·海军重点建设教材

装备科技译著出版基金

可靠性设计

Design for Reliability

[美] Dev Raheja　Louis J.Gullo　编著
方　颖　刘　柏　等译
方　颖　宋太亮　审校
陈大圣　宋太亮　主审

国防工业出版社
National Defense Industry Press

WILEY

装备科技译著出版基金

可靠性设计

Design for Reliability

[美] Dev Raheja　Louis J. Gullo　编著
方　颖　刘　柏　等译
方　颖　宋太亮　审校
陈大圣　宋太亮　主审

国防工业出版社
·北京·

著作权合同登记　图字:军-2014-130号

图书在版编目(CIP)数据

可靠性设计/(美)拉赫亚(Raheja,D.),(美)古洛(Gullo,L.J.)编著;
方颖等译.—北京:国防工业出版社,2015.5
书名原文:Design for reliability
ISBN 978-7-118-10030-3

Ⅰ.①可...　Ⅱ.①拉...②古...③方...　Ⅲ.①工业设计　Ⅳ.①TB47

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 076783 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100048)
北京嘉恒彩色印刷有限责任公司
新华书店经售

*

开本 710×1000　1/16　印张 14¾　字数 272 千字
2015 年 5 月第 1 版第 1 次印刷　印数 1—2000 册　定价 68.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777　　发行邮购:(010)88540776
发行传真:(010)88540755　　发行业务:(010)88540717

译者序

我国第一部可靠性国家军用标准 GJB 450 于 1988 年颁布实施，这部标准是借鉴美国军用标准编制而成的。2004 年，我国对 GJB 450 进行了修订，颁布实施 GJB 450A《装备可靠性工作通用要求》。修订后的标准是在美军废除可靠性标准之后，总结我国工程实践经验后修改完成的，从标准的内容来看，标准的内容由原来的规范装备研制的可靠性工作，扩展为规范装备全寿命期的可靠性工作，但没有包括制造过程的可靠性保证。

20 世纪 90 年代，可靠性技术刚引入装备领域时，引起了人们的极大兴趣，加之领导层高度重视，可靠性技术得到了一定的应用，也取得了一些研究和应用成果。进入 21 世纪后，由于装备管理体制机制发生了重大变化，虽然有一段时间可靠性标准化工作得到发展，但总体来讲可靠性实践工作出现滑坡，造成装备可靠性要求没有得到很好保证，装备故障率比较高。造成这种问题的原因是多方面的，一方面，装备信息化水平和复杂程度不断提高，加之我国技术基础薄弱，可靠性保证难度加大；同时，可靠性方法本身也确定存在一些问题，应用效果并不明显。另一方面，问题就更多了。一是装备的需求和订购方，受快出装备快出成绩观念的影响，担心可靠性工作影响交付进度和增加工作量，有些型号根本就没有把可靠性设计要求和验证要求纳入合同，立项关口和定型关口没有把住；二是由于管理体制上的限制，可靠性标准没有得到很好的宣传培训，大量设计人员根本就不知道有可靠性方面的标准；三是设计单位主动做好可靠性工作的积极性没有被激发出来，没有发挥主要责任，满足于实现战术技术指标，对可靠性的重要性认识不到位；四是设计理念、设计手段、管理等方面还比较落后。以上这些问题，严重制约装备可靠性水平的提高，严重制约装备作战能力和保障能力的形成。

按照传统的可靠性定义和发展历史，过去比较关注可靠性的数学问题，大多采用概率和统计方法研究可靠性问题，加之数据比较缺乏，造成人们对可靠性有些神秘感，这实际上也影响到可靠性技术的应用和发展。事实上，可靠性更多的是设计问题，是工程实践问题，是设计出来和制造出来的，甚至是早期策划和规划出来的，因为产品的可靠性与其结构、材料、工艺等因素关系密切，这些因素对可靠性的影响最大，一旦其结构、材料、工艺确定了，其可靠性也就基本上确定了，所以许多人认为过去没有进行可靠性设计，所设计的产品可靠性也很好，这

里面也隐含着所选择的设计方案可靠性达到了一定的水平。但是，如果在确定方案时，采用可靠性设计方法考虑了可靠性的各种影响因素，所设计产品的可靠性可能会更好地满足用户的要求，而且不会出现研制反复的情况。

