

生产系统预测性维护调度 优化研究

刘勤明 叶春明 著

Predictive Maintenance Scheduling Optimization of
Production System

管理
MANAGEMENT



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

本书由上海理工大学科技发展项目(2020KJFZ038)、
国家自然科学基金重点项目(71632008)、国家自然科学基金项目(71371123)、
上海市自然科学基金资助项目(19ZR1435600)、
教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(20YJAZH068)、
上海市课程思政改革领航学院(上海理工大学管理学院)和上海市课程思政改革领航团队(上
海理工大学工业工程团队)、
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
2015[65]号)资助出版

生产系统预测性维护调度优化研究

刘勤明 叶春明 著



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书立足于生产系统设备健康预测与维护的相关研究,利用数据分析了设备的运行状态,描述了设备的衰退趋势,实现了有效的健康预测,为设备预测维护提供了决策依据。首先,用隐半马尔可夫模型对存在老化现象的设备状态进行识别;其次,构建了不同数据缺失情况下的设备健康预测模型;最后,基于设备健康预测,构建了单设备、多部件设备、多设备生产系统的维护模型。本书的研究结论为制造企业管理者进行生产系统维护管理提供了有效的决策依据。

图书在版编目(CIP)数据

生产系统预测性维护调度优化研究 / 刘勤明,叶春明
著. —上海:上海交通大学出版社,2021
ISBN 978-7-313-24320-1
I. ①生… II. ①刘…②叶… III. ①生产调整-研究
IV. ①F273
中国版本图书馆 CIP 数据核字(2021) 第 027777 号

生产系统预测性维护调度优化研究

SHENGCHAN XITONG YUCEXING WEIHU DIAODU YOUHUA YANJIU

著 者: 刘勤明 叶春明
出版发行: 上海交通大学出版社
地址: 上海市番禺路 951 号
邮政编码: 200030
电 话: 021-64071208
印 刷: 常熟市文化印刷有限公司
经 销: 全国新华书店
开 本: 710mm×1000mm 1/16
印 张: 15.5
字 数: 293 千字
版 次: 2021 年 4 月第 1 版
印 次: 2021 年 4 月第 1 次印刷
书 号: ISBN 978-7-313-24320-1
定 价: 78.00 元

版权所有 侵权必究

告 读 者: 如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话: 0512-52219025

前 言

随着现代化工业技术的提高,生产系统中的设备正变得越来越复杂。这些设备一旦发生故障,不仅会带来严重的经济损失,还会给人身安全造成威胁。诊断设备当前所处的健康状态,并预测剩余有效寿命,能够为企业维护策略的制定提供理论依据。在实际生产中,由于人为因素和噪声、扰动等环境因素导致其健康预测中的样本数据会出现不确定的情况。不确定的样本数据会降低数据挖掘的能力,导致预测结果出现偏差,而可靠的预测结果作为开展设备状态维护的关键,在保障企业设备的安全性能、制定设备维护的计划以及降低维护成本等方面都发挥着重要的作用。

在诸多制造业企业中,设备是其最重要的财产,而围绕设备制订生产计划和维护计划是企业最重要的活动。生产活动的进行会造成设备故障率的上升,而维护活动则是对设备可能出现的故障加以消除,保证设备正常运转。若生产计划与维护计划的制订相脱离,势必导致设备维护过度或维护不充分等不良后果。因此,将生产计划与维护计划联合研究,既能充分发挥设备产能,满足生产需求;也能减少设备故障带来的不必要的停机,对降低维护成本具有重要的意义。

本书主要从以下十个方面进行探讨。

第1章是绪论部分,这部分内容主要阐述本书选题的背景、分析和探讨了已有设备健康预测、设备维护以及调度的相关研究,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。

