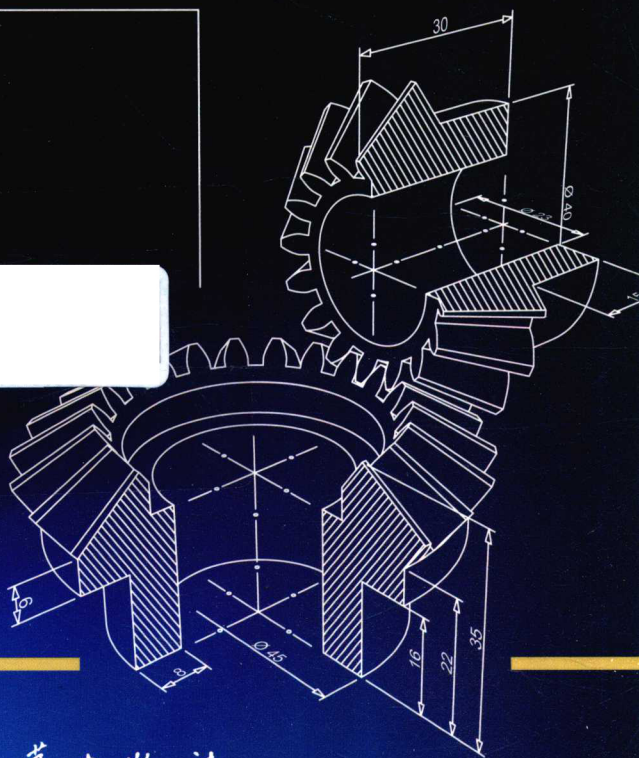


 Springer

复杂系统维修手册

Complex System
Maintenance Handbook

[英] Khairy A.H. Kobbacy D.N.Prabhakar Murthy 编著
徐庆征 赵洪钢 程志君 刘宇 王娜 译



国防工业出版社
National Defense Industry Press

复杂系统维修手册

[英] Khairy A. H. Kobbacy D. N. Prabhakar Murthy 编著
徐庆征 赵洪钢 程志君 刘宇 王娜 译



国防工业出版社

·北京·

著作权合同登记 图字:军-2016-115号

图书在版编目(CIP)数据

复杂系统维修手册 / (英) 凯里·A·H·科巴希
(Khairy A. H. Kobbacy), (澳) D·N·普拉巴卡尔·穆
尔蒂 (D. N. Prabhakar Murthy) 编著; 徐庆征等译. —
北京: 国防工业出版社, 2019. 3

书名原文: Complex System Maintenance Handbook
ISBN 978-7-118-11794-3

I. ①复… II. ①凯… ②D… ③徐… III. ①工业设
备-维修-技术手册 IV. ①TB4-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 014981 号

Translation from the English language edition:

Complex System Maintenance Handbook

by Khairy A. H. Kobbacy and D. N. Prabhakar Murthy

Copyright © 2008 Springer-Verlag London Limited

This edition has been translated and published under licence from Springer-Verlag London Limited
Springer-Verlag London Limited takes no responsibility and shall not be made liable for the
accuracy of the translation.

本书简体中文版由 Springer 授权国防工业出版社独家出版发行, 版权所有, 侵权必究。

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

天津嘉恒印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 31 字数 771 千字

2019 年 3 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 199.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 68428422

发行邮购: (010) 68414474

发行传真: (010) 68411535

发行业务: (010) 68472764

译者前言

现代信息社会广泛存在着交通、通信、金融等众多复杂系统,其规模越来越大,复杂度越来越高,对人类社会的渗透和影响日益突显。这类复杂大系统一旦发生故障,极有可能引发重大的财产损失和人员伤亡,甚至破坏人类的生存环境。因此,如何提高系统的安全性、可靠性和稳定性,降低对社会生产生活的安全风险和隐患,成为现代维修理论和实践的重大课题。近几十年来,复杂系统维修和管理经历了若干次重大变革,思想观念上从无关紧要的问题逐渐上升至企业战略的高度,技术手段上从无需维修或反应式维修起步,正在朝着自我维修或免维修方向迈进。

