

可靠性·维修性·保障性丛书

8

电子元器件失效分析及应用

主编 夏泓 副主编 郑鹏洲

KEKAOXING WEIXIUXING BAOZHANGXING
CONGSU

国防工业出版社

RMS



图书在版编目(CIP)数据

电子元器件失效分析及应用/夏泓主编. —北京:国防工业出版社,1998.2

(可靠性·维修性·保障性丛书)

ISBN 7-118-01811-2

I. 电… I. 夏… III. ①电子元件-失效分析②电子器件-失效分析 IV. TN60

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 16939 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

北京市怀柔新华印刷厂

新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 5½ 133 千字

1998 年 2 月第 1 版 1998 年 2 月北京第 1 次印刷

印数:1-5000 册 定价:8.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

可靠性·维修性·保障性丛书

编辑委员会

主任

王统业

副主任

陈丹淮 黄 宁 杨为民

委 员

(按姓氏笔划排序)

公子臣	王产良	孙守魁	朱明让
邱德富	何国伟	张海门	俞 石
高志强	殷鹤龄	屠庆慈	

认真研究先进理论，

密切联系工程实际，

大力推进可靠性系统

工程的发展。

祝《可靠性、维修性、

保障性丛书》出版

丁继高

一九八四年十月二十日。

《可排性、维修性、保障性丛书》的出版,对我国可排性系统工程的发展,必将起到巨大的推动作用。

感谢编者的创造性劳动。我们可以为有自己的工程应用价值极高的这部巨著而自豪

许光
一九八八年八月廿五日

發展可靠性技術
提高裝備質量水平

懷國樑

94.9.30

序 言

树立当代质量观，不断提高产品质量，已成为国民经济和国防科技发展中引人注目的关键问题。可靠性、维修性、保障性是产品效能的决定因素，亦为产品质量的重要内涵。产品不但要性能优越，而且要寿命长、故障少、易维修、易保障，从而使其具有较高的效能及较低的生命周期费用，以达到获取最佳效费比的目的。

可靠性、维修性技术是与国民经济及国防科技密切相关的、亟待发展的新兴学科分支，世界各发达国家均对此予以高度重视，通过可靠性、维修性技术的开发和应用，已在民用产品与武器装备的研制中获取了巨大效益。进入 90 年代以来，欧美各国在可靠性、维修性、保障性的综合化发展方面又取得了新进展，产生了诸如“并行工程”和“可信性技术”的新概念、新方法；因而更进一步地提高了产品质量、缩短了研制周期并节省了成本。与此相比，我国的可靠性、维修性工程起步较晚，无论从发展需求而言或与国外水平相比，均有明显差距。为尽快扭转这一落后局面，必须首先加强对可靠性、维修性工作的管理，大力发展可靠性、维修性技术。同时，必须重视专业人才培养，提高可靠性、维修性设计与管理人员的素质。这对于促进可靠性系统工程的深入发展，更有效地提高装备质量，具有重要的现实意义。为适应这一需求，国防科学技术工业委员会组织了国内这一领域中的知名专家和学者撰写了这套《可靠性·维修性·保障性丛书》，准备分批出版，第一批共六册，今后将陆续出版其它各册。

这套《丛书》系统地引进、吸收了发达国家先进的管理思想和相关技术，并在认真总结我国已取得的成果和经验的基础上，从

技术和管理两方面深入浅出地阐明了有关专业的基本理论、技术及其应用和可靠性系统工程管理等问题,具有系统性和实用性,从而有助于人们全面、系统地了解 and 掌握该项技术的主要内涵。《丛书》中所阐述的可靠性、维修性工程的理论和方法对现代工程系统、武器装备系统和一般民用产品均具有普遍的适用性。

《可靠性·维修性·保障性丛书》是一套理论与工程实践并重的著作,它不仅可作为从事现代化工程系统研制的工程技术人员和管理人员指导工作的参考书;而且也有关工程专业的大学本科生和研究生提供了系列化的参考书。我们相信,这套丛书的出版,将对我国可靠性系统工程的全面、深入发展起到重要的推动和促进作用。

