



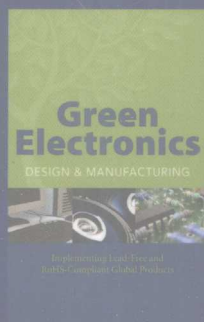
绿色电子 —— 产品设计与制造

Green Electronics Design and Manufacturing

【美】Sammy G. Shina 著

张永平等译

宋顺达 丁志俊 审校





国际先进工业技术译丛

绿色电子 —— 产品设计与制造

Green Electronics Design and Manufacturing

【美】Sammy G. Shina 著

张永平等译

宋顺达 丁志俊 审校

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

绿色电子: 产品设计与制造 / (美) 希娜 (Shina, S. G.)
著; 张永平等译. —北京: 人民邮电出版社, 2009.9
(国际先进工业技术译丛)
ISBN 978-7-115-20836-1

I. 绿… II. ①希…②张… III. ①电子产品—设计—无
污染技术②电子产品—生产工艺—无污染技术 IV. TN0

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第068707号

版 权 声 明

Sammy G. Shina

Green Electronics Design and Manufacturing

ISBN: 0-07-149594-0

Copyright © 2008 by The McGraw-Hill Companies, Inc.

Original language published by The McGraw-Hill Companies, Inc. All rights reserved. No part of this publication may be reproduced or distributed by any means, or stored in a database or retrieval system, without the prior written permission of the publisher.

Simplified Chinese translation edition jointly published by McGraw-Hill Education (Asia) Co. and Posts & Telecommunications Press.

本书中文简体字翻译版由人民邮电出版社和美国麦格劳-希尔教育(亚洲)出版公司合作出版。未经出版者预先书面许可, 不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

本书封底贴有 McGraw-Hill 公司激光防伪标签, 无标签者不得销售。

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2008-5174 号

国际先进工业技术译丛

绿色电子——产品设计与制造

-
- ◆ 著 [美] Sammy G. Shina
 - 译 张永平 等
 - 审 校 宋顺达 丁志俊
 - 责任编辑 姚予疆 韦 毅
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
 - 邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
 - 网址 <http://www.ptpress.com.cn>
 - 北京隆昌伟业印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
 - 印张: 15.75
 - 字数: 367千字 2009年9月第1版
 - 印数: 1-3500册 2009年9月北京第1次印刷

著作权合同登记号 图字: 01-2008-5174 号

ISBN 978-7-115-20836-1/TN

定价: 48.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

内 容 提 要

本书是一本有关绿色电子产品制造的著作，为成功设计和制造环境友好型电子产品提供指导性的内容，包括在整个电子供应链上应该如何掌握符合全球环保法规的策略、设计、测试及实现等问题。本书介绍了全球环境法规及其对制造和设计工艺的影响，阐述了在电子产品的设计和制造过程中使用绿色环保材料和工艺的相关问题，描述了着手实施绿色电子产品和工艺的原则和所需的工具，介绍了测试和分析绿色电子产品的方法。本书结合具体的实例，通过缜密的论证、翔实的数据和实验结果，详细说明了从含铅组装到无铅组装这一变革过程中所需要经历的不同阶段，以及在不同阶段所应采取的措施，为成功完成向绿色电子产品和工艺的转换提供指导。

本书可供电子制造业及封装业中电子电气产品和印制电路板的工程设计、产品设计方面的工程技术人员、系统工程师等有关人员阅读参考，也可作为高等院校电子设计与制造专业师生的参考资料。

丛 书 前 言

改革开放 30 年来，我国工业得到了飞速发展，在短短 30 年的时间内完成了发达国家上百年的工业化发展历程，建立了相对完整的工业体系。我国已成为全球制造业基地，中国模式备受世人瞩目。在信息技术快速发展以及对节能减排和环境保护日益重视的今天，为了促进我国工业由大变强的发展，我们必须走新型工业化道路，解决工业化过程中面临的一些突出问题，比如如何进一步增强自主创新能力，如何完善对工业行业的管理，如何在一些核心技术和关键技术上有更大的突破，如何促进高新技术与传统产业的结合，等等。

