

机械零部件

动态可靠性若干问题的研究

王新刚 著

机械零部件动态可靠性 若干问题的研究

王新刚 著

东北大学出版社

© 王新刚 2014

图书在版编目 (CIP) 数据

机械零部件动态可靠性若干问题的研究 / 王新刚著. — 沈阳: 东北大学出版社, 2014. 4
ISBN 978-7-5517-0557-8

I. ①机… II. ①王… III. ①机械元件—可靠性—研究 IV. ①TH13

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 049534 号

出版者: 东北大学出版社

地址: 沈阳市和平区文化路 3 号巷 11 号

邮编: 110004

电话: 024—83687331 (市场部) 83680267 (社务室)

传真: 024—83680180 (市场部) 83680265 (社务室)

E-mail: neuph @ neupress. com

http: // www. neupress. com

印刷者: 沈阳市第二市政建设工程公司印刷厂

发行者: 东北大学出版社

幅面尺寸: 185mm × 260mm

印 张: 11.5

字 数: 284 千字

出版时间: 2014 年 4 月第 1 版

印刷时间: 2014 年 4 月第 1 次印刷

组稿编辑: 霍 楠

责任编辑: 刘乃义

封面设计: 刘江旻

责任校对: 李 佳

责任出版: 唐敏志

ISBN 978-7-5517-0557-8

定 价: 35.00 元

目 录

第 1 章 可靠性研究现状及基本理论	1
1.1 可靠性研究的目的与意义	1
1.2 机械可靠性设计的背景及特点	2
1.3 机械零部件可靠性设计的现状	5
1.4 可靠性的基本理论	7
1.5 可靠性优化设计方法	11
1.6 动态可靠性简介及主要研究内容	13
第 2 章 机械零部件的动态可靠性设计	17
2.1 引 言	17
2.2 强度不退化下的可靠性模型的建立	17
2.3 动态可靠性模型的建立	21
2.4 任意分布参数的动态可靠性设计	24
2.5 理论模型分析	26
2.6 本章小结	30
第 3 章 机械零部件的动态可靠性灵敏度设计	32
3.1 引 言	32
3.2 灵敏度公式的修正	33
3.3 动态可靠性灵敏度设计	36
3.4 基于实测信息的零部件渐变可靠性灵敏度设计	39
3.5 理论模型分析	43
3.6 本章小结	52
第 4 章 机械零部件的动态可靠性稳健优化设计	53
4.1 引 言	53
4.2 稳健设计方法简介	54
4.3 基于灵敏度分析的稳健可靠性优化方法	55
4.4 动态可靠性稳健优化设计	59
4.5 任意分布参数的动态可靠性稳健优化设计	60
4.6 理论模型分析	60
4.7 本章小结	64

第 5 章	研究切削刀具可靠性的基本方法	66
5.1	引 言	66
5.2	刀具可靠性研究的总体结构	67
5.3	刀具耐用度的分布模型研究	68
5.4	刀具可靠性的研究方法	70
5.5	本章小结	72
第 6 章	基于磨损的切削刀具的动态可靠性设计	74
6.1	引 言	74
6.2	切削刀具的磨损可靠性	74
6.3	基于 AE 模型的切削刀具的磨损可靠性	80
6.4	变化切削加工条件下的刀具可靠性研究	87
6.5	数值算例	92
6.6	本章小结	96
第 7 章	基于疲劳破损的切削刀具的动态可靠性及灵敏度设计	98
7.1	引 言	98
7.2	国内外研究现状	99
7.3	硬质合金刀具的动态可靠性及失效率研究	100
7.4	硬质合金刀具的动态可靠性灵敏度分析	105
7.5	可转位刀具的动态可靠性及灵敏度研究	109
7.6	基于鞍点逼近的陶瓷刀具的动态可靠性及灵敏度研究	116
7.7	本章小结	121
第 8 章	某型转向架关键部件的动态可靠性设计	122
8.1	引 言	122
8.2	轮对的有限元分析与试验设计	123
8.3	轮对载荷谱的确定	128
8.4	轮对的动态疲劳可靠性及灵敏度设计	137
8.5	轮对的动态可靠性稳健优化设计	147
8.6	某转向架构架的可靠性灵敏度分析	152
8.7	本章小结	163
第 9 章	结论与展望	165
9.1	结 论	165
9.2	展 望	166
参 考 文 献		168

第 1 章 可靠性研究现状及基本理论

1.1 可靠性研究的目的与意义

可靠性技术最早是由美国军用航空部门提出的，兴起于 20 世纪 40 年代初。经过几十年的迅猛发展，可靠性技术已进入了一个崭新的阶段，其研究已遍及电子、机械、化工、自动化及航空、航天等领域。从最复杂的宇宙飞船到日用的洗衣机、冰箱、复印机和汽车，以及到细小的可置于人体内的心脏起搏器，都应用了可靠性技术。许多产品都有明确的可靠性指标。产品的可靠性已成为衡量产品质量的重要指标之一。随着可靠性技术的发展，应用可靠性技术的方法和手段也层出不穷，引起了各国学者的极大关注。

