

21世纪高等教育新理念精品规划教材

可靠性与优化设计

KEKAOXING YU YOUHUA SHEJI

主 编 张永芝

副主编 段志信 姜爱峰 张 丽



天津大学出版社

TIANJIN UNIVERSITY PRESS

21世纪高等教育新理念精品规划教材

可靠性与优化设计

主 编 张永芝

副主编 段志信 姜爱峰 张 丽



天津大学出版社
TIANJIN UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

可靠性与优化设计 / 张永芝主编. — 天津: 天津
大学出版社, 2018.1 (2019.1 重印)
21世纪高等教育新理念精品规划教材
ISBN 978-7-5618-6044-1

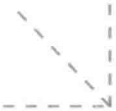
I. ①可… II. ①张… III. ①可靠性设计—最优设计
—高等学校—教材 IV. ①TB114.32

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第005556号

出版发行 天津大学出版社
地 址 天津市卫津路92号天津大学内(邮编: 300072)
电 话 发行部: 022-27403647
网 址 publish.tju.edu.cn
印 刷 北京虎彩文化传播有限公司
经 销 全国各地新华书店
开 本 185mm×260mm
印 张 8
字 数 175千
版 次 2018年1月第1版
印 次 2019年1月第2次
定 价 22.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 烦请向我社发行部门联系调换

版权所有 侵权必究



前言

PREFACE

随着科学技术的飞速发展，可靠性和优化技术日益受到人们的关注，目前，可靠性和优化技术已经成为科研和生产中不可或缺的内容。

可靠性技术是随着事故与灾难的发生而发展起来的。自从第一次世界大战起，人们就开始研究延长武器寿命的产品，以提高可靠性，但发展的速度不够明显。科学技术的进一步发展，尤其是计算机的出现，使得可靠性技术得到飞速发展，不但出现了一些实用的计算方法，而且出现了保证设计质量与提高可靠性的具体措施。国际上，美国于1950年成立了“电子设备可靠性顾问团”（AGREE），并于1957年发表了关于可靠性特征及可靠性试验的报告。从此，可靠性技术在世界各地得到了迅速发展。国内的可靠性研究也适应社会的发展与国际竞争的需要，出现了一种崭新的气象。

第二次世界大战期间，美国在军事上首先应用了优化技术。1967年，美国的R. L. 福克斯等发表了第一篇机构最优化论文。随着数学理论和电子计算机技术的进一步发展，优化设计已逐步成为一门新兴的独立的工程学科，并在生产实践中得到了广泛的应用。

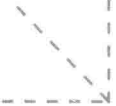
为了适应形势与教学的需求，编者根据多年的教学和科研经验，在参考相关著作的基础上，撰写了本书。

“可靠性与优化设计”是一门专业技术课程。由于它的系统性和理论性较强，而且对数学基础要求高，学生在学习过程中会有一定的困难。本书的宗旨是为初学者启蒙和为应用者奠定基础，因此，在编写中将教学重点放在了正确建立基本概念和基本理论上，力求把严密的可靠性理论体系采用通俗易懂的语言来撰写，避免冗长公式的推导，更易于学生学习。为了应用方便，在书中还给出了计算框图以及详细步骤；为培养学生分析问题和解决问题的能力，书中每章都有一定数量的例题。

本书由多位教师参与编写，其中第1章、第2章、第5章及各章习题由张永芝编写，其余各章由段志信编写，姜爱峰和张丽负责文字输入、绘图及排版工作。在本书编写过程中得到了学校、学院的大力支持及帮助，在此表示诚挚的感谢。

