



国家重点基础研究发展计划(2013CB036300-2)
国家重点研发计划(2016YFC0802202)
国家自然科学基金(51678489)

Structural health monitoring A machine perspective

机器学习视角的 结构健康监测

单德山 付春雨 郭珊 译



科学出版社

机器学习视角的结构健康监测

[美]C. R. 法拉 [英]K. 沃登 著

单德山 付春雨 郭 珊 译



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书针对结构健康监测的特点,将统计模式识别引入健康监测问题中,从而建立该类问题的最有效解决框架。内容包括结构响应信号的传感和采集、损伤敏感特征分析、结构异常诊断、基于统计模式识别方法的损伤诊断、结构状态评估。本书的编写力求理论与工程实践相结合,提供了大量的应用范例供参考。

本书可供结构健康监测的设计、实施和研究人员参考,也可作为高等院校机械工程和土木工程专业研究生及本科高年级学生学习结构健康监测的教材。

Charles R. Farrar & Keith Worden

Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective

Copyright © John Wiley & Sons, Ltd., 2013

图书在版编目(CIP)数据

机器学习视角的结构健康监测 / (美) 法拉 (Farrar, C. R.), (英) 沃登 (Worden, K.) 著; 单德山, 付春雨, 郭珊译. —北京: 科学出版社, 2017.11

书名原文: Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective
ISBN 978-7-03-053959-5

I. ①机… II. ①法… ②沃… ③单… ④付… ⑤郭… III. ①建筑结构-安全监测 IV. ①TU317

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 172842 号

责任编辑: 张 展 华宗琪 / 责任校对: 黄丽莉 贺江艳
责任印制: 罗 科 / 封面设计: 陈 敬

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017年11月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2017年11月第一次印刷 印张: 27

字数: 640千字

定价: 189.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

译者序

Charles Farrar 和 Keith Worden 2013 年出版的专著 *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective* 内容丰富, 是结构健康监测领域的经典之作。当译者首次读完这本书时, 发现书中的主要观点, 与西南交通大学智能化桥梁研究团队 2013 年出版的专著《桥梁结构损伤诊断的统计学习理论》中的主要观点, 几乎是一致的。只是后者主要针对桥梁结构的损伤诊断, 提出采用统计模式识别的方法实现; 而 *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective* 则是针对更普遍的结构, 如房屋结构、飞机、轮船、旋转机械、天文望远镜等, 当然也包括桥梁结构。

有鉴于此, 为在结构健康监测中推广机器学习方法的应用, 西南交通大学智能化桥梁研究团队组织了本书的翻译和审核工作。历时 1 年有余, 终于完成了本书的翻译。期望本书的中译本能对从事结构健康监测工作的学者、工程师及学生有所帮助。本书英文版的附录 A 和 B, 为信号处理和线性结构动力学方面的基本知识, 中译本则省略了这些内容, 感兴趣的读者可参考本书英文版或其他相关书籍。

参与翻译工作的各位老师和研究生都为本书的翻译付出了极大努力, 在翻译过程中反复考量, 以求尽可能还原英文版的本意, 在此过程中各位老师和同学也受益良多。由于译者水平所限, 尽管倍加小心谨慎, 本中译本难免存在不妥之处, 盼本书的读者予以指正, 以使我们进一步完善和提高中译本的质量。

西南交通大学李乔教授对本次翻译工作提供了大力的支持和帮助, 并提出了宝贵的修改建议, 谨在此表示诚挚的感谢。

单德山

2016 年 11 月

前 言

本书是两位作者 20 世纪 90 年代中期以来，在结构健康监测方面的合作成果。值得一提的是，两位作者不约而同地提出，SHM 的统计模式识别方法是解决这方面问题最为有效的框架。随着这个想法的实现，就有可能开发大量由统计与机器学习领域所研发的模式识别算法，并将其有效用于损伤诊断问题中，尽管多数情况下开发这些算法的初衷并非损伤诊断。文献中，这类结构健康监测观点已成为主流。因此，本书的主要目标是为读者提供结构化统计模式识别方法的综述，当其用于 SHM 问题时，将引入机器学习工具。除此之外，两位作者希望读者肯定这种方法的一般性，并了解这类方法非常适合处理现实损伤诊断问题中遇到的所有变异源。

