



国际电气工程先进技术译丛

WILEY

# 先进的结构损伤 检测理论与应用

**Advanced Structural Damage Detection: from  
Theory to Engineering Applications**

Tadeusz Stepinski

[波]

Tadeusz Uhl 主编

Wieslaw Staszewski

丁克勤 林树青 等译



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

国际电气工程先进技术译丛

# 先进的结构损伤检测理论与应用

Advanced Structural Damage Detection:  
from Theory to Engineering Applications

Tadeusz Stepinski

[波] Tadeusz Uhl 主编

Wieslaw Staszewski

丁克勤 林树青 等译



机械工业出版社

Copyright©2013 John Wiley & Sons, Ltd.

All Right Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled < Advanced Structural Damage Detection: From Theory To Engineering Applications >, ISBN: 978 - 1 - 118 - 42298 - 4, by Tadeusz Stepinski, Tadeusz Uhl, Wieslaw Staszewski, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记图字: 01 - 2013 - 7266 号。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

先进的结构损伤检测理论与应用 / (波) 斯蒂芬斯基 (Stepinski, T.) 等主编; 丁克勤等译. —北京: 机械工业出版社, 2014. 12

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文: Advanced structural damage detection: from theory to engineering applications

ISBN 978-7-111-48258-1

I. ①先… II. ①斯…②丁… III. ①无损检验 IV. ①TG115. 28

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 237096 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 张俊红 责任编辑: 阎洪庆

版式设计: 霍永明 责任校对: 张晓蓉

封面设计: 马精明 责任印制: 乔宇

北京机工印刷厂印刷 (三河市南杨庄国丰装订厂装订)

2015 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18 印张 · 359 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-48258-1

定价: 99.00 元



凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

本书全面回顾了各种监测技术的最新进展及其在结构健康监测 (SHM) 中的应用。本书强调基本概念、基本原理和典型应用, 并侧重理论方法研究与工程应用的有机结合, 内容涉及弹性波数值模拟、非线性声学、探测概率模型、压电传感技术、模态滤波技术、热成像技术以及基于视觉的监测技术等诸多学科, 充分体现了损伤探测和 SHM 的技术前沿。全书共分 10 章: 第 1 章引论, 第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法, 第 3 章介绍 SHM 系统辅助探测概率模型的应用, 第 4 章提供了非线性声学在 SHM 中应用的状况, 第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器, 第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法, 第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法, 第 8 章介绍了模态滤波器的理论 and 应用, 第 9 章讨论了在无损评价 (NDE) 和 SHM 中使用热成像技术的不同方式, 第 10 章介绍了基于视觉的监测系统。本书收集了近年来 SHM、损伤探测以及压电传感技术等方面的最新研究成果, 并包括大量相关示例, 内容新颖, 图表清晰, 实用性强。

本书可供从事无损检测、SHM 以及相关传感技术研究的科研人员、工程技术人员使用, 也可供机械和土木工程等领域的本科生和研究生参考。

# 译者序

结构健康监测 (SHM) 是工程领域中一种跨学科的、创新性的方法,也是近些年来国内外学者和相关从业者十分关注的热点问题,其利用嵌入或粘接到结构上的不同类型传感器,对结构完整性和性能进行监测,而不影响结构本身,也不损害其运行。随着大型工程结构和装备的性能退化和超期服役,如何实时监测结构损伤,动态掌握其健康状态,及时发现并消除安全隐患,避免重特大事故发生,是当前学术界和工程界亟待解决的重大课题。

本书全面回顾了各种监测技术的最新进展及其在结构健康监测 (SHM) 中的应用,内容新颖,图表清晰,实用性强。全书共分 10 章:第 1 章引论,第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法,第 3 章介绍在裂纹形态不确定和系统变化时,SHM 系统辅助探测概率模型 (MAPOD) 的应用,第 4 章提供了非线性声学应用于 SHM 的当前状况,第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器,第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法,第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法,第 8 章介绍了模态滤波器的理论和应用,重点关注它们在 SHM 系统中应用前景,第 9 章讨论了在无损评价 (NDE) 和结构健康监测 (SHM) 中使用热成像技术的不同方式,第 10 章介绍了基于视觉的监测系统。

本书翻译工作的分工如下:丁克勤研究员负责前言、目录、第 1~4 章、第 8 章、第 9 章;赵娜负责第 5 章;乔松负责第 6 章;李伯华负责第 7 章;陈光负责第 10 章。丁克勤研究员的博士后、研究生陈力、何亚莹、李昕阳、巩建华等分别参加了第 2 章、第 4 章、第 8 章、第 9 章的翻译工作。另外,俞跃参加了第 9 章的部分翻译和校核工作。陶芳泽和丁科负责译稿中的插图和表格的整理工作。林树青研究员负责全书的统一和协调,并对全书进行了最后的校核。

本书的翻译工作得到了机械工业出版社电工电子分社张俊红副社长的大力支持和热情鼓励,在此表示诚挚的感谢!

