

本书得到了国家自然科学基金重点项目（项目编号：71632008）、国家自然科学基金项目（项目编号：71371123）、教育部人文社会科学研究青年基金项目（项目编号：15YJCZH096）、第六批上海市属高校应用型本科试点专业建设项目上海理工大学工业工程专业（沪教委高2018[65]号）的资助。



大数据驱动的设备健康预测 及维护决策优化

| 董 明 刘勤明◎著



非外借



清华大学出版社



大数据驱动的设备健康预测 及维护决策优化

董明 刘勤明◎著

清华大学出版社
北京

内 容 简 介

本书是近几年作者对设备健康预测及维护领域的研究成果及经验总结,可以作为管理科学与工程、工业工程等专业研究生科研辅助资料,使其了解设备的运行状态、衰退趋势以及采取的维护策略。本书共分五个专题:国内外相关研究述评,单监测信息的在线健康预测,多监测信息的在线健康预测,设备集成动态维护,设备维护调度。每一个专题都有引言部分和小结部分,通过引言的学习,研究生可以掌握本专题的基本观点、原理和模型方法;通过小结的学习,研究生对本专题有一个全面的认知和应用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

大数据驱动的设备健康预测及维护决策优化/董明,刘勤明著. —北京:清华大学出版社,2019

(清华汇智文库)

ISBN 978-7-302-49632-8

I. ①大… II. ①董… ②刘… III. ①数据管理—设备管理 IV. ①TP274

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 031755 号

责任编辑:杜 星

封面设计:汉风唐韵

责任校对:宋玉莲

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

邮 编:100084

社 总 机:010-62770175

邮 政 电 话:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市吉祥印务有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:170mm×230mm 印 张:12.5 插 页:1 字 数:222千字

版 次:2019年1月第1版

印 次:2019年1月第1次印刷

定 价:98.00 元

产品编号:078227-01

F 前言

Foreword

随着现代信息技术、物联网及大数据的快速发展,数据驱动的设备健康预测、维护及运行状态,对企业生产经营和经济效益的影响也日益显著。设备的可靠性和有效维护保障了企业正常运行,是企业生存的必要条件。因此,高效的设备维护在企业生产经营中的作用和地位日益突出,是企业降低生产成本和保证生产效率的基础。半个多世纪以来,不少学者针对设备的维护进行了许多研究,但是,设备健康预测对维护策略影响方面的研究较少。

本书立足于过去几十年国内外的设备健康预测与维护相关的研究基础,利用数据分析了设备的运行状态,描述了设备的衰退趋势,实现了有效的在线健康预测,为设备的集成动态维护提供了决策依据。首先,本书应用隐式半马尔可夫模型(Hidden semi-Markov-Model, HSMM)对设备在线运行过程中的健康进行识别与预测,提出了单监测信息在线健康预测方法。其次,基于单监测信息在线健康预测,探讨了多监测信息的在线健康预测方法。再次,基于设备在线健康预测和衰退性能的预测,建立了设备的集成动态维护模型,从而有助于设备维护领域的发展。最后,基于集成维护模型,描述了多部件设备维护调度的优化。

第1章是绪论部分,这部分主要阐述本书选题的背景、研究的技术路线,并且讨论了研究主要创新点和所期望达到的研究目标。

第2章是相关概念部分,描述了设备健康管理的发展历程,分析和探讨了已有设备健康预测、设备维护及调度的相关研究,包括对已有的研究进行回顾,评论已有方法的不足,确定需要进一步研究的方向。同时,给出了退化隐半马尔可夫模型的概念。

第3章研究了单监测信息的在线健康预测问题。基于 HSMM 和序列蒙特卡



洛(Sequential Monte Carlo, SMC)的联合优化,建立了一套完整的 HSMM 和 SMC 联合优化的在线健康预测模型,提出了一种联合多步向前健康识别算法,用于在线识别设备的健康状态,并且,建立了在线剩余寿命预测模型。目前,已有的单一方法、模型、算法很难满足设备的在线健康预测,本研究提出的联合模型,基于 HSMM 丰富的数学结构和 SMC 的在线特征,利用设备的健康预测对其性能状态进行量化,进而描述了设备的实际运行状况,为设备在线健康管理提供理论支持和决策依据。