可靠性是产品无故障或者性能没有退化的情况下，持续地执行作战任务的能力，这种定义，对我们理解可靠性对装备作战使用的重要性是非常有帮助的，可靠性与装备持续完成任务的能力直接相关，可靠性不高，装备“飞”不远，“跑”不远，不能持续使用，这可以从所研制运输机的航程看出来，我们研制的运输机，其他性能指标与国外相比都不差，差的就是可靠性，可靠性直接影响了飞机的航程和舰船的续航能力。当然，这些能力还受其他因素的影响，比如油耗等。因此，保证可靠性是装备发展的一项重要任务，必须下大力气提高装备的可靠性水平。

保证可靠性是一个复杂的系统问题。目前，国内外有一些创新的做法，就是广泛应用一些新的设计方法和手段，这些方法手段远远超出了传统的可靠性设计方法，超出了现有的标准要求，例如，制造过程中采用保证质量的一些方法来保证产品的可靠性，利用计算机建模与仿真技术来分析和评价产品的可靠性，利用有限元分析、热分析等工作提高可靠性，等等。这些方法，有些方法原来并没有归入可靠性设计的范畴，但是，实践证明这些方法确实对提高可靠性是非常有效的，应当在将来修订标准时，纳入标准要求，供设计人员选择使用。

推荐翻译出版本书的主要原因是，本书介绍了大量非传统的可靠性设计技术和方法，这些技术和方法是国外最新的研究成果，希望读者加强应用和实践，把我国装备可靠性工作推向一个新的起点。我相信，本书的翻译出版，对我国可靠性工程创新发展和应用实践，将起到重要的推进作用。也希望广大的可靠性工作者，勇于创新，创造出一些新的提高可靠性的技术和方法，使我国可靠性理论和技术应用在世界上占有一席之地。

2014 年 12 月

译者前言

武器装备可靠性保证工作是一项极为复杂而艰巨的工作，必须首先全力做好可靠性设计工作。通过应用可靠性设计理论、技术和方法，主动消除产品故障，降低设计成本和寿命期费用，提供质量更好的产品，提升顾客的满意度，进而提高装备的作战能力和保障能力。

本书是国际知名出版集团 Wiley 与 IEEE 共同推出的《质量与可靠性系列丛书》之一。参加本书编写的作者具有军工企业大型复杂装备设计的经验，同时具有不同学科专业领域的知识。其中，Dev Raheja 是 Raheja 咨询公司的董事长，是国际认可的质量和安全顾问，具有在航空航天、医疗设备、汽车和消费产品等多个领域的工程经验。Louis J. Gullo 是退役的美国陆军中校，雷声公司导弹系统的高级工程师，在军事、太空和商业项目上有 30 多年的经验。本书将计算机科学技术和可靠性工程技术相结合，所提供的理论、技术和方法也适用于安全性、维修性、保障性工程和系统集成。

本书的翻译工作力求忠实原著，并易于理解。翻译出版本书旨在推广成熟的可靠性设计技术，供设计工程师、可靠性工程师和项目管理人员参考。特别是期望通过武器装备论证、研制、试验人员等方面人员的工程实践，促进可靠性设计技术的发展，提高我国装备的可靠性水平，创造出更大的经济效益和军事效益。

全书由方颖、刘柏等翻译，其中，第 1 章 ~ 第 8 章由方颖、张海军翻译；第 9 章由方颖翻译；第 10 章 ~ 第 16 章由张海军、刘柏翻译；第 17 章由刘柏翻译；第 18 章由方颖翻译。全书由方颖、宋太亮负责审校，由方颖负责全面策划、技术审校。此外，常增柱、田宏伟、高瑗寅、吴婷等参与了部分翻译工作。全书由陈大圣和宋太亮主审。

由于译者水平有限，书中难免有疏忽和错误之处，恳请各位读者批评指正。

译 者

2014 年 12 月

原书序

质量与可靠性对系统的重要性是无可争议的。质量与可靠性方面的产品故障必然导致维修成本、保修索赔、顾客投诉、产品召回和销售损失，极端情况下会导致人员伤亡。因此，质量与可靠性在现代科学与工程中起到了关键的作用，同时也面临各种各样的机遇和挑战。

质量与可靠性科学的发展，反映了技术保障的趋势和变革。采用新技术的设备，无论是太阳能面板、隐身飞机还是先进的医疗设备都需要正常运行，并在整个任务期内不发生故障。新技术引起新的故障机理（化学、电子、物理、机械、结构等）、新的故障部位和新的故障模式。因此，物理失效模式的不断进步、多学科方法相结合对我们形成应对未来挑战的能力是至关重要的。

