


“十三五”国家重点出版物出版规划项目

 可靠性新技术丛书

Residual Life Prediction and Optimal
Maintenance Decision for a Piece of Equipment

设备剩余寿命预测 与最优维修决策

■ 胡昌华 樊红东 王兆强 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

物出版规划项目

设备剩余寿命预测 与最优维修决策

Residual Life Prediction and Optimal Maintenance
Decision for a Piece of Equipment

胡昌华 樊红东 王兆强 著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书主要内容包括带非线性漂移的维纳退化过程建模与剩余寿命预测、含突变点维纳性能退化过程建模与剩余寿命预测、伽玛退化过程建模与剩余寿命预测、逆高斯退化过程建模与剩余寿命预测、基于支持向量机的性能退化建模与剩余寿命预测、基于相关向量机模糊模型的性能退化建模与剩余寿命预测、基于证据推理的性能退化建模与可靠性预测、权值选优粒子滤波性能退化建模与剩余寿命预测、基于灰色预测模型的性能退化建模与剩余寿命预测、基于寿命预测信息的退化设备最优检测策略及应用、资源有限情形下两部件系统的合作预测维修等。

本书可为从事设备故障诊断与容错控制、寿命预测与维修决策等方面理论研究或应用研究的科研人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

设备剩余寿命预测与最优维修决策/胡昌华,樊红东,王兆强著. —北京:国防工业出版社,2018.11

(可靠性新技术丛书)

ISBN 978-7-118-11658-8

I. ①设… II. ①胡… ②樊… ③王… III. ①机械设备-预期寿命 ②机械设备-可维修性 IV. ①TH17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 256343 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)

北京龙世杰印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 字数 261 千字

2018 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 68.00 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

可靠性新技术丛书

编审委员会

主任委员：康 锐

副主任委员：周东华 左明健 王少萍 林 京

委 员(按姓氏笔画排序)：

朱晓燕 任占勇 任立明 李 想

李大庆 李建军 李彦夫 杨立兴

宋笔锋 苗 强 胡昌华 姜 潮

陶春虎 姬广振 翟国富 魏发远

可靠性理论与技术发源于20世纪50年代,在西方工业化先进国家得到了学术界、工业界广泛持续的关注,在理论、技术和实践上均取得了显著的成就。20世纪60年代,我国开始在学术界和电子、航天等工业领域关注可靠性理论研究和技术应用,但是由于众所周知的原因,这一时期进展并不顺利。直到20世纪80年代,国内才开始系统化地研究和应用可靠性理论与技术,但在发展初期,主要以引进吸收国外的成熟理论与技术进行转化应用为主,原创性的研究成果不多,这一局面直到20世纪90年代才开始逐渐转变。1995年以来,在航空航天及国防工业领域开始设立可靠性技术的国家级专项研究计划,标志着国内可靠性理论与技术研究的起步;2005年,以国家863计划为代表,开始在非军工领域设立可靠性技术专项研究计划;2010年以来,在国家自然科学基金的资助项目中,各领域的可靠性基础研究项目数量也大幅增加。同时,进入21世纪以来,在国内若干单位先后建立了国家级、省部级的可靠性技术重点实验室。上述工作全方位地推动了国内可靠性理论与技术研究工作。当然,在这一进程中,随着中国制造业的快速发展,特别是《中国制造2025》的颁布,中国正从制造大国向制造强国的目标迈进,在这一进程中,中国工业界对可靠性理论与技术的迫切需求也越来越强烈。工业界的需求与学术界的研究相互促进,使得国内可靠性理论与技术自主成果层出不穷,极大地丰富和充实了已有的可靠性理论与技术体系。

在上述背景下,我们组织编著了这套可靠性新技术丛书,以集中展示近5年内国内可靠性技术领域最新的原创性研究和应用成果。在组织编著丛书过程中,坚持了以下几个原则:一是**坚持原创**。丛书选题的征集,要求每一本图书反映的成果都要依托国家级科研项目或重大工程实践,确保图书内容反映理论、技术和应用创新成果,力求做到每一本图书达到专著或编著水平。二是**体现科学**。丛书框架的设计,按照可靠性系统工程管理、可靠性设计与试验、故障诊断预测与维修决策、可靠性物理与失效分析四个板块组织丛书的选题,基本上反映了可靠性技术作为一门新兴交叉学科的主要内容,也能在一定时期内保证本套丛书的开放性。三是**保证权威**。丛书作者的遴选,汇聚了一支由国内可靠性技术领域长江学者特聘教授、千人计划专家、国家杰出青年基金获得者、973项目首席科学家、国家级奖获得者、大型企业质量总师、首席可靠性专家等领衔的高水平作者队伍,这些高层次专家的加盟奠定了丛书的权威性地位。四是**覆盖全面**。丛书选题内容不仅覆盖了航空航