机械可靠性设计又称机械概率设计，是可靠性工程学的主要内容之一，是可靠性工程学在机械设计中的应用^[1-13]。对机械破坏机理认识的日益深化、对机械故障概率资料的逐步积累，以及概率与统计在机械零件的应力与强度分析方面的应用，等等，都为机械可靠性设计提供了理论基础和实践经验，使可靠性理论的应用扩展到结构设计、强度分析、疲劳研究等方面。断裂力学分析中引入可靠性理论，就形成了一个被称为概率断裂力学的分支。它是用概率统计的理论和方法分析带裂纹材料或机械零件发生断裂的一种工程方法，是指将载荷、材料性能与强度及零部件的尺寸，都视为属于某种概率分布的统计量，应用概率与数理统计及强度理论，求出在给定设计条件下零部件不产生破坏的概率^[14-28]。

机械可靠性设计虽然可以确保或预测所设计的机械产品在规定的使用条件下和规定的使用时间内完成规定功能的概率，确保产品的可靠性指标的实现，但它不能保证产品具有最佳的工作性能和参数匹配、最小的结构尺寸和质量、最低的成本和最大的效益。所以，要使产品既具有可靠性要求，又具有最优的设计结果，就必须将可靠性设计理论与最优化技术结合起来，即采用可靠性优化设计方法。按照这种设计方法进行设计，既能定量地给出产品在使用中的可靠性，又能得到产品的功能、参数匹配、结构尺寸与质量、成本等方面的参数最优解。该方法是将可靠性分析理论与数学规划方法有机地结合在一起，将可靠性要求作为追求的目标或者约束条件，运用最优化方法得到在概率意义下的最佳设计的一种数值计算方法。近年来，随着 CAD 技术和计算机技术的迅速发展，在可靠性稳健设计理论中注入了许多新的理论知识，出现了一些新的科研成果，逐渐形成了现代的可靠性稳健设计方法。20 世纪 70 年代末，日本著名的质量工程学家 Taguchi 提出了稳健设计思想，并在产品设计领域得到广泛的推广和应用。同时，该设计方法产生了巨大的经济效益和社会效益，是产品质量设计的又一次重大飞跃。现在，可靠性稳健设计方法已成为设计产品

成本和质量的一种实用的工程设计方法。正确、合理地应用可靠性与稳健设计的理论,可以使产品在规定的寿命内当设计因素发生微小变化时都能保证产品质量的稳定。

机械零部件的可靠性问题是目前国内外力学和机械工程领域内研究的热点和难点问题之一^[29-31]。零部件工作环境及自身结构的复杂化使得其可靠性分析越来越重要。迄今为止,绝大多数可靠性设计建模通常采用确定性的力学模型,而且已经研究得很成熟了。但它只适用于机械零部件结构简单、受力不复杂、危险点处的功能函数为显式的情况下进行可靠性分析。但在实际工况中很难找到这样的零部件,所以,建立一种符合实际工程中的真实模型的可靠性设计理论就显得格外重要。

动态可靠性及其应用近年来在国内外获得了迅速发展,但基于动态可靠性的机械结构优化设计方法却远未受到重视。由于动态可靠性所涉及的问题远比静态可靠性所涉及的问题复杂得多,所以到现在所见刊的大多数可靠性设计建模通常采用确定性的力学模型,并得到了很好的发展,张义民教授^[32-37]在这方面已经取得了相当大的成绩。然而,在实际机械结构的设计过程中,许多信息的不确定性使得机械结构的许多设计参数具有不确定性;其次,由于其自身的材料性能、所处环境情况、使用时间、荷载效应的变化以及其他各种因素的影响,其可靠性一般会随使用时间的增加而出现逐渐减弱的趋势,这一可靠性逐渐减弱的过程是一个动态的时变过程,所以结构的可靠性也就应该考虑时间因素^[38-39]。机械零部件可靠性灵敏度设计是在可靠性基础上进行机械零部件的灵敏度设计,所以其灵敏度设计也应是随时间变化的,是个时变灵敏度问题^[40]。可靠性灵敏度分析在可靠性设计和修改、可靠性优化设计、可靠性维护等方面均有重要的应用。机械产品稳健设计是关于产品质量和成本的一种工程设计方法,使所设计的机械产品具有对设计参数变化的不敏感性,即具有稳健性,它的基本思想是当设计参数发生微小的变差时,在制造或使用中都能保证产品质量的稳健性。事实上,由于可靠性稳健设计建立在可靠性设计和可靠性灵敏度分析的基础之上,又因为可靠性和可靠性灵敏度都与时间有关,所以稳健设计也应与时间有关,是个时变稳健^[41]设计过程。

因此,需要建立一个符合或更接近机械零部件实际工况的可靠性数学模型来对零部件进行可靠性设计,并对时变可靠性模型进行相应的拓展,建立时变可靠性灵敏度及稳健优化设计方法,既可以提高设计水平,又能够加强零部件的安全和可靠性,以便进一步提高产品质量,避免重大事故的发生,并能够对提升产品的市场竞争力、创造更大的经济效益和社会效益提供理论依据。

1.2 机械可靠性设计的背景及特点

1.2.1 机械零部件可靠性设计的形成与发展

“可靠性”作为衡量产品质量的一项重要指标,早已不是一个新的概念。长期以来,一切讲究产品信誉的厂家,为了争取顾客,都在追求其产品具有好的可靠性。因为只有那些可靠性好的产品,才能长期发挥其使用性能,从而受到用户的欢迎。现在,可靠性技术

已成为保证提高产品质量、确保产品性能安全不可缺少的依据和手段。所以,应对可靠性设计更加重视,利用其成熟的理论方法和先进的计算机技术来重新评价产品的设计原理和生产过程。