由于时间仓促和知识的局限性,书中难免有不当和疏忽之处,敬请广大读者不吝赐教。

# 原 书 前 言

结构健康监测 (SHM) 是工程领域中一种跨学科的、创新性的方法, 该方法对结构安全、完整性和性能进行监测, 而不影响结构本身, 也不损害其运行。SHM 利用嵌入或粘接到结构上的不同类型传感器, 来探测损伤的存在、定位、严重程度和结果。

通过采用远程感知和智能材料, SHM 技术集成无损评价 (NDE) 技术构建智能自监测结构, 其特征是可靠性增加, 寿命延长。SHM 主要应用于性能要求高的系统, 传统的现场评估手段成本高、难度大甚至无法实施。

本书由本领域的技术专家编写。通过研读本书, 学生、工程师和其他感兴趣的技术人员将会全面了解各种监测技术的最新进展及其在 SHM 中的应用。本书对主要 SHM 技术进行了全面回顾, 有利于本领域的深入研究与发展。本书不仅提供了一系列 SHM 技术的理论、原理和可行性研究结果, 还提供了一些新颖的数据处理算法, 并在实际应用中进行了验证。

本书报告了 MONIT 项目研究成果, 该项目由 AGH 科技大学 (AGH-UST) 组织实施, 得到了欧洲区域发展基金的支持。本书由 AGH 科技大学 (AGH-UST) 机器人与机电一体化系本领域研究人员编写, 共包括 10 章内容。

第 1 章引论, 简要概述了 SHM 的思想, 解释了其与传统的 NDE 技术的关系, 并通过 NDE 和状态监测 (CM) 的内容阐述了 SHM 的跨学科特性。本章还讨论了结构损伤和结构损伤探测方面, 概述了 SHM 程序的主要层次, 给出了采用整体和局部 SHM 方法的 SHM 系统的结构, 最后讨论了 SHM 系统设计过程的相关问题。

第 2 章介绍弹性波在平面结构中传播的数值模拟方法, 简要概述了弹性波传播的数值方法, 既有理论背景又有实践方面。这些方法包括: 有限元方法 (隐式和显式)、谱单元法、有限体积法和有限差分法。本章重点介绍了局部交互模拟法 (Local Interaction Simulation Approach, LISA), 它属于有限差分法。近些年来, 由于基于图形处理单元 (GPU)

快速演化技术，LISA 被重新发现具有吸引力。文中给出了由 GPU 实现 AGH 科技大学 (AGH - UST) 开发的 LISA，并采用基准模型案例对其性能进行了说明。

第 3 章介绍在裂纹形态不确定和系统变化时，SHM 系统辅助探测概率模型 (MAPOD) 的应用，通过采用传感器阵列监测平面结构的数值模拟来研究 SHM 系统相关问题。系统监测可靠性通过采用三维模型进行评估，模型包括兰姆波在类平板结构传播与不同形态裂纹引起的散射。第 2 章已经介绍了通过采用并行处理技术来对计算机模型进行处理，这大大加快了模拟时间。本章考虑的裂纹形态指裂纹的位置、方向和大小的变化。

第 4 章提供了非线性声学应用于 SHM 的当前状况。本章首先对含有损伤的弹性材料与非线性有关的物理机制的文献进行了全面综述。考虑了不同的应力 - 应变特征，详细地给出了接触声学非线性和非线性共振等两个特定现象的影响。文中对不同幅值和频率的两个波被引入到一个损伤结构中将产生混频的原理进行了解释。本章主要部分回顾了损伤探测方法及其应用于金属及玻璃、有机玻璃、混凝土和岩石等复合结构。

第 5 章讨论用于产生和传感表面波和兰姆波的压电传感器。在对传感器设计进行简单回顾后，本章重点介绍压电复合材料制成的传感器。文中给出了一种新颖的基于宏观纤维复合材料 (MFC) 的压电传感器。与常用的、传统的带电电极 MFC 传感器不同，文中展示的传感器提供了与特定波长相匹配的稀疏交叉指型电极。文中给出了由 MFC 基板制作的交叉指型传感器 (IDT) 的两种不同设计，并与带密集电极的传统 MFC 传感器进行了数值模拟和实验测试结果比较，对传统的 MFC 传感器和粘贴到一个铝板的 IDT 使用激光扫描振动计进行实验。

