

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

基于大数据的 起重装备服役 健康管理



丁克勤 陈力 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



“十三五”国家重点出版物出版规划项目

基于大数据的起重装备 服役健康管理

丁克勤 陈力 编著



机械工业出版社

本书详细剖析了起重装备健康管理需求及其全生命周期数据,系统阐述了起重装备的结构、机构和电气等三个子系统的健康诊断和故障预测方法,全面介绍了起重装备整机系统的安全性评价方法以及以可靠性为中心的维修方法,最后简要介绍了大数据、物联网的先进理论、技术和方法以及所开发的基于大数据的起重装备服役健康管理平台。本书体系清晰、重点突出、内容翔实,可作为从事起重装备检测监测、健康诊断、安全评估以及健康管理等相关技术研究的科技工作者、工程技术人员以及设备运行维护与管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

基于大数据的起重装备服役健康管理 / 丁克勤, 陈力编著. —北京: 机械工业出版社, 2018.10

“十三五”国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-111-60513-3

I. ①基… II. ①丁… ②陈… III. ①起重机械—产品生命周期—研究 IV. ①TH21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 152082 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: 朱 林

责任校对: 刘志文 封面设计: 马精明

责任印制: 孙 炜

天津嘉恒印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·13 印张·315 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-60513-3

定价: 50.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: www.cmpbook.com

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网: www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前言

复杂起重装备广泛应用于冶金、电力、港口、物流、机械制造、建筑业和海洋工程等国民经济各行业中，是工业生产的重要工艺设备，关系到人民生命安全。随着我国经济的快速发展，起重装备向大型化、多功能化、高参数化方向发展，必然对起重装备的运行管理等提出新的挑战 and 更高要求。

传统的起重装备管理以安全管理为主，主要是依据起重机定期检验规程开展定期检验，进而根据检测结果给出结论或开展一些安全评价工作。这种管理模式通常只能反映起重装备当前的安全状况，不能真实反映起重装备系统的健康状态。随着信息技术的快速发展，尤其是随着大数据技术的兴起，起重装备安全管理工作将日益基于数据和分析而开展，而并非基于传统的工作模式。

为了确保大型起重装备安全健康运行，运用大数据实施起重装备服役健康管理势在必行。起重装备运行过程中采集的应力、振动、声发射等动态数据，具有工业大数据大容量、多样性与高速率等特点。研究和利用先进的理论与方法，从大数据资源中挖掘信息，高效、准确地识别装备的健康状况，预测损伤演化趋势，可在早期就加以控制或采取补救措施以消除安全隐患，从而避免安全事故的发生。

本书以起重装备为对象，全面论述了基于大数据的起重装备服役健康管理的基本理论、方法及其应用。本书共分为 12 章，第 1 章主要介绍了起重装备的发展趋势与特点及其健康管理需求，第 2 章主要介绍了起重装备的全生命周期数据，第 3 章和第 4 章分别介绍了起重装备金属结构疲劳累积损伤诊断与寿命预测方法，第 5 章和第 6 章分别介绍了起重装备减速机和制动器健康诊断与故障预测方法，第 7 章介绍了起重装备电气系统健康诊断与故障预测方法，第 8 章重点阐述了起重装备运行故障与工作效率分析方法，第 9 章和第 10 章分别介绍了起重装备风险评价与系统安全评价方法，第 11 章介绍了起重装备以可靠性为中心的维修方法，第 12 章主要介绍了基于大数据的起重装备服役健康管理平台。

全书由丁克勤、陈力编著，参加部分章节编写等相关工作的还有乔立红、柳亦兵、张旭、王志杰、黄双喜、陶芳泽、唐方雄、李娜等同志。

在本书即将出版之际，特别感谢长期以来关心和支持我国特种设备健康监测技术发展的林树青研究员、郭元亮研究员等专家，感谢国家高技术研究发展计划（863 计划）课题“大型复杂起重装备全生命周期数据集成管理与应用技术研究”（2015AA043702）提供的经费支持，感谢机械工业出版社电工电子分社相关领导和编辑同志为本书出版所付出的辛苦工作。

本书在写作过程中参考或引用了许多学者的资料，作者已尽可能在参考文献中列出，在此谨对他们表示衷心的感谢。若某些引用资料因作者疏忽未标注其出处，在此表示歉意。

基于大数据的起重装备服役健康管理在我国仍处于积累和发展阶段。由于时间仓促和作者认识上的局限性，本书疏漏和不当之处在所难免，敬请广大读者不吝赐教。

作者

2018 年于北京

目 录

前 言

第 1 章 绪论..... 1

- 1.1 起重装备发展趋势及其特点..... 1
- 1.2 起重装备面临的形势分析..... 2
- 1.3 起重装备服役健康管理..... 4
 - ★ 1.3.1 起重装备健康管理需求..... 4
 - ★ 1.3.2 起重装备健康管理组成..... 5
 - ★ 1.3.3 起重装备健康管理应用..... 5
 - ★ 1.3.4 起重装备健康管理发展趋势..... 7
- 1.4 本书主要内容..... 7

第 2 章 起重装备全生命周期数据

模型..... 8

- 2.1 概述..... 8
- 2.2 产品全生命周期数据管理范围..... 9
- 2.3 产品全生命周期数据模型..... 10
- 2.4 产品全生命周期数据获取..... 12
- 2.5 产品全生命周期建模方法框架..... 12
 - ★ 2.5.1 产品全生命周期模型体系
框架..... 12
 - ★ 2.5.2 产品全生命周期元模型建
模方法..... 14
 - ★ 2.5.3 产品全生命周期阶段领域
元模型..... 16
 - ★ 2.5.4 起重装备全生命周期信息
模型..... 20
- 2.6 基于统一数据源的敏捷数据管理框架..... 23

