

机械产品可靠性分析与优化

张建国 苏 多 刘英卫 编著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

[http //www.phei.com.cn](http://www.phei.com.cn)

机械产品可靠性分析与优化

张建国 苏 多 刘英卫 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 · BEIJING

内 容 简 介

本书从工程实用角度出发,比较系统地介绍了机械产品可靠性分析与优化的常用理论、方法及最新的研究成果和应用实例,其中包括机械产品可靠性分析基本概念和原理,以一次二阶矩法、二次二阶矩法为主的解析算法;随机模拟法中的中心正态重要抽样法、半径外重要抽样法和自适应重要抽样法;试验设计和应用于机械产品可靠性分析的响应面模型和 KRIGING 模型。基于可靠性的优化设计和建模方法,基于可靠性的多学科设计分析和优化等;同时对机械产品基于可靠性的多学科优化设计中的关键技术进行了较全面、详细的论述。最后介绍了基于可靠性的多学科协同建模仿真及设计优化评估软件原型,空间结构锁和剪切机械应用实例。

本书内容系统、先进、实用,反映了作者近十几年的最新科研成果和工程实践经验,可供可靠性、机械设计等相关专业研究生、教师和工程技术人员学习、参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

机械产品可靠性分析与优化/张建国,苏多,刘英卫编著. —北京:电子工业出版社,2008.6
ISBN 978-7-121-05004-6

I. 机… II. ①张…②苏…③刘… III. ①结构可靠性—分析②结构可靠性—最佳化 IV. TB114.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 139648 号

责任编辑:徐 静 特约编辑:王占禄
印 刷:北京市海淀区四季青印刷厂
装 订:北京鼎盛东极装订有限公司
出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本:787×1092 1/16 印张:15.25 字数:360 千字
印 次:2008 年 6 月第 1 次印刷
定 价:32.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。
联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn
服务热线:(010)88258888。

前 言

机械是人类从事生产活动的重要工具,在人类社会发展史上始终都占有极其重要的地位。20 世纪以来,科学技术突飞猛进,制造业得以极大的发展,使得农业、石油化工、电气与电子、交通运输、医药卫生与生命科学、核能利用与空间探索等领域都获得了巨大的成功,人类社会生活水准日益提高。但是制造业的发展也使得人类面临着更多地工业灾难、并造成了资源日益紧张、环境质量下降,人类因此不得不更加关注自身面临的威胁。为了缓解这种危机,必须促使现有的工业体系向安全、集约的方向发展。但是人类文明的高度发展使得当代经济活动、生产活动与科学探索中的事故更具有突发性、灾难性、中断性以及社会性。可靠性与安全问题不仅不会自行消失,反而更加突出,越来越成为人类生活的主题。因此,世界上许多发达国家和一些发展中国家都把可靠性和安全性工程作为 21 世纪优先发展的领域之一。

可靠性工程技术的全面应用开始于 1961 年阿波罗宇宙飞船的研制,1969 年阿波罗飞船登月成功,显示了可靠性的有效性。随之可靠性技术迅速地从航天领域发展到其他领域,如电子通信、计算机、机械等方面。在过去 40 多年中,由于机械可靠性问题的特殊性,其技术发展较电子工业领域缓慢。但是,当电子产品的可靠性提高后,机械产品的可靠性问题变得日益突出。机械系统越来越复杂和昂贵(如超大型喷气飞机、核电站、巨型油轮、自动化机械等),有的机械产品工作条件非常严酷,往往要在高(低)压、高(低)温、振动冲击、腐蚀等条件下长期工作(如卫星、飞船、核电站、发动机等),而且往往要求其具有高可靠长寿命,因此,机械可靠性问题日益受到人们的重视,特别是围绕机械可靠性分析设计和优化技术,得到了较为系统的研究。

目前,机械产品可靠性分析与优化理论方法和新技术应用,面临着数字化浪潮的冲击;以 C4P(CAD/CAE/CAPP/CAM/PDM)为代表的计算机辅助设计工具在制造业的广泛普及,确定性的机械产品计算机辅助设计更多地强调了基于多体系统复杂产品的系统动态设计、基于多学科协同集成框架的优化设计、基于本构融合的多领域统一建模技术,可用机、电、液、数字化功能样机分析的研究与开发,并逐步形成相关技术和软件平台工具。在设计管理方面,由产品数据管理(PDM)向产品全生命周期拓展,已形成产品全生命周期管理(PLM)技术。以各类 CAx(如 CAD、CAM、CAE 等)/DFx(如 DFA、DFM 等)技术为代表的虚拟样机技术已在机械产品领域中取得许多研究成果与成功的应用。与此同时,一类以支持多领域协同 CAx/DFx 技术为特征的复杂产品的虚拟样机技术正成为制造业产品研究、开发的热点。典型范例是在波音 777 飞机研制中,虚拟样机技术的成功开发与应用。

