

[瑞典] Johan Liu (刘建影) Olli Salmela Jussi Särkkä 著
James E. Morris Per-Erik Tegehall Cristina Andersson
郭 福 马立民 译

微电子技术的可靠性

——互连、器件及系统

Reliability of Microtechnology: Interconnects, Devices and Systems



科学出版社

微电子技术的可靠性

——互连、器件及系统

Reliability of Microtechnology: Interconnects, Devices and Systems

[瑞典]Johan Liu(刘建影) Olli Salmela Jussi Särkkä 著
James E. Morris Per-Erik Tegehall Cristina Andersson
郭 福 马立民 译

科学出版社

北 京

图字:01-2012-1458

内 容 简 介

本书详尽地介绍了电子互连系统中可靠性的诸多基础科学问题及测试和解决方案,涉及的概念、模型、方法等的阐述清晰易懂,并附有习题帮助读者深入思考和理解相关的理论基础。书中首先描述了微电子技术可靠性问题的重要性和定义,然后分别从经验模型、物理模型以及失效的一般机制讨论了系统失效的方式和测试方法,之后又分别从可靠性设计、元件和系统级可靠性的角度阐述了能够影响微系统互连失效的相关因素,最后以质量管理为立足点介绍了保障高可靠性产品所涉及的基本环节。

本书适合作为微电子互连技术相关专业学科以及其他涉及电子产品微技术可靠性专业的高年级本科生、研究生教材,也可作为工程技术人员的参考用书。

Translation from English language edition:

Reliability of Microtechnology

by Johan Liu, Olli Salmela, Jussi Särkkä, James E. Morris, Per-Erik Tegehall and Cristina Andersson

Copyright©2011, Springer US

Springer US is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

图书在版编目(CIP)数据

微电子技术的可靠性——互连、器件及系统/[瑞典]刘建影(Liu, J.)等著;郭福,马立民译. —北京:科学出版社,2013.6

书名原文:Reliability of microtechnology; interconnects, devices and systems

ISBN 978-7-03-037606-0

I. ①微… II. ①刘…②郭…③马… III. ①微电子技术-可靠性-研究
IV. ①TN4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 114377 号

责任编辑:牛宇锋 汤 枫 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:张 倩 / 封面设计:陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2013 年 6 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2013 年 6 月第一次印刷 印张:12 1/4

字数:226 000

定价:58.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

译 者 序

微电子组装技术与材料的应用已经成为电子产品向微型、便携、轻质化发展的重要保障。组装技术的不断创新和新型环保材料的应用使电子产品具备多功能、低成本、循环处理等使用、生产和再制造的属性和优点。然而,每一次技术和材料的革新必然涉及诸多需要解决的可靠性问题。电子产品在热学、力学及电学耦合作用的工作环境下,会在不同组装层级上引发不同可靠性问题。尽管,众多学者和研究机构相继关注并开展了广泛的可靠性测试,相关可靠性测试标准也已经由不同行业机构或国家推出。但是,尚未有相关书籍将微电子组装技术和材料中涉及的不同类型可靠性的测试方法、测试仪器、理论模型及其解决或预防措施进行相关的整理及对比。瑞典查尔姆斯理工大学 Johan Liu 教授所著的 *Reliability of Microtechnology* 一书,很好地将上述可靠性涉及的各方面内容整合在一个连贯的体系中,从而使微电子技术的可靠性问题进一步条理化。并且,每一章都附有参考文献和习题,这有助于满足不同类型读者的需求。

在得到著者肯定的前提下,北京工业大学先进电子连接材料实验室凭借多年的微电子组装技术与材料的可靠性研究经验和成果对该书进行了翻译工作。全书由郭福和马立民翻译和校正。组内成员刘思涵、左勇、赵然、周虎、王欣欣、沈丽、张旭参与了部分资料翻译和图片整理工作。全书由郭福教授统稿。

由于译者水平有限,书中不妥之处在所难免,敬请读者批评指正。

译 者

2013 年 5 月于北京工业大学

原 书 序

当今社会,人们对电子产品的依赖性正以不断加速的方式渗透到世界的各个角落。

对于工业界来说,我们已经并会继续将产品可靠性放在首位来关注,同时也面临着消费者对产品功能需求不断提高和产品组装竞争日趋激烈的压力。众所周知,产品的可靠性问题不仅会在某些案例中给人们的日常使用带来不便,更会在某些案例中带来灾难性的后果。