由于编者水平有限，书中不足之处在所难免，欢迎广大读者批评指正。

编 者



目 录

CONTENTS

第1章	引论	1
1.1	可靠性的产生与发展	1
1.2	可靠性的概念	3
1.3	可靠性的重要意义	4
1.4	可靠性的研究内容	5
1.5	可靠性的学习方法	6
第2章	可靠性设计的地位、特点、内容、方法和步骤	7
2.1	可靠性设计的地位	7
2.2	可靠性设计的特点	9
2.3	可靠性设计的内容	9
2.4	可靠性设计的方法和步骤	10
第3章	可靠性数学基础及特征量	12
3.1	可靠性数学基础	12
3.2	可靠性的特征量	18
3.3	常用概率分布的可靠性特征量计算	22
第4章	可靠性随机变量运算与模拟	35
4.1	随机变量代数计算	35
4.2	确定随机变量分布的方法	37
第5章	可靠性失效理论	42
5.1	失效的概念	42
5.2	失效模式和失效机理	43

5.3	失效率模型及失效率曲线	44
5.4	失效的界限模型与耐久模型	46
5.5	应力—强度干涉失效模型	47
5.6	累积损伤模型	49
第6章	可靠性数据分析	53
6.1	可靠性数据的收集	53
6.2	可靠性数据分布参数的估计方法	54
6.3	可靠度的置信区间	57
6.4	可靠性数据概率分布的正态性检验	59
第7章	可靠性设计与可靠度计算	63
7.1	概述	63
7.2	可靠性设计理论应力—强度干涉理论	65
7.3	可靠度一般计算方法	69
7.4	常见分布的可靠度计算	70
7.5	可靠度特殊计算方法	73
第8章	机械可靠性设计	86
8.1	应力分布类型和分布参数确定	86
8.2	强度分布及其参数的确定	88
8.3	分布状态的疲劳曲线	95
8.4	分布状态的疲劳极限应力线图	97
8.5	稳定交变应力下的可靠度计算	99
8.6	不稳定交变应力的可靠性计算	102
8.7	轴的可靠性设计实例	104
8.8	齿轮传动可靠性设计实例	106
第9章	机械可靠性优化设计	110
9.1	优化设计与可靠性优化设计	110
9.2	可靠度分配的简单方法	110
9.3	可靠度分配的优化方法——动态规划法	111
9.4	机械强度可靠性优化设计	116
9.5	齿轮减速器优化设计	118
参考文献		122

第 1 章 引 论

1.1 可靠性的产生与发展

可靠性是一门新兴的工程学科。产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一。近年来,世界各发达国家已把可靠性技术和全面质量管理紧密地结合起来,有力地提高了产品的可靠性水平。

可靠性工程的诞生可以追溯到 20 世纪 40 年代,即第二次世界大战期间。当时,由于战争的需要,迫切要求对飞机、火箭及电子设备的可靠性进行研究。最早提出可靠性理论的是德国的科学技术人员,德国在 V1 火箭的研制中,提出了火箭系统的可靠性等于所有元器件可靠度乘积的理论,即把小样本问题转化为大样本问题进行研究。到了 20 世纪 50 年代初期,美国为了发展军事,投入了大量的人力、物力对可靠性进行研究。美国先后成立了“电子设备可靠性专门委员会”“电子设备可靠性顾问委员会”。1964 年 6 月 4 日,美国的“电子设备可靠性顾问委员会”发布了《军用电子设备可靠性报告》。这就是著名的“AGREE”报告。这一报告提出可靠性是可建立的、可分配的及可验证的,从而为可靠性学科的发展提出了初步框架。“AGREE”报告是美国可靠性工程学发展的奠基性文件。因此,真正为可靠性奠定基础的是美国。

20 世纪 50 年代,苏联为了保证人造地球卫星发射与飞行的可靠性,开始了可靠性的研究工作。同时,为了满足作战对导弹可靠性的要求,一些国家也先后开展了对可靠性的研究与应用。也就在这一时期,日本企业家认识到,要在国际市场的竞争中取胜,必须进行可靠性的研究。1958 年日本科学技术联盟成立了“可靠性研究委员会”,专门对可靠性问题进行研究。