作者在长期从事机械可靠性技术方法研究、工程实践和教学过程中,深深感到要想使我国的机械产品整体水平赶超世界先进水平,实现我国高端制造业与高技术产业发展,适应国际化竞争的长远需求,机械产品可靠性分析和优化设计的理论与方法必须融入数字化环境并与虚拟样机技术相结合,借鉴相对成熟的结构安全可靠理论。基于目前国内技术发展和工程需求,作者系统地总结了具有一定代表性的机械产品可靠性分析与优化技术理论方法

和解决方案。

本书从工程实用角度出发,系统地论述了机械产品可靠性分析与优化的常用理论与方法及最新的研究成果,是作者近 10 年来在机械产品可靠性设计分析领域中科研成果的总结,同时也包含了作者指导的硕士、博士研究生所做的研究工作。在编写本书的过程中,参考了国内外大量的资料和文献,力求内容的完整、科学和新颖,且重点突出于工程应用和作者工程实践经验的总结。

全书共分为 9 章,其中第 1、2、3、4 章由张建国编写,第 5、6、7 章由苏多编写,第 8、9 章由张建国和苏多共同编写,五院总体部研究员谭春林和江西蓝天学院的刘英卫教授为本书编写提供了部分素材,并对部分内容作了审核。此外,本书编写得到了作者指导的研究生李强、刘欣、邢晨光、王世清、姜智锐等人的帮助,在此表示感谢。

由于作者的水平、经验及时间所限,书中难免有疏漏之处,热忱欢迎读者批评、指正。

作 者

2008 年 6 月

于北京航空航天大学为民楼

目 录

第1章 绪论	1
1.1 机械产品可靠性分析	1
1.1.1 结构可靠性	2
1.1.2 机构可靠性	4
1.1.3 俄罗斯和日本机械可靠性研究发展	5
1.1.4 国内机械可靠性研究现状	6
1.1.5 基于数字样机的机械产品可靠性设计分析	7
1.2 机械产品可靠性优化	12
1.2.1 基于可靠性的优化设计	12
1.2.2 多学科设计优化框架下的协同可靠性分析方法	17
1.2.3 多学科设计优化研究与应用	20
1.2.4 多学科设计优化过程中的不确定性问题	23
1.2.5 基于可靠性的多学科设计优化(RBMDO)	27
1.3 本章小结	27
第2章 可靠度解析算法	29
2.1 基本概念	29
2.1.1 基本随机变量	29
2.1.2 状态函数和极限状态方程	33
2.1.3 可靠度	34
2.1.4 可靠度指标和验算点	35
2.2 一次二阶矩法	38
2.2.1 均值点法(MEAN)	38
2.2.2 验算点法(FORM)	40
2.2.3 映射变换法	46
2.2.4 实用分析法	48
2.2.5 设计点法	49
2.2.6 相关随机变量的处理	51
2.3 均值法(MV)	54
2.3.1 改进均值法(AMV)	54
2.3.2 迭代改进均值法(AMV ⁺)	55
2.4 二次二阶矩法	58
2.4.1 二次展开法(ESORM)	58
2.4.2 二次展开法(PFSORM)	64
2.4.3 渐近法(Laplace)	66

2.5	灵敏度分析	71
2.6	本章小结	74
2.6.1	各算法原理比较	74
2.6.2	各算法计算量和精度比较	74
第3章	随机模拟法	76
3.1	引言	76
3.2	简单蒙特卡罗法	76
3.3	重要抽样法	79
3.3.1	中心正态重要抽样法	79
3.3.2	半径外重要抽样法	81
3.3.3	算例	84
3.4	自适应重要抽样法	88
3.4.1	中心正态自适应重要抽样法	89
3.4.2	半径外自适应重要抽样法	90
3.4.3	算例	90
3.5	本章小结	91
第4章	响应面法	93
4.1	概述	93
4.2	试验设计	94
4.2.1	全析因设计	94
4.2.2	正交试验设计	94
4.2.3	均匀设计	95
4.3	响应面模型	95
4.3.1	多项式响应面模型	96
4.3.2	经典响应面法	96
4.3.3	序列响应面法	99
4.3.4	连续插值抽样响应面法	100
4.3.5	加权最小二乘响应面法	103
4.3.6	插值加权响应面法	107
4.3.7	响应面模型对比分析	108
4.4	Kriging 模型和方法	109
4.4.1	Kriging 方法	109
4.4.2	Kriging 模型	110
4.4.3	Kriging 模型分类	111
4.4.4	Kriging 方法在概率计算和优化中的应用	112
4.5	本章小结	115
第5章	基于可靠性的优化设计和建模方法	116
5.1	概述	116
5.1.1	复杂系统的设计问题	116