第2章是设备维护的概念及理论部分,描述了设备健康管理的发展历程,同时给出了状态识别、剩余寿命预测、设备维护等概念。

第3章研究了数据完备情况下设备健康预测问题。针对设备在日常使用过程中存在的老化现象,设计了指数型和乘数型两种形式的老化因子,并且将不同形式的老化因子集成到改进的隐半马尔可夫模型(HSMM)中,更新状态概率转移矩阵,通过一个包含双重迭代估值算法对相应老化因子进行估值。最后,基于设备失效率函数,对设备的剩余有效寿命进行预测,提高了设备健康预测的精度。使用从液压泵上获取的实时监测数据,对不同形式的老化因子进行估值,选取似然值最大的老化因子获得设备的剩余有效寿命。并且,为了体现不同形式的老化因子在预测性能方面的差异,将不同形式老化因子的预测结果进行了对比分析。

第4章研究了数据不完备情况下设备健康预测问题。针对样本数据中存在缺失数据的情况,建立分段隐半马尔可夫模型(SHSMM)架构,并利用EM算法对SHSMM模型的参数进行估计。选择灰色启发式算法来填补监测样本中的缺失数据,并使用灰色启发式算法将填补好的完整数据样本输入SHSMM中来进行机械设备的健康预测。针对样本数据中存在异常数据的情况,基于提出的SHSMM模型,将样本数据中的异常值当作缺失值处理,设计了一个动态前向后向灰色填充方法。针对样本数据中存在不准确数据的情况,基于Dempster-Shafer(DS)证据理论和Markov链建立DS-MM理论框架,建立状态识别框架并用区间数表示不准确的数据,利用区间数之间的距离和相似度作为产生基本概率赋值(BPA)的证据,采用Pignistic概率转换将BPA转化为基础状态的概率分布并进行设备健康预测。

第5章在设备健康预测基础上,基于时间延迟理论,建立了考虑生产计划的单设备系统的维护模型。首先以单机系统设备为对象,研究优化维护费用的问题。考虑到实际生活中设备可能出现的不同程度的缺陷或故障,使用三阶段时间延迟理论,不同阶段定义不同的分布函数模拟设备的劣化过程。分析缺陷、故障发生的时刻与阈值时间点之间的关系,对维护情况进行分类,建立以单位时间维护费用最低为优化目标的模型。在此基础上,对部件串联的多产品生产系统的生产、维护综合计划展开研究,实现生产与维护总成本最低的目标。最后基于实际生产时间与可用生产时间的约束关系,建立总成本最低模型。

第6章在设备健康预测基础上,基于可靠度约束,建立了考虑生产计划的单设备系统的维护模型。针对单设备生产系统,为解决两种计划独立决策的不足,

防止因生产系统不满足可靠度标准而产生质量费用,构建了基于可靠度约束的生产计划和预防维护的集成计划模型。结合生产实际,为强化设备维护与生产的相关关系,考虑设备役龄对产品加工工时的影响,引入产品堕化效应;同时考虑设备闲置与生产的不同状态,基于设备的实际生产运行时间研究设备故障,制订维护和生产计划,实现生产与维护费用的总费用最低。

第7章在单设备维护优化基础上,基于集成动态维护模型,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内容,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。

第8章在单设备维护优化基础上,考虑生产与需求,建立多设备系统的维护优化模型。针对考虑生产多于需求或少于需求的情况下多设备系统的维护问题,建立了状态维护策略模型。首先构建状态的转移概率模型,并且针对不同状态采取两种维护策略;其次,基于半马尔可夫模型以损失成本和超额利润、检测成本、维护成本为优化目标,建立在不同策略下维护费用模型,求解不同状态下的维护策略。针对周期检测的由多个同类型设备组成的系统,根据在检测点观测的多设备系统的状态,从而确定维护需求和备件订购数量,基于半更新过程,建立一个周期内的以检查费用、维护相关费用和备件相关费用的平均费用率为目标函数的联合决策优化模型。

第9章在单设备维护优化基础上,针对生产系统由于发生故障将造成生产停滞、增加短缺成本的问题,构建了多情景模式下考虑产品次品率的预防维护模型。首先,分析缓冲区库存变化的轨迹,确定不同的缓冲区库存情景模式,构建生产周期内不同情景下缓冲区库存持有成本模型。其次,以预防性维护时的次品率阈值水平、建立缓冲区库存时次品率的阈值水平和缓冲区库存量大小为决策变量,以生产周期内单位时间总费用最小作为目标建立生产系统预防维护模型,总费用包括预防性维护费用、库存持有费用、返工费用、短缺费用、保修维护费用。