本书内容编排合理，适合高年级本科生、研究生和执业工程师等。实际上，本书很多内容都是以行业短期课程为基础的，该课程始于 1997 年，已讲授了二十多次，并在加利福尼亚大学圣迭戈分校的结构健康监测研究生班上讲授了无数次；从 2002 年开始，又在设菲尔德大学的研究生班上进行讲授。为创作出一本尽可能完善的书，已付出了诸多努力，鉴于这一目标，本书增加了关于信号处理和线性结构动力学两篇附录。因此，上述具备适当背景知识的读者可以发现，无须太多预备知识便可理解本书所呈现的大部分内容。然而，读者应牢记，结构健康监测是一个多学科交叉的课题，此处所展示的内容在某种程度上“传统地”涵盖了结构动力学、无损评估、信号处理、检测理论、机器学习、概率统计以及传感器网络等课程。当试图覆盖如此广泛的技术时，作者在这里面临着巨大挑战：完备详细处理这些课程，并同时保持书本合理篇幅间取得平衡。这就使得内容的拟定十分困难；显然，许多章节本身也可以扩展为书籍（如第 4 章传感与数据采集）。这里所采取的方法是，详尽解释书中内容以便读者理解其概念和关键问题。然后，作者利用参考文献为读者指出各个主题的详细总结。最后须指出的是，本书的内容是依照第 1 章所述统计模式识别范例而连贯呈现，但作者建议，该统计模式识别范例在实际中，应进行更为综合的考虑和运用。

除了展现结构健康监测过程中的各方面理论，作者也尽可能从多方面论证这些概念。这些论证包括数值模拟、专为 SHM 而设计的控制良好的实验室试验测试，可能还包括从民用基础设施到望远镜以及飞机等多种现实世界的结构实例。这些论证不仅可以展示某一特定方法如何运作，而且意在强调这些方法的问题与挑战。

当人们谈及意欲采用统计模式识别方法来解决 SHM 问题，并用机器学习算法来实现这一方法时，往往会误以为不需要用到物理模型。这类物理模型的发展在传统上，已成为工程研究的中流砥柱。然而，由于损伤出现和演化相关的长度和时间尺度变化较大、多数现实系统的几何复杂性以及多数 SHM 问题中不可避免遇到的运营与环境变异性，这样的 SHM 物理建模变得十分具有挑战性。必须明确指出，本书的基础——统计模式

识别方法，绝不排除使用这种物理模型。如果这类模型可用且得到了验证，那么只有依据由这些模型中获得的深刻见解，才能改善 SHM 过程。然而，通过采用模式识别方法，不仅仅局限于某种特定的模型形式，某种意义上，我们允许结构更直接地与我们“交流”。

最后，必须承认的一点是，对于多数应用而言，SHM 根本上仍然是一个研究课题。作者相信本书给出了该领域的最新总结，并用最大众化的方法来解决目前所提出的 SHM 问题。然而，可以预测，随着新方法的不断提出，这门技术仍将继续演变。即使对此处所提的课题，讨论也绝不是完全的。例如，第 7 章并未包含其他很多文献提到的特征。因而在此鼓励读者借阅其他 SHM 相关书籍，这些书籍多数是近十年出版的，进而可以获得这一主题更广泛的理解。由于 SHM 方案可提供生命安全与经济效益，这门技术前途无量。结构健康监测的应用也在扩大化和多样化。因此，作者由衷希望本书能为这一领域的“健康”尽绵薄之力。

致 谢

本书所总结的工作代表了与两位作者共事二十余年的众多学生和同事所做的贡献。作者尽力为那些对本书内容有所裨益的人们一一署名。然而面面俱到十分困难，难免有所遗漏，在此作者深表歉意。以下致谢词由两位作者逐章陈述。

Charles Farrar 的致谢

特别感谢英国皇家工程院院士为作者颁发杰出访问学者奖学金；该奖学金用于完善本书的大部分内容。接下来特别感谢加利福尼亚大学圣迭戈分校的 Mike Todd 和 Los Alamos 国家实验室 (LANL) 的 Gyuhae Park。在过去十年里，他们参与帮助了 LANL-UCSD 工程学院的创办、发展以及运营，使其从动力学暑期班蜕变为国际教育与研究机构。通过他们的努力，学院能一致专注结构健康监测的研究，并与时俱进地持续向前推进这项研究。此外，在追寻多年的 SHM 研究生涯中，作者得到了所有 LANL 管理者的支持。作者特别感谢 LANL 工程副主任 Steve Girrens 的支持和友谊。作者与 Steve 已共事 29 年，他的支持与鼓励无论从哪方面讲都弥足珍贵。