美国对可靠性的研究始于第二次世界大战。当时,雷达系统已经发展很快而电子元件却屡出故障。因此,早期的可靠性研究的重点放在故障占大半的电子管方面,不仅重视其电气性能,而且重视其耐震、耐冲击等可靠性方面。1942年,美国麻省理工学院(MIT)对真空管的可靠性进行了深入的调查研究。1952年11月,美国成立了“电子设备可靠性顾问团”。该顾问团对电子产品的设计、试制、生产、试验、储存、运输、使用等各方面的可靠性问题作了全面的调查研究,并于1957年6月发表了著名的“军用电子设备的可靠性报告”。该报告除论述了产品在上述各环节中的可靠性问题外,还比较完整地论述了可靠性的理论基础和研究方法。Freudenthal发表了题为“结构的安全度”的文章^[42],文章中对可靠性理论进行了详细的表述,确切指出了可靠性的理论算法。此后,可靠性问题在学术界和工程界引起了广泛的关注。1947年,苏联的 Ржаницын 提出了一次二阶矩理论的基本概念^[43],并提出了计算结构失效概率的方法和计算可靠性指标的公式。Cornell于1969年提出了将可靠性指标作为衡量结构安全性的统一数量指标,并建立了结构安全度的二阶矩模型^[44]。Lind对这种模型采用分离函数方式,将可靠性指标表示为分项系数形式,这一工作加快了可靠性方法的实用化^[45]。1971年,加拿大的 N. C. Lind 通过分离函数将可靠指标 β 表达成设计人员习惯采用的分项系数形式,以便与设计规范联系起来,使结构可靠性分析的理论和方法达到了实用阶段。AH-SAng 分析了各种结构的不确定性,提出了广义可靠性的概念^[46]。Hosafer 提出根据失效面而不是根据失效函数来定义失效模式的可靠性指标,但此方法只适用于非线性程度较小的极限状态方程^[47]。1976年,国际“结构安全度联合委员会”(JCSS)采用了 Rackwitz 和 Fiessler 等提出的“当量正态化”方法^[48-50],以考虑随机变量的实际分布。至此,“二阶矩模式”的结构可靠性表达式和设计方法逐步达到了完善。Bncher 提出了计算结构可靠度的响应面方法^[51]。Zheng Y 等针对状态变量与基本变量之间的显式函数关系式不存在的情况,而提出了可靠性分析的响应面法^[52],该方法便于与通用的有限元软件连接,以便对大型的复杂机械结构进行可靠性分析与设计计算。英国国家系统可靠性分析中心(NCRS)成立了机械可靠性研究小组,探讨机械可靠性的应用技术,汇编出版了《机械系统可靠性》一书,从失效模式、使用环境、故障性质、筛选效果、试验难度、维修方式和数据积累七方面阐明了机械可靠性和电子可靠性的差别,介绍了机械可靠性应用的重点,提出了几种机械系统可靠性的评估方法,并强调要重视数据积累^[53-56]。

从20世纪50年代开始,我国有关高等院校和科研单位开展了极限状态设计法的研究和讨论,并用数理统计的方法研究荷载、材料强度的概率分布等问题。我国主要在航空、航天、电子、机械等领域开展研究工作。进入20世纪80年代以后,可靠性研究得到了迅速的发展,特别是武器装备的可靠性管理和研究取得了长足的进步。国内也涌现出了一批从事可靠性研究的学者,提出了重要的科研成果和理论方法。例如,张崎和李兴斯针对响应面法模拟极限状态方程时在计算精度上存在一定缺陷的问题,采用 Kriging 模型模拟未知状态的结构响应,然后用优化方法来求解可靠性指标。高镇同和熊峻江阐述了疲劳/断

裂可靠性领域的一些重要研究成果,并对疲劳/断裂可靠性的研究进行了展望。赵永翔等介绍了考虑疲劳本构关系随机性的结构应力疲劳可靠性分析方法。20世纪90年代初,机械电子工业部提出了“以科技为先导,以质量为主线”的思路,沿着控制好的水平的发展模式开展可靠性工作,全面推动了我国可靠性工作的发展。我国的可靠性应用大部分集中在军工企业,民用企业相对较少。吕震宙、史进渊对随机参数线性振动系统的可靠性问题进行了研究,使动态随机结构的可靠性理论的研究有了若干进展。虽然国内外都在深入研究机械可靠性设计问题,但进行可利用的数据较少,而且非常有限,获取可靠的数据极其困难,以及零部件结构复杂、工作环境影响因素的随机性和失效模式的多样性等原因,到现今尚未有全面的结构可靠性设计手册问世。

1.2.2 机械零部件可靠性设计的特点

机械零件的可靠性设计研究与电子产品的可靠性设计研究不同,机械零件的可靠性设计研究具有以下特点。

首先,它采用了可靠度或其他可靠性指标,来确保结构的可靠性,而传统的机械设计是用安全系数来保证结构的可靠性,因此,机械可靠性设计方法对失效可能性的认识和估计都比较合理。

其次,机械可靠性设计除引入可靠度或其他可靠性指标外,还对结构的安全系数作了统计分析,这样得出的安全系数比传统机械设计中的安全系数更符合实际,因为它已经是与可靠度相联系的安全系数了。从对结构安全性的评价来看,传统的机械设计只有“安全系数”这样一个指标,而机械可靠性设计则有可靠度和安全系数两个指标。

由于机械零部件的结构、工作环境和加工工艺复杂等原因,可靠性设计方法在以下情况下难以实现:

① 机械产品的通用性差,根据功用不同,各种机器的组成各不相同,每一种机器都有其特殊零件;

② 力和加载方式复杂,载荷谱定量化很难;

③ 机械破坏机制的多样性和对环境因素的依赖性;

④ 机械设备的可靠性试验相当困难;

⑤ 工艺过程和制造质量的不稳定;

⑥ 连接状态的变化性;

⑦ 机械可靠性理论的难度较大;

⑧ 用户保养管理条件和维修质量的差异性。

由上述机械零件的特点可知,机械零件的可靠性设计研究有很多困难,其主要设计难点如下:

① 对于大型的复杂机械零部件,产品体积大、试验困难,其价格昂贵、生产数量少,使得相应的样本数据少;

② 机械零部件的失效分布是多种多样的,可靠性验证试验还不成熟;

③ 机械零部件随着使用时间的增加,其故障具有一定的耗损,因此,失效率不再为恒定的常数,而是随使用时间的变化而变化的;

④ 机械零部件具有多种失效模式共存，但是多种失效模式的相关程度很难确定，不利于可靠性的分析。

1.3 机械零部件可靠性设计的现状

1.3.1 可靠性设计研究现状

从20世纪80年代我国向南太平洋成功发射运载火箭以及随后多次发射卫星的成功，反映出我国元器件的生产到大型系统的可靠性研究与实践进入到较高的理论与应用水平。最近几年，我国在通信、汽车、航空、仪表等行业也开展了可靠性研究与应用，并取得了很好的成果。特别是我国航空航天事业的迅速崛起，先后成功发射了神5、神6、神7和神8宇宙飞船，其可靠性工程在我国航天事业应用得更加广泛，其理论地位也愈显得格外重要。可靠性工程之所以能够快速发展和在各行业中广泛地得到应用，离不开学者、专家们对可靠性理论与技术的创新和支持。国内一些研究人员对随机结构可靠性问题进行了研究，创立了一次二阶矩法和摄动理论^[57-61]。崔海涛^[62]等人从计算效率和计算精度等方面对随机有限元法进行了比较分析，为工程应用提供了可靠的理论依据。国外还有部分研究人员论述了随机有限元法研究的发展趋势和现状^[63-65]。Decomposition method是由Xu和Rahman提出的机械系统失效概率计算方法，并得到了一定范围的应用。Wei和Rahman提出了一种预计机械系统单元可靠性的新单变量方法。该方法包含在极大可能点的新颖的函数分解，便于实现旋转正态空间中一般多变量函数的单变量近似，以及计算失效概率的一维积分。

随着铁道部和科技部“十一五”国家科技支撑计划“中国高速列车关键技术研究及装备研制”项目的提出，我国的高速铁路将会得到更好、更快、更新的发展。其中，动车组关键部件的可靠性设计就是对我国可靠性工程理论与可靠性实际应用价值的一次完美展现。我国大力开展铁道机车车辆可靠性工程方面的工作是非常必要的，原因如下。

① 随着铁路列车的不断提速，铁路运输安全就显得非常重要，列车零部件的设计以可靠性为前提，高速运行的列车一旦发生故障，往往会造成重大恶性事故，给人民的生命财产带来巨大损失。

② 目前我国的机车车辆产品质量较低，在设计和制造等环节存在问题，主要是各环节的可靠性比较低。所以，根据我国机车车辆可靠性研究的现状，必须进行可靠性工程的研究与应用，才能使高速列车的可靠性和稳健性更上一层楼。

③ 日、法等国对可靠性工程在高速动车方面的应用非常重视，并已取得了明显的成效。相比之下，我国铁路部门可靠性工程的研究起步较晚，有许多可靠性工程方面的问题需要解决，许多课题急待研究^[66-70]。

目前，可靠性学科已经得到了广泛的发展和應用，特别是一些新算法的提出，能更好地解决工程实际问题。现有的机械零部件工作情况复杂，工作环境对其影响较大，再加上本身结构的复杂性，使得原始的可靠性方法不能很好地解决零部件工程应用问题。例如，

多种失效模式下的零部件的可靠性设计,以往的可靠性理论是不能解决的,但随着可靠性理论的发展,一些棘手的问题就迎刃而解了。冯元生阐述了机构可靠性的设计方法^[71]。李业农和施祖康将平面机构运动可靠性设计分为机构动作可靠性设计和运动精度可靠性设计,重点阐述了平面机构运动精度的可靠性设计原理,并推导出了机构的使用寿命。吕震宙和冯元生提出了刚度可靠性的分析方法^[72]。此外,随机有限元法、四阶矩法^[73-77]、任意分布参数的可靠性设计方法等都在完善和充实着可靠性工程学科,使得可靠性能更加系统、完善和精确地解决实际工程应用问题。

1.3.2 可靠性灵敏度设计的研究现状

在对机械结构进行优化设计时,以往都是凭借经验进行的,有一定的盲目性。当零部件结构复杂且物理参数和几何参数很多时,进行一次优化设计总是希望知道哪些结构参数对整个系统的影响较大,也就是对这些参数的敏感程度。机械零部件可靠性灵敏度设计是在可靠性基础上进行机械零部件的灵敏度设计。事实上,若某些因素对机械结构件失效有较大的影响,则在设计制造过程中就要严格加以控制,使其变化较小,以保证机械结构件有足够的安全可靠;反之,如果某些因素的变异性对结构件可靠性的影响不显著,则在进行机械结构件可靠性设计时,就可以把它当作确定量值处理,以减少随机变量的数目。灵敏度设计可以充分反映各设计参数对结构失效影响的不同程度,即敏感性。结构可靠性灵敏度分析在可靠性设计和修改、可靠性优化设计以及可靠性维护等方面均有重要的应用。目前,可靠性灵敏度分析大致有直接求导法、差分法和摄动法。上述三种方法对于线性结构设计问题可以给出满足工程要求的灵敏度信息。

