

面向复杂装备全生命周期的 健康管理技术

——以全断面掘进机为例

MIANXIANG FUZA ZHUANGBEI QUANSHENGMING ZHOUQI DE
JIANKANG GUANLI JISHU
YI QUANDUANMIAN JUEJINJI WEILI

张天瑞 著

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

面向复杂装备全生命周期的 健康管理技术

——以全断面掘进机为例

张天瑞 著

MIANXIANG FUZA ZHUANGBEI QUANSHENGMING ZHOUQI DE
JIANKANG GUANLI JISHU
YI QUANDUANMIAN JUEJINJI WEILI

中国财经出版传媒集团



经济科学出版社
Economic Science Press

图书在版编目 (CIP) 数据

面向复杂装备全生命周期的健康管理技术：以全断面掘进机为例/张天瑞著. —北京：经济科学出版社，2018.5
ISBN 978 - 7 - 5141 - 9354 - 1

I. ①面… II. ①张… III. ①装备制造业 - 产品
生命周期 - 产品管理 - 研究 - 中国 IV. ①F426.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 110127 号

责任编辑：李 雪

责任校对：徐领柱

责任印制：邱 天

面向复杂装备全生命周期的健康管理技术

——以全断面掘进机为例

张天瑞 著

经济科学出版社出版、发行 新华书店经销

社址：北京市海淀区阜成路甲 28 号 邮编：100142

总编部电话：010 - 88191217 发行部电话：010 - 88191522

网址：www. esp. com. cn

电子邮件：esp@ esp. com. cn

天猫网店：经济科学出版社旗舰店

网址：http://jjkxcbs. tmall. com

固安华明印业有限公司印装

710 × 1000 16 开 15.25 印张 200000 字

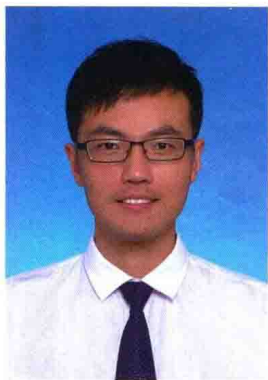
2018 年 8 月第 1 版 2018 年 8 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 5141 - 9354 - 1 定价：58.00 元

(图书出现印装问题，本社负责调换。电话：010 - 88191510)

(版权所有 侵权必究 举报电话：010 - 88191586)

电子邮箱：dbts@ esp. com. cn)



作者简介

张天瑞(1985-),男(汉),工学博士,沈阳大学机械工程学院工业工程系讲师,硕士生导师,沈阳大学科技园博士后工作站在站博士后。2008年6月毕业于北华航天工业学院机械工程系机械设计制造及其自动化专业,获工学学士学位。2010年7月毕业于东北大学机械工程与自动化学院机械制造及其自动化专业,获工学硕士学位。2014年7月毕业于东北大学机械工程与自动化学院机械制造及其自动化专业,获工学博士学位。先后主持教育部高等学校基本科研业务费专项资金项目、辽宁省博士科研启动基金项目、辽宁省自然科学基金指导计划项目、参与国家自然科学基金面上项目、辽宁省自然科学基金指导计划项目、沈阳市高技术产业发展计划项目等科研项目10余项。在《东北大学学报(自然科学版)》《系统仿真学报》《中国工程机械学报》《工业工程与管理》《沈阳大学学报(自然科学版)》和 *Advances in Intelligent Systems and Computing* 等重要学术期刊和学术会议上发表论文30余篇。主持及参与本科生和研究生教学改革项目4项,参与出版专著以及教材8部,讲授《工程图学》《机械设计基础》《物流与供应链管理》等本科生和研究生课程5门。

MIANNIANGTU ZA ZHUYANGBEI QUANSHENGMING ZHOUQI DE
JIANKANG GUANLI JISHU
YIQUANDUANNIAN JIJINJI WEILI

封面设计：王颖

MIANXIANG FUZA ZHUANGBEI QUANSHENGMING ZHOUQI DE
JIANKANG GUANLI JISHU
YI QUANDUANMIAN JUEJINJI WEILI

前 言

复杂装备在现代化工业和基础设施建设中发挥着重要的作用，工作过程中一旦复杂装备发生故障或者“健康”状况欠佳，必将严重影响工作效率和企业效能。因此，为了降低复杂装备发生故障产生的安全隐患的可能性、提高生产或者施工作业的可靠性、缩短装备停机时间、减少维修维护费用、提升工作效率，复杂装备的“健康”问题受到越来越多的重视。

