

国家自然科学基金 (71172124,71201124)

国家社科基金 (15GJ003-245) 资助

西安高新技术研究所青年基金(2015QNJJ011)

M A J O R

S T U D I E S

O F 面向知识管理的
大型装备维护支持
系统研究

E Q U I P M E N T

蒋维杨 赵嵩正 著

M A I N T E N A N C E

非
外
借



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

国家自然科学基金(71172124,71201124)
国家社科基金(15GJ003-245) 资助
西安高新技术研究所青年基金(2015QNJJ011)

M A J O R

S T U D I E S

O F

面向知识管理的
大型装备维护支持
系统研究

E Q U I P M E N T

M A I N T E N A N C E

蒋维杨 赵嵩正 著



西安交通大学出版社
XI'AN JIAOTONG UNIVERSITY PRESS

内容简介

本研究在分析装备管理和知识管理理论的基础上,以面向知识管理的大型装备维护业务信息化问题为对象,尝试解决维护知识建模、维护业务的计划控制和维护支持系统开发等现实问题。从装备维护类型划分出发,结合全生命周期管理理论,建立了大型装备维护支持系统集成框架。然后,考虑维护知识的表示和共享,建立了维护知识本体模型。以维护知识驱动维护计划制定,提出了年度维护计划的编制与优化算法,分析了维护作业的实施控制过程。同时,运用图论中节点、边表示装备、控制关系,提出了大型装备系统控制图的绘制算法及相似度计算模型。最后,设计了大型装备维护支持系统的原型系统。

图书在版编目(CIP)数据

面向知识管理的大型装备维护支持系统研究 / 蒋维杨,赵嵩正著. —西安:西安交通大学出版社, 2017. 1 (2017.9重印)

ISBN 978-7-5605-8363-1

I. ①面… II. ①蒋… ②赵… III. ①设备管理-管理系统-研究 IV. ①F273.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 066771 号

书 名 面向知识管理的大型装备维护支持系统研究
著 者 蒋维杨 赵嵩正
责任编辑 张 苗 付高明 代分红

出版发行 西安交通大学出版社
(西安市兴庆南路 10 号 邮政编码 710049)
网 址 <http://www.xjtpress.com>
电 话 (029)82668357 82667874(发行中心)
(029)82668315(总编办)
传 真 (029)82668280
印 刷 虎彩印艺股份有限公司

开 本 720mm×1000mm 1/16 印张 8.875 字数 200 千字
版次印次 2017 年 1 月第 1 版 2017 年 9 月第 2 次印刷
书 号 ISBN 978-7-5605-8363-1
定 价 45.00 元

读者购书、书店添货、如发现印装质量问题,请与本社发行中心联系、调换。

订购热线:(029)82665248 (029)82665249

投稿热线:(029)82668519

读者信箱:xjtpress@163.com

版权所有 侵权必究

| 前 言 |

在航天宇航、精密制造、工程建设和军事任务等领域，大型装备正提供着各种复杂、精密、强大的功能。由于大型装备承担任务的特殊性，通过装备维护来确保大型装备尽可能保持良好技术状态、降低故障发生，既是一种经济方面的考虑，也是出于一种安全生产和使命职责方面的权衡。大型装备的组成结构和工作机理的专业性，使得装备维护业务对于维护知识呈现出越来越强的依赖性。

然而，传统的装备维护管理信息化模型和技术难以支撑起大型装备维护业务的实际需求。在这种背景下，本研究以知识管理背景下大型装备维护业务信息化为研究对象，在分析装备管理和知识管理理论的基础上，对基于知识的大型装备维护模型、装备维护知识建模、维护知识在计划控制业务中的应用、控制系统控制图等理论与方法进行研究，并构建面向知识管理的大型装备维护管理信息系统原型，尝试建立一套从维护知识建模、方法应用到维护支持系统开发的完整技术方案。

为增强对实践工作的指导性和可读性，本书针对一系列现实问题来组织主要内容。为解决大型装备支持系统应用框架的问题，研究了大型装备维护管理模型（第2章）；为解决大型装备维护知识在部门内和部门外进行共享问题，探讨了基于本体的大型装备维护知识共享模型（第3章）；为解决维护知识向维护计划的转化和维护作业控制问题，分析了基于知识的大型装备维护计划与控制的框架、模型和算法（第4章）；为优化装备状态检测和故障检修业务，研究了装备控制图绘制和相似度计算算法（第5章）；为解决信息平台构建问题，讨论了大型装备维护支持系统的开发与部署（第6章）。

