导弹构件失效物理与可靠性分析

常新龙　胡　宽　张晓军　刘万雷　著

西北工业大学出版社

国家自然科学基金资助项目(51605480,11302249)

DAODAN GOUJIAN SHIXIAOWULI YU KEKAOXING FENXI

导弹构件失效物理与可靠性分析

常新龙　胡　宽　张晓军　刘万雷　著

西北工业大学出版社

【内容简介】 本书以导弹构件贮存可靠性与寿命评估为应用背景，全面阐述失效物理的基本概念、可靠性计算方法及在导弹武器中的应用。主要内容包括失效物理基本概念；导弹结构材料、应力与失效；导弹构件失效物理模型及常用分布；基于应力-强度干涉模型的可靠度计算；基于应力-强度-时间模型的可靠度计算；导弹金属构件断裂失效分析及可靠度计算；导弹贮存中的应力腐蚀及可靠性计算以及导弹非金属材料老化及可靠度计算等。

本书部分内容结合了作者近年来相关科研成果，适用于从事导弹武器装备研制、质量控制、使用管理等方面的技术人员阅读，也可作为高等院校相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

导弹构件失效物理与可靠性分析/常新龙等著．—西安：西北工业大学出版社，2016.8
ISBN 978-7-5612-5040-2

Ⅰ.①导… Ⅱ.①常… Ⅲ.①导弹—构件—失效物理 Ⅳ.①TJ76

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 209572 号

策划编辑：华一瑾
责任编辑：卢颖慧

出版发行：西北工业大学出版社
通信地址：西安市友谊西路 127 号　　邮编：710072
电　　话：(029)88493844　88491757
网　　址：www.nwpup.com
印 刷 者：陕西金德佳印务有限公司
开　　本：787 mm×1 092 mm　1/16
印　　张：10.625
字　　数：254 千字
版　　次：2016 年 8 月第 1 版　2016 年 8 月第 1 次印刷
定　　价：38.00 元

前　言

传统的可靠性概率统计方法，在实践中解决了很多重要产品的可靠性问题。但是，实践表明，基于数理统计的方法是一种宏观的分析方法，还不能准确反映产品失效或发生故障的本质。对于具体导弹构件来说，解决可靠性问题不能只是失效子样的统计，关键是研究构件失效的变化过程和质量劣化的演变规律，特别是应研究掌握构件失效前所处的物理状态和失效时机，从而把握构件的贮存使用寿命，推断可靠性随时间的变化历程，为构件乃至全导弹系统提供可靠寿命信息，预测服、退役时机。

失效物理又称可靠性物理，是可靠性工程的一个重要领域，也是可靠性技术的一个新发展阶段。它从可靠性技术的数理统计方法发展到以理化分析为基础的分析方法，是从产品的本质上探究其不可靠因素，分析解释环境对材料变化的关系，寻找失效的物理的、化学的和机械力的原因，从而对导弹构件和材料的改良、设计中的可靠性增长、贮存使用中的环境优化以及维修管理中的方法改进提供依据和保证。因此，失效物理是物理学和可靠性相结合的新学科。

本书以导弹构件贮存可靠性与寿命评估为应用背景，结合笔者近十年来应用失效物理技术在导弹武器可靠性工程、贮存延寿工程及环境适应性等领域的研究成果，全面阐述失效物理的基本概念、可靠性计算方法及在导弹武器中的应用。主要内容包括失效物理基本概念；导弹结构材料、应力与失效；导弹构件失效物理模型及常用分布；基于应力-强度干涉模型的可靠度计算；基于应力-强度-时间模型的可靠度计算；导弹金属构件断裂失效分析及可靠度计算；导弹贮存中的应力腐蚀及可靠度计算以及导弹非金属材料老化及可靠度计算等。

本书由常新龙主持编写，共分 8 章。编写分工：第 1～3 章由常新龙编写；第 4 章和第 5 章由胡宽编写；第 6 章和第 8 章由张晓军编写；第 7 章由刘万雷编写。

在编写本书过程中得到了火箭军工程大学许多同行专家、教授以及研究生的大力帮助，在此表示感谢。同时，本书也参考了部分兄弟院校和国内外的文献资料，在此对其作者表示诚挚的谢意。

本书的出版及所涉及的研究成果得到国家自然科学基金资助项目（项目编号：11302249、51605480）的支持，在此一并表示感谢。

本书的内容涉及范围较广，由于笔者水平有限，以及所研究工作的局限性，书中难免有不完善之处，恳请读者批评指正。

著　者

2016 年 3 月

目　录

第 1 章　失效物理基本概念 …… 1

1.1　失效物理概述 …… 1
1.2　失效物理与可靠性工程 …… 5
1.3　失效物理在导弹武器中的应用 …… 9

第 2 章　导弹结构材料、应力与失效 …… 12

2.1　导弹材料概述 …… 12
2.2　材料失效物理基础 …… 15
2.3　导弹材料环境应力与失效 …… 19

第 3 章　导弹构件失效物理模型及常用分布 …… 28

3.1　导弹构件典型失效物理模型 …… 28
3.2　导弹构件随机变量常用分布 …… 50
3.3　随机变量函数特征值求法 …… 65

第 4 章　基于应力-强度干涉模型的可靠度计算 …… 73

4.1　应力和强度服从同一分布的可靠度计算 …… 73
4.2　应力和强度服从不同分布的可靠度计算 …… 81
4.3　可靠度的图解法 …… 84
4.4　可靠度的数值积分法与模拟法 …… 88

