

可靠性技术丛书—12

# 失效分析及其应用

---

塩見 弘

〔日〕 久保陽一 著

高橋治太郎

---



机械工业出版社

本书是日本科技连可靠性技术丛书第12册的中译本。本书共分五章，介绍了失效分析及其应用的基础知识。第一章为绪论；第二章叙述了失效分析的概念、失效机理及物理模型、失效分析程序等；第三章介绍了以电子元器件为中心的典型失效分析方法；第四章为电子系统和机械系统等的失效分析事例；第五章为有关资料。本书内容简明扼要，深入浅出，易于理解。

本书可供在电子和机械等行业从事规划、设计、生产、质量管理、失效分析、维修等各项工作的工程技术人员和管理干部参考，也可供大专院校有关专业师生参考。

日科技連信頼性工学シリーズ 第12巻

### 故障解析とその応用

塩見 弘・久保 陽一・高橋 治太郎 著

日科技連出版社

1984年4月

可靠性技术丛书-12

### 失效分析及其应用

〔日〕塩見 弘・久保 陽一・高橋 治太郎 著

陈祝同 译

顾唯明 石川 校

责任编辑：晏章华 版式设计：张世琴

封面设计：方 芬

机械工业出版社出版（北京东黄城根79号万安里一层）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第117号）

通县电子外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

开本 787×1091<sup>1</sup>/<sub>16</sub> · 印张 8<sup>1</sup>/<sub>4</sub> · 字数 173千字  
1988年12月北京第一版·1988年12月北京第一次印刷

印数 0,001-3,820 · 定价：3.90元

ISBN7-111-01396-4/TH·241

## 译 序

可靠性是衡量机电产品质量的一项重要标准。随着工业技术的发展,产品性能参数日益提高,结构日趋复杂,产品的使用场所更加广泛,环境更为严酷,因而,产品的可靠性问题越来越突出。从50年代起,国外就兴起了可靠性技术的研究。可靠性技术的观点和方法,目前已经成为产品质量保证、安全性研究和产品责任预防措施不可缺少的依据和手段。

日本开展可靠性技术的研究和应用已有近30年的历史。其可靠性技术着重应用在民用工业产品上,尤其是和TQC(全面质量管理)结合,形成实用化的特点,使产品的可靠性有显著提高。日本专家认为高可靠的优质产品的实现,是长期积累的可靠性技术和严格的生产管理制度相结合的结晶,必须强调从设计、制造、管理到使用、维修的全过程的管理。

这套丛书总结了日本推广可靠性技术的经验,通俗易懂,实用性强。它是为指导日本的技术人员和管理人员应用可靠性技术而编写的一套工具书。全书共分15册,包括可靠性、维修性总论、数理基础、设计、试验、数据采集和处理、故障诊断、维修和管理等诸方面内容。

为了配合国内普及和推广可靠性技术,我们决定翻译出版这套丛书,供从事产品设计、试验、管理、维修以及产品开发研究的各种专业人员和各级管理干部借鉴和应用。这套

---

丛书同时也可作为国内高等院校可靠性课程的教材，并且对从事可靠性研究的高等院校教师、科研人员和研究生也有参考价值。丛书由国家机械工业委员会机械科学研究院组织翻译、校审。全套丛书将陆续与读者见面，希望能对各单位开展可靠性活动有所裨益。

由于我们水平有限，难免有不足和谬误之处，欢迎批评指正。

在此，对日本科技连的慷慨赠书表示感谢。

科技司  
国家机械工业委员会机械科学研究院

一九八七年二月

---

## 《可靠性技术丛书》出版序言

1958年日本科技联盟内设立了可靠性研究会,至今已经历了近四分之一世纪的岁月。在这个期间,通过各种研究班和专题讨论会等普及活动,以及由于有关协会、学会及企业的努力,已经发表了大量有关可靠性的应用报告和研究成果。可靠性的观点和方法已经成为质量保证、安全性保证、产品责任预防等不可缺少的依据和手段,因此受到各方面的广泛关注。

