

# 飞机机体的 可靠性

〔苏〕П.А.索洛莫诺夫著

航空工业部第六〇一研究所

一九八四年六月

# 飞机机体的可靠性

〔苏〕П.А.索洛莫诺夫著

航空工业部第六〇一研究所

一九八四年六月

НАДЕЖНОСТЬ ПЛАНЕРА САМОЛЕТА

П. А. СОЛОМОНОВ

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ»

1974

飞机机体的可靠性

П.А.索洛莫诺夫

莫斯科〈机械制造〉

1974

## 出 版 说 明

可靠性是一门新兴学科。产品的可靠性已是衡量产品质量的重要指标之一。近年以来，工业发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来，有力地促进了产品可靠性水平的提高。

对于航空工业来说，可靠性问题和人身安危、经济效益密切相关，因此，显得更加重要，更加迫切。我国的航空工业是由仿制走向自行设计的，长期以来，在新机研制和飞机使用维护过程中，对于可靠性问题，无论在理论研究方面，还是在实际应用方面，都需要迅速发展，才能适应当前开展可靠性工作的要求。

本书译自苏联机械制造出版社1974年出版的《飞机机体的可靠性》，希望该书能对新机研制和飞机使用维护的可靠性技术的实际应用有所参考。

本书内容对飞机机体的可靠性问题作了全面论述，全书共分七章，主要内容有：飞机部件和系统的工作载荷和工作条件以及它们对可靠性的影响；飞机可靠性的主要特征；研制与批生产阶段确保飞机机体和系统可靠性措施；使用过程中飞机的技术寿命和可靠性保证；飞机机体技术寿命和可靠性的保证与评定；研究航空技术设备故障的方法；保证飞行技术安全的某些问题。这些内容比较系统和切合实际，对于从事新机研制的工程技术人员有一定的实用参考价值，对于从事使用维护的专业人员和航空院校师生亦会有所帮助。由于本书是1974年版本，所以有些新的技术内容尚未列入。

本书由邱耀庭同志译一、三、四章，郭培凡同志译五、

六、七章，黄德森同志译前言和第二章，他们相互间还作了部分翻译校对。此外，胡秉科和李陆豫同志担任了二、五、六、七章的翻译校对，解思适、贾国荣、唐灏等同志担任了技术校对。最后由副总设计师赵沛霖和质量理科黄德森进行了全面审校定稿。

本书在翻译出版过程中，还得到了有关部门的领导和同志们的大力协助，在此表示衷心感谢。

由于我们的水平有限，书中错误和不妥之处在所难免，恳请读者批评指正。

译 者

一九八四年二月

# 目 录

|                                                |        |
|------------------------------------------------|--------|
| 前 言                                            | ( 1 )  |
| <b>第一章 飞机部件和系统的工作载荷和工作条件</b>                   |        |
| 以及它们对可靠性的影响                                    | ( 4 )  |
| 1.1 飞机部件和系统的载荷特性和工作条件                          | ( 4 )  |
| 1.2 飞机机体结构元件的机械载荷和温度载<br>荷                     | ( 5 )  |
| 1.3 飞行中飞机设备和系统附件的工作载荷<br>和工作条件                 | ( 19 ) |
| 1.4 保管时对飞机机体、设备和系统附件的<br>影响因素                  | ( 28 ) |
| 1.5 工作载荷和工作条件对飞机机体和系统<br>的材料的影响                | ( 33 ) |
| <b>第二章 飞机可靠性的基本特征</b>                          | ( 49 ) |
| 2.1 飞机可靠性的基本概念                                 | ( 49 ) |
| 2.2 飞机可靠性的基本定量特征                               | ( 55 ) |
| 2.3 飞机可修复技术装置的可靠性特征量                           | ( 69 ) |
| 2.4 系统可靠性的计算                                   | ( 84 ) |
| <b>第三章 研制与批生产阶段确保飞机机体和系统<br/>        可靠性措施</b> | ( 93 ) |
| 3.1 设计和样机研制阶段确保飞机高度可靠<br>性的问题                  | ( 93 ) |
| 3.2 设计阶段可靠性的定量评定问题                             | (104)  |
| 3.3 批生产过程中飞机可靠性的保证措施                           | (108)  |
| 3.4 使用备用法提高航空技术装置的可靠性                          | (117)  |
| 3.5 飞机使用可靠性的试验                                 | (128)  |
| 3.6 飞机附件和系统的技术寿命的确定工作                          | (137)  |