除了随着技术变化的改革之外，质量与可靠性工程领域自身也取得了持续进展：针对过程改进以及减少设计和制造关联故障开发了新的技术和方法。

近年来，可靠性设计（DFR）理念已经越来越受欢迎，它的发展有望持续数年。DFR 方法把焦点从可靠性论证和过时的“试验—分析—改进”原理转移到现有最佳的基于科学方法的产品和过程的可靠性设计上来。这些概念围绕概率设计和六西格玛设计（Design for Six Sigma，DFSS）方法，注重在设计和制造层面减少差异性。同样地，工业界期望在设计过程中增加仿真技术的使用、加强可靠性建模的应用，从而使可靠性工程与设计工程更早地成为一个整体。DFR 也把可靠性工程师的角色从主要关注产品试验和分析转变成为设计团队的指导者，负责寻找并把最佳的设计方法应用到实现产品可靠性上。一个正确应用 DFR 的过程将确保追求可靠性成为整个企业的活动。

在这里也应该提到质量与可靠性工程的其他新兴的、持续发展的趋势。随着越来越多的应用，风险评估将会强化可靠性分析，不仅强调故障的概率，也强调故障的定量结果。寿命周期工程的理念期望在降低寿命周期风险和减少设计、制造、质量、保证、服务的组合成本上找到更广泛的应用。故障预测和健康管理（PHM）的进步会带来新模型与算法的发展，这样可以通过评估预期工作条件的退化程度来预测产品的可靠性水平。其他先进的发展领域包括人的可靠性分析和软件可靠性分析。

此外，持续的全球化和外包影响了大部分的工业，使质量与可靠性专业人员的工作复杂化。各类工程职能分布在世界各地给设计协调和保障增加了复杂

性。把设计和生产转移到设计和制造过程上缺少知识深度并且质量管理体系不太健全的地区，在这些地区，低成本通常是产品开发的主要驱动力，影响了公司生产可靠的无缺陷零部件的能力。

尽管质量与可靠性的重要性是显而易见的，当今的可靠性工程教育却缺少质量与可靠性工程课程。很少有工程学校提供学位课程，在质量与可靠性方法上也很少提供足够种类的课程。因此，大多数质量与可靠性从业者从同事、专业研讨会及各种各样的出版物和技术书籍那里接受专业训练。对职业发展来说，这个领域缺少正规的教育现状凸显了专业技术出版物的重要性。

《质量与可靠性工程 Wiley 系列》的真正目标是给质量与可靠性的从业者和研究者提供一个坚实的教育基础，扩大读者对包括本领域最新进展在内的基础知识。本系列继续保持 Wiley 技术出版的优秀传统，为工程实践和教学做出持久和积极的贡献。

Andre Kleyner

原书前言

不论是对工业还是对市场来说，可靠性设计（DFR）已成为全世界的目标。全世界最好的组织为了全球竞争，与此同时大大地降低生命周期成本。可靠性设计的原则和方法旨在主动预防故障、失效和产品故障，这样能够带来成本更低、更快、更好的产品。在日本，这个工具被用来获得客户忠诚和客户信任。然而，我们仍然面临一些挑战。很少有工程经理和设计工程师理解可靠性设计所增加的产品价值，即他们常常看不见节省的保修成本、客户满意度的提高和市场份额的增加。

以上事实，以及当前世界范围内的经济挑战已经为这一工程科学创造了完美的条件。可靠性设计是一门艺术，因为许多决策的确定不仅要以证据数据为基础，而且要基于低成本的工程设计创新。读者将会对本书的知识价值很满意，因为所有对这本书有贡献的人在这些方法上至少有 20 年的实践经验。

编写这本书的想法是在我们参加 IEEE 可靠性设计技术委员会期间萌发的。我们看到对可靠性设计书籍的需要不仅仅有硬件工程师，也有软件和系统工程师。传统的关于可靠性工程的书籍更多地是侧重于统计分析技术，而不是提升固有设计来减少软硬件的故障。本书试图通过介绍可靠性设计在新产品或系统早期开发阶段的巨大优势，来填补知识出版机构的空白。本书满足正在寻找如何在设计工程队中协同工作的入门级设计工程师、有经验的设计工程师、工程经理以及可靠性工程师或经理的需要。

Dev Raheja
Louis J. Gullo

原书作者

Steven S. Austin
阿拉巴马州亨茨维尔国防部导弹防御局
Lawrence Bernstein
新泽西州霍博肯史蒂文斯理工学院
Joseph A. Childs
佛罗里达州奥兰多洛克希德·马丁公司导弹和火控
Jack Dixon
佛罗里达州奥兰多动力学研究公司
Louis J. Gullo
亚利桑那州图森美国雷声公司导弹系统
Samuel Keene
科罗拉多州里昂 Keene 联合公司
Brian Moriarty
弗吉尼亚州湖岭 Engility 公司
Dev Raheja
马里兰州 Raheja 咨询公司
Robert W. Stoddard
宾夕法尼亚州维妮夏六西格玛国际定向服务有限责任公司
C. M. Yuhas

简介:你会学到什么?

