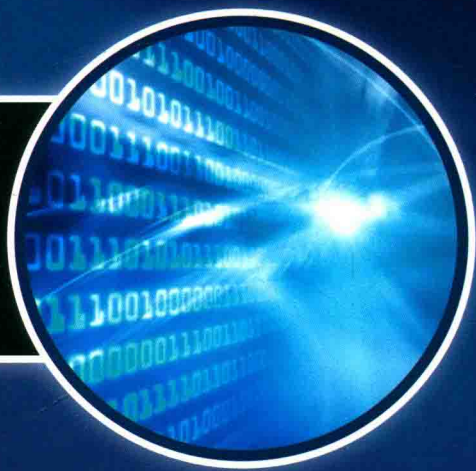


SUISHIJIAN XIANGYING DE JIEGOU
YU XITONG DE KEKAOXING JISUAN FANGFA

随时间响应的结构

与系统的可靠性计算方法

方永锋◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

随时间响应的结构

⑤ 系统的可靠性计算方法

方永锋◎著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书详细阐述了随时间响应的结构与系统的可靠性的研究理论与方法,不但介绍了随时间响应的结构与系统可靠性的理论,还提出了计算随时间响应的结构与系统可靠性的模型方法,这些方法在工程实践中具有实用性、适用性和易行性,可供相关工作人员参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

随时间响应的结构与系统的可靠性计算方法 / 方永锋著. — 北京:中国水利水电出版社, 2016.6
ISBN 978-7-5170-4293-8

I. ①随… II. ①方… III. ①数据结构—计算方法②系统可靠性—计算方法 IV. ①TP311.12②N94

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第088788号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈 洁 封面设计:崔 蕾

书 名	随时间响应的结构与系统的可靠性计算方法
作 者	方永锋 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座100038) 网址:www.waterpub.com.cn E-mail:mchannel@263.net(万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京厚诚则铭印刷科技有限公司
印 刷	三河市佳星印装有限公司
规 格	170mm×240mm 16开本 16.75印张 305千字
版 次	2016年6月第1版 2016年6月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	52.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

序

在中国由制造大国迈向制造强国之际,青年教师方永锋博士以他本人最新研究成果撰写了《随时间响应的结构与系统的可靠性计算方法》一书,这对落实《中国制造 2025》中强化“四基”的要求具有重要的理论和实践意义。

本书详细阐述了随时间响应的结构与系统的可靠性计算的理论与方法,作者不但介绍了随时间响应的结构与系统可靠性的理论,还提出了计算随时间响应的结构与系统可靠性的模型,这在工程实践中具有实用性和易行性。该书的出版将有力推动现有结构与系统的可靠性理论与方法的发展。

同时,从本书的出版我也看到了年青一代教师的快速成长、对学校发展的迫切期望以及他们所作出的贡献。

最后,祝祖国的制造业强国梦早日实现,学校的发展目标早日实现。



2016 年 4 月于贵阳

前 言

结构与系统可靠性在工程实践中有着广泛的应用,随时间响应的结构与系统可靠性不但考虑结构与系统的可靠性随时间的变化情况,而且还考虑结构与系统失效时间以及为什么失效的情况。

本书较为系统地介绍了随时间响应的结构与系统的可靠性的基本理论与方法,在内容安排上先进、实用、完整且结构紧凑。在每一章提出了为什么要研究随时间响应的结构与系统的可靠性问题,根据问题给出了解决方案,最后用具有代表性的实例说明了方法的有效性与实用性。

本书中提出的随时间响应的结构与系统的可靠性是以传统的结构与系统可靠性为基础的。在此基础上,发展了传统的结构与系统的可靠性理论与方法从而形成了新的随时间响应的结构与系统的可靠性理论与方法,比较详尽地介绍了随时间响应的结构与系统可靠性的思想与方法应用和最新的研究成果,并提出了新方法与新模型,反映了随时间响应的结构与系统研究的最新的进展。这一点,并不会使得原来就具有可靠性知识的读者读起来感到困难。

随时间响应的结构与系统的可靠性对《中国制造 2025》提出的强化“四基”具有重要的意义;同时,对国家中长期科技发展纲要中提出的振兴重大装备和重大工程也具有重要的意义。愿本书的出版能为我国由制造业大国迈向制造业强国贡献绵薄力量。

