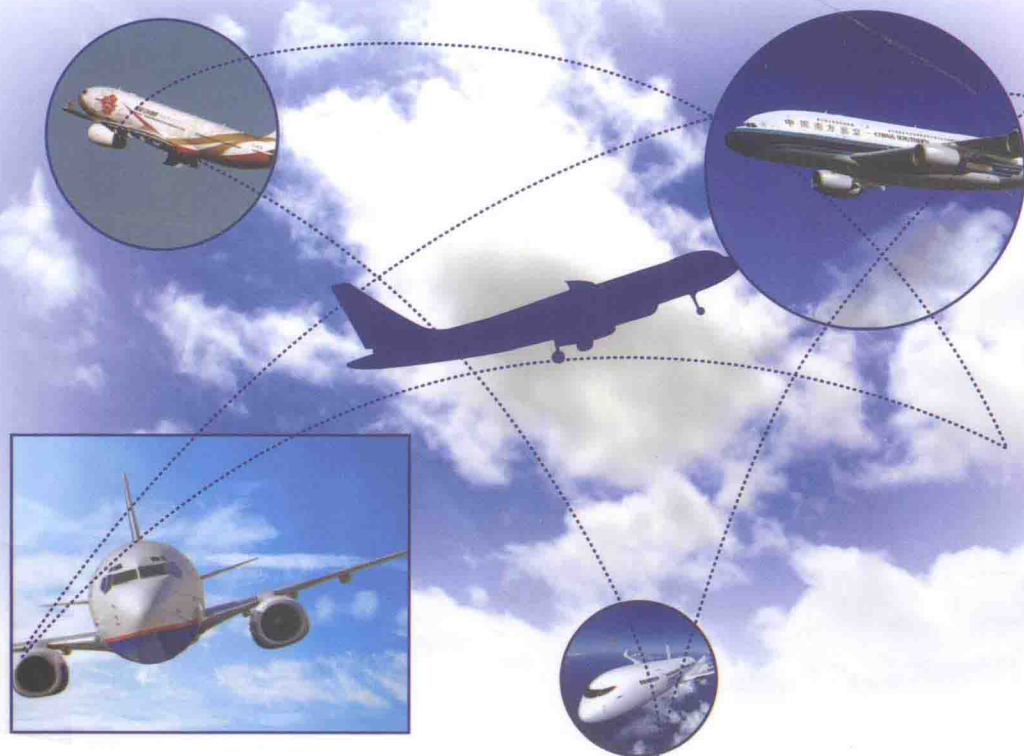


■ 普通高等院校航空专业“十二五”规划教材

航空器可靠性工程

Aircraft Reliability Engineering

么 饶 主 编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

第1章 以可靠性为中心的维修概述

1.1 RCM 基本概念

1.1.1 基本概念

以可靠性为中心的维修(Reliability Centered Maintenance, RCM),是指按照以最少的维修资源消耗保持产品固有可靠性和安全性的原则,应用逻辑决断的方法确定产品预防性维修要求的过程。RCM的最终结果是产生产品预防性维修大纲。

产品的预防性维修大纲是产品的预防性维修要求的汇总文件,一般包括下列内容:

(1) 需进行预防性维修的产品和项目。在此“项目”指某些产品结构的各分析层次,因为最低分析层次有可能是一结构零件上的某一个部位,故称为项目。

(2) 需维修产品(项目)要实施的预防维修工作类型及工作的简要说明。

(3) 各项预防性工作的间隔期。

(4) 实施每项预防性维修工作的维修级别。

由此可见,预防性维修大纲就是要解决以下问题:哪些产品和项目需要实施预防性维修?在哪一级别实施维修?以何种工作类型完成维修以及完成的时机?

1.1.2 RCM 分析的根本目的

RCM 用于确定产品预防性维修大纲,其根本目的如下:

(1) 通过确定适用而有效的预防性维修工作,以最少的资源消耗保持和恢复产品可靠性和安全性的固有水平。产品可靠性和安全性的固有水平是由设计与制造赋予的,通过进行适用而有效的预防性维修,可以使其固有水平得以充分发挥。

(2) 提供必要的设计改进所需的信息。通过 RCM 分析,可以有效地发现对产品可靠性、安全性和维修保障等有重大影响或后果的设计缺陷,为改进设计提供重要信息。

1.1.3 RCM 的产生与发展

在长期的维修实践中,人们一直在不断地探索既实用又科学的维修理论与方法,以便指导维修实践活动,确保产品能够发挥其应有的效能。

20 世纪 50 年代末以前,在各国产品维修中普遍的做法是对产品实行定时翻修,这种做法来自早期的对机械事故的认识:机件工作就有磨损,磨损则会引起故障,而故障影响安全,所以,产品的安全性取决于可靠性,而产品可靠性是随时间增长而下降的,必须经常检查并定时翻修才能恢复其可靠性。预防性维修工作做得越多,翻修周期越短,翻修深度越大,产品就越可靠。可见,传统的维修思想是以定时翻修为主的维修思想,其理论基础

是故障规律为典型的“浴盆曲线”。然而,在多年的实践中人们发现,无论这种维修活动进行得多么充分,很多故障也不能防止和有效减少,同时,这种维修方式的维修费用不堪负担。

20 世纪 50 年代末期,国际民用航空机群的规模逐渐发展到有充足的数据可供研究的程度,而且维修费用日益迅速增长,人们开始对传统做法的实际效果进行彻底检查,与此同时,负责管理航空公司维修工作的联邦航空局也在困境中体验到,对某些型号的不可靠发动机来讲,不可能通过改变预定大修的范围或频度而控制其故障率。因此,于 1960 年成立了一个由联邦航空局和各航空公司两方面代表所组成的特别工作组来调查研究预防性维修的作用。其结果使人们认识到:①预定大修对复杂设备的整体可靠性影响极小,除非该设备具有一种支配性故障模式;②对于相当多的设备,预定维修的方式没有什么效果。