|            |                                  |       |
|------------|----------------------------------|-------|
| <b>第四章</b> | 确保飞机使用过程中的可靠性和寿命·····            | (142) |
| 4.1        | 确保飞机使用过程中的可靠性所要进行的工作·····        | (142) |
| 4.2        | 确定航空技术装备故障原因的方法·····             | (154) |
| 4.3        | 故障预报·····                        | (164) |
| 4.4        | 飞机状态的检查手段·····                   | (169) |
| 4.5        | 对象选择和检查的周期性·····                 | (178) |
| 4.6        | 关于飞机可靠性统计信息的收集、处理和分析方法·····      | (193) |
| <b>第五章</b> | 飞机机体技术寿命和可靠性的评定与保证·····          | (209) |
| 5.1        | 飞机机体技术寿命的确定和修复方法的演变·····         | (209) |
| 5.2        | 确定飞机机体初期使用期限·····                | (221) |
| 5.3        | 飞机机体极限使用期限的确定和保证·····            | (230) |
| <b>第六章</b> | 航空技术设备故障的研究方法·····               | (247) |
| 6.1        | 航空技术设备故障的研究组织·····               | (247) |
| 6.2        | 航空技术设备故障的金属物理分析方法·····           | (257) |
| 6.3        | 用痕迹法检查有故障的和失效的航空技术设备的零件·····     | (270) |
| 6.4        | 在研究航空技术设备故障原因中关于使用因果关系的某些概念····· | (274) |
| 6.5        | 飞机机体附件和系统的某些研究特点·····            | (281) |
| 6.6        | 动力装置的研究特性·····                   | (300) |
| 6.7        | 航空燃油附件和液压附件活门副的研究方法·····         | (318) |
| <b>第七章</b> | 保证飞行技术安全的一些问题·····               | (327) |

|                          |       |
|--------------------------|-------|
| 7.1 影响飞行安全的主要因素.....     | (327) |
| 7.2 关于飞行安全次数评定标准的概念..... | (332) |
| 7.3 飞行安全的评定与保证.....      | (335) |
| 参考文献目录.....              | (348) |

## 前 言

技术装备的质量是指这种装备适合于使用需要程度的性能总和。最重要的质量指标是：可靠性、耐久性和使用维护性。对产品的质量要求取决于它的用途。对大部份工业产品来说，生产过程的机械化和自动化设备，在提出最佳质量时，还应考虑经济性的要求（图1）。对这类产品可靠性的要求，一般说来，要大大地低于航空技术装备的可靠性，而

基本上取决于它们使用的经济效益。对于航空技术装备、船舶和某些工程项目来说，由于与确保人员的安全有关，所以对可靠性提出了特别高的要求。

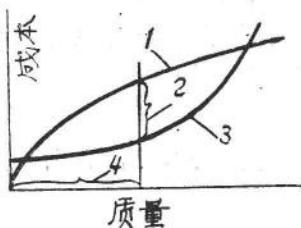


图1 提高产品质量与经济合理性的关系曲线

1. 经营过程中获得的价格；
2. 经济效益；
3. 生产成本；
4. 最佳质量

每一种技术装备都具有它固有的质量指标；各类航空技术装备产品，也都具有它们固有的质量指标。例如，

对于液压泵来说，这类质量指标为：最大压力、供油量、随着液压油入口温度和压力使供油量的变化；对于机体结构元件和动力装置来说，静强度和静持久强度、抗腐蚀性，相对延伸率等。而对航空发动机来说，最重要的质量指标是：推力、耗油量、推重比、寿命等。对整架飞机而言——最大

速度、升限、起飞和着陆滑跑距离、载重量和航程等。

但是，除了上述性能外，还有确定航空技术产品功能的

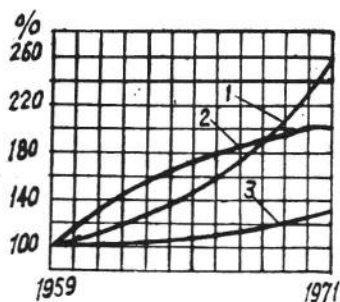


图2 提高飞机设备复杂性和增加容积的关系曲线，用%表示

1. 设备数量； 2. 燃油量；  
3. 飞机容积

质量特性，如无故障工作的程度很高；以较少的劳动消耗，迅速发现和排除故障。这种特性就是可靠性。

可靠性应理解为：在地面和空中，在规定的使用范围和给定的时间或飞行小时内（工作时间），在保持飞行技术性能的条件下完成规定功能的航空技术装备特性。可靠性——这是各种机械、各种技术装备不可缺少

