

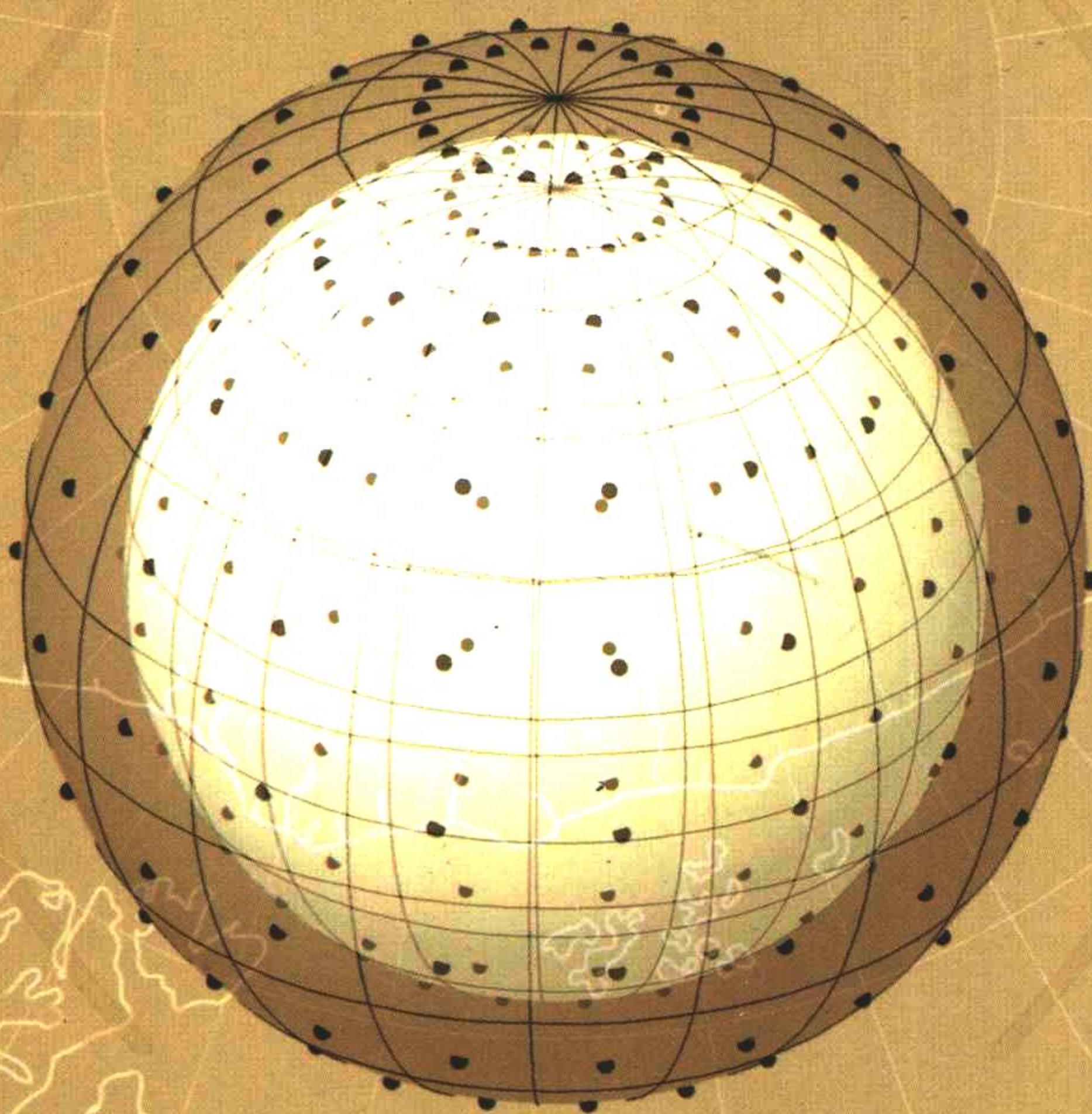
国防电子信息技术丛书

Optimal Inventory Modeling of Systems
Multi-Echelon Techniques, Second Edition

装备备件最优库存建模 ——多级技术（第二版）

[美] Craig C. Sherbrooke 著

贺步杰 等译 夏文祥 校



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

装备备件最优库存建模——多级技术 (第二版)

