

徐明 编著

基于故障物理的 电子产品可靠性

JIYU GUZHANG WULI DE
DIANZI CHANPIN KEKAOXING

航空工业出版社

基于故障物理的 电子产品可靠性

徐 明 编著

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

基于故障物理的可靠性技术作为一种新兴的可靠性工程技术,历经十余年的发展,基本形成了相应的技术体系,一些研究成果已经在工程中推广应用。本书汇集了作者近年来在基于故障物理的可靠性基础理论、基础模型和工程技术等方面的研究成果和工程应用的经验总结。

全书共分7章,主要包括基于故障物理的可靠性技术概述、基于故障物理的可靠性理论与方法、可靠性设计技术、可靠性分析技术、可靠性试验技术、基于故障物理的可靠性技术的应用和基于故障物理的可靠性技术的发展前景。

本书可作为电子产品的设计人员、可靠性工程专业技术人员的参考资料,同时对产品可靠性工作有关的管理人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

基于故障物理的电子产品可靠性 / 徐明编著. -- 北京:航空工业出版社, 2015. 6

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0399 - 7

I. ①基… II. ①徐… III. ①电子产品可靠性 IV. ①F407. 63

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第298201号

基于故障物理的电子产品可靠性

Jiyu Guzhang Wuli de Dianzi Chanpin Kekaoxing

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

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年6月第1版

2015年6月第1次印刷

开本: 787 × 1092 1/16

印张: 11.5

字数: 292千字

印数: 1—2000

定价: 45.00元

前 言

随着科学技术的飞速进步和人类社会的不断发展，产品的功能特性和可靠性水平也越来越高。然而，产品的复杂程度和新技术的应用量持续增加，对于武器装备来说，可靠性对于装备的作战能力、生存力、部署机动性、维修成本和使用保障费用将产生越来越重要的影响，对于工业产品来说，可靠性在很大程度上对产品的使用特性、维修成本乃至产品的市场竞争力等具有重要作用。可靠性作为重要设计特性之一，已经受到了全社会的广泛关注。

可靠性是一门研究产品在全寿命过程中与故障做斗争的学科，是多学科交叉又相互渗透的边缘学科，系统科学、概率统计学和故障物理（Physics of Failure, PoF）学构成了可靠性工程的基础。近年来，故障物理学备受关注，已逐步深入到材料学、力学、电子学、化学及物理学等多个学科。基于故障物理的可靠性从故障原因和故障机理出发研究产品的故障规律，运用这些机理和规律来进行故障预计、预防、预测、诊断和修复，进而指导可靠性设计、分析、验证等相关活动的开展，在产品的研制中发挥着越来越重要的作用。在国外，20 世纪 80 年代美国空军的航空电子完整性大纲首次提出了基于故障物理的可靠性，我国从 2004 年左右开始引入基于故障物理的可靠性技术，并进行了广泛而深入的理论与方法研究，取得了一系列进展，主要表现在：研究了电子产品的故障物理理论与常见应力损伤模型；提出了基于故障物理的可靠性仿真分析方法；发展了基于故障物理的可靠性试验验证与评估方法；逐渐形成了由基础理论、基础技术和应用技术三个层次组成的基于故障物理的可靠性技术框架。可以说，基于故障物理的可靠性在国内经过了十余年的发展，已经开始在现代武器装备等大型工程研制中全面推行，走上了规范化的发展道路。

与此同时，我们应当看到，在我国工程型号研制的可靠性工作中，基于故障物理的可靠性技术应用还不够深入，型号设计人员对这种新技术的认识还存在不足；在工业领域，基于故障物理的可靠性技术的应用才刚刚开始，很多工厂企业还未认识到这一新技术对产品设计所带来的巨大变革与作用。在国内可靠性领域，缺少一本合适的工具书介绍基于故障物理可靠性的相关知识。本书编写的目的是通过总结我们在这一领域十多年的研究成果，梳理基于故障物理的可靠性技术体系中的新模型、新方法、新技术，介绍这些技术在工程中的宝贵经验，为产品设计的技术和管理人员提供一本较为完整、理论性强、工程实用性好的可靠性技术工具书，以期提高产品设计人员解决可靠性问题的能力。

本书共分 7 章，各章节主要内容如下：

第 1 章 基于故障物理的可靠性技术概述。介绍基于故障物理的可靠性技术的发展历程、故障的发生原理以及电子产品基于故障物理的可靠性技术构架。

第 2 章 基于故障物理的可靠性理论与方法。介绍故障物理学、应力损伤理论与模型、产品功能模型、失效分析方法等基础理论与方法。

第 3 章 可靠性设计技术。从热设计、抗机械应力设计、静电放电设计、防腐蚀设

计、抗辐射设计等不同角度介绍产品的可靠性设计原则与基本方法。

第4章 可靠性分析技术。从产品故障产生的过程出发介绍产品的损伤分析技术和故障分析技术。

第5章 可靠性试验技术。从产品的故障机理出发介绍基于故障物理的可靠性试验验证技术。

第6章 基于故障物理的可靠性技术的应用。介绍基于故障物理的可靠性技术在产品设计分析以及产品试验工作中的应用。

第7章 基于故障物理的可靠性技术的发展前景。从理论与方法的发展、基础模型数据的建设、工程应用技术平台开发三个方面阐述了基于故障物理的可靠性技术今后的发展方向。

全书由徐明主编，李永红、邵将、卢风铭、刘春志、路浩天、任超、孙瑞锋、杜鑫、王如平参与了各章节的编写工作，邵将、卢风铭参与了全书校对工作。本书可供电子产品的设计管理人员、可靠性工程专业技术人员等学习和参考。与产品可靠性工作有关的管理人员可参考使用，大专院校的本科生和研究生也可参考使用。由于水平有限，书中的某些观点和见解还不十分成熟，错误之处在所难免，请读者指正。

