



中国质量协会
CHINA ASSOCIATION
FOR QUALITY

可靠性工程师注册考试指定辅导教材

可靠性工程师 手册

(第二版)

Handbook of
Certified Reliability Engineer

中国质量协会组织编写

李良巧 © 主编



中
CHIN
FOR

可靠性工程师注册考试指定辅导教材

可靠性工程师 手册

(第二版)

Handbook of Certified Reliability Engineer

中国质量协会组织编写

李良巧 © 主编

中国人民大学出版社

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

可靠性工程师手册/李良巧主编. —2 版. —北京: 中国人民大学出版社, 2017. 6

可靠性工程师注册考试指定辅导教材

ISBN 978-7-300-24423-5

I. ①可… II. ①李… III. ①可靠性工程-手册 IV. ①TB114.4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 116116 号

可靠性工程师注册考试指定辅导教材

可靠性工程师手册 (第二版)

中国质量协会组织编写

李良巧 主编

Kekaoxing Gongchengshi Shouce

出版发行 中国人民大学出版社

社 址 北京中关村大街 31 号

电 话 010-62511242 (总编室)

010-82501766 (邮购部)

010-62515195 (发行公司)

网 址 <http://www.crup.com.cn>

<http://www.ttrnet.com> (人大教研网)

经 销 新华书店

印 刷 北京昌联印刷有限公司

规 格 185 mm×260 mm 16 开本

印 张 25.25 插页 2

字 数 558 000

邮政编码 100080

010-62511770 (质管部)

010-62514148 (门市部)

010-62515275 (盗版举报)

版 次 2012 年 4 月第 1 版

2017 年 6 月第 2 版

印 次 2017 年 6 月第 1 次印刷

定 价 59.00 元

版权所有 侵权必究

印装差错 负责调换

可靠性工程师手册（第二版）编辑委员会

顾 问 陈邦柱 陆燕荪

主 任 贾福兴

委 员 段永刚 李良巧 段一泓 康 锐 李长福 曾 楨

主 编 李良巧

编写组成员（以下排名不分先后）

李良巧 马 林 康 锐 李长福 吕 青 段一泓

姬广振 章文晋 崔利荣 曾 楨 王林波

中国质量协会质量专业人员 注册考试丛书序

2012年2月6日，国务院发布《质量发展纲要（2011—2020年）》，对我国今后一个时期的质量工作做出了总体部署。该纲要将“质量素质提升”列在质量提升工程之首，把质量知识的普及与质量专业人才的培养作为提高质量的重要举措，显示了国家对质量人才队伍培养的高度重视。人才是经济社会发展的第一资源，2009年《全国工业企业质量管理现状调查》^①结果表明，现阶段人员素质是制约我国企业质量水平提升的最重要因素之一，企业对各类质量专业人才需求迫切。建立完善的质量专业人才培养和职业发展机制，培养满足企业发展需要的高水平质量专业人才，是建设质量强国的必然选择。

目前，国家正积极探索和鼓励人才培养的新机制，《国家中长期人才发展规划纲要（2010—2020年）》中提出，要建立和完善与国际接轨的工程师认证认可制度，提高工程技术人才职业化、国际化水平。要完善以市场和出资人认可为核心的企业经营管理人才评价体系，建立社会化的职业经理人资质评价制度。从美国、德国和日本等国家质量人才培养的经验看，专业化和职业化方式是比单纯学校教育更为普遍的做法。2004年起，中国质量协会在多年跟踪、研究发达国家质量专业人才培养机制和知识体系的基础上，在人力资源和社会保障部、中国企业联合会的支持下，采用国际通用模式陆续建立起六西格玛绿带、六西格玛黑带、质量经理、可靠性工程师等质量专业人员考试注册制度。截至2016年，参加各项考试注册的质量专业人员已超过5万人，为企业选拔和培养了一大批具有专业能力、符合实践要求的质量管理人才。

中国质量协会组织开展的注册考试呈现如下显著特点：第一，知识大纲与国际接轨，既保证了知识体系的先进性、适用性，又结合国内现实需求。每一种注册考试都设有专业委员会，聘请该领域产、学、研结合的专家队伍对知识大纲、教材及考试内容把关。第二，知识考核与专业技能确认缺一不可。取得中国质量协会质量专业人员注册资格，不仅

