



经典译丛



人工智能与智能系统

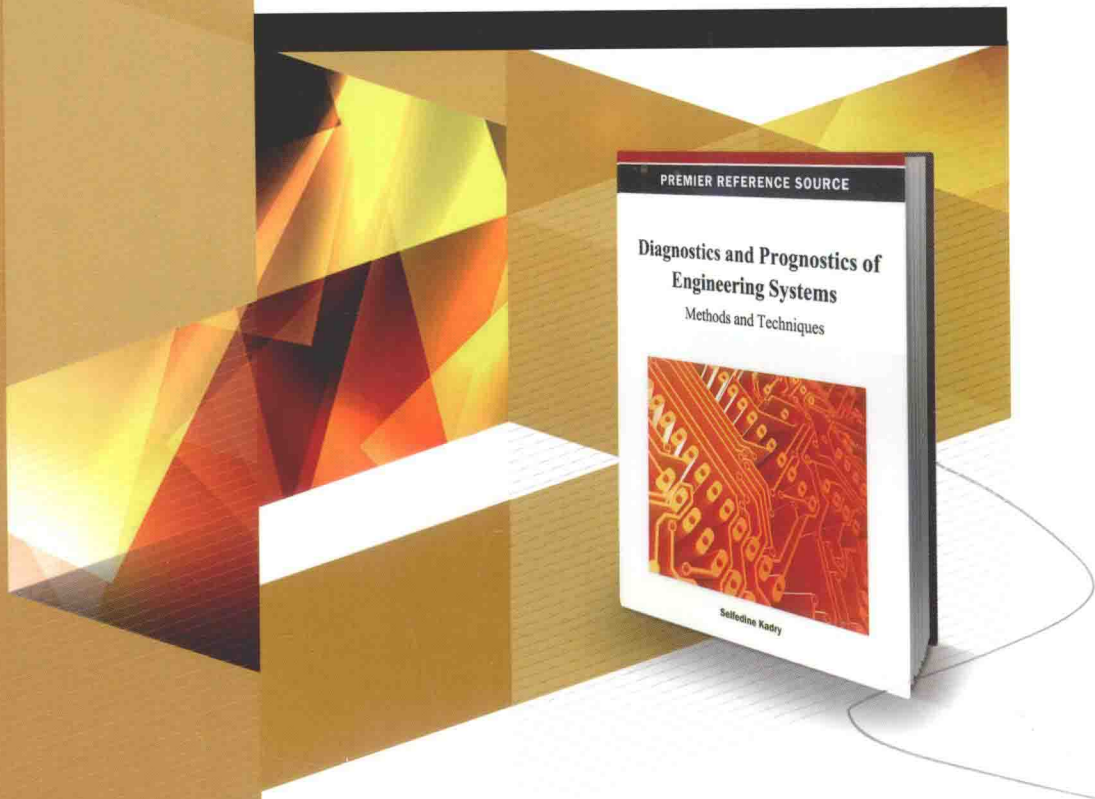
Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems
Methods and Techniques

工程系统诊断与预测 ——方法与技术

Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems
Methods and Techniques

【黎】 Seifedine Kadry 主编

尹明 叶晓惠 陈少昌 等译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

经典译丛·人工智能与智能系统

工程系统诊断与预测 ——方法与技术

**Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems
Methods and Techniques**

[黎] Seifedine Kadry 主编
尹明 叶晓惠 陈少昌 等译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

工业预测使用概率测量对工业系统的全寿命周期进行预报,由此来决定机器的运行方式,尤其需要的是能够在机器失效前预测。这一点是首要的。因此,为工程系统开发可靠的预测过程,对增加系统性能和提高可靠性是非常重要的。

本书内容主要是介绍系统诊断和预测的基本原理和应用。在诊断和预测系统的方法和技术上开展了广泛讨论,内容高度覆盖了 SHM/DP 学科范围,包括以实际应用案例来说明方法的有效性,以及未来的发展趋势和研究。

本书可作为高等学校本科高年级和研究生的参考教材,也可以作为从事故障诊断和预测的工程技术人员参考书。

First published in the English language under the title "Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques". Copyright © 2013 by IGI Global, www. igiglobal. com.

本书原版由 IGI Global 出版。

本书中文简体翻译由 IGI Global 授权电子工业出版社出版。

Copyright © 2013 IGI Global 和电子工业出版社 2016。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制和发行本书的任何部分。

此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权贸易合同登记号 图字:01-2014-2939

图书在版编目(CIP)数据

工程系统诊断与预测:方法与技术 / (黎) 赛义夫丁·卡德里 (Seifedine Kadry) 主编; 尹明等译.

