

下 册 目 录

第五章 飞机的维修性与有效性	1
第一节 概述	1
第二节 维修性的量度	5
第三节 有效性与系统效能	15
第四节 维修性设计特征	23
第五节 人素工程	32
第六节 飞机维修性举例及保持维修性的措施	45
第六章 维修数据的统计、整理与分析	50
第一节 机务统计	50
第二节 维修数据的整理	52
第三节 维修数据的分析	55
第七章 最优化技术及其在维修中的应用	63
第一节 线性规划	63
第二节 非线性规划	79
第三节 网络分析技术	92
第四节 查找故障的概率法	116
第八章 维修工程预测技术	129
第一节 预测问题概述	129
第二节 贝叶斯预测法	134
第三节 回归预测法	138
第四节 马尔可夫链预测法	150
第五节 排队论预测法	167
第九章 维修大纲的制订与修改	177
第一节 概述	177
第二节 维修项目与维修方式的确定	178
第三节 维修周期的确定	190
第四节 维修大纲的管理	202

第五章 飞机的维修性与有效性

第一节 概 述

前面几章我们学习了可靠性,飞机的可靠性是飞机的一个很重要的品质。现在我们再提出两个新的重要的品质,叫做**飞机的维修性与有效性**。因为有效性是飞机的可靠性与维修性两个概念的综合产物,所以我们得首先谈谈维修性,然后再谈有效性。

军事装备系统一般来说可以分为两类:一类叫做“**单次系统**”,如巡航导弹、火箭那样只能算是一次使用的设备;而另一类叫做“**可修复系统**”,如汽车、坦克等,一旦发生故障可以通过维修恢复原有的功能,可以再次使用。而飞机,一方面与可修复系统相似,是可以维修的,而另一方面它不能在空中“抛锚”,排除故障,又与“单次系统”相似。所以飞机包含了两类系统的特点,但从维修的意义方面来说,也把它作为可修复系统系来看待。

本章提出的维修性、维修工程,以及有效性,是专门讨论装备有关维修的理论与实践的问题。

一、维修性的发展史

过去三十年内科学技术有了快速的进展,武器装备也随着发展成为复杂而又昂贵的系统。由于喷气飞机、大型直升机、核潜艇、电子计算机及人造卫星、载人航天飞机的建造,极大地强调了系统的性能、维修保障、成本和寿命的有效设计。

可靠性成为一种工程分科,是第二次世界大战以后,由于导弹及航天技术发展的迫切需要,而在短期内迅速地发展起来的。不久以来,由于权衡各种因素,怎样才能使得一个统系更易于维修,并且符合可靠性与经济效果的要求;就引导人们去研究和发展另一个新的分科——维修性。

维修性作为工程上的分科,还不到25年的历史。但作为装备的保养、修理技术,很早以前就被人们注意到了。早在1901年莱特兄弟发明飞机的时候,当时美国军部就在合同中提出“便于操纵便于维护”的要求。维修性从现代的意义来说,它是第二次世界大战以后,随着可靠问题之后才提出的。但那时也只是作为一个系统的一般的维护修理特性,尚没有一个正规的理论体系。

直到五十年代后期,国外才把维修性的要求增加到产品设计中来,并广泛应用了数学、人素工程、心理学等理论,逐渐地发展形成维修性理论。

美国军事系统把维修性的要求,编成规范,并把这些规范纳入军用标准之中。同时以通俗读物的形式发给军队学习和使用。

六十年代在发展军用标准的同时,又开始转向维修性量度的研究、预测技术、试验技术以及数理统计等等都得到了具体应用。诸如平均修复时间(MTTR)、修复时间中位数($\tilde{M}$)、

最大修复时间(M_{max})等成为计算中量的参数。另外还有常用的维修工时(即每飞行小时所需的维修工时)、翻修时限等。把维修性设计要求发展成为维修管理所依据的维修大纲。

七十年代,维修性已成为系统工程的一部分。近年来维性规范已经成为新技术所必需的要求。例如微电子技术和电子系统结构上的应用。对于非电子系统,如机械、液压系统的应用,过去一向成为比较困难的问题,目前已经得到较好的解决并趋于完善。

二、维修性的定义

当设计一个系统时,必须考虑到许多不同的要求,我们从图5-1 可以看出一个系统的各种要求。这种要求我们可以用“四面八方”四个字来帮助记忆。“四面”即时间要求、环境要求、人的因素要求及成本要求;“八方”即性能、生产性、安全性、操作性、可靠性、维修性、供应及装组^①。系统的最优化设计必须包括这些参数相互间的经济效果的权衡。这些参数的组合方法,和掌握各个参数自身的规律,是系统工程的过程。

