

Residual Life Estimation
for Nonlinear-Deteriorate Products

非线性退化情形下 的产品剩余寿命预测

王小林 蒋平 邢云燕 郭波 著

Residual Life Estimation
for Nonlinear-Deteriorate Products



国防工业出版社
National Defense Industry Press

非线性退化情形下的 产品剩余寿命预测

Residual Life Estimation for
Nonlinear – Deterioriate Products

王小林 蒋平 邢云燕 郭波 著

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

围绕着产品使用过程中的保障需求以及理论需要,本书以非线性 Wiener 退化过程为研究对象,按照从一维到多维退化的情形,在退化建模和产品剩余寿命预测方面进行了深入的研究。所建的退化模型考虑了产品之间的差异性、退化的非线性、退化在时间轴上的不确定性等。针对多维的情形,退化模型还考虑了性能指标退化的相关性。相应的成果能够指导解决实际工程中存在的问题,同时有助于促进退化建模以及产品剩余寿命预测理论的发展。

本书可供装备使用单位、科研机构的工程技术和管理人员阅读参考,也可作为院校和科研机构相关研究或教学培训的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

非线性退化情形下的产品剩余寿命预测/王小林等著.

—北京:国防工业出版社,2015.9

ISBN 978-7-118-10369-4

I. ①非... II. ①王... 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(2015)第 205244 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)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 11 $\frac{3}{4}$ 字数 208 千字

2015 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 40.00 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

在工业、国防、航空、运输等领域,产品在使用过程中的失效或者故障可能会导致严重事故的发生,如人员伤亡、环境污染以及经济损失等。为此,从可靠性管理的角度考虑,常常需要回答这样一个问题:产品在当前时刻未失效的情况下,还能继续运行多长时间。对这个问题的回答影响着:①产品的全寿命周期费用;②产品的使用效率;③维修保障措施决策的合理性等。其实,对以上问题的回答也就是要预测产品的剩余寿命,即产品从当前时刻到故障发生之间的时间间隔。在实际应用中,由于不合理的预测结果,如过于悲观或者过于乐观,滋生了很多负面影响,如维修不足、维修过剩、备件“供不应求”或“供过于求”等。因此,从实际应用的需求考虑,如何有效地预测产品投入使用后的剩余寿命是一个迫切需要解决的问题。

传统的剩余寿命预测模型与方法是基于产品寿命数据的,而不是建立在故障预测的基础之上,因此不适合预测与健康管理技术的需求。主要体现在两个方面:①难以应用于无失效或者是小样本的情形;②预测结果往往表征的是产品总体特征,缺乏针对性,难以有效地指导对目标产品的维修决策。为解决这一问题,需要在预测健康管理技术框架下、在故障预测的基础上开展对目标产品剩余寿命的预测问题研究。为此,需要分析产品失效机理的演变过程,使得产品的故障可预测。幸运的是,很多失效模式都可以追溯到产品性能的退化,如裂纹的增长导致金属构件的失效,供油系统重量的减少导致卫星动量轮的失效,电容值的减少导致电容器的失效。因此,可以根据产品的退化性能数据,追踪产品性能的退化过程以及预测将来的行为,进一步预测产品的剩余寿命。虽然退化数据能够提供较多的可靠性信息,但退化建模质量的好坏对评估和预测结果的精度有着重要的影响,基于不同的模型有可能得到不同的结果。模型选择不当,还可能导致评估和预测结果存在较大的误差。例如,利用线性模型去描述非线性的退化过程,会产生不合理的评估或者是预测结果,进而导致做出错误的决策。因此,需要结合产品的实际退化过程,研究和选择合理的退化模型进行退化建模。以此需求为牵引,本书主要以非线性 Wiener 过程为研究对象,按照从一维到多

维退化的情形,围绕着退化建模与产品的剩余寿命预测等问题展开深入的研究。最后,指出了研究中还存在的问题。

本书以非线性 Wiener 过程为研究对象,对非线性退化情形下的产品剩余寿命预测问题进行了研究,有助于促进退化建模以及产品剩余寿命预测理论的发展。相应的研究成果可进一步拓展,如预测目标产品的剩余寿命、评估产品的可靠性、设计退化试验方案、制定维修方案、制定产品筛选试验方案等。希望本书的内容能够起到抛砖引玉的作用,广大工程技术人员能够在产品性能退化建模以及综合保障的研究和实践中取得更加丰硕的成果。