第 3 章 基于大数据的结构疲劳累积

损伤诊断..... 26

- 3.1 概述..... 26

- 3.2 疲劳的基本概念..... 26

- 3.3 应力监测大数据处理方法..... 27

- ★ 3.3.1 应力-时间历程..... 27

- ★ 3.3.2 应力-时间历程监测大数据
快速处理方法..... 27

- 3.4 疲劳累积损伤诊断理论..... 34

- ★ 3.4.1 线性疲劳累积损伤理论..... 34

- ★ 3.4.2 双线性疲劳累积损伤理论..... 35

- ★ 3.4.3 非线性疲劳累积损伤理论..... 36

- 3.5 工程应用..... 37

- ★ 3.5.1 工程概述..... 37

- ★ 3.5.2 测点位置..... 37

- ★ 3.5.3 基于光纤光栅的应力谱实
时监测..... 38

- ★ 3.5.4 测试数据..... 39

- ★ 3.5.5 桥式起重机的疲劳累积损
伤计算..... 39

第 4 章 起重装备结构疲劳裂纹形成

寿命预测..... 42

- 4.1 概述..... 42

- 4.2 疲劳寿命定义..... 42

- 4.3 疲劳裂纹形成寿命预测研究动态..... 43

- 4.4 疲劳裂纹形成寿命计算方法..... 45

- ★ 4.4.1 名义应力法..... 45

- ★ 4.4.2 局部应力-应变法..... 47

- ★ 4.4.3 应力场强法..... 50

- ★ 4.4.4 焊接结构疲劳裂纹萌生寿
命估算..... 53

第 5 章 基于大数据的减速机健康

诊断与故障预测..... 56

- 5.1 概述..... 56

➤5.2	起重装备减速机失效模式	57
★ 5.2.1	齿轮减速机典型故障问题及其原因	57
★ 5.2.2	齿轮失效模式	58
★ 5.2.3	轴承失效模式	61
➤5.3	减速机健康状态诊断	62
★ 5.3.1	故障诊断方法分类	62
★ 5.3.2	基于有监督学习的模式识别方法	63
★ 5.3.3	基于无监督学习的模式识别方法	64
➤5.4	减速机运行故障预测	67
★ 5.4.1	故障预测概述	67
★ 5.4.2	故障预测方法分类	67
★ 5.4.3	基于数据的预测方法	68
★ 5.4.4	基于概率统计的预测方法	69
➤5.5	起重装备减速机振动监测标准	70
★ 5.5.1	齿轮减速机专用振动标准	70
★ 5.5.2	振动状态监测与诊断标准	71

第 6 章 基于大数据的制动器健康 诊断与故障预测

➤6.1	概述	72
➤6.2	制动器典型失效模式及分析	72
★ 6.2.1	制动器典型失效模式	72
★ 6.2.2	制动器典型失效分析	74
★ 6.2.3	制动器失效机理分析	76
➤6.3	制动器健康状态诊断	77
★ 6.3.1	制动器健康状态划分	77
★ 6.3.2	模糊状态诊断原理	78
★ 6.3.3	制动器健康状态诊断模型	79
★ 6.3.4	各隶属函数的确定	80
➤6.4	制动器故障预测	80
★ 6.4.1	基于时间序列的制动器故障预测	80
★ 6.4.2	基于 BP 神经网络算法的制动器故障预测	80
★ 6.4.3	基于支持向量回归的制动器故障预测	82

➤6.5	应用案例	82
------	------	----

第 7 章 起重装备电气系统健康诊断 与故障预测

➤7.1	概述	85
➤7.2	起重装备电气系统故障分析	85
★ 7.2.1	基于 FMEA 的电气系统故障分析方法	85
★ 7.2.2	起重装备电气系统的层次划分	86
★ 7.2.3	电气部件的故障分析	87
★ 7.2.4	子系统的故障分析	94
★ 7.2.5	系统的故障分析	97
➤7.3	起重装备电气系统的故障预测	97
★ 7.3.1	基于定量 FTA 的起重装备电气系统故障预测方法	97
★ 7.3.2	电气系统故障树的建立	97
★ 7.3.3	故障预报模型的建立	98
★ 7.3.4	起重装备电气系统故障预测的流程	99
★ 7.3.5	起重装备电气系统故障预测算例	100
➤7.4	电气部件故障率的预测	105
★ 7.4.1	基于产品寿命数据的故障率的预测	106
★ 7.4.2	基于可靠性手册的故障率的预测	106
★ 7.4.3	基于现场故障记录统计的故障率的预测	107

第 8 章 数据驱动的起重装备运行故障与工作效率分析方法

➤8.1	概述	108
➤8.2	基于故障模式及运维数据的起重装备性能评估	108
★ 8.2.1	贝叶斯网络	108
★ 8.2.2	基于专家知识和系统运行记录的贝叶斯网络构造方法	109

➤8.3	基于设备整体可靠性的起重装备综合效率模型	112
★ 8.3.1	设备综合效率	112
★ 8.3.2	面向潜在运行效率的起重装备运行效率预测模型	116
➤8.4	基于潜在运行效率分析的预测性维修决策	118
★ 8.4.1	潜在运行效率分析及预测性维修决策框架	118
★ 8.4.2	基于潜在运行效率的维修决策模型	118
➤8.5	应用案例	119
★ 8.5.1	起重装备折臂事故的故障树和贝叶斯网络结构	120
★ 8.5.2	基于专家知识和系统运行记录的参数训练	121
★ 8.5.3	起重装备潜在运行效率分析及预测性维修决策	123

