

# 维修性工程

· 维修性丛书 · 甘茂治 徐绪森 傅光甫 周青龙编 著

WEIXIUSING  
GONGCHENG



国防工业出版社

# 维修性工程

甘茂治 徐绪森 编著  
傅光甫 周青龙

江苏工业学院图书馆  
藏书章

国防工业出版社

## 内 容 简 介

本书系统地论述了维修性工程有关维修性的基本理论和维修性设计、试验与管理诸方面的内容,并结合工程实际着重阐述了维修、维修性的意义、维修性的定性要求和定量指标、可修复系统维修性的各种分析论证模型、维修性分配、预计、试验与评定方法,维修性的管理以及与维修性紧密相关的维修保障问题。

本书可作为不同专业的工业设计人员、设备管理人员的教材,也可供工科大学生和研究生以及从事设备研制生产与管理的人员参考。

\*

## 维修性工程

甘茂治 徐绪森 傅光甫 周青龙 编著

\*

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

石家庄铁道学院印刷厂印装

\*

787×1092 毫米 16 开本 13<sup>1</sup>/<sub>2</sub> 印张 304 千字

1991 年 10 月第一版 1991 年 10 月河北第一次印刷

印数:0001—5000 册

---

ISBN 7-118-00977-6/TH·72 定价:9.10 元

## 前 言

产品的维修性是由产品设计所赋予的使之维修简便、迅速、经济的固有属性。这种设计特性,对于现代化的民用设备和军用装备都是极其重要的。为了实现产品的维修性要求,必须在产品的论证(规划)、研制、生产及试验、使用与维修等各个阶段进行一系列的活动,即维修性工程活动,作为一门新学科,维修性工程自 80 年代初引入我国以后,已引起我国有关部门及军队的重视。特别是 1987 年国家军用标准 GJB368《装备维修性通用规范》和 1988 年国家标准 GB9414《设备维修性导则》颁布之后,军内外的产品研制、生产、试验及管理工作者,均迫切希望出版系统介绍维修性工程方面的书籍。

本书在引进吸收国外维修性工程理论的基础上,结合我国的实际情况和有关国家标准,系统阐述维修性工程的理论、活动及其技术与管理,并尽可能具体地说明达到维修性要求应当做什么,怎么做,谁来做。本书是军内外产品研制、生产、管理工作者的必备书籍之一,也可作为高等院校产品(设备)设计和管理工程专业的教材或教学参考书。

本书共分 7 章,分别由甘茂治(第 1,4 章)、徐绪森(第 2,3 章)、周青龙(第 6 章)、傅光甫(第 5,7 章)等同志编写,并由甘茂治教授统稿、王宏济教授审校。之后,又由赵路华、沈纯同志在文字上进行了加工和订正。本书在编写过程中,曾参考和引用了一些文献资料,在此特向原著者致谢。由于时间仓促,水平有限,又因维修性工程研究在我国起步不久,本书难免存在问题与错误,请读者予以批评、指正。

# 目 录

|                                 |      |
|---------------------------------|------|
| 第一章 绪论.....                     | (1)  |
| 第一节 维修的意义.....                  | (1)  |
| 1.1 维修的定义及区分 .....              | (1)  |
| 1.2 维修在国民经济发展和国防建设中的地位和作用 ..... | (2)  |
| 第二节 产品的固有属性及其与维修的关系.....        | (4)  |
| 2.1 可靠性 .....                   | (4)  |
| 2.2 维修性 .....                   | (6)  |
| 2.3 经济性 .....                   | (7)  |
| 第三节 维修性工程.....                  | (8)  |
| 3.1 维修性工程的意义及发展 .....           | (8)  |
| 3.2 维修性工程与其它工程学科的关系.....        | (10) |
| 3.3 维修性工程的主要内容及研究方法.....        | (12) |
| 第二章 维修性的基本要求 .....              | (14) |
| 第一节 维修性的定性要求 .....              | (14) |
| 1.1 结构尽量简单.....                 | (14) |
| 1.2 具有良好的维修可达性.....             | (14) |
| 1.3 提高标准化和互换性程度.....            | (18) |
| 1.4 具有完善的防差错措施及识别标记.....        | (19) |
| 1.5 保证维修安全.....                 | (20) |
| 1.6 检测诊断准确、快速、简便.....           | (21) |
| 1.7 要重视贵重件的可修复性.....            | (23) |
| 1.8 要符合维修中人的因素工程的要求.....        | (23) |
| 第二节 维修性的定量化 .....               | (24) |
| 2.1 维修度 $M(t)$ .....            | (24) |
| 2.2 维修度密度函数 $m(t)$ .....        | (25) |
| 2.3 修复率 $\mu(t)$ .....          | (25) |
| 2.4 常用维修时间的分布.....              | (26) |
| 第三节 维修性的定量指标 .....              | (30) |
| 3.1 维修延续时间指标.....               | (30) |
| 3.2 维修工时指标.....                 | (32) |
| 3.3 维修周期指标.....                 | (33) |
| 3.4 维修费用指标.....                 | (33) |
| 3.5 检测性能指标.....                 | (33) |
| 第四节 常用件结构及其应用的维修性要求 .....       | (36) |