本书开展的研究和出版得到了国防科技大学科研计划项目(JC13-02-05)和国家自然科学基金面上项目(71371182)的资助。

由于编者水平有限,错漏之处在所难免,恳请读者批评指正。第一作者联系邮箱 wangxiaolin2013@sina.com。

目 录

第 1 章	绪论	1
1.1	产品剩余寿命预测	1
1.2	剩余寿命预测的相关研究	7
1.2.1	产品性能退化建模的研究	7
1.2.2	产品剩余寿命预测的研究	24
1.3	有待解决的问题及思路	33
1.3.1	有待解决的问题	33
1.3.2	解决问题的思路	35
1.4	本书的主要内容和结构安排	36
第 2 章	基于非线性 Wiener 过程的退化建模与产品剩余寿命预测	38
2.1	引言	38
2.2	非线性 Wiener 退化过程模型	39
2.3	产品失效分布的近似	41
2.4	产品剩余寿命的预测	45
2.4.1	退化模型的更新	45
2.4.2	剩余寿命预测	46
2.5	退化模型参数估计	48
2.5.1	θ_1 的估计	48
2.5.2	Q 的估计	50
2.6	算例分析	51
2.6.1	仿真算例	51
2.6.2	实例	53
2.7	退化模型的误用分析	62
2.7.1	基于极大似然估计性质的退化模型误用分析方法	63
2.7.2	退化模型误用的仿真分析方法	66
2.7.3	疲劳裂纹增长实例	66

2.8	本章小结	72
第3章	考虑测量误差的非线性 Wiener 过程退化建模与产品 剩余寿命预测	73
3.1	引言	73
3.2	考虑测量误差的非线性 Wiener 过程模型	74
3.3	产品剩余寿命的预测	75
3.3.1	退化模型的更新	75
3.3.2	剩余寿命预测	77
3.4	退化模型参数估计	79
3.4.1	Θ_1 的估计	79
3.4.2	Q 的估计	82
3.5	算例分析	83
3.5.1	仿真示例	83
3.5.2	裂纹增长算例	87
3.6	退化模型的拓展	91
3.7	本章小结	94
第4章	基于偏正态随机效应的非线性 Wiener 过程退化建模与 剩余寿命预测	95
4.1	引言	95
4.2	基于偏正态随机效应的非线性 Wiener 退化过程模型	96
4.3	失效分布的近似	99
4.4	目标产品剩余寿命的预测	102
4.4.1	退化模型的更新	102
4.4.2	剩余寿命预测	103
4.5	退化模型参数估计	105
4.6	算例分析	108
4.7	本章小结	113
第5章	基于二元非线性 Wiener 过程模型的退化建模与产品 剩余寿命预测	115
5.1	引言	115
5.2	模型假设与二元退化建模	116
5.2.1	模型假设	116

5.2.2	二元 Frank Copula 函数	118
5.2.3	二维退化建模	120
5.3	产品剩余寿命预测	122
5.3.1	退化模型的更新	122
5.3.2	单个性能指标的剩余寿命预测	124
5.3.3	产品的剩余寿命预测	125
5.4	退化模型参数估计	128
5.4.1	θ_1 的估计	128
5.4.2	θ_2 的估计	130
5.5	数值算例	131
5.5.1	模型检验	131
5.5.2	产品剩余寿命预测	131
5.6	本章小结	139
第 6 章	基于多元非线性 Wiener 过程模型的退化建模与产品 剩余寿命预测	141
6.1	引 言	141
6.2	模型假设与多元退化建模	142
6.2.1	模型假设	143
6.2.2	多元退化建模	144
6.2.3	需要研究的问题	145
6.3	目标产品剩余寿命预测	146
6.3.1	退化模型的更新	146
6.3.2	产品剩余寿命预测	148
6.4	退化模型参数的估计	153
6.5	数值算例	158
6.5.1	退化模型的检验	159
6.5.2	算例分析	160
6.6	本章小结	168
参考文献		170