第 6 章给出了机电阻抗 (EMI) 方法，在提供了理论背景后，介绍了用于损伤探测的测量装置和信号处理算法，采用梁和板等简单机械结构的数值模拟结果对 EMI 方法进行了说明。文中还给出了在实验室条件下铝板和管道等简单结构的实验结果。最后，文中给出了在两架飞机结构 (在主起落架和铆接机身面板中的螺栓接头) 上开展 EMI 测量的结果，并对 EMI 用于 SHM 的可行性进行了讨论。

第 7 章回顾了采用传感器阵列选取兰姆波聚焦的方法。在简要介绍相控阵场后，本章讨论了基于延迟叠加 (DAS) 操作的传统波束形成技

术。首先，基于采用点状传感器和自由发散介质的简化模型的仿真结果，根据空间分辨率对二维（2D）阵列拓扑的几个例子进行比较。文中第二部分提出了一种新的波束形成技术，它是对 DORT（时反算子分解的法语缩写）法的一个扩展，其中连续小波变换（CWT）被用于非平稳快照的时频表示（TFR）。文中证实了所提出的技术可应用于铝板中的兰姆波自聚焦，不管是线性还是二维星形阵列。这表明采用提出的方法获得时反算子分解能分离铝板中点状散射，并且允许兰姆波聚集在板中出现的大量单个损伤中。

第8章介绍了模态滤波器的理论和应用，重点关注它们在 SHM 系统中的应用潜力。模态滤波器可以成功地用于大型工程结构的总体监测。机械系统的结构变化（如由于裂纹导致刚度下降）导致模态滤波器的输出值出现峰值。这些峰值由不完全模态滤波产生，不完全模态滤波是由于系统的局部结构变化引起的，基于模态滤波器的 SHM 系统理论上对温度或湿度等环境变化不敏感（总体结构变化不会引起模态滤波精度的下降）。文中提供了该技术的许多实际应用情况，包括对成熟的 SHM 系统的描述，以及全面的仿真、实验和操作试验结果。文中还验证了模态滤波器可以创建一个有价值的、计算量低的损伤探测指示器。此外，采用这个概念的 SHM 系统容易实现自动化。

第9章讨论了在 NDE 和 SHM 中使用热成像技术的不同方式。首先，本章介绍了热成像技术分类取决于带内部激励的主动式红外热像仪，包括振动热成像（VT），并全面概述了包括热成像相机和激励源的测量设备。其次，本章介绍了采用显式有限元对热机械耦合现象进行数值模拟的结果。文中给出了 AGH-UST 开发的 VT 测量系统的硬件和软件组成，并通过在实验室开展复合材料和金属样品的实验对系统进行说明。文中还给出了测量参数对热响应影响的研究结果。最后，本章给出了在一个军用飞机机身和翼板上进行测量的报告，并对与实地测量相关的具体项目进行了讨论。

第10章介绍了基于视觉的监测系统。本章首先回顾了基于视觉的测量方法的研究背景和相关工作，指出了系统在市场上的可用性，并讨论了其优缺点；接着重点论述了这种方法的主要步骤，如相机标定、尺度系数计算算法以及使用对应映射的图像矫正等；然后给出了采用成熟的程序工具和建筑物的可视化模型对这种方法进行仿真测试的结果的报告，并给出了推荐算法的不确定性增长的数值调查结果，并对其进行了



讨论，损伤探测概率也一并被考虑；另外，还对在实验室里开展的测试工作进行了报告，测试过程采用一个由钢结构组成的装置、两个高分辨率数码单反（SLR）相机和单点加载；并且文中还对基于视觉的测量方法与使用其他接触和非接触测量技术的结果进行了比较；最后，对在土木工程建设中使用的方法进行了评估。