5.1.2	系统工程中的综合集成方法论	120
5.1.3	多学科设计优化应用研究	125
5.2	机械产品性能与可靠性多学科协同设计体系	126
5.3	机械产品多学科建模过程中常用可靠性参数	128
5.3.1	系统、部件的可靠性参数	128
5.3.2	零件的可靠性参数	129
5.4	机械产品基于可靠性的多学科建模	129
5.4.1	多学科建模理论分析	129
5.4.2	多学科模型的组成	131
5.4.3	多学科建模方法	132
5.4.4	复杂机械产品建模	138
5.5	产品系统综合设计分析与评价	141
5.5.1	设计标准的发展	141
5.5.2	设计评价与多重标准	142
5.5.3	设计方案的产生和评价	145
5.6	机械产品基于可靠性的综合设计	146
5.6.1	概念设计	146
5.6.2	机械产品可靠性综合设计	147
5.6.3	参数化设计	149
第6章	基于可靠性的多学科分析和优化	151
6.1	多学科设计优化方法	151
6.1.1	多学科综合优化的形成动因	151
6.1.2	MDO 发展现状	152
6.1.3	MDO 的分解和综合技术	153
6.1.4	MDO 方法介绍	156
6.2	基于可靠性的多学科概率设计优化	163
6.2.1	数学模型	163
6.2.2	多学科设计优化框架下的协同可靠性分析方法	165
6.3	本章小结	167
第7章	基于可靠性的多学科协同建模仿真及设计优化平台软件原型	168
7.1	多学科综合设计优化环境的功能构成	168
7.2	多学科产品模型的管理	168
7.3	综合设计优化环境的体系结构及其特点	173
7.3.1	综合设计优化环境的体系结构开发原则	173
7.3.2	综合设计优化环境的性能特点	173
7.3.3	在综合设计优化环境中开发多学科产品模型	173
7.4	工具集成问题	174
7.5	复杂产品虚拟样机设计仿真环境对多领域工具集成的需求特点	174
7.5.1	工具集成技术概述	174

7.5.2 复杂产品虚拟样机设计仿真环境对工具集成平台的需求特点	175
7.6 机械产品基于可靠性的多学科综合软件平台原型	175
7.6.1 平台体系结构	176
7.6.2 平台的运行	178
7.7 本章小结	182
第8章 应用实例一:空间结构锁	183
8.1 航天飞行器可靠性问题	183
8.2 空间对接锁系基于可靠性的多学科综合设计优化环境	183
8.2.1 空间对接锁系综合设计优化概述	183
8.2.2 空间对接机构工程应用研究	184
8.3 空间对接锁系多学科产品模型应用实例	186
8.3.1 对接锁系简介	186
8.3.2 空间对接机构多学科协同设计建模	187
8.3.3 空间对接锁系基于可靠性的多学科协同仿真和优化	192
8.4 本章小结	204
第9章 应用实例二:剪切机系统	205
9.1 概述	205
9.2 联接销的可靠性仿真分析	205
9.2.1 对象简述	205
9.2.2 载荷分析计算	208
9.2.3 联接销的可靠性分析	213
9.3 万向节机构的可靠性仿真分析	215
9.3.1 对象简述	215
9.3.2 分析方案及具体步骤	215
9.3.3 分析计算过程	216
9.3.4 可靠性分析计算	217
9.3.5 结果分析及设计改进	218
附录 随机变量及其分布	220
一、 N 维随机向量(略)	220
二、二维随机向量联合概率分布	220
三、随机变量的分布特征	222
四、随机变量及其函数的矩	225
参考文献	227

第1章 绪 论

可靠性技术的研究始于20世纪20年代,在结构工程设计中的应用始于20世纪40年代。自从1946年Freuenthal发表了“结构的安全度”一文以来,可靠性问题开始引起学术界和工程界的普遍关注与重视。目前,随着现代科学技术创新节奏的加快和人们对产品质量要求的日益提高,可靠性在科学和工程中的作用越来越重要。

1.1 机械产品可靠性分析

国内外的实践经验表明,产品的可靠性是由设计决定的,是由制造、安装和管理来保证的。因此,只有将概率设计理论和可靠性分析与设计方法应用于机械结构设计中,才能得到既有足够安全可靠,又有适当经济性的优化结构。

机械结构可靠性基本理论的研究始于20世纪20年代,1924年Forssell提出了结构的初始建造费用和结构倒塌损失期望值总和最小的设计思想,并在美国的Cornell之后逐步形成了计算可靠度的“二阶矩模式”。

1946年,Freuenthal发表的“结构的安全度”论文和1954年拉尼岑提出的应力-强度干涉模型,奠定了结构可靠性的理论基础。1974年,Hasofer和Lind提出了结构可靠度指标 β 在标准正态空间内解析几何定义,明确了可靠度系数 β 的几何意义,为在线性空间内更精确分析结构可靠度提供了条件。以上研究成果为国际结构安全度联合会(JCSS)推荐使用的JC法奠定了基础。

