

Reliability Analysis Methods for Mechanical
Systems involving Failure Correlations

相关性失效机械系统的 可靠性分析方法

唐家银 何平 陈崇双 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press

相关性失效机械系统的 可靠性分析方法

唐家银 何平 陈崇双 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

主要包括 Copula 基础理论简介、应力—强度相关性干涉下的零件可靠性计算、相关性失效的典型不可修机械系统可靠性分析、相关性故障的典型可修机械系统可靠性模型、相关性失效的机械系统可靠性综合评价等。

本书可供机械工程、应用统计学、运筹学等专业可靠性方向的高年级本科生和研究生使用,也可供从事机械工程、可靠性工程、可靠性统计等领域研究、设计等方面的科研人员、工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

相关性失效机械系统的可靠性分析方法 / 唐家银, 何平,
陈崇双著. —北京: 国防工业出版社, 2014. 6
ISBN 978-7-118-09344-5

I. ①相... II. ①唐... ②何... ③陈... III. ①
机械系统—可靠性—分析方法 IV. ①TH

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 134206 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 9¼ 字数 208 千字

2014 年 6 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 48.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

机械可靠性是一个综合性系统工程问题,其理论与方法有着广泛的工程应用价值,尤其在机械产品发展日趋高性能、高强度、高精度化的形势下,对其可靠性指标则提出更高的要求。既不同于传统机械设计方法,也不同于传统电子系统可靠性理论方法,机械系统可靠性问题具有多变量、多状态、概率化、多指标、干涉理论基础性、受环境影响、维修策略优化、系统化研究等诸多特点。但目前较为成熟的机械系统可靠性预计、分析和设计理论多是沿承了电子产品系统的可靠性分析模型,实际上机械系统及其零部件的失效机理、承载特点与电子电路系统及其元件有着截然差异,一是电子元件的状态二值性(失效与正常)不太适用于机械零件的多态性和多失效模式;另一本质区别是电子产品系统可靠性理论多以独立性失效为先决条件,但失效相关性却是机械系统可靠性的重要特征。忽略失效相关性下的机械系统可靠性分析与评价,常常会导致过大的误差,甚至得出错误的结论。

本书引入目前国内外广泛运用的 Copula 相关性理论,围绕机械系统可靠性分析中涉及的静动态相关性,改进现有零部件及系统的可靠性计算评估模型,应用 Copula 相关性理论探索机械系统的可靠性理论、方法和工程化建模步骤,为机械系统的设计、运行、维修提供指导。

撰写思路沿机械系统可靠性分析中涉及的各类静动态相关性这根主线,以推进式、适用性、系统化的原则展开。

全书共分 6 章。第 3 章探讨机械零部件可靠性的计算,零部件可靠性的精确计算是对机械系统可靠性正确评估的基础。从机械零件可靠性计算入手,基于机械零部件应力与强度两者负相关结构,利用 Copula 理论,建立了应力—强度相关性干涉的可靠度计算模型。验证了零件可靠度是随应力强度相关程度参数变化的区间连续值;说明了独立干涉条件下的可靠度计算结果偏于开放。鉴于机械零件的综合应力、综合强度的各分量之间存在着的正相关性,也给出了在既定失效判据下,其分布的确定方法。并考虑了零部件强度和应力随工作时间的变化历程,建立了强度衰减过程的动态相关性干涉模型。

以强度为判据的设计计算是机械设计的重点。常规设计的数值型安全系数不能体现应力、强度分布的离散特征;传统的随机安全系数—可靠度计算方法又

缺乏考虑应力、强度之间的干涉相关性。为此,建立了应力—强度相关干涉下随机安全系数—可靠度计算方法;并以此为基础,给出了相关性干涉下的典型机械零件静强度可靠性设计的处理步骤。

针对机械零件的多失效模式特征,本书给出一种新的机械零件综合可靠度计算模型——C - R(Copula - Reliability)算法。对于高可靠性、长寿命产品的多故障模式相关性失效的特征,基于高长寿命产品的性能退化数据,运用确定性趋势组合时序模型,提炼既定故障模式退化量分布发展的特征信息,依条件期望原理差分方程方法,给出动态退化量分布特征的估计方法,在此基础上建立 Copula 综合可靠性模型,并拓展至退化量—随机失效阈值相关性干涉的普适性模型。