第 1 章　可靠性设计范例(Raheja)

本章介绍了可靠性设计意味着什么。描述了目前的产品状态与设计可靠性所需技术之间的技术差距,作为新产品的一个价值定位。给出了如何获得高投入产出比的真实例子,以理解可靠性设计这门艺术。本章用 8 个实用的范例作为最好的实践向读者介绍了更深层次的主题。

第 2 章　可靠性设计工具(Childs)

本章总结了产品寿命周期内的可靠性工具,从方案、需求、开发、设计、生产、试验及寿命结束。也说明了在理解和交流可靠性性能方面对工具的需求。这其中许多的工具在接下来的章节中会进一步详细解释。

第 3 章　开发可靠的软件(Keene)

本章描述了好的设计做法,为了开发出嵌入在大多数高技术产品中的可靠的软件。介绍了如何通过应用基于证据的软件可靠性工具来预防常常出现在设计中固有的软件错误和故障,如 FMEA、能力成熟度模型和软件可靠性模型。介绍了最流行的软件可靠性评估工具 CASRE(计算机辅助软件可靠性评估)。

第 4 章　可靠性建模(Gullo)

本章是关于可靠性建模的,是早期设计阶段可靠性设计的最重要的工具之一,以确定整体可靠性的策略。本章涵盖了系统可靠性模型和组件可靠性模型,介绍了可靠性框图在建模中的用途。讨论了可靠性增长过程、物理建模的相似性分析以及广泛用于仿真的模型。

第 5 章　设计故障模式、影响及危害性分析(Gullo)

本章介绍了在系统级、子系统级和组件级有关 FMECA 的可靠性分析核心知识。介绍了如何使用称为风险优序数的风险指标来进行风险评估,以及如何消除单点故障,使设计的脆弱性大大减少。本章也解释了 FMEA 和 FMECA 之间的区别,如何使用它们以改进产品性能和维修效能。

第 6 章　过程故障模式、影响及危害性分析(Childs)

第 5 章　介绍了如何使设计更健壮,本章将应用 FMEA 工具分析一个过程的健壮性,这样在缺陷出现在生产中之前,制造缺陷就被消除了。最终的结果是用更低的制造成本提高产品的可靠性。本章内容包括进行分析的逐步过程,以及使用风险优序数进行风险评估。

第 7 章　应用于软件开发的 FMECA（Stoddard）

FMEA 工具同样适用于软件设计。很少有关于如何把 FMEA 应用于软件的文献。本章介绍如何利用 FMEA 以提高软件可靠性的详细内容。本章介绍了经验教训以及把 FMECA 整合到最广泛使用的软件开发模型“V”模型的不同方法。本章描述了正确使用该工具的作用和职责。

第 8 章　需求开发的六西格玛方法（Keene）

在本章中，作者解释了对于确定六西格玛计划的关键输入变量来说，试验设计（DOE）为什么是一个最有效点。本章包括该计划的起源、六西格玛测量的意义以及它如何被应用以改善设计。然后，继续介绍了设计产品的六西格玛性能工具，以降低故障率，使故障率尽可能接近于零。

第 9 章　可靠设计中人的因素（Dixon）

许多产品故障往往被归咎于人，其实故障是在于对人因工程的重视不够。本章介绍以人为中心的设计原则，以使人机界面健壮，并且具有容错能力。还介绍了如何进行人因分析、如何整合人为因素以使产品设计人性化。

第 10 章　设计中以排除故障为目的的应力分析（Gullo）

本章介绍了为什么减少设计应力对于提高耐用性和可靠性来说是至关重要的。介绍了降额作为一种设计工具的概念。作者介绍了关于电气和机械应力的例子，以及如何把该理论应用于软件设计。本章还介绍了如何应用一种数值方法有限元分析，以解决具体的设计问题。