机械结构可靠性分析可以分为两部分:其一是失效模式的确定;其二是计算机械结构发生的失效概率。失效概率的计算是可靠性分析的目的,而失效模式的确定以及每个失效模式的极限状态方程的建立则是可靠性分析的基础。只有首先给出状态变量与各个随机变量之间的函数关系,才能应用解析的或者数值方法计算失效概率。失效概率近似计算的方法大致分为两类:

1)解析法。包括计算单个失效模式的一次二阶矩法、二次可靠性方法、组合超平面法以及计算多个失效模式的一阶边界法、二阶窄边界法以及三阶高精度法等。

2)数值方法。包括数值积分方法(“M空间”数值积分法、降阶积分法)与数值模拟法(蒙特卡罗法、重要抽样法、分层抽样法、条件期望值法和公共随机数法)。

到目前为止,以估计机械结构系统可靠度为目标的、以概率统计和随机过程理论为基础的、以各种机械结构分析技术为工具的多种机械结构可靠性分析与设计方法得到了迅速发展。其中,一次二阶矩法和以一次二阶矩法为基础的现代可靠度分析理论已经发展得相对成熟,并得到了广泛应用。另外,在广义随机空间内考虑随机变量相关性的结构可靠度实用分析方法,扩大了现有可靠度计算方法的适用范围,还可以通过可靠度的高次高阶矩法提高可靠度的计算精度。

在机械可靠度分析中,建立极限状态函数是进行可靠度分析的前提条件,对于复杂的机

机械结构,大部分情况下状态函数与基本随机变量之间的显式函数关系是不存在的,这为进一步的可靠度分析带来了困难。这时一般用响应面代替状态函数,而现在最多的是用二次多项式模拟状态函数。响应面法便于与通用的有限元软件工具连接,可实现对大型复杂机械结构进行可靠度分析与设计计算。但如果问题的规模较大且随机变量很多,响应面法的计算量则是工程难以接受的。实践证明,采用改进均值法是在隐式极限状态函数下进行可靠度分析的有效方法,与响应曲面法相比,它具有计算量小、精度高的优点。

机械结构可靠度还可以用 Monte Carlo 法进行数字仿真,但由于机械结构可靠度往往较高,抽样一次的计算量很大,所以简单 Monte Carlo 法效率很低。为了提高计算效率,机械结构可靠度分析应用最多的是重要抽样法,通过选取新的概率分布函数来改变抽样重心,目的是提高投点的命中率和命中效果。

本书介绍的可靠性分析方法都是以荷载、材料常数、几何参数等基本变量的随机性为基础,也可称之为随机可靠性分析。目前,在可靠性分析中,还有模糊可靠性和非概率可靠性两个分支,其研究成果离工程实用还有较大差距。模糊性是不同于随机性的一种不确定因素,它主要是由于不可能给某些事物以明确的定义和评定标准而形成的,模糊可靠性模型是当今可靠性学科研究的方向之一;模糊性的客观存在同随机性一样必然会对机械结构的可靠性产生影响,人们对此已形成共识。20 世纪 80 年代中后期至今,国内外众多学者在将模糊性引入到可靠性分析中已作了一些有益的工作。广义可靠性亦称为随机模糊可靠性,是同时考虑不确定因素中随机性和模糊性的总称。它应用模糊数学方法,发展了随机、模糊混合可靠性模型,扩大了可靠性分析的范围。近年来,广义可靠性方面的研究取得了一定进展,可靠性与模糊性理论相结合而形成的广义可靠性分析方法能弥补经典可靠性理论的不足,在不确定因素中考虑到了模糊与随机因素造成的影响。

除此之外,还有以集合为基础的非概率可靠性。而非概率可靠性模型的建立则是从 20 世纪 90 年代才被提到可靠性学科研究中来的,可以说非概率可靠性模型是用集合来描述影响结构安全的不确定因素,以一种非概率的安全指标来描述结构的安全程度。

1.1.1 结构可靠性

在实际机械结构中,由于失效模式的多样性,人们对其可靠性问题给予了关注。机械结构可靠性研究对相关力学学科的发展和新兴学科分支的诞生,起到了很大的推动作用。自 20 世纪 60 年代开始,机械结构可靠性设计在航天、航空、车辆、建筑结构等各个领域得到了成功的应用。

20 世纪 70 年代发展了概率疲劳理论,高镇同院士阐述了疲劳/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,指出未来疲劳/断裂可靠性问题将随“疲劳学”高层次基础研究而向纵深发展。由于新材料的不断涌现,疲劳/断裂可靠性研究领域也将随之拓宽。疲劳/断裂可靠性研究途径将从现象转入机理。根据物理本质表现出的混沌特征,揭示其依赖于时间的损伤萌生、演化和终结的全过程。

20 世纪 80 年代发展了概率断裂力学和随机结构动力学。目前,随机变量的数据采集处理和统计分析、动载荷下的结构可靠性分析、随机疲劳和随机断裂结构可靠性分析、结构抗震可靠性分析、大型结构系统可靠性评估技术等还有待于进一步发展和完善。