人们尝试将各种可靠性大纲中所学到的东西组织起来,研究出一种合理的、通用的制订预防性维修大纲的方法。1965 年,有人提出了一种不成熟的决断图方法,并在 1967 年 6 月召开的美国航空和宇航学会的民用飞机设计与运行会议上发表了一篇论述其应用的报告。这种方法经完善后编入了为管理制订新型波音 747 飞机初始大纲而成立的维修指导小组所起草的一本关于维修评估和制订大纲的手册中。由航空界和联邦航空局人员组成的工作组应用这份称为 MSG-1 的文件,制订了第一个以 RCM 原理为基础的预防维修大纲。波音 747 飞机的维修大纲获得了成功。

决断图方法在使用中得到了进一步完善,两年后被编入了第二份文件,即“MSG-2; 航空公司/制造公司维修大纲制订书”。使用 MSG-2 制订了洛克希德 1011 和道格拉斯 DC-10 飞机的预防维修大纲,这些大纲也很成功。MSG-2 还被用于军用战术飞机,首批采用的是洛克希德公司的 S-3 和 P-3 飞机及麦克唐纳公司的 F4J 型飞机。欧洲也编写了与此类似的文件,作为空中客车公司的 A-300 和协和式飞机的初始大纲的依据。

MSG-1 和 MSG-2 中将这些方法的目的概括为制订一个能以最低的成本确保达到设备可能达到的最大安全性和可靠性的预防维修大纲。经济上得益于这种方法的例子是,按传统的维修方针,道格拉斯 DC-8 飞机的初始大纲中要求对 339 个部件进行预定大修,与之相比,DC-10 飞机的大纲中只有 7 个这样的部件。DC-10 大纲中不再规定大修期限的部件之一为涡轮推进发动机。取消发动机的预定大修不仅使人工和材料费用大为降低,也使车间检修所需的备份发动机的库存量减少了 50% 以上。由于当时大型飞机的发动机每台价值在 100 万美元以上,因而可节省大量经费。

另一个例子是,按照波音 747 的 MSG-1 大纲,在达到该型飞机第一次大检查的 20000h 的基本间隔期以前,联合航空公司只用了 66000h 就完成了飞机的结构大检查。而按照传统的维修方针,对于体积较小、复杂程度较低的 DC-8 飞机,在相同的结构检查间隔期需要耗费 400 万工时才能完成检查。对任何一个负责维修由复杂设备构成的庞大机群的单位来讲,这么大幅度地降低费用具有很重要的意义。更重要的是,这种费用降低是在不降低可靠性的情况下达到的。相反,更好地了解复杂设备的失效过程,使预防性维修能针对潜在故障的特定迹象,实际上是提高了可靠性。

尽管 MSG-1 和 MSG-2 彻底改革了运输机维修大纲的制订方法,但在其他类型设

备上的应用却因其简短性和针对性而受到限制。此外,某些概念的系统阐述也不够完善。例如,决断推理起始于对所建议工作的评估,而不是对确定该工作是否需要以及需要时其实际目的故障后果的评估;未提及确定工作间隔的问题;隐蔽功能故障的作用尚不清楚;结构维修的论述不够充分;也未对设备投入使用后如何利用运行资料对初始大纲进行改进和完善加以说明,即未对有效管理现行大纲所需的信息系统加以说明。所有这些缺陷,以及阐明许多基本原理的需要,导致产生了应用范围更广泛的逻辑分析方法,并形成了现在称为“以可靠性为中心的维修”的逻辑学科。在航空工业中,RCM 也称为 MSG-3。时至今日,它仍保留着对所有主要型号飞机制定和细化维修大纲所采用的程序。

1978 年,美国国防部委托美国联合航空公司韵斯坦利·诺兰(Stanley Nowlan)和霍华德·希普(Howard Heap)所撰写的关于民用航空工业制订飞机维修大纲所采用方法的报告,即著名的“以可靠性为中心的维修”报告,这篇报告全面阐述了 RCM 在民用航空工业中的研究与应用情况,它标志着 RCM 理论的诞生。这篇报告成为以后 RCM 研究的基础。

从 20 世纪 80 年代起,RCM 已应用于世界上许多工业部门,它正迅速成为维修管理实践的基础。自 20 世纪 60 年代美国民航界首先创立以可靠性为中心的维修理论以来,经历了怀疑、试验、肯定、推广和制定标准的过程,在 40 年来指导维修实践的过程中,该理论不断地得到发展和完善,目前,RCM 的国际标准正在拟制中。今天,这一理论已成为指导机械、机电、电器和电子等各类设备维修的共性基础理论。

1990 年 9 月,英国阿兰德公司莫布雷在 RCM 和“MSG-3 修改 1”的基础上,结合民用设备的实际情况,提出了 RCMZ,到 2000 年,该理论已在英国、爱尔兰共和国、美国、中国香港、澳大利亚、西班牙和新加坡等国家和地区的钢铁、电力、铁路、汽车、地铁、海洋石油、核工业、建筑、供水、食品、造纸、卷烟及药品等行业广泛应用。RCM 已被各层次的人员欣然接受,并使这些国家和地区的用户都取得了成功,这一事实说明文化上的差异对 RCM 的影响远小于很多其他这类参数的影响。

1979 年,中国民航和空军首先引进了以可靠性为中心的维修理论,取得了较好的效果。随后,海、陆军和各工业部门也逐步开展了研究和应用。例如,某型坦克发动机应用以可靠性为中心的维修理论,使其寿命延长了 40%,1987 年在国产民用运输机上全面开展 RCM 研究,取得了成功。

1989 年 5 月,原航空航天工业部发布了航空工业标准《飞机、发动机及设备以可靠性为中心的维修大纲的制订》(HB 6211—89),并运用于轰炸机和教练机维修大纲的制订。1992 年,总后勤部、国防科工委发布了国家军用标准《装备预防性维修大纲的制订要求与方法》(GJB 1378),并于 1994 年 3 月颁布了该标准的实施指南,用标准的形式对 RCM 加以规范化,并用以指导各类武器装备维修大纲的制订。

以可靠性为中心的维修理论更新了传统维修的观念,按照新理论指导的维修实践,与传统维修的做法有较大的差别。

1.2 可靠性基本概念

1.2.1 可靠性的定义

产品的质量指标有很多种,例如,一辆摩托车的指标就有功率、耗油率、最大速度、噪声等。这类指标通常称为性能指标,即产品完成规定功能所需要的指标。此外,产品还有另一类质量指标,即可靠性指标。它反映产品保持其性能指标的能力,如摩托车出厂时的各项性能指标经检验都符合标准,但行驶 10 万公里后摩托车是否仍能保持其出厂时的各项性能指标呢?这是用户十分关心的问题。生产厂为了说明自己产品保持其性能指标的能力,就要提出产品的可靠性指标(可靠性特征量),如可靠度、平均寿命、失效率等。