由于本书涉及学科知识领域广泛，以及作者水平之限，书中偏颇和错误之处在所难免，恳请读者不吝赐教。本书在写作过程中，受到国家自然科学基金（71172124, 71201124）、国家社科基金（15GJ003 - 245）、西安高新技术研究所青年基金（2015QNJJ011）的部分资助。在本书的写作过程中，西北工业大学梁工谦教授、同淑荣教授提出了宝贵的修改意见。与此同时，很多课题组成员也给予了热心帮助。作者谨在此向所有对本书做出贡献的人致以衷心的感谢！

CONTENTS|目录

第1章 绪论 / 1

- 1.1 研究背景 / 1
- 1.2 国内外研究现状 / 2
 - 1.2.1 大型装备维护管理集成框架相关研究 / 2
 - 1.2.2 装备维护知识共享相关研究 / 3
 - 1.2.3 装备维护业务的计划与控制研究 / 7
 - 1.2.4 装备状态监测与故障修理等相关研究 / 9
 - 1.2.5 装备维护支持系统相关研究 / 11
- 1.3 本研究拟解决的问题 / 15
- 1.4 研究框架 / 16
 - 1.4.1 研究内容 / 16
 - 1.4.2 技术路线 / 17
 - 1.4.3 组织结构 / 19
- 1.5 本章小结 / 19

第2章 大型装备维护支持系统集成框架 20

- 2.1 引言 / 20
- 2.2 大型装备的维护类型、内容与策略 / 20
 - 2.2.1 大型装备的维护类型 / 20
 - 2.2.2 大型装备的维护内容 / 23
 - 2.2.3 大型装备的维护策略 / 25

- 2.3 面向知识管理的大型装备维护管理 / 28
 - 2.3.1 数据、信息与知识 / 28
 - 2.3.2 大型装备的维护信息 / 29
 - 2.3.3 基于知识的大型装备维护模型 / 29
- 2.4 全生命周期管理背景下的大型装备维护 / 32
 - 2.4.1 大型装备全生命周期阶段的划分 / 32
 - 2.4.2 全生命周期各阶段的维护工作 / 33
 - 2.4.3 基于角色的装备全生命周期维护模型 / 34
- 2.5 面向知识管理的大型装备维护支持系统集成框架 / 36
 - 2.5.1 装备维护知识管理服务 / 36
 - 2.5.2 大型装备维护的部门间协同 / 37
 - 2.5.3 修复性维修向预防维护的转换 / 37
 - 2.5.4 维护业务应用 / 37
- 2.6 本章小结 / 38

第3章 基于本体的大型装备维护知识模型研究 / 39

- 3.1 引言 / 39
- 3.2 基于本体的大型装备维护知识表示方法 / 39
 - 3.2.1 大型装备维护知识的共享过程分析 / 39
 - 3.2.2 常见知识表示方法 / 41
 - 3.2.3 选用本体表示大型装备维护知识的必要性和先进性 / 43
 - 3.2.4 基于 BOM 的维护知识组织架构 / 45
- 3.3 大型装备维护知识的元本体 / 47
 - 3.3.1 大型装备维护知识的元本体类及属性 / 47
 - 3.3.2 大型装备维护知识的元本体模型 / 48
- 3.4 大型装备维护知识的可扩展本体 / 49
 - 3.4.1 大型装备本体的可扩展模型 / 49
 - 3.4.2 大型装备维护指南本体的可扩展模型 / 50
 - 3.4.3 大型装备运行条件本体的可扩展模型 / 52
 - 3.4.4 大型装备运维记录本体的可扩展模型 / 53
- 3.5 大型装备维护知识本体模型表述与实现的实例 / 56
 - 3.5.1 导弹武器系统维护知识研究背景 / 56

- 3.5.2 导弹武器系统维护知识本体构建 / 56
- 3.5.3 导弹武器系统维护知识本体的验证与查询 / 58
- 3.5.4 基于 OWL 的导弹武器系统维护知识语义描述 / 59

3.6 本章小结 / 61

第4章 基于知识的大型装备维护计划与控制 / 62

- 4.1 引言 / 62
- 4.2 基于知识的大型装备维护计划总体框架与业务模型 / 62
 - 4.2.1 大型装备维护计划的类型 / 62
 - 4.2.2 基于装备知识的维护计划总体框架 / 63
 - 4.2.3 基于维护知识的维护计划业务模型 / 64
- 4.3 基于定期保养知识的大型装备保养计划的编制 / 66
 - 4.3.1 大型装备定期保养知识的组成 / 66
 - 4.3.2 大型装备的定期保养类别 / 67
 - 4.3.3 保养计划的产生过程 / 68
 - 4.3.4 年度保养计划的编制与优化 / 68
 - 4.3.5 年度保养计划的编制算法 / 72
 - 4.3.6 月度保养计划的编制 / 75
- 4.4 大型装备维护计划的实施 / 77
 - 4.4.1 装备维护实施的关键管控要素 / 77
 - 4.4.2 年度计划的执行 / 78
 - 4.4.3 月度计划的执行 / 78
 - 4.4.4 基于工单的大型装备维护作业实施与控制框架 / 79
- 4.5 本章小结 / 81