Optimal Inventory Modeling of Systems Multi-Echelon Techniques, Second Edition

库存论方面的多数专著利用单项法计算确定备件的库存量, 忽视了备件价格、保障等级和隶属层级等因素, 《装备备件最优库存建模——多级技术》是首部采用系统法建立库存模型的专业书。本书的计算结果大大降低了多种装备的资源消耗, 其中包括机群、舰队、通信网络、电气设施和宇航空间站等。

从总体上看, 本书新版虽然只增加了四章及部分附录, 但所有各章均已进行了广泛的修改, 追加了大量的测试实例。此外还增添了许多新的应用领域, 包括民航部门、“沙漠风暴”作战得出的经验, 以及个人计算机使用模型时Windows的标准界面。

对本书第一版的评价

曼彻斯特 (Manchester) 大学计算机教授 史蒂夫·纽 (Steve New) :

本书是作者库存论应用方面近三十年工作的全面回顾与总结, 很值得关注。在文字论述和逻辑结构上堪称典范, 即使是不同行业的人员也可能从作者精湛的学识中获益。

埃克塞特 (Exeter) 大学备件保障领域教授 莫斯·乃兹维克 (Mirce Knezevic) :

书中大量的计算实例有助于我们领会所用的模型与数学原理。对致力于库存论及其在复杂装备中应用的所有读者、图书馆与组织的藏书来说, 这样一种内容翔实的专著无疑应受到重视。

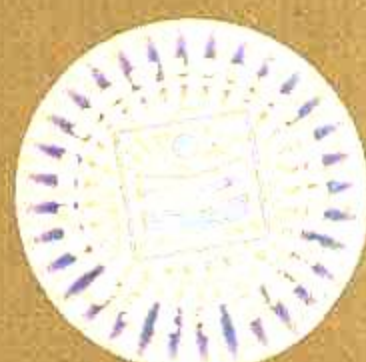
对本书第二版的评价

美国空军退役将军、空军装备部前司令、国防部国防后勤局局长 乔治 T. 巴比特 (George T. Babbitt) :

本书第二版对备件保障人员和装备主管认为至关重要的基本内容保持不变。舍布鲁克 (Sherbrooke) 倾其毕生精力研究现实中的库存问题, 书中具体实例便于读者领会边际分析、期望短缺数、费用—可用度曲线及优化求解等关键概念与原理, 以及基于模型的模拟和解析之间的关系。《装备备件最优库存建模——多级技术》一书中, 在进行最重要的保障费用与装备可用度之间权衡利弊分析方面, 舍布鲁克教给我们 (公共及私营部门的备件主管) 更好地领会原理和解决问题的方法。这一教学参考书理应列入你们的藏书。



策划编辑: 贺瑞君
责任编辑: 韩玲玲
责任美编: 喻 晓



本书贴有激光防伪标志, 凡没有防伪标志者, 属盗版图书。

ISBN 978-7-121-05802-8



9 787121 058028 >

定价: 45.00 元

国防电子信息技术丛书

装备备件最优库存建模

——多级技术（第二版）

**Optimal Inventory Modeling of Systems
Multi-Echelon Techniques, Second Edition**

[美] Craig C. Sherbrooke 著

贺步杰 等译 夏文祥 校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书是备件库存建模方面的一本理论体系完整、观点权威、方法实用的著作。该书由浅入深、全面细致地介绍了备件库存优化的理论和方法，并且列举了诸多算例，内容涉及单地库存模型，多等级模型，需求过程和需求预测，多等级、多层级模型，有定期补给和余度的多等级、多层级模型，定期补给专题，串件拼修的建模、实际应用，以及库存模型的执行问题。

该书可以作为大学运筹学专业的教材，是装备维修和供应链管理专业的研究生的必备参考书，也可供军队、大型企业的相关人员参考。

Translation from the English language edition:

Craig C. Sherbrooke : Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques, Second Edition

Copyright © 2004 Springer, The Netherlands as a part of Springer Science + Business Media

All rights Reserved

版权贸易合同登记号 图字：01-2007-6015

图书在版编目（CIP）数据

装备备件最优库存建模：多级技术：第2版 / （美）舍布鲁克（Sherbrooke, C. C.）著；贺步杰等译.