根据国家标准《可靠性、维修性术语》(GB 3187—1994),可靠性定义为“产品在规定条件下和规定的时间区间内完成规定功能的能力。”这种能力以概率(可能性)表示,故可靠性也称可靠度。定义中的“产品”是指作为单独研究和分别试验的任何元件、器件、零部件、组件、设备和系统;“规定条件”是指产品的使用条件、维护条件、环境条件和操作技术;“规定时间区间”是指产品的工作期限,可以用时间单位,也可以用周期、次数、里程或其他单位表示;“规定功能”通常用产品的各种性能指标来表示。对以上 4 个方面内容必须有明确的规定,研究产品可靠性才有意义。

1.2.2 可靠性研究的基础内容概述

1. 可靠性常用指标

可靠性有狭义和广义两种意义。狭义可靠性仅指产品在规定条件下和规定时间区间内完成规定功能的能力。以后对“可靠性”一词若不加以注明,均指狭义可靠性。广义可靠性通常包含狭义可靠性和维修性等方面的内容。将产品在规定的维护修理使用条件下,产品在执行任务期间某一时刻处于良好状态的能力称为广义可靠性。

维修是为了保持或恢复产品能完成规定功能而采取的技术管理措施,仅适用于可修复产品。维修性则是在规定条件下使用的产品在规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到能完成规定功能的能力。

狭义可靠性和维修性两方面的内容合起来称为有效性。有效性是指可维修产品在某时刻具有或维持规定功能的能力。

产品长期储存,其材料将会老化变质。在规定的储存条件下,产品从开始储存到丧失其规定功能的时间称为储存寿命。

狭义可靠性、广义可靠性、维修性、有效性和储存寿命的相互关系,可用图 1-1 表示。图中的狭义可靠性、有效性和储存寿命,称为可靠性的三大指标。

这里还需指出的是,为什么不把广义可靠性作为可靠性的一个指标而用有效性代替?这是因为当前工程界对维修性的研究和应用还暂不如狭义可靠性,特别是定量研究分析方面。本书主要研究产品的狭义可靠性问题。狭义可靠性具体指标详见第 2 章。可靠性基本理论除了可靠性具体指标外,还包括以下内容。

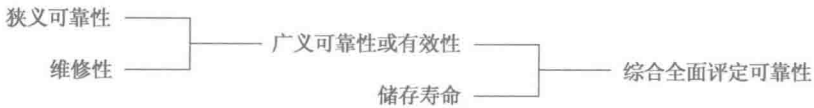


图 1-1 可靠性的三大指标

2. 可靠性模型的建立与分析

可靠性模型是指可靠性框图及其数学模型。建立各级产品可靠性模型的目的是定量分配、估算和评价产品的可靠性。

1) 几种典型的可靠性模型

(1) 串联模型指组成产品的所有单元中任一单元发生故障都会导致整个产品故障的模型。

(2) 并联模型指组成产品的所有单元同时工作,只要有一个单元不故障,产品就不故障,也称工作储备模型。例如,某液压系统中有两个液压泵同时工作,虽然其中一个泵故障了,但该系统仍能正常工作即属此类。

(3) r/n 模型指组成产品的所有单元同时工作,但至少 r 个正常,产品才能正常的模型。例如,一架具有 3 台发动机的飞机,按规定只要两台发动机能正常工作,飞机即可正常飞行,即属 $2/3$ 模型。

(4) 旁联模型指组成产品的所有单元中,只有一个单元在工作,当工作单元故障后通过检测转换装置接到另一单元进行工作的模型,也称非工作储备模型。例如,某燃油系统由正常、应急分系统组成,当正常系统故障后转为应急系统工作,即属此类模型。

几种典型可靠性模型如表 1-1 所列。

2) 可靠性建模与分析的主要用途

- (1) 从可靠性角度出发,为设计方案等的决策提供依据。
- (2) 定量地预计或评价装备的可靠性,发现其薄弱环节。
- (3) 它是进行故障模式、影响及危害性分析的基础。

表 1-1 典型的可靠性模型

可靠性框图	数学模型
(a) 串联系统	$R_s(t) = \prod_{i=1}^n R_i(t)$ $\lambda_s = \sum_{i=1}^n \lambda_i$ $MTBF_s = 1/\lambda_s$ 假设各单元寿命服从指数分布
(b) 并联系统	$R_S(t) = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_i(t))$

(续)

可靠性框图	数学模型
(c) r/n模型	$R_s(t) = \sum_{i=0}^{n-r} C_n^i R(t)^{n-i} (1 - R(t))^i$ 假设各单元相同
(d) 旁联模型	$R_s(t) = e^{-\lambda t} \left[1 + \lambda t + \frac{(\lambda t)^2}{2!} + \dots + \frac{(\lambda t)^{n-1}}{(n-1)!} \right]$ 假设各单元相同, 寿命均服从指数分布, 检测转换装置可靠度为 1

