

柔性机构 动态可靠性分析

ROUXING JIGOU DONGTAI KEKAOXING FENXI

于霖冲 白广忱◎著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

柔性机构动态可靠性分析

于霖冲 白广忱 著



机械工业出版社

本书共分为6章：柔性机构动态可靠性概述、柔性机构模型及其随机动态响应、柔性机构动态可靠性分析理论、柔性机构动态可靠性分析方法、柔性机构动态可靠性算例和柔性机构动态可靠性发展趋势。论述了柔性机构发展历程、应用范围和发展趋势，给出了柔性机构基本概念，建立了柔性机构分析模型，提出了柔性机构动态响应随机分析方法、柔性机构动态可靠性分析基本理论和分析方法，并结合柔性机构的主要应用领域给出了柔性机构可靠性分析的算例。

本书可供航空、航天、机器人、力学、机械和汽车等专业的师生及科技工作者阅读和参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

柔性机构动态可靠性分析/于霖冲, 白广忱著. —北京: 机械工业出版社, 2012. 11

ISBN 978-7-111-40350-0

I. ①柔… II. ①于…②白… III. ①柔性连杆机构—动态—可靠性—分析 IV. ①TH112. 1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 265576 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 黄丽梅 责任编辑: 黄丽梅

版式设计: 赵颖喆 责任校对: 刘怡丹

封面设计: 赵颖喆 责任印制: 张楠

北京中兴印刷有限公司印刷

2013 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm · 9.25 印张 · 160 千字

0 001—2 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-40350-0

定价: 35.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

策划编辑: (010)88379770

电话服务

网络服务

社服务中心: (010)88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010)68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010)88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010)88379203 封面无防伪标均为盗版

前 言

随着功能日趋复杂、精密的柔性机构在航空、航天、机器人等领域的广泛应用，多刚体系统动力学的计算误差已经无法满足运动精度的要求，需要迫切解决柔性机构变形与运动耦合的问题。柔性多体系统动力学方法是在多刚体系统动力学的基础上，重点解决柔性体位形描述、变形运动耦合建模以及微分代数方程的求解精度等问题。柔性多体系统动力学在航空、航天和机器人等领域机械系统的动态设计起到了重大的推动作用并得到较为广泛的应用，是解决柔性机构变形运动耦合问题的有效方法。

柔性机构动态可靠性分析的研究是柔性多体系统动力学在理论研究和实际应用中的自然延伸；同时，柔性机构的主要应用领域都有高精度要求和高可靠性要求，这使柔性机构动态可靠性分析的研究成为当务之急。在人类涉及柔性机构的重大活动中，出现了多起由于机构故障导致造价昂贵的装备失效的重大损失，惨痛的教训也迫切需要进行柔性机构动态可靠性分析的研究。

柔性机构动态可靠性分析研究的目的是任务就是在多体系统动力学的基础上，结合概率论及数理统计、随机过程理论、机构学、可靠性工程、自动控制、优化设计和系统仿真等多学科进行交叉综合，提出柔性机构动态可靠性分析理论方法，建立柔性机构动态可靠性分析模型并进行基于动态可靠性的柔性机构优化设计，实现柔性机构的动态设计、可靠性设计、优化设计的相互结合，发展机构设计的新理论和新方法。

本书主要包括了柔性机构动态可靠性理论、柔性机构动态可靠性分析方法以及可靠性分析算例等内容，提出了柔性机构动态可靠性分析和可靠度计算的多种方法，给出了柔性机构动态可靠性分析的基本概念和理论框架。

在相关课题研究以及本书写作过程中，王荣桥教授、陈志英教授、王建军教授、樊江副教授等曾给予宝贵的意见和建议，向他们表示敬意和感谢。本书得到了张春宜、高阳、任远、郭秩维、田江、刘天杰、王瑞朋、滕志辉和李辉的支持帮助，在此一并向他们表示真诚的感谢。

本书的出版得到了嘉应学院各位领导和老师的关心和帮助，在此表示真诚的感谢。向给予我鼓励的厦门理工学院各位领导和老师表示感谢，特别向机械工程系的各位老师表示衷心的感谢。