北京：电子工业出版社，2008.2

（国防电子信息技术丛书）

书名原文：Optimal Inventory Modeling of Systems: Multi-Echelon Techniques, Second Edition

ISBN 978-7-121-05802-8

I. 装… II. ①舍… ②贺… III. 装备—零部件—库存—系统建模 IV. F253.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2008）第 006122 号

责任编辑：韩玲玲

印 刷：北京市海淀区四季青印刷厂

装 订：涿州市桃园装订有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本：787×1092 1/16 印张：16.25 字数：416 千字

印 次：2008 年 2 月第 1 次印刷

定 价：85.00 元

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为；歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路 173 信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

《装备备件最优库存建模——多级技术（第二版）》

专业技术审查委员会

主任委员：詹崇良

副主任委员：周中全

委员：李克军 周航军 郑刚 张瑞昌
潘明荣

编译委员会

贺步杰 夏文祥 傅涛 高辉 万玉成
龙军 张义龙 贺凌轩 刘文武

译者序

随着高技术装备的快速发展,为保障装备正常使用的备件管理越来越受到人们的重视。装备复杂,备件价格急剧攀升,如再按照传统方法管理备件,“经费紧张,备件短缺”的矛盾只会更加突出,甚至会出现装备难以为继的状况。正因为如此,20世纪90年代左右,西方发达国家兴起了备件管理专业,并认为未来10年备件管理人才将供不应求。为了紧跟专业的前沿动态,力求与国际发展同步,现将美国兰德公司(RAND)著名备件管理专家克雷格 C.舍布鲁克(Craig C. Sherbrooke)博士的本书推荐给国内同行。

本书运用定量方法分析解决装备可用度和备件保障经费之间的最优效费比,并紧贴备件保障实际,论述建立备件库存模型的多级技术。所谓多级,这里面有三层含义。第一层含义是保障等级,类似于我们按行政隶属关系划分的三级保障体制。对消耗量低、价格昂贵的备件来说,三级库存分配的科学决策,既可达成最高的装备完好率,又不会突破预算经费指标。第二层含义是备件产品树内部的隶属层级。无论是外场(装备使用现场)还是内场,换件维修应力求“换小(SRU)不换大(LRU)”。这里的大小就是备件层级的高低。例如,发动机燃料泵漏油,更换密封胶圈(低层级)即可,而不必更换燃料泵(高层级)。书中的 VARI-METRIC 模型就是针对上述两级相应的各种排列组合提出的最优库存方案。第三层含义是指装备全寿命期所处的各个阶段。我们知道,装备备件的故障规律符合浴盆曲线,库存决策应与此相对应,这就使问题更加复杂化。这一部分内容涉及面广,周期长,见效慢,目前还不是很成熟,故书中没有详细的论述。

备件管理人员大多未受过正规的数学专业训练,一看到“建模”二字便担心读不懂书中的内容。原著作者考虑到这种困难,将数学难度较深的内容安排到附录部分。如果读者对正文中有些内容仍感到难以理解,不妨先阅读其中的定性描述部分,这对于更新备件保障观念、改革我国民用及军用备件保障技术,或许大有益处。我们再也不能将“备件管理”的理解停留在传统的“器材保管”上了!20世纪90年代国际上有人发起的“备件运动”(Spares Campaign),其目的就在于寻求如何以有限的经费,最大限度地提高装备完好率,而这就是备件管理的精髓所在。