—北京: 电子工业出版社, 2016.7

书名原文: Diagnostics and Prognostics of Engineering Systems: Methods and Techniques

ISBN 978-7-121-29056-5

I. ①工… II. ①赛… ②尹… III. ①系统工程—故障诊断 IV. ①N945

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 131909 号

策划编辑: 陈晓莉

责任编辑: 陈晓莉

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订: 三河市鑫金马印装有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 19.75 字数: 520 千字

版 次: 2016 年 7 月第 1 版

印 次: 2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系及邮购电话:(010)88254888,(010)88258888

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:chenxl@phei.com.cn。

译者序

故障预测与健康管理(Prognosis and Health Management, PHM)是一种新兴的维修与管理方式,通过感知并充分使用状态监测与监控信息,对设备的工作状态、可靠性、寿命和故障进行预测,融合维修、使用和环境信息,结合规范的装备管理方法和业务流程,从而对维修活动进行科学规划和合理优化,并对影响设备健康状态和剩余寿命的技术、管理和人为因素进行全过程控制。进入 21 世纪以来,PHM 在国内外得到了十分迅速的发展,在机械、电子、航空航天、船舶、石油、汽车等领域得到了广泛的应用。

《工程系统中的诊断与预测——技术与方法》是美国中东大学的 Seifedine Kadry 教授关于故障预测与健康管理方面的最新著作。作者在引入容错控制、故障检测或报警的基础上,着重介绍了基于数据驱动的预测、基于故障物理的预测、PHM 投资回报和全寿命周期费用等内容。

全书共分为 19 章。叶晓慧负责本书翻译的全面工作,第 1~10 章由尹明翻译,第 11~15 章由王红霞翻译,第 16~19 章由解锋翻译,陈少昌负责本书的校对。孙金明、田沿平、周晶晶、熊波、张波、章耀文、申振、林朋飞等研究生负责本书图表的绘制工作。同时,感谢电子工业出版社的陈晓莉编审对本书提出的宝贵意见。

本书可作为高等学校高年级和研究生的参考教材,也可以作为从事故障诊断和预测的工程技术人员参考书。

PHM 是新兴的一门技术,应用范围广泛,由于译者的水平有限,加之时间仓促,书中不当甚至错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

译者

2016 年 4 月于武汉

序

可以说,自从人类诞生起,结构健康监测(SHM)和损伤预测(DP)就已经被熟练掌握,只不过是人类没有意识到。早期猎人不约而同地通过听取弓弦弯曲时释放的声音来判断它们是否正常工作,而且他们一直依赖这样的方式。今天,我们依然依靠相似的评估方法。我们每个人经常下意识地期望日常生活中经常使用的设施,如交通系统或民用基础设施,可以让我们最满意和最安全。此刻我完全相信正在坐着的最喜欢的椅子,已经被评估从某种方式上存在损坏,但坐着却是安全的。根据早期猎人的意识,我敲了敲椅子的4条腿,听着每条腿发出的声音都很相近,没有显著的不同。当然,我不必过早期的狩猎生活。

幸运的是,结构健康监测和预测(SHM/DP)等领域已经在一段时间得到发展。定性地说,结构健康监测是通过现场测量组件结构目前能力或系统执行功能的数据,并进行数据的适当分析做出评估的通用过程。损伤预测或预测是通过考虑如何评估结构健康监测来扩展这一过程。可以用这种方法来预测剩余使用寿命(RUL)或类似性能级度量,有利于组件或系统的有效生命周期管理。成功的SHM/DP策略可以通过维修优化过程使系统成本显著降低,工作期间性能最大化,非计划停机时间最小化,以及缓解灾难性故障并突显生命安全的优势。事实上,非常重要的成果是:任何结构/系统所有者都不会否认,他们的所有目标都是以最优生命周期管理为中心。