第10章为研究工作的总结,给出了研究的结论,并讨论了设备剩余寿命预

测、集成维护与设备衰退等问题未来可能的研究方向。

本书的 10 章内容相互之间联系紧密,形成了一个数据驱动的设备维护决策框架。基于设备健康预测思想,提出了数据完备和数据不完备两种情况下的设备健康预测模型;基于设备健康预测,提出了单设备系统、多部件设备系统、多设备系统以及租赁设备的维护模型。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)、上海市自然科学基金资助项目(项目编号:19ZR1435600)、教育部人文社会科学研究规划基金资助项目(项目编号:20YJAZH068)、上海理工大学科技发展项目(项目编号:2020KJFZ038)、上海市课程思政改革领航学院(上海理工大学管理学院)、上海市课程思政改革领航团队(上海理工大学工业工程团队)和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 2015[65]号)的资助,作者深表谢意。由于作者的水平有限,书中难免有不妥之处,敬请读者不吝批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.2 设备健康预测方法的研究及进展	4
1.2.1 基于物理模型的方法	4
1.2.2 基于知识驱动的方法	5
1.2.3 基于数据驱动的方法	6
1.3 设备维护方法的研究及进展	9
1.3.1 单设备维护方法	9
1.3.2 多设备维护方法	10
1.3.3 维护与备件订购方法	11
1.3.4 生产与维护联合优化方法	12
1.4 现有方法的不足	14
1.4.1 设备健康预测研究的不足	14
1.4.2 设备维护研究的不足	15
1.5 本章小结	16
第 2 章 设备维护的概念及理论	17
2.1 引言	17
2.2 设备剩余寿命预测	18
2.2.1 设备剩余寿命预测的概念	18
2.2.2 设备剩余寿命预测方法的分类	19

2.3	设备维护优化的基本流程	21
2.4	设备维护策略	22
2.4.1	维护策略类型	22
2.4.2	维护方式	26
2.5	多设备维护策略	26
2.6	本章小结	27
第 3 章	数据完备情况下设备健康预测	28
3.1	引言	28
3.2	HSMM 基础理论	28
3.3	改进的 HSMM	31
3.3.1	改进的前向—后向算法	31
3.3.2	改进的 Viterbi 算法	34
3.3.3	改进的 Baum-Welch 算法	36
3.4	基于改进 HSMM 的设备健康预测框架	38
3.4.1	基于改进 HSMM 的设备故障诊断	38
3.4.2	基于改进 HSMM 的寿命预测	39
3.5	设备老化的定义及分类	40
3.6	考虑老化因子的 HSMM	41
3.6.1	考虑老化因子的转移矩阵	41
3.6.2	指数型老化因子的设计	43
3.6.3	乘数型老化因子的设计	45
3.7	老化因子的估值算法	48
3.8	基于失效率的设备剩余有效寿命估值算法	50
3.9	算例分析	52
3.9.1	老化因子的求解	54
3.9.2	剩余有效寿命的估值	55
3.9.3	对比分析	56
3.10	本章小结	59
第 4 章	数据不完备情况下设备健康预测	60
4.1	引言	60

4.2	考虑数据缺失下的设备健康预测	61
4.2.1	SHSMM 的推理与学习机制	61
4.2.2	期望最大化参数自适应估计算法	63
4.2.3	基于灰色 EM-SHSMM 的设备健康预测	64
4.2.4	算例分析	67
4.3	考虑数据异常下的设备健康预测	70
4.3.1	异常数据的处理	70
4.3.2	基于动态前向后向灰色填充方法	71
4.3.3	算例分析	73
4.4	考虑数据不准确下的设备健康预测	75
4.4.1	DS-MM 理论框架	75
4.4.2	基于 DS-MM 的设备健康预测	76
4.4.3	算例分析	78
4.5	本章小结	84
第 5 章	基于时间延迟理论的设备维护计划研究	85
5.1	引言	85
5.2	基于三段时间延迟理论的预防维护模型	86
5.2.1	模型假设	86
5.2.2	模型参数的符号定义	86
5.2.3	模型建立	88
5.3	设备维护与生产联合优化概述	96
5.3.1	维护计划问题描述	96
5.3.2	生产计划问题描述	97
5.3.3	联合优化问题描述	97
5.4	基于时间延迟理论的生产计划与维护计划联合优化模型	98
5.4.1	模型假设	98
5.4.2	符号定义	98
5.4.3	维护费用模型	100
5.4.4	生产成本模型	103
5.4.5	联合优化模型	104
5.5	算例分析	106