徐 明
2015 年 2 月

目 录

第1章 基于故障物理的可靠性技术概述	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 电子产品故障的发生原理	(2)
1.3 电子产品基于故障物理的可靠性技术构架	(3)
第2章 基于故障物理的可靠性理论与方法	(5)
2.1 故障物理学	(5)
2.1.1 故障物理学发展历程	(5)
2.1.2 故障物理技术	(9)
2.1.3 故障物理学主要研究内容	(10)
2.2 应力损伤理论与应力损伤模型	(11)
2.2.1 机械应力故障	(13)
2.2.2 热应力故障	(17)
2.2.3 电子应力故障	(18)
2.2.4 化学应力故障	(21)
2.2.5 辐射应力故障	(23)
2.3 产品功能模型	(24)
2.3.1 电路设计信息收集	(24)
2.3.2 功能可靠性建模方法	(25)
2.3.3 系统模型集成	(30)
2.4 失效分析方法	(30)
2.4.1 失效分析技术概述	(30)
2.4.2 非破坏性失效分析方法	(32)
2.4.3 显微分析技术	(36)
2.4.4 破坏性失效分析方法	(38)
2.4.5 失效分析案例	(40)
第3章 可靠性设计技术	(47)
3.1 热设计	(47)
3.1.1 热设计的一般过程	(47)
3.1.2 热交换途径和热环境影响因素	(47)
3.1.3 常用的冷却方法及选择	(49)
3.1.4 元器件的热设计	(49)
3.1.5 元器件的布局与安装	(52)
3.1.6 印制电路板的热设计	(52)
3.1.7 机箱的热设计	(53)

3.1.8 其他形式温度应力的热设计	(53)
3.2 抗振动应力设计	(54)
3.2.1 振动设计原则	(54)
3.2.2 振动设计方法	(54)
3.2.3 振动环境适应性设计策略	(61)
3.3 静电放电设计	(65)
3.3.1 静电放电原理	(65)
3.3.2 静电放电失效类型	(65)
3.3.3 静电放电预防措施	(66)
3.4 防腐蚀设计	(66)
3.4.1 金属化学腐蚀和电化学腐蚀	(66)
3.4.2 军用飞机电子设备腐蚀的环境条件	(67)
3.4.3 电子设备腐蚀的控制与防护	(69)
3.5 抗辐射设计	(73)
3.5.1 基本概念	(73)
3.5.2 抗辐射加固过程	(74)
3.5.3 抗辐射加固考虑的因素	(76)
第4章 可靠性分析技术	(81)
4.1 产品损伤分析技术	(81)
4.1.1 概念	(81)
4.1.2 流程	(81)
4.1.3 主失效机理确定	(82)
4.1.4 应力分析	(82)
4.1.5 应力损伤分析	(83)
4.1.6 案例	(84)
4.2 产品故障分析技术	(89)
4.2.1 产品故障特点	(89)
4.2.2 产品故障分类	(90)
4.2.3 产品故障建模	(90)
4.2.4 产品故障影响分析	(94)
第5章 可靠性试验技术	(96)
5.1 基于故障物理的可靠性试验的概念和内涵	(96)
5.1.1 目的	(96)
5.1.2 基本内容	(96)
5.1.3 基本假设与前提条件	(99)
5.1.4 作用与意义	(102)
5.1.5 适用范围	(103)
5.2 基于故障物理的可靠性验证试验与传统可靠性试验的差异	(104)
5.2.1 故障认识的差异	(104)

5.2.2 试验原理的差异	(105)
5.2.3 试验方法的差异	(105)
5.2.4 试验对象的差异	(105)
5.2.5 指标体系的差异	(106)
5.2.6 评估方法的差异	(108)
5.3 产品可靠性模型验证与评价技术	(108)
5.3.1 产品热振电响应特性试验验证技术	(108)
5.3.2 产品应力损伤分析模型试验验证技术	(113)
5.3.3 产品可靠性模型评价技术	(119)
第6章 基于故障物理的可靠性技术的应用	(125)
6.1 基于故障物理的可靠性技术在产品设计分析工作中的应用	(125)
6.1.1 可靠性仿真分析	(125)
6.1.2 电路功能可靠性仿真分析	(130)
6.2 基于故障物理的可靠性技术在产品试验工作中的应用	(148)
6.2.1 可靠性强化试验	(148)
6.2.2 可靠性加速试验	(155)
第7章 基于故障物理的可靠性技术的发展前景	(163)
7.1 理论与方法的发展	(163)
7.2 可靠性基础模型数据的建设	(163)
7.2.1 应力损伤模型的发展	(164)
7.2.2 应力损伤模型图谱与后续研究方向	(164)
7.3 工程应用技术平台的开发	(166)
7.3.1 工程应用技术平台概述	(166)
7.3.2 发展趋势及关键技术	(166)
7.3.3 典型工程应用平台示例	(168)
参考文献	(172)

