



系统可靠性的 与维修性的 分析与设计

● 章国栋 陆廷孝 屠庆慈 吴真真 编著 ● 北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

可靠性工程和维修性工程是工程系统工程的重要组成部分，对于提高工程系统的使用效能具有关键性的影响，它在我国还是新发展起来的工程专业。为了适应当前有关专业本科生和部分研究生的教学需要，在结合我国工程发展实际的基础上编写了本书。

作为工程专业性的教材，本书主要讨论工程项目的设计与研制中如何推行可靠性和维修性工程，以实现规定的可靠性和维修性要求。书中着重从可靠性和维修性的工程分析与设计角度，较系统而详细地论述了相关的基本理论、工程实用方法和实施步骤，并给出了工程应用实例。在工程实践第一线从事可靠性和维修性工作的工程技术人员也可以本书作为开展工作时的参考。

系统可靠性与维修性的分析与设计

XITONG KEKAOXING YU WEIXIUXING
DE FENXI YU SHEJI

章国栋 陆廷孝 屠庆慈 吴真真 编
责任编辑 樊毅

北京航空航天大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销
通县觅子店印刷厂印装

787×1092 1/16 印张：25.5 字数：653千字
1990年7月第一版 1990年7月第一次印刷 印数：4000册
ISBN 7-81012-181-2/TP·028 定价：5.35元

前 言

可靠性工程发展成较为成熟的工程学科是近20年来的事。维修性工程发展得还要慢些，只是在十多年前才逐渐成熟起来。在可靠性工程和维修性工程的发展过程中，军用装备、军用系统的研制是其积极的和主要的推动力。

四十年代到五十年代期间，军用电子设备在飞速发展中遇到了因可靠性很差而严重地影响了使用效果的问题，促使美国于1950年成立了“电子设备可靠性调查委员会”，以进行全面、彻底的调查研究。1952年又把该委员会升级为“电子设备可靠性咨询委员会（AGREE）”，负责对电子设备的设计、开发、生产、供应、使用、维修及人员培训等各个方面进行可靠性的监督。这一时期可以说是美国可靠性工程兴起和奠基的阶段。1957年6月发表的“军用电子设备的可靠性报告（AGREE报告）”可以说是一个关于在美国开展可靠性工程研究的基础性文件，建立了可靠性工程的框架。

直到1954年，关于维修性的研究还没有形成一个确定的专业，某些生产者只是在产品研制过程的后期在设计上加入一些与维修相关的特征。美国空军于1959年颁发的MIL-M-26512规范可以说是第一份正式提出有关装备的维修性要求的规范。

六十年代，可靠性工程和维修性工程在美国都先后进入了全面发展阶段。以可靠性作为主题的各种军用标准、规范和手册陆续出版，如1962年颁发的MIL-HDBK-217“电子设备可靠性手册”、1963年颁发的MIL-STD-781“可靠性试验、指数分布”和1965年颁发的MIL-STD-785“系统与设备的可靠性大纲要求”等，这些都成为今日的可靠性标准体系的基础。随后，1966年先后出版了MIL-STD-470“维修性大纲要求”、MIL-STD-471“维修性验证”和MIL-HDBK-472“维修性预计”等标准和手册，使推行维修性工程有了一整套的工具，也标志着维修性工程已形成一门独立的学科。

六十年代中，苏联、法国和日本等国也都相继深入地开展了可靠性与维修性的研究。1965年国际电工委员会（IEC）可靠性专业委员会TC56成立，使可靠性技术成为了国际化的技术。

作为独立的工程学科，可靠性工程和维修性工程也是在美国率先形成的。可靠性工程和维修性工程在美国的兴起、成长与成熟的过程具有代表性。

可靠性工程和维修性工程趋于成熟还远不是它们发展进程的终结，它们还在继续向更高水平、更广阔和更深入的内涵发展。比如，以寿命周期费用为约束的可靠性与维修性的权衡优化设计、具有高可靠性与高维修性的系统的研制、软件的可靠性与维修性的研究、可靠性试验方法的改进、先进的机内自测试技术的开发以及统一的管理机构与数据库的建立和促进国际间的协调发展等。有关的研究成果和新进展又适时地反映到相应的新标准、新规范等的制订和原有标准、规范等的修订中去。

纵观可靠性工程和维修性工程的发展历程，可以看出正是客观现实条件的变化（设备的日趋复杂、使用运行环境的日益严酷、财力与人力资源受到严格限制、可靠性与维修性技术的不断发展等）导致人们在观念上产生了变化，从单纯地追求某些技术性能目标，转向主要

以寿命周期费用体现出来的综合目标，转向要求在系统的效能和费用间求得合理的平衡。高的可靠性和高的维修性对提高系统的效能和降低其寿命周期费用起着举足轻重的作用。正因为如此，可靠性工程和维修性工程自七十年代以来取得了长足的进展。