本书的完成首先要感谢陈建军教授的悉心指导以及陈老师的团队提供的相关资料;其次要感谢贵州省自然科学基金(黔科合 J 字[2014]2001)、贵州省省级实验示范教学中心、贵州省高等学校新能源汽车产学研基地(黔教 KY[2014]238)、贵州省高等学校新能源汽车工程技术研究中心(黔教 KY[2014]226)、贵州省煤化工工程 2011 协同创新中心(黔教合协同创新字[2014]08)、贵州省低速电动车工程技术研究中心(黔科合高字[2015]4001)、贵州工程应用技术学院高层次人才科研项目(院科合字 G(2015)003 号)等项目的资助。如果没有这些项目的支持,本书很难顺利地完成。最后,感谢其他所有对本书的顺利出版做出贡献的人。

尽管作者对撰写本书谨慎加小心,但由于本人水平有限,书中难免存在不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016 年 3 月于西安

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 结构与系统可靠性的发展概况	1
1.3 随时间响应的结构与系统可靠性研究进展	3
1.4 随时间响应的结构与系统可靠性研究的必要性与意义	9
1.5 本书的主要工作	11
参考文献	13
第 2 章 随机参数结构的可靠性数学基础	27
2.1 引言	27
2.2 结构可靠性的基本概念	27
2.3 统计量与次序统计量	33
2.4 寿命分布参数	35
2.5 结构随机随时间响应的可靠性中常用的几个概率分布	36
2.6 泊松随机过程	42
参考文献	44
第 3 章 随机变量的计算与应力-强度干涉理论	46
3.1 数字特征	46
3.2 数字特征的点估计	48
3.3 随机变量函数矩的简单计算	49
3.4 非正态变量的当量正态化	52
3.5 相关变量独立化	54
3.6 应力-强度干涉理论	55
参考文献	65
第 4 章 随时间响应的随机参数结构的可靠性计算	68
4.1 引言	68
4.2 多种随机载荷下随时间响应的结构可靠度计算	69
4.3 多次随机载荷下随时间响应的结构可靠性计算的概率 密度演化方法	76

4.4	共同随机载荷下随时间响应的结构可靠性计算	101
4.5	本章小结	108
参考文献		109
第 5 章 随时间响应的区间参数结构的可靠性计算		114
5.1	引言	114
5.2	非概率模型及计算方法	115
5.3	随时间响应的结构非概率可靠性计算	128
5.4	多次区间载荷下结构随机强度的混合随时间响应的可靠性计算	134
5.5	本章小结	140
参考文献		141
第 6 章 随时间响应的模糊参数结构的可靠性计算		147
6.1	引言	147
6.2	随时间响应的模糊参数结构的可靠性数学基础	148
6.3	多次模糊载荷下随时间响应的结构模糊可靠性计算	152
6.4	多次随机载荷下结构的模糊强度的混合随时间响应的可靠性计算	158
6.5	混合参数下结构的可靠性计算	165
6.6	本章小结	171
参考文献		172
第 7 章 随时间响应的可修复 k/n 表决系统的可靠性计算		176
7.1	引言	176
7.2	可修复 k/n 表决系统	176
7.3	多次随机作用下随时间响应的可修复的 k/n 表决系统可靠性计算	184
7.4	随时间响应的可修复 k/n 表决系统生命状态计算	190
7.5	本章小结	196
参考文献		197
第 8 章 随时间响应的多状态可修复 k/n 表决系统的可靠性计算		207
8.1	引言	207
8.2	随时间响应的多状态可修复 k/n 表决系统的可靠性计算	209
8.3	随时间响应的多状态发动机系统的可靠性计算	215
8.4	本章小结	226
参考文献		226

第 9 章 基于随机因子的结构分析方法.....	229
9.1 引言	229
9.2 随机结构分析的主要方法	230
9.3 结构分析的随机因子法	231
9.4 随机结构分析中若干问题的处理	232
9.5 随机因子法在结构分析中的应用	234
9.6 基于随机因子法的区间结构动力方法	240
9.7 基于随机因子法的瞬态随机温度场分析	247
9.8 本章小结	256
参考文献.....	258