|     |                   |      |
|-----|-------------------|------|
| 4.1 | 紧固件               | (36) |
| 4.2 | 润滑装置              | (37) |
| 4.3 | 轴承                | (38) |
| 4.4 | 密封件               | (39) |
| 4.5 | 接插件               | (39) |
| 4.6 | 电器元部件             | (41) |
| 第五节 | 维修中的人-机系统         | (42) |
| 5.1 | 人的特性和能力           | (42) |
| 5.2 | 人-机系统中人的控制特性和模型   | (45) |
| 5.3 | 人与环境的关系           | (48) |
| 第三章 | 可修复系统分析           | (49) |
| 第一节 | 系统的可用度分析          | (49) |
| 1.1 | 可用度的基本概念          | (49) |
| 1.2 | 三种稳态可用度           | (50) |
| 1.3 | 马尔可夫型可修复系统的可用度分析  | (51) |
| 1.4 | 非马尔可夫型可修复系统的可用度分析 | (57) |
| 1.5 | 使用可用度分析           | (60) |
| 第二节 | 系统的效能分析           | (61) |
| 2.1 | 系统效能的基本概念         | (61) |
| 2.2 | 系统效能的量度           | (62) |
| 2.3 | 系统效能模型的建立         | (63) |
| 2.4 | 系统效能分析举例          | (64) |
| 第三节 | 系统的费用分析           | (68) |
| 3.1 | 全寿命费用的基本概念        | (68) |
| 3.2 | 全寿命费用的估算          | (70) |
| 3.3 | 费用效能分析            | (74) |
| 第四节 | 维修性要求的分析论证        | (77) |
| 4.1 | 维修性分析论证的依据        | (77) |
| 4.2 | 各类产品维修性要求的特点      | (78) |
| 4.3 | 维修性要求的确定过程        | (80) |
| 第四章 | 维修性的分配与预计         | (83) |
| 第一节 | 概述                | (83) |
| 1.1 | 维修性分配与预计的意义       | (83) |
| 1.2 | 维修性分配与预计的时机和条件    | (83) |
| 第二节 | 系统分析              | (84) |
| 2.1 | 系统分析的目的与要求        | (84) |
| 2.2 | 系统分析的内容与方法        | (84) |
| 第三节 | 维修性的分配            | (87) |

|                                       |       |
|---------------------------------------|-------|
| 3.1 维修性分配的主要指标                        | (87)  |
| 3.2 维修性分配应考虑的因素                       | (89)  |
| 3.3 维修性分配的步骤与方法                       | (89)  |
| 第四节 维修性的预计                            | (94)  |
| 4.1 维修性预计的参数及判断标准                     | (94)  |
| 4.2 维修性预计的方法                          | (94)  |
| 第五章 维修性的试验与评定                         | (106) |
| 第一节 概述                                | (106) |
| 1.1 维修性试验与评定的目的和意义                    | (106) |
| 1.2 维修性试验方法的发展                        | (106) |
| 1.3 维修性试验的类别                          | (106) |
| 第二节 维修性试验的准备                          | (108) |
| 2.1 维修性试验计划的制定                        | (108) |
| 2.2 试验方法的选择                           | (109) |
| 2.3 确定受试品                             | (109) |
| 2.4 确定和准备试验环境条件                       | (110) |
| 2.5 培训试验维修人员                          | (110) |
| 2.6 准备试验设备及保障物资                       | (110) |
| 第三节 维修性试验的实施                          | (110) |
| 3.1 维修作业样本的选择和分配                      | (110) |
| 3.2 故障的模拟和排除                          | (112) |
| 3.3 预防维修试验                            | (113) |
| 3.4 试验过程的监督和管理                        | (114) |
| 3.5 试验数据的收集、处理与分析                     | (115) |
| 3.6 试验报告的编写                           | (116) |
| 第四节 维修性试验方法及其原理                       | (116) |
| 4.1 试验方法 1:对均值的假设检验                   | (118) |
| 4.2 试验方法 2:规定临界百分位数的假设检验              | (123) |
| 4.3 试验方法 3:规定临界维修时间的假设检验              | (128) |
| 4.4 试验方法 4:修复时间中值( $\bar{M}_a$ )的试验   | (131) |
| 4.5 试验方法 5:每次运行应计入的平均维修停机时间 $M_0$ 的试验 | (133) |
| 4.6 试验方法 6:每飞行小时的平均维修工时的试验            | (134) |
| 4.7 试验方法 7:地面电子系统的维修工时率试验             | (134) |
| 4.8 试验方法 8:均值与有百分位要求的组合序贯试验           | (136) |
| 4.9 试验方法 9:均值和最大修复时间的中心极限定理大样本试验      | (149) |
| 4.10 试验方法 10:最大维修时间和维修时间中值未知分布的试验     | (152) |
| 4.11 试验方法 11:预防维修时间的专门试验              | (152) |
| 第五节 检测性能评价与验证                         | (154) |
| 5.1 故障检测率和隔离率的评价与验证                   | (154) |