第 9 章	起重装备关键风险因素辨识与风险评价方法	125
➤9.1	概述	125
➤9.2	风险评价基本理论	125
➤9.3	起重装备风险因素辨识方法	126
★ 9.3.1	风险辨识	126
★ 9.3.2	起重装备典型事故现实风险评价分级研究	127
➤9.4	起重装备风险评价方法	128
★ 9.4.1	起重装备风险评价模型构建	128
★ 9.4.2	起重装备基本风险分类模型	131
★ 9.4.3	起重装备单体固有风险分类方法	134
★ 9.4.4	起重装备单体现实风险分类方法	135
★ 9.4.5	起重装备单体现实风险分类实证	139

第 10 章	起重装备系统安全性评价方法	143
➤10.1	概述	143
➤10.2	安全性评价的层次体系和计算框架	144
★ 10.2.1	层次体系的划分	144
★ 10.2.2	安全性评价的过程	145
★ 10.2.3	基本的计算框架	145
★ 10.2.4	安全性评价的结果	147
➤10.3	度量指标评价值的计算及其状态描述	148
★ 10.3.1	强度指标	148
★ 10.3.2	刚度指标	148
★ 10.3.3	裂纹指标	149
★ 10.3.4	板的变形指标	150
★ 10.3.5	锈蚀指标	151
★ 10.3.6	齿轮和轴承指标	151
➤10.4	层次分析法	152
★ 10.4.1	系统的递阶层次结构	152
★ 10.4.2	比较判断矩阵	152
★ 10.4.3	权重计算及一致性检验	153
➤10.5	模糊综合评判法	154
★ 10.5.1	模糊综合评判法简述	154
★ 10.5.2	基于多级模糊综合评判法的结构安全性评价	156
➤10.6	应用案例	158

第 11 章	起重装备以可靠性为中心的维修方法	160
➤11.1	概述	160
➤11.2	起重装备机构系统 RCM 分析应用	161
★ 11.2.1	起重装备结构层次划分	161
★ 11.2.2	起重装备重要功能产品确定	162
★ 11.2.3	起重装备 FMECA	163
★ 11.2.4	起重装备维修策略逻辑决断	167
★ 11.2.5	起重装备预防性维修周期决策	169

➤11.3 起重装备金属结构 RCM 分析	173	★ 12.3.5 大数据可视化技术	186
★ 11.3.1 起重装备金属结构		➤12.4 起重装备风险管理系统	186
FMECA	173	★ 12.4.1 基于 RFID 的起重装备	
★ 11.3.2 确定起重装备金属结构		风险分析仪	186
SSI	173	★ 12.4.2 基于物联网的起重装备	
★ 11.3.3 起重装备金属结构维修		风险管理系统	188
逻辑决断	174	★ 12.4.3 基于检验数据库的起重	
		装备风险管理平台	189
第 12 章 基于大数据的起重装备服役		➤12.5 基于大数据的起重装备服役健康管	
健康管理平台	179	理平台设计	191
➤12.1 概述	179	★ 12.5.1 管理平台的架构设计	191
➤12.2 物联网概念及相关技术	180	★ 12.5.2 管理平台服务功能划分	192
★ 12.2.1 物联网的发展历程	180	★ 12.5.3 起重装备健康管理服务	
★ 12.2.2 物联网的定义	180	内容	193
★ 12.2.3 物联网技术	181	➤12.6 应用案例	194
➤12.3 大数据处理技术	183	★ 12.6.1 起重装备风险管理系统	
★ 12.3.1 大数据概念	183	应用案例	194
★ 12.3.2 大数据采集技术	183	★ 12.6.2 基于大数据的起重装备服	
★ 12.3.3 大数据存储技术	184	役健康管理平台应用案例	196
★ 12.3.4 大数据挖掘技术	185	参考文献	198

绪 论

起重装备是一种以间隙作业方式对物料进行起升、下降和水平移动的物料搬运机械。起重装备的作业通常带有重复循环的性质。经常起动、制动、正向和反向运动是起重装备的基本特点。起重装备广泛用于冶金工业、电力工业、机械制造业、交通运输业、建筑业、商业和农业等国民经济各部门及人们日常生活中。自有文明以来,物料搬运便成了人类活动的重要组成部分。任何物质的生产都将伴随着物料的搬运,从原材料到产品的生产过程中,物料的搬运量常常是产品质量的数倍,甚至数百倍。据统计,机械加工行业每生产 1t 产品,在加工过程中要装卸、搬运 50t 物料,在铸造过程中要搬运 80t 物料。在冶金行业,每冶炼 1t 钢,需要搬运 6t 原料,车间之间的转运量为 63t,车间内部的转运量达 160t,用于物料输送的费用占全部生产费用的 35%。在美国工业产品的生产中,装卸搬运费用占总成本的 20%。德国企业物料搬运费用占营业额的 1/6。在法国机械工业购置物料搬运设备的投资分配比例约占 15%。

1.1 起重装备发展趋势及其特点

随着生产规模的扩大,自动化程度的提高,作为物料搬运重要设备的起重装备在现代化生产过程中应用越来越广,作用越来越大,对起重装备的安全性要求也越来越高。科学技术的飞速发展,推动了现代设计和制造能力的提高,激烈的国际市场竞争也越来越依赖于技术的竞争。这些都促使起重装备的技术性能进入崭新的发展阶段,起重装备正经历着一场巨大的变革。目前国际上起重装备发展趋势如下:

1) 重点产品大型化、高速化、耐久化和专用化。由于工业生产规模不断扩大,生产效率日益提高,以及产品生产过程中物料装卸搬运费用所占比例逐渐增加,促使大型或高速起重装备的需求量不断增长。起重重量越来越大,工作速度越来越高,并对能耗和可靠性提出了更高的要求。起重装备不但要好用,容易维护,容易操作,而且可靠性要高,安全性要好,故障要少,无故障工作时间要进一步提高。除了开发研制高效率的通用起重装备外,还要发展一机多用产品,增强应变能力,开发特殊使用场合的专用产品,以适应不同的使用要求。