第 1 章。作者对本书的基础，即统计模式识别范例的最初想法主要来自 20 世纪 90 年代中期，与 LANL 的两位计算机学家 Vance Faber 和 Dave Nix 的讨论交流，这两位科学家曾用类似的方法处理了许多模式分类问题。

第 2 章。这章综述的多数材料源于众多作者所著的两篇深度文献综述。这些文献综述的领衔作者有两位，一位是 LANL 的博士后研究员 Scott Doebling，另一位是 LANL 的技术人员 Hoon Sohn。同时也感谢 Tom Duffey 为本章旋转机械部分内容所做的贡献。

第 4 章。本章重点介绍的无线传感器节点工作，由 LANL 的一群研究生助理完成，由 Neal Tanner 发起后，再由 David Allen、Jarrod Dove、David Mascarenas 和 Tim Overly 加以完善，目前是由 Stuart Taylor 负责。直升机无线能量传输系统是 David Mascarenas 博士学位论文所研究的课题。LANL 技术人员 Gyuhae Park 和 Kevin Farinholt 是这些学生的主要导师。另外，Gyuhae Park 还主持了本章简述的以阻抗理论为基础的传感器工作。

第 5 章。新墨西哥州立大学 (NMSU)、桑迪亚国家实验室 (SNL) 和 LANL 的大量人员参与了 I-40 桥梁试验。首先特此感谢 NMSU 的 Ken White，他提出该实验并承担了项目的费用。同时也要感谢 Albert Migliori，他邀请作者参与这个项目，这也使作者在 SHM 领域崭露头角。新墨西哥大学 (UNM) 的 Kerry Cone 和 NMSU 的 Wayne McCabe 这两位学生，以及 UNM 的 Bill Baker 和 SNL 的 Randy Mayes，都为本项目的成功起了关键作用。

特此感谢加利福尼亚大学 Irvine 分校的 Gerard Pardoen，他邀请作者参与他主持的

混凝土柱试验计划。这部分工作是在 Rose-Hulman 理工学院的 Phil Cornwell 与当时就读于斯坦福大学的研究生 Erik Strasser、Hoon Sohn 的帮助下完成。

再次感谢 UNM 的 Bill Baker 设计了 8 自由度测试结构。同样感谢 David Mascarenas 在 LANL 作研究生助理期间，设计了模拟房屋结构并负责其制作。

正如 I-40 桥试验一样，自 1996 年以来，有很多人员参与了 Alamosa 峡谷桥的多项试验。另外，NMSU 的 Ken White 经新墨西哥州公路与运输部门批准，将这座桥指定为试验结构。Scott Doebling 和 Phil Cornwell 主持了大部分试验内容，其结果已汇总于本书中。

第 6 章。LANL 的两位技术人员 Brett Nadler 和 Jeni Wait 做了复合板冲击试验及随后的复合板超声波扫描，在此予以谢意。

第 7 章。非常感谢 LANL 的 Francois Hemez，对本章时间矩与模型修正部分所作的帮助与指导。Scott Doebling 同样为模型修正部分做出了重大贡献。LANL 的 Gyuhae Park 和 Eric Flynn 为本章导波和阻抗测试内容，提供了大量的帮助。感谢 Kevin Farinholt 开发了 7.2 节所示的测试结构；同样也感谢 LANL 的 Chris Stull 在 7.3 节中所作的数值模拟工作。I-40 桥的 COMAC 值计算工作由 Eloi Figuereido 完成，这是他在 LANL 所做的硕士课题之一。荷载相关里兹向量的选取，是 Hoon Sohn 在斯坦福大学做研究生助理期间所做的工作。本章所示 I-40 桥的结果均由 NMSU 的 David Jauregui 在 LANL 做研究生助理期间完成。Dave Nix 向作者推荐采用时间序列模型诊断损伤。交互信息结果选自 SNL 的 Tim Edwards 所著 SHM 课程中的一部分。

第 8 章。Amy Robertson 在 LANL 做技术员期间，开展了 Holder 指数相关的工作，在此感谢她的工作。

第 10 章。本章所示控制图表由 Eloi Figuereido 完成，这也是他在 LANL 硕士研究内容的一部分。LANL 的 Chris Stull、Jim Wren 和 Stuart Taylor 完成了 Raptor 望远镜相关项目的实验和分析工作，在此表示感谢。