第5章 基于图论的大型装备的控制图研究 / 82

- 5.1 引言 / 82
- 5.2 大型装备系统控制图的构建 / 82
 - 5.2.1 大型装备系统控制图的提出 / 82
 - 5.2.2 装备控制图的控制关系矩阵 / 84
 - 5.2.3 控制图形成算法 / 85
 - 5.2.4 控制图绘制实例 / 90

- 5.3 大型装备系统控制图的相似度 / 92
 - 5.3.1 控制图的节点集相似度 / 92
 - 5.3.2 控制图的控制边集相似度 / 93
 - 5.3.3 控制图的总体相似度 / 94
 - 5.3.4 大型装备系统控制图的单节点相似度 / 96
 - 5.3.5 大型装备系统控制图相似度分析实例 / 96
- 5.4 本章小结 / 99

第6章 大型装备维护支持原型系统的开发与实施 / 100

- 6.1 引言 / 100
- 6.2 大型装备维护支持系统的设计与实现 / 100
 - 6.2.1 信息系统开发的结构化生命周期方法 / 100
 - 6.2.2 大型装备维护的主要业务流程 / 101
 - 6.2.3 大型装备维护支持系统的功能结构 / 102
 - 6.2.4 大型装备维护支持系统的数据结构 / 104
 - 6.2.5 大型装备维护支持系统的体系结构 / 105
 - 6.2.6 系统实现 / 106
- 6.3 大型装备维护支持原型系统的系统集成 / 108
 - 6.3.1 信息系统集成方法 / 108
 - 6.3.2 大型装备的信息集成平台 / 109
 - 6.3.3 基于集成平台的装备备件信息集成 / 111
- 6.4 实施计划、数据初始化及系统测试 / 114
 - 6.4.1 大型装备维护支持系统的实施计划 / 114
 - 6.4.2 大型装备维护支持系统的数据初始化 / 115
 - 6.4.3 大型装备维护支持系统的测试 / 117
- 6.5 本章小结 / 117

第7章 结论与研究展望 / 118

- 7.1 主要工作 / 118
- 7.2 主要创新点 / 120
- 7.3 未来的工作展望 / 120

参考文献 / 122

第1章 绪论

1.1 研究背景

由于集电子、液压、精密机械、计算机和自动控制等技术于一体^[1],大型装备可以承担重要功能任务,在航空宇航、精密制造、工程建设和军事任务等领域发挥着越来越重要的影响。对于很多工业企业而言,在大型装备出现故障停机或事故后再进行维修,不仅维修成本昂贵,附带生产损失也会非常大,更有可能造成巨大的安全威胁。装备维护是装备全生命周期管理的一个重要环节^[2]。考虑到很多大型装备是具有数十年以上使用期限的耐用产品,由于其复杂工艺和昂贵价格,大型装备维护阶段在其整个生命周期中扮演着非常重要的角色。保障大型装备的安全运行、维修与大修是装备管理的主要内容,对于提高大型装备综合利用效率、减少大型装备全生命周期费用具有重要意义^[3]。

大型装备是一类昂贵的产品,其维护环节比一般产品更为重要,每个大型装备产品都会有一个定期的、不同程度的详细维护计划,特别是某些关键大型零部件,在该环节需要进行重点维护,因而通常会进行返修加工,或进行零部件更换^[4]。结构复杂的大型装备维护情况也很复杂,需要采用多种模式进行维护,如可靠性为中心维修^[5]、全员生产维护^[6]、主动维修、视情维修^[7]、事后维修和定期维修等。在开展大型装备的各类维护活动时,往往需要集成台账、备件、部件、计划、实施等多种装备信息,在实施过程中需要达到维护信息的实时上传下达,这些就要求借助于信息化技术来推进大型装备维护业务模型的升级。基于装备维护信息系统,进行维护计划的自动生成、维护作业的工单控制,对业务数据进行统计分析,可推进装备维护业务的有序管理。

