

FEIJIQILUOJIAQIANGDU  
SHEJIZHINAN

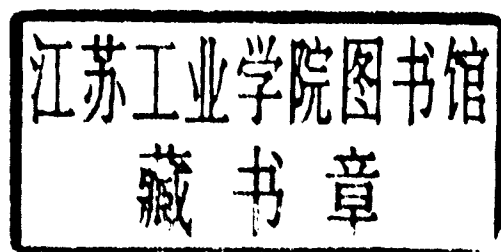
航空航天工业部科学技术委员会 编著  
四川科学技术出版社



飞机起落架强度设计指南

# 飞机起落架强度设计指南

航空航天工业部科学技术委员会编著



四川科学技术出版社

1989年·成都

责任编辑：刘阳青

封面设计：韩建勇

技术设计：康永光

### 飞机起落架强度设计指南

航空航天工业部科学技术委员会 编著

---

四川科学技术出版社出版、发行

(成都盐道街三号)

新华书店重庆发行所经销

安岳县印刷厂印刷

ISBN7-5364-1298-3/TH·33

---

1989年11月第1版 开本787×1092毫米 1/16

1989年11月第1次印刷 字数1700千

印数1—1100册 印张71.25插页6

定 价：25.00元

---

## 内 容 提 要

---

本书共分十一章。第一、二章论述了起落架强度设计的基本问题；第三章详细介绍了军用规范对飞机地面载荷的规定和载荷计算方法；第四、五、六章给出了起落架静强度的分析方法；第七、八章为动强度分析和试验；第九章阐述了起落架疲劳设计的各种方法；第十、十一章为起落架损伤容限设计和耐久性设计；最后附有十六项计算机程序的简要说明。

本书主要读者对象为从事飞机起落架的设计和强度分析人员。对航空院校师生、民航、飞机工厂和空军地勤、修理厂的工程技术人员以及汽车、拖拉机、自行车、船舶等一切在运载机械领域从事工作的工程技术人员，亦可作为参考。

本书主编单位为航空航天工业部六一一研究所。

**主 编** 刘锐琛  
**副主编** 苏开鑫  
邵永起  
王俊扬

**主 审** 张阿舟  
**副主审** 诸德培

**编委会成员** (按姓氏笔划为序)

王俊扬  
刘锐琛  
李本旭  
杨学勤  
苏开鑫  
邵永起  
李铁柏

**编写顾问**

## 编、校、审人员名单

(注有\*者为该章主编)

### 第一章 概 论

编写	刘锐琛*	杨国柱	庠玉螯	姚开楝		
校对	李本旭	余思民	周玉启	陈国钧	刘锐琛	王俊扬
审核	张阿舟	诸德培	苏开鑫			

### 第二章 强度设计和试验原则

编写	刘锐琛*	王俊扬	高金华			
校对	李本旭	王俊扬	郑昱仲	刘锐琛	王宝录	
审核	张阿舟	王俊扬				

### 第三章 载荷情况和载荷计算

编写	邵永起*	刘锐琛	罗家枢	王建成	李本旭	杨华奎
	陈宝卿	姚开楝	史永祥			
校对	李本旭	刘锐琛	郭余发	曹定国	罗家枢	杨树勳
	邵永起	鄢良全	陈国钧	李 刚		
审核	诸德培	苏开鑫				

### 第四章 主体材料

编写	李本旭*	高金华				
校对	高金华	李本旭	刘锐琛	王俊扬		
审核	王俊扬	刘锐琛				

### 第五章 静强度校核方法

编写	刘锐琛*	杨华奎	张树祥	吴有金	鄢良全	余思民
	庠玉螯	张国华	王俊扬	杨海鹞		
校对	李本旭	余思民	刘锐琛	鄢良全	邝凤英	曹定国
	方 杰	周玉启	郑昱仲			
审核	张阿舟	邵永起				

### 第六章 有限元素法在起落架设计中的应用

编写	苏开鑫*	刘英卫	梁保华			
校对	刘英卫	梁保华	苏开鑫	方 杰		

审核 张阿舟 杨国柱

## 第七章 动力分析和试验

编写	苏开鑫*	邵永起	杨国柱	周可斌	徐守富	金 辉
	孙建军	诸德培	刘锐琛	杨树勋	王邦经	
校对	刘锐琛	苏开鑫	梁保华	杨华奎	孙建军	李本旭
审核	诸德培	刘锐琛				