第1章 基于故障物理的可靠性技术概述

1.1 引言

基于故障物理的可靠性技术 (Physics of Failure Based Reliability), 是以故障物理学为基础, 进行主动的可靠性 (故障) 设计分析的技术。它基于产品的预期使用环境历程 (热、振动和电应力历程等) 及产品设计 (功能拓扑结构、物理结构、元器件和材料等) 研究产品的主要故障机理 (故障机理类型及其发生时间), 以及这些主要故障机理对产品可靠性 (故障) 传递影响的规律, 采用应力设计的方式在产品有效使用期内应采用故障预防的理论和方法, 进行故障机理的消除或规避等故障预防的理论和方法, 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活动, 以保证产品可靠性要求的实现。

基于故障物理 (PoF) 的可靠性技术在产品上的应用背景最早可追溯到 20 世纪 70 年代末 80 年代初, 随着美国空军装备可靠性与维修性 (R&M) 要求的大幅提升, 电子产品可靠性设计分析方法不足以有效支撑航空装备 R&M 要求的实现。过去认为, 可靠性工作在故障随机性发生的假设下, 电子产品故障的发生是必然的、不可避免的, 甚至是可接受的, 因此满足于将故障率控制在一定水平, 以致造成在“故障何时发生”以及“为何发生故障”等方面开展的工作被忽略, 没有从故障机理和产品设计参数优化层面来回答和解决可靠性相关问题。这样的做法不利于促进产品可靠性设计, 也无助于在产品研制过程中对有限的可靠性工作资源进行合理规划。因此, 在美国空军于 20 世纪 80 年代中期出台的 R&M 2000 行动计划中, 倡议工业界借鉴飞机结构完整性大纲 (ASIP) 和发动机结构完整性大纲 (ENSIP) 实施过程中取得的成功经验。为了贯彻这一思想, 寻找一条提高电子产品可靠性的新路, 俄亥俄州赖特·帕特森空军基地的空军指挥中心航空系统部 (ASD) 开始实施航空电子完整性大纲 (AVIP), 并在 1986 年发布 MIL - A - 87244 《航电/电子综合计划要求》。AVIP 强调“通过设计”实现可靠性 (Reliability by Design)。AVIP 认为每种故障的原因和影响之间都有一定的关系。对于硬件故障 (包括机械的、化学的和电应力的故障), 原因都可以归结为设计中的应力边界不够恰当, 并提出所有的电子产品都存在缺陷, 缺陷会发展成故障, 而通过分析与控制应力和缺陷的发展速度 (如初始裂纹尺寸等) 可以确定故障的发生时间。

20 世纪 90 年代, 随着 AVIP 的应用和科技的迅速发展, 美国军方对 AVIP 进行了进一步补充和完善。1995 年 1 月, MIL - A - 87244A 改版为 MIL - HDBK - 87244 《航空电子设备/电子设备完整性手册》, 对航空电子设备的完整性要求、完整性验证要求及其工作内容。目前, AVIP 已经在 SRAM II, ATARS, AN/ALE - 47, GPSDAC, “沉默彩虹” (Tacit Rainbow) 反辐射无人机, MARK XV IFF, LANTIRN (航空吊舱) 以及 F - 22 和联合攻击战斗机 (JSF) 机载电子产品等项目中得到应用。

基于故障物理的可靠性技术是目前可靠性工程技术发展的热点和主要方向之一, 受到国

内外研究者的普遍重视，被誉为“科学的可靠性工程技术”。从国外研究情况看，目前系统的技术体系框架仍然在发展完善过程中。马里兰大学 CALCE 中心最早提出故障物理可靠性这一概念，但其研究重点是电子产品的故障机理及其模型研究。美国国家航空航天局（NASA）、美国陆军装备系统分析中心（AMSAA）以及英国国防部和英国航空宇航工业等，对故障物理可靠性进行了系统研究，并在电子产品级开展故障物理的可靠性设计分析技术的应用。

国内，中国航空综合技术研究所最早开展电子产品基于故障物理的可靠性技术研究，自 2000 年以来，在航空机载电子产品的故障机理及其建模技术、故障机理的影响分析技术、基于故障物理的可靠性设计分析等方面进行了一系列研究，取得了重要进展，并在工程应用中进行了成果转化。北京航空航天大学等单位在典型故障机理模型研究以及基于功能/性能的可靠性等方面取得了一定的研究成果。

1.2 电子产品故障的发生原理

在不考虑电子产品软件故障的前提下，追根溯源，任何电子产品的故障总是由于外界的环境载荷和工作载荷（机械、热、电、化学等）对电子设备的硬件（物理结构组成和电路）的广义应力损伤所导致，这些故障机理通过电子设备的功能逻辑关系进行传递影响，最终导致电子设备的故障，如图 1-1 所示。因此，电子产品的故障涉及以下几个方面的因素：使用、环境条件和工作载荷历程，包括振动、温度循环、湿度、电应力等载荷。