维修性可以说是系统的一种设计特性,它使设备具有更好的固有的维修条件,以便减少维修工时,无需高难度的维修技术,降低对工具设备的要求,以及维修的经济性。

维修性的定义是: **维修性是系统的设计和安装的一种特性,即系统在规定条件下进行维**

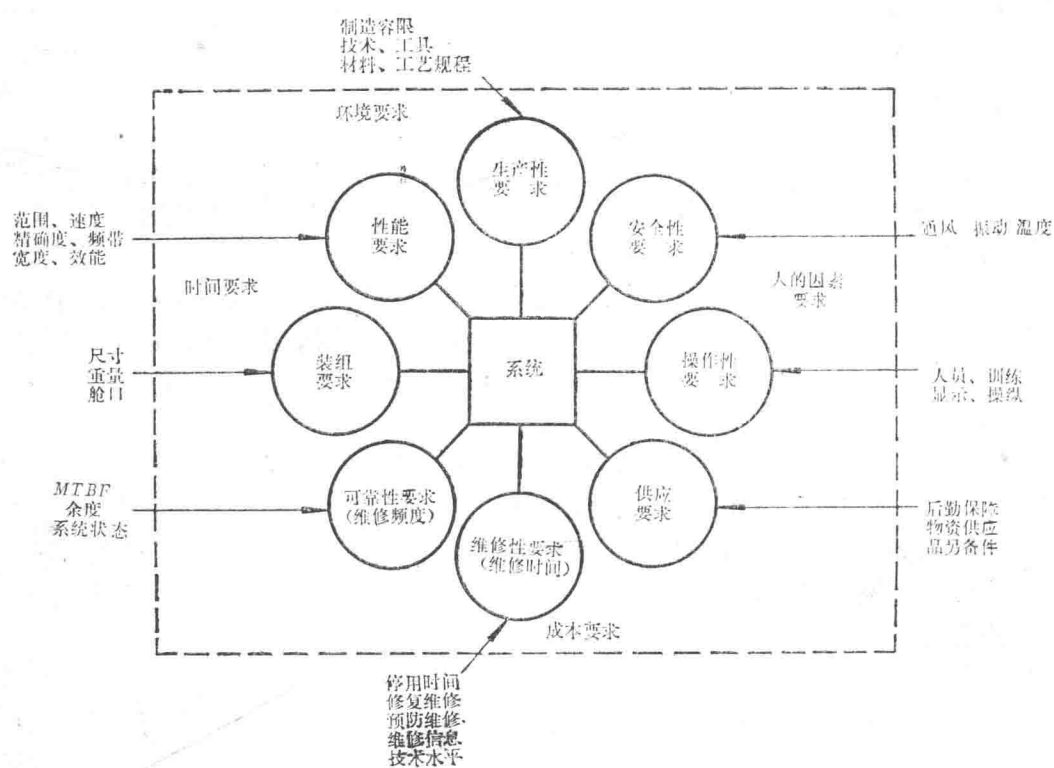


图 5-1 系统设计要求的结构图

① 装组的定义见第五节

修时，在规定时间内完成维修的概率。用概率数字来表示维修性，叫做**维修度**。

为了区别“维修”与维修性，我们把两个定义加以比较就可以明白。

维修的定义是：**维修是指维护或修理一个系统处于可使用状态的所有活动**。这些活动包括保养、修理、改装、改型、翻修、检查、状态监控、防腐蚀和维修设备的准备。

对于维修性，我们还可以用更加概括更加通俗的语言来说：“**维修性就是产品进行维修难易程度的尺度。**”

维修性既然是系统的一种设计特性，那末拿飞机来说，提高一种飞机的维修性究竟有什么要求？从美国军用标准来看，他们把维修性的要求归纳为六类二十五项，现列举如下：

（一）减少维修的复杂性

1. 提供适当的可达性、工作部位如操作空间（就是容易摸到、看到、便于拆装操作）；
2. 提高机件的互换性；
3. 尽量采用军用标准件；
4. 减少维修所需的工具设备；
5. 保证系统、设备的相容性（互相间的配套与有关设施的配套）。

（二）减少所需维修的项目和次数

1. 采用故障自动防护措施（指即使空中出了故障也能保证安全和完成任务，包括余度技术、备用系统和结构破损安全原则等）；
2. 尽量减少需要预防维修的机件（就是机务准备和定期检修的项目越少越好，机件不需经常拆卸和检查）；
3. 有足够寿命或耗损容限；
4. 能够预防和控制腐蚀（不需要经常进行防潮防锈工作）。

（三）缩短因维修而停飞的时间

1. 能迅速发现故障和查明性能下降的原因；
2. 维修准备时间要尽可能缩短；
3. 能迅速判断故障的部位，同时对人员的技术水平不需过高要求，对测试设备不需过于复杂；
4. 已发生的故障要易于排除和修复；
5. 调整、校正工作能在较短的时间内准确完成；
6. 能对修复或排除故障的结果，迅速作出鉴定。

（四）减少维修费用

1. 尽量减少专用工具设备及维修设施的需要量；
2. 维修要求要与系统的经济效果一致；
3. 减少不必要的维修数据和资料。

（五）运用人素工程原理，创造维修的便利条件；

1. 各个零件、测试点、调整机构和连接件等要便于识别，而且有较好的可达性；
2. 操作方便，便于移动、运输和存放；
3. 维修任务能按照便于理解和记忆的逻辑次序安排；
4. 要做到符合人的生理参数（例如人的体力、视力、反应能力等）。

(六) 减少维修中的差错

1. 连接、装配和安装中减少装错、装反及漏装的可能性；
2. 减少肮脏的、单调的和令人厌烦的工作；
3. 要求维修标记、符号和技术数据都很清晰。

三、维修工程与维修性工程

维修工程与维修性工程具有不同的意义。维修工程是对设备的使用者为了保持或恢复设备处于可使用状态的活动而言。维修性工程是对设备的设计者为了提高机件易于维修的活动而言的，它的作用是为了保证在生产、装配和使用的整个寿命周期内的保障费用最少和停用时间最短。

设备在寿命周期内的保障工作是维修工程者的责任，但是反过来他们可以影响负有改善维修性责任的设计者。

任何一个设备总有一个使用者与生产者的问题。设备的使用者，他必须由设备的生产者来满足他的要求。现在，我们可以拿建筑房屋为例，缺房单位需要房屋，是使用者，而建筑公司是生产者，他可以建造房屋以满足缺房单位的需要。初看起来他们好像是买者与卖者，对立的两个方面，而其实，他们之间却有着密切的关系。缺房者必须考虑房屋的面积、座落、结构形式、使用情况与维修条件等等要求，建造者恰恰需要这些要求，把它作为根据，然后纳入设计计划、建造施工的过程中去，并且使建成的房屋最适合使用及维修上的经济效果。这种关系正如我们飞机的使用维修者和飞机的设计生产者的关系一样。

