



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

任占勇 著

数字化研制环境下的 可靠性工程技术

——基于产品数字样机的可靠性设计与分析

RELIABILITY ENGINEERING
TECHNOLOGY IN DIGITAL
DEVELOPMENT ENVIRONMENT
—RELIABILITY DESIGN ANALYSIS
BASED ON PRODUCT DIGITAL PROTOTYPE

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版

数字化研制环境下的 可靠性工程技术

——基于产品数字样机的可靠性设计与分析

任占勇 著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书主要介绍数字化研制环境下的电子产品可靠性设计分析原理和方法。全书共分7章,分别介绍数字化研制环境对可靠性设计分析工作的支撑和推动作用及可靠性设计分析的思路,电子产品的故障原理及基于数字样机的可靠性建模技术,基于数字样机的电子产品结构可靠性设计分析及优化技术,基于数字样机的电路功能可靠性设计分析及优化技术,基于数字样机的可靠性评价技术,基于数字样机的可靠性设计分析应用案例,以及数字化研制环境下可靠性设计分析技术的展望。

本书可供工程技术人员和可靠性研究人员参考,也可作为高等院校可靠性工程相关专业研究生的参考书籍。

图书在版编目(CIP)数据

数字化研制环境下的可靠性工程技术:基于产品数字样机的可靠性设计与分析/任占勇著. --北京:航空工业出版社,2015.8

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978-7-5165-0816-9

I. ①数… II. ①任… III. ①可靠性工程—研究

IV. ①TB114.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第154552号

数字化研制环境下的可靠性工程技术

——基于产品数字样机的可靠性设计与分析

Shuzihua Yanzhi Huanjing Xiade Kekaoxing Gongcheng Jishu

——Jiyu Chanpin Shuzi Yangji de Kekaoxing Sheji yu Fenxi

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年8月第1版

2015年8月第1次印刷

开本:787×1092 1/16

印张:29.25

字数:748千字

印数:1—2000

定价:148.00元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人员中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人员技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展作出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

A stylized, handwritten signature in black ink, reading '林右鸣' (Lin Youming).

中国航空工业集团公司董事长

前 言

可靠性是产品的重要质量特性之一。对武器装备而言，装备不可靠，再好的性能也发挥不出来，必然影响作战成败和作战人员的安全；而民用产品不可靠则直接影响产品品牌形象和企业营利能力，甚至直接决定企业的成败。可靠性作为产品的固有属性，是由设计决定并通过工艺生产加以保证的。通过可靠性设计分析可尽早发现设计缺陷和可靠性薄弱环节，并采取有效的改进措施，使产品的可靠性满足规定的指标要求。

目前的可靠性设计分析仍然存在与产品性能设计工作“两张皮”的老大难问题，应该说主要症结还在于现有的可靠性技术方法的工程适应性不强，外加基础故障数据的缺乏，造成在产品研制过程中对设计方案潜在薄弱环节的定位不具体或不全面，不得不等到研制后期具备物理样机后，依靠试验的方式来暴露产品设计缺陷并验证可靠性的达标情况。一旦产品可靠性不达标，必然会导致设计反复，造成时间、成本等方面的极大浪费。而且，随着用户需求的不断提高产品总体上向复杂化方向发展，可靠性要求的设计实现日益困难。因此，探讨新的更加有效的可靠性设计分析技术十分必要和迫切。

可靠性工程和其他专业学科一样，也是由科学技术的不断进步而推动发展的。例如，基础材料、元器件和工艺等技术和质量水平的不断提高为可靠性工程的发展奠定了坚实的物质基础；对故障规律认识的不断深化推动着可靠性理论和方法的持续创新；广泛应用的产品信息化和数字化设计手段为可靠性技术的研究和工程应用增效提供了全新的手段。尤其随着产品数字化设计技术近年来逐渐成熟，并在工业领域广泛应用，对产品并行设计和集成制造具有极大支撑作用。数字化设计和制造等先进技术手段的出现彻底改变了传统“试验—分析—改进”的串行研制模式，产品数字样机将逐渐取代研制过程中用于工程分析的实物模型或物理样机，已经成为工业界不可逆转的趋势。依托产品数字化研制环境的强大建模和仿真能力，为克服现有可靠性技术存在的缺陷、创新可靠性工程技术以及实现可靠性与产品性能的并行设计等，提供了极为重要的基础支撑条件。