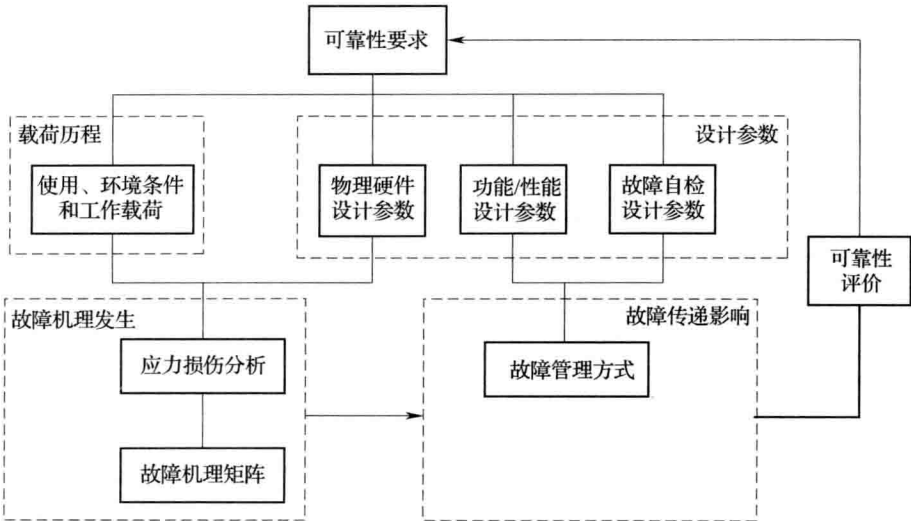


图 1-1 电子产品故障原理

产品的设计参数，包括硬件物理结构参数（故障机理的发生载体）、功能结构参数（故障机理传递的路径）以及故障及时自检的能力特征参数（功能重构和冗余实现的关键）。

对电子产品的故障发生过程进行抽象，主要关注以下两大要素的分析。

①产品的主要故障机理分析。对于预期使用环境和产品设计构型而言，总是可以确定其主要的故障机理种类及其发生时间（考虑其随机离散性）。我们这里将这些根据底层故障（或局部故障）发生时间进行排序的主要故障机理称为产品的主要故障机理集，可以通过广义应力损伤的方式进行主要故障机理的分析。

②产品的（性能/功能失效）故障分析。故障机理导致的底层故障通过传递影响最终形成电子产品的功能/性能失效。这类故障是依托电子产品的功能拓扑关系进行传递的，只要电子产品的功能拓扑结构确定，则这种传递路径即可以确定，我们将底层故障传递影响导致故障的过程称之为故障的传递影响，可以基于电子产品的功能模型以故障注入的方式进行定量分析。

因此，电子产品的故障发生过程可描述为：以故障机理导致的底层故障集为输入，以电子产品的功能结构拓扑关系为路径进行传递，最终形成电子产品故障，见图 1-2。可靠性设计与分析的主要目标也是围绕上述两个分析要素展开的。根据应力裕度，设计在电子产品的有效使用期消除和延长故障机理的发生，其设计活动包括材料和元器件的选择与控制、几何尺寸和布局、设计参数确定等；通过功能拓扑结构设计（如冗余或重构等）实现对故障机理发生的包容，即局部故障的发生不导致电子产品故障，可对功能和设计参数的映射关系进行监测、管理和优化，实现产品在规定使用期保持性能/功能。目前相应的设计活动包括参数和容差设计、冗余及其重构设计等，几乎不考虑从产品的架构设计中解决可靠性设计问题。

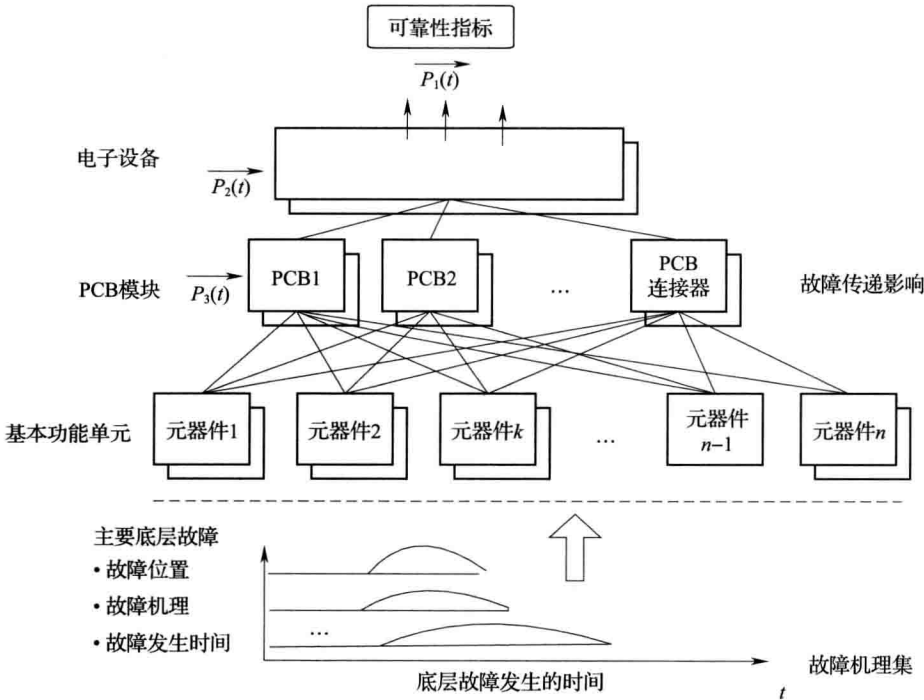


图 1-2 电子产品故障发生过程分析

1.3 电子产品基于故障物理的可靠性技术构架

基于故障物理的可靠性技术，是以通过广义应力损伤分析确定的故障机理对应的产品主要故障机理（含性能退化）时序集为基础输入，开展可靠性设计与分析工作，包括可靠性建模、可靠性设计分析以及针对主要或关键故障机理的试验验证等工作。基于故障物理的可靠性技术体系分为基础理论、基础技术、应用技术三个部分，其技术框架如图 1-3 所示。