本书受到 863 高科技计划项目、国家自然科学基金、教育部博士点基金和厦门理工学院引进人才项目以及厦门理工学院学术专著出版基金资助，在此表示感谢。

限于作者水平，书中难免存在错误与不足，殷切希望广大读者批评指正。

作者

目 录

前言

第 1 章 柔性机构动态可靠性分析概述	1
1.1 柔性机构可靠性研究的背景和意义	1
1.2 柔性机构动态可靠性分析研究综述	5
1.2.1 结构可靠性理论和分析方法研究进展	6
1.2.2 机构可靠性理论和分析方法研究进展	11
1.2.3 柔性机构动态可靠性理论和分析方法研究现状	14
第 2 章 柔性机构模型及其随机动态响应	17
2.1 柔性机构模型	18
2.1.1 柔性体描述	18
2.1.2 柔性体模型	19
2.1.3 柔性机构建模方法	25
2.2 柔性机构的动态响应	26
2.2.1 柔性机构确定性动态响应	26
2.2.2 柔性机构的随机因素	26
2.2.3 动态响应的随机分析方法	27
2.3 柔性机构的随机过程	33
2.3.1 柔性机构的随机过程描述	33
2.3.2 柔性机构的随机过程的数字特征	40
2.3.3 柔性机构的随机过程分析理论	40
2.3.4 柔性机构的随机过程分析方法	42
第 3 章 柔性机构动态可靠性分析理论	46
3.1 柔性机构的动态可靠性与静态可靠性	48
3.1.1 动态可靠性与静态可靠性的区别	49
3.1.2 柔性机构静态可靠度与动态可靠度	50
3.1.3 基于随机过程的柔性机构动态可靠性分析模型	51
3.1.4 基于时间截口分布的柔性机构动态可靠性分析模型	53
3.2 柔性机构广义动态强度可靠性和广义动态性能可靠性	56
3.2.1 柔性机构动态强度可靠性分析	56

3.2.2	柔性机构动态性能可靠性分析	57
3.3	柔性机构专题可靠性分析	58
3.3.1	柔性机构启动可靠性分析	59
3.3.2	柔性机构定位可靠性分析	60
3.3.3	柔性机构运动参数可靠性分析和运动精度可靠性分析	61
3.3.4	柔性机构动力参数可靠性分析和动力精度可靠性分析	62
3.3.5	基于随机过程的柔性机构变形可靠性分析	63
3.3.6	基于随机过程的柔性机构强度可靠性分析	65
3.3.7	柔性机构谐振可靠性分析	65
3.3.8	柔性机构分离可靠性分析和锁定可靠性分析	66
3.3.9	柔性机构卡滞可靠性分析	67
3.3.10	柔性机构磨损可靠性分析	68
3.3.11	柔性机构疲劳寿命可靠性分析	69
第4章	柔性机构动态可靠性分析方法	71
4.1	MC方法和ANN-MC方法	71
4.1.1	MC方法的基本原理	72
4.1.2	MC方法的改进	73
4.1.3	柔性机构可靠性分析的ANN-MC方法	76
4.2	RSM方法和ANN-RSM方法	79
4.2.1	FOSM方法和AFOSM方法	79
4.2.2	RSM方法的原理和计算步骤	83
4.2.3	RSM方法的改进	85
4.2.4	柔性机构动态可靠性分析的ANN-RSM方法	89
4.3	FRSM方法	90
4.3.1	FRSM方法的基本原理	91
4.3.2	柔性机构动态可靠性分析的FRSM方法	92
第5章	柔性机构动态可靠性算例	94
5.1	柔性体模型及柔性机构虚拟样机仿真模型	94
5.1.1	柔性体模型	94
5.1.2	柔性机构模型	94
5.1.3	柔性机构动态可靠性仿真	95
5.2	柔性曲柄滑块机构动态可靠性分析	97
5.2.1	不考虑运动副摩擦的柔性曲柄滑块机构模型	97
5.2.2	考虑运动副摩擦的柔性曲柄滑块机构模型	99
5.2.3	刚体假设的曲柄滑块机构动态可靠性分析	99

5.2.4 柔体假设的曲柄滑块机构动态可靠性分析	100
5.3 门-铰链-门框机构系统动态可靠性分析	106
5.3.1 门铰链机构模型	107
5.3.2 门铰链机构开启角度可靠性分析	107
5.3.3 门铰链机构动态强度可靠性分析	108
5.4 空间站展开机构系统动态可靠性分析	108
5.4.1 空间站展开机构模型	108
5.4.2 空间站展开机构运动分析及动态响应	110
5.4.3 空间站展开机构动态强度可靠性分析	113
5.4.4 空间站展开机构动态性能可靠性分析	116
5.5 轴对称矢量喷管机构系统动态可靠性分析	118
5.5.1 轴对称矢量喷管机构模型	118
5.5.2 轴对称矢量喷管机构动态强度可靠性分析	120
5.5.3 轴对称矢量喷管机构动态性能可靠性分析	120
第 6 章 柔性机构动态可靠性发展趋势	122
6.1 高速机构和大柔性机构的动态可靠性研究	122
6.2 柔性机构动态可靠性综合	123
参考文献	127