《可靠性·维修性·保障性丛书》

编辑委员会

一九九四年十一月

前 言

本书简述了电子元器件失效分析的作用，介绍了电子元器件失效分析的一般方法及应用。本书可供研制电子设备的元器件使用人员、新型电子元器件的设计和管理人员学习。也可供失效分析专业人员参考。

本书共分 6 章。

第 1 章绪论，阐述电子元器件失效分析工作的发展、失效分析的作用，介绍了本书的结构和特点。

第 2 章首先介绍失效的概念、失效的分类，提出得到失效模式定量判据的一些方法；在论述失效分析的思路和典型程序之后，介绍并评价了元器件失效分析的常用技术、可能的失效原因和机理的假设及分析。

第 3 章以制造工艺复杂、分析难度较大的半导体集成电路的失效分析为重点，列举多个实例，阐述常用电子元器件失效模式和机理的分析方法和过程。

第 4 章从帮助阅读和使用失效分析报告的角度，阐述失效分析报告的内容、格式、处理和应用。

第 5 章介绍与失效分析关系密切、以预防失效发生为目的的电子元器件破坏性物理分析的方法和实例。

第 6 章概述电子元器件失效分析的管理工作。

全书由夏泓主编，郑鹏洲主审。

在本书编写过程中，得到杨为民、何国伟、朱明让、屠庆慈、戴慈庄教授的指导；得到中国空间技术研究院的领导和一些同行专家的支持；在此一并致谢。

本册编写组
一九九六年十二月

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 失效分析的由来与发展	(1)
1.2 失效分析的作用	(2)
1.3 本书的结构与特点	(3)
第 2 章 电子元器件失效分析的一般方法及应用	(5)
2.1 失效的概念	(5)
2.1.1 失效的概念	(5)
2.1.2 失效的分类	(7)
2.1.3 从发展的观点和联系的观点认识失效模式和 机理	(8)
2.1.4 失效模式的定量判据	(10)
2.2 失效分析的思路和典型程序	(12)
2.2.1 失效分析的思路	(13)
2.2.2 整机和元器件失效分析的一些原则	(13)
2.2.3 整机失效分析常用方法	(15)
2.3 元器件失效分析的常用技术	(20)
2.3.1 元器件解焊技术	(20)
2.3.2 元器件失效部位定位技术	(21)
2.4 可能的失效原因和机理的假设及分析	(31)
2.4.1 元器件本质问题	(31)
2.4.2 误筛问题	(33)
2.4.3 误用问题	(34)
2.4.4 意外损伤	(35)
2.5 失效机理验证	(35)
2.6 估计失效模式的发生概率和危害性	(36)
2.6.1 估计失效模式的发生概率	(36)

2.6.2	估计失效模式的危害性	(37)
2.7	进行失效分析的基本条件	(39)
2.7.1	专业人员和分析小组	(39)
2.7.2	失效信息的采集	(40)
2.7.3	设备和环境	(40)
第3章	常用电子元器件失效模式和机理分析	(49)
3.1	半导体集成电路的失效分析	(49)
3.1.1	半导体集成电路的特点	(49)
3.1.2	半导体集成电路的主要失效模式和机理	(77)
3.1.3	半导体集成电路的失效分析程序和方法	(82)
3.1.4	半导体器件失效分析实例	(108)
3.2	电阻器的失效分析	(116)
3.2.1	电阻器的主要失效模式	(116)
3.2.2	电阻器的主要的失效机理	(116)
3.2.3	电阻器的失效分析程序和设备	(117)
3.3	电容器的失效分析	(117)
3.3.1	电容器的主要失效模式	(117)
3.3.2	电容器的主要失效机理	(118)
3.3.3	电容器的失效分析程序和设备	(119)
3.4	引线断裂现象的失效分析	(120)
第4章	失效分析报告	(123)
4.1	失效分析报告内容	(123)
4.2	失效分析报告格式	(126)
4.3	失效分析报告处理和应用	(128)
第5章	破坏性物理分析	(133)
5.1	破坏性物理分析的作用和与失效分析的关系	(133)
5.1.1	破坏性物理分析的作用	(133)
5.1.2	破坏性物理分析与失效分析的关系	(134)
5.2	破坏性物理分析的方法和程序	(135)
5.2.1	DPA 的有关标准和可以预防的失效模式	(135)
5.2.2	DPA 项目的增加和剪裁	(137)
5.2.3	DPA 的等级	(138)
5.2.4	不同工程任务和同一工程不同类型器件选择 DPA	