的质量指标。假如技术装备不具有必需的可靠性，则所有其它的质量指标在很大程度上就要丧失它的实际意义。

对飞行器的可靠性提出特别高的要求，可用以下情况说明：

1. 附件和系统在空中出现故障，就可能危害旅客和机组人员生命，使飞机坠毁和破坏地面建筑；

2. 飞行器的零件和部件是在高振动、高声压和高 温下工作；

3. 航空技术装备是很复杂的，现代飞机的零件和附件有几十万个（图2）；

4. 在很大的飞行速度和起飞着陆速度情况下，飞行员不可能经常及时地对系统和部件出现这样或那样的故障作出反应。图3表示M数的变化曲线（取自国外资料）。

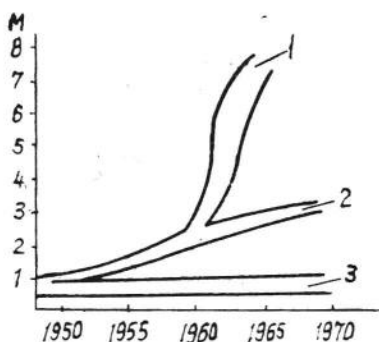


图3 随飞机制造年代  
M数的变化曲线

- 1. 试验机;
- 2. 战斗机;
- 3. 运输机

研制出可靠的和经久耐用的机器，这是一项很复杂的任务，要完成这项任务取决于很多因素。为提高航空技术装备的可靠性，必须依靠很多部门的全体人员在其研制、批生产和使用维护等各个阶段的共同努力。在设计阶段要为可靠性技术“打基础”，在生产过程中要确实保证质量，而在使用维护过程中要予以保持。在设计、修改、试验和生产过程中“打下基础”的飞行器可靠性，通常称为“技术可靠性”。航空技术装备的可靠性要在其使用全寿命内，由使用维护和修理部门予以保证。

可靠性理论的主要任务是确定发生故障的规律性，研究各种外因和内因对可靠性的影响，确定可靠性的数量特征、评价方法和计算方法，制定设计和制造中保证可靠性的方法，还要制定在使用维护过程中保持可靠性的方法。

# 第一章 飞机部件和系统的工作载荷 和工作条件以及它们对可靠性的影响

## 1.1 飞机部件和系统的载荷特性和工作条件

飞机机体的部件和零件、动力装置，它们的系统和设备都是在一些特殊条件下工作的，这些条件与地面技术装备的工作条件大不相同。第一，现代飞机的部件和零件的工作条件是相当复杂的(振动、温度、压力)，作用载荷也加大了。第二，飞机部件和零件的工作条件的特殊性在于作用因素的迅速变化(时间和空间)，以及这些因素在广泛的范围内的变化。飞机在三种情况(在飞行中、在地面、在维修时)中的某种情况下，都有该种情况的一组特殊因素作用在部件和零件上，而且这些因素的影响程度可能是各种各样的。

在飞行中，有各种因素作用在飞机部件和零件上，这些因素与飞机的使用特性、气象因素，以及与飞行人员的操作有关。载荷、过载、变形、振动、声载荷、气动力热、发动机热、压力、负载等都与飞机使用特性的因素有关。温度、湿度、气压和它们的变化以及梯度是空域中的气象因素。与飞行人员操作有关的因素为他们所受的教育程度、飞行人员的训练情况、飞行驾驶质量和机警性。飞行中的作用因素取决于飞机种类、它的设计特点，以及它的使用特点和使用条件。

在地面，有下列一些因素作用在飞机上：气象因素(温

度，它的昼夜变化和全年变化、湿度和气压以及腐蚀性介质等），生物学因素（霉菌、昆虫和啮齿类动物）以及时间性因素（化合物分解，材料性能的改变，材料氧化，金属锈蚀等）。按作用在设备和系统附件上的特点，可以把时间性因素作为单独一组分出来。老化过程也属于时间性因素。老化就是材料的物理化学性能的逐渐改变的过程。在外部因素的作用下，老化过程速率可能有变化，这样的外部因素有：温度、振动、氧、臭氧、潮湿、电磁场等等。对许多材料来说，老化过程不易发现材料性能恶化的明显征候，这些变化是逐渐发生的，并且在个别情况下是可以导致突变的——破坏或是断裂。老化现象是所有材料都具有的，但有机物绝缘材料很容易老化。例如，橡胶材料会变硬易碎，布满裂纹，而且这些裂纹会扩展到零件的内部及其外表面。