第 1 章 柔性机构动态可靠性分析概述

机构是由零部件和运动副组成的动态机械系统，在机构运动过程中，机构的拓扑结构和约束条件随时间而改变，机构的动力学参数和运动学参数也随时间而改变。进行机构的可靠性分析，考虑随机因素的影响和随机动态响应的分布，机构的运动过程为一个随机过程，机构可靠性分析就是一个时变结构的动态可靠性分析。柔性机构作为一个包含柔性构件的机构系统，力学行为非常复杂，动力学参数和运动学参数因为运动与变形的耦合而呈现出高度非线性。因此，柔性机构随机动态响应求解和统计的规模大、耗时长、成本高，使柔性机构可靠性研究的难度增大。

柔性机构动态可靠性分析是机构可靠性分析的组成部分，而机构可靠性研究是可靠性工程领域非常薄弱的环节。与结构可靠性研究相比，机构可靠性研究起步较晚，可靠性理论和分析方法有待进一步完善，已经不能满足机构可靠性设计的需要。而机构可靠性分析是事前预防故障、保证机构高可靠性的根本途径，对缩短研制周期和提高经济效益有重要意义。

近 40 年以来，不同领域的机构可靠性研究工作逐渐展开，基于静力学和拟静力学分析的机构可靠性研究以及多刚体机构的运动功能可靠性研究取得了很大进展，考虑构件弹性的机构动态可靠性研究正逐步兴起，进一步发展基于柔性多体动力学概率分析的柔性机构动态可靠性理论和方法，是机构可靠性研究的必然趋势。柔性机构动态可靠性理论和方法具有重要的理论指导意义和实际应用价值。

1.1 柔性机构可靠性研究的背景和意义

作为柔性机构可靠性分析的基础，多体系统动力学（Multibody Systems Dynamics）为一般力学的一个分支，是 20 世纪 60 年代在人类早期航天活动时期诞生的一门关于机构位形描述、建模、计算和仿真的学科，其早期的研究对象是小变形、刚体假设的多刚体系统。多刚体系统动力学（Rigid Multibody Dynamics）是在最初航空、航天上的机构系统结构比较简单，部件的柔性较小的情况

下逐渐发展起来的,刚体假设在应用于小变形弹性体的计算上所取得的近似结果比较令人满意。

多刚体系统动力学开创性研究的标志是 Fletcher 等学者在 1963 发表的论文, Fletcher 等建立了重力定向卫星的两个刚体组成的多体系统模型^[1],在 20 世纪 70 年代初,美国学者 Likins 采用混合坐标方法研究了带有柔性附件卫星的动力学问题^[2,3],是多柔体系统建模理论和方法的奠基性研究。以国际理论与应用力学学会(IUTAM)、北大西洋公约组织与美国国家基金委员会(NATO-NSF-ARD)以及国际机器及机构理论联合会(IFTOMM)召开的关于多体系统动力学的一系列有广泛影响的学术会议为里程碑和阶段性标志,多体系统动力学经过 50 多年的研究,逐步从多刚体系统动力学过渡到柔性多体系统动力学,并在建模、计算和仿真等方面日趋成熟^[4-9]。上述学术会议总结了当时的研究进展,提出了多体系统动力学未来的研究热点和发展方向。多体系统动力学的研究成果对分析和解决人类航天活动中出现的机构故障起到了重要作用,同时也为柔性机构动态可靠性分析与设计的研究奠定了基础。

尽管多体系统动力学取得了令人瞩目的成就,然而缺乏系统的机构可靠性分析理论和设计方法的指导,实物仿真实验费用昂贵,而且无法全面地模拟真实的使用环境,令机构生产制造中缺少可靠性设计、可靠性分析和可靠性管理,出现了多起因为机械故障导致航空器和航天器的失败实例^[10,11]。

