

航空机载设备寿命与可靠性评估指南

V24
1004-1

图书馆

✓24
1004

航空机载设备寿命与可靠性 评估指南

(适做短训班教材)

顾振中 童心 曾天翔 屠庆慈
费瑞娣 张红春等编著



航空工业部三〇一研究所

647123

前 言

经过 30 几年的艰苦奋斗，我国航空工业已具相当规模，取得了巨大的成就，但与国际先进水平相比还存在较大的差距：如机载设备的寿命与可靠性还不能满足需要，甚至成为国内外贸易的主要障碍之一。为此，我们与有关厂所院校，自 81 年起开展了一些研究工作，在各单位实践的基础上，写成此书；它可做为贯彻航空部颁发的航辅函(1983) 1686 号文《航空机载设备寿命与可靠性评估的一般程序与方法》的主要参考资料。本书侧重实用，对某些公式的推导做了删减以应急需。

本书共分九章，第一、二、五、六章为 301 所顾振中编写；第三章为 628 所曾天翔编写；第四章为西工大童心编写；第七章为北京航空学院一所屠庆慈编写；第八章为 351 厂费瑞娣编写；第九章为三〇一所张红春编写，全书由顾振中整理，并由三〇一所可靠性研究室主任毛黎明同志进行了审校和张红春同志进行了校对工作，对此编著者表示感谢。由于我们水平有限，书中难免存在缺点和错误，希读者指正。

内 容 提 要

本书介绍机载设备寿命与可靠性基本知识和评估的程序与方法。全书共分九章，包括：可靠性基本知识、有关的概率统计基础。常用寿命分布、数理统计在可靠性工程中的应用、产品寿命评估、处理现场可靠性数据的一种方法——残存比率法、设备平均故障时间的评估、应用实例、以及航空机载设备可靠性与寿命评估的计算机程序。

本书可供航空主辅机厂以及其他工业部门技术人员和管理人员阅读。也可供大专院校师生参考。本书与录象带(301 所录制)配合可作学习班教材，特别适于做为贯彻航空部颁发的航辅函(1983)1686 号文《航空机载设备寿命与可靠性评估的一般程序与方法》的主要参考资料。

目 录

第一章 可靠性基本知识.....	(1)
第二章 概率论与数理统计基本知识.....	(30)
第三章 常用的寿命分布.....	(43)
第四章 数理统计在可靠性工程中的应用.....	(69)
第五章 机载设备寿命.....	(130)
第六章 机载设备平均故障间隔时间(MTBF)的评估	(149)
第七章 现场可靠性数据处理及寿命评估方法——残存比率法.....	(186)
第八章 应用实例：肺式氧气调节器(YTQ-1)的MTBF和寿命评估.....	(199)
第九章 航空机载设备可靠性与寿命评估的计算机程序.....	(219)

第一章 可靠性基本知识

§1—1问题的产生

人们要求航空机载设备(以下简称设备或产品)体积小、重量轻、性能好、和可靠性高,并用重量、时间和长度等单位成功地描述了设备的技术性能,而对可靠性要求却长期处在定性描述阶段。如设备“安全可靠”,“经久耐用”等。尽管如此,但在实际生产活动中,人们对可靠性却是十分重视的,如世界上第一艘蒸汽轮船设计了锅炉和发动机,还安装了船帆保证轮船的安全可靠。

50年代前后,在使用、运输、贮存电子设备过程中出现大量故障。如美国60%的机载电子设备运到远东后不能使用。50%的电子设备在储存期间发生故障;苏联1958年统计结果表明,因工业生产的废品使国家造成的损失为国民经济总收入的四分之一。世界上第一台电子计算机ENIAC共用了18,000个电子管,使用中平均30分钟需要更换一只电子管。出现上述问题的主要原因:

1. 设备结构复杂和产品的组成元器件数量多

产品技术性能要求的提高,使它的结构日趋复杂,组成它的元器件数量也日益增大。如表1.1:

机载电子设备元器件数量增长情况

表1.1

年 代	机 种 或 设 备 名 称	元 器 件 数 量
40年代	歼击机机载电子设备	约为600
1950年	B-47机载电子设备	$\cdots 2 \times 10^4$
1955年	B-52机载电子设备	$\cdots 5 \times 10^4$
1960年	B-58机载电子设备	$\cdots 9 \times 10^4$
	SPY-1雷达中电子设备	$\cdots 10^6$
	阿波罗飞船上电子设备	$\cdots 7 \times 10^7$