第4章在机械系统可靠性方面,比较详尽地研究了零部件失效相关下各类典型不可修系统可靠性的响应特征;把系统可靠度计算的基本公式广义化、普适化,使之适用于各类型系统和更广泛工况。针对典型的不可修系统(包括串联、并联、混联、 $k/n(G)$ 表决、储备、网络系统),从零部件寿命相关结构的角度入手,建立对应的失效相关机械系统 Copula 可靠性分析计算模型。通过系统可靠度随零部件数目变化的对比,验证了模型的合理性,同时给出了零件失效寿命相关结构的选择准则和相关程度参数的估计方法。

确定零部件的可靠性设计要求,进行可靠度分配,是机械系统可靠性正确预计的重要应用。本书在失效相关的系统可靠性计算模型基础上,给出相对失效概率的相关性 Copula 可靠度分配法和零件失效相关条件下的再分配方法。

第5章则探讨了相关性故障下的典型可修系统可靠性模型,考虑可修系统零部件工作寿命、故障部件修复时间之间的正相关性,且将时间变量放宽到一般性连续分布,而不局限于指数分布。基于 Copula 函数的相关性理论,给出微时间差 $t \rightarrow t + \Delta t$ 内系统一步状态转移矩阵概念,进而建立了单部件、串联型、二不同单元和一修理工组成的并联可修系统、任意的 $k/n(F)$ 可修系统一般性 Copula 可用度计算模型。

结构函数反映了零部件状态特征对系统的状态影响,但缺乏对可靠性变化的定量刻画;系统可靠度计算模型又不能显性描述零部件的结构配置、组成关系。第6章以 $k/n(G)$ 系统为对象,给出并验证了两者之间的等效映射表征,并拓展至普适性的零件相关性失效下可靠度—结构函数映射表征。最后为完成对机械系统零部件故障的风险定量评估,从故障影响、故障冲击的角度考虑故障相关性,给出转移矩阵化 FMECA 建模方法,发展了单层次 $n \rightarrow 1$ 的 FMECA 模型。

本书的出版得到了教育部人文社会科学研究青年基金(11YJCZH154)“故障相关性的 Copula 统计分析及其在铁路运输可靠性评估中的应用”,中央高校基本科研业务费专题项目“高速铁路装备安全监测和运营维护中的大数据统计

分析研究”的资助。另外,本书编写过程中,得到了西南交通大学数学学院的领导、同事的帮助和支持;国防工业出版社诸同志作了认真且辛苦的编辑工作,在此一并致谢!

由于作者水平有限,书中不足之处在所难免,欢迎专家、学者及读者批评指正。

作者

2013 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 可靠性工程的发展及其意义	1
1.1.2 机械系统可靠性的诞生和特点	2
1.1.3 机械系统可靠性研究中的几个关键因素	3
1.2 国内外研究现状	6
1.2.1 相关性失效的系统可靠性研究进展	6
1.2.2 问题的提出	9
1.3 主要研究内容和研究方法	10
1.3.1 课题来源	10
1.3.2 主要研究内容和结构组织	11
1.3.3 研究思路和技术路线	12
第 2 章 相关性分析的 Copula 基础知识	15
2.1 Copula 简介	15
2.2 Copula 的定义和基本定理	17
2.3 Copula 的基本性质	18
2.3.1 Copula 对相关性的刻画	18
2.3.2 相关性测度指标	20
2.4 几类经典 Copula 族	26
2.5 联合分布下的 Copula 确定	31
2.6 本章小结	32
第 3 章 应力—强度相关性干涉下的零件可靠性计算	34
3.1 应力—强度相关性干涉可靠性模型	34
3.1.1 静态应力—强度相关性干涉模型	35
3.1.2 动态应力—强度相关性干涉模型	39
3.2 相关性干涉下随机安全系数与零件可靠性设计	41
3.2.1 应力—强度相关性干涉下随机安全系数与零件可靠度	42