# 目 录

译者序

原书前言

第 1 章 引论 ..... 1

1.1 引言 ..... 1

1.2 结构损伤和结构损伤探测 ..... 1

1.3 SHM 作为 NDT 的深化 ..... 3

1.4 SHM 的跨学科性质 ..... 4

1.5 SHM 系统的结构 ..... 7

1.5.1 局部 SHM 方法 ..... 8

1.5.2 整体 SHM 方法 ..... 8

1.6 与 SHM 系统设计有关的方面 ..... 10

1.6.1 设计原则 ..... 11

参考文献 ..... 12

第 2 章 弹性波传播的数值模拟 ..... 14

2.1 引言 ..... 14

2.2 建模方法 ..... 15

2.2.1 有限差分法 ..... 15

2.2.2 有限元法 ..... 16

2.2.3 谱单元法 ..... 17

2.2.4 边界元法 ..... 19

2.2.5 有限体积法 ..... 20

2.2.6 其他数值方法 ..... 21

2.2.7 时间离散化 ..... 23

2.3 混合和多尺度建模 ..... 25

2.4 局部交互仿真方法 (LISA) ..... 29

2.4.1 GPU 实现 ..... 31

2.4.2 进一步发展的基于 GPU 的  
LISA 软件包 ..... 33

2.4.3 cuLISA3D 解算器的性能 ..... 33

2.5 耦合方案 ..... 35

2.6 损伤模型 ..... 41

2.7 波传播的吸收边界条件 ..... 42

2.8 结论 ..... 44

参考文献 ..... 45

第 3 章 结构健康监测中的辅助探测

概率模型 ..... 51

3.1 引言 ..... 51

3.2 探测概率 ..... 52

3.3 POD 的理论方面 ..... 53

3.3.1 击中/脱靶分析 ..... 53

3.3.2 信号响应分析 ..... 55

3.3.3 置信区间 ..... 56

3.3.4 误报率 ..... 57

3.4 从 POD 到 MAPOD ..... 57

3.5 SHM 的 POD ..... 58

3.6 考虑缺陷几何不确定性的 SHM  
系统的 MAPOD ..... 59

3.6.1 SHM 系统 ..... 59

3.6.2 仿真框架 ..... 60

3.6.3 可靠性评估 ..... 60

3.7 结论 ..... 63

参考文献 ..... 63

第 4 章 非线性声学 ..... 66

4.1 引言 ..... 66

4.2 理论背景 ..... 67

4.2.1 接触声学的非线性 ..... 69

4.2.2 非线性共振 ..... 71

4.2.3 混频 ..... 72

4.3 损伤探测方法和应用 ..... 77

4.3.1 损伤探测非线性声学 ..... 78

4.4 结论 .....	93	6.5.1 板结构试验 .....	140
参考文献 .....	94	6.5.2 管道截面的状态监测 .....	144
<b>第5章 导波压电复合材料</b>		6.5.3 讨论 .....	146
<b>传感器</b> .....	97	6.6 飞机结构应用验证 .....	147
5.1 引言 .....	97	6.6.1 主起落架舱螺栓联接的 监测 .....	147
5.2 导波压电传感器 .....	98	6.6.2 铆接机身面板监测 .....	152
5.2.1 压电元件 .....	98	6.6.3 讨论 .....	154
5.2.2 基于压电复合材料的 传感器 .....	98	6.7 结论 .....	154
5.2.3 交叉指型传感器 .....	101	参考文献 .....	155
5.3 基于 MFC 的新型 IDT-DS .....	105	<b>第7章 导波波束的形成</b> .....	157
5.4 兰姆波生成压电复合材料 传感器 .....	107	7.1 引言 .....	157
5.4.1 数值模拟 .....	107	7.2 理论 .....	158
5.4.2 实验验证 .....	109	7.2.1 合成孔径成像 .....	158
5.4.3 数值模拟与实验结果 .....	109	7.2.2 有效孔径概念 .....	162
5.4.4 讨论 .....	116	7.2.3 成像方案 .....	164
5.5 IDT-DS4 的兰姆波传感特性 .....	117	7.2.4 自聚焦阵列 .....	166
5.5.1 数值模拟 .....	117	7.3 数值结果 .....	168
5.5.2 实验验证 .....	119	7.3.1 有效孔径实例 .....	168
5.6 结论 .....	121	7.3.2 星形阵列成像 .....	170
附录 .....	121	7.3.3 DORT-CWT 方法的数值 验证 .....	174
参考文献 .....	122	7.4 实验结果 .....	176
<b>第6章 机电阻抗方法</b> .....	125	7.4.1 实验装置 .....	176
6.1 引言 .....	125	7.4.2 传感阵列的实验评估 .....	176
6.2 理论背景 .....	126	7.4.3 有效孔径的实验评估 .....	178
6.2.1 机电阻抗的定义 .....	126	7.4.4 使用合成孔径的损伤成像 .....	179
6.2.2 测量技术 .....	127	7.4.5 DORT-CWT 方法的实验 验证 .....	179
6.2.3 损伤探测算法 .....	129	7.4.6 基于自聚焦发射阵列的损伤 成像 .....	182
6.3 数值模拟 .....	129	7.5 讨论 .....	183
6.3.1 基于有限元的机电阻抗建模 方法 .....	130	7.6 结论 .....	184
6.3.2 不确定性和敏感性分析 .....	134	参考文献 .....	185
6.3.3 讨论 .....	137	<b>第8章 模态滤波技术</b> .....	187
6.4 先进 SHM 系统 .....	138	8.1 引言 .....	187
6.5 实验室测试 .....	140		

