

飞机起落架的可靠性

30272171

译者的话

飞机使用经验表明，起落架的使用可靠性低于飞机结构其它部件的使用可靠性。这是与它们使用条件恶劣和在起飞、着陆及滑行时作用在起落架上的交变载荷的增加分不开的。据统计，现代运输机在整个使用期内起落架地面滑行距离已超过五万到二十万公里。另外，在飞行过程中，起落架这部分重量是无用的（歼击机相当于总重的4~5%，运输机相当于总重的3%左右）。为尽量减少结构重量和收藏空间，现代飞机起落架多采用超高强度钢或高强度铝合金制造。疲劳强度的分散度大并对应力集中很敏感，结构形状复杂，铰接接头很多，加之有相当多的结构是采用焊接的，现有的工艺和检验方法还不能完全避免制造质量较低的起落架投入使用。实践证明，与飞机结构的其它部件相比，起落架故障较多，发生故障的间隔飞行时间也比较短。因此，近年来已引起设计、制造和使用部门中越来越多的人注意研究和解决这个问题。

本书运用概率计算方法，从载荷分布，材料的抗疲劳特性，典型接头的应力状态以及起落架结构工艺等角度，对起落架的可靠性和寿命进行了详细的讨论，给出了综合考虑上述诸因素的计算方法和典型构件的寿命计算实例。本书对航空科研设计、制造、使用、修理等部门的专业人员以及院校师生是一本较好的参考书。

在本书译校过程中得到许杨、李明和李陆予等同志的许

637063

前 言

在现代飞机制造中，预防飞机机体、起落架构件及飞机其它重要组合件在使用中发生疲劳破坏是保证给定使用期限内飞行安全的头等大事。近代解决这个问题的方法是改善飞机的设计和制造以及完善结构寿命可靠性指标的预估工作。最重要的指标之一是由寿命分布函数所确定的单独构件和整个结构无故障工作的概率。

这个函数可以根据使用中的故障数据，用统计处理方法来确定。然而，对要求可靠性高的结构来说，采用这种方法是困难的，因为在使用中故障次数应该很少，甚至根本不存在。此外，这是一种消极的方法，只有经历过很长使用寿命后，才能给出可靠性指标。

因此，在飞机设计和样机调试阶段，迫切需要用计算方法来确定寿命分布函数。

为了解决飞机起落架构件的这个问题，作者使用了大量关于载荷统计特性，疲劳强度统计特性的资料，并采用了疲劳破坏的相似理论和疲劳计算的概率方法。

书中研究了在新机设计和样机调试阶段中预估飞机起落架构件寿命概率的综合解法。这个综合解包括起落架构件使用载荷的应变测量研究，及用统计方法计算疲劳强度所必须的载荷计算特性的统计处理。

其次，叙述了实物构件疲劳极限及其它疲劳强度特性的均值和变异系数的研究方法和测定结果。对于不存在摩擦腐

蚀的构件，为此目的运用了疲劳破坏相似理论，确定了相应的相似方程参数，并指明利用它们确定疲劳计算特性的方法。对于不适用相似理论的耳片接头，列出了经统计处理的实物构件疲劳试验结果，并确定了相应的计算特性。研究了“劳卡季”（Локати）法的适用性和构件的结构及工艺强化方法的影响。

基于试验数据和疲劳概率计算方法，得到了起落架构件寿命的分布函数，它们与经验分布函数十分符合。因此，用起落架为例表明作者所拟定的确定结构寿命分布函数的方法是有效的，寿命分布函数对于规定安全使用寿命，有根据的预防检查，修理期限，计划备件生产和解决其它现实问题都具有很重要的意义。类似的强度概率预估方法也可以适用于飞机的其它部件。