第 11 章。支持向量回归机的实例是，不列颠哥伦比亚大学 Luke Bornn 担任 LANL 研究生助理期间所做的工作。

第 12 章。在传感器系统设计部分，作者感谢 Gyuhae Park 提供的阻抗测试材料。感谢 Mike Todd 提供了复合材料船体的数据，同时感谢 Hoon Sohn 对这些数据进行了广泛深入的分析。再次感谢 Eloi Figuereido 对各种机器学习算法的对比研究，这也是他在 LANL 硕士期间研究内容的一部分。Dustin Harvey 在 LANL 担任研究生助理期间，做了大量工作来定义查找表的示例。

第 13 章。再次感谢 Gyuhae Park 提供了本章用的阻抗测试实例。

第 14 章。本章大部分内容摘自《皇家学会哲学汇刊》(*Philosophical Transactions of the Royal Society*) 上的一篇文章。作者在此感谢论文合著者 Nick Lieven，现任布里斯托尔大学副校长，感谢他同意作者在本书中引用这些内容。

Keith Worden 的致谢

在设菲尔德，作者要感谢两位朋友——一位是 Wielaw Staszewski（现就职于 AGH 科学技术大学），另一位是 Graeme Manson。从作者涉足这一领域开始，他们就一直与作

者共同从事 SHM 领域的工作，并为作者提供了源源不断的思路与支持。同样，Keith 也要感谢 Geof Tomlinson 提供的博士后职位，这让作者从（当时的）非线性系统识别的领域轻松转入到 SHM 中。在目前研究的大环境中，若无德才兼备的博士生及研究机构的支持，研究工作几乎不可能取得任何进展。作者有幸与这样一群杰出的研究人员共事合作（未严格按照时间排序）：尽管难免有部分成员离开，但大部分仍然是与作者志同道合的同事。Keith 也要感谢那些优秀负责的本科生以及硕士生，他们高质量的工作使本书得以出版。目前本书中的许多结论或多或少都受到了这些学生工作的影响，在某些情况下，部分结论直接取自他们的工作成果。如果有未注明结论直接来源的情况，这是作者的疏忽，还望海涵。Keith 将逐章对 Charles 的致谢进行补充，对他们表示感谢。

第 9 章。声发射工作利用了威尔士大学的 Karen Holford 教授和 Rhys Pullin 博士所提供的试验数据，其中一些具体的分析源自 Steve Rippengill 工程硕士项目的部分工作。（Karen 和 Rhys 提供的 AE 数据同样出现在第 6 章的 PCA 例证中。）

第 10 章。10.3 节运营变化有关的成果是意大利都灵理工大学的 Cecilia Surace 与作者合作完成。正是通过与 Cecilia 的合作，作者才意识到运营与环境变化的重要性。第 10 章中所呈现的 Gnat 飞机相关工作，只有在 DERA（现 QinetiQ）的 David Allman 先生（已故）的经济支持，以及 Graeme Manson（Sheffield）先生的共同合作（以及无限耐心）下才得以完成。David 对我们 SHM 工作的支持，使我们能更为深入地进行试验验证，遗憾的是作为朋友和同事，他已经去世了。第 10 章中的控制图表部分大多归功于 Keith 从 Jyrki Kullaa 所学到的内容（位于芬兰赫尔辛基的阿尔托大学）。最后，极值统计的内容则归功于韩国科学技术院的 Hoon Sohn 教授多年来的大量讨论。

第 11 章。作者要再次感谢 Graeme Manson 与 Gnat 相关的合作。基于支持向量机的 Gnat 数据分析大部分是 Alex Lane 作为其本科项目来完成的。关于特征选择的遗传优化，作者再次感谢 Vaggelis Papatheou 和 Graeme Manson；最后一节中的大部分详细分析是由 Gabrielle Hilson 作为其毕业设计来完成。

第 12 章。本章协整检验法的内容由 Lizzy Cross 博士提供，在此表示衷心感谢。

附录 B。复合梁试验的内容由 Nikolaos Dervilis（设菲尔德）先生提供，不胜感激。

纵观全书，Lamb 波传播相关的任何数据几乎均来自设菲尔德大学与苏格兰格拉斯哥 Strathclyde 大学的 Gareth Pierce 博士和 Brian Culshaw 教授共同完成的工作，或者来自 Wieslaw Staszewski 教授（现就职于波兰克拉科夫的 AGH 科学技术大学）的工作。作者还要感谢，近年来与 Rob Barthorpe 博士（设菲尔德）就 SHM 而进行的一些有趣而发人深省的交流，尤其是基于模型有关的方法及验证和确认问题。