5.5.1	设备维护分析	106
5.5.2	设备维护与生产计划联合优化分析	110
5.6	本章小结	115
第 6 章	基于可靠度约束的设备维护计划研究	116
6.1	引言	116
6.2	基于可靠度约束的维护与生产集合优化模型	117
6.2.1	假定条件	117
6.2.2	符号定义	117
6.2.3	数学模型	118
6.2.4	物流平衡约束	120
6.2.5	生产固定费用约束	120
6.2.6	生产能力约束	120
6.2.7	生产可靠度约束	121
6.2.8	模型求解	121
6.3	基于可靠度约束的集合优化模型算例分析	125
6.4	考虑产品堕化的维护与生产集合优化描述	128
6.5	考虑产品堕化的维护与生产集合优化模型	129
6.5.1	假定条件	129
6.5.2	符号定义	129
6.5.3	数学模型	130
6.5.4	模型求解	132
6.6	考虑产品堕化的集合优化模型算例分析	135
6.7	本章小结	137
第 7 章	基于集成模型的多部件设备维护计划研究	139
7.1	引言	139
7.2	设备维护调度优化模型	140
7.2.1	设备维护调度决策	140
7.2.2	遗传算法	147
7.3	算例分析	149
7.3.1	数据准备	150

7.3.2	算法设计	153
7.3.3	维护调度比较分析	155
7.3.4	考虑调整因子的维护调度分析	159
7.4	本章小结	162
第 8 章	考虑生产与需求的多设备维护计划研究	163
8.1	引言	163
8.2	多设备系统描述	165
8.3	考虑生产与需求情况下多设备状态维护	166
8.3.1	符号说明	166
8.3.2	数学模型	167
8.3.3	算例分析	172
8.4	多设备状态维护与备件订购策略的联合优化	175
8.4.1	符号说明	175
8.4.2	系统描述	176
8.4.3	维护优化模型	178
8.4.5	模型求解	181
8.4.6	算例分析	183
8.5	本章小结	187
第 9 章	考虑产品保修服务的设备维护计划研究	188
9.1	引言	188
9.2	考虑产品保修服务的设备维护描述	190
9.3	考虑产品保修服务的设备维护模型	191
9.3.1	符号说明与假设	191
9.3.2	单位时间返工费用和产品费用	193
9.3.3	单位时间预防维护费用	201
9.3.4	单位时间总费用模型	202
9.3.5	模型求解	202
9.4	算例分析	204
9.4.1	数据准备	204
9.4.2	结果分析	205

9.4.3 敏感性分析	208
9.5 本章小结	210
第 10 章 总结与展望	212
10.1 结论	212
10.2 展望	213
参考文献	215
索引	235

第 1 章 绪 论

1.1 研究背景和意义

随着科学技术和现代工业的迅速发展,许多设备变得越来越复杂。这些设备由于其复杂性和其他各种因素的影响(如磨损、负载、外部冲击、运行环境的变化),其性能及健康状态将不可避免地发生变化,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^[1]。例如,2010年4月发生在墨西哥湾的漏油事故,就是由于“深水地平线”钻井平台发生爆炸时,最后一道安全防线——防喷阀的失效,造成原油不断冒出,多名工作人员失去了生命,当地大量生物死亡,对生态环境造成了永久性的破坏^[2]。此外,用于保证设备正常运行的维护保障活动还需要相应的费用支持。据调查,各类行业在维护中的投入占到生产总成本的15%~70%,而维护活动安排及维护资源管理的不当,将会影响整个生产过程并造成浪费^[3]。因此,在设备运行过程中,利用先进的科学技术,有计划、有组织、有针对性地对设备进行状态监测和故障诊断,在其性能退化的初期,尤其在还没有造成重大危害时,及时发现异常或定量评价设备健康状态、预测设备的剩余寿命,并在此基础上确定对设备的最佳维护时机,成为一个十分重要和紧迫的课题。