大型装备维护作业离不开维护知识的支撑。随着科学技术的进步和现代工业技术的迅猛发展,现代大型装备日趋复杂化、自动化和精密化,其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^[8]。大型装备的使用维护逐渐呈现出知识化、专业化的特征。与之相对应的是,大型装备保障体系具有网络化分散与

一体化集中相结合、定期维护与机动保障相结合、维修队伍知识化与维修手段智能化相结合的特点^[9]。在大型装备维护实践中,装备设计阶段关于装备BOM、功能、性能、可维修性设计等知识难以有效传递到装备维护阶段;不同环境条件下的大型装备维护知识难以得到有效记录;维护人员的个人维修经验等隐性维护知识难以转化为显性知识以便得到最大价值地利用;相近型号装备维护知识难以交流共享等。这些问题的存在,严重影响维护知识对于大型装备维护指导作用的发挥,必然制约大型装备维护业务能力的提升,无法始终确保大型装备良好技术状态的保持。

为了满足装备维护的信息化趋势,学术界对大型装备维护支持系统进行了一定的研究,从各个侧面提出来一些有价值的理论,工业界也针对特定行业推出了一些软件系统。然而,对于大型装备维护中如何发挥维护知识的作用,如何借助信息化手段来推进知识管理背景下的大型装备维护业务,无论从学术界还是从工业界暂时都难以找到理想的解决方案。鉴于此,本研究选择“面向知识管理的大型装备维护支持系统”作为研究主题,研究知识管理背景下大型装备的维护业务信息化问题,以有效改进大型装备维护业务模式、提高大型装备维护业务效率,为大型装备发挥最大使用价值、降低全生命周期费用等目标提供有力保障。

1.2 国内外研究现状

本研究所涉及到的装备维护、全生命周期管理、以及知识管理等理论在近几十年的研究过程中,产生了丰富的理论研究成果,这为本研究提供了坚实的理论基础和广泛的参考平台。

1.2.1 大型装备维护管理集成框架相关研究

维护业务的开展需要一个清晰的从总体上对相关业务进行指导的层次定义清晰、逻辑严密的管理模型,国内外很多学者已经各个侧面对大型装备维护管理的集成框架进行了研究。

刘化深等^[9]研究了大型装备维护、修理与运行服务链信息化框架模型,提出了大型装备保障的维护、修理与运行服务链模式及其信息化维度,该研究的重要价值在于为大型装备生命周期内各种信息集成提供了参考。

Zhang 等^[65]开发了一个建筑机械工业产品服务系统的集成知识管理和重用的框架,目的是在新产品设计时对过去知识进行重用。该研究分析了大型装备全生命周期各阶段对应的知识输出和知识重用,提出了一个包含应用层、任务处理层、知识表示层和分享层等四层的设计知识管理和重用框架。该研究较

好地处理了装备相关知识输出和重用,但装备维护不是其主要研究主题,因此,维护知识对于维护业务的支持方面需要进一步研究。

Zhu 等^[102]建立了基于制造商、客户和服务供应商三者利益协调的产品服务系统框架,其工作的主要贡献在于可以更好集成产品开发过程与维护和服务过程,帮助制造商扩展从飞行器的使用到报废整个周期内所承担的责任。

程曜安等^[133]分析了支持大型装备持续改进的维护、维修和大修业务需求,提出了一个维护、维修和大修支持系统总体框架,该研究为达到大型设备的全生命周期信息综合利用和精益维修的目标提供了技术支持。

莫欣农^[132]从装备维护对制造服务支持的角度,研究了装备生命周期各阶段装备制造商、装备使用企业如何协同维护装备以实现效益最大化。

Lee^[140]从全生命周期管理理论出发,基于网络的智能技术,提出了一个产品的制造和回收的集成制造框架,该研究的目的是通过对产品在实际使用中的性能跟踪来提高售后服务对于产品性能的理解,以不断提高产品可靠性。

Meier 和 Krug^[141]提出一个集成开发和供应的产品服务系统解决方案。

Becker^[142]提出了一个结合服务提供商与客户概念模型,认为服务提供商和客户均是服务支持系统中价值的创造者。

Zhu^[146]从综合考虑硬件和软件的视角,提出了一个数控机床的产品服务系统框架。

为了提供高附加值的产品维护服务可以有效降低产品使用者的成本,降低油耗量和碳排放量等实现可持续发展,Aurich^[154]提出了一种生命周期导向的产品服务系统概念和框架。

综上所述,制造企业需要管理的产品范围,已经从设计和生产延伸至维护、修理和报废话题。换言之,产品生命周期管理作为一种制造模式需要相应地延伸至相应范围,以管理产品生命周期内所有信息^[60]。因此,可以看出上述研究成果可为大型装备生命周期和维护知识管理模型的建立提供重要参考。然而,大部分研究是基于生命周期中设计和制造商的视角,较少基于维护部门的视角。同时,上述主要研究仍以信息管理为导向,对于装备维护管理中知识应用理论需要展开进一步研究。

