



国防科技图书出版基金

Data-Driven Remaining Useful Life  
Prediction Theory and  
Applications for Equipment

数据驱动的设备剩余寿命  
预测理论及应用

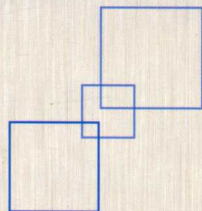
司小胜 胡昌华 著



5



国防工业出版社  
National Defense Industry Press





国防科技图书出版基金

# 数据驱动的设备剩余寿命 预测理论及应用

Data - Driven Remaining Useful Life Prediction  
Theory and Applications for Equipment

司小胜 胡昌华 著

国防工业出版社

·北京·

图书在版编目(CIP)数据

数据驱动的设备剩余寿命预测理论及应用/司小胜,  
胡昌华著. —北京:国防工业出版社,2016.4

ISBN 978-7-118-10394-6

I. ①数... II. ①司... ②胡... III. ①数据处理  
系统—数据通信设备—寿命—预测 IV. ①TN919.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 020951 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)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$  字数 310 千字

2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 88.00 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

## 致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

**国防科技图书出版基金资助的对象是:**

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

**国防科技图书出版基金**  
评审委员会

# 国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员 潘银喜

副主任委员 吴有生 傅兴男 杨崇新

秘书长 杨崇新

副秘书长 邢海鹰 谢晓阳

委员 (按姓氏笔画排序)


才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
李德仁	李德毅	杨伟	肖志力
吴宏鑫	张文栋	张信威	陆军
陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
傅惠民	魏炳波		

# 序 言

如何对关键军事设备科学定寿与延寿,成为军事设备健康管理的重大问题,对于保障其安全可靠运行、随时处于良好的战备状态具有重大意义。2004年,美国国防部将具备寿命预测能力作为采购武器系统的必需要求;2006年,我国《国家中长期科学发展规划纲要》将复杂设备和重大设施的寿命预测技术部署为重点发展的前沿技术。准确预测设备剩余寿命是实现其科学定寿与延寿的重点和难点问题。由于这类设备本身的复杂性、执行训练与作战任务的多样性,其健康状态演化规律难以进行机理建模,而寿命试验方法对于代价高昂、小样本的军事设备容易造成难以承受的费用支出。对于这类设备,数据驱动的剩余寿命预测技术,可显著提升寿命预测性能、减少试验费用,已成为国际上可靠性工程和自动化技术领域研究前沿。鉴于此,建模系统性退化过程的测量数据、发展数据驱动的剩余寿命预测理论和方法,具有重要理论意义和工程应用价值。

目前,如何利用设备退化测量数据,提升其性能退化建模及剩余寿命预测能力,成为制约数据驱动剩余寿命预测技术发展的关键科学问题。我欣喜地看到第二炮兵工程大学的年轻教员司小胜同志以及胡昌华教授率领课题组在剩余寿命预测领域坚持不懈研究,在数据驱动的设备剩余寿命预测理论及应用方面取得了一些重要进展:首次提出并研究了数据驱动寿命预测中的逆问题——如何在寿命预测性能约束下,确定数据中测量误差参数的可行域;针对线性随机退化设备,提出了剩余寿命自适应预测方法、多层不确定性下的剩余寿命预测方法,解决了退化轨迹依赖的剩余寿命预测精确封闭解的求解难题;率先开展了非线性随机退化过程建模及剩余寿命估计研究,提出了一类新颖的、一般性的非线性随机退化过程建模与剩余寿命预测方法;提出了随机退化设备的剩余储存寿命预测方法。这些研究工作具有相当的难度和挑战性,是该领域前沿性、开拓性的研究,取得的研究成果富有创见,丰富和发展了剩余寿命预测的理论、模型和方法。

本书理论研究与工程实例验证紧密结合,对推动设备剩余寿命预测理论及应用研究的发展具有重要作用,对促进可靠性工程、随机建模、数据分析等相关科技领域的发展也有重要的意义,对从事寿命试验设计、分析、管理的人员,从事健康管理系統验证和设计的科技人员,从事设备寿命预测理论、故障预测理论及应用研究的科技人员具有重要的参考价值。因此,欣然成序,以期更多的同志关注和参与这方面的研究。

