

电子故障

分析手册

〔美〕P.L. 马丁

主编

张伦等译
吴常津等校



科学出版社

www.sciencep.com

电子故障分析手册

〔美〕 P. L. 马丁 主编
张 伦 等 译
吴常津 等 校

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本手册是一本有关电子故障分析的综合性参考书,书中详细论述了电子元件和电子系统的故障分析方法。全书分三大部分共 20 章。第一部分介绍电子故障分析的应用,包括电子故障的原因、故障在整个产品寿命期内的分布、故障的消除、质量控制规范、产品的赔偿责任和其他相关问题。第二部分叙述分析方法,包括非破坏性方法(摄影和光学显微术、X 射线和元件的 X 射线照相检查、红外热敏成像法、电子器件的声学微成像故障分析)和破坏性方法(金相学、化学特性的确定、电子与电气特性的测试、扫描电子显微镜和 X 射线分析)。第三部分介绍特殊的电子封装和元件工艺,包括焊接、印制电路部件的故障分析、导线和电缆、开关和继电器、连接技术、元件的故障分析、半导体器件、电源和高压设备。书中对电子元件和电子系统的故障类型、故障机理、查找排除故障的途径及具体步骤,特别是对工艺过程中的故障做了深入细致的介绍。此外,书中还提供了大量实验数据、曲线、图片和典型案例分析,可供在实际工作中参考使用。

本书可作为从事电子元件和电子系统制造、设计和维护使用的广大工程技术人员及实验人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

电子故障分析手册/(美)马丁(Martin, P. L.)主编;张伦等译;吴常津等校. --北京:科学出版社,2005

书名原文:Electronic Failure Analysis Handbook

ISBN 7-03-014505-4

I. 电… II. ①马…②张…③吴… III. ①电子设备-故障诊断-技术手册 IV. TN05-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2004)第 117935 号

责任编辑:肖京涛 刘晓融 / 责任制作:魏 谨

责任印制:刘士平 / 封面设计:天梯艺术

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>

新蕾印刷厂 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005 年 2 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005 年 2 月第一次印刷 印张: 37 1/2

印数: 1---4 000 字数: 736 000

定 价: 69.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

译者序

首先,我们十分高兴能有机会向读者提供这本对电子行业极富实用价值和指导意义的综合性参考手册,同时期望它能对从事电子元件生产制造和使用维护的广大工程技术人员起良好的助手作用。

众所周知,包括半导体器件和微电子器件在内的各种元件的可靠性,对于电子设备和电子系统获得长期稳定的优良性能具有十分重要的意义。为了实现产品的高可靠性,必须对电子元件和电子系统进行全面、深入的故障分析,正确查找出故障原因。如今,电子故障分析已成为元件制造商、电子系统和分系统设计人员以及实验人员十分关心的课题。遗憾的是,有关电子故障分析的论著迄今尚不多见。本书则是国外最新出版的书籍中较有价值的一种。

电子故障分析涉及广泛的专业内容,也是一个较复杂的探索过程。因此,要编写一本内容充实、完整的这一专业领域的书籍绝非某个专家所能胜任,而需要由多位各领域的专家分别撰写,合力完成。本书也是由多位美国各有关公司和研究团体的电子技术专家分别撰写而成。

本书共分三部分,第一部分(1~3章)讨论了电子故障分析的利用,内容包括电子故障原因、故障在整个产品寿命期内的分布、故障的消除、质量控制规范、产品的赔偿责任和其他相关问题。第二部分讨论分析方法,包括两方面的内容:4~7章介绍非破坏性方法,分别讨论了摄影和光学显微术、X射线和元件的X射线照相检查、红外热敏成像法、电子器件的声学微成像故障分析。8~12章介绍破坏性方法,分别讨论了金相学、化学特性的确定、电子与电气特性的测试、扫描电子显微镜和X射线分析。第三部分(13~20章)介绍了特殊的电子封装和元件工艺,内容包括焊接、印制电路部件的故障分析、导线和电缆、开关和继电器、连接技术、元件的故障分析、半导体器件和电源。这部分主要介绍用来形成这些工艺的制造和处理过程、典型的故障类型和机理、可采用的故障分析方法和应用注意事项。叙述中列举了许多故障分析的典型案例。无疑,这对于从事实际工作的广大工程技术人员将起到良好的提示和借鉴作用。