日本科技联盟过去所进行的卓有成效的可靠性教育和普及活动,不仅有研究班和专题讨论会,还有关于可靠性的出版活动等。但遗憾的是,有些活动不完全是有组织地进行的。在最近的可靠性活动的高潮中,使人不免稍有动手已晚之感。为了扩大活动的领域,日本科技联盟出版社决定出版《日本科技速可靠性技术丛书全15卷》。

与所谓的可靠性技术专著相比,这套丛书的特点是具有更广泛的基础知识,尽可能简明易懂,讲述比较详尽,以适应从初学者到技术人员,乃至管理干部等各类人员使用的要求。此外,为了使从事计划、设计、生产、质量管理、维修等各项业务,以及电子、电机、机械、精密仪器等各主要行业的人员喜欢阅读本书,执笔者邀请了各方面经验丰富的专家参与筹划。

这套丛书的另一个特点是,为了便于用作现场常备的参考书,并且携带方便,故采用32开本。读者可以分册阅读,

容易安排时间，并掌握其最基础的知识。

希望这套丛书能成为与可靠性有关的工作人员的案头书，  
在今后发展可靠性活动中起到引路的作用。

《日本科技連可靠性技术丛书》

主编

市田 嵩

川崎 茂人

塩見 弘

---

## 前 言

可靠性工程学的领域与许多其他工程学领域有关,可以说它是跨学科的综合性很强的工程学。因此,本书象数理、统计那样是基础的,既有通用性强的部分,就象试验和这里所叙述的失效分析那样,但在其各自的技术领域内也有方法完全不同的情况。这一客观存在,给执笔和对各册进行均衡的编辑工作带来困难。

如果将从书的构成分为通用篇和个别领域篇来规划,便可在某种程度上避免这个问题。这本书是由有关电子设备和电子器件的人员执笔编写的,没有其他领域的人员参加,但这也是本书的不足之处。

在编写本书时,考虑了下列情况:

(1) 从日本可靠性和维修性讨论会、美国可靠性物理讨论会等的动向来看,电子设备,特别是电子器件的失效分析是相当重要的领域。尤其是随着新的半导体集成电路的发展,需要不断开发新的分析技术。在这一领域内采用的新技术,对其他领域的分析及分析的思路也有很大影响。即便从汇集一个领域的事例集的意义上来讲,也应把电子器件的失效分析作为一个重点。

(2) 失效分析中所使用的装置,从物性分析和计量技术方面来看,不是失效分析专用的,并且不是只用于电子设备的。例如,电子显微镜(SEM),不仅用于电子系统、机械系统,也用于一般的科学技术领域,如物理、化学、药学、

---

医学、法医学、考古学等领域。因此，作为分析装置，在电子设备方面可以用，在其他领域里也可以使用。

(3) 与第(2)项有关，作为失效件事后分析的失效分析，也是利用分析装置进行分析的，可是这只不过是显示失效分析的一个方面。要强调FMEA(故障模式影响分析)或FTA(故障树分析)、模拟等技术分析与试验等事前质量保证活动的重要性。另外也收入了如工程管理和设备预防维修、诊断、安全性等相关的问题。

(4) 关于机械系统的失效分析是不充分的，书中列举了断口金相学等有代表性的分析事例。另外，关于机械系统的失效分析，在本丛书第8册《结构可靠性》中，从宇宙和航空的角度出发，详细记载了设计构思和失效分析事例，所以请务必参考该册。再者，对选择和提供有关汽车方面事例的丰田汽车公司的髭谷幸先生深表谢意。

