

闫楚良 苏开鑫 编著

# 飞机起落架 安全寿命与损伤容限设计



航空工业出版社

# 飞机起落架 安全寿命与损伤容限设计

闫楚良 苏开鑫 编著

航空工业出版社

北京

## 内容提要

本书在内容上：一是突出了起落架结构耐久性设计的重要性，详细介绍了起落架疲劳耐久性的各种分析手段和安全寿命与损伤容限保安全相结合的设计理念、分析方法、试验验证要求和实施技术。二是重点深入地介绍了应变法测量起落架疲劳载荷谱的实测技术，包括不同类型起落架结构的应变计布局和应变电桥设计；在试验室内外地面标定试验装置设计和标定方法；阐明了载荷标定和飞行实测载荷谱数据的统计、分析、处理及各种载荷谱的编排方法。本书内容丰富、系统全面，并有具体机型的起落架作为实例加以说明，便于理解和掌握。

本书可作为飞机设计研究所、航空工厂和航空公司从事起落架疲劳设计和疲劳试验的技术人员及高等学校航空、机械专业研究生参考使用。

## 图书在版编目 (C I P) 数据

飞机起落架安全寿命与损伤容限设计 / 闫楚良, 苏开鑫编著. —北京: 航空工业出版社, 2011. 12

ISBN 978-7-80243-894-1

I. ①飞… II. ①闫… ②苏… III. ①起落架—耐用性—研究 ②起落架—安全设计—研究 IV. ①V226

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 277769 号

## 飞机起落架安全寿命与损伤容限设计

Feiji Qiluoja Anquan Shouming Yu Sunshang Rongxian Sheji

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: 010-64815615 010-64978486

北京方册印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2011 年 12 月第 1 版

2011 年 12 月第 1 次印刷

开本: 787 × 960 1/16

印张: 21.25 字数: 388 千字

印数: 1—1000

定价: 58.00 元

# 前 言

起落架是飞机结构的一个重要受力部件，在使用过程中，它重复经受着陆冲击、地面滑跑和地面操作飞机而产生的各种载荷，如飞机发动机试车载荷、机轮刹车载荷、飞机转弯载荷、前轮静态操纵飞机及牵引等载荷的作用。这些受载情况，在每一次地空地飞行过程中大多数都会重复出现，而且每个飞行起落出现这些载荷的峰谷值大小和频次都不相同，带有明显的随机性。正因为这些一个起落接一个起落的重复载荷作用，导致了起落架及其与机体相连接结构的疲劳破坏，对飞机的使用安全造成严重威胁。据统计，飞机起落架事故约占全机总事故的40%。美国空军研究了1968年至1978年期间飞机机体和起落架结构的328起破坏事故，统计研究表明，涉及起落架结构的事故竟达65%之多。

现今飞机起落架设计的核心是如何才能实现高性能、长寿命、高可靠性和低维修成本的问题。因为，只有实现高性能才能控制起落架的着陆与滑跑冲击载荷（该内容本书不作详细阐述）；也只有实现长寿命、高可靠性和低维修成本，才能保证飞机的使用安全。同时使其具有市场竞争能力。

长期以来，由于起落架为单传力路径结构，另外起落架结构大多采用高强度钢制造，高强度钢材料与铝合金材料的结构相比，裂纹检出概率要低、裂纹扩展速率要高。所以，起落架一直采用安全寿命设计的定寿思想，而回避损伤容限设计。但从开展损伤容限设计的“三要素”角度看，起落架结构与其他飞机结构部件相比，可检性好是它的最大优势。在场站一级就可以把起落架从飞机上拆卸下来，分解成一个个的零构件进行无损探伤检查，发现裂纹可以及时修理或更换，这就具备了开展损伤容限设计的重要条件。只要我们充分发挥其检查方便的优势，特别在材料选择、结构布局、应力水平控制、细节设计和加工工艺改进等方面全力采取相应措施，并在提高其损伤许用值、改善裂纹扩展阻抗性能方面做好工作，使其具有一定的裂纹缓慢扩展特性，把起落架实现损伤容限设计的关键技术把握好，使起落架实现以安全寿命设计思想定寿，并辅以损伤容限设计作为进一步保安全的措施是完全可能的。基于这种考虑设计