备件最优库存建模技术既需要扎实的数学基础,又需要复杂的备件保障专业技术,涉及的知识面相当广泛,全书翻译难度很大。为此,空装航材部的领导和机关给予了大力支持和帮助,詹崇良部长、周中全副部长除了在百忙中审查书中部分内容外,还责成机关检查督促本书的翻译出版。另外,北空航材处也为本书出版鼎力相助,业内同行李春莉、李爱平、刘洋、季鸣、程志平、王建强、吴永春等针对专业技术问题提出了许多宝贵意见,在此一并表示衷心的感谢!原著中存在的个别疏漏之处,译者尽可能做了校正。由于水平有限,加之时间仓促,译文中难免存在不妥之处,恳请读者批评指正,也可通过 hebujie@hotmail.com 直接与我联系。

贺步杰

2007年12月于徐州

前 言

本书是为从事装备备件保障并关注装备完好率的人员编写的。我们研究提出建立数学模型的技术是在给定装备可用度或备件总经费条件下，计算确定各地每项备件的最优库存量。最优化的算法认真权衡装备工作现场和负责保障的后方仓库之间备件库存量的多少，即所谓的后方仓库与基地的多等级保障问题，同时也权衡分析备件产品树组件及其分组之间隶属关系的多层级问题。

此外，本书的使用对象还包括对库存论数学方法及其实际应用感兴趣的运筹学专业研究生。书中详细地阐述了库存论必备的理论基础。如同本书书名副标题所指出的那样，多等级与多层级技术是这一专著的重点内容。我们认为，本书是首部深层次研究多级备件保障专题的教科书。

但是，本书并非主要论述多等级库存论，我们仅限于关注一种情况下的优化理论，即保持库存量为 s 以及只要库存量降低到 $s - 1$ 时就再次订购或送修备件。由于构成装备的可修理备件价格高、需求量低， $(s, s - 1)$ 策略是其最优的方案，因此我们只研究这一对策。当然，我们确实也对低价格、高需求备件订货量大于 1 的情况进行了计算，但因这些器材大多处于备件产品树的较低层级，所以我们乐于使用最优对策的近似方法，这对掌握备件影响装备可用度和装备成本的情况误差不大。

重点关注通用多级技术数学原理的读者应查阅其他文献资料，其中比较经典的参考文献是克拉克（Clark）和斯卡福（Scarf）1960 年的论述，最好的是施瓦茨（Schwarz）1981 年所著的文献。施瓦茨的大批论文中，有几篇是专门研究多级技术的，包括 200 多篇参考资料。其他最新的研究成果有菲德格鲁（Federgruen）和斯普肯（Zipkin）1984 年以及斯沃尔纳斯（Svoronos）和斯普肯（Zipkin）1988 年的专题论述。由于他们的最优技术解法迭代过程太复杂，所以目前已经很少有人使用。但有一种明显的例外情况，即本书第 10 章论述的 1990 年科恩（Cohen）等人的方法，我们照常采用。

在过去 20 年里，库存管理的研究出现了两种重要但又相互对立的观点。工业制造部门往往重点强调编制计划和实时控制的方法，以便减少与生产过程同步的库存投资额。而另一种极端情况是，负责保障复杂装备（如舰船、电信网络、电器设备、计算机系统、航天飞机和轨道飞行器等）的备件管理人员，正在利用越来越复杂的库存模型。其中部分原因是上述装备的复杂性日益提高，而又必须满足其规定的可用度指标。上述两种研究成果的核心内容现已极大地提高了计算能力、计算机教育与用户广泛普及的程度。

预测需求和建立库存模型对上述两类群体中的前者已经显得不太重要，而对后者（备件保障群体）却是越来越重要的问题。在两个极端之间还有其他许多应用方法，如商业领域零售企业的实用方法。在有些情况下，零售商已能缩短订货间隔期，并可以依托供应商较强的快速反应能力；而在另一种情况下，间隔期和供应批发商数量的可变性已经越来越明显，库存论和预测技术仍是他们的重要工具，从而不太需要更好的新技术。

本书的目的是论述高技术装备的保障问题。对此，虽然军事部门已有许多普通的实用方法，但我们所提出的这些方法也适用于复杂的民品项目。这里我们不是以抽象的名词术语谈论高技术装备和分散供应的地点，而是为便于论述，借用军品实例并参照飞机、空军作战基地、后方仓库保障等具体情况。我们这样做的目的是希望本书阐述得更清晰，学术氛围较淡，不致使读者忽视其他有关的实用技术。