## 第八章 摆振

编写	苏开鑫*	周可斌		
校对	周可斌	苏开鑫	刘锐琛	罗本元
审核	诸德培	刘锐琛		

## 第九章 疲劳设计

编写	邵永起*	杨树勋	苏开鑫	刘锐琛	李素菊	岳祖培
	罗家枢					
校对	刘锐琛	李本旭	邵永起	赵维田	余思民	
审核	诸德培	仇仲翼	李本旭			

## 第十章 损伤容限设计

编写	王俊扬*			
校对	郑旻仲	刘锐琛	高金华	李本旭
审核	张阿舟	刘锐琛	高金华	

## 第十一章 耐久性设计

编写	王俊扬*		
校对	郑旻仲	仇仲翼	李本旭
审核	仇仲翼	刘锐琛	

## 附录 计算机程序 审核 高金华

QCH—1	编写	刘锐琛	
	校对	李本旭	
QCH—2	编写	梁保华	
	校对	苏开鑫	
QCH—3	编写	杨国柱	
	校对	苏开鑫	李本旭
QCH—4	编写	李本旭	
	校对	高金华	

QCH—5	编写	方杰			
	校对	高金华			
QCH—6	编写	张燮年			
	校对	庠玉螯			
QCH—7	编写	刘英卫			
	校对	苏开鑫	梁保华		
QCH—8	编写	刘英卫			
	校对	苏开鑫			
QCH—9	编写	朱才生			
	校对	王俊扬	郑昱仲		
QCH—10	编写	朱才生			
	校对	王俊扬	郑昱仲		
QCH—11	编写	朱才生			
	校对	王俊扬	郑昱仲		
QCH—12	编写	高金华			
	校对	李本旭			
QCH—13	编写	余思民			
	校对	刘锐琛			
QCH—14	编写	胡文华			
	校对	刘锐琛			
QCH—15	编写	金辉	孙建军	诸德培	
	校对	孙建军			
QCH—16	编写	张国华			
	校对	刘锐琛			
	描图	吴春荣	李永勤	赵蓉	陈秀琳等



---

# 前 言

---

在航空、航天技术的不断发展中，起落装置的设计是十分重要的环节。为了保证飞行器安全起飞、着陆，要求起落架具有足够的强度和刚度；为了使飞行器离地后具有良好的性能，要求起落架应当尽可能的轻；为了满足经济性和商业竞争需要，起落架还应当经久耐用并且与机体结构同寿。总之，当前对起落架设计的要求是愈来愈高了。

为了满足上述要求，总结飞机起落架强度设计的经验，配合新颁布的国家军用标准《军用飞机强度和刚度规范》顺利地贯彻，我们组织了这本《飞机起落架强度设计指南》（以下简称《指南》）的编写。

编写《指南》，是航空工业部下达的科研任务。在充分利用国内起落架设计计算、试验和编制国家军用飞机强度和刚度规范的某些研究成果的基础上，参考了国外有关文献资料，由几十位同志，经过三年编、校、审的辛勤努力，完成了《指南》的编写工作。

《指南》着重论述了飞机起落架强度设计中比较成熟的基本方法，介绍了某些试验成果和各单位编写的计算机程序。为了适应发展的需要，在《指南》概论中，简要介绍了外国航天飞机起落装置的受载特点，供读者参考。

《指南》全书共11章，第一章概论，扼要介绍了起落架强度设计的一般内容，其余各章均为专题论述。从第二章至第九章为起落架载荷、静强度、动强度及疲劳寿命分析，这几章的内容充分结合了设计实践，是比较成熟的内容。关于损伤容限设计和耐久性设计是否适用于起落架结构的问题，目前的认识尚不一致。需要通过今后的设计实践予以解决。为此，我们安排编写了第十章起落架损伤容限设计和第十一章耐久性设计，仅供读者参考。此外，《指南》还对起落架常见故障和使用维护要求作了专题论述，可供空、海军地勤及修理厂工程技术人员参考。

由于编写本书缺乏经验，书中或有不完善和不妥当之处，诚恳欢迎使用人员和学者专家提出批评建议。

航空工业部科学技术委员会

1988年6月30日

# 符 号

## 1. 基本符号

A	功量 面积
a	裂纹长度 停机时重心到前轮轴的水平距离
b	停机时重心到主轮轴的水平距离
D	损伤度 抗弯刚度系数
E	弹性模量
f	安全系数 阻尼油孔面积
F	作用于轮胎接地面(或轮心)的载荷
G	飞机重量 剪切模量
g	重力加速度
H	停机时重心到前、主轮接地点连线的距离
h	板或容器的厚度 缓冲器全伸时飞机重心到主轮轴的高度
I	机轮转动组件质量的转动惯量
K	塑性系数 应力集中系数
$K_{Ic}$	断裂韧度
$K_{Ic}$	表面裂纹断裂韧度
$K_{Isc}$	应力腐蚀断裂韧度
L	疲劳分散系数 飞机升力系数, $\bar{L} = 1 - L$
M	弯矩
m	飞机质量
N	寿命次数
$n_0$	预压系数
n	空气多变指数 过载系数
P	载荷
$p_0$	缓冲器内气室初压力
q	均布载荷