第1章 绪 论

随着科学技术的发展,如传感器技术、材料制造技术、信息技术等,装备维修保障在理论以及实践方面都随之发生了巨大的变化。例如,维修模式已从被动的修复性维修(事后维修),历经计划性的维修模式,如定期维修,形成了目前正在蓬勃发展的主动式维修——视情维修。与其他两种维修模式相比,视情维修是建立在故障预测基础上的主动维修,使得维修保障措施针对性强、维修效果好。从视情维修的视角,以实际需求为牵引,产生了在工业、国防、航空等领域有着广泛应用前景的预测与健康管理技术(Prognostics and Health Management, PHM)。预测与健康管理技术是一种新型的装备综合保障技术,既提高装备安全性、战备完好性又能够降低维修保障费用。在预测与健康管理技术框架下,装备的视情维修、备件管理等维修保障活动都是建立在剩余寿命预测的基础之上。因此,对于目标产品来说,为了应用预测与健康管理技术,一个核心问题就是剩余寿命预测。

1.1 产品剩余寿命预测

在工业、国防、航空、运输等领域,产品在使用过程中的失效或者故障可能会导致严重事故发生,如人员伤亡、环境污染以及经济损失等。为此,从可靠性管理的角度考虑,常常需要回答这样一个问题:产品在当前时刻未失效的情况下,还能继续运行多长时间。对这个问题的回答影响着:①产品的全寿命周期费用;②产品的使用效率;③维修保障措施决策的合理性等。

其实,对以上问题的回答也就是要预测产品的剩余寿命,即产品从当前时刻到故障发生之间的时间间隔。考虑到剩余寿命的随机不确定性,剩余寿命预测通常涉及求其均值以及密度函数。在实际应用中,由于不合理的预测结果,如过于悲观或者过于乐观,滋生了很多负面影响。从维修决策的角度来讲,一方面,可能导致维修过剩,即对状态较好的产品,进行不必要的维修,降低了产品的有效利用率,同时造成人力、物力、财力相对浪费。据估计,在企业的维修成本中,大约有30%是由于低效率的维修方式造成的^[1];另一方面,可能由于维修不足,导致产品由于多种原因在检修期未到时产生局部故障,造成高昂的维修代价以

及严重的事故损失。例如,由于苯胺装置硝化单元的 P-102 塔发生堵塞而导致循环不畅,导致 2005 年吉林石化公司双苯厂发生的重大爆炸事故,造成巨大的经济损失和严重的社会影响^[2]。墨西哥湾深水油井的爆炸导致大量人员伤亡,同时还对环境造成了巨大的危害^[3]。从备件供应的角度来讲,不合理的预测结果可能造成“供不应求”或“供过于求”的现象,导致不必要的损失。一方面,“供过于求”会造成高昂的采购、库存成本,同时也会引发备件存储失效等问题;另一方面,“供不应求”会造成备件短缺,造成维修延误等后果。

除了已投入使用的产品需要关注剩余寿命预测问题外,长贮产品也需要关注类似的问题。导弹作为一种典型的长期贮存产品,在维护国家主权、领土安全、海洋安全、领空安全等方面都发挥着巨大的作用。为了适应不同的功能需求,各军事强国都列装了不同种类、不同型号的导弹,但它们都有着共同的特点,也就是“长期贮存、一次使用”。导弹的贮存剖面占据了其寿命剖面的大量时间,保证导弹在贮存期间有着较高的战备完好率是确保导弹在需要执行任务时发挥其应有功能的前提。为此,需要在导弹的贮存剖面内,结合导弹的健康状态进行故障预测,估计相关部件在贮存期内的剩余寿命,进而采取有效的维修保障措施。另外,结合实际需求,对相关型号的导弹往往还需要考虑延寿问题。其实,导弹延寿需要解决的主要问题也就是贮存寿命的预测问题。在这方面,美国、俄罗斯等国家关注的比较早,他们对导弹延寿、超期服役都进行过大胆的尝试,积累了丰富的经验。如美国大部分的“大力神”导弹都超期服役了 23 年,俄罗斯大部分的 SS-18 导弹超期服役了 20 年,这不仅保证了战斗力还节省了军费,是可靠性管理方面的成功案例。

结合实际需求,需要寻求合理的模型与方法来预测目标产品的剩余寿命。这里需要注意的问题是:研究对象为目标产品,也就是单个产品。这好比是病人看病的过程,为了保证诊断过程的有效性,医生既需要考虑人类共性的问题,同时也需要考虑病人自身的状况。因此,需要通过相关的检测了解病人的健康状况,同时结合相关的医学知识,才能对症下药,避免盲目用药。同样,为了预测目标产品的剩余寿命,也需要考虑共性与个性的问题,这样才能得到有效的预测结果,进而采取合理的维修保障措施。为满足这一需求,产生了在工业、国防、航空等领域有着广泛应用前景的预测与健康管理技术。在预测与健康管理技术框架下,装备的视情维修、备件管理等维修保障活动都是建立在剩余寿命预测的基础之上。目前,在很多产品的设计上,特别有着高可靠以及安全性要求的产品,都会考虑加入预测与健康管理技术,如飞机发动机状态监测系统、雷达状态监测系统、导弹状态监测系统等。