没有一本书或者作品集能够完全地涵盖SHM/DP设计的巨大广度,尤其是考虑到在这一切之前的任何应用领域。也不会有人想到这么全面的事情,因为它可能写满数万张,每张数千字。《工程系统中的诊断和预测——方法与技术》这本书由Seifedine Kadry教授主编,及时收集了在工业机器中特定的、可访问应用领域所使用的一批关键技术和方法。收集的论文被认为是高度覆盖了SHM/DP学科范围的。任何像SHM/DP的策略大致都包括:现场数据采集,从测得的数据进行特征提取——统计及其功能分类,预测建模,以协助制定风险告知的生命周期确定,无论是在经济、管理,以及其他方面的限制都不可避免地存在。这些章节从计算机科学、机械工程、工业工程、信息技术、控制工程、统计和决策科学,以及政策或管理中提取,SHM/DP如何被成功开发评估部署在工业机器实践。目前SHM/DP的论文集相当缺乏,本书的出现并不能完全解决燃眉之急,当前结构所有者或运营商希望他们系统的使用年限远远超出了最初的设计寿命。同样重要的是,本书得到了国际社会帮助,来自13个不同国家的作者投稿,拥抱“世界公民”的概念已经越来越多地定义了现代工程师或技术从业者。

因此,无论你是一个研究者、从业者、技术经理,或者是想了解SHM/DP那令人难以置信的宽广和令人兴奋的领域,邀请你在自己最喜欢的椅子坐下来,打开这本书。很高兴告诉大家,我的椅子的第二次声学测试还是显示无明显变化,我将伴随着你一起坐下来静静地阅读。

Michael Todd

圣地亚哥 加利福尼亚大学,美国

Michael Todd 是从杜克大学机械工程与材料科学系获得学士(1992), 硕士(1993), 博士(1996), 同时是 NSF 的一名研究生。1996 年成为 A. S. E. E 的博士后, 1988 年成为一名研究工程师, 后来成为美国海军研究实验室光纤智能结构部的领导。2003 年又加入了加州圣地亚哥的结构工程部, 目前是该部的教授兼副主席。共发表期刊论文 75 篇, 会议集论文 170 篇, 出版专著 5 本和授权专利 4 项。研究方向包括: 非线性时间序列应用到结构健康监测、采用最优贝叶斯推理框架进行 SHM 中的最优决策、为航空航天结构评估开发新型超声波检测、开发各种基于 SHM 性能测量的最优传感器网络、为结构评估开发 RF 传感器系统、为航空航天及海军的高灵活结构系统基于有限数据集创造实时形状重建策略、开发卫星系统振动的评估监测、为国内和海军结构应用设计和检测光纤测量系统以及噪声传播建模。他是国际期刊《结构健康监测》的编辑委员会委员。

前言

在人类的健康护理中,基于有关健康状况参数的测量建立医疗分析。收集测量参数的目的是检测异常、诊断疾病和预测病变。依此类推,健康管理的技术规程,用于从测量参数的历史记录中捕捉工业设备的功能状态。

目前,大多数维修方式都是通过预防和纠正方法进行。预防方法是设定固定的维修间隔,来防止部件、子系统或者系统退化。已经发生了明显的错误或故障之后进行纠正性维修。在许多应用中使用这两种方法都表明是昂贵,主要是由于生产损失、备件存储、质量缺陷等的费用。

基本上,预测性维修或基于状态维修(CBM)立足于机器实际情况的维修需要,而不像预防性维修预先设定时间表。预防性维修是基于时间和活动,如基于时间更换润滑油,如日历时间或设备的运行时间。例如,大多数人在汽车或吉普车每 3000~5000 千米时更换机油,不用考虑到机油的实际状况和性能。这有点类似于预防性维修任务。在另一方面,汽车的使用者根据车辆的运行时间和机油的周期性分析,来确定其实际状况和润滑性能,可能能够延长更换机油直到车辆已经行驶到 1 万公里。这就是预测性维修和预防性维修。预测性维修用于定义基于量化的材料或设备状态所需的维修任务之间的根本区别。

基于状态维修的目标是在正确的时间保持设备完好运行。CBM 是基于使用实时预测与健康管理系统(PHM)的数据进行优先和优化维修资源。通过观察系统的状态(状态监测),确定系统的健康,并采取行动。只有当维修实际需要从而减少了抛弃设备的剩余使用寿命,维修人员利用基于状态维修能够决定在适当的时间进行维修。理想情况下 CBM 将允许维修人员只做正确的事,最大限度地减少备件成本、系统停机时间和维修时间。

智能维修、诊断和预测即机器的 CBM 主要指工业、航空航天器、军事和商船,汽车行业等上的复杂系统。工业和军事领域关注关键系统和部件的可靠性和可用性。这些目标都是最大化设备时间,尽量减少维修和运营成本。由于人员水平降低和设备变得越来越复杂,智能维修方案必须取代旧的预先安排和劳动密集型规划维修系统,保证设备继续正常运行。机器设备的不断增长需求使所有设备的服务来适应关键任务的执行。故障检测和故障隔离效果后,系统具有非常低的误警率,要继续提高这些新的应用,预测的要求就更加明显,对系统设计团队的挑战也是非常显著。这些预测的挑战已经在机械系统上存在并应用了一段时间,但在电子系统上还需要积极探索。