1.2.2 装备维护知识共享相关研究

欧盟第六框架中提出基于敏捷嵌入式系统的产品全生命周期管理和信息追踪系统(PROMISE)项目,该项目明确提出要把全生命周期中早期、中期和晚期三个阶段系统完整地、全面地整合在一起,整合的核心技术之一就是知识管理。即把产品的全生命周期的数据和信息转化成知识。

1. 装备设计知识的重用

设计开发阶段是产品生命周期中知识最集中的阶段之一,因此,在设计阶段的设计知识重用问题一直是研究的热点。为了帮助设计人员更好地做出设计决策,Vareilles 等^[61]将基于约束满足问题的常识和基于案例推理的情景知识进行联合,运用于设计领域。Vezzetti 等^[62]开发了一种消费品领域的支持知识重用的产品生命周期管理方法,结合质量功能展开和 TRIZ(发明家式的解决任务理论)理论对产品设计阶段的知识重用问题进行了研究。Mahdjoub 等^[63]将基于多代理的知识工程系统与虚拟现实关联的产品全生命周期管理进行集成,以支持研发部门在开发新产品中去提取和重用工程知识。Mahl 等^[64]研究了制造业中基于规则系统的知识获取和使用方法。

综上所述,装备设计知识重用一直都是研究的热点。然而,从装备全生命周期管理的角度来看,对于装备维护的业务支持而言,更需要装备生命前期的设计知识向维护知识的合理转换,以支持复杂的装备维护实践。

2. 维护知识对于设计知识的支持

在全球市场上,大型装备制造商已经开始将其业务从销售产品向提供基于产品的服务转移。这种商业转变需要制造商在学习产品设计知识的同时去学习产品使用和维护阶段的知识。设计部门需要获取相似装备的全生命周期知识,例如制造知识、销售市场知识、使用维护知识、再制造和回收利用知识等等。然而,由于企业规模很大,以及地理上分布式运营,使得设计部门经常不能有效和高效地获得所需的生命周期知识。对于大型企业而言,获取产品全生命周期的知识是非常困难的。因为执行产品服务活动涉及到许多不同部门。比如,服务工程师拥有更多关于客户需求方面的知识,然而,在传统的设计情景下,服务工程师是没有必要与设计人员去分享客户需求方面知识的。这就意味着只有有限的知识能被反馈回设计人员。从客户的角度,不仅仅是维护知识的积累,而应该借助于产品维护实践更明确地提出功能升级需求,以协助实现产品被更合理地设计和制造^[65]。为了更好地定义新产品,零部件故障和组件性能需求可以通过维护人员传递给设计人员^[66]。

关于客户需求和消费经验的知识和反馈已经成为企业的重要信息和资产,Liao 等^[67]研究了新产品开发和营销的需求链知识挖掘问题。Wongd 等^[68]研究了从维护阶段向工程设计阶段的知识转移问题,提出了一个航空发动机制造企业的基于知识的文档存储库,帮助设计工程师获取维护中的问题。

综上所述,从装备维护实践中提炼知识并向设计部门反馈的思路已催生了相关研究。这些研究主要围绕客户对于装备需求知识和装备设计改进知识如何有效从装备维护部门向设计部门反馈。然而,如何加强维护实践中知识与生

命周期阶段设计制造知识的共享,是值得注意的问题。

3. 装备维护知识的生成、表示、共享

维护知识是结构化的技术、经验以及信息,也包括专家的见解,其核心价值是能够提高维护决策的科学性和实时性。基于维护知识在维护决策中的重要性,维护知识管理一直是维护领域的重要研究内容。对维护领域中的结构、半结构化的信息以及知识进行结构化的有效表示,以促进知识的共享与重用,是维护知识管理的一个关键环节。当前装备维护知识管理相关研究主要集中在装备维护知识生成、表示、推理、知识库的构建、本体研究等方面。

针对复杂装备系统早期使用维护中由于诊断知识匮乏导致故障诊断效果不理想的问题,张登峰等^[69]提出利用设计阶段知识生成诊断维护知识的理念。黄考利等^[70]提出了一种基于仿真技术的故障知识获取方式,仿真数据经过分析、变换,转化为知识,从而实现知识获取。Azadeh 等^[71]研究了如何基于关键故障模式的液压和机械操作参数的交互式影响,进行知识获取和语法规则提取。