3. 可靠性预计与分配

1) 可靠性预计、分配的目的及相互关系

可靠性预计与分配是可靠性设计的重要任务之一。在装备寿命周期的前几个阶段要反复进行多次。可靠性预计、分配的关系如图 1-2 所示。

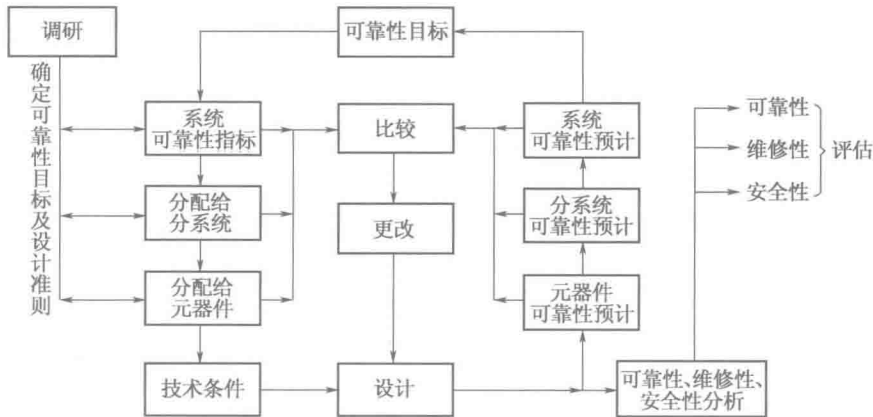


图 1-2 可靠性预计和分配

可靠性预计是根据组成系统的元件、组件、分系统的可靠性来推测系统的可靠性。这是一个从小到大、由下向上的综合过程。其主要目的是：从可靠性角度出发,对不同的设计方案进行比较,为设计决策提供依据;发现设计中的薄弱环节,为设计改进或生产过程控制提供依据;为可靠性试验方案设计提供依据;对可靠性分配、维护使用提供有益信息。可靠性分配是把系统可靠性指标分给分系统、设备、组件和元件。这是一个从大到小、由上到下的分解过程。其主要目的是分配给各级产品可靠性指标,使各级设计人员明确其可靠性设计要求,并研究实现这些要求的可能性及方法。它也是可靠性试验与评价的依据。

2) 可靠性预计方法

工程中常用的可靠性预计方法见表 1-2。

表 1-2 民航飞机的主要可靠性参数

序号	指标类型	具体指标
1	安全性	损失概率;事件率
2	可用性	出勤可靠度或延误率;航班可靠度
3	可靠性	出勤可靠度或延误率;平均故障间隔时间或失效率;航行可靠度;发动机空中停车率;发动机送修率;平均非计划拆卸间隔时间
4	耐久性	首次翻修间隔时间;翻修间隔时间;总寿命;储存期限

3) 可靠性分配方法

工程中常用的可靠性分配方法见表 1-3。

表 1-3 常用的可靠性预计方法

序号	预计方法	适用范围	适用阶段	简要说明
1	元件计数法	电子类产品 基本可靠性预计	方案论证及 初步设计	根据元器件的品种及粗略的质量要求,查 MIL - HD-BK - 217(国外元器件)或 GJB/Z299A(国内元器件),得到各元器件故障率数据,按产品中元器件数量将故障率相加
2	应力分析法	电子类产品 基本可靠性预计	详细设计	根据元器件的品种、质量水平、工作应力及环境应力等因素,查 MIL - HDBK - 217(国外元器件)或 GJB/Z299A(国内元器件),得到各元器件故障率数据,按产品中元器件数量将故障率相加
3	故障率预计法	机械、电子和机电类产品, 但要求组成产品的所有单元均有故障率数据 基本或任务可靠性预计	详细设计	根据产品原理图,建立其可靠性模型,输入各单元的故障率设计进行计算
4	相似产品法 (含相似电路、相似设备)	机械、电子和机电类产品, 具有相似产品的可靠性数据 基本或任务可靠性预计	方案论证及 初步设计	将研制的新产品与其可靠性已知的相似产品进行比较
5	评分法	机械、机电类产品,产品中 仅个别单元有故障率数据 基本或任务可靠性预计	方案论证及 初步设计	专家根据其经验,按几种因素(如复杂度、环境和技术水平等)对产品的各单元进行评分。通过已知故障率单元的数据,推算出其他单元的故障率。按数学公式算出产品的故障率
6	性能参数预计法	比较复杂的机械、电子和机电系统或分系统 基本或任务可靠性预计	方案论证及 初步设计	根据同类型产品的大量统计数据,建立产品可靠性与其性能参数的数学关系。将新研产品的有关性能参数代入,预计新研产品的可靠性
7	上、下限法	复杂的机械、电子和机电系统或分系统,其各单元均有可靠性数据 任务可靠性预计	初步设计及 详细设计	利用简化方法算出复杂系统可靠性的上、下限,再将上、下限综合预计系统可靠性

4. 故障寿命分布规律及维修策略

1) 浴盆曲线

研究故障宏观统计规律主要是研究故障率随时间变化的规律。认为具有代表性的是图 1-3 所示的规律。

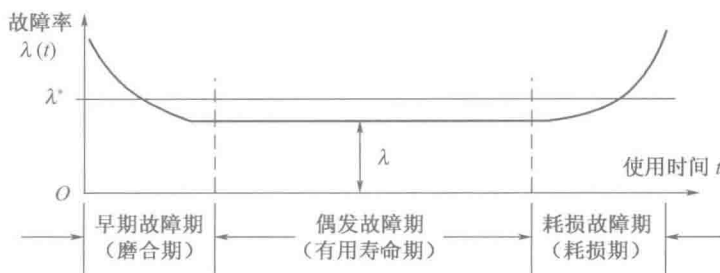


图 1-3 浴盆曲线

从图 1-3 可看出,在一个复杂系统或设备的寿命周期中,故障率随时间的变化分为 3 个阶段,即早期故障期、偶发故障期和耗损故障期。

(1) 早期故障期的故障主要由设计、制造和材质上的缺陷或操作不熟练等原因造成,发生在设备的使用初期、大修理或改造后使用初期。开始故障率较高,随着故障的排除,故障率逐渐下降。

(2) 偶发故障期的故障主要由构成系统(设备和零部件)的某些无法预测的缺陷所引起。在此期间,故障不可预测,不受运转时间的影响而随机发生。此时期的故障大体以一定的比率发生,故障率 $\lambda(t)$ 基本保持不变,且服从指数分布。这一时期是设备的最佳工作期。

(3) 耗损故障期的故障主要由构成设备的大部分零部件集中耗损而产生,其表现形式是随着运转时间的增加,故障率逐渐升高。

通常,根据设备的耗损故障情况和能力,制定一条“允许的故障率 λ^* ”的界线,以控制实际故障率不超过此范围。维修人员的工作是努力延长设备寿命,减少停机时间,降低故障率,使其不超过规定的“允许的故障率 λ^* ”界线。