随着组成设备元器件数量的增加,其可靠性相应降低,因为其中一个元器件发生故障,就可能影响设备某些功能的实现。如对串联系统,系统(设备)的可靠性等于各个元器件可靠性的乘积。假设每个元器件的可靠度为0.9,当系统(或设备)由三个元器件组成时,则设备可靠性为0.729,当设备元器件增加到6个时,其系统可靠性则降为0.537。

随着设备复杂程度的增加,设计、制造、销售和使用设备的人员增多,人——机关系复杂,也会出现一些不能完全避免的过失和错误,使设备使用可靠性降低。

2. 设备环境条件日益严酷

随着飞机性能的提高, 设备环境条件更加严酷。如飞机在高空高速飞行时, 设备要经受宇宙粒子、各种辐射的影响, 温度和振动的冲击; 在海上飞行时, 设备还必须考虑海水、盐雾的影响。表1、2表明: 环境条件不同对设备失效影响的严重程度。

环境条件对设备失效的影响 表1.2

环 境 条 件	对设备失效的影响
实验室使用	1
野外使用	2
军舰上使用	10
飞机上使用	20
火箭上使用	150

设备(包括机械产品)故障多, 是迫使人们重视可靠性的一个原因; 另一个重要原因是为了提高经济效益。设备的经济性主要包括: 维修费用, 飞机停飞费用, 和在使用中设备发生故障造成的损失等。由于产品(或设备)故障多, 上述费用是一项很可观的数目。如50年代中期, 美国国防部每天平均花费2,500万美元用于武器系统的维修, 每年用了90亿美元, 占国防部总预算的25%。通过开展可靠性、维修性的研究, 减少了上述费用。如波音707飞机采用以可靠性为中心的MSG-2维修大纲后, 定时维修项目从原来占总项目的99%减到40%相应的维修费用也有了显著的降低。

§1—2 可靠性指标与基本概念

1. 可靠性概念

科学技术问题的解决, 需要给它明确的定义和定量表示。因为一门科学与数学结合, 才能发展到更加完善和成熟的程度。只有结束定性表示阶段, 找出定量方法描述设备的可靠性, 才能对不同设备的可靠性进行对比、分析、鉴定和改进。

可靠性定义: 产品在规定条件下和规定时间内, 完成规定功能的能力。

定义中“完成规定功能”的对立概念是“丧失规定功能”即设备发生故障。由此可知可靠性是研究故障现象的。由于故障的发生涉及很多不确定因素, 因此, 它是随机现象、随机事件。如某型航行仪表装在同类型飞机上, 在长期飞行过程中出现的故障, 呈现一定的规律性(常称为统计规律性)。统计规律性常表现为频率的稳定性, 即故障发生的次数与试验次数之比, 总是稳定在某一固定值附近。我们可以用这个固定值做为事件(或故障)发生可能性大小的尺度, 也称“频率稳定值为该随机事件(或故障)的概率”, 记为 $P(A)$ 。它介于0与1之间。运用上述方法可给出可靠性定量指标。

基本可靠性: 在规定条件下无故障工作的持续时间或概率。如平均故障间隔时间(MTBF), 或平均故障间隔周期(MCBF)。它应包括设备的所有寿命单位*注1(不仅是任务时间)和产品中的所有失效(不仅是在装配元件级的任务致命性失效)。它可为寿命周期费用(E

CC)和后勤保障分析提供依据。

任务可靠性: 产品在规定的任务剖面*注2时间内完成要求功能的能力, 它是系统的四个可靠性参数之一。系统可靠性参数实例包括:

- (1) 备用状态: 平均维修停机间隔时间(MTBDE)。
- (2) 任务成功率: 致命性失效间任务时间*注3 (MTBCF)。
- (3) 维护要求: 平均维修作业间隔时间(MTBMA)。
- (4) 后勤要求: 平均拆卸间隔时间(MTBR)。

任务可靠性可为产品的使用有效性分析提供依据。

一般情况常用 MTBF、MTBMA 或失效率表示基本可靠性, 而用任务成功概率 (MCSF)、致命性失效间时间(MTBCF)或临界失效率表示任务可靠性。

当基本可靠性未满足要求时, 可以通过简化设计, 使用高质量元件或通过拆衷选择性能容差等予以解决。任务可靠性不足可以通过采用冗余技术或选用合适的操作方式予以解决。但是, 这些设计技术会增加系统的复杂程度, 降低基本可靠性并增加寿命周期费用。

总之, 任务可靠性是工作有效性的一种度量; 基本可靠性是用户费用的一种度量, 两者即有差别又有联系。

使用可靠性和维修性值(operational R&M Value): 可靠性或维修性的一个度量, 它包括产品设计安装、质量、环境、使用、维修及修理的综合影响。

固有可靠性和维修性值(Inherent R&M Value): 是可靠性或维修性的度量。它只包含产品设计及其应用的影响, 并假设它处在理想的使用和环境条件下。

正确理解产品可靠性应明确:

- (1) 规定功能是什么? 产品失效判据是什么?