^① 工业和信息化部2009年委托中国质量协会开展了部分工业行业的质量管理现状调查，调查结果得到政府有关部门高度重视。

必须参加全国统考,取得合格成绩之后,还需要通过专业的面试或者提交书面专业报告,以验证考生的专业实践能力。第三,考试流程规范,确保公平公正。为保证注册考试的公正性,中国质量协会设立了专门的注册考试管理部门,实施规范的专业化考试注册流程。考试办公室组织编写公开的考试大纲和相应教材,举办教师资格认证,但不参与考前培训辅导活动。第四,紧密结合企业质量人才现实需求。每年组织注册考试专项研究,完善知识大纲,与企业、学术界进行充分的交流,确保注册资格考试的水平,满足企业实践对各类质量人才知识能力的要求。

为推广先进的质量管理理念、方法和工具,并为准备参加资格考试的学员提供与相应的知识大纲一致的资料和信息,中国质量协会组织国内优秀专家团队编写了这套注册考试系列丛书。每种图书一般以“手册”为名,例如“可靠性工程师手册”,意在说明这是一本具有系统完整的知识体系、适合可靠性工程师岗位使用的专业图书,是可靠性工程师必备的工具书。因此,这套丛书虽然是注册考试的辅导教材,但其用途可以更加广泛,出版以来受到了社会各界的关注和广大质量工作者的欢迎。

中国质量协会始终以提升组织竞争力和质量人员专业能力为己任,着力推进质量专业人员知识体系的开发和选拔、培养、职业发展机制的建立,不断地推出满足企业 and 质量从业人员需要的产品和服务。希望这套丛书能在帮助国内企业增强竞争力以及提升质量人员专业能力方面发挥作用。

中国质量协会

序

质量既是科技创新、资源配置、劳动者素质等因素的集成，又是法治环境、文化教育、诚信建设等方面的综合反映。可靠性是产品质量的核心内容之一，是企业技术和管理水平的综合反映，关系顾客满意，关系企业竞争力，关系经济的可持续发展。

改革开放 30 多年来，我国产品的质量有了很大的提升，但在可靠性方面与发达国家仍存在较大的差距，与经济全球化发展的要求还不适应，提升可靠性是迫切需要解决的问题。为了改变这种状况，国务院发布的《质量发展纲要（2011—2020 年）》中，明确提出要实施五项质量提升工程，可靠性提升工程是其中之一。纲要中提出，实施“可靠性提升工程。在汽车、机床、航空航天、船舶、轨道交通、发电设备、工程机械、特种设备、家用电器、元器件和基础件等重点行业实施可靠性提升工程。加强产品可靠性设计、试验及生产过程质量控制，依靠技术进步、管理创新和标准完善，提升可靠性水平，促进我国产品质量由符合性向适用性、高可靠性转型。到 2020 年，我国基础件、通用件及关键自动化测控部件等可靠性水平满足国内市场需求，重点产品的可靠性达到或接近国际先进水平”。

可靠性水平的提高离不开可靠性知识的普及和人才培养。中国质量协会是全国性质量组织，多年来为推动我国产品质量与可靠性水平的提升做了大量卓有成效的工作，并于 2008 年成立了可靠性推进工作委员会。在委员会的推动下，调研并完成了多个重点行业的可靠性现状报告，为政府决策提供了依据；建立了可靠性工程师考试注册制度，培养了一批可靠性专业人才；在中国质量协会质量技术奖中开展了优秀可靠性项目评选活动，促进了可靠性管理的推广应用；完成了用于指导企业可靠性项目实施的《可靠性管理项目评价标准》的研究与建立；组织召开了首届“全国可靠性管理项目发表赛”，搭建了可靠性工作交流平台，总结了优秀企业的经验，促进了产学研及不同行业 and 不同企业间的交流和分享。

为了更好地培养可靠性人才，中国质量协会组织专家编写了《可靠性工程师手册》，在编写过程中收集整理了来自政府、高校、科研院所、企业等多方面的意见，力求精准，



历时将近4年。在即将完稿之际,恰逢国务院出台《质量发展纲要(2011—2020年)》。纲要的出台为可靠性工作的推进提供了机遇,希望这本书的出版能够更好地促进可靠性人才的培养,加强可靠性工作的推进,提升我国产品的可靠性水平。