塩見 弘

1984年4月1日

## 缩 写 词 表

|       |                    |
|-------|--------------------|
| DLD   | 黑线缺陷               |
| DPA   | 破坏性物理分析            |
| DSD   | 黑点缺陷               |
| ETA   | 事件树分析              |
| EXACT | 国际电子器件性能测试认证数据交换机构 |
| FMEA  | 故障模式影响分析           |
| FTA   | 故障树分析              |
| MTBF  | 平均无故障工作时间          |
| PDCA  | 质量管理循环, 戴明循环       |
| TQC   | 全面质量管理             |
| tlf   | 失效寿命               |

---

# 目 录

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| 第一章 绪论                      | 1  |
| 第二章 什么是失效分析                 | 3  |
| 2.1 引言                      | 3  |
| 2.2 失效分析的定义                 | 4  |
| 2.2.1 对象——微观分析和宏观分析         | 4  |
| 2.2.2 潜在的和显在的——事前、事中、事后分析   | 7  |
| 2.2.3 机理、发生率、失效的影响——质的和量的分析 | 7  |
| 2.2.4 改进措施和系统的调查研究          | 9  |
| 2.3 失效机理                    | 9  |
| 2.3.1 在现实中发生的失效             | 9  |
| 2.3.2 影响可靠性的主要因素            | 11 |
| 2.3.3 失效机理和各种主要原因           | 11 |
| 2.3.4 失效机理和失效模式             | 14 |
| 2.4 失效物理模型                  | 18 |
| 2.4.1 可逆变化和不可逆变化            | 19 |
| 2.4.2 极限模型和耐久模型             | 19 |
| 2.4.3 能量和变化                 | 20 |
| 2.4.4 应力-强度模型               | 24 |
| 2.4.5 反应论模型                 | 25 |
| 2.4.6 累积损伤模型                | 28 |
| 2.4.7 最弱链环模型                | 29 |
| 2.4.8 束模型                   | 30 |
| 2.4.9 墨菲法则                  | 31 |
| 2.5 失效分析的程序                 | 32 |

---

|                         |                            |           |
|-------------------------|----------------------------|-----------|
| 2.5.1                   | 微观分析的例子 (电子元器件的失效分析) ..... | 32        |
| 2.5.2                   | 宏观分析的例子 (飞机的事后调查) .....    | 36        |
| 2.5.3                   | 分析的实施和费用有效性 .....          | 37        |
| <b>第三章 失效分析方法 .....</b> |                            | <b>40</b> |
| 3.1                     | 引言 .....                   | 40        |
| 3.2                     | 非破坏的方法 .....               | 41        |
| 3.2.1                   | 外观检查 .....                 | 41        |
| 3.2.2                   | 电气试验 .....                 | 43        |
| 3.2.3                   | 断续动作试验 .....               | 46        |
| 3.2.4                   | 内部检查 .....                 | 48        |
| 3.2.5                   | 加 热 .....                  | 49        |
| 3.2.6                   | 化学清洗 .....                 | 51        |
| 3.2.7                   | 放射线摄影检查 .....              | 53        |
| 3.2.8                   | 封装漏泄试验 .....               | 54        |
| 3.2.9                   | 微片检测试验 .....               | 56        |
| 3.2.10                  | 露点试验 .....                 | 57        |
| 3.2.11                  | 表面温度分布测定 .....             | 58        |
| 3.3                     | 半破坏的方法 .....               | 62        |
| 3.3.1                   | 封装的开封和树脂剥离 .....           | 62        |
| 3.3.2                   | 离子污染物的检查 .....             | 67        |
| 3.4                     | 破坏的方法 .....                | 68        |
| 3.4.1                   | 断面制作 .....                 | 69        |
| 3.4.2                   | 化学分析 .....                 | 75        |
| 3.4.3                   | 仪器分析 .....                 | 77        |
| 3.4.4                   | 化学腐蚀 .....                 | 87        |
| 3.4.5                   | 表面形状测定 .....               | 89        |
| 3.4.6                   | 机械破坏试验 .....               | 91        |