可靠性与维修性在工程项目发展中的地位日益提高。按美国空军的提法，可靠性与维修性是“战斗力的乘数”，他们提出“今天的可靠性与维修性，就是明天的战斗力”。美国空军预期在公元2000年时要做到至少使其新机发展项目的可靠性和维修性都比现有的水平提高一倍。

在我国，最早也是由电子工业部门开始开展可靠性工作的，在六十年代初进行了有关可靠性评估的开拓性工作。以后经过各有关部门的持续努力，自1984年开始，在国防科工委的统一领导下，结合国情并积极汲取国外的先进技术内容，组织制订了一系列关于可靠性与维修性的基础规定和标准。1985年10月科工委颁发的“航空技术装备寿命与可靠性工作暂行规定”，是我国航空工业的可靠性工程与维修性工程全面进入工程实践和系统发展阶段的一个标志。1987年5月，国务院、中央军委颁发“军工产品质量管理条例”，明确了在产品研制中要运用可靠性和维修性技术。此后，于1987年12月和1988年3月先后颁发的国家军用标准GJB368-87“装备维修性通用规范”和GJB450-88“装备研制与生产的可靠性通用大纲”可以说是目前具有代表性的基础标准。总的来说，我国的可靠性工程和维修性工程尚处于打基础的阶段。

现在有越来越多的人认识到，要使一个产品或系统的可靠性和维修性达到预期的目标，必须从设计的开初就要加以考虑。也就是常说的：可靠性必须是设计到产品里面去的，同时也是制造出来的；维修性也是一个设计特性，也是要设计出来的。

产品的产生始自设计，要进行设计就离不开分析与综合。通过综合，按一定的条件确定出具有合用的整体功能（包括可靠性和维修性）的硬件与软件组成的总体。而综合的依据是分析，作出正确的综合决策（设计方案）有赖于做好分析工作。进行分析是为了得出关于产品的本质描述，确定出产品的技术规格、性能参数以及与之相关的各种状态因素。在设计过程中不断地进行分析，依据分析结果作出设计决策，再通过分析加以评断。在这个反复的过程中，可靠性与维修性的分析与设计是一个不可少的、有机的组成部分，关系到整个产品的设计、生产和使用情况的好坏。

现代可靠性工程和维修性工程虽然在我国发展较迟，但已开始对我国航空工业及其他工业的发展产生了重要的影响。我国新产品的可靠性与维修性设计已经有了一个良好的开端，有关的基础理论和应用科学的研究工作已有所进展。理论与工程实践相结合，必将进一步推动可靠性工程和维修性工程在我国的深入发展，使之提高到新的水平。

作为工程应用性的学科，可靠性工程和维修性工程包含了为获得所需的可靠性和维修性特性所进行的一系列设计、研制、生产、使用和保养、修理等各种工作，涉及到相当广泛的专业内容。本书主要围绕产品或系统的可靠性与维修性设计工作，从工程实用的角度，就可靠性与维修性基础理论、相关指标的规定、有关的工程分析和设计方法等内容作了阐述，也论及一些与可靠性和维修性设计密切相关的问题。可靠性工程和维修性工程是以概率模型为基础的，可靠性与维修性参数大多是以概率形式定义的，因此希望在阅读本书前能先复习一下有关概率与数理统计的基本理论。

编写本书的目的是要以它作为可靠性、维修性专业本科生及部分研究生的专业教材之

一，并供在职技术人员进行专业培训和从事专业设计工作时参考。参加编写工作的有：章国栋（第一、九、十四、十五章）、陆廷孝（第二、四、六、七、八章）、屠庆慈（第三、五、六章）、吴真真（第十、十一、十二、十三），由章国栋主编。

628所研究员曾天翔同志仔细地审阅了本书，并提出了许多宝贵的意见，在此对他表示衷心的感谢；还要感谢陆翠云同志为本书绘制了大量的插图。

目 录

第一章 引 论

1.1 概述	(1)
1.2 系统和系统的发展过程	(1)
1.2.1 系统	(1)
1.2.2 系统的寿命周期	(2)
1.3 系统的效能与寿命周期费用	(3)
1.3.1 系统的效能	(3)
1.3.2 系统的寿命周期费用	(4)
1.3.3 系统效能的权衡分析与优化	(6)
1.4 系统寿命周期内的可靠性与维修性工作	(8)
1.5 可靠性与维修性的工程实践与管理	(9)
1.5.1 可靠性和维修性与系统工程过程	(9)
1.5.2 可靠性与维修性专业职能的组织与管理	(10)
习题	(13)

第二章 可靠性与可靠性工程

2.1 概述	(14)
2.1.1 质量与可靠性	(14)
2.1.2 可靠性的基本概念	(15)
2.1.3 故障的基本概念	(16)
2.2 可靠性工程和可靠性设计	(16)
2.3 可靠性的定量和定性要求	(18)
2.3.1 可靠性的定量要求	(18)
2.3.2 可靠性的定性要求	(20)
2.4 可靠性的主要度量指标	(20)
2.4.1 可靠性量化的必要性及特点	(20)
2.4.2 可靠度和累积故障分布函数	(20)
2.4.3 故障率函数	(24)
2.4.4 可靠性的寿命特征	(29)
2.4.5 军、民用飞机整机常用的可靠性指标	(31)
习题	(33)