传统的剩余寿命预测模型与方法是基于产品寿命数据的,而不是建立在故

障预测的基础之上,因此不适合预测与健康管理技术的需求。主要体现在两个方面:①难以应用于无失效或者是小样本的情形;②预测结果往往表征的是产品总体特征,缺乏针对性,难以有效地指导对目标产品的维修决策。为解决这一问题,需要预测与健康管理技术框架下,在故障预测的基础上开展对目标产品剩余寿命的预测问题研究。为此,需要分析产品失效机理的演变过程,使得产品的故障可预测。幸运的是,很多失效模式都可以追溯到产品性能的退化^[4],如裂纹的增长导致金属构件的失效^[5],供油系统重量的减少导致卫星动量轮的失效^[6],电容值的减少导致电容器的失效^[7]。此时,可以根据产品的退化性能数据,追踪产品性能的退化过程以及预测将来的行为,进一步预测产品的剩余寿命以及开展维修决策活动,从而减少或者是避免故障的发生。目前,基于性能退化数据预测产品剩余寿命逐渐成为现代可靠性管理领域的一个重要研究方向。

基于性能退化数据的分析方法为预测目标产品的剩余寿命提供了一种有效的途径。这种预测方式能够在一定程度上克服无失效数据带来的困扰,同时能够考虑产品个体之间的差异,使得预测结果更加有针对性。与基于寿命数据的可靠性理论相比,利用产品性能退化数据开展相应的可靠性工作具有如下优点:

(1) 与寿命数据相比,退化数据更能体现产品的失效物理,有助于考虑环境应力对产品性能退化的影响,从而为相关的可靠性试验提供有针对性的指导。

(2) 无论是否存在产品的寿命数据信息,通过对性能退化数据的建模,都能够对产品的可靠性相关指标进行评估和预测,且能保证一定的精度,从而能够在一定程度上解决传统可靠性理论应用于高可靠性产品所带来的可信度危机^[8]。

(3) 退化数据能够体现外部以及内部环境多种因素对产品性能的动态影响,使得相关的评估和预测结果更具有指导意义^[3]。

(4) 与寿命数据相比,基于退化数据的分析可以节省试验时间与费用^[5]。

虽然退化数据能够提供较多的可靠性信息,但退化建模质量的好坏对评估和预测结果的精度有着重要的影响,基于不同的模型有可能得到不同的结果。模型选择不当,还可能导致评估和预测结果存在较大的误差。例如,利用线性模型去描述非线性的退化过程,会产生不合理的评估或者预测结果,进而导致做出错误的决策。因此,需要结合产品的实际退化过程,研究和选择合理的退化模型进行退化建模。

产品投入使用后,由于内部以及外部环境的相互作用,其性能随着工作时间的延长逐渐发生退化,如机械产品的磨损、裂纹增长等。产品的退化程度可以通过相关的性能指标来度量,当性能指标不能满足需求时,则判定产品失效。产品的失效,特别是具有高可靠以及安全性要求的产品,如飞机发动机、卫星电池、导弹导航系统等,会导致严重事故发生,如人员伤亡以及经济损失等。因此,有必

要在故障发生前采取一定的维修保障措施来避免,以确保产品能够以较高的可靠性完成相应的任务。随着科学技术的发展,产品的维修模式也发生了巨大的变化,主动式的视情维修成为了目前的主流。近年来,以实际需求为牵引,以视情维修为视角发展起来的预测与健康管理技术有着广泛的应用前景。产品的剩余寿命预测是预测与健康管理技术一个重要环节,发挥着承前启后的重要作用。预测结果对产品使用过程中的安全性、经济性都有着重要的影响,是开展维修保障措施规划的依据。

开展对目标产品的剩余寿命预测研究有着重要的理论与实践意义。一方面,开展对剩余寿命预测研究可以补充和完善相关理论,能够从技术层面对可靠性管理进行延伸与拓展;另一方面,根据预测结果,结合一定的维修模型,可以对维修时机、监测间隔以及备件订购等活动进行优化,从而实现产品运行的失效风险最小。