|                                   |              |
|-----------------------------------|--------------|
| 5.2 虚警率的评价和验证 .....               | (155)        |
| <b>第六章 维修保障分系统的建立 .....</b>       | <b>(157)</b> |
| <b>第一节 概论 .....</b>               | <b>(157)</b> |
| 1.1 维修保障分系统设计的意义 .....            | (157)        |
| 1.2 全寿命过程中的维修保障规划活动 .....         | (158)        |
| <b>第二节 设计过程中的维修保障规划 .....</b>     | <b>(158)</b> |
| 2.1 维修方案 .....                    | (159)        |
| 2.2 维修保障规划 .....                  | (161)        |
| <b>第三节 维修保障分析 .....</b>           | <b>(162)</b> |
| 3.1 概述 .....                      | (162)        |
| 3.2 系统用途和维修保障分系统的定义 .....         | (163)        |
| 3.3 待选维修保障方案的准备与评估 .....          | (165)        |
| <b>第四节 维修计划的制订 .....</b>          | <b>(166)</b> |
| 4.1 维修任务的确定 .....                 | (166)        |
| 4.2 维修任务分析 .....                  | (172)        |
| 4.3 维修级别分析 .....                  | (172)        |
| 4.4 维修计划文件的制订 .....               | (172)        |
| <b>第五节 维修保障资源的确定 .....</b>        | <b>(174)</b> |
| 5.1 人员的训练 .....                   | (174)        |
| 5.2 技术手册 .....                    | (175)        |
| 5.3 保障设备 .....                    | (176)        |
| 5.4 备件的筹措与供应 .....                | (176)        |
| 5.5 设施 .....                      | (177)        |
| <b>第六节 维修保障的试验与验证 .....</b>       | <b>(177)</b> |
| 6.1 维修保障的试验与验证的意义 .....           | (177)        |
| 6.2 维修保障的验证要点 .....               | (177)        |
| 6.3 维修保障数据的收集与反馈 .....            | (178)        |
| <b>第七章 维修性管理 .....</b>            | <b>(179)</b> |
| <b>第一节 维修性管理概述 .....</b>          | <b>(179)</b> |
| 1.1 维修性管理的意义及发展 .....             | (179)        |
| 1.2 维修性管理与产品保证 .....              | (180)        |
| 1.3 维修性管理的职能 .....                | (181)        |
| <b>第二节 全寿命过程维修性管理的内容和要求 .....</b> | <b>(181)</b> |
| 2.1 全寿命过程的划分 .....                | (181)        |
| 2.2 论证阶段维修性工作的内容 .....            | (182)        |
| 2.3 研制阶段维修性工作的内容 .....            | (184)        |
| 2.4 生产阶段维修性工作的内容 .....            | (188)        |
| 2.5 使用阶段维修性工作的内容 .....            | (188)        |

第三节 订购方和承制方在全寿命过程各阶段中承担的责任..... (188)

3.1 论证阶段 ..... (188)

3.2 研制阶段 ..... (189)

3.3 生产阶段 ..... (190)

3.4 使用阶段 ..... (190)

3.5 淘汰(退役)阶段 ..... (190)

附录 A MIL-HDBK-472《维修性预计》程序 V ..... (191)

附录 B MIL-HDBK-472《维修性预计》程序 III ..... (198)

参考文献..... (204)

# 第一章 绪论

## 第一节 维修的意义

### 1.1 维修的定义及区分

维修(maintenance)的对象是设备或装备。设备(equipment)是人们从事生产活动、军事行动,或进行某项工作为满足某种需要所必须的成套设施或器械。装备(materiel, equipment)是军事习惯用语,即各种军用技术装备,包括各种武器装备和后勤装备。因此,维修的广义对象可以指各种产品、各种设施。为避免赘述,本书中的维修对象一般用“产品”一词,包括民用设备、军用装备及其它需维修的产品。

维修,在我国传统观念上一直被看作是“敲敲打打”的工作,是服务性的“行当”,而从事维修的人员则被称之为“小炉匠”。随着我国科学技术和经济的发展,在军队及一些工厂企业里已开始较为重视维修工作,但由于设(装)备管理体制的束缚和习惯势力的影响,维修也仅被看成是一般保障工作,至于与设备或装备的设计、研制和生产则各不相关,根本谈不上把维修作为一门系统的工程技术学科来探讨和研究。