3.2.2	平均安全系数可靠度计算方法	43
3.2.3	应力—强度相关性干涉下的零件可靠性设计	44
3.3	多失效模式下的零件可靠度计算	46
3.3.1	机械零件综合可靠度的 C—R 算法	47
3.3.2	零件可靠度动态连续性验证与算例结果对比	48
3.4	多故障模式高寿命产品相关性失效的综合可靠性评估	53
3.4.1	模型假设和符号	53
3.4.2	退化量分布确定模型和参数估计	54
3.4.3	相关性失效的综合可靠性模型	56
3.5	本章小结	61
第 4 章	相关性失效的典型不可修机械系统可靠性分析	62
4.1	相关性失效的串并联机械系统可靠性预计模型	62
4.1.1	相关性失效系统可靠度的 Copula 计算模型	63
4.1.2	模型效果验证	66
4.2	相关性失效的储备型机械系统可靠性预计模型	69
4.2.1	零件相关性失效的冷储备系统可靠性模型	70
4.2.2	零件相关性失效的温储备系统可靠性模型	72
4.2.3	算例与 Copula 经验选择	73
4.3	相关性失效的表决型机械系统可靠性预计模型	74
4.3.1	相关性失效的 $k/n(G)$ 系统可靠度模型	76
4.3.2	相关性 $k/n(G)$ 系统可靠性模型合理性验证	78
4.4	网络型系统可靠性计算模型	81
4.5	考虑零件失效相关性的机械系统可靠度分配	84
4.5.1	相对失效概率的相关性可靠度分配	85
4.5.2	零件失效相关下的再分配法	87
4.6	本章小结	88
第 5 章	相关性故障的典型可修机械系统可靠性模型	90
5.1	同时考虑故障相关和变故障率的可修系统可靠性计算	91
5.1.1	系统可用度及模型假定和记号	91
5.1.2	单部件可修系统计算模型	92
5.1.3	n 个同型单元和一修理工的串联可修系统计算模型	94
5.1.4	两不同单元和一修理工的并联可修系统计算模型	97
5.2	故障相关的表决可修系统可用度计算	99
5.2.1	模型假定	101

5.2.2	故障相关的 $k/n(F)$ 可修系统一步状态转移矩阵	101
5.2.3	故障相关的 $k/n(F)$ 可修系统动态可用度计算	104
5.2.4	模型通用性检验	105
5.3	本章小结	107
第 6 章	相关性失效的机械系统可靠性综合评价	108
6.1	相关性失效 $k/n(G)$ 系统结构函数—可靠度计算的等效映射表征	109
6.1.1	独立性失效下的二值状态 $k/n(G)$ 系统结构函数	110
6.1.2	独立性失效下的 $k/n(G)$ 系统一致性可靠度预计模型	111
6.1.3	$k/n(G)$ 系统结构函数—可靠度等效映射表征	112
6.1.4	零件失效相关的 $k/n(G)$ 系统可靠度—结构函数等效映射表征	113
6.2	转移矩阵化 FMECA 建模方法	117
6.2.1	故障相关的转移矩阵化 FMECA 模型	117
6.2.2	转移矩阵化 FMECA 模型在某型车转向架机械系统中的应用	121
6.3	本章小结	126
	参考文献	127

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景

1.1.1 可靠性工程的发展及其意义

随着科技的发展,现代化的机器、技术装备、交通工具等越来越复杂。在这些机器设备提供着越来越优质性能的同时,也对其可靠性提出了更高的要求,因为系统越复杂,而可靠性若是达不到较高的指标要求,则故障的可能性越大、造成的损失也越大。这些损失可能是经济上的、信誉上的,甚至会造成影响生命安全或更严重的灾难性后果。如导航系统的不可靠或工作失误可能导致飞机坠毁;飞机在着陆时,其控制系统若不能将飞机的起落架可靠地弹出,后果将是不可想象的。包括 2011 年日本大地震引发的福岛核电站核泄漏危机均属于可靠性缺失范畴。

可靠性的提出,起源于美国航空设备中的电子管故障问题。原因是 20 世纪 40 年代第二次世界大战期间,美国运往远东的作战飞机,有 60% 以上难以飞行,经过调查,原因是电子管经运输、储存而失效了。这引起美国军方的高度重视,从此开始对电子设备不失效的质量指标——可靠性进行系统的研究^[1-4]。

1952 年,美国成立了电子设备可靠性咨询委员会(Advisory Group on Reliability of Electronic Equipment, AGREE)。该机构对电子产品的设计、生产、试验、储存、运输、使用等方面的可靠性问题,作了全面调查研究,于 1957 年发表了著名的“军用电子设备可靠性报告”,提出了对产品进行试验和鉴定的方法,被认为是电子产品可靠性奠基性文件。从此可靠性技术发展成为一门独立的工程学科^[1-4]。这也同时决定了传统可靠性理论和方法的基本特点:主要涉及具有常数型失效率的二态电子元件和各元件失效相互独立的电子电路系统。