原机械工业部副部长
中国质量协会可靠性推进工作委员会主任

2012年3月15日

第二版前言

本书自 2012 年出版以来，受到读者广泛的关注和欢迎。随着贯彻国务院发布的《质量发展纲要（2011—2020 年）》工作的深入，企业在“提质增效”和“转型升级”过程中，质量意识普遍增强，对以可靠性为中心的质量技术需求将更加迫切，同时考虑到质量工程技术的发展，可靠性工程师除了要掌握可靠性知识，还应较全面地理解和掌握产品质量特性中的维修性、测试性、保障性、安全性和环境适应性等相关知识，中国质量协会可靠性推进工作委员会决定对本书进行改版。

此次改版将比较完整地介绍与通用质量特性有关的可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性、环境适应性等“六性”。将“可靠性工程”作为重点，安排为上篇，仍保留 7 章；将其他“五性”的相关内容作为下篇，分为 5 章进行介绍。具体修改如下。

将本书第一版的第 5 章中有关维修性的内容修改为本版中的第 8 章维修性工程基础，有关测试性的内容修改为本版中第 9 章测试性工程基础，有关可用性的内容经修改放入新增的第 10 章保障性工程基础；将第 1 章中有关安全性的内容修改为本版第 11 章安全性工程基础，有关软件可靠性的内容修改后和人—机可靠性合并为第 5 章软件可靠性与人—机可靠性。此外，新增第 12 章环境适应性工程基础和绪论。在绪论中，说明了通用质量特性和“六性”之间的关系。

本版各章撰写人为：绪论李良巧，第 1 章李良巧，第 2 章李长福，第 3 章李长福、李良巧、钱云鹏，第 4 章李长福，第 5 章李良巧，第 6 章李长福，第 7 章李良巧，第 8 章姬广振，第 9 章至第 12 章李良巧，全书由李良巧统一编校。

在改版过程中，中国质量协会始终对本书的编写和出版给予大力支持和指导。同时，北京航空航天大学教授、可靠性推进工作委员会专家委员会副主任康锐给予了很多指导和支持，并审阅了第 5 章、第 9 章至第 12 章。中国空间技术研究院遇今研究员审阅了绪论。中国兵器科学研究院何恩山同志、张侦英同志在编写过程中提供了帮助。在改版过程中，重点参考并部分引用了康锐主编的《可靠性维修性保障性工程基础》。在此对他们表示由



衷的感谢。

尽管我们已经努力确保本书内容准确,但错误终难避免。如果您发现了书中的任何错误,我们都非常乐于见到您将错误提交给我们,以便我们不断提高本书后续版本的质量。

联系邮箱: cre@caq.org.cn。

《可靠性工程师手册》编委会
中国质量协会可靠性推进工作委员会

第一版前言

“质量是企业的生命”，“军工产品，质量第一”，“质量兴国，质量兴市”等口号目前已是人们耳熟能详的。“质量”一词的权威定义即一组固有特性满足要求的程度。但要能够系统、全面地说清楚“质量”并不是一件很容易的事。作者同意目前的一种说法，即产品的一组固有特性，包括产品专用质量特性和通用质量特性两部分。专用质量特性是指产品的功能和性能，如飞机的飞行高度、飞行速度和续航距离，卡车的载重量、乘员数量和油耗，导弹的射程、威力和精度等。通用质量特性是指保证产品各种功能和性能有效发挥的一组共有的技术特性，如产品能安全可靠工作的持续时间，产品发生故障能否快速、经济地修复，产品能否适应规定的各种环境等。产品的专用质量特性和通用质量特性正如人的双腿，缺一不可。产品因其具有具体且明确的专用质量特性而成产品，然而如果通用质量特性不好，故障频发，维修费用高昂，这肯定不是好的产品，不是顾客满意的产品。这说明包括可靠性、维修性等通用特性非常重要。这一点越来越被有作为的企事业单位所认识和重视，它们积极引进、学习、研究和推广应用可靠性、维修性工程，并在提高产品质量中发挥了重要作用。