2) 系列产品模块化、组合化、标准化和实用化。许多起重装备是成系列成批量的产品,需对系列主参数进行合理匹配,才能改善整机性能,降低制造成本,提高通用化程度,用较少规格数的零部件组成多品种、多规格的系列产品,充分满足用户需求。用模块化设计代替传统的整机设计方法,将起重装备上功能基本相同的构件、部件和零件制成有多种用途,有相同连接要素和可互换的标准模块,通过不同模块的组合,形成不同类型和规格的起重装备。对起重装备进行改进,只需针对某几个模块。设计新型起重装备,只需选用不同模块重新进行组合。可使单件小批量生产的起重装备改换成具有相当批量的模块生产,实现高效率的专业化生产,企业的生产组织也由产品管理变为模块管理。进一步扩大起重装备的参数系列范围,增加多种起重重量、工作速度、起升高度、工作级别的选择,发展特殊用途的派生起重装

备系列,以满足更多的使用需求。

3) 产品性能自动化、智能化、集成化和高效化。将机械技术和电子技术相结合,将先进的微电子技术、电力电子技术、光缆技术、液压技术、模糊控制技术应用到机械的驱动和控制系统,实现自动化和半自动化,使起重装备物料搬运系统具有更高的柔性,以适合未来多批次少批量的柔性生产模式。控制方面重点提高单机综合自动化水平。重点发展位置检测及自动位置控制技术、故障自诊断监控技术。电气传动方面重点开发以计算机为核心的高性能电气传动装置,使起重装备具有优良的调速和静动特性,可进行操作的自动控制、自动显示与记录,起重装备运行的自动保护与自动检测,特殊场合的远距离遥控等,以适应起重装备安全性和自动化生产的需要。

4) 产品组合成套化、系统化、复合化和信息化。在起重装备单机自动化的基础上,赋予起重装备信息传递和处理的功能,并通过计算机把各种起重运输机械组成一个物料搬运集成系统,通过中央控制室的控制,能与生产设备有机结合,能与生产系统协调配合。起重装备通过系统集成,能形成不同机种的最佳匹配和组合,取长补短,发挥最佳效用。

5) 产品设计微机化、精确化、快速化和全面化。进一步广泛应用现代电子计算机技术,不断提高产品的设计水平与精度。充分利用计算机代替人工进行方案选择、计算分析并通过人机交互,最大限度地发挥设计人员的创造力。随着起重装备的高速化、大型化,需进一步深入开展对起重装备载荷变化规律、动态特性和疲劳特性的研究,进一步开展对起重装备整装备及零部件的可靠性试验研究,提供起重装备新的设计方法和数据,全面采用极限状态设计法、概率设计法、优化设计、可靠性设计等。

6) 产品构造新型化、美观化、宜人化和综合化。结构方面采用薄壁型材和异形钢、减少结构的拼接焊缝,采用各种高强度低合金钢新材料,提高承载能力,改善受力条件,减轻自重和外形美观。在机构方面进一步开发新型传动零部件,简化机构,以焊代铸,采用机电液一体化技术,提高使用性能和可靠性,增加起重装备的功能。在电控方面开发性能好、成本低、可靠性高的调速系统和电控系统。今后会更加注重起重装备的安全性,研制新型安全保护装置;重视驾驶员的工作条件,应用人体工程学设计驾驶室;降低驾驶员的劳动强度,发展半自动和全自动操纵。

1.2 起重装备面临的形势分析

我国起重装备制造业是新中国成立以后才逐渐形成的。经过五十多年,特别是近十几年的飞跃发展,已具有一定的规模和水平,基本形成了较为完整的科研生产体系。目前已制定了起重装备设计规范、制造技术条件和质量检验标准,产品已形成系列并多次更新换代,产品的规格品种不断增加,产品性能已经达到规定的指标要求,应当说起重装备已经进入成熟产品的行列,基本上满足了国内销售市场的需要。但我国起重装备与世界先进水平比较,由于产品规格品种少,产品的零部件、元器件和整机的故障率较多,可靠性低和安全性差,寿命短,存在较大的差距,因而绝大部分品种的起重装备至今尚未占领国际市场。造成这种局面的原因是多方面的,但从技术角度来看,主要有以下几个方面:

1) 设计水平不高。目前国内起重装备的设计方法主要采用许用应力法,这种方法与国外已经采用的极限状态法和近期采用的概率设计法相比,无论在设计参数取值和安全系数选

取上均与实际使用情况有较大出入,而且采用的设计理论(弹性理论和匀质材料)也比较落后,许多零部件及构造的细部设计也还存在不少问题,根据起重装备可靠性考核结果,近15%的故障与设计缺陷有关。因此要使产品性能有根本性变化,还需从设计抓起。

2) 产品检测水平不高。主要表现在长期以来只能对起重装备的短期性能指标(出厂性能)做全面考核,而对产品的可靠性,如平均故障时间(Mean Time Between Failure, MTBF)、平均首次出故障时间(Mean Time To First Failure, MTTF)、使用可用度(A)等一系列长期性能指标极少涉及,对起重装备故障模式、故障率、故障原因缺乏深入了解,缺乏量的概念,致使国内的起重装备故障多、寿命短、信誉差,迟迟打不进国际市场。

3) 产品安全性差。与国外产品相比,我国起重装备缺少运行自动记录装置,无法为用户提供准确信息以对起重装备及时维护、按时检修、到时报废。因而使起重装备带病运行、超寿命运行现象大量存在,极易造成事故隐患。此外,现有的安全保护装置可靠性差,运行不久就性能下降,精度超标,故障频繁,甚至影响起重装备正常作业,许多用户只能将安全保护装置短接,起重装备失去安全保护作用,会带来不良后果。因此应更加关注起重装备在长期运行过程中如何使安全保护装置稳定有效地工作,例如“黑匣子”技术、在线监视技术和报警系统的完善是降低起重装备事故的关键。