预测是现代预测与健康管理系统更具挑战性的方面之一。它也是在运营双方在降低运营、支持成本、全寿命周期的总体成本,以及提高了许多机械和复杂系统的安全性方面有巨大的潜力。复杂系统的诊断监测使人们达到共识,预测在需求和技术上都是可行的。

本书的各章节集合,可以完全覆盖结构健康监测和预测健康管理涉及的领域。这些章节包含了机械和工业工程、信息技术和控制工程,并卓有成效地介绍 SHM 和 PHM 如何被建立、评估、部署在工业机械的实践中。

第 1 章 在通用离散随机系统中实现基于输出概率密度估计的迭代容错控制

本章介绍了一种基于迭代学习控制的容错控制方法。该方法使用一种广义固定结构的比

例积分控制器,应用于通用的非高斯变量随机系统,受约束的控制器的状态向量导致平方根概率密度函数的应用结果。将整个控制水平轴划分为许多等时间间隔的批次。在每个批次内,状态受约束的广义比例积分控制器采用线性矩阵不等式方法使输出概率密度函数成形。在任何相邻的批次之间,优化径向基函数的基本函数。当建立迭代学习控制收敛的充分条件,就可以利用一种P型迭代学习控制实现批次间的优化。

第2章 智能系统监测:在线学习和系统条件状态

本章提出了一种新型智能系统状态监控的通用方法。使用5个连续步骤实现:(1)数据采集。(2)简化的自适应模型。(3)诊断,并与自适应模型进行数据比较。(4)使用退化模型间的退化混合自动装置流来跟踪系统状态;(5)在实现对EOL或RUL的预测。本章提出了一种基于简化自适应模型方法并应用在智能系统监测中,这种方法可应用于在步骤(2)和步骤(4)研究范围的诊断与预测之外部分。

第3章 分类器的原理

本章描述了表明使用神经网络开发出一套连续学习诊断系统是可能的。整套系统将大大地节省分析师在异常和故障检测上的时间和精力。使原本需要耗费大量时间的任务自动化在分类器上有几种方式可以提高预测新数据采样解释的数据显示。预测的置信空间可以使用很容易进行估计。

第4章 综合多传感器信息产生故障诊断指标

本章提出了通过综合多传感器上收集的信息产生故障水平指标的两种方法。第一种方法,将从两个传感器在不同健康状况下收集到的信号作为一个多元信号,使用多元经验模式分解法将该多元信号分解为一组固有模态函数,该故障敏感的模式函数是由一个基于互信息标准来选择的,然后得到全范围的基础指标。该方法产生的指标显示了平面振动的运动特征。第二种方法从每个单独的传感器提取特征,采用全局模糊优先选择具有近似质量更好的单调关联故障的水平特征,并利用PCA组合信息选择特征为一个单一的指标。利用不同传感器收集到的信息和特征来生成指标,优于每一个传感器的特征。该方法是通用的,而且可以用于多传感器。但是由于利用PCA线性变换生成的指标不能保持最初选择特征的物理意义。

第5章 基于自由参数变换方法对系统进行故障检测与隔离

本章提出了一种基于数据转换方法的转换检测与模式识别。当系统在可识别模式之间转换时,这两个过程都可以使用这两种方法实现。不同模式间的识别需要以一个模式相关的马尔可夫参数作为必要条件。虽然当系统在不容易识别的模式下转换时,转换是可检测的。但无差别的条件并不暗示非转换性检测并不是一个非转换检测充分条件。

第6章 基于数据驱动的旋转机预测

概述了基于数据驱动预测的全过程。为齿轮故障检测提供适当的状态指标;为那些状态指标设置阈值,并通过融合成一个组件的健康指标(HI);使用一个状态空间过程根据目前组件的健康来估计剩余有用寿命;使用状态估计来量化估计剩余有用寿命的置信空间。

第7章 基于个体预测确定合适的退化参数

本章提出了一套表征预测参数的适应性指标。这些参数的特征如单调性、预测性和趋势性,可用于比较候选预测参数;并由此确定哪些是对个体预测非常有用的。单调性表征参数潜在正的或负的趋势,这解决了上述常见物理系统不能自行愈合的假设。预测性实现了许多系统或部件退化参数的关键失效值方差的测量,从而提高了在失效估计的置信。趋势性表示许多系统已经发展的衰退参数在某种程度上具有相同的潜在形状的度量,并且可以通过相同的