我国国家标准《可靠性基本名词术语及定义》(GB3187-82)给维修下的定义是:“为保持或恢复产品能完成规定功能的能力而采取的技术管理措施。”这个定义明确指出了维修的内涵和外延。维修的目的和时机,不但包括了产品在使用过程中发生故障时必须恢复其完成规定功能的能力,而且还包括了产品发生故障之前预防故障保障其完成规定功能的能力。因此,维修工作不但包括了为达上述目的而采取的各项技术措施,如:检测、换件、加注润滑剂等等;而且还包含各种管理措施,其中既有维修的管理,又有技术活动之外的设备管理,如使用或贮存条件的监测、使用(运转)时间及频率的控制等等。进入80年代以来,随着可靠性工程及维修学科进一步发展,维修的概念又有了新的扩展。美国1981年颁布的军用标准 MIL-STD-721C《可靠性与维修性术语的定义》,将“维修”定义为:“使产品保持或恢复到规定状态所采取的全部措施。”此处用“规定状态”(Condition)代替传统的“规定功能”(Function),这就将维修的范围进一步拓宽了。即维修不仅是要恢复或保持产品的功能,而且还要恢复和保持产品所固有的状态或性能完好。维修概念的再一扩展称为改进性或改造性维修(Improvement or modification),即:在进行一般性维修的同时或专门安排的利用现代技术或先进经验进行的技术改造活动,给旧设备换上新的部分或附件,以提高现有设备的效能或降低全寿命费用。例如:机床增设微机控制系统提高精度和效率;车辆在大修时对主要的易磨损件进行强化处理以延长寿命;现役飞机加阻力伞缩短降落滑行距离;设置某些故障报警装置提高安全性等等。

由此可见,维修通常可分为三类:

(1)排除故障维修(Corrective maintenance, CM):又称修复性维修(repair)或非计划维修(Unexpected maintenance),即当产品发生故障或其规定状态遭到破坏时为排除故障所进行的维修。如在武器战斗、车船运行、机器运转中发生故障所进行的维修,就是最典型的

排除故障维修。

(2) 预防维修(Preventive maintenance, PM):即为了预防故障、保持产品于规定状态所进行的维修。预防维修通常采用三种方式:

a. 定期(时)维修(Periodic maintenance):又称计划维修,即按使用时间(使用或贮存年度、运行公里或小时数、射击发数等寿命单位,下同)确定维修周期的维修。也就是只要达到规定的周期,就要按预先规定的内容、时间进行维修作业。这是各种机械传统的预防维修方式。例如:车辆运行若干公里或飞机飞行若干小时进行某种维修,都是典型的定时维修。这种方式便于有计划地组织维修作业。有利于利用维修资源,特别是对机械或机电类设备有着较好的预防故障的作用。但它以使用时间作为控制维修周期的唯一参数,不能预防那些与时间无直接关系的故障,也不适合于以随机故障为主的电子产品或其它复杂产品。

b. 视情维修(On-condition maintenance):即通过检查预示可能出现故障的特性,在全面出现故障之前及预报的临界值之后所进行的预防维修。这种维修是在掌握装备可靠程度的基础上,只对其可能发生功能性故障的部分或机件作必要的预防维修(IROAN—Inspectand Repair Only as Necessary)。因而,维修的及时性、针对性、经济性都比较好,可减少或避免盲目的维修,以充分利用产品及其各部分的工作寿命,提高产品的有效性。但是,这种维修必须恰当地拟定检测周期,明确项目(部件、机件或元器件)耗损的极限值,以及及时进行维修;同时,还必须具有预测故障何时增长的很好的数据系统及检测手段。目前视情维修已日益成为各种设备和装备的主要维修方式。

c. 状态监测维修(Condition—Monitor maintenance):即对产品进行连续监控或利用诊断技术提供的信息,通过统计技术决定一类(批)产品开始需要维修的故障。这种维修方式是以概率论与数理统计以及先进的自动检测与诊断技术为基础的维修方式,但不适用于故障是突发性的灾难性的情况。

此外,由使用操作者进行的产品保养(Servicing),如擦拭、润滑、检查与查看等,也可看作是一种预防性维修(维护)。

随着维修实践经验的积累和理论研究的深入,应用以可靠性为中心的维修分析(RCMA)方法,近年来,人们不再把预防维修分为三种方式,而是用逻辑决断的手段作出维修计划,对产品不同层次与部位具体分析,从而采取各种预防维修工作(如:润滑/保养、使用检查、功能检查、拆修、定期报废等)。

(3) 改进性或改造性维修。这种维修方式可以把维修与更新结合起来,往往用最小的代价取得设备(装备)性能更趋完善或得到一定提高。也有人称之为设备的现代化改装。在我国国力有限,设备(装备)不可能大批更新,而技术发展又很快的形势下,这种维修无疑是一种特别有意义的设备发展与维修策略。

综上所述,维修实质上是产品科研、生产与使用的延伸和发展,也是产品从论证、研制、生产、使用直到淘汰的全寿命过程(寿命周期 Life cycle)的一个重要环节。

## 1.2 维修在国民经济发展和国防建设中的地位 and 作用

设备维修是国民经济各部门维持再生产的必要手段。完好的设备是生产力的重要因素,也是人类各种生产活动赖以进行的物质条件。设备的性能完好是靠维修来保持和恢复的,而对绝大多数设备不进行维修,采取“坏了就扔”的策略,显然不但在我国,就是对发达

国家也是行不通的。例如汽车,苏联汽车大修数早已超过生产数,而在资本主义国家中通常修复的汽车出售数,也比新车多 10~15%。又如,我国农机系统拥有大中型拖拉机 60 余万台,若每三年需大修一次,每年需修 20 余万台,这就远远超过全国大中型拖拉机 10 余万台的年产量。如果取消修理,仅靠年产量将无法足工农业生产的需要。所有国民经济以及科教文部门,对设备维修的依赖情况也都一样。因此,可以毫不夸张地说,维修本身就是生产力。