目前国际上采用的经典可靠性定义为“产品在规定的工作环境下、规定时间内、完成规定功能的能力”。这个定义是由 1966 年美国的 MILSTD-721B 给出的。

可靠性的发展经历了先“定性”,后“定量”,再“系统化”的过程。产品可靠性的定性判据,如设计、制造一台机器或一个零件,要求其能连续工作五年,如果使用到第四年或更短时间就发生损坏事件,即为不可靠;反之,如果能连续工作五年以上,则是可靠的^[1]。当然,这种评判是模糊的、缺乏严格的计算方法和数

量标准。最早用定量的尺度衡量产品可靠性的人是德国火箭专家 R. Lusser, 在第二次世界大战后期, 他首先提出用概率乘积法则将系统的可靠度看成是各子系统可靠度乘积, 从而算出了 V - II 型火箭诱导装置的可靠度是 75%。在 20 世纪 50 年代初期, 概率理论、数理统计方法和运筹学技术等渗入到产品的可靠性设计、分析、计算和优化中, 可靠性理论才得到了系统化的研究与发展。

正是由于产品可靠性的重要性, 可靠性理论研究已经从最初的军工、电子产品, 扩展到许多其他技术领域, 得到了越来越广泛的应用, 迅速发展成集概率论、数理统计、运筹学、电子、控制、机械、材料等技术为一体的综合性学科。

1.1.2 机械系统可靠性的诞生和特点

最早进行机械系统可靠性研究的国家是美国, 始于 20 世纪 60 年代初期, 其发展与航天计划有关, 当时在航天方面, 由于机械故障引起的事故多、损失大。因此美国宇航局 (NASA) 从 1965 年起开始进行机械可靠性研究。

机械系统可靠性研究是可靠性工程学的重要组成部分, 它把随机方法应用到机械工程设计, 不仅解决了传统设计所不能处理的问题, 而且能有效地提高产品的设计水平和质量, 降低产品的成本。

与传统机械设计方法和传统电子系统可靠性均不同, 机械系统可靠性具有以下基本特点^[2]:

(1) 视应力和强度为随机变量。零部件所受的应力和材料的强度均非定值, 而为随机变量, 受载荷、强度、结构尺寸、工况等变动而导致其分布特征参数各异。

(2) 需采用概率、统计理论方法进行分析、求解计算。

(3) 可定量求解产品的失效概率和可靠度。

(4) 有多种可靠性指标供选择。传统机械设计方法仅有一种可靠性评价指标, 即安全系数; 而机械可靠性设计则可根据不同需求选择适宜可靠性指标, 如失效率、可靠度、平均无故障工作时间 (Mean Time Between Failures, MTBF)、首次故障里程 (用于交通工具)、维修度、有效度等。

(5) 应力、强度分布对产品可靠性的主导作用。应力—强度干涉 (Stress-Strength Interference, SSI) 理论作为机械产品可靠性分析计算的理论基础。

(6) 工作环境对产品可靠性影响作用。高温、低温、冲击、振动、潮湿、烟雾、腐蚀、沙尘、磨损等环境条件对应力分布、强度分布有影响作用, 进而影响了基于应力—强度分布干涉的产品可靠性。

(7) 必须考虑维修性。以有效度为可靠性指标的可修产品, 如工程机械等, 不论其最初设计多高的可靠性, 都必须考虑其维修性, 才能使之维持高的有效度。

(8) 从系统的观点出发考虑机械产品的可靠性, 而不仅仅是针对某个别机

械零件,因系统的可靠性不仅与机械系统各组成零件的可靠性有关,而且还与系统的组成结构、匹配方式有关。

1.1.3 机械系统可靠性研究中的几个关键因素

可靠性是研究零部件与系统失效(故障)特性的工程学科,不同系统、不同失效机理需要不同的概念、不同的定义和不同的分析方法。若是做出不合理的假设,套用固定的方法和模型,有可能导致可靠性分析、评价、设计失去其应用价值,甚至导致错误结论^[3]。

机械系统及其零部件的失效机理、承载特点与电子电路系统及其元件有着截然区别。实验证明,许多研发的机械产品没有达到预期的可靠性标准,究其原因,是因为没有一个有机的、符合机械系统特色的、整套的研究方法,从而设计的产品很难得到预计的可靠性结果,将传统的电子系统可靠性理论方法直接照搬运用到机械系统中是不合适的。因此,机械系统可靠性工程还需要进一步研究、发展和逐步完善。客观、合理的机械系统可靠性理论方法应该考虑以下几个关键因素。