本书作者一直在可靠性专业领域耕耘。近年来，随着工业领域向数字化设计模式的转型，也投入了很多精力在思考如何结合先进的数字化手段进一步促进可靠性工作。本书正是作者多年来研究和工程应用经验的一个阶段性总结，内容涵盖在产品数字化研制环境下，基于数字样机的可靠性设计分析的总体思路和框架、可靠性建模技术、可靠性设计分析及优化技术以及可靠性评价技术等。本书可供工程技术人员和可靠性研究人员参考，也可作为高等院校可靠性工程相关专业研究生的参考书籍。

全书共分7章。第1章介绍了产品数字化设计对可靠性的支撑和推动作用，以及数字化研制环境下可靠性设计与分析的思路。第2章介绍了电子产品的故障原理，以及基于数字样机的可靠性建模框架和技术途径。第3章介绍了基于数字样机的电子产品结构可靠性

设计分析技术，主要是采用广义应力损伤理论的故障机理建模分析及设计优化。第4章介绍了基于数字样机的电路功能可靠性设计分析及优化技术，主要是基于产品的电路功能模型，采用故障注入等途径实现故障的传递影响分析。第5章介绍了基于数字样机的可靠性评价技术。第6章给出了基于数字样机的可靠性设计分析应用案例。第7章是对数字化研制环境下可靠性设计分析技术的展望。

本书在成文过程中，李永红、武月琴、邵将、王如平、刘春志和张华等同志提供了很多非常有价值的素材和案例，王云、孔祥雷和卢风铭等进行了全文校阅，并提出了许多修改意见。在此一并致谢。由于作者学识有限，本书难免存在错误和缺陷，恳请读者批评指正。

作者
2015 年 3 月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 可靠性工程概述	(1)
1.2 产品数字化设计与可靠性	(9)
第 2 章 基于数字样机的可靠性设计分析技术原理	(33)
2.1 电子产品的故障行为及其影响因素分析	(34)
2.2 基于数字样机的可靠性建模方法	(44)
2.3 基于性能保持时间的可靠性参数探讨	(79)
第 3 章 基于产品数字样机的结构可靠性设计分析技术	(92)
3.1 概述	(92)
3.2 流程	(93)
3.3 技术特点	(94)
3.4 产品结构模型建模方法	(97)
3.5 产品热设计分析技术	(103)
3.6 产品抗振设计分析技术	(122)
3.7 电路板互连可靠性设计分析技术	(155)
3.8 集成电路可靠性设计分析技术	(177)
第 4 章 基于产品数字样机的功能可靠性设计分析技术	(198)
4.1 概述	(198)
4.2 流程	(199)
4.3 功能数字样机建模方法	(200)
4.4 电子产品容差设计与分析技术	(225)
4.5 电子产品降额设计与分析技术	(258)
4.6 电子产品故障定量影响分析技术	(277)
4.7 电子产品性能退化分析技术	(298)
第 5 章 基于产品数字样机的可靠性评价技术	(319)
5.1 概述	(319)
5.2 可靠性数据分析技术	(320)
5.3 故障模式的聚类分析	(333)

5.4 可靠性评价技术 (337)

5.5 案例分析 (344)

第 6 章 基于产品数字样机的可靠性设计分析应用案例 (360)

6.1 引言 (360)

6.2 基于结构数字样机的可靠性设计分析应用案例 (360)

6.3 基于功能（性能）数字样机的可靠性设计与分析 (400)

第 7 章 数字化环境下的可靠性设计分析技术展望 (445)

7.1 可靠性技术与 MBSE 技术的进一步集成与深入发展 (445)

7.2 基于数字样机的结构可靠性设计与分析技术 (446)

7.3 基于数字样机的功能可靠性设计与分析技术 (450)

参考文献 (454)

第1章 绪 论

1.1 可靠性工程概述

1.1.1 可靠性定义及内涵

可靠性工程是研究与产品故障作斗争的工程技术。它研究故障发生的机理与规律，以及故障预防的理论与方法，并运用这些机理与规律、理论与方法开展一系列相关的技术与管理工作。可靠性工程贯彻产品的全寿命周期，目的是确定和达到产品的可靠性要求。