目前，为了预防复杂装备故障发生或者防止其健康状况进一步恶化，定期维护和维修是应用最普遍的预防性管理措施。而定期维护和维修适用于已知寿命分布规律，并且的确有耗损期的装备或部件，这种方式在一定程度上预防了复杂装备发生故障，以便于安排维护和维修工作，组织备件的存储与供应，但不能充分利用复杂装备全生命周期的特征，容易产生维护不足和维修过剩等情况。研究表明，大多数装备的运行寿命与其发生故障可能性之间的相关性越来越少，传统的定期维修已不能满足对复杂装备进行精确维修的需求；更不利于对复杂装备开展绿色再制造，以延长其生命周期；也不便于将复杂装备运行过程中的问题及时反馈到产品的设计与生产环节，以更为合理地开展并行工程等相关工作。针对这些情况，基于工作状态面向产品生命周期的修护和维修开始得到研究与应用，其后勤保障规模小、效率高、预知性好等优势开始崭露头角。

复杂装备健康管理技术的演变过程是人们认识和利用自然规律过程的一个典型反映，即从对故障和异常事件的被动反应（事后维修），到主动预防（定期维修），再到事先预测（视情维修）和维修规划管理（信息化维修），其主要目的是降低使用与保障费用，提高装备系统安全性、战备完好性和任务成功性，实现预测维修和自主式保障。故障预测可预测故障发生的时间与部位，并确定设备剩余寿命，在发生灾难性事故前及时预知，并采取必要的预防维修措施；健康状态管理是根据诊断/预测信息、可用维修资源和使用需求对维修活动作出的适当决策。

复杂装备故障预测和健康管理是一种新型的维修与管理方式，通过感知并充分使用状态监测与监控信息，对装备的工作状态、可靠性、寿命和故障进行预测融合维修、使用和环境信息，结合规范的装备管理方法和业务流程，对维修活动进行科学规划和合理优化，对影响复杂装备健康状态和生命周期的技术、管理和人为因素进行全过程控制。其重要基础是装备管理、状态监测、故障预测与健康健康管理。但是，有效的装备故障预测与健康健康管理，不仅仅局限于状态监测和维修的范围，而是深入到装备的规范化、科学化和智能化管理之中，并且从传统的以“修”为主的思路转变到“‘修’‘管’结合、重视管理”的思路上来。随着科学技术的快速发展，复杂装备在功能和性能提高的同时，由于组成环节和影响因素的增加，装备“健康”问题越来越复杂，也带来了装备可靠性、安全性、可用性和经济性等方面的一系列难题。

本书前面概述部分主要说的是复杂装备，后面做具体内容介绍的部分要具体到某一装备详细说明，没办法再以复杂装备做介绍。而作为一种典型的复杂装备，全断面掘进机在我国基础设施建设、城市现代化进程等方面，尤其是高铁、城市地铁和海底隧道的建设中占据着无可替代的地位，研究全断面掘进机的健康管理技术对于提高其自身

的安全性、可靠性及有效性，降低施工成本，保障施工安全，提高我国装备制造业水平都具有重要意义。但全断面掘进机复杂的组成、结构和工作环境造成了其故障多发性的特点，传统的健康管理技术和服务方式越来越难以满足全断面掘进机诊断维护的需求。对于使用者来说，如何提高和保障全断面掘进机的工作可靠性与掘进高效性是一个亟待解决的问题；而对于其制造企业来说，全断面掘进机质量的竞争焦点集中到了设计开发阶段和售后服务阶段，为客户提供高可靠性的产品和迅速有效的健康管理服务是全断面掘进机制造企业所面临的重要问题。