因此,在大学生和工程师微电子技术可靠性的教育上必须将可靠性的理论和实际应用的重要性放在首位。

然而,使用环境和自身需求会给应用中的电子产品带来多种应力条件(热力学、动力学、电化学、电学等)并使其可靠性问题变得十分复杂。而新的应用(相关使用和环境条件)、新的产品设计、新材料以及新工艺也都进一步使可靠性问题复杂化。

我们很幸运能够拥有一批专家引领和指导我们解决电子可靠性中的这些关键且复杂的问题。通过会议和专题研讨会的形式,我们从这些专家身上收获颇丰。长期以来也需要一本相关的全面的书籍来记录可靠性理论和知识。该书则适时地满足了这一需求。

Dongkai Shangguan(上官东恺),博士,MBA

伟创力电子科技有限公司 副总裁

华中科技大学 客座教授

IEEE Fellow(会士)

2010年9月

原 书 前 言

本书内容涵盖从器件到系统的各种主题,还包括相关习题及答案,可作为大四本科生或一年级研究生掌握微电子技术可靠性知识和理论的自学教材。本书也有助于可靠性工程师在可靠性评价、建模以及质量管理方面开展工作。书中包括从元件到系统级别互连的可靠性问题。本书首先介绍了可靠性方法论的概念,其后阐述了钎料和导电胶的一般失效机制和特殊失效模型。此外,还详细描述了加速试验、互连、元件、系统级可靠性以及可制造性方面的可靠性设计问题。最后介绍了质量和可靠性管理问题以及可靠性的表征工具。

Johan Liu(刘建影)

瑞典皇家科学院工程院(IVA) 成员

IEEE Fellow(会士)

瑞典查尔姆斯理工大学 教授

上海大学 特聘教授

2010年9月

哥德堡

目 录

译者序

原书序

原书前言

第一章 可靠性及其重要性	1
参考文献	1
第二章 可靠性的度量	3
2.1 可靠性的定义	3
2.2 经验模型	3
2.3 物理模型	4
2.4 可靠性信息	4
2.5 互连可靠性	8
2.6 互连的等级	10
2.7 可靠性函数	11
2.7.1 指数分布	14
2.7.2 韦布尔分布	16
2.7.3 对数-正态分布	18
2.7.4 基于物理模型的分布	19
2.8 微系统可靠性预测的一般韦布尔分布模型	21
2.8.1 基于位置参数的失效准则	22
2.8.2 最小二乘估计	22
2.8.3 试验与数据	23
2.8.4 分析与结果	25
2.8.5 结果应用	26
习题	27
参考文献	28
第三章 微系统的一般失效机制	31
3.1 简介	31
3.2 力学和热机械失效机制	33
3.2.1 低周疲劳	33
3.2.2 蠕变	35

3.3 脆性断裂·····	36
3.4 IC 级别的失效机制·····	36
3.4.1 电迁移·····	36
3.4.2 静电释放·····	38
3.5 腐蚀·····	39
3.6 塑料封装的爆米花效应·····	40
习题·····	41
参考文献·····	42
第四章 焊点可靠性 ·····	44
4.1 焊点的显微组织·····	44
4.1.1 共晶 Sn-37Pb 显微组织·····	45
4.1.2 显微组织稳定性和界面反应·····	46
4.1.3 共晶 Sn-3.5Ag 显微组织·····	47
4.1.4 显微组织演变和界面反应·····	47
4.1.5 Sn-Ag-Cu 合金显微组织·····	48
4.1.6 显微组织演变和界面反应·····	49
4.1.7 Sn-3.5Ag-3Bi 显微组织·····	50
4.1.8 Sn-0.7Cu-0.4Co 显微组织·····	50
4.2 焊点力学可靠性·····	51
4.3 常见焊点失效机制·····	54
4.3.1 二级钎料互连失效行为·····	57
4.3.2 焊点可靠性测试标准·····	58
习题·····	59
参考文献·····	59
第五章 导电胶黏剂接头的可靠性 ·····	63
5.1 导电胶黏剂的介绍·····	63
5.2 各向同性导电胶黏剂·····	63
5.3 ICA 互连的可靠性·····	65
5.3.1 金属化的影响·····	65
5.3.2 固化程度的影响·····	65
5.3.3 冲击强度·····	67
5.3.4 失效机制·····	67
5.3.5 通过纳米颗粒导电的 ICA·····	70
5.4 ACA 连接的可靠性·····	72
5.4.1 装配工艺的影响·····	73