我军的现役飞机装备大都设计于较早的年代，如果按照上面提到的六类要求来衡量，维修性方面还存在着许多问题。最根本的一条是在飞机的设计和研制中，对维修性没有足够的重视。使用部门维修能力的提高，始终受着飞机本身维修性的制约和影响，我们必须从原则上承认**飞机的维修性是早已设计好了的**。但是我们可以设想，如果一架飞机是按照一定的维修性规范而设计的并且从实践方面证明它的维修性设计又是符合实际的，则**维修工作的本身只能保持固有维修性**。但是维修人员掌握了维修性理论，又在对老旧飞机的长期维修实践中归纳了它在维修性方面存在的缺陷，这样维修人员便可以在现有的技术和设备的条件下，为改善老旧飞机的维修性做出成效。如我军维修人员经常对老旧飞机为改善它的维修性水平进行的加改装工作和自行研制某些维修设备等等。

改善维修性有一个十分重要的问题，就是**使用、维修者把维修性的改进意见传达到设计部门，即所谓信息的反馈问题**。目前国外的做法是设计制造厂商、使用部门和政府领导机关三方面的工程技术人员组成一个维修指导小组，它既指导飞机的维修性设计与改进，又在飞机制成后制定维修大纲，用来指导全面的维修工作。本来，这种三结合领导的做法，是我们社会主义国家的光荣传统，设计、生产部门与使用部门都有为实现国家现代化的共同目标，采用三结合制度来促进维修工作，将会取得更大的成果。

四、维修性的重要性

为什么要求设备要具有良好的维修性？

维修性引起重视的起因，是近代的武器装备的维修费用大得惊人。如果设备的维修问

题能在设计的时候得到解决，那么后来的维修费用就可以大为减少。

根据资料报导，美国空军在50年代，飞机的维修费用几乎占空军人员的1/3也都投入到飞机维修及有关后勤保障工作中去。陆军购买电子设备的费用仅占设备在总寿命周期内包括使用及维修在内的总费用的25—40%。

据报导，美军军用设备的维修费用，在近期，虽然还不是精确的统计，但据维修部门及财务系统研究指出，在设备的寿命周期内平均维修费用约占全部设备的采购费用的3—10倍。

我军情况，据粗略估计，按目前使用、维修水平，一架歼—6飞机使用15年，其累计的使用保障费用就能买6架新的歼—6飞机。这些统计数字是惊人的。

系统的费用是与维修性相关的，一定的维修性水平，它要求一定的试验和辅助设备，修理器材、维修人员的训练、训练设备、维修设施、维修说明书、数据资料以及其他物资供应在内的费用。这就取决于向设计制造部门提出的可靠性及维修性的要求，而这种要求除了体现高度可靠性和维修性以外，还要考虑经济效果。

不过，成本费用是必须考虑的重要问题，但不是唯一的问题。作为军事装备来说，当需要一个系统能持久地完成规定的工作任务，一旦出了故障时，又能以极短的时间修复好。如果能设法使它达到这种要求，这是很重要的，甚至比节省费用更重要。这也指出了时间是维修性的一个重要参数，也是维修性的一个重要尺度。维修性工程要求除上面提出的一些具体条文以外，有必要归纳为以下三点：

- 1° 缩短停用时间，提高装备的战斗准备效果（有效性）；
- 2° 设备由于偶然故障而停用时，应具有快速修复的能力（修复维修）；
- 3° 设备由于老旧及耗损引起的故障，应具有采取预防措施的能力（预防维修）。

装备可能由于某一个要害机件的失修，或由于维修性方面的缺陷，可以造成生命及设备的损失，以至丧失战机。

维修性工程是关系到航空兵部队战斗力的重大问题。这是因为战斗力的一个极其重要方面就是战斗准备。这个名称的科学含义就是指一个系统或设备在下达命令时的可用程度，就是有效性。而有效性是由可靠性与维修性两方面综合体现的。

第二节 维修性的量度

一、概述

上节已经说过，维修性是设备设计与安装的一种特性。维修性的定义是：系统在规定条件下进行维修时，在规定时间内完成维修的概率。我们用概率的数值来表示维修性，叫做维修度，维修度也可以说是关于修复的尺度。这个定义中的变量就是维修时间。

显然，维修时间是根据那些需要维修的机件的故障或缺陷的特点不同而大有不同。因此维修时间不是常数，但是按照一定的统计规律分布的。这在某种意义上与可靠度的故障间隔时间相似，其不同点则是维修度的变量总是时间，而可靠度的变量可以是故障间隔时间，无故障公里数、无故障射击的发数、无故障工作循环数或成功试验次数等等。这种区别我们

将在本文关于有效度估算中会碰到的。可靠度与维修度的另一个不同点就是可靠度所涉及的事件是故障，它发生的时刻是无法事先规定的，而维修度所涉及的事件是完成维修，它可以事先定出时间。

现将可靠度与维修度列表比较如下：

表 5—1 可靠度 $R(t)$ 与维修度 $M(t)$ 的比较

	可 靠 度	维 修 度
累 积 分 布	F (有故障) R (无故障)	M (已修复) $1 - M$ (尚未修复)
密 度 函 数	$f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$	$m(t) = \frac{dM(t)}{dt}$
率	$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$ (故障率)	$\mu(t) = \frac{m(t)}{1 - M(t)}$ (修复率)
指数分布时的累积分 布与平均时间	$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ $MTBF(MTTF) = \frac{1}{\lambda}$	$M(t) = 1 - e^{-\mu t}$ $MTTR(MDT) = \frac{1}{\mu}$