基于上述动机，本书以全断面掘进机为研究对象，在探讨其故障预测与健康理论的基础上撰写而成的。重点研究复杂装备状态监测、故障预测、健康管理、健康评估和系统应用等内容，以期达到提高装备任务成功率、降低维修保障费用、缩短维修任务周期等目标，推动装备健康管理理论在复杂装备维修保障中的应用，有重要的现实意义和显著的军事、经济效益。

本书共7章。第1章在总结产品全生命周期、状态监测、故障诊断、健康管理等技术发展和国内外研究现状的基础上，分析了在复杂装备全生命周期内进行健康管理的必要性以及存在的问题等。第2章分析了健康管理服务模式的转变以及健康管理在全断面掘进机生命周期中的角色，提出了面向服务的全断面掘进机生命周期的健康管理理念。从功能结构、概念模型、总体结构、逻辑结构四个方面对面向服务的全断面掘进机生命周期健康管理系统的体系结构进行了详细设计。第3章分析了全断面掘进机状态监测与预测评估的主要方法，设计了基于虚拟仪器的全断面掘进机状态监测系统。建立了基于灰色预测和神经网络的全断面掘进机运行状态预测评估模型，通过推进系统液压油温度变化预测和主轴承轴瓦振动幅值变化预测，初步实现了全

断面掘进机关键部件运行状态的评估。第4章应用粗糙集和决策树技术建立了基于数据挖掘的全断面掘进机故障诊断模型。通过粗糙集理论选择全断面掘进机故障特征参数,经过数据预处理,由改进的C4.5算法进行决策。最后,采用Clementine技术实现了诊断模型。诊断模型的实现,为故障维护决策支持奠定了基础。第5章分析了全断面掘进机维修任务指派问题的分类、特点和性能指标分类方法,建立了基于FAHP-匈牙利混合算法的全断面掘进机故障任务指派模型,得到的结果既考虑了决策者的主观因素,又使得掘进机维修时间、维修成本和维修后循环等达到最优。第6章在理论研究的基础上,以全断面掘进机国家重点实验室的设备健康管理建设项目为依托,研究了面向服务的全断面掘进机生命周期健康管理系统的实施策略,构建了基于SOA的全断面掘进机健康管理原型系统。详细介绍了全断面掘进机健康管理系统的的设计,对部分关键功能模块进行了原型系统开发,并给出了系统运行示例,验证了上述理论研究的正确性与技术的可行性。第7章对研究内容进行了总结与展望。

本书在撰写过程中参考了大量文献资料,作者已经尽可能详细地在参考文献中列出,在此对这些专家学者们表示深深的谢意。也有可能有些资料引用了而因疏忽没有列出其资料出处,若有这类情况发生,再次表示万分歉意。

鉴于作者知识水平有限,再加上复杂装备健康管理理念不断发展变化,对它的认识和研究都还在继续深入,因此本书的叙述中难免出现谬误,真心希望读者批评指正。

著者

2018年3月

目 录

第 1 章 绪论 / 1

- 1.1 研究背景及意义 / 2
- 1.2 复杂装备全生命周期的主要研究内容 / 7
- 1.3 复杂装备健康管理研究的现状及
发展趋势 / 13
- 1.4 全断面掘进机健康管理的研究现状与
发展趋势 / 27
- 1.5 本章小结 / 37

第 2 章 面向服务的全断面掘进机健康管理 模式与体系结构研究 / 38

- 2.1 面向服务的基本理论 / 39
- 2.2 面向服务的健康管理模式研究 / 44
- 2.3 全断面掘进机健康管理模式研究 / 48
- 2.4 面向服务的全断面掘进机健康管理的
关键技术 / 56

- 2.5 面向服务的全断面掘进机健康管理
系统体系结构 / 70
- 2.6 本章小结 / 77

第3章 基于虚拟仪器的全断面掘进机状态监测与 预测评估研究 / 79

- 3.1 全断面掘进机发展对状态监测与预测评估新的需求 / 79
- 3.2 全断面掘进机状态监测与预测评估的主要对象与方法 / 83
- 3.3 基于远程虚拟仪器的全断面掘进机状态监测系统 / 96
- 3.4 全断面掘进机运行状态的预测分析 / 107
- 3.5 本章小结 / 115