天、国防军工行业,还涉及了轨道交通、装备制造、通信网络等非军工行业。

这套丛书成功入选“十三五”国家重点出版物出版规划项目,主要著作同时获得国家科学技术学术著作出版基金、国防科技图书出版基金以及其他专项基金等的资助。为了保证这套丛书的出版质量,国防工业出版社专门成立了由总编辑挂帅的丛书出版工作领导小组和由可靠性领域权威专家组成的丛书编审委员会,从选题征集、大纲审定、初稿协调、终稿审查等若干环节设置评审点,依托领域专家逐一对入选丛书的创新性、实用性、协调性进行审查把关。

我们相信,本套丛书的出版将推动我国可靠性理论与技术的学术研究跃上一个新台阶,引领我国工业界可靠性技术应用的新方向,并最终为“中国制造 2025”目标的实现做出积极的贡献。

康锐

2018年5月20日

序

复杂工程装备剩余寿命预测与维修决策是一个亟待解决的重大工程问题,尤其对于航空航天等领域应用要求而言,该问题更是一个具有极大挑战性的问题。一方面,由于航空航天这类高可靠、长寿命设备的成本高、寿命周期长,难以通过试验获得大量的关于设备的失效数据或寿命数据,传统的基于失效分布统计分析的剩余寿命预测与最优维修方法变得不可用或不好用;另一方面,这类设备在研制、定型试验、储存使用过程中又积累了一些反映设备运行状态和性能的监检测数据,这些数据中包含了丰富的关于设备剩余寿命的相关信息,遗憾的是现有的剩余寿命预测方法对这些数据没有加以合理的运用。令人欣喜的是,本书作者胡昌华教授及其所率领的研究团队早在2002年就开始探索综合运用设备历史监检测信息中的寿命数据和退化数据进行设备的性能退化规律建模、剩余寿命预测和最优维修决策,并取得了一批原创性成果。例如,非线性维纳退化过程首达时间分布及剩余寿命预测,突变点自检测和多阶段退化建模与剩余寿命预测,融合主客观信息的证据推理退化建模与剩余寿命预测,基于寿命预测信息的退化设备最优检测策略,资源有限情形下两部件系统合作预测维修等。这些研究成果在领域内顶级学术期刊 *IEEE Trans On Reliability*、*European Journal of Operational Research*、《中国科学》、《自动化学报》等刊物上发表,引起了国内外同行的广泛关注,表明该书理论成果已经产生较广泛的国际学术影响力,具有很好的前沿性、系统性和原创性。同时,胡昌华教授及其所率领的研究团队非常重视理论联系实际,运用书中所提方法解决航天产品如陀螺、平台等的剩余寿命预测与维修决策,取得了一些更加贴近工程实际的预测与决策结果。该书有很强的应用针对性和很高的应用参考价值,是近年来不可多得的一部关于设备剩余寿命预测与最优维修决策方面的专著。该书的出版必将推动和促进基于退化建模的复杂工程装备剩余寿命预测与维修决策技术的发展,为解决这一重大工程难题也提供了重要的理论基础。该书不失为一本可靠性工程、维修工程与管理工程领域优秀的专著,对从事相关领域研究的广大科技工作者有重要的理论和应用参考价值。



房建成,中国科学院院士。

前言

保障复杂工程设备安全可靠地运行是设备研制、使用人员共同的目标,设备性能退化规律建模、故障预报、剩余寿命预测与维修可以把设备故障的发现、预防、维护做在事前,成为设备可靠性工程、安全性工程、维修性工程与管理工程的前沿研究方向,但这个研究方向所涉及的问题也是一些有相当难度、富有挑战的问题。