2) 一般设备故障率曲线的基本形式

通过美国宇航局统计数据表明,航空设备故障率大致可以分为 6 种类型,其故障率曲线如图 1-4 所示。

从图 1-4 中的 6 种故障率曲线可以看到,图 1-4(a) 所示为经典的浴盆曲线,有明显的耗损期;图 1-4(b) 所示的故障率具有常数或渐升的特征,然后出现明显的耗损期,符合这两种形式的是各种零件或简单产品的故障,如轮胎、刹车片或活塞式发动机汽缸的故障,它们通常具有机械磨损、材料老化或金属疲劳等;图 1-4(c) 所示的没有明显的耗损期,但是故障率也是随着使用时间的增加而增加;图 1-4(d) 显示了新设备从刚出厂的低故障率急剧增长到一个恒定的故障率;图 1-4(e) 显示设备的故障为恒定值,出现的故障常常是偶然因素造成的;而图 1-4(f) 显示设备开始有高的初期故障率,然后急剧下降到一个恒定的或者是增长极为缓慢的故障率。

具有图 1-4(a)、(b) 耗损特性的航空设备仅占全部设备的 6%,具有经典浴盆曲线

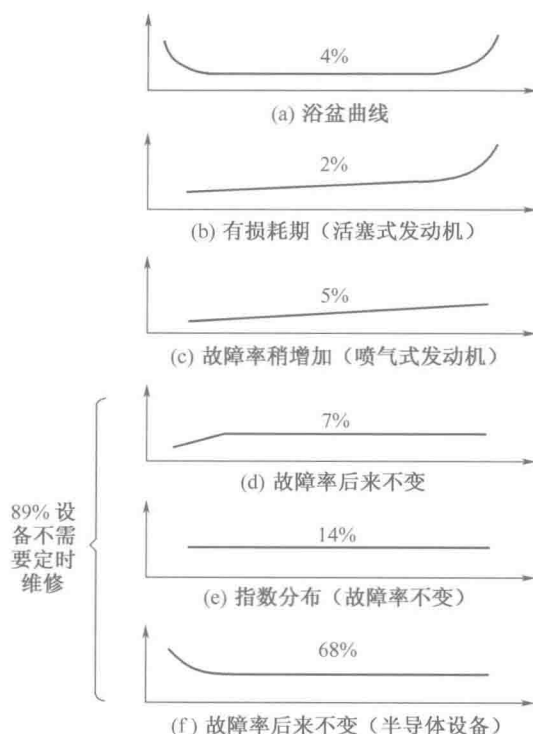


图 1-4 6 种基本故障率 λ 与时间 t 的关系曲线
纵轴表示故障率 λ ; 横轴表示从新的或翻修后算起的时间 t ; 百分数表示
具有某些曲线样式的机件在所研究机件总数中所占的比例

(图 1-4(a)) 的仅占 4%, 没有明确耗损期 (图 1-4(c)) 的占 5%。以上 3 种形式故障率的设备共占 11%, 而 89% 的设备则没有耗损期 (图 1-4(d) ~ (f)), 归为图 1-4(e) 所示, 这些不需要定时维修。

一般来说, 在实际运行中, 设备的故障率应该是图 1-4 所示的 6 种曲线中的一种或几种的合成 (图 1-4(a) 可以看作图 1-4(b)、(e)、(f) 的合成), 其故障率可能与民用飞机的故障率不完全相同。但是, 设备故障率取决于设备的复杂性, 设备越复杂, 其故障曲线越接近于图 1-4(e)、(f)。

图 1-4(a)、(b)、(c)、(e) 所示的 4 种曲线的分布函数及其故障率模型和维修策略分别如下。

(1) 浴盆曲线 (图 1-4(a) 所示曲线)。浴盆曲线的分布函数为

$$F(t; \eta, \beta) = 1 - \exp \left[1 - \exp \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \quad t \geq 0; \eta, \beta > 0 \quad (1-1)$$

相应的密度函数为

$$f(t; \eta, \beta) = \exp \left[1 - \exp \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right] \times \exp \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \times \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (1-2)$$

这是一个两参数模型, 其失效率函数为

$$r(t; \eta, \beta) = \exp\left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \times \frac{\beta t^{\beta-1}}{\eta^\beta} \quad (1-3)$$

这里故障率函数 $r(t)$ 可以看作两个函数, 即

$$r_1(t; \eta, \beta) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1}$$

$$r_2(t; \eta, \beta) = \exp\left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right]$$

的乘积。其中, 当 $\beta < 1$ 时, r_1 为减函数, r_2 则总是增函数。这里 $r(t)$ 的导数为

$$r'(t; \eta, \beta) = \frac{\beta r(t)}{t} \left[\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta - \left(\frac{1}{\beta} - 1\right) \right] \quad (1-4)$$

由式(1-4)知, 当 $\beta < 1$ 时, $r(t)$ 是浴盆曲线形状的, 其最低点对应的 t 值为

$$t = \eta \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (1-5)$$

浴盆曲线的维修策略为: 对于早期故障, 只能在发现故障后立即采取排除措施, 不适用于采取定时更换的事前预防对策。因为在早期故障率高的情况下, 如果企图以新品更换在用品, 就等于用故障率高的机件更换故障率低的机件, 不仅不能降低总的故障率, 反而会产生相反的效果。

图 1-5 显示每相隔间隔期 T 实行定时更换时故障率的变化情况。每次定时更换, 都会使故障率升高, 并使平均故障率大于 $\lambda(T)$, 保持在一个较高的水平。

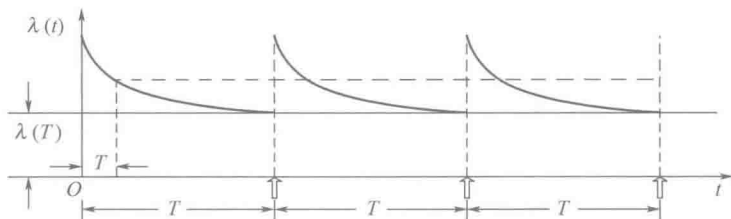


图 1-5 定时更换产生反效果的示意图

偶发故障期, 不能用定时更换的办法来预防。故障率本来是常数, 即使更换了, 故障率也不发生变化, 定时更换无效果(图 1-6)。这时只能让它一直工作到有用寿命末期为止。如果更换修理, 也许会引起附加的早期故障, 增加人为差错的概率。