为配合我国工业领域设备改造，推动我国工业领域与国际间、行业内的交流与发展，加速工业生产及制造技术的进步和设备更新换代步伐，我们精选了国外有关现代工业技术的部分图书，翻译出版了“国际先进工业技术译丛”。本丛书内容主要涉及新型能源开发与利用、绿色设计与制造、资源节约和环境保护、能效管理等方面。这些图书的原著均由英美等国的知名出版集团出版，汇集了多个国家著名专家学者在工业技术领域的重要研究成果，集中反映了当前工业领域的先进理念、方法和技术，对于解决我国当前工业发展过程中的一些关键问题和突出问题具有较大的参考价值。

现代工业技术呈现开放性、智能化、信息化与网络化的特点，融合了自动化技术、信息技术、现代控制技术、网络技术、先进制造技术、环境保护技术及现代管理理论和方法等诸多学科的先进技术，需要各学科的专家及工程技术人员通力合作，从而实现多学科专业知识与系统的集成，形成现代工业发展的手段和模式。因此，“国际先进工业技术译丛”在选编时，以促进信息化和工业化融合、技术创新和节能减排为原则，紧密结合我国国情，力求突出实用性和先进性，希望有助于解决我国工业技术应用中的一些实际问题，促进我国工业技术及管理模式的变革，提高我国工业企业的技术创新能力。

“国际先进工业技术译丛”的翻译和审定工作主要由国内相关领域的知名专家学者和专业人士承担，力求准确真实地反映原著内容并便于国内读者理解和接受。本丛书致力于“传播国际先进工业生产管理理念，推广工业领域重大技术创新成果”，以便使我国工业领域内的相关人员能够对现代工业方面的知识和技术有更深入和全面的了解，并在我国现代化工业的建设中加以应用。今后我们将继续加强对国际上工业技术领域优秀图书的翻译和出版工作，欢迎专家学者以及广大读者提出宝贵意见和建议。

译者序

当前，绿色环保已成为我国社会可持续发展的主流意识之一，“环境、健康、安全”也已经成为世界各国工业制造的主要评价指标。过去那种一味追求低成本、高可靠性而不计环境后果的生产方式正在发生根本的变化。为了顺应环保的要求，各国纷纷出台了相应的法规，用以限制危害环境的物质的使用。本书中所依据欧盟的 RoHS 指令和 WEEE 法规就是出于这样的目的而制定的。我国为了推行可持续发展战略，针对制造业也相继出台了类似的法规，对使用危害环境的物质进行严格限制，这些措施充分反映了我国在治理环境问题上的决心。

电子制造业是我国当前规模较大的产业。随着技术的不断发展，电子产品的更新换代速度非常快。这种快速的更新带来的后果是产生大量的电子废弃物，这些废弃物中含有很多污染环境的物质，其中影响最为严重的是重金属——铅，这类重金属会渗透到土壤和水源中，影响到植物的生长和人们的生活饮用水安全，从而造成对人类健康的影响。这种影响对于我们这样一个电子制造业相对集中的国家而言尤为严重。在这样的现实面前，将采取怎样的积极应对措施，从源头上杜绝这类污染的发生，是我们每个人需要深入思考的问题。本书所着重阐述的绿色电子制造理念及技术可成为回答这个问题的有力依据。

