

指导单位
组织单位

中国科协智能制造学会联合体
中国机械工程学会

普通高等教育新工科·智能制造系列规划教材

智能运维与 健康管理

Intelligent Maintenance and Health Management

陈雪峰 主编 / 訾艳阳 副主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

· 智能制造系列规划教材

智能运维与健康管埋

主 编 陈雪峰
副主编 訾艳阳
参 编 高金吉 江志农 何清波 雷亚国 严如强
李巍华 邱伯华 何 晓 史铁林 轩建平
杨申仲 褚福磊 冯 坤 王 宇 陈景龙
刘一龙 翟 智 贺王鹏 史红卫 宫保贵
马晓骏 魏元雷 徐小力



机械工业出版社

本书是在《中国制造 2025》计划的指导下与中国科协智能制造学会联合体推进《智能制造领域人才培养方案》的背景下,在机械工程学会的组织下编写的。本书面向高端装备全寿命周期安全运行的工程需求,重点讲解了故障机理分析、早期故障预示、智能维护与健康管理的基本原理、实现方法和关键技术,介绍了数控装备、石化、船舶、高铁以及航空航天等重要领域智能运维与健康管理的典型应用,旨在培养学生具有智能运维与健康管理的基本知识以及系统思维能力、项目管理能力和跨学科智能制造的沟通能力。

本书结合了作者团队在复杂高端装备故障诊断与健康管理方面累积的几十年研究成果与最新研究进展,在多个典型行业应用经验的基础上,深入浅出且系统性地讲解了智能运维与健康管理的基础知识与关键技术。

本书可作为高等院校相关专业高年级本科生和研究生的专业教材与参考书,也可供从事相关行业高端装备安全、健康管理与故障诊断等方向的科学研究与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能运维与健康管理的陈雪峰主编. —北京:机械工业出版社, 2018. 10
普通高等教育新工科. 智能制造系列规划教材
ISBN 978-7-111-61033-5

I. ①智… II. ①陈… III. ①智能制造系统-设备管理-高等学校-教材
IV. ①TH166

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 225547 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:舒恬 责任编辑:舒恬 王勇哲 邓海平 余峰

责任校对:王明欣 封面设计:张静

责任印制:孙炜

保定市中国画美凯印刷有限公司印刷

2018 年 10 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·20 印张·493 千字

标准书号:ISBN 978-7-111-61033-5

定价:55.00 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

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

前 言



为贯彻落实中国科协“加快培养新一代信息技术人才，解决新一代信息技术人才紧缺问题”的精神，中国科协智能制造学会联合体与中国机械工程学会启动了智能制造领域紧缺人才的培养工作。2018年2月7日，中国机械工程学会等组织在京召开了以“智能制造人才培养‘大学加课’”为主题的研讨会，会议要求相关高校面向工科专业编写智能制造的普适性教材，本书的建设工作由此起步。

《中国制造2025》指出：“基于信息物理系统的智能装备、智能工厂等智能制造正在引领制造方式变革”。为深入实施《中国制造2025》，根据国家制造强国建设领导小组的统一部署，教育部、人力资源和社会保障部、工业和信息化部等联合编制了《制造业人才发展规划指南》，坚持育人为本，大力推进培养智能制造等领域的人才。

智能制造是将物联网、大数据、云计算等新一代信息技术与设计、生产、管理、运维、服务等制造活动的各个环节融合，具有信息深度自感知、智慧优化自决策、精准控制自执行、运维监控自诊断等功能的先进制造过程、系统与模式的总称。“智能运维与健康”作为产品全生命周期智能制造的一种新模式，其基础是机械状态监测与故障诊断的理论及技术，研究对象是产品全生命周期链中窗口期最长的运行服役阶段。在2018年8月10日召开的第十六届全国设备故障诊断学术会议的“故障诊断研究的新春天”主题沙龙中，经研讨得出：重大装备的智能运维与健康，已经成为符合制造业两化融合的未来运行安全保障，是制造服务融合的新范式。

本书的编写团队包含了多名国内本领域具有雄厚研究基础的知名学者与行业专家，虽编写时间紧迫，他们却依然贯彻人才培养至上的理念，以极大的热情投入教材编写工作，并融入了其最新的研究成果。本书编写过程中，编写人员遵循全国机械类教学指导委员会所倡导的“新工科”教材编写精神，注重教材的知识关联与问题空间构建。本书由基础知识篇、工程应用篇两大板块构成，在应用领域进行了精心选择，对象不仅包括石化行业、数控机床等故障诊断经典领域，也涵盖了作为我国制造业名片的大型民用客机与高铁等新兴领域。本课程旨在教授学生智能运维与健康的基本知识，引导学生构思兼顾社会、安全、环境等因素的综合方案，培养学生建立具有工程情怀的严谨观、安全观与可持续发展观，以及系统思维、项目管理、跨学科智能制造沟通与管理的能力。

本书由西安交通大学陈雪峰任主编，西安交通大学訾艳阳任副主编。第1章由西安交通大学陈雪峰和王宇编写；第2章由上海交通大学何清波和清华大学褚福磊编写；第3章由西安交通大学訾艳阳、陈景龙和贺王鹏编写；第4章由西安交通大学雷亚国编写；第5章由西安交通大学严如强和华南理工大学李巍华编写；第6章由中国机械工程学会杨申仲和北京信

息科技大学徐小力编写；第7章由华中科技大学史铁林和轩建平编写；第8章由北京化工大学高金吉、江志农和冯坤编写；第9章由西安交通大学瞿艳阳、中国船舶工业系统工程研究院邱伯华和何晓编写；第10章由西安交通大学刘一龙和中国中车股份有限公司宫保贵编写；第11章由西安交通大学陈雪峰和翟智、中国商用飞机有限责任公司马晓骏和魏元雷、中国航天科工集团一院测控公司史红卫编写。

本书是在中国科协智能制造学会联合体的指导下，由中国机械工程学会组织编写的普通高等教育新工科·智能制造系列规划教材之一。中国科协智能制造学会联合体致力于增强我国智能制造技术创新能力、促进我国制造业向中高端迈进。中国机械工程学会是中国科协智能制造学会联合体成员单位和秘书处单位，是我国成立较早、规模最大的工科学会之一，是我国机械行业非常重要的对外交流渠道，承担了行业和政府部门委托的大量合作任务，担负着学术交流、人才培养和对外交流等多项工作。在本书编写过程中，中国机械工程学会常务副理事长张彦敏对本书高度重视，多次与相关领导协调，为确保本书编写和推广工作的顺利进行提供了重要的支持；中国机械工程学会继续教育处副处长王玲多次精心安排相关领域专家研讨，为编写工作的高效、高质推进和完成付出了巨大的精力；中国机械工程学会综合技术处副处长杨丽在系列教材编写的前期调研和组织协调上，给予了大力支持。同时，本书的出版也得到了机械工业出版社的大力支持和悉心编校。在此一并表示衷心的感谢。

本书可供机械类、电气类等工科专业本科生或研究生选用，亦可供企业工程师或相关研究人员参考。选用本教材的学校可根据培养方案和教学计划，按照16~48学时设置课程，工程应用篇可以根据不同专业的需求选讲。为方便教学，本书亦提供了教学计划、课件、视频等配套资源，供授课教师参考，欢迎选用本书作教材的教师登录 www.cmpedu.com 注册下载。

由于本书涉及的学科与内容广泛，很多相关技术与应用仍处于发展和完善阶段，同时由于作者水平有限，书中难免有错误与不妥之处，敬请各位读者与专家批评指正。

编者

目 录

前 言

基础知识篇

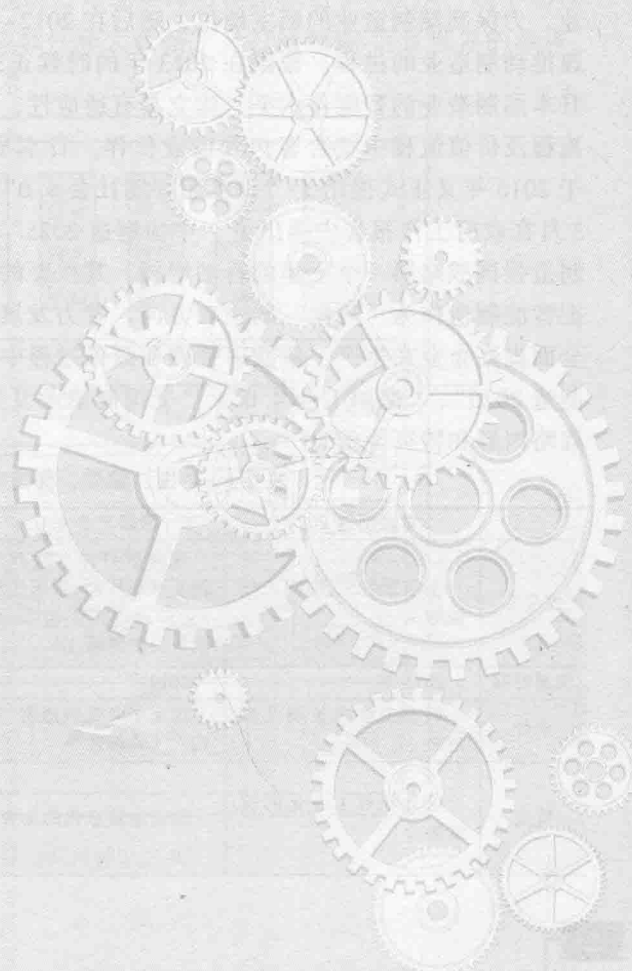
第 1 章 绪论	2	4.1 工业大数据概述	84
1.1 引言	2	4.2 工业大数据质量改善	89
1.2 机械状态监测与故障诊断	6	4.3 大数据健康监测	92
1.3 智能运维与健康管理的	14	4.4 大数据智能诊断	97
1.4 本书培养目标与“新工科”计划、 高等工程教育专业认证的关系	24	4.5 大数据驱动的健康管理案例	103
本章小结	26	本章小结	108
参考文献	26	思考题与习题	108
第 2 章 典型故障机理分析方法	28	参考文献	109
2.1 重大装备典型故障	29	第 5 章 融入新一代人工智能的智能 运维	111
2.2 故障机理分析的动力学基础	35	5.1 新一代人工智能概述	112
2.3 典型故障动力学分析及实例	41	5.2 深度神经网络	113
本章小结	51	5.3 迁移学习	124
思考题与习题	51	5.4 深度迁移学习及其特征挖掘	128
参考文献	51	本章小结	133
第 3 章 基于特征提取的故障诊断	53	思考题与习题	134
3.1 特征提取技术概述	54	参考文献	134
3.2 故障诊断内积匹配诊断原理	55	第 6 章 设备安全智能监控	137
3.3 基于小波的特征提取方法	60	6.1 设备工程精益管理	138
3.4 基于小波的稀疏特征提取	71	6.2 设备安全智能检测监控	146
本章小结	80	6.3 典型行业的智能运维应用	158
思考题与习题	80	本章小结	159
参考文献	81	思考题与习题	160
第 4 章 大数据驱动的智能故障诊断	83	参考文献	160

工程应用篇

第 7 章 加工过程智能运维	162	7.3 加工过程智能运维关键技术	174
7.1 加工过程智能运维概述	162	7.4 加工过程智能运维系统实施典型 案例	189
7.2 加工过程智能运维系统架构	162		

本章小结	198	第 10 章 高铁故障预测与健康管理的	252
思考题与习题	198	10.1 高铁故障预测与健康管理的概述	252
参考文献	198	10.2 系统架构	253
第 8 章 石化装备智能运维	200	10.3 牵引电动机故障诊断与健康管理的	
8.1 石化装备智能运维概述	200	关键技术	257
8.2 石化装备智能运维系统架构	201	10.4 牵引电动机故障诊断与健康管理的	
8.3 石化装备智能运维关键技术	203	系统实现	264
8.4 石化装备智能运维应用实例	225	本章小结	274
本章小结	232	思考题与习题	275
思考题与习题	232	参考文献	275
参考文献	232	第 11 章 航天航空健康管理	276
第 9 章 船舶智能运维与健康管理的	233	11.1 航天航空健康管理概述	276
9.1 智慧船舶概述	233	11.2 空天发动机健康管理	277
9.2 船舶智能运维与健康管理的系统架构	234	11.3 直升机健康管理	287
9.3 船舶智能运维与健康管理的		11.4 民用客机故障预测与健康管理的	
关键技术及		系统	294
应用案例	238	本章小结	310
9.4 全球智慧船舶系统	243	思考题与习题	310
本章小结	251	参考文献	310
思考题与习题	251		
参考文献	251		

基础知识篇



第1章

绪 论

1.1 引 言

制造业是国民经济的主体，是立国之本、兴国之器、强国之基，高端制造业更是一个国家核心竞争力的重要标志，是战略性新兴产业的重要一环，是制造业价值链的高端环节，国际化战略的竞争高地。进入 21 世纪以来，互联网、新能源、新材料和生物技术均获得了极为快速的发展，并正在以极快的速度形成巨大产业能力和市场，将使整个工业生产体系提升到一个新的水平，推动一场新的工业革命。如何能紧跟甚至引领新一代的工业革命浪潮，是每个国家所关心的核心问题。2009 年底，美国发布《制造业复兴框架》，旨在复兴美国制造业，力保高端制造业的霸主地位，随后在 2012~2016 年发布了“美国先进制造三部曲”，加速推动制造业的进程。德国在 2013 年的时候正式提出了“工业 4.0”的战略规划，旨在提升本国制造业的智能化水平，建立具有适应性、资源效率及基因工程学的智慧工厂，在商业流程及价值流程中整合客户及商业伙伴。日本早在 20 世纪末，就开始推动智能制造计划，于 2016 年又正式提出了“日本超智能社会 5.0”的概念。而在我国，李克强总理于 2015 年 3 月在政府工作报告中提出了“中国制造 2025”的宏伟战略。“中国制造 2025”是中国实施制造强国战略第一个十年的行动纲领，其主要的切入点为推进信息化和工业化的深度融合，把智能制造作为“两化”的主攻方向，着力发展智能装备和智能产品，使生产过程智能化，全面提高企业生产、研发、管理和服务过程中的智能化水平。表 1-1 中详细对比了“中国制造 2025”、“德国工业 4.0”、“美国制造业复兴”和“日本超智能社会 5.0”四者之间的战略内容和特征等信息^[1]。

表 1-1 中国、德国、美国和日本制造战略对比^[3]

	中国制造 2025	德国工业 4.0	美国制造业复兴	日本超智能社会 5.0
发起者	工信部牵头，中国工程院起草	联邦教研部与联邦经济技术部资助，德国工程院、弗劳恩霍夫协会、西门子公司建议	智能制造领导力联盟(SMLC)、26 家公司、8 个生产财团、6 所大学和 1 个政府实验室	日本内阁
发起时间	2015 年	2013 年	2011 年	2016 年
定位	国家工业中长期发展战略	国家工业升级战略，第四次工业革命	美国“制造业回归”的一项重要内容	实现日本社会智能化
特点	信息化和工业化的深度融合	制造业信息化的集合	工业互联网革命，倡导将人、数据和机器连接起来	社会的物质和信息饱和且高度一体化

(续)

	中国制造 2025	德国工业 4.0	美国制造业复兴	日本超智能社会 5.0
目的	增强国家工业竞争力,在 2025 年迈入制造强国行列,在建国 100 周年时占据世界强国的领先地位	增强国家制造能力	专注于制造业、出口、自由贸易和创新,提升美国竞争力	最大限度利用信息技术通过网络空间和物理空间的融合、共享,给每个人带来“超级智慧社会”
重要主题	互联网+智能制造	智能工厂、智能生产、智能物流	智能制造	超智慧社会
实现方式	通过智能制造,带动产业数字化水平和智能化水平的提高	通过价值网络实现横向集成、工程端到端数字集成横跨整个价值链、垂直集成和网络化的制造体系	以“软”服务为主,注重软件、网络、大数据等对工业领域服务方式的颠覆	在德国工业 4.0 的基础上,通过智能化技术解决相关经济和社会课题的全新的概念模式
重点技术	制造业互联网化	CPS(信息物理系统)	工业互联网	虚拟空间和现实空间

在“中国制造 2025”中,智能制造是其重要主题,也是其主攻方向。以制造业数字化、网络化和智能化为特征的智能制造是新一轮工业革命的核心技术,应该作为“中国制造 2025”的制高点、突破口。智能制造是一个庞大的系统工程,由产品、生产、模式、基础四个维度组成,其中智能产品是主题,智能生产是主线,以用户为中心的产业模式变革是主题,以信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)和工业互联网为基础。《国家智能制造标准体系建设指南(2015 年版)》提出的智能制造系统架构结构图如图 1-1 所示,其中远程运维是“智能服务”的主要核心内容,“工业软件和大数据”是打通物理-信息世界的载体,它们都是实现制造业产业模式转变的关键技术。

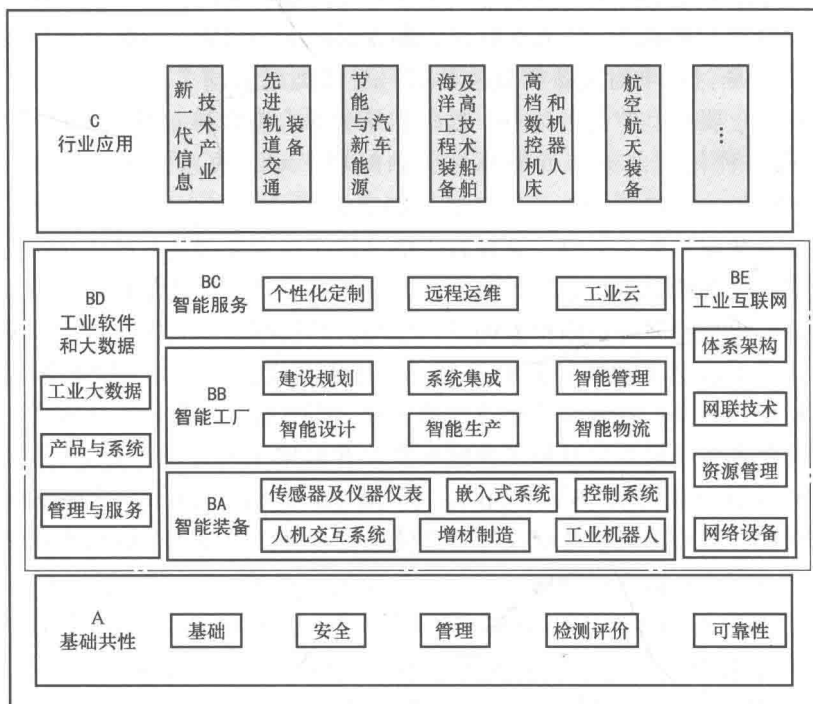


图 1-1 智能制造标准体系结构

随着智能制造的不断推进与制造产业的不断转型，信息物理系统的推广会使得各种各样的传感器和终端被应用于装备中，而随着大量工业数据的获取和设备互联的实现，制造业所产生的数据将呈爆炸式的增长，为我们带来工业大数据。但是，数据本身不会带来价值，要将其转换成信息之后才能对产业产生价值。智能运维与健康管理的实现就是实现智能制造中数据转换的关键技术，它是智能制造中一类重要的新型模式，其核心支撑技术包括状态监测、故障诊断、趋势预测与寿命评估等。通过智能运维与健康管理的实施，对复杂和重大工业系统健康状态的监测、诊断、预测和管理便得以实现。可见，对于智能制造的主体——高端装备而言，智能运维与健康管理的必要性不言而喻。

从“中国制造 2025”战略计划中我们也可以看到智能运维与健康管理的必要性。工信部、发改委、科技部以及财政部在 2015 年下发的《智能制造工程实施指南（2016—2020）》中明确提到智能制造新模式关键要素之一为“远程运维服务”。其核心内容为：要建有标准化信息采集与控制系统、自动诊断系统、基于专家系统的故障预测模型和故障索引知识库；可实现装备（产品）远程无人操控、工作环境预警、运行状态监测和故障诊断与自修复；建立产品生命周期分析平台、核心配件生命周期分析平台和用户使用习惯信息模型；可对智能装备（产品）提供健康状况监测、虚拟设备维护方案制定与执行、最优使用方案推送和创新应用开放等服务^[2]。装备的智能运维与健康管理的必然性会直接渗透到企业的运营管理乃至产品的整个生命周期，减少损失，并且影响企业的决策，因此基于数据的装备智能运维与健康管理的必然性将在“中国制造 2025”的浪潮中扮演至关重要的角色。

从故障诊断技术的发展历程来讲，装备的智能运维与健康管理的实现是智能生产的必由之路。实际上早在 20 世纪 70 年代，故障诊断、预测、健康管理等系统就开始出现在工程应用中，如 A-7E 飞机的发动机使用了发动机管理系统（Engine Management System, EMS）成为故障预测与健康管理的（Prognostics and Health Management, PHM）早期的经典案例。经过了 40 多年的发展，诊断过程中对装备所监控的信号量种类越来越多，所获取的信息量也越来越丰富，包括振动、噪声、声发射信号、温度和压力等。在故障诊断技术的基础理论方面，从最开始出现的各种传统的故障诊断算法，如时域平均、快速傅里叶变换（Fast Fourier Transformation, FFT）、包络谱分析、功率谱和倒频谱等分析方法。可以看到，信息处理技术是实现机械装备故障诊断的关键，处理技术的进步必将大大促进机械装备故障诊断技术的发展，这就要求我们不断跟进信息处理技术的发展，把先进有效的信息处理方法引入到机械装备故障诊断中。近些年故障诊断行业的学者已经开始借鉴图像处理、语音识别中的先进人工智能算法，用来解决装备故障诊断的问题，比如稀疏理论、分类、聚类算法和机器学习等，均取得了不错的成果。在故障诊断技术的工程应用方面，中国的三一重工，作为中国机械制造领域的佼佼者，已经率先开始了智能生产、智能服务的尝试。其出厂的每一台设备，均可以在自主开发的企业控制中心（Enterprise Control Center, ECC）进行监测。装备的位置、累计工作时间、累计油耗、月度或者年度的闲忙程度，甚至装备的历史运动轨迹都可以了如指掌。正是基于这些信息的及时获取，在装备发生故障之后，工程师可以依据装备传回的数据快速进行分析和排查，指导用户进行维修；除此之外，由于机械装备的价格都比较高昂，用户一般会选择分期付款的形式购买。ECC 还能根据装备的运行情况判断设备是否实现了盈利，从而判断用户是否存在恶意拖欠欠款的行为，并且能实现对装备的远程锁定，维护企业的利益。实际上现阶段大部分装备在运行过程中存在着许多无法被

定量和预测的因素，这些不确定因素可能是后面出现严重故障的主要原因。前三次工业革命主要是解决产品生产过程中“可见”的问题，比如避免产品的缺陷、避免加工失效、提升设备效率和安全问题等，这些问题在生产过程中可见、可测，往往很容易避免和解决。不可见的问题往往表现为设备的性能下降、健康衰退、零部件的磨损和运行风险升高等。因而在工业 4.0 时代，我们关注的已经不仅仅是故障的诊断识别，更关注的是这些不可见因素的避免和透明化呈现，即制造装备的智能运维与健康管理的。

而对于重大装备而言，其对国民经济和国防安全具有重要意义，针对该类装备进行系统性智能运维与健康管理的刻不容缓。国民经济领域的重大装备，如航空发动机、风电设备、高速列车等，其服役期可以占据整个产品全生命周期的 90% 以上，运行中未能及时发现的严重故障极易导致灾难性事故，如何针对其运行安全开展监控至关重要。马航失联、国产新舟 60 全面停飞、挑战者号发生空难，重大装备故障的灾难性与突发性，折射出了高端机械装备运行安全保障的必要性与紧迫性，运行安全保障已成为国内外的关注焦点。例如航空发动机，尽管在我国的大规模使用已经有 60 多年的历史，但是其核心技术一直掌握在美国、英国、法国和俄罗斯等国的手中，我国与上述国家的技术差距明显，尤其是由于缺乏机载监测与诊断手段，大量监视工作主要集中在地面进行，空中飞行安全的技术保障已成为制约和影响我国航空安全的重大技术挑战。在新能源领域，据全球风能协会（GWEC）发布的数据显示，2016 年一年内全球新增的风电装机容量已经超过 54.6GW，全球累计容量达到 486.7GW。而中国该年的新增风电装机容量为 23.3GW，占全球增量的 42.7%。快速的增长使得中国以累计 168.7GW 的装机容量蝉联世界第一。据《中国风电发展路线图 2050》预测，到 2030 年和 2050 年，我国风电装机规模将分别达到 400GW 和 1TW，满足全国近 8.4% 和 17% 的电力需求，成为五大电源之一。然而，现役风电装备运行可靠性差，因故障导致的停机时间已占额定发电时间的 25.6%，对于工作寿命为 20 年的机组，其维护费用已高达风电装备总收入的 20%~25%，运行维护成本高成为风电发展的制约因素，迫切需要研制开发风电装备监测诊断技术。在智能制造领域，高档数控机床的服役性能监控、刀具的在线监测、智能主轴的微振动监测与主动控制等，特别是在德国工业 4.0、智能制造范畴下，正如前面提及，更需要远程监测与控制技术。

开展装备的智能运维与健康管理的，是提高装备运行安全性、可靠性的重要手段，是保证人民生命、财产安全甚至是国防安全的必然要求。2009 年，美国三院院士 Achenbach 教授对结构健康监测的重要性做了重要论述，提到结构健康监测（Structural Health Monitoring, SHM）系统可以预防诸如飞机、桥梁、核反应堆和大坝等重要结构的失效，而这些结构一旦失效就会引起巨大的灾害^[3]。2014 年，美国普惠（P&W）公司首席专家 Volponi 在 ASME（美国机械工程师协会）上发表的文章中讲述了航空业故障诊断的产生、发展和未来的发展趋势，并强调对于航空发动机进行健康监测的重要性^[4]。国内的多位知名学者也强调了装备的监测和故障诊断的重要价值。而目前，我国正处于时代变革的转折点，中华民族实现伟大复兴的关键时刻。国家对于制造业出台了许多的重要指南和重大规划，如《国家中长期科学和技术发展规划纲要（2006—2020 年）》、上面提及的“中国制造 2025”计划、《智能制造工程实施指南（2016—2020）》等，都毫不例外地将提升产品质量、提高重大装备可靠性规划为重要发展战略。2018 年中国工程院院士周济等人更是提出了符合我国国情的“新一代智能制造”发展理念。认为智能制造会沿着数字化、网络化和智能化的基本范

式演进,如图 1-2 所示。新一代智能制造的技术机理已经从之前的“CPS”理念上升到了“人-信息-物理系统 (Human-Cyber-Physical Systems, HCPS)”,强调了人在智能制造中的重要地位,已经成为统筹协调“人”、“信息系统”和“物理系统”的综合集成大系统。可见,智能制造俨然已经成为时代发展的必然趋势,而其中装备的智能运维与健康管理的研究工作必然将成为推动中国步入世界制造业强国之林的一股强劲动力!

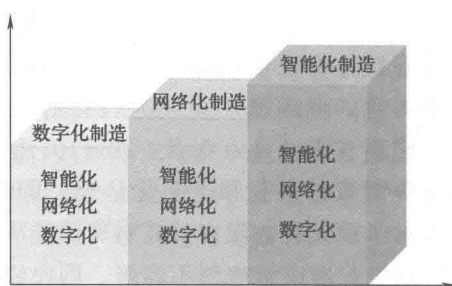


图 1-2 智能制造的演进范式

1.2 机械状态监测与故障诊断

机械状态监测与故障诊断是装备智能运维与健康管理的实现的重要理论基础,相关方法和理论的进展极大地推动了智能运维与健康管理的技术的应用和发展。

1.2.1 故障监测诊断的重要意义

机械故障诊断是借助机械、力学、电子、计算机、信号处理和人工智能等学科方面的技术对连续运行机械装备的状态和故障进行监测、诊断的一门现代化科学技术,并且已迅速发展成为一门新兴学科。其突出特点是理论研究与工程实际应用紧密结合。

随着现代科学技术和工业的迅速发展,国民经济的制造、能源、石化、运载和国防等需求的不断增大导致其相应行业的机械装备日益大型化、高速化、集成化和自动化。装备的需求与人民的生活和利益息息相关,例如:百万千瓦大型发电机组、200km/h 以上的高速列车、大型连轧机组、大型舰船、大型盾构掘进装备、成套集成电路制造装备和航空航天运载工具等。“千里之堤,溃于蚁穴”,机械装备一旦出现故障,引发重大事故,将带来巨大的经济损失和人员伤亡。国内外由机械故障引起的重大事故屡屡发生,例如我们熟知的 1985 年因少补一排铆钉而导致尾翼脱落引发的大阪空难、1986 年切尔诺贝利核电站爆炸、1998 年德国高速列车轮箍踏面断裂所导致的翻车、2002 年我国三峡工地塔带机断裂事故、2003 年美国哥伦比亚号载人航天飞机的空中解体、2007 年美国空军 F15 战机空中解体事件、2009 年波音 737 及空客 330 先后失事以及 2011 年南非 ESKOM 电力公司的 DUVHA 电站因 4 号机组超速试验时保护失灵引发的汽轮机飞车事故等。若能准确及时找出故障,并做出相应决策,就能在最大程度上避免重大和灾难性事故,因此机械故障诊断对保障机械装备安全运行至关重要。

正因如此,机械故障诊断理论与技术已成为国内外的研究热点。根据搜索引擎相关搜索结果,2016~2018 年标题中含有故障诊断 (Fault Diagnosis) 的文献有 25400 篇,标题中含有损伤检测 (Damage Detection) 的文献有 93100 篇。不仅从论文的数量能明显看出故障诊断研究广泛,从有关故障诊断的国内外会议数目也能明显反映出机械故障诊断早已是举世瞩目的研究课题。主要针对电力系统的装备状态监测与故障诊断国际学术会议 (International

Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, CMD) 每两年召开一届, 由 IEEE 等国际性学术组织进行技术支持; 由巴西维修协会和欧盟国家维修联合会共同倡议的世界维修大会得到了许多国家积极响应, 每两年召开一届, 并由各国申请轮流主办; 国际结构、材料和环境健康监测大会 (HMSME) 每两年在世界不同国家举办一次; 美国斯坦福大学每三年举办一次的关于大型结构的结构健康监测会议总能吸引大量的研究人员, 特别是军方研究人员参加; 两年一届的结构损伤评估国际会议 (Damage Assessment of Structures, DAMAS) 是学术界和工业界的科学家和工程师们在损伤评价、结构健康监测和非破坏性评估等方面交流和合作的平台; 状态监测与诊断工程管理 (Condition Monitoring and Diagnostic Engineering Management, COMADEM) 国际会议每年举行一次, 至 2018 年已举办 30 届; 机械失效预防技术 (Machinery Failure Prevention Technology, MFPT) 是致力于工程领域健康管理及失效预防技术研究的国际会议, 每年举办一次, 至今已具有近半个世纪的发展历程; 在国内, 中国振动工程学会、中国机械工程学会和中国设备管理协会等均每两年召开一次故障诊断会议, 加强了学术交流和成果推广应用。

1.2.2 国内外研究现状

机械故障诊断研究的是机器或机组运行状态的变化在诊断信息中的反映, 由数据采集、特征提取、模式识别和故障预知组成。除了这四点之外, 故障机理表现了数据和特征之间的联系, 因此相关研究可分为信号获取与传感技术、故障机理与征兆联系、信号处理与特征提取和识别分类与智能决策四个方面。

1. 在信号获取与传感技术方面

可靠的信号获取与先进的传感技术, 是机械故障诊断的前提。例如, 英国罗尔斯-罗伊斯公司在航空发动机中安装有若干个传感器, 通过实时采集发动机振动信号并分析其振动情况, 判断故障与否。所以一直以来各国学者致力于推进传感技术与机械装备的结合研究, 2009 年美国三院院士、西北大学机械工程系 Achenbach 教授^[3]将传感技术等列入结构健康监测的重要研究范畴内; 美国斯坦福大学 Kiremidjian 开展了传感网络方面的研究; 日本东京大学 Takeda 等人在复合材料结构健康监测传感方面取得了显著的研究成果。在国内, 南京航空航天大学的王强等人对结构健康监测中的压电阵列技术进行了研究; 重庆大学的邵毅敏等人提出了一种新的传感器和轴承一体化的智能轴承; 武汉理工大学的徐刚对光纤传感技术应用于机械设备监测方面进行了研究。

2. 在故障机理与征兆联系方面

研究故障的产生机理和表征形式, 是为了掌握故障的形成和发展过程, 了解设备故障的内在本质及其特征, 建立合理的故障模式, 是机械故障诊断的基础。2018 年 4 月 17 日, 美国西南航空一架飞机的发动机爆炸导致一人身亡, 其事故原因在于金属部件疲劳引起的风扇叶片脱落最终导致的爆炸。航空发动机因为运行要求, 其风扇、压气机和涡轮的叶片都会受到转速变化、离心载荷、气动载荷引起的交变载荷, 因而使金属部件疲劳受损。风扇叶片脱落故障的机理不仅在于金属部件的疲劳损伤, 安装失误导致的碰摩等因素也会导致; 不同运行状态的机械设备都有相对应的不尽相同的故障机理, 因此对于故障机理的研究不可忽视。在国外, 美国 Sohre 于 1968 年发表的论文“高速涡轮机械运行问题的起因和治理”对旋转机械的典型故障征兆和原因进行了全面的描述和归纳; 日本的白木万博自二十世纪六七十年

代以来,发表了大量的故障诊断方面文章,总结了丰富的现场故障处理经验并进行了理论分析;美国 Bently 公司的转子动力学研究所对转子和轴承系统的典型故障机理进行了大量试验研究并发表了不少论文;2008 年意大利学者 Bachschmid 等人在国际期刊 MSSP 上作为客籍主编撰写了一期裂纹研究综述文章,从裂纹转子模型、裂纹机理等多方面做了相关的论述;日本九州工业大学丰田立夫和三重大学 Chen 等人在故障机理与特征提取等实用技术方面也进行了大量研究。反观国内,东北大学的闻邦椿和天津大学的陈予恕对基于混沌和分岔理论对轴系非线性动力学行为进行了深入研究;哈尔滨工业大学的韩刚等人研究了航空发动机叶片和转子在气流激励下的非线性动态响应,揭示了颤振产生、发展的机理和演变规律;东北大学的刘杨等人基于非线性有限元法建立了双盘耦合故障转子系统动力学模型,并通过实验研究分析了不同转速下的系统动态响应特性。

3. 在信号处理与特征提取方面

从运行动态信号中提取出故障征兆,是机械故障诊断的必要条件。18 世纪,傅里叶 (Fourier) 提出的傅里叶变换启示了人们,时间信号可以在另一个域中以不同的形式表达,从而打开了信号处理的大门。例如傅里叶变换算法可透析时间信号内部频率成分,对于传感器所测得的信号经过处理后能够更为直观的解读以提取所需的信息。此外,现代信号处理方法大致分为时域、频域以及相结合的时频域处理方法。随着信号处理的方法从经典的傅里叶变换到更强大的小波变换再到自适应强的经验模态分解 (Empirical Mode Decomposition, EMD) 以及其他方法不断地发展,机械诊断研究也在如日中天的进行着。在国外,多伦多大学的 Jardine 等人详细叙述了利用时域统计指标来诊断轴承故障的优缺点;马来西亚的 Mohammad 等人讨论了各种状态监测与信号处理方法的原理与特点;美国斯坦福大学 Ihn 在复合材料结构健康监测方面取得了显著的研究成果;英国曼彻斯特哈德菲尔德大学的 Ball 所在团队长期从事故障诊断的研究工作;美国陆军研究实验室的 Haile 等人利用盲源分离方法来分析旋翼飞机的轴承故障;在时频分析方面,帝国理工大学 Ahrabian 等学者将同步压缩变换方法从一维扩展成并行多维,提高了算法的抗噪声性能;法国图卢兹大学的 Oberlin 等学者则提出了二阶同步压缩变换方法,进一步提高了时频聚集性。从此可以看出,国外的研究在不间断地进行着,国内也是同一番景象。西安交通大学的王诗彬和苏州大学的范伟等人利用小波函数与故障特征成分的相似性,提取轴承、齿轮故障特征;郭远晶等人提出了一种基于短时傅里叶变换 (Short-Time Fourier Transform, STFT) 时频谱系数收缩的旋转机械故障振动信号降噪方法,数值仿真和实验结果表明,该方法能够从噪声混合信号中恢复出时域降噪信号;北京工业大学的胥永刚等人提出并利用了基于形态分量分析 (Morphological Component Analysis, MCA) 的双树复小波降噪方法成功对仿真信号和某轧机齿轮箱打齿故障早期信号提取出强背景噪声下的微弱故障特征信息;桂林电子科技大学的王衍学等人详细叙述了有关谱峭度的理论发展和与之相关的应用研究,为推动该方法在机械故障诊断领域的广泛使用奠定了基础;东南大学的钱宇宁等人结合连续小波变换和盲源分离的优点,提出了一种用于风电机组齿轮箱故障诊断的新方法;EMD 作为一种自适应信号分解方法,被广泛应用于机械故障诊断领域,上海大学的蒋超等人提出了基于快速谱峭度图的选取方法,选取出集合经验模态分解 (Ensemble Empirical Mode Decomposition, EEMD) 处理后反应故障中最敏感的分量,并将其应用于滚动轴承故障诊断中;西安交通大学的孔德同等人研究并提出了基于极值点分布特性的改进 EEMD 方法,有效提取了转子早期碰摩故障的特征信息;西安交

通大学的雷亚国等人将 EEMD 自适应地应用到齿轮故障诊断中, 自适应的改变加入了信号中的白噪声, 提高了诊断的准确性。

4. 在识别分类与智能决策方面

近年来, 计算机人工智能和机器学习技术的快速进步使得故障诊断系统逐步向智能化方向发展。专家系统、模糊集理论、人工神经网络和支持向量机等技术得到了广泛应用, 也因此促进了机械设备智能故障诊断的发展。智能故障诊断就是模拟人类思考的过程, 通过有效地获取、传递和处理诊断信息, 模拟人类专家, 以灵活的策略对监测对象的运行状态和故障做出准确的判断和最佳的决策。智能故障诊断具有学习功能和自动获取诊断信息对故障进行实时诊断的能力, 故其成为实现机械故障诊断的关键应用技术。Gelgele 等人针对发动机状态监测开发了发动机监测专家系统 (Expert Engine Diagnosis System, EXEDS), 可对发动机故障征兆进行逐步分析, 并给出恰当的维修建议。加拿大西安大略大学的 Mechefske 采用模糊集理论对轴承在不同状态下的频谱进行分类。印度阿美尼达大学的 Saravanan 等人将人工神经网络和支持向量机相结合, 并将其应用于齿轮箱故障识别, 对比了神经网络与支持向量机的识别效果。华北电力大学的杨志凌等人根据风机齿轮箱结构特征构建了故障树模型, 随后依据 C# 开发了风机齿轮箱故障诊断专家系统, 并成功应用于风机的健康维护。美国密歇根大学的倪军和辛辛那提大学的李杰等人在美国自然科学基金 (National Science Foundation, NSF) 的资助下, 联合工业界共同成立了“智能维护系统中心 (Center for Intelligent Maintenance Systems, IMS)”, 致力于对机械设各性能衰退分析和预测性维护方法的研究。相应地, 在国内, 雷亚国等人提出了一种基于深度学习理论的机械装备健康监测新方法, 该方法摆脱了对大量信号处理技术和诊断经验的依赖, 实现了故障特征的自适应提取和健康状态的智能诊断。清华大学的郑玮等人提出了一种专家系统与神经网络相结合的机械故障诊断方法, 并将其应用到了卫星故障的智能诊断中。

综上所述, 机械故障监测诊断技术的迫切需求在国内外学术界产生了共鸣, 吸引了众多学者献身于故障诊断研究, 故障诊断也因此正在稳步地发展着。

1.2.3 机械故障监测诊断现今存在的问题

1. 故障机理研究不足

故障机理是指通过理论或大量的试验分析, 得到反映设备故障状态信号与设备系统参数联系的表达式, 依之改变系统的参数可改变设备的状态信号。机理研究可以揭示故障萌生和演化的一般规律, 建立起故障与征兆之间的内在联系和映射关系。其具体的研究过程如下: ①根据研究对象的物理特点, 建立相应数学力学模型; ②通过仿真研究获得其响应特征; ③结合试验修正模型, 准确获知某一故障的表征。这一反复式的研究过程是故障机理及故障征兆研究的有效手段, 也是机械故障诊断技术的重要基础和依据。由于通常难以获得某一系统较全面的故障数据样本, 因此只有通过机理仿真研究, 才能对系统未知故障和弱故障进行有效的预知和识别, 以避免漏诊和误诊。

当前研究中对机械故障机理的研究不够重视, 甚至很多典型故障特征都是沿用经典的成果, 例如裂纹转子的倍频响应是 Bently 在 20 世纪 80 年代给出的研究结论。造成故障机理研究不足的主要原因归纳起来有以下几点: ①大型装备的故障机理研究通常需要涉及繁多的数学、力学等知识, 即工程结构的简化和力学模型的建立都存在较大难度; ②故障机理研究需

要结合大量的试验验证,一个模型简化合理、故障模拟典型、制造精度保证且测试数据可靠的试验台,往往不是一朝一夕可以实现的,需要持久、大量的资源投入;③实验室针对单一故障的准确表征,还需要工程实际的验证,单一的故障特征在实际工程中往往可遇而不可求。同时,目前针对旋转机械所建立的故障模拟试验台和理论研究较多,但是针对往复机械和专用机械理论和实验研究偏少。

2. 故障诊断方法有限

机械设备诊断首先要对从各类运转设备中所获取的各种信号进行分析,通过适当分析,提取信号中的各种特征信息,进而可以获得与故障相关的征兆,最终利用这些征兆进行故障诊断。工程应用实践表明不同类型的机械故障在动态信号中会表现出不同的特征波形,如齿轮和轴承等机械零部件出现剥落和裂纹等故障时,往复机械的气缸、活塞、气阀磨损缺陷,其运行中产生的冲击振动呈现接近单边振荡衰减的响应波形,而且随着损伤程度的发展,其特征波形也会发生改变;旋转机械失衡振动的波形与正弦波相似;内燃机燃爆振动的波形则是具有高斯函数包络的高频信号。目前广泛应用的傅里叶变换、短时傅里叶变换、小波变换、第二代小波变换和多小波变换等可以说都是基于内积原理的特征波形基函数信号分解,旨在灵活运用与特征波形相匹配的基函数去更好地处理信号,提取故障特征,从而实现故障诊断。

故障诊断方法研究中提出了许多有效的“望闻问测”诊断手段,但是近年来的理论分析和工程应用表明,针对早期故障、微弱故障、复合故障和系统故障等的诊断方法还存在不足,可靠的诊断方法有限。理论层面,经快速傅里叶变换得到的离散频谱,其频率、幅值和相位均可能产生一定的误差,单频率谐波信号加矩形窗时的幅值误差最大误差从理论上可以达到36.4%。即使加其他窗时,也不能完全消除此误差,加汉宁(Hanning)窗且只进行幅值恢复时的最大幅值误差仍高达15.3%,相位误差高达 $\pm 90^\circ$,频率最大误差为0.5个频率分辨率。工程层面,机械设备运行过程中不可避免地会产生损伤和出现早期故障,它具有潜在性和动态响应的微弱性;复合故障和系统故障由于多因素耦合且传递路径复杂,往往导致单一的信号处理方法难以有效溯源故障成因,也正因为如此,导致如航空发动机振动故障诊断至今没有很好的解决方法。现存的很多理论和工程问题大大限制了该技术的实际应用。

3. 智能诊断系统薄弱

现代机械装备越来越朝着大型化、复杂化、高速化、自动化和智能化的方向发展,旧的依赖于人的传统诊断方法已远远不能满足当前各式各样复杂化的系统需要,工业生产迫切需要融合智能传感网络、智能诊断算法和智能决策预示的智能诊断系统、专家会诊平台和远程诊断技术等。发展智能化的诊断方法,是故障诊断的一条全新的途径,目前已得到广泛应用,成为设备故障诊断的主要方向。不同类型的智能诊断方法针对某一特定的、相对简单的对象进行故障诊断时有其各自的优点和不足,例如神经网络诊断技术需要的训练样本难以获取;模糊故障诊断技术往往需要由先验知识人工确定隶属函数及模糊关系矩阵,但实际上要获得与设备实际情况相符的隶属函数及模糊关系矩阵却存在许多困难;专家系统诊断技术存在知识获取“瓶颈”,缺乏有效的诊断知识表达方式,推理效率低。

当前实际应用中所采用的人工智能诊断方法很多,但大部分智能方法都需要满足一定的假设条件和人为设置一定的参数,其智能化诊断能力还比较薄弱,因此研究中通过仿真进行验证的故障诊断算法较多。故而智能诊断方法往往给人留下“黑匣子”和“因人而异”的