4) 起重装备事故频发。由于我国起重装备生产厂家多,有1000多家,设计制造水平参差不齐,造成部分起重装备带有一些安全隐患。更重要的是用户对起重装备安全运行的意识不强,由于缺乏对起重装备运行过程中有效的维护和检修,同时违反操作规程野蛮作业,造成起重装备安全事故时有发生,而且往往伴随人身伤亡事故。据国内权威部门对1200例塔式起重机事故的调查分析,塔式起重机倾翻和断臂等事故占了塔机事故的70%,而这些事故的主要原因是超载和违章作业引起的。当然,与起重装备制造质量差、安全装置不全或失灵也有直接关系。

5) 工艺技术水平低。分析我国起重装备产品和零部件质量差、技术经济性能落后的主要原因是生产工艺落后。例如,缺乏高精度加工设备,电气元器件可靠性低、性能差,热加工技术落后,铸、锻件质量低,焊接件外观差,缺乏检测仪器设备等。按目前情况,就是完全按国外标准和设计图样,也很难能全部制造出来。如果工艺技术上不去,产品水平也将很难上去。

6) 产品性能不稳定。这是设计、制造、安装和使用存在问题的综合反映。多种零部件性能与质量不过关,难以使整机水平提高。电气控制功能少、性能不高、可靠性低,频繁使用经常发生故障。起制动性能不好,影响操作。传动部件噪声大、寿命短、缺乏自动保护与维护功能。产品装配质量不过关,根据可靠性考核结果,近30%故障是由装配质量问题引发的。驾驶室操纵设备与设施比较简陋,驾驶员操作视野差、易疲劳、容易误操作引发故障。起重装备整体造型、焊接与制造的外观质量、油漆等都存在差距。此外,产品品种规格不全,有时造成用户的不合理选用,从而引起故障频繁。

7) 产品开发能力差。目前起重装备行业科研力量仍然比较薄弱,技术资料陈旧、缺乏,设计手段也落后。计算机辅助设计刚开始起步,可靠性设计缺乏试验和数据积累。基础理论如动态分析、疲劳特性、运动力学以及电气传动原理的研究比较落后,加之人员素质、科研经费、管理水平和测试手段等因素,使技术储备缺乏,新产品开发存在问题较多,设计周期长,产品更新换代很慢。

1.3 起重装备服役健康管理

★ 1.3.1 起重装备健康管理需求

起重装备健康管理需求包括以下两方面：

1) 起重装备向全球化、服务化方向发展，开展以设备故障诊断和维护为核心的售后服务是实现服务型制造的重要途径。

起重装备是我国国民经济的支柱产业。经济全球化、信息技术革命和现代管理思想的发展，已经使世界制造业发生了重大变化，起重装备向全球化、服务化方向发展。全球化背景下使得设备用户分布在全球各个角落，给设备的运行维护带来极大的困难和挑战。服务化背景下，装备制造与服务相互渗透与融合，传统“制造+销售”的生产型制造单向业态开始向“技术+管理+服务”的服务型制造复合业态转型。从生产型制造走向服务型制造已成为当今制造业发展的大趋势。

然而，当前在制造业全球化、服务化趋势下，我国起重装备整体仍处在全球产业价值链中低端，产品附加值低，必须从生产比重大的价值链低端向服务比重大、附加值高的价值链高端转移。产品的高附加值集中在产品研发设计和售后服务阶段。而我国装备制造企业创新能力差、缺乏核心技术和品牌，技术对外依存度高，大部分企业仍然以制造为主，大约超过70%的企业在价值链中扮演制造商的角色。相对于研发创新，售后服务具有较强的本地性和易操作性，但是长期以来我国起重装备对产品售后服务不够重视。所以，必须对大型装备使用阶段的运行、维护、维修等服务过程进行优化，提升服务能力。发展以装备故障诊断和维护为核心的售后服务作为产品高附加值业务，将成为促进制造业转型升级、迈向产业链高端的重要途径。

2011年12月，我国发布《国务院关于印发工业转型升级规划（2011—2015年）的通知》，鼓励制造企业积极发展精准化的定制服务、全生命周期的运维和在线支持服务。国内部分大型集团企业（如三一重工、徐州重工等）逐渐从生产型向服务型转变，建立了相应实时监控和远程故障诊断系统或平台，为客户提供全方位服务，但是整体与国外还存在较大差距。

2) 起重装备系统结构复杂，故障诊断和设备维护困难，传统的“事后维修”和“计划维修”难以满足需求，迫切需要故障预测与健康管理技术支撑。

起重装备通常由众多部件组成，结构层次多，不同零部件之间关系复杂、耦合性强。起重装备制造是制造业的高端领域，集中了制造业中的先进技术，代表一个国家的制造业发展水平。随着科技的发展和技术的进步，起重装备向大型化、精密化和自动化方向发展。起重装备系统具有非线性、耦合性、随机性等特点，导致系统容易出现故障。而这类大型起重装备系统一旦发生故障，常常会造成巨大的损失，甚至是灾难性后果。

所以，人们希望提高起重装备系统的可靠性和可维修性，故障诊断技术不仅是提高设备安全性和可靠性的重要手段，而且可以节约设备整个生命周期的运行维护成本。然而，目前故障诊断领域的研究工作主要集中在研究系统的状态评价和故障诊断方面，所关心的是系统“当前”的运行状态，即系统是否发生了故障、故障的部位等，对系统故障预测与健康管理的研

失和人员伤亡,而“计划维修”经常造成不足维修和过剩维修。由于起重装备系统正在向着大功率、长寿命、多用途方向发展,系统具有时变性、层次性、一定冗余度和有限故障诊断经验等特点,使得传统的诊断方式难以满足其诊断、维护需求。

综上所述,传统的故障诊断方法并不能完全适应起重装备系统故障诊断任务的要求,必须研究适应于其特点的有效诊断方法。所以,将故障消灭在萌芽状态的“视情维修”和“预知维修”成为起重装备系统未来保障维护的发展方向。由此产生了故障预测与健康管理的概念。它是指利用尽可能少的传感器采集系统的各类数据信息,借助各种推理算法和智能模型(如物理模型、神经网络、数据融合、模糊逻辑、专家系统等)来监控、预测和管理系统的状态,估计系统自身的健康状况,在系统发生故障前能尽早监测且能有效预测,并结合各种信息资源提供一系列的维修保障措施以实现系统的视情维修。健康管理是机内测试和状态监测能力的拓展,是从状态监测到状态管理的转变。

★ 1.3.2 起重装备健康管理组成

起重装备健康管理技术主要涉及数据处理、状态监测、故障诊断、故障预测、以可靠性为中心的维修和健康管理等众多方面的内容。尤其是面向服务的健康管理系统以服务的形式向用户开放式提供故障预测和健康管理服务,实现面向服务的健康管理系统必须注重对以下关键技术的研究:①数据处理与故障诊断技术;②故障预测与健康评估技术;③以可靠性为中心的维修与服务技术;④健康管理平台与服务技术。

★ 1.3.3 起重装备健康管理应用

1998年美国最早提出健康管理的概念,关于健康管理技术的研究首先开始于美军。各军种和国防部随着故障监测和维修技术的迅速发展,先后开发了使用健康管理技术的系统,如航天器集成健康管理系统、飞机状态监测系统、发动机监测系统、综合诊断预测系统等。

近几年来,由于故障预测与健康管理技术的成功应用,使得健康管理技术受到越来越多的重视。美国国防部在2000年将其列入《军用关键技术》报告。目前,健康管理技术广泛应用于英、美、加拿大和以色列等国的大、中型民用和军用直升机领域。美陆军的AH-64阿帕奇、UH-60黑鹰等直升机已有180多架安装了健康管理系统。AH264、RAH266、EH101、NHgO、Bell206等军用飞机也使用了健康管理系统,美国智能自动化公司新开发的超级HUMS于2007年3月被引入美陆军的RQ-7A/B“阴影”200战术无人机系统中。波音公司还将健康管理应用到民航领域,称作“飞机状态管理”系统,据波音公司的初步估计,通过使用该系统可使航空公司节省约25%的因航班延误和取消而导致的费用,提高了飞行安全和航班运营效率。

目前,在美国及其盟国的大学、工业部门和军方针对联合先进攻击机F-35(JSF)的不同子系统和模块展开了深入研究。美国宾夕法尼亚州立大学应用研究实验室的“空中飞行器小组”考虑突发和渐变故障,研究了增强FMECA技术,从历史实验数据建立设备寿命历程曲线和报废时刻,利用预测参数值估计系统状态,在此基础上估计系统的残余寿命。荷兰的PROMIS系统,用连续测量的系统健康状态参数表征系统的物理状态,并通过寿命模型和期望的系统载荷计算元件的残余寿命。美国Oceana传感器公司应用智能无线传感器网络,进行JSF的健康管理开发。Impact Technologies和智能自动化公司开发了故障预测和健康管理

设计工具软件。此外,美国国家航空航天局(NASA)有关研究机构一直致力于飞行器故障预测技术的研究,采用混合智能模型自主故障适应控制方法对空间飞行状态进行监控和诊断。

当前,从航天领域发展起来了一种故障预测的前沿技术,称为基于信标的多任务异常分析(也称作广义相干信号异常检测器),该方法正被应用于美国的联合攻击战斗机(Joint Strike Fighter, JSF)上,作为实现该机健康管理的一项关键技术。美国圣地亚国家实验室正在与美国能源部(The US Department of Energy, DoE)、国防部(Department of Defense, DoD)、工业界和学术界合作建立预测与状态管理创优中心,支持健康管理技术开发和技术试验,该中心已于2005年4月开始运行。2007年7月,NASA公布了飞行器综合健康管理技术计划。2008—2009年,NASA对该计划做了修改完善,连续出版了2.01、2.02、2.03版本,将飞行器综合健康管理(Integrated Vehicle Health Management, IVHM)计划的研究范畴从硬件IVHM技术扩大到软件健康管理技术领域。在民用航天领域,2009年,智能维护系统(Intelligent Maintenance System, IMS)和基于IMS的异常监测感应软件系统已被用于国际空间站热控系统的分析和健康监测。

健康管理技术的发展经历了状态(健康)监控和故障诊断、故障预测、系统集成三个阶段。作为一门新兴学科,健康管理还在增添新的功能。由于没有一种整体的系统工程方法,健康管理技术研究呈现出“百花齐放”但“各自为政”的局面。2009年初,美国纽约出现了一个新的非营利组织——PHM(Prognostic and Health Management, 预测与健康),致力于将分散的健康管理团体联合起来,推动PHM成为一门工程学科。PHM学会借助其网站为团体协作提供了一个交流平台,开办了在线杂志《预测与健康国际杂志》,并在每年秋季组织召开PHM学会年度会议。首届PHM学会学术年会于2009年9月27日~10月1日在圣地亚哥召开。PHM学会还致力于发展健康管理方面的国际标准、研究方法、技术课程和度量参数。

在国内,近几年来健康管理技术在军事及航天等领域受到了越来越多的重视。中国航空信息中心的张宝珍对健康管理技术进行了概念梳理。北京航空航天大学可靠性工程研究所、航空634所、哈尔滨工业大学等研究机构从设备健康衰退规律、故障预测模型、健康管理技术等方面对健康管理技术进行了较多跟踪研究,如北京航空航天大学的曾声奎等人提出了故障诊断与预测的人—机—环境的完整认知模型,对故障诊断与预测技术的性能要求、定量评价及验证方法等进行了分析。哈尔滨工业大学对航天器集成健康管理系统的概念及技术进行了跟踪研究等。空军工程大学张亮针对新一代作战飞机的技术特点以及在维修保障方面的需求,提出了机载健康管理系统的体系结构,设计了3种分离的推理机:异常检测推理机、故障诊断推理机和故障预测推理机。空军工程大学景博总结了特征参数法、预警电路、累积损伤模型法和综合法4种电子系统故障预测的实现方法,分析了电子系统健康管理技术涉及的关键技术。此外,国家863计划项目中已经对健康管理技术进行了立项研究。

总的来说,国内在健康管理技术研究方面起步较晚,近年来逐渐认识到此领域工作的重要性和迫切性,对国外相关技术进行了跟踪研究,主要在理论方面做了些研究工作。目前我国的健康管理技术主要应用在民航,主要是飞机或发动机的性能状态监控的软件系统,但功能很有限,健康管理核心技术的研究更谈不上成熟。可以说,国内对于故障预测和健康管理技术的研究目前正处于起步和探索阶段,大多数研究集中在系统监测和故障诊断方面,对整个系统的诊断模式、故障预测、知识服务等方面的研究较少。起重装备健康管理更是有待于进一步加强。

★ 1.3.4 起重装备健康管理发展趋势

当前健康管理技术研究的发展趋势主要体现在以下几个方面:

1) 网络化。网络化是健康管理技术的重要发展方向,随着信息技术的发展,开发基于Web的远程故障诊断与健康管理系统,可以提高复杂装备故障诊断的协同性和准确性,同时可以降低复杂装备的运行成本,提高企业经济效益。

2) 服务化。现有的健康管理技术中故障诊断和预测模式单一,系统资源相对封闭,缺乏与外界的交互,导致资源使用率低下、共享程度不够等问题,并且容易造成诊断方法、预测方法单一等现象。服务化将故障诊断资源以服务的形式进行封装和使用,在健康管理平台中进行服务的交易和共享,有利于丰富平台的知识资源、诊断方法等内容,提高资源利用率,促进健康管理技术的深入研究和应用。

3) 敏捷化。由于装备系统的复杂性和重要性,使其对故障诊断和维护的实时性、敏捷性要求较高,希望能够提高预测、诊断和维修的反应速度,尽量达到实时在线诊断,提高诊断效率,最大限度地减少损失。

4) 知识化。未来的复杂装备系统智能化程度将逐渐提高,装备系统将具备自诊断、自修复功能,要求相应的故障诊断系统能够在设备运行过程中具备知识的学习和更新能力,在没有人为参与下仍然能够完成设备诊断任务。知识将在健康管理系统中扮演更加重要的角色,知识化、智能化将成为健康管理技术的发展趋势。

5) 集成化。目前的装备故障诊断系统或健康管理系统大都是独立的系统,无法获取产品设计、制造等阶段的信息,造成诊断知识匮乏。企业的其他业务信息系统存储了大量的产品信息和知识,如产品数据管理(Product Data Management, PDM)、仿真数据管理(Simulation Data Management, SDM)、测试数据管理(Test Data Management, TDM)、供应链管理(Supply Chain Management, SCM)、客户关系管理(Client Relation Management, CRM)等,但是,这些业务系统又忽视了向产品全生命周期后期的知识传递,所以形成知识断层。未来将健康管理系统与企业其他业务系统集成,快速获取与设备维护相关的全生命周期知识资源,成为健康管理技术发展的另一趋势。

1.4 本书主要内容

本书第1章是绪论,主要介绍了起重装备的发展趋势与特点及其健康管理需求;第2章主要介绍了起重装备的全生命周期数据;第3章和第4章针对起重装备的金属结构,基于监测大数据,全面介绍了结构的累积损伤诊断与疲劳寿命预测;第5章和第6章分别介绍了起重装备减速机和制动器的健康诊断与故障预测;第7章介绍了起重装备电气系统的健康诊断与故障预测;第8章重点阐述了起重装备运行故障与工作效率分析方法;第9章和第10章分别说明了起重装备的风险评价与系统安全评价方法;第11章介绍了先进的起重装备以可靠性为中心的维修方法;第12章介绍了基于大数据的起重装备服役健康管理平台。

起重装备全生命周期数据模型

2.1 概述

产品全生命周期的概念最早出现在经济管理领域,1950年Dean为了研究产品在出现、成长、成熟、衰亡几个时期的价格变化,利用产品全生命周期来描述整个过程。1965年Levitt又专门讨论了产品全生命周期的概念,分为市场开发、市场成长、市场成熟和市场衰退四个阶段。

美国国防部于1985年提出一项战略性计划“计算机辅助后勤保障”(Computer Aided Logistic Support, CALS),经历了“计算机辅助采办与后勤保障(Computer-Aided Acquisition and Logistic Support)”到“持续采办与寿命同期保障(Continuous Acquisition and Lifecycle Support)”,开始涉及产品全生命周期管理这一概念,包括武器系统的设计、研制、制造和保障过程等阶段。

此后,产品全生命周期开始被制造业广泛接受,并于20世纪90年代得到迅猛发展的产品数据管理(PDM)技术结合,产生了产品全生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)。权威的CIMdata公司给出的定义:“PLM是一种战略商业方法,它应用一整套的商业解决方案来支持产品定义信息的协同创造、管理、分发和使用;支持扩展企业(包括顾客、设计伙伴和供应伙伴等)的业务;覆盖从产品或装置生命中的概念(阶段)到结束(阶段)的(产品)生命周期;集成了人、过程、商业系统和信息”。随着互联网的出现和基于互联网协作的发展,PLM重点从单纯的设计阶段的数据和过程管理扩展到从需求到概念、定义,再到采购、生产、服务、维护和报废各个生命周期阶段的相关数据、过程、资源分配、使用工具等信息以及这些信息之间的有机关联。

PLM的创新在于定义了产品作为企业内部和跨企业的信息中心,并且全生命周期作为信息集成分析的时间尺度,解决的最核心问题还是产品全生命周期数据的管理,是企业解决产品全生命周期“信息孤岛”的战略思想、提高自身竞争力的强有力工具。通过集成CAX工具,实现产品开发、生产、销售、使用和维护维修中数据的获取和管理,进而在全生命周期内实现数据共享。但是在PLM的应用中,存在着以下问题。

1) 受传统商业模式的影响,大多数企业PLM实施的关注点主要集中在产品设计和生产阶段,以期望获取最直接的经济利益,其他阶段由于长期得不到关注而缺乏详细的产品相关数据使得PLM的优势受限。企业利润由苦笑曲线向微笑曲线的转变(见图2-1),揭示出制造企业单纯地依靠降低生产成本、提高产品质量,不足以获取市场优势,需要关注产品上游的设计和下游的服务、回收再利用等阶段,实现产品设计创新,提高人性化的服务,尽量重用废弃产品及其零部件、原材料。产品设计将客户需求转化为一套合理的解决方案,仅占产品总成本的6%,却决定了最终产品70%的质量和成本既要响应客户的多样化、复杂化需求,又要为产品的制造、销售、维护等后续阶段提供必不可少的技术支持。因此增强产品设计能力,是企业快速响应市场的先决条件,也是企业提高竞争力的主要手段。部分企业围绕产品

服务过程和回收再利用所产生的利润远远超过制造产品,现代制造服务业已成为企业新的业务增长点和利润的来源。例如,在航空工业里,企业的获利能力不是来自于飞机的销售,而是飞机在三十多年的预期寿命里的维护、维修收入。同样在船舶行业里,船东每年支付的船舶修理费用占到了船舶固定成本的15%还多,将近运输总成本的8%。1997年,施乐欧洲公司开始废弃产品回收和重新加工计划,全年回收约16万台机器,通过重新加工从中产出380万件零部件,利用废弃产品的

回收和再加工节约了8000万美元。可见制造企业不但需要关注产品的设计和生产,还要管理产品的使用维修和报废回收,为产品提供完善的支持,从而提升竞争力。

2) 产品全生命周期数据缺乏有效的数据获取和信息处理机制。从产品市场预测到报废回收的全过程,产生了各类海量数据,如图样、手册、单据等,完善、管理和使用这些产品数据为新产品的研发提供了丰富的知识库。但是由于缺乏有效的数据采集手段和信息处理机制,故不能建立完备的产品信息库。产品离开制造企业后,因为时间和空间的限制及获取手段的落后,产品数据变得模糊、不完整,严重地制约了产品全生命周期数据的获取和信息处理,使得这部分产品信息不精确、不完善。所以各阶段之间存在着信息差,无法真正实现产品数据、信息、知识的无缝转换,也不能实现新知识的快速获取和旧知识的有效复用。

这种情况下,产品全生命周期数据闭环管理的研究就显得尤为迫切。其思想源于产品全生命周期闭环管理,数据管理范围从产品设计和生产到概念设计、使用服务和报废回收,支持数据的获取、统一管理和有效供给。

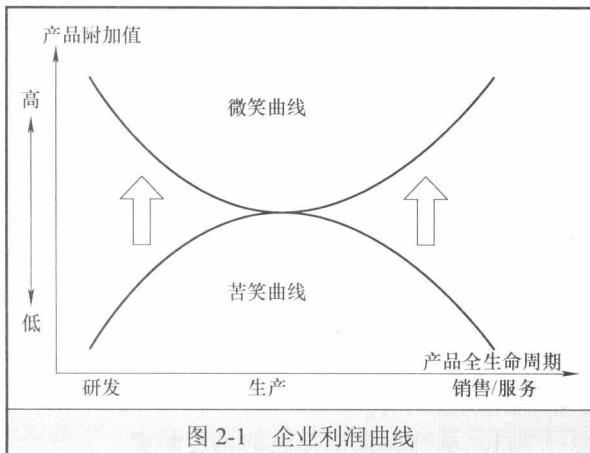


图 2-1 企业利润曲线

2.2 产品全生命周期数据管理范围

从PDM开始,到现在的PLM系统,产品数据管理功能主要围绕产品研发阶段进行,管理的数据主要是产品设计的数据,如产品信息、产品结构信息(各种BOM、配置、约束信息、装配信息等)、文档数据(二维图样、三维模型、计算书、说明书、有限元分析报告、NC代码等)。

随着研究的深入和市场需求的提升,PLM的涵盖范围开始向产品研发的上游和下游扩展,覆盖了产品全生命周期的更多阶段,集成了产品更多阶段的数据,实现数据的共享,有效地提高了数据的利用效率,提升了企业的创新能力。

Lee等人将PLM的思想应用到了维护、维修、大修(Maintenance, Repair&Overhaul, MRO)中,实现了产品设计数据和MRO数据的集成,从而在MRO阶段能获取到产品的原始定义数据,大幅度提高产品维护维修的层次和水平,实现了产品定义信息指导实际维护维修工作。赵洪志等人基于PLM,实现了产品使用阶段信息的管理,如用户反馈信息、产品状态信息等。莫蓉、张淑华等研究了基于PLM的产品全生命周期质量信息的管理,包括检测信息的管理、全面质量信息的管理等。但是国内PLM系统大都还停留在产品数据管理和工艺信