较早的失败实例是 1958 年美国发射的第一颗人造地球卫星“探险者一号”,在卫星入轨后,星体外部四根鞭状天线在展开过程中产生的弹性振动使得卫星姿态失稳,导致卫星翻滚、失控,其主要原因是应用刚体假设进行计算,忽略了天线的弹性振动和弹性变形所引起的卫星内能耗散。

1963 年 3 月 16 日,美国宇航员阿姆斯特朗与斯科特在乘坐“双子星座-8”号飞船执行与目标飞行器“阿金纳”交会对接的任务时,因一枚反推火箭发生故障,两个航天器一同翻滚、失控。

1978 年,美国“陆地卫星-2”因偏航飞轮机构失效,整星失败。1979 年,日本广播卫星因飞轮机构停转导致卫星提前报废。

1982 年,美国“陆地卫星-4”观测仪的旋转部件受到柔性太阳能帆板驱动系统的干扰而产生微小扰动,降低了图像质量。“国际通讯卫星 V 号”柔性太阳能帆板扭转频率与驱动系统发生谐振,导致太阳能帆板停转、打滑。加拿大、德国、印度也先后出现过柔性太阳能帆板不能正常展开的故障。

1990 年发射入轨的哈勃望远镜曾经因太阳能帆板连接存在间隙,在“昼夜”

温度循环的共同影响下，导致太阳能帆板出现卡滞-滑动的周期性运动，不能精确定位。

由于前苏联解体，导致航天人才流失、科研经费不足、科研管理涣散，俄罗斯出现很多次航天发射失败。2001年7月，俄罗斯进行太阳帆飞船试验过程中，因航天器未能与火箭分离以失败告终。2011年仅仅一年期间，俄罗斯就有5次航天探索以失败告终，其可靠性研究和可靠性管理工作亟待提高，以满足新的、更加艰巨的科研要求。

我国在航天探索的过程中，也经历了多起惨痛的教训，其中就包括卫星与火箭分离过程中出现的故障，导致卫星不能正常入轨，无法准确定点或者自旋速度不稳定等卫星姿态失效现象，最终导致卫星无法正常工作。“风云一号”卫星为了获得星载机构的高可靠度，不得不使用寿命很短的机构以保证整星的发射成功。2008年10月，“鑫诺二号”由于定点过程中出现技术故障，导致太阳帆板未能二次展开，卫星无法正常工作。2011年由于“长征二号丙”火箭发射失利，而推迟了“天宫一号”和“神舟八号”的发射。

除了在航天领域内出现柔性机构的故障之外，在其他应用领域内也同样出现了柔性机构的故障，例如：高速精密加工机床由于传动轴转速加快导致零件加工误差增大；高速车辆的悬架系统和操纵系统高速运行情况下出现稳定性和平顺性劣化的现象；机器人的高速柔性机械臂运动轨迹异常；自行式火炮和装甲车等机动武器系统出现命中率下降等现象。柔性机构故障导致重大损失的惨痛教训，使人们充分认识到在广泛应用柔性机构的同时进行可靠性分析和设计的必要性。

然而，为了降低成本、减轻自重、增加有效载荷，航天器、航空器、机器人及其他各类机构系统不断向轻质、柔性、高速、精密和复杂的方向发展。在高速、大柔性的情况下，在机构系统运动存在两种运动形式：一种是柔性构件的变形运动，又称为快变的弹性振动；另一种是构件的刚性运动，又称为慢变的刚体移动。这两种运动同时出现，互相耦合，使机构的运动状态为高度非线性^[12]。一方面，机构速度的提高和构件柔性的增大，导致构件在惯性力作用下的变形加大，使机构真实运动与期望运动之间产生误差；另一方面，速度的提高使激振力的频率提高，而构件柔性的增大使系统的固有频率下降，导致激振力频率和固有频率接近，加大了振动的幅度，也增大了发生谐振的危险，从而引起过大的动态应力。

