

基于性能退化的 长寿命产品寿命预测技术

孙 权 冯 静 潘正强 著

 科学出版社

基于性能退化的长寿命 产品寿命预测技术

孙 权 冯 静 潘正强 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术是解决小子样、高可靠性与长寿命产品可靠性设计、分析、试验与评估等问题的关键技术之一。本书针对当前研究中的热点和难点问题,系统地介绍了性能退化基本理论、基于单参数性能退化建模的寿命预测方法、基于多参数性能退化建模的寿命预测方法、基于加速退化建模的寿命预测方法、加速退化试验优化设计方法和零失效寿命验证退化试验设计方法等。

本书可为航空、航天、高精尖装备领域从事产品可靠性设计、试验、分析和管理工作科技人员提供参考,也可作为相关专业的研究生教材。

图书在版编目(CIP)数据

基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术/孙权,冯静,潘正强著. —北京:科学出版社, 2015

ISBN 978-7-03-042326-9

I. ①基… II. ①孙… ②冯… ③潘… III. ①产品寿命-预测技术
IV. ①F273.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 251023 号

责任编辑:刘凤娟/责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴/封面设计:耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 1 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2015 年 1 月第一次印刷 印张: 11

字数: 210 000

定价: 66.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

序 言

基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术是解决小子样、高可靠性与长寿命产品可靠性设计、分析、试验与评估等问题的关键技术之一，是当前可靠性领域的研究重点和热点。传统的可靠性分析技术的分析对象是寿命数据，但由于科技的不断进步，设计、制造技术以及使用材料的不断提高与改善，产品的可靠性越来越高，寿命越来越长，在相对短期内无法获取足够的失效数据，因此很难利用传统的寿命预测理论对产品进行寿命预测。这是因为传统的寿命试验仅记录失效和试验时间，在建模分析过程中并没有考虑产品性能退化过程中所包含的信息，而产品性能退化过程中包含着大量可信、精确而又有用的与产品寿命有关的关键信息，是寿命预测的一个丰富的信息源，所以从产品性能参数的变化着手，通过对表征产品功能的某些量进行连续测量，取得退化数据，利用退化数据对产品功能的退化过程进行分析，就可以对产品寿命进行预测。本书是作者所在的国防科学技术大学长寿命产品寿命预测技术研究团队十余年来在长寿命产品预测方面研究和实践的总结。

本书的完成得到国家自然科学基金项目的资助，包括基于失效物理的长寿命产品寿命预测理论(60701006)、长贮产品贮存寿命小子样预测理论研究(60804054)、含外界应力冲击的多参数退化型产品寿命预测方法(61304221)、基于退化协变量的非连续工作产品寿命预测方法(61273041)、基于性能退化数据的零失效可靠性验证方法(71271212)。

在本书完成过程中，我们先后得到了中国工程物理研究院八所，中国科学院武汉物理与数学研究所，空军装备研究院防空所，海军装备研究院舰船所，中国空间技术研究院 501 部、502 所，中国航天技术研究院 509 所、811 所、803 所、805 所，中国电子科技集团公司第九研究所等单位的大力支持，他们为我们提供了高储能金属化膜电容器、铷原子钟、弹载电子设备、舰艇发动机、舰艇特种设备、星载陀螺仪、卫星镉镍电池、卫星氢镍电池、星用动量轮、空间驱动机构、星用永磁器件等产品的应用背景、试验数据和研究经费，从而为长寿命产品寿命预测研究提供了坚实的工程实践基础。在此对支持我们研究团队开展寿命预测工程实践研究的郑万国、梅刚华、文华、范浩、王岩磊、刘隆波、宫颖、程卓、信太林、宗益燕、吴东、王虎平、唐宏亮、苗军、张明、张芦、谭福明等同志表示由衷的感谢。

本书内容除了来源于作者公开发表的论文外，还来源于作者研究团队中研究生

赵建印、彭宝华、刘强、黎明、汤衍真、程龙、张哲伟、黄广东等的学位论文，在此作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限，本书的选材和文字难免存在不妥和疏漏之处，敬请读者不吝批评指正。