第 1 章 绪论

1.1 引言

可靠性工程是一门综合性与边缘性的工程学科,它是结构与系统在使用过程中的一个重要的质量指标。可靠性理论与方法有着广泛的工程应用价值,对于结构与系统的分析与设计,必须考虑结构与系统的可靠性。在现代化的条件下,任何新产品的诞生,都要有明确的可靠性指标要求。因而,为了改善和提高结构与系统的可靠性,延长产品的使用寿命,确保生命安全,减少财产损失,研究结构与系统的可靠性是有必要的和必须的。

1.2 结构与系统可靠性的发展概况

可靠性问题自人类的社会活动开始就存在,但真正引起人们关注应该是起始于第二次世界大战期间。当时,美军的通信、电子设备在使用中故障频繁发生,一些电子设备甚至还未曾投入使用已经大量失效。

自 20 世纪 40 年代末,以美国为首的许多工业发达国家陆续展开了可靠性方面的研究工作。结构与系统领域的可靠性研究可追溯到 20 世纪 40 年代末 50 年代初期。1947 年,Freudenthal 提出了著名的应力-强度干涉模型,形成了结构可靠性设计的基础^[1-3]。自 1954 年前苏联学者拉尼岑首次提出应力-强度的正态-正态模型以来,苏、美、日、加拿大等国的学者都在机械与结构可靠性的研究方面做出了卓越的贡献,使机械与结构可靠性逐步发展成为两门独立的工程学科。

应力-强度指的是在可靠性计算中,进行随机变量“干涉分析”的基本思想,它是将应力和强度作为两个随机变量来比较其相对大小时,在同一坐标系中画出的这两个随机变量的分布函数曲线一般都会相交,即有“干涉”区存在,表明有应力大于强度的可能性。分别用 $g(s)$ 和 $f(\delta)$ 表示应力和强度的概率密度函数,借助应力-强度干涉分析,可以得出结构可靠度 R 的计算公式:

$$R = \int_0^{\infty} g(s) \left[\int_s^{\infty} f(\delta) d\delta \right] ds \tag{1-1}$$

这里,应力和强度的概念都是广义的。可以认为应力是可以导致结构和系统元件失效的任何物理因素,如载荷、温度、腐蚀、辐射等,而结构和系统元件的强度是它们抵抗相对应力(或载荷)的性能指标。

美国于 1952 年成立了“电子设备可靠性咨询委员会”,1957 年发表了著名的“军用电子设备的可靠性”研究报告,这一报告被认为是电子产品可靠性理论和方法的奠基性文件,标志着可靠性工程已经发展成为了一门独立的工程学科。

根据传统的观点及元件独立失效的假设,系统的可靠度可以根据系统元件的可靠度直接计算。

传统的串联系统可靠性模型为:

$$R_{sys} = \prod_{i=1}^n R_{r_i} \tag{1-2}$$

传统的并联系统可靠性模型为:

$$R_{sys} = 1 - \prod_{i=1}^n (1 - R_{r_i}) \tag{1-3}$$

这里, R_{sys} 为系统的可靠度, R_{r_i} 为系统第 i 个元件的可靠度, n 为构成系统元件的个数。

特别自 20 世纪 60 年代以来,随着计算机与计算方法的迅猛发展,结构与系统的可靠性研究取得了长足的进步,内容不断地充实,成果日渐丰富。可靠性在结构与系统工程中应用已涉及分析、预测、实验、设计、动力、疲劳、断裂等诸多方面。应力-强度干涉模型也被广泛应用疲劳强度的可靠性设计中^[4-6]。在 20 世纪 70 年代前后,Haugen 和 Keceioglu 提出了一整套基于干涉模型的疲劳强度可靠性设计方法,该方法已经在工程上得到了广泛的应用^[7-9]。材料在循环载荷的长期作用下,强度逐渐降低。因此,疲劳载荷-疲劳强度干涉模型是一个动态的概率模型。在应用应力-强度干涉模型进行随机可靠性分析时的一个重要前提是获得材料随机强度的概率分布。在文献[10]中,Weibull 指出:“随机强度分布可以从实验所得数据间接获得,也可以从材料寿命分布转换而来”。也就是说,寻求随机疲劳强度概率分布可以从实际测试或理论推导两方面着手。