《复杂系统维修手册》由 31 位享有国际声誉的研究者和经验丰富的实践者共同撰写。全书共 77.1 万字,包括概述、概念和方法的演化、方法和技术、特殊问题建模、管理、应用(研究实例)共六个部分,各章针对维修的特定方面进行文献综述,或报告特定工业领域的进展和趋势,或处理某个具体案例。本书内容详实,概念清晰,理论分析严谨,工程案例丰富。本书读者群十分广泛,既包括从事维修理论研究的科研人员,也包括工程应用领域的工程技术和管理人员。此外,它还可作为机械工程、军事装备学和应用数学等专业的研究生用书。

译著由国防科技大学和电子科技大学的五位志同道合的老师合作完成。其中,徐庆征副教授翻译序言、第 1 章和第 15 章~第 20 章,约 19 万字,并负责全书的统稿和校对工作,赵洪钢副教授翻译第 2 章~第 4 章和第 10 章~第 14 章,约 27.7 万字,程志君副教授翻译第 5 章~第 9 章,约 13.8 万字,电子科技大学的刘宇教授翻译第 23 章~第 25 章,9.6 万字,王娜副教授翻译第 21 章、第 22 章和作者简历,约 7 万字,并重新绘制全书的插图和表格。本书的出版得到了国家自然科学基金(61573370、71771039)和国防科技大学科研计划项目(ZK18-03-43)的资助,国防工业出版社的张冬晔编辑提出了许多有益的建议和意见,在此一并致谢。

在本书翻译过程中,我们通过电子邮件与部分原著作者保持沟通,力求准确把握原著内涵,避免学术错误。囿于译者的水平,书中难免存在一些错译漏译以及表述不规范之处,恳请广大读者和学者批评指正。

译者

xuqingzheng@hotmail.com

2019 年 1 月于西安

序 言

现代社会依赖于众多(由人类设计和制造的)复杂系统的平稳运行,它提供了许多产品和服务。这些系统至少包括运输系统(火车、汽车、渡船、舰船和飞机)、通信系统(电视、电话和计算机网络)、公共事业网络(水、气和电力网络)、制造工厂(生产工业产品和消费耐用品)、加工工厂(提炼和处理矿物和石油)、医院(提供服务)和银行(提供金融交易服务)。

从某种意义上说,人类建造的所有系统都是不可靠的,会随着寿命和使用而逐步退化。当一个系统不能再实现已设计好的功能时,我们称该系统失效。一些故障可能是灾难性的,会导致严重的经济损失,影响人类自身,并对环境产生严重的破坏作用。典型的例子包括正在飞行的飞机爆炸、污水处理工厂故障,以及桥梁垮塌。通过维修行为(包括预防性维修、检查、状态监控、基于设计的维修),人们能够控制系统退化,降低灾难性故障的发生。通过维修或替换掉引起故障的组件,合理的维修行为能够使得失效系统重新恢复到工作状态。

维修已经从系统投入使用后的工程行为,转变为在系统设计、制造或建造过程中需要加以解决的重要问题。维修会对可靠性(技术问题)产生影响,也自然地会牵连到经济和商业问题。这就表明,复杂系统的运行要求我们从商业角度全面地考察维修行为,即以一種有效的方式使技术和商业相结合。

有关维修的文献非常庞杂。在最近五十年间,由于对故障机理的理解、监控和评估系统状态的技术、存储和处理大规模数据的计算机、建立模型以便确定最优维修策略时所需工具和技术的进步,情况已然发生了剧烈变化。

本书由享有国际声誉的活跃研究者和经验丰富的实践者共同撰写,其目的是将这些大量文献整合为多个章节,各章节聚焦维修的不同方面。每一章针对维修的某个特定方面(例如,方法论、方法、技术、管理、建模分析和优化)进行文献综述,或报告某个特定工业领域的进展和趋势,或处理某个具体案例。我们期待本书能够缩小理论和实践之间的鸿沟,激发维修领域新的研究。