第4章 基于数据挖掘的全断面掘进机故障诊断 技术研究 / 117

- 4.1 数据挖掘与故障诊断技术的理论研究 / 118
- 4.2 基于数据挖掘技术的故障诊断模型 / 125
- 4.3 基于数据挖掘的故障诊断模型实例应用 / 139
- 4.4 本章小结 / 150

第5章 全断面掘进机基于技术服务的故障任务 指派研究 / 151

- 5.1 全断面掘进机维修任务指派问题的分类和特点 / 152
- 5.2 维修任务的性能指标分类及任务指派问题建模 / 153
- 5.3 全断面掘进机故障任务排序 / 158
- 5.4 全断面掘进机故障任务的指派 / 164
- 5.5 本章小结 / 175

第6章 基于SOA的全断面掘进机健康管理系统

实现研究 / 177

- 6.1 基于SOA的全断面掘进机健康管理系统的方案设计 / 178
- 6.2 全断面掘进机健康管理系统的设计与开发 / 190
- 6.3 全断面掘进机健康管理原型系统的实现与应用 / 196
- 6.4 本章小结 / 209

第7章 结论与展望 / 211

参考文献 / 214

第 1 章

绪 论

复杂装备在现代化工业和基础设施建设中发挥着极为重要的作用，随着各种大型复杂装备性能的不断提高及系统组成的复杂性的不断增加，各种信息技术和智能技术被广泛应用其中，使复杂装备的可靠性、维护性、故障预测与诊断及维修保障等问题日渐突出。工作过程中一旦复杂装备发生故障或者健康状况欠佳，必将严重影响工作效率和企业效能。因此，为了降低复杂装备发生故障产生的安全隐患的可能性、提高生产或者施工作业的安全性、缩短装备停机时间、减少维修维护费用、提升工作效率，复杂装备的“健康”问题越来越被重视。随着装备管理部门对复杂机电装备安全性、可靠性和经济性要求的不断提高，人们迫切需要实时监控装备的工作状态并了解其可靠性状况，准确评估装备的性能，并在此基础上准确定位、诊断并预测装备潜在故障或性能退化部位，及时进行必要的维修或替换，保证复杂装备能够在预期寿命范围内完成特定功能，保障装备安全、可靠地运行。

装备制造业复杂产品是一种复杂产品系统^[1]，其研发成本高、规模大、技术含量高、用户定制、单件或小批生产的大型产品、系统或

基础设施^[2]，本书研究的全断面掘进机（tunnel boring machine, TBM）便是复杂产品系统中的复杂装备之一，如图 1-1 所示。

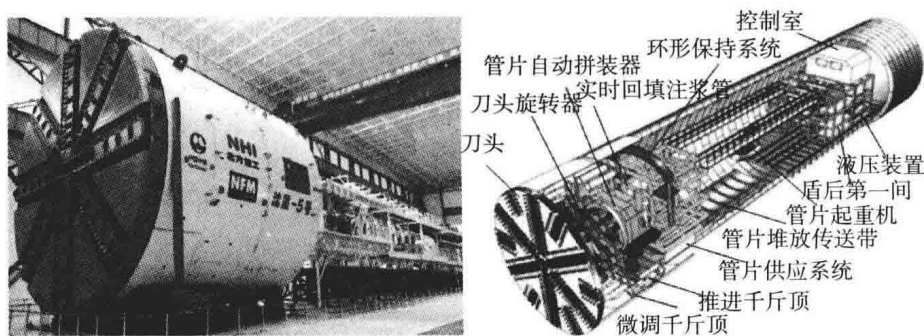


图 1-1 全断面掘进机及其结构示意图

资料来源：作者整理。

1.1 研究背景及意义

1.1.1 研究背景

作为基础设施建设中的复杂装备，全断面掘进机的构成装置和控制系统的规模和复杂性日益增加，影响系统运行的因素骤增，使其产生故障或失效的潜在可能性也在相应增加，一旦出现故障就可能引起链式反应，导致整个设备系统不能正常运行乃至瘫痪，造成巨大经济损失。因此，近年来国家在政策上也在不断加强对诸如全断面掘进机等在内的复杂装备研究的支持。