鉴于在产品寿命的早期阶段主动进行故障分析能够提高可靠性并增加利润空间,故分析人员还应熟悉了解保险和法律方面的一些事务。因此,书中专辟一章叙述这方面的内容。

纵观全书,可以发现,本书最突出的特点是具有很强的实用性。由于各章作者均为该领域拥有丰富实践经验的专家学者,因而在内容的编排、取舍,叙述重点和进行故障分析的途径等都有极强的针对性,许多内容(工艺过程、图片、曲线和数据)均是来自实践的经验总结甚至“诀窍”,因而是一些难得的宝贵资料。其次,书中引入的大量清晰的实际故障显微放大照片,提供了故障的直观图像,有利于加深对正文的理解。此

外,也需指出,由于故障分析采用的手段在某些方面具有共通性,因此,书中某些章节的叙述内容有一些重复或类似,这是在所难免的。但这种情况在全书中所占的比重很小,既不显得累赘,还能保证各章内容的独立性。读者在熟悉掌握书中所述各种故障机理之后,便不难针对具体故障类型采用相应的适当方法进行分析,查出并排除各种故障,从而为提高电子元件和电子系统产品的可靠性和质量探寻出最佳有效途径。

本书翻译的分工如下:张伦(1~9,11,12,20章)、王晦光(15、16章)、王云祥(17、19章)、黎安尧(18章)、钟将(10章)、王宇新(13章)、李勇(14章)。

吴常津博士仔细地校订了全书的绝大部分章节,张伦和李镇远校对了部分章节,焊接专家陈沛生教授校订了第3章。

鉴于本书涉及的专业内容十分广泛,译者水平有限,译文中不当和疏漏之处在所难免,切望读者批评指正。

张 伦

前 言

迅速发展的半导体和微电子故障分析领域已在可靠性和故障分析国际会议上占支配地位。这是非常容易理解的,因为微电子学行业率先将故障分析融合到它的企业文化中。这种融合导致了过去数十年间微电子产品可靠性的极大提高。这一成功引起了与电子学相关的其他行业的纷纷效仿。如今,电子故障分析(EFA)已成为元件供应商、系统和分系统设计人员,制造商以及电力部门等的研发与制造过程的一部分。尽管电子和电气故障分析已得到了广泛应用,但对于那些不属于微电子行业的文献资料大部分都没有得到足够的重视。《电子故障分析手册》一书便是在电子和电气封装、元件及组件等方面来说明这一具有广泛基础且被忽视的题材的一个尝试。

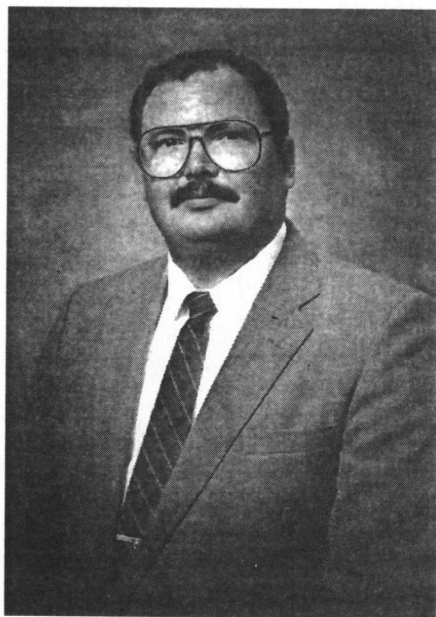
电气和电子器件故障以及故障分析贯穿着产品的整个寿命周期。随着产品的技术进步和市场的日趋成熟,这些故障及其相关的分析的费用将变得更加昂贵。从事电子行业的人们正在意识到在产品寿命周期的早期阶段主动进行故障分析能够提高可靠性并且增加净利润空间。现在,仍有一些制造商尚未迅速跟上形势。这便为故障分析人员开辟了 in 保险和法律方面提供服务的市场。正如对微电子学一样,这些方面在手册中都做了论述,但不是重点。