第三章 系统可靠性模型的建立与分析

3.1 概述	(36)
3.2 典型的系统可靠性模型	(38)
3.2.1 串联模型	(38)

3.2.2	并联模型	(39)
3.2.3	n 中取 r (r/n)模型	(41)
3.2.4	混合式贮备模型	(42)
3.2.5	多数表决贮备模型	(42)
3.2.6	混联模型	(14)
3.2.7	非工作贮备模型	(44)
3.3	基本可靠性模型与任务可靠性模型	(46)
3.3.1	建立基本可靠性模型与任务可靠性模型的目的	(46)
3.3.2	任务可靠性模型的建立	(48)
3.3.3	建立任务可靠性框图的实例	(49)
3.3.4	建立任务可靠性模型需要考虑的几个特殊问题	(50)
3.4	选择可靠性模型的原则	(52)
3.5	设计实例	(54)
3.6	网络系统的基本概念	(59)
3.7	计算网络系统可靠度的方法	(62)
3.7.1	布尔真值表法	(62)
3.7.2	部件状态图示法 (概率图法)	(63)
3.7.3	最小路集和最小割集法	(67)
3.7.4	用全概率分解法计算网络系统可靠度	(81)
3.7.5	网络系统的直接不交化算法 (不交型算法 (I))	(84)
3.7.6	网络系统的不交最小路集算法 (不交型算法 (II))	(86)
3.8	设计时提高网络系统可靠度的方法	(93)
	习题	(95)

第四章 故障模式影响及致命性分析方法和故障树分析法

4.1	故障模式影响分析和故障模式影响及致命性分析	(100)
4.1.1	概述	(100)
4.1.2	故障模式	(101)
4.1.3	FMEA和FMECA实施步骤	(101)
4.1.4	致命性分析	(102)
4.1.5	FMEA和FMECA表格及实例	(104)
4.2	故障树分析	(107)
4.2.1	概述	(107)
4.2.2	故障树的建造	(108)
4.2.3	故障树的数学描述	(114)
4.2.4	故障树的定性分析	(119)
4.2.5	故障树定量化计算	(124)
4.2.6	故障树的简化	(132)
4.2.7	重要度及其在设计时的应用	(138)
4.2.8	FTA法的评价	(141)
4.2.9	FTA法的应用实例	(141)
	习题	(147)

第五章 系统可靠性的预计和分配

5.1	概述	(149)
-----	----	---------

5.2 系统可靠性预计	(149)
5.2.1 概述	(149)
5.2.2 系统可靠性预计方法	(150)
5.2.3 保证可靠性预计精度的方法	(168)
5.3 系统可靠性分配	(169)
5.3.1 概述	(169)
5.3.2 无约束条件的系统可靠性分配方法	(172)
5.3.3 有约束条件的系统可靠性分配方法	(181)
习题	(191)

第六章 可靠性设计和分析技术的扩展

6.1 概述	(194)
6.2 电子元器件和电路的容差分析	(194)
6.3 电磁兼容设计	(198)
6.3.1 概述	(198)
6.3.2 电磁兼容性定义	(198)
6.3.3 电磁干扰对系统造成的危害	(199)
6.3.4 电磁干扰传播的途径	(199)
6.3.5 控制电磁干扰的主要措施	(202)
6.4 潜在电路分析	(204)
6.4.1 概述	(204)
6.4.2 潜在电路的特点及其产生原因	(204)
6.4.3 潜在电路的表现形式	(205)
6.4.4 潜在电路的分析方法	(206)
6.4.5 潜在电路分析的一些特点	(207)
6.5 热设计	(208)
6.5.1 概述	(208)
6.5.2 散热的基本设计措施	(208)
6.5.3 最常用的几种冷却方法	(209)
6.5.4 热设计方法	(210)
6.6 软件可靠性	(213)
6.6.1 概述	(213)
6.6.2 软件的寿命周期	(213)
6.6.3 软件的故障及可靠性	(214)
6.6.4 提高软件可靠性的途径	(216)
6.7 机械类产品可靠性设计与分析	(218)
6.7.1 概率设计方法	(218)
6.7.2 耗损型故障模型分析法	(221)
6.8 系统可靠性综合方法	(224)
6.8.1 概述	(224)
6.8.2 系统可靠性综合的经典法简介	(225)
习题	(227)