然而，绿色电子制造带给企业的是成本上的增加、可靠性下降、利润的减少，企业的利益受到了一定程度的冲击。在环境与利益之间如何取舍，每个制造企业必须做出选择。本书从当前存在的铅污染问题入手，结合具体的实例，详细介绍了从含铅组装到无铅组装这一变革过程中所需要经历的不同阶段，并且介绍了在不同阶段所应采取的措施，同时还通过令人信服的数据，说明了在这种重大的变革面前，企业产品的可靠性仍可达到先前的水平。这些都为我们的选择提供了理论的依据和实践的保障。本书的多位作者都是在电子制造行业中的权威专家，这些专家都有着深厚的理论功底和丰富的实践经验。本书缜密的论证、翔实的数据和试验结果，为电子制造行业提供了电路板由锡铅组装到无铅组装的可靠依据。从书中可以看出，向绿色环保的无铅制造过渡实质上带给企业的是一种企业文化的提升，这种文化提升所带来的长远利益是无法估量的，同时也符合当前我们国家推行的可持续发展战略。

本书翻译完成之时，恰逢阳春三月，桃花盛开。碧蓝的天空映衬着粉红的桃花，使得这个春天格外地让人心旷神怡。虽然身居城市，却感觉到只有在乡村才有的清新空气，所有的一切似乎都与往日不同。绿色和环保除了给人们带来美好的环境之外，还带给人们愉悦的心情。这是全社会共同努力营造绿色家园的结果，也是贯彻可持续发展战略的伟大成果。

本书的翻译是集体合作的结果。其中第 1、3 章由宋顺达翻译，第 2、10 章由刘锋翻译，

第 7、8 章由李化健翻译，第 4、5、6、9 章的翻译及全文的统稿工作由张永平完成。在整个翻译过程中，全体翻译人员共同努力，克服了诸多困难，在较短的时间内完成了译文的初稿。此后，译文几经审阅，大家为此付出了很多心血，希望能够完整地表达原著作者的本意。在翻译过程中，丁志俊老师对这项工作予以高度的重视，并对译文作了细致的审定。翻译小组的同行们夜以继日地工作，付出了艰辛的劳动，在此还要感谢参与文稿整理工作的裴卫芳、刘晶、郑建杰、于丹蕾和于云，感谢卢云侠、安秀芹、李智玲、方向丽、高连石和张贺提供的帮助。译者衷心希望这样一部具有指导意义的著作能够为我国的电子制造企业提供帮助，同时也希望在本译著出版后，读者在阅读的同时，能够及时指出其中的不足，并反馈至本书责任编辑的电子邮箱 weiyi@ptpress.com.cn，我们将不胜感激。

张永平
2009 年 3 月

作者简介

Sammy G. Shina, 美国马萨诸塞大学洛厄尔分校机械工程学教授, 曾为宾夕法尼亚大学工学管理硕士(EXMSE)课程和加州大学 Irvine 分校授课。他曾担任过制造工程师学会(SME)机器人技术/可调加工系统(FMS)组的主席, 是马萨诸塞州质量奖的发起人。他是 1999 年成立的新英格兰无铅联合会的创始人。该联合会由 30 多个从事电子产品及其供应链的公司组成, 由减少使用有毒物质协会(TURI)、美国国家环境保护局(EPA)及联合会的成员公司出资, 积极开展针对无铅及符合 RoHS 指令的材料和工艺的研究、测试及评估活动。该联合会已发表了 40 余篇论文, 其中一些被翻译成亚洲一些国家的语言, 并在 2006 年 5 月获得了 EPA 的区域性环境贡献奖。Shina 博士还是两本关于并行工程和六西格玛畅销书的作者, 他创作了本书的两章, 并在其研究领域内写了 100 余篇技术出版物。

Shina 博士是一位国际顾问、培训师, 他还组织了无铅、质量、六西格玛、实验设计以及项目管理、技术供应链、产品设计与开发和电子制造与自动化等主题研讨会。他在高科技公司从事了 22 年的新产品和最尖端制造技术的开发。他是并行产品/工艺设计、机械 CAD 设计与测试和摩托罗拉六西格玛学会等主题的 HP 高级研讨会发言人。他获得了美国麻省理工学院电子工程与工业管理的理学学士学位、伍斯特理工学院的计算机技术理学硕士学位和塔夫斯大学机械工程理学博士学位, 现定居在美国马萨诸塞州弗雷明汉市。