目前，不可否认的事实是，我国产品与发达国家相比还有很大差距，这种差距不仅表现在功能、性能等专用质量特性上，更重要的表现在产品的可靠性、维修性上。造成通用质量特性这种明显差距的原因很多，但对产品可靠性、维修性的重要性认识不足和缺乏可靠性、维修性专业人才是一个重要的原因。为了改变这种局面，中国质量协会 2008 年专门成立了可靠性推进工作委员会并在委员会下设立专家委员会和推进办公室。同时借鉴国外可靠性工程师注册管理制度和做法，在我国试行可靠性工程师注册制度，制定了《中国质量协会可靠性工程师注册管理办法》《注册可靠性工程师考试管理办法》和《注册可靠性工程师考试大纲》。

为了配合注册可靠性工程师考试工作的开展和可靠性知识的普及，中国质量协会、卓越国际质量科学院积极策划和组织《可靠性工程师手册》的编写。主编接受中国质量协会的委托，依据《注册可靠性工程师考试大纲》的要求，组织有关可靠性工作者，在参考国内外有关可靠性、维修性工程方面的著作并结合工程实践的基础上编成此书，以使读者能够对通用质量特性有较为全面的了解。本书可供有志于献身我国可靠性工作的工程师学习



和参考,亦可供渴望了解可靠性、维修性知识的管理者、产品研发工程师和质量管理工程师参考。

本书编写过程中大量参考或引用了国内外相关的著译作,引用最多的是龚庆祥主编、赵宇和顾长鸿副主编的《型号可靠性工程手册》和任立明主编、何国伟和周海京副主编的《可靠性工程师必备知识手册》。在此,编者特向各位著译者表示衷心的感谢。

本书各章的编写者为:第1章李良巧,第2章李长福、冯欣,第3章李长福、李良巧、冯欣、钱云鹏、陈凤熹,第4章李长福,第5章姬广振,第6章李长福,第7章李良巧。张孔峰审阅了部分章节,全书由李良巧统稿和审定。

本书由中国质量协会可靠性推进工作委员会办公室组织编写,编写过程得到中国质量协会可靠性推进工作委员会陆燕荪主任、著名可靠性专家何国伟教授的指导。中国质量协会段一泓副秘书长,李文成、赵建坤、王丽林部长以及总装可靠性专业组顾问、导航与控制研究所领导夏建中研究员及诸多研究人员对本书的编辑出版给予了大力支持,在此致以衷心感谢。

由于编者水平有限,本书疏漏、不足及错误定然有之,恳请读者批评指正,以求不断改进完善。

《可靠性工程师手册》编委会
中国质量协会可靠性推进工作委员会

目 录

绪 论	1
-----	---

上篇 可靠性工程

第 1 章 可靠性概论	7
1.1 可靠性工程的发展及其重要性	7
1.2 产品质量与可靠性的关系	12
1.3 可靠性工程	15
1.4 可靠性定义及分类	17
1.5 故障（失效）及其分类	18
1.6 可靠性和产品性能	20
1.7 可靠度、累积故障和故障密度分布函数	20
1.8 可靠性常用度量参数	22
1.9 产品故障率浴盆曲线	25
1.10 产品可靠性要求	26
第 2 章 可靠性数学基础	29
2.1 概率论基础	29
2.2 可靠性工程中常用的概率分布	30
2.3 参数估计	38
第 3 章 可靠性设计与分析	43
3.1 概 述	43
3.2 可靠性建模、分配和预计	45
3.3 故障模式、影响及危害性分析	64
3.4 故障树分析	89
3.5 可靠性设计准则的制定与实施	101
3.6 电子产品可靠性设计与分析	107
3.7 机械产品可靠性设计与分析	129