最后，Keith 要对他的孩子 Anna 和 George 表示歉意，因为除了其他事情，所有时间都用于编写这本书，而没有陪伴孩子们。感谢你们的耐心和理解，他会努力做得更好。

除了以上两位作者的感谢，这里首先要致谢的是 Lizzy Cross 先生，他几乎对原稿各处都进行了仔细的校对和评论。他的努力保证了（有些粗糙的）草稿成为各个章节，并将最终版本的错误降至最低。应该说遗留的任何错误都是作者失误而造成的，若读者发现了任何这类错误，恳请（客气地）告知作者。最后，两位作者要感谢出版社的编辑们，以及后来的 Liz Wingett 女士，他们有礼貌但坚定的努力，使作者能按期完成著作的出版。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 工程师与科学家如何研究损伤	2
1.2 发展 SHM 技术的原因	3
1.3 损伤定义	4
1.4 SHM 统计模式识别范例	6
1.4.1 运营评估	9
1.4.2 数据采集	9
1.4.3 数据归一化	9
1.4.4 数据净化	10
1.4.5 数据压缩	10
1.4.6 数据融合	10
1.4.7 特征提取	10
1.4.8 特征判别的统计建模	11
1.5 局部与整体损伤诊断	11
1.6 结构健康监测的基本公理	12
1.7 本书采用的方法	13
参考文献	13
第 2 章 研究历史回顾	15
2.1 旋转机械应用	15
2.1.1 旋转机械的运营评估	16
2.1.2 旋转机械的数据采集	16
2.1.3 旋转机械特征值的提取	17
2.1.4 旋转机械损伤诊断的统计建模	18
2.1.5 旋转机械状态监测的结论意见	18
2.2 海洋石油平台	19
2.2.1 海洋平台运营评估	20
2.2.2 海洋平台数据采集	21
2.2.3 海洋平台特征值提取	21
2.2.4 海洋平台统计学建模	22
2.2.5 海洋石油平台结构健康监测研究的经验教训	22
2.3 航空航天结构	22
2.3.1 航空航天结构的运营评估	25

2.3.2	航空航天结构的数据采集	26
2.3.3	航空航天结构的特征提取和统计建模	27
2.3.4	用于航空航天 SHM 应用的统计模型	28
2.3.5	关于航空航天 SHM 应用的结论性意见	28
2.4	土木工程基础设施	29
2.4.1	桥梁结构的运营评价	30
2.4.2	桥梁结构的数据采集	31
2.4.3	以模态属性为基础的特征	32
2.4.4	土木工程基础设施的特征统计分类	32
2.4.5	桥梁结构应用	33
2.5	小结	33
	参考文献	34
第 3 章	运营评估	42
3.1	结构健康监测的经济和寿命安全理由	42
3.2	定义待检测的损伤	43
3.3	运营和环境条件	44
3.4	数据采集限制	44
3.5	运营评估实例: 桥梁监测	45
3.6	运营评估实例: 风力发电机	47
3.7	运营评估总结	48
	参考文献	48
第 4 章	传感与数据采集	49
4.1	简介	49
4.2	SHM 的传感与数据采集系统策略	49
4.2.1	策略 I	50
4.2.2	策略 II	50
4.3	传感和数据采集的概念挑战	51
4.4	应采集什么类型的数据?	52
4.4.1	动态输入和响应量	52
4.4.2	其他损伤敏感物理量	54
4.4.3	环境量	54
4.4.4	运营量	55
4.5	目前的 SHM 传感系统	55
4.5.1	有线系统	55
4.5.2	无线系统	56
4.6	传感器网络范例	58
4.6.1	直接连接到中央处理设备的传感器阵列	59
4.6.2	跳频连接的分布式处理	59
4.6.3	混合连接的分布式处理	60