1961 年,苏联发射第一艘有人驾驶的宇宙飞船时,宇航员对宇宙飞船安全飞行和安全返回地面的可靠性提出了概率的要求,可靠性研究人员把宇宙飞船系统的可靠性转化为各元器件的可靠性进行研究,取得成功,满足了宇航员对宇宙飞船系统提出的可靠性要求。也就在这一时期,苏联对可靠性问题展开了全面的研究。

20 世纪 60 年代是美国航空航天事业迅速发展的时期。美国国家航空航天管理局(NASA)和美国国防部接受了 20 世纪 50 年代由 NASA 发展起来的可靠性设计及试验方案。与此同时,计算机硬件也从晶体管到集成电路,并朝着超大规模集成(VLSI)方向发展。计

算机的进步主要源于硬件的进步,那时软件的重要性还不显著。软件可靠性问题获得重视是在20世纪60年代末。这时,苏联、法国、日本、英国等国家也相继开展了可靠性工程的研究。20世纪60年代我国在雷达、通信机、电子计算机等方面也提出了可靠性问题。

20世纪70年代,各种各样的电子设备或系统广泛应用于各科学技术领域、工业生产部门以及人们的日常生活中。电子设备的可靠性直接影响着生产的效率、系统、设备以及人们的安全,对可靠性问题的研究显得日益重要。同时,人们也开始了对非电子设备(如机械设备)可靠性的研究,以解决已有的电子设备可靠性设计及试验技术对非电子设备使用时受到限制和结果不理想的问题。

20世纪70年代,计算机软件可靠性的理论一方面提出了数十种软件可靠性模型,另一方面是对软件容错的研究,提出了分别与硬件静态冗余和动态冗余相对应的软件N文本方法和恢复方法。

20世纪70年代,由于我国国家重点工程的需要(元器件的可靠性问题)以及消费者的强烈要求(电视机的质量问题),对各行各业开展可靠性的研究起到了巨大的推动作用。从1973年起,原国防科工委和原四机部为了解决国家重点工程元器件的可靠性问题,多次召开有关提高可靠性的工作会议。1978年提出《电子产品可靠性“七专”质量控制与反馈科学试验》计划,并组织实施。经过多年努力,使军用元器件可靠性提高了两个数量级,保证了运载火箭、通信卫星的连续发射成功和海底通信电缆的长期正常运行。

1978年,国家计划委员会、电子工业部及广播电视总局陆续召开了有关提高电视机质量的工作会议。对电视机等产品明确提出了可靠性、安全性的要求和可靠性指标,组织全国整机及元器件生产厂家开展了大规模的、以可靠性为重点的全面质量管理。在五年的时间里,使电视机平均故障间隔时间提高了一个数量级,配套元器件使用可靠性也提高了一个至两个数量级。

20世纪80年代,可靠性研究继续朝广度和深度发展,中心内容是实现可靠性保证。1985年,美国军方提出在2000年实现“可靠性加倍,维修时间减半”的目标,到2016年为止已全部实现预期计划。

20世纪80年代初,我国掀起了电子行业可靠性工程和管理的第一高潮。组织编写可靠性普及教材,在原电子工业部内普遍开展可靠性教育,形成了一批研究可靠性的骨干队伍。

1984年组建了全国统一的电子产品可靠性信息交换网,并颁布了GJB/Z 299—1987《电子设备可靠性预计手册》,有力地推动了我国电子产品可靠性工作。同时还组织制定了一系列有关可靠性的国家标准、国家军用标准和专业标准,使可靠性管理工作进入标准化轨道。在20世纪80年代,软件可靠性理论研究停滞不前,没有质的飞跃。但软件可靠性的工程实践经验得到不断积累,不少软件可靠性技术在软件工程实践中得以应用。某些技术达到实用化程序,如软件可靠性建模技术、管理技术等。可以说这一时期,软件可靠性从研究阶段逐渐迈向工程化阶段。