(1) 可靠性定义

可靠性是产品在规定的条件下和规定的时间内完成规定功能的能力。这里的产品可以泛指任何系统、设备和元器件。可靠性反映了产品是否容易发生故障的特性，其定义中的要素是“三个”规定：“规定条件”“规定时间”及“规定功能”。

其中，“规定功能”是产品规定的必须具备的功能及技术指标。所要求产品功能的多少和其技术指标的高低，直接影响到产品可靠性指标的高低。例如，电风扇的主要功能有转叶、摇头、定时，规定的功能是三者都要，还是仅需要转叶，所对应的可靠性指标是大不一样的。因此，在分析评价产品的可靠性时，必须首先明确要求产品完成的规定功能是什么。只有规定了清晰的功能及其性能界面，才能给出明确的产品故障判据。

“规定条件”包括使用时的环境条件和工作条件。如温度、湿度、振动、冲击、辐射等环境条件，使用时的应力条件，维护方法，储存时的储存条件，使用时对操作人员的技术等级要求等。在不同的规定条件下产品的可靠性表现是不同的。例如，同一型号的汽车在高速公路和崎岖山路上行驶其可靠性的表现就差异很大。因此，要谈论产品的可靠性必须指明规定的条件是什么。

“规定时间”是指产品规定的任务时间。随着产品任务时间的增加，产品出现故障的概率将增加，导致产品的可靠性将呈下降趋势。因此，谈论产品的可靠性离不开规定的任务时间。不同类型的产品对应的时间单位可能不同。例如，火箭发射装置，其可靠性对应的时间以秒计，海底通信电缆则以年计。此外，时间单位不仅可以是年、月、时、分、秒，也可以是工作次数（如继电器）、循环次数（如发动机）、行驶里程（如车辆）等。

要确定产品规定的环境条件和规定的任务时间，必须对产品的寿命剖面和任务剖面进行分析研究。

(2) 故障相关术语

故障：指产品不能或将不能完成规定功能的事件或状态（因预防维修或其他计划性活动或缺乏外部资源造成不能执行规定功能的情况除外）。

失效：指产品丧失完成规定功能的能力的事件。实际应用中，特别是对硬件产品而

言，故障与失效很难区分，故一般统称故障。

故障机理：指引起故障的物理的、化学的、生物的或其他的过程。

故障模式：故障的表现形式，如短路、开路、断裂、过度耗损等。

故障原因：引起故障的设计、制造、使用和维修等有关因素。

故障影响：故障模式对产品的使用、功能或状态所导致的结果。

故障判据：判断是否属于故障的依据，也称故障判断准则。

(3) 可靠性相关术语

基本可靠性：产品在规定的条件下，规定的时间内，无故障工作的能力。基本可靠性反映产品对维修资源的要求。确定基本可靠性值时，应统计产品的所有寿命单位和所有的关联故障。

任务可靠性：产品在规定的任务剖面内完成规定功能的能力。

固有可靠性：设计和制造赋予产品的，并在理想的使用和保障条件下所具有的可靠性。

使用可靠性：产品在实际的环境中使用时所呈现的可靠性，它反映产品设计、制造、使用、维修、环境等因素的综合影响。

耐久性：产品在规定的使用、储存与维修条件下，达到极限状态之前，完成规定功能的能力，一般用寿命度量。极限状态是指由于耗损（如疲劳、磨损、腐蚀、变质等）使产品从技术上或从经济上考虑，都不宜再继续使用而必须大修或报废的状态。

寿命周期：装备从立项论证到退役报废所经历的整个时间。它通常包括论证、方案、工程研制与定型、生产、使用与保障以及退役等阶段。

(4) 寿命剖面与任务剖面

寿命剖面：产品从交付到寿命终结或退出使用这段时间内所经历的全部事件和环境的时序描述。它可能包括一个或多个任务剖面。寿命剖面说明了产品在整个寿命周期经历的事件（如装卸、运输、储存、检测、维修、部署、执行任务等）以及每个事件的顺序、持续时间、环境和工作方式。通常把产品的寿命剖面分为后勤和使用两个阶段。