第 5 章　基于应力-强度-时间模型的可靠度计算 …… 92

5.1　确定循环时间下的可靠度计算 …… 92
5.2　随机循环时间下的可靠度计算 …… 95
5.3　应力-强度-时间模型的应用 …… 98

第 6 章　导弹金属构件断裂失效分析与可靠度计算 …… 105

6.1　金属构件断裂力学基础 …… 105
6.2　金属构件静应力断裂问题的可靠度计算与应用 …… 109
6.3　金属构件疲劳断裂与可靠度计算 …… 117
6.4　导弹推进剂贮箱结构强度与剩余寿命评估 …… 120

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

第 7 章　导弹贮存中的应力腐蚀及可靠性计算 …… 130

7.1　应力腐蚀 …… 130
7.2　导弹贮存环境及腐蚀分析 …… 134
7.3　导弹构件应力腐蚀可靠性计算 …… 139

第 8 章　导弹非金属材料老化及可靠性计算 …… 144

8.1　导弹非金属材料老化 …… 144
8.2　基于反应论模型的加速老化试验及评估 …… 147
8.3　固体推进剂贮存可靠寿命预测 …… 154
8.4　橡胶密封结构贮存可靠性仿真计算 …… 157

参考文献 …… 161

第1章　失效物理基本概念

1.1　失效物理概述

1.1.1　失效与失效物理的含义

产品丧失规定的功能，通常叫失效。对可修复的产品，如无线电整机和某些机电组件，也可使用“故障”这一名词。为叙述方便，本书统称为“失效”。

产品的失效，不仅指致命性的破坏或完全丧失功能，亦指功能、特性降低到不能满足规定的要求。因此，判断产品的失效就必须首先确定其失效判别标准（亦叫失效判据）。标准不明确，会造成生产检验上、供需方验收上及维修服务等方面的混乱和分歧。

导致产品失效的原因是多种多样的，例如：零部件本身的缺陷；系统、电路设计不当或装配欠佳；人为使用不当与差错。但无论何种原因，都有一个共同点，即来自环境条件、工作条件的能量积累，一旦超过某个限度，产品便开始劣化直至失效。这种劣化的诱因——环境条件、工作条件等，一般称为应力，应力只是诱因。产品总是经过一段时间的演变后才失效，因此，时间的因素亦不可忽视。

上述应力和时间是产生失效的外因。而失效的内因，亦即导致发生失效的物理、化学或机械的过程，则称为失效机理。失效机理是从原子或分子学观点来阐明与失效有关的物理、化学过程。产品失效的形式、形态、现象，称为失效模式。如果拿疾病来做比喻，失效模式相当于基本病症，而失效机理则相当于病理。研究失效机理的科学称为失效物理学，简称失效物理，或称可靠性物理。

1.1.2　失效物理的研究内容与方法

一、失效物理的主要研究内容

可靠性工作的目的不仅是为了评价产品的可靠性，更重要的是为了提高产品的可靠性水平。可靠性物理是从原子和分子的运动规律出发，解释材料和元器件的失效现象，以便为其改进、设计、评价与使用，结构的组成、设计、使用与维护，以及环境、负荷的控制提供依据。失效物理是“物理＋化学＋工程学”的基础技术学科，它随着微电子技术、传感器与测试技术、计算机技术的发展和材料工程、控制工程学学科的交叉渗透，而不断得到丰富、发展和完善。

20世纪60年代以来，国内外广泛深入地开展了不同材料和构件的失效物理研究，即开展失效模式及其机理分析（简称失效分析）。研究失效物理的根本目的在于提高产品的可靠性。失效物理研究的内容大致如下：

（1）研究产品发生失效的场所、阶段、应力、时间、参数变化等（外部观测性分析）。

（2）找出失效的真实因子、效应过程及其关联症状（内部微观观察）。

(3)通过统计分析与物理分析,确定失效模型,明确失效机理。

(4)将失效分析结果反馈到与产品失效有关的阶段(如设计、制造、试验、贮运、使用、维修等),促使有关部门应用此分析结果改进产品。

具体来说,失效分析结果可用于:

1)为改进产品的设计、工艺、用料、管理等提供第一手参考资料;

2)为拟定产品的工艺质量控制和可靠性控制(包括检验、筛选、加速试验、非破坏性检测等)提供依据;

3)为规定产品的使用条件提供依据;