第七章 可靠性设计评审和验证

7.1 概述	(229)
7.1.1 可靠性设计评审的概念	(229)
7.1.2 可靠性设计评审的目的和作用	(229)
7.1.3 可靠性设计评审的性质和特点	(229)
7.1.4 可靠性设计评审分类	(230)
7.2 可靠性设计评审点的设置及主要设计评审点评审内容	(230)
7.2.1 可靠性设计评审点的设置	(230)
7.2.2 主要评审点评审内容	(231)
7.3 可靠性设计评审程序	(232)
7.4 可靠性设计评审的组织机构	(233)
7.5 可靠性设计评审实例	(233)
7.6 可靠性验证	(234)
7.6.1 可靠性验证试验的目的	(234)
7.6.2 可靠性验证试验的分类	(234)
7.6.3 验证试验大纲和计划	(235)
习题	(235)

第八章 系统可靠性设计的案例——教练机研制阶段的可靠性设计

8.1 概述	(236)
8.2 方案论证及初步设计阶段主要的可靠性设计工作	(237)
8.2.1 整机可靠性、维修性指标的确定	(237)
8.2.2 可靠性、维修性专用技术文件的制订和贯彻	(237)
8.2.3 FMEA的实施	(238)
8.2.4 可靠性建模、预计及分配	(238)
8.2.5 成品可靠性指标的选定和取值	(240)
8.2.6 设计评审	(241)
8.2.7 重视环境因素对可靠性的影响及采取的环境控制措施	(241)
8.3 详细设计阶段主要的可靠性设计工作	(241)
8.3.1 预计完成任务成功概率 (MCSP) 的步骤	(242)
8.3.2 对关键系统进行安全性评定	(244)
8.3.3 设计评审	(248)
习题	(248)

第九章 维修性与维修性工程

9.1 概述	(249)
9.2 维修性的基本概念及其量化指标	(249)
9.2.1 维修性的基本概念和定义	(249)
9.2.2 维修度 $M(t)$	(250)
9.2.3 维修性的主要度量指标	(251)
9.3 可用性与可用度	(251)
9.3.1 基本概念	(251)

9.3.2	固有可用度 A_T	(252)
9.3.3	使用可用度 A_0	(253)
9.3.4	达到的可用度 A_d	(254)
9.4	维修性工程	(254)
9.5	维修性要求的确定	(256)
9.6	维修性大纲与维修性大纲工作项目	(257)
9.6.1	制订维修性大纲计划	(257)
9.6.2	进行维修性分析	(257)
9.6.3	为确定维修概念和制定维修计划提供信息	(259)
9.6.4	建立维修性设计准则	(259)
9.6.5	进行设计权衡	(260)
9.6.6	预计维修性参数值	(260)
9.6.7	对分承制方实施监控	(261)
9.6.8	参加设计评审	(261)
9.6.9	建立数据收集、分析和纠正措施系统	(261)
9.6.10	验证达到的维修性要求	(262)
9.6.11	编写维修性状态报告	(262)
习题	(263)

第十章 系统维修性模型的建立与分析

10.1	概述	(264)
10.2	维修性函数	(264)
10.2.1	维修度函数	(264)
10.2.2	维修概率密度函数	(265)
10.2.3	维修率函数	(265)
10.3	维修性模型中常用的统计分布	(266)
10.3.1	正态分布	(266)
10.3.2	指数分布	(269)
10.3.3	对数正态分布	(270)
10.4	可用度函数	(274)
10.4.1	概述	(274)
10.4.2	可用度的马尔可夫过程模型	(275)
10.4.3	不用时间定义的可用度模型	(287)
10.4.4	战备完好率概率模型	(288)
习题	(292)

第十一章 系统维修性的分配和预计

11.1	系统维修性分配	(294)
11.1.1	分配因素	(294)
11.1.2	维修性分配的主要步骤	(295)
11.1.3	维修性分配方法	(299)
11.2	系统维修性预计	(305)
11.2.1	概述	(305)

11.2.2 推断法	(305)
11.2.3 时间累加法	(306)
11.2.4 随机抽样法	(309)
11.2.5 加权因子预计法	(313)
11.2.6 线性回归预计法	(314)
习题	(314)

第十二章 系统维修性设计

12.1 维修性设计与系统设计	(316)
12.1.1 维修性设计与系统设计之间的关系	(316)
12.1.2 系统设计中的维修性工作	(317)
12.2 维修性设计准则	(319)
12.2.1 概述	(319)
12.2.2 拟订维修性设计准则的基本原则	(320)
12.2.3 维修性设计准则的主要内容	(323)
12.2.4 维修性设计准则实例	(330)
12.3 维修性设计评审	(333)
12.3.1 概述	(333)
12.3.2 设计评审的基本类型	(334)
12.3.3 维修性设计评审的主要内容	(335)
12.4 机内自测试技术	(340)
12.4.1 概述	(340)
12.4.2 BIT的工作类型	(340)
12.4.3 BIT的主要性能指标	(342)
12.4.4 BIT的设计考虑	(343)
习题	(344)