维修具有巨大的经济效益。设备维修的经济效益在于恢复与维持设备的规定状态,尔后通过设备的运转或运营来实现。例如,年产 30 万吨合成氨的企业,因设备原因停产一天,就要损失税利 15 万元;武钢一米七轧机停产一天将损失 70 万元;宝钢 4063m<sup>3</sup> 的高炉停产一天即少产生铁上万吨。若把这些设备管理、维修好,延长一天使用期或缩短一天维修期,其经济效益可达几十万至几百万元。同时,维修将以消耗较少的人力、物力、财力,来获得与购买新品同等的设备生产能力,这本身就体现了经济效益。通过维修,特别是结合进行设备改造与更新的维修,乃是节约能源、资源、减少污染和提高效能的重要途径。一些发达国家在加速工业发展中,都采取了这一途径。

国外的经验表明,生产越发展,维修越重要,它在国民经济中所处的地位和作用就越来越大。据瑞典统计,全国制造业维修工人占职工总数的比例,1971 年为 5.5%,1979 年上升到 6.5%;同期职工总数减少 6.8%,维修工人却增加 10.7%。美国也有类似的情况。在我国,据有关部门的统计,当前全国工交企业拥有固定资产 7000 多亿元,其中属于设备部分约有 4000 多亿元,占 60% 左右。同时,还有一支 500 多万人的设备维修与管理队伍,每年用于设备维修的费用达 300 亿元。在全国拥有的 300 万台机床中,设备维修行业占有 100 万台。这些数字说明,设备维修在国民经济发展中有着举足轻重的作用,是我国现代化建设中不可缺少的组成部分。

对于军事装备来说,维修更有其特殊的重要性。武器装备是军队战斗力最重要的因素之一,装备现代化是军队现代化的首要内容。保持装备良好的战备状态是巩固国防、夺取胜利的首要条件。应当看到,由于军事装备常常在野外、战斗环境中使用,条件恶劣,一般耗损性的故障率要比同样的民用设备高得多,加之在现代化战争中战损严重,军事装备与民用设备相比,对维修的要求就更为迫切与重要。在第四次中东战争中,以色列仅在 10 天中就修复坦克近 2000 辆次,及时恢复战斗力是其制胜的重要物质条件。在英阿马岛之战中,英军损坏 12 艘军舰,战时修复 11 艘,依靠维修而保持了强大的战斗力。飞机也是如此,同是歼击机,由于维修方便迅速的程度不一,其发挥的效能也就大不一样。如鹞式机每天平均飞行 9h 以上,而有的机型维修费时费力,每天却只能飞行 3h。单就飞行时间而言就形成了 3:1 的力量对比,由此可以看出,军用装备的维修确实是影响战斗力的重要因素。

正因为如此,各国军队都非常重视装备维修,为此花费了巨大的人力、物力和财力,以保证部队的训练与战备。美国 1984 年军用装备的维修费高达 600 亿美元,80 年代以来维修费已接近装备研制费与采购费之和。美、苏一个陆军师的维修人员少则数百人,多则一千余人,均达到全师人员总数的 10% 上下。我国的装备维修在国防现代化建设中 also 占有同样重要的地位和作用。

由于设(装)备维修在我国“四化”建设中的重要作用,因此研究如何实现维修现代化,

提高其效率和效益,对国民经济和科技事业发展以及军队建设都具有重要的、现实的和深远的意义。

## 第二节 产品的固有属性及其与维修的关系

如前所述,维修拥有庞大的专业队伍并消耗巨大的物力和财力;维修工作是产品研制、生产和使用过程的延伸和发展。所以,研究和解决维修问题就不能仅限于产品使用过程中的维修技术或管理问题,而且还应着眼于更大的系统,以研究处理维修与产品研制、生产及使用的关系问题,其中首先是与产品固有属性的关系问题。

研制和生产一种产品总是为了用以完成规定的功能(Functions)。应当说,完成功能是产品的一种固有属性或基本属性,而功能指标又是用来衡量这种性能高低的。例如,飞机和船舶的航程、速度、载运量;电机的功率、转速;武器的射程、射速、精度等等。一种新产品的研制,总是力图使这些功能指标比原有的产品要有所提高。然而要保持和维持这些性能则要靠维修来实现。

除功能指标外,设备(装备)还有可靠性、维修性和经济性等几种基本属性。下面将分别讨论这几种属性及其与维修的关系。

### 2.1 可靠性

通俗地说,产品的可靠性(Reliability)就是在使用中不易出毛病,经久耐用。它的重要性是大家所公认的。但是,作为一门技术学科的可靠性工程,是从第二次世界大战中期开始、直至 50 年代才迅速发展起来的。首先是在军事装备中,进而又在民用产品中应用,并取得了巨大的军事效益、社会效益和经济效益。