4)为系统的可靠性设计、可靠性预计、故障效应分析等提供依据;

5)促进新产品、新材料、新工艺、新技术的开发。

二、产品失效分类

根据不同的划分标准,产品的失效分类有多种多样,本书以常见的产品失效进行分类。如按失效发生的场合划分,可分为试验失效、现场失效(或运行失效)等;按失效的程度可分为完全失效和局部失效,或者称严重(或致命)失效和轻度失效;按失效前功能或参数变化的性质可分为突然失效和退化失效;按失效排除的性质可分为稳定失效(或称坏死)和间歇失效;按失效的外部表现可分为明显失效和隐蔽失效;按失效发生的起因,可分为设计上的失效、工艺上的失效和使用上的失效;按失效的起源可分为自然失效和人为失效;按同其他失效的关系,可分为独立失效和从属失效(或二次失效);而按失效浴盆曲线上不同阶段分,又可分为早期失效、偶然(或随机)失效、耗损(或老化)失效;等等。

较常用的失效类型名词有现场失效、致命失效、退化失效、间歇失效、人为失效、从属失效、早期失效、偶然失效和耗损失效等。

现场失效系指产品在现场使用或运行条件下发生的失效。

致命失效系指产品发生诸如开路、短路等以致根本无法工作的完全失效,或指产品的一个或数个基本参数突然改变以致无法工作之类的失效。

退化失效系指产品的一个或数个基本参数逐渐发生退化性变化直至达不到规定要求而失效,诸如半导体器件的电流增益、反向漏电的超差、金属化互连的腐蚀或电迁移等。

间歇失效系指产品在试验或使用过程中呈现时好时坏之类的失效。例如,在半导体器件的金-铝互连系统中,当形成金属间化合物而接触不良时,或由于封装欠佳而引起接触时断时通的现象,都是一种间歇失效;又如,管壳内混有不固定的导电微粒,振动时可能会引起瞬间短路;此外,某些元器件表面沾污引起的瞬时短、断路,以及一般的虚焊,也可引起间歇失效。

人为失效系指由于人为的误用、误操作所引起的产品失效。

从属失效系指系统中因某一零部件失效而引起其他相关联零部件的失效。例如,某一电容器本身工作时没有失效,但因电路中其他部分故障而引起加在电容器两端的电压大大超过其额定值以致被击穿损坏,电容器的这种失效即为从属失效。为此,对系统的关键部位,应在线路设计上采用预防保护措施。

早期失效系指产品由于设计、制造上的缺陷等原因,导致其在开始工作后的较短时间内就发生的失效。电子元器件和整机一般都有一个早期失效期,出厂前如能进行某些有针对性的

筛选、老炼，则早期失效现象可以大为减少。

偶然失效系指产品由于偶然（随机）的因素而发生的失效。经过早期失效期后产品进入偶然失效期（亦即正常工作寿命期），与早期失效期的失效率相比，偶然失效期的失效率较低，且接近于常数。耗损（老化）失效系指产品由于老化、疲劳、磨损等原因引起的失效。经过较长的偶然失效期后，产品进入使用的后期，即耗损失效期，在这时期，失效率随时间推移而迅速增加。

三、失效物理分析方法

失效物理一般分两个环节，即失效分析和建立失效物理模型。

1. 失效分析

产品的失效是人们所不希望的，在科研生产活动中，人们矢志不渝地与产品的失效做斗争。失效分析就是向失效现象做斗争的必要手段，通过分析产品的失效原因并提出对策可以防止再发生失效。因此，失效分析是一种技术活动，也是一种管理活动。

可靠性技术以失效研究为对象。在可靠性工程中，失效分析及相应的纠正措施对保证产品可靠性的贡献最为突出，据美国宇航公司统计，失效分析及相应的纠正措施在可靠性保证中所起的作用，占全部措施总和的 30%。失效分析如此重要是不难理解的。在复杂的导弹和宇航设备研制中，由于系统的复杂性和新型号的多样性，必然会使用大量新型材料和新型元器件，其中许多是新研制出来而未经使用考验的产品。这些“新”就意味着很多薄弱环节和潜在失效因素未经过暴露过程。要找出其薄弱环节或失效因素，其途径有两条：一是在产品长期的使用中经现场使用发现其失效情况；二是经试验、分析来预测其隐患和薄弱环节。在实际的导弹研制使用中，两条途径都很重要，而两条途径中，都必须对失效（故障）残骸上的各种信息进行分析，找出其失效的机制成因，并采取防止失效的对策，这就是失效分析的重要作用。