(1) 开展有效的维修保障决策迫切需要预测产品的剩余寿命。

产品投入使用后,对其剩余寿命进行预测是很有必要的。准确的预测结果有助于开展有效的维修保障决策,有助于提高产品使用率,减少故障发生率,同时降低维修费用。对可靠性与安全性有着较高要求的领域(如军事、航空领域),这是至关重要的。目前,预测与健康管理技术在我国的应用刚刚起步,有着广泛的应用前景。剩余寿命预测作为其中一个重要环节,需要对其加大研究力度,促进预测与健康管理技术在我国推广与应用。

由于制造材料、制造工艺以及使用环境等随机性因素的影响,导致同类型产品有着不同的寿命,当然也就有着不同的剩余寿命,需要区别对待。另外,主动式的视情维修是建立在目标产品剩余寿命预测基础之上的。因此,为了开展有效的维修保障决策,需要预测产品的剩余寿命。对于产品而言,为了预测其剩余寿命,除了考虑同型号产品的整体特性外,还需要考虑其自身的特性。例如对于航空公司而言,不仅要关注同类型发动机的整体可靠性水平,更要关注单台发动机在当前时刻的剩余寿命,这样才能有针对性地开展维修保障工作、降低风险,实现科学管理。总之,开展产品剩余寿命预测工作有着重要的工程实践意义,可以有效地指导产品的维修决策,避免维修不足或者维修过剩的现象,同时也能有效地支撑相关备件的订购活动,进一步保证维修活动的顺利实施。

(2) 实际需求迫切需要加强剩余寿命预测相关理论的研究。

产品的很多失效模式可以追溯到产品性能的退化,结合一定的模型与方法对故障进行预测,进而预测目标产品的剩余寿命。从故障预测的角度预测目标产品的剩余寿命,使得预测结果更加有效,这是传统的剩余寿命预测方法无法实现的。为了预测目标产品的剩余寿命,首先需要分析其性能退化过程的特点,采取一定的模型来描述,并对其将来的行为进行预测。然而,不同的退化模型可能

导致不同的预测结果,甚至导致错误的结果。例如,利用线性模型描述非线性的退化过程,会导致结果的可信度较低。

从工程实际角度考虑,在退化建模中需要考虑两种随机性:样本随机性以及退化在时间轴上的随机性。样本随机性主要用来刻画产品之间的差异,这种差异是由制造工艺、制造材料等因素造成的,如不同的产品有着不同的退化速率。退化在时间轴上的随机性用来刻画产品性能退化的波动性,即性能参数在随时间演进的过程中所体现出来的不确定性。在常用的退化模型中,退化轨迹模型中的随机参数可以用来表征产品之间的差异,然而这类模型难以反映退化在时间轴上的随机性。退化量分布模型忽略了退化数据的方向性,同时没有考虑个体差异,难以用来预测单个产品的剩余寿命。考虑到退化的随机性,基于随机过程模型的建模方法深受很多学者与工程人员的青睐。该类模型能够表征退化在时间轴上的随机性,如 Wiener 过程和 Gamma 过程。然而,相关的研究常常忽略产品之间的差异,所得结果也只是体现产品的整体特性。为此,需要考虑带有随机效应的随机过程模型进行退化建模,如带有随机效应的 Wiener 过程模型。

若 $\{X(t):t \geq 0\}$ 满足:

① 任意时刻的增量服从正态分布,即

$$\Delta X = X(t + \Delta t) - X(t) \sim N(a\Delta t, \sigma^2 \Delta t)$$

式中: a 和 σ 分别为漂移系数和扩散系数。

② 任意两个不相交时间段内的增量相互独立。相应的数学描述为:对于任意的 $0 < t_1 < t_2 < \dots < t_n$, 则 $X(t_1) - X(t_0)$, $X(t_2) - X(t_1)$, $\dots$, $X(t_n) - X(t_{n-1})$ 相互独立。

③ $X(0) = 0$, 即 $X(0)$ 以概率 1 取值为 0。

满足以上性质的随机过程称为一元线性 Wiener 过程。此时, $X(t)$ 有着良好的计算与分析性质:① 退化量增量满足马尔科夫性质,即退化量增量只与当前时刻的退化量有关,而与之之前的退化历史无关;② 首达时分布有着封闭的表达式,即逆高斯分布。