典型的维修性量度包括平均修复时间 (MTTR)、平均有效修复维修时间 ($\bar{M}_{er}$)、平均有效预防维修时间 ($\bar{M}_{pr}$)、平均有效预防维修和修复维修时间 ($\bar{M}$)、维修时间中位数 ($\tilde{M}$)、设备修理时间 (ERT)、几何平均修复时间 (MTTR_G)、最大维修时间 (M_{max})、和维修度函数 $M(t)$ 。

二、两类维修与维修的时间因素

从许多维修的实例中看出，维修不一定是系统或设备损坏或产生故障时才进行的，而是可以采取事先预防措施。因而维修活动从物理意义上来说，可以分为修复维修和预防维修：

(一) 修复维修 (事后维修)，即把设备从产生故障状态修复成具有原有功能的可使用状态的维修活动。

(二) 预防维修，即为了使设备避免发展成为需要修复维修状态的维修活动。

不管是修复维修或是预防维修，当进行维修活动时，总要使设备在一定时间范围内不能使用，这个时间叫做“停用时间”。但修复维修活动所形成的停用时间与预防维修活动所形成的停用时间是有区别的。需要修复维修的时机，往往是机件处在工作状态，并且是由于偶然故障所引起的，因而干扰了设备的工作时间；而预防维修是事先制定计划的，就可以利用设备的非工作时间，因而可以把维修的时间影响降到最小。

当然，进行定期预防维修 (预定维修)，会给正常工作的设备带来经济上的损失，诸如更换零备件的损失，设备使用时间的损失等。我们对于维修性还必须从设备的使用价值、维修费用等方面来考虑。

通过预防维修的缺点来看修复维修，可能在某种条件不足的情况下，如系统缺乏破损安

全、余度技术的设计，对使用者来说，修复维修比预防维修造成的损失更大。这种损失就不是同一个数量级的，可能会酿成整个设备的损坏，危及人的生命安全，以至军事上的损失。

维修度是一个概率，它的变量是时间，这就带来了一系列关于时间的量度。通过这些量度才能使维修度与可靠度、有效度以及其他有关概念建立联系。

我们先就一个系统或设备（以飞机为例）的总寿命周期来考虑其使用过程的时间关系，然后再讨论有关维修的时间概念。

1° 现役时间与非现役时间，飞机处于服役状态叫做现役时间（有效时间）；如果处于非服役状态，叫做非现役时间（无效时间）。

2° 可用时间与停用时间，飞机处于能完成规定功能的状态，叫做可用时间；如果处于不能完成规定功能状态，则叫做停用时间。

3° 待命时间（警戒时间）即飞机处于执行任务状态的等待命令的时间。

4° 反应时间 也可以说是任务起动时间，要从接受命令的时间计算起直到进入任务时间为止。

5° 任务时间 即执行预定任务的可用时间。

飞机修复维修时间是完成各种不同的修复任务的基本时间的总和。这些时间有：准备时间、查找故障时间、领取器材时间、排除故障时间、调整校准时间、检验时间以及清理时间；排除故障所需时间既指在原位排除故障的时间，也包括拆卸修理或更换，或者拆卸更换

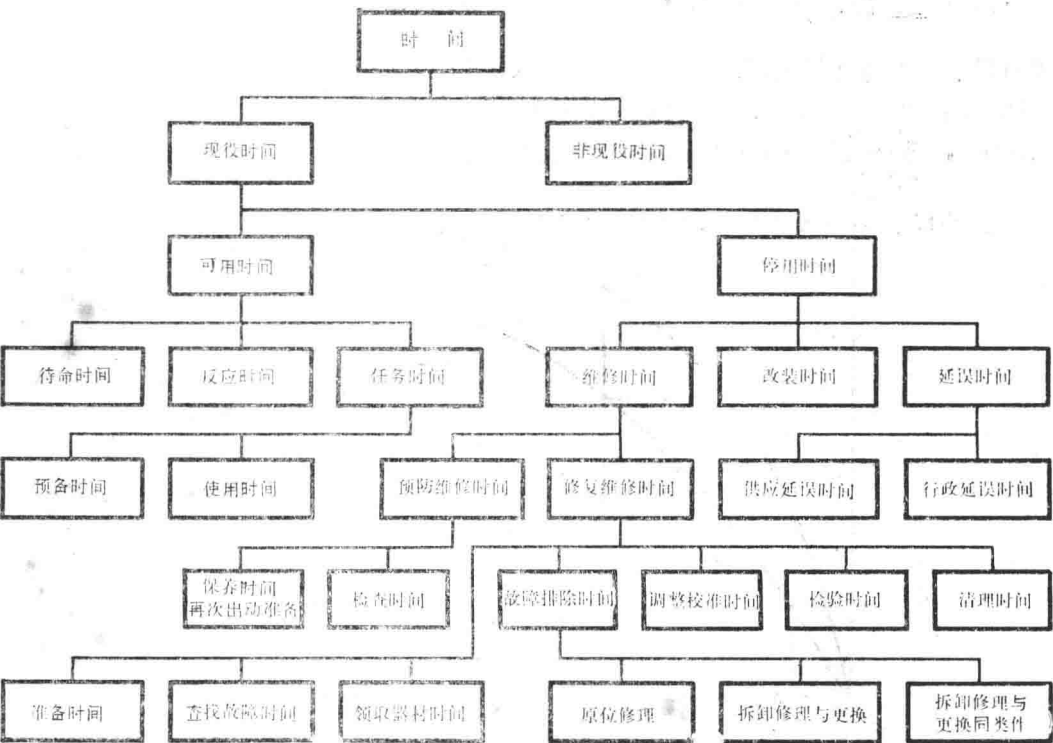


图 5—2 时间关系图

同类件所需的工作时间，预防维修时间包括检查时间和保养时间（维护时间）和再次出动准备时间。

然而，当考虑停用时间时，几乎都有一定的延误时间，如供应延误时间、行政延误时间、工作中休息时间等，可根据延误的性质归类。图5-2列出时间关系方块图，方块图既包括可用时间也包括停用时间，这就给讨论维修性、有效性及其有关因素打下基础。