失效分析的方法主要是采用统计推断的思路建立失效物理-化学模型和数学模型，并取得验证。具体方法包括以下几点：

（1）按失效模式和失效机理发生频率的直方图法、主次图法；

（2）按退化前后参数相关项，确定退化因子的相关分析法；

（3）寻找特性值及其退化量与寿命关系的回归分析法；

（4）根据影响寿命的多因素，研究加速性的方差分析法；

（5）根据特定失效模式发生时间的寿命分布分析法等。

2. 建立失效物理模型

可靠性物理是应可靠性工程需要而产生的，因而具有鲜明的工程性。如前所述，它实现从微观的角度入手来研究元件、材料的失效机制成因，而得出宏观的可靠性指标。从微观到宏观怎样联系呢？分析这个问题，首先需要从微观研究中所得到的对失效过程的描述，上升为定量的规律。这种规律就被称为可靠性物理模型。

从可靠性角度把产品的质量发生变化的物理过程综合起来，归纳到数学模型中去，这样的数学模型既考虑了产品的劣化过程，又考虑了产品的失效问题。这种归纳过程就是建立可靠性物理模型的过程。可靠性指标是由概率来推断的，因此，沟通材料失效的内在微观世界规律与外在宏观性能之间的关系，就必须利用概率统计的方法。这是能够做到的，因为由微观的物

理过程导致材料失效的宏观过程，在时域和空域上都是随机的过程。也就是说，材料劣化的微观过程与材料失效的宏观统计规律之间有其必然联系。因此，所谓“失效物理模型”，必然是能反映材料的失效物理模型规律和概率数理统计规律的数学表达式。其主要思路是应用物理-化学定律建立失效物理-化学模型和数学模型，并进行验证。具体方法包括：

(1)破坏分析法。即直接分析法，包括：①亚微观分析法。该方法以原子、分子结构为研究对象，如研究原子扩散。②微观分析法。该方法以晶粒、晶界结构为研究对象，如研究晶间腐蚀。③准宏观分析法。该方法以零件、材料的表面层或应力-应变状态为研究对象，如研究疲劳裂纹等。

(2)非破坏性分析法。采用全息干涉摄影、声发射等物理检测方法的间接分析方法。

1.1.3 失效物理发展简史

在20世纪50年代可靠性技术发展初期，产品的统计试验得到注重，以此来定量地掌握产品的可靠度。这种试验本身并不能提高产品的固有可靠性。到了50年代后期，由于空间技术的迅速发展，复杂的电子系统要求具有很高的可靠性，这就迫使人们要从根本上迅速提高电子产品的固有可靠性。这样，在研制及生产产品时，为缩短试验时间和减少样品数量，创立了许多模拟的加速试验、筛选试验方法，并对其中的失效产品进行机理分析，以求在设计、生产工艺、材料等方面加以改进，提高其可靠度。60年代前后，半导体器件发展很快，未知的失效原因很多，且与物理关系甚为密切，“失效物理学”应运而生。美国“民兵-Ⅱ”导弹发展计划及此后的“阿波罗”登月计划是可靠性技术、可靠性物理、可靠性管理的首次大演习。可靠性物理由此得到了大发展，从而开创了可靠性技术发展的新阶段。

失效物理专家开始主要是从事元器件设计、生产技术的研究。由于失效机理分析涉及材料学、物理学、化学、冶金学等专业，并要广泛应用理化分析仪器，因此，现阶段分析技术专家的知识面已大大增加。失效物理学已成为一门新兴的边缘学科。

1962年9月，美国空军下属的罗姆空间发展中心(RADC－USAF)和美国伊利诺伊州立工学院联合召开了第一届“电子学失效物理讨论会”，与会者350人。会上罗姆中心人员介绍了他们在可靠性和失效物理方面的研究规划，这大概就是“失效物理”作为一门新学科首次被正式提出。1965年第四届讨论年会上就有美国以外的学者参加，并开始用先进的分析设备来做失效分析。

从1967年的第六届讨论年会起，年会由美国电气与电子工程师协会(IEEE)的电子器件分会与可靠性分会主办，每年举行一次，并更名为“国际可靠性物理讨论会”，出版年会论文集。从每年年会发表的论文内容来看，该讨论会的重点是半导体器件，尤其是大规模集成电路的失效分析；除对失效机理的探索外，趋于转向研究产品的可靠性设计及新的分析技术。

美国还有一个“失效分析先进技术年会”(ATFA)，1975年的第一届年会是由IEEE的洛杉矶分会和国际金相学会联合主办的。自1980年起更名为“国际失效分析与试验年会”(ISTFA)。主要内容是新的分析技术在电子元器件研究中的应用。

与其他的可靠性技术一样，这个在美国首先创立和发展起来的失效物理学，很快就在世界各国得到发展。自1962年以来，国际上失效物理的研究异常活跃，且不断有所创新，例如失效

物理模型、故障预测技术等。在交流利用成果上，除各种学术会议外，各国的可靠性数据交换中心都收集了各种电子产品的失效模式和频度等资料，并在出版的数据集中列出。

失效物理分析方法对于高可靠元器件的设计、改进以及筛选试验方法的研究大有用处。尤其是可靠性技术发展到今天的可靠性保证阶段，失效物理的研究成果已经被应用到系统设计、可靠性与质量保证体系中。