前言

随着全球化市场内各公司竞争的加剧，绿色电子产品的设计与制造变得越发重要。因为消费者追求的不仅仅是高质量、低成本的产品，同时也希望自己能够成为好的环境保护主义者，即要求消耗最少的能源，将排放到空气中、江河湖海中以及大地上的有害物质降到最低限度。消费者一致表示，他们愿意为环保友好型和“绿色”产品支付额外的费用。大量的调查数据表明，如果所购买的产品是绿色环保的，那么消费者将乐于支付 10% 的超额费用。有关国家的政府机构和官员已对这种公众运动做出回应，并开始着手制定一系列的关于禁用和限用某些有害物质和化学制品的强制性法规。

对绿色产品强制性要求的推动力最初来自于欧洲和日本。上述两地区的共同特点是人口稠密和土地资源有限，这种情况在日本尤为严重。此外，这些国家本土的环保运动还可以被用作有效的竞争武器，或者是贸易壁垒的来源，同时也是民族主义者和地区保护主义者引以为傲的资本。实际上，2006 年 7 月颁布实施的 RoHS 指令，就是欧盟为强制要求禁止某些有害金属和化学物质的使用而做出的一个里程碑式的决议。此后，所有在欧盟市场出售的产品都被强制要求必须符合 RoHS 指令。电子工业领域给予 RoHS 指令的首要关注是由铅引发的，铅是该指令的禁用物质之一，但是之前所有的电子元件都是使用含铅焊料实现连接的。RoHS 指令迅速成为欧盟所有国家和行业向绿色产品转变的战斗号角，通过在设计 and 制造工艺中去除其他有害金属和化学物质，从而实现向绿色产品的转变。

在美国，绿色设计与制造的进展相对较慢，这主要是因为美国人认为自己就是现代电子行业的起源国，所以不希望太过仓促地将自身推入环保运动中。按照美国电子工业领域的观点，必须要经过很长的时间，才能使电子产品达到较高的质量和可靠性水平，快速地转变到替代材料和工艺，将不可避免地危及电子产品质量当前的成功和可靠阶段。

美国公司最初的响应是反对有害物质禁用指令的提案，他们或者指出这些材料并不具有如 RoHS 指令所言的危害性，或者指出替代材料也同样糟糕。对付绿色“怪物”的另一种选择可以是回收非环保材料，或是更好地保护处理这些材料的工人。

美国的通俗文化中也融入了对环保问题的探讨，其电影作品中高度关注有害物质对健康的危害，如 1983 年摄制的以犹他州克尔—麦吉公司核材料泄漏问题处理为背景的《丝克伍事件 (Silkwood)》，1998 年摄制的发生于马萨诸塞州沃本、以反对 WR Grace 公司事件为背景的《公民行动 (Civil action)》，以及 2000 年摄制的以加州某小镇反对太平洋煤气电力公司的斗争为背景的《永不妥协 (Erin Brockovich)》等。所有这些影片，都反映了人们如何以自然

的、感性的和有效的方式，反对有害物质对健康的威胁。此外，一些新的合成词，如全球气候变暖、“碳足迹（carbon footprint）”等，已成功地融入文化，并成为一种环保专用的流行语言规范或“通用语”。毫无疑问，没有任何一家美国公司希望自己被看作是支持和拥护人类健康或环境的反对者。

目前绿色设计与制造的进展状况是，美国的各公司已准备好实施环保产品和工艺，而且实际上也期待能够最大限度地减少能源和有害物质的使用。为实现上述目的，他们通过行业联合会和行业协会等形式充实各自的知识库，同时确保自己的公司在向下一代目标材料的转变中保持领先。该项工作一个最好的例证，就是美国国家电子制造商协会（或称为 iNEMI），为去除印制电路板压合时使用的卤素所做的努力。就绿色设计与制造未来的发展方向而言，这将是一个很好的范例。