的起落架只会比按单纯安全寿命思想设计的起落架更好、更安全。事实上，很多飞机设计厂所的设计师们都是这样做的，只是不提损伤容限设计罢了。

从20世纪80年代至今，各个飞机设计厂所在飞机起落架结构定寿研究过程中，结合我国的国情，对传统的安全寿命设计不断进行了修正和扩充。本书把这些设计思想和做法加以总结，形成了以下的起落架定寿方法：

(1) 在起落架结构设计阶段就要认真贯彻结构耐久性设计，在材料选择、细节设计、加工工艺以及表面强化处理等诸多方面进行耐久性控制，使起落架结构具有较长的裂纹形成寿命，而且一旦形成工程可检裂纹后还具有一定的缓慢扩展特性。

(2) 在起落架结构疲劳试验过程中，试件关键部位形成工程可检裂纹时，没有把它作为试验寿命终止的判据，而是允许进行有限次的修理（一般修理为1~2次，而且这种修理方法是外场能实现的），修理完好后继续进行疲劳试验，并且把修理试验寿命计入总寿命中，采用疲劳分散系数4除以试验总寿命，给出使用寿命。

(3) 在安全寿命设计中增加了用损伤容限设计保安全的设计做法。因此，要求在疲劳试验过程中，在适当时机进行裂纹扩展试验。在达到或接近设计目标寿命数时进行含裂纹结构的剩余强度和剩余刚度试验。

(4) 利用裂纹扩展试验寿命数除以分散系数2作为检查周期，通过剩余强度试验证明含损伤的起落架结构仍具有承受100%使用载荷不破坏的能力。

经过二十多年多个新、老飞机起落架的定寿、延寿工作实践，证明这种设计思想是安全可靠的、是符合实情的，也是很成功的。美国2005年11月颁布的最新标准《飞机结构完整性大纲》MIL-STD-1530C (USFA) 5.1.3.5.2条中明确提出：对所有采用安全寿命概念设计的结构件（如起落架结构和旋翼机的动力构件），也应开展损伤容限评估工作。

解决起落架结构定寿、延寿问题的先决条件就是要编制出符合实际使用的载荷谱（即我们常说的实测谱），以此作为安全寿命和损伤容限分析及全尺寸结构疲劳耐久性损伤容限试验的依据。为了更好地推动和深化起落架载荷谱实测与编谱研究工作，我们以自己的研究成果为主，结合收集到的国内外有关测谱与编谱方面的研究成果，在本书中详细介绍了采用应变法测量起落架载荷谱的原理和在试验室内外地面标定的试验方法；阐明了载荷标定试验数据和实测到的载荷谱数据的统计处理方法。

采用应变法测量载荷时，由于应变计粘贴误差和载荷施加过程中各种因素的影响，各载荷分量和各测量桥路之间的交互影响总是存在的。如何将各载荷分量和各测量桥路之间的交互影响减小至最低程度，尤其是对实测起落架载荷来说更为显得重要。本书提出的采用逐步回归分析后退法作为变量筛选的主要依据，以此确定进入多元回归方程的回归变量，以达到建立最优载荷方程的目的。此外在本书中，从载荷标定试验开始到载荷谱的编制全过程，我们都采用了国内多个机种的载荷谱实测、编谱作为例子加以验证介绍，目的是便于读者理解和掌握。