任务剖面：产品在完成规定任务这段时间内所经历的事件和环境的时序描述。它包括任务成功或严重故障的判断规则。对于完成一种或多种任务的产品都应制定一种或多种任务剖面。任务剖面一般应包括：产品的工作状态；任务期间可修产品的维修方案；产品工作时间；产品所处环境的时间与顺序；任务成功或严重故障的定义等。

1.1.2 可靠性的重要地位和作用

企业的宗旨是向顾客提供满意的产品或服务从而实现盈利。顾客的满意最重要的条件之一就是高质量，而高质量的前提是必须高可靠。世界著名的质量管理大师朱兰博士早就指出，我们都是在质量大坝下生活。尤其在科学技术日益发达的今天，这句名言愈发深刻。试想人们早上醒来，打开电灯，乘坐电梯，出行使用交通工具，办公室打开电脑，联系工作使用电话等，人们充分享受着现代文明带来的便利。这些产品若故障频发，可靠性差，那么我们就不是享受而是受罪了。而且，顾客不满意不但不再购买该产品，并可能影响到周围的潜在顾客。如果产品是武器装备，产品的不可靠在平时训练和作战中造成的后果是难以想象的，必然直接关系到战斗人员的生命安全和战争的胜负。

产品的可靠性跟产品的预期使用方式、使用环境以及更新换代等因素均相关。旧的隐患问题解决了，一旦条件发生变化，必然会产生新的隐患。所谓旧的矛盾解决了新的矛盾又产生一样，可靠性的改进和提升也是遵循持续改进的原则，因此对一个组织来说，追求产品的高质量和高可靠是一个永恒的主题。

结合我国当前的产品可靠性现状，可以从以下几个方面理解开展可靠性工作的重要性和紧迫性。

①武器装备的可靠性是发挥装备作战效能的关键，而民用产品的可靠性是用户满意的关键。武器装备在作战使用中必须发挥最大效能，而效能是武器装备可靠性、可用性和性能的综合反映。如果装备不可靠，再好的性能也不可能发挥，必然影响作战成败和作战人员的安全。民用产品不可靠的严重后果则更加不言而喻。

②产品可靠性是影响企业营利的关键。产品可靠性不高，不但影响市场占有率，而且使产品卖售后服务成本也居高不下，从而影响到产品的美誉度和品牌形象，何谈长期稳定的高盈利能力？据某企业介绍，以企业5年保有量为500万台产品计算，每年维修率每增加一个百分点将直接带来200万元的维修服务成本。因此，民用产品一直以追求高可靠性为目标，产品“零缺陷”的质量理念就发端于民用产品的生产企业。

③产品可靠性是影响企业创建品牌的关键。近年以来，我国企业逐渐认识到品牌的重要性，客户买品牌、用名牌已经是当今的消费时尚。很多有所作为的企业开始实施品牌战略，投入了大量资金、人力和物力来塑造自身的品牌形象。就品牌的实质内涵而言，产品的性能还只是顾客考虑的一方面因素，而后期的维护则是顾客选择继续购买与否的决定因素，其中产品的好用和耐用直接决定了品牌形象能否树立成功。改革开放30多年来，很多我们耳熟能详的品牌在激烈的市场竞争中失去了踪影，相当一部分是产品的质量拖累了产品形象，导致最终被逐出市场。

④可靠性是实现我国由制造大国向制造强国转型的必由之路。所谓制造大国，是我国工业起步阶段在利用低廉劳动力成本和材料成本基础上，大量承接来料加工和代工生产，大多没有自主知识产权。利润的绝大部分被委托加工方赚取，我们产值规模看起来很高，但利润非常有限；而制造强国的特征则是拥有自主知识产权的产品独立设计和开发。其中最重要的特征是创新性，产品灵活满足顾客多样化需求。其中，对自主研发的产品来说，其安全性和可靠性是特别需要关注的一个方面，否则功亏一篑。

1.1.3 可靠性工程的发展历程

从历史的观点看，只要是产品，就存在可靠工作和不可靠工作的问题。日本一位著名质量专家曾风趣地说过，早在石器时代，当人们把石斧做好后套在木柄上，就会模拟使用方式检查其是否套得牢固，这实质上就是最原始的可靠性试验。因此从这个意义上讲，产品可靠性的历史非常悠久。但是可靠性作为一门专门学科却只有50多年的历史，是一门较为年轻的富有生命力的学科，并日益受到人们的广泛关注与重视。