第 11 章　高加速寿命试验（Gullo）

通常来说，设计者不能够预测新的设计会发生什么故障。本章介绍了高加速寿命试验和高加速应力试验如何快速地暴露出故障模式。还介绍了如何设计这些试验，以及如何从试验结果中消除设计裕度。本章还介绍了确定加速应力的不同方法。

第 12 章　耐极端环境设计（Austin）

当产品被用在极冷或极热的环境中，例如，阿拉斯加或亚利桑那州沙漠，我们必须为这样的环境进行设计以保证产品可以持续足够长的工作时间。本章介绍了需要考虑哪些因素以及如何为每个条件进行设计。还介绍了太空计划和海外经验如何有助于使产品耐用、可靠和安全。

第 13 章　可信性设计（Bernstein 和 Yuhas）

这一章是非常重要的，因为软件可靠性设计方法还没有被标准化。这一章不用可靠性来设计软件，这样，工程变更中的错误也是安全可靠的，这些错误是很常见的。本章介绍了设计方法，提出了改进架构、模块、接口以及重新使用软件的正确使用策略建议。本章还提供了好的设计实践。

第 14 章　故障预测与健康管理能力以提高可靠性（Gullo）

可靠性设计实践应该包括在产品故障之前检测故障。本章介绍了设计故障

预测和产品健康监测的原则，这些原则可以被设计到产品中，结果是增强系统的可靠性。本章也介绍了基于状态的维修（视情维修）和基于时间的维修，使用故障预兆对即将发生的故障事件发出信号，以及自动应力检测以加强预测。

第 15 章　可靠性管理（Childs）

本章介绍了提升可靠性管理重要性的目的和指南。在设计过程中，管理人员参与对于任何成功的可靠性设计来说都是重要的。介绍了在早期设计过程中，如何管理、计划、执行和记录计划的需求。介绍了重要的任务、可靠性评估闭环、问题解决以及可靠性增长试验。

第 16 章　风险管理、异常处理及变更管理（Dixon）

在产品设计过程中，许多的风险被忽视了。本章定义了在工程方面，风险是什么，如何预测风险、评估风险以及消除风险。强调了风险管理文化在消除风险上的作用，以及配置管理在规避来自设计变更新风险上的关键作用。本章还介绍了如何最大限度地减少疏漏之处，以及需求变化。

第 17 章　可靠性设计与安全性设计的集成（Moriarty）

本章整合了可靠性和安全性，包括如何进行安全性设计。介绍了几个安全性分析技术，同样适用于可靠性。介绍了风险评价指数矩阵如何被广泛地用在航空航天领域和许多商用产品上，以做出风险管理决策，也介绍了降低风险的例子。

第 18 章　组织的可靠性能力评估（Gullo）

本章介绍了使用 IEEE 1624—2008 标准的好处，描述了如何通过评估 8 个关键可靠性实践和相关指标来确定组织的可靠性能力。管理人员应该知道一个组织交付可靠的产品的能力，它被定义为组织的可靠性能力。本章用案例研究详细地介绍了这一过程。

目　录

第 1 章　可靠性设计范例 …… 1

1.1　为什么要进行可靠性设计 …… 1
1.2　对可靠性当前状态的反响 …… 2
1.3　可靠性设计范例 …… 3
范例 1　学会精益求精而不是平均 …… 3
范例 2　在需求分析上多花时间 …… 4
范例 3　用寿命周期成本来衡量可靠性 …… 6
范例 4　2 倍寿命设计 …… 6
范例 5　安全——关键组件应该被设计为 4 倍寿命 …… 7
范例 6　学会改变成本和性能悖论以达到双赢局面 …… 7
范例 7　设计以避免潜在制造缺陷 …… 8
范例 8　故障预测健康监测设计 …… 9
1.4　总结 …… 10
参考文献 …… 10

第 2 章　可靠性设计工具 …… 11

2.1　引言 …… 11
2.2　产品寿命周期中的可靠性工具 …… 11
2.3　工具的需求:理解和沟通可靠性性能 …… 13
2.3.1　工程 …… 13
2.3.2　管理人员 …… 14
2.3.3　客户 …… 14
2.4　可靠性工具 …… 14
2.4.1　早期计划阶段(概念设计) …… 14
2.4.2　零件、材料和工艺选择 …… 18
2.4.3　应力分析和设计指南 …… 19
2.4.4　设计故障模式、影响及危害性分析 …… 19
2.4.5　机内测试定义和有效性分析 …… 20