随着社会对产品增值服务的需求日益增多，产品服务系统作为一种新的制造系统模式蓬勃发展起来。2006年2月13日国务院下发了

《国务院关于加快振兴装备制造业的若干意见》，其中提到：为了满足铁路、水利工程、城市轨道交通等建设项目的需要，加快大断面岩石掘进机等大型施工机械的研制，实现设备国产化。2009年2月14日，国务院公布的《十大产业振兴规划》中明确把“装备制造业”列为十大振兴产业之一。2009年5月12日《装备制造业调整和振兴规划》正式公布，提出：在基础设施方面，发展重点是大型隧道全断面掘进机、大型履带吊和全路面起重机、架桥机、沥青混凝土搅拌和再生成套设备。同年，科技部提出了“制造即服务”的口号。其中的一个含义就是产品应当在减少资源消耗和环境影响的条件下尽可能地发挥社会效益，消费者也应建立绿色消费的理念，要有“不求所有，但求所用”的心态，这样才能提高企业制造产品的效率^[3]。

2011年3月16日，国务院发布了《中华人民共和国国民经济和社会发展的第十二个五年规划纲要》（以下简称《规划纲要》），提出要大力改造提升制造业，为了进一步贯彻落实《规划纲要》，2012年5月7日工信部印发了《高端装备制造业“十二五”发展规划》，该规划强调围绕智能制造过程中的感知、决策、执行三个关键环节，突破新型传感、高精度运动控制、故障诊断与健康维护等关键技术，推进智能制造技术、智能测控装备和智能基础制造装备在石油化工、煤炭开采、发电、环保、纺织、冶金、建材、机械加工、食品加工等典型制造领域中的示范应用。

在2016版国家重点支持的高新技术领域中，涵盖了高技术服务和先进制造与自动化等领域。其中，高技术服务中的数据服务技术主要面向行业和社会应用的基于大数据、知识库管理产品、商业智能的数据采集、分析处理与决策支持技术等内容，与本书中对全断面掘进机的数据处理过程的论述密切相关。先进制造与自动化领域中的高端装备再制造技术主要指盾构机/全断面掘进机等高端装备再制造技术，对应于本书中的全断面掘进机关键部件失效机理问题的相关研究，研

究成果可为复杂装备再制造过程提供理论和实践基础。

信息技术尤其是网络通信技术的飞速发展给现代诊断维护技术注入新的活力，基于无线通信、互联网的诊断、服务方式实现了远程监控、诊断与技术服务，为装备制造企业与客户之间协同诊断维护提供了便利，而不断融合的多学科技术也推动了现代故障诊断和技术服务系统向集成健康管理方向发展。

在以上背景的驱动下，许多学者开展了网络环境下健康管理体系与方法的研究，取得了较为丰富的研究成果，但也存在以下三个问题。第一，现有的健康管理系统注重于体系结构，缺乏与产品数据管理系统的集成，使健康管理孤立于其生命周期，不利于产品生命周期其他阶段，尤其是设计阶段的知识服务于产品的健康管理。第二，注重各种诊断方法的智能性研究，缺乏利用现有数据构建相应的决策支持系统。第三，注重诊断，缺乏服务。

因此，需要从全系统、全特性、全过程角度出发，分析全断面掘进机健康管理的知识需求及装备生命周期提供的健康管理知识源，建立一个能贯穿于全断面掘进机生命周期的知识体系，实现各阶段领域知识服务于全断面掘进机健康管理的各个环节，进而推动相关应用研究和健康管理服务系统的开发。

1.1.2 研究意义

全断面掘进机是集机、电、液、气、信息、自动化控制于一体的大型高技术成套隧道施工专用装备，是将掘进、出渣和衬砌等多个功能环节有机整合在一起的联合体，是一个国家高端装备制造业发展水平的标志性产品。我国各类全断面掘进机未来潜在市场需求量将超过200台。而此前，我国大约85%的全断面掘进机依赖进口，仅德国海