我国自 20 世纪 60 年代初建立电子产品可靠性专业研究所以来，一方面报道和引进了国际上先进的可靠性技术(包括失效物理)，另一方面对国产的电子产品进行了大量的可靠性试验研究工作。70 年代起，在科学院系统，各工业部门的厂、所及高等院校先后配备了较先进的分析设备，逐步开展了失效机理的分析研究工作。1979 年，中国电子学会成立了可靠性与质量管理专业学会，该学会设立了可靠性物理学组，以促进和开展可靠性物理方面的研究和技术交流。由于国家工业基础和资金的限制，目前我国的分析设备(数量、种类和分布)尚远不够，分析研究人员数量不足，水平尚待提高；地区性、专业性的分析中心尚未完善，这些都有待进一步发展。

1.2　失效物理与可靠性工程

失效物理，是可靠性工程的一个重要领域，是可靠性技术的一个新发展阶段。它从可靠性技术的数理统计方法发展到以理化分析为基础的分析方法，是从产品的本质上探究其不可靠因素，从而为研制和生产乃至贮存使用提供科学信息依据；它是物理学和可靠性相结合的新学科，是一种“物理＋工程”的基础技术，是对可靠性工程起支柱作用的一项技术。

可靠性概率统计方法的充分发展，为解决产品可靠性问题提供了可能。但是，实践表明，可靠性的数理统计方法是一种宏观的分析方法，还不能准确反映产品失效或发生故障的本质。对于具体导弹构件来说，解决可靠性问题不能只是进行失效子样的统计，关键是研究构件失效的变化过程和质量劣化的演变规律，特别是应研究掌握构件失效前所处的物理状态和失效时机，从而把握构件的贮存使用寿命，推断可靠性随时间的变化历程，为构件乃至全导弹系统提供可靠寿命信息、预测服退役时机。可见，失效物理方法的重要性是不言而喻的。

可靠性的数学统计方法，在实践中解决了很多重要产品的可靠性问题。但是，这种方法往往需要大量子样的失效统计，由于子样量较大，所以试验或现场必须有大量失效样本作为数据基础。这样一来，花费的时间经费就会很多。而失效物理方法则可用少量子样进行理化分析，从物理化学规律上得到失效信息，不需要进行大批量的失效数据的子样统计。因此，有人称失效物理方法是省时、省钱和省力的方法。

可靠性的概率统计方法已经有了充分的发展，并已经提供了广泛的解决实践中各种问题的可能性。在概率论和数理统计理论等基础上，已经建立了用于可靠性计算的数学方法——可靠性数学。但是，对于具体产品来说，解决可靠性问题不能只是故障统计，关键是必须研究引起产品质量发生变化的物理过程。这些物理过程服从某种物理规律并具有随机性质，存在着相互作用，并且与产品输出参数又有着极其复杂的关系。从可靠性的角度，把产品的质量发生变化的物理过程集中起来，归纳到数学模型中，这种数学模型既考虑了故障，又考虑了产品

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

的物理变化过程，因此是最能反映产品失效本质的数学模型。

1.2.1 可靠性工程的产生与发展

在第二次世界大战中，美国在远东使用的电子设备，有许多在运输和保管中即已损坏，半数以上无法使用，或者在使用中很容易出故障，可靠性工程的研究就是由此开始的。1943 年至 1950 年间，美国对设备中失效频数最高、被视为设备故障祸根的电子管，曾倾注了很大的努力去追查其失效原因并寻求改善的方法，从而制造出了“高可靠电子管”。但是研究结果发现，对于提高设备的可靠性来说，仅仅改进其中部分元器件是无济于事的。人们逐渐认识到，为了确保（系统的）可靠性，还必须对整个系统作全面的考察，必须从研制之初就进行可靠性的设计，把可靠性指标“纳入”产品之中。

在这一认识的基础上，美国进行了许多研究工作，其中最有权威性的综合研究，就是美国国防部“电子设备可靠性顾问团”（AGREE）于 1952 年开始进行的研究工作。该顾问团分成九个小组来研究可靠性工程中的基本问题，并于 1957 年 6 月出版了其研究报告。在这份研究报告中，叙述了设备（系统）的可靠度与构成该设备（系统）的元、部件的可靠度之间的关系，设备（系统）可靠度的时间量度 MTBF（即平均故障间隔，各故障间的平均间隔就是无故障的平均时间；而对于随机故障来说，如后文所述，MTBF 的倒数即等于失效率）的测量方法和保证方法等基本方法，从而为之后美国可靠性工程学的发展指明了方向。这一研究成果已具体反映在美国军用标准中。

可靠性，就是表示“系统、设备、元件等，其功能在时间上的稳定性的程度或性质”，它是产品的时间质量的抽象化；进一步对系统或硬件的可靠性作定量的描述，就成为可靠度（reliability）。