本书将有助于在航空工业中更广泛地推广概率计算方法，为改善计算、设计方法和发展航空技术起到积极的作用。

苏联科学院院士 И. Ф. 奥勃拉兹佐夫

271 2
 151 章六第

目 录
 章十第

绪论 1
 第一章 飞机起落架使用故障的分析 10
 1. 起落架故障分类 11
 2. 起落架故障频率参数及其典型种类 15
 第二章 起落架构件使用载荷的统计特性 29
 1. 载荷计数方法 31
 2. 起落架载荷幅值的分布规律及参数 34
 3. 单参数等效分布的参数 51
 第三章 疲劳破坏的相似规律 54
 1. 疲劳强度的统计估算法 55
 2. 起落架结构材料疲劳破坏相似规律的研究 60
 3. 试件疲劳试验的统计处理及其结果 67
 第四章 起落架典型接头的寿命 89
 1. 研究用的起落架接头典型试件及其参数 89
 2. 接头应力状态的研究 98
 3. 接头寿命的统计分析 106
 4. 快速试验方法准确性的统计分析 119
 第五章 结构工艺性和使用因素对起落架接头寿命影响的研究 133
 1. 零件结构参数的变化对接头寿命的影响 133
 2. 表面塑性变形法对起落架接头寿命的影响 136
 3. 零件实际尺寸与名义尺寸偏差的分析 143
 4. 理论应力集中系数的变异系数的确定 147

绪 论

近几十年来，航空运输业朝着增加航程和飞行速度，增加飞行高度和载重量，改善使用性能(起飞着陆性能)，提高附件及整机寿命和维修简便的方向发展。苏联和国外运输机性能提高的趋势列于表 1。

表 1 运输机的性能

飞机名称	发动机台数	发动机	发动机推	巡航速度	航程	有效载荷	乘客座
		型别	力(kg)	(km/h)	(km)	(kg)	位数
伊尔-18	4	涡轮螺旋	4000	650	5400	15000	111
图-104B	2	涡轮喷气	9500	800	4000	12000	122
伊尔-62	4	涡轮风扇	10500	900	9000	23000	186
图-154	3	涡轮喷气	9500	920	4000	18000	152
波音707-320B	4	涡轮喷气	8165	880	9700	23860	189
VC-10	4	涡轮喷气	9525	900	8700	18300	151
道格拉斯DC-8-40	4	涡轮喷气	7940	880	9120	18750	177

航空技术发展的特点随着性能要求的不断提高必然带来结构的复杂化和制造、使用飞机成本的增加。现代运输机是一个极为复杂的综合体，它包括大量设备，大功率的发动机装置和自动协调操纵系统。例如，有效载荷达到12t，起飞重量大于70t的运输机，保证各系统工作所用的仪表和附件达3000个，电缆长度超过120km。

影响飞行安全的主要因素之一是飞机结构是否具有最佳的强度，它在很大程度上取决于制造工艺水平，检验方法和全面文明生产状况。工艺程序不稳定及工艺缺陷的漏检可导致强度数据的分散和平均值的降低，必然引起飞机结构可靠性和寿命的降低。

分析了载重12t以上的两种运输机在三年内的全部故障分布，在飞机的所有系统和承力结构上实际上都有故障发生(表2)。

表2 运输机的故障统计

飞机系统	飞 机 A					
	1964年		1965年		1966年	
	故障次数	%	故障次数	%	故障次数	%
机 身	14	0.238	12	0.146	26	0.186
机 翼	66	1.125	86	1.048	189	1.352
尾 翼	4	0.068	3	0.036	10	0.071
起落架系统	105	1.791	253	3.084	107	2.912
操纵系统	42	0.716	20	0.243	25	0.179
液压系统	327	5.578	328	3.999	517	3.699
高空系统	308	5.254	187	2.279	516	3.692
生活设施	30	0.511	41	0.499	60	0.429
伞						
防冰系统	24	0.409	25	0.304	58	0.414
燃油系统	145	2.473	534	6.511	669	4.786
滑油系统	94	1.603	49	0.597	160	1.445
发动机及其附件	863	14.721	1041	12.692	1808	12.936
电气设备	665	11.344	1416	17.264	2294	16.413
仪表设备	899	15.336	1831	22.325	3752	26.846
无线电设备	2276	38.826	2376	28.968	3485	24.935
总 计	5862	100	8202	100	13976	100