第 4 章在单监测信息健康预测的基础上,建立了多监测信息的在线健康预测模型。为了更好地提高在线健康预测的精确度,基于单监测信息在线健康预测方法的思想,本书提出了多监测信息的在线健康预测方法。为了处理多监测信息和降低模型的计算复杂性,对 HSMM 的基本算法进行了修正,计算复杂性从 $O[(MD+M^2)T]$ 降低到 $O[(D+M^2)T]$ 。建立了自适应隐式半马尔可夫模型(Adaptive Hidden semi-Markov Model, AHSM),来处理多监测信息的在线健康预测问题,应用最大似然线性回归训练对输出概率分布和驻留概率分布进行自适应训练,处理多监测信息之间的差异性。结合修正的 HSMM 进行有效的多监测信息在线健康预测。在此基础上,本书提出了多监测信息的在线剩余寿命预测方法。同时,探讨了设备的在线健康管理,得到基于多监测信息的预测模型,并比较了两种健康预测方式的异同,给出了多源信息融合健康管理的启示与思考。

第 5 章在设备健康预测基础上,建立了基于在线健康预测的集成动态维护模型。不同于传统的维护方式,集成维护将设备的退化信息和老化信息引入维护模型中,结合设备的诊断信息和预测信息,以总的维护成本(故障成本、维护成本和资源成本)和总维护时间为目标,建立了两层集成动态维护模型。在传统的维护模型中,设备的维护资源只考虑了备件约束条件,而本书同时考虑了备件和维修人员的双约束条件。另外,针对小修和大修的维护方式,引入了维护风险因素,将维护风险因子集成到维护模型,提出了设备集成维护管理的建议和策略。

第 6 章在系统的维护策略的基础上,建立了基于集成维护模型的维护调度优化模型,针对多部件设备的特点,建立了多部件设备的维护拓展模型。多部件设备的维护决策包括性能衰退、维护方式和维护费用三部分。在性能衰退方面,通过在线诊断信息和预测信息得到设备故障率的变化趋势,用威布尔分布模拟设备的衰退过程;在维护方式方面,定义小修、大修和更换三种维护方式,分别描述了三种维护方式对设备故障率的影响;在维护费用方面,考虑了故障成本、维护成本、资源成

本和停机成本四部分,根据每次维护活动的费用模型,建立了多阶段的总费用率模型。本研究为多部件设备维护管理奠定了理论基础和决策依据。

第7章为研究工作的总结,给出了研究的结论,并讨论了多源状态信息下的设备在线健康预测、集成维护与设备衰退问题未来可能的研究方向。

本书的7章内容相互之间联系紧密,形成了一个数据驱动的系统性设备维护决策框架。基于单监测信息在线健康预测思想,提出了多监测信息的健康预测方法;基于在线健康预测,提出了考虑设备衰退性能和维护资源的集成动态维护模型。本书所做的研究内容有助于提高企业的维护水平和设备可靠性、降低维护成本、提高设备利用率,最终提高企业的竞争力。同时,拓展了制造系统的维护管理领域,为制造企业维护策略的制定提供决策支持和科学有效的指导。

本书得到了国家自然科学基金重点项目(项目编号:71632008)、国家自然科学基金项目(项目编号:71371123)、教育部人文社会科学研究青年基金项目(项目编号:15YJCZH096)的资助,笔者深表谢意。由于笔者的水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝批评指正。