第十三章 系统维修性验证和评估

13.1 维修性验证试验的主要类型	(345)
13.2 维修性验证的程序和方法	(346)
13.2.1 维修性验证计划	(346)
13.2.2 初步验证阶段	(347)
13.2.3 正式验证阶段	(349)
13.3 验证试验的数据分析和评估	(351)
13.3.1 计算 \bar{M}_{ot} 、 $M_{max,ct}$ 和 σ	(352)
13.3.2 修复时间的频率分布	(353)
13.3.3 评估判据	(354)
习题	(355)

第十四章 维修与维修工程

14.1 概述	(356)
14.2 维修工程分析与维修概念	(357)
14.2.1 维修工程分析	(357)

14.2.2	维修概念	(358)
14.2.3	维修级别	(358)
14.2.4	维修要求和维修工作	(359)
14.3	以可靠性为中心的维修逻辑决断	(360)
14.3.1	以可靠性为中心的维修 (RCM)	(360)
14.3.2	初始RCM大纲的拟订	(361)
14.3.3	以可靠性为中心的维修决断图	(362)
14.3.4	三种维修方式	(363)
14.4	后勤保障分析	(365)
14.4.1	综合后勤保障与后勤保障分析	(365)
14.4.2	后勤保障分析工作要点	(365)
14.5	维修计划	(366)
14.5.1	维修计划	(366)
14.5.2	详细维修计划的制订	(367)
14.6	区域性检查	(367)
	习题	(368)

第十五章 可靠性与维修性的权衡

15.1	概述	(369)
15.2	可靠性与费用的权衡	(370)
15.2.1	权衡问题	(370)
15.2.2	权衡分析方法	(370)
15.3	可靠性、维修性与可用性的权衡	(371)
15.3.1	权衡问题	(371)
15.3.2	权衡分析方法	(371)
15.4	预防性维修与修复性维修的权衡	(372)
15.4.1	权衡问题	(372)
15.4.2	权衡分析方法	(372)
15.5	复杂系统的可靠性与维修性权衡	(374)
15.5.1	权衡问题	(374)
15.5.2	权衡分析方法	(375)
	习题	(378)

附录1	在50%、75%、90%、95%和99%置信度下由试验数和故障数确定的可靠度	(380)
附录2	设计检验表和记分标准	(385)
附录3	与可靠性和维修性工作有关的主要国家标准和国家军用标准	(390)
附录4	美国国防部已颁布的主要可靠性与维修性文件	(392)
	参考文献	(394)

第一章 引 论

1.1 概 述

对各种各样的产品，从人造卫星到飞机、从汽车到自行车、从仪器设备到家用电器以至儿童的玩具，在它们的用户中间没有哪一个愿意接受经常出故障因而需要频繁地加以修理的产品，也不欢迎那些一旦出了故障就难于进行修理的产品。而在很多场合，用户的工作或生活又依赖于那些产品的可靠工作，同时用户的手中也不大可能保存众多的备用产品作为工作中的产品出故障时的备份。从国防工业到一般民用工业，各行各业都日益认识到产品可靠性是个非常重要的问题；也认识到，为了以尽可能少的花费取得并使用所需的产品，就要将产品设计得既能持续地可靠运行，又能易于进行维修。

对于军用装备或采用先进技术的民用产品（如民航飞机、核电站等）来说，上述问题就受到更多的关注。因为对这类产品，由于它们的技术性能越来越复杂、使用环境更加严酷多变、对操作人员和维护保养人员技术水平的要求也随之提高，致使购置和维持它们的正常使用所需的花费越发增多；但经费总是有限的，如果因此而使这类产品不能按预定要求正常运行，其后果就相当严重，甚至会是一场灾难性的。

为了将这些矛盾统一起来，求得合理的解决，提出了在系统的寿命周期费用的制约下，求得能发挥的最大效能（或是反命题：在保证一定的系统效能的条件下，使寿命周期费用最少）。这样，费用-效能准则就成了评价工程系统是否合用的主要准则。

本章将从系统整个发展过程出发，对其效能和寿命周期费用问题作一简要论述，并由之引申出可靠性与维修性对提高系统的效能和降低系统的寿命周期费用所起的作用。

1.2 系统和系统的发展过程

1.2.1 系 统

我们在不同的场合经常用到“产品”和“系统”两个词汇，有时也不太注意它们之间在含义上的严格区别。按通常的理解：

“产品”是指作为单独研究或单独试验对象的任何元器件、零件、甚至一台完整的设备。在严格地应用这一词时，对它的确切具体含义应加以说明。

“系统”通常是指设备、技能以及能担当或保障某项任务的执行的各因素的总和。一个完整的系统包括所有的设备、有关的设施、器材、软件、技术服务以及为保障在规定的运行环境下能充分运行所需的人员。

可以看出，在没有特别指明的情况下，“产品”只是个泛指的词，而“系统”则有着较为明确但又远为广泛的含义。本书中较多地使用“系统”一词，这表明我们是着重从系统的角度去研究可靠性与维修性问题的。