本书面向的读者群十分广泛,包括工业领域的实践者(维修工程师和管理者),以及从不同角度研究维修问题的研究者。本书也可作为维修、工业工程和应用数学专业研究生的教科书。

我们感谢各章作者的通力合作,以及对我們请求的快速反馈,使得本书得以按时完成。我们特别感谢索尔福德大学的大力支持,以及2006年颁发给D. N. Prabhakar Murthy的CAMPUS Fellowship奖。我们诚挚地感谢Springer编辑Anthony Doyle和Simon Rees给予的帮助和鼓励。最后,我们还要感谢Sorina Moosdorf等协助本书出版的团队成员。

目 录

第一部分 概述

第 1 章 概述	3
1.1 引言	3
1.2 研究维修的框架	4
1.3 手册的结构	7
1.4 目标读者	13
1.5 本章缩略语	13

第二部分 概念和方法的演化

第 2 章 从演化的视角看待维修	17
2.1 引言	17
2.2 维修所处的环境	17
2.3 维修实践随时间的演变	20
2.4 维修管理者	32
2.5 结论和维修面临的新挑战	35
2.6 本章缩略语	36
2.7 参考文献	38
第 3 章 维修的新技术	39
3.1 简介	39
3.2 维修技术现状综述	40
3.3 基于 Watchdog Agent [®] 的智能维修系统	44
3.4 结论和未来研究方向	56
3.5 本章缩略语	58
3.6 参考文献	59
第 4 章 以可靠性为中心的维修	62
4.1 引言	62
4.2 以可靠性为中心的维修分析过程的主要步骤	63
4.3 通用的和本地的以可靠性为中心的维修分析	78

4.4	维修间隔周期的建模和最优化	79
4.5	结论	83
4.6	本章缩略语	83
4.7	参考文献	84

第三部分 方法和技术

第5章	视情维修建模	89
5.1	概述	89
5.2	状态监测技术	90
5.3	视情维修建模	92
5.4	条件剩余寿命预测	95
5.5	将来的研究方向	100
5.6	总结和结论	101
5.7	本章缩略语	102
5.8	参考文献	102
第6章	基于有限数据的维修	104
6.1	引言	104
6.2	贝叶斯方法的必要性	105
6.3	贝叶斯推理	106
6.4	先验分布和后验分布	107
6.5	预测分布	110
6.6	先验分布的详细叙述	111
6.7	贝叶斯决策理论	112
6.8	贝叶斯方法应用于维修的回顾	113
6.9	案例研究	115
6.10	结论	116
6.11	本章缩略语及主要符号	117
6.12	参考文献	118
第7章	可靠性预测和加速试验	119
7.1	引言	119
7.2	加速寿命试验的类型	120
7.3	加速寿命试验可靠性估计模型	121
7.4	加速寿命试验的设计	125
7.5	加速寿命试验结果与正常工作条件下维修决策的关联	128
7.6	确定正常条件下最优预防性维修策略和最优退化阈值	129
7.7	结论	133
7.8	本章缩略语	133
7.9	参考文献	134

第 8 章 复杂系统的预防性维修模型	136
8.1 引言	136
8.2 历史数据集实例	136
8.3 预防性和修复性维修的作用	138
8.4 适当模型的综述	139
8.5 广义比例强度模型(GPIM)	145
8.6 参数估计	146
8.7 模型的选择	148
8.8 预防性维修规划	150
8.9 应用	151
8.10 结论	154
8.11 本章缩略语及主要符号	154
8.12 参考文献	155
第 9 章 维修中的人工智能	157
9.1 引言	157
9.2 维修管理、规划和调度	157
9.3 人工智能技术	158
9.4 维修中的人工智能	159
9.5 复合智能维修优化系统	163
9.6 将来的发展	167
9.7 结论	168
9.8 致谢	169
9.9 本章缩略语	169
9.10 参考文献	170

第四部分 特殊问题建模

第 10 章 可修系统的维修	177
10.1 引言	177
10.2 点过程方法	178
10.3 故障竞争风险模型与预防性维修对比	185
10.4 周期测试系统	189
10.5 结论	193
10.6 本章缩略语	194
10.7 参考文献	195
第 11 章 多组件系统的最优化维修:综述	197
11.1 引言	197
11.2 构造领域	198
11.3 经济相关性	199