本书的结构

本书旨在向设计工程师、生产工程师、质量工程师和工艺工程师及其管理者介绍并使他们了解在电子产品的设计和制造过程中使用绿色环保材料和工艺的相关问题，以及解决这些问题的办法。这些都是基于作者在过去的 10 年中在绿色环保材料、工艺及其相应技巧方面的研究、实践、咨询和教学所积累的经验。在那段时间里，我和许多工程师一样，遇到了绿色环保材料方面常见的限制：禁令太过专制，难以实现，只适用于愿意在绿色环保材料方面投入大量精力和研究的大型企业，实施成本昂贵，仅用于生产而非设计等。他们不断促使我将绿色环保材料应用于他们感兴趣的领域内，并给我带来许多复杂的绿色设计和生产应用实例以及需要解决的问题。同时，我也加入了许多公司和组织，他们的工程师和管理人员在传统设计和制造过程中使用了新颖且富有创意的绿色环保方法和材料。本书中许多实例与案例研究就是基于这些经验。

本书材料的一个重要来源就是马萨诸塞无铅联合会的工作成果，这个联合会是我于 1999 年创立的，联合会由起初的 2 家公司很快扩大到 8 家公司。后来，来自新英格兰其他州的公司也陆续加入，所以我们将名称改为新英格兰无铅联合会。本书的所有章节均由参加联合会的公司的杰出工程师及专业人员撰稿。

参加联合会的公司规模、领域、产品类型和策略各不相同。但是，他们在跨学科团队合作环境中，有效使用本书提到的工具和方法并通过进行修正来满足实际需要，以成功地实施绿色设计和制造的方法是相似的。

我认为，绿色设计和制造带来的最为重要的影响是在新产品的早期设计阶段使用本书所提到的技术和方法。首先，新产品制造工艺就应以绿色环保为目标。这样就会使设计工程师充分认识到设计和确定可以应用绿色环保材料和工艺来制造低成本和低能耗产品的重要性。当公司的制造和供应链完全承诺并已经尝试采用绿色环保材料和工艺进行产品制造时，绿色产品制造就会达到理想的境地。公司及其供应商应该对与绿色环保产品相关的成本、品质和可靠性有充分认识。这确实是一个非常艰巨的任务，尤其是在供应链中包括了小型企业且这些小型企业还没有做好充分准备去迎接绿色环保材料和工艺的情况下。

本书中所使用的关于绿色设计和制造的方法并不是十分刻板的。我试图在绿色环保材料和工艺的实施的提供尽可能多的可行方法，而不会在每个具体案例中特别推荐某个处理流程。工程师都是富有创造力的人，他们总会尝试将新的理念融合为他们所熟悉的理念。许多人会

在绿色产品上打上自己的印记或在此类产品的设计和生產流程中融入他们自己的方法。如果强制他们接受，他们一定会反抗这种新理念。我认为只要这些工程师不偏离实现绿色产品这一总体目标，他们的个人努力应该给予鼓励。

本书分为两部分。第一部分叙述了着手实施绿色产品和工艺的原则和所需工具。工具包括为对比绿色替代性材料和工艺与非绿色基准而使用的统计技术。发展替代性材料和工艺的其他重要技术是为选择最佳绿色替代性材料和工艺而采取实验设计（DoE）方法论。此外，这一部分还叙述了可靠性原则和用于模拟寿命试验的各种技术的使用。用于绿色设计和制造的这些技术的应用实例将会在对所使用的数学原理阐述后进行叙述。我编写了统计学和 DoE 章节，David Pinsky（锡晶须方面的可靠度高级工程师和专家）编写了关于可靠性的第 3 章。

第二部分是绿色产品和工艺的成功实施的一个全面集合。从高级管理人员、项目经理到设计和生产专家的观点应有尽有。绿色制造的实施案例均来自于新英格兰无铅联合会中的企业，他们成功完成了向绿色产品和工艺的转换。