本书作者及团队早在 2002 年就开始探索基于设备历史监检测数据建立设备性能退化规律模型、剩余寿命预测模型和最优维修决策模型。其主要动因有几个方面:一是因为缺少科学的定寿基础理论的支持,许多设备的设计给定寿命非常保守(被严重低估),导致超过给定寿命的“超期”服役产品继续使用缺少依据,报废又造成严重浪费,工程实践迫切想要破解科学确定设备准确寿命这一难题,呼唤提出准确确定设备科学寿命的方法。二是已有的一些定寿方法因为各种原因,在解决工程问题时碰到了不好用或无法用的困难,例如,机理模型定寿方法获得的设备寿命信息很准确,但对复杂工程设备而言,要建立或获得设备的机理模型不仅十分困难,而且代价很高,有时几乎不可能实现。加速实验统计分析的寿命分析方法也可以在相对较短的时间内获得关于设备寿命的较准确信息,但对于航空航天领域高成本、长寿命设备类型而言,注定不可能投入大量的子样进行寿命试验,基于小子样数据得到的统计寿命结果必然存在较大的偏差。近年来逐步得到发展的基于性能退化数据的设备健康管理、性能退化规律建模、剩余寿命预测与维修决策分析方法,为解决上述困境提供了一条可行的解决思路,因为设备的性能退化数据可以通过设备研制、定型试验、储存使用中反映设备性能状况的参量进行监检测而获得,这样就大大拓宽了可用数据的来源,数据来源的丰富为获得更贴近工程实际的寿命预测结果提供了可能,但随之而来的问题是需要新的处理这类数据以获得关于设备性能退化规律建模、剩余寿命预测与维修决策分析的基础理论方法来支撑。从 2002 年开始,作者带领研究生开展了这方面的探索,先后有 30 余名博士、硕士研究生开展有关研究,他们的学位论文工作为本书的完成提供了重要的参考,本书内容正是作者团队在该领域十多年研究成果的系统总结。他们包括吕瑛洁等的一些早期的探索,张正新、张建勋、王志远等在维纳退化过程建模方面的一些工作,陈亮、张佳等在伽玛退化过程建模方面的工作,司小胜、李明福等在逆高斯退化过程建模方面的工作,张

琪在权值优选粒子滤波方面的工作,蔡艳玲、胡友涛、陈伟等在支持向量机方面的工作,司小胜、周志杰等在基于证据推理的退化建模方面的工作等。这些研究工作中的有些内容已经单独出版,如博士生司小胜的博士论文“随机退化系统的剩余寿命预测”已经单独出版,没有包括在本书中。有些研究工作,随着时间的推移在其他同类书中已经有所反映,也没有包括在本书中。还有些最新成果,限于时间的关系,还来不及纳入本书当中。这些没有纳入本书的研究,对于推动相关技术的发展也做出了重要的贡献,对这些同志如洪贝、胡友涛、郑建飞、杜党波、张会会、吕瑛洁、蔡曦、王鑫、郑光宇、黄莹等,作者表示由衷的感谢!

全书共分12章。第1章概述了寿命预测和维修决策方法研究现状。第2章针对非线性退化设备给出了基于维纳过程的剩余寿命实时预测方法。第3章针对退化过程中存在突变点的情形介绍了突变点检测算法并给出了剩余寿命实时预测方法。第4章、第5章分别研究了基于伽玛过程和逆高斯过程的性能退化建模与剩余寿命预测方法。第6章针对退化数据样本较小的情形研究了基于支持向量机的剩余寿命预测方法。第7章提出了一种基于相关向量机的模糊模型辨识方法,研究了相应的性能退化建模与预测方法。第8章系统研究了融合主客观信息的证据推理退化建模与剩余寿命预测。第9章介绍了粒子滤波相关算法,提出了一种权值选优粒子滤波算法并应用于设备剩余寿命预测。第10章介绍了灰色模型理论及在性能退化建模与预测中的应用。第11章研究了基于剩余寿命预测信息的最优检测策略。第12章针对失效模式相互影响情形提出了一种合作预测维修模型。

本书的研究工作得到了国家杰出青年科学基金[数据驱动的导弹故障诊断与预测维护技术(61025014)]、国家自然科学基金重点项目[复杂工程系统故障预报与预测维护若干关键问题研究(60736026)]、国家自然科学基金面上项目[考虑多状态交互影响的设备剩余寿命预测方法(61573365)]、国家自然科学基金青年项目[维修次数有限情形下复杂可修系统最优维修策略研究(61304101)、随机服役环境下阈值时变设备剩余寿命预测与维修库存决策(61603398)]的资助,感谢国家自然科学基金对于作者及其研究团队的支持,特别感谢国家自然科学基金信息学部王成红教授、宋苏处长的支持。

在本书相关研究过程中,清华大学周东华教授给予了无私的支持和帮助,在我们合作开展国家自然科学基金重点项目研究、联合培养博士研究生的过程中,周东华教授毫无保留地将研究资料、研究心得与我们交流,而在发表论文等取得成果的时候,周东华教授总是将自己的名字往后排,体现了一个科技工作者崇高的品格,在此向周东华教授表示由衷的感谢和崇高的敬意!