历经半个多世纪的发展,可靠性已逐步渗透到电子、机械、建筑、造船、航空、航天、核工业等几乎所有的工业部门,可靠性的思想与方法已逐步被工程技术人员认识和掌握。现在,从代表国家科技水平最复杂的航天飞机到日常生活中最简单的圆珠笔,从庞大的工程结构到微小的心脏起搏器等

等都提出了明确的可靠性要求。然而至今,结构与机械系统的可靠性理论与方法仍不尽完善,仍在探索与发展之中。

不同领域的可靠性问题有各自不同的特点。人的可靠性问题与设备的可靠性问题不同,软件系统的可靠性问题与硬件系统的可靠性问题也不同,机械系统的可靠性问题与电子系统的可靠性问题也不同。随着社会的发展,众多拥有着复杂结构和超大系统的精密设备相继问世,将对结构与系统的可靠性理论与方法提出新的挑战 and 机遇。可靠性理论应用范围的不断扩大,一些问题也随之而来。不同的结构,不同的系统,有不同的失效机理。

如果不加区别的直接用传统的可靠性方法生搬硬套,都会导致可靠性设计、分析、评价失去应用价值,甚至导致错误的结论。

总的来说,可靠性研究还处于一个相对年轻的阶段。目前常用的计算结构与系统的可靠性方法有一次二阶矩法(First Order and Second Moment, FOSM)、二次二阶矩法(Second Order and Second Moment, SOSM)、响应面法(Response Surface Method, RSM)等。这些在一定的条件和一定的精度要求下都可以满足工程实际的需要,但在许多复杂的工程实际场合远远不能满足需要^[11]。例如,航天系统中大型电路系统,建筑中的复杂建筑结构等。

国际著名可靠性专家 O'Connor 在文献[12]中指出:“目前存在的并且有可靠性和质量专家使用的大多数方法都是容易产生误导性和无效性”。这一论断虽然言过其实,但在一定程度上反映了目前国际上可靠性工程理论与应用现状。

1.3 随时间响应的结构与系统可靠性研究进展

结构和系统服役的环境是十分复杂的。动载荷作用下的疲劳、腐蚀、磨损是结构与系统失效的常见原因。这类与时间有关的动态可靠性问题的失效与静载失效的传统可靠性问题有许多不同之处,因而也需要不同的分析方法和模型。传统可靠性问题考虑的是是否失效,而动态的可靠性问题考虑的不仅是失效与否的问题,还要考虑的是何时失效的问题。传统的可靠性问题可以只涉及载荷与强度两个物理量,通过比较这两个物理量的相对大小即可建立失效的判别依据与准则。动态可靠性问题除了传统可靠性问题考虑的因素外,还与时间有关,涉及累积损伤计算、强度退化,以及更多的影响因素。在复杂载荷的历程作用下,首先需要进行累积损伤计算或性能退化规律分析,然后才能判断何时发生失效,在什么样的状态下失效等。

目前使用的计算可靠性分析的方法与模型,运用应力-强度干涉理论可以方便地计算结构与系统的可靠度,分析它们的可靠性,但严格的讲,其应用背景是在考虑一次载荷引起的失效下进行的^[13],计算的是一个静态的概率指标,没有反映出可靠度随时间变化的规律。文献[14]建立了抗力退化的可靠度计算模型,采用蒙特卡洛重要抽样方法求解时变可靠度,但它只能针对一次载荷发生的情况,而且耗时费力。文献[15]详细研究了多次载荷作用对结构可靠性的影响,给出了载荷多次作用于零件的可靠性模型,理论上可行,但在实际应用时因为等幅荷载难以满足,因而应用起来误差太大是难以避免的。另外,由于强度退化过程与载荷历程相关,多次载荷下的强度退化规律难以确定,要把这种方法用于实践处理可靠性问题还有明显的困难。文献[16—17]对动力可靠性进行了研究,其理论方法严谨可行,但也仅限于载荷的动态分析。文献[18]讨论了机械零部件与系统的动态可靠性,说明了零件与系统的失效率也是满足浴盆曲线的。