可靠性的定义：“系统、设备、元件等在规定的条件和所要求的时间内完成规定功能的概率”。也就是说，可靠性就是产品在规定的使用条件、环境条件下和所要求的时间内（包括距离、动作次数等）处于无故障地正常工作的概率。这里，所谓“故障”，就是指“失去规定的功能”。然而，对于复杂的系统来说，硬件的故障并不会马上造成系统的故障，而是由于一定程度的人为差错、管理差错及软件故障才引起系统的故障。要提高系统和硬件的可靠性，简言之，就是要在规定的使用、环境条件下和规定的时间内使其“不发生故障”。

但是，随着近年来对系统、硬件的性能要求越来越高、越来越复杂，要想像过去那样把安全系数设计得超出必要的限度是不允许的了，而应该从经济和技术的角度都作出合理的设计。像飞机、铁路新干线以及高层建筑等，若要求安全系数做得绰绰有余，便不能以合理的成本费用来实现所要求的功能。构成系统、硬件的元件数正变得越来越多、越来越复杂；技术又是日新月异地向前发展，使得过去的数据不能照搬使用。此外，在使用和环境条件方面，加在产品上的应力也更加严酷、更加多样化。比如我们身边的电子产品，由十多年前的收音机到现在的立体声设备，从黑白电视机到彩色电视机，在这当中，元件数已从 10^2 的数量级剧增到 10^3，而汽车、喷气式飞机、阿波罗宇宙飞船、电子计算机等使用的电子元件数，则分别跃升到 10^4，10^5，10^6 及 $10^5 \sim 10^6$ 的数量级。在环境条件方面，电子产品往往要在宇宙空间及火箭飞行等的高温、低温、高真空等极端条件下使用。此外，所要求的寿命保证时间也越来越长，例如要求

5～10年。由于系统的故障数是随元件数、应力、使用时间而增加的，因此就给可靠性的提高带来了困难。

1.2.2　失效物理在提高可靠性方面的作用

为了与设备、系统的复杂化、高性能化相适应，并且要用有限的费用和时间来满足对可靠性的要求，需要采用失效物理方法对产品进行分析。

从系统（设备）制造到成品最后报废（其经验又必定为下一代改型产品提供借鉴）的整个寿命周期，系统（设备）的所有技术和数据资料都应综合地反映到其可靠性计划中去。必须明确对产品的可靠性要求，并在产品的研究、设计、制造、试验、使用和维护等各个阶段，有组织、系统地推进可靠性计划的实施。对于在使用和试验等阶段中所得到的数据资料，必须从技术以及统计角度出发进行分析，并进一步加以整理综合，然后尽快且有效地反馈到产品的研究、设计、制造、维护、试验等方面去。这项工作是在折中考虑成本费用和其他质量的基础上实现产品可靠性的唯一方法。可靠性技术本身是综合性的，属于系统工程的范畴。所以，必然要求可靠性机构应能维持经常性的活动。

系统的故障是随采用的器件数、所受的应力和时间而增加的，要提高系统的可靠性，需要从以下几个方面着手。

1. 提高元件（部件）的可靠性

要提高设备、系统内元件、材料本身的可靠性，就是要设法降低这些元件、材料的失效率，延长它们的固有寿命，研究保证固有寿命的方法。

劣化机理、缺陷（这是导致产品失效的原因）的检测和剔除技术、寿命预计、旨在减小应力影响的设计等就是通过失效物理方法来提高产品可靠性的途径。在电子工业方面，前面说到的提高电子管可靠性的措施（其结果就是制造出高可靠电子管）就是对现成产品进行改进的例子，而对其后的晶体管、集成电路的劣化机理开展研究，就是设法提高新品的可靠性并进而为新的物理学和新技术打开新局面的具体例子。

2. 系统的高可靠性设计

从系统整体来看，若只是在提高元件的可靠性上下功夫未必一定有效。对于失效率已达 10^{-9}/h 甚至 10^{-10}/h 的高可靠元件来说，想进一步提高其可靠性绝非易事。而且对于系统的故障来说，有时元件本身的质量虽然符合规定要求，但设计上规定的使用方法却不合理；有时虽然设备是完好的，但配置不当，容易被损坏，或操作时容易产生差错。由于这类人为因素而导致软件产生故障的情况，往往多得出人意料。

因此，为提高系统的可靠性，与其从改善元件、材料的质量上入手，还不如在设备、系统的使用环境上、结构上和系统设计上多下功夫，设法减少系统的故障，延长系统的寿命。

例如，可以在设计时多考虑一下系统结构的安全余量，设法减轻系统使用时所受的应力，或者在减额状态下使用元件（电子元件在低于额定的条件下使用叫作减额）；对于容易出故障的地方，可以采用贮备设计；另外，还可以在“人机工程”方面下功夫采取一些合理措施；等等。以上这些方法都是较为有效的。即使元件本身未被改进，但如果知道它的失效原因，并掌握它的退化程度，那么就可以在系统的设计阶段预见环境因素和时间对失效及退化量的影响，从而