一般情况, 产品规定功能系指技术性能指标如电阻器, 其性能指标有阻值, 功率、温度系数、精度等。其失效有开路、短路等。

- (2) 规定条件: 包括环境条件、工作条件和使用维护条件等。

(3) 规定时间: 由于产品使用是一个由新变旧的过程, 因此产品可靠性是时间的函数。为此在研究具体产品可靠性时, 必须对其使用时间(或次数、周期)做出明确规定。

2. 可靠性指标名称与定义。

按产品特点与不同的应用场合常用下述可靠性指标与函数:

- (1) 可靠度与可靠度函数

当 N 个产品, 在规定条件下和规定时间内工作, 发现其中有 r 个失效, 则可靠度函数

$$R(t) = P(T > t) \quad F(t) = P(T < t) \quad (1.1)$$

式中 T 为寿命随机变量。

t 为某一规定时间。

$$\text{可靠度 } R = \frac{N-r}{N} = 1 - \frac{r}{N} \quad (1.2)$$

*注1 寿命单位: 是产品使用期间的度量(即工作小时、周期等)。

注2 任务剖面: 对产品从开始到完成某特定任务这一时间段上的事件和环境的描述。它包括任务成功或致命性失效的准则。

注3 致命性失效间任务时间 [Missioo-Time-BetWeen-Critical Failurs(MTBCF)] 任务可靠性的一种度量。在规定的任务时间内, 任务时间的总数除以致命性失效的总次数。

$$R(t) + F(t) = 1$$

$F = \frac{r}{N}$ 称为失效概率或不可靠度

例 1-1、110 支电子管，从开始工作到 500 小时发现有 10 支失效。求可靠度 R 和不可靠度 F

解：

$$R = \frac{N-r}{N} = \frac{110-10}{110} = 90.91\%$$

$$F = \frac{r}{N} = \frac{10}{110} = 9.09\%$$

(2) 失效率与失效率函数

失效率密度函数可由失效频率统计说明

例 1-2、某型机载电子设备共 18 台，从开始使用到首次失效的时间为 16、29、50、68、100、130、140、190、210、270、280、340、410、450、520、620、800、1100(以小时为单位)，做出直方图。

解：产品的失效频率直方图

a 分组：以 250 小时为组距，将失效数据分成五组，并列成表 1.3

某型机载电子设备首次失效频率

表 1.3

序 号	分组范围	组 中 值	失效频率数 Δn_i	失效频率 f_i^*	累积失效概率 F_i
1	0—250	125	9	0.500	0.500
2	250—500	375	5	0.278	0.778
3	500—750	625	2	0.111	0.889
4	750—1000	875	1	0.056	0.945
5	1000—1250	1125	1	0.056	1.000

b. 计算：

$$\text{失效频率 } f_i^* = \frac{\Delta n_i}{N}$$

$$\text{累积失效频率 } F_i = \sum_{j=1}^i f_j^* = \sum_{j=1}^i \frac{\Delta n_j}{N}$$

上述计算结果列入表 1.3、式中 N 为产品总数。

C、做频率直方图如图 1.1

以失效时间 t 为横坐标。以单位时间的失效频率

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t} = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t} \quad (1-3) \text{ 为纵坐标。}$$

图 1.1 表明：每个直方面积 $S_i = f_i \Delta t = \frac{\Delta n_i}{N}$ 代表 Δt 时间范围内失效频率，近似代表随

机变量失效时间(或寿命) T 取值落在 Δt 时间范围内的概率。图1.1也可直观地看到：失效密度随时间变化的大致情况，分布范围。以及每个区间中失效的比例等。

取更多产品做试验。区间更小，则直方图近似可用——光滑曲线 $f(t)$ 表示见图1.1。人们称 $f(t)$ 为失效密度函数。它表示产品在 t 时刻附近单位时间内的失效概率密度。