我始终认为,有关电子器件故障分析的内容不难汇集成三卷本,但市场的压力迫使我们只能出单卷本。因此,作为主编,必须对手册的重点和内容作出艰难的决定。为了方便读者,本手册分成三个部分。第一部分是占手册篇幅最少的部分,讨论了电子器件故障分析的利用。所包括的内容有电子故障原因简介、故障在整个产品寿命期的分布、故障的消除、质量控制规范、产品的赔偿责任和其他相关问题。第二部分讨论分析方法,包括两部分:4~7 章介绍非破坏性方法,而 8~12 章则与破坏性方法有关。重点放在这些方法在电子材料上的应用及其最佳化。第三部分是关于特殊的电子封装和元件工艺。在尽可能的情况下,向读者介绍用来形成这些工艺的制造材料 and 处理过程、典型的故障类型和机理、可采用的故障分析方法和应用注意事项。这部分的特点是有许多章对故障分析的典型案例进行了研究。

《电子故障分析手册》是一本有关电子故障分析的综合性参考书。我深信,它是对“电子封装和互连丛书(Electronic Packaging and Interconnection Series)”的有价值的补充和姊妹篇。如果没有许多重点章节作者的艰苦工作,这本手册便不可能问世。这些科学家、工程师和工艺师中的每一位都是某一特定领域的公认专家。将他们的贡献集中到一起,构成了电子器件故障分析领域内容充实广泛的研究成果。

P. L. 马丁

编者简介



P. L. 马丁现就职于国家技术系统公司(NTS)萨克拉门托分部,任工程可靠性分析与加工处理部门主管一职,主要负责分部所有电子故障分析的事务。他丰富的经验来源于在加利福尼亚美国空军麦克莱伦基地从事了十几年不同环境下电子故障测试的工作。马丁在麦克莱伦基地协助美国空军修理部门的工艺过程开发和质量控制(包括电子设备、雷达、发动机和电子附件等);协助飞行器灾难(坠毁)研究及美国空军特别调查办公室关于承包商欺骗的调查。马丁在承包商欺骗案中以一个内行的身份给予了专业的证词,他还以美国空军赖特实验室的 WL-TR-95-4004 顾问的身份向美国国会议员和美国空军司令、参谋长等提出他所发现的关于空军武器系统的问题。他还撰写了《飞行器灾祸调查手册——电子部件》等书。

译校人员名单

翻译人员 张 伦 王晦光 王云祥 黎安尧
钟 将 王宇新 李 勇

校订人员 吴常津 张 伦 李镇远 陈沛生

目 录

第 1 部分 电子故障分析简介	1
第 1 章 电子元件可靠性综述	3
1.1 概 述	3
1.2 故障类型	3
1.3 引起电子元件和系统故障的环境作用	5
1.4 影响电子故障的其他因素	9
1.5 电子元件的故障形式和机理	10
1.6 与静止状态相关的故障机理	14
1.7 确定电子故障的原因	16
1.8 统计分布	21
参考文献	24
第 2 章 电子系统可靠性评述	25
2.1 概 述	25
2.2 什么是可靠性	25
2.3 故障的报告、分析和改进体系	26
2.4 质量检验和检查	27
2.5 环境合格性试验	30
2.6 环境应力筛选	31
2.7 强化试验	35
2.8 设备的安全性	35
2.9 涉及安全性和可靠性的典型案例研究	36
参考文献	41
第 3 章 产品的赔偿责任	42
3.1 概 述	42
3.2 产品的赔偿责任法	43
3.3 产品赔偿责任案件的立案	49
3.4 产品赔偿责任的代价	50
3.5 电子故障分析和庭审程序	51
3.6 部分法律案例剖析	53
3.7 名词解释	55