维护知识管理是设备维护领域的重要研究内容,其中如何对维护知识进行有效表示与检索是维护知识管理的一个关键环节。借鉴知识管理领域本体研究的成果,许楚奎^[72]将本体引入到设备维护领域知识表示与检索中,深入探索了设备维护知识本体的表示方法以及基于本体的设备维护知识检索方法。Martinez - Bejar 等^[73]采用语义驱动的模糊逻辑方法,进行知识表示和推理。王道平等^[74]采用面向对象与产生式规则相结合的方法表示诊断知识,提高了故障诊断的准确性。Zhang 等^[75]提出了一个多视角建模方法,来系统管理语义网上的分布式制造知识。侯文瑞^[76]研究了采用框架与规则集成的知识表述方法表示维修知识。

装备维修知识库的构建在装备知识管理过程中也是一个不可避免的问题。胡金强等^[77]研究了装备保障知识资源库构建问题。于德介等^[78]则以 CIM 哲理为指导设计了设备集成维护与管理系统,研究了其网络体系结构、运行工作流程和集成技术特性,探讨了系统实现所需的建模、知识库构建和 Web 数据访问等关键技术。Guerra 等^[79]提出了一个制造企业知识和信息维护模型。

综上所述,国内外对于装备维护知识的生成、表示、检索、推理、存储等方面的研究,仍处于初级阶段。对于维护知识表示的方法、工具等特点和使用场合的分析相对较少。

4. 基于本体的装备维护知识管理

本体描述一个领域内的概念以及概念之间的关系^[85],利用语义相似度为信息检索提供了有力的工具^{[86][87]}。集合语义网技术,本体也被用来解决语义歧义和匹配困难^[88]。数据不一致和数据不匹配是限制数据互操作、妨碍分布式业务的平稳运行的严重问题。本体是一种可以描述领域内多个实体及实体

属性的语义模型,并且本体可以用来作为数据无缝集成和交换的工具。现有的理论无法提供一个涵盖本体预开发、开发和后发展等本体开发不同阶段的综合开发方法。因此,Rajpathak 等^[89]构建了一种分布式环境下数据集成和决策支持的通用本体开发框架,提出一个涵盖本体预开发、开发和后发展等本体开发不同阶段的综合开发方法。Garzas 等^[90]为了帮助理解和应用面向对象的设计知识,提出一个本体模型。在本体提升学习环境在广泛应用之前,本体开发和维护仍然是一个需要解决的关键难题,Gasevic 等^[91]研究了学习环境下基于分众分类法本体维护方法。Chen 等^[92]提出了基于概念特点的本体构建和维护的框架、相关技术和机制。Okabe 等^[93]研究了基于本体和规则系统的组织知识传递。Dori 等^[94]研究了本体构建中的产品生命周期工程内知识映射。

本体可以在规范化产品信息过程中扮演一个重要角色^[95]。基于本体的装备知识管理研究是目前一个比较热门的领域。胡金强等^[96]研究了基于 Protégé 的装备保障知识本体构建方法。许楚銮等^[97]根据装备维护领域知识的特点,为满足设备维护领域知识数字化表示的需求,将本体引入到该领域的知识表示中。闻敬谦等^[98]探讨了基于本体的语义相似在维修案例推理中的应用。李锋等^[99]基于本体给出识别及量化属性间映射关系的方法,引入语义相似对最近相邻算法进行了改进。Rodriguez^[100]、黄果等^[101]对基于本体概念相似度计算方法进行了改进。为了提供一个知识重用的方法,Zhu 等^[102]明确提出了一个基于本体的知识表示模型。Keyarsalan 等^[103]为了对交通灯控制知识进行重用,设计了单点交通灯智能本体系统。

综上所述,本体作为一种解决语义歧义、进行知识共享的有效途径,已经被装备维护知识表达领域相关研究做了探索性应用。然而,面向维护支持系统数据需求的维护本体建模等方面的研究仍相对较少。

5. 装备 BOM(Bill of materials)对于装备维护知识的承载

在装备设计制造阶段,制造企业通过建立产品设计制造过程各阶段的 BOM 模型,对其知识进行组织管理,确保各阶段间知识的传递、共享和重用^{[104][105]}。从设计制造阶段向使用维护阶段过渡,直至装备报废的生命终期,装备 BOM 可以承担各类知识有效载体的角色。因此,研究知识在装备维护系统中的管理,就需要考察相关 BOM 理论。