8.2 当前发展状况 .....	188	参考文献 .....	240
8.3 方法的制定 .....	192	<b>第 10 章 基于视觉的监测系统</b> .....	242
8.4 方法的数值验证 .....	195	10.1 引言 .....	242
8.4.1 用于模拟的模型 .....	195	10.2 当前发展现状 .....	243
8.4.2 测试程序 .....	196	10.3 数字图像相关法的挠度 测量 .....	244
8.4.3 分析的结果 .....	197	10.4 图像配准和平面矫正 .....	247
8.4.4 基于模型的探测概率 .....	200	10.5 自动特征检测和匹配 .....	249
8.5 基于模态过滤的监测系统 .....	202	10.5.1 基于挠度变形的损伤检测 和定位 .....	250
8.5.1 主要假设 .....	202	10.6 软件工具开发 .....	252
8.5.2 测量诊断装置 .....	203	10.7 方法的数值研究 .....	253
8.5.3 模态分析和模态过滤 软件 .....	204	10.7.1 视觉测量系统的数值 模型 .....	253
8.6 实验室测试 .....	206	10.7.2 方法的不确定性研究 .....	253
8.6.1 测试程序 .....	206	10.7.3 基于概率模型的损伤 探测 .....	260
8.6.2 实验结果 .....	207	10.8 方法的实验室研究 .....	263
8.6.3 探测分析的概率 .....	212	10.8.1 实验室设置方法的 测试 .....	264
8.7 操作测试 .....	214	10.8.2 实验室研究方法的探测 概率 .....	264
8.8 结论 .....	217	10.8.3 开发方法的精度研究 .....	270
参考文献 .....	218	10.9 方法的关键研究和评价 .....	272
<b>第 9 章 振动红外热成像法</b> .....	219	10.9.1 电车高架桥挠度监测 .....	272
9.1 引言 .....	219	10.10 结论 .....	275
9.2 热成像无损检测技术现状 .....	219	参考文献 .....	275
9.3 振动热成像检测系统的发展 .....	227		
9.4 虚拟测试 .....	230		
9.5 实验室测试 .....	235		
9.6 现场测量 .....	237		
9.7 概要和结论 .....	239		

# 第 1 章 引 论

## 1.1 引言

为了确保结构的完整性和安全性，人们普遍认为工程结构的维护是很重要的，尤其对土木工程结构和运输设备。例如，对航空结构定期开展检测，对于飞机机身可能产生的疲劳裂纹进行监测。

对于损伤探测，已经发展了各种不同的无损检测与评价（NDT/E）方法。超声检测、涡流检测被广泛用于裂纹检测，就是很好的、成熟的例子。NDT/E 技术往往局限于单点检测，当大面积需要被监测时就必须采用扫描手段。

近些年来，已发展了一系列新的损伤探测技术和传感技术。这些技术方法可对大型结构实施全面的在线监测，属于结构健康监测（SHM）领域。它们有能力实现对损伤连续监测，包括应用新的传感器。通常采用先进传感器的损伤监测系统，均涉及一个新设计理念。执行器、传感器和信号处理单元被集成在监测系统中，推进了该领域的发展。

结构健康监测（SHM）常在一个结构内集成传感器、执行器、可能的智能材料、数据传输和计算能力，其目的是及时探测、定位、评估和预测现在或将来导致结构功能故障的损伤（Adams, 2007; Balageas 等, 2006），一个典型的结构健康监测（SHM）系统是与结构全面的、在线的损伤识别相关的，这样的系统通常应用于航空航天（Staszewski 等, 2004）和土木工程（Wenzel, 2005）中。