设法减轻应力或采取贮备设计等方法。为此，必须了解在使用条件和环境应力不变时元件性能随时间变化的情况，并以此作为系统设计的依据。而如何获得这种信息，便是失效物理的重要研究范畴。

3. 系统的维修性设计和工作有效度

前面两点是考虑尽量使系统、设备“无故障”的方法。但是，通常比较复杂的、要求长期使用的系统或设备，并不是发生故障后就马上抛弃的，多数是在故障发生前即实行预防性维修，而在故障发生以后，则采取更换故障品的维修办法，从而使系统、设备一边工作，一边修理。对于一边使用，一边更换故障品的系统、装置，也不单纯是采用更换故障品这种事后维修的方式，而且还要通过预防性维修，减缓故障率（更换率）的增长，尽量设法延长产品的耐用（有效）寿命，努力使失效率在预定的使用寿命期内维持在较低的水平上。

对于广义的可靠性来说，除了单纯的“使产品无故障”这种狭义的可靠性内容之外，还包括“出现故障或工作不正常时即行修理”这样一种维修性的内容。也就是说，可靠性和维修性这两者结合起来，就能“使整个系统或设备处于满意的状态”。用概率来表示广义的可靠性，就叫作有效度；用概率来表示维修性，就叫作维修度。维修度的定义是：“可以修复的系统、设备或元件，在规定的条件下和规定的时间内完成维修的概率。”换句话说，它是表示产品从发生故障的时间算起到某一时间止，其可能修复的比率。

通过维修来提高系统可靠性这项工作，乍一看来好像与失效物理无关，但实际决非如此。由于故障发生的部位及其模式不同，其解决措施（如故障检测方法、修理、储备设计等）也各不相同。如果没有这方面的知识，就不可能进行合理的维修。比如，对于失效率随时间而减少的元件（称其失效率为减少型失效率）和失效率随时间而保持恒定的元件（称其失效率为恒定失效率），预防性维修是无意义的；只是对于失效率随时间而上升的元件（称其失效率为增加性失效率），这种预防性维修才是有效的。此外，随着系统的复杂化，不断研究新的故障（失效）检测装置、显示装置等，也属于失效物理的范畴。有时，为了要特别强调维修性，也有“维修性物理”这一提法。

综上所述，提高系统整体可靠性的方法有两个方面：①元件、材料本身的高可靠性（如上文1. 项所述）；②系统的高可靠性（见上文2. 项的可靠性与3. 项的维修性）。失效物理就是经济而有效地实现以上两个目的所不可缺少的基础技术。此外，若通过1. 项能有效地减少材料本身的失效，就会带来很多好处，例如，对于2. 项的系统设计来说，就可以减少元件的数量（重量）；又例如，对于要求高速、高性能和体积大的船舶、飞机、火箭发动机等来说，若能制出既能满足以上要求又能经久耐用的新材料、新元件的话，那么其效果就会马上显现出来。但是，这却孕育着一个矛盾：由于是新元件和新材料，就不能照搬硬套过去的数据，所以要在有限的时间内，以有限的费用来对其可靠性作出评价则是困难的。假如通过失效物理分析方法，能获得有关不断创新的元件、材料的可靠性预测数据，获得有关其失效机理方面的数据，那么自然就能解决这一问题。

将上述问题再从时间和数量这两方面加以分析便得到表1－1所示结果。由于现代设备（系统）复杂性增加、对其性能的要求增高以及技术的飞速发展，对可靠性的要求也日渐提高。为此，失效物理就越发显得重要了。

包括“人机系统”在内，随着系统的复杂化和体积的增大，势必产生对元件增加的限制，并进一步要求元件、材料本身的高可靠和系统的高可靠。另外，就时间性而言，也产生这样的问题：由于技术的飞速发展，使得过去的数据不能沿用，可靠性的保证方法也赶不上研制的速度。再者，随着对系统功能的要求日益严格，也进一步要求产品能耐受多种应力的作用，具有良好的环境适应性、安全性，且体积小、质量轻等，但又适于大批量生产。这样，又将加速新产品的研制进程。表 1－1 的右侧，是应用失效物理方法解决元件数量和满足时间要求这两方面的示例。

表 1－1　失效物理方法的重要性

对可靠性的压力			失效物理方法示例
1）复杂性； 2）对性能的高要求； 3）技术发展的速度	1）元件数量的限制； 2）时间上的限制； 3）成本的限制	1）要求不损坏、不发生失效、具有耐用性和安全性； 2）要求系统进行高可靠性设计； 3）要求维护性良好； 4）时间的限制：过去的数据不能使用	可用于失效机理与应力关系的分析、改良和预测； 失效的检测技术； 失效影响分析； 针对劣化方式而采取的维护措施； 加速寿命试验； 筛选； 稳定性措施； 各种失效机理的总失效率