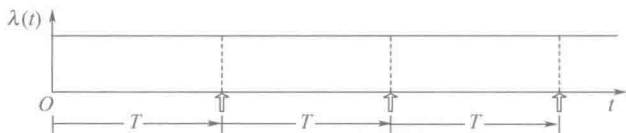


图 1-6 定时更换无效果的示意图

耗损故障期, 设备的故障率开始随着时间的增加而迅速增大, 表现出故障集中出现的趋势。如果在进入耗损故障期之前定时更换, 故障率递增的趋势是可以控制住的。

(2) 正态分布函数(图 1-4(b)所示曲线图 1-7)。正态分布函数分布密度、可靠度

和故障率函数分别为

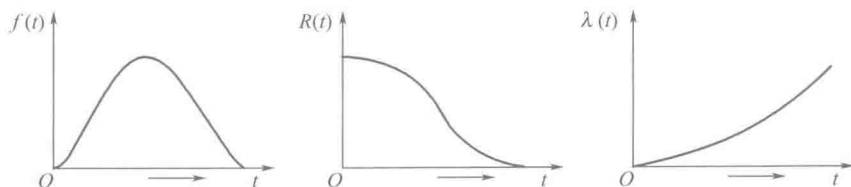


图 1-7 正态分布曲线

$$f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (1-6)$$

$$R(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad (1-7)$$

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{1 - F(t)} \quad (1-8)$$

正态分布曲线的维修策略：对于故障率服从正态分布的设备存在两种情况，如图 1-8 和图 1-9 所示。图 1-8 所示的设备，其状态变化分布范围小，故障率在短时间内增长很快，设备故障多发期的时间跨度短，故可采用定期维修策略，在设备故障率急剧增长之前进行定期维修。图 1-9 所示的设备，其状态变化分布范围大，故障率增长缓慢，设备故障多发期跨越了较长的时间段，很难判断合适的维修周期，此时可采用基于状态的维修策略。

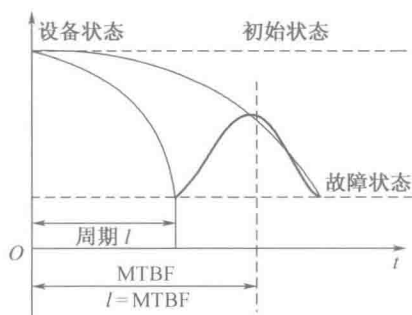


图 1-8 定期维修

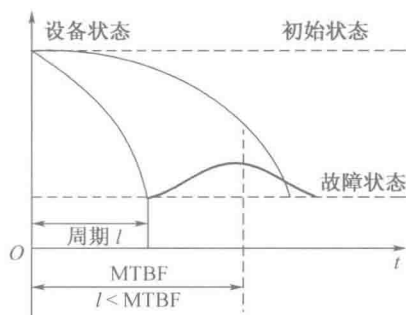


图 1-9 基于状态的维修

(3) 线性递增函数(图 1-4(c)所示曲线)。该分布函数、分布密度及故障率函数分别为

$$F(t; a, b) = 1 - \exp \left[- \int_0^t (at + b) dt \right] \quad (1-9)$$

$$f(t; a, b) = (at + b) \exp \left[- \int_0^t (at + b) dt \right] \quad (1-10)$$

$$r(t, a, b) = at + b \quad (1-11)$$

式中： a 为斜率； b 为截距。

(4) 指数分布函数(图 1-4(d)所示曲线)。其分布函数、可靠度及故障率函数分

别为

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (1-12)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (1-13)$$

$$\lambda(t) = \lambda \quad (1-14)$$

式中: $1/\lambda$ 为平均故障间隔时间(MTBF)。

指数分布曲线的维修策略: 故障服从指数分布的设备, 平均故障间隔期等于故障率 λ 的倒数, 即 $1/\lambda$ 。因此, 对于可修复系统可以认为大约每隔 $1/\lambda$ 时间发生一次故障, 此时可以通过改进设计和设备的检修来改善设备的状态(图 1-10)。

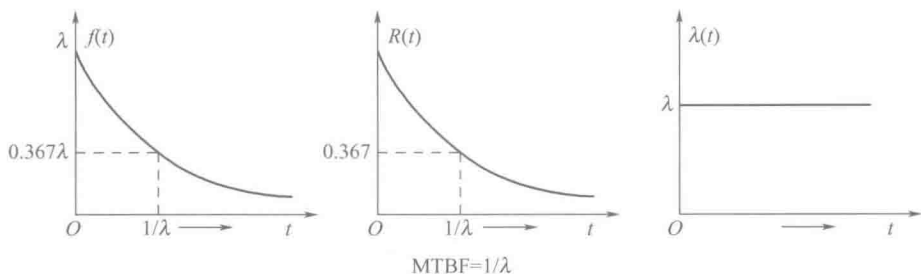


图 1-10 指数分布相关曲线

3) 复杂设备故障率曲线

复杂设备是相对简单设备而言的, 简单设备是指只有一种或很少几种故障模式能引起故障的设备。复杂设备是指具有多种故障模式能引起故障的设备, 如飞机、轮船、汽车及其各系统、设备和动力装置均属于复杂设备。

1960 年 2 月, 美国贝尔电话实验室的德雷尼克首次发表了复杂设备的故障定律。后来也称之为德雷尼克定律。其内容是: 可修复的复杂设备, 不管其故障件寿命分布类型(如指数分布、正态分布等)如何, 故障件修复或更新之后, 复杂设备的故障率随着时间的增长而趋于常数, 如图 1-11 所示。