事实上若要用应力-强度干涉模型计算结构与系统的可靠度,即使只考虑具有不确定性的恒幅应力条件下的可靠性问题,也需要知道指定寿命下的强度分布。然而,严格的讲,给定寿命下的强度分布无法通过实验准确的得到,而通过数学公式推导又有很多障碍。尽管如此应力-强度干涉模型至今仍然是时变可靠性计算的基本方法^[19—21]。

1961年,Weibull提出了在S-N曲线上的任一点(S,N)的疲劳强度破坏概率与疲劳寿命破坏概率相等的猜测^[19]。1984年,Tanka^[22]提出了与Weibull设想完全一致的模型,进一步阐明了这种等同的观点,给出了疲劳寿命分布与疲劳强度分布之间的关系式,但沿用了疲劳强度遵循正态分布的假设。1986年,傅惠民在文献[23]用概率论的方法论证了P-S-N曲线上任一点的疲劳寿命破坏概率与疲劳强度破坏概率在数值上是相等。同时,还得出了一般情况下疲劳强度服从偏态分布的结论。此外,姚卫星等在文献[24]也进行了这方面的研究。然而,这一方面的应用常常受到数学困难的限制。

在实际工程应用中,载荷大多是复杂的随时间变化的随机载荷,也就是说,结构和系统在它们的服役期,承受的载荷是多次和不确定的。在多次载荷历程下的结构与系统可靠性方面的研究还在不断地发展、完善。文献[25]进行了有关复杂载荷下的疲劳可靠性方法的研究,文献[26]开展了有关复杂载荷对剩余寿命分布的影响研究。文献[27—28]研究了剩余强度变化规律及相应的可靠性模型。各种新的方法也在复杂载荷历程下结构与系统的可靠性问题中有所尝试,并建立了相应的模型。这些模型包括随机有限元法^[29]、概率与非概率混合可靠性模型^[30]、基于遗传算法和神经网络的

可靠性模型^[31]等。文献[32—33]通过引入信息理论,建立了定量综合评价寿命统计分布的信息量模型。文献[34—35]应用模糊数学建立了模糊可靠性模型。文献[36]提出了考虑疲劳本构随机性的结构疲劳可靠性分析方法。文献[37—38]研究了多状态零件及系统可靠性问题。但是,这些方法,要么计算精度不高,要么耗费时间多、成本大,要么假设条件难以满足,总之,实际工程应用意义并不是很大。

对于多次随机载荷时间历程的统计特性及其表述方法以及多次载荷历程下的结构与系统可靠性研究还比较少。有关载荷的统计特性的表达,基本上只涉及恒幅循环载荷^[39],以及以“首次穿越”方法为背景的极限载荷分布统计^[40]。文献[41]提出了一种描述复杂随机载荷历程的方法,但只是通过平均水平因子和幅度因子两个随机参数表达载荷的随机性,过于简化。

目前,越来越多的人研究工作设计结构与系统的老化问题^[42]和模糊问题^[43],提出了“具有中介状态”的可靠性这样的概念^[44]。以突变的模式表述从完全正常状态到完全失效状态的转变基本框架。这样的框架对某些电气设施和精密仪器可能是适用的,但对许多其他工程却不能完全符合实际情况。因为工程中的结构和系统元件的工作状态从有效到失效是一个渐变的过程,从完好的工作到完全不能有效地工作还存在许多的中间状态。此外,文献[45]在充分考虑非临界损伤对临界损伤失效影响的条件下,给出了系统的多级失效描述,通过计算临界失效事件和非临界失效事件的并集得到了更为合理的系统可靠性评价结果。文献[46]研究了考虑中介状态的机械系统的可靠性问题。文献[47—48]对系统的非整数阶失效问题做了初步的探索性描述,文献[49—50]采用多状态失效树近似构造了连续状态系统的可靠性模型。这些方法,虽然不能很好地反映结构与系统的可靠性随时间变化的情况,但为研究结构与系统的可靠性开创了不一样的思路。