可靠性的传统概念是“产品在规定条件下和规定时间内,完成规定功能的能力”(GB3187—82《可靠性基本名词术语及定义》)。一种产品完成规定功能的能力,即可靠性是“与规定条件”分不开的。所谓“规定条件”,是指设计产品时应考虑的各种规定条件、储存与运输条件、使用与维修条件等。条件不同,同一产品完成功能的状况也不同。因此,定义可靠性时必须规定条件。产品的可靠性还同时间有关,这里的时间是指使用期和储存期。在规定条件下一种产品的可靠性是随着时间的增长而降低的,故在确定可靠性时应规定时间。此处所指的时间使用的是广义的寿命单位(Life units),即产品使用期间对寿命的度量单位,例如使用(工作、飞行)小时、循环次数、运行距离、发射弹数等。

可靠性既然是一种完成规定功能的能力(可能性),因此可以用概率,即可靠度  $R(t)$  来表示。可靠度是指产品在规定条件下和规定时间  $t$  内完成规定功能的概率。可表示为:

$$R(t) = P(T > t) \quad (1-1)$$

其中  $T$  是产品从开始工作到发生故障时的连续正常工作时间。

可靠度  $R(t)$  是时间的减函数。不同类型产品的可靠度具有不同的概率分布函数。最常见的是指数分布、威布尔分布、正态分布等。

度量产品可靠性的指标(参数)最常用的是寿命,对不可修复产品则是指失效前的工作时间 MTTF;对于可修复产品,常用平均故障间隔时间 MTBF 来表示,即相邻两次故障间的平均工作时间。MTBF 可用产品使用寿命期内的某个观察期间一个或多个产品的累积工作时间与故障次数之比来计算。产品的可靠性也可用故障(失效)率来衡量。故障率

(failure rate)是指工作到某时刻尚未发生故障的产品,在该时刻后单位时间内发生故障的概率。这里的故障(失效),是指产品丧失所规定的功能。这种可靠性是以完成规定功能或任务为依据的,因而又称为任务可靠性。

提高产品的任务可靠性,除了提高产品各组成单元的可靠性(如零、元、器件的寿命,包含强度、耐磨、耐腐蚀、抗老化等特性)外,极重要的是合理地设计产品的结构,例如增加冗余(储备)设置,包含工作储备与非工作储备等。

可靠性与维修有着密切的关系。一方面维修的主要目的是为了恢复或保持产品的可靠性;另一方面,一般地说产品的可靠性越高,故障越少,而排除故障和预防故障所需的维修人力、物力和财力消耗也就越少,为此所需要配备的维修人员、设备、备件及材料、文件资料等后勤保障要求也越少,反之则多。因此,提高产品的可靠性,就意味着在保证完成功能的前提下减少了维修。

但是,任务可靠性与减少维修的要求并不完全一致,有时甚至是有矛盾的。任务可靠性要保证完成规定功能,常采用冗余设置,例如在一个系统中为保证动力供应,多采用两个或多个电源,以提高完成任务的可靠性。但这种办法却增加了维修的工作量,这是因为工作着的电源要维修,未工作的电源也要维修。所以,设计产品时过分强调任务可靠性,反而可能导致使用中维修人力和物力的巨大消耗,提高了产品在使用中的后勤保障的要求。特别是武器装备,往往完成功能的时间很短,长期处在储存、运转、训练等状态,而且还要保证它们处于良好战备状态,一旦任务需要即可使用。在这种情况下,装备的储存、使用、维修、供应等费用无疑会直线上升,致使在装备的寿命周期内平均要用高于其购买费用1倍、甚至几倍的钱来维修。武器装备越现代化,结构越复杂,其维修费用也就越昂贵。减少维修人力、物力和费用,已成为武器装备设计的重要目标,并且由此引起了可靠性的含义及指标体系的变化。

70年代末至80年代初,美国国防部提出了基本可靠性(Basic reliability)的概念,其定义是“产品在规定条件下无故障特性的持续时间或概率”,而故障是指“产品任何部分不能完成其性能规范规定的事件”。基本可靠性与任务可靠性的根本区别在于,前者以产品的规定状态为准,后者则按产品的规定功能为准,前者要比后者严得多、范围宽得多。凡是不符合规范规定的状态,都被看作故障,破坏了基本可靠性的要求。因此,都要消耗人力和物质资源来予以维修。所以,基本可靠性归根结底就是减少维修的内容、频率及消耗的人、财、物力,进而减少装备的全寿命费用。

可靠性的目标由仅仅是完成功能、保证任务成功扩展到减少费用等项,已形成了新的指标(可靠性参数)体系。在产品设计时,可靠性目标包括提高效能和减少费用两方面。提高效能(Effectiveness)中又包含任务可靠性和可用度。任务可靠性可用平均致命故障间隔时间 MTBCF 作指标。这里的致命性故障是指那些影响完成任务的故障。可用度(Availability)相应的可靠性指标是平均停机事件间隔时间 MTBDE,即在某一规定时间内,系统寿命单位的总数除以系统不能执行其任务的事件总次数。此处的停机事件,不仅限于产品不能完成其规定功能的致命故障,而且还包括预防维修以及其它延误所造成的停机事件。在减少维修费用中,包含着减少维修人员费用和后勤保障费用。为减少维修人员费用,从可靠性角度引入了平均维修活动间隔时间 MTBMA,它等于某一规定时间内,系统寿命单位的总数除以维修活动的总数。此处的维修活动,是指进行一次维修中的各个环节