根据企业生产的特性及 BOM 在不同阶段的作用,BOM 可分为很多种类,有 DBOM,EBOM,MBOM,Generic BOM,PBOM(Planning BOM)^[106],xBOM^[107],Customized BOM,Floor BOM,Issue BOM,As-Servied BOM,As-Supported BOM 等。Hegge 和 Worlmann 在 1992 年提出了通用 BOM 表(generic bill of material,GBOM)的概念^[108,109]。通用 BOM 表是顾客商业性质订单转化为企业技术性生

产计划的桥梁^[110],是用来描述一类具有相同市场定位和需求、相似产品结构和零配件以及相似功能的产品族的树状通用数据结构 GBOM^{[111][112][113]}。当前对 GBOM 的研究主要集中在设计 BOM (DBOM) 中的多样性管理。为了更好的管理客户订单并提升车间的运作效率,Yeh^[114]提出在集成 BOM 和行程结构中扩充客户订单内容的工件模型,并且该扩展模型允许在一个工件的加工过程中具有多个公共行程。这种扩展了的工件模型概念在生产应用管理系统中具有一定的参考价值。在产品整个生命周期中,不同部门有不同形式的 BOM 文件^[115]。这种传统的 BOM 分类、设计、制作、使用方式将会引起设计与制造、采购等材料清单不一致,造成各类维护知识表示、传递、存储、共享问题^{[116][117]}。为满足 BOM 的一致性、完整性和数据集成性的需求,并能实现基于 BOM 的产品知识管理,需要研究基于单一数据源^[118]的产品 BOM 知识语义视图映射技术。郭钢等^[119]从多视图的实现角度出发,提出本体和从体的概念,指出 BOM 的多视图是不同的部门和用户对本体和从体的选择和定义,也就是 BOM 的多视图概念,并进一步分析了 BOM 本体和从体的组成,及各部分的实现方法和步骤。

吕吉峰等^[120]提出了 BOM 驱动的维修需求及计划管理框架。Chang 等^[121]提出三层 M_BOM 规划方法来解决 E_BOM 和 M_BOM 不一致的问题。Hsieh 等^[122]提出以 BOM 为导向、以类为基础的自动化库存指派方法,使用 BOM 作为生产系统的主要架构,可有效地整合生产系统的制造资源。

胡浩等^[123]以维修状态 BOM 为设备维修状态看板与管理工具,基于维修状态 BOM 中每个维修状态项的维修状态演化表记录设备维修状态,从而实现了设备维修历史的系统性记录与管理。

综上所述,BOM 作为制造业的核心概念之一,在装备设计制造阶段一直吸引了较多学者的注意。然而,在装备维护阶段,如何发挥 BOM 对于维护业务的支撑作用,尤其是如何利用 BOM 来组织维护知识,需要开展进一步的研究。

1.2.3 装备维护业务的计划与控制研究

装备维护工作从总体上可以笼统划分为预防维护和改善维修^[10]。预防维护强调在装备故障发生之前采取措施,尽量避免或减少故障。根据维护周期的特点,预防维护又可以分为定周期的定期维护和基于状态的维护。改善维修则强调装备故障的抢修和修复,为事后处理措施。

定期维护是一种基于“硬时间”的预防维护方式,一般为有计划地重复进行。编制一个维护计划意味着必须了解维护需要执行的任务、周期以及需要完成的任务的作业细节。因此,需要计划每天(或者周)所有工单的确切执行顺

序。这需要协调大量约束条件。Hwang^[11]等研究了机器停机情况下维护调度问题。Schmidt等^[12]研究了可用性约束下的维护调度问题。Hwang等^[13]研究了最长维护时间情形下的机器可用性。Angel - Bello等^[14]借助于启发式算法研究了跨越一个维护周期的定期维护的调度问题。Palma等^[15]利用约束满足问题(CSP)理论来进行维护计划的编制和优化,并利用 Gensym 公司的 G2 工具计划了一个市政服务的周维护任务。Sergaki等^[16]研究了基于模糊知识的电力系统维护计划问题。徐慧^[17]研究了多动态不确定环境下流程制造企业装备动态维修计划制定方法。Kareem等^[18]提出了一种基于装备部位检测的预先维护计划模型。对于每台设备维护方式的选择,需要基于其对于保证生产连续进行的重要程度,Gómez de León等^[19]对工业生产线中关键设备的重要度定量评价进而决定维护策略的问题进行了研究。Papakostas^[20]为航线运营商提供了一个航线维护活动的短期计划优化方法,用以分析推迟维护活动对飞机调度的影响。Chan等^[21]开发了一个飞机发动机公司维护部门的计划系统。Fornasiero等^[22]以减少非正常停车和车队整体剩余生命周期费用最小化为目标,将每辆卡车按部件进行维修费用核算,自动编制车队停车维护计划。