1.1.3.1 系统可靠性与零件可靠性之间关系

通过零件的可靠度计算系统的可靠度是各类系统可靠性分析的常做。传统的分析模式,先利用应力—强度干涉模型计算出每个工作零部件的可靠度(这里的应力是指施加于零部件上、产生破坏影响的物理量的综合表征;而强度则是承受这种破坏量的能力),或者通过零件试样的可靠度试验数据,用统计方法确定零件可靠度。再代入根据系统的逻辑构成(可靠性框图,诸如串联、并联、混联、储备、表决等)确定的可靠性结构函数表达式中,从而建立系统可靠性分析模型。

传统的系统可靠性计算模型多是建立于系统中各零件失效相互独立基础之上的^[1,2,4-14]。然而,在机械系统中零件失效之间普遍存在着三类相关性失效形式,即共因失效(Common Cause Failures, CCF)^[15-19]、从属失效(Propagating Failures)^[20]及共模失效(Common Mode Failures),且三类失效形式互相交叉,这就使得机械系统可靠性分析与建模都相对电子电路系统要复杂得多,如何从零部件可靠度入手推断系统可靠度也就变得更为困难。但失效相关是系统失效的普遍特征,忽略零件之间的失效相关性,理想化地在各零件失效相互独立的假设基础上,进行机械系统的可靠性分析与评价,常常会导致过大的误差,甚至得出错误的结论^[21-23]。

例如对于串联型机械系统,仍然采用电子电路系统可靠度计算模型

$$R_s = \prod_{i=1}^n R_i \quad (1.1.1)$$

式中: R_i 是第 i 个零件的可靠度; n 是系统中零部件数量。由于 $0 < R_i(t) < 1$, 则

$$\lim_{t \rightarrow \infty} R_s(t) = 0 \quad (1.1.2)$$

对于多为串联型的大型复杂机械系统,如飞机、汽车、机车车辆系统等,总可以分解为成千上万个零部件或多种可能的失效模式,但系统可靠度实际上不可能趋于零^[24]。

从1962年开始,Lloyd^[25]就提出,对于有 n 个零件组成的串联型系统,其可靠度 R_s 的值应该处于以零件的最小可靠度 $R_{\min}$ (文献假设各零件可靠度相等)与各零件可靠度乘积值(文献为 R_i^n)为端点的区间内。国内学者孙玉秋^[26,27]和李文侠^[28]在此基础上,给出机械系统可靠性的粗略工程算法。

如果利用机械、结构系统可靠度的对立概率,即失效概率来表示,李文侠^[29]也指出了,对于串联型结构系统,其失效概率范围为

$$\max\{P_i | i = 1, 2, \dots, n\} < P_s < 1 - \prod_{i=1}^n (1 - P_i) \quad (1.1.3)$$

式中: P_i 和 P_s 分别是构件与结构系统的失效概率。

而由对偶关系,得到并联系统的失效概率范围为

$$\prod_{i=1}^n P_i < P_s < \min\{P_i | i = 1, 2, \dots, n\} \quad (1.1.4)$$

式(1.1.3)的右端和式(1.1.4)的左端便对应于系统的各零件失效完全相互独立的理想状态。

1.1.3.2 机械系统和零件的状态多值性

目前经典文献^[1,2,5-9,10,30-34]中的系统可靠性预计、分析、设计理论基本上多是沿承了电子产品系统的可靠性模型,并在此基础上进行一些可靠性优化、分配和设计等方面研究和应用^[35-40],但若是对机械系统而言,实际上两类系统在状态特征上就存在本质差异。因为电子电路系统中元件和系统的状态是二值性特征(即失效和完好,通常数学上以0和1来处理,失效形式也多为短路和断路两种),并以此二值性为基础,构建零件与系统失效之间的逻辑关系,建立系统可靠性分析模型。但是机械系统甚至是机电系统中,零部件显然存在多值(正常、有磨损、磨损过限、萌生裂纹、裂纹扩展、有腐蚀、断裂等)状态,并对应于多值状态,机械零件的基本失效模式有屈服、断裂、累积疲劳、腐蚀、蠕变、磨损、变形超限等多种形式。如此,零件呈现不同的性能水平,进而不同程度地影响着系统的输出功效,发电系统、通信系统、计算机系统和公共基础设施系统等就是典型的例子。由于机械系统的状态多值性,其可靠性分析计算问题比电子产品的二值状态可靠性要复杂得多。近年来,多态系统的可靠性研究以及多失效模式零件的可靠性评估是可靠性工程的另一热点,受到广泛关注^[41-48],并取得一定的成果^[49-54]。因为状态多值性不是本书的研究重点,在此不详细赘述。同时模糊理论^[55-59]和灰色理论^[60-62]应该可以初步解决零件和系统状态变化一些问题。