20世纪90年代初,原机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”,沿着

“管起来—控制好—上水平”的发展模式开展可靠性工作，掀起了我国第二次可靠性工作的高潮，取得了较好的成绩。进入20世纪90年代后，由于软件可靠性问题的重要性更加突出和软件可靠性工程实践范畴的不断拓展，软件可靠性逐渐成为软件开发者需要考虑的重要因素，软件可靠性工程在软件工程领域逐渐取得相对独立的地位，并成为生机勃勃的分支。

1991年，海湾战争的“沙漠风暴”行动和科索沃战争表明，未来战争是高技术的较量。现代化技术装备由于采用了大量的高技术，极大地提高了系统的复杂性，为了保证战备的完好性、任务的成功性以及减少维修人员和费用，可靠性工程范围将大大扩展，需要更多的可靠性技术做保证，需要更加严密的可靠性管理系统，可靠性研究需要上一个台阶。

综上所述，可靠性工程的诞生、发展是社会的需要，与科学技术的发展，尤其与电子技术的发展是分不开的。虽然可靠性工程起源于军事领域，但从它的推广应用到给企业与社会带来巨大经济效益的事实中，人们更加认识到提高产品可靠性的重要性。世界各国纷纷投入大量人力、物力进行研究，并在更广泛的领域里推广应用。我国可靠性工程虽然发展快，但是目前与发达国家相比，还有很大差距。为尽快改变我国可靠性工作落后的局面，各级领导和各类人员应尽快从认识上转变观念，树立当代质量观，“以质量求生存，求发展”。把产品性能和可靠性同等看待，这是推动可靠性发展的关键。与此同时，要有效地推动可靠性工程，应将可靠性理论研究成果和可靠性工程技术应用于可靠性工程实践中，把对产品的可靠性要求纳入产品指标体系，并要有相应的考核要求和办法。

1.2 可靠性的概念

可靠性(reliability)是以发生故障的难易程度作为考虑问题的出发点，由若干个工作单元组成，能够完成某些特定工作功能的整体，称为工程系统。

现代工程系统是复杂系统。非线性、多体性、开放性是其普遍特征，因而由此产生的不稳定性及其表现形式——不确定性从本质上是无法消除的，只能从统计规律意义上的一定范围加以控制，并对其做出概率性质的预言，即可靠性预测。

可靠性预测并不否定传统预测模型的建设性作用，而是把它界定在一定范围内(如甚小方差系统)，并常常将系统预测结果作为统计期望值，而实际预测值在此期望值附近随机涨落，并对此涨落的水平和分布特性做出正确描述。即它不把所谓的标准值绝对化，而是作为一种有用的参考值，并对不可忽视的涨落做出概率性预测，此即可靠性的科学概念。

可靠性的科学概念必须体现在产品设计之中。GB/T 2900.99—2016《电工术语可信性》给出了可靠性的工程定义：“在给定的条件，给定的时间区间，能无失效地执行要求的能力。”该定义涵盖以下要点。

(1)持续时间区间可用与产品有关的适合的计量单位表示,例如日历时间、工作周期、行程等,这些计量单位宜清晰阐述。

(2)给定的条件包括影响可靠性的各个方面,如运行模式、应力水平、环境条件和维修。

(3)可靠性采用量度指标予以定量化。

可以看出,上述工程定义是可靠性科学概念在工程应用中的具体化,它丰富了可靠性的科学含义。

产品的可靠性与设计、制造、试验、贮运、使用、维护等一系列环节有关,是典型的复杂性系统,须正确运用随机方法、模糊性理论和系统科学方法,并依据可靠性技术(可靠性试验、评估和管理等)加以实现。可靠性工程学是上述诸方面理论与技术相互渗透、相互制约的一门综合性前沿学科。