5.4.2 衬底和元器件的影响	75
5.4.3 吸潮引起的恶化	77
5.4.4 氧化物和裂纹的增长	78
5.4.5 开路和桥连的概率	80
5.4.6 黏结过程中 ACA 的流动	81
5.4.7 电传导的发展和残余应力	82
习题	84
参考文献	85
第六章 加速试验	87
6.1 加速试验的疲劳失效分析	87
6.2 热疲劳	88
6.3 不同的测试因素对热疲劳寿命的影响	89
6.4 恒温低周疲劳力学性能	90
6.4.1 频率的影响	92
6.4.2 保温时间的影响	93
6.4.3 应变范围和应变速率的影响	93
6.4.4 温度的影响	93
6.4.5 失效定义的影响	94
6.4.6 其他因素的影响	94
习题	94
参考文献	98
第七章 工艺可靠性设计	99
7.1 无铅钎焊	99
7.2 其他问题	101
7.2.1 铅污染	102
7.2.2 锡晶须	103
7.3 检验	104
7.4 修理和返工	104
习题	105
参考文献	105
第八章 元器件可靠性	107
8.1 引言	107
8.2 经验模型	108
8.3 方法	109
8.4 系统可靠性分析中的经验模型	109

8.5 经验模型的局限性和使用建议	110
习题	112
参考文献	113
第九章 系统级可靠性	114
9.1 引言	114
9.2 一些近似韦布尔分布的恒定风险率	117
9.3 结果函数和风险率	120
9.4 不同选项的属性	122
9.5 选项选择的对比	123
9.6 时间区间的选择	124
9.7 选择双参数韦布尔分布的动机	124
9.8 恒定失效率及其现场故障数据中恒定失效率的起源	125
习题	125
参考文献	126
第十章 微系统的可靠性与质量管理	128
10.1 引言	128
10.2 事项 1: 产品的需求和约束	130
10.3 事项 2: 产品的生命周期条件	130
10.4 事项 3: 选择和表征可选择的产品体系架构和制造工艺	131
10.5 事项 4: 封装理念认证和制造工艺	132
10.5.1 可制造性	133
10.5.2 可靠性	133
10.5.3 可维修性	137
10.5.4 环境友好性	138
10.6 事项 5: 风险管理以及平衡功能性、质量和成本要求	138
10.6.1 供应材料和元件的风险管理	138
10.6.2 制造工艺和新技术的风险管理	138
10.6.3 失效模式与效应分析	139
10.6.4 保护措施	139
10.7 事项 6: 质量管理以及改良设计、材料、组件和制造工艺	139
10.7.1 设计缺陷	140
10.7.2 制造工艺引起的缺陷	141
10.8 事项 7: 失效分析和反馈获得的知识	142
习题	143
参考文献	143

第十一章 用于可靠性分析的试验工具·····	145
11.1 光学显微镜·····	145
11.2 扫描电子显微镜·····	145
11.3 X射线能谱仪·····	146
11.4 扫描声学显微镜·····	146
11.5 X射线·····	147
11.6 低周疲劳测试·····	147
11.7 剪切测试·····	148
11.8 湿度和温度试验·····	150
11.9 热冲击和热循环试验·····	151
11.10 云纹干涉法·····	151
习题·····	154
参考文献·····	154
缩写·····	156
习题答案·····	158
中英文名词对照·····	174

第一章 可靠性及其重要性

可靠性工程学正成为一门多学科交叉的科学。早期,可靠性工程学被认为是等同于应用概率理论和统计学的一门学科。而今,可靠性研究已被细分为更小的领域。研究话题可以分为应用方法论、基于数学的方法论(尤其针对大系统可靠性分析)、基于物理的方法论(尤其是针对元件级别的研究)。数学领域中的很多新概念也快速地融入到可靠性工程学当中,包括模糊逻辑^[1]和 Petri 网理论^[2]等。物理可靠性科学也从日益强大的计算机科学中受益良多。计算机科学可以辅助开展精确的复杂结构模拟工作^[3~5]。