董 明 上海交通大学

刘勤明 上海理工大学

2018-05-20

第 1 章 绪 论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 研究范围与对象	4
1.3 研究目的与创新点	5
1.4 研究框架	7
1.5 本章小结	8
第 2 章 设备维护的概念	9
2.1 引言	9
2.2 设备健康管理的历史发展	12
2.3 设备健康预测方法的研究及进展	14
2.3.1 基于物理模型的方法	15
2.3.2 基于知识驱动的方法	17
2.3.3 基于数据驱动的方法	20
2.3.4 基于模型驱动的方法	26
2.3.5 基于信息融合的方法	31
2.3.6 混合模型	32
2.4 设备维护方法的研究及进展	36
2.4.1 基于健康信息的维护	38
2.4.2 基于衰退过程的维护	40
2.4.3 基于备件库存的维护	41
2.5 设备维护调度方法的研究及进展	42
2.6 现有方法的不足	47
2.6.1 设备健康预测研究的不足	47



2.6.2	设备维护研究的不足	48
2.6.3	设备维护调度优化需要研究的问题	48
2.7	退化隐半马尔可夫模型	49
2.8	本章小结	56
第3章	单监测信息的在线健康预测	60
3.1	引言	60
3.2	设备在线健康预测方法	62
3.2.1	数据预处理及特征提取	62
3.2.2	在线健康预测算法	64
3.2.3	剩余有效寿命预测方法	68
3.3	算例分析	69
3.3.1	基于 HSMM 的健康诊断	71
3.3.2	数据准备与处理	73
3.3.3	模型参数估计	77
3.3.4	在线健康预测分析	78
3.3.5	预测性能评估	82
3.4	本章小结	85
第4章	多监测信息的在线健康预测	86
4.1	引言	86
4.2	特征空间降维	87
4.3	设备在线健康预测方法	88
4.3.1	修正隐式半马尔可夫模型	88
4.3.2	自适应隐式半马尔可夫模型	92
4.3.3	剩余有效寿命预测方法	94
4.4	算例分析	97
4.4.1	数据准备	97
4.4.2	在线健康状态识别分析	98
4.4.3	在线健康预测分析	101
4.4.4	预测性能评估	103
4.5	本章小结	106
第5章	基于在线健康预测的集成动态维护研究	107
5.1	引言	107

5.2	衰退过程分析	112
5.3	维护动作与维护时间分析	114
5.4	集成动态维护模型	117
5.4.1	基本假设和符号	117
5.4.2	维护成本分析	119
5.4.3	基于动态规划算法维护策略优化模型	123
5.4.4	维护策略优化算法	127
5.5	算例分析	129
5.5.1	数据准备	129
5.5.2	其他维护策略	133
5.5.3	维护结果分析	134
5.5.4	备件库存策略分析	137
5.5.5	策略动态性分析	138
5.6	本章小结	141
第6章	基于集成维护模型的维护调度优化研究	143
6.1	引言	143
6.2	设备维护调度优化模型	144
6.2.1	设备维护调度决策	144
6.2.2	遗传算法	151
6.3	案例分析	153
6.3.1	数据准备	154
6.3.2	算法设计	157
6.3.3	维护调度比较分析	157
6.3.4	考虑调整因子的维护调度分析	163
6.4	本章小结	165
第7章	总结与展望	166
7.1	结论	166
7.2	展望	168
参考文献		170

第 1 章

绪 论

1.1 研究背景和意义

当前,随着经济与科学技术的飞速发展,对设备的高可靠性要求日益增加,企业的生产需求也急剧增加,因而也提高了企业对生产设备管理的要求。企业在满足其最高产能的前提下,要求实现生产管理的高有效性、可靠性,低生产风险性及高生产安全性。在企业的生产管理中,设备管理是其一个重要的组成部分,设备管理的水平及可靠性会影响企业的持续发展、生产水平及其生产效率等。设备故障的意外发生,通常会增加企业的设备维护支出,因为在绝大多数正常情况下,设备发生故障导致的事后维修支出相较日常设备的预防性维护支出而言,要高出许多。除去维修费用,设备故障造成的计划外停机也会造成生产及与生产相关的一系列损失,使企业蒙受巨大的损失。据调查,未纳入计划的一天停工,其经济损失可高达 10 万~20 万欧元^[1]。