或要素,例如故障检测或隔离、更换、调校、检验等。减少维修后勤保障费用涉及到所需的备件及有关设备、仪器、工具和设施。从可靠性角度来说,就是要尽量减少拆装和更换件,故引入一个平均拆换间隔时间 MTBR,它等于某一规定时间内系统寿命单位的总数除以该系统拆换的总次数。

这样,从基本可靠性 MTBF,到涉及四个方面的系统可靠性参数,构成一个比较完整的可靠性指标体系,以体现新研制装备的价值或质量。这个指标体系不但能保证产品的功能、可用度,而且还同减少维修紧密相连。可靠性研究的发展,必将引起产品设计水平的提高和产品质量的新飞跃。

## 2.2 维修性

维修性(Maintainability)是产品的又一个固有属性。在给定条件下,一种设备或装备损坏或出故障后是否容易修复,平时预防维修是否方便经济,即维修的效率和效益如何,完全取决于它的维修性。因此,维修性就是产品设计所赋予的使其维修简便、迅速和经济的一种固有特性。初看起来,维修性似乎同产品设计中的传统提法“维修方便”相同,但实际上存在着质的差别,即维修性有明确的定义和要求,可以定量化为各种参数及指标,有系统的技术措施,有较系统的分析与验证方法等等。

维修性的定义是:产品在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的可能性。换言之,维修性是产品所具有的能在规定的约束条件下完成维修的能力。这些规定的约束条件是必要和重要的,因为能否完成维修并使产品保持或恢复规定状态,均与上述因素有着密切的关系。所谓规定的条件,主要是指维修的级别和场所(工厂或修理基地、专门的机修车间或修理所和使用单位的现场等)以及相应水平的维修技术人员与设施、设备、工具、备件和技术资料等等。所谓规定的程序和方法,主要包括实施维修过程中不同的方式和方法(如:定期、视情或状态监控方式;换件或原件修复方法等)。条件、程序、方法不一样,同样一种产品完成维修的可能性也不一样。完成维修的可能性还与维修时间的长短有着直接关系。因此,在确定维修性的要求或进行试验评定时,都应明确定义这几个“规定”。

如果用概率表示完成维修的可能性就是维修度  $M(t)$ ,即:产品在规定的条件下和规定的时间内,按规定的程序和方法进行维修时,保持或恢复其规定状态的概率。可表达为:

$$M(t) = P(\tau \leq t) \quad (1-2)$$

式中  $\tau$ ——在规定约束条件下完成维修的时间;

$t$ ——规定的维修时间。

显然,维修度  $M(t)$  是时间  $t$  的递增函数,且  $M(0)=0, M(\infty)=1$ 。

维修度是维修性定量化的基础。在此基础上,有维修时间、工时、费用等一系列维修性指标或参数,使产品的维修性可以度量、计算和试验评定。关于维修性的量化及分析、试验和评定,将在第二、五章中分别讨论。

维修性的定性要求,也就是实现产品维修性的技术措施。国家军用标准 GJB368.2—87《维修性的基本要求》规定了维修的可达性、标准化与互换性、维修安全性、防差错与识别标志、检测方便迅速、贵重件的可修复性、维修的人机工程要求等项具体措施,这是对各类设备及装备维修性很好的概括。这些内容将在第二章中进一步讨论。

### 2.3 经济性

传统的产品的经济性,通常是用产品的成本或获取费用来衡量,也就是只考虑一种产品的研制和生产的费用,而不考虑产品使用与维修的费用。其结果常常造成用户对产品“买得起,用不起,修不起”。因此,产品的经济性应当引入全寿命费用(LCC, Life cycle cost),即一种产品从论证、研制开始,到生产、使用 and 维修,直至全部淘汰的全寿命过程中的全部费用,包括产品的获取费用(研制、生产费)和继生费用(使用、维修费以及退役费用)两大部分。根据美国资料,武器装备的维修保障费用视其种类与型号的不同分别可达获取费用的3~10倍<sup>①</sup>。因此,作为产品固有属性的经济性,不能仅考虑其成本或订购费,而应当以全寿命费用为依据。特别是在优化装备的整体性能时,全寿命费用又常常作为权衡的约束条件。

以上所说的可靠性、维修性与经济性,同功能参数(指标)一样,都是产品的固有属性,或者说都具有“先天性”。产品(包括“硬件”和“软件”)设计和制造时所赋予的功能、可靠性、维修性和经济性,“后天”(即产品定型生产以后)是难以改变的。比如由于设计制造的原因,产品的可靠性差,就会常出故障、经常维修。若同时加之维修性也差,维修费时费力费钱,那就必然导致全寿命过程的全部费用增加,即LCC增加,造成“先天不足,后患无穷”的结果。又如,据美国测算,B-52飞机在研制结束时,95%的全寿命费用(LCC)已被决定;到生产阶段,99%的LCC被决定。这就是LCC的先天性。由于可靠性、维修性和LCC具有先天性,为了从根本上减少和方便维修,减少费用,就应当把产品的这几项固有属性同时纳入设计研制过程,进行功能、可靠性、维修性及全寿命费用的综合权衡,以真正实现设备或装备的“优生”。