|                                  |     |
|----------------------------------|-----|
| 3.5 综合评价和对策.....                 | 92  |
| 第四章 失效分析的事例和应用.....              | 94  |
| 4.1 引言 .....                     | 94  |
| 4.2 电子系统的失效分析.....               | 94  |
| 4.2.1 齐纳二极管的失效分析.....            | 96  |
| 4.2.2 功率晶体管的疲劳寿命.....            | 99  |
| 4.2.3 利用SEM电压衬度像进行失效分析.....      | 102 |
| 4.2.4 利用低能电子射线SEM进行LSI的失效分析..... | 104 |
| 4.2.5 由尘埃引起的开关接点接触不良的分析.....     | 107 |
| 4.2.6 对由硅污染引起的接触不良现象的分析.....     | 109 |
| 4.2.7 短路原因的分析.....               | 110 |
| 4.2.8 断路原因的分析.....               | 114 |
| 4.2.9 特性劣化原因的分析.....             | 123 |
| 4.3 机械系统的失效分析.....               | 130 |
| 4.3.1 利用断口组织显微镜检查法调查断裂事故的原因..... | 130 |
| 4.3.2 准双曲线螺旋锥齿轮的破坏.....          | 134 |
| 4.3.3 打字机零件断裂的分析.....            | 135 |
| 4.4 在工程管理中的应用.....               | 136 |
| 4.4.1 半导体的表面检测技术.....            | 137 |
| 4.4.2 工艺FMEA.....                | 144 |
| 4.4.3 微小部分多层镀层的厚度管理.....         | 146 |
| 4.4.4 液体中微粒子的测定.....             | 150 |
| 4.5 事的分析——设备异常的预报和诊断.....        | 153 |
| 4.5.1 设备诊断的一般方法.....             | 153 |
| 4.5.2 构件发生裂纹的预测.....             | 157 |
| 4.5.3 FMEA 的应用.....              | 158 |

|                                                        |     |
|--------------------------------------------------------|-----|
| 4.6 其他事例 (在安全性方面的应用) .....                             | 158 |
| <b>第五章 资料</b> .....                                    | 161 |
| 5.1 引言 .....                                           | 161 |
| 5.2 失效的定义 .....                                        | 161 |
| 5.3 关于IEC Pub .362 (1971) 可靠性、维修性和可用性的失效数据收集指导概要 ..... | 163 |
| 5.4 MIL-STD-883, T 5003微型电路失效分析的目的和程序概要 .....          | 167 |
| 5.5 EXACT的数据表 .....                                    | 174 |
| 5.6 各种分析装置 .....                                       | 174 |
| 5.7 失效分析用小器具 .....                                     | 175 |
| 5.8 相关标准和文献 .....                                      | 200 |
| <b>参考文献</b> .....                                      | 227 |
| <b>汉英名词对照</b> .....                                    | 231 |
| <b>附表</b> .....                                        | 234 |
| <b>索引</b> .....                                        | 239 |

# 第一章 绪 论

失效分析是质量保证和可靠性保证中不可缺少的技术。当然，因对象不同方法各异，但是不管是在工程中、在实验室、或在现场分析，如果发现不适当的情况、异常和故障，尽管有程度之差，均应根据日常的经验查明其原因以求改善。这时不需要提出PDCA(质量管理循环，又称戴明循环)。

失效分析的方法大致可分为〔1，3〕：

- { 统计分析，数量分析
- { 固有技术分析

对其一一讨论需要很多篇幅，所以在此只进行概念上的解释。

这是因为关于统计分析和数量分析在本丛书的其他分册中有相当深入的叙述，而关于固有技术分析，则需要各技术领域的专门知识，在此不可能进行充分的叙述。

另外，按照应用的阶段，从系统、产品、零件、材料的开发到使用的各个阶段〔2，3〕，失效分析可大致分为：

**事前分析** 例如，应用于设计、开发、制造阶段的预测分析：工程计算、可靠度计算、故障率的评价、FTA、FMEA、ETA等，以及零部件外购阶段的评价和认定等外购管理。

**事中分析** 在制造阶段中的制造、生产设备，使用中产品异常的预测、状态监视维护及状态监视。

**事后分析** 事后通过追究制造、试验和使用等各阶段发生的不良情况和异常情况，以及失效现场分析，根据现象产

生的原因及再现实验提出进一步改善的措施。

最典型的失效分析是事后分析，但从失效分析的目的上看，它是改善和排除失效原因的预防工作，仅是在事后进行“追溯失效分析”，就可靠性在时间轴上的工作来说，应该在失效之前考虑。