可靠性学科更加专业性的趋势为该学科带来了很多益处,如可靠性预测的准确性越来越高。因此,安全裕度需求越来越小^[6]。比起宽广的研究范围,专业化研究方向和趋势也使得研究结果更加可靠。人们甚至可以认为可靠性的专业化使得该学科从哲学范畴转变为一门学科。

然而,专业化趋势也为可靠性学科带来了一些负面影响。最为显著的就是先进的可靠性分析专家只关注他们感兴趣的学科领域,这使得不同学科和研究话题之间的关联性减弱。最为糟糕的事情就是可靠性专家对相邻学科领域的问题一窍不通。例如:他们无法将元件级别的可靠性分析手段和结果全部用于更高等级系统的可靠性分析上来。另一方面,元件级别可靠性需求是源于系统级别需求的。

本书将阐述存在于互连、器件及系统微电子技术中可靠性问题的整体方法。同时探讨该方法在电子和微电子机械系统中的基础科学问题。

参考文献

- [1] C. E. Pelaez and J. B. Bowles, "Applying Fuzzy Cognitive Maps Knowledge Representation to Failure Modes Effects Analysis", Proc. of the IEEE Annual Symposium on Reliability and Maintainability, 1995, 450-456.
- [2] M. Silva and S. Velilla, "Error Detection and Correction on Petri net models of Discrete Events Control Systems", Proc. IEEE Int. Symposium Circuits and Systems, 1985, 921-924.
- [3] IEEE Standard Methodology for Reliability Prediction and Assessment for Electronic Systems and Equipment, #1413-1998, IEEE, 1998.
- [4] IEEE Guide for Selecting and Using Reliability Predictions Based on IEEE 1413, #1413.1-2002, IEEE, 2002.

- [5] R. Darveaux, “Effect of Simulation Methodology on Solder Joint Crack Growth Correlation”, Proc. of the 50th Electronics Components and Technology Conference, Las Vegas, 2000, 1048-1058.
- [6] J. Galloway, L. Li, R. Dunne, and H. Tsubaki, “Analysis of Acceleration Factors Used to Predict BGA Solder Joint Field Life”, Proc. SMTA International, Chicago, 2001, 357-363.

第二章 可靠性的度量

摘要：本章首先明确了可靠性的定义，随后讨论了不同的可靠性模型。经验模型是基于现场数据建立的，易于应用。物理模型表述了某种特定的失效机理，用于预测失效。物理模型既可以通过分析得到，也可以通过计算机模拟得到。其他关于可靠性的有用信息可以通过测试试验样品或整体产品而得到。当实际使用条件下的数据与试验结果有相似的项目时，将试验结果与已有数据进行对比，不失为一个预测实际条件下可靠性行为的好方法。当检测元器件的可靠性时，需同时考虑互连可靠性因素。在很多情况下，实际的元器件并未具有很大的风险，而钎料互连可能会产生一定的风险，需要降低。

本章最后讨论了一些统计分布，尤其是给出了一些关于如何使用韦布尔分布（Weibull distribution）的实用建议。

2.1 可靠性的定义

可靠性有几种不同的定义方式。本书中用到的定义为修改自文献 [1] 的常用的定义：

可靠性是指某一对象在规定条件下服役一定时间的可能性。

上述的定义源自军用手册 MIL-STD-721C^[2]，且适用于不可修复的硬件对象。“对象”可能是元器件、子系统，或者系统。如果对象是软件而非硬件，这个定义会有所不同^[3]。

2.2 经验模型

元器件级可靠性分析准则在军事和航空工业中具有特定的背景。在这些应用领域中使用的元器件的安全性是至关重要的，因而有必要建立特定标准和可靠性预测方法^[4]。这些可靠性预测模型通常是基于大型现场失效数据库得到的。经验模型为特定的元器件或技术提供了通用的估计。虽然是基于经验数据，但依旧考虑了实际使用环境的影响。即在公式中引入反映退化作用的因子诸如温度、电压或者一些其他的应力因子。同时通过所谓的阿伦尼乌斯公式（Arrhenius equation）^[5]考虑温度相关性。阿伦尼乌斯公式最初是在化学反应速率的建模中提出的。