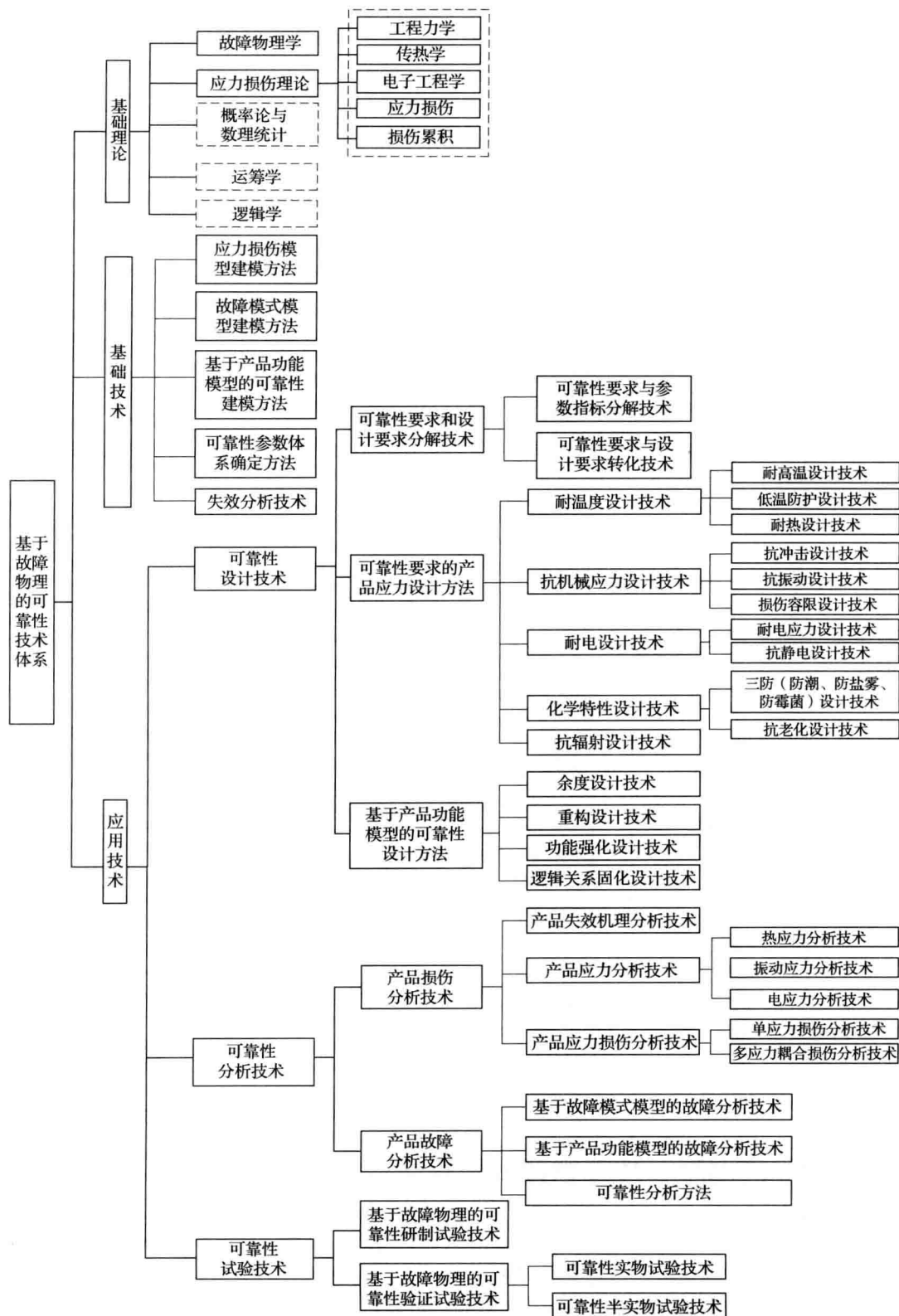


图 1-3 基于故障物理的可靠性技术架构

第2章 基于故障物理的可靠性理论与方法

2.1 故障物理学

2.1.1 故障物理学发展历程

从可靠性工程的发展历程来看,在最初阶段就产生了两种解决可靠性问题的方法和途径。第一种是已在工程实践中广泛应用的基于概率统计的方法(在这里我们暂且称之为一般方法);第二种就是近年来越来越受到广泛关注的故障物理方法。这两种方法在可靠性工程发展的过程中一直是并存的,就是说可靠性工程的发展存在着两条“主线”。实际上第一种方法由于在工程实践中见效快而被广泛推广,呈现出迅速发展的趋势;而第二种方法则由于需要漫长的物理化学等发展过程而发展得相对缓慢,但随着新技术、新工艺、新材料的发展与应用,故障物理方法的优势逐渐凸显。

