构安全的各种因素的随机性,用概率分布函数或者随机过程描述,并用概率分析方法建立可靠性模型,分析结构的破坏概率,保证结构的破坏危险率或者破坏概率在其使用寿命期内小于给定指标,才能在设计上更合理地评价飞机结构的安全性与可靠性,从而又提出了可靠性设计思想。我国军用和民用飞机的设计也开始采用贯穿可靠性的耐久性/损伤容限设计原则,经过“七五”、“八五”、“九五”和正在进行的研究项目,已取得了大量的成果,有些成果已应用于工程实践。从国内外飞机结构设计思想的发展来看,不管哪种设计思想,避免飞机结构出现灾难性疲劳破坏是设计最重要的目标之一。

随着飞机结构静强度设计技术、疲劳强度试验技术的发展,飞机结构的安全性得到了显著提高。而由于飞机在飞行中的气动弹性不稳定性(如飞机颤振和伺服颤振)、在地面滑行时的动力不稳定性(如起落架摆振)以及冲击载荷所造成的飞机结构破坏和飞机灾难性事故,使设计人员认识到静强度和疲劳强度设计无法从根本上解决飞机结构振动疲劳破坏或动强度破坏的问题。因此,在飞机结构设计中提出了动强度设计的思想。

结构热强度设计概念源于航天器的设计。随着飞行马赫数的逐步提高以及高超声速飞机的发展,由气动加热导致的机体结构强度问题越来越突出,因此引入了飞机结构热强度设计思想。热强度设计主要是依据在飞机服役过程中出现的热强度的具体问题开展的针对性研究和设计,例如,YF-12蒙皮在热强度试验中出现了撕裂或卷曲,为减缓热应力设计了褶皱蒙皮;SR-71翼前缘处出现了热屈曲问题后,根据热屈曲强度设计思想对翼前缘进行了局部改进设计;X-15尾翼出现了热颤振事故后,开始对热颤振问题进行了较为集中的研究。随后,在飞机结构热强度设计方面提出了热防护结构设计思想,并制定了针对热结构/热防护结构的设计标准,基本形成了飞机结构热强度设计体系。

1.2 飞机地面强度试验发展概况

目前,飞机地面强度试验主要包括了静强度、疲劳、动力学和热强度等学科。随着飞机研制对强度验证需求的不断提高,各学科的试验技术也得到了不断发展和完善。

1.2.1 静强度试验发展概况

飞机结构静强度试验是验证飞机结构设计与制造的最重要的手段之一,是最早付诸实施的飞机地面强度试验类型,其试验结果也一直得到设计师们的重视和信赖。

1903年,莱特兄弟在放飞他们的“飞行者”号前,将飞机支撑于两个机翼的翼尖,并给飞机添加了440lb^①的重物,完成了承载能力验证试验,这是有记载的首次全尺寸飞机结构静强度试验。

在随后的各型飞机研发过程中,即使试验设施与试验条件非常简陋,工程师们总是想

^① 1lb = 0.454kg。