1.3 可靠性的重要意义

对于产品来说,可靠性问题和人身安全、经济效益密切相关。因此,研究产品的可靠性问题显得十分重要,非常迫切。例如,导弹武器系统是由导弹和地面设备的若干个分系统组成,每个分系统又由数台整机组成,每台整机又由几百或几千个元器件组成。如果一个元件失效,一根导线断掉,一个接头接点接触不良,都可能造成事故,引起严重后果。又如,飞机某一系统或某一元器件如果发生故障,就有可能造成恶性灾难。1971年,苏联三名字航员在“礼炮”号飞船中由于一个部件失灵而丧生。由此可见,提高产品可靠性的重要意义。

(1)提高产品的可靠性,可以防止故障和事故的发生,尤其是避免灾难性的事故发生,从而保证人民生命财产安全。1986年1月28日,美国航天飞机“挑战者”号由于一个密封圈失效,起飞76 s后爆炸,其中七名字航员丧生,造成12亿美元的经济损失;1992年,我国发射“澳星”时,由于一个小零件的故障,使“澳星”发射失败,造成了巨大的经济损失和政治影响。

(2)提高产品的可靠性,能使产品总的费用降低。要提高产品的可靠性,首先要增加费用,以选用较好的元部件,研制包括部分冗余功能部件的容错结构以及进行可靠性设计、分析、试验,这些都需要经费。然而,产品可靠性的提高使得维修费及停机检查损失费大大减少,使总费用降低。例如,美国共和国公司在发展F105战斗轰炸机的过程中,花了2500万美元使该机的任务可靠度从0.7263提高到0.8969,这样每年可节省维修费5400万美元。

(3)提高产品的可靠性,可以减少停机时间,提高产品可用率。一台设备可以顶几台设备的工作效率。这样,在投资、成本相近的情况下,可以发挥几倍的效益。美国GE公司经过分析认为,对于发电、冶金、矿山、运输等连续作业的设备,即使可靠性提高1%,成本提高10%也是合算的。

(4)对于企业来讲,提高产品的可靠性,可以改善企业信誉,增强竞争力,扩大产品销路,从而提高经济效益。

(5)提高产品的可靠性,可以减少产品责任赔偿案件的发生以及其他处理产品事故费用的支出,避免不必要的经济损失。为了提高产品的可靠性,必须在生产的各个环节上做出努力,但最重要的是设计阶段。如果设计不合理,想通过事后的修理来达到所期望的可靠性,这几乎是不可能的。因此,从事仪器研制和系统设计的科研人员,应该熟悉和掌握保证可靠性的各种方法与手段。本书的目的在于帮助目前和今后从事这方面工作的科研人员完成任务。

1.4 可靠性的研究内容

可靠性作为一门工程学科,它有自己的体系、方法和技术,主要包括相互关联的三个方面。

1. 可靠性工程

可靠性工程是为了保证产品在设计、生产及使用过程中达到预定的可靠性指标,应该采取的技术及组织管理措施。它是介于固有技术和管理科学之间的一门边缘学科,具有技术与管理的双重性。可靠性技术在产品全寿命周期的各个阶段的应用目的和任务有以下几个方面。

(1)可靠性设计。通过设计奠定产品的可靠性基础。研究在设计阶段如何预测和预防各种可能发生的故障和隐患以及确保产品的维修性。

(2)可靠性试验。通过试验测定和验证产品的可靠性。研究在有限的样本、时间和使用费用下,如何获得合理的评定结果,找出薄弱环节,提出改进措施,以提高产品的可靠性。

(3)制造阶段的可靠性。通过制造实现产品的可靠性。研究制造偏差的控制、缺陷的处理和早期故障的排除,保证设计目标的实现。

(4)使用阶段的可靠性。通过使用维持产品的可靠性。研究产品运行中的可靠性监视、诊断、预测以及采用售后服务与维修策略,防止可靠性劣化。产品全寿命周期中的可靠性管理的目的是:以较少的费用、时间实现产品计划所要求的定量可靠性,其任务是对各个阶段的所有可靠性工程技术活动进行规划、组织、协调、控制与监督。