作 者

2014 年 6 月 20 日

目 录

序言

第 1 章	概论	1
1.1	问题提出	1
1.2	国内外研究现状	2
1.2.1	性能退化建模研究现状	2
1.2.2	退化试验设计研究现状	7
1.2.3	零失效寿命验证试验方法研究现状	9
1.3	关键技术	11
1.4	本书的主要内容	12
第 2 章	性能退化基本理论	13
2.1	退化失效模式	13
2.2	退化数据	15
2.3	退化失效分析通用模型	16
2.3.1	退化量的统计模型	16
2.3.2	退化失效的寿命变量	17
2.3.3	退化失效模型	18
2.4	失效机理分析	19
2.4.1	失效机理分析的基本概念	19
2.4.2	失效机理分析程序	22
2.4.3	失效机理分析方法	24
2.5	关键性能参数选取及其分类	24
2.5.1	关键特征性能参数选取原则	25
2.5.2	关键性能参数分类方法	25
2.6	寿命分布建模与分析	28
2.6.1	$F(t)$ 的解析解	28
2.6.2	$F(t)$ 的数值积分解	29
2.6.3	$F(t)$ 的蒙特卡罗解	30
2.6.4	$F(t)$ 的 Bootstrap 置信区间	30
2.6.5	伪寿命数据方法	31
第 3 章	基于单参数性能退化建模的寿命预测方法	33
3.1	失效物理建模	33

3.1.1	累积损伤模型	33
3.1.2	反应论模型	36
3.1.3	基于退化率模型	37
3.2	退化分布建模	37
3.2.1	正态型退化分布模型	38
3.2.2	Weibull 型退化分布模型	39
3.2.3	建模分析步骤	40
3.2.4	案例分析	40
3.3	广义退化建模	42
3.3.1	线性退化模型	44
3.3.2	指数退化模型	45
3.3.3	案例分析	46
3.4	随机过程退化建模	48
3.4.1	基于 Wiener 过程的性能退化模型	48
3.4.2	基于 Gamma 过程的性能退化模型	51
3.4.3	基于复合 Poisson 过程的性能退化模型	53
3.5	Gauss-Poisson 模型	54
3.6	含变点退化建模	58
3.6.1	含变点的退化失效物理分析	58
3.6.2	形式化模型建立	60
3.6.3	含变点的 Wiener 过程退化模型	64
第 4 章	基于多参数性能退化建模的寿命预测方法	71
4.1	多元退化分布建模	71
4.1.1	基于多元正态分布的多参数退化模型	71
4.1.2	基于多元 Weibull 分布的多参数退化模型	72
4.2	多元随机过程退化建模	73
4.2.1	基于多元 Wiener 过程的多参数退化模型	73
4.2.2	基于多元 Gamma 过程的多参数退化模型	75
4.2.3	案例分析	78
4.3	基于 Copula 函数的多参数建模	79
4.3.1	Copula 函数	80
4.3.2	基于 Copula 函数的多参数建模	81
第 5 章	基于加速退化建模的寿命预测方法	84
5.1	加速退化试验	84
5.2	加速模型	86
5.2.1	单应力加速模型	86
5.2.2	多应力加速模型	88

5.3 单参数加速退化建模	89
5.3.1 基于正态型退化分布的加速退化建模	89
5.3.2 基于 Weibull 型退化分布的加速退化建模	90
5.3.3 基于 Wiener 过程的加速退化建模	91
5.3.4 基于 Gamma 过程的加速退化建模	92
5.4 双参数加速退化建模	93
5.4.1 基于二元正态分布的加速退化建模	93
5.4.2 基于二元 Weibull 分布的加速退化建模	95
5.4.3 基于二元 Wiener 过程的加速退化建模	96
5.4.4 基于二元 Gamma 过程的加速退化建模	97
第 6 章 加速退化试验优化设计方法	99
6.1 试验方案优化的关键要素	99
6.2 加速退化试验优化设计方法	102
6.2.1 优化模型	102
6.2.2 单参数情形渐近方差的计算	103
6.2.3 双参数情形渐近方差的计算	110
6.2.4 模型求解算法	125
第 7 章 零失效寿命验证退化试验设计方法	127
7.1 零失效寿命验证风险建模方法	128
7.2 零失效寿命验证试验优化设计方法	129
7.3 加速模型外推风险研究	132
7.3.1 测量不确定度及其评定方法	132
7.3.2 加速模型外推风险描述	134
第 8 章 退化试验优化设计案例	136
8.1 某碳膜电阻器单参数步进应力加速退化试验优化设计	136
8.2 某位标器双参数步进应力加速退化试验优化设计	139
8.2.1 基于可靠寿命渐近方差最小的试验方案优化设计	140
8.2.2 基于试验费用最低的试验方案优化设计	142
8.2.3 约束条件对试验方案的影响分析	145
8.3 某导弹自毁装置零失效可靠性验证试验设计	148
8.3.1 使用方风险的表示	148
8.3.2 试验参数设计	149
8.3.3 优化模型	150
8.3.4 试验结果分析	150
参考文献	152
附录 《长寿命产品寿命分析软件》介绍	158
索引	165