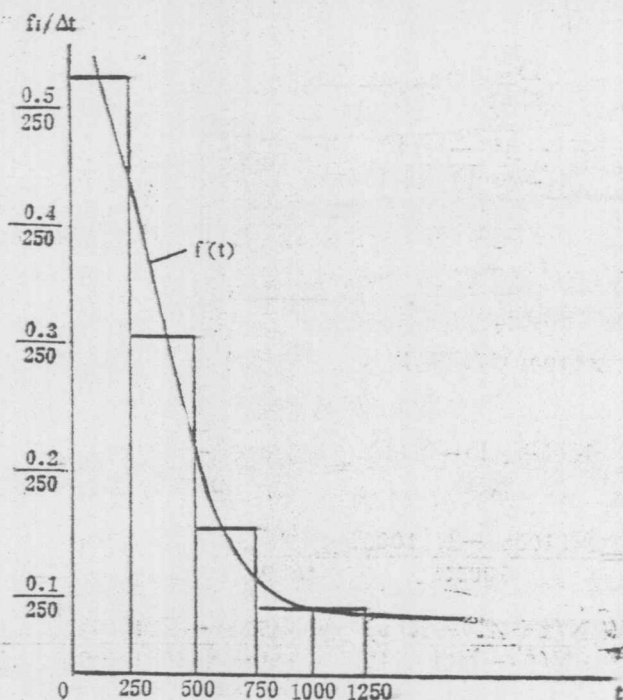


图 1.1 频率直方图

失效概率密度函数具有一般概率密度函数性质。则失效分布函数具有如下性质：

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

$f(t) \geq 0$; $F(t)$ 为 $[0, \infty)$ 内非降函数

$$\int_{t_1}^{t_2} f(t) dt = F(t_2) - F(t_1)$$

$$\int_0^{\infty} f(t) dt = 1$$

$$\text{由 } f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = d[1 - R(t)] = - \frac{dR(t)}{dt} \quad (1.4)$$

式(1-4)说明： $f(t)$ 可以表明可靠度或不可靠度随时间的变化。

失效率函数：

产品工作到 t 时刻以后，单位时间内发生失效的概率，称为产品在时刻 t 的瞬时失效率。也称为失效率函数 $\lambda(t)$ ， $N(t + \Delta t)$ 、 $N(t)$ 为对应 $t + \Delta t$ 、 t 时的失效产品数。

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{[N - N(t)]\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{N \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{\frac{N - N(t)}{N}} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{F(t+\Delta t) - F(t)}{\Delta t} \cdot \frac{1}{R(t)} = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (1.5)$$

$$f_i = \frac{f_i^*}{\Delta t} = \frac{\Delta n_i}{N \Delta t} \text{ 和失效率观测值}$$

$$\hat{\lambda}(t_i) = \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{[N - N(t)]\Delta t} \text{ 比较上述两式知 } \lambda(t) \text{ 比 } f(t) \text{ 能更灵敏地反映产品失效}$$

变化速度。因为后者分母是随时间变化的 $[N - N(t)]\Delta t$ ，前者分母是常数 $N\Delta t$ 。

例 1.3、100 个产品工作到 100 小时发现 25 个失效：在 $t=100 \sim 105$ (小时) 期间内 1 个失效，在 $t=1000$ 小时共有 51 个失效：在 $1000 \sim 1005$ (小时) 期间内 1 个失效，求 $f(100)$ $\lambda(100)$ $f(1000)$ 和 $\lambda(1000)$ 等观测值。

解：

$$f(100) = \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{N \Delta t} = \frac{N(105) - N(100)}{100 \times 5} = \frac{1}{500}$$

$$f(1000) = \frac{N(1005) - N(1000)}{100 \times 5} = \frac{1}{500}$$

$$\lambda(100) = \frac{N(t+\Delta t) - N(t)}{[N(0) - N(t)]\Delta t} = \frac{N(105) - N(100)}{[100 - N(100)] \times 5} = \frac{1}{75 \times 5}$$

$$\lambda(1000) = \frac{N(1005) - N(1000)}{[100 - N(1000)] \times 5} = \frac{1}{49 \times 5}$$

