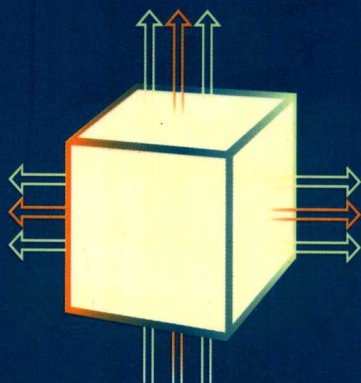


以可靠性为中心的 维修决策模型

The Decision Models
for Reliability Centered Maintenance

贾希胜 著



國防工業出版社

National Defense Industry Press

以可靠性为中心的 维修决策模型

**The Decision Models for
Reliability Centered Maintenance**

贾希胜 著

國防工業出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

以可靠性为中心的维修决策模型 / 贾希胜著. —北京:国防工业出版社, 2007. 1

ISBN 7-118-04799-6

I. 以... II. 贾... III. 武器装备-可维修性-决策模型-研究 IV. E92

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 117871 号

※

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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 850 × 1168 1/32 印张 7 $\frac{3}{8}$ 字数 186 千字

2007 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 28.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。

2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。

3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。

4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘 书 长 程洪彬

副 秘 书 长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参

杨星豪 李德毅 吴有生 何新贵

佟玉民 宋家树 张立同 张鸿元

陈冀胜 周一宇 赵凤起 侯正明

常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

前 言

以可靠性为中心的维修(RCM)是目前国际上通用的用以确定装备(或设备)预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程过程,也是我军各类复杂武器系统制订预防性维修大纲的规定方法。

RCM 应用中的一个突出问题是:大多数 RCM 决策基于分析者的经验和定性判断,决策过程缺乏模型支持。尽管 RCM 方法强调控制故障风险以降低安全性后果,增加系统可用性以提高任务能力,降低费用以增加预防维修的经济性,但在目前公开出版的 RCM 应用文献及标准资料中很少涉及有关 RCM 建模方面的内容。现有的科技文献中,可以查到大量有关预防性维修的数学模型,但这些模型并不是专门针对 RCM 决策过程而建立的,只是一些零散的实践和不成体系的研究。为了在我国推广 RCM 技术、培养 RCM 人才,迫切需要编写一部系统阐述 RCM 建模方法与技术的著作。

本书作者长期从事 RCM 研究与推广应用工作,20 世纪 90 年代初作为主要研究人员参与了我国第一部 RCM 国家军用标准的编制工作;1996 年至 2001 年在英国访问、学习期间主攻 RCM 建模研究,并以《运筹学中的维修决策模型》为题完成博士论文,取得英国索尔福德大学的博士学位;2001 年回国后,积极致力于 RCM 的推广应用工作,曾组织过多期 RCM 培训班,主讲多期博士、硕士研究生课程——“以可靠性为中心的维修”和“以可靠性为中心的维修决策模型”;在有关装备管理部门的支持下,曾成功地组织、指导过多种新研装备和现役装备的 RCM 大纲制订工作,有丰富的 RCM 推广应用经验。本书以 RCM 分析过程中对决策模

型的需求为出发点,详细介绍了各类 RCM 决策模型。全书共 7 章,第 1 章介绍了 RCM 的概念、原理、国内外的应用现状和 RCM 分析的基本过程,并指出了 RCM 应用中应注意的问题;第 2 章对 RCM 分析过程中的决策模型进行了需求分析,并对 RCM 决策模型进行了分类,提出了 RCM 建模研究的主要内容,对现有文献中的有关维修模型进行了分析综述,对于维修建模的基本知识进行了概括与总结;第 3 章至第 5 章详细介绍了不同故障后果下的定期更换模型、功能检测模型和故障检查模型,给出模型的推导过程和应用示例;第 6 章以延迟时间模型中的参数估计为主讨论了维修决策模型中的参数估计问题;第 7 章详细介绍了维修模型在某企业中的应用案例,探讨了维修决策模型的意义与应用过程。作者对本书中的所有模型都进行了举例计算与验证,力求结果无误。