本书共分十二章，在内容上，一是突出了结构耐久性细节设计思想的重要性和设计方法；二是重点深入介绍起落架疲劳载荷谱的实测技术、数据处理和载荷谱的编制方法；三是详细介绍起落架疲劳耐久性使用寿命的各种分析手段和安全寿命与损伤容限保安全相结合的设计理念、分析方法、试验验证要求和实施技术。本书在编写过程中，参考了国内外一些相关文献资料和飞机设计厂所的某些型号飞机起落架的数据，我们在本书最后的参考文献中均已列出，对此我们表示感谢。

空军可靠性办公室的李东炜、纪敦、傅志高、董欧等同志参加了本书的编写，还有孟繁沛、张书明、刘克格、孟祥民、杨方飞、周福强、田兆锋等同志对本书的编写提供大力支持和帮助，在此我们表示诚挚的谢意。

由于作者编写水平有限，书中若有不妥或错误之处，敬请批评指正。

编者著

2011年9月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 起落架疲劳问题的特殊性 .....	1
1.2 起落架载荷谱实测和编谱技术回顾 .....	3
1.3 耐久性设计是提高起落架使用寿命的重要手段 .....	5
1.4 安全寿命设计定寿损伤容限保安全的设计更符合实情 .....	6
<b>第 2 章 起落架设计外载荷及结构受力分析</b> .....	9
2.1 起落架的着陆撞击载荷 .....	10
2.2 起落架的外载荷情况 .....	10
2.3 起落架的结构形式和受力分析 .....	11
2.3.1 支柱式主起落架 .....	11
2.3.2 摇臂式前起落架 .....	13
2.3.3 起落架受力分析 .....	14
<b>第 3 章 起落架耐久性设计思想与寿命设计准则</b> .....	17
3.1 耐久性设计的基本定义和术语 .....	17
3.1.1 耐久性 .....	17
3.1.2 结构细节 .....	17
3.1.3 主导疲劳裂纹 .....	17
3.1.4 确定性裂纹扩展 .....	17
3.1.5 裂纹缓慢扩展 .....	18
3.1.6 失效 .....	18
3.1.7 使用寿命 .....	18
3.1.8 经济寿命 .....	18
3.1.9 耐久性极限 .....	19
3.1.10 经济修理极限 .....	19

3.2	耐久性设计基本概念	19
3.2.1	耐久性设计的必要性和可行性	19
3.2.2	起落架耐久性设计内容和设计思想	20
3.2.3	耐久性设计准则	21
3.2.4	耐久性设计要求	23
3.2.5	关于初始检查大纲的制定	32
<b>第4章</b>	<b>结构细节耐久性设计</b>	<b>35</b>
4.1	起落架结构细节耐久性设计意义与流程	35
4.1.1	必要性分析	35
4.1.2	结构细节耐久性设计一般流程	36
4.2	使用材料选择与制造工艺控制	40
4.2.1	材料选择	40
4.2.2	材料与工艺的控制	41
4.3	起落架结构细节耐久性设计的基本原则与方法	44
4.3.1	起落架结构细节耐久性设计分类	44
4.3.2	起落架结构细节耐久性设计的基本方法	45
4.4	起落架典型结构细节耐久性设计方法	50
4.4.1	起落架耳片接头的主要形式	50
4.4.2	起落架耳片接头裂纹形式和开裂原因	50
4.4.3	耳片接头耐久性设计技术	53
4.4.4	销、轴类元件耐久性设计	55
4.4.5	筒体件细节耐久性设计	56
4.5	起落架结构强化方法	58
4.5.1	孔冷挤压原理和工艺过程	58
4.5.2	孔冷挤压参数选择	58
4.5.3	干涉螺接	59
4.5.4	喷丸强化	61
4.5.5	其他强化方法	63
4.6	起落架结构抗腐蚀耐久性设计	64
4.6.1	起落架结构的腐蚀类型	64
4.6.2	抗腐蚀材料的选择和控制	66