由于可靠性灵敏度分析方法在机械结构可靠性设计和结构优化等方面具有重要地位,以及人们对灵敏度认识的不断深入,很多学者提出了非常有效的可靠性灵敏度分析方法,并在实际工程领域中得到了应用。例如,Hohenbicher和Rackwitz提出了可靠性对随机变量的敏感度概念^[78]。在敏感度概念提出后,Bjerager和Krenk进行了一阶的可靠性灵敏度问题研究^[79]。文献^[80]提出了一种高效的自适应重要抽样方法,用来计算零部件和系统的可靠度以及可靠性灵敏度。Karamchandani和Cornell提出了基于二次二阶矩的可靠性灵敏度分析方法^[81]。王东等人采用JC法对影响重力坝可靠度指标的多个随机变量进行了敏感性分析^[82],得到了有用的结论。Melchers和Ahammed提出了基于Monte Carlo模拟快速近似求解可靠性灵敏度的分析方法^[83]。文献^[84-86]提出一种基于相对熵概念的概率灵敏度分析方法。Ambartzumian采用差分法来求解系统的可靠性灵敏度问题。张艳红等人提出了考虑系统参数不确定性的可靠度分析的快速积分法,且算法简便。张义民^[87-88]等提出了基于可靠性摄动分析法的可靠性灵敏度分析方法,并提供了一套严格的可靠性灵敏度分析公式,能够实现对随机变量的均值、方差、协方差的可靠性灵敏度分析。

目前,对可靠性灵敏度的研究已经取得了很大的成果,而且可靠性技术已渗透到机械工程的各个领域。在进行机械零部件的可靠性分析时,由于各因素对机械零件失效的影响程度不同,因此,机械零件可靠性灵敏度的研究对快速找到影响整个系统安全性的参数具有重要意义。可靠性灵敏度的研究,总是在设法得到状态函数的显性表达式,在不能给出显式时,只能依赖数值方法解决问题。常采用摄动法、一次二阶矩法、JC法、响应面法、

Monte Carlo 法和 SFEM or PFEM 法进行可靠性灵敏度分析。但是在实际设计中,机械零部件所处的工况非常复杂,再加上自身结构也比较复杂,而且载荷和强度是随着使用时间的变化而变化的,针对这些问题,本书引入动态可靠性灵敏度对零部件进行分析设计。对于非线性结构设计问题,当功能函数非线性较强的时候,原有的灵敏度计算公式往往会给出错误的信息,基于此,本书对灵敏度公式进行了修正,确保得到正确的数值解。

1.3.3 可靠性稳健设计的研究现状

20 世纪 70 年代, G. Taguchi 提出了稳健设计^[89]的思想与方法,并在各行业和领域得到了应用,同时产生了巨大的社会效益。该方法已成为关于产品经济成本和质量的一种工程设计方法。正确地应用稳健设计方法,可以使产品在制造和使用中,当设计因素发生微小变化时,都能保证产品质量的稳定。

目前,随着计算机技术的不断发展、优化设计方法的改进以及计算智能的快速发展,在三次设计的基础上逐渐形成了现代稳健设计方法。机械稳健设计方法^[90-92]大致可分为两大类:第一类是以三次设计法、响应曲面法、双响应曲面法方法为理论基础的稳健设计方法;另一类是以线性模型法、容差多面体法、灵敏度法、变差传递法、随机模型法^[93-94]等方法为基础的稳健优化设计方法。陈立周^[95]等人在《稳健设计》一书中讲述了应用工程离散优化技术,对随机模型法的稳健设计理论和应用的研究过程,建立了稳健设计的基本概念和方法。梁尚明等人提出了模糊稳健优化设计方法^[96-97]。郭惠昕将稳健设计理念 and 模糊设计相结合,提出了模糊稳健设计的思想^[98-100]。

稳健设计方法,国内有的学者也称之为健壮设计、鲁棒设计。文献^[101]从基于灵敏度分析的健壮设计、质量工程健壮设计、健壮结构和结构/控制一体化的健壮设计四个方面概述了机械健壮性设计发展状况,并提出了有建设性的意见。文献^[102]提出了一种基于设计变量敏感性的健壮性设计方法,该方法采用了灵敏度附加目标函数的方法,得到了多目标优化问题,并可快速找到不确定因素的干扰不敏感的稳健最优解。文献^[103-105]将工程结构鲁棒优化问题描述成双目标优化问题。文献^[106]论述了当前国内外鲁棒设计的研究成果和理论算法,介绍并讨论了各种鲁棒设计方法的优缺点。

机械零部件结构的复杂性、工作环境的恶劣性以及随机外载荷的多变性,使得零部件的可靠性、灵敏度和稳健设计的结果都不再是一具体的数值,而是随着零部件的服役期的增加而逐渐变化的,是个动态过程。本书将动态可靠性、灵敏度及优化设计的方法相结合,提出了动态可靠性稳健设计的数值方法,把可靠性灵敏度融入优化设计模型中,将可靠性稳健设计归结为满足可靠性要求的多目标优化问题,在满足可靠性要求的前提下,同时进行质量的极小化和稳健性的极大化。