本书可以作为装备(或设备)管理专业的高层次人才培养教学用书,也可以供广大工程技术人员参考。

本书得以成稿,应该感谢许多人的关心和帮助。首先应感谢军械工程学院的王宏济教授、甘茂治教授和英国索尔福德大学的克瑞斯特教授,正是在他们的启蒙和指导下,作者才有幸进入维修理论研究领域。感谢作者的同事康建设、贾云献等对本书结构的建议与修改,感谢作者的学生程中华、温亮、白永生、王丹、蒲贵权等为翻译作者的英文稿付出的劳动。感谢国防科技图书出版基金评审委员会对出版本书的大力支持和帮助。

目 录

第 1 章 以可靠性为中心的维修	1
1.1 概述	1
1.2 RCM 的原理及分析过程	5
1.2.1 RCM 的基本观点	5
1.2.2 RCM 分析中的七个基本问题	6
1.2.3 RCM 分析过程	7
1.3 故障模式与影响分析	11
1.3.1 概述	11
1.3.2 故障及其分类	14
1.3.3 功能	17
1.3.4 功能故障模式	18
1.3.5 故障原因	19
1.3.6 故障过程及影响	23
1.4 RCM 逻辑决断与分析记录	24
1.4.1 预防性维修工作类型	24
1.4.2 预防性维修工作的选择准则	30
1.4.3 RCM 决断过程	32
1.5 RCM 分析过程中应注意的几个问题	35
1.5.1 分析项目的确定	35
1.5.2 FMEA	35
1.5.3 故障特征记录	35
1.5.4 预防性维修的间隔期框架与时间单位	38
1.5.5 关于维修工作实施级别的确定	39
1.5.6 分析的组织形式与结果的可信性	39

第2章 RCM 模型需求分析与建模基本知识	40
2.1 RCM 模型需求与模型分类	40
2.1.1 引言	40
2.1.2 RCM 分析过程与建模需求	41
2.1.3 模型的分类	42
2.2 相关维修模型综述	45
2.2.1 更换模型	45
2.2.2 故障检查模型	48
2.2.3 功能检测(缺陷检测)	50
2.2.4 结论	54
2.3 RCM 建模的基础知识	54
2.3.1 可靠性的定量描述	54
2.3.2 随机变量的常用分布	57
2.3.3 更新过程	61
2.3.4 参数估计与分布拟合	63
2.3.5 Monte - Carlo 仿真	67
第3章 定时更换模型	71
3.1 概述	71
3.2 工龄更换模型	72
3.2.1 工龄更换的描述	72
3.2.2 假设和参数	73
3.2.3 无限使用期的工龄更换模型	74
3.2.4 有限使用期的工龄更换模型	81
3.2.5 模型的求解方法和案例	86
3.3 成组更换模型	90
3.3.1 成组更换的描述	90
3.3.2 假设和参数	91
3.3.3 无限使用期的成组更换模型	92
3.3.4 有限使用期的成组更换模型	96
3.4 总结和归纳	98
第4章 功能检测模型	100
4.1 功能检测策略描述	100

4.2	无限使用期的功能检测模型	102
4.2.1	潜在故障不可测量的模型	102
4.2.2	潜在故障可测量的模型	111
4.3	有限使用期下的不完善检测的功能检测模型	121
4.3.1	假设和参数	121
4.3.2	完善检测中事件发生的概率	122
4.3.3	费用模型	125
4.3.4	可用度模型	127
4.3.5	风险模型	131
4.4	总结和归纳	134
第5章	故障检查模型	135
5.1	RCM 中故障检查模型的描述	135
5.2	可用度模型 I	136
5.2.1	假设和参数	136
5.2.2	可用度模型 I 的一般形式	137
5.2.3	故障时间呈指数分布	139
5.3	可用度模型 II	141
5.3.1	假设和参数	142
5.3.2	系统可用度模型 II	142
5.3.3	故障率、维修率为常数、 $\theta=0$ 时的特殊情况	146
5.4	可用度模型 III	147
5.4.1	假设和参数	147
5.4.2	可用度模型 III 的一般形式	148
5.5	可用度模型 IV	150
5.5.1	假设和参数	151
5.5.2	可用度模型 IV 的一般形式	151
5.5.3	改进的可用度模型 IV	153
5.6	总结和归纳	157
第6章	延迟时间模型中的参数估计方法	158
6.1	两种考虑主观数据的参数估计方法	158
6.1.1	Christer 参数估计方法	158
6.1.2	主观数据估计概率	159