线性 Wiener 过程适合描述线性退化的情况,难以描述非线性退化的动态特性。为此,有必要研究非线性 Wiener 过程模型,即假定退化量的增量服从正态分布,均值与方差都为关于时间的非线性函数,且二者的函数形式可以不同,独立性假设与线性 Wiener 过程类似。直观上,非线性 Wiener 过程模型包含了线性 Wiener 过程,有着更广的应用范围。然而,由于非线性的影响,难以得到首达时分布的封闭表达式,这在一定程度上阻碍了它在实际中的应用。为此,结合实际需求,需要采用一定方法与思路克服这一障碍,如对首达时分布进行近似,还有待深入的研究。

目前,在利用 Wiener 过程进行退化建模的研究中,所取得成果大都是针对一个性能特征且线性退化的情形。随着科学技术的发展,现代产品结构日趋复杂,功能呈现多样化,失效机理也变得复杂,仅仅一个性能指标难以充分地表征产品的健康状态。例如,作为星载铷原子频标关键部件的铷光谱灯,若其铷消耗量或光强的衰减量超过相应的规定量后,就判定该铷光谱灯失效。此时,仅仅利用一个性能指标难以表征铷光谱灯的性能。因此,需要考虑多元退化的建模问题。由于受共同的外部和内部环境影响,使得不同性能指标的退化往往不是独立的,而是存在一定的相关性。因此,在退化建模时需要考虑相关性。与一元退化模型相比,多元退化模型更加复杂,特别是加上非线性的影响,难以得到首达时分布的封闭表达式。如何推导或者近似退化模型对应的失效分布或剩余寿命分布,需要进行研究。目前,多性能指标产品的剩余寿命预测是可靠性工程研究中没有解决的问题,也是值得研究的问题。

(3) 在退化建模以及剩余寿命预测方面的研究有着广泛的应用前景。

围绕着实际的工程需求以及理论需要,这里以非线性 Wiener 退化过程为研究对象,在退化建模和产品剩余寿命预测方面进行了深入的研究。所建的退化模型考虑了产品之间的差异性、退化的非线性、退化在时间轴上的不确定性等。针对多维的情形,退化模型还考虑了性能指标退化的相关性。针对每个退化模型,都给出了相应的失效概率密度函数以及剩余寿命概率密度函数的近似表达式,并研究了产品剩余寿命的预测方法。为了使所建退化模型和相关的方法更好地被应用,还研究了退化模型的参数估计方法。该研究能够指导解决实际工程中存在的问题,同时有助于促进退化建模以及产品剩余寿命预测理论的发展。

本书主要以非线性 Wiener 过程为研究对象,围绕着退化建模与产品的剩余寿命预测等问题展开深入的研究。提出了一类通用性较强的一元 Wiener 过程模型,进一步从测量误差以及随机效应两个方面进行了拓展,并分别给出了相应的剩余寿命分布密度函数的近似表达式,同时给出了相应的剩余寿命预测方法。另外,从性能参数维数上进行拓展,分别研究了二元以及多元情形下的退化建模问题,对相应的失效分布密度函数以及剩余寿命分布密度函数进行近似,给出了相应的近似表达式,并通过示例验证了方法的有效性。

书中的研究成果可用于:①产品的可靠性评估。结合实际需要,可根据相应的退化模型描述产品性能退化过程,并利用相应的参数估计方法对退化模型的参数进行估计,进一步评估产品的可靠性。②退化试验方案设计。在相关的研究中,大都只考虑了一维退化的情形,且往往没有考虑产品个体差异。结合上文中的退化模型以及相应的失效分布,可以进一步研究退化试验方案的设计。③预测目标产品的剩余寿命。利用目标产品的退化数据信息,结合相应的模型与

方法,能够预测其剩余寿命。④维修方案的制定。在制定维修方案的过程中,特别是视情维修,往往需要预测产品的剩余寿命,特别是其概率密度函数。从一维到多维退化的情形,相应的研究结果有助于促进维修决策的发展。⑤产品筛选试验方案的制定。产品在投入使用或者是投放市场之前,需要进行筛选试验移除缺陷产品。针对相应的退化模型,以最小化产品寿命周期费用为目标来制定筛选方案。