三、维修性函数的估算

维修度是某个时间内完成修复的概率。因为完成修复的概率是与时俱增的，是对时间的累积函数，它的形式和不可靠度的形式相同。这里先介绍指数分布情况估算法。

指数分布是数学上最容易处理的一种分布，当连续性的维修时间服从指数分布时，修复维修的维修度就可以应用下面公式：

$$M(t) = 1 - \exp(-t/\text{MTTR}) \quad (5.1)$$

或

$$M(t) = 1 - \exp(-\mu t) \quad (5.2)$$

式中 $M(t)$ ——维修活动、在 $(0, t]$ 时间内完成的概率

MTTR ——平均修复时间

μ ——修复率

从以上式子可以看出，它只有单一参数，即 MTTR， $\mu = \frac{1}{\text{MTTR}}$ ，如 MTTR 为已知，我们就可以根据不同的规定时间 t 值，计算出 $M(t)$ 值。

图5-3指出 MTTR 不同，就可以得出不同的 $M(t)$ 曲线。图中一条曲线表明设备的 MTTR 为 0.5 小时，另一条曲线表明设备的 MTTR 为 1 小时。

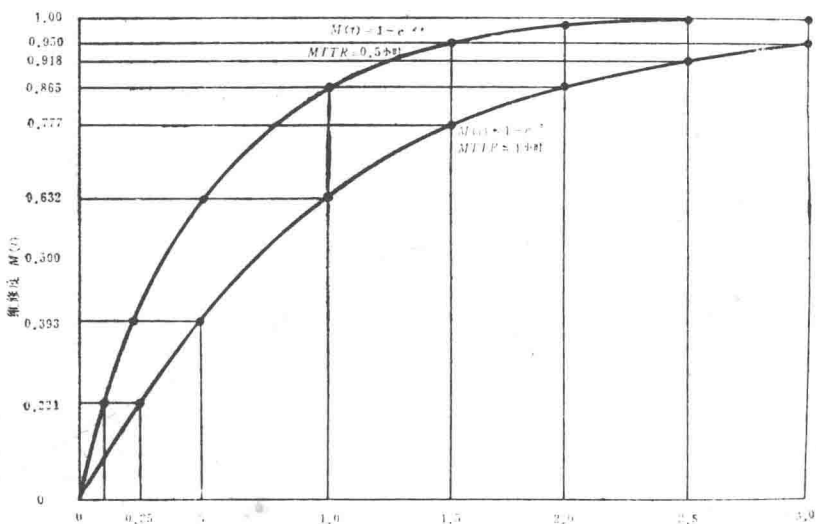


图 5-3 二个指数型维修度函数

现在我们分别讨论平均修复时间 (MTTR) 和修复率 (μ) 的特性:

(一) 平均修复时间 (MTTR)

平均修复时间的定义是: 设备或系统修复时间的均值。

MTTR是一个重要的参数, 它的特点是便于计量和便于测量。不足之处是除指数分布以外, MTTR无法描述整个分布的情况。对于复杂设备或系统的设计要求来说, MTTR是重要的, 硬件可以通过试验测定MTTR。

MTTR是根据设备出故障时, 修理机件的频率和时间而定的。当服从指数分布时, 可以从下式求得MTTR。

$$MTTR = \sum_{i=1}^N \lambda_i t_i / \lambda \quad (5.3)$$

式中 N ——可更换或可修复机件的总数;

λ_i ——第 i 个机件的故障率;

t_i ——第 i 个机件出故障后的修复时间;

λ ——整机的故障率, 一般是各机件故障率的总和。

式 (5.3) 是一个非常实用的维修性设计的工具。维修性工程师估计修复时间 t_i , 他所用的分析方法是基于现场的数据或专家的判断。要考虑到查找故障、隔离故障, 分解机件、更换机件、重新装配、调整、保养和试验, 每一步骤都占有一定的时间。但这些时间都可以在设备的设计试验及装配的过程中来估算。或者, 通过硬件试验, 维修性模拟验证试验, 或通过一段时间的观察, 定出总修复停用时间, 然后除以修复活动的次数 N_r , 即

$$MTTR = \sum_{i=1}^{N_r} t_i / N_r \quad (5.4)$$

观察 (5.3) 和 (5.4), MTTR的计算很简便, 仅仅用计算器或计算尺就可以算出。但许多复杂分布, 便涉及一些更复杂的数学方法。举一个MTTR的计算例子。

例1 设一个系统是由三个可修部件组成, 它的平均故障间隔时间及更换时间为

部件 1: $MTBF_1 = 1000$ 小时, $t_1 = 1$ 小时

部件 2: $MTBF_2 = 500$ 小时, $t_2 = 0.5$ 小时

部件 3: $MTBF_3 = 500$ 小时, $t_3 = 1$ 小时

若更换时间服从指数分布时, 求平均修复时间

解 首先把MTBF变为故障率, 即

$$\lambda_1 = 1/1000 = 0.001$$

$$\lambda_2 = 1/500 = 0.002$$

$$\lambda_3 = 1/500 = 0.002$$

代入公式 (5.3)

$$\begin{aligned} MTTR &= \frac{\lambda_1 t_1 + \lambda_2 t_2 + \lambda_3 t_3}{\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3} = \frac{0.001 \times 1 + 0.002 \times 0.5 + 0.002 \times 1}{0.001 + 0.002 + 0.002} \\ &= \frac{0.004}{0.005} = 0.8 \text{ 小时。} \end{aligned}$$