参考文献	56
补充读物	57
第 2 部分 电子故障分析技术	59
第 4 章 摄影和光学显微术	61
4.1 概 述	61
4.2 评 述	61
4.3 影像记录过程	62
4.4 影像记录设备	72
4.5 透镜和显微镜基础知识	83
4.6 光学显微术	87
参考文献	96
第 5 章 X 射线和元件的 X 射线照相检查	97
5.1 概 述	97
5.2 X 射线的发展史	98
5.3 X 射线照相术	104
5.4 X 射线照相的过程	112
5.5 典型案例研究	121
参考文献	127
第 6 章 红外热敏成像法	128
6.1 概述——为什么要进行热敏成像	128
6.2 热、热传递和温度	129
6.3 红外线的基础知识	133
6.4 热成像仪器是如何工作的	137
6.5 用于故障分析的红外热敏成像技术	145
6.6 典型案例研究	148
第 7 章 电子器件的声学微成像故障分析	158
7.1 概 述	158
7.2 方 法	159
7.3 成像型式	161
7.4 典型案例研究	164
7.5 结 论	172
参考文献	173
推荐阅读材料	174

第 8 章 金相学	175
8.1 概 述	175
8.2 历史回顾	175
8.3 设定目标	176
8.4 样品剥离	176
8.5 灌 封	178
8.6 中间样品制备	184
8.7 研 磨	184
8.8 抛 光	188
8.9 刻 蚀	194
8.10 检查方法	197
8.11 适于特殊应用场合的优化研磨和抛光技术	199
8.12 人工痕迹	209
参考文献	213
第 9 章 化学特性的确定	214
9.1 概 述	214
9.2 原子波谱学的技术和应用	215
9.3 选择适当的原子波谱方法	218
9.4 傅里叶变换式红外显微波谱方法评述	222
9.5 热分析	223
参考文献	228
推荐阅读材料	228
第 10 章 电子与电气特性的测试	229
10.1 概 述	229
10.2 电气特性的标准测试方法	229
10.3 故障分析的电气特性测试	230
10.4 故障分析电气特性测试的其他内容	230
10.5 报告的故障类型和背景资料	232
10.6 故障分析电测试的一般方法	234
10.7 非半导体器件电气特性的测试	243
10.8 半导体器件电气特性的测试	248
10.9 故障分析电气特性测试的特殊测试方法	256
10.10 故障分析电气特性测试的注意事项	260
推荐阅读材料	262

第 11 章 扫描电子显微镜和 X 射线分析	263
11.1 显微镜的历史	263
11.2 光学透射扫描显微镜的比较	265
11.3 扫描电子显微镜的基本原理	269
11.4 成像方式	272
11.5 利用扫描电子显微镜的 X 射线谱测量	286
参考文献	295
第 12 章 其他配套技术	296
12.1 封装开启技术	296
12.2 去密封和去灌注	297
12.3 清洁问题	299
12.4 微粒碰撞噪声的检测测试	300
12.5 密封性测试	301
12.6 残留气体分析	304
12.7 截断面分析	306
参考文献	307
第 3 部分 特殊工艺中的电子故障分析	309
第 13 章 焊 接	311
13.1 概 述	311
13.2 焊料合金	312
13.3 焊接处理和标准	319
13.4 连接类型和设计	327
13.5 检验、测试和表征方法	331
13.6 可靠性问题	340
13.7 故障机理	345
13.8 典型案例研究	352
参考文献	355
第 14 章 印制线路组件的故障分析	358
14.1 概 述	358
14.2 印制线路板的结构和制造	358
14.3 印制线路组件故障的特征	364
14.4 故障分析步骤	371
14.5 确定印制线路组件的故障根源和事件发生顺序	377
参考文献	381