故障物理又称为可靠性物理,主要经历了4个发展阶段,即萌芽阶段、稳步发展阶段、长足发展阶段以及成熟与专业化阶段。图2-1是以时间为主线的故障物理方法的发展历程。

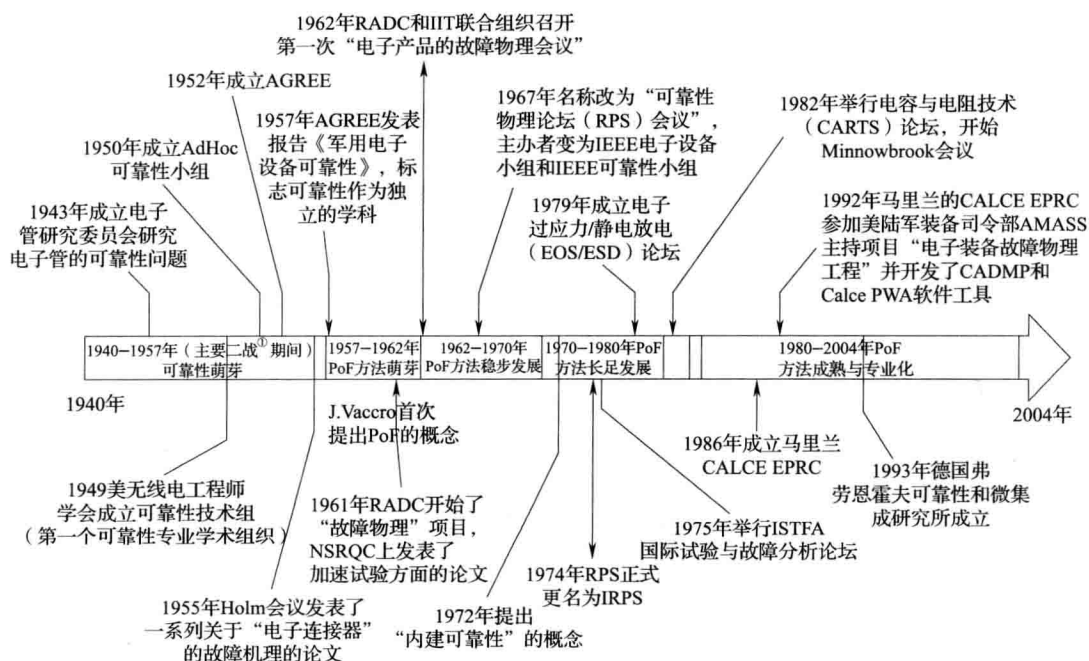


图2-1 PoF方法的发展历程

① 二战——第二次世界大战。

以下将分别按年代（每 10 年）分阶段详述 PoF 发展历程的相关内容，其中包括涉及到的相关研究机构、代表性事件以及专业会议等。

（1）20 世纪 50 年代（萌芽阶段）

虽然直到 20 世纪 60 年代初期才开始正式使用“可靠性物理”这个名词，但促使这种可靠性方法产生的最主要推动力却在 50 年代就已经“生根发芽”了。20 世纪 50 年代，军用电子产品的高故障率已经严重威胁到美军主战装备的操作完好性，这些现象引起了美军的极大关注。由于这些主战装备变得日益复杂，除非可以将组成这些装备的元器件的可靠性提高一个数量级，否则这些装备的可靠性将由于复杂性的提高而相应降低。若使用传统的可靠性方法测量元器件的可靠性，则不能将一个元器件的试验结果扩展到新开发的元器件或新的环境条件中去。随着电子产品设计技术的迅速发展，开发出新种类元器件的速度也越来越快。原材料、加工方式、使用条件以及采用标准的改变都将使现有元器件的可靠性数据不再有效，这就需要通过既费时又花费高昂的试验对新的元器件建立新的可靠性数据。并且，随着元器件可靠性的提高，开展这种试验所花费的时间也越来越长，这样导致新元器件的开发速度总是快于元器件可靠性数据的积累速度。这一系列的局限性都促使人们要采取一种新的方法来处理元器件的可靠性问题。这种方法就叫做“故障物理”，后来也被称为“可靠性物理”。

20 世纪 50 年代用于处理可靠性问题的主要方法就是用传统的概率统计方法对可靠性进行测量、预计和试验，此时的可靠性方法大部分都是对已有产品进行“事后分析”的方法。

1957 年 12 月罗伯特·卢瑟（Robert Lusser）发表了题为《电子产品的不可靠性——原因及处理》的文章，统一了当时可靠性领域存在的一些分歧意见。卢瑟指出，通过对美军导弹系统的研究表明，60% 的故障是由电子元器件引起的。这篇文章说明，当时电子产品的可靠性理论和质量概念是不充分的，仍要寻求新的方法来处理电子产品的可靠性问题。

另外值得一提的是，在 1955 年有一个对日后可靠性物理的发展具有重要意义的事件，即召开了一个关于电工电子连接器的会议——Holm（霍尔姆）会议。会上发表了电子连接器领域所知的绝大部分故障机理的有关论文，这些都成为日后进行连接器可靠性物理分析时的主要数据来源。

（2）20 世纪 60 年代（稳步发展阶段）

20 世纪 60 年代早期，可靠性物理已开始成为可靠性领域的一个重要部分，其诞生地就是位于美国纽约格里菲斯（Griffiss）空军基地的罗姆航空研制中心（RADC）。RADC 在 1961 年就开始了“故障物理”项目，该项目旨在增强对电子元器件的物理属性和故障机理的认识。从那时起直到 20 世纪 90 年代初，RADC 即开始构建故障物理的理论和技术基础。