失效率(或平均失效率)：在产品寿命中的一个规定的时间里试验样品失效的总数与该试验样品的累积试验时间之比。

$$\lambda = \frac{r}{T} \quad (1.6)$$

式中 r ——失效产品数。

T ——累积试验时间，指在规定条件下每个产品完成要求功能时间的总和。

失效率的单位：常用 $\%/ \text{小时}$ 、 $\%/10^3 \text{小时}$ ，对失效率很低的产品用菲特作单位。

1 菲特 = $1 \times 10^{-9} / \text{小时}$ ，意即 10 亿个产品工作 1 小时只有一个产品失效。

产品失效率越低，其可靠性越高，常用作开关、继电器、半导体等产品的可靠性指标。

(3) 典型失效率曲线

不可修的大量同样产品使用结果的统计表明：产品的典型失效率曲线可用浴盆曲线表示如图 1.2。按失效机理不同，有如下三种失效：

a. 早期失效：由于设计制造缺陷引起的失效。

b. 偶然失效：由于偶然因素发生的失效，或只能通过概率和统计方法来预计的失效。

c. 耗损失效：由于老化磨损、疲劳等原因引起的失效。

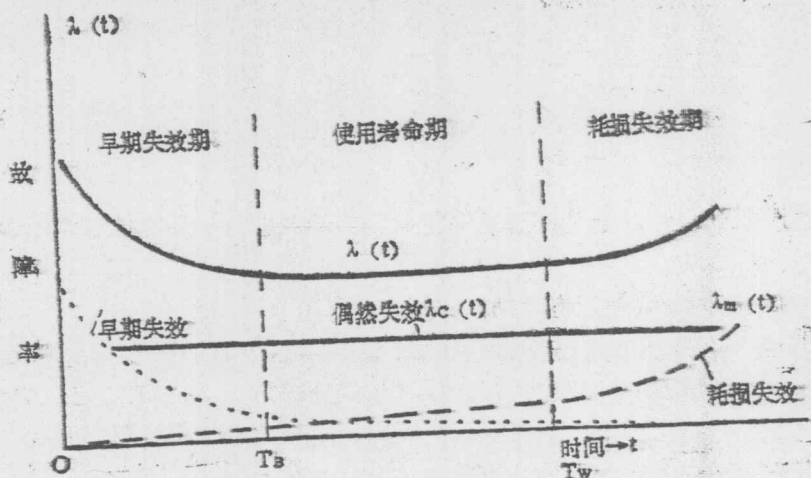


图 1.2 产品典型失效率曲线

典型失效率曲线与人的死亡率曲线相近。当以纵座标表示死亡率，横座标对应于年龄时，曲线的前一部分表示人的幼儿时期。其死亡率较高。因为幼儿身体抵抗力弱，随着年龄增长抗病能力增强，其死亡率逐渐减小。青壮年时期，人的生命旺盛死亡多由偶然所致（如车祸天灾等），其相应的曲线低而平稳。进入老年期由于人的血管、心脏等器官出现了老化现象，死亡率迅速增加。

三个失效期：

a. 早期失效期：此期间产品失效率随时间下降。其主要失效模式是早期失效如电子元件的焊接或密封不良，材料或表面污染，装配不当等，早期失效反映了工厂制造能力和对工艺的控制程度，当更换新部件或产品翻修后再投入工作时也会再次出现早期失效。

早期失效可以通过工艺控制加以预防；通化老炼——筛选试验(Burn-in)予以基本消除，可以认为早期失效对产品可靠性影响不大。

确定老炼——筛选时间是个涉及经验的问题，假设一个串联系统由 N 个元件组成。其中有 N_E 个次品，而且好品的失效率为零，次品的平均故障间隔时间为 m_0 。

$$\text{则系统的可靠度 } R_s = e^{-N_E t / m_0} \quad (1.7)$$

全部 N_E 个次品元件失效的时间均值 $E(t)$

$$E(t) = m_0 \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{N_E} \right) \quad (1.8)$$

例 1.4 假设有 10 个次品，每个次品 $m_0 = 10$ 小时

求： $E(t)$ 值？

注 1. 见文献 2. (11.23) 式。

解:

$$E(t) = m_s \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{N_E} \right)$$

$$= 10 \left(1 + \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \dots + \frac{1}{10} \right) = 10 \times 3 = 30 \text{ 小时}$$

常用 $5E(t)$ 做为老炼筛选试验时间。电子及电气元器件的老炼筛选时间一般为 10-200 小时。

b 偶然失效期(使用寿命期)

产品经早期失效后, 进入偶然失效期。在此期间产品的失效率接近常数。

此时期的早期失效率和耗损失效率与偶然失效率 λ_c 比较, 它们的数值较小: 因此常用偶然失效率表示使用寿命期内的总失效率, 其失效主要由过应力引起的。如过电压和过热常造成电子设备和电子元器件的失效。