第 1 章 概 论

基于性能退化的长寿命产品寿命预测技术是相对于大样本情形下经典寿命预测技术而言的新技术，它从产品性能参数的变化着手，通过对表征产品功能的某些量进行连续测量，取得退化数据，利用退化数据对产品功能的退化过程进行分析，结合失效物理分析来判断产品寿命特征参数，然后建立特征性能参数的退化模型，给出模型参数估计值，在此基础上，通过设定失效阈值标准和建立产品寿命分布模型，实现对产品寿命的预测。本书针对传统寿命预测方法与实际工程应用不相适应的问题，对基于性能退化数据的寿命预测技术展开研究，解决高可靠性、长寿命产品的寿命预测及其应用问题。

对于性能退化型长寿命产品，一般情况下，随着使用时间的增加，表征产品特性的性能特征参数将出现退化的情况。性能退化现象是自然而又大量存在的，如电子元器件的特性退化，金属材料的蠕变、裂纹初始化及其传播、磨损、腐蚀、氧化，绝缘体和隔热体的老化等。当产品的某些性能特征参数不断退化并超过其失效阈值时，产品就会失效，很多失效机理也可以在退化过程中跟踪。如果某些长寿命产品在正常应力条件下退化速度较慢，以至于在合理的时间内很难做出有用的推断，可以利用提高应力的方法加速性能参数的退化过程，从而在较短的时间内得到可用的退化信息。因此，可以从性能退化的角度去研究产品的寿命预测问题。

1.1 问 题 提 出

长寿命产品寿命预测问题是产品研制过程面临的瓶颈问题之一。现有的寿命预测理论是以失效时间作为统计分析对象的，其做法是通过大量试验得到产品的失效数据，然后使用统计判断准则，选择最合适的统计分布模型(主要是指指数、正态、韦布尔(Weibull)、对数正态等传统寿命分布)，最后通过产品寿命分布模型来预测产品的寿命。对于长寿命产品，则常采用加速寿命试验建立产品寿命与应力之间关系的模型(加速方程)，然后使用外推方法预测产品在正常应力下的寿命。这种方法比较适合于技术复杂性低和大批量生产的标准型产品，对于现代工业生产条件下的高技术复杂结构和小批量生产的订制型产品，现有的寿命预测方法在工程实践中遇到很多问题，表现在：

(1) 小子样问题。现代工业生产具有“多品种、小批量、快速生产”的特点,产品受到研制经费和时间的限制,在只能允许少量寿命试验样本的情形下,获得的失效数据甚少,导致依赖于大样本寿命数据的传统寿命预测理论的可信度受到质疑。

(2) 长寿命问题。对于长寿命产品,在有限的时间内,即使通过加速寿命试验也难以获得足够的失效数据,甚至没有失效数据,无法建立有效的(传统可靠性)寿命分布模型。

(3) 相关性问题。现代产品性能和工作环境复杂多变,建立在独立性假设基础上的传统系统可靠性(逻辑)模型,无法刻划多种因素及其复杂相关性对产品可靠性的影响;用简单的加速因子或环境因子难以描述工作环境等因素对产品可靠性的影响,导致可靠性预计值与实际情况相差较大。

(4) 失效分析问题。产品失效分为两类,即性能退化失效与偶发失效,据统计,性能退化失效在产品失效中占 70%~80%,传统可靠性侧重研究偶发失效,有些舍本逐末。

为了解决在长寿命产品寿命预测中遇到的上述问题,急需发展一种更为有效的寿命预测理论。基于性能退化的长寿命产品寿命预测理论,是从失效物理分析出发,通过分析产品失效的相关性和退化失效规律,设计与性能相关的加速退化试验,并结合产品研制过程中的性能测试和性能试验,获取充分的、与寿命相关的性能信息,然后对产品寿命进行预测,从而开辟一条使用性能数据对产品寿命进行预测的新途径,解决长寿命产品寿命预测的问题。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 性能退化建模研究现状

在航空、航天、电子等重要领域,存在大量的高可靠、长寿命产品,并发挥着非常重要的作用。对于这些产品,几乎无法通过寿命试验或加速寿命试验取得足够的失效寿命数据,甚至还会出现“零失效”现象,因此,传统的寿命预测理论势必带来“可信度危机”。但是,绝大多数这类产品都具有自己的性能特征,在工作或储存过程中,这些性能特征会随着时间的延长而逐渐衰退,直至无法正常工作。这些退化数据提供了丰富的寿命信息,如果能有效地加以利用,可弥补长寿命产品寿命预测信息量不足的问题。近年来,通过产品的性能退化数据进行可靠性分析,在理论研究和工程应用上都取得了成功。基于性能退化数据的可靠性建模方法是对传统寿命预测方法的有效补充,是解决小子样、高可靠性与长寿命产品寿命预测问题的重要手段,已成为现代可靠性工程的一个新的研究方向。