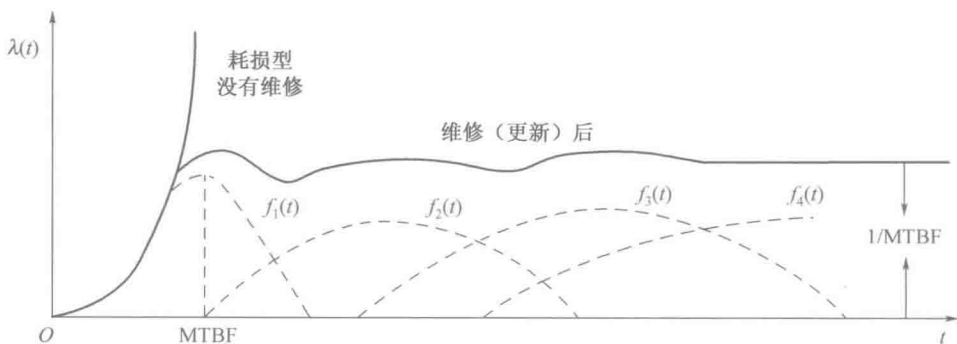


图 1-11 复杂设备维修(更新)后的故障率曲线

一般的机械设备、机电设备、电气设备和电子设备等多属于复杂设备。复杂设备的故障定律应用十分广泛, 它使我们在故障机制尚不清楚的情况下, 可以回避故障的物理原因, 也可不必知道故障件的分布类型, 为实施预防性维修工作提供了简便而又重要的理论依据。

复杂设备故障定律的物理解释:复杂设备的故障是由许多不同的故障模式造成的,而每一种故障模式会在不同的时间发生,具有偶然性。如果出现了故障就及时排除——更新的话,那么故障件的更新也具有偶然性,因而使得设备总的故障率为常数。

1.3 维修性及维修性指标

1.3.1 维修性的定义

维修性是航空器与维修保障密切相关的另一类质量属性,是由设计赋予航空器的维修保障简便、迅速、经济的维修保障品质。

最初提出维修性概念时,仅把它作为可靠性的部分内容加以考虑,直到20世纪60年代中期,维修性才被公认为一个独立的专业。目前在系统工程中,通常将维修性作为一种设计出来的系统固有特性,这种固有的、量化的特征决定了为把系统维持在或恢复到给定的使用状态所需的维修工作量。确切地说,维修性定义的是系统在规定的条件下(包括维修等级、人员技术水平与资源等),在规定的时间内,按给定的程序和方法进行维修时,保持或恢复到规定状态的能力。

所以维修性就是在规定的约束(时间、条件、程序和方法等)下完成维修的能力,它反映着上述的维修及时、有效和经济的目标。维修性具有以下特点:

(1) 直接影响到可用性。

(2) 维修性的好坏,关系着维修所需的时间、工时以及其他物质资源消耗,直接决定着维修费用,维修性是影响寿命周期的重要因素。

国外的经验表明,在研制阶段投入1USD改进维修性,可望取得减少全寿命费用(Life Cycle Cost, LCC)达到50~100USD的效益。维修的经济性可以用直接维修成本来度量。直接维修成本(Direct Maintenance Cost cycle cost, DMC)是指在完成飞机或设备维修中直接花费的人工时和材料的费用。维修性包括直接维修成本属性。

航空器的测试性(testability)是维修保障过程的重要条件。测试的概念很广泛,包括对航空器进行的检查、测量、试验。测试性定义为能及时、准确地确定产品(系统、子系统、设备或组件)状态(可工作、不可工作、性能下降)和隔离其内部故障的一种设计特性。航空器好的测试性主要表现在:产品系统中重要零部件出现影响安全、经济和使用的状态时能够被检测或监测到;有完善的机载监测系统,自检功能强、测试方便;便于使用外部的检查、监测设备和分析技术进行状态监测和故障诊断。测试性的问题,包括现代监测与诊断技术,是可以构成维修工程的两个单独分支进行研究发展的。本书从概念上把测试性作为维修性的一部分。

本书绪论中已经提到,进行维修和维修决策之前,能否通过机内传感器及其诊断系统和离位检测诊断技术,及时、准确地确定、预测到航空器的状态并将故障隔离到修理的位置,即航空器具有的预测与健康管理能力,是进行正确、及时维修保障的重要前提,是航空器越来越重要的属性。

维修性,包括测试性和直接维修成本,虽然是产品的固有特性,但是不能脱离人的因素影响。系统的固有维修性主要取决于系统各组成部分的物理特性。但是,相同的系统,

由于采用不同的维修概念和不同的后勤保障方式,还由于从事维修工作的人员技术水平的差异,会表现出不同的维修特性,这一点是维修性和可靠性的重要差别。工程应用中,可以将维修性分成固有维修性和使用维修性两种。

固有维修性:也称为设计维修性,是在例行的保障条件下表现出来的维修性,它完全取决于设计和制造。

使用维修性:实际使用过程中表现出来的维修性,它不但包括产品设计、生产质量影响,而且包括产品和使用环境、维修策略、保障延误等因素的综合影响,使用维修性不能直接用设计参数表示,而是使用维修参数表示,如平均停机时间。

1.3.2 维修性定量参数

1. 维修性定量参数

与可靠性一样,维修性的特征量也是概率参数,用连续型随机变量或离散型随机变量、概率参数和统计分布进行分析。维修性基本量化参数是维修度 M ,它是指系统(或产品)在规定的条件下进行维修时,在规定的时间内,保持或恢复到规定状态的概率。

民用飞机的维修性参数是描述飞机维修性的某种度量,反映了对飞机正点运营和经济性的要求。定量的维修要求主要包括以下参数,现分别解释其含义和计算方法。

1) 用概率表示的指标

(1) 维修度 M 。可修产品在规定条件下进行维修时,在规定时间内完成维修的概率称为维修度。维修度表示维修的难易程度,也是维修时间的函数,其表达式为

$$M(t) = \frac{n_R}{n_0} \quad (1-15)$$

式中: n_R 为在 t 时间内产品的修复件数; n_0 为产品的总修复件数。

不同时间的维修度不同,维修时间越长,维修度 M 越大,到某一时刻, $M(t)$ 可达到 100%。

(2) 可用度 A 。产品在某时刻具有或维持其规定功能的概率称为可用度。可用度为广义可靠性参数,它是不发生故障的可用度和排除故障的维修度的综合量度,即在可靠度和维修度的综合作用下,产品保持可用状态的概率,可用度分为固有可用度和使用可用度。