(续)

飞机系统	1964 α		1965 α		1966 α	
	故障次数	%	故障次数	%	故障次数	%
机身	21	0.865	52	1.265	30	0.232
机翼	25	1.030	29	0.206	103	0.799
尾翼	18	0.741	38	0.925	103	0.799
起落架系统	81	3.337	196	4.771	47	2.692
操纵系统	16	0.659	17	0.414	28	0.217
液压系统	296	12.196	282	6.864	446	3.461
高空系统	186	7.663	290	7.059	282	2.188
生活设施	6	0.247	50	1.217	47	0.364
伞	13	0.535	18	0.438	67	0.520
防冰系统	15	0.618	2	0.048	12	0.093
燃油系统	97	3.996	442	10.759	417	3.236
滑油系统	150	6.18	149	3.627	9	0.069
发动机及其附件	145	5.974	131	3.189	339	2.630
电气设备	132	5.438	232	5.647	439	3.406
仪表设备	374	15.409	949	23.101	8327	64.62
无线电设备	852	35.105	1231	29.966	1890	14.667
总计	2427	100	4108	100	12886	100

飞机长期使用，要求检查和排除故障工作很多。对于起飞重量达70t的运输机，使用20000飞行小时，为维持其额定可靠性所要求的工作量达到220000额定小时，即相当于11个定额小时保证一小时的飞行。

飞机承力结构几乎在整个使用期限内有关故障发生的这一事实使得弄清最佳强度和结构寿命的工作极为复杂。这种复杂性来自大量结构、工艺和使用诸多因素的作用，可以归纳为：

——结构上实际作用的载荷和出现的故障在时间上的随

机性质；

——主要结构材料，各个承力接头和整个结构的强度特性有相当大的分散性；

——在设计阶段缺乏能表征各种使用条件下结构工作状态足够而可靠的试验资料；

——新机试制并把它投入使用的周期较短，选择保证飞机使用性能高的最佳工艺配套较为困难；

——飞机的工作密度大而使用期限长；

——为准确可靠地查明故障及其产生原因所需的检查组织工作很复杂。

上面列举的很不完全的因素就能表明，为判断使用条件下的结构可靠性和寿命，必须了解：作用的外载荷谱；结构的物理参数和几何参数对强度的影响（由于一系列结构工艺因素使强度具有很大的分散性）。

为提高结构可靠性和寿命，科学家和工程师们做了大量的研究工作。

可靠性和寿命课题的提出，理论基础和解决办法在H. Г. 勃鲁耶维奇，B. B. 格涅坚柯，B. C. 索特斯基，X. B. 卡尔顿斯基，Я. B. 绍尔等的著作中有详细论述。

材料疲劳强度和作用载荷的概率统计计算方法及承力结构寿命和可靠性的计算方法列举在C. B. 谢连先，Д. H. 列舍托夫，B. B. 包洛琴，B. Л. 柯加耶夫，M. H. 斯捷波诺夫，B. T. 布格洛夫，H. И. 柯农楚克，M. Я. 沙申，P. Д. 瓦贡诺夫，И. B. 安那尼耶夫，Л. A. 科兹洛夫，И. B. 雅科勃松，H. H. 斯特莱列茨基，A. P. 尔然尼岑，威布尔，弗列坚塔利等的著作中。在疲劳寿命问题中线性累积损伤方法得到广泛使用。在C. B. 谢连先，Д. H. 列舍托夫，B. B. 包洛琴，B. П.