函数形式进行描述。这三种直观的度量可以归一化,从而给出预测参数适宜性的定量测量。三种措施和适用性的结合可以用来作为适应度函数优化预测参数的发展。

第 8 章 多状态设备退化的非均匀连续时间隐半马尔可夫建模过程

本章展示了使用非均匀连续时间的隐半马尔可夫建模过程(NHCTHSMP)的一种通用随机模型,用于一系列无法观察到的多状态设备的衰退过程和观测过程。本章还对与多态设备相关联的 NHCTHSMP 的详细数学结构进行了说明,并描述了一个基于关联的内核函数和转换速率功能的 NHCTHSMP 的重要措施。在最终的估计方法中,提出了可用于使用状态监控信息来估计 NHCTHSMP 的未知参数,提供了一个简单的数值实例来描述 NHCTHSMP 的应用过程。

第 9 章 基于随机转换机械系统随机疲劳的技术

本章针对机械系统随机疲劳提出一种新技术,即找到一个应力的随机密度函数。这种技术是基于概率变换与有限元法的结合,以获得响应的概率密度函数。这项新技术是通过 10000 次的 Monte-Carlo 模拟来验证。

第 10 章 基于状态分类和预测的旋转机退化预测

本章分析了在预测学中基于状态分类和预测方法的退化问题。正常、异常和故障情况的判断是通过检测转换阶段的异常来定义的。首先,状态分类的方法是用退化状态来进行分析的,然后是在转换阶段讨论故障发生的概率,最后,针对旋转机的退化过程,通过现场数据得到状态分类和预测结果。

第 11 章 连续刀具状态检测的一种时序预测方法

介绍了一种基于隐半马尔可夫模型的连续时间诊断和预测方法。同时,描述了在连续健康监测中应用的一种 HSMM 前后向算法的计算效率。基于简化的前后向算法,定义了诊断和预测过程。对于提出的 HSMM 方法和现有的 HMM 方法进行比较研究。两种方法在交叉验证、诊断和预测三个方向上进行性能比较。根据实验结果,HSMM 方法在诊断和预测性能上优于 HMM 方法。提出的 HSMM 的预测能力通过方案 III 进行测试。有趣的是,基于 HSMM 方法的在 10 个时间步内的预测错误率小于基于 HMM 方法在平均一个时间步内的预测错误率。这表明相比于 HMM,HSMM 在捕获潜在时间信息方面是多么的强大。

第 12 章 集成系统健康状态的预测与监制

本章将 HAC 模式引入到集成系统健康监测与控制及预测。在这种模式中,组件系统的健康预测模块提供的信息应该允许修正控制器,并使控制目标考虑系统的健康。在这种方式中,为了满足控制目标将会产生控制行为,并且同时延长系统组件的寿命。健康意识的控制与容错控制恰恰相反,甚至当系统处于非故障情况下也能够调整控制器。预测模块在特定的操作条件下将估计在线组件的老化。在非故障情况下,控制基于提出的健康指标提出的分配到系统上。贯穿本章使用一个案例用来说明该想法和概念。

第 13 章 基于粒子滤波的齿轮故障预测方法

介绍了一维健康指数的螺旋伞齿轮受点蚀故障模型的基于粒子滤波的齿轮故障预测方法。该方法集成一对新组件到粒子滤波有效地解决了应用粒子滤波到机械组件剩余寿命故障预测的问题。(1)基于数据挖掘技术有效地定义退化状态转换和通过白化变换得到的一维健康指数的测量函数。(2)利用与无偏超前 I 步的 RUL 估计来更新一个 I 步有效测量误差。利用螺旋伞齿轮案例的研究数据验证提出的故障预测方法,验证结果表明方法的有效性。

第 14 章 PHM 商业应用案例:投资回报率和可用性影响

解决 PHM 系统支持商业案例的构建和优化两个必须的关键能力。首先,本章介绍了全寿命周期成本模型的构建,把投资回报率估计列入系统内 PHM 和维修选项价值进行估计。接着,又阐述了以可用性为中心要求的(如,可用性合同)纳入 PHM 关键系统的支持,以及由此产生的可实现价值。提供了航空电子设备、风力涡轮机和风力发电场的相关案例。