4.6.3	改进细节设计和选择抗腐蚀成形工艺 .....	67
4.6.4	采用合理的涂(镀)层防护系统 .....	70
<b>第5章</b>	<b>载荷谱实测及其数据的统计处理 .....</b>	<b>72</b>
5.1	概述 .....	72
5.2	载荷谱实测参数 .....	74
5.3	载荷实测的应变计布置和地面标定试验 .....	75
5.3.1	应变计的布置及分析 .....	75
5.3.2	起落架应变计粘贴位置选择 .....	76
5.3.3	地面标定试验技术 .....	83
5.4	载荷谱实测数据的统计处理 .....	99
5.4.1	说明 .....	99
5.4.2	实测数据的预处理 .....	100
5.4.3	实测参数雨流法计数统计 .....	114
5.5	载荷谱实测数据统计处理实例 .....	121
5.5.1	某型飞机起落架载荷谱实测数据的预处理 .....	121
5.5.2	确定起落架过载 .....	125
5.5.3	峰谷值检测与二级低载截除 .....	126
5.5.4	实测数据典型载荷段的划分 .....	127
<b>第6章</b>	<b>疲劳载荷谱编制 .....</b>	<b>135</b>
6.1	概述 .....	135
6.2	起落架载荷谱的基本组成 .....	135
6.2.1	主起落架疲劳载荷谱 .....	135
6.2.2	前起落架疲劳载荷谱 .....	136
6.2.3	各个分谱载荷历程特点分析 .....	136
6.3	载荷谱的编制方法 .....	148
6.3.1	依据规范结合经验数据计算编制设计使用载荷谱 .....	148
6.3.2	依据实测统计数据编制各个载荷分谱 .....	158
6.3.3	过载谱到载荷谱峰谷值的计算 .....	166
6.4	起落架载荷总谱的编排 .....	167
6.4.1	一般说明 .....	167

6.4.2	全停起落谱和非全停起落谱 .....	168
6.4.3	飞·续·飞谱 .....	168
6.4.4	起落架载荷谱编制的基本要求 .....	172
6.4.5	起落架疲劳试验飞·续·飞程序块谱实例 .....	174
6.5	实测载荷谱转换成疲劳试验谱的损伤等效折算方法 .....	176
6.5.1	方法简述 .....	176
6.5.2	疲劳载荷谱损伤等效折算公式 .....	176
6.5.3	平均应力相同的载荷谱简化 .....	179
6.5.4	平均应力不同但最小应力相同的载荷谱简化 .....	180
6.5.5	已知应力比 $R$ 的载荷谱简化 .....	182
6.5.6	着陆撞击情况载荷谱简化 .....	183
6.5.7	加载次数和载荷值的等效当量修正 .....	186
6.5.8	裂纹扩展载荷谱的损伤当量折算 .....	186
6.5.9	损伤等效当量折算的一般原则 .....	187
<b>第7章</b>	<b>疲劳耐久性分析</b> .....	<b>189</b>
7.1	概述 .....	189
7.2	结构细节耐久性分析方法 .....	192
7.2.1	细节耐久性分析准则 .....	192
7.2.2	结构细节耐久性分析方法 .....	193
7.2.3	标准 $S-N$ 曲线方程 .....	200
7.2.4	起落架常用材料的 $S_m^0$ 和 $S$ 值的确定 .....	208
7.2.5	标准 $S-N$ 曲线方程的适用范围 .....	209
<b>第8章</b>	<b>结构细节疲劳额定强度许用值确定</b> .....	<b>211</b>
8.1	概述 .....	211
8.2	依据疲劳试验数据确定 $LDFR_0$ .....	211
8.2.1	对全尺寸疲劳试验的要求 .....	212
8.2.2	试验载荷谱一级化处理 .....	212
8.2.3	对疲劳试验寿命进行可靠性处理 .....	214
8.2.4	试验表征的主要构件 $LDFR_0$ 求解 .....	215
8.2.5	主要构件上相似细节试验表征 $LDFR_0$ .....	217