具有随机参数的随机结构振动系统要远比静态随机结构系统复杂,所以其可靠性问题的研究还处于初级阶段。已有学者对具有随机参数的线性振动系统的可靠性问题进行了研究,并对动态随机结构的可靠性理论进行了探讨,提出了机械零件振动的可靠性设计方法。以传统的振动设计方法为基础,并考虑了振动设计量离散性的影响。另外,应用四阶矩技术和 Edgeworth 级数,解决了具有随机参数的非线性振动系统的可靠性分析问题。在一般随机有限元法的基础上,应用四阶矩技术、最大熵理论及不完全概率信息分析方法,还发展出了在随机参数的联合概率密度函数未知的情况下,具有相关失效模式的非线性动态随机结构系统可靠性分析的方法。

结构系统可靠性研究是目前的一个热点问题。结构系统可靠性研究主要针对结构系统静不定和多重失效模式,失效零件之间以及失效模式之间相关性的特点,采用系统工程的方法,从整个系统的角度来考虑失效模式和评价其可靠性水平。解决这个关键问题的主要方法包括 β -unzipping 法、分枝限界法、荷载增量法及准则法等。许多学者对结构系统可靠性分析中所存在的问题进行了大量的研究并提出了相应的解决方法。

近年来,结构可靠性研究不断向纵深发展,如复杂超静定结构的可靠性分析计算研究,复杂结构系统的可靠性设计分析研究,结构动态可靠性研究,结构模糊可靠性研究等都取得了可喜成果。

目前,与机械结构可靠性分析相关的强度分析技术与计算力学得到了飞速发展,如:

1) 强度分析与设计概念巨变

由单纯静强度的分析设计方法发展为能综合考虑静、动、热、疲、断、腐蚀及气动弹性广义强度分析、设计技术等。

2) 计算结构力学的发展

高速电子计算技术、有限元/结构优化技术的发展,使工程结构强度分析能力得到飞跃发展。

◆ 总体强度、局部强度、细节强度分析

◆ 静、动强度分析

◆ 热、电磁、液固耦合及多场问题

◆ 各种非线性(材料、几何)问题

1. 结构可靠度计算方法

20 世纪 40 年代以来,工程技术人员逐渐认识到在结构设计中必须引入考虑不确定因素的可靠性模型。卡宾奇应用统计数学的方法研究载荷及材料强度的离散性,从而开启了概率方法在结构设计中的应用。经过几十年的发展,可靠性分析已经成为关系结构安全的决定因素之一。几类可靠度计算的概率方法见表 1-1。

2. 随机有限元法

随着机械结构复杂程度的提高,机械结构承载后的响应量与输入之间存在着复杂的函数关系,往往难以用显式表达。有限元法是目前复杂机械结构分析的非常有效的数值方法之一,它能适应各种不同性质、形状和边界条件的工程问题。然而在实际机械结构中,由于材料参数的不确定性、几何尺寸的不确定性以及载荷等不确定性的存在,这样就导致出现具有随机参数的随机结构。由于各种不确定因素的存在,使得进行确定参数结构分析的有限

元在解决具有随机参数的复杂结构分析时受到了很大的限制。因此,人们自然会想到将确定性有限元法、随机分析理论和可靠性分析方法结合在一起,由此诞生了随机有限元法。

表 1-1 几类可靠度计算的概率方法

	需要的分析结果		问题的性质			其他		
	均值和方差	高阶矩	多值函数	函数复杂程度	各自变量相关	精度	计算时间	算法复杂程度
近似计算	可以	较困难	可以	低	困难	低	短	复杂
数值计算	可以	可以	可以	中	较困难	中	中	中
随机模拟	可以	可以	可以	高	可以	高	长	简单

当前,在确定性有限元基础上发展起来的随机有限元法已成为对随机参数结构进行不确定性分析十分有效的数值方法。已有学者应用随机有限元法和一阶可靠性技术对随机结构可靠性问题进行了研究,总结了以一次二阶矩法、摄动技术、有限元理论和实用概率统计学为基础的现代结构可靠性分析与设计理论和方法。还对随机有限元法中的常用算法,从计算效率、计算精度等方面,进行了分析与比较,为工程实际的选用提供了可靠的理论依据。

1.1.2 机构可靠性

机构可靠性的研究最早始于人们对机构运动副及其零件磨损问题的研究。前苏联在1978年和1979年出版的两本研究机构磨损可靠性问题的专著,奠定了机构磨损可靠性的研究基础。机构运动可靠性的研究也始于前苏联1979年出版的一本专著。

1984年,以色列的B. Z. Sandler教授的专著《机械概率设计》为用概率方法进行机构运动学和动力学研究奠定了基础。在其著作中,首次打破了传统做法——即在机构运动学和动力学研究中对于存在有随机因素的场合都大量采用非随机的方法处理。例如,连杆机构、凸轮机构或齿轮机构中的精度问题,通常是通过假定其误差的形状、频率或性质为确定值,从而被简化成通用的经典形式。虽然经典的非随机分析和综合方法在原理上能够提供完整的数值解,但是对某些问题应用概率方法的优点还是显而易见的。如:

- 1)估计随机因素对机构动作的影响;
- 2)随机过程的谱理论能够有效地应用于估算机构系统的动力性能;
- 3)用概率论方法研究高副机构(如凸轮机构和齿轮机构)等。

如果使用非随机方法,这种问题实际上无法解决。在以上论著中,作者们运用随机函数和概率论的方法,有效地解决了机构运动精度和动力精度的问题。对于运动学和动力学问题,书中提出了线性和非线性两种处理方法,对于机构的分析与综合问题进行讨论。但是,虽然作者成功地将概率统计理论应用于工程设计,但在其理论中没有引入机构可靠性的概念。

目前,在空间应用领域,发达国家对空间机构可靠性和寿命设计分析技术非常重视,如NASA每年举行空间机构专题讨论会,主要关注和讨论的是机构设计方面的技术问题,还有空间机构高可靠和长寿命设计分析技术所面临的创新和挑战。这主要因为现代空间飞行器要求机构不断向高精度、大型化、柔性化、高速度和高效能的方向发展,其可靠性面临着新的挑战。

与地面和航空飞行器机构相比,现代空间飞行器机构可靠性和寿命设计分析必须考虑如空间环境(如高真空、大温变、润滑、磨损和密封等)的影响和执行机构杆件弹性变形的影响等,它们有特殊的失效模式,如间歇运动机构的真空冷焊问题、高循环机构的长时间润滑、磨损和密封问题,大型柔性机构(例如,空间站展开机构等)的多柔体系统动力学可靠性分析问题和微型机构(MEMS)的可靠性问题等,是目前空间飞行器机构解决高可靠和长寿命问题的前沿和热点。

1.1.3 俄罗斯和日本机械可靠性研究发展

在前苏联出版的《现代可靠性理论:状况、问题及前景》一书中,作者B. B. 格涅坚科和H. A. 乌沙科夫指出由于机械学和材料力学的经典著作研究了统计强度问题,为研究机械产品在动态过程中的与强度有关的可靠性模型;外界作用(应力水平)的随机性和机械系统材料强度的随机性,以及它们的统计特性(均值和方差)提供技术支持,同时作为可靠性设计与分析的研究基础和重点考虑对象。前苏联时期,可靠性理论主要研究单调函数非参数级分布和指数分布,现在正把注意力放在与降额、磨损过程、随机偏差和参数趋势有关的参数失效上。尽管这一研究工作要求从微观方面研究开始,但更重要的是从宏观方面加强对机械零部件与外界负荷相互作用的动态过程研究,这是非常细致复杂,又相当繁琐的工作,需要专家长期进行研究才能完成。

尽管可靠性理论基本上是研究产生失效的随机过程,利用概率论和统计方法是恰当的,但概率论和统计方法并不是任何时候都能应用的。前苏联可靠性专家如A. H. 克雷罗夫等指出生存性和无故障性问题对可靠性更为重要。实际上无故障性正是国内所讲的耐久性,耐久性也是机械产品可靠性研究工作中的一个重要组成部分,这一点对机械设备和零部件非常重要。

俄罗斯工程博士B. B. 沙时金和卡尔佐夫指出俄罗斯机械可靠性基础研究主要包括如下几个方面:

- 1)作用载荷与应力及其随机性和统计特性。如构件的使用载荷、应力集中、动态下的使用载荷应力、循环载荷及其参数、热使用载荷等。

- 2)构件的摩擦和磨损。

- 3)构件材料的抗性及其随机性和统计特性。如强度、刚性、耐磨性;机械可靠性基础(使用载荷、材料的抗性,如耐久性、强度、硬度、耐磨性等)研究。

- 4)典型零部件的可靠性设计。例如传动机构(齿轮、蜗轮蜗杆、皮带)的可靠性计算;轴、轴承、密封件、弹簧、轮盘、容器、活塞以及螺纹联接的可靠性设计(主要是耐久性和寿命的计算)。

- 5)机器设计与制造过程中的可靠性保证(主要是耐久性和寿命)。

- 6)机器和机械装置的技术诊断、使用阶段机器可靠性保证等。

由此可见,俄罗斯机械可靠性研究比较全面和深入,但对理论分析方面的研究不如美国。其机械零部件的可靠性研究也是针对具体产品进行,例如对轴类零件,也只局限在某种轴的可靠性设计上。

在日本,机械可靠性研究以民用产品为主,推进日本可靠性技术的主要机构是日本科技

联盟中的一个机械工业可靠性分会,由企业的可靠性推进人员和院校的教授组成,每月例会,研究可靠性在机械工业的引入、推进和开发,其最显著的成绩是将故障模式、影响分析(FMEA)等技术成功的引入到机械工业企业中。