传统的结构可靠性模型是基于静态的应力与强度关系建立起来的^[51—53],这些模型中没有考虑多次载荷作用、载荷变化以及结构强度指标退化等时变因素对结构可靠度的影响。实际上,结构由于振动、冲击、疲劳、腐蚀、老化等外在因素以及一些不确定性的内在因素的共同影响,其可靠性是与时间相关的函数。文献[54]建立了结构抗力退化的可靠度计算模型,采用 Monte Carlo(MC)重要抽样方法求解时变的可靠度,但是算法复杂耗时,且只考虑一次载荷的情况。文献[55]给出了一种考虑载荷多次作用下零件的可靠性计算模型,但该模型在实际应用时,当作用载荷等幅的条件难以满足时,导致其可靠性的预测结果误差偏大是难以避免的。文献[56]给出了随结构时变信息更新的可靠性的有关论述,并利用时变的 Bayes 方法求得结构的可靠度,这作为对具体问题的一种求解方法切实可行,但文中并

未给出相应的随时变的结构可靠性计算模型。文献[57]对结构的动力可靠性问题进行了分析研究,但仅限于作用载荷为平稳随机过程的情况。文献[58—61]研究了机械零部件与系统的动态可靠性,表明零件与系统的动态失效率也是满足浴盆曲线的,但其中的动载荷考虑为等幅分布的情况。当载荷随时间变化且结构强度随时间退化时如何进行结构动态可靠性计算问题还需要进一步的考虑。关于结构的经典可靠性研究已有很多文献进行了描述^[62—66],主要的方法有一次二阶矩方法^[67,68]、蒙特卡洛方法(Monte Carlo Method, MCM)^[69,70]等。文献[71—73]研究了结构的动力可靠性问题,主要是针对结构承受一次动载荷进行可靠性分析,但整个分析过程未考虑结构的强度与时间的关系。多年来,人们一直在探索对结构可靠性精确计算的方法,而完全概率分析方法则提供了一种新的思路。该方法的基本作法是根据激励随机变量的分布类型和系统激励与响应之间的传递函数关系,利用随机数学中的相关方法,设法获得结构随机响应量完整的概率信息,包括响应量的概率分布函数和数字特征,再利用可靠性分析中的积分方法,获得结构可靠度的准确计算结果。近年来出现了利用概率密度演化方法(Probability Density Evolution Method, PDEM)研究结构的静力和动力可靠性问题^[74—79],该方法能够全面地反映随机模型的概率信息,可得到随机结构的静、动力响应量的概率密度函数。在已知载荷应力与结构强度的概率分布函数的前提下,利用概率密度演化方法,建立结构承受多次随机载荷且结构强度随时间不退化和退化的结构动态完全概率的可靠性计算模型在相关文献中并没有发现。对结构承受一种载荷的静态可靠性问题的研究已经很多了^[80—84],而且取得了很多好的成果。文献[85—86]都讨论了风载荷对结构的可靠性的影响,文献[87]讨论小鸟对飞机冲击时对飞机可靠性的影响。文献[88—90]考虑了两种载荷下的结构可靠性,但它没有考虑结构还有可能承受了其他载荷情况下的结构可靠性问题,而且也没有考虑结构强度因为振动腐蚀等原因随时间退化的问题。实际上,任何一个结构在它的服役期间,所受的载荷不是唯一的,而是若干种载荷共同作用于它。当若干种载荷共同随时间作用于结构元件且结构元件强度退化时如何建立结构元件的动态可靠性计算模型在现有的文献很少提到。

结构随机可靠性模型是在已知结构强度和所受载荷概率分布函数的前提下,利用直接积分法或一次二阶矩法计算得到的可靠性指标^[91—93],其可靠性预测需要较多的统计数据,且预测结果对概率分布参数的准确性较为敏感,即概率参数很小的误差有时可能导致可靠度计算结果呈现较大的误差^[94]。在许多实际工程问题中,不确定性参数精确的概率数据通常是不易得到的。事实上,当掌握的不确定性参数信息较少时,则宜采用区间或凸集