11.4	随机相关性	205
11.5	结构相关性	210
11.6	计划周期和最优化方法	210
11.7	趋势及开放领域	211
11.8	总结	212
11.9	本章缩略语	212
11.10	参考文献	213
第 12 章	资本设备的更换	215
12.1	引言	215
12.2	资本设备更换建模的框架	216
12.3	经济寿命模型	217
12.4	网络系统的资本设备更换	226
12.5	动态规划模型	229
12.6	未来研究方向的讨论	237
12.7	本章缩略语	237
12.8	参考文献	237
第 13 章	维修和生产:规划模型综述	240
13.1	引言	240
13.2	维修规划和最优化的综述	241
13.3	考虑生产因素时何时维修	242
13.4	特定行业领域	245
13.5	维修的生产规划	247
13.6	集成化的生产和维修规划	248
13.7	趋势和开放领域	252
13.8	结论	253
13.9	致谢	253
13.10	本章缩略语	253
13.11	参考文献	254
第 14 章	延迟时间建模	258
14.1	引言	258
14.2	延迟时间的概念	259
14.3	复杂设备的延迟时间建模	260
14.4	受单一故障模式影响的组件(单组件系统)的延迟时间模型	263
14.5	延迟时间模型的参数估计	267
14.6	延迟时间建模的发展和未来研究方向	273
14.7	结论	274
14.8	题献	274
14.9	本章缩略语	275
14.10	参考文献	275

第五部分 管理

第 15 章 维修外包	279
15.1 引言	279
15.2 客户和维修代理商视角	280
15.3 维修外包研究的框架	282
15.4 文献综述	286
15.5 游戏理论方法	288
15.6 代理理论(委托-代理问题)	289
15.7 结论和将来研究的主题	291
15.8 本章缩略语	291
15.9 参考文献	291
第 16 章 租赁设备的维修	294
16.1 引言	294
16.2 设备租赁	295
16.3 设备租赁研究的框架	296
16.4 操作租赁模式下的设备维修	299
16.5 维修政策的分析和优化	304
16.6 将来研究的主题	307
16.7 本章缩略语及主要符号	307
16.8 参考文献	308
第 17 章 计算机化的维修管理系统	310
17.1 引言	310
17.2 黑洞的证据	311
17.3 在维修中决策分析的应用	314
17.4 维修策略	314
17.5 一个工业研究实例中的决策网格	315
17.6 应答式维修中的待处理需求	321
17.7 将来的研究方向和结论	322
17.8 本章缩略语	322
17.9 参考文献	323
第 18 章 维修中的风险分析	325
18.1 引言	325
18.2 风险管理和风险分析基础	325
18.3 将风险分析用于维修活动的决策支持中	327
18.4 一个案例	330
18.5 关键问题的讨论	336
18.6 结论	339

18.7	本章缩略语	339
18.8	参考文献	340
第19章	维修性能度量系统	342
19.1	引言	342
19.2	性能度量——综述	342
19.3	维修性能度量	344
19.4	开发和执行问题	345
19.5	维修性能度量框架	347
19.6	不同工业领域的实例	351
19.7	结论	354
19.8	本章缩略语	354
19.9	参考文献	355
第20章	维修备件预测和库存管理	357
20.1	引言	357
20.2	备件分类	358
20.3	参数预测	362
20.4	非参数预测	366
20.5	性能度量	367
20.6	实验证据	371
20.7	结论	372
20.8	本章缩略语	374
20.9	参考文献	375

第六部分 应用(研究案例)

第21章	铁路行业的维修	381
21.1	引言	381
21.2	铁路维修的背景信息	381
21.3	研究案例一	382
21.4	研究案例二	389
21.5	结论	396
21.6	本章缩略语	396
21.7	参考文献	397
第22章	柴油发动机的状态监测	399
22.1	引言	399
22.2	视情维修及其在柴油发动机中的应用	399
22.3	问题背景和观察结果	403
22.4	多变量控制表和判别模型的开发	405
22.5	结论和讨论	414