1962 年 9 月 26 日到 27 日，RADC 在美国芝加哥举办了第一次故障物理方面的专业会议，会议名为“电子产品的故障物理会议”，由 RADC 应用研究实验室和伊利诺伊理工学院（IIT，现在名为伊利诺伊研究院）共同发起主办。会议既定的方法是将材料的基本物理和化学特性与可靠性参数关联起来。哈利·戴维斯（Harry Davis）在开幕词中说：“我认为，本次会议的主题“故障物理”是可靠性研究中非常核心的部分。对故障物理和机

理的彻底理解是提高可靠性的主要方法……”这篇会议的开幕词概括了20世纪60年代早期军用电子产品领域的流行观点。会议发表的论文既覆盖了各种不同的装置,也涉及不同层次的技术细节问题。涉及的不同装置和问题有:①电阻器的可靠性;②晶体管的二次击穿问题;③陶瓷电容器介质等。值得说明的是,这次会议是探索性质的,与会者在会前只是提交了300~500字的摘要,在会议上开展了进一步的讨论和理解,会后6个月才出版发行会议论文集。

在成立专门的可靠性物理论坛之前,反映这一领域内容的文章大多发表在NSRQC(国际可靠性与质量控制论坛)上。NSRQC主要开展系统层次的可靠性研究项目,一篇奠定目前可靠性物理领域大部分“加速试验”基础的文章发表在1961年的NSRQC会议论文集上。

1963年9月,美国芝加哥召开了第二次“电子产品的故障物理会议”。会议上发表的论文绝大部分是关于单个装置的,有两篇文章是关于加速试验的。

1964年9月,美国芝加哥召开了第三次“电子产品的故障物理会议”。此时,可靠性物理已在可靠性领域奠定了地位。正如开幕词中所说:“正是可靠性物理将可靠性由一种‘黑盒艺术’变为了科学(即不仅知其然还知其所以然)。”同时也提出“概率统计方法的可靠性研究仍处于领先地位”。这次会议发表了基于“‘民兵’2导弹CQAP项目”的论文,正是这些项目促使在今后的会议中出现了一些很有价值的文章。此次会议也开始陆续发表一些关于故障分析技术的文章。值得说明的是,这次会议第一次收录了来自美国以外其他国家的论文,这说明其他国家也开始关注这一领域的最新发展。

1965年9月,美国芝加哥召开了第四次“电子产品的故障物理会议”。从第三次会议以来,可靠性物理得到了很大发展,这可以从开幕词中的乐观态度得到体现:“可靠性物理已经步入自己的发展道路,并且逐渐为主要的可靠性项目所接受并发挥用途。这不仅因为找到了解决可靠性问题简单便捷的方法,更主要的原因是,基本的物理方法是系统地理解元器件的唯一推理的方法。”会议论文涉及较新的集成电路(IC)领域,也第一次开始研究塑料材料的特性,这一领域直到今天也仍是元器件故障机理研究的主要内容。

1966年12月15—17日,美国俄亥俄州哥伦布市巴特尔(Battelle)纪念学院举行了第五次“电子产品的故障物理会议”。本次会议是前五次会议中参加人数最多的一次,共有535名与会者,其中包括来自7个非美国国家的30名学者。此次会议也是RADC主办的最后一次会议。

1967年,会议的名称由“电子产品的故障物理会议”改为“可靠性物理论坛(RPS)会议”,主办者也改为IEEE电子设备小组和IEEE可靠性小组,而RADC、巴特尔纪念学院以及IIT仅作为参与者。随着集成电路的大量使用,很多新的故障机理被发现,也要求有更多的故障分析工具。会议上发表了大量的文章。

1968年12月,第七次可靠性物理论坛会议在华盛顿举行。参加会议的人员持续减少,论坛的前途也开始受到质疑。由于参加会议的人员太少,可靠性物理论坛决定采取新的方式,1969年没有举行会议。在1970年的春天,论坛会议在拉斯维加斯重新举办,也许是期望温暖的季节、温暖的地点能够带来更多的与会人员,带来可靠性物理研究的“春天”。

这里还要补充提到美国电子部件可靠性中心(ECRC),他们在可靠性物理领域所做

的主要工作之一就是曾与 RADC 签订合同，编写并出版了可靠性物理笔记（RADC - TR - 65 - 330）。笔记中描述了“那些引起并促进电子设备退化、老化和故障的材料的物理和化学过程的研究结果”。其中在 1965 年的文档中概括了可靠性物理模型演化的三个阶段。

①早期模型：主要以经验为基础，通过统计试验数据，建立应力—强度干涉模型等进行研究，即所谓的“概率统计方法”。

②当前模型：虽然仍以经验为主建立模型，但至少要求可以对物理过程进行局部的理论解释。数学模型的参数形式不仅要包括工作时间还要包括环境应力，即所谓的“概率—物理方法”。

③未来模型：模型以物理过程理论为基础，对未来模型能优于当前模型的最主要期望就是能在设备开发的初始阶段就确定“最适宜”的设计，这种设计是可靠性、期望的输入输出特征、材料属性、设计配置以及制造过程等的函数。