中国科学院院士 

# 前 言

随着高新技术的发展和人们探索自然领域的拓展,许多设备变得越来越复杂。这些设备由于其机械的复杂性和其他各种因素的影响(如磨损、外部冲击、负载、运行环境的变化),其性能及健康状态将不可避免地发生退化,进而造成系统最终的失效。而一旦发生由于失效引起的事故,所造成的人员财产损失甚至环境破坏往往是不可估量的。因此,在系统运行过程中,如果能在其性能退化的初期,尤其在还没有造成重大危害时,根据监测信息,及时发现异常或定量评价系统健康状况、预测系统的剩余寿命,并在此基础上确定对系统维护的最佳时机,对于切实保障复杂系统的运行安全性、可靠性与经济性具有重要的意义。

近 10 年来,随着对关键系统的可靠性和安全性要求的不断提高、装备采购费用和使用与保障费用的不断增长、状态监测技术的不断进步,准确地评估与预测系统未来一段时间发生失效的概率已经成为国内外学者研究的热点问题。工程实践表明,预测与健康管理工作可以降低维修保障费用、提高系统的完好率和任务的完成率,这对于安全性和可靠性要求较高的领域显得尤为重要。

预测与健康管理的核心问题是通过状态监测得到的数据,预测系统的剩余寿命,依据这些信息确定系统的最优维护时机,以实现经济成本最小或系统失效风险最小,最终达到基于状态的预测维护和自主式保障。在这一问题中,通过状态监测得到的退化数据,预测系统的剩余寿命是实现健康管理的关键。对于剩余寿命预测方法的研究,在过去 20 年得到了国内外学者的广泛关注和长足的发展。现有的剩余寿命预测方法可以分为三类:基于机理模型的方法、数据驱动的方法和前两者相融合的方法。随着科学技术的发展和进步,现代工业过程、生产制造系统、航空航天系统、军事装备等现代化水平不断提高,系统的复杂性和不确定性也随之增加,难以建立准确的机理模型。相比之下,数据驱动的方法为解决这类设备的控制、决策、优化、管理提供了可行的途径。

数据驱动的方法泛指一类不需要事先已知设备精确机理模型便能对其实现控制、预测、管理的方法,主要包括人工智能方法和统计数据驱动的方法。人工智能方法一般利用得到的数据,通过机器学习以拟合系统性能变量的演化规律,进而通过外推性能变量到失效阈值以实现剩余寿命的预测,难以得到体现剩余寿命随机不确定特征的概率分布函数。但是,剩余寿命预测主要是为系统健康管理策略与最优维护时机的确定服务的,在这些相关的决策中,一般以单位时间期望费用为优



化目标函数,其计算需要剩余寿命的概率分布。另一方面,剩余寿命预测是根据当前得到的监测信息,预测当前时刻到系统失效时刻的有效时间间隔,即对将来失效事件预测。因此,预测的结果不可避免地具有不确定性。相比之下,统计数据驱动的方法以概率统计理论为基础,通过统计或随机模型对监测数据进行建模,在概率论的框架下对剩余寿命的分布进行推断与预测,不仅可以对系统的性能退化进行建模,也可推断出系统剩余寿命的概率分布,便于量化预测结果的不确定性,从而为健康管理提供前提基础。

国家对于重大设施和装备的寿命预测与健康管理技术的研究给予了高度的重视。在2006年发布的《国家中长期科学和技术发展规划(2006—2020)》中将重大产品和重大设施的寿命预测技术列为重点发展的方向;2011年科技部颁布的《国家“十二五”科学和技术发展规划》中明确指出,围绕空间科学和航空航天等事关经济社会发展的重大科学问题,继续加强重大工程健康状态的检测、监测等基础研究是重点部署的研究方向之一;2012年工业与信息化部印发的《高端装备制造业“十二五”发展规划》中将健康维护技术列为重点发展的方向之一。很明显,设备的剩余寿命预测问题已成为迫切需要解决的突出科学问题和重大工程问题,是国家非常重视的重要发展方向。