促使我撰写这一专著的因素是 1989 年 4 月我首次开设“备件管理与建模”课程，每期有四天的教学任务（现已改为三天）。该课程在美国、欧洲和远东已讲授 50 多期。为充分反映学生意见和笔者的经验，每次讲完本课程之后，我都对资料进行修改。形成现有版本的教科书主要应归功于大量学生的反馈意见。

本书读者对象是具有丰富实践经验的备件保障人员和工程技术人员，以及所受数学专业训练有限但具有博士学位的主管们。为此，我们力求适应兴趣和学习能力基本持平的读者要求。为使数学功底不牢的读者便于理解，我们将许多数学证明推导安排在习题和附录中（但第 4、5、7 章中的少量微积分算法还是不能取消）。

我在运筹学研究生学院讲授库存论课程时，通常使用哈德利（Hadley）和怀廷（Whitin）1963 年编著的《库存系统分析》作为主要教材。这本教材即使已经陈旧过时并停止印刷，但仍不乏一些很好的素材。但许多学生抱怨哈德利、怀廷的教材及其他教科书缺少实际工作的真实案例，学生们希望掌握更多的数学模型执行情况。因此，本书中尽可能包括许多具体的数据，主要是来自现场技术测试、需求预测分析以及自由号空间站的数据。此外，本书论述的每一种模型都已编写了个人计算机程序，目前大多数程序正在使用之中。

需要重点强调的是，本书提出的模型全部是解析模型。我们利用模拟方法验证解析模型的精确度，但模型本身则是由许多数学公式构成的，这些公式可以针对最优存储策略进行有效计算，求出解决方案。模型的这一解析算法对其具体应用于个人计算机甚至大型机是十分重要的。

本书对库存论的数学基础进行了详细推导，适合于研究生第一学期的课程学习。有两类人才可使用本书，一是想要跟踪库存建模技术最新动态的备件保障实际工作者，二是关注备件保障理论与实践两个方面的运筹学研究生。这正是笔者的愿望。

本书大部分素材是基于我自己的研究成果，其中有许多资料现已在各类刊物上公开发表，如《运筹学》、《管理科学》、《海军后勤研究季刊》等。然而，有关自由号空间站的备件定期补给建模，在装备系统级和备件级两级都有冗余度，但由于时间问题尚未印

刷出版。有关需求预测的许多研究成果目前仅限于在后勤管理研究所（LMI）的刊物上发表。

书中内容从 20 世纪 60 年代初完成的研究课题开始。该课题的结果表明，运作一个空军基地并以充分低的备件成本达到较高的保障效能是完全可行的。此后的保障现场试验验证了课题结论，所推荐的备件库存数已在基地具体执行，并以一半的库存成本产生与原来相同的保障效能。这一新方法的基本原理，我们将在第 1 章中介绍，而第 2 章则论述其数学方法，同时说明基地备件短缺数最小化即相当于装备可用度最大化。

第 3 章将数学方法推广到多个基地和多个后方仓库保障的库存量优化。第 4 章论述备件需求量的估计方法，并提出需求量并非固定不变的建模技术。我们说明了方差与均值之比（以下简称差均比）大于泊松（Poisson）分布特征参数比值为 1 的需求情况，并利用负二项分布建立这种效果的数学模型，同时还对因后方级、基地级和备件内部隶属层级之间的供应渠道延误时间相互影响而形成的更大需求差均比进行建模。我们用两个层级的备件实例说明这一情况，利用空军具体的数据介绍需求预测分析，并提出故障率受耗损支配的备件处理方法。在第 5 章中，我们研究提出多等级、多层级综合问题优化的数学方法。

第 6 章与第 7 章主要是可修复备件的定期补给问题，以及如何将其运用于自由号空间站。本书首次介绍的诸多新成果之一是优化技术，同时考虑了装备系统与备件两级的冗余度问题，这在装备设计中具有十分重要的意义。航天飞机备件的长期采购与短期补给运载问题，可以利用同一模型进行计算。短期补给情况下，受耗损支配的安装件寿命模型可用来改进既定航天飞行中补给的一组备件。