模型来描述问题的不确定性^[95-96]。文献[97-99]提出了基于区间分析的结构非概率可靠性模型,并分析了区间静载荷作用下结构的非概率可靠度。在针对实际问题中掌握作用载荷与结构强度的统计信息量较少的情况下,利用区间理论对结构的强度随时间变化进行区间分析,建立当作用载荷随时间变化且结构强度随时间退化时结构的动态非概率可靠性计算模型就成为急需解决的问题。在实际工程中往往还会遇到在结构服役期随机型和区间型不确定因素是共同存在的问题,对于同时含有随机变量和区间变量的结构可靠性问题,利用混合模型处理方式,给出结构可靠度。这比给出一个确定的单值具有更高的可信度^[100]。文献[101]提出了结构的随机-区间问题的 Sequential Single-Loop Method (SSLM) 处理方法,然后根据随机-区间变量,对结构进行优化设计。但该文提出的 SSLM 对区间问题转化为随机问题的方法算法繁冗,运算迭代次数多,且只考虑静力学的问题。文献[102]从理论上证明了区间变量转化为随机变量和直接计算随机-区间变量对于结构的可靠度的计算结果是相同的。文献[103-107]利用区间因子研究了随机-区间性质的结构系统的静力学可靠性问题,得到的结构可靠度是一个常量。利用随机-区间理论,对结构承受的区间载荷随时间变化,随时间响应的结构随机强度随时间退化时结构的区间-随机混合可靠性计算模型,从而得到结构的实时可靠度还需要进一步的考虑。在实际工程应用中,结构的强度和所受的载荷属于模糊不确定性问题也是大量存在的。文献[108-111]对模糊可靠性问题求解做了研究,初步的描述了模糊可靠性的基本方法。文献[112]研究了应力随机而强度模糊时的结构模糊可靠性问题。文献[113]将模糊问题通过当量方法转化为随机问题,然后用一次二阶矩法计算结构的可靠性指标。但以上文献仅考虑一次载荷、强度不退化时的结构的模糊可靠性问题。针对实际问题中结构承受的多次模糊载荷与结构模糊强度的情况,建立当作用于结构的多次模糊载荷随时间变化同时结构的模糊强度随时间退化情况下的结构的动态模糊-模糊可靠性预测模型还需要进一步深入思考。在实际工程应用中还大量存在既包含随机信息,又包含模糊信息的实际问题,文献[114-116]对一次随机应力、模糊强度可靠性问题提出了一种改进的处理方法,简化了算法。文献[117-119]研究了一次应力随机、强度模糊时的机械结构模糊可靠性问题。实际问题中,结构承受多次随机载荷,结构的模糊强度随时间变化的结构模糊-随机混合动态模糊可靠性预测模型是必要的。

可修复的 k/n 系统是一种常见的系统类型,普遍存在于各种工程系统中,如:飞机的发动机系统、发电厂的发电机系统等。目前,对各种系统的可靠性预测问题已有许多研究^[120-124],其中 k/n 表决系统的可靠性问题也受

到了广泛的关注^[125,126],文献[127]研究了考虑失效相关的 k/n 表决系统的动态可靠性模型,利用应力-强度干涉理论,对系统的强度退化的情况进行了讨论。文献[128—129]分别讨论了 $1/2$ 表决系统、 k/n 表决系统的可靠性问题,基于系统各部分失效相互独立的假设对系统进行了可靠性分析与计算,但这种处理常常会导致过大的误差。文献[130—132]从数学角度论述了配有修理工的 k/n 表决系统的瞬态可用度和排队修理等问题。然而,上述的这些研究工作并未涉及 k/n 表决系统在受到多次随机作用,且系统单元的抗力随时间下降的情况。传统的可靠性与概率风险评估方法往往将系统的状态视为是与时间无关的过程^[133—135]。文献[136]研究了载荷均担的 k/n 表决系统的可靠性。文献[137]指出载荷增大将会导致部件有更高的失效率。以上文献中的系统失效率均不随时间而改变,而实际中的系统及组成系统的各个单元的状态可能是处于动态的变化过程。此时,对系统的可靠性计算则需考虑系统的状态随时间变化的情况^[138]。文献[139]讨论了失效率随时间而变时由单个部件或两个部件并联构成的简单系统的可靠度和可用度。文献[140]简述了复杂大系统动态可靠性与动态概率风险评估技术发展现状。上述文献,不论是对系统可靠度的建模与分析,还是对系统可用度的建模与分析,只是停留在对系统情况的不变的分析之中。文献[141—142]运用应力-强度干涉理论、顺序统计量理论等研究了失效相关的 k/n 表决系统动态可靠性模型,得出了此类系统的可靠度是随时间变化的,但这些文献对系统的可靠度的研究是局部的。文献[143—145]利用微分方程建立了传染病模型,并用该模型预测了流行病传染的规模、爆发时间、死亡人数和持续时间,为政府的决策提供了相关的依据。对可修复 k/n 表决系统生命状态进行分析,探讨以工作单元数 k 的理论依据现有的文献没有给出任何的回答。