第 15 章 导线和电缆	383
15.1 概 述	383
15.2 导线的类型、结构和特性	384
15.3 铜线的特性	384
15.4 连接线的故障机理和分析方法	388
15.5 样品的制备:晶粒结构	394
15.6 典型案例研究	395
参考文献	401
第 16 章 开关和继电器	402
16.1 概 述	402
16.2 开 关	402
16.3 继电器	406
16.4 断路器	409
16.5 触 点	410
16.6 故障特性	411
16.7 故障分析步骤	418
参考文献	423
推荐阅读材料	423
第 17 章 连接技术	424
17.1 概 述	424
17.2 连接器技术规范	427
17.3 典型电源连接器的热模型	444
17.4 连接器与导线的连接	445
17.5 连接器标准	447
17.6 连接器故障	450
17.7 电 击	458
17.8 典型案例研究	460
17.9 结束语	476
参考文献	477
第 18 章 元件的故障分析	478
18.1 概 述	478
18.2 元件故障分析使用的设备与技术	484
18.3 元件故障分析的目的	485
18.4 电容器故障	485
18.5 分立半导体器件和集成电路	494

目 录

18.6 电感器和变压器	501
18.7 电阻器的故障	505
18.8 其他无源元件	511
参考文献	515
插图来源	516
推荐阅读材料	516
第 19 章 半导体器件	517
19.1 概 述	517
19.2 半导体器件故障分析的基本步骤	517
19.3 故障分析的几个阶段	519
19.4 故障分析报告	528
19.5 典型案例研究	528
参考文献	548
推荐阅读材料	548
第 20 章 电源和高压设备	549
20.1 概 述	549
20.2 背景材料	550
20.3 故障的基本知识	555
20.4 电源和高压封装	560
20.5 设备类别和相关的故障机理	564
20.6 评估鉴定的关键因素	570
参考文献	578
名词解释	580



第1部分

电子故障分析简介

第 1 章 电子元件可靠性综述

D. D. 丹尼斯
IIT 研究所(IITRI)

1.1 概 述

故障分析是确定故障原因、搜集和分析数据以及总结出消除引起特定器件或系统失效的故障机理的过程。故障可能在整个产品的寿命期内出现。故障可能来源于设计、工艺、元件和制造过程、超负荷使用以及日常维护。表 1.1 列出影响可靠性的各种因素。

故障分析人员只掌握有限的故障原因的信息是极为普遍的情况。在故障分析过程中,不仅涉及故障原因的各种细节对分析人员有很大帮助,所完成的分析的结果也是非常有价值的。如第 2 章中所述,故障报告、分析和纠正系统(FRACAS)已被许多机构用来追踪与其产品相关的故障。FRACAS 可以提供进行全面而精确故障分析所必须的有价值信息。在无法获得数据的情况下,分析人员可能起“私人侦探”的作用,以便确定与故障原因有关的细节。全面而精确的故障分析允许设计人员和用户采取对问题进行弥补所必需的行动。纠正改进之后所节省的成本一般足以负担故障分析的费用,这种成本节约带来的效益可能因避免问题的再次出现而成倍增加。

表 1.1 影响可靠性的各种因素的分布^[1]

影响因素	故障百分比
日常维护	17
硬件可靠性	16
反复测试	28
设计	21
质量	18

1.2 故障类型

电子产品的故障基本上可以分为三大类,即早期失效、由有关事件引发的故障和耗损报废。造成早期失效故障(亦称为早期失效率)的原因是在制造或组装过程中存在着缺陷。有效使用寿命期的特点是由随机发生的事件引发的失效率呈现的相对平