1.2.2 系统的寿命周期

一个具体的系统有其发生、发展到终结的过程，这个从其开始到终结的全过程通常称之为系统的“寿命周期”。按发展的阶段顺序和不同阶段的发展特点，可以将系统的寿命周期划分为四个阶段，即：方案论证（概念设计）阶段、设计与研制阶段、生产阶段和使用阶段。

虽然由于所采用的管理体制有所不同，不同发展阶段的功能内容有差异，不同的系统的寿命周期各阶段在详细划分上会有差别，但其带有普遍性的发展规律是相同的。

1. 方案论证阶段

也称概念设计阶段。这个阶段的工作结果从根本上确定了新系统的发展方向。

任何新系统的产生都起源于某种社会需求（政治的、军事的、经济的等等），因此，进行需求分析，并据此确定出合适的系统发展目标是系统发展的起点。

这个阶段的主要工作内容为：从技术、经济、进度等各方面进行任务可行性研究；分析并比较各种可能的方案；经论证确定出合用的系统方案并制定出系统的发展规划。

对一些大型的、耗资巨大而且对社会影响较大的系统（如大型军事系统），为了强调这一阶段工作的重要性、防止出现重大失误，有时还要把这个阶段再细划为方案及探索阶段和论证及确认阶段。

2. 设计与研制阶段

在这个阶段中，要由粗到细地、具体地进行系统的设计，为新系统的最终实现奠定坚实的物质基础。系统最终所具有的功能和技术特性（其中包括可靠性与维修性特性），为实现这些功能和技术特性所要求的每一个工程过程的细节等，都应在这个阶段的后期确切地确定出来。按工作内容的深化与详细程度，这一阶段又可再划分为初步设计和详细设计两个阶段。

初步设计阶段的工作主要为：对包括可靠性、维修性、安全性等在内的所有性能参数，使用和后勤保障特性等功能特性进行定量的分析；确定主要设计参数；通过权衡和优选综合确定出系统的总方案并拟定出有关的规范。

详细设计阶段要根据初步设计阶段所确定的各种要求与制约条件进行详细的工程设计；研制出系统的原型并进行评定；依据评定的结果作出必要的修改，并最终确定出能予以实现而且能满足预定要求的系统基准。

在系统的设计与研制阶段，应该根据实际需要，同时地、协调地进行硬件与软件的设计和研制工作，以期使系统能及时、充分地按预定要求运行。

在这个阶段，还要进行大量的、各种类型的验证和鉴定试验。

3. 生产阶段

在这一阶段进行系统、子系统及它们的各组成部分的制造、装配和试验，最终使设计意图得以实现，成为真正可用的物质实体。这一阶段是完成系统的全部生产工程的阶段。

4. 使用阶段

这是设计目标最终得以达到的阶段。但问题不仅仅在于能使系统投入运行，还在于能使它在规定的时期内按要求正常地运行。为此，必须在系统的预期使用期内提供全面的综合后勤保障，包括提供备件、技术与维修服务、人员培训等。

根据所收集的系统实际使用信息，应在这个阶段对系统进行必要的修改与改进，以期更

好地发挥系统的效能。

当一个系统由于使用寿命的终止而不再继续运行时，它的寿命周期就终结了。对于应加以处置的系统，要从经济、社会和生态环境等多方面的因素出发进行综合考虑，提出适当的处置方法。对从该系统寿命周期内各发展阶段得到的经验，应加以分析、消化，使之能用于改进同样系统的再生产过程或将新系统的设计提到更高的水平。

应该说明，系统寿命周期内的各发展阶段不仅仅是单向的按顺序发展的进程，实际上在每个阶段之间以及各阶段内不同的工作任务间都存在着反馈过程。即为了尽可能完善地达到预期的目的，在系统发展过程中进行反复的工作迭代是不可避免的。

系统发展的各阶段间不是截然分开的，它们之间存在着一定的交叉和重叠。但同时各阶段间又有着明确的、不同深度和广度的工作内容，各阶段间的工作输入、输出关系是要十分清楚地予以确定的。为了保证系统发展工作的顺利进展、为了避免不必要的反复和浪费，在每个阶段的结尾，以至每个阶段中的重要中间小阶段的结尾，都必须提出完整的配套技术文件，还要对阶段工作结果进行严格的评审。只有通过了前一阶段的各种有关内容的评审，才能正式进入下一阶段的工作。由此也可以看出作好系统发展的工程管理工作是非常重要的。

1.3 系统的效能与寿命周期费用

1.3.1 系统的效能

功能简单的工具，如一把斧头，在相当长的时期内都可以随时拿来使用，而且一般都能起到应起的作用。但对现代复杂的大型系统而言，问题就不那么简单了。在运载火箭、飞机、指令与控制系统等的运行过程中，常会出现下述情况：