1.4 可靠性的基本理论

结构的安全可靠是工程结构设计的一个重要目标。机械产品的可靠性就是研究产品在

各种外界和内在的不确定因素作用下的安全问题。从研究的对象来说,结构可靠度可分为点可靠度和体系(系统)可靠度,其特点是采用可靠度或其他可靠性指标,来确保结构的可靠性,而传统的机械设计是用安全系数来保证结构的可靠性,因此,机械可靠性设计方法对失效可能性的认识和估计都比较合理。另外,机械可靠性设计还对结构的安全系数作了统计分析,这样得出的安全系数比传统机械设计中的安全系数更符合实际。对整个结构系统而言,在进行可靠性分析时,由于各因素对产品失效的影响程度不同,因此,关于结构可靠性灵敏度的研究具有重要的意义。稳健设计方法已成为关于产品经济成本和质量的一种工程设计方法,正确地应用稳健设计方法,可以使产品在制造和使用中,当设计因素发生微小变化时都能保证产品质量的稳定,为机构可靠性优化设计指明方向。可靠性、可靠性灵敏度和可靠性稳健优化设计理论是在严谨的数学理论的基础上逐渐发展和完善起来的。目前,可靠性的数学基础主要是概率论及数理统计和非概率的区间法。一些随机因素是决定产品可靠和实效的主要原因。现在,随着人们对可靠性理论的不断深入研究,可靠性已发展成为一门以多种数学理论分支为基础的新兴边缘学科。目前,可靠性理论的主要数学理论基础是概率论、随机过程理论、决策论、博弈论和组合数学等。

本节首先介绍本书所应用的可靠性基本概念,包括可靠性的基本假设和可靠性的设计方法,对后面要用到的可靠性优化设计进行了详细的阐述,同时提出了可靠性优化设计模型和模型的求解方案,为今后的可靠性稳健优化设计进行铺垫。

1.4.1 可靠性的基本假设

机械产品的可靠性是衡量产品质量的一个重要的指标,也就是研究机械产品在各种外界因素和内在因素作用下的安全问题。可靠度是指产品在规定的条件下和规定的时间内,完成规定功能的概率,一般用 R 表示。可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(\mathbf{X})]}{\sqrt{\text{Var}[g(\mathbf{X})]}} \quad (1.1)$$

利用可靠性指标可以直接衡量产品的可靠性,如果基本随机变量向量 \mathbf{X} 服从正态分布,用失败点处状态表面的切平面近似地模拟极限状态表面,可以获得可靠度的一阶估计量

$$R = \Phi(\beta) \quad (1.2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 为标准正态分布函数。

目前,对机械产品结构进行可靠性分析和计算时,大多采用的是应力-强度干涉模型。所以有必要对应力和强度的理论进行深入的研究。干涉模型中的应力定义为对机械产品功能有影响的各种外界因素的统称,其表现形式有应力、力矩、温度、震动、腐蚀等;强度定义为抵抗外载荷的能力,通常,影响强度的因素有腐蚀、温度、材料性能、机加工质量和外载荷效应等。这样,可靠度就可以定义为强度大于施加在它上面应力的概率,其本质是产品内部效应量积累超过某一值而引起的失效模型,称之为应力-强度干涉模型。为了对机械产品结构进行准确的可靠性分析和计算,需要作出如下一些假设:

- ① 机械产品强度为一非负的随机变量或随机过程;
- ② 应力为一非负随机变量或随机过程,这里的正负不表示力的方向;

③ 当强度大于应力时,认为机械产品是可靠的,否则认为该产品是失效的;

④ 对于应力-强度干涉模型而言,产品失效仅由于应力作用而发生;

⑤ 计算强度和应力的数学和力学公式仍然适用,公式中出现的定量符号均视为随机变量或随机过程。

在干涉模型中,将应力和强度视为随机变量或随机过程,能更准确地反映出应力和强度本身存在的客观不确定性、离散性以及随时间变化的不确定性,这就限定了必须用概率统计的方法对机械产品的可靠度或失效概率进行计算。根据应力和强度可能出现的不同情况,可将应力-强度干涉模型归为如下三种基本形式:

① 应力-强度随机变量模型,其中,应力和强度均为随机变量;

② 应力-强度半随机过程模型,其中,应力和强度之一为随机过程,另一个为随机变量;

③ 应力-强度全随机过程模型,在该模型中,应力和强度均用随机过程模型来描述。

通常,把应力-强度随机变量模型称为静态模型。在该模型中,两者均为随机变量,不包含时间因素,认为应力和强度都是不随时间变化的,这是一种近似理想化的情况,或者认为具有瞬态性质的瞬时一次作用,这种模型是理论上较为成熟的一种模型。半随机过程模型和全随机过程模型均称为动态模型。

1.4.2 可靠度计算方法概述

知道基本随机变量向量 X 的概率密度函数或联合概率密度函数后,就可以计算可靠度了。但是,在实际工况中很难有足够的资料来确定它们的分布模型。即便能够近似地拟合出概率分布,但大多很难进行积分计算从而获得可靠度,而数值积分往往是不实用的。所以目前一般采用 Monte-Carlo 法、矩法、响应面法以及随机有限元法等近似方法来计算可靠度。下面简要地介绍几种常用的计算可靠度的数值方法。