1.1.3.3 机械系统可靠性分析中的变量相关性

机械系统可靠性工程中静态可靠性分析蕴含着影响失效(故障)的以下四类相关性:

(1) 确定零部件综合应力的各分量之间,以及确定零部件综合强度的各分量之间均存在相关性。机械可靠性设计中,干涉模型的应力和强度均指综合(广义)的,施加于产品或零件上的物理量,诸如载荷、应力、剪力、温度、冲击值、腐蚀等统称为应力,用 S 表示,即 $S = h_s(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 。这里 $y_i (i=1, 2, \dots, n)$ 分别指代正应力、剪应力等各名义应力分量,而这些应力分量均受到载荷、温度、几何尺寸、物理性质、作用时间等因素影响,从而导致彼此相关。

而产品或零件所能承受的这种应力的能力,统称为强度,用 δ 表示, $\delta = h_\delta(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 。 x_i 分别指代屈服极限、温度极限、有限寿命疲劳强度、无限寿命疲劳强度、疲劳失效循环次数、变形能、耐热性、耐蚀性等强度分量。而强度的各分量也受到零件尺寸、表面质量、应力集中等因素共同影响。一般来说,载荷值越大、温度越高、尺寸越小、物理性质越差、作用时间越长,则压力、剪力、冲击值等这些应力分量也随之增大。即,此类分量相关性多表现为正相关性。

(2) 零件应力—强度干涉中的综合应力、综合强度变量本身之间也存在相关性。如零件的许用载荷(强度 δ)通常会随着零件尺寸参数的增大、表面状况良好等因素而增大,而零件所受的应力 S 则会随之减小。温度、湿度、腐蚀等因素也对两者有类似作用。这类干涉相关性则表现为负相关性。

(3) 零件各失效模式之间存在相关性。机械零件的基本失效模式有屈服、断裂、累积疲劳、腐蚀、蠕变、磨损、变形超限等,各种失效模式之间的相关性多表现为正相关性,即如果零件未经腐蚀,表面特征良好,其疲劳裂纹萌生较慢,导致疲劳寿命延长;反之,零件腐蚀严重,显然疲劳寿命缩短。同样,随着裂纹的加剧,腐蚀度增速。

(4) 机械系统中的各零件失效事件之间的相关性。对于机械系统而言,其组成各单元工作寿命之间的相关性也多数体现为正相关性,即一定载荷作用下,一零件的强度会随着另一零件强度的衰减而衰减,从而导致其失效的趋势比两者相互独立时要大。如滚动轴承组件,由于滚子的铸造缺陷或腐蚀剥落,就会导致保持架、轴承内圈、外圈寿命的锐减;车辆系统中,一系弹簧、一系垂向减振器、二系空气弹簧、二系垂向减振器均承担着车辆的垂向减振任务,若其中之一失效,施加于其他存活零部件的应力就会增加,导致其失效概率随之增大。再如近期日本大地震引发的福岛核电站各机组的连续性爆炸也是此类相关性的体现。

在机械零件的长期使用过程中,其可靠度是随工作时间 t 的增大而减小的,动态的应力—强度干涉模型考虑了时间因素带来的可靠度变化,从而机械零件动态可靠性分析计算应该是强度衰减过程 $\{\delta(t), t \geq 0\}$ 与宽平稳随机应力过程 $\{S(t), t \geq 0\}$ 交叉干涉的结果。所以完整的机械系统可靠性工程不仅要包括以

上涉及四类变量相关性的静态可靠性研究,还需包括与载荷历程对应的动态可靠性研究。

动态机械系统可靠性分析至少蕴含以下两类相关性:

(1) 同一机械零件在载荷历程下的强度衰减过程 $\{\delta(t), t \geq 0\}$ 形成强度时间序列,相邻两次维修检测点对应强度变量 δ_i 与 δ_{i+1} 之间存在的相关性。这种相关性的准确捕捉对零件寿命预测、零件维修、更换、报废风险的实时警报是很有帮助的,有助于机械系统维修策略的正确制定。