偶然失效的出现只能通过概率和统计方法来预测, 如想采用定期翻修消除这类故障, 是有害无益的; 因此未耗损部件的翻修不能提高产品可靠性, 却有可能引起新的早期失效, 使产品可靠性降低。采用老炼——筛选方法对消除偶然失效也是无效的。

c 耗损失效期

在此期间, 产品失效率随时间逐渐上升。其失效是由耗损和老化引起的, 因此失效一般集中在某一时刻发生。此种失效可用正态分布来描述, 对这类失效应在一定条件下采用“事前维修”防止失效的发生。为了确定产品寿命和合适的维修方案对这类失效进行研究是必要的。

(4) 实测的产品失效率曲线。

图 1.3 为一种离心泵的实测失效率曲线, 该图表明:

AB: 典型的失效率曲线:

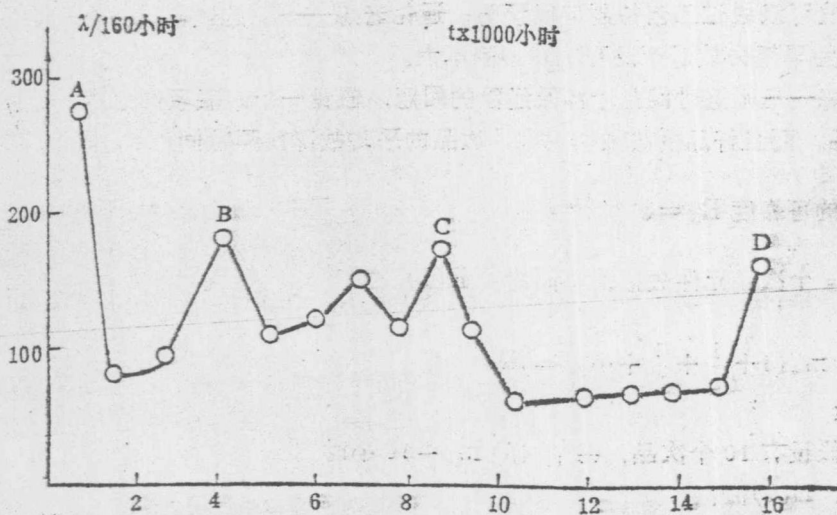


图 1.3 实测“浴盆”曲线

B: 对应于 3,500 小时进行修理并更换零件;

C: 对应于 8,500 小时进行大修, 使失效率下降到比开始工作阶段还低, 修理人员的技术水平较高;

D: 对应于 15,500 小时更换新泵。

图 1.4 是美国联合航空公司通过大量现场统计结果得到的六种类型机载设备失效率曲线。

A类: 近似“浴盆”、有明显的耗损失效。如航空机炮、刹车片等。

B类: 失效率开始近似常数, 或缓慢增加, 随后出现耗损失效。如飞机轮胎、发动机叶片, 气缸、飞机结构物等。

C类: 失效率逐渐增加, 上升趋势较缓慢, 没有明显耗损失效。如航空涡轮发动机等。

D类: 失效率, 在开始段很低, 随后增加, 然后稳定在某一水平上。如航空电机和结构简单的产品等。

E类: 失效率近似常数, 如磁罗盘、瞄准具、力臂调节器以及许多元件组成的可修复产品。

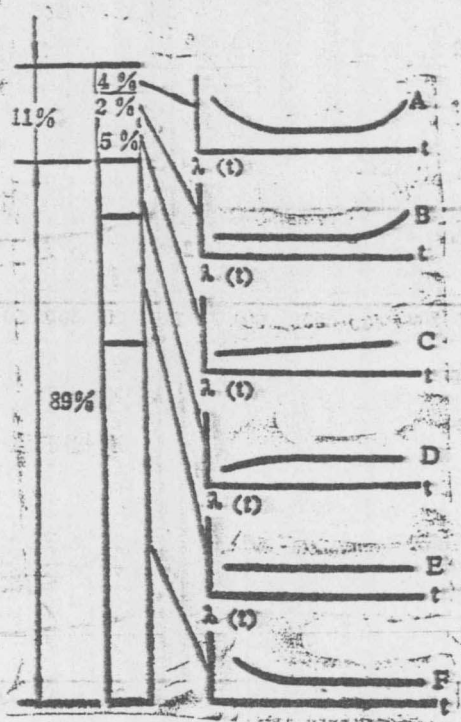


图 1-4 航空机载设备失效率曲线

F类: 大多数未经过老炼筛选的航空电子设备。如无线电罗盘等。上述失效率曲线表明: 航空产品中具有明显耗损失效的产品约占总数的 11%(其中 A 类占 4%, B 类占 2%, C 类占 5%)无明显耗损期的产品约占总数的 89%。