4.7	未来的传感网络范例	61
4.8	定义传感器系统特性	63
4.8.1	所需灵敏度及量程	64
4.8.2	所需带宽及频率分辨率	64
4.8.3	传感器数量和位置	64
4.8.4	传感器标定、稳定性和可靠性	65
4.9	定义数据采样参数	67
4.10	定义数据采集系统	67
4.11	主动与被动传感	68
4.12	多尺度传感	69
4.13	传感器系统的供电	69
4.14	信号调理	70
4.15	传感器和作动器优化	70
4.16	传感器融合	71
4.17	结构健康监测传感和数据采集问题的总结	74
	参考文献	75
第5章	案例研究	79
5.1	I-40 桥	79
5.1.1	初步测试和数据采集	81
5.1.2	完好状态环境振动测试	81
5.1.3	强迫振动测试	83
5.2	混凝土柱	84
5.2.1	拟静力加载	85
5.2.2	动态激励	86
5.2.3	数据采集	87
5.3	自由度系统	88
5.3.1	物理参数	90
5.3.2	数据采集	90
5.4	模拟房屋结构	90
5.4.1	试验过程与数据采集	91
5.4.2	测试数据	91
5.5	Alamosa 峡谷大桥	93
5.5.1	试验过程和数据采集	95
5.5.2	环境测量	96
5.5.3	研究模态特性变异所进行的振动试验	96
5.6	Gnat 飞机	97
5.6.1	用改造的检查面板模拟损伤	97
5.6.2	用拆除检测板模拟损伤	101
	参考文献	104

第 6 章 概率统计导论	105
6.1 简介	105
6.2 概率: 基本定义	106
6.3 随机变量及其分布	107
6.4 期望值	110
6.5 高斯分布(及其他分布)	114
6.6 多元统计	115
6.7 多元高斯分布	116
6.8 条件概率和贝叶斯定理	117
6.9 置信限与累积分布函数	119
6.10 孤立点分析	122
6.10.1 单变量数据中的异常值	122
6.10.2 多元数据中的异常值	123
6.10.3 不一致性临界值或阈值计算	123
6.11 密度估计	123
6.12 极值统计	128
6.12.1 极值统计简介	128
6.12.2 基本理论	128
6.12.3 极限分布的确定	131
6.13 降维——主成分分析	134
6.13.1 简单投影	135
6.13.2 主成分分析	136
6.14 结论	138
参考文献	138
第 7 章 损伤敏感特征	140
7.1 特征提取过程中常用的波形和谱函数	142
7.1.1 波形比较	143
7.1.2 自相关和互相关函数	143
7.1.3 功率谱和互功率谱密度函数	145
7.1.4 脉冲响应函数和频率响应函数	147
7.1.5 相干函数	148
7.1.6 关于波形和频谱的一些评论	149
7.2 基本信号统计量	149
7.3 瞬态信号: 时间矩	155
7.4 瞬态信号: 衰减度量	157
7.5 声发射特征	159
7.6 SHM 导波方法所用特征	160
7.6.1 预处理	161
7.6.2 基准比较	161

7.6.3	损伤定位	162
7.7	用于阻抗测试的特征	163
7.8	基本模态属性	165
7.8.1	共振频率简介	166
7.8.2	特征提取的正反建模方法	168
7.8.3	共振频率: 正方法	168
7.8.4	共振频率: 敏感性问题	168
7.8.5	振型	170
7.8.6	荷载相关 Ritz 向量	176
7.9	基本模态属性的衍生特征	178
7.9.1	模态曲率	178
7.9.2	模态应变能	180
7.9.3	模态柔度	184
7.10	模型修正方法	187
7.10.1	目标函数和约束	188
7.10.2	模态力误差的直接解	189
7.10.3	最优矩阵修正方法	191
7.10.4	基于敏感性的修正方法	193
7.10.5	特征结构配置法	196
7.10.6	混合矩阵修正法	197
7.10.7	模型修正法的结论性意见	197
7.11	时间序列模型	198
7.12	特征选择	199
7.12.1	敏感性分析	200
7.12.2	信息量	202
7.12.3	鲁棒性评估	204
7.12.4	优化过程	204
7.13	度量	204
7.14	结论性意见	204
	参考文献	205
第 8 章	基于线性响应偏差的特征	210
8.1	可产生非线性系统响应的损伤类型	210
8.2	探索 SHM 非线性系统识别方法的动机	212
8.2.1	相干函数	214
8.2.2	线性和互反性检验	216
8.2.3	谐波畸变	221
8.2.4	频率响应函数失真	223
8.2.5	概率密度函数	226
8.2.6	相关性检验	227