日本企业界认为机械产品的可靠性是通过长期使用经验的积累,发现故障经过不断设计改进获得的。机械设计主要采用的是以经验为主的设计规范,可靠性是通过这种设计规范的实现而得到保证的。这些规范包括材料的选定、结构形式、许用应力和安全系数的确定等。对于设计与原有产品相似的产品时,这种规范很有效。现在日本的机械可靠性设计一方面表现为成功的设计经验,另一方面表现为采用可靠性设计与实物试验相对比的方法。

1.1.4 国内机械可靠性研究现状

国内机械可靠性开展研究起步比较晚。20世纪80年代徐灏、王希季利用应力-强度干涉模型在国内率先提出了机械强度可靠性设计方法的概念,给出了强度可靠性的表达式。高镇同等应用统计学的方法对疲劳应力进行了统计计算方法研究。至此,国内关于机械可靠性设计方面的公开资料才开始多起来,许多文献中均介绍了应力-强度干涉模型,并以教学范例的形式在某些典型机械产品中应用该模型进行了可靠度计算,且强度和应力的统计特性多设定是正态分布或对数正态分布。尽管也给出了其他分布如威布尔分布等,但所列举的例子中多是正态分布。

在功能失效极限状态方程的应用过程中往往也是采用正态分布,或利用哈-林(H-L)和雷-菲(L-F)法转换成随机变量服从正态分布的情况。其中哈-林(H-L)法适用于基本变量为正态分布情况;雷-菲(L-F)法适用于基本变量为非正态分布情况,即将非正态分布转换为正态分布来处理。由于这两种方法计算出可靠度数值或大或小,误差有时很大,使功能失效极限状态方程方法的推广应用受到很大的局限。一些学者也提出了解决方法,例如吴氏(Wu)方法,其途径主要是在计算可靠度的过程中采用拟合误差和加权函数,但是由于加权函数不易确定,也很难在工程中应用。

目前国内关于机械产品可靠性设计技术研究不全面,尽管可靠性方面的论著比较多,但机械可靠性方面的研究尚处在教学、学术探讨阶段,很少在工程实际中进行应用。可靠性设计步骤、系统可靠性预计方法等尚未形成比较公认的符合工程实际的方法。相比之下,机械静强度可靠性设计技术研究比较成熟,但多数也是停留在教学中。应用应力-强度干涉模型直接进行可靠性设计比较复杂,但进行可靠性分析或可靠性计算则相对方便。

关于机械疲劳强度可靠性设计方法研究的比较多。由于影响疲劳应力和疲劳强度的因素非常多,因此疲劳强度可靠性设计比较复杂。对于产生于同一力源的应力幅和平均应力,可采用等效应力的方法进行,对于产生于不同力源引起的应力幅和平均应力,往往采用二维概率分布。一些学者进行了恒幅应力下疲劳应力服从二维分布时干涉模型和可靠度计算研究。同时,另有许多学者也进行了非恒幅应力下疲劳强度可靠性计算研究。也有学者从剩余疲劳强度出发,进行各自假设,按静态情况进行可靠度计算研究。也有许多学者进行随机应力作用下零件疲劳可靠性计算研究,其研究出发点是以前Miner定理为基础,重点考虑疲劳累积损伤,并提出了动态损伤干涉模型,认为某时刻的累积损伤和临界损伤都是随机变量,并假设都服从对数正态分布,且对数标准差相等,据此利用干涉模型进行可靠性计算。也有

一些学者结合 P-S-N 曲线推导出可靠度计算公式,其前提是假设该曲线为平行线,但是否与实际情况相符,有待验证。

1.1.5 基于数字样机的机械产品可靠性设计分析

1. 产品设计开发技术发展现状和趋势

回顾产品设计流程的发展历史,根据产品开发流程中“设计”和“制造”这两个主要活动的关系,大致可分为两个大阶段:

1) 在手工艺时代,“设计”与“制造”并没有分开,想法与实现是通过手、眼和材料的相互作用而得以连接和协调起来,即在制造产品前不需要绘图和产品建模。

2) 18 世纪的英国工业革命给人类社会带来了先进的科学技术及其文明,手工艺生产方式由于不再适应机械化批量生产的模式而逐渐被淘汰,“设计”从“制造”活动中分离出去。主要原因在于:产品的复杂性提高,依靠个人经验技巧的设计与制造过程越来越难以胜任;工业化、标准化和规范化的机器批量生产要求预先进行形态设计,从而可以有效地控制产品质量。

今天,产品复杂程度的增加导致可制造和可装配的问题日益突出。在开发产品时,人们又开始把设计和制造作为一个统一的整体来进行理解和适当组织,主要有三种趋势:面向制造/装配的设计、采取典型化和标准化措施、以及继续原有的专业化和分工细化。

另外,根据设计活动并行化的特征,产品开发流程的发展过程可以分为三个阶段:

1) 传统的串行开发过程

传统的串行产品开发流程如图 1-1 所示。传统的串行开发过程是相对简单的规范化的过程,串行产品开发流程的优点在于将复杂的开发活动变成可理解、可管理的一系列活动。缺点是没有考虑这些活动之间的并行关系,于是导致很长的产品开发周期和很高的开发成本;由于上游的活动对下游考虑很少,最终导致设计返工次数很高,尤其是对十分复杂的产品。

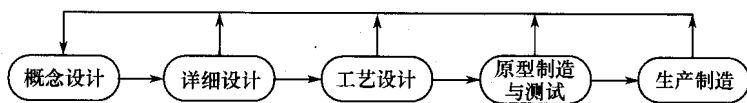


图 1-1 传统的串行产品开发流程图

2) 基于并行工程的产品开发过程

并行的产品开发流程如图 1-2 所示,并行工程的主旨在于克服传统的串行开发模式的弊端,如减少返工次数,缩短产品上市周期,加快产品对市场需求的响应等。

并行工程有三个要素:即多功能团队、并行设计和供应商合作关系。多功能团队应该被赋予一定的权利,从而可以方便、快捷地做出决策。团队成员应具有责任心,彼此相互信任和尊重。并行设计是指在设计过程各个环节的设计开始就尽可能的同步进行,比如在产品的外形和材料设计完成后,马上开始相应的制造工艺设计。供应商合作关系是将供应商作为多功能团队的一员。与以往的设计结束之后通过招标选择供应商的方式不同,关键是供应商在设计过程早期的零部件设计之前就已经确定下来,并参与到零部件的设计与制造过程中。

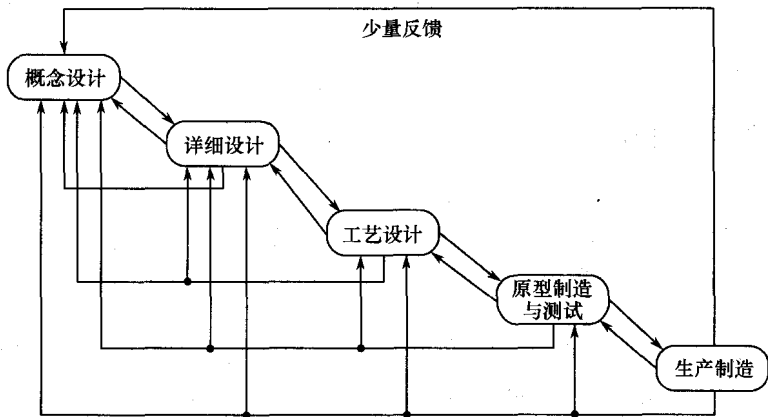


图 1-2 并行的产品开发流程图

3) 基于虚拟样机的产品开发设计过程

一味的强调设计活动的并行化并不总是正确的,随着产品开发活动并行化程度增加,决策失误几率也随之快速增加。为了在增加并行化程度的同时,保证决策失误几率不会有很大的增加,就需要先进的设计方法和工具的支持。虚拟样机技术可以看作是在并行工程的基础上,为进一步提高设计并行化程度和设计效率而提出的先进设计方法。

虚拟样机(Virtual Prototype, VP)是产品的多领域数字化模型的几何体,包含有真实产品的所有关键特征。基于虚拟样机的产品设计过程能够以低成本开发和展示产品的各种方案,评估用户的需求,提前对产品的用户满意度做检查,提高了产品设计的自由度;能够快速方便地将工程师的想法展示给用户,在产品开发的早期测试产品的功能,降低了出现重大设计错误的可能性;利用虚拟样机技术进行产品的全方面的测试和评估,可以避免重复建立物理样机,减少了开发成本和时间。如图 1-3 所示,虚拟样机的 3 个组成要素为:仿真模型、CAD 模型和虚拟环境模型。

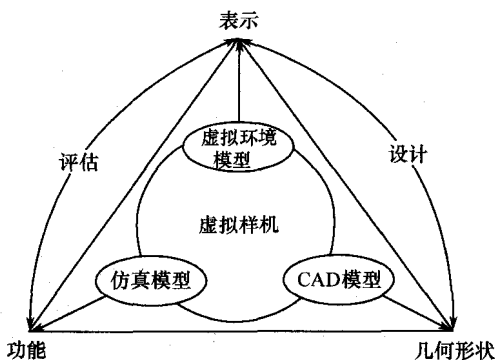


图 1-3 虚拟样机的组成要素

虚拟样机技术与虚拟样机是不同的概念。虚拟样机技术是以并行工程思想为指导,以 CAx/DFx 技术为基础,以协同仿真技术为核心的先进的数字化设计方法。由于虚拟样机技术还处于发展初期,基于虚拟样机的产品开发过程仍处于研究中,还没有公认的模式。从虚拟样机技术的特征出发,基于虚拟样机的产品开发过程应该进一步加大并行化程度,将强调