第 4 章 可靠性试验	152
4.1 概 述	152
4.2 环境应力筛选	154
4.3 可靠性研制试验	164
4.4 可靠性增长试验	171
4.5 可靠性鉴定和验收试验	174
4.6 寿命试验	186
第 5 章 软件可靠性与人—机可靠性	193
5.1 软件可靠性	193
5.2 人—机可靠性	204
第 6 章 数据收集、处理与应用	212
6.1 概 述	212
6.2 数据类型、来源和收集	213
6.3 数据处理和评估	215
6.4 数据管理和应用	226
6.5 数据收集、处理与应用的工程应用要点	227
第 7 章 可靠性管理	230
7.1 概 述	230
7.2 制定并实施可靠性发展战略	230
7.3 可靠性工作的基本原则	231
7.4 故障报告、分析和纠正措施系统	232
7.5 可靠性评审	237
7.6 可靠性工程知识培训	238
7.7 可靠性工程师	239
7.8 可靠性信息管理	241
7.9 产品可靠性保证大纲	243

下篇 维修性、测试性、保障性、安全性、环境适应性工程基础

第 8 章 维修性工程基础	261
8.1 概 述	261
8.2 维修性基本概念	262
8.3 维修性要求	266
8.4 维修性设计与分析	268
8.5 维修性试验与评价	274
8.6 维修性管理	277
8.7 工程应用要点	279

第 9 章 测试性工程基础	283
9.1 概 述	283
9.2 测试性要求	285
9.3 测试性设计与分析	287
9.4 测试性试验与评价	294
9.5 测试性管理	301
9.6 工程应用要点	301
第 10 章 保障性工程基础	303
10.1 概 述	303
10.2 可用性	306
10.3 保障性要求	308
10.4 综合保障的规划与管理	310
10.5 规划使用保障与维修保障	311
10.6 规划与研制保障资源	312
10.7 保障性试验与评价	314
10.8 工程应用要点	316
第 11 章 安全性工程基础	318
11.1 概 述	318
11.2 安全性要求	323
11.3 安全性设计与分析	324
11.4 安全性验证与评价	337
11.5 软件安全性	340
11.6 安全性管理	340
11.7 工程应用要点	341
第 12 章 环境适应性工程基础	343
12.1 概 述	343
12.2 环境适应性要求	347
12.3 环境适应性设计	347
12.4 环境试验与评价	354
12.5 环境适应性管理	357
12.6 工程应用要点	358
附录 A 国际、国家标准一览表	361
附录 B 函数表	372
附录 C 注册可靠性工程师考试大纲	388

绪 论

“质量是企业的生命”，几乎人人皆知。在国务院发布的《质量发展纲要（2011—2020年）》（以下简称《纲要》）中更是明确指出，质量发展是兴国之道、强国之策。质量反映了一个国家的综合实力，是企业和产业核心竞争力的体现，也是国家文明程度的体现。质量既是科技创新、资源配置、劳动者素质等因素的集成，又是法制环境、文化教育、诚信建设等方面的综合反映。质量问题是经济社会发展的战略问题，关系可持续发展，关系人民群众的切身利益，关系国家形象。《纲要》提出在全国开展质量提升工程（包括质量素质提升工程、可靠性提升工程、顾客满意度提升工程、质量对比提升工程和清洁生产提升工程）。在《中国制造2025》中更是把“质量为先”作为五条基本方针之一，把质量品牌建设作为九大战略任务和重点之一。可见质量是如此重要。那么，产品可靠性与质量是什么关系？为什么企业实施可靠性提升工程就能提高产品质量？产品质量除了强调可靠性，为什么还要强调维修性、测试性、保障性、安全性和环境适应性？这些特性之间又有什么联系？这些问题是企业开展可靠性提升工程必须清楚的，也是可靠性工程师必须掌握的。

Quality 在 GB/T 19000—2016《质量管理体系 基础和术语》中被译为质量。其定义是：客体的一组固有特性满足要求的程度。同时还有两条注释。注1：术语“质量”可使用形容词来修饰，如：差、好或优秀。注2：“固有”（其对应的是“赋予”）是指存在于客体中。

要全面理解质量的内涵，必须重点理解质量定义中的术语“客体”“特性”和“要求”包含的内容。这几个关键术语在 GB/T 19000—2016 中都有定义。“客体”的定义是：可感知或可想象到的任何事物。示例：产品、服务、过程、人员、组织、体系、资源。“特性”的定义是：可区分的特征。同时附有三条注释。注1：特性可以是固有的或赋予的。注2：特性可以是定性或定量的。注3：有各种类别的特性，如：