8.3	依据飞行数据确定 $LDFR_0$ 的方法	218
8.3.1	依据飞行数据确定 $LDFR_0$ 方法	219
8.3.2	依据飞行数据确定 $LDFR_0$ 的实例	219
8.4	新机起落架结构 $LDFR$ 的确定	220
8.4.1	原型机各主要构件 $LDFR_0$ 明细表	220
8.4.2	用类比法求解新机 $LDFR$ 的实例	221
8.5	用分析法确定 $LDFR_0$	224
8.5.1	针对 $N_0$ 及 $R_0$ 不同引入的修正系数 $K_1$ 与 $K_2$	225
8.5.2	$K_1$ 、 $K_2$ 应用举例	226
8.5.3	构件疲劳额定强度值系数 $R_c$	227
8.5.4	开孔细节的 $LDFR_0$	228
8.5.5	缺口细节的 $LDFR_0$	229
8.5.6	螺栓螺纹细节的 $LDFR_0$	229
8.5.7	耳片细节的 $LDFR_0$	235
8.6	疲劳额定强度许用值 $LDFR$ 的确定	242
8.6.1	满足要求的 $LDFR$ 所在范围	242
8.6.2	疲劳额定强度截止值 $LDFR_{max}$	243
8.6.3	疲劳额定强度许用值的确定	245
8.7	任意可靠度下的细节疲劳额定强度值	246
8.7.1	任意可靠度下可靠性寿命公式	246
8.7.2	任意可靠度下的细节疲劳额定强度值	247
8.8	应用实例	247
8.8.1	原有機種主起落架破坏细节的 $LDFR_0$ 确定	248
8.8.2	新飞机主起落架同一细节的应力谱	249
8.8.3	新机起落架分析细节的疲劳额定许用值	250
8.8.4	细节损伤度计算	251
8.8.5	计算 $[S_{max0}]$	252
8.8.6	新机起落架分析细节的疲劳裕度	252
8.8.7	分析法确定分析细节的 $LDFR_0$ 值	252
<b>第9章</b>	<b>弯扭联合载荷作用下起落架疲劳寿命分析方法</b>	<b>254</b>
9.1	概述	254

9.2	复合应力疲劳强度准则 .....	254
9.3	当量应力集中系数 .....	257
9.4	寿命估算步骤 .....	259
9.5	应用实例 .....	260
<b>第 10 章</b>	<b>损伤容限保安全的设计原理与分析方法 .....</b>	<b>265</b>
10.1	概述 .....	265
10.2	损伤容限设计的一般原理和方法 .....	267
10.2.1	损伤容限设计的一般原理 .....	267
10.2.2	损伤容限控制计划的主要环节 .....	269
10.2.3	民用航空条例 CCAR 25.571 中的损伤容限评定要求 .....	269
10.2.4	起落架损伤容限设计的一般要求 .....	271
10.2.5	结构维修大纲的建立和评估 .....	272
10.3	剩余强度分析方法 .....	276
10.3.1	剩余强度分析基本原理 .....	276
10.3.2	剩余强度许用值 .....	277
10.3.3	常见起落架结构的开裂模型 .....	279
10.3.4	剩余强度计算分析步骤 .....	282
10.3.5	剩余强度分析实例 .....	284
10.4	裂纹扩展分析方法 .....	286
10.4.1	由损伤容限特性图预测裂纹扩展寿命 .....	287
10.4.2	线性累计法预测裂纹扩展寿命 .....	289
<b>第 11 章</b>	<b>全尺寸起落架结构疲劳定寿试验要求与实施技术 .....</b>	<b>298</b>
11.1	疲劳定寿试验涉及的有关名词概念说明 .....	298
11.1.1	经济寿命 .....	298
11.1.2	强度与刚度准则 .....	299
11.1.3	疲劳分散系数 .....	299
11.1.4	工程可检裂纹 .....	300
11.1.5	不能经济修理的极限裂纹尺寸 .....	300
11.1.6	耐久性疲劳试验 .....	300
11.2	耐久性疲劳试验内容 .....	301