2. 可靠性分析

通过可靠性试验,发现产品的薄弱环节,研究导致薄弱环节出现的内因、外因和机理,并找出规律,提出改进措施的工作称为可靠性分析。

3. 可靠性数学

可靠性数学是研究产品故障的统计规律,研究产品的可靠性设计、分析、预测、分配、

评估、验收和抽样等技术的数理统计学方法，概率属于可靠性数学研究的内容。可靠性技术应用于相关领域，可以解决产品的可靠性问题。通过对故障物理、试验技术的研究，提供有关产品故障的机理分析、检测、诊断和设计预防技术；应用数理统计评定技术和现场使用信息反馈等手段，使设计、试验、制造和使用过程形成一个有可靠性保证的循环技术管理体系，通过管理指导技术的合理使用，最终实现可靠性目标。

1.5 可靠性的学习方法

可靠性工程是一门涉及面很广、具有相当深度的学科，它与各边缘学科有着密切的联系。为了有效地学习和正确地应用可靠性工程，并将其研究对象推广到各有关学科领域，应掌握下列基本要点。

1. 掌握概率统计基本知识

概率论和统计学是可靠性工程的基础理论，在此基础上逐步掌握实际数据统计的各个特性。因为就质量管理、运筹学等所用的各种概率统计而言，必须积累大量实践经验，并能随时灵活应用。将基本观点的理论探讨和具体的实际分析两方面有机结合是学习可靠性工程的关键。尤为重要的是实际数据的积累与分析。我们常常可以看到，在所得到的数据资料中，一定存在着有价值的数据。无论多简单的问题，数据的积累都是可靠性工程的基础。此外，需要培养分析、处理数据的能力。为了掌握这些方法的适用范围，最有效的做法是明确其理论依据。

2. 注意与固有技术的联系

一般而言，可靠性工程是通用技术。通用技术与固有技术相结合能发挥其应有的效果。因此，为了恰当地应用可靠性工程，应在掌握某一门固有技术之后学习可靠性工程，更为有效。

思考题

1. 提高产品的可靠性有哪几个方面的重要意义？
2. 产品可靠性的定义是什么？其中规定的条件、规定的时间、规定的功能的意义各是什么？

第2章 可靠性设计的地位、特点、内容、方法和步骤

2.1 可靠性设计的地位

从产品的生产计划开始,经过构思、设计、研制、制造、装配、试验、使用、维修、故障反馈,一直到报废,所有阶段都应当有可靠性保证措施。其中,设计正确是确保设计阶段可靠性的重要一环。因为生产是按照设计进行的,设计决定了产品的固有可靠性。

2.1.1 可靠性技术要求

在设计之初,应当有详细的可靠性技术要求,它把可靠性和维修要求具体化,并且说明操作、维修和环境对可靠性的影响。通常由用户提出技术要求,如果用户没有明确的要求,那么可靠性工程师应当自己确定产品的可靠性目标。根据技术要求,在设计阶段弄清潜在的可靠性缺陷、薄弱环节及其产生的原因,并尽可能在设计阶段及时修改设计。

可靠性技术要求中包括可靠性指标及定义中的几个要点,主要有下列内容。

(1)可靠性指标。应明确地规定指标的目标值,而且可以预测和量度。如果指标是可靠度,应标明规定的时间。

(2)失效定义。必须明确失效的定义和失效模式。

(3)维修性指标。在规定可靠性指标时,维修性是一个重要因素。良好的维修性可以提高零件和设备的可靠性,例如通过预防维修,适时地更换性能逐渐衰退的零件,可以避免由于磨损、变形、疲劳、腐蚀等原因而引起的失效。维修性也有许多指标,经常采用的是平均修复时间(MTTR)和最大维修时间。