项目的方式	(138)
5.2.5 DPA 报告格式	(139)
5.3 破坏性物理分析的应用实例	(140)
5.3.1 对高质量等级产品的 DPA	(140)
5.3.2 中法双方共同完成的一些 DPA 工作片断	(142)
第 6 章 电子元器件失效分析的管理	(151)
6.1 失效分析的管理模式	(151)
6.1.1 现行的管理模式	(151)
6.1.2 现行管理模式的讨论	(151)
6.2 失效分析管理工作内容和职责简表	(153)
参考文献	(154)

第1章 绪 论

1.1 失效分析的由来与发展

电子元器件失效分析的由来与发展的动力，是人们对电子产品质量可靠性的要求不断增加。例如，卫星、飞机、舰船和计算机等所用电子元器件质量可靠性是卫星、飞机、舰船和计算机质量可靠性的基础。

卫星和飞机有复杂的电子设备，所采用的元器件与地面设备用元器件的重要区别在于在天上飞行的卫星和飞机的元器件不可更换。卫星用元器件在真空失重、辐射等空间环境下工作，因此卫星用元器件要满足在空间环境下高可靠长寿命的要求。一颗卫星使用元器件的数量在数万至数十万个。为使寿命几年至十几年的卫星工作正常，为使飞机、舰船和计算机等不出现因电子元器件失效造成的灾难性后果，必须开展评价元器件可靠性和提高元器件可靠性的工作。

50年代，以可靠性数学为基础，主要采取统计失效的方法，重点研究统计失效率和加速试验。

60年代，以失效物理为基础，主要采取控制失效的方法，重点是通过在现场失效元器件或加速试验中失效元器件的失效分析，指导控制失效的方法，提出并利用浴盆曲线理论，用高应力筛选试验剔除早期失效。

70年代，以可靠性物理为基础，仍用控制失效的方法，其标志是美国军方推行合格产品清单(QPL)制度。QPL的要点是：制造厂的能力(包括管理、生产、试验、失效分析等)要经过政府或权威机构认证通过；要做多项为剔除缺陷的筛选试验；要做充

分的抽样试验（质量一致性检验）。

80年代，以试验为基础的可靠性保证工作存在的局限性很大，以集成电路为例：由于元器件尺寸缩小，集成度提高，外加应力难于施加到芯片上各个元器件；批量太少不满足抽样要求；即使花费巨额资金，具有相当大数量的抽样样品，评价试验的时间也难以容忍。例如，为评价使用1万余只元器件组装的小型卫星是否满足1年寿命的要求，在元器件抽样样品数量达到23万只时，需要的试验时间仍是一年多。因此80年代起，主要采取预防失效的方法，借助加失效器件的失效分析结果提出预防失效的设计规定。另一方面，元器件使用方在美国军方合格产品清单QPL制度的起点上继续保持使用户元器件可靠性保证机构；承担一些认定试验；提出优选元器件清单（PPL）；制定用户标准；完成破坏性物理分析（DPA）试验；下厂监制和验收；补充筛选；失效分析；辐射试验等。