随着功能日趋复杂、精密的柔性机构在航空、航天、机器人等领域的广泛应用，多刚体系统动力学的计算误差已经无法满足运动精度的要求，需要迫切解决

柔性机构的运动耦合问题。较早用于处理柔性机构动力学问题的方法是运动弹性动力学方法 (Kineto-Elasto Dynamics, 简称 KED), KED 方法主要采用“瞬时结构假定”, 不考虑构件的柔性变形对其大范围运动的影响, 通过多刚体系统动力学分析得到构件运动性态, 然后考虑构件的惯性特性, 以惯性力的形式加到构件上, 根据惯性力和系统外力进行柔性变形和强度分析。KED 方法的实质是将变形运动和刚性运动的耦合动力学问题转化为多刚体系统动力学和结构动力学的简单叠加, 并没有考虑两种运动之间的耦合, KED 方法适用于机构速度较低、构件的柔性较小的情况^[13]。但是随着航空、航天技术的发展, 机构系统向着轻质和柔性等方面发展, KED 方法的计算误差越来越大, 已经不符合含有柔性体的复杂机构系统。另外, 随着机构系统运动速度的加快, 运动耦合的程度逐渐加强, 非线性程度也逐渐增大。柔性机构运动分析的高精度和高可靠性要求, 使 KED 方法无法全面满足现代机构的设计和分析。在这种情况下, 柔性多体系统动力学 (Flexible Multibody Dynamics, 简称 FMD) 在应用力学领域和机构学领域应运而生。柔性多体系统动力学方法是在多刚体系统动力学的基础上, 重点解决柔性体位形描述、耦合运动建模以及微分代数方程 (Differential-Algebraic Equations, 简称 DAEs) 的求解精度等问题。柔性多体系统动力学对航空、航天和机器人等领域机械系统的动态设计起到了重大的推动作用, 是解决运动耦合问题的有效方法^[14]。

柔性多体系统动力学在建模、计算和仿真等方面的逐渐成熟以及航空、航天和机器人领域内柔性机构的大量应用, 使得柔性机构动态可靠性分析的研究成为柔性多体系统动力学在实际应用中的自然延伸。同时, 柔性机构所应用的主要领域对机构运动高精度要求和高可靠性要求使柔性机构动态可靠性分析和设计的研究成为当务之急。在人类的航天活动中, 出现了多起由于机构故障导致造价昂贵的航天器失效的重大损失, 惨痛的教训也迫切需要进行柔性机构动态可靠性分析和设计的研究。

进入 21 世纪以来, 我国在柔性机构主要应用领域陆续展开了多项大型科技活动, 取得了举世瞩目的成就。随着“神舟”系列飞船、“天宫一号”、“嫦娥”探月工程、“北斗”系列卫星的成功, 我国将会进行更加广阔的深空探测实践, 同时也为柔性机构的应用带来挑战和机遇。

柔性机构动态可靠性分析研究的任务就是在多体系统动力学的基础上, 结合概率论及数理统计、随机过程理论、机构学、可靠性工程、自动控制、优化设计和系统仿真等多学科进行交叉综合, 提出柔性机构动态可靠性分析理论方法, 建

立柔性机构动态可靠性分析模型并进行基于动态可靠性的柔性机构优化设计，实现柔性机构的动态设计、可靠性设计、优化设计的相互结合，发展机构设计的新理论和新方法，如图 1-1 所示。