(1) 在需要某系统工作时，它不能如期开始工作；

(2) 虽然能如期开始工作，但由于达不到期望的工作水平或正常的工作持续时间过短，最终不能成功地完成规定的任务。

这说明对于复杂的系统，必须以更为综合性的指标去评价它们工作的好坏和判断该系统发展得成功与否。这个综合性的评价指标就是系统的效能。

系统的效能指的是当需要系统工作时，该系统能达到其任务目标的能力。为了充分发挥其效能，系统必须是随时可以使用的，即在任何随机时刻都能执行指定的任务；它还必须是能持续工作的，即能在规定的时期内保持应有的执行任务的能力。

系统效能的较为精确的定义是：系统在规定的条件下工作时，在规定的时间内成功地满足工作要求的概率。可见，系统效能的量化度量具有统计上的意义。

系统的设计、生产和使用过程都对系统的效能有明显的影响，因而设计人员、生产人员、使用与维修人员都对系统的效能有实质性的影响。这些影响都主要地反映在系统所具有的能力（性能）特性、可靠性特性和可用性特性上。

这里所说的“能力”，就是我们传统上所说的技术性能，比如对飞机而言就是飞行高度、速度和航程等。“可靠性”表征系统在规定的条件下，在规定的时间内，完成规定功能的能力；“可用性”则表示在某一随机时刻要求系统完成任务时，在任务开始时处于能工作状态的程 度，它是系统可靠性和维修性的综合表征。关于系统的可靠性、维修性和可用性正是本书后面各章、节中要论述的中心内容，此处不再详述。

系统效能的构成示于图1.1。

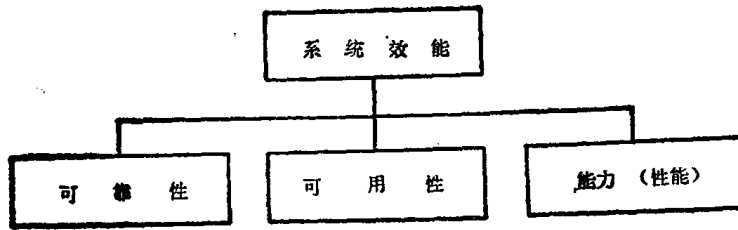


图 1.1 系统效能的构成

1.3.2 系统的寿命周期费用 (LCC—Life Cycle Cost)

系统的效能是评价系统是否合用的主要判据，是对系统所具有的能达到一系列规定的任务要求的能力的度量。求得高的系统效能，是发展新系统或改进已有系统时所做出的各种努力的结合点。

不用说，系统的能力是达到规定效能的基本条件。用来发射卫星的运载火箭，如果不能将一定量的有效载荷送入预定轨道，即使其他方面的特性再优越也是枉然。过去，人们为了使各种系统具备应有的能力，做了大量的工作，设计工作历来也是以达到预期的能力作为侧重点的。然而，这不是问题的全部，系统的可靠性以及由可靠性和维修性共同构成的可用性也是保证系统效能的同样重要的因素。

在系统发展的过程中，如何对能力、可靠性和可用性三者进行综合呢？一般而言，工程问题都是多解的，既可以这样综合，也可以那样综合，最后都可能达到同样的效能。这样就提出了另一个问题，即应以什么为依据，去判断出更为合理的综合方式呢？早在六十年代初期，就提出了以系统的寿命周期费用作为进行设计权衡的工具，同时也作为考虑系统使用方式的依据。

系统的寿命周期费用，是指在系统的整个寿命周期内，为获取并维持系统的运行所花费的总费用。它包括硬件和软件的研制费、生产费、后勤保障费以及在研制、采办、使用、技术保障和处置过程中所需的各种人员费用。

不同的系统，其寿命周期费用的构成不完全相同，各构成成份间的比例关系也不一样。图1.2给出了几种主要的费用构成因素，并在概念上表示出它们在寿命周期内的分布情况。

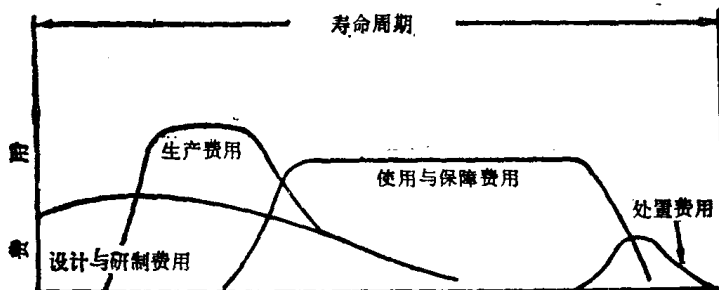


图 1.2 系统寿命周期内的费用构成分布

由图1.2可见，使用与保障费占了系统寿命周期费用中的很大一部分。如 据美国三种飞

机的统计，它们的使用和保障费平均占到飞机寿命周期费用的48%。

要估算出特定系统的寿命周期费用，需要对其寿命周期内各阶段所有可能的花费逐一加以确定。由于有大量的因素都影响到费用值，而明晰的经验数据又难于得到，所以，建立起具体的数学模型并进行费用估算是相当困难的事。需要在系统发展工作的管理上采取有力的保证措施，才有可能取得较可信的费用估算结果。图1.3举例说明了使系统达到一定的可用性所需费用的估算过程。