1. 单参数退化失效产品可靠性建模

目前基于性能退化的可靠性建模与分析的多数研究中,产品的关键性能参数仅有一个,其失效模式是一元退化失效。针对一元退化失效产品,目前已经根据不同的退化机理建立了多种退化过程模型^[1],如随机变量模型、退化分布模型、累积损伤模型、随机过程模型等,在这些模型的基础上发展了基于退化数据的单参数退化失效产品可靠性建模方法。

随机变量模型是基于性能退化的可靠性建模中最早使用的一种模型,其中,产品的性能是时间的确定性函数

$$X(t) = g(t; \theta), \quad (1.2.1)$$

其中, $g(\cdot)$ 是确定性函数,其形式通常由经验得到; θ 是有限维随机向量,用于描述一批产品中个体之间的差异。常见的随机变量模型包括 Paris 模型^[2,3], 幂律模型^[4], 反应论模型^[5-7], 随机斜率/截距模型^[8-16]等。Meeker 和 Escobar^[2]采用 Paris 模型对某金属的疲劳裂缝增长数据进行了建模,得到了金属的寿命分布; Chan 等^[4]采用幂律模型来描述薄膜电阻的退化机理,对其进行了可靠性建模; Meeker 和 LuValle^[6]采用反应论模型对绝缘材料中细导纤维(conductive filament)增长进行建模,研究了印刷电路板的可靠性模型; Carey 和 Koenig^[7]利用反应论模型描述海底电缆组件的退化过程,采用加速退化数据进行建模。Gertsbackh 和 Kordonskiy^[8]最早对随机斜率和截距模型进行了研究,假设斜率和截距均为正态分布且相互独立,推导出产品寿命的 Bernstein 分布; Tseng 等^[10]采用随机斜率/截距模型研究了荧光灯管亮度的退化, Lu 和 Meeker^[9]采用其描述金属裂纹的增长, 冯静^[13]采用其描述运载火箭发动机性能的退化过程; Hamada^[14]采用随机斜率模型描述激光亮度的退化过程, Oliveira 和 Colosimo^[12]同样采用随机斜率模型描述了汽车轮胎的磨损过程, Freitas 等^[15]采用该模型描述火车车轮直径的退化, Gebraeel 等^[16]采用其描述刹车片厚度的退化。Gopikrishnan^[11]将上面的线性形式推广到非线性情形,针对上面的模型研究了随机斜率、随机截距以及随机斜率/截距三种情况下的建模方法。

累积损伤模型^[13,17]中,性能退化过程被认为是冲击和微小损伤的累积导致的,因而也称为冲击模型。时刻 t 的产品性能退化量 $X(t)$ 可以表示为

$$X(t) = \sum_{i=1}^{N(t)} D_i, \quad (1.2.2)$$

其中, D_i 是第 i 次冲击所造成的退化量; $N(t)$ 是时间 t 内的冲击次数。针对不同的退化机理可以对 D_i 和 $N(t)$ 的形式进行不同的假设,产品的性能退化过程及寿命分布也不同。冯静^[13]在研究金属化膜脉冲电容器的退化失效过程时,考虑 $N(t)$ 为齐次泊松过程, D_i 为正态分布,给出了基于退化数据的参数矩估计方法,得到了电容器的寿命分布; Zhao 和 Liu^[18]同样针对金属化膜脉冲电容器,考虑 $N(t)$ 为非齐次泊松过程,

给出了基于退化数据的可靠性评估; Bocchetti 等^[19]考虑 D_i 为常数, $N(t)$ 为非齐次泊松过程, 对船用柴油机的退化过程进行了建模; Hsieh 等^[20]针对 $N(t)$ 为非齐次泊松过程, D_i 为一般分布的情形进行了研究, 给出了参数估计的极大似然方法; Sun 等^[17]对金属化膜脉冲电容器的退化过程进行研究时, 考虑容值退化量由两部分构成, 一部分由式(1.2.2)给出, 其中, $N(t)$ 为齐次泊松过程, D_i 为常数, 另一部分是正态分布的随机变量, 建立了电容器退化的 Gaussian-Poisson 联合分布模型。

退化分布模型^[21-23]考虑了退化过程本身的随机性, 直接给出产品性能在任意时刻 t 的概率分布

$$X(t) \sim f(\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)), \quad (1.2.3)$$