柯加耶夫的著作中对疲劳损伤的累积提出了完善的看法。

在П. А. 列宾杰尔, П. Е. 吉雅钦科, И. В. 克拉盖利斯基, Б. И. 柯斯捷斯基, М. М. 赫鲁舍夫等的著作中指出了产品活动零件表面磨损的物理性质与随机过程理论之间的关系, 这种物理性质在估算结构可靠性和寿命时具有很大的意义。

产品结构工艺特点对磨损过程有很大影响, 这已由Л. Н. 加尔库诺夫, А. А. 斯塔罗谢夫斯基等完成的著作所证实。И. А. 奥金格, Я. Б. 弗利德曼, В. С. 伊万诺娃, С. И. 基斯金娜等的著作对金属疲劳强度的物理性质进行了研究。在Н. Н. 达维坚柯夫, В. Д. 库兹涅佐夫, С. В. 谢连先, Э. А. 萨捷利, И. В. 库德利雅采夫, С. Н. 基施金, И. Г. 格利钦科, И. А. 奥金格, Б. Е. 阿符钦柯夫等领导所进行的并在一系列刊物上得到评述的零件表面强化最有效工艺方法的研究具有重要的意义。这些工作显著地提高了结构的疲劳强度, 表面冷作硬化方法在工业中得到广泛的应用。这个方法对具有应力集中的结构特别有效。

近年来广泛使用试验-理论方法估算产品的实际工作能力。拟定快速试验方法并评定其准确度方面的工作在Р. В. 库盖利, X. Б. 加尔顿斯基, М. Н. 斯捷波诺夫, Т. А. 弗兰楚兹, В. Л. 莱海尔等的著作中得到了反映。

在多次受载的结构中, 从经济合理性方面评价提高可靠性和寿命的措施, 具有不小的意义, 考虑结构制造和使用经济性在内的结构寿命和可靠性定额制定方法, 在Л. Я. 舒赫加勒捷尔, И. Т. 别里雅柯夫, А. В. 格利切夫等的著作中有详细的论述。对结构可靠性和寿命研究方向概括地作小结时, 应当指

出积累科研资料的必要性,它们是用统计力学方法和可靠性理论进一步分析作为基础的。

原则上,检查确定产品的实际强度可能有两条途径。第一条途径是在最接近实际使用条件下,对实物产品进行大量试验。为了实现这种方法,必须具有设计和制造试验台和装置的大量拨款和临时基金,并且所获得的试验结果只是用于该型结构。

第二条途径是用概率计算方法来获得结构可靠性和寿命,它是基于制造和使用阶段中各种因素作用下结构承载能力统计规律性的综合资料。从个别典型结构上获得的规律性和拟定的分析方法,对于在各种样式产品上总结和推广这些规律性和分析方法具有广阔的前景。本书叙述飞机承力结构可靠性和寿命的综合统计估算法,这个方法是在研究使用中获得的的大量数据以及零件、组合件的广泛疲劳寿命试验的基础上拟定的。选择运输机的起落架作为研究和制定方法的对象是因为起落架是飞机三个主要系统中最容易出故障的系统之一,尽管起落架的故障只占飞机故障总数的30%。例如,1966年的统计数据中,每1350飞行小时中,起落架系统出现一次故障,而飞机操纵系统却在22000飞行小时出现一次。

毫无疑问,飞机系统(机体、操纵和起落架)的故障会导致严重的后果,因此,为保证飞行安全,不管要花多少成本,必须首先保证这些系统的可靠性和寿命。起落架故障次数多而故障前的飞行时间又较短,说明它的使用条件较为苛刻,在起飞、着陆和地面运动过程中交变载荷偏高。同时,在飞行中,起落架系统是无用的重量,占运输机起飞重量的2~3%。在设计时力图用最小的重量

获得满意的强度，使现在起落架承力结构的零件和组合件有70%是用高强度钢30XΓCA和30XΓCHA制成的(表3)。

表3 起落架结构件采用的钢品种的分布
(以百分比表示)