数据驱动的设备剩余寿命预测是一个有着重要理论意义和工程应用价值的科学问题,解决这类问题的主要瓶颈在于:设备的性能退化规律与剩余寿命预测模型建模方法。本书作者长期从事设备的寿命预测技术的理论方法研究和应用验证工作。本书将在概率随机建模的框架下,介绍数据驱动的设备剩余寿命预测方法以及作者在这一领域的最新研究成果。

本书第1章综述了设备剩余寿命预测技术的发展现状,重点讨论了数据驱动的剩余寿命预测研究存在的问题和发展趋势。第2章探讨了基本退化数据的剩余寿命预测研究中数据的可用性问题,并对随机退化模型的选择、数据测量误差对最优维护决策的影响进行了分析。第3章~第5章主要针对线性随机退化的设备,分别介绍了剩余寿命的自适应预测方法、退化轨迹依赖的剩余寿命预测的精确封闭解的求解方法以及多层不确定性下的剩余寿命预测方法。这部分丰富和发展了线性随机退化设备的剩余寿命预测研究,揭示了数据对剩余寿命预测的影响。第6章和第7章将基本退化数据的剩余寿命预测的研究对象由线性随机退化设备拓展到非线性随机退化设备,分别介绍了非线性随机退化过程建模和剩余寿命预测方法、隐含非线性退化状态估计与剩余寿命自适应预测方法、参数在线更新方法等。第8章主要针对存在状态切换的随机退化设备,重点探讨了存在储存-工作两种状态切换时的剩余储存寿命预测方法。本书包含了作者在基本退化数据的剩余寿命预测领域的最新研究成果。

本书涉及的研究成果得到了众多科研机构的支持。特别感谢国家自然科学基金委员会对杰出青年基金项目“数据驱动的导弹故障诊断与预测维护技术”

(61025014)、重点项目“复杂工程系统故障预测与预测维护理论及关键技术研究”(60736026)、面上项目“统计数据驱动的剩余寿命估计若干关键问题研究”(61174030)和青年项目“数据驱动的伺服系统故障预测与健康关键技术研究”(61104223)的资助。本书的作者之一司小胜同志在清华大学的周东华教授和北京科技大学的王文彬教授的指导下开展了许多的研究工作,得到了他们持续的支持,受益匪浅。在本书正式出版之际,谨向他们表示衷心的感谢。

由于理论水平有限,以及所做研究工作的局限性,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。

作者

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 引言 .....	1
1.2 预测与健康管理的研 究 进 展 .....	4
1.3 数据驱动的剩余寿命预测综述 .....	5
1.3.1 基于直接监测数据的剩余寿命预测 .....	7
1.3.2 基于间接监测数据的剩余寿命预测 .....	13
1.4 本书概况 .....	17
<b>第 2 章 寿命预测性能约束下的数据测量误差可行域分析</b> .....	20
2.1 引言 .....	20
2.2 问题提出和基本定义 .....	20
2.2.1 问题提出 .....	20
2.2.2 基本定义 .....	24
2.3 考虑测量误差和不考虑测量误差时寿命预测的性质 .....	25
2.3.1 不考虑测量误差时寿命预测的性质 .....	26
2.3.2 考虑测量误差时寿命预测的性质 .....	27
2.4 寿命预测性能约束下测量误差参数的可行域 .....	31
2.4.1 考虑与不考虑测量误差时寿命预测差异的性能测度 .....	31
2.4.2 变化系数相对增加率下测量误差参数的可行域 .....	33
2.4.3 方差相对增加率下测量误差参数的可行域 .....	35
2.4.4 相似性测度下测量误差参数的可行域 .....	36
2.5 带随机测量误差的寿命预测对维修决策的影响 .....	44
2.6 实例研究 .....	47
2.6.1 数值例子 .....	47
2.6.2 惯性导航系统实例验证 .....	50
<b>第 3 章 线性随机退化设备的剩余寿命自适应预测方法</b> .....	59
3.1 引言 .....	59