在工程实际应用中,系统往往是由不同的元件组成,这些元件在系统中呈现出多样性,而且这些元件自身的状态也是多样的。由于这些因素,导致了一个系统也是呈现出多个状态的。关于多状态可修复 k/n 表决系统(Multi-state Repairable k/n Voting System, MSRVS)的可靠性研究始于20世纪70年代中期,到目前已经取得了一些进展,文献[146—148]研究了MSRVS的特点,提供了对MSRVS的可靠性研究的可能。文献[149—151]研究对多状态并联系统进行了研究。虽然,对MSRVS的可靠性研究有所发展,但这些研究具有一定的局限性,而且处于基础阶段。另外,因为MSRVS的复杂性,研究起来具有一定的困难,所以,对MSRVS的可靠性研究的文献目前看来还是比较少的。近年来,对马尔科夫链(Markov Chain, MC)和半马尔科夫链(Semi-Markov Chain, SMC)的研究的内容日

渐丰富,理论逐步完善。文献[152—157]用马尔科夫链和半马尔科夫链研究了系统的状态变化,对系统的可靠性、可用度、平均开工时间等能够做出很好的预测。实际上,在系统的服役过程中,由于系统往往受到不同的作用,从而导致系统在某一状态的逗留时间是离散的、不连续的。而且,还可以用时间离散状态去逼近连续时间状态。文献[158—163]提出了具有离散时间的马尔科夫链(Discrete Time Markov Chain, DTMC)系统的可靠性问题,并用离散状态时间连续的马尔科夫模型对系统的可用度进行了求解。文献[164—167]详细阐述了离散时间半马尔科夫链(Discrete Time Semi-Markov Chain, DTSMC)在系统可靠性研究中的应用。文献[168]说明了离散时间半马尔科夫链在其他方面的应用同样也会收到良好的效果。文献[169]利用DTMC与DTSMC研究了具有4个多状态元件的多状态燃煤发电系统的可靠性问题,对于预测这一类型的设备在短时可靠度有不错的效果。用DTMC和DTSMC研究MSRVS的元件的状态,给出MSRVS的可靠度和可用度的预测模型具有一定的意义。多状态系统的可靠性被广泛应用于电力系统、发动机系统、电子产品系统等可靠性评估中^[170]。目前,对发动机系统可靠性的评估用两状态系统的可靠性评估所代替[171—173],但是该方法显然在发动机系统的单元可靠性还有裕量的情况下是不准确的,至少是有限制的。文献[174—175]用单一马尔科夫模型对燃煤发电机组的可靠性进行了研究。然而,迄今为止,还没有文献对多状态发动机系统可靠性问题运用马尔科夫链和半马尔科夫链结合起来进行研究。

1.4 随时间响应的结构与系统可靠性研究的必要性与意义

随时间响应的结构与系统可靠性研究的必要性:结构和系统服役的环境是十分复杂的,动载荷作用下结构与系统本身的振动疲劳、腐蚀、磨损等的失效是结构与系统失效的常见原因。这类与时间有关的动态可靠性问题的失效与静载失效的传统可靠性问题有许多不同之处,因而也需要不同的分析方法和模型。传统的可靠性问题考虑的是是否失效的问题,而随时间响应的的可靠性问题不仅考虑是否失效的问题,还要考虑何时失效以及失效前的结构与系统服役情况的问题。结构与系统的动态可靠性问题也不同于结构与系统的动力可靠性问题,在结构可靠性中,一般将由动载荷引起的结构动位移和动应力对应的时变可靠性问题称之为结构动力可靠性问