11.3 耐久性疲劳试验的要求 .....	301
11.3.1 关于试件的数量 .....	301
11.3.2 试验前应对结构进行细节耐久性分析评估 .....	302
11.4 起落架全尺寸结构耐久性疲劳试验 .....	302
11.4.1 试验件支持 .....	302
11.4.2 试验载荷谱及加载方法 .....	303
11.4.3 试验项目及顺序 .....	303
11.4.4 试验报告 .....	307
<b>附录:带可靠性指标的使用寿命 .....</b>	<b>309</b>
1 建立在对数正态分布基础上的可靠性寿命 .....	309
1.1 仅按存活率(可靠度)要求决定使用寿命 .....	309
1.2 按存活率(可靠度)和置信度要求决定使用寿命 .....	312
2 建立在双参数 Weibull 分布基础上的可靠性寿命 .....	314
<b>参考文献 .....</b>	<b>322</b>

# 第 1 章 绪论

## 1.1 起落架疲劳问题的特殊性

起落架是飞机结构重要的受力部件之一，除用在地面支持飞机停放外，主要承受飞机从地面起飞升至空中，完成飞行任务后又回到地面，经历一个地空地飞行起落中的某些任务段产生的各种载荷。它包括：

(1) 地面任务段中的牵引、滑行、发动机试车、机轮刹车、飞机打地转和转弯等情况产生的各种载荷；

(2) 起飞任务段中的发动机试车、滑跑、收放起落架等情况产生的各种载荷；

(3) 着陆任务段中的放下起落架、着陆冲击、着陆滑跑、机轮刹车、飞机转弯等情况的各种载荷。

这些受载情况在每次地空地飞行时都存在。但是每个飞行起落出现这些载荷的峰谷值大小和频次都不相同，带有明显的随机性。正因为这些一个起落接一个起落的重复载荷作用，导致了起落架及其与机体相连结构的疲劳破坏，对飞机的使用安全造成严重威胁。据统计，飞机起落架事故约占全机总事故的 40%，事故的主要表现是结构出现裂纹和疲劳断裂。例如，20 世纪 70 年代前后，起落架在服役的几种飞机中事故频繁出现。外场调查表明，几种服役飞机起落架结构在 700 ~ 1000 个起落内都检查出有裂纹存在，起落架在使用过程中折断的事故也时有发生。某型飞机前起落架缓冲支柱充气嘴部位就发生过断裂破坏，而且还不止一架飞机，已经严重影响到现役飞机的使用出勤率。究其原因，主要是过去的飞机设计基本上是按静强度要求设计，没有考虑结构的抗疲劳和使用寿命要求。

和飞机结构其他部件的疲劳问题相比较，起落架结构的疲劳问题有它自己的特殊性。首先从起落架结构设计来说，一般情况下它都是单传力路径的静定结构，因此它不能像机体结构那样设计成破损安全结构（多传力途径结构或止裂结构），而是最多只能设计成缓慢裂纹扩展结构。能否做到这一点，要看起落架使用材料的疲劳特性和结构的工作应力水平。但是起落架选用的材料往往都采用高强度合金钢，甚至采用超高强度钢制造。这种材料一般有三大特点：

缺口敏感、应力腐蚀和氢脆。这些特点降低了高强度钢的疲劳性能。

起落架零件在制造时，因操作不当引起的划伤或刀痕和外场使用过程中的擦伤，都可能会由于材料缺口敏感而造成应力集中源、裂纹源，有的甚至会导致疲劳破坏。高强度钢制造的零件表面保护层或镀层在使用中一旦遭到损坏、擦伤或剥落，在腐蚀环境中容易产生腐蚀、应力腐蚀，乃至形成裂纹而导致腐蚀疲劳破坏。