1.2 剩余寿命预测的相关研究

可靠性作为产品质量在时间尺度上的变化属性,其重要性逐渐被人们所认识和理解。随着科学技术的发展,在工业、农业以及军工等行业出现了大量长寿命、高可靠的产品。对于这些产品,在有限的时间内难以收集到足够的失效数据,极少失效或者零失效的情况常常发生。这给传统基于寿命数据的可靠性分析方法带来了挑战。幸运的是,很多高可靠产品的失效机理都可以追溯到性能的退化。为此,基于性能退化数据的可靠性评估方法被很多学者和工程人员所接受。这种方法为长寿命、高可靠产品的可靠性评估提供了新的途径。与传统的可靠性分析方法相比,基于性能退化数据的可靠性评估方法考虑了产品“为什么”以及“如何”失效等问题,使得评估的结果更加可信。在研究高可靠性产品的可靠性问题时,Meeker & Hamada^[9]指出了传统可靠性理论与工程应用的不适应问题,并推荐从产品性能退化的角度进行失效分析。Lu 等^[10]也指出退化分析可以解决极少失效或者零失效情况下的可靠性评估问题,并对基于退化数据的评估方法与传统基于寿命的评估方法进行了对比,结果表明基于退化数据的评估方法往往能够得到更加准确的结果。

产品投入使用后,进行相关的维护是保证产品发挥其性能的必要手段。由于受内部环境以及外部环境的影响,同类型的产品在性能退化上往往存在着差异。为了开展有效的维修决策、备件贮存等活动,需要在考虑产品个体差异的条件下,结合产品自身的退化数据对其剩余寿命进行预测。在此基础上建立的维修保障措施才更有针对性,进一步减少经济成本以及降低失效风险^[11,12]。退化模型在产品的剩余寿命预测中起着重要的作用,根据不同的退化模型可能得到不同的结果,甚至有可能得到没有意义的预测结果。为此,在进行产品剩余寿命预测之前,需要进行退化分析,选择合适的退化模型。下面介绍国内外对退化建模和剩余寿命预测两方面研究的进展情况。

1.2.1 产品性能退化建模的研究

产品在使用的过程中,其性能随着时间不断地退化,通过一定的监测技术可

以得到相应的性能监测数据。监测数据主要可以分为两类:直接监测数据和间接监测数据^[13]。直接监测数据是指能够直接表征产品健康状态的数据,如磨损程度、裂纹长度、电容容值以及绝缘材料的老化程度等。在相关的研究中,通常将这类数据记为退化数据。对于存在此类数据的产品,其失效时间可定义为性能退化量超过失效阈值的时间。对于某些产品而言,难以获得能直接表征其性能的数据,只能得到间接监测数据。该类数据往往只能间接或者部分表征产品健康状态,如通过油液分析得到的数据。为便于理解,这里将间接监测数据记为间接性能数据。在对产品剩余寿命预测的过程中,对这两类数据的处理方法是不同的。对退化数据而言,需要建立退化模型描述其演化过程;而对于间接性能数据,需要建立间接性能数据与产品状态(隐退化、剩余寿命等)之间的关系,除此之外往往还需要失效数据信息。对于某些有高可靠性、安全性要求的产品来说,获取一定量的失效数据需要较高的经济成本。这里重点关注退化数据的建模,关于间接性能数据的建模研究可参见文献[14]。

不同的产品有不同的性能参数,可能是一维,也可能是多维。若产品含有多个性能参数,则需要考虑多维退化模型。同时,如果性能参数之间不独立,则在退化建模时需要考虑它们之间的相关性。此外,针对不同的性能参数,可能需要建立不同的退化模型。下面就从一元退化建模和多元退化建模两个方面对目前国内外的研究现状进行分析,相应的研究技术树如图 1.1 所示。

1.2.1.1 一元退化建模的研究现状

目前,关于退化建模的研究中,大都假定产品的关键性能参数只有一个,即认为产品是一元退化失效。记 $X(t)$ 表示产品性能参数在 t 时刻的退化量, $X(t)$ 可能是关于时间的单调函数或非单调函数。根据退化失效的定义,当 $X(t)$ 达到失效阈值 D 时,认为产品失效,对应的时间为产品的失效时间。对于有递增趋势的退化过程,产品失效时间可定义为

$$T = \inf\{t; X(t) \geq D\} \quad (1.1)$$

相应的失效分布为

$$P(T \leq t) = P(\sup_{0 \leq s \leq t} X(s) \geq D) \quad (1.2)$$

对于有递减趋势的退化过程,可以令 $Y(t) = X(0) - X(t)$,将其转换为有递增趋势的退化过程。如不做特别说明,下面都假定产品性能退化随时间呈现递增的趋势。根据式(1.2)可以看出,失效分布取决于如何对 $X(t)$ 进行建模。它们之间的关系如图 1.2 所示。