(二) 修复率(μ)

修复率的定义是：到某一个时间还在进行维修的系统，在下一单位时间内完成维修活动的概率。修复率可表示为：

$$\mu(t) = \frac{dM(t)}{dt} \cdot \frac{1}{1-M(t)} = \frac{m(t)}{1-M(t)} \quad (5.5)$$

式中 $\frac{dM(t)}{dt} = m(t)$ 为维修密度函数。

修复率分瞬时修复率和平均修复率，上式是瞬时修复率，在指数分布的情况下，瞬是修复率与平均修复率是相同的，这时 μ 为MTTR的倒数，即

$$\mu = 1/\text{MTTR} \quad (5.6)$$

因为MTTR是一个定数，则在指数分布的情况下， μ 为常数。而关于所有其他分布，都不是常数，一般来说，它是维修时间 t 的函数。

例2 某飞机各部件根据一个阶段使用的结果，经统计得出下表的数据。试计算平均修复时间，平均修复率，以及对5小时、10小时的维修度。

次 数	1	3	5	2	4	9	10	2	4	1
修复时间 (小时)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

解 求平均修复时间(MTTR) (小时)

$$(1 \times 1 + 2 \times 3 + 3 \times 5 + 4 \times 2 + 5 \times 4 + 6 \times 9 + 7 \times 10 + 8 \times 2 + 9 \times 4 + 10 \times 1) \div 35 = 6.7$$

求平均修复率(μ)

$$1/6.7 = 0.15$$

求维修度，依据公式 (5.2)

$$5 \text{ 小时} \quad M(t) = 1 - e^{-\mu t} = 1 - e^{-0.15 \times 5} = 53\%$$

$$10 \text{ 小时} \quad 1 - e^{-0.15 \times 10} = 78\%.$$

四、几种典型维修时间的估算

这里所阐述的参量，有的是上面已经提过的，以前是根据指数分布情况描述的，而这里除指数分布外将涉及其他各种分布。

(一) 平均有效修复维修时间 ($\bar{M}_{ct}$)

它的定义与平均修复时间 (MTTR) 的定义是基本一致的。主要区别在于，平均有效修复时间更强调不把延误时间计算在内。

当故障率为 λ_i 的第 i 个机件发生故障时，系统的修复时间为 M_{ci} ，其平均修复时间

$$\bar{M}_{ct} = \sum \lambda_i M_{ci} / \sum \lambda_i. \quad (5.7)$$

(二) 平均有效预防维修时间 ($\bar{M}_{pi}$)

它的定义是：一个系统有效预防维修时间的均值。给出公式如下：

$$\overline{M}_{pi} = \sum f_i M_{pi} / \sum f_i \quad (5.8)$$

式中 f_i —第 i 个机件完成有效预防维修的频率;

M_{pi} —当第 i 个机件完成有效预防维修的频率为 f_i 时, 系统的有效维修时间。

如果频率 f_i 给定的时间单位为小时, 则 M_{pi} 也要用小时。

(三) 平均有效预防维修和修复维修时间 ($\overline{M}$)

它的定义是: 所有维修活动时间的均值, 它既包括系统的修复维修时间, 也包括预防维修时间。平均修复时间 (MTTR) 是不包括预防维修时间的, 为了便于区别, 我们把 $\overline{M}$ 称为平均维修时间。给出式子如下:

$$\overline{M} = \frac{\sum \lambda_i M_{ci} + \sum f_i M_{pi}}{\sum \lambda_i + \sum f_i} \quad (5.9)$$

式中 λ_i 、 f_i 、 M_{ci} 和 M_{pi} 在上面已有说明。在这个式中必须注意 λ_i 与 f_i 应是同一的时间单位。 M_{ci} 与 M_{pi} 应是同一的时间单位。

(四) 维修时间中位数 ($\widetilde{M}$)

我们可以从图5-3作仔细观察, 并注意所得的结论。一个设备的平均修复时间 (MTTR) 为 0.5 小时, 则它的维修度函数为:

$$M(t) = 1 - \exp(-2t)$$

我们把维修时间这个变量以不同的数值代入上式, 就可以得出如下不同的 $M(t)$ 值。

当 $t = 0.25$ 小时, $M(t) = 0.40$ 或 40%;

$t = 0.35$ 小时, $M(t) = 0.50$ 或 50%;

$t = 0.5$ 小时, $M(t) = 0.63$ 或 63%;

$t = 1.5$ 小时, $M(t) = 0.95$ 或 95%。

我们的结论是: 被修复设备的修复时间若是服从指数分布, 应它具有完成修复的概率为 40% 时, 则这时的维修时间 $t = 0.5 \text{ MTTR}$;

50% 时, $t = 0.7 \text{ MTTR}$;

63% 时, $t = \text{MTTR}$;

95% 时, $t = 3 \text{ MTTR}$ 。

这里有两个百分数是我们特别感兴趣的: 一个是 50% 维修度, 就是维修时间中位数; 另一个是 95% 维修度, 就是规定的最大维修时间 (也有规定为 90% 的)。

维修时间中位数的定义是: 维修度为 50% 时的维修时间。也就是完成 50% 的总维修活动的维修时间。维修时间中位数 ($\widetilde{M}$) 与平均维修时间 ($\overline{M}$) 不一定是一样的 (见图 5-4)。

(五) 设备修理时间 (ERT)