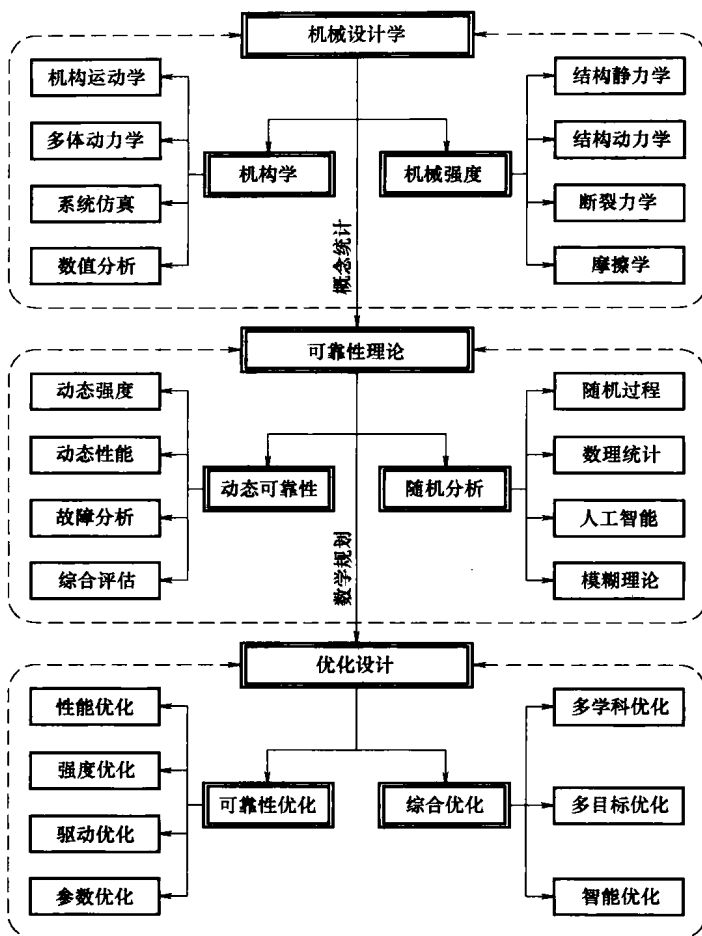


图 1-1 柔性机构动态可靠性研究的学科体系

1.2 柔性机构动态可靠性分析研究综述

柔性机构动态可靠性分析的研究与随机结构分析、结构可靠性理论和方法是紧密相关的，柔性机构动态可靠性分析建立在上述理论和方法之上，上述学科的发展为柔性机构随机分析和柔性机构动态可靠性分析的研究奠定了基础。

1.2.1 结构可靠性理论和分析方法研究进展

随机结构可靠性研究的历史可以追溯到 20 世纪 20 年代, 匈牙利、德国和前苏联的少数学者开始了结构零部件可靠性研究的探索。尽管这项研究工作富有开拓性, 但是由于当时的科技发展水平和实际需求, 结构可靠性分析方法在当时未能立刻引起广大学者和社会的广泛重视。

在第二次世界大战期间以及随后的一段时期, 许多复杂大型结构出现了在设计使用寿命内, 在规定的载荷条件和使用环境下, 却不能按预期正常工作的事情。例如: 美国空军飞机在二战期间因飞机自身故障而损失的飞机为 21000 架, 比实战中被击落的数量多 1.5 倍; 机载、舰载电子设备约 70%~80% 为运输、储存过程中的故障损耗而非作战消耗。除此以外, 其他民用大型设备也相继频繁出现类似故障, 这逐渐引起人们的关注和重视。

1947 年, 前苏联学者 Ржаницын 提出使用一次二阶矩方法 (First Order Second Moment, 简称 FOSM) 估算结构的可靠性, 同期, 美国学者 Freudenthal 发表了论文 “The Safety of Structures”, 论文中论述了传统设计方法中的安全系数和结构破坏概率之间的内在关系, 建立了结构可靠性分析的理想数学模型, 引起了学术界、工程界的普遍关注并得到了学术界、工程界的接受和赞同, 成为可靠性理论确立的一个奠基性标志^[15]。

美国军方于 1952 年在陆、海、空三军各自建立研究可靠性问题委员会的基础上, 成立了政府的职能管理部门, 即国防部电子设备可靠性顾问团 (Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, 简称 AGREE)。1957 年, AGREE 发表了著名的《电子设备可靠性报告》。这个报告较完整地阐述了研制及生产过程中对产品的可靠性指标进行试验、验证和鉴定的方法, 提出了电子产品在生产、保障、运输、储备等方面需要注意的问题和要求等, 被认为是可靠性问题研究的奠基性文件, 标志着可靠性理论在 20 世纪 50 年代开始形成, 并逐渐发展成为独立的工程技术学科。

20 世纪 60 年代, 许多大型工程的开发研制不但在计算上提供了强有力的技术支持, 而且使可靠性理论和方法得到了全面发展和具体应用, 并从零部件的可靠性研究逐渐转向随机结构系统可靠性分析。例如: 1964 年, IBM 公司花费 50 亿美元开发了第三代计算机的代表产品 IBM 360/370; 1965 年, 第一台超级计算机 CD6600/7600 开发成功; 1968 年, 通用动力公司开始研制 F-111A 战斗轰炸机; 1969 年, INTERNET 的前身 ARPANET 计划开始启动, 阿波罗登月计