该书能够纳入国防工业出版社策划的“十三五”国家重点出版物出版规划项

目《可靠性新技术》丛书,北京航空航天大学康锐教授、国防工业出版社白天明编辑给予了热情推荐和大力支持。中国科学院院士、北京航空航天大学房建成教授欣然举荐本书并作序,清华大学叶昊教授也热情举荐了本书,对这些同志给予的帮助与支持表示由衷的感谢!

由于作者水平有限,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

胡昌华

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 设备寿命预测	2
1.2.1 寿命预测的基本概念	2
1.2.2 新研设备定寿技术	3
1.2.3 工作状态下设备剩余寿命预测研究现状	4
1.2.4 设备贮存寿命预测研究现状	9
1.3 设备最优维修决策	10
1.3.1 维修的定义和分类	10
1.3.2 单部件系统维修决策	13
1.3.3 多部件系统维修决策	18
参考文献	21
第 2 章 带非线性漂移的维纳退化过程建模与剩余寿命预测	30
2.1 维纳退化过程的定义	31
2.2 带非线性漂移的维纳退化过程模型	32
2.3 带非线性漂移的维纳退化过程剩余寿命预测	33
2.4 带非线性漂移的维纳退化过程模型参数估计	34
2.4.1 估计共性参数以及随机参数分布的超参数	35
2.4.2 基于贝叶斯更新策略的随机参数实时更新	37
2.5 实例分析	38
2.5.1 问题描述	38
2.5.2 结果与讨论	39
2.6 本章小结	41
参考文献	42
第 3 章 含突变点维纳性能退化过程建模与剩余寿命预测	43
3.1 含突变点维纳性能退化过程模型描述	44
3.1.1 设备的退化建模与剩余寿命预测	44
3.1.2 性能退化过程中的变点检测	44
3.1.3 设备的退化模型——维纳过程	45

3.1.4	指数族先验分布的共轭分布	46
3.2	含突变点维纳性能退化过程突变点检测	47
3.2.1	贝叶斯在线变点检测算法	47
3.2.2	先验分布的经验贝叶斯确定方法	49
3.2.3	EM 算法	51
3.3	基于贝叶斯在线变点检测的剩余寿命预测方法	57
3.4	实例分析	58
3.5	本章小结	61
	参考文献	61
第 4 章	伽玛退化过程建模与剩余寿命预测	63
4.1	伽玛退化过程的定义	63
4.2	伽玛退化过程的参数估计	65
4.2.1	矩估计法	65
4.2.2	极大似然估计法	67
4.3	基于伽玛退化过程的设备剩余寿命预测	69
4.3.1	寿命分布	69
4.3.2	剩余寿命分布	70
4.3.3	可靠度函数	71
4.3.4	实例验证	72
4.4	存在环境影响时伽玛性能退化过程建模和最优维修	73
4.4.1	问题描述	73
4.4.2	存在外部环境影响时伽玛性能退化过程剩余寿命分布计算	74
4.4.3	存在外部环境影响时基于伽玛性能退化过程的最优维修决策	76
4.5	本章小结	78
	参考文献	78
第 5 章	逆高斯退化过程建模与剩余寿命预测	80
5.1	逆高斯退化过程的定义	80
5.2	基于 ER 融合的逆高斯退化模型参数估计方法	82
5.2.1	单个设备逆高斯退化过程参数估计	83
5.2.2	基于证据推理的固定参数融合	86
5.3	剩余寿命分布计算	88
5.4	实验验证	89
5.5	本章小结	94
	参考文献	94