第 15 章 船舶动力机械系统的远程故障诊断系统

本章研究了一个新的基于知识的远程诊断系统应用于船舶动力系统的状态监测与故障诊断。所构建的级诊断系统集成性能参数、润滑油分析、振动和瞬时速度分析,目标是建立可行和可用的船舶动力远程诊断系统。齿轮泵的测试表明,该系统能胜任故障检测。所提出的基于远程诊断系统的知识已经被工程实践证明是可行的,且对柴油发动机的故障检测是高效的。

第 16 章 磨损条件下节流阀的预测与健康管埋:最优维修规划诊断—预测框架

本章分析了一个用于石油行业有关节流阀侵蚀的实际案例研究,目的是定义一个诊断—预测框架用于优化这些组件的维修计划。明确了两个目标:(1)状态监测系统的发展能够提供可靠的侵蚀状态的计算,该计算是基于与节流阀侵蚀有关的物理参数的收集测量,(2)预测系统的开发是准确估计节流阀的剩余有用寿命。一个经验、基于模型的方法已用于实现侵蚀状态可靠计算的诊断目标,而基于伽玛概率分布的统计方法已用于实现准确估计节流阀剩余有用寿命的预测目标。

第 17 章 工业设备的故障预测与健康管埋

本章回顾对 PHM 方法的知识状态,章中分别列举不同的信息和数据,这些信息和数据可供执行任务并识别当前面临的挑战,以及必须解决在实践中实现可靠部署存在的问题。本章重点是 PHM 的预测部分,其涉及设备发生故障的预测和剩余有用寿命(RUL)。

第 18 章 在不确定条件下使用贝叶斯分析和解析近似法进行结构可靠性和响应预测

本章针对可靠性和系统响应故障预测提出了一种有效的贝叶斯分析方法。该方法可以组合额外的信息(如检查数据)以减少不确定性,提高估计精度。本章提出的工作与传统方法的主要区别是,实现了包括不使用 MC 或 MCMC 模拟的贝叶斯更新的所有计算。采用一个 20 变量的数值例子和规模结构问题进行验证,比传统的基于模拟方法的精度和效率更高。

第 19 章 使用间接传感器测量具有动态响应重建的疲劳损伤预测和寿命预测

提出了一种使用监控系统实现疲劳预测的新方法。EMD 方法将信号分解为一系列特定滤波过程的固有模态函数(IMF)。这些 IMF 分量,代表各模式的位移,用来推断动态响应的临界点。值得注意的是,模式形状信息是必需的,可以从传统的有限元分析得到的。疲劳裂纹扩展预测是在使用时间的导数模型外推过程完成后进行的。基于目前的研究,得出如下结论:(1)目前研究提供了一种并行的疲劳裂纹预测,可用于在线预测疲劳寿命;(2)目前数值研究表明,提出的重建方法可以有效地识别关键点处直接传感器故障时的动态响应。

本书的读者对象:

本书有三种潜在的读者:(1)研究领域是系统故障诊断和预测的本科生和研究生;(2)上述研究领域的大学教师和其他工业机构的研究员;(3)工业领域研究和开发部门的参与者。本书不同于其他具有工业领域的复杂案例研究和实际数据的书籍。本书可以作为工业工程、电子工程、机械工程、制造智能和工业电子等专业的研究生课程和课外辅导书。

致 谢

在本书的编写过程中我非常努力地工作。但是,如果没有许多热心人的支持与帮助,这项工作不可能取得成功。因此,我要衷心感谢所有人。

首先,我对所有作者在写作和校对中做出的辛苦努力表示衷心感谢。如果没有你们的努力和承诺,这本书是不可能完成的。感谢所有研究人员为系统诊断与预测协会提供了丰硕而有用的成果。

其次,我对 IGI 全球出版团队提供的帮助表示衷心感谢。特别要感谢 Hannah Abelbeck 编辑全程提供的帮助。

我也应该向各位老师的帮助表示感激之情,特别是 Alaa Chateauneuf 教授、KhaledEl-Tawil 教授、Ahmad Jammal 教授、Khaled Smaily 教授和 Mohamed Smaily 教授。