图 1.5 是我国空军工程部门对 1556 架歼六飞机 17 项产品失效率曲线的统计结果。(按

产品分别计算统计时间约为1,300万飞行小时,失效总数为11,945条。图中“首次”字样指产品翻修前的故障情况。“翻修”字样是指产品翻修后的故障情况。

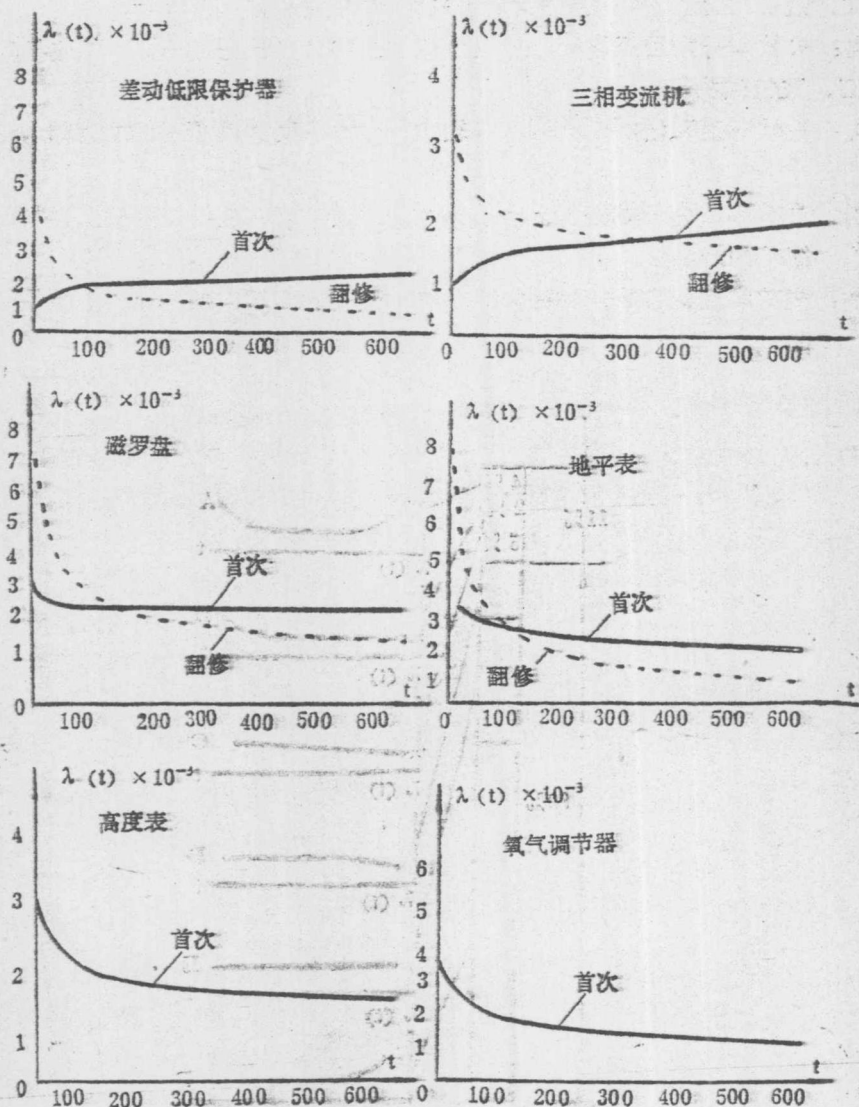


图1.5(a)