我希望本书会对初学者以及电子产品的设计和生產行业有经验的从业人员有所帮助，尤其是一些缺乏技术人员，缺乏实施某些绿色设计和生產所必需的资源，又急需将绿色设计和生產的理念融入企业文化的中小型企业。书中所记录的经验对于激励许多企业大胆发展新型世界级的绿色产品会有所帮助，这些绿色产品会使这些企业在将来不断发展和繁荣。

Sammy G. Shina

致 谢

本书中所陈述的绿色设计和制造的原理是通过我在企业界和学术界 40 年的学习、积累和实践所得来的。从麻省理工学院毕业后，我在电子工业领域工作了 22 年，随后的 20 年我在马萨诸塞大学洛厄尔分校任教。在学校任职期间，我担任过教师、研究员和不同企业的顾问，这些经历增长了我绿色电子产品设计、制造和质量领域内的个人知识和经验。

我非常感激各机构在我收集资料、撰写章节和编辑本书的很长时间里给予的支持和鼓励；非常感谢马萨诸塞大学洛厄尔分校在绿色设计和制造方面给予我长时间的支持，尤其是前教务长 John Wooding 和机械工程学院院长 John McKelliget，他们在我对于环境的研究和工作中也给予了很大支持，并批准了我休假一学期来组织、编辑和撰写本书部分内容。我还要感谢 TURI，尤其是前任和现任会长 Ken Geiser、Michael Ellenbecker。感谢 Liz Harriman 和 Greg Morose，他们与我密切合作，共同管理马萨诸塞和新英格兰无铅联合会。早在 20 世纪 90 年代中期，从一开始的免清洗焊接，通过附加的 PCB 技术，到现在的无铅联合会，这 15 年来，TURI 一直支持我的研究工作并帮助我的学生获得了绿色环保材料和工艺高级工程师学位。

我也非常感激 EPA 在新英格兰地区的分部，在近几年内非常支持我在联合会的工作，尤其是 Linda Darveau 和 Rob Guillimen，我非常感谢他们授予新英格兰无铅联合会 2006 年 EPA 区域性商业、工业和专业机构环境贡献奖。

另外，我要感谢本书编辑，同时也是我之前关于六西格玛和并行工程的 3 本书的编辑，来自 McGraw-Hill 公司的 Steve Chapman。在 4 本书的写作过程中，他经常给予我支持、鼓励和引导，对此我非常地感谢。同时，我还要感谢 ITC 公司驻印度诺伊达的项目工程师 Vastavikta Sharma 对本书高效迅速的编辑和出版以及澳大利亚 NSW 公司诺拉本部的 Toni Rafferty 对本书编辑和打样做出的贡献。

非常感谢许多为我所创立的无铅联合会自愿奉献他们宝贵时间和精力的工程师们，他们从一个公司到另一个公司，经历了电子业中许多的曲折和迂回的历程，我祝愿他们能够在所在的公司实施绿色产品战略方面取得巨大成功。

最后，十分感谢我的家人在本书写作、编辑和出版过程中对我精神上的支持。感谢我的夫人 Jackie 和我们的孩子 Mike、Gail、Nancy 和 Jon 以及我的孙子，在我写作和编辑的日日夜夜里带给了我许多的欢乐。

目 录

第 1 章 电子产品的环境发展	1
1.1 历史回顾	1
1.2 绿色设计开发与制造的竞争力	3
1.3 绿色设计和新产品的寿命周期	4
1.4 不恰当地采用绿色材料和工艺对设计带来的不利影响	5
1.5 应用质量工具和质量技术成功实现产品的绿色设计与制造	6
1.6 本书其余章节的设置	10
第 2 章 绿色电子产品的统计分析	13
2.1 样本和总体工艺均值和标准差的计算	13
2.1.1 其他统计工具：误差、样本规模以及点估计和区间估计	15
2.1.2 均值的置信区间估计	16
2.1.3 样本和总体的标准差	16
2.2 确定工艺能力	17
2.2.1 大规模生产的工艺能力	18
2.2.2 确定工艺能力的标准差	18
2.2.3 计算 σ 的方法举例	18
2.2.4 少量生产的工艺能力	19
2.3 新绿色部件原型的工艺能力	20
2.4 统计方法结论	22
2.5 实验设计	22
2.5.1 实验设计的定义和期望值	23
2.5.2 实验设计技术	23
2.5.3 实验设计分析工具集	29
2.5.4 在绿色材料和工艺选择的不同阶段应用实验设计	35
2.5.5 实验设计选择的结论	38
参考文献	38