最后,也是很重要的一点。我对家人的祝福表示感谢,同时对同事的帮助和祝福也表示衷心感谢。

Seifedine Kadry
美国中东大学,科威特

目 录

第 1 章 在通用离散随机系统中实现基于输出概率密度估计的迭代容错控制	1
1.1 引言	1
1.2 基于 ILC 的 PDF 控制	2
1.3 问题公式化	3
1.3.1 非线性动态权重模型	4
1.4 故障检测	5
1.5 故障诊断	7
1.6 故障容错控制	10
1.6.1 问题公式化	10
1.6.2 控制器设计	11
1.7 径向基函数的调整	14
1.8 收敛性分析	14
1.9 一个演示例子	15
1.10 结论	19
参考文献	19
第 2 章 智能系统监测:在线学习和系统条件状态	22
2.1 引言	22
2.1.1 预测与健康管理的	23
2.1.2 问题公式化	24
2.1.3 系统退化监测	25
2.2 传送带过程仿真	25
2.2.1 感应电动机及其控制	26
2.2.2 标量控制电机建模	27
2.2.3 矢量控制电机建模	28
2.2.4 热模型	30
2.2.5 传送带	30
2.2.6 退化仿真	31
2.3 在线学习自适应建模	32
2.3.1 感应电动机自适应模型	33
2.3.2 负载转矩自适应估计器	34
2.3.3 转子电阻参数估计	37
2.4 退化自动装置和系统条件状态	37
2.5 解决方案和建议	39
2.6 未来的研究方向	40
2.7 结论	40
参考文献	41

辅助读物	42
关键术语和定义	44
附录	45
第 3 章 分类器的原理	46
3.1 引言	46
3.2 背景	46
3.3 分类器	47
3.3.1 分类器的训练	47
3.3.2 分类器的隶属度	48
3.3.3 多变量分类器	49
3.3.4 分类标签	49
3.4 数据预处理	50
3.5 连续学习	52
3.5.1 概述	52
3.5.2 初始训练	53
3.5.3 预测	53
3.5.4 再训练	55
3.5.5 故障检测	56
3.5.6 诊断进程	57
3.5.7 总结	57
3.6 预测的置信区间	58
3.7 通用性	59
3.8 未来的研究方向	60
3.9 结论	60
参考文献	61
其他阅读	61
第 4 章 综合多传感器信息产生故障诊断指标	62
4.1 引言	62
4.2 背景	63
4.3 为故障级别诊断产生的一个指标	64
4.3.1 方法 I:处理从两个传感器采集的信号	64
4.3.2 方法 II:分别从每个传感器处理采集信号	68
4.3.3 泥浆泵的叶轮故障诊断应用	71
4.4 未来的研究方向	76
4.5 结论	76
4.6 致谢	76
参考文献	76
补充阅读	79
第 5 章 基于自由参数变换方法对系统进行故障检测与隔离	81
5.1 引言	81
5.2 问题假设	82

5.2.1	目标	82
5.2.2	假设	82
5.2.3	基于数据残差生成方法的一般原则	82
5.3	单一模式的传感器故障检测和隔离	83
5.3.1	基于数据的残差法	83
5.3.2	残差对故障的灵敏度	84
5.3.3	传感器故障隔离	84
5.4	仅使用在线输入/输出数据进行转换时间估计	85
5.5	利用在线和离线的输入/输出数据进行开关时间估计和当前模式识别	86
5.5.1	基于数据的残差	86
5.5.2	模式识别	87
5.5.3	模式辨别能力	88
5.5.4	开关时间估计	88
5.5.5	转换的可探测性	89
5.5.6	示例	90
5.6	算法	92
5.7	车辆防侧翻实例	92
5.8	结论	96
	参考文献	96
第 6 章	基于数据驱动的旋转机预测	98
6.1	引言	98
6.2	状态监测的状态指标	99
6.2.1	特征提取来提高信噪比	99
6.2.2	TSA 技术和状态指标	100
6.2.3	齿轮故障状态指标	100
6.3	阈值设置和组件健康	101
6.3.1	齿轮健康分布函数	102
6.3.2	状态指标间的相关性控制	102
6.3.3	基于瑞利概率密度函数的健康指标	103
6.4	预测的状态空间模型	104
6.4.1	估算系统的剩余有效寿命	105
6.4.2	预测及预测中的置信区间	106
6.4.3	试验样品和一个预测实例	107
6.5	结论	108
	参考文献	108
第 7 章	基于个体预测确定合适的退化参数	110
7.1	引言	110
7.2	背景	111
7.3	方法	112
7.3.1	通用路径模型	112
7.3.2	利用非贝叶斯更新方法结合先验信息	113