设备是企业进行正常生产运转的技术基础,如果设备在生产使用过程中,未进行有效的维护,就可能会失效或者发生故障,对企业来说,这不仅会增加相应的设备维护成本,影响企业的生产效率,还会降低生产线上的在制品质量,从而造成企



业的巨大损失。对企业来说,由于低效或者无效的维护,维护费用的三分之一或者二分之一都浪费了^[2]。因而,通过对设备进行合理有效的维护来降低故障发生率,已成为企业降低生产成本、提高生产效率和市场竞争力的重要手段之一。

工业设备和生产系统操作的可靠性对生产型企业的盈利能力和竞争能力都有重要影响,这使企业对工业生产过程和生产设备维护策略重要性的关注日益增加。维护,是指为了保持或恢复设备系统处于正常执行预定功能状态,而进行的所有相关技术和管理活动。维护最基本的作用是延长设备的使用寿命,避免事故的发生和技术性灾难,为生产节约、节省原材料和动力资源从而减少生产费用,提高生产利润和投资回报率^[2]。对企业生产管理而言,制定一个行之有效的维护管理系统是非常必要的。它可以将维护成本维持在一个较低水平,同时使所有的设备都保持高效率的运作。近年来,随着设备维护研究的不断深入,以及实践的实施验证,企业管理人员和研究人员对维护管理领域的认知也在逐步提高,新的维护理念与方法、新的应用领域都不断出现^[3],主要表现如下。

(1)第三方运营维护的出现,外部社会化维护资源的介入使工业制造型企业不再依赖企业内部提供的维护资源。

(2)维护不再是一种单纯消耗企业资源的活动,而被看作是创造企业利润的来源。优化的维修策略可直接作用于生产率的提高上,从而为企业创造更多利润。

(3)设备维护管理不再只关注设备故障本身,还将与设备故障相关的许多因素,如维修后设备状态、维修成本、停工损失等,都纳入维护决策的考虑和优化的过程中。

(4)设备维护管理不再被视为孤立的管理活动单独进行,它开始与企业的其他管理职能,如库存管理、生产计划制订等相结合,共同拟订一个集成的生产维护采购计划,以取得更大的效益。

设备的主要前期维护方式包括两大类:出现故障后采取的恢复性维护方式和保持设备良好运转状态的预防性维护方式^[3,4]。

其一,事后维护。表示设备出现故障后对其采取的维护方式,也就是说,设备坏了才进行维修,如果设备没有故障,就不进行维修。事后维护是一种无计划性的被动维修方式。

其二,预防维护。表示设备在生产中以预防故障为主要目的,对设备进行检查和检测,防止设备故障发生或者发现设备的故障征兆,使设备保持最初的功能状态,在故障发生之前所进行的各种维护、维修活动。

设备维护管理在经历了事后维护、预防维护阶段后,出现了一种新的设备维护方式,即状态维护(condition based maintenance, CBM)。在状态维护过程中,监测设备的工作状态及环境,通过传感器获得设备的实时状态信息,利用先进的数据处理技术对监测到的设备信息进行分析,从而获得当前的健康诊断状况,并通过一系列的设备诊断预测方法来预测设备的有效寿命,合理地确定设备的维护计划及维护时间。有效实施状态维护主要包括两个方面:诊断和预测。诊断主要表示设备出现运转异常时,对设备的故障进行诊断、判断及处理。预测主要表示设备出现故障前,对设备的状态进行预测。随着生产技术的不断发展,机械设备复杂性在提高的同时,也增加了企业生产系统的复杂性,因此,设备的诊断和预测会面临更大困难。

在新的设备维护方式中,设备的健康预测作为新兴的研究内容,被引入设备的维护研究领域,并且成为当前研究的一个热点问题。随后不久,设备的健康预测获得了蓬勃的发展,但是,在发展过程中出现的一些预测方法在使用过程中缺乏通用性,仅仅局限于某些特定的领域,如航空领域、汽车领域、国防领域等^[5],并且,已有的许多预测模型是建立在对设备的监测信息进行技术处理与分析的基础上的。在维护策略的优化研究中,对传感器检测信息的分析建模有利于设备健康预测方法的发展,促使设备在诊断当前健康状态时,还能够有效地预测未来状态的发展趋势。然而,对于目前的预测模型,大多数都是离线对设备进行健康预测,为了使预测的设备状态与设备的实际状态更加吻合,进行了单监测信息的设备在线健康预测,在此基础上,进一步研究了多监测信息的在线健康预测。在设备的维护过程中,高准确性和可靠性的设备健康预测结果是保证设备维护效果的重要因素,并影响生产安全性的提升、生产任务的合理制定、设备维护策略的有效实施、设备维护成本的降低,以及设备生产停工时间的减少等方面。虽然有效的在线健康预测是很难的研究内容,但是,设备的在线健康预测技术及方法模型仍是研究的热点领域。进行设备健康预测的意义主要体现在以下方面。

(1)从经济角度考虑,准确有效的在线健康预测可以为减少设备停机时间、提高设备的利用率、保证设备的持续使用提供基础,可以保障企业在规定的时间完成预期的工作任务,从而提高客户的满意度和企业的效益。同时,后续基于在线健康预测的设备维护,也为企业带来了合理有效的维护决策。

(2)从安全角度考虑,设备的故障或者突发故障可能会带来难以估算的安全隐患,比如航天设备、核电设备、矿山设备等,一旦发生故障,会造成人员伤亡和企业



的经济损失。如果进行合理、有效、精确的在线健康预测,就可以在设备恶化或者衰退前,对其进行合理的维护决策,从而减小设备的安全隐患。

(3)从生产角度考虑,合理有效的在线健康预测可以为企业的维护决策提供依据,可以实现用最少的备件库存满足最大的维护操作,进而降低企业的备件库存费用。

在对设备健康预测的相关模型方法进行总结归纳的基础上,本书拓展和改进健康预测方法,提出了单监测信息和多监测信息的在线健康预测方法。基于设备监测信息的健康预测,反映了设备健康预测模型的个体特征;同时,由于设备的监测信号具有实时性,提出的在线健康预测模型不断更新,因而,实时追踪设备当前最新的健康状态可以反映设备健康预测模型的更新特征,是十分有意义的研究。

在现实中,维护不仅局限于制造业领域,也在其他行业也得到了极大的关注与应用(如服务行业),如医院里大型贵重医疗器械的维护^[6],公共设施如桥梁道路的维护^[7,8],物流行业的车辆更新^[9]等对于各个行业不同的维护对象,最终的维护目标都是降低其成本,提高设备的利用率和竞争力。目前,针对设备的维护问题,设备的诊断信息发挥着重要的作用,随着对维护要求的提高,在设备的维护过程中,需要同时考虑设备的预测信息。在本书中,基于设备的在线健康预测,可获得设备的诊断信息和预测信息,对设备进行全面维护,可以满足企业的多样化需求,消除企业提高生产率的“瓶颈”问题。对基于状态监测信息的预测与系统性设备维护管理从理论和方法方面进行研究,并在此基础上实现预测性维护,可以获得巨大的经济效益。

1.2 研究范围与对象

优化的维护策略可以分为数据采集、信号处理和维护决策三个部分。数据采集表示数据收集和存储目标设备有用数据的过程;信号处理表示处理和分析数据以更好获得设备健康状态的过程;维护决策表示基于设备健康预测,制定有效维护策略的过程。维护决策包含两个基础内容:设备健康诊断与设备健康预测。本书主要研究了基于设备诊断和预测信息的单监测信息与多监测信息的在线健康预测

模型,进而发展到设备的集成动态维护与设备的维护调度研究。因此,数据收集的方法如传感器选型、传感器布置,信号处理方法如信号降噪等都不是本书所要研究的内容。

本书是以液压泵为研究对象,来阐述整个文章的内容的。液压泵是液压系统的动力元件,其作用是将原动机的机械能转换成液体的压力能,液压系统中的油泵向整个液压系统提供动力。液压泵是靠密封容积的变化来实现吸油和压油的,故可称为容积泵。其工作过程就是吸油和压油过程。液压泵组成的系统主要有以下五部分:①能源装置,它是供给液压系统压力油,把机械能转换成液压能的装置。②执行装置,它是把液压能转换成机械能的装置。③控制调节装置,它是对系统中的压力、流量或流动方向进行控制或调节的装置。④辅助装置,上述三部分之外的其他装置,如油箱、滤油器、油管等。它们对保障系统正常工作是必不可少的。⑤工作介质传递能量的流体,即液压油等。液压泵一般包括以下部件:缸体、偏心轮、柱塞、吸油阀、排油阀、传动轴、中心弹簧、斜盘。

首先,基于液压泵的监测信息,提出了液压泵单监测信息的在线健康预测模型,在此基础上,提出了液压泵的多监测信息的在线健康预测。其次,基于在线健康预测模型,提出了液压泵整体的集成动态维护模型。液压泵这一类设备,都是由多部件所组成的,因此,在液压泵整体维护模型的基础上,进一步考虑并分析该类设备的维护调度问题。

1.3 研究目的与创新点

目前,由于工业界对预防性维护技术的需求,故障诊断领域的研究重点已逐步转向状态监测、预测性维修和故障早期诊断。预测主要采用自动化的模型探测、诊断和分析物理系统性能的退化,并计算在不可接受的性能退化发生前,设备处于可接受工作状态内的有效剩余寿命。退化分析的主要功能是指研究涉及物理属性的演变,或者导致设备失效的性能测量标准。准确并可靠的预测分析结果是成功执行基于状态的工程系统维护的关键因素,并且它对安全性能的改进、任务的规划、维修时间表的制定、降低维修成本和减少停工时间等都起着至关重要的作用。



在分析国际设备健康状态预测技术的发展并完成相关文献综述的过程中,本书分析比较了各种预测技术的优缺点。其中,隐式马尔可夫模型(Hidden Markov model, HMM)在模式识别领域有着很好的应用,近年来才被引入机械设备健康诊断领域中,并有了一定应用。但 HMM 技术的局限性使它应用于复杂系统的建模时,难以对真实情况做出高精确度的建模,导致其结果可靠度不高。隐式半马尔可夫模型是 HMM 的衍生模型,在定义完全的 HMM 结构上加入了时间组成部分,克服了因马尔可夫链的假设所造成的局限性。在解决实际问题中,HSMM 能够提供更好的建模和分析能力,提高模式分类的精度。但 HSMM 很少应用于机械设备健康诊断和预测领域,且已有的 HSMM 也没有很好地描述设备的性能退化情况。在结合目前设备维护的实际情况的基础上,本书以单设备系统为研究对象,通过对基于状态的设备维护优化相关内容的研究,可看出本研究的目的与特色在于以下方面。

(1) 将考虑设备性能退化的隐式半马尔可夫模型与失效率结合,用于单监测信息的设备在线健康状态分析及寿命预测。

(2) 基于单监测信息的在线健康预测模型,考虑多监测信息的设备在线健康状态分析及寿命预测。

(3) 在考虑备件库存成本对维护成本与维护风险及维护效果都存在影响的情况下,基于在线健康预测分析数据优化设备动态维护策略。

(4) 在设备在线健康状态有效预测的基础上,考虑多部件设备预测性维护调度优化。基于集成维护模型,对多部件设备的维护调度进行优化分析。

针对以上研究目的,本研究从预测分析的实际运用角度出发,提出一个系统地应用于 CBM 的剩余寿命预测模型。在用于诊断设备健康状态和预测有效剩余寿命的 HSMM 中,引入老化因子来描述设备性能的退化趋势。与现有的 HMM 诊断模型比较,考虑了性能退化过程的 HSMM 更贴合设备在使用中的实际情况,能更精确地描述状态转移的过程。针对多监测信息的处理问题,设计了全新的 HSMM,在最大程度上融合了多监测信息。最后,在改进后的预测分析系统的基础上,对如何将预测分析数据运用到实际的设备动态维护策略中进行了探索研究,希望能进一步提高预测分析模型用于实际生产维护计划制订的可能性。在维护策略的制定上,兼顾了维护成本和设备利用率两个指标,同时在维护成本的设计中创造性地引入了备件库存成本。在四类成本的设置上,设备更换成本设为常数值,设备维护成本与操作成本是和系统状态及系统虚龄相关的函数(虚龄的具体设置见

第5章,其取值与设备的退化状态相关),备件库存成本与设备的维护策略相关。每次维护执行影响的设备状态参数有设备健康状态转移概率和设备虚龄两种。

围绕设备健康预测技术,开展了设备的维护优化研究,参照国内外最新的研究进展和成果,主要创新成果有以下几个。

(1) 针对单监测信息的离线预测缺陷和性能衰退特征,将衰退性能引入在线预测模型,提出了在线联合多步向前健康状态识别算法,描述了设备从正常工作状态到失效状态的一系列退化过程,实现了对设备健康状态的在线描述,建立了单监测信息在线健康预测模型,实现了在线健康预测和在线剩余寿命估计。

(2) 针对单监测信息的预测精度问题,利用最大似然线性回归方法对修正 HSMM 进行训练,提出了多监测信息在线健康预测方法(自适应 HSMM),建立了多监测信息的在线剩余寿命估计新方法,实现了多监测信息之间的有效融合,可以获得更符合实际的设备健康状态和剩余寿命。

(3) 针对传统的设备维护方式,将在线健康预测模型结合到设备的维护模型中。在设备的维护模型中,考虑了设备的衰退信息(退化信息和老化信息)、诊断和预测信息、资源约束(备件和维修人员)等,建立了基于在线健康预测的双层集成动态维护模型。针对系统的维护策略问题,以每次维护活动的费用和总的维护费用率为目标,基于设备健康预测与集成动态维护模型,考虑设备维护的调整因子、多部件之间的相关性和维护调度资源的约束,建立了多部件设备的维护调度优化模型。

1.4 研究框架

本书通过消化吸收设备健康状态诊断与预测的最新理论和研究成果,在对当前已有技术的优劣分类进行分析、比较、研究后,选取 HSMM 对设备的健康状态退化趋势进行预测,针对维护策略进行深入研究,将与维护策略密切相关的备件库存管理纳入维护策略的优化考虑中,在一定程度上拓宽了我国设备维护管理的研究领域,对于促进我国设备维护管理的发展具有较高的理论价值和现实意义。

本书的基本思路和组织框架如图 1-1 所示。

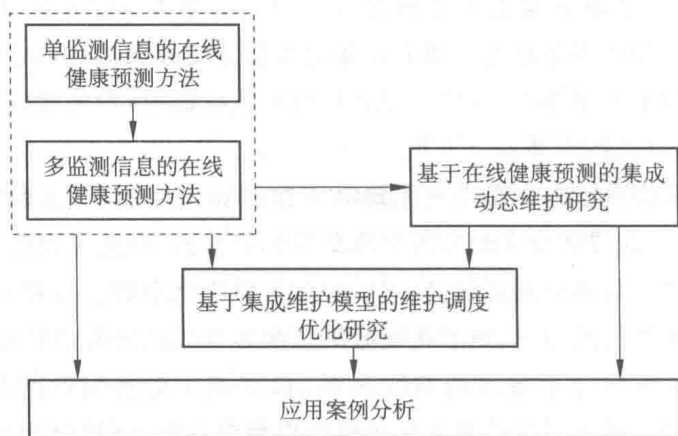


图 1-1 本书的基本思路和组织框架

1.5 本章小结

本章是全书的总体概述,概述性地介绍了相关的研究背景,在实践背景的基础上提出本研究主题,在理论背景的基础上将研究主题细化成具体的研究问题。围绕要解决的具体研究问题,本章介绍了相关的研究意义、研究目的、研究框架,以及结构安排和研究创新。本章既是全书的概述,又是全书研究的逻辑指导。