6.1.3 主观数据概率估计实例	160
6.2 单部件模型的客观参数估计	162
6.2.1 假设和参数	162
6.2.2 基本似然函数	163
6.2.3 理想检测	164
6.2.4 非理想检测	166
6.2.5 客观参数估计实例	169
6.3 复杂系统的客观参数估计	172
6.3.1 假设和参数	172
6.3.2 已知每工作日的故障次数和每次检测缺陷次数的情况	173
6.3.3 已知故障发生时刻和检测缺陷次数的情况	176
6.4 复杂系统的贝叶斯参数估计	178
6.4.1 假设和参数	178
6.4.2 基于主观数据的估计	179
6.4.3 基于主观数据和客观数据的估计	182
6.4.4 举例	184
6.5 总结和归纳	187
第7章 复杂设备延迟时间建模案例研究	188
7.1 案例研究背景	188
7.2 数据收集分析	190
7.2.1 客观数据收集	190
7.2.2 主观数据估计	190
7.2.3 潜在故障和故障数据分析	190
7.3 锅炉的 RCM 分析	195
7.4 维修决策模型及分析处理	197
7.4.1 假设和参数	197
7.4.2 参数估计	198
7.4.3 决策模型	203
7.4.4 计算和分析	204
7.5 结论和建议	209
参考文献	212

CONTENTS

Chapter 1 Reliability – Centered Maintenance	1
1.1 Introduction	1
1.2 Principle and process of RCM	5
1.3 Failure mode and effect analysis	11
1.4 RCM logic decision	24
1.5 Notes for RCM process	35
Chapter 2 Basics of RCM modelling	40
2.1 Requirements and classification of RCM decision models	40
2.2 Overview of maintenance modelling	45
2.3 Basic knowledge for RCM modeling	54
Chapter 3 Replacement models	71
3.1 Introduction	71
3.2 Age replacement models	72
3.3 Block replacement models	90
3.4 Summary and conclusions	98
Chapter 4 Functional check models	100
4.1 The description of functional check	100
4.2 Functional check models in infinite time horizon	102
4.3 Functional check models with imperfect inspection for finite time horizon	121
4.4 Summary and conclusions	134
Chapter 5 Failure finding models	135

5.1	The description of failure finding task	135
5.2	Availability model I	136
5.3	Availability model II	141
5.4	Availability model III	147
5.5	Availability model IV	150
5.6	Summary and conclusions	157
Chapter 6 Methodologies of parameter estimation in maintenance decision models		158
6.1	Subjective data estimation	158
6.2	Objective parameter estimation of single component	162
6.3	Objective parameter estimation of complex system	172
6.4	Bayesian parameter estimation for a complex system	178
6.5	Summary and conclusions	187
Chapter 7 Delay time modelling for a complex plant— a case study		188
7.1	Introduction of the case study	188
7.2	Data collection and analysis	190
7.3	RCM analysis for the boiler	195
7.4	Maintenance decision modeling and analysis	197
7.5	Summary and conclusions	209
References		212

第 1 章 以可靠性为中心的维修

1.1 概 述

以可靠性为中心的维修 (Reliability Centered Maintenance, RCM) 是目前国际上通用的用以确定装备(设备)预防性维修需求、优化维修制度的一种系统工程过程。按国家军用标准 GJB1378—92, RCM 可以定义为:按照以最少的资源消耗保持装备固有可靠性和安全性的原则,应用逻辑决断的方法确定装备预防性维修要求的过程或方法。它的基本思路是:对系统进行功能与故障分析,明确系统内可能发生的故障、故障原因及其后果;用规范化的逻辑决断方法,确定出各故障的预防性对策;通过现场故障数据统计、专家评估、定量化建模等手段在保证安全性和完好性的前提下,以维修停机损失最小为目标优化系统的维修策略。

RCM 是确定装备预防性维修需求的一种方法或手段,它有实实在在的分析过程与内容,它不是一种具体的维修方式,也不是笼统意义上的维修思想。严格地讲,它是一种系统的维修分析手段或方法,我们可以称其为 RCM 分析。

为什么称为以可靠性为中心的维修呢?在这种确定维修需求的方法中是如何体现以可靠性为中心呢?传统的确定维修需求的方法主要是基于相似装备的经验和现场数据统计,并没有从功能出发对可能发生的故障做出预计。应用 RCM 方法,可以系统地分析出装备的故障模式、原因与影响,然后对每一故障原因,有针对性地确定出预防性维修工作的类型,这样把所有的预防性维修工作组合在一起形成装备的预防性维修大纲,执行这样的 RCM 大纲