很长时间以来,制造业内外一直存在关于预防维护优化问题的争论,主要焦点在于维护优化应考虑哪些因素。Oke等^[23]开发了一个考虑各种维护变量的概念模型,利用目标规划来优化预防维护。维护优化模型需要了解底层故障分布^[24]。很多维护优化模型非常关注费用问题,通过对定期维护间隔和故障修理的费用的建模^[25,26,27],来进行总维护成本优化。在保障装备可用性的情况下,优化定期维护间隔或优化维护措施。Vintr等^[28]基于运营数据的全生命周期费用视角,对预防维护进行了优化。Krstic等^[29]从最大可用性和最小维护成本出发,应用多目标优化方法,提出了机动车离合器的预防维护优化策略。Vatn等^[30]引入安全因素,在考虑不确定性的情况下,利用成本效益分析法对维护费用、生产损失、安全成本等进行分析,提出了基于高安全需求的维护优化模型。张钊等^[31]建立了以电气装备整个更新维护周期内单位时间费用成本率最小化的数学维护模型。应保胜等^[32]研究了生产计划和预防性维修计划的统筹优化问题,刘永梅等^[33]建立了考虑多种约束条件的检修计划优化数学模型,张平等^[34]建立了基于维修任务分配的多目标优化模型,时昌明等^[35]提出了以根据任务的强度确定维修时机为优化目标的维修计划优化模型。

综上所述,经过几十年的发展,有关装备维护计划的制定与优化问题已产生了丰富的研究成果。这些研究主要面向降低维护费用、减少维护时间、优化维护间隔等目标。这些研究对于维护对象的剩余周期费用评估、产品生命周期中段(即使用阶段)计划与优化等问题的解决具有重要价值。然而,当面临多种

类型维护对象、多维护目标(不仅仅剩余周期费用最小)和多约束条件情形时,该维护计划编制算法还需要做进一步调整。此外,对于维护计划的实施与控制是最现实的业务需求之一,在这些研究中对于如何实施和控制维护任务等,尚未给出明确的答案。

1.2.4 装备状态监测与故障修理等相关研究

大规模系统的预防维护计划,可能在很多领域并不是十分适用,一方面是实际作业成本过高,另一方面容易造成过剩维修。因此,装备维护实践中,对于较为重要的装备往往采取基于装备状态的维修方式,对于可以容忍故障发生甚至允许停机的装备则采取故障时候修理的方式。关于装备状态监测和故障修理等方面的相关研究成果已较为丰硕。

1. 基于状态监测的装备维护

在不断地追求消减装备维护工作的数量和费用的同时,又要确保装备的安全性、可靠性和完整性不被破坏。为了解决这一矛盾,基于装备状态监测开展装备维护的维护方式成为一种可行的选择。因为这种方式可识别装备的潜在故障,并在生产中断前建议补救行动。装备状态监测的目的是达到一种可监测、诊断和损坏定位以及甚至于可预测部件或系统剩余使用寿命的能力^[36]。Rabatel 等^[37]通过对铁路监测传感器搜集的海量数据进行处理,允许适量的异常数据,对设备状态进行判别,从而发现故障隐患。Marquez^[38]等研究了铁路道叉的状态监测与故障预测问题。Kwon 等^[39]通过 Web 技术,实时监测远程机器人系统,进行视情维护。

在基于状态监测的装备维护方式中,为了识别即将发生的故障和预报部件最终失效前的剩余使用寿命,有效的诊断和预报工具对于维修工程师而言几乎是不可或缺的。有效的装备状态诊断和故障预报可使维修部门提前采取补救行动并协调好生产活动。在实际世界中,所有机器部件都会趋于劣化,并且装备的故障特征与工作条件有着密切的关系。Kim 等^[40]依据机器历史运行数据,利用支持向量机分类器作为机器劣化过程的健康状态概率估计工具,进行部件剩余使用寿命的长期预测,所提出的方法对于视情维修方式是一种重要的支撑。Bedford 等^[41]假设系统劣化状态可以通过信号反映出来,建立一个风险评估模型,来支持预防维护决策。Magro 等^[42]利用粗糙集理论,从现场设备记录的数据中提取有效信息,来预测某个部件是否会在近期发生故障,进行预防维护决策。And 等^[43]运用贝叶斯方法进行装备部位的疲劳寿命预测。Chinnam 等^[44]提出一种模糊神经方法,来评估视情维修系统中设备的平均残余生命。Celeux 等^[45]利用贝叶斯网络理论来预示一个核工厂机械系统劣化过程。