在有些情况下，维修可以采用串件拼修的方法，也就是将短缺的备件统一集中到尽可能少的装备架（套）数上。串件的数学方法有所不同，这是第 8 章介绍的内容。我们指出，这一情况可以使用同一目标函数，即期望可用度函数，但计算结果只是次最优方案。我们注意到，若在决策过程中随时掌握备件位置和状态的信息，而不考虑所用的采购模型，也可以收到较好的短期保障效能。专管修复品从后方仓库分配到基地以及待修品后方送修优先级安排的 DRIVE 模型（航空部附件分配与送修动态管理模型）就属于这一类模型。我们介绍了利用这一技术所产生的部分效益以及执行中的问题。第 9 章是第二版新增的内容，主要论述运用同一理论可以建立数学模型的 12 个问题，包括民用航空的改进方案、备件补给和送修前提条件的变更、飞机飞行现场及其他保障场所的管理等。

最后的第 10 章涉及现实工作中许多具体的问题，如各种方案的利弊所在、介绍几个不同用户群体的执行经验等。附录中安排了帕尔姆定理的数学推导过程、各个基地相互之间的横向供应等专题，以及需求预测分析的讨论。附录 D~F 是第二版新增的内容。附录 D 是根据“沙漠风暴”作战观测的数据，预测战时条件下的备件需求量。附录 E 和 F 介绍优化理论的执行问题（VMetric 软件）以及需求预测原理（“需求分析系统”的软件）。

与其他教科书相比，本书论述了库存论具有的几个重要的突出特点。我们利用系统方法，由此强调装备（如飞机）的可用度，然后计算确定合理的库存策略。我们认为，备件保障人员应为管理层提供费用-可用度（即费-效比）曲线以进行管理，通过这些曲线就可以选定最优的装备系统指标。实际上，系统方法的运用有几种方式，它不仅仅可以计算确定备件的库存量，而且还包括需求预测和各种对策方案的评价。

可修复备件大多直接关系到飞机的可用度，因此可修件是本书的核心，而多数教科书则以消耗性器材为重点。多等级、多层级的库存论在多数教材中只简要介绍几页而已，本书却花费大量篇幅予以论述。

第二版新增内容虽然只有四章和部分附录，但全书各章我们都进行了广泛修订，增加了大量的具体实例。本书第一版已出版了 12 年，我们由新版可以看出这种时过境迁的状况，比如说 1992 年时，个人计算机模型尚不能使用 Windows，而现在 Windows 已成为标准的操作系统。最初撰写教材时还没有 Word，只能用 WordStar 来完成，而现在要重新建立本书文稿，就需要我儿子埃文（Evan）帮助用原始的投影去完成。

读者可以通过电子信箱 cshebro@alum.mit.edu 与我取得联系。

Craig C. Sherbrooke
于加利福尼亚卡马里奥城

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 综述	1
1.2 系统方法	2
1.3 单项方法	2
1.4 可修件与消耗件	3
1.5 问题的“物理实质”	5
1.6 多项备件的优化	5
1.7 多等级的优化	6
1.8 多层级的优化	7
1.9 现场试验情况	7
1.10 重温单项方法	10
1.11 重温系统方法	11
1.12 小结	14
1.13 习题	14
第 2 章 可修件单个基地库存模型	15
2.1 综述	15
2.2 均值与方差	15
2.3 泊松分布及其符号	16
2.4 帕尔姆定理	17
2.5 修理时间为独立变量和需求量为常数的证明	17
2.6 库存量	18
2.7 备件保障效能指标	19
2.8 装备效能指标	22
2.9 单个基地模型	22
2.10 边际分析	23
2.11 函数凸性分析	26
2.12 边际分析的数学求解	27
2.13 可分离性	28
2.14 可用度	29
2.15 小结	32