然而，尽管从 20 世纪 70 年代初开始微型器件的失效速率每 3 年降低约

50%^[6]，模型手册平均每6年更新一次，但模型还是变得过于陈旧。最终，1994年美国军用规范和标准改革取消许多军用规范和标准^[7]。加之空军重新明确了美国空军研究实验室（MIL-HDBK-217的筹备活动）的使命，淡化了可靠性，致使政府不再出台更新计划，MIL-HDBK-217逐渐被废弃。

MIL-HDBK-217的废弃并不是经验模型的终止，仍然存在几种类似的标准，如Bellcore可靠性预测程序^[8]、日本电报电话公司（NTT）的程序^[9]、英国电信公司手册^[10]、CNET科技资讯程序^[11]和西门子程序^[12]等。然而根据不同标准预测得到的失效速率可能会互相偏离^[13]。经验模型原则上能够考虑到早期失效和随机失效，而物理模型中却并非如此。经验模型也易于使用。

2.3 物理模型

每一种物理模型^[14,15]都是为了阐述一种特定失效机理而构建的。首先，进行测试试验，分析失效样品，找出失效的根本原因^[16]。随后选择一个可以解释特定失效机理的合适的理论，并用于计算加速因子和推导平均失效时间（MTTF）。这意味着在进行试验和分析根本原因之前，通常不能确定与失效机理相关的加速因子。

物理模型既可以是基于分析模型的，也可以是基于有限元分析（FEA）模拟的。在焊点的疲劳建模中，物理模型得到了最广泛的应用。通过物理模型还可以研究一些其他现象，如电迁移^[17]和一些其他的热引发的失效机理^[18]。物理模型能够研究材料性能、尺寸和现场环境的影响，其问题在于这些模型具有较高的参数灵敏度。许多模型使用的都是指数方程或幂方程。二阶微分方程的通解常为指数形式，该解可通过有限元分析模拟得到。因此，即使是微小的参数值不准确，都可能引起巨大的错误。尽管有这样的事情，给出合理的误差估计却是很罕见的，但也有例外^[19,20]。

另一个可能降低基于物理模型预测的置信水平的因素是这些模型是在严格控制的实验室环境中得到的，在实际的现场环境中获得的可靠性数据少之又少^[21]。目前，依旧存在着某些失效机理无法用现有模型解释的情况。在这些情况下，无法根据物理模型做出预测，物理模型通常用来解释失效现象，因此它对于涉及早期失效和随机失效的情况没有太大意义。过载的情况是个例外，它可以通过应力-强度分析进行研究。此外，评价带有缺陷的子构件的早期失效的方法也在逐步发展中^[22]。

2.4 可靠性信息

正如本章前面所讨论的，评估微系统元器件的可靠性有多种方法。为了评价

上述评估的实用性，应该为此选择一些关键的准则。一个关键的问题在于我们能在多大程度上依赖这些可靠性数据。与实际现场表现无关的可靠性预测是没有价值的。及时获得有用的可靠性数据也是至关重要的。在其使用寿命之后，至少在理论上还应能够确切了解某个元器件的可靠性性能。然而，这种信息未必实用，由于元器件已经失效，无法影响其改造成本。因此，对于绝大多数的工程设计而言，希望获得对对象最佳认识的实时信息。

在图 2.1 中，一些可靠性信息的来源是基于上述两种准则进行判断的：可靠性信息的置信水平和当信息可用时的时间跨度。图 2.1 可能有些主观，但仍相当能说明问题。基于置信水平方法的排序可以进行广泛的讨论。这里所说的“置信水平”是用以描述信息的准确性和可信赖度，不能将其与在数理统计中有确切定义的置信限和置信区间的概念相混淆。

当元器件在设计时，其可靠性可以首先通过类似的项目数据进行表征。如果类似的元器件已经使用了好几年，通过内部现场失效数据库估计所使用元器件的可靠性是有可能的。如果元器件并未在类似的产品中使用过，仍然有可能根据之前讨论过的手册对其可靠性做出一些通用的估计。然而应注意到，这样的信息有可能是基于过时的数据得到的。