8.2.7	Holder 指数	228
8.2.8	线性时间序列预测误差	232
8.2.9	非线性时间序列模型	233
8.2.10	Hilbert 变换	236
8.2.11	非线性声学方法	237
8.3	非线性动力系统理论的应用	238
8.3.1	裂缝梁模拟为双线性系统	240
8.3.2	损伤梁的混沌讯问	242
8.3.3	局部吸引子方差	242
8.3.4	用局部吸引子方差诊断损伤	244
8.4	非线性系统识别方法	245
8.5	非线性系统响应特征提取的结论性意见	248
	参考文献	249
第 9 章	机器学习与统计模式识别	253
9.1	简介	253
9.2	智能损伤诊断	253
9.3	损伤识别的数据处理和融合	255
9.4	统计模式识别: 假设检验	257
9.5	统计模式识别: 一般框架	260
9.6	判别函数和决策边界	262
9.7	决策树	263
9.8	训练-极大似然	264
9.9	最近邻分类	267
9.10	案例分析: 声发射试验	267
9.10.1	主成分分析	269
9.10.2	训练和验证数据	270
9.10.3	判别分析和决策边界	271
9.10.4	核判别分析	273
9.11	总结	274
	参考文献	274
第 10 章	无监督学习——异常诊断	276
10.1	简介	276
10.2	高斯分布的正常状态——孤立点分析	277
10.3	非高斯正常状态——神经网络方法	279
10.4	非参数密度估计——案例研究	283
10.4.1	试验结构和数据采集	284
10.4.2	数据与特征预处理	286
10.4.3	异常诊断	287
10.5	统计过程控制	289

10.5.1	基于自回归模型的特征提取	290
10.5.2	X-bar 控制图: 试验案例研究	291
10.6	其他控制图和多元统计过程控制	295
10.6.1	S 控制图	295
10.6.2	累积和图概述	295
10.6.3	EWMA 图概述	296
10.6.4	Hotelling 或 Shewhart T^2 图	296
10.6.5	多元累积和图	297
10.6.6	多元 EWMA 图	297
10.7	异常诊断阈值	298
10.7.1	极值统计	298
10.7.2	I 型和 II 型错误: ROC 曲线	302
10.8	小结	307
	参考文献	307
第 11 章	监督学习——分类与回归	309
11.1	简介	309
11.2	人工神经网络	309
11.2.1	生物性动机	309
11.2.2	并行处理范式	312
11.2.3	人工神经元	313
11.2.4	感知器简介	313
11.2.5	多层感知器	315
11.3	神经网络案例研究: 分类问题	318
11.4	其他神经网络结构	321
11.4.1	前馈网络	321
11.4.2	递归网络	321
11.4.3	细胞网络	321
11.5	统计学习理论和核方法	322
11.5.1	结构风险最小化	322
11.5.2	支持向量机	323
11.5.3	核函数	326
11.6	案例研究 II: 支持向量分类	328
11.7	支持向量回归	329
11.8	案例研究 III: 支持向量回归	331
11.9	用遗传算法进行分类特征选择	334
11.9.1	用工程判断进行特征选取	334
11.9.2	遗传特征选择	335
11.9.3	网络泛化问题	340
11.9.4	讨论和小结	342

11.10 讨论及总结	343
参考文献	344
第 12 章 数据归一化	347
12.1 简介	347
12.2 忽略数据归一化的实例	348
12.3 环境和运营变化源	349
12.4 传感器系统设计	352
12.5 运营和环境变化建模	354
12.6 查表	356
12.7 数据归一化的机器学习方法	362
12.7.1 自联想神经网络法	363
12.7.2 因子分析	363
12.7.3 马氏平方距离法	364
12.7.4 奇异值分解法	364
12.7.5 模拟房屋结构数据的应用	365
12.8 智能特征选择: 投影法	368
12.9 协整	371
12.9.1 理论	371
12.9.2 例证	373
12.10 总结	374
参考文献	375
第 13 章 结构健康监测的基本公理	378
13.1 简介	378
13.2 公理 I	379
13.3 公理 II	380
13.4 公理 III	382
13.5 公理 IV a	384
13.6 公理 IV b	384
13.7 公理 V	385
13.8 公理 VI	386
13.9 公理 VII	388
13.10 公理 VIII	390
13.11 小结	394
参考文献	394
第 14 章 损伤预后	397
14.1 简介	397
14.2 损伤预后的动因	397
14.3 损伤预后的当前状态	398
14.4 定义损伤预后问题	399