1.2 失效分析的作用

美军在60年代末到70年代初采用了以失效分析为中心的元器件质量保证计划，通过制造、试验暴露问题，失效分析找出原因，设计、工艺、管理改进，再制造，再试验，再分析，再改进的多次循环，在6~7年间使集成电路的失效率从 $7 \times 10^{-5}/\text{h}$ 降至 $3 \times 10^{-9}/\text{h}$ ，集成电路的失效率降低了4个数量级，成功地实现了“民兵Ⅰ”洲际导弹计划、阿波罗飞船登月计划。

我国的卫星和飞机的研制者，在部分国产元器件质量可靠性水平与卫星、飞机要求相差很大时，开展有特色的元器件质量可靠性保证工作。其中，采用抓住可靠性摸底对比试验、下厂监制、下厂验收、二次筛选和装入整机后五个环节中失效样品失效分析等措施，取得生产和使用全过程中失效件的失效分析，防止有批次性质量问题的元器件装星、装机的效果。采用失效分析和失效分析的预先研究相结合，积极与国内外同行交流，充分利用国内

外已有的成果等措施，取得在较短的时间内掌握较高的失效分析技术的效果。采用针对失效机理提出对策、反馈给供应厂并评估改进效果，取得使元器件固有可靠性得到提高的效果。这些元器件失效分析的措施，为设计寿命为 4 年，实际在轨工作 4 年 8 个月，全部采用国产元器件的东方红二号甲同步通信卫星（第一颗东方红二号甲 1987 年开始在轨道运行）等我国成功发射的 30 多颗卫星做出了贡献。

归纳起来，失效分析的作用是：

(a) 通过失效分析得到改进设计、工艺或应用的理论和思想。

(b) 通过了解引起失效的物理现象得到预测可靠性模型公式。

(c) 为可靠性试验（加速寿命试验、筛选）条件提供理论依据和实际分析手段。

(d) 在处理工程遇到的元器件问题时，为是否要整批不用提供决策依据。

(e) 通过实施失效分析的纠正措施可以提高成品率和可靠性，减小系统试验和运行工作时的故障，得到明显的经济效益。

1.3 本书的结构与特点

本书共分 6 章，可供研制电子设备的元器件使用人员和研制新型电子元器件的设计和管理人员学习，也可供失效分析专业人员参考。本书主要特点是：

针对常用电子元器件的常见病、多发病、致命性疾病，列举事例加以说明。

介绍产生失效分析程序的专题研究过程，以求建立具有针对性的失效分析工作程序，避免知其然不知其所以然的生搬硬套已有的程序，或者犯经验主义的错误。

注重整机故障分析与元器件失效分析的接口和界面关系，介绍整机故障分析和元器件失效分析需要共同遵循的原则和方法。

总结工程实践，提出从工程的角度处理失效元器件的工作内容和程序。

提出并讨论失效模式和机理与质量等级、制造时代的关系，以求从发展的观点和联系的观点认识失效模式和机理。

讨论失效模式的定量判据。

适当介绍失效分析的新技术和新设备。

将破坏性物理分析（第5章）的内容写入本书，是由于对正常（合格）元器件的缺陷分析与失效分析所采用的设备和方法十分一致，并且由于破坏性物理分析对预防失效十分有效，已经引起人们越来越多的注意。

第 2 章 电子元器件失效分析的一般方法及应用

2.1 失效的概念

2.2.1 失效的概念

1. 失效（故障）

failure

产品丧失规定的功能。对可修复产品通常也称故障。

2. 失效模式

failure mode

失效的表现形式。

3. 失效机理

failure mechanism

引起失效的物理、化学变化等内在原因。

4. 误用失效

misuse failure

不按规定条件使用产品而引起的失效。

5. 本质失效

inherent weakness failure

产品在规定的条件下使用，由于产品本身固有的弱点而引起的失效。

6. 早期失效

early failure

产品由于设计制造上的缺陷等原因而发生的失效。