尽管 SHM 系统利用 NDT/E 方法作为工具，但 SHM 系统和 NDT/E 操作原理有许多不同。NDT/E 技术通常应用于离线和局部结构的损伤检测，而 SHM 方法通常能够对整体结构在其运行过程中实施实时监测。SHM 是结构诊断的一个连续的步骤，从历史上看，结构诊断是从采用状态监测（CM）系统对结构损伤探测发展过来的。CM 系统有能力对损伤进行探测，但需以对结构运行过程进行全面评估为基础。SHM 有望进一步对损伤演化进行早期探测，在理想的情况下，能够在结构损伤真实发生之前预测损伤将发生（Inman 等, 2005）。

## 1.2 结构损伤和结构损伤探测

在机械结构中，损伤术语包含许多不同的内涵，在结构健康监测领域中，损伤可以直观地理解为缺陷或失效，它损害工程结构的功能和工作条件。当采用系统分

析时，可以给损伤一个更精确的定义。通过输入激励和输出可测信号，结构可以被当作一个系统。在这种背景下，损伤可以被视为一种额外的激励，导致能量流动和转换，引起输出信号的变化。因此，损伤探测是一个逆问题，通过测量输出信号来探测损伤。损伤也可以被视为对材料属性和/或结构物理参数的一个改变。由于材料沉积和塑性或者疲劳和腐蚀等原因，材料属性和参数发生变化。在这种背景下损伤探测是一个识别问题。为评估结构损伤，常需提取材料属性和物理参数。

在过去的几十年里，已经发展了许多不同的损伤探测方法。这些方法可以分为基于模型和基于信号的方法。基于振动的方法探测损伤，通常采用从物理模型得到的物理参数和/或模态参数。当监测载荷以获得结构有用信息时，模型也是基础。基于信号的方法依赖于各种类型的直接测量值，如噪声、振动、超声或温度。

基于模型和基于信号的两种方法均需信号处理技术。前者需要建立合理的模型，并分析模型中与损伤相关的参数变化；后者需要提取特征值，并建立这些特征值与可能损伤之间的关系。

基于信号的方法大多数依赖于结构状态与信号特性或症状之间的关系。由于工程结构的复杂性、设计的复杂性和先进材料的使用，结构状态与症状关系常常不易分析。因此，需采用不同的信号处理方法来进行分析，包括特征和先进的特征分析。前者基于简单的特征进行分析，如统计谱矩或物理/模态参数；后者应用多维特性（如向量、矩阵、图像等），如光谱、信号瞬时特征或时间-频率分布。

在这种背景下，损伤探测可当作模式识别的问题。模式识别需要特征选择程序进行训练，通常基于统计、句法或神经网络方法。这一领域的许多最近研究成果是以信号处理（Staszewski 和 Worden, 2009）和机器学习（Worden 等, 2011）新发展为基础的。很明显，这些发展是实施任何 SHM 系统所必要的。

损伤探测构成整体损伤识别问题的主要目标。SHM 系统的任务可以当作一个过程，由五个方面的活动组成，形成了五个重要单元或级别，如图 1.1 所示（Balageas 等, 2006；Cempel, 1991；Rytter, 1993）。

五个级别分别为 I、损伤探测；II、损伤定位；III、损伤大小的评估；IV、剩余寿命预测；V、具有自评价、自愈或控制能力的智能结构。在这种情况下，探测能够给出损伤可能存在的定性表示，定位能够给出损伤可能存在的位置信息，评估能够通过所提供的损伤类型和大小信息估计其严重性，最后预测能够估计结构的剩余寿命和预测可能的故障或失效。前 3 个级别（即探测、定位、评估）主要与系统辨识、建模和信号处理方面有关。预测级别属于疲劳分析、断裂力学、

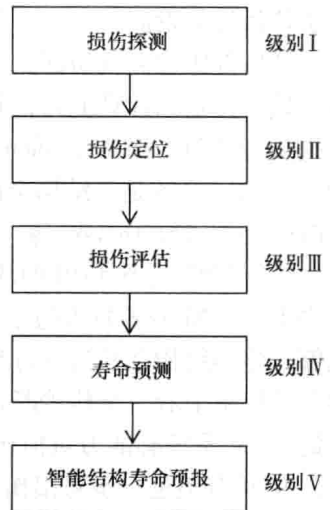


图 1.1 SHM 程序的主要级别

设计评估、可靠性和统计分析的领域。在许多实验室，这个级别被广泛探索研究，但目前没有商业上可用的解决方案。所有这些级别需要各种数据元、信号和/或信息处理。

### 1.3 SHM 作为 NDT 的深化

在许多工程领域，损伤探测/监测、NDT/E 和 SHM 往往被误解为同义词和可能具有相同的含义。结构的损伤、健康和监测可以使用各种定义来描述。一般来说，健康是结构在整个寿命周期内工作/执行和保持结构完整性的能力，而监测是诊断和预测的过程，损伤则是一种材料、结构或功能失效。同时，在这种情况下，结构完整性是工程组件和结构的安全性和失效的边界条件。在飞机维护中，损伤探测和直接的积累损伤监测为载荷监测提供了一种替代方法。