22.6	致谢	414
22.7	本章缩略语及主要符号	414
22.8	参考文献	415
第 23 章	瑞典铁路管理局中维修过程的标杆分析	417
23.1	引言	417
23.2	瑞典铁路的运营	417
23.3	标杆分析:概述	418
23.4	维修的标杆分析	420
23.5	瑞典铁路部门的标杆分析	422
23.6	研究案例一:跨国境标杆分析	422
23.7	研究案例二:维修承包的内部标杆分析	424
23.8	研究案例三:欧洲铁路管理局之间的透明度	427
23.9	讨论	429
23.10	结论	429
23.11	研究展望	430
23.12	致谢	430
23.13	附录	431
23.14	本章缩略语	433
23.15	参考文献	433
第 24 章	集成化电子运营和电子维修:在北海海上资产中的应用	435
24.1	引言	435
24.2	当前对于电子维修的反思	436
24.3	海上资产维修	437
24.4	e-方法:改变技术和经济环境	439
24.5	集成化电子运营和电子维修方案在北海的开发和应用	441
24.6	北海资产运营和维修中 e-方法的关键特征	443
24.7	完全集成化和高可靠性所面临的挑战	446
24.8	结论	449
24.9	本章缩略语	450
24.10	参考文献	450
第 25 章	基于监视控制与数据采集系统(SCADA)数据的长壁开采设备的故障检测和识别	454
25.1	引言	454
25.2	长壁开采系统	454
25.3	减少设备停机时间:采用故障检测和识别的案例	457
25.4	故障检测和识别方法	459
25.5	长壁开采故障检测和识别训练集的开发	463
25.6	事件时间的判定	465
25.7	观测数据的分类	469

25.8	故障检测和识别结果	474
25.9	结论	475
25.10	本章缩略语	476
25.11	参考文献	476
作者简历		477

第一部分

概述

第1章 概述

第 1 章 概 述

Khairy A. H. Kobbacy 和 D. N. Prabhakar Murthy

1.1 引言

现代社会的有效功能依赖于许多复杂系统的平稳运行,这些系统由许多设备构成,并提供一系列的产品和服务。这些系统至少包括运输系统(火车、汽车、渡船、舰船和飞机)、通信系统(电视、电话和计算机网络)、公共事业网络(水、气和电力网络)、制造工厂(生产工业产品和消费耐用品)、加工工厂(提炼和处理矿物和石油)、医院(提供服务)和银行(提供金融交易服务)。从某种意义上说,所有的设备都是不可靠的,会随着寿命和使用而逐步退化,当它不能再交付产品和服务时,它就随之失效。当一个复杂系统失效时,其后果可能是灾难性的。它会导致严重的经济损失,影响人类自身,并对环境产生严重的破坏作用。例如,正在飞行的飞机爆炸、污水处理工厂故障,以及桥梁垮塌。

合理的修复性维修,能够使得失效系统重新恢复到工作状态。例如,维修或替换掉某些组件,它们会失效,进而引起系统故障。通过一些维修行动(包括预防性维修、检查、状态监控、基于设计的维修),人们能够控制故障的发生。良好的设计以及有效的预防性维修行动,能够降低故障及其后果的发生概率,但是不可能完全地消除故障。

在过去 100 年间,维修方法已经发生了显著变化。100 年以前,人们主要关注修复性维修,将系统交付给企业的维修部门,使得失效系统能够恢复到工作状态。由经过训练的技术人员执行维修操作,维修被视为一个技术问题,在系统设计和运行的过程中并不发挥作用。在第二次世界大战中,人们真正认识到预防性维修的重要性。预防性维修会引入额外的费用,只有当收益高于所需费用时,它才具有价值。确定最优的维修层次需要构建合理的模型,使用复杂的优化技术。同样是在这一时期,维修问题逐渐在设计阶段得到重视,由此产生了可维修性的概念。可靠性和可维修性(R&M)逐渐成为系统设计和运行中的主要问题。