高强度钢的氢脆破坏是由起落架在制造或修理过程中，采用酸洗、电解除油及电镀等工艺造成的。在此环节中，氢原子会进入钢件表面，并向内部扩散，被吸收的氢原子具有向应力集中部位扩散和移动的行为。当氢原子变成氢分子时产生高压，使钢组织破坏，最终形成延迟断裂。原本采用高强度钢烧结起落架的目的是为了减轻重量，或者说在相同的重量下可以降低价格的应力水平——提高裂纹形成寿命。但是，如果采用成形的工艺不好、加工表面质量不高，这样不但是一种浪费，而且会事与愿违，反而降低了抗疲劳性能。

与飞机的机翼、尾翼所承载荷不同，起落架载荷有它自己的特点，作用在起落架机轮上的载荷在地面坐标系中有三个方向分力，而且这三个分力的峰谷值都不是同一时刻出现的。此外在受力过程中缓冲支柱（或缓冲器）还在运动（压缩或伸展），起落架所受的载荷工况也比较复杂，通常可分为着陆撞击载荷、地面滑跑载荷、地面运行操纵载荷三大类。而且每一种载荷工况变化历程都与缓冲器行程相对应。每一个地空地飞行起落的载荷工况类别虽然相同，但是载荷的大小和出现的频次并不相同，尤其是着陆撞击载荷就更带有随机性。因此，必须通过飞行实测，获得起落架载荷与缓冲器行程的时间历程数据，用经过统计处理过的载荷与缓冲器行程数据编制起落架的实测载荷谱，进行起落架疲劳耐久性分析与试验，最终确定起落架结构的使用寿命。

自 20 世纪 80 年代开展飞机结构抗疲劳设计和全尺寸结构疲劳试验研究以来，我国外场飞机起落架的使用情况就大不一样，起落架因疲劳问题出现的故障有了非常明显的降低，并且新研飞机起落架寿命已有很大的提高。军用飞机起落架的使用寿命已经达到了 5000 次起落，有的教练机已经达到 8000 次起落的寿命指标要求。这些长足的进步和成绩的取得主要来自以下几个方面：

(1) 在设计方面，新研飞机起落架主动贯彻执行了结构细节耐久性设计技术（在役飞机起落架也按耐久性要求进行了设计改进），开展了起落架疲劳载荷谱的实测与编谱技术、寿命预测方法及全尺寸结构疲劳试验的研究，开展了起落架损伤容限保安全的设计和试验评定研究，而且这些研究都是结合具体的飞机起落架实际需要进行的，针对性、实用性都很强。

(2) 在生产制造过程中采用了有利于提高抗疲劳的加工工艺，注意了结构原始疲劳质量的控制和提高。

(3) 使用单位按照设计部门制定的起落架外场使用维护检查大纲、检查周期、重点检查部位与维修方法，进行精心的使用维护。

以上三个方面是实现起落架长寿命、高可靠性、低维修成本的关键，只有设计方、生产制造方、使用方结合在一起协同工作，就可以使飞机起落架使用寿命上一个新台阶。

## 1.2 起落架载荷谱实测和编谱技术回顾

编制一个合理的、尽可能反映预期使用情况、符合起落架实际受载经历的疲劳载荷谱，对起落架结构疲劳定寿有着十分重要的意义。用于疲劳耐久性分析和疲劳试验的载荷谱，任何偏重或偏轻的谱都会使给出的寿命偏离实际情况。

起落架疲劳载荷谱编制通常有两种渠道和方法：

一种是采用电阻应变计实测法。测量起落架在飞行使用中经历的各种载荷与缓冲器行程的时间历程，将获得的实测数据经过统计分析处理后得到可供编谱的数据，这种谱通常称之为实测谱。

另一种就是所谓的计算分析谱。鉴于每一个飞行起落典型任务段各受载荷情况基本相同这一特点，就有可能通过以往的同类飞机起落架实测统计分析数据和通过对载荷谱编制规范的有关规定，吸取以往各个机型起落架定寿的成功经验和教训。经综合分析后，编制一个基本上能代表起落架使用经历的设计载荷谱，为设计阶段起落架结构进行疲劳耐久性评估。