划成功, 麦道公司开始研制 F-15A 战斗机, 通用动力公司与克莱斯勒公司开始共同研制 M1 坦克, 波音飞机公司开始研制“民兵 3”式弹道导弹。在这段时期内, 经典可靠性理论逐步创立, 做出杰出贡献有代表性的学者主要有美国的 Cornell^[16]和加拿大的 Lind^[17]。其中, Cornell 在 Ржаницын 研究的基础上提出了在可靠度分析中应用直接与失效概率相联系的可靠度指标 β 来衡量结构的可靠度, 并且建立了与 Ржаницын 相似的一次二阶矩理论。Lind 进一步提出将可靠度指标 β 转化为易于为工程界接受的分项系数形式, 推动了结构可靠度理论在设计规范中的应用。在研制“民兵 3”式弹道导弹和阿波罗登月计划的研制过程中, 美国贝尔实验室发明了故障树分析方法 (Fault Tree Analysis, 简称 FTA), 对系统进行故障模式及影响分析 (Failure Mode and Effects Analysis, 简称 FMEA), FTA 成为结构系统可靠性研究的开创性实践, 被美国宇航局 (National Aeronautics & Space Administration, 简称 NASA) 归纳为登月成功的三大关键技术之一。20 世纪 60 年代中期, 随机结构系统分析随着摄动方法的兴起和概率论思想的普及逐渐引起专家学者的兴趣和关注, 最早起源于对具有随机参数微分方程的研究。Soong 和 Bogdanoff 研究了具有随机参数无规则线型链索的频率解问题, 采用传递矩阵技术和摄动展开思想相结合, 给出了考虑随机参数的频率解答^[18]; Boyce 和 Goodwin 研究具有随机参数的弦和梁的特征值问题等^[19]。在他们的研究中, 采用了摄动逼近的思想, 同时考虑了材料特征与边界条件随机性, 是关于随机结构的探索性研究。直到 20 世纪 60 年代末, 随机结构的研究才真正引起了广泛的兴趣和注意。Collins 和 Thompson^[20]采用二阶 Taylor 级数展开表示系统的特征值、特征向量和系统的随机参数, 形成了进行随机动力系统特征值分析的基本格局; Shinozuka 和 Astill^[21]采用摄动技术研究随机动力系统的特征值, 其意义在于初步形成了随机动力系统的特征值分析的基本方法。随机结构系统分析的探索为结构动力学、随机振动和结构动力可靠性的研究开辟了道路, 也为随机机构分析和机构可靠性研究提供了富有价值的参考。

进入 20 世纪 70 年代, 结构可靠性的研究步入成熟, 这一阶段的主要特点是建立集中统一的可靠性管理机构, 负责组织、协调国防部范围内的可靠性政策、标准、手册和重大研究课题, 制定出一套较完善的可靠性设计、试验及管理的方法和程序。一方面, 可靠性研究的开展带来了巨大的经济效益, 例如, 日本的汽车、工程机械、发电设备、电子、电气产品因其质量好而享誉全球, 并因此减少大量维护成本、节约大量维修费用而获得了巨大的经济利润。可靠性研究成果的成功应用使可靠性理论和方法迅速向更加广泛的领域进军, 进一步促进了可靠性

研究的发展。另一方面,恶性事故依旧频繁出现使可靠性研究面临新的挑战。例如:1971年,前苏联三名宇航员在“礼炮”号飞船中由于一个部件失灵而丧命;1974年,F-15A战斗机交付使用,但F-15A战斗机可靠性很差,需要经常返回车间维修,甚至有“车间皇后”的戏称;1978、1979两年期间,美国宇航局三次火箭发射相继失败,损失1.7亿美元;1979年,美国宾夕法尼亚州的三里岛核电站发生核泄漏事故,20万人紧急撤离。上述恶性事故对结构可靠性研究提出更加迫切的要求,为了借鉴大型工程成功研制的经验,同时吸取重点事故的教训,在20世纪70年代相继研制的高技术武器系统都提出了更高的可靠性要求。如:1976年首飞,由美国通用动力公司研制的空军F-16A单发轻型战斗机;1976年首飞,由美国麦道公司和诺斯罗普公司共同研制的海军的F/A-18A双发超音速舰载战斗/攻击机;1974年首飞,由英国霍克·西德利公司(现并入英国航宇公司)研制的双座单发“隼”式教练攻击机。上述飞机在设计研制阶段就着重进行质量控制和可靠性分析,在定型交付使用后,有效地避免了F-15A战斗机诸多的质量问题。系统可靠性理论在这段时期内也日臻成熟,有代表性的成就主要有:Hasofer和Lind提出根据失效面而不是安全裕量方程定义失效模式的可靠度指标 β ,这种方法的结果不会由于选择形式不同的等价安全裕量方程而变化^[22]。Ditlevsen通过考虑失效模式之间的关系,提出了2阶窄可靠度上下界理论,并且在系统主要失效模式集已知的前提下,可以建立 N 阶窄可靠度上下界理论。这种方法标志着结构系统综合失效概率上下界估算的问题在工程上有了可以实现的解决方案^[23,24]。