现代意义的可靠性工程起源于第二次世界大战。日本的齐藤善三郎在《漫谈可靠性》一书中有一段简要的说明。

在第二次世界大战正处于高潮时期，美国在南方布置了很多远东战略军用飞机，最初，近半数飞机都难以飞行，经过多次检查才搞清楚，原来是电子管发生了故障。用到的

电子管半数以上发生了故障，无法继续使用，而这种电子管恰好是安装在飞机的重要部件上。

这对美国政府来说是很严重的问题，随后他们采取了紧急措施。从生产开始，严格按照图样要求，加强了对制造过程的控制，终于制造出与图样要求符合性较好的电子管。这些电子管发往远东并安装后，仍然不断地发生故障，尝试了多次，其结果都差不多。

为什么在工厂里检查合格的电子管，一使用就故障频频呢？这使人们联想到，是否还有一种超越制造技术或检查能力的其他“因素”在起作用。

这种“因素”又是什么呢？它是防止电子管发生故障的一种特性，人们把这种特性称为“可靠性”。只有在设计图样时就考虑它，再按照图样生产，才能制造合格的产品。后来经过实践证明，这种可靠性很好的电子管，在使用时就很少发生故障。因此，电子管的故障问题催生了可靠性工程的萌芽。

自此，美国军方开始有计划、有组织地开展可靠性研究。美军 1952 年成立了“军用电子设备可靠性咨询组”，制订可靠性研究与发展计划。1957 年发布的“军用电子设备可靠性”报告，提出了武器装备可靠性设计分析与试验评价的方法与程序，成为可靠性奠基性文件，标志了可靠性工程成为一门独立的学科。20 世纪 50 年代开始研制的 F-4、F-104 等第二代战斗机，几乎没有开展有计划的可靠性工作，主要靠传统的工程设计方法和质量控制技术来获得可靠性，其可靠性水平低，战备完好性和出勤率低，维修和保障费用高。

20 世纪 60 年代可靠性工程得到全面和迅速发展，并逐步进入工程应用。美军在侵越战争中，F-4、F-104 和 F-105 等没有开展可靠性工作的第二代战斗机的任务可靠度仅有 0.5，平均每一架飞机每天出动 1 架次。因此，美军在“军用电子设备可靠性”报告的基础上，经过几年的研究与应用，制定和发布了 MIL-STD-785《系统与设备的可靠性大纲要求》等一系列可靠性军用标准，并在 F-14A、F-15A 战斗机和 M1 坦克等第三代装备研制中得到应用。针对这些装备开始规定了可靠性要求，制定了可靠性大纲，开展了可靠性分析、设计和可靠性鉴定试验。使这些装备的可靠性和战备完好性水平显著提高，维修和保障费用有所降低。

20 世纪 70 年代，第三代装备在使用中故障多、可靠性低，可靠性问题引起美军高层领导的重视。为加强武器装备的可靠性管理，美国国防部建立了统一的管理机构，成立直属三军联合后勤司令部领导的可靠性、可用性与维修性联合技术协调组，建立全国统一的数据交换网——政府与工业界数据交换网（Government Industry Data Exchange Program, GIDEP）。20 世纪 70 年代后期，在武器装备研制中，开始重视采用可靠性研制与增长试验、环境应力筛选和综合环境试验，并颁发相应的标准。此外，机械产品的可靠性问题、软件可靠性问题等引起了人们的注意。

20 世纪 80 年代可靠性工程得到深入发展。第四次中东战争中，以色列军队依靠具有良好抢修性的武器装备和具有高的战伤抢修水平的部队，扭转战局，取得最后胜利，从实战中表明，可靠性、维修性、保障性是武器装备战斗力的“倍增器”。1980 年，美国国防部颁发了第一个可靠性和维修性（Reliability and Maintainability, R&M）条例 DoDD 5000.40《可靠性和维修性》，规定了国防部武器装备采办的 R&M 政策和各个部门的职责，并强调从武器装备研制开始就应开展 R&M 工作。在武器装备研制和改进改型中，广