- a) 物理的（如：机械的、电的、化学的或生物等的特性）；
- b) 感官的（如：嗅觉、触觉、味觉、视觉、听觉）；
- c) 行为的（如：礼貌、诚实、正直）；
- d) 时间的（如：准时性、可靠性、可用性、连续性）；
- e) 人因功效的（如：生理的特性或有关人身安全的特性）；
- f) 功能的（如：飞机的最高速度）。

“要求”的定义是：明示的、通常隐含的或必须履行的需求或期望。

根据质量和客体的定义，质量就可以理解为产品、服务、过程、人员、组织体系、资源的一组固有特性满足要求的程度。也就有人们常说的产品质量、服务质量、体系质量……本书讲述的是产品的可靠性、维修性等特性，涉及的客体是产品。因此，我们讨论的是产品质量，即产品一组固有特性满足要求的程度。仔细分析“特性”定义中所包含的六种特性，很明显产品不可能具有行为的特性，行为的特性只存在于客体中的服务和人员等对象。因此，产品质量可理解为产品一组物理的、感官的、时间的、人因工效的和功能的等五种特性满足要求的程度。进一步对这五种固有特性进行分析，我们可以按是否能在物理空间独立存在分为两类：能在物理空间独立存在的物理的、感官的、人因功效的和功能的等四种特性为一类；不能在物理空间独立存在的时间的特性为另一类。前一类四种特性以汽车为例作简要说明。汽车的物理特性：机械特性如车长、车高、车宽、发动机的缸数、轮胎的尺寸等；电的特性如发动机点火电压电流、自动导航设备的性能、显示器显示的参数、音响的参数等；化学的特性如燃油或燃气的成分等。汽车的感官特性：视觉特性如颜色，听觉特性如音响效果，触觉特性如车门把手的舒适度、嗅觉特性如车内味道等。汽车的人因功效特性如车内座椅的形状和位置、靠背的舒适程度、安全气囊等。汽车的功能特性如最高时速、手动排挡、自动排挡等。对于这一类特性在工程上我们习惯称为产品功能和性能，在产品开发过程中一般称为产品的技术要求。产品只有具备满足用户需要的功能和性能要求才能成为产品。近年来又将其称为“专用质量特性”。这一类特性是一种确定性的特性，可在物理空间独立存在。也就是GB/T 19000—2016中“性能”所定义的“可测量的结果”。之所以称为“专用质量特性”，是因为不同的产品要用一组特定专用的参数来度量。例如，高铁要以最高时速、载客量、刹车距离等参数描述；计算机则要用另一组参数如计算速度、内存容量等描述。后一类不能在物理空间独立存在的就是时间的特性，它是用来度量产品的专用特性与时间有关的特性，也就是度量产品物理的、感官的、人因功效的和功能的特性与时间有关的特性，度量可采用可靠性、维修性、保障性、测试性、安全性和环境适应性等（通常简称为“六性”），在GJB 9001C《质量管理体系要求》中，把这六性称为“通用质量特性”。下面分别对“六性”如何度量专用质量特性的时间特性作简要说明。

可靠性是指产品在规定条件下和规定时间内完成规定功能的能力。也就是产品出厂时各项功能和性能符合制造验收规范要求的合格水平在规定条件下所能保持的时间，合格水平保持的时间越长，说明产品越可靠。之所以称为通用质量特性，是因为只要是可修复类型的产品都可以用平均故障间隔时间（MTBF）这一通用参数来度量，不管是汽车、计算机、电视机还是空调等都可用MTBF度量；只要是不可修复类型的产品都可以用失效前平均时间（MTTF）这一通用参数来度量，不管是灯泡、弹药还是刹车片等都可用MTTF度量。由于产品什么时候发生故障或失效，即产品由合格水平变为不合格水平是一种随机事件，因此，通用质量特性是一个不确定的事件，规定的可靠性定量要求不能像专用质量特性那样可以用测量仪器测量其真值，可靠性的定量要求是一个统计量。

维修性是指产品在规定条件下和规定时间内，按照规定的程序和方法进行维修时，保持或恢复到规定状态的能力。产品维修性主要涉及预防性维修和修复性维修，核心是规定的时间，无论是预防性维修时间还是修复性维修时间，都期望越短越好。时间越短，产品