R	轮胎实际滚动半径
S	机翼面积 缓冲器压缩行程
T	发动机地面最大静推力
V	速度
$V_0$	缓冲器气室的初容积
$V_t$	缓冲器气室的终容积
W	位移量
$\sigma$	正应力
$\tau$	剪应力
$\delta$	轮胎压缩量
$\mu$	摩擦系数 泊松比
$\rho$	油液密度
$\lambda$	展弦比 缓冲器压缩比
$\varphi$	传递系数, 刹车效率
$\omega$	自然圆频率
$\Omega$	折合频率
$\eta$	效率系数 剩余强度系数
r	比重
$\phi(\Omega)$	功率谱密度
da/dn	裂纹扩展速率

## 2. 常用角注

x, y, z	飞机起落架坐标系统(航向为正, 向上为正, 指向右翼为正)
max和min	最大和最小
Sy和Sj	使用和设计
ZL和qf	着陆和起飞
zh和q	主起落架和前起落架
qz和ht	起转和回弹
d和w	动能和位能
m、r和t	经向、径向和环向
K	轮轴中心点
an	安全
cz	全伸
d'	当量
Hc	缓冲器
jq	剪切
jy	挤压

Lx	轮胎
Ls	拉伸
Lj	临界
Pj	平均
qd	起吊
tj	停机
Kq	空气
yz	油压

### 3. 专用符号

除以上基本符号和角注外，各章还采用了加注跟随性说明的专用符号。

# 目 录

## 第一章 概 论

§ 1.1 概述	1
1.1.1 起落架的基本功能	1
1.1.2 起落架强度设计的任务	2
§ 1.2 飞机起飞着陆典型过程	3
1.2.1 起飞过程	3
1.2.2 着陆过程	4
1.2.3 飞机起飞着陆基本设计情况	5
§ 1.3 起落架的配置和基本类型	7
1.3.1 起落架的配置	7
1.3.2 起落架的配置对飞机地面运动的影响	8
1.3.3 起落架结构布局的基本类型	9
1.3.4 功能机构	14
1.3.5 起飞加速装置和着陆减速装置	19
§ 1.4 起落架缓冲器工作原理	24
1.4.1 引言	24
1.4.2 油气式缓冲器	26
1.4.3 全油液缓冲器	27
1.4.4 双腔缓冲器	31
§ 1.5 航空机轮	34
1.5.1 引言	34
1.5.2 轮毂	36

1.5.3	刹车装置	39
1.5.4	航空轮胎	49
<b>§ 1.6</b>	<b>航天飞机起落装置</b>	<b>55</b>
1.6.1	引言	55
1.6.2	起落方式及几种典型航天飞机起落概况	56
1.6.3	水平起落装置的结构、性能、载荷要求及设计特点	58
1.6.4	航天飞机起飞装置(起飞车)	65
<b>§ 1.7</b>	<b>起落架使用寿命</b>	<b>66</b>
1.7.1	引言	66
1.7.2	起落架定寿原理	72
1.7.3	老机起落架延寿	74
<b>§ 1.8</b>	<b>起落架故障和使用维护</b>	<b>81</b>
1.8.1	引言	81
1.8.2	起落架常见故障	81
1.8.3	对起落架使用维护的基本要求	85
	参考文献	91

## 第二章 强度设计和试验原则

<b>§ 2.1</b>	<b>概述</b>	<b>93</b>
2.1.1	引言	93
2.1.2	可靠性要求	93
2.1.3	强度设计思想的发展过程	94
2.1.4	强度分析与优化设计	97
2.1.5	计算机辅助起落架设计	98
<b>§ 2.2</b>	<b>起落架结构完整性大纲</b>	<b>98</b>
2.2.1	结构完整性大纲任务的分类	98
2.2.2	设计准则(任务Ⅰ)	102
2.2.3	设计分析和研制试验(任务Ⅱ)	105
2.2.4	全尺寸试验(任务Ⅲ)	108
2.2.5	机队管理数据(任务Ⅳ)	112
2.2.6	机队管理(任务Ⅴ)	114
2.2.7	质量保证措施	115
<b>§ 2.3</b>	<b>统计分析基础</b>	<b>115</b>
2.3.1	引言	116

2.3.2	两种常用的分布及其特征量	117
2.3.3	参数估计	120
2.3.4	假设检验	126
2.3.5	回归分析	133
2.3.6	可疑观测值的取舍	136
<b>§ 2.4</b>	<b>强度试验原则</b>	<b>137</b>
2.4.1	引言	137
2.4.2	起落架静强度与刚度试验	138
2.4.3	落震试验	138
2.4.4	摆振试验	139
2.4.5	疲劳试验	139
2.4.6	耐久性试验	140
2.4.7	损伤容限试验	140
	参考文献	140