在现有的研究中,常用的退化模型包括退化轨迹模型、退化量分布模型、累积损伤模型、Gamma 过程模型以及 Wiener 过程模型等。其中 Gamma 过程模型

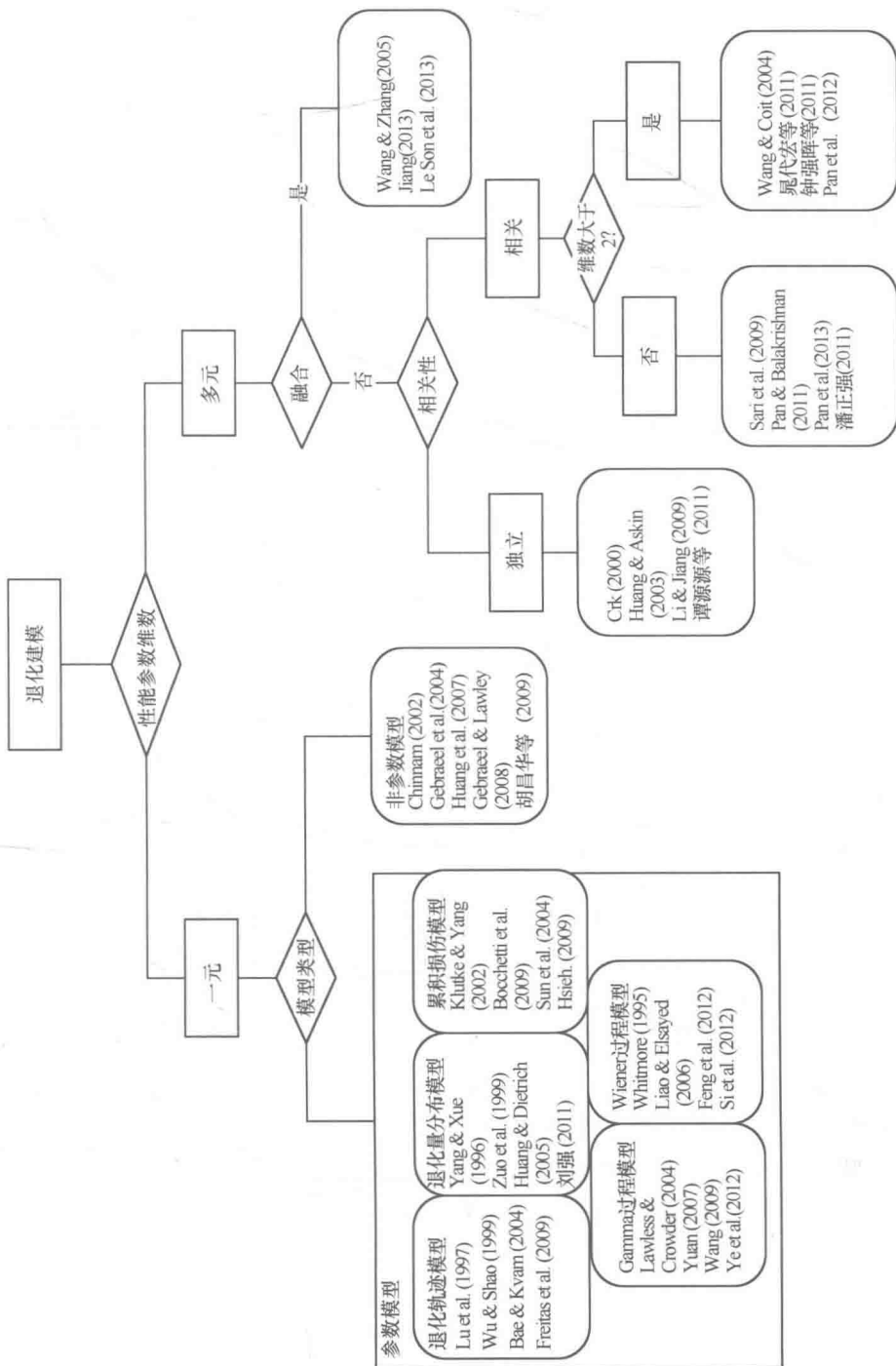


图1.1 退化建模研究技术树