就可以避免严重故障后果的产生,从而保证装备的可靠性。

对于军用装备而言,RCM 分析的结果是针对该装备的预防性维修大纲。装备预防性维修的大纲是规定装备预防性维修要求的汇总文件,是关于该装备预防性维修要求的总的安排。其主要内容包括:

- (1) 需要进行预防性维修的产品或项目(WHAT);
- (2) 实施的维修工作类型或“方式”(HOW);
- (3) 维修工作的时机即维修期(WHEN);
- (4) 实施维修工作的维修级别(WHERE)。

装备预防性维修大纲对于维修管理来说是一个新的术语,它是装备全系统、全寿命维修管理的产物。按照现代维修工程的要求,装备在研制过程中就要规划其维修保障系统,而维修大纲是规划维修保障系统的顶层文件,是纲目性的资料。因为只有搞清了装备的维修工作需求才能进一步有针对性地设计和优化维修保障系统。

RCM 的产生与装备维修方式的多样化和人们对维修实践的不断认识有直接的关系。20 世纪 50 年代末以前,各国在装备维修中普遍的做法是对装备实行定时翻修。这种做法来自早期人们对机械事故的认识:机件工作就有磨损,磨损则会引起故障,而故障影响安全,所以,装备的安全性取决于其可靠性,而装备可靠性是随时间的推移而下降的,必须经常检查并定时翻修才能恢复其可靠性。基于这种认识,人们认为:预防性维修工作做得越多、翻修周期越短、翻修深度越大,装备就越可靠。但是,对于复杂装备或产品来说,传统的做法常常会遇到两个重大问题,一是随着装备的复杂化,无论机件大小都进行定时翻修,其维修费用不堪负担;二是有些产品或项目,不论其翻修期缩到多短、翻修深度增到多大,其故障率仍然不能有效控制。60 年代初,美国联合航空公司通过收集大量数据并进行分析,发现航空机件的故障率曲线有六种基本形式,符合典型的“浴盆曲线”的仅占 4%,且具有明显耗损期的情况也并不普遍,没有耗损期的机件约占 89%。通过分析他

们得到两个重要结论,即:

(1) 对于复杂装备,除非具有某种支配性故障模式,否则定时翻修无助于提高其可靠性;

(2) 对许多项目,没有一种预防性维修方式是十分有效的。

在其后近 10 年的维修改革探索中,通过应用可靠性大纲、针对性维修、按需要检查和更换等一系列试验和总结,形成了一种普遍适用的、新的维修理论——以可靠性为中心的维修。1968 年,美国空运协会颁发了体现这种理论的飞机维修大纲,制订文件 MSG-1《手册:维修的鉴定与大纲的制订》(RCM 的最初版本),该文件由领导制订波音 747 飞机初始维修大纲的维修指导小组 (Maintenance Steering Group, MSG) 起草,在波音 747 飞机上运用后获得了成功。按照 RCM 理论制订的波音 747 飞机初始维修大纲,在达到 20000h 以前的大的结构检查仅用 6.6 万工时;而按照传统维修思想,对于较小且不复杂的 DC-8 飞机,在同一周期内需用 400 万工时。对于任何用户来说,这样大幅度地减少维修工时、费用,其意义是显而易见的,更重要的是这是在不降低装备可靠性的前提下实现的。

1974 年,美国国防部明令在全军推广以可靠性为中心的维修。1978 年,美国国防部委托联合航空公司在 MSG-2 的基础上研究提出维修大纲制订的方法。诺兰 (Nowlan. F. S.) 与希普 (Heap. H. F.) 合著的《以可靠性为中心的维修》正是在这种情况下出版的。此书正式推出了一种新的逻辑决断法——RCM 法。它弥补了 MSG-1/2 中的不足之处,且明确阐述了逻辑决断的基本原理。对维修工作明确区分,避免使用定时维修、视情维修、状态监控三种维修方式,而是代之以更具体的预防性维修工作类型。自此,RCM 理论在世界范围内得到进一步推广应用,并不断有所发展。美国国防部和三军制订了一系列指令、军用标准或手册,RCM 的推行取得成功。进入 20 世纪 90 年代后,RCM 已广泛应用于世界上许多工业部门或领域,其理论又有了新的发展。1991 年,英国的约翰·莫布雷 (John Moubray) 撰写了新的《以可靠性为