其中, $f(\cdot)$ 是某一概率分布; $\theta_1(t), \dots, \theta_n(t)$ 是其分布参数且均是时间 t 的函数, 用来反映性能 $X(t)$ 的矩随时间的变化。Yang 和 Xue^[21,22]假设其参数是均值和方差, 研究了退化失效可靠性建模; Zuo 等^[23]针对 $f(\cdot)$ 是一般概率分布的情形进行了研究, 给出了参数估计的回归方法。

产品因投入使用而产生性能退化, 外因是存在能量的作用, 内因是材料性能和状态发生了不可逆转的变化。产品发生失效的可能性与其性能参数逼近极限状态有关, 而产品性能参数逼近其极限状态, 通常是一个演变过程。由于产品工作环境、应力、内部材料特性等诸多随机因素的影响, 该演变过程一般是一个随机过程。因此, 随机过程模型是描述产品性能退化的有力工具, 最常用的随机过程有 Wiener 过程和 Gamma 过程。

由于 Wiener 过程模型能够描述多种典型产品的性能退化过程, 并且具有良好的计算分析性质, 因而成为目前基于性能退化的可靠性建模与分析中最基本、应用最广的模型之一。虽然一元 Wiener 过程的首达时分布为逆高斯分布这一结论在随机过程领域中早已推导得到, Chhikara 和 Folks^[24,25]首次提出将逆高斯分布作为寿命分布, 讨论了相关性质和参数估计方法, 但其并非特别针对性能退化产品。Doksum 和 Hoyland^[26]首次将 Wiener 过程应用于工程领域, 研究了 Wiener 过程退化产品的可变应力加速寿命试验模型。

基于 Wiener 过程的性能退化过程建模方法, 目前的研究主要考虑产品的退化过程为线性的情形; 针对非线性退化的情形, Whitmore^[27]、Wang 和 Nair^[28]通过对时间单位进行变换, 使得变换后的退化模型为带线性漂移的 Wiener 过程, 其中, Whitmore^[27]主要考虑参数形式的变换, Wang 和 Nair^[28]则考虑非参数变换。针对产品的性能退化量非负的情形, Park 和 Padgett^[30]考虑退化过程为几何布朗运动, 对退化量取对数后转换为 Wiener 过程进行处理。Wiener 过程的参数估计方面, 主要基于产品的退化数据, 利用 Wiener 过程的独立增量性质进行参数估计; Pettit 等^[31]

和彭宝华等^[32]则考虑了 Bayes 方法; Tang 和 Su^[33]通过人为定义多个伪失效阈值,得到了中间数据,研究了基于中间数据的参数估计方法;此外,Whitmore^[27]针对性能退化测量存在测量误差的情形研究了其参数估计方法。应用方面, Park 和 Padgett^[30,34]对碳膜电阻的阻值以及某种合成材料的强度取对数后,采用 Wiener 过程对其退化过程进行建模; Whitmore^[27, 29]对时间尺度进行变换后,采用 Wiener 过程对晶体管增益的退化进行建模; Wang 和 Nair^[28]采用类似思想对金属裂纹的增长进行建模; Nicolai 等^[35]采用 Wiener 过程等模型对钢铁结构表面锈迹的扩散过程进行建模; Tseng 和 Tang 等^[36]对发光二极管等的亮度进行变换后,采用 Wiener 过程进行建模; 赵建印等^[37]采用 Wiener 过程等模型对金属化膜脉冲电容器的容值退化过程进行建模。

Gamma 过程模型^[1,38]也是基于性能退化的可靠性建模中一种常用的模型。Noortwijk^[39]对 Gamma 过程在可靠性、维修性研究中的应用情况进行了综述; Yuan^[1]将 Gamma 过程应用于核电站元件的退化过程建模中; Lawless 和 Crowder^[38]考虑带协变量情形的 Gamma 过程,将其应用于金属裂纹增长的建模中; Park 和 Padgett^[38]考虑加速应力的情形,对碳膜电阻退化过程和金属裂纹增长过程进行了研究。

综上所述,单参数退化建模问题已得到了非常广泛地研究和应用,各类模型有其自身的优点和不足,具体分析如下:

(1) 对于随机变量模型,如果产品的失效阈值 D_f 已知,则容易得到产品的寿命为 $T = g^{-1}(D_f; \theta)$,从而可以由 θ 的分布得到产品寿命的分布。而随机向量 θ 的分布通常由产品的性能退化数据,采用回归方法得到。随机变量模型的优点在于其模型和统计分析方法都较为简单,其不足之处是,对于某一具体产品,其退化过程是确定性过程,没有考虑到产品随退化过程本身的随机性^[1,40]。