设备修理时间 (ERT) 的定义与维修时间中位数是一样的。这里把它叫做“设备修理时间 (ERT)”是从设备的应用角度出发, 并且规定出最大容许值。

ERT 与 MTTR 的数量关系对于不同的分布情况是不同的。

对于正态分布, 因为它是对称的,

$$ERT = MTTR$$

(5.10)

对于指数分布, 我们有近似值,

$$ERT = 0.7MTTR$$

(5.11)

对于对数正态分布, 它们的关系为:

$$MTTR = ERT \exp(\sigma^2/2)$$

(5.12)

也可以写成

$$ERT = MTTR / \exp(\sigma^2/2)$$

(5.13)

式中 σ^2 —— 修复时间的自然对数的方差。

图中: $\tilde{M}$ —— 维修时间中位数

ERT —— 设备修理时间

$\bar{M}$ —— 平均维修时间

M_{max} —— 最大维修时间

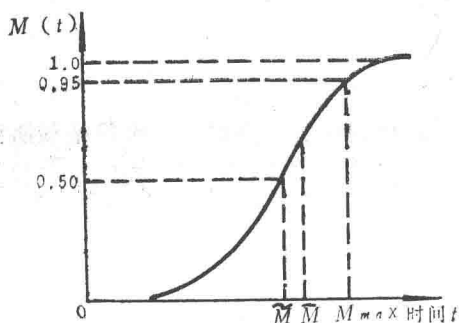


图 5-4 维修度函数与维修指标

(六) 几何平均修复时间(MTTR_G)

几何平均修复时间是应用在对数正态分布中。这种情况下, 它的数值恰好与ERT相等。由式 (5.14) 给出, 它与式 (5.13) 等同:

$$MTTR_G = MTTR / \exp(\sigma^2/2)$$

(5.14)

它也可以直接从修复时间的自然对数的均值 m 求得①:

$$m = \sum \lambda_i \ln t_i / \sum \lambda_i$$

(5.15)

这时MTTR_G即为:

$$MTTR_G = e^m$$

(5.16)

(七) 最大维修时间(M_{max})

它的定义是: 维修度函数 $M(t)$ 为95% (或90%) 时的维修时间。从图5-4中, 我们明显地看出 M_{max} 就是完成总维修活动的95%时所需的维修时间。对于正态分布, M_{max} 的近似值为:

$$M_{max} = MTTR + 1.65\sigma$$

(5.17)

式中 σ —— 修复时间正态分布的标准偏差。对于指数分布,

$$M_{max} = 3MTTR$$

(5.18)

对于对数正态分布,

$$\ln M_{max} = m + 1.65\sigma$$

(5.19)

式中 m 已在式 (5.15) 中给出, σ 为修复时间的自然对数的标准偏差。

对于指数分布情况, 如果把 M_{max} 与MTTR作为维修度函数的两个参数, 设

$$\alpha = \exp(-M_{max}/MTTR)$$

(5.20)

则

$$M(t) = 1 - \alpha$$

(5.21)

① 本章的均值代号用 m , 不用 μ , 以免与修复率 μ 混淆

由式 (5·20)

$$\ln \alpha = -M_{max}/MTTR \quad (5 \cdot 22)$$

或 $MTTR = -M_{max}/\ln \alpha. \quad (5 \cdot 23)$

例3 假如修复时间服从指数分布, 设备的维修度为0.9, 维修时间规定不超过1小时, 求设计用的平均修复时间 (MTTR) 应为多少?

解 我们直接用 M_{max} 求MTTR,

$M_{max} = 1$ 小时, 由式 (5·21) 得

$$\alpha = 0.1 \quad \ln 0.1 = -2.30259$$

由式 (5·23) 得

$$MTTR = -M_{max}/\ln \alpha = -1/(-2.30259) = 0.434 \text{小时或为26分钟。}$$

五、用概率纸的估算法

维修性函数及其参数 ($\bar{M}$, M_{max} 等), 同样可以根据实测值用概率纸进行估算的。但是, 维修时间和故障前时间这两个概念在考虑方法及处理方法上是多少有所不同的。

维修时间的分布也很符合威布尔分布。从理论上来看, 预防维修时间可以认为是正态分布, 事后维修时间是对数正态分布, 而迟延时间则是指数分布或威布尔分布。

下面试用对数正态概率纸来估算维修指标。

首先给出服从对数正态分布的维修度函数如下式:

$$M(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_r^t \frac{1}{t-r} \exp \left[-\frac{\ln^2 \left(\frac{t-r}{m} \right)}{2\sigma^2} \right] dt \quad (5 \cdot 24)$$

其中, σ 、 m 、 r 这三个参数的作用, 可以认为与威布尔分布的三个参数是一样的, 不过 σ 越大, 则越容易形成左右不对称的歪斜形状 (威布尔形状参数的值越小, 图形就越容易歪斜)。概率密度 (在故障前的时间里, 它与故障密度相对应) 示于图 5-5。但无论 σ 有多大, 如果 $r=0$, 则 $t=0$ 时, 从 0 出发, 不能作出威布尔形状参数 ≤ 1 那样的图形。

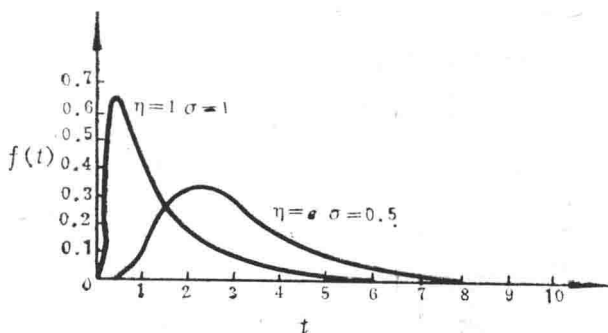


图 5-5 服从对数正态分布的概率密度函数 (图中: $\eta=m$)