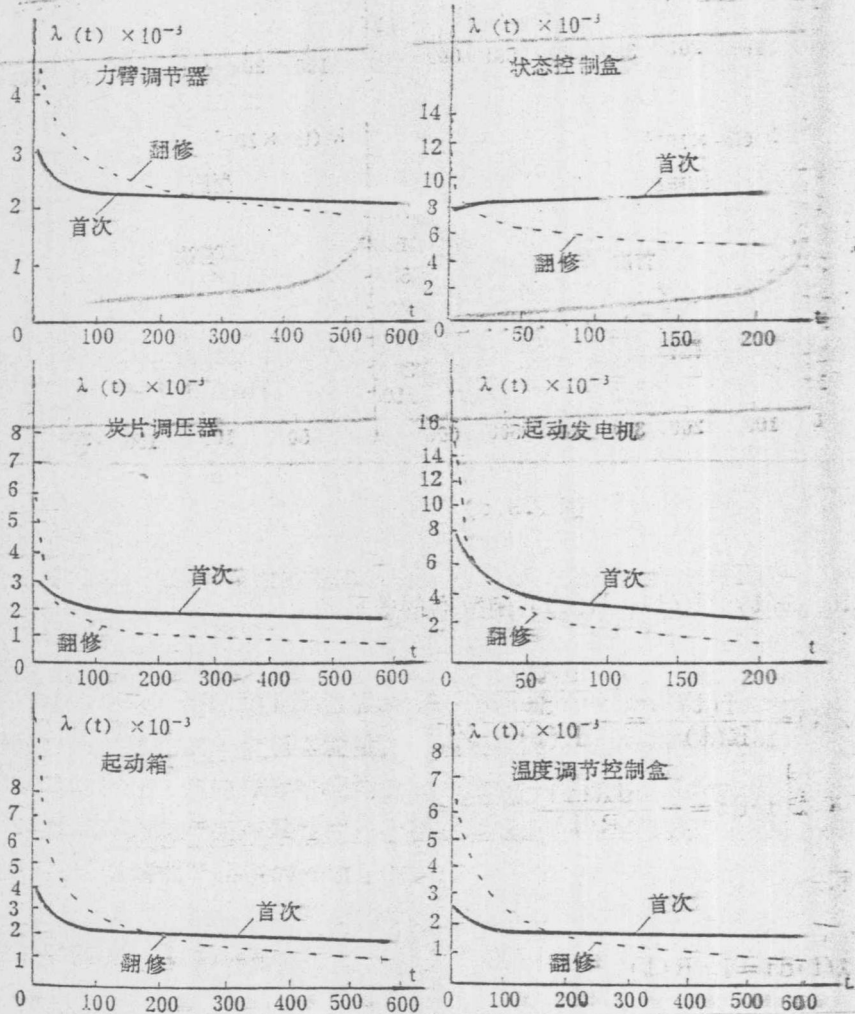


图1.5(b)

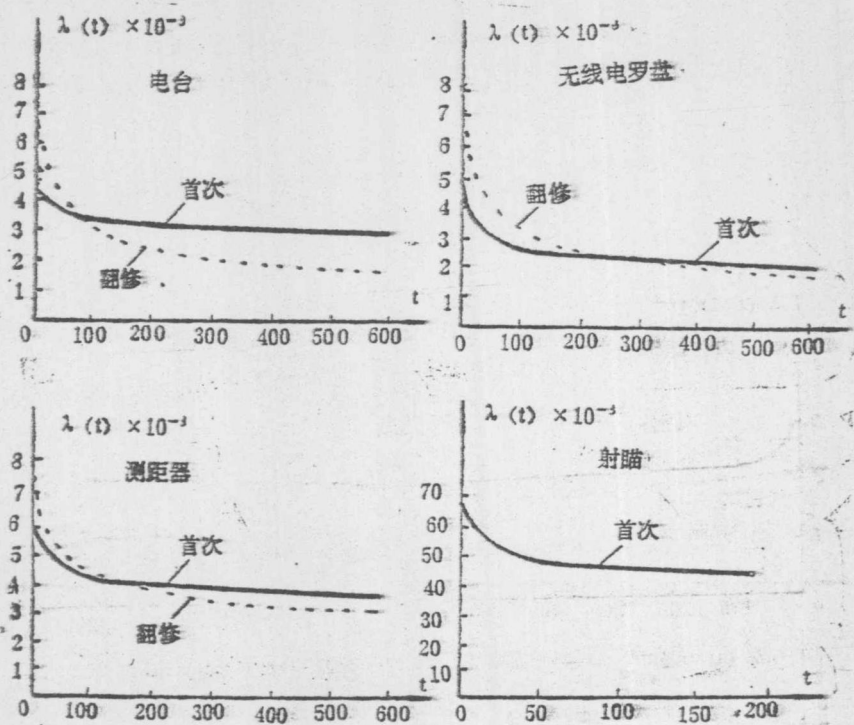


图 1.5(c)

(5) $f(t)$ 、 $\lambda(t)$ 、 $F(t)$ 、 $R(t)$ 各函数间的关系。

$$\text{已知 } \lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = -\frac{\frac{dR(t)}{dt}}{R(t)}$$

$$\text{得 } \lambda(t)dt = -\frac{dR(t)}{R(t)}$$

两边取积分

$$-\int_0^t \lambda(t)dt = \ln R(t)$$

$$\therefore R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$F(t) = 1 - R(t) = 1 - e^{-\int_0^t \lambda(t)dt}$$

$$f(t) = F'(t) = \lambda(t)e^{-\int_0^t \lambda(t)dt} \quad (1.9)$$