零件名称	A 前支柱		B 主支柱	
	30XΓCA	30XΓCHA	30XΓCA	30XΓCHA
承力结构	23.6	36.6	42.7	33.8
螺 栓	73.3	26.7	65.1	23.6
衬 套	38.3	18.4	9.8	—
螺 帽	100	—	100	—
垫 片	100	—	35.7	—

起落架结构具有很多应力集中部位，它的制造工艺过程包括各种工序：热模压毛坯、机械加工、焊接、装配时的精

表4 制造和装配起落架主支柱、前支柱
的劳动工时

成本组成项	劳 动 量				成本(卢布)	
	小 时		%		主支柱	前支柱
	主支柱	前支柱	主支柱	前支柱		
制造零件	268.4	227.3	45.7	47.9	121	101
焊 接	131	61.4	23.4	13.7	63	29
装 配	51.8	108.0	9.7	25.2	26	53
精加工、检验、试验	126.8	60.3	21.9	13.2	59	28
总 计	578	457.0	100	100	269	211
结构材料					838	428
总 共					1107	638

加工和检验调整工序。以运输机起落架支柱为例，其制造和装配的劳动量共达1000定额小时(表4)。

起落架制造和装配工艺过程的多样性和繁重程度对使用中的质量和可靠性有很大影响，因为保证所有过程的严格性和稳定性是极为困难的。

承受多次重复载荷的起落架，由于缺少可靠性和实际寿命数据，不得不采用一套昂贵的综合措施，以保证在飞机整个使用期限内能检查出故障和恢复寿命及可靠性。因此，运输机起落架第一次大修包括下列工序：

	定额小时
1. 分解起落架前支柱和主支柱	138
2. 清洗零件	40
3. 零件喷砂处理	24
4. 缺陷检验	170
5. 零件和组合件修理及装配	600
6. 零件制造加工	64
7. 配套和检验	84
8. 清洗零件和组合件，喷砂和喷漆	40
	总修理工时1160

这样，起落架一次大修的劳动量约为1160定额小时，相当于制造新支柱的劳动量。起落架支柱在20000飞行小时内，要经过5~6次大修，所以保持可靠性所需的劳动量是制造新结构劳动量的4~5倍。因此，早在设计阶段就具有构件和整个起落架的使用可靠性数据是很重要的，这些数据可以用起落架构件的寿命分布函数来估算。

单个构件和整个起落架的寿命分布函数值具有极其重要的意义，因为它能够：

第一章 飞机起落架使用

故障的分析

飞机速度的增加，现代飞机结构的复杂化，对使用可靠性，安全性的要求不断提高，在设计师，工艺师和使用人员面前提出了大量的新任务。

可靠性问题的研究，通常是与这些技术装置在各种试验和使用中的大量数据资料的综合分析联系在一起的。

产品在使用过程中的故障统计资料是其可靠性资料的主要来源。因为分析一定使用期限内产品的故障统计资料，就能够确定研制和使用各个阶段中对于产品可靠性的影响，也是寻找结构薄弱环节，工艺和修理综合程序的弱点以及选择合理修理周期的基本方法之一。

修整产品结构，改进制造和装配工艺程序，加强检验方法，改善预防检查和修理措施等方面所采取的决定是否正确，在很大程度上取决于故障统计资料的性质和准确性。

根据故障数据和产品本身的可靠性水平，可以正确选定相适应的故障数学模型，作为整个可靠性工程计算和新研制结构可靠性与分析预测的基础。

特别应当指出，个别零件或整个组合件在使用过程中的故障规律是评定各种可靠性和寿命计算方法有效性的唯一实际客观标准。

目前，在搜集统计数据、数据分析整理，研究故障出现的形式和条件、原因和后果等方面进行着大量的工作。

故障数据分析处理计划的拟定是一件复杂的工作，要求