SHM 新进展既与现有技术、新设备和传感器技术的改进有关，也与新的监测原理有关。可以用三个例子说明。首先，声发射（AE）是一种行之有效的无损检测技术，用于损伤识别已有多年。然而，当与监测结构集成在一起的光纤传感器被使用时，AE（被动的无损检测方法）也可以与基于兰姆波损伤探测相结合（主动的无损检测方法）。其次，兰姆波第一次用于 NDT/E 可追溯到 19 世纪 50 年代，虽然智能传感器（如压电陶瓷、聚合物、圆盘、油漆、纤维）在 19 世纪 90 年代初期被引入时，才产生真正的 SHM 方法。第三，很多新的损伤探测方法最近被提出，这些方法是基于非线性声学的非经典方法，具有良好的损伤探测灵敏度。

无损检测（NDT）技术往往局限于单点测量，在需要对结构进行大面积监测时，就需要扫描。最近几年，产生了一系列新的损伤检测技术和传感技术。SHM 方法允许对大型结构进行整体在线监测，同时也提供损伤定位。这些方法应用新的传感器能够实现对损伤连续监测。采用智能传感技术的损伤监测系统体现了一种新的设计理念，将执行器、传感器和信号处理单元直接集成在一起。在过去 20 ~ 30 年，这个领域已开展了大量研究工作。

通常，交替使用 SHM、损伤探测/监测和 NDT 来评价结构运行状态。然而正如上面所讨论的，只有 SHM 定义了整个过程，包括 5 个重要的识别单元（或级别）。正如 Adams（2007）准确指出的，SHM 与 NDT 的区别在于全面在线实施各种损伤探测技术，这些技术需要定期空间测量（或观察）。在线实施过程比传统的无损检测技术需要更先进的信号处理手段，以实现可靠的损伤探测。

无损检测（NDT）涉及将已知的被测输入信号与一个已知的模型进行比较——它不需要损坏物理系统。在损伤已经被定位后，无损检测通常以离线方式在当地进行，或周期性的，以改进结构性能。如果结构损伤位置已知，无损检测技术主要被用来表征损伤和评估其严重性。

## 1.4 SHM 的跨学科性质

SHM 是一个跨学科的研究领域,集成了材料科学、力学、电子学和计算机科学这些基本科学,并与结构及其生命周期密切相关。图 1.2 说明了这一点。

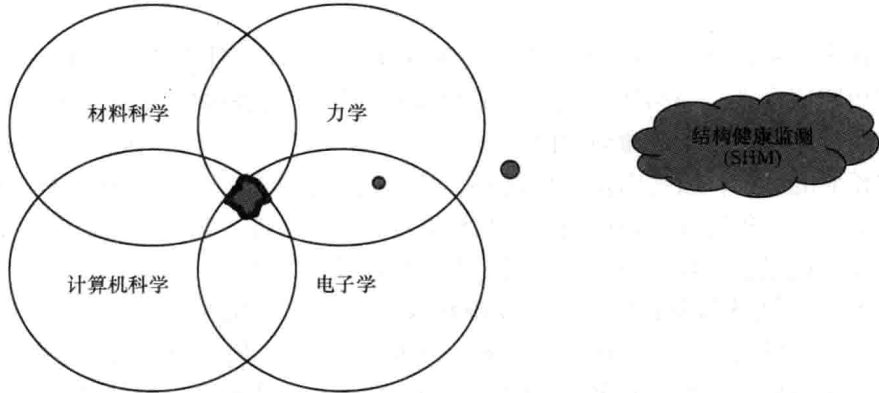


图 1.2 SHM 的跨学科性质

SHM 方法实现损伤探测需要 3 个要素。它们是：①被监测结构和可能的损伤场景方面的知识；②可以用于损伤探测的传感器和仪表，它们被用来获取信号/数据；③用于提取可能损伤和整体结构完整性信息的相关分析。这 3 个要素的所有建模、数值模拟和信号处理是重要的活动。