3.2	线性随机退化设备的退化建模 .....	60
3.2.1	基于线性随机退化模型的使用寿命分析方法概述 .....	60
3.2.2	线性随机退化设备建模 .....	62
3.3	剩余寿命自适应预测 .....	64
3.4	随机模型参数估计算法及其收敛性分析 .....	66
3.4.1	期望最大化算法 .....	67
3.4.2	线性随机退化模型参数自适应估计算法 .....	68
3.4.3	模型参数自适应估计算法的收敛性分析 .....	72
3.5	实例研究 .....	75
3.5.1	问题描述 .....	75
3.5.2	惯性导航系统剩余寿命预测结果 .....	76
3.5.3	比较研究 .....	78
<b>第4章</b>	<b>线性随机退化设备剩余寿命预测的精确封闭解 .....</b>	<b>83</b>
4.1	引言 .....	83
4.2	依赖于退化轨迹的剩余寿命自适应预测方法 .....	84
4.2.1	基于随机过程的退化模型的一般性描述 .....	84
4.2.2	依赖于退化轨迹的剩余寿命自适应预测方法 .....	85
4.3	线性随机退化模型及剩余寿命预测 .....	87
4.4	指数随机退化模型及剩余寿命预测 .....	97
4.5	验证研究 .....	105
4.5.1	数值例子 .....	105
4.5.2	惯性导航系统实例研究 .....	110
<b>第5章</b>	<b>多层不确定性下的设备剩余寿命预测方法 .....</b>	<b>115</b>
5.1	引言 .....	115
5.2	问题描述 .....	116
5.3	三层不确定性下设备的剩余寿命预测 .....	118
5.3.1	情况1时的剩余寿命预测 .....	119
5.3.2	情况2时的剩余寿命预测 .....	124
5.3.3	情况3:三层不确定性下的剩余寿命预测 .....	127
5.4	模型参数可辨识性与估计方法 .....	137
5.5	实例研究 .....	140
5.5.1	实例问题描述 .....	141
5.5.2	模型拟合度比较 .....	142
5.5.3	剩余寿命预测比较 .....	144

<b>第 6 章</b>	<b>非线性随机退化建模与剩余寿命预测方法</b>	150
6.1	引言	150
6.2	启发性实例与非线性随机退化建模	151
6.2.1	启发性实例	151
6.2.2	非线性随机退化过程建模	154
6.3	非线性随机退化设备的剩余寿命预测	155
6.3.1	寿命分布的推导	155
6.3.2	考虑个体差异时的剩余寿命预测	163
6.3.3	考虑测量不确定性时的剩余寿命预测	166
6.4	非线性随机退化模型的参数估计	170
6.5	实例研究	173
6.5.1	激光发生器的退化数据	174
6.5.2	航空铝合金材料 A2017 - T4 的疲劳裂纹增长数据	177
6.5.3	惯性导航系统陀螺仪漂移退化数据	180
<b>第 7 章</b>	<b>隐含非线性退化建模与剩余寿命在线预测方法</b>	184
7.1	引言	184
7.2	问题描述与剩余寿命预测	185
7.2.1	问题描述	185
7.2.2	剩余寿命预测	186
7.3	参数在线估计算法	189
7.4	三种非线性函数下的具体实现	191
7.4.1	三种非线性函数形式下剩余寿命分布的推导	191
7.4.2	三种状态空间模型对应的参数估计方法	193
7.5	数值算例	196
7.5.1	数值仿真验证	196
7.5.2	补充的数值算例	200
7.6	实例验证	203
7.6.1	问题描述	203
7.6.2	实验结果分析	204
<b>第 8 章</b>	<b>存在状态切换的设备剩余储存寿命预测方法</b>	207
8.1	引言	207
8.2	问题描述	208
8.3	设备储存 - 工作状态切换过程建模	210

8.3.1	随机时变的设备运行过程 .....	210
8.3.2	设备运行过程参数的 Bayesian 估计 .....	212
8.4	设备退化过程建模与剩余储存寿命预测 .....	215
8.4.1	固定设备运行过程与模型参数下的剩余储存寿命预测 .....	215
8.4.2	退化过程参数的 Bayesian 估计 .....	219
8.4.3	随机时变设备运行过程下的剩余储存寿命预测 .....	221
8.5	实例研究 .....	223
8.5.1	问题背景与数据描述 .....	223
8.5.2	结果与讨论 .....	225
附录 A	方程 (2.101) 和方程 (2.102) 的推导 .....	229
附录 B	引理 5.2 和引理 5.3 的证明 .....	231
参考文献	.....	233