固有可用度可以表示为

$$A_1 = \frac{MTBF}{MTBF - M} \quad (1-16)$$

使用可用度表示为产品能工作时间与能工作时间和不能工作时间的和之比,即

$$A_0 = \frac{T_v}{T_v + T_{\bar{v}}} \quad (1-17)$$

设产品只允许维修一次,且修复后对工作没有影响,则可用度、可靠度和维修度间的关系可以表示为

$$A_1(t, \tau) = R(t) + [1 - R(t)]M(t) \quad (1-18)$$

式中: $R(t)$ 为时间从 0 到 t 时产品无故障部分; $[1 - R(t)]$ 为产品使用到 t 时发生故障的部分; $[1 - R(t)]M(\tau)$ 为在 τ 时间内产品经过维修恢复正常功能的部分。 $M(t) = 0$ 为不可修产品, 即 $A_1(t, \tau) = R(\tau)$, 此条件下, 产品的可靠性参数只考虑可靠度。

2) 用时间计量的指标

(1) 平均修复时间 MTTR。平均修复时间 MTTR 指排除故障所需实际修复时的平均值。其度量方法: 在规定条件和时间内, 产品在任一规定的维修级别上, 修复性维修总时间

间 $\sum_{i=1}^r t_i$ 除以被修复产品的故障总数 r , 即

$$\text{MTTR} = \frac{\sum_{i=1}^r t_i}{r} \quad (1-19)$$

式中: t_i 为排除第 i 次故障所需的实际修复时间。

当设备由 n 个可修复项目组成时, 平均修复时间定义为

$$\text{MTTR} = \frac{\sum_{i=1}^n \text{MTTR}_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (1-20)$$

式中: λ_i 为第 i 个可修工作项目的故障率; MTTR_i 为第 i 个可修工作项目的平均修复时间。

在进行 MTTR 计算时, 所考虑的只是实际修理时间, 包括准备时间、故障检测和诊断时间、拆卸时间、修理(更换时间)失效部分的时间、重装时间、校验时间和启动时间等, 不应计入行政与供应延误时间。

(2) 恢复功能用的任务时间(Mission Time To Restore Function, MTTRF)是任务维修性的测度。其度量方法: 在规定的任务剖面中, 产品致命性故障的总维修时间与致命性故障总数之比, 也可以理解为排除致命性故障所需实际时间的平均值。MTTR 是指在设备寿命剖面内排除所有故障的平均值, 主要反映设备完好性和对维修资源与费用的要求, 因而是一个基本的维修性参数。而 MTTRF 只是指在设备的任务剖面内排除致命性故障所需时间的平均值, 主要反映任务成功性的要求, 是任务维修性参数。

(3) 最大修复时间 $M_{\max ct}$ 。最大修复时间指设备达到规定的维修度所需的维修时间, 即预计完成全部维修工作项目的某个规定的百分比所需的时间, 它反映了设备能在多长时间内完成维修。

如当维修时间服从正态分布 $N(\overline{M}_{ct}, \sigma^2)$ 给定维修 $M(t) = p = 0.9$ 时, 设 Z_p 为正态分布的 p 分位数, 则有

$$\overline{M}_{\max ct} = \overline{M}_{ct} + Z_{p\sigma} \quad (1-21)$$

(4) 平均预防性维修时间 $\overline{M}_{pt}$ 。 $\overline{M}_{pt}$ 指设备每次进行预防性维修所需时间的平均值, 即

$$\overline{M}_{pt} = \frac{\sum_{j=1}^n f_{pj} \overline{M}_{pj}}{\sum_{j=1}^m f_{pj}} \quad (1-22)$$

式中: f_{pj} 为第 j 项预防性维修作业的频率; m 为预防性维修作业的项目数; $\overline{M}_{pj}$ 为第 j 项预防性维修的平均时间。

(5) 平均维修时间 $\overline{M}$ 。平均维修时间是综合反映设备的修复性维修时间与预防性维修时间大小的维修型参数。其度量方法是: 在规定的条件下和规定的时间内, 产品修复性维修和预防性维修的总时间与该产品的维修总次数之比, 具体计算公式为

$$\overline{M} = \frac{\lambda \overline{M}_{ct} + f_p \overline{M}_{pt}}{\lambda + f_p} \quad (1-23)$$

式中: λ 为产品的总故障率; f_p 为产品的预防性维修频率。

(6) 维修停机时间率 M_{DT} 。 M_{DT} 指产品每工作小时停机时间的平均值, 这里包括修复性维修与预防性维修。具体可用式(1-24)计算, 即

$$M_{DT} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \overline{M}_{cti} + \sum_{j=1}^m f_{pj} \overline{M}_{ptj} \quad (1-24)$$

(7) 重构时间 M_n 。重构时间指设备发生故障或受到损伤后, 重新构成能完成其功能的系统所需的时间, 如对于有冗余设计的设备可指冗余部件的切换时间。

3) 用单位时间比率计量的参数

(1) 维修率 $\mu(t)$ 。产品在维修时间已达到某时刻 t 后尚未修复, 在该时刻后单位时间内完成修复的概率称为维修率。维修率是维修时间 t 的函数, 它反映了某时刻的修复情况, 单位时间为 $1/h$ 。

若以 $M(t)$ 为维修率, $m(t) = dM(t)/dt$ 为维修概率密度, 则 $\mu(t)$ 为

$$\mu(t) = \frac{dM(t)}{1 - M(t) dt} = \frac{m(t)}{1 - M(t)} \quad (1-25)$$

(2) 维修性指数 M_1 。维修性指数是指维修工时参数 T_{OH} , 又称维修工时率, 其定义为每工作小时的平均维修工时(如人力消耗等)。具体可用式(1-26)计算, 即

$$M_1 = \frac{M_{MH}}{T_{OH}} \quad (1-26)$$

式中: M_{MH} 为设备在规定的使用期间内的维修工时数; T_{OH} 为设备在规定的使用期间内的工作小时或寿命单位数。

2. 测试性定量参数

测试性定量要求是一系列的指标, 而指标是测试性参数的要求值。常用测试性参数介绍如下。

1) 故障检测率 r_{FD}

故障检测率是被测试项目在规定期间内发生的所有故障, 在规定条件下用规定的方法能够正确检测出的百分数, 即

$$r_{FD} = \frac{N_D}{N_T} \times 100\% \quad (1-27)$$

式中: N_T 为在规定期间内发生的全部故障数; N_D 为在同一期间内, 在规定条件下用规定方法正确检测出的故障数。

这里的“规定期间”是指用于统计故障发生总数和检测出故障数的时间区间, 此时间