与此同时随机结构分析方法也逐渐发展起来,随机有限元方法、随机场理论和随机模拟方法在随机结构静力分析和动力响应方面得到了发展和应用。对随机结构分析做出突出贡献的学者主要是:Hart和Collins^[25]、Hasselmann和Hart^[26]、Chen和Soroka^[27]将摄动技术和有限元结合,形成了摄动随机有限元研究的基本思路;Shinozuka和Wen采用Monte Carlo随机模拟方法对随机结构进行了系统的分析^[28];Shinozuka和Lenoe建立了材料空间分布随机特性的随机场模型^[29]。

20世纪80年代以及其后的岁月,结构可靠性理论和方法向更深更广的方向发展,形成了完整系统的工程技术学科。Murotsu等提出了识别系统失效模式的分枝约界法^[30];Thoft-Christensen和Sorensen提出了识别系统主要失效模式的 β 约界法^[31];Moses通过分析结构系统的失效演化过程,求出系统的系列主要失效模式,并提出了增量载荷法^[32];Ang A H-S和Tang提出了FTA方法和概率

网络评估技术^[33]；Feng 和 Moses 在增量载荷法基础上进一步采用无损结构系统可靠度指标和残余结构系统可靠度指标共同规范设计，以确保结构具有合理的残余可靠度储备^[34]。1980 年以来，世界各国开发研制的高技术产品逐渐大型化、精密化、复杂化。例如：美国波音系列、麦道系列、欧洲空中客车系列以及俄罗斯图波列夫系列和伊留申系列的大型军用、民用客机陆续开始研制；其他领域内的机电产品、土木工程结构、能源化工设施等都逐渐向大型化、精密化、复杂化方向发展。尤其值得一提的是人类对外太空探索过程中具有历史意义的大型科研活动——国际空间站的建设和深空探测的活动。1983 年，由美国总统里根提出的国际空间站（International Space Station，简称 ISS）合作计划，得到了美国、俄罗斯、日本、加拿大、巴西和欧洲航天局的 11 个成员国共 16 个国家的支持。国际空间站于 1993 年完成设计，并逐渐开始实施。国际空间站长 108m，重约 430t，预计投资总额将超过 630 亿美元，历时 10 年左右的时间建成。国际空间站在组装阶段，其主要设施由俄罗斯的质子号火箭、欧洲航天局阿里安 5 号火箭以及美国的航天飞机发射运送，累计发射运送次数约为 80 次左右。组装完成后的天地往返运输工作由美国的航天飞机、俄罗斯的联盟-TM 飞船及进步号货运飞船完成。随机结构分析在这一时期也得到进一步的发展，随机有限元、随机场理论、谱分解方法和正交分解方法在随机结构静力分析以及随机结构动力分析方面取得进展。Vanmarcke 较系统地研究了随机场理论，1983 年，Vanmarcke 的专著《随机场：分析与合成》的出版奠定了随机场局部平均的理论基础^[35]；Ghanem 和 Spanos 利用 Karhunen-Loeve 级数将随机场正交展开，并由此推导出随机刚度矩阵的级数展开式的一类算法，称为正交展开法（或规范展开法）。其专著《随机有限元：一个谱方法》是随机有限元领域中第一本专著，该书主要讨论了用谱方法将随机过程的响应用离散、独立的随机变量来表示，进而在 Hilbert 空间中求解^[36]。Yamazaki 和 Shinozuka 将随机方程的 Neumann 展开引入随机有限元方程中，并将随机场函数的 Monte Carlo 模拟与随机刚度的 Neumann 级数展开式结合，得到了精度较高的一类 Neumann 随机有限元列式，使随机模拟的效率大大提高^[37]。这些成就为随机结构静力可靠度和随机结构动力可靠度的研究奠定了理论基础，同时为随机柔性机构可靠性分析提供了参考。

随着人类进入 21 世纪，美国、俄罗斯、欧洲和日本的深空探测活动陆续频繁，人类对月球、太阳系的行星及其卫星、彗星、小行星的探测不断深入。2003 年 6 月 10 日，携带“勇气”号火星车的美国“火星探测流浪者”号探测器发射升空。2004 年 1 月 3 日，美国“勇气”号火星车在火星表面成功着陆；2003 年