SHM 的跨学科性质需要在设计、制造和运行中有一个专用的方法，因此，SHM 系统大多安装在新结构上，很少安装在运行很长一段时间的旧结构上。将 SHM 安装在运行历史未知的结构上探测损伤是非常困难的，因为这种情况下对损伤正确评估的概率远低于新结构。

一个 SHM 系统设计取决于可能发生的损伤类型、用于设计的材料类型和用于损伤探测的物理现象。一个 SHM 系统设计的复杂性取决于材料损伤的局部性质，它们最有可能发生在评估的结构上，它们通常可能不会显著影响在运行过程中测量的结构响应，例如它的低频振动谱。

从损伤结构难以获得 SHM 数据的另一个因素，是在运行期间不易到达特定部件。因此，常常需要应用分析程序和仿真工具对局部结构行为进行深入研究，这些分析程序和工具广泛用于理解受损结构行为和相关信号的特征。由于 SHM 系统成本相对较高，因此必须非常仔细地进行设计和优化，要充分考虑系统性能影响最小化、硬件成本最小化（例如传感器和执行器的数量）、损伤探测和评估准确性最大化。

如今，在 SHM 系统的设计中，多物理和多尺度仿真是极有价值的工具。设计过程包括几个步骤，最具有挑战性的是：①选择一个对损伤非常敏感、易于探测的现



象, ②定义具有自动验证能力的所需的传感系统, ③选择数据采集和处理架构, ④定义特征提取和信息减少程序, ⑤制定和实施损伤探测程序, ⑥损伤定位和它的大小评估。

对于任何结构, 如何解决所有这些设计和实现的问题没有通用规则。设计方法都是针对一个给定的结构、所采用的材料和适用于健康监测的物理现象。SHM 技术有助于实现更好的运营安全, 对降低维护和操作成本具有经济价值, 因为它可以长时间预测可能发生的损伤, 因此, 使操作人员有足够的时间来计划主动服务和维护操作。

有几个学科是与 SHM 非常密切相关的: CM——状态监测 (Inman 等, 2005); NDT/E——无损检测/评价 (Staszewski 等, 2004); SPC——统计过程控制 (Inman 等, 2005); DP——损伤预测 (Inman 等, 2005); MP——维护计划 (Pietrzyk 和 Uhl, 2005), 例如 RCM (以可靠性为中心的维护)。

CM (状态监测) 在很多方面与 SHM 非常相似, 但在实际使用中, 它更多应用于旋转和往复机械。CM 方法的主要特点是, 损伤类型和位置基本上是明确的, 可能损伤的数量是有限的, 包含损伤特征的数据库是可以得到的, 环境条件对测量结果的影响是很轻微的, 通过使用 CM 获得经济效益是良好的。与 SHM 方法相比, CM 的一个突出优点是, 使用 CM 能产生的经济效益, 在全球范围内有许多旋转机械监测标准。

另一方面, SHM 也有不足: 损伤定位不清晰; 由于被监测的结构难以接近, 给测量带来诸多困难; 损伤类型往往难以识别; 环境条件对测量结果影响显著; SHM 系统的成本相对较高, 所以它们常常应用在关键结构上。

CM 系统仅依赖于在运行时对结构响应的测量, 不需要采用专用的执行器来激励或触发。图 1.3 按照硬件与结构集成关系, 给出了 CM、NDT 和 SHM 系统之间的差别。

可以看出, NDT 和 SHM 系统的主要区别在硬件架构上。在 SHM 系统中, 传感器和执行器被集成到 (或结合) 结构中, 而 NDT 是一个外部系统, 它与传感器和执行器是独立的 (见图 1.3c)。SHM 和 NDT 系统与其他工具集成的示意图如图 1.4 所示。

NDT/E 和 SHM 的主要区别是它们的工作方式, NDT/E 的工作方式是离线的, 而 SHM 的工作方式是在线的, 这使得 SHM 的复杂程度远远超过 NDT/E 的应用。

统计过程控制 (SPC) 的目标与 SHM 相似, 但 SPC 系统的最终目标不仅是探测结构损伤, 而且是对过程进行诊断——它们使用多种传感器对过程参数的变化进行监测。过程参数因结构失效而发生变化, 在这方面 SHM 和 SPC 是可比的。

损伤预测 (DP) 是用来预测运行结构的剩余寿命, 在运行中, 它们的性能仍将高于给定的阈值。DP 系统充分利用损伤的大小和位置以及运行载荷的有关知识。剩余寿命预测是基于一个预测模型, 该模型从所采用的监测系统获得信息 (该系统