决定于技术维护的因素，是使用的机构、工程技术人员受教育的程度、完成工作的质量、修理质量、运输和保管的特点。人员对附件进行工作时，一方面能改善飞机机体的设备和系统附件的技术状态和预防发生故障（如加注润滑油，调整参数等等）；另一方面在拆卸和装配时，由于维护结果的影响，也会使它们的技术状态变坏。机械载荷和温度载荷以及材料抗腐蚀能力，都是确定机体结构元件可靠工作的主要因素。除此之外，对系统和设备的附件和零件来说，在一般情况下它们的工作条件和储存条件也有决定性的影响。

### **1.2 飞机机体结构元件的机械载荷和温度载荷**

在飞机使用过程中，各种载荷都作用在机体的结构元件上。作用在机体上的所有载荷可分为两种：规律性载荷，这些载荷的数值和重复性在飞行中是可以测定的；另一些载荷，它们的数值和交替情况是不规则的。属于第一种载荷的

有：稳定飞行状态下的气动载荷，收放襟翼和起落架时所产生的载荷，以及在密封座舱中所产生的增压载荷。属于第二种载荷的有：机动过载和作用在机翼、尾翼、机身由阵风所产生的载荷。

最大过载  $n_{max}$ 、极限速度  $V_{max}$ 、极限速压  $q_{max}$  和飞机重量  $G$  是确定飞机机体部件外载荷的主要参数。所有飞机都要作一定程度的机动飞行。但只是对机动飞机（歼击机、攻击机、初级教练机等）在作机动飞行时，其静强度载荷和静持久性载荷才是可测定的，机动过载值和频率取决于机型、飞行战术性能、稳定性和操纵性。机动过载值以及在这种情况下作用在飞机机体构件上的载荷还取决于所完成的飞行性质、飞行高度和速度。随着飞行高度和速度的增加，气动载荷的分布特征也改变，因而也改变它的数值。随着飞行高度的增加，最大可能机动载荷值则减少。最大允许使用过载值取决于飞机型别，歼击机承受最大垂直机动过载大约为  $8 \sim 9g$ （ $g$  是重力加速度），重型飞机为  $2.5g$ 。

对机动飞机来说，大多数飞机机体构件的载荷值取决于飞机重心的过载值  $n_{ncp}$ 。此  $n_{ncp}$  又由它的平均值  $n_{ycp}$  和旋转角速度变量  $\Delta n_y$  以及重心到构件的距离来确定。为计算机体构件的静强度和使用期限以及编制使用过程的强度试验程序，应该测量飞机重心过载（见图 4）。同时还要确定出飞行一小时的垂直过载（见图 5）和水平过载（见图 6）的平均累积频数  $H_{icp}$ 。

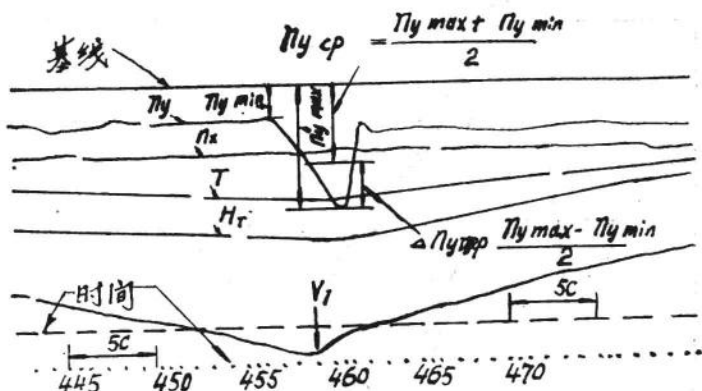


图 4 飞行速度  $V$ 、飞行高度  $H$ 、垂直过载  $n_y$  和水平过载  $n_x$  的示波曲线

除机动载荷外，由阵风产生的载荷也作用在机体构件上。在大气层中由于温度和压差而产生气团运动，由于气流的急剧移动（这种气流伴随有空气速度交变场和涡流）在大气中产生紊流。由阵风所产生的过载值不大，但经常会遇到这种阵风。对运输机和轰炸机来说，这种数值可能达到最大使用载荷。阵风载荷不只取决于计算参数，还取决于使用参数。这样，飞行轨迹在高度上的变化可确定阵风随时间的作用性质，而飞行速度则影响过载值。