(2) 累积损伤模型较为灵活,可以描述多种退化过程,并能较好地反映产品的性能退化过程,然而由式(1.2.3)得到的产品寿命分布形式一般较为复杂,为退化试验优化设计的研究带来一定的困难。

(3) 退化分布模型考虑了退化过程本身的随机性,并利用分布函数进行描述,当退化分布确定后,产品的寿命分布形式很容易确定。同时,该模型还考虑退化分布参数随时间的变化,具有很好的灵活性,但是退化分布模型对产品的样本数量有一定的要求。

(4) 随机过程模型充分考虑产品个体差异及产品状态随时间的变化过程,能够较好地刻画产品的性能退化过程。常用的 Wiener 过程和 Gamma 过程模型对应的产品寿命分布得到了较为充分地研究,因此,利用该模型进一步开展产品的退化试验设计等具备了很好的条件。

2. 多参数退化失效产品可靠性建模

许多产品涉及多个关键性能参数,并且这些性能参数都可能随产品的运行而发生退化,当其中某一性能参数到达其相应阈值时产品即失效。记时刻 t 产品的 K 个性能参数的退化量为 $\mathbf{X}(t) = (X_1(t), \dots, X_K(t))$,对应的失效阈值为 $\mathbf{D}_f = (D_{f1}, \dots, D_{fK})$,产品的可靠度为

$$R(t) = P\{\mathbf{X}(s) < \mathbf{D}_f, 0 \leq s \leq t\}. \quad (1.2.4)$$

Crk^[41,42]和 Huang 等^[43]针对各性能参数退化过程之间相互独立的情形进行研究,针对这一情形,式(1.2.4)可以写为

$$\begin{aligned} R(t) &= P\{\mathbf{X}(s) < \mathbf{D}_f, 0 \leq s \leq t\} \\ &= P\{X_1(s) < D_{f1}, 0 \leq s \leq t\} \cdots P\{X_K(s) < D_{fK}, 0 \leq s \leq t\} \\ &= R_1(t) \cdots R_K(t), \end{aligned} \quad (1.2.5)$$

即此时产品的可靠性模型可以看为可靠性串联模型,其建模过程可以首先针对每一性能参数的退化过程单独建模,然后由可靠性串联模型得到产品的可靠性模型。

对于性能参数的退化过程之间相关的情形, Lu 等^[44-46]研究了多性能参数产品的实时可靠性预计问题,给出可靠度的一般形式

$$R(t) = \int \cdots \int_{\Omega} f_t(x_1, \dots, x_K) dx_1 \cdots dx_K, \quad (1.2.6)$$

其中, Ω 是产品可靠时各性能参数运行的范围。其研究中采用多元时间序列方法对产品的性能退化过程进行建模,给出了时刻 t 各性能参数联合密度 $f_t(x_1, \dots, x_K)$ 的递推公式,进而对产品进行实时可靠性预计。Wang 等^[47]针对单调退化产品给出了类似的形式,并给出了 $\mathbf{X}(t)$ 服从多元高斯过程情形时联合密度函数的一般估计方法。然而在实际应用中,要得到密度函数任意时刻 t 的联合密度函数一般较为困难,为此 Sari 等^[48,49]和 Zhou 等^[50]采用 Copula 函数进行构造。其研究中,首先分别建立各性能参数的退化过程模型,然后用 Copula 函数描述各性能参数退化过程之间的相关性,进而计算式(1.2.6)。Sari 等^[48,49]采用该方法研究发光二极管等的可靠性模型,并将其应用于加速退化试验设计中; Zhou 等^[50]采用一元 Gamma 过程对各性能参数的退化过程进行建模,研究了两个性能参数产品的可靠性建模问题。此外, Xu 等^[51]从另一个角度研究了多性能参数退化失效产品的可靠性建模问题。其研究将产品的性能参数看成产品失效的协变量,采用 Logistic 方程描述性能参数与产品失效之间的关系,给出了产品的实时可靠性预计。Pan 等提出了基于 Wiener 过程和 Copula 函数的二元退化建模方法^[52],并将该模型推广到恒定应力加速的情形^[53];在两个性能参数相关的情形下,提出了基于 Gamma 过程的二元退化模型,并利用二维 Birnbaum-Saunders 分布及其边际分布建立产品的寿命模型^[54];在此基础上,进一

步研究了基于该模型的步进应力加速退化试验优化设计问题^[55]。Son 等^[56]考虑了由元器件的性能退化导致的系统退化失效问题。针对这种情况, Son 等主要研究了如何由元器件的性能退化模型与系统的结构计算系统的可靠度,给出了一种近似解析方法和一种仿真方法。