针对不同的对象，可以建立起多种费用估算模型，并采用相应的合适方法估算出有关的费用。费用估算的准确度是随着系统发展工作的深入而逐渐提高的，比如较好的费用估算模型的准确度在方案论证阶段初期可为15~20%，到方案论证阶段的后期可以提高到3~5%。

在方案论证阶段，可以利用某种费用模型先估算出某一个方案的费用，而对其他方案只估出它们相对的费用差别即可。当设计规范及有关大政方针已经确定，发展项目已进入审定和批准阶段时，就需要更为详尽的费用估算方法了，以便据此判定该发展项目寿命周期费用的合理性。

在设计与研制阶段的后期，由于可靠性、维修性和后勤保障特性已经过一定的验证，所以有关系统的使用与保障费用可以估计得更为准确，可以再次重新估计系统的寿命周期费用。

到了生产、供应、安装和使用阶段，由于已经可以进行实际费用的测定，所以可以进一步评估原先所估算的费用值的准确性，并且可以在必要时改进所用的费用估算模型和估算方法。

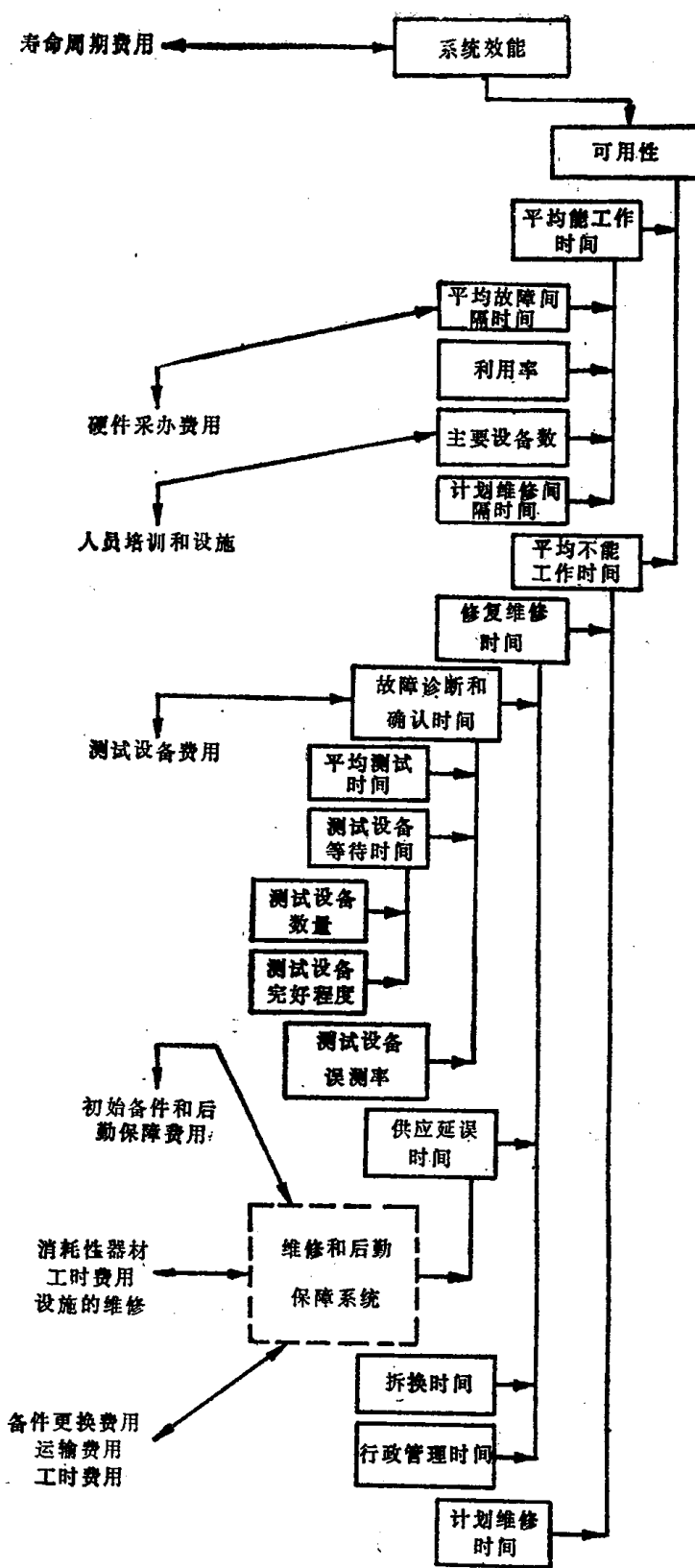


图 1.3 系统可用性费用的一般估算过程