由于本书也涉及到DPA（破坏性物理分析）〔4〕，对所谓检查合格的新产品，如果进行剖析也会发现潜在的缺陷或异常，由此可见回溯到时间轴上早期管理的重要性。

本书第二章涉及到失效分析的概念、失效机理、失效物理（可靠性物理）思想方法。其后，在第三章里叙述以电子元器件为中心的典型失效分析方法，例如表面分析技术等。但是，即使分析方法相同，按照其应用的阶段，则有事前、事中、事后的分类方法。第四章叙述电子系统和机械系统等有限的事例。在第五章里记载了有关的资料。

与其说本书是失效分析的全部，莫如说限于记述失效分析和事例的一小部分。读者有可能找不到结合其技术领域的方法或事例，但作者深切期望读者能体会本书的意图，以自己的技术弥补其不足。

## 第二章 什么是失效分析

### 2.1 引言

本章简述失效分析的思想方法、定义和概念，随后叙述进行失效分析时对最基础的失效机理的理解。知道失效机理，并在能采取对策的基础上指出其失效原因的工作就是失效分析。

根据环境、时间和人这些基本因素，引起失效的导火线或“致命伤”是什么，同时知道控制到何种程度才能消除或预防。根据情况，有时由于对机理的理解不深，即使暂时还弄不清失效原因，其分析结果也会成为到现在还没有观测或取得数据的新着眼点。而且，即便知道原因，在目前情况下也有可能尚无适当的、经济合理的解决办法。

但是，不论在什么情况下，也必须重视品质的经济性，因此，要探讨其异常或失效是否在容许的范围内以后再作出决断。如果不容许，则不是用现在的方式，而是要在本质上消除缺陷，这就可能成为开发新技术构想的萌芽。

本章叙述了为理解失效发生方式或在某种程度上表现在数量上，所需要的有代表性的失效发生模型或失效物理模型。其中有：机械应力-强度模型、化学反应速度模型、表示局部和整体功能结合的链模型和束模型等。

本章最后，述及失效分析的一般程序。但是，其具体分析方法将在第三章的失效分析方法中叙述。

## 2.2 失效分析的定义

按照JIS Z 8115 “可靠性术语 (1981年)”规定,失效分析被定义为:

“研究产品潜在的或显在的失效机理、发生率及失效的影响,或为决定改进措施而进行的系统调查研究”。

另外,在MIL STD 2068(“可靠性开发试验”)中,将失效分析简单地定义为:

“失效模式、失效机理和原因(例如软钎料异常、设计的弱点、污染和装配技术)的判别”。(参照第五章的5.4节MIL STD 883)。

### 2.2.1 对象——微观分析和宏观分析

各式各样的对象,如硬件、软件、人的要素等,其复杂性涉及到系统、子系统、装置、部件、组件、器件、零件和材料从高级阶层到低级阶层<sup>[1, 2]</sup>。

#### (1) 微观分析和宏观分析

失效分析无论在思路或方法上都有许多共性。可是,由于对象规模的大小不同,采取的分析方法也有所不同。可作如下考虑:

系统——宏观分析——流行病学的方法——系统的模型、数量分析

零件、材料——微观分析——失效物理或病理学的方法——固有技术分析

这里所说的流行病学,就是以人类集团为对象对特定的疾病或烟草和健康的因果关系等进行观测,并探求共同原因的观点<sup>[5]</sup>。

另一方面,病理学的方法、药理学的方法是深入到微观