综上所述,目前的多参数退化建模研究工作主要针对多个参数退化规律一致的情形开展。由于参数之间相关性描述的困难,当前大部分工作都是基于正态性假设,用多维正态分布对多个退化参数进行建模。事实上,许多产品的多个性能参数的退化规律并不一致,简单的正态性假设也不合理,使得现有的模型难以直接应用。本书将在多元退化分布建模、随机过程退化建模、多个参数退化规律不一致时的性能退化建模等方面开展研究工作,为解决产品多性能参数退化建模问题提供解决思路。

1.2.2 退化试验设计研究现状

性能退化试验是近年来为研究高可靠性、长寿命产品的可靠性而发展起来的一种新的可靠性试验。在这类试验中,产品的物理特性参数在运行过程中表现出一定的退化规律,如疲劳、腐蚀或氧化等。对于高可靠大型复杂机械装置,在相对较短的试验时间内,甚至在加速应力的情况下,几乎得不到失效数据,因此,试图通过传统的寿命试验方法确定其寿命分布是非常困难的。克服这一困难的一种可能途径是借助于退化试验,即通过退化试验测得产品在运行过程中的退化信息,由此来推断产品的寿命分布函数。目前一些学者对退化试验的截止准则、退化试验优化设计方法,以及如何利用退化试验设计实现可靠性增长、提高产品稳健性等方面进行研究。

对于许多高可靠、长寿命产品,在额定工作应力下进行退化试验,需要大量的时间和费用,并且难以观测到退化值,加速退化试验就是在这样的背景下发展起来的。加速退化试验的目的是找出产品性能退化如何发生、何时发生,在保持失效机理不变的条件下,将样品置于比通常条件严酷的环境条件或工作应力下进行加速样品性能退化的试验,以确定系统、子系统、元器件、材料的退化轨迹,从而通过外推的方法得到产品在设计或使用条件下的失效寿命或可靠性。试验是否具有加速性是进行加速退化试验的关键所在,为保证加速退化试验正常进行,需做出以下假定:①在各加速应力水平下,产品的失效机理保持不变;②存在有规律的加速过程;③在各加速应力水平下,产品的退化过程服从同族随机过程,即应力水平变化时,产品退化随机过程保持不变,改变的只是过程参数。为确保所实施的加速退化试验符合以上假定,往往需要进行一定时期的摸底试验。

按照加速退化试验中应力加速方式不同,可以分为恒定应力加速退化试验、步进应力加速退化试验和序进应力加速退化试验。其中,恒定应力加速退化试验和步

进应力加速退化试验是当前的研究重点,而序进应力加速退化试验由于试验应力难以控制,在实际工程中应用较少,相应的研究工作也较少。

1. 恒定应力加速退化试验

在恒定应力加速退化试验研究方面, Boulanger 和 Escobar^[59]假设产品的最大退化量是应力的函数,产品的退化量逐渐接近最大退化量,提出了加速退化试验设计方法——两步分析法,该方案首先确定应力水平的选择以及各应力水平下试验样品的比例分配,然后在给定应力水平下,优化各试验样品退化量的检测时间。但是他们的研究是在一个试验的截尾时间,在试验前并不知道的条件下去进行的,因而不切实际。Park 和 Yum^[60]在破坏性试验的假设下,通过最小化额定工作应力下产品平均寿命的渐近方差,对应力水平数、各应力水平下的产品分配及测量时间等进行了优化设计。Yu 和 Tseng^[61]提出了直观法来确定加速退化试验的最佳终止时间,解决了加速退化试验要进行多长时间才能获得足够多的数据以推断使用条件下产品的寿命这个实际问题,并将该方法应用到发光二极管的试验中。Li^[62, 63]研究了加速退化试验的优化方法,其基本思想是通过最小化额定工作条件下产品平均寿命的均方误差来确定试验中的应力水平及试验样品的分配。Yang 等^[64]研究了利用变动失效阈值进行加速退化试验设计的方法。首先通过改变失效阈值获取更多的寿命信息,建立寿命与失效阈值及应力之间的关系,用于评估额定工作条件和失效阈值下寿命分布。以额定工作条件和失效阈值下寿命的渐近方差为优化目标,选择变动的失效阈值、应力水平及各应力水平下的样品分配数。Belie 等^[65]介绍了一种用于混凝土加速退化试验的装置,并详细介绍了试验过程、数据测量方法以及数据处理方法。Thomas 等^[66]提出了一套加速试验方案。主要包括三个阶段,首先通过设计筛选试验,辨识加速因子,然后设计初步老化试验,应用试验数据分析产品寿命,如果分析结果满足精度要求,则停止,否则设计第二步老化试验,以改进产品寿命评估精度。此外,他们还讨论了加速试验数据的建模和分析方法,并以锂离子电池为例,进行了详细地分析研究。Polavarapu 等^[68, 69]根据 MTTF 最小的原则,利用逆 Weibull 退化数据设计加速退化试验方案。在试验费用的约束下,转换为一个非线性整数规划的求解问题,求解得到各应力水平下样本数、观测频率及观测时间,并将该试验方案运用到发光二极管的加速试验设计中,最后对模型参数的敏感性和鲁棒性进行了分析。Yu^[67, 70]以产品寿命 p 分位点估计的均方差为优化目标,在试验总费用的约束下,确定各应力水平下的试验产品数、退化量测试次数、退化量测试时间间隔等。