(1) 响应面法

目前的机械结构系统越来越趋于复杂化,机械结构系统承载后的响应量与输入之间存在着复杂的函数关系,往往难以获得功能函数的显性表达式。在计算这类复杂的机械结构系统的可靠度时,可靠性分析模型是不能预先假定的,采用传统的一次二阶矩等方法就存在困难,可能无法进行下去。

为解决此类复杂的机械结构系统的可靠性分析问题,人们提出了响应面法。该方法的基本思想是:首先假设出一个极限状态变量与基本变量之间的简单解析表达式,然后用插值方法来确定表达式中的未知参数,最终获得确定的解析表达式。可靠度计算的响应面法一方面能够使得可靠度的计算得到简化,另一方面以非线性功能函数的二次近似来代替一次二阶矩法采用的一次近似,能使计算精度有所提高。同时,在进行基于有限元分析的可靠度计算时,如果采用响应面法,可以利用确定性有限元分析程序进行可靠度的计算。

(2) 随机有限元法

从 20 世纪 70 年代起,随机有限元法已成为处理随机现象的分析工具,它采用确定性有限元法、随机分析理论和可靠性分析相结合的方法,综合考虑了各物理量的随机性。该法首先求出结构相应的统计特征量,从而可以进一步进行结构的可靠性分析。与确定性有

限元比较, 随机有限元在物理建模上更符合客观实际, 也更合理, 尤其是当有关参数的统计特性可知时, 随机有限元可提供较精确的分析结果。

从获得的随机有限元控制方程来看, 随机有限元法可分为 TSFEM 法、PSFEM 法、随机(Neumann 展开)有限元法(NSFEM)。当前, 随机有限元法已成为对随机参数结构进行不确定分析的有效数值计算方法。但是, 由于有限元法本身存在的离散特性, 使问题求解时的未知数大量增加, 因此, 无论是基于摄动法的随机有限元方法, 还是基于统计方法的随机有限元方法, 都不可避免地存在计算量大及精度不宜控制的问题。

(3) Monte-Carlo 法

Monte-Carlo 法的理论基础是概率论中的大数定律, 又称随机抽样技巧、概率模拟方法和统计试验法。建立在一次二阶矩理论基础上的计算可靠度的方法, 在功能函数非线性程度很高等许多情况下, 得到的结果误差较大。为了得到较精确的可靠度, 用 Monte-Carlo 法仿真可以得到满意的结果。它是最直观、最精确、对高度非线性问题最有效的结构可靠性分析方法, 该法通过对随机变量的大量抽样, 对抽样结果进行统计后获得结构的可靠度。

Monte-Carlo 法不用考虑功能函数的非线性和极限状态曲面的复杂性, 回避了结构可靠性分析中的数学困难, 通用性强。该方法的缺点是计算量太大, 因此, 在大型的复杂机械结构系统可靠性分析中受到了限制。为了提高工作效率, 通常用减少样本方差、提高样本质量等方法来尽可能地减少必需的样本量。目前, 在该方法的基础上又发展了重要抽样法、分层抽样法、条件期望值法等多种抽样方法。随着计算机硬件水平的提高和抽样技术的改进, 可以有效地提高 Monte-Carlo 法的计算效率, 因此, 该方法的应用将越来越广泛。

(4) 矩 法

矩法主要包括一次二阶矩法和高次高阶矩法。一次二阶矩法在实际工程中应用得相当广泛, 已成为国际上机械结构可靠度分析和计算的一种基本方法。其基本思想是根据基本随机变量的前二阶矩, 将非线性功能函数进行 Taylor 展开并保留至一次项, 然后近似计算出功能函数的均值和标准差, 进而求得结构的可靠度。该类方法是一种近似的计算方法, 但具有很强的适用性, 计算精度能够满足工程需求。中心点法、验算点法和 JC 法都是以一次二阶矩法为基础的可靠度计算方法。

① 中心点法。中心点法将非线性功能函数在随机变量的均值点进行 Taylor 展开并保留至一次项, 然后近似计算出功能函数的均值和标准差, 进而求得可靠度。该方法因略去二阶及更高阶项, 误差将随着线性化点到失效边界距离的增大而增大, 而均值法中所选用的线性化点(均值点)一般在可靠区而不在失效边界上, 结果往往带来相当大的误差。同时, 选用不同的极限状态方程不能得到相同的可靠指标, 这就为中心点法的应用带来了不便。

② 验算点法。Hasofer 和 Lind 根据失效面而不是极限状态方程来定义可靠性指标, 把失效面上与原点距离最短的点作为功能函数线性化点, 并通过迭代寻求设计点和可靠性指标。针对一次二阶矩法的上述问题, 人们把线性化点选在设计验算点上, 以克服均值一次二阶矩法存在的问题。该方法无疑优于均值一次二阶矩法, 但该方法只是在随机变量相互独立、正态分布和线性极限状态方程的情况下才是精确的, 否则只能得到近似的结果。

③ JC 法。Rackwitz 和 Fiessler 提出了一种当量正态转化法, 可把非正态变量变换为等

价的正态变量计算可靠性指标。由于 R-F 算法具有良好的普适性, 目前已被国际结构安全度联合委员会(JCSS)所采用, 并正式命名为 JC 法。该方法克服了上述两种方法的不足, 适用于随机变量为任意分布下结构可靠性指标的求解, 并且对非线性程度不高的结构功能函数, 其精度能满足工程实际需要。