(2) 隶属同一机械系统两工作零件 i^{th} 和 j^{th} 的强度衰减过程 $\{\delta_i(t), t \geq 0\}$ 和 $\{\delta_j(t), t \geq 0\}$ 之间的相关性。根据服务机械系统工作任务的匹配结构不同,一零件强度的衰减速率对另一零件的强度衰减速率产生或正或负的影响作用,例如一承受拉应力的串联型多连杆结构,若其中一截拉杆的强度迅速衰退,会加快自我失效(断裂)的过程,但却对其余零件强度衰退(断裂)起到延缓作用;至于载荷任务下的机车车辆系统的多数并联、储备、 $k/n(G)$ 表决系统,则效果相反。

实际上,要想如实、准确地建立机械系统可靠性的分析和计算模型,对上述系统中蕴含的六层次相关性的分析研究缺一不可,相关性的忽略可能会产生错误的结果。这是机械系统可靠性理论研究的重点、难点,也是本书的主要研究方向。目前,计入变量相关性的复杂系统可靠性定量计算在国内外尚无一套成熟的、能工程化的理论方法,这很大程度上制约了机械、结构系统可靠性理论的发展。

除了上述提及的三个关键因素,机械系统可靠性分析研究还应该包括载荷循环—疲劳寿命干涉、损伤容限、成本费用—可靠性等,但这些都不属于本书研究范畴,也就不详细展开。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 相关性失效的系统可靠性研究进展

非电系统可靠性研究在 20 世纪 40 年代就开始了,由于系统自身的复杂性,其理论研究发展非常缓慢。据可查资料,Freudenthal^[63]是最早进行结构、机械系统可靠性研究者,他采用全概率分析方法研究了传统安全系数和结构破坏概率之间的内在联系,提出了考虑诸多因素,主要是有初始损伤条件下的结构系统可靠性数学模型。另一个早期研究非电系统的学者 Hrasofer^[64]则建议,根据失效面而不是失效函数定义失效模式的可靠度指标 β ,这样定义的指标 β 不会由于选择不同的等价失效函数而发生变化,有一定合理性。对于复杂机械、结构系统可靠度计算求解,直至现在还处于起步期,没有成熟的可靠性分析计算理论,当前能够定量计算可靠度的各种方法均可归结为两种:数学模型法和物理原因

法。数学模型法依赖于试验数据,采用统计学手段研究可靠性随使用时间的变化规律,目前在研究系统疲劳寿命时经常使用;二是根据概率理论研究产品失效随机事件的可能性,在电子产品系统广泛应用。物理原因法的突出成果便是应力—强度干涉模型了。

关于上节探讨的机械系统可靠性分析中的三个关键因素,其中对机械零件及系统的状态多值性的研究状况也已经简述,其余两个因素合起来,便形成计入变量相关性的机械系统可靠性理论与工程化建模问题,这是本书的主题。

考虑失效相关影响因素的可靠性研究,最早出现在 1967 年,继 Lloyd 之后, Cornel^[65]明确提出了零件、系统可靠度的一般界限理论,根据独立假设理论算得的是系统可靠度下界值,而由最薄弱环节理论算得系统可靠度上界值,实际可靠度介于两者之间,显然计入了失效相关性,但其界限范围随系统中零件数或零件故障模式数的增大而迅速变得太宽,不实用。Ditlevsen^[66,67]通过严格概率推理和证明,在考虑两两失效模式之间的相关影响下,给出了可靠度窄界理论,被国内外学者所广泛接受^[50,68-76]。此方法依赖较大值相关系数 ρ (针对失效模式的功能函数是线性关系而言),初步解决了机械、结构系统综合失效概率的估算问题,可以说 Ditlevsen 的研究工作是具有里程碑意义的,之后涌现一大批国内外学者以相关系数 ρ 为中心,建立相关性影响的可靠性分析计算模型^[49,50,68-90]。但是随着失效模式数的增大,其计算变得难以实现;同时计算结果仅仅是一个区间范围,这两个缺陷都对于越来越复杂、高精度、高速运转的机械系统来说,都是不容许的。

至 20 世纪 80 年代,系统可靠性技术与有限元法、计算机应用和实用概率网络分析理论相结合,可靠性理论逐渐由零、构件级水平向系统级水平过渡,出现了不少对相关性的串并联系统进行可靠度计算的理论。相继产生了影响函数理论^[80]、降维法^[81,26]、PNET(概率网络估算技术)理论^[82]、极限分析法^[83]、生成函数法^[47,91]等。其中,影响函数理论尽管可以避免求多重积分,但相关功能函数本身很难反映实际,因而误差大;降维法通过条件概率及当量正态分布理论,最终得到 n 个一维概率乘积,由于每一步需迭代求解实际验算点,故效率不高;至于 PNET 算法因相关系数矩阵中的初始相关系数选择较主观,可能使得计算结果偏离实际情况。这些方法都有以下共同点:计算量相当大,且运用极限状态方程求解两两失效模式功能变量之间的线性相关系数 ρ ,再以线性相关系数 ρ 为基石,寻求多失效模式的零件综合可靠度或多零件系统的可靠度。