泛采用可靠性计算机辅助设计 (Computer Aided Design, CAD) 技术、可靠性研制与增长试验、环境应力筛选, 大大提高了装备的可靠性水平。1986 年美国空军颁发了《R&M 2000》行动计划, 从管理入手, 推动 R&M 技术的发展, 使 R&M 的管理走向制度化, 使 R&M 成为航空武器装备战斗力的组成部分。

20 世纪 90 年代以后, 海湾战争等多次高技术局部战争的经验教训进一步表明可靠性、维修性、保障性在现代高技术局部战争中的作用。在可靠性工程领域内, 重视高加速寿命试验 (Highly Accelerated Life Test, HALT)、高加速应力筛选 (Highly Accelerated Stress Screen, HASS)、失效物理分析、故障模式及影响分析 (Failure Mode Effects Analysis, FMEA)、故障预测与状态监控等实用性技术的研究和应用。在装备的研制中, 强调经济承受性, 在 F-35、LDP-17 等新一代装备的研制中, 都把可靠性、维修性、保障性作为降低全寿命费用的重要工具, 推行费用作为独立变量的方针, 重视可靠性综合化、自动化、智能化和军民两用化, 广泛采用建模与仿真技术、虚拟现实技术、网络技术、人工智能技术、微观分析技术和可靠性强化试验技术, 确保新一代装备的可靠性、维修性、保障性水平得到全面提高, 大大降低装备的研制费用、维修和保障费用以及全寿命费用。

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 20 世纪 60 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, 组织制定了一系列关于可靠性与维修性的基础规定和标准。1985 年 10 月国防科工委颁发的《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 GJB 368—1987《装备维修性通用规范》和 GJB 450—1988《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, 我国的可靠性工程与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, 必须从设计的开始就要加以考虑。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。

现代可靠性工程与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与维修性工程在我国的深入发展, 使之提高到新的水平。

总结近几十年来可靠性的发展历程, 大致经历了如下的重大变化和发展:

①从重视武器装备的性能、忽略可靠性，转变为树立可靠性与性能、费用及进度同等重要的观念，实现了理念的转变。例如，现代的武器装备研发必须提出相应的可靠性指标，并进行严格的论证、设计和验证考核。民用产品也普遍开展了可靠性设计与试验工作，例如，很多企业要求产品研发过程需要开展 FMEA、可靠性强化试验以及环境应力筛选等工作。

②从狭义的可靠性发展到维修性、测试性、保障性以及环境适应性等大的产品可靠性概念。

③从自发的可靠性保证到从管理上统一组织，系统管理的可靠性工作方式，实现了体系的完善。例如，我国的武器装备研发对可靠性、维修性和保障性等通用特性要求建立专门的工作系统，统一领导。

④从电子设备的可靠性研究发展到重视机械设备、光电设备、软件等其他产品的可靠性研究与应用，全面提升产品的可靠性水平。

⑤可靠性理论方面，从故障宏观统计推断的可靠性发展到微观的故障物理可靠性，从故障的外在表现和内在机理等多维角度全面分析产品的故障行为规律，提升产品可靠性水平。

⑥可靠性工具手段方面，从定性的分析或手工的简单计算到计算机辅助的可靠性设计分析，实现故障分析的精细化和定量化。当今信息化条件下，可靠性设计分析与产品性能设计日益朝向一体化融合方向发展。

⑦可靠性试验方面，从重视可靠性统计试验到强调可靠性工程试验，通过环境应力筛选、可靠性强化试验以及高加速应力试验等，确保产品的健壮性和高可靠性。

1.1.4 科技进步对可靠性工程技术的推动作用

可靠性工程技术的不断发展是在需求牵引下，由于科学技术的不断进步而推动发展的。具体地说，可靠性学科的不断发展和进步建立在故障基础理论、基础材料以及信息化等基础学科的技术发展之上。