(4)载荷情况。需要对载荷谱等加以说明,因为载荷的较强度变化对失效有更大的影响。

(5)环境条件。在正常工作情况下,环境对于应力水平的影响很大,是引起失效的重要原因之一。所以,应当对环境条件进行要求及限制。

(6)可靠性保证。对机械产品进行可靠性试验常常是不可能的,因为可靠性试验费时又

费钱。因此试验不能作为唯一的保险手段。为了保证设计能达到可靠性目标,技术要求应当说明包括哪些关键性的措施(如设计评审、FMECA、FTA等)和预测、如何记录、使用什么数据及来源,采取什么样的设计观点,等等。

2.1.2 冗余分析

冗余也称为贮备,是提高系统或设备可靠性的主要方法之一。在进行设计方案审查时,需要进行冗余分析。冗余在系统设计中比在设备设计中更有用。

在系统中采用冗余的必要性是十分明显的。重要的系统必须有冗余,即在系统中增加一些冗余部件(或子系统),以求当系统的某一零部件发生故障时,整个系统仍能正常工作。如汽车的制动系统。

冗余设计的内容是:在体积、重量、成本和能耗等约束条件下,确定最优的冗余方式和预测冗余系统的可靠性。

冗余有多种方式,常用的有:①并联冗余,例如泵或阀门的并联使用等;②表决冗余(k/n 系统),例如飞机的发动机系统,有4台发动机的飞机,只要其中2台能够正常工作,即可以保证正常飞行,称为2/4系统,因此装4台发动机比装2台发动机有更高的可靠性;③旁联(待机)冗余,冗余部分平时并不参加工作,而是处于等待状态,一旦工作的部件发生故障,它能立即开始工作;④载荷均分并联冗余,在这种冗余系统中并联的子系统平均地分担载荷,当一个子系统失效时,幸存的子系统便承担增大的载荷。

必须注意,为了提高系统的可靠性,应首先考虑采取下列方法:①简化设计;②采用高可靠性的零部件;③使产品工作时的功率、速度等低于额定值,降额使用。

2.1.3 维修性分析

维修性分析包括确定修复时间分布、预测维修度、备件数、维修策略、最佳维修周期以及维修人员的规模和技术水平等。

2.1.4 设计评审

设计评审是可靠性计划中的一项基本活动,主要目的是从可靠性、维修性和安全性的要求出发,对产品设计进行全面而深入的审查和分析,及早地查出设计中的缺陷并加以补救,以保证产品在使用时能达到可靠性和维修性目标。

通常,从设计到使用,要使机械产品的可靠性达到满意的程度,可能要花几年甚至更多的时间,而且预定的可靠性目标不一定能实现。这时,设计人员应注意及时修改设计,否则会使成本提高或延误时间。经验表明,设计更改得越早,损失越小。一般来说,在试验和生产之前更改设计的花费,比生产时再更改设计要便宜几十倍甚至更多。

2.2 可靠性设计的特点

(1)可靠性设计要求根据不同的产品、使用场合采用不同的可靠性指标,如可靠度、失效率、MTBF、维修度、MTTR、可靠寿命、有效度、经济尺度等。在设计之初最重要的就是确定可靠性指标及其量值,并考虑如何去评价它。

(2)可靠性设计强调在设计阶段“把可靠性直接设计到零件中,进而设计到系统中”。这个可靠性被称为固有可靠性。它是由设计决定的,由制造和管理来保证。

(3)可靠性设计必须考虑环境的影响。环境对应力有很大影响,从而影响可靠度的大小。例如高温、低温、冲击、振动、潮湿、烟雾等环境条件,都是导致可靠性降低的主要原因。在严酷条件下工作的机械设备,会比在正常条件下工作的机械设备更早地失效。

(4)对维修性的考虑。当有效度是主要的可靠性指标时,不论产品的质量有多高,都必须考虑维修性,否则不可能维持高有效度。

(5)可靠性设计在设计阶段及以后的阶段都需要可靠性增长。GB/T 2900.99—2016中关于可靠性增长的定义是:“通过解决设计和制造薄弱环节而对可靠性改进的迭代过程。”因此,在不同的阶段,对系统的可靠性要反复进行预测。