第3章 绿色电子系统的可靠性	41
3.1 引言	41
3.1.1 什么是可靠性	41
3.1.2 可靠性的测度	41
3.1.3 威布尔分布的实例	42
3.1.4 绿色电子背景下的可靠性	45
3.2 无铅焊料互连	45
3.2.1 无铅焊料与锡/铅焊料基准	45
3.2.2 无铅焊料及其影响可靠性的特性	46
3.2.3 最受关注的试验环境	48
3.2.4 锡/铅合金和 SAC 合金的温度循环疲劳寿命行为	50
3.2.5 温度驻留时间和最大温度应力松弛或蠕变的影响	53
3.2.6 根据温度循环试验数据计算温度循环现场寿命	55
3.2.7 机械冲击与振动	56
3.2.8 其他方面的考虑: 新的故障模式	58
3.3 返工和维修对可靠性的挑战	58
3.3.1 返工导致的损伤以及和印制电路板相关的故障模式	59
3.3.2 返工对元件造成的损伤	60
3.3.3 对维修的特殊考虑	62
3.4 无铅可焊镀层	63
3.4.1 纯锡镀层和锡晶须	63
3.4.2 锡/铋合金与锡/铅合金的相互作用	73
3.4.3 浸银的香槟空洞	74
3.5 印制电路板的可靠性问题	74
3.6 航空航天和高性能电子工业标准	76
3.6.1 航空和高性能电子工业领域已发布的标准文件	76
3.6.2 尚在开发的标准文件	77
3.7 连接件问题	78
3.7.1 连接件中镉的使用	78
3.7.2 连接件中锡的使用	78
3.8 结论	79
致谢	79
参考文献	79
第4章 环境适应性策略与实现	83
4.1 引言	83
4.2 需求描述	84
4.3 构建团队	85