首先，对故障认识的不断加深推动可靠性理论和方法的创新。可靠性工程是跟产品故障作斗争的学科。随着对故障认识的不断加深，可靠性的理论和方法也在不断充实。我们对产品故障的早期认识是故障的外在的宏观统计规律性，于是采用数理统计的理论和方法发展出一套成体系的可靠性工程技术，对可靠性的设计与分析、试验与评价等工作起到了较大的支撑作用。随着发展，人们对故障的认识从外在深入到本质，意识到掌控故障的内外原因是故障机理，而故障机理又与产品的设计参数和环境条件等影响因素相关。因此，在失效物理学基础上发展出基于故障物理的可靠性技术，摒弃了随机故障无法避免的旧观念，要求在弄清楚产品将会怎样发生故障、何时发生故障并实现对产品的故障进行预测的前提下，制订相应设计、维修和保障措施，从而设计出在其任务周期不存在随机故障的产品。

其次，基础材料、元器件和工艺等技术的不断进步促进了可靠性工程的发展。产品可靠性的不断提升得益于材料、零部件和元器件以及工艺等基础科学的不断进步，这为提升产品可靠性奠定了坚实的物质基础。例如，轻质强度合金材料的出现，使得飞机在减重的同时耐久性和可靠性得以快速提高；集成电路的快速发展一方面不但体积大幅缩小，而且

可靠性也快速提高；表面离子处理工艺技术的出现使得原有结构材料的强度、耐腐蚀的能力提高等。还有，伴随基础材料的研究，对其故障机理的研究手段不断完善，现有的材料在不同应用条件下的故障机理早在投入应用以前已经掌握，并可以基于仿真模型进行定量化的分析，进而通过设计进行预防或采取故障规避措施。

再有，产品的信息化和数字化设计手段为可靠性技术的研究和工程应用提供了新的技术手段。现代高技术武器装备在战争中的地位和作用越来越突出，其结构越来越复杂、造价越来越高、工作环境越来越特殊，因而世界各国军事工业企业积极引进先进技术和管理工作。在计算机技术、网络通信技术、数字化仿真技术等相关技术的支持下，欧美等西方发达国家对装备研制全过程进行数字化描述，在数字化平台上建立数字化产品模型，开展设计仿真与优化，进行数字化预装配，开展数字化制造等工作，实现装备研制全过程的数字化，缩短了研发周期，减少了设计更改，节省了设计费用，提高了装备的质量、可靠性和性能稳定性。我国随着国家信息化带动工业化战略的实施以及军工数字化建设，通过推进数字化设计和计算机集成制造系统（Computer Integrated Manufacturing Systems, CIMS）工程、并行工程、制造业信息化工程等，数字化设计制造的研究和应用进入了一个新的阶段。三维数字化设计、三维数字样机、数字化仿真试验、加工过程模拟与仿真、产品数据管理等技术得到了较为普遍的应用，取得了显著成效。其为可靠性工程技术创新和集成创新提供了条件。

本书主要围绕数字化设计环境为可靠性工程技术创新及应用增效提供的基础性支撑作用展开论述。依托数字化环境下的强大的数字建模和仿真能力，为可靠性工程技术的发展创新提供的保障作用主要体现在以下几个方面：

一是可以最大限度地克服现有的系统可靠性工程技术存在的固有缺陷。现有的可靠性工程技术，限于当时的认知和工程手段，对产品设计方案以及故障规律进行了很多假设和简化，仅基于故障的统计规律性和故障逻辑关系，对产品的故障发生及其传播影响规律涵盖不全。例如，可靠性建模仅考虑了产品组成部分之间的故障逻辑组合关系对产品的影响，而对产品各组成部分由于参数漂移和性能偏差的综合累积误差的全局故障以及系统接口故障等问题则无法模拟，而这类问题随着产品结构和功能关系日益复杂将更加凸显，对产品可靠性尤其高可靠性指标的实现带来隐患。既然可靠性建模是从产品的功能关系转化而得的故障逻辑关系，数字化设计模式下完全可以依托产品的数字化模型通过故障注入等仿真分析的方式实现对故障影响的定性和定量分析，而不要考虑为了解析的方便而简化为故障逻辑模型。