1.3　失效物理在导弹武器中的应用

在导弹武器系统中，其任何设备和构件的失效（故障）都是由其外界环境的影响和内在因素的变化而造成的。失效物理就是从构件材料的原子和分子角度出发，分析解释环境对材料性能的影响，探索材料失效的物理、化学和机械力的变化过程，揭示材料性能的变化规律，并通过对导弹构件和材料的改良、设计中的可靠性增长、贮存使用中的环境优化以及维修管理中的方法改进，从而提高导弹武器系统的可靠性。

提高导弹武器系统的可靠性，一是从改善其元件和材料的质量入手，二是从系统的使用环境上和设计上下功夫。失效物理就是经济而有效地实现上述两种方法的途径。一种新型号高性能的导弹，其设计必须采用很多的性能优良的新材料，而不能全部照搬旧型号的构件和材料。只有通过失效物理分析，才能获得不断创新的构件和材料的可靠性预测数据，没有这些失效分析数据，新的高性能的导弹就不会诞生。同样，没有进行环境因素对新型高性能导弹的失效影响分析，这种导弹的贮存、使用乃至退役报废，也就没有依据。这种盲目性不但会使新型号导弹装备失去高性能的意义，反而会降低其贮存使用可靠性。下面介绍失效物理方法在导弹武器系统中的几种应用情况。

1. 在导弹可靠性设计中的应用

在失效物理研究中提出的数据，就其包含的信息内涵而言，要比向用户调查或外场调查、

各种检验或验收试验所提供的内容丰富，例如不仅可提供平均失效率、平均无故障工作时间、平均修复时间等，而且可以提供：

(1)各种材料及元器件在不同环境、不同工作条件的失效率。

(2)各种不同故障模式及失效机理发生的频数与频率；状态或状态有关的参数随时间变化的规律及失效的后果。

(3)各种失效机理的发生、发展、相互间影响到的直接观察结果。利用可靠性物理研究的成果，可以提供电子元器件、机械元器件的降额系数和环境系数，以便进行可靠性预测。例如，导弹液体发动机燃烧室的身部采用波纹板钎焊夹层结构，在地面试车中多次出现发动机内壁撕裂、鼓气的失效事件。失效分析表明，失效是由于高温腐蚀性介质使钎焊焊缝受到腐蚀引起的。根据这种分析改变了结构设计，问题得到彻底解决。在导弹设计和试制阶段，此类失效分析而使试制得到成功的事例是很多的。

(4)按照失效机理的串联模式，对新设计、新结构的元器件或设备进行可靠性预计。

(5)按照状态参数的时间变化规律提供筛选的方法。

(6)按照失效机理的物理模型，提供加速试验方法。

(7)产品改型时，为选择材料、典型结构与元器件提供依据。如某导弹贮存箱底曾出现过贮存裂纹，在部队的贮存使用中成为至关重要的问题。曾有人认为该种铝合金材料不适于作贮箱用，认为它对应力腐蚀太敏感。经失效分析表明，贮存裂纹系由焊接所致，后来改进了焊接规范、焊料和焊缝边缘的构造，问题得到解决。

例如某型姿态控制发动机的喷注器多次发现漏火现象，曾提出过很多疑问，并根据疑问进行更改均未奏效。后来经对失效残骸进行分析发现，漏火系不锈钢中发纹所致，经采用无发纹不锈钢后，问题即获解决。

2. 在导弹质量控制中的应用

在影响产品固有的可靠性的因素中，设计约占 67%，工艺约占 33%。在改善工艺加强质量控制后，产品可靠性功能往往有很大的提升。在不同工艺条件下进行可靠性物理研究，可以得出各种工艺因素对产品可靠性的影响。

每种可靠性试验都有各自的特定要求，失效分析在选取试验方法上起着重要作用。例如某导弹的高压波纹管曾出现过疲劳损伤，为了提高其可靠性曾确定采用疲劳筛选方法以剔除劣品。实践证明这种方法消耗了一部分波纹管，但并没有改善其可靠性。失效分析表明，疲劳模式不适于这种波纹管的失效问题，而稳定和改善批次质量并采取样本抽验才控制了波纹管的质量水平。

3. 在导弹维修及延寿工程中的应用

维修方式的选择依据就是失效模式、影响及致命分析，因此可靠性物理研究为正确选择维修方式及制定维修方案打下了基础。在可靠性物理研究中，采取的一些物理化学检测手段，又可作为视情维修或状态监控的手段，维修性物理是与可靠性物理密切相关的学科。如某次导弹发射，地面电源大功率调整管击穿短路，并将弹上放大器烧毁。分析表明，功率管的失效是偶然性质低劣，更换后不会出现同样故障，从而为决策提供了依据。

导弹贮存到一定的时间，某些构件即失效。失效期限和贮存环境及贮存方法有直接关系。

不断研究构件材料失效的机理，可提供导弹贮存中的环境优化及方法上的优化，特别是在导弹达到设计寿命期后，可根据失效机理等信息有针对性地对导弹更换薄弱部件，以延长导弹的使用寿命。这种导弹延寿工作，世界各国都很重视。

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com