由该图可见, σ 值越小, 就越接近于正态分布。

表5-2所列的是某台设备进行故障维修得到的24个数据。

第一列, 序号 No. 是 t 值由小至大的顺序, t 是修复时间, M 是维修度, 它们的计算式如下:

$$M(t) = \frac{i}{N+1} \quad (5 \cdot 25)$$

	0.10	0	10	1.00	100
	0.15	12	15	1.50	60
	0.17	16	16	1.70	64
	0.25	20	17	2.00	68
	0.30	24	18	2.80	72
	0.34	28	19	3.20	76
	0.40	32	20	3.50	80
	0.50	36	21	4.30	84
0	0.60	40	22	5.40	88
1	0.70	44	23	6.60	92
2	1.00	48	24	8.50	96

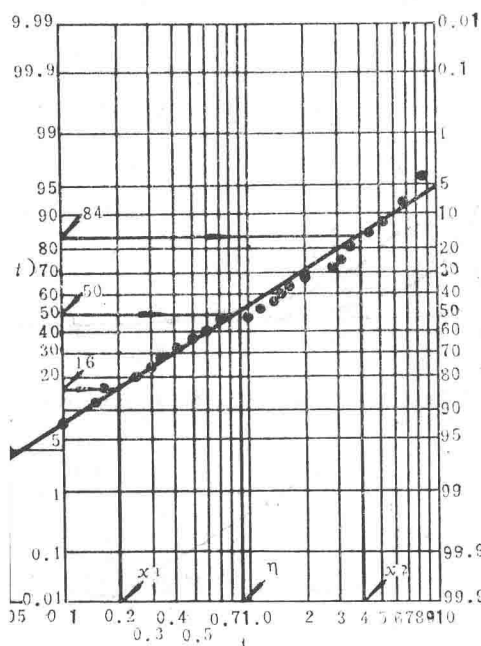


图 5-6 对数正态概率纸

根据图5-6，查出与 $M(t) = 16\%$ 及 $M(t) = 84\%$ 的线和回归直线交点对应的横座标 t 的

i 是顺序数， N 是数据的数目（这里 $N = 24$ ）；（ N 值大，则可以写成 $M(t) = i/N$ ；但当 $N < 20$ 或 N 的全部数据齐全时，最好是采用上式）。

一般的对数正态概率纸如图5-6所示。在前面二、四章已介绍过。

根据表5-2的数据，画出与 t 相对应的 $M(t)$ 值。例如对No. 1的数据来说，可以把 $t = 0.5$ ， $M(t) = 4\%$ 的点画在图上，然后，再依次画出No. 2数据的点（ $t = 0.1$ ， $M(t) = 8\%$ ），如此等等。

1. 配置回归直线；

2. 尺度参数 m 的求法

在横轴上的刻度上读出 $M(t) = 50\%$ 的线和回归直线的交点的横座标值 m 。

对我们所举的例子， $m = 0.9$ 小时。

3. 形状参数 σ 的求法

读数, x_1 和 x_2 , 这时再根据

$$\sigma = 2.3 \lg \frac{1}{2} \left(\frac{m}{x_1} + \frac{x_2}{m} \right) \quad (5.26)$$

就可以求出 σ (常数2.3是 $\lg 10$ 的近似值)。

对于这个图来说, $\sigma = 2.3 \lg 4.4 = 2.3 \times 0.643 = 1.48$ 。

4. 平均维修时间 $\bar{M}$ 的求法

这时就是求平均维修时间。分布的均值 $\bar{M}$ 可依据式 (5.12) 而经过变换得下式:

$$\bar{M} = m \exp[\sigma^2/2] \quad (5.27)$$

对于图5-6来说, 则

$$\bar{M} = 0.9 \times 2.99 = 2.69。$$

此外, 也可以用表5-2数据中 t 的几何平均值来求 $\bar{M}$ 。特点是数据少时, 用此方法也能使求得的结果具有较高的精确度。

5. 最大维修时间 M_{max} 的求法

可以取与 $M(t) = 95\%$ 线与回归直线交点对应的横座标 t 的读数。

对于图5-6来说, M_{max} 大约为11小时。

前面这些都可以用对数正态概率纸来推算。在一般的维修工作中, σ 约为0.5~2.0。设备越简单, σ 则越小。而对于那些多次不能简单地确定故障的部位和所要采用的修理方法的设备, σ 就取较大的值。对于事先已明确规定出其修理步骤的预防性检修来说, 则 σ 更小, 且一般是用正态分布来处理。

第三节 有效性与系统效能

一、概述

有效性就是可靠性和维修性综合起来的尺度。对于可修复的系统来说, 可靠度是为了使设备在使用中不出故障的时间越长越好, 是表示易坏不易坏的量度, 而维修度则是使设备一旦出了故障, 修好的时间越短越好, 是表示修复难易的量度, 前者是设备处于工作状态, 属于“可用时间”, 后者是设备处于维修状态, 属于“停用时间”如果把这两种意义综合在一起, 它表示设备和系统圆满工作的比率, 我们就把这个概念叫做系统的有效性。用概率来表示叫做有效度。

有效度的定义是: 在规定的条件下, 当任务需要的任何时刻, 系统能处于可使用状态的概率。

有效度从时间比率上来看, 还可以分为两类:

(一) 瞬时有效度 (A) 在给定的时间间隔内的任何瞬间, 一个项目处于可使用状态的 概率。

(二) 平均有效度 ($\bar{A}$) 在给定的部分时间间隔内, 一个项目处于可使用状态的 概率。