二是为创新可靠性工程技术并进行工程推广应用提供了条件。现有的系统可靠性工程技术，主要以故障的统计规律性为基础开展工作，是一种事后反馈的方式，本质上不能实现故障的预防。可靠性设计分析的另外一条有效的途径是通过可靠性的内外因分析，从广义应力损伤角度进行故障的分析和预防，即所谓故障物理的可靠性设计分析思路。应该说故障物理专业已经发展了多年，积累了大量的工程数据和基础模型，但可靠性工作没有从故障物理的途径开展工作，很大程度上是因为这项工作涉及复杂的应力计算和应力损伤计算分析，没有现在的数字建模与仿真工具为依托，定量开展这项工作几乎是不可能的。

三是为可靠性与产品性能的并行设计提供了可能。可靠性与产品性能一体化设计工作

包括组织形式、设计流程、数据流程、控制流程、监控流程等方面的一体化，从而确保可靠性的设计要求及时、准确地反馈到产品的设计改进过程中。建立在数字化设计环境下的基于单一数据源的产品数字定义为开展一体化工作提供了必要的手段，例如，跨部门的集成产品开发团队（Integrated Product Team, IPT）的及时沟通、可靠性工作流程与产品设计流程的内嵌、信息流的闭环反馈等都需要数字化环境进行支撑。

在以上推动可靠性工程发展的各项技术中，数字化设计技术是核心驱动力。目前可靠性技术研究的热点，如宏观层面复杂网络系统可靠性建模及装备产品微观层面的故障机理研究等，都涉及复杂模型的建立及解析计算，主要是从计算机数字建模与仿真手段开展研究的；

①复杂网络系统建模。随着信息化作战成为未来战争的主要作战样式，装备体系的可靠性、维修性、保障性以及综合保障的研究已经成为当前研究领域的热点和难点。装备体系表现出的复杂网络特性是新一代可靠性、维修性、保障性技术重点关注及需要解决的重大基础性和现实性问题。复杂网络系统的建模、仿真及其计算等都建立在数字化建模仿真能力的基础上，传统手工方式已经无法支撑可靠性工程的设计及优化工作。

②微观故障机理分析。随着科学技术快速发展，各种微型装备、微型部件和组件的发展，给可靠性工程提出新的挑战，各种新的失效模式、失效机理和故障模型将会出现，采用传统的可靠性方法将不可能完全有效地解决新问题。因此，微观化的可靠性分析技术即以失效机理为基础的可靠性预计技术引起了美英各国的重视。近年来，美国山地亚国家实验室提出了以失效物理为基础的可靠性工程方法，称之为以科学为基础的可靠性工程方法，已用于该实验室的微型机械研制中，被称为是 21 世纪的可靠性工程方法。故障机理的建模分析涉及大量工程的复杂仿真计算，必须基于 CAD/CAE 等集成的工作平台才能形成工程应用能力。

很多文献中经常谈到可靠性技术的发展特点如自动化、实用化、智能化及仿真化等，其背后也无不反映了数字化和信息化技术的推动作用；

①自动化。自动化是可靠性技术发展的一个重要趋势。随着 CAD 和计算机辅助工程分析（Computer Aided Engineering, CAE）技术日益广泛应用，可靠性设计与分析自动化会改善 21 世纪武器装备可靠性设计和分析的质量，缩短研制周期，提高可靠性水平；故障检测与诊断自动化以及维修与后勤保障的自动化将会大大改善装备的保障能力，缩短保障时间，提高新一代武器装备的战备完好性，大大降低装备的维修和保障费用；可靠性管理、信息收集和处理的自动化将大大提高装备的可靠性水平。

②实用化。在美国，为了维持一支“老龄化”的装备，其维修费用、备件费用将会显著增加，可靠性新技术的应用也会受费用的制约。在下一代的武器装备发展中，如故障模式、影响和危害性分析（Failure Mode Effects and Criticality Analysis, FMECA）、故障报告、分析及纠正措施系统（Failure Report Analysis and Corrective Action System, FRACAS）、故障树分析（Fault Tree Analysis, FTA）、机内测试（Built-in Test, BIT）技术、健壮设计技术等一批经济有效的实用可靠性技术，将会得到更广泛的应用和进一步发展，新的实用化的可靠性技术也将出现。这些可靠性工程技术工具的实用化效果更多是因为数字化应用环境提供的便利，例如，FMEA 从原来靠经验填写表格的方式改为基于产品的数字模型进行故障注入考察其影响的方式，可以克服传统分析太过依靠分析人员的经验、只能进行单