退化和故障依赖于系统中不同组件的压力。这些压力依赖于操作状态,而操作状态是受商业考量支配的。因此,维修从一个纯粹的技术问题转变为一个战略管理问题,人们能够选择维修外包、租赁设备而非购买设备等。同时,技术的进步(新材料;用于监视、数据收集和分析的新传感器)也为维修增加了新的维度(科学、技术)。在 21 世纪,这些进步必将以不断增长的速度持续发展。

本书试图解决与复杂系统维修相关的若干问题。其目的是对当前研究状态给予介绍,并指出发展趋势。每一章处理维修的一个特定方面(例如,方法论、方法、技术、管理、建模分析和优化),或报告某个特定工业领域的进展和趋势,或处理某个具体案例。在本章中,我们将简单对本书进行介绍。本章的结构如下:1.2 节描述本书的框架,对于研究复杂系统维修而言,它是必须的,然后讨论了一些非常重要的问题;1.3 节给出本书的结构,并概述本书的各个章节。最后,讨论本书的目标读者群,并以此作为结论。

1.2 研究维修的框架

正确地研究维修需要一个全面的框架,它包括了所有关键要素。然而,对某个正在考虑的特定维修问题而言,并不是所有的要素都具有显著关联性。

系统工程方法是一种解决维修问题的有效方法。在该方法中,利用特征来描述与问题相关的现实世界,标识相关变量,以及这些变量间的关系。利用语言或者网络图来表示特征,在网络图中,节点代表变量,连接的边代表相互关系。该方法非常适合于定性分析。在定量分析中,人们需要建立数学模型来表示相互关系。此时,通常需要统计和动态规划,因为系统的退化和失效通常是以不确定的方式发生的。在本节中,我们讨论一些关键要素和相关问题。

我们使用“资产”一词来表示复杂系统或单独设备。除了 1.1 节所列举的那些事物以外,它还包括基础设施,例如建筑物、桥梁等。

1.2.1 利益相关方

对于一个资产而言,存在一些利益相关方,如图 1.1 所示。

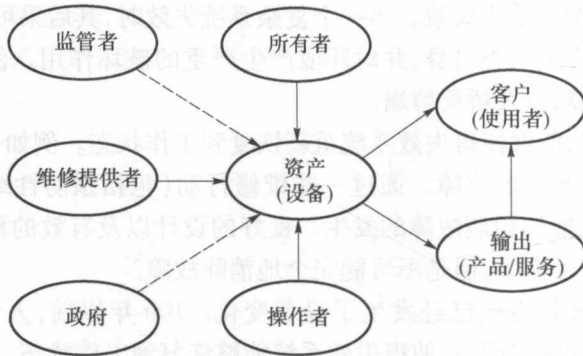


图 1.1 资产维修的利益相关方

利益相关方的数量依赖于正在考察的资产本身。例如,对于铁路网络(提供运输乘客和物资的服务)而言,客户就包括铁路操作者和公众。所有者可以是一个企业实体、金融机构或政府部门。操作者是一个代理机构,负责操作和维修轨道,确保交通顺畅。维修提供者也是一个代理机构,执行维修行为(预防性和修复性)。它可以是操作者(此时,维修行动在企业内部完成)或者某些外部代理商(如果维修工作被外包的话),或者是兼而有之(当部分维修工作被外包处理时)。监管者是一个独立机构,处理安全性和风险问题。他们规定最低安全标准,能够处罚所有者、操作者和维修提供者,以保证安全性不会受到威胁。政府在提供资金和承担一定风险方面扮演着重要角色。在该实例中,资产维修行动影响了所有涉及到的部门。如果铁路线关闭,无论是经常发生或是持续很长一段时间,这都会影响到客户的满意度和乘坐频率、操作者和所有者的收益,以及政府的成本。

1.2.2 不同角度

我们把注意力集中于一种情况,即资产属于所有者,维修工作被外包处理。在这种情况下,存在两个角色:①资产的所有者;②维修代理商(提供维修服务)。图 1.2 是维修过程的简化版系统特征,此时,维修行动通过维修服务合同加以规范。问题是如何确定维修服务合同的条款。