第 6 章 基于支持向量机的性能退化建模与剩余寿命预测	96
6.1 SVR 原理	97
6.1.1 原始问题与对偶问题	97
6.1.2 SVR 的稀疏性	101
6.1.3 核函数	102
6.2 基于 GA 优化 SVR 的退化建模和剩余寿命预测方法	103
6.2.1 问题描述	103
6.2.2 基本思路	104
6.2.3 方法的具体步骤	105
6.2.4 实例分析	105
6.3 基于 SVR 和 FCM 聚类的实时退化建模和剩余寿命预测方法	109
6.3.1 问题描述	109
6.3.2 基本思路与具体步骤	111
6.3.3 实例分析	114
6.4 本章小结	121
参考文献	121
第 7 章 基于相关向量机模糊模型的性能退化建模与剩余寿命预测	123
7.1 相关向量机模糊模型数学描述及特性分析	124
7.1.1 模糊模型数学描述	124
7.1.2 基于相关向量机的模糊模型	125
7.1.3 相关向量机模糊模型的一致逼近性	127
7.2 相关向量机模糊模型辨识	130
7.2.1 结构辨识	130
7.2.2 参数辨识	131
7.2.3 基于相关向量机和梯度下降方法的模糊模型辨识算法	133
7.3 基于相关向量机模糊模型的退化建模与剩余寿命预测	133
7.4 实验验证	134
7.4.1 连续釜式搅拌器仿真系统描述	134
7.4.2 仿真实验及其结果	135
7.4.3 结果分析	138
7.5 本章小结	138
参考文献	139
第 8 章 基于证据推理的性能退化建模与可靠性预测	141
8.1 基于证据推理的性能退化建模	142

8.1.1	预测模型结构与表达形式	142
8.1.2	基于证据推理的性能退化建模与预测	142
8.1.3	基于效用的数值型输出	143
8.2	基于EM算法在线更新ER模型的可靠性预测	144
8.2.1	基于判断性输出的递归参数估计算法	145
8.2.2	基于数值输出的递归参数估计算法	149
8.3	案例研究	151
8.3.1	问题描述	151
8.3.2	可靠性数据的参考点	152
8.3.3	退化建模与预测模型	153
8.3.4	基于判断性输出的仿真结果	153
8.3.5	基于数值输出的仿真结果	155
8.4	本章小结	157
	参考文献	157
第9章	权值选优粒子滤波性能退化建模与剩余寿命预测	159
9.1	权值选优粒子滤波算法	159
9.1.1	粒子滤波算法及特性分析	159
9.1.2	权值选优粒子滤波算法	164
9.2	权值选优粒子滤波性能退化建模	165
9.2.1	性能退化过程描述	165
9.2.2	性能退化过程参数估计	166
9.3	权值选优粒子滤波剩余寿命预测	168
9.4	仿真研究	168
9.5	本章小结	172
	参考文献	172
第10章	基于灰色预测模型的性能退化建模与剩余寿命预测	174
10.1	灰色预测模型	175
10.1.1	经典的灰色预测模型GM(1,1)	175
10.1.2	改进的灰色模型	176
10.2	基于改进灰色模型的剩余寿命预测	182
10.3	基于改进灰色模型的惯性器件性能退化轨迹建模	182
10.4	本章小结	184
	参考文献	185

第 11 章 基于寿命预测信息的退化设备最优检测策略及应用	186
11.1 设备检测策略及其最优化目标函数	187
11.2 基于剩余寿命预测的退化设备最优检测策略	190
11.2.1 $G(x)$ 已知时设备的最优检测周期	190
11.2.2 $G(x)$ 未知时设备的最优检测周期	191
11.3 基于寿命预测信息的惯性平台的最优检测策略	193
11.4 本章小结	195
参考文献	196
第 12 章 资源有限情形下两部件系统的合作预测维修	198
12.1 资源有限情形下两部件系统合作预测维修策略描述	199
12.1.1 基于寿命预测信息的期望失效次数估计	202
12.1.2 资源有限与失效模式相互影响情形下的维修效果建模	202
12.2 预测维修目标函数建立及其优化求解	203
12.2.1 目标函数建立	203
12.2.2 费用率函数优化求解	205
12.3 数值仿真	215
12.4 本章小结	218
参考文献	218