7.3.3	选择最优预测参数	114
7.3.4	综合监测和预测系统	115
7.4	应用与结果	116
7.4.1	数据集描述	116
7.4.2	通过专家分析找到一个预测参数	116
7.4.3	确定一个最佳的预测参数与遗传算法	120
7.5	总结	121
	参考文献	122
第 8 章	多状态设备退化的非齐次连续时间隐半马尔科夫建模过程	123
8.1	引言	123
8.2	背景	124
8.3	马尔可夫重建过程的多态退化建模	125
8.3.1	初级 NHCTSMP	126
8.3.2	转换类型	128
8.3.3	使用转换率函数 NHCTSMP 建模	129
8.3.4	转换类型的选择	131
8.3.5	使用 NHCTHSMP 多状态设备建模	132
8.3.6	假设	132
8.3.7	NHCTHSMP 参数	132
8.4	为多状态设备的 NHCTHSMP 参数估计	133
8.4.1	无监督估计方法	133
8.5	计算实例	139
8.6	未来的研究方向	143
8.7	总结	143
8.8	致谢	143
	参考文献	143
第 9 章	基于概率变换与有限元法相结合的机械系统随机疲劳诊断	146
9.1	引言	146
9.2	随机疲劳	146
9.2.1	概率变换方法	147
9.2.2	有限元法	147
9.2.3	有限元和概率变换方法的新技术	147
9.2.4	应用:张力下的多孔板	148
9.3	总结	150
	参考文献	150
第 10 章	基于状态分类和预测的旋转机退化预测	151
10.1	引言	151
10.2	背景	151
10.3	异常定义和退化检测	152
10.4	基于状态分类的退化过程	153
10.4.1	学习矢量量化	153

10.4.2	支持向量机	153
10.5	基于状态预测的退化	154
10.5.1	异常状态分类器的概率估计原理	154
10.5.2	使用支持向量机的异常状态的概率估计	155
10.6	旋转机状态分类和预测的案例	155
10.6.1	训练和测试样本	156
10.6.2	退化状态分类	156
10.6.3	退化状态预测	158
10.7	未来的研究方向	159
10.7.1	失效发生的概率估计	159
10.7.2	复杂设备的降维	159
10.8	结论	159
10.9	致谢	159
	参考文献	160
	补充阅读	161
第 11 章	连续刀具状态检测的一种时序预测方法	163
11.1	引言	163
11.1.1	隐马尔可夫模型	164
11.2	隐半马氏模型的方法	165
11.3	前后向迭代算法的简化计算	168
11.3.1	前后向变量	168
11.3.2	状态估计	169
11.4	诊断和预测	170
11.5	数据集和特征	171
11.5.1	统计特征	171
11.5.2	小波特征	172
11.5.3	特征选择	172
11.6	诊断和预测结果	174
11.6.1	方面一:交叉验证	175
11.6.2	方面二:测试诊断能力	175
11.6.3	方面三:预测能力测试	176
11.6.4	非对称损失函数	177
11.6.5	方面一:非对称交叉验证	179
11.6.6	方面二:非对称诊断	179
11.7	结论	180
	参考文献	180
第 12 章	集成系统健康状态的预测与监控	182
12.1	引言	182
12.2	背景	183
12.2.1	故障诊断概述	183
12.2.2	PHM 概述	183

12.2.3	可靠性与故障容错控制概述	184
12.3	集成控制和预测	185
12.3.1	控制和预测	185
12.3.2	体系结构描述	186
12.3.3	数据采集和预处理	186
12.3.4	状态监测与故障诊断	188
12.3.5	预测	191
12.3.6	决策	194
12.3.7	对策与建议	197
12.4	未来研究方向	197
12.5	结论	197
12.6	致谢	198
	参考文献	198
	补充阅读	201
第 13 章	基于粒子滤波的齿轮故障预测方法	202
13.1	引言	202
13.2	方法	203
13.2.1	一维健康指数	203
13.2.2	基于粒子滤波的 RUL 预测	204
13.3	螺旋伞齿轮的案例研究	205
13.3.1	实验装置和数据收集	205
13.3.2	结果	206
13.4	总结	209
13.5	致谢	210
	参考文献	210
第 14 章	PHM 商业应用案例:投资回报率和可用性影响	211
14.1	引言	211
14.1.1	维修模式	211
14.1.2	系统和企业级维修价值	212
14.2	投资回报(ROI)	213
14.2.1	ROI 的定义	213
14.2.2	ROI 成本规避	213
14.2.3	将健康管理加入风力发动机的投资回报	215
14.3	系统级维修值	218
14.3.1	定期维修与无维修灵活性 PHM 的 NPV	219
14.3.2	维修选项分析	221
14.4	可用性需求	222
14.4.1	可用性合同	223
14.4.2	基于可用性的设计	224
14.5	结论	226
	参考文献	227