与上述性能、费用的先天性有关的还有一个维修保障分系统与产品同步研制的问题。维修保障分系统(Maintenance subsystem)是指保证产品维修所需的人力和其它资源,包括维修设施、设备、工具、备件和资料等及有关的管理手段(维修计划、分级、机构设置等)。对于复杂的设备或武器装备系统来说,维修保障分系统是其不可缺少的组成部分。它与设备或武器的维修性是相辅相成、互为条件的。现代设备工程或维修工程的基本观点,就是维修保障分系统的设计应当尽早开始,并与设备或装备性能设计相匹配,以保证设备或装备在使用过程中能得到及时有效而经济的维修保障。我国新国家标准《设备维修性导则》(参照采用IEC706)和国家军用标准《装备维修性通用规范》对此都做了明确规定。这个要求,是国内外设备或装备发展与使用维修的经验总结,已经成为设备研制与管理的重要原则。对此,我们还将在第六章中进一步讨论。

当然,产品的各种固有属性及其维修保障分系统在使用维修阶段也不是不可以改进的。但这种改进,实质上是产品及其保障分系统的再设计和再研制,或者说是产品设计研制的补充与发展,这与前面所说的“先天性”并不矛盾。因此,改善产品的维修性要从设计研制阶段抓起,这正是从根本上优化产品性能和节省全寿命费用的一条必由之路。

① 《维修性工程的理论与应用》中文版第4页,昆仑出版社1988年出版。有的资料为3~20倍。

### 第三节 维修性工程

#### 3.1 维修性工程的意义及发展

如前所述,维修性是产品基本的固有属性之一。它对于确保产品的可用度,提高效能,减少全寿命费用都具有重要的意义。欲使设备获得良好的维修性,并不是靠一两个环节或个别人小改小革所能奏效的,而需要在产品论证、研制直至淘汰退役的全寿命过程中,各有关单位和人员共同开展维修性活动,同心协力搞好维修性的论证、分析、设计、试验与评定,以及维修性数据收集与反馈等各方面的技术与管理的工作。实际上,按照系统工程的观点看,这就形成了包含上述各项内容的维修性工程。就其内容来说,维修性工程就是研究产品在全寿命过程中如何将维修性与产品结构及维修保障要素相结合,实现经济而有效的维修保障。这是一门专门从事维修性设计、试验和论证的工程技术学科,故也有称之为维修性技术。GJB451-90 将维修性工程定义为:为了达到产品的维修性要求所进行的一整套设计、研制、生产和试验工作。

维修性工程在产品发展中有着重要的作用。众所周知,设备或装备为完成一定的功能,必须具有尽可能良好的工作或战斗性能,如飞机和车辆的速度、行程及载运量;武器的射程、精度等。由此又必须有相应的功能或性能设计、试验,从而产生和形成了各种产品的设计与试验的理论与技术。而维修性工程或技术,对于各种需要维修的产品,特别是各种复杂的设备或装备的研制,又是十分必要和普遍适用的。据国外资料说,在维修性上花 1 美元,在整个产品的全寿命过程中就可获得 50 美元的价值。因此,各发达国家都非常重视维修性工程的研究与应用,并把它贯穿于产品研制、生产和使用的全过程之中。其重点是:在论证与研制阶段,根据设备或装备的类型、复杂及贵重的程度等因素,设置专门的维修性机构或人员,进行各项维修性活动;制定、颁布有关维修性的国家标准、军用标准或国际标准,为维修性工程活动立“法”;在有关设备或装备发展与管理的院校或专业中,广泛开设维修性工程的课程,等等。实践证明,维修性工程在促进产品发展与维修中所发挥的作用是十分显著和重要的。

作为一门新兴学科或工程技术的维修性工程,迄今为止大约经历了 30 年的发展过程。维修性工程起源于美国,初期只是作为可靠性工程的一个组成部分。可靠性工程首先是从军用装备、电子设备开始发展起来的。在第二次大战期间,特别是 50 年代后,随着电子设备使用愈加广泛和工作环境的越来越恶劣(如航空航天飞行器和火箭上使用的电子设备),而对设备的功能要求却越来越高,设备的结构也越来越复杂,这就导致了设备的可靠性日益难以满足。如在 50 年代初的朝鲜战争期间,美军各种无线电通讯和雷达设备故障频繁,分别有 14% 和 84% 的时间处于故障停机状态,这就给使用与维修带来很大困难。上述情况迫使美国加紧装备可靠性的研究,包括可靠性的理论、设计和试验技术,采取提高电子元件的寿命、改进装备结构等措施,以减少故障。另一方面,作为可靠性的补充,采用各种便于维修的合理结构,提高装备的维修性,缩短维修停机时间,也是完全必要的。因此,从 50 年代中期开始,美国已经把它列入有关的合同文件中,并在 1959 年颁布了第一个有关维修性的美国军用标准(规范)MIL-M-26512《美国空军航空空间系统与设备的维修性要求》。随后又相继制定了海军电子设备、导弹武器系统的维修性要求等有关标准。他