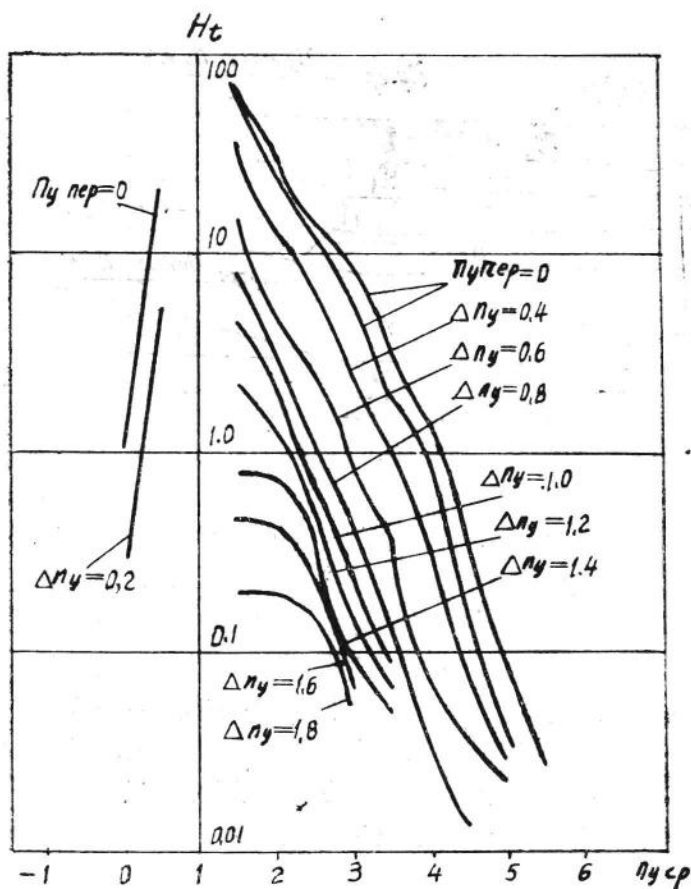


图5 轻型飞机重心垂直过载 $n_y$ 的累积频数 $H_t$

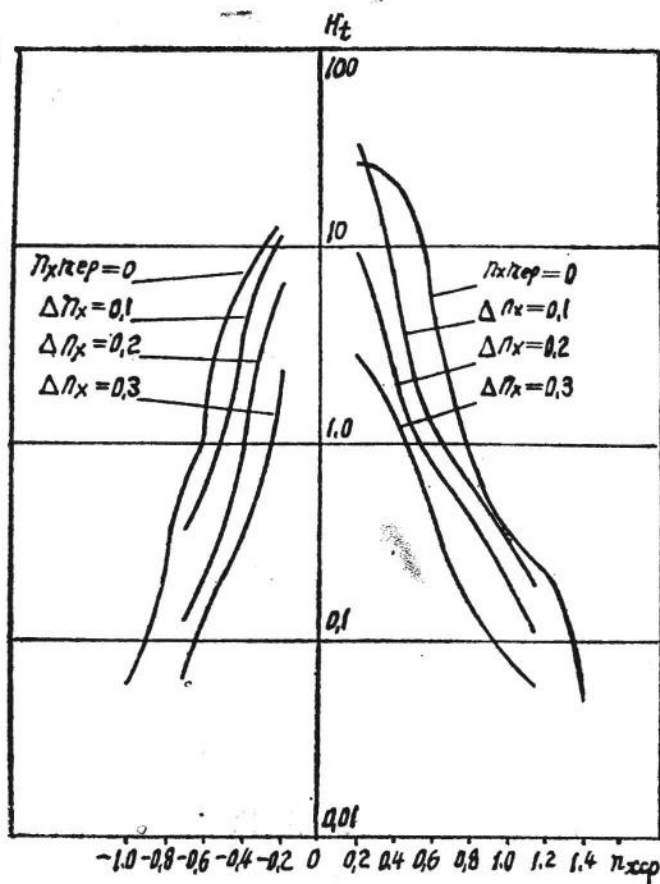


图 6 轻型飞机重心纵向过载  $n_x$  的累积频数  $H_t$