# Contents

<b>Chapter 1 Overview</b> .....	1
1.1 Introduction .....	1
1.2 Advances in prognostics and health management .....	4
1.3 Review on data – driven remaining useful life prediction methods .....	5
1.3.1 Methods based on directly observed data .....	7
1.3.2 Methods based on indirectly observed data .....	13
1.4 Outline of book .....	17
<b>Chapter 2 Permissible area analyses of measurement errors with required lifetime prediction performance</b> .....	20
2.1 Introduction .....	20
2.2 Problem description and basic definitions .....	20
2.2.1 Problem description .....	20
2.2.2 Basic definitions .....	24
2.3 Properties of lifetime prediction with/without measurement error .....	25
2.3.1 Properties of lifetime prediction without measurement error .....	26
2.3.2 Properties of lifetime prediction with measurement error .....	27
2.4 Permissible area of measurement error parameters .....	31
2.4.1 Performance measures to quantify the difference with/without measurement error .....	31
2.4.2 Permissible parameters using coefficient of variation .....	33
2.4.3 Permissible parameters using variance .....	35
2.4.4 Permissible parameters using similarity measure .....	36
2.5 Effect of lifetime prediction with measurement on maintenance decision .....	44
2.6 Experimental studies .....	47

2.6.1	Numerical example .....	47
2.6.2	Case study of inertial navigation system .....	50

**Chapter 3 Adaptive remaining useful life prediction method for linear stochastic degrading equipment .....** 59

3.1	Introduction .....	59
3.2	Degradation modeling for stochastic degrading equipment .....	60
3.2.1	Overview of lifetime analysis methods for stochastic degrading equipment .....	60
3.2.2	Linear degradation modeling for stochastic degrading equipment .....	62
3.3	Adaptive remaining useful Life prediction .....	64
3.4	Parameters estimation algorithm of stochastic model and its convergence analysis .....	66
3.4.1	Expectation maximization algorithm .....	67
3.4.2	Adaptive parameters estimation algorithm for linear stochastic degradation model .....	68
3.4.3	Convergence analysis of adaptive parameters estimation algorithm .....	72
3.5	Case study .....	75
3.5.1	Problem description .....	75
3.5.2	Predictive results of inertial navigation system .....	76
3.5.3	Comparative results .....	78

**Chapter 4 Exact and closed – form solution to remaining useful life prediction of linea stochastic degrading equipment .....** 83

4.1	Introduction .....	83
4.2	Adaptive remaining useful life prediction depending on degradation paths .....	84
4.2.1	A general description of stochastic process based degradation model .....	84
4.2.2	Adaptive remaining useful life prediction method relying on degradation paths .....	85



4.3	Linear stochastic degradation model and remaining useful life prediction .....	87
4.4	Exponential stochastic degradation model and remaining useful life prediction .....	97
4.5	Verification study .....	105
4.5.1	Numerical example .....	105
4.5.2	Case study of inertial navigation system .....	110
<b>Chapter 5</b>	<b>Remaining useful life prediction with three – level variability .....</b>	<b>115</b>
5.1	Introduction .....	115
5.2	Problem description .....	116
5.3	Remaining useful life prediction with three – level variability .....	118
5.3.1	Remaining useful life prediction in Case 1 .....	119
5.3.2	Remaining useful life prediction in Case 2 .....	124
5.3.3	Remaining useful life prediction in Case 3 .....	127
5.4	Model identifiability and parameter estimation method .....	137
5.5	Practical case study .....	140
5.5.1	Problem description .....	141
5.5.2	Comparisons for model fitting .....	142
5.5.3	Comparisons for the predicted remaining useful life .....	144
<b>Chapter 6</b>	<b>Nonlinear degradation modeling and remaining useful life prediction method .....</b>	<b>150</b>
6.1	Introduction .....	150
6.2	Motivating examples and nonlinear stochastic degradation modeling .....	151
6.2.1	Motivating examples .....	151
6.2.2	Nonlinear stochastic degradation modeling .....	154
6.3	Remaining useful life prediction for nonlinear stochastic degrading equipment .....	155
6.3.1	Derivation of lifetime distribution .....	155
6.3.2	Remaining useful life prediction with individual variability .....	163
6.3.3	Remaining useful life prediction with uncertain	