## 第三章 起落架及飞机地面载荷

<b>§ 3.1</b>	<b>概述</b>	<b>141</b>
<b>§ 3.2</b>	<b>地面环境</b>	<b>143</b>
3.2.1	引言	143
3.2.2	机场跑道	143
3.2.3	地面阵风	150
3.2.4	能见度	151
<b>§ 3.3</b>	<b>陆基飞机地面载荷规范使用说明</b>	<b>153</b>
3.3.1	有关规定	153
3.3.2	重量分类	153
3.3.3	起落架缓冲系统应吸收的着陆功量	154
3.3.4	起落架垂直载荷系数 $n_y$ 的确定	157
3.3.5	对称着陆情况	158
3.3.6	偏航着陆情况	167
3.3.7	单个主起落架着陆情况	168
3.3.8	地面滑行情况	168
3.3.9	刹车情况	171
3.3.10	转弯情况	174
3.3.11	打地转情况	179
3.3.12	牵引情况	179
3.3.13	尾起落架特殊受载情况	182

3.3.14 尾起落架受阻情况	182
<b>§ 3.4 军用水上飞机的水动载荷及其登陆轮架的地面载荷和使用说明</b>	<b>183</b>
3.4.1 水动载荷及其使用说明	183
3.4.2 登陆轮架的载荷	194
<b>§ 3.5 地面载荷谱</b>	<b>196</b>
3.5.1 引言	196
3.5.2 随机谱的实测与编制	196
3.5.3 程序块谱的编制	197
3.5.4 编谱中应注意的问题	197
3.5.5 地面载荷谱组成	200
3.5.6 水面载荷谱	202
<b>§ 3.6 非正常起飞与非正常着陆</b>	<b>203</b>
3.6.1 非正常起飞	203
3.6.2 非正常着陆	204
<b>§ 3.7 其它载荷</b>	<b>211</b>
3.7.1 收放作动筒载荷	211
3.7.2 阻力伞	218
3.7.3 着陆拦阻系统载荷	221
<b>§ 3.8 地面载荷的试飞实测</b>	<b>227</b>
3.8.1 下沉速度的实测	227
3.8.2 飞机地面载荷的实测方法	237
3.8.3 某飞机主起落架刹车载荷谱的实测	243
参考文献	251

## 第四章 主体材料

<b>§ 4.1 概述</b>	<b>253</b>
4.1.1 基本符号表	253
4.1.2 引言	254
4.1.3 选材原则	254
<b>§ 4.2 起落架常用材料的物理机械性能</b>	<b>256</b>
4.2.1 定义	256
4.2.2 常用材料	258
4.2.3 成分、机械性能及物理性能	260



4.2.4	材料的摩擦特性	262
<b>§ 4.3</b>	<b>材料的疲劳特性</b>	<b>263</b>
4.3.1	引言	263
4.3.2	疲劳寿命的特点及影响因素	264
4.3.3	S—N曲线的工程设计	266
4.3.4	$\Delta\sigma$ — $\varepsilon$ 曲线与 $\Delta e$ —N曲线	286
<b>§ 4.4</b>	<b>材料的断裂特性</b>	<b>329</b>
4.4.1	引言	329
4.4.2	平面应变断裂韧度 ( $K_{Ic}$ )	330
4.4.3	表面裂纹断裂韧度 ( $K_{Is}$ )	341
4.4.4	疲劳裂纹扩展速率 $da/dN$	345
4.4.5	平面应力阻力 $K_R$ 曲线	352
4.4.6	弹塑性断裂阻力 $J_R$ 曲线	359
4.4.7	应力腐蚀断裂韧度 $K_{Isc}$ 和 $da/dt$	363
<b>§ 4.5</b>	<b>材料防腐蚀特性</b>	<b>369</b>
4.5.1	引言	369
4.5.2	金属腐蚀机理	369
4.5.3	金属腐蚀特点	370
4.5.4	腐蚀分类	371
4.5.5	影响金属腐蚀的因素	373
4.5.6	腐蚀的控制方法	379
<b>§ 4.6</b>	<b>断口分析</b>	<b>380</b>
4.6.1	金属断裂形态分类	380
4.6.2	几个基本术语	382
4.6.3	宏观分析	385
4.6.4	微观分析	388
4.6.5	起落架断口实例	391
	参考文献	393

## 第五章 静强度校核方法

<b>§ 5.1</b>	<b>概述</b>	<b>395</b>
5.1.1	引言	395
5.1.2	范围和方法	395