在一次二阶矩法的基础上, 人们尝试了可靠度的高次高阶矩法, 分别提出了计算可靠度的二次二阶矩法和四阶矩法, 目的是为了提提高可靠度的计算精度。其原理与一次二阶矩法相同, 计算可靠性指标时都是以求得极限状态方程的偏导、获得其 Taylor 级数为基础的, 计算精度较高, 但较难处理一些复杂、不易求导的功能函数。张义民将随机摄动技术、四阶矩技术和 Edgeworth 级数相结合进行可靠性分析, 适用于任意分布形式的随机变量, 同时避免了 JC 法的等效正态化和迭代运算, 直接给出了可靠度的解析表达式, 并且可以获得较高的计算精度。

1.5 可靠性优化设计方法

可靠性优化设计是在可靠性基础上进行的优化设计, 即把可靠度要求或者结合在优化问题的约束条件内, 或者结合到优化问题的目标函数内, 运用优化方法, 得出产品参数的最优解, 以便最好地达到预先确定的目标, 即在设计中保证产品的经济效益和运行中的安全可靠。

1.5.1 优化模型的建立

可靠性优化设计与传统的优化设计不同之处仅仅在于前者把设计变量、设计参数当作随机变量来处理以及将可靠性约束加到约束条件中。由于对具体问题的要求不同, 可靠性优化设计的数学模型有均值模型、方差模型、概率模型和混合模型四种表示形式, 其中, 最有代表性的且最常用的是均值模型, 这时的目标函数可以是质量、成本或某项性能指标。因此, 本书只针对均值模型进行简单的介绍。

(1) 均值模型

$$\left. \begin{aligned} \min E[f(\mathbf{X})] \\ \text{s.t. } P\{g_u(\mathbf{X}) \geq 0\} \geq R_u \quad (u = 1, 2, \dots, n) \\ q_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, l) \\ h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

(2) 方差模型

$$\left. \begin{aligned} \min \text{Var}[f(\mathbf{X})] \\ \text{s.t. } P\{g_u(\mathbf{X}) \geq 0\} \geq R_u \quad (u = 1, 2, \dots, n) \\ q_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, l) \\ h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

(3) 概率模型

$$\left. \begin{aligned} \min & P[f(\mathbf{X})] \\ \text{s.t.} & P\{g_u(\mathbf{X}) \geq 0\} \geq R_u \quad (u = 1, 2, \dots, n) \\ & q_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, l) \\ & h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

(4) 混合模型

$$\left. \begin{aligned} \min & \{ \omega_1 E[f(\mathbf{X})] + \omega_2 \text{Var}[f(\mathbf{X})] \} \\ \text{s.t.} & P\{g_u(\mathbf{X}) \geq 0\} \geq R_u \quad (u = 1, 2, \dots, n) \\ & q_i(\mathbf{X}) \geq 0 \quad (i = 1, \dots, l) \\ & h_j(\mathbf{X}) = 0 \quad (j = 1, \dots, m) \end{aligned} \right\} \quad (1.6)$$

式中, P 称为事件的概率; R_u 为设计所要求的可靠度; \mathbf{X} 为基本随机变量向量, 包括随机设计向量和随机参数向量。

1.5.2 优化模型的求解

对于均值模型(1.3)可靠性优化设计问题的求解, 要比确定型优化模型的求解困难得多, 计算量也较大, 而且与随机变量的分布形式有密切的关系。针对该模型的求解方法有多种, 根据对概率约束处理方法的不同, 可将其分为随机约束规划法、安全指标优化方法和修改均值法。本书采用修改均值法来对均值模型进行求解。具体步骤如下。

假如基本随机变量向量 \mathbf{X} 表示相互独立的随机变量, 将功能函数在均值点 μ 处按 Taylor 级数展开, 得

$$\begin{aligned} Y(\mathbf{X}) &= Y(\mu) + \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial Y}{\partial X} \right) (X_i - \mu_i) + K(\mathbf{X}) \\ &= \alpha_0 + \sum_{i=1}^n \alpha_i x_i + K(\mathbf{X}) = Y_1(\mathbf{X}) + K(\mathbf{X}) \end{aligned} \quad (1.7)$$

式中, $Y_1(\mathbf{X})$ 是代表一次项之和的随机变量; $K(\mathbf{X})$ 代表高次项, 也是随机变量。但在修改均值法中, 把 $K(\mathbf{X})$ 看成确定函数。包含 $K(\mathbf{X})$ 是为了校正高阶误差, 为了权衡精度和效率, 这里对每一个 $Y(\mathbf{X}) = Y_0$ 只允许 $K(\mathbf{X})$ 取一个值。

为了定义 $K(\mathbf{X})$, 首先忽略 $K(\mathbf{X})$, 则

$$Y(\mathbf{X}) = Y_1(\mathbf{X}) = Y_0 \quad (1.8)$$

对于 Y_0 的每个值, 如果变量为非正态, 应用等效正态法转化为正态, 在标准正态空间中, Y_1 到原点的距离为

$$\beta = \left| \frac{\alpha_0 + \sum \alpha_i \mu_i - Y_0}{\sqrt{\sum (\alpha_i \sigma_i)^2}} \right| \quad (1.9)$$

如果记 $u_i = \frac{x_i - \mu_i}{\sigma_i}$, 则相应的最可能点是

$$u_i^* = \pm \beta \frac{\alpha_i \sigma_i}{\sqrt{\sum (\alpha_i \sigma_i)^2}} \quad (1.10)$$

式中, 正负号的取法是: 当概率大于 0.5 时, 取正号, 否则取负号。