国内的关于这方面的研究工作大多集中在材料方面。黄宝臣^[72]详细地介绍了全紫外线加速老化试验方法及其应用,并附带介绍了采用这一试验方法所获得的初步数据与结果。吕伟利和王长华^[73]给出了用人工加速老化试验的组织、实施方法,又以大量使用的非金属材料为例,给出了试验数据的存贮可靠性计算方法。孙贵之等^[74]

通过对防潮领域的新型材料 PAP-D 铝塑复合材料在湿热条件下的加速老化试验, 评估材料在正常条件下的寿命及应用前景。张凯等^[75]综述橡胶材料加速老化试验及其寿命预测的各种方法, 探讨了它们的特点和失真问题, 并提出了相关的处理方法。胡文军等^[76]介绍了橡胶的热氧加速老化试验和寿命预测方法。刘秀生等^[77]通过紫外加速老化试验, 测定了漆膜的光泽、色差, 并掌握了它们的变化规律。乔海霞等^[78]概述了聚合物基复合材料加速老化研究方法的进展, 从试验方法、老化机理等方面着重介绍了湿热老化、腐蚀侵蚀和人工气候老化, 总结了高置信度、高可靠度评估复合材料工作寿命的方法, 并展望了复合材料加速老化的研究方法。肖鑫等^[79]简要概述了橡胶材料在承载及非承载状态下, 加速老化试验方法及其测试手段的新进展; 总结了橡胶材料寿命评估模型在计算机仿真、动力学等领域的新进展。其他方面研究工作还有, 徐先芝和招誉颐^[71]对当时氧化锌避雷器的加速老化试验方法及存在的问题作了比较详细地探讨, 对加速老化试验提出了改进建议。冯志刚等^[80]分析了美国和俄罗斯等发达国家关于导弹加速老化试验的研究情况及其试验思路, 总结了国外先进经验, 并在此基础上提出导弹贮存试验的一些构想。王亚顺^[81]在他的博士论文中, 详细讨论了基于逆 Weibull 模型的仿真基加速退化试验设计优化方法, 并通过算例与基于解析的加速退化试验方案优化方法进行对比, 验证了其有效性。

2. 步进应力加速退化试验

在步进应力加速退化试验研究方面, Park 和 Yum^[82]在破坏性试验假设下, 讨论了步进应力加速退化试验的最优设计问题, 并与恒定应力加速退化试验设计进行了对比分析。Tang 等^[83]根据试验费用最小原则, 设计了两应力步进退化试验, 给出了样本数量选择、低应力下测试点选择、整个试验过程测量总数的确定原则, 并使用以产品退化过程为基础的随机模型, 利用退化轨迹数据, 推导得出了极大似然估计和使用条件下的中值寿命及其渐近偏差。Liao 和 Tseng^[84]假设产品的退化过程为 Wiener 过程, 在试验总费用的约束下, 通过最小化产品寿命分布 p 分位点的渐近方差, 确定 K 步步进应力加速退化试验中各应力水平下的试验产品数、退化量测试次数、退化量测试时间间隔等。书中还介绍了优化问题的求解算法, 对模型参数进行了敏感性分析。Tseng 等^[85]讨论了基于 Gamma 过程的步进应力加速退化试验设计问题, 给出了最优试验方案, 并对方案的灵敏性和稳定性进行了分析。

1.2.3 零失效寿命验证试验方法研究现状

可靠性验证试验作为可靠性工程的重要组成部分, 是用来验证产品当前或未来一段时间内的可靠性特征值是否符合规定的过程。传统的可靠性指标验证试验包括可靠性鉴定试验和可靠性验收试验, 它是一种基于统计学原理的试验方法, 因此也被称为可靠性统计试验^[86]。从确定产品可靠性是否符合合同要求和了解产品研制过