从上面的发展历史进程可以看出，现在发展的“故障物理模型”是处于 1965 年所划分的第三阶段的模型。早期对故障物理的研究主要关注的是电气化学故障模式的静态模型，以设备材料和过程的缺陷为基础，通过改变温度进行加速试验。这些研究不包括部件的机械耗损故障模型，也不包括互连技术特别是焊接。元器件筛选还是检验设备缺陷的最主要的方法。随着制造过程的大幅度改进，通过对早期焊接电路中大部分可靠性局限性问题成功解决，设备可靠性得到了量级的提高。因此，转向建立第三代模型——基于动态“速率过程”的故障物理模型也是理所当然的事情。

（3）20 世纪 70 年代（长足发展阶段）

20 世纪 70 年代，可靠性物理获得了长足发展，越来越广泛地应用于电子行业。70 年代早期发展了封装的可靠性物理，研制开发出了很多新的元器件和更可靠的系统。1971 年，由于各种新器件的迅速开发，使得加速寿命试验得到广泛推广。1972 年是标志性的一年，各种可靠性物理新方法和新技术大量涌现，也是在这一年第一次提出“内建可靠性”的概念，并且直到 90 年代才将这种方法进一步系统化。1973 年，关于反映焊缝的金属脆变和静电放电方面的文章发表出来。1974 年，会议名称前添加“International”正式改为“IRPS（国际可靠性物理论坛）”。20 世纪 70 年代后期，IRPS 开始关注半导体可靠性物理。1976 年，第一次出现关于“电热”的文章，以及关于微电路封装“残余气氛分析 RGA”的文章。1977 年，使用扫描电子显微镜（SEM）进行故障分析成为新方法，并出现了第一篇关于“唾沫污染”的文章。

这一时期还出现了很多其他与可靠性物理相关的论坛和会议。

第一个就是国际试验与故障分析论坛（ISTFA）。该小组成立于 1975 年，起先主要研究高级故障分析技术（ATFA），后来在 1979 年将其研究范围扩展为 ISTFA。ISTFA 的主要研究内容包括无源装置的故障机理，分立半导体器件、集成电路的故障机理，以及电子装置试验等。

第二个是电子过应力/静电放电（EOS/ESD）论坛。由于在 IRPS 上已经发表了很多关于电子过应力/静电放电的文章，因此很多人认为对这方面的研究已经足够了，然而却有少部分人坚持认为对这方面的研究还远远不够，并在 1979 年成立这个论坛。大量的事实也证明，由于静电放电和过应力引起的问题还远没有解决。

第三个是电容与电阻技术（CARTS）论坛。20 世纪 70 年代后期，关于无源部件的文

章已经越来越少了,然而仍有对无源部件故障物理信息的需求,因此从1982年开始举办CARTS论坛。

第四个是明劳布鲁克(Minnowbrook)会议。20世纪70年代后期已经在微电子中开始大量使用聚合体,而关于聚合体的可靠性物理信息却很少。1982年开始,每年由来自不同学科领域的人员在纽约蓝山湖举行Minnowbrook会议,旨在聚集所有的关于聚合体的知识和需求,以期望聚合体的生产商注意到这些问题。目前Minnowbrook会议关注的是混合体和砷化镓封装。

(4) 20世纪八九十年代(成熟与专业化阶段)

20世纪80年代早期,可靠性物理发展得更加成熟和专业化。八九十年代的IRPS主要涉及封装、金属化、故障分析、电介质/热载、装备和过程、混合半导体等方面。由于可靠性领域的专业化范围非常广,不可能一次会议涉及到所有方面,因此,IRPS选择了半导体物理这个专业化方向。

20世纪90年代早期,美国陆军和美国空军分别发起了两个与可靠性物理相关的项目。

①美国陆军

1992年,通过美国陆军装备司令部(AMC)授权,由美国陆军装备系统分析中心(AMASS)直接主持,并与马里兰大学计算机辅助寿命周期工程电子封装研究中心(CALCE EPRC)合作开展项目“电子装备故障物理工程”,以寻求更科学的故障物理方法来评价电子装备可靠性。由AMC提供资金,CALCE开发用于集成电路和多芯片组件(MCM)可靠性评估的软件工具CADMP(计算机辅助电子封装设计)。现在,电子产品与系统中心(EPSC)仍然在通过电子部件联盟(ECA)继续开发完善CADMP。此外,CALCE也开发了用于电路卡组件可靠性评估的故障物理分析软件工具Calce PWA。从此,CALCE在PoF领域占据了主导地位,标志着故障物理开始走向成熟和专业化,并逐步被工程实践所接受。

②美国空军

美国空军的项目是期望通过对外场故障数据的收集来确定故障的根本原因,然而这个项目由于缺乏资金支持而中断了。已有的研究结果有:电子过应力、制造缺陷、元器件的错误使用等主要的故障原因,以及聚合体封装陶瓷元器件的内部湿气等级随着时间的增加而降低等。

可靠性物理总是伴随着新器件、新技术的发展而发展,并反过来促进新器件的发展。当前电子产品领域的研究热点是微机电系统(MEMS),可靠性物理也必将随之得到进一步的发展。

2.1.2 故障物理技术

所谓故障物理技术是指在故障物理学的基础上评估缺陷和应力对产品可靠性的影响,并通过正向设计、装配和支持性方法来减少故障和评估故障的一种分析方法。该技术通过集中识别寻找故障和故障机理,更改设计和制造工艺来防止故障出现。进行故障物理分析的关键要素是弄清产品寿命周期载荷和应力,以及产品结构、潜在缺陷和故障机理,使用建立模型和模拟技术的方法,在进行物理试验以前率先确定故障机理。该方法应用加速试