原则上说，起落架疲劳载荷谱应该通过飞行实测与统计分析，获取大量实测载荷及其他有关数据后才能编谱。但是这种实测不仅需要较高的费用，而且难度也比较大。只有具备较高载荷测量和数据统计处理技术水平的专业人员，才能获得正确的编谱数据。

飞机在打样设计、详细设计阶段都要对重要结构进行疲劳耐久性分析评估，预估起落架结构能否满足设计目标寿命要求。最重要的是通过分析可以尽早暴露疲劳薄弱环节，及时改进不合理的结构设计。研制阶段的元件、组合件的模拟件疲劳试验等也要用到疲劳载荷谱，因此在获得实测谱之前，必须要有一个能代表飞机平均使用情况的起落架设计载荷谱供以上工作使用。由于每一种飞机都有它自己的特点，如飞机的重量不同、起落架结构刚度和缓冲特性不



同、机轮刹车力矩不同等，因此，在编制每个具体型号飞机起落架设计载荷谱时必须都要考虑进去。掌握计算分析谱的编制方法是很重要的，因为在新机研制时根本不可能有飞机进行外场的飞行实测。只有飞机完成了设计，生产制造出一批并交付部队使用后才有可能对起落架载荷进行飞行实测。因此，本书对这两种编谱方法都给予了介绍，而且它是本书介绍的一个重点内容。尤其是在起落架载荷谱的实测、实测数据处理和编谱方法等方面，内容更为丰富、充实，在本书的第5章、第6章中做了详细的介绍。

凡是做过用应变法测量飞机载荷谱的人都知道，起落架载荷谱实测与飞机其他部件的载荷谱实测相比起来，其难度和工作量都很大。

和测量飞机机翼、尾翼、机身等部件的载荷一样，用应变法测量起落架载荷，首先必须根据受力分析对起落架结构确定好测量截面，并在这些截面上选择适当位置粘贴好应变计，确定应变计的组桥方式，然后在地面进行载荷标定试验。其目的就是要建立起输入载荷与应变电桥输出码值的定量关系，将这种确定的关系应用于飞机实测过程中测到的同一个对象的应变结果上，就可将应变结果转换成载荷结果，从而得到实测载荷的时间历程。

但是，起落架受到的地面载荷不仅仅是一个垂直载荷，而是还同时有航向载荷和侧向载荷的共同作用。其结果是在使用状态下，各截面上布置的应变计感受到的是作用在机轮上三个载荷分量  $P_x$ 、 $P_y$ 、 $P_z$  共同产生的复合应变。在测量其中某一载荷分量时，必须把其余两个载荷分量产生的那部分应变从测量结果中排除掉。可是应变计本身不会分辨示值中的各应变成分，所以必须设法根据不同性质的载荷，精心选择贴片位置和方位，把应变计合理地接入电桥（采用全桥连接），充分利用电桥的性质，尽可能的从复杂的复合应变中测出需要的载荷，这一点是非常重要的。但是，起落架是一个空间受力结构，尽管我们在选择贴片位置和组桥方式上充分考虑了排除非测量载荷的干扰，但实际上这种非测量载荷的干扰总是存在的，尤其是贴片时要求把应变计精确地粘贴到理论上设计的位置几乎就很难做到。因此，每个起落架进行载荷标定时设计的电桥远不止三组（理论上三组就可以），而是设计了很多组。然后通过标定试验结果的回归处理，剔除那些影响回归精度的电桥，建立最优的载荷回归方程。这就是起落架载荷测量的难点所在。

飞机起落架地面载荷标定试验、载荷谱测量工作量是由多方单位通力合作才能完成。先由设计单位提出飞机载荷谱测试任务书；再由测试单位根据任务书要求，研究确定起落架载荷谱测试方法、制定标定试验方案（应变计粘贴部位和应变桥路设计方案、飞机测试改装设计方案、测试仪器设备配置方案、载