4.4 策略的开发过程.....86

4.5 策略的获批.....87

4.6 启动开发过程.....87

4.7 驱动项目.....89

 4.7.1 制造技术渠道.....89

 4.7.2 供应链渠道.....92

 4.7.3 产品设计（环境设计）渠道.....93

 4.7.4 市场与环境监管渠道.....93

4.8 对 132 环境符合性策略的反应.....94

4.9 结论.....94

致谢.....95

参考文献.....95

第 5 章 按照绿色设计和制造的理念管理全球设计团队.....97

5.1 利用全球化团队实施电子产品绿色设计简介.....97

5.2 理解欧盟环境指令的适用范围.....98

 5.2.1 RoHS 指令.....98

 5.2.2 受 RoHS 指令影响的电子产品种类.....98

 5.2.3 目前为 RoHS 指令豁免的电子产品种类.....99

 5.2.4 中国 RoHS 法规.....99

 5.2.5 EMC 指令.....99

 5.2.6 WEEE.....100

5.3 绿色产品的全球性立法.....100

5.4 全球性 RoHS 执行组织.....100

5.5 区域性 RoHS 执行团队.....102

5.6 产品工业化团队.....102

5.7 全球化团队之间的交流.....104

5.8 理解投资组合中哪些产品需要重新设计.....104

5.9 用于本地控制的项目目录.....106

5.10 绿色过渡导致的元件废弃问题.....107

5.11 质量与可靠性.....108

5.12 无铅组装工艺.....109

5.13 与本地和海外制造机构间的交流与资质鉴定.....109

5.14 产品是否符合相应法规的信息决策.....110

5.15 商标管理.....111

5.16 数据和文件方面的要求.....111

5.17 风险管理.....112

5.18 结论.....112

参考文献.....113

第 6 章 向无铅组件的成功转变	115
6.1 引言	115
6.1.1 转变规划概述	115
6.1.2 无铅合金的选择	116
6.1.3 SAC305 对装配工艺的影响	117
6.1.4 转变的目标	117
6.1.5 产品组合	118
6.1.6 无铅装配和焊剂的要求	118
6.1.7 1 号试验机 (SMT 装配试验机)	121
6.1.8 2 号试验机 (插入式装配试验机)	121
6.1.9 无铅焊膏鉴定	122
6.1.10 免清洗焊膏实验室分析	123
6.1.11 评定的阶段划分	123
6.1.12 焊接接头的机械验证	125
6.1.13 锡/铅装配和无铅装配的可靠性比较	126
6.1.14 无铅波峰焊接焊剂评定	127
6.1.15 基准电子 TV3	127
6.1.16 TURI TV3	128
6.1.17 TURI TV3 概述	129
6.1.18 无铅试验的因子和等级	129
6.1.19 TRUI TV3 元件	129
6.1.20 TURI TV3 温度循环试验和 HALT	129
6.1.21 TURI TV3 试验结果与结论	130
6.1.22 TURI TV4	130
6.2 与设计团队和材料供应链的联系	131
6.2.1 印制电路板材料的设计	131
6.2.2 元件供应商准备方法	132
6.2.3 元件供应商调查结果	132
6.3 成功向无铅装配转变的推荐步骤 (工艺及产品)	133
6.3.1 制造现场工艺评定	133
6.3.2 无铅装配产品的评定	136
6.3.3 TV1 实验室分析 (SMT 工艺评定)	137
6.3.4 TV2 实验室分析 (通孔工艺评定)	139
6.4 含铅和无铅混合元件表面镀层管理及处理方法	139
6.4.1 材料工艺控制	140
6.4.2 可视化管理技术	140
6.4.3 尽职检验与 XRF 检验	141
6.4.4 材料搬运过程中的 XRF 检测	141

6.4.5	制造过程中的 XRF 检测	142
6.4.6	XRF 检验结论	142
6.4.7	混装工艺	142
6.4.8	混装案例 1: 无铅元件使用锡/铅焊膏进行装配	143
6.4.9	混装案例 2: 锡/铅元件使用无铅焊膏进行装配	143
6.5	装配人员和检查人员的培训	144
6.5.1	RoHS 指令培训要求	144
6.5.2	禁用物质培训实例	144
6.5.3	目视检验培训	145
6.5.4	材料工艺控制培训	145
6.5.5	制造工艺控制培训	145
6.5.6	技术支持部门的工艺培训	145
6.6	批量生产从锡/铅向无铅装配转变以及插入式和 SMT 返工的评定	146
6.6.1	概述	146
6.6.2	使用混装技术的装配过程和结果汇总	146
6.6.3	Maverick 电路板的温度循环可靠性试验结果	147
6.6.4	1 号试验板和 2 号试验板上进行插入式装配的强制返工	148
6.6.5	Maverick 电路板通孔返工	150
6.6.6	BGA 返工	152
6.6.7	Maverick 电路板和 1 号、2 号试验板试验结论	153
6.6.8	Alpha 电路板上插入式元件的强制性返工	153
6.7	无铅制造的成本	154
6.7.1	原料和设备成本	155
6.7.2	培训及工艺改良费用	155
6.7.3	材料采购及与工艺有关的成本	155
6.7.4	基础设施及总体成本	156
6.8	WEEE、绿色回收及其他	156
	致谢	157
	参考文献	157

第 7 章 为在新产品中使用绿色材料和工艺制定总体规划（产品开发“绿色化”）

7.1	引言	159
7.2	绿色电子设计基础综述	159
7.2.1	功能性	159
7.2.2	成本、尺寸和重量	161
7.2.3	可制造性	162
7.2.4	可靠性	164
7.2.5	满足设计要求	165