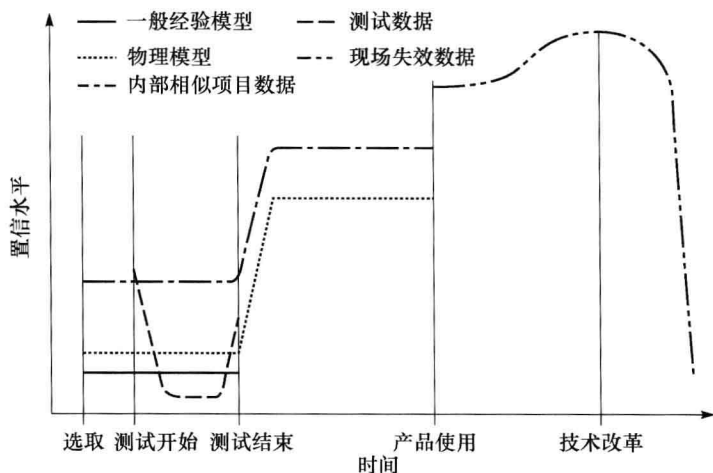


图 2.1 可靠性信息来源：信息的置信水平和信息可用时的时间跨度

如果没有可用的现场数据，也可以通过物理模型得到初步的估计。物理模型是由一个合适的分析模型和/或计算机模拟分析组成的。由于没有校准信息的物理模型可能不是十分精确，因而可以预计到，在置信水平方面，初始阶段的内部现场数据将优于物理预测。但是若通用手册是基于过时的数据，那么物理模型可以得到更精确的寿命预测。

只有进行了可靠性测试之后,才有可能提高可靠性预测的质量。物理模型可以利用测试结果作为输入数据(校准数据),随后即能得到更为精确的元器件寿命预测。此外,当测试结束后,还可以将元器件的测试结果与通过同样测试的相似对象的现场失效数据进行对比。这使得可靠性的预测可以以具体的数据为基础,如果元器件与参考对象的测试表现一致,那么所研究的元器件就有可能表现出相似的现场可靠性行为;如果元器件比拥有现场数据的对象的测试表现差,那么可以预计其现场可靠性性能将会比参照对象差一些,反之亦然。

测试本身也提供了一些有价值的信息。如果测试中出现了早期失效,那么很有可能在现场也会出现早期失效。这些信息十分重要,但除非进行实际的元器件测试,否则很难获得。物理模型通常仅仅预测元器件的失效,因此对于预测早期失效没有什么价值。过载应力情况是个例外,可以通过应力-强度模型进行分析。考虑早期失效时,经验模型更佳。然而,由于目前它们没有经常更新,所以可能会偏于保守,或不包含新的元器件类型的信息。

测试数据曲线的形状类似于可靠性中常用的浴盆曲线(bathtub curve)。早期失效、随机失效和加速失效区域很容易识别。然而,由于监测的参数是置信水平,而非失效率,可以预测曲线的形状会在一定程度上偏离传统的浴盆曲线。在测试环境中早期失效的发生是一个较为可靠的标志,表明在现场环境中有可能会发生实际的早期失效。随着测试的进行和失效的发生,在元器件的寿命期内,实际环境是否也会引发这些失效现象变得更加难以预测。随机失效区域的置信水平值较小,因为只有一小部分元器件有可能在这段时间内发生失效。在失效现象开始发生之后,置信水平预计会再次上升。但是其置信水平要低于早期失效的情况,这是因为其经历了更长的测试时间。因此,在元器件的整个寿命期之内记录失效的情况下是很难预估的。

尽管缺乏早期失效的相关信息,但在很多情况下它们是现场失效的主要原因。这在消费产品中更为突出,因为它们的预期使用寿命都是有限的,因此元器件的损坏是不太可能的。早期失效主要归咎于设计缺陷、制造缺陷和质量问题。在测试的早期失效阶段后,通常会经历一个失效发生较少的阶段,通常称为浴盆曲线中的“随机失效”部分。由于只有一小部分设备会在这个阶段发生失效,观察到的失效现象十分有限,因此置信水平通常比较低。为了得到能够接受的置信水平,应测试数以千计的对象^[23]。然而,这与通常可用的测试对象的数量和有限的测试资源是相冲突的。

正如前面所讨论的,测试中失效阶段的信息可以用做其他预测方法的输入数据。当产品开始在现场应用后,现场失效数据就开始积累。在理想的情况下,现场数据是最为准确的可靠性信息来源。遗憾的是,现场数据对于可靠性工程师而言可能并非经常有用。其原因如下:失效分析常常没有彻底进行,这是由于维修