近二十年,在机械系统可靠性研究中,相继出现对零件失效相关性进行考虑的工作。孙玉秋,张祖明^[26-28]提出了解决复杂机械系统可靠度求解的阶段连续界限理论,认为相关影响的系统可靠性介于最薄弱环节理论和独立假设理论之间,利用阈值简化计算子系统可靠度。董聪^[82]、桑国光^[83]借助于窄可靠度界限理论,由主要失效模式概率综合给出系统失效模式概率。Monte - Carlo 法在解

决系统可靠性问题中越来越广泛^[92,93],由随机抽样结果计算系统失效的概率,但前提是结合有限元方法,对算法程序要求较高,同时由于抽样方法的不同,可能导致偏差较大;另外,当构成系统零部件数量诸多或零件失效模式增大时,判断很复杂。喻天翔^[69]在 Ditlevsen 理论上,仅考虑主次失效模式之间的相关性,推导出相应的简化计算模型,其模型的假设条件是可靠度 R 与主次相关系数 ρ 是线性变化关系^[50],较为理想化,同时如果主次可靠度比较接近,那么误差应该较大。

最近几年,国内外学者对机械、结构系统进行可靠性分析时,尝试从不同角度考虑其中蕴含的相关性,相关性失效的机械可靠性工程迅速成为研究热点,并取得一定进步。何红妮^[86]针对正态变量,依据相关系数提出一种基于马尔可夫链样本模拟的线性抽样可靠性分析方法。庞宝才^[87,88]介绍了一种矩方法,将相关变量空间等效转化成不相关变量空间,但只针对正态型随机变量,同时随着零件的失效模式数增大,其计算量几何增长,无法实现。张义民^[49]同样根据各失效模式间的相关系数,应用概率摄动法与可靠性分析的四阶矩技术,对多失效模式下机械零部件进行可靠性分析。Jose^[89]则给出简单不可修系统在失效相关影响下的三种可靠度分配方法。Li^[90]利用广义生成函数(Universal Generating Function, UGF)给出共因失效影响下,多状态串并联系统的异构冗余优化方法。谢里阳^[94]和王正^[95,96]在系统层次上运用应力—强度理论建立失效相关系统的可靠性模型,充分考虑了零件失效之间的共因关系,有一定的实际意义,但文献给出的静态干涉模型计算过程未涉及各零件失效的影响互动结构,同时未考虑同一零件的应力与强度两随机变量本身也是相关的。周金宇^[97]从零件共因载荷的角度,利用正交化方法,给出机械、结构系统可靠度模型,也是以零件所受载荷全相关、强度全独立、载荷—强度独立为前提条件。其实,对于机械系统中三类相关性失效形式的研究热点——共因失效(其他两类为从属失效和共模失效),可以追溯到从 20 世纪 70 年代,Chung^[15,17,18,98]是最早研究此类失效相关性的学者代表,Ching^[99]运用应力—强度干涉理论和共载模型发展了共因失效分析方法提出逆应力—强度干涉方法(Inverse Stress-Strength Interference, ISSI)。Ali^[100]对共因失效的研究方法和应用作了较全面的介绍。近些年,共因失效可靠性模型逐渐细化^[101-103],但应用范围却越来越广^[104-106]。目前,国内外对于共因失效型的相关性可靠性研究方法总结起来,共有五种。即贝塔因子法(Beta Factor Method, BF)^[107]、二维相关性失效率法(Binomial Failure Rate Model, BFR)^[108]、多维相关失效比例法(Multiple Dependent Failure Fraction Method, MDFF)^[109]、多种希腊字母法(Multiple Greek Letter Method, MGLM)^[110]和应力—强度共因干涉模型法(Stress-Strength Interference Model, SSI)。此外,国内学者谢里阳、王正、周金宇、李翠玲等人还在应力—强度共因干涉模型基础上,对载荷多次作用下的共因失效系统可靠性、多状态系统共因失效机理与定量分析及系统