近年来,设备的健康预测研究取得了蓬勃的发展,准确可靠的预测分析结果对设备安全性能的提升、维护成本的降低、停工时间的减少等方面都发挥着重要作用。在健康预测研究中,监测数据是开展设备剩余寿命预测研究的前提和基

础^[4]。但设备在实际运转过程中,由于噪声、故障和人为因素等影响,导致采集到的样本数据出现不确定,最终会影响剩余寿命预测的结果^[5-6]。如何在样本数据不确定的情况下对设备进行有效的健康预测,将成为健康预测领域的一项重大而急迫的研究任务。这种数据不确定的情况是一种不确定性问题,目前,不确定性问题作为系统特别是复杂系统故障的一个重要特性,成为智能诊断领域中一个重要研究内容。对在样本数据不确定下的设备进行健康预测将具有十分重要的研究意义,可以归纳为以下几点:

(1) 经济角度:准确可靠的健康预测结果可以提高设备利用率、延长机械设
备运行周期、降低设备运行费用。不但保证了企业的运作效率,而且降低了企业的维护费用。

(2) 安全角度:一些大型复杂设备的故障可能会带来难以估算的安全隐患,比如航天、核电等设备,一旦发生故障可能会造成人员伤亡以及重大经济损失。如果能够对这些设备开展有效的健康预测,就可能在设备产生重大突发故障前,对设备进行适当的维护,减小设备的安全隐患。

(3) 生产角度:合理有效的健康预测结果可以提高维护决策的精确性,能够实现用最小的备件库存满足最大的维护操作,有效降低了企业备件的库存费用。

在制造业中,企业的生产设备是其生存与发展的重要物质财富,对设备的管理已经成为企业生产经营的重要组成部分。在大部分的制造型企业中,生产设备所占固定资产的比例高达 60% 以上,可见生产设备对于制造型企业的重要性。随着生产设备的不断运行,设备上的零部件会出现一定程度的磨损和老化,如果不能对设备进行有效的维护保养,可能会导致设备出现意外的故障发生。生产设备故障的发生会使企业的生产计划难以实现,从而使企业遭受巨大的经济损失,甚至可能会导致一些不必要的人员伤亡事件的发生,所以合理有效地制定设备的维护方案对生产企业格外重要,科学的维护策略可以使设备更加安全地运行和减少设备故障的发生概率,从而提高企业的生产效率和核心竞争力。设备在实际生产过程中可能会发生故障,一般需要进行相应的维护才能将设备恢复到良好的状态,为了对设备进行维护,备件作为维护活动重要的资源之一是必不可少的,然而备件的存储数量对企业来说至关重要,如果过多地存储大量的备件,可能会导致库存管理成本的增加,也会导致企业流动资金的减少,不利于企业的长期发展,过少地存储备件会使设备在发生故障时可能会备件数量不足,

从而延迟设备的维护时间,所以综合考虑设备备件和维护策略可以有效地降低企业维护成本。

现代制造企业面临着激烈的全球化竞争和市场需求的不不断变化,高效的设备运行能够保证企业及时有效地完成客户的订单,从而能够在市场竞争中占有有利的优势,对设备的有效的维护能够减少停工的时间,从而更加有利于设备的高效运行。设备的维护成本在企业的生产活动中占很大一部分比例,所以企业更加认识到对设备维护的重要性。随着科技的快速发展,设备逐渐变得复杂,维护费用变得更加昂贵,所以制定有效的设备维护策略可以使制造企业减少成本。通过对设备退化过程的研究,进一步扩展维护决策建模的理论,从而为我国制造业企业提供值得借鉴的有效维护方式。