绪 论

1.1 引 言

随着技术的进步和社会化大生产的发展,出现了一些要求高可靠、长寿命、长期在线使用或多运行状态交替转换的大型复杂系统,如卫星需要空间在轨连续运行 10 余年甚至更长时间,核电站、水电站、大型石化生产线等也需要连续长时间高可靠运行。这些系统不仅投资规模大,而且对系统的安全可靠运行提出了非常高的要求,一旦出现问题,其后果往往是灾难性的!但这类系统有时又很脆弱,往往一个局部的微小的故障,就可能引发整个系统的灾难性的后果^[1]。比如,1994 年 9 月 8 日,美国航空公司的一架波音 737 飞机由于飞机的方向舵发生非指令性的偏斜而在匹兹堡附近坠毁,导致 131 人遇难^[2];2005 年,吉林石化公司双苯厂由于其苯胺装置硝化单元的 P-102 塔发生堵塞导致重大爆炸事故,造成了非常大的经济损失^[3]。如何保证大型复杂系统安全可靠运行成为一个亟待解决的重大工程问题。容错可以部分地解决这类问题,但需要增加系统的成本、复杂性和硬件开销。利用在线故障检测诊断机构,可以及时检测系统中存在的故障,同时配合合适的维修策略,对系统中发生的故障可以做到及时处置,但这类方法常常需要故障发展到相当程度且当其能够在故障显现或暴露时才会有较好的效果。实际上,人们更希望把故障的处置措施做在事前,即如果能在系统出现故障的苗头和趋势时就提前对系统进行预防性的维修措施,对于避免或预防灾难性事故发生将更有效且代价最小。设备性能退化规律建模、剩余寿命预测与预测维护是支撑前述目标实现的三大相互关联的核心关键技术。

通过维修可以提高系统的可靠性、使用性和安全性,减少或避免灾难性事故,保障人员、设备安全,降低因事故造成的损失。但维修也需要巨大的费用支持,据统计,维修费用一般占制造业生产成本的 15%,钢铁业的 40%;在美国,整个工业界每年的维修费用都大约在 2000 亿美元以上^[4],其中大约 30%的维修成本是由低效率的维修方式造成的^[5]。

为了既能使维修在保证系统正确运行中发挥有效作用,又能使其消耗尽可能少的费用,研究人员对维修策略进行了大量的研究,维修理念也从当初的事后维修发展过渡到基于时间的计划性维修,再到目前应用广泛的视情维修。随着传感器技术和预测技术的迅速发展,从视情维修中又发展出一个重要的方向:预测维修。国外,预测维修在 20 世纪末就已经得到了重视。目前,预测维修也引起了国内学者的密切关注。在我国,2006 年 2 月国务院颁布的《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020 年)》以及“863”计划先进制造技术领域都将“重大产品和重大设施寿命预测技术”列为亟待发展的前沿技术之一^[6,7]。

作为实现预测维修的核心技术,寿命预测近年来已经成为国内外研究的热点之一^[8-12]。传统的寿命预测技术是以一类产品为研究对象,通过统计方法对其寿命数据进行统计分析,进而得到其寿命分布。然而,这种方式并没有考虑设备运行过程中环境等因素的影响,从而使统计得到的寿命分布并不能准确刻画设备的寿命变化,进而导致维修活动的安排不够合理。另一方面,随着科技的发展,设备的寿命越来越长,可靠性越来越高,很难搜集到大量的寿命数据,从而影响统计结果的准确性。

随着传感器技术的发展,通过监测数据对设备的剩余寿命进行在线评估就显得异常迫切,并得到了众多学者的关注。Jardine 等^[13]总结了近年来寿命预测领域的主要研究成果,并指出当前对剩余寿命预测的研究主要是预测其概率分布和期望,主要有统计方法、人工智能方法和机理模型方法。统计方法和人工智能方法同属数据驱动的方法。对于统计数据驱动的剩余寿命预测方法,司小胜等在文献[14]中进行了系统的综述,根据状态监测数据的类型,将获取到的数据分为直接监测数据和间接监测数据,基于此,将现有的方法划分为基于直接监测数据的方法和基于间接监测数据的方法,并且从剩余寿命建模的角度,对现有的各种预测方法进行了详细的归纳和评述。本书从新研设备定寿、工作状态下设备剩余寿命预测及设备存储寿命预测这几个方面对寿命预测方法进行了更为全面的总结和评述^[15]。

1.2 设备寿命预测

1.2.1 寿命预测的基本概念

剩余寿命,通常称为剩余有效寿命(Remaining Useful Life, RUL),也称为剩余工作寿命(Remaining service life)、残余寿命(Residual life),是从当前时刻开始设备还能继续正常工作的时间。而寿命预测是指在当前设备状态和历史状态数据已知的条件下,去预测在一个(或多个)失效发生之前还剩下多少时间。通常情况下,剩余寿命被定义为条件随机变量^[13]: