

基于失效模式的 起重装备服役 健康监测



丁克勤 刘关四 编著

基于失效模式的起重装备 服役健康监测

丁克勤 刘关四 编著



机械工业出版社

本书简要概述了起重装备类型、典型失效模式及其产生的原因分析,系统阐述了起重装备结构、机构、电气等关键部件针对不同失效或故障模式的运行状态监控与结构健康监测理论、技术、方法,全面介绍了面向云服务的起重装备健康监测一体化系统的设计思路与服务模式等内容。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

基于失效模式的起重装备服役健康监测 / 丁克勤, 刘关四编著. —北京: 机械工业出版社, 2018.10

ISBN 978-7-111-60512-6

I. ①基… II. ①丁… ②刘… 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 151962 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: 肖 琳 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·12.5 印张·298 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-60512-6

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

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: www.cmpedu.com

前言

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。起重装备是现代工业生产、城市发展、人民生活必不可少的基础设施,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,起重装备的安全关系到人民生命安全,也关系到国家经济运行安全和社会稳定。

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,必然对起重装备的检验检测等提出新的挑战 and 更高要求。起重装备主要由结构、机构、电气系统、钢丝绳、吊具等关键部件组成,其失效模式复杂多样,不尽相同。传统的起重装备检验检测主要以定期检验为主,没有充分考虑到起重装备的失效模式,也不能满足起重装备在作业过程中对关键部件运行状态实时监测的需求;而且检验强度大、效率低,难以保障起重装备的安全运行。因此,为保障大型起重装备安全运行,以失效模式为基础,全面实施起重装备结构、机构、电气系统等关键部件运行健康监测势在必行。

结构健康监测的概念于 1954 年被提出,于 20 世纪 80 年代开始得到广泛探索与研究。其基本原理是利用安装到结构与材料上的先进传感、驱动元件,在线实时获取与机构和材料健康状况相关的信息,结合先进的信号处理方法和材料结构力学建模方法,提取结构损伤特征参数,识别结构的健康状况,并在早期就加以控制或采取补救措施,以消除安全隐患或控制安全隐患的进一步发展,从而避免安全事故的发生。

本书以起重装备为对象,全面论述了基于失效模式的起重装备服役健康监测的基本理论、方法及其应用。本书共分为 10 章,第 1 章主要介绍了起重装备的发展趋势与特点以及对健康监测的需求,第 2 章主要介绍了起重机类型及典型失效模式,第 3 章主要介绍了起重装备结构应力状态光纤监测技术,第 4 章主要介绍了起重装备结构疲劳损伤磁效应监测技术,第 5 章主要介绍了起重装备结构疲劳裂纹超声导波监测技术,第 6 章主要介绍了起重装备结构损伤演化声发射监测技术,第 7 章主要介绍了起重装备减速机运行状态健康监测技术,第 8 章主要介绍了起重装备制动器运行健康监测技术,第 9 章主要介绍了起重装备电气系统运行状态健康监测技术,第 10 章主要介绍了面向云服务的起重装备健康监测一体化系统。

本书由丁克勤、刘关四编著,参加部分章节编写等相关工作的还有陈光、辛伟、胡亚男、赵娜、柳亦兵、张旭、王志杰、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起重装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。

基于失效模式的起重装备服役健康监测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 国内外结构健康监测发展现状..... 5
- 1.3 起重装备健康监测体系构建..... 10
- 1.4 本书主要内容..... 11

第 2 章 起重机类型及典型失效模式..... 12

- 2.1 概述..... 12
- 2.2 起重机的类型..... 12
 - ★ 2.2.1 桥架型起重机..... 12
 - ★ 2.2.2 臂架型起重机..... 16
 - ★ 2.2.3 缆索型起重机..... 18
- 2.3 起重机的构成..... 20
 - ★ 2.3.1 桥架型起重机的组成..... 20
 - ★ 2.3.2 臂架型起重机的组成..... 22
 - ★ 2.3.3 缆索型起重机的组成..... 26
- 2.4 起重机典型失效模式分析..... 28
 - ★ 2.4.1 金属结构典型失效模式分析..... 28
 - ★ 2.4.2 零部件典型失效模式分析..... 28
 - ★ 2.4.3 机构典型失效模式分析..... 30
- 2.5 事故案例..... 31

第 3 章 起重装备结构应力状态光纤 光栅监测..... 33

- 3.1 概述..... 33
- 3.2 光纤光栅传感器监测基本原理与传感特性..... 33
 - ★ 3.2.1 光纤光栅传感基本原理..... 34
 - ★ 3.2.2 光纤光栅温度特性..... 37
 - ★ 3.2.3 光纤光栅应变特性..... 38

- ★ 3.2.4 光纤光栅温度应变交叉敏感特性..... 39

- ★ 3.2.5 典型光纤光栅应变传感器..... 40

➤3.3 FBG 应变传感器的应变传递机理..... 42

- ★ 3.3.1 表面粘贴式 FBG 应变传感器应变传递机理..... 42

- ★ 3.3.2 埋入式 FBG 应变传感器应变传递机理..... 44

➤3.4 常用的光纤布拉格光栅解调方法..... 45

- ★ 3.4.1 基于光纤 F-P 可调谐滤波法..... 45

- ★ 3.4.2 基于光谱仪检测的解调技术..... 46

- ★ 3.4.3 非平衡 Mach-Zender 干涉法..... 46

➤3.5 FBG 传感器性能退化分析..... 47

- ★ 3.5.1 热导致的 FBG 传感器性能退化..... 47

- ★ 3.5.2 应力导致的 FBG 应变传感器性能退化..... 47

➤3.6 工程应用..... 48

第 4 章 起重装备结构疲劳损伤磁 效应监测..... 56

➤4.1 概述..... 56

➤4.2 结构疲劳损伤演化过程及度量..... 56

- ★ 4.2.1 疲劳损伤过程的不同阶段..... 56

- ★ 4.2.2 位错对结构疲劳损伤的影响..... 57

- ★ 4.2.3 结构疲劳中的累积损伤理论..... 60

➤4.3 结构疲劳损伤和磁滞特性关系理论..... 62

- ★ 4.3.1 金属结构的磁化特性..... 62

- ★ 4.3.2 磁化效应 J-A 理论模型..... 63

- ★ 4.3.3 疲劳损伤与磁滞特性的关系分析..... 65

➤4.4 起重装备结构疲劳损伤磁监测试验平台..... 67

★ 4.4.1	疲劳损伤磁监测装置	67	★ 6.2.1	声发射波的传播	96
★ 4.4.2	磁传感器	67	★ 6.2.2	凯赛尔效应和费利西蒂效应	98
★ 4.4.3	疲劳损伤磁监测试验平台	68	★ 6.2.3	声发射监测原理	98
➤ 4.5	起重装备结构疲劳损伤磁监测试验	69	➤ 6.3	声发射监测传感技术	99
★ 4.5.1	磁传感器的磁路分析	69	★ 6.3.1	传感器工作原理	99
★ 4.5.2	结构疲劳损伤不同时的磁滞回线	70	★ 6.3.2	传感器的类型	99
★ 4.5.3	磁滞回线磁参量与疲劳损伤的关系	71	★ 6.3.3	传感器的结构	100
★ 4.5.4	多组试件的疲劳损伤磁监测试验结果	72	➤ 6.4	声发射信号处理方法	100
★ 6.4.1	声发射信号的参数分析方法	100	★ 6.4.2	其他信号处理方法	103
★ 6.4.2	其他信号处理方法	103	➤ 6.5	典型声发射监测系统	105
★ 6.5.1	声发射监测系统	105	★ 6.5.1	声发射监测系统	105
★ 6.5.2	基于光纤传输的声发射监测系统	108	★ 6.5.2	基于光纤传输的声发射监测系统	108
★ 6.6	声发射监测技术的实验及应用	109	★ 6.6	声发射监测技术的实验及应用	109
第 5 章	起重装备结构疲劳裂纹超声导波监测	75	第 7 章	起重装备减速机运行状态健康监测	116
➤ 5.1	概述	75	➤ 7.1	概述	116
➤ 5.2	超声导波基本理论	75	➤ 7.2	起重装备减速机失效模式	116
★ 5.2.1	超声导波基本概念	75	➤ 7.3	起重装备减速机运行状态监测技术	120
★ 5.2.2	自由板中的超声导波	76	➤ 7.4	起重装备减速机振动基本原理	124
★ 5.2.3	超声导波频散方程	78	★ 7.4.1	齿轮减速机振动	125
➤ 5.3	超声导波监测传感技术与系统	82	★ 7.4.2	轴承振动	129
★ 5.3.1	超声 Lamb 波监测原理	82	➤ 7.5	起重装备减速机振动监测系统	131
★ 5.3.2	超声 Lamb 波传感器	83	★ 7.5.1	振动监测系统概述	131
★ 5.3.3	传感器阵列技术	84	★ 7.5.2	常用振动传感器	132
★ 5.3.4	超声导波监测系统	85	★ 7.5.3	模拟信号调理	135
➤ 5.4	超声导波监测信号分析与处理技术	86	★ 7.5.4	模-数转换	135
★ 5.4.1	频谱分析技术	87	➤ 7.6	起重装备减速机振动监测信号分析	136
★ 5.4.2	时频分析技术	87	★ 7.6.1	振动监测信号的时域分析	136
➤ 5.5	超声 Lamb 波缺陷定位成像技术	89	★ 7.6.2	振动监测信号的频域分析	140
★ 5.5.1	基于损伤概率成像算法的层析成像原理	89	★ 7.6.3	现代信号分析技术	143
★ 5.5.2	圆弧成像原理	90	➤ 7.7	起重装备减速机振动监测标准	144
★ 5.5.3	椭圆成像原理	91	第 8 章	起重装备制动器运行状态健康监测	146
➤ 5.6	金属板结构超声导波监测试验	91	➤ 8.1	概述	146
第 6 章	起重装备结构损伤演化声发射监测	95			
➤ 6.1	概述	95			
➤ 6.2	声发射监测理论基础	96			

➤8.2	制动器典型失效模式及失效机理分析	146
★ 8.2.1	制动器典型失效模式	146
★ 8.2.2	制动器失效机理分析	146
➤8.3	制动器运行状态监测内容	149
➤8.4	起重装备制动器性能监测系统	151
★ 8.4.1	监测系统整体设计	151
★ 8.4.2	基于多变量传感器的制动器性能监测系统	154

第 9 章 起重装备电气控制系统

运行状态健康监测

➤9.1	概述	156
➤9.2	电气部件的故障分析	156
★ 9.2.1	断路器的故障分析	156
★ 9.2.2	继电器的故障分析	157
★ 9.2.3	电动机的故障分析	158
★ 9.2.4	变频器的故障分析	158
★ 9.2.5	PLC 的故障分析	159
➤9.3	电气控制系统关键部件状态监测	160
★ 9.3.1	接触器的运行监测	160
★ 9.3.2	电动机的运行监测	162
★ 9.3.3	变频器的运行监测	163
★ 9.3.4	PLC 的运行监测	164
★ 9.3.5	其他部件及工作参数的运行监测	165

➤9.4	起重装备电气控制系统运行状态健康监测系统	165
★ 9.4.1	系统设计的目标与原则	165
★ 9.4.2	系统总体架构	165
★ 9.4.3	系统硬件组成	166
★ 9.4.4	系统软件设计	170
★ 9.4.5	工程应用	170

第 10 章 面向云服务的起重装备健

康监测一体化系统

➤10.1	概述	176
➤10.2	云计算相关理论及技术	176
★ 10.2.1	云计算的基础知识	176
★ 10.2.2	云计算的关键技术	179
★ 10.2.3	云计算架构的服务模式	182
➤10.3	起重装备健康监测一体化系统	184
★ 10.3.1	系统总体设计	184
★ 10.3.2	系统软件设计	186
➤10.4	基于健康监测的起重装备云平台	187
★ 10.4.1	云平台基础架构设计	187
★ 10.4.2	云平台功能模块划分	188
★ 10.4.3	业务流程分析与数据库设计	190
➤10.5	工程应用	191

参考文献	194
------	-----

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。

1.1 起重装备发展趋势及其特点

复杂起重装备是现代工业生产、城市发展、人民生活必不可少的基础设施,是主要工业行业的“骨干”,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。2015 年 12 月统计,我国起重运输(物料搬运)机械制造业规模以上企业达 1193 家,其中大型企业 10 家、中型企业 132 家、小型企业 1051 家,行业从业人数 28.5 万人。“十二五”期间,我国起重装备行业发展势头强劲,截止到 2017 年底,我国起重机械保有量达到 223.75 万台。

1. 我国起重装备向大型化、高参数化方向发展,对起重装备传统设计、制造、运维管理模式提出了新挑战和更高要求

1) 我国港口起重装备正在向大型化、高参数化方向发展。世界经济全球化促进了国际贸易的迅速发展,而其中 90% 以上的国际贸易量是通过水路运输来完成的。我国拥有 1.8 万 km 的海岸线,11 万 km 的内河航道,承担着 9% 的国内贸易运输和 85% 以上的外贸货物运输,沿海沿江有 1460 多个商港。到 2010 年,全国规模以上港口(含内河)完成货物吞吐量 80.2 亿 t,港口集装箱吞吐量 14 500 万标准箱,且每年均保持增长趋势。为适应船舶大型化、货物装卸散装化和集装化发展需要,我国港口起重装备,如港口岸边集装箱起重机、轮胎龙门起重机、正面吊运机、高生产率的抓斗卸船机等,均向大型化、专用化的装卸起重机械发展。由上海振华重工集团有限公司设计制造的岸桥起重机最大起重量可达 150t,前伸距长达 70m;轮式起重机最大起重量达到 5000t,均居世界第一。

2) 我国海洋工程起重装备向大型化、高参数化方向发展。世界经济的快速增长形成了对能源的巨大需求,能源供应的日趋紧张促使各国向海洋,尤其是深海进行资源开发。截至 2011 年,我国在近海发现 31 个油气田,已投产的海上油气田有 15 个。我国南中国海油气资

源量的总体估计为 1050 亿桶, 天然气 2000 万亿 m^3 。自 20 世纪 80 年代末以来, 我国在南中国海联合勘探和生产水深范围从 100m 不断向 500~2000m 水深海域拓展, 这不仅需要深海油气勘探技术的提高, 同时还需要大量海上工程配套设备的供应。起重装备作为海洋石油开发、大型海上工程、沿海风电设备安装等不可缺少的工程机械, 对其需求将迅猛增加, 而且不断向大型化发展。上海振华重工集团有限公司作为我国目前主要的大型海洋工程起重机生产厂家之一, 2006 年就为广州打捞局“华天龙”号起重船制造了起重量 4000t 的起重机, 2008 年又为海油工程制造了“蓝鲸”号起重机, 吨位达到了 7500t。2011 年武桥重工集团股份有限公司制造的海上平台起重机, 最大吊重更是达到了 22 000t。随着深海开发需求的日益增加, 同时为了满足对到期或废旧海洋工程的维修、拆卸和回收利用的需要, 全球几大海洋工程公司又提出了海洋工程超大型起重系统, 其起重能力可以达到 30 000t。

进入 21 世纪以来, 我国的造船工业进入了快速发展时期, 各大主力船厂承接的船舶吨位从几万吨发展到几十万吨, 年造船能力也普遍跃升到百万吨水平, 造船模式也相继从船台造船到船坞造船, 大型造船门式起重机的需求也大幅增加。随着中船江南长兴造船基地、广州中船龙穴造船有限公司、青岛海西湾造修船基地、舟山金海湾船业有限公司、新时代造船有限公司、太平洋造船集团有限公司、扬州大洋造船有限公司等大型国营和民营造船基地的建设, 大型造船门式起重机也进入到一个集中建造的黄金时期, 起重机的提升从 600t 上升到 900t, 跨度从 170m 增加到 239m, 已经建成的或在建的大型造船起重机有上百台。门式起重机作为一种重要的物料搬运设备, 在造船领域的重要作用日益显现。从 20 世纪后期开始, 国际上门式起重机向大型化、多功能化、专用化和自动化方向发展。

另外, 冶金起重机作为冶金行业安全、正常生产必不可少的关键和重要设备, 其主要趋势之一是起重量大型化、工作高速化。随着社会的发展, 对冶金企业的要求也在逐步提高, 这不仅表现在对冶金产品的数量要求上, 更重要的是表现在对冶金产品的质量和品种方面, 社会需求的增加推动和促进了冶金企业的技术改造和技术进步, 大型转炉、连铸、连轧技术的应用, 对冶金起重机的大型化和高速化提出了更高的要求。由太原重工股份有限公司设计制造的冶金起重机, 最大吨位已达到 480t, 居于世界首位。

起重装备的大型化、高参数化发展必然对起重装备的设计、制造和运维等管理模式提出新的挑战 and 更高要求。这种挑战和要求主要体现在:

1) 起重装备新产品的不断涌现, 对设计、制造、运维等全生命周期数据统一模型提出了新挑战和更高要求。

2) 起重装备大型化、高参数化, 对运行过程安全检测技术、健康监测技术等提出了新挑战和更高要求。

3) 起重装备大型化、高参数化, 对故障与效率的关系以及关联数据分析技术等提出了新挑战和更高要求。

4) 起重装备大型化、高参数化, 对设计、制造和运维等产品全寿命周期数据集成管理提出了新挑战和更高要求。

面对起重装备的大型化、高参数化发展对其设计、制造和运维等管理模式提出新的挑战 and 更高要求。目前, 我国起重装备无论在设计、制造、运维方法、标准法规方面, 还是在生命周期数据集成管理、一体化管理等方面, 都存在严重的不足。因此, 建立起适合我国国情

的,与国际发展趋势充分接轨的复杂起重装备全生命周期数据统一模型和管理系统,尽快开展这一项目的研究工作,已经成为当务之急。

2. 我国起重装备设计、制造、运维“先天不足、后天失调”问题突出,导致事故频发

我国起重装备制造行业是新中国成立以后才逐渐形成的。经过60多年的努力,我国已成为世界起重装备制造大国,但还不是制造强国。与国际发达国家相比,我国起重装备设计、制造、运维“先天不足、后天失调”问题突出,总体上仍存在10~15年的阶段性差距,主要表现在以下几个方面:

1) 面向运维的起重装备设计水平不高,产品开发能力差。目前国内起重机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,根据起重机可靠性考核结果,近15%的故障与设计缺陷有关。

2) 起重装备产品检测水平不高,产品安全性差。主要表现在长期以来只能对起重机的短期性能指标(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)、使用可用度等一系列长期性能指标极少涉及,对起重机故障模式、故障率、故障原因缺乏深入了解,缺乏量的概念,致使国内的起重机故障多、寿命短、信誉差,难以占领国际市场。

3) 起重装备生产工艺落后,产品性能不稳定。分析我国起重机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,缺乏高精度制造设备,电气元器件可靠性低、性能差,热制造技术落后,铸、锻件质量低,焊接件外观差,缺乏检测仪器设备等。产品性能不稳定是设计、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%的故障是由装配质量问题引发的。

4) 起重装备事故频发,伤亡巨大。由于起重机设计制造水平参差不齐,造成部分起重机带有一些安全隐患。由于缺乏对起重机运行过程中有效的原维护和检修,造成起重机安全事故时有发生,而且往往伴随人身伤亡事故。从原国家质量监督检验检疫总局全国特种设备安全状况统计中可以看出,特种设备事故中起重装备引起的事故比例近3年分别占22.7%、33%、18%,其比例均位居8类特种设备中事故率首位。

近十几年来,全国起重装备事故呈高发态势,一些与起重装备有关的特别重大事故造成了恶劣的社会影响。如2001年7月17日,上海沪东中华造船(集团)有限公司大型龙门吊在吊装过程中,突然发生整体倒塌事故,3000多t的质量在十几秒中砸向地面,造成36人死亡,3人受伤,死者中,包括同济大学5位教师和2位博士后。2007年4月18日发生在辽宁省铁岭市清河特殊钢有限公司的一起起重机事故造成32人死亡、6人重伤。

3. 开展基于故障知识库的起重装备设计、制造和运维数据集成管理是提高我国大型起重装备产品质量和可靠性的重要手段

起重装备制造质量和运行可靠性的高低直接取决于对起重装备设计、制造和运维等各个

环节的数据管理和质量控制,受传统运作模式的影响,多数起重装备企业的产品数据管理还是局限于产品设计和生产阶段,其他阶段的数据管理能力薄弱,缺乏有效的数据获取和处理机制,不能建立产品全生命周期信息库,无法真正实现产品数据的无缝集成,以及新数据的快速获取和旧数据的高效复用,阻碍了产品创新和服务的发展。

目前我国大型起重装备制造的主要关注点是结构性能及工艺性能的保证,而对产品的工作性能及维修维护性能考虑不足,产品在使用和维护阶段的信息化并未得到充分的重视,使得大型起重装备在可靠性、可维护性方面和西方发达国家相比仍然相对滞后。

复杂起重装备产品综合性能包括前期结构和工艺制造性能,也包括后期的可靠性、维修性、保障性等。对产品综合性能的设计需要考虑产品后期运行过程中的故障信息,需要将产品生命周期后期维修和维护数据反馈于生命周期前期阶段,以指导前期的结构设计和制造工艺设计,实现满足设计全生命周期综合性能需求的设计方案。因此,需要对面向 MRO (Maintenance, Repair & Operations) 的复杂起重装备产品综合性能设计方法、体系及相关系统进行研究。

目前,在运用故障模式与影响分析(Failure Mode and Effects Analysis, FMEA)对起重装备进行故障分析,并在起重装备设计、制造和运维环节进行应用时,存在的共性问题如下:

- 1) 缺乏故障模式的数据积累,不能列出全部故障模式,也难以确定故障模式的发生频率。原因是缺乏行之有效的故障信息管理机制和方法,没有形成企业自己的故障模式库。
- 2) 缺乏专业的技术团队对故障进行分析,导致分析肤浅,且故障数据表达不严谨。
- 3) 产品运行过程发生的故障,无法有效地反馈到产品设计、制造、运维等全生命周期的管理过程中,进行有效的改进和控制。
- 4) 企业对 FMEA 的运用多停留在形式上,和实际产品脱节,企业缺乏产品全生命周期数据集成管理系统进行支撑。

因此,开展起重装备设计、制造和运维全生命周期数据集成管理与应用是提升我国起重装备产品质量,提高产品运行可靠性的重要手段,需求非常迫切。

4. 开展起重装备设计、制造和运维数据集成管理是提高我国起重装备制造业信息化管理水平的需要

我国起重装备制造业信息化管理水平整体上比较低,将信息技术、现代管理技术和制造技术相结合,并应用于企业产品全生命周期(从市场需求分析到最终报废处理)的各个阶段更是存在不足,严重制约了我国现代起重装备制造业的发展。随着我国经济快速发展和改革开放不断推进,我国起重装备制造业也不断认识到了信息技术对企业发展的重大作用,也相继引进或自主开发了 CAX、PDM (产品数据管理)、ERP (企业资源计划)、SCM (软件配置管理)、MRO 等系统。但是现有的这些系统,主要是针对产品全生命周期中某些阶段的解决方案,还缺少通贯全局的系统集成,还缺少对整个企业跨任务的数据流进行不间断的控制。因此,制造企业普遍存在信息孤岛,许多系统之间不能集成,造成大量的信息需要重复录入,大大降低了信息系统的使用效率,影响了企业信息系统整体效力的发挥。

提高产品质量、降低产品成本、缩短产品开发周期成为我国起重装备制造业生存和发展的关键。为消除企业“信息孤岛”,提高企业信息化管理水平,迫切需要建立产品生命周期管理(Product Lifecycle Management, PLM)系统,在统一的集成资源环境下对产品整个生

命周期中的各种活动所涉及的产品信息进行统一描述和管理。

5. 开展起重装备设计、制造和运维数据集成管理是增强我国起重装备国际竞争力的有效途径

全球化的竞争、越来越短的产品生命周期以及多样化的客户需求使得我国起重装备制造企业面临着越来越严峻的生存环境。在这样的环境下,企业往往很难获得足够的利润,这就迫使企业改变经营策略,从用户需求分析,功能设计,直到制造、销售、服务和报废的整个产品生命周期的角度挖掘最大化的产品利润。在这种情况下,原有的产品数据管理系统已经很难满足企业的需求,因此人们也越来越关注 PLM 的研究。近年来,我国起重装备制造业正处于快速发展期,利用世界范围内劳动力分工大转移的机遇,我国有机会真正成为世界工厂和制造强国。我国起重装备制造企业应该采用先进的信息技术,提升制造水平,成为世界级制造企业。在这个过程中,PLM 可以发挥很大的作用。

1) 加快新型起重装备产品上市。在今天的竞争环境中,新产品上市的速度对企业的影响是至关重要的。PLM 系统打破了限制产品设计师、制造者、销售者和使用者之间进行沟通的技术桎梏,通过互联网的协作和协同设计,可以让客户和供应商及早参与产品开发过程,避免后期的修改或返工。同时,采用标准化的零部件,也可以极大地加快产品开发速度,缩短产品研发周期,加速新品上市,并且以“正确的产品”获得最有利的竞争地位。

2) 降低起重装备制造成本。PLM 允许后期的参与者在最早的阶段就参与进来,从而有效地控制产品的成本。在企业内部,人们发现,如果在产品设计阶段的用户需求没有得到充分的考虑,它的成本将在产品生命周期的后续阶段体现出来。类似的,那些没有考虑到生产制造问题的设计,通常也不得不经常性地进行的昂贵的返工。PLM 和企业的制造系统之间的无缝集成,使得企业能够在所有的产品配置中,数字化地优化和验证任何制造工艺和流程,从而有效地降低制造成本。

3) 生产出超越客户期望的起重装备。PLM 在起重装备产品概念设计阶段和规划阶段就让客户参与,确保最终的产品符合客户期望。作为面对用户的起重装备制造企业,协同设计系统可以让企业与其用户保持对产品设计更改的同步。由于 PLM 可以对产品整个生命周期进行监控,有效改善产品质量。所以应用 PLM 系统也是客户所希望的。

综上所述,我国起重装备制造业以及产品正向大型化、高参数化方向发展,运行风险和不可预见因素增加,设计、制造、维护和检验难度越来越大。由于产品的零部件、元器件和整机的故障率较多,可靠性和安全性差,寿命短,因而绝大部分品种的起重装备至今尚未占领国际市场,这与我国当前的发展形势和国际地位是不适应的,与国家科技工作的指导方针是相违背的。因此,迫切需要开展复杂起重装备产品全生命周期数据集成管理与应用技术研究,以全面提升我国起重装备产品质量、可靠性和产品全生命周期数据集成管理水平,增强我国起重装备制造业的国际竞争力。

1.2 国内外结构健康监测发展现状

1. 在航空航天领域的发展与应用

国际上对结构健康监测开展了大量的研究工作,在美国空军及国家航空航天局(National

Aeronautics and Space Administration, NASA) 的多个项目中都包含了对结构健康监测技术的研究与探索, 具体包括: ①1979 年, 美国 NASA 启动了一项“智能蒙皮”计划, Claus 等人首次将光纤光栅传感器网络埋入碳纤维增强复合材料飞机蒙皮中, 使材料具有感知应力和判断损伤的能力, 这是结构健康监测系统在航空航天领域的初步尝试; ②1998 年 NASA 采用光纤光栅传感器监测可重复使用运载器 (RLVX-33) 低温储箱的状态 (包括温度和应变); ③NASA 开发了结合经验组件方法的混合诊断工具, 并将该混合诊断工具应用于航天飞机主引擎异常检测; ④NASA 集成喷气推进实验室 (Jet Propulsion Laboratory, JPL) 开发的 BEAM 和 ARC (Ames Research Center, 埃姆斯研究中心) 开发的 Livingstone 构成混合推理系统原型, 并用于 X-34 主推进反馈系统健康监测; 另外美国空军还针对 F-15、F-16、F-18、F-22、JSF 等飞行器的结构健康监测技术进行了大量基础研究并已开始进行飞行演示验证, 例如 F-35 中采用了先进的预测及健康管理 (Prognostics & Health Management, PHM) 系统。在民用航空领域, 结构健康监测技术被视为保障复合材料大量使用和提高飞机可靠性、降低维护费用的关键技术。因此世界上的主要飞机制造公司都非常重视结构健康监测技术的研究与应用。波音公司探索了在多个机型上采用结构健康监测技术探测结构微裂纹, 还在继续研究大面积复合材料结构的健康监测技术在新型飞机 Boeing 787 上的应用。空中客车公司研究了结构健康监测技术在 A320、A340、A350、A380 等型号上的实现。

美国陆军航空技术局资助的运营支持和维持技术计划 [Operations Support and Sustainment Technologies (OSST) Program] 的一个重要研究内容, 就是发展以传感器网络智能层为基础的直升机疲劳裂纹监测方法, 以内置传感器网络智能层为基础的结构健康监测系统可用于对纤维缠绕复合材料压力容器—空间飞行器储箱的完整性进行监测。在美国航空航天局马歇尔航天飞行中心成功制备了含有嵌入式智能层的纤维缠绕复合材料储箱样品。在记录了传感器网络中的每一驱动器—传感器路径的基线数据后, 在复合材料储箱中引入冲击损伤, 然后观察由损伤引起的传感器信号改变。通过处理所有驱动器—传感器路径信号的改变, 可以获得表示损伤位置和大小损伤图像。

我国国家自然科学基金委员会最早于 1991 年将智能材料与结构技术列为国家高新技术研究发展计划纲要的新概念构想探索课题, 1996 年又将其列入重点课题。从那时起, 我国的一些高等院校就紧紧跟随国际先进水平的步伐, 至今已开展了 20 余年的智能材料与结构技术的研究。例如, 南京航空航天大学早在 1991 年就成立了智能材料与结构研究所, 集中从事智能材料与结构的研究, 研究内容涉及压电传感技术、光纤传感技术、无线传感器网络和系统集成等方面, 并在无人机典型结构和复合材料结构典型构件上进行了验证, 建立了基于多主体协作管理的用于大型铝板结构的三种典型对象监测验证系统, 先后取得了一批在国内外有影响的学术成果。1991 年原中国航空工业集团有限公司还投资 1200 万元建设了智能材料与结构航空科技部级重点实验室。此外, 哈尔滨工业大学在应用光纤传感器监测复合材料的固化等方面进行了大量的研究。重庆大学侧重于基于分布式光纤传感器系统的智能材料与结构的研究。北京航空航天大学也进行了一些智能材料制备及性能表征方面的研究, 并在“863 项目”资助下, 开展了对飞机结构损伤进行在线监测的新机理和新技术研究。

2. 在土木工程领域的研究与应用

目前结构健康监测技术在土木工程领域的应用早已是一个研究的热点, 应用的对象包括

桥梁、水坝、高层建筑、公路等。美国 20 世纪 80 年代中后期就开始在多座桥梁上布设监测传感器, 监测环境荷载、结构振动和局部应力状态, 用以验证设计假定、监视施工质量和实时评定服役安全状态。美国仅 1995 年, 就投资 1.44 亿美元, 在 90 座大坝上配备了安全监测设备。

在舰艇和海上钻井平台方面, 美国海军研究了一套光纤传感器系统, 用于监测美国海军舰艇推进系统中装配的水润滑轴承的疲劳裂纹及船体的结构应变。英国实施了海上平台智能结构系统的研究计划, 针对航海目标, 研究以全光纤传感器为核心的复合材料海上平台系统, 以探索在恶劣的海洋环境下海上平台的健康监测试验等综合技术; 英国石油机构声称, 由于采用结构健康监测系统, 他们的海上石油平台得到了很好的经济效益, 平均每一个海上石油平台可以节省 5000 万英镑左右。

日本的明石海峡大桥 (Akashi-Kaikyo bridge) 为主跨 1991m 的 3 跨双铰悬索桥, 于 1998 年 4 月 5 日通车, 是本土—四国联络线桥。该桥抗震设计要求可以抵抗距震中 150km 的里氏 8.5 级地震, 抗风设计的设计风速在桥面处为 60m/s。明石海峡大桥的建造采用了最新的抗风、抗震设计法, 所以不仅必须检验设计时的假定, 而且还要检验结构在强风和强震中的一些相关参数。另外还需要监控其基本结构特性, 即在正常状态中温度和其他条件发生变化时桥梁的行为。为调查这些项目, 安装了一套监控系统。在观测中, 采用 GPS 来监测梁和塔的变形。

在国内, 近几年结构健康监测系统的应用逐渐增多, 武汉理工大学、同济大学、东南大学及大连理工大学都开展了不少结构健康监测方面的研究, 尤其是针对桥梁结构。我国在许多大型土木工程中也采用了结构健康监测系统, 例如香港青马大桥安装了 500 个加速度传感器、粘贴了大量的应变片和一套 GPS, 用以长期监测桥梁的服役安全性。内地也有不少桥梁安装了结构健康监测系统, 如江苏的苏通大桥、江阴大桥等。此外, 哈尔滨工业大学在“863 项目”的资助下, 对海洋钻井平台的结构健康监测系统进行了系统研究。但由于结构健康监测系统集成技术复杂, 成本昂贵, 我国的结构健康监测系统多应用于大跨桥梁。

滨州黄河公路大桥是目前黄河上唯一的 3 塔斜拉桥, 也是目前全国第 3 大 3 塔斜拉桥。该桥结构健康监测系统集成核心软件为美国 NI 公司的 LabVIEW 开发平台, 主要用于进行传感器信号的采集, 并将所有信息输入数据库中; 同时通过阈值触发调用 MATLAB 进行数据处理和分析, 调用 ANSYS 进行结构分析; 采用大型网络数据库系统 SQL Server 2000 作为系统的核心数据库; 桥梁结构损伤识别采用应变模态法; 结构安全评定采用整体安全评定与局部构件安全评定相结合, 现场实时安全评定与远程专家安全评定相结合的方法。传感器系统包括: 风荷载采用超声风速仪和涡轮式风速仪测试, 分别安装在中塔顶部和桥面上; 温度采用光纤光栅温度传感器, 测试精度为 $\pm 0.1^{\circ}\text{C}$; 应变采用光纤光栅应变传感器, 其测试精度为 $\pm 2\mu\epsilon$; 根据桥梁结构的自振频率, 分别选用了力平衡式和压电式加速度传感器; 位移采用 JAVAD 公司的 GB-1000 双频 GPS 测试, 在该桥上共安装了 4 套 GPS, 分别设置在中塔顶部、合龙段的上下游和岸边。该结构健康监测系统在成桥试验阶段开始运行, 成桥试验中利用此系统记录了山东滨州黄河公路大桥在试验工况下的受力状态, 验证了该系统的性能。

另外, 李爱群等开发了一套用于润扬大桥的健康监测系统, 在有限元分析的基础上, 应用遗传算法进行了润扬大桥结构健康监测系统振动和应变传感器优化布置的理论分析。芜湖长江大桥也安装了长期的健康监测系统, 实现了对表征大桥健康及行车安全状况的多种物理

量的长期在线监测。

3. 在特种设备领域的研究与应用

(1) 压力容器健康监测

1995年,美国洛马航空公司的 Lisa 等人验证了 EFPI (Extrinsic Fabry-Ferot 干涉仪) 能够应用于低温储箱的监测,在 $-210\sim 370^{\circ}\text{C}$ (可重复使用储箱工作的范围在此之内) 的温度范围内它能够正常工作。由于弯曲对 EFPI 传感器的精度有影响,故不能粘贴或埋入到封头处的曲面部位,这限制了 EFPI 传感器在储箱上的使用。哈尔滨工业大学的张晓晶等探索了裸 FBG (Fiber Bragg Grating, 光纤布拉格光栅) 传感器在 $-150\sim 550^{\circ}\text{C}$ 范围内的温度灵敏特性,通过试验证实了 FBG 传感器只在有限区域内波长变化和温度是线性关系,而在整个试验温度范围内却是非线性的。研究发现 FBG 传感器能够在低温下使用,并分段给出了 FBG 传感器的温度灵敏系数。这项作为 FBG 传感器在低温储箱上的使用打下了基础。日本东京大学的 Takeda 等在液氮储箱表面粘贴了 FBG 传感器,证实了传感器能够在液氮的温度下正常使用。这项研究通过向储箱中打入液氮来增加压力,为 FBG 传感器在低温储箱上的应用做了一次实际验证。

最先开展这项工作的美国洛马航空公司的研究人员把 EFPI 传感器埋入到缩比的低温储箱中,证实了埋入传感器是可行的,并把电阻应变片粘贴在缩比件的表面。试验表明,EFPI 传感器和电阻应变片的测量结果有极好的一致性。日本东京大学的 Takeda 等人将 FBG 传感器粘贴在液氮储箱表面,并与应变片的测量结果进行了对比,虽然储箱在增压和减压的过程中,测量的应变没有重合为一条线,但 FBG 传感器和应变片的测量结果符合得很好。韩国科学技术院的研究人员在储箱的桶身和封头处粘贴了大量的 FBG 传感器和应变片进行比较,两者的测量结果相符合,两种传感器测量到的应变略有差别,是由于两种传感器粘贴的位置不完全重合造成的。马歇尔宇航中心的 Grant 等将 FBG 传感器埋入到复合材料压力容器中,验证了 FBG 传感器在增压过程中的存活能力,容器内压力与 FBG 传感器测量到的应变成正比。比利时根特大学的 Wale 等人把 FBG 传感器埋入到复合材料压力容器中,跟踪载荷循环变化,监测容器变形情况,得到了较好的结果。Wale 等人还把埋入 FBG 传感器的监测结果和应变片、声发射的监测结果做了深入的比较,FBG 传感器的监测结果与两者符合得很好。

德国物理学会的研究人员将钽金属用环氧胶粘贴在光栅段,制作成微弯梁氢传感器,经过测试,氢气的密度与光栅的波长成正比。上海交通大学和哈尔滨工业大学合作利用微机电系统 (Micro Electro Mechanical System, MEMS) 加工工艺在光栅处溅射上金属钽薄膜,钽金属吸收氢气后膨胀,将变形传递给光栅,从而制作成氢传感器,来探测氢储箱是否泄漏。试验结果表明,氢气浓度与光栅波长有线性关系。FBG 和钽金属结合制作成氢传感器的原理都是相同的,不同的是制作方法。合理选择方法,制作出高精度、低成本的氢传感器是研究的目标。

(2) 压力管道健康监测

Martin 等人在实验室条件下对全尺寸海底管道立管试件处安装 FBG 光纤光栅传感器,通过试验机对试件加载,对轴力和弯矩的应变状况进行监测,试验数据证明 FBG 传感器在立管监测中具有良好的传感性能。

Ren Liang、Li Hong-Na 等人,将 1.2mm 直径不锈钢管封装的 FBG 传感器安装在海底管

道模型上,采用万能试验机对管道加载,标定了FBG传感器,并将该传感器应用在管道的振动试验上。室内试验证明,FBG传感器与电阻应变片线性关系良好。

Borbon 等人对准分布式多点FBG光纤光栅传感器在海底管道泄漏检测的应用做了初步探索。通过不同的波长区分各点的应变值,并通过试验对传感器的性能进行标定,试验证明该传感器有工程应用的价值。但该方法受光栅数量限制,有效传感长度较短,尚无法用于实际海底管道的监测。

Zingaretti、Prmi 等人提出了光纤水下成像技术,来连续监测管道的运行状况,通过后续软件过滤、提取并分析管道的等高线,跟踪比较管道的路由,以此来监测管道的安全状况。该成像技术需放置于船舶上,监测速度每小时1海里^①,但该技术无法对海底管道进行实时监测,且受恶劣天气和海况制约,监测成本较大。

(3) 储罐健康监测

在20世纪90年代前,国外光纤传感技术对大型储罐的监测处于起步阶段,随着光纤传感技术的不断发展,其已经在储罐的监测领域上有进一步的发展,Alessandra Tesei 和 Piero Guerrini、Mario Zampolli 等人提出了频散测量法测量储罐中的参数。Ines Latka、Kyung-Rak 和 Sohn、Joon-Hwanshim 等人提出了用嵌入悬臂 Bragg 光纤光栅传感器系统对液位进行监测。Li, W.和 Jiang, D 等人认为光纤传感器液位测量是一个编码单元,可以将油位的改变转化为一连串的光纤编码,当液位依旧如此,这个单元处于静止状态,当油位或上或下时该系统会在外力的驱使下达到新的平衡状态,光纤编码器会同时随着鼓型浮标而旋转。Tadahito Mizutani 和 Nobuo Takeda 等人还提出了用光纤传感技术去监测储罐的压力和储罐的应变等。

国内由于具体国情,长期以来对罐区的管理工作主要是依靠人工进行,没有形成真正意义上的“监控系统”,国内的检测仪表和控制设备也大大落后于国际知名品牌。改革开放以后,我国工业生产发展迅速,通过对国外先进技术的消化和吸收,我国安全仪表、监测系统、报警及连锁控制系统等得到了提升并在我国自行设计的石化生产设备中获得应用。中国地质大学的李宝健通过光纤传感技术的监测方法和计算机辅助管理技术,对石油储罐区油罐超高液位、温度和压力等参数进行了监测;武汉理工大学姜德生教授等人以实验的方法做了光纤对储罐中参数监测的研究,将光纤传感技术引入油田联合站,解决原油储罐液位检测和报警、储罐负压检测和报警、原油流量检测和信号远传、三相分离器油、水液位检测与信号远传,采用分布式控制技术和网络技术组成先进的生产过程控制系统和安全监控系统,但从整体上看,无论监测传感器还是数据处理、计算机系统开发应用,都与发达国家有一定的距离,大中型控制系统仍采用欧美控制系统较多。

(4) 起重机健康监测

由于大型起重装备金属结构的失效往往导致重大经济损失、造成严重的社会影响。国外有关专家首先开始了针对起重装备等工程机械的健康监测研究:Hale 首先开展了起重机金属结构疲劳裂纹监测的研究工作;Lee 等人研究了由循环载荷引起的低碳钢板疲劳裂纹扩展的监测问题,通过试验证明了通过检测裂纹附近的刚度变化能够可靠监测钢结构疲劳裂纹的扩展;Ichinose 等人也通过与 Lee 类似的方法研究了由循环载荷引起的钢结构破坏的应力监测问题。日本安川公司开发的起重机监控系统(Crane Monitoring System, CMS),通过智能传

① 1海里=1852m。

感技术实时采集生产现场相关数据,然后通过无线通信技术远程监控集装箱装卸设备,实现远程故障诊断;日本住友公司研发的起重机监控系统,能够实时监测起重机的金属结构应力,并通过超高速交换路由技术实现全球其自有品牌机械产品的实时在线健康监测。马来西亚 Johor 港口基于无线技术开发了一套复杂的健康监测系统,它能使装卸机械、集装箱、船舶与监控中心进行实时数据交换,并能利用专用软件实现对港口作业的统一调度,实现了港口作业的自动化。

随着健康监测技术在土木工程领域的成功应用,国内也有高校、科研院所开展了对大型工程机械结构健康监测的理论和技术研究,东南大学、清华大学等高校已将健康监测系统初步应用于大型机械的健康监测及故障诊断。武汉理工大学针对港口岸桥结构,建立了基于改进 BP 神经网络的结构应力诊断专家系统,并开发了基于 GPRS 无线网络的在线监测系统。东南大学研究了机械设备工况监视与故障诊断系统,通过布置振动传感器、压力传感器等来实时采集机组运行数据,具备报警功能,并在故障诊断系统中加入相关算法分析,可以给出针对具体故障的一般应对方案。上海交通大学开发了基于移动通信技术的港口起重机远程监控系统 NetsCAD,该系统的监控采用 GE9030 系列 PLC,通过无线通信技术实现现场起重设备和监控中心的连接,通过 TCP/IP 实现监测数据的无线传输,系统可对码头的任一设备进行在线监测,并具有远程故障诊断功能。另外,天津港港口的门式起重机上也安装了健康监测系统,用于生产经营管理监督,此系统可实现对吊装质量等参数的实时监测,并可以通过无线通信技术将监测数据传输至局域网,实现起重机运行状况的远程动态监测。华中科技大学土木工程与力学学院也开展了智能结构在起重机金属结构健康监测中应用的研究。我国的健康监测系统可以完成采集待测结构状态参数这一基本功能,但在如何有效分析、评估结构的健康状况方面(如结构累积损伤分析、剩余寿命评估、智能诊断等)仅处于探索阶段,这方面工作的实质性进展还有待于损伤识别理论的发展、新型损伤参考指标的发现以及对特定待测结构特性的更深入认识。

1.3 起重装备健康监测体系构建

起重装备健康监测硬件系统包括信号传感模块、数据采集模块、通信模块、数据发送模块。

1) 信号传感模块采用声、光、电、磁、热等原理制成的传感器来感知起重装备结构、机构、液压、电气控制等系统的失效特征参数信息,根据多点式监测的思路进行传感器布设,各传感器之间通过通信模块和总线相连接,一条总线可连接多个传感器节点。每个传感器节点都集成了一个数据发送器和接收器,可以完成数据的收发工作,实现组建多点式监测系统各监测节点之间的通信功能。

2) 数据采集模块负责对传感器感知到的失效特征信号进行放大以及模-数转换等处理,再将转换后的数字信号传递至数据发送模块。

3) 通信模块负责将各种类型的失效特征信号通过通信模块传送至下位机。

4) 数据发送模块的功能是将数字信号通过无线网络发送给远程无线服务器,实现监测数据的实时、远程传输。

起重机的监测客户端通过访问无线服务器即可获取监测信息,可以实现多个监测客户端