在制造型企业的生产过程中,为生产设备制订科学合理的维护计划,有效地避免因设备发生的意外故障而造成不必要的损失,是企业界和学术界所需要共同研究和解决的问题。根据统计,在1981年美国的制造型企业对其设备的维护金额高达6 000亿美金,而且在20年内维护的费用增加了一倍之多^[7]。德国的企业对于设备的维护费用占到其GDP的14%~15%,而荷兰的企业的维护费用则占到14%^[8,9]。具体到企业而言,其总支出的15%~70%用于生产设备的维护^[10]。更值得注意的是,如此高的维护费用中的三分之一在维护实施过程中白白浪费掉^[11]。所以科学的维护策略对企业有着重要的意义。

设备维护是企业的一项重要任务,随着设备的使用时间的增长,设备的故障次数会不断地增加,维护成本也会逐渐地增加,维护的难度也会不断地增加,所以高效的维护策略可以增加设备的使用寿命和设备的工作效率,从而可以增加企业的盈利能力和市场的核心竞争能力。有效地提高设备的可靠性和设备的寿命,可以更好地完成生产的任务,从而增加企业的盈利能力,对维护成本的控制也影响着企业的盈利能力和竞争优势。

生产系统一般由多台设备组成,传统的维护方式可能会造成维护不足或维护过剩的情况,所以有效地考虑设备状态从而制订相应的维护计划可以最小化维护成本和故障损失成本。本书考虑生产多于需求可能会给企业带来利润以及生产少于需求会给企业造成损失,在这种情况下研究多设备的状态维护策略。另一方面,备件作为维护的重要资源之一,考虑合理的备件订购策略,可以有效地降低维护成本。因此,结合多设备系统的特点,采取有效合理的维护策略,并

应用到制造业设备和生产企业的实际生产经营中去,具有重要的理论和实际意义。

1.2 设备健康预测方法的研究及进展

近些年来,随着人们安全意识的提高,设备的健康预测理论得到了国内外科研发机构和工业界的广泛研究,各种不同的模型、新算法和新技术被提出并引入机械设备健康预测的研究之中。立足现有的研究成果,可以将机械设备健康预测方法归纳为三类:基于物理模型的健康预测、基于知识的健康预测、基于数据的健康预测。

1.2.1 基于物理模型的方法

基于模型的健康预测方法通常是采用数学模型去描述那些会直接或间接影响机械设备健康状态的物理过程。应用基于物理模型的健康预测方法的前提条件是已知对象设备的数学模型,这些模型通常由相关领域的专家提出,并且需要运用大量的数据对其进行验证。

Oppenheimer 和 Loparo 提出了一种基于物理模型的诊断和预测方法,并结合了基于裂缝变化规律的故障强度模型的基础上,可用于预测设备的剩余有效寿命^[12]。Liang 等人在分析了系统产生的振动信号以及设备故障的产生机理的基础上,建立了相应的模型对系统的可观测变量与特征变量之间关系进行描述,通过递推最小二乘算法调整模型的参数,从而对系统未来某个时刻的故障特征的变化情况进行预测^[13]。刘兰英和许亮提出一种将信息物理融合系统和感知控制论相结合的 PC-CPS 模型,该系统模型具有实时监测、故障诊断和故障预测等功能^[14]。Li 等学者采用非线性递推最小二乘法,通过分析疲劳裂纹拓展模型和诊断模型间的映射关系,预测滚动轴承的裂纹尺寸^[15]。Luo 等学者也建立了一种集成性的基于物理模型的预测方法,建模的基础是设备在正常状态和衰退状态下的大量仿真数据收集^[16]。Kacprzyński 等人将物理失效模型和相关的诊断信息相融合,建立一个可对直升机上齿轮的健康状态进行预测的模型^[17]。Cai 等人提出了一种基于物理模型的线性分布参数方法对传感器的故障进行诊断评估^[18]。Liu 等人提出了一个数据驱动的动态分层贝叶斯退化模型,利用物