此外,在进行可靠性设计时必须以整体的、系统的观点去考虑问题,要以人机工程的观点去考虑问题,需要考虑产品的寿命期总费用,而不是只考虑购置费用等。

可靠性设计尽管是一种新的设计理论和方法,但仍然需要传统的设计经验,并且与其他设计方法和理论一起综合应用,例如有限元分析、断裂力学、疲劳统计学、试验应力分析等。

2.3 可靠性设计的内容

(1)确定可靠性指标及其量值。可靠性指标的选取取决于产品的设计要求,而可靠性指标的大小则取决于产品的重要性。要重视过去的经验、用户的要求及市场调查。例如对于汽车,可以采用可靠度、有效度、MTBF或里程数作为可靠性指标。

(2)对可靠性指标进行合理的分配。

(3)把规定的可靠度直接设计到零件中,进而设计到系统中。零件的可靠性设计一般是先规定目标,再求零件的主要截面尺寸。如果是对现有的零件、设备或系统进行可靠性特征量计算,则属于可靠性分析。

2.4 可靠性设计的方法和步骤

(1)确定设计的问题及任务的轮廓。如果设计的是一个常用零部件(如轴),则设计问题应简单而明确,目的是确定轴的危险断面的直径。但是对于复杂的系统,则必须确定完整的任务轮廓以及相应的环境轮廓,并在此基础上,确定各子系统的目标可靠度。

(2)确定有关的设计变量和参数。例如在设计同时受弯矩和扭矩作用的轴时,需要确定的设计变量和参数有:轴的直径,弯曲应力、剪应力,材料的持久极限,应力集中系数、尺寸系数和表面质量系数等。

(3)进行失效模式、影响及致命度分析(FMECA)。

(4)确定零件的失效模式是独立的还是相关的。如果所有的失效模式是互相独立的,则这种失效模式不影响任何其他失效模式的性质,且在进行一种失效模式下的应力及强度计算时,不需考虑所有其他失效模式的影响。如果一种失效模式的性质受到另一种可能同时发生的失效模式的影响,则受到影响的应力和强度应当加以修正,这样计算出的每种失效模式的可靠度将是互相独立的。

(5)确定涉及的每种失效模式的判据。比较常用的判据有:①最大正应力;②最大剪应力;③最大变形能;④最大应变能;⑤最大应变;⑥最大变形;⑦疲劳情况下的变形能;⑧疲劳情况下的最大总应变;⑨最大许用腐蚀量;⑩最大许用振幅;⑪最大许用蠕变;等等。

(6)确定应力公式。对于每种失效模式,必须确定载荷、尺寸、温度、时间、物理性质、使用和工作环境等设计变量和参数之间的函数关系,从而得出应力公式。

(7)确定每种失效模式下的应力分布。根据失效模式、影响及致命度分析(FMECA)鉴别的所有重要的和致命的失效模式,都应当予以考虑,并且按照上述过程确定其应力分布。

(8)确定强度公式。对于确定的失效模式,强度是失效时的应力。因此,工作应力一旦超过强度,将会导致一定的失效模式;这种失效模式发生的概率,就是不可靠度。通常得到的是材料的强度数据,为了得到零件的强度数据,需要用相关系数加以修正。

(9)确定每种失效模式下的强度分布。将试件的强度与每个强度修正系数综合起来,便可得到零件的强度分布。经验表明,这样得出的强度分布数据在量值上要大得多。最好用试验方法直接得出零件的强度分布数据。

(10)对于每种致命的失效模式,确定其与应力分布和强度分布相关的可靠度。对于零件的每种致命的失效模式,都应计算其可靠度。这些失效模式可能是屈服、断裂、疲劳、过度变形、压杆失稳、振幅过大、蠕变、磨损、腐蚀、噪声过大,等等。有的零件在一种情况下可能只有一种致命的失效模式,而在其他情况下,可能有多种致命的失效模式。这时,也需要计算与这些失效模式相应的可靠度。