2.16 习题	32
第 3 章 多等级模型 METRIC	35
3.1 综述	35
3.2 METRIC 模型的假设条件	35
3.3 METRIC 原理	37
3.4 计算实例	38
3.5 凸化分析	40
3.6 METRIC 优化方法小结	41
3.7 可用度	41
3.8 小结	42
3.9 习题	43
第 4 章 需求过程和需求预测	44
4.1 综述	44
4.2 泊松过程	45
4.3 负二项分布	46
4.4 多层级问题	48
4.5 多层级问题举例	49
4.6 LRU 供应渠道件数的方差	50
4.7 重温多层级问题举例	52
4.8 随时间变化的需求率	53
4.9 贝叶斯分析	54
4.10 客观贝叶斯法	55
4.11 有原始估计数据时的贝叶斯分析	59
4.12 詹姆斯-斯坦因估计	60
4.13 詹姆斯-斯坦因估计的试验	61
4.14 贝叶斯和詹姆斯-斯坦因估计的比较	62
4.15 需求预测试验的设计	63
4.16 需求预测试验的结果	64
4.17 随机故障与耗损过程的关系	65
4.18 拟合优度检验	68
4.19 小结	70
4.20 习题	71
第 5 章 VARI-METRIC: 多等级、多层级模型	74
5.1 综述	74

5.2	数学预备知识：多等级理论	75
5.3	各项定义	77
5.4	需求率	78
5.5	后方级在修 LRU 件数的均值和方差	79
5.6	基地级在修或补给的 SRU 件数的均值和方差	79
5.7	基地在修或补给的 LRU 件数的均值和方差	80
5.8	飞机可用度	81
5.9	优化方法	81
5.10	补给时间假设条件的推广	81
5.11	泊松需求分布假设条件的推广	82
5.12	通用的备件	82
5.13	消耗性及局部可修备件	83
5.14	计算实例	87
5.15	备件关键性的差别	88
5.16	因维修造成的飞机可用度降低	89
5.17	公式低估飞机可用度	90
5.18	小结	91
5.19	习题	91
第 6 章	有定期补给和冗余度的多等级多层次模型	93
6.1	空间站介绍	93
6.2	综述	94
6.3	维修方针	94
6.4	可用度是往返周期时间的函数	95
6.5	轨道替换件 (ORU) 短缺数的概率分布	95
6.6	因 ORU 而停机系统套数的概率分布	98
6.7	停机系统套数的概率分布	100
6.8	可用度	101
6.9	一项 ORU 计算举例	101
6.10	优化算法	103
6.11	多种资源约束	103
6.12	冗余度模块图	105
6.13	计算举例	106
6.14	50% ORU 良好的其他冗余度配置	111
6.15	理论部分小结	114
6.16	理论的实用性	115
6.17	习题	116

第 7 章 备件定期补给专题	118
7.1 综述	118
7.2 不同周期长度的可用度	118
7.3 因轨道拆换件维修而引起的可用度下降	119
7.4 耗损故障	120
7.5 计算举例	123
7.6 周期内一处多次重复的耗损故障	124
7.7 通用备件	128
7.8 备件报废问题	129
7.9 动态条件下的计算	129
7.10 小结	130
7.11 习题	130
第 8 章 串件拼修对策的建模	131
8.1 综述	131
8.2 单个基地模型	132
8.3 多层次模型	134
8.4 可用度优化	135
8.5 串件拼修目标函数的比较	137
8.6 模型推广问题	139
8.7 Dyna-METRIC 和可持续航材保障模型 (ASM)	140
8.8 DRIVE: 航空部附件分配与送修动态管理模型	141
8.9 DRIVE 模型的目的	141
8.10 DRIVE 的假设条件	142
8.11 DRIVE 执行中的问题	144
8.12 DRIVE 的分配算法	145
8.13 DRIVE 的现场试验结果	146
8.14 分配和送修分开的模型 OVERDRIVE	146
8.15 DRIVE 当前状况	150
8.16 小结	151
8.17 习题	151
第 9 章 实际应用	153
9.1 综述	153
9.2 民用航空的应用	153
9.3 备件资源的重新分配与出售	154
9.4 定期补给	154
9.5 无补给时的应用: 空运携行配套备件	155