2.5 详细的设计阶段 …… 21
2.5.1 持续应力分析 …… 21
2.5.2 过程 FMECA …… 21
2.5.3 分析工具的持续使用 …… 21
2.6 设计验证阶段 …… 21
2.6.1 故障报告及纠正措施系统 …… 21
2.6.2 根因分析和故障树/石川鱼骨图 …… 22
2.7 试验数据分析 …… 24
2.7.1 寿命试验与加速因子 …… 24
2.7.2 可靠性增长建模 …… 25
2.7.3 生产和外场支持 …… 25
2.7.4 生产检验 …… 25
2.8 总结 …… 27
参考文献 …… 27

第 3 章 开发可靠的软件 …… 28

3.1 引言 …… 28
3.2 软件可靠性:定义和基本概念 …… 30
3.3 软件可靠性设计注意事项 …… 33
3.4 可靠性需要有效的变更管理 …… 36
3.5 运行时软件可靠性模型 …… 36
3.6 测试前的软件可靠性预测工具 …… 37
参考文献 …… 38

第 4 章 可靠性建模 …… 40

4.1 引言 …… 40
4.2 可靠性框图:系统建模 …… 42
4.3 使用 RBD 分析系统可靠性模型实例 …… 43
4.4 可靠性增长模型 …… 44
4.5 相似性分析和物理模型类别 …… 45
4.6 蒙特卡罗模型 …… 46
4.7 马尔可夫模型 …… 47
参考文献 …… 48

第 5 章 设计故障模式、影响及危害性分析 …… 50

5.1 FMEA 和 FMECA 介绍 …… 50

5.2 设计 FMECA …… 50
5.3 如何消除或避免单点故障 …… 52
5.4 FMECA – MA 的原理 …… 53
5.5 过程 FMECA 与设计 FMECA 的区别 …… 54
5.6 D – FMECA 方法 …… 54
5.7 设计 FMECA 过程示例 …… 56
5.8 风险优先数 …… 62
5.9 RPN 排序 …… 63
5.10 建议的措施 …… 64
5.11 措施效果和修正的 RPN …… 64
5.12 总结 …… 65
参考文献 …… 65

第 6 章 过程故障模式、影响和危害性分析 …… 67

6.1 引言 …… 67
6.2 P – FMECA 的原理 …… 67
6.3 P – FMECA 的使用 …… 68
6.4 开始前需要什么 …… 69
6.5 按步实施 P – FMECA …… 70
6.6 改进措施 …… 76
6.7 报告结果 …… 77
参考文献 …… 78

第 7 章 应用于软件开发的 FMECA …… 79

7.1 引言 …… 79
7.2 软件开发的 FMECA 范围 …… 79
7.3 软件开发的 FMECA 步骤 …… 81
7.4 对软件 FMECA 角色和职责的重要提示 …… 88
7.5 从实施软件 FMECA 学到的经验教训 …… 89
7.6 总结 …… 91
参考文献 …… 91

第 8 章 需求开发的六西格玛方法 …… 92

8.1 试验设计的早期经历 …… 92
8.2 六西格玛基础 …… 94
8.3 六西格玛的含义 …… 94

8.4 六西格玛的三方面倡议 …… 96
8.5 RASCI 工具 …… 97
8.6 六西格玛设计 …… 98
8.7 需求开发:系统可靠性面临的主要挑战 …… 99
8.8 GQM 工具 …… 100
8.9 思维导图工具 …… 101
参考文献 …… 103

第 9 章 可靠性设计中人的因素 …… 104

9.1 人因工程 …… 104
9.2 设计工程师关注的人的因素 …… 104
9.3 以人为中心的设计 …… 105
9.4 人因分析过程 …… 109
9.5 人因和风险 …… 113
9.6 人为差错 …… 113
9.7 容错设计 …… 115
9.8 检查单 …… 115
9.9 人因设计试验验证 …… 116
参考文献 …… 116

第 10 章 设计中以排除故障为目的的应力分析 …… 117

10.1 应力分析的原则 …… 117
10.2 机械应力分析或耐久性分析 …… 117
10.3 有限元分析 …… 118
10.4 概率性与确定性的方法和故障对比 …… 118
10.5 应力分析如何有助于可靠性设计 …… 119
10.6 降额和应力分析 …… 119
10.7 应力强度曲线 …… 120
10.8 软件应力分析和测试 …… 123
10.9 结构增强以提高结构完整性 …… 124
参考文献 …… 125

第 11 章 高加速寿命试验 …… 126

11.1 引言 …… 126
11.2 时间压缩 …… 129
11.3 测试覆盖率 …… 129