



国防科技著作精品译丛



Springer

Analysis and Algorithms
for Service Parts Supply Chains

维修备件供应链 分析与算法

【美】John A. Muckstadt 著

孙江生 张海莹 赵方庚 等译

甘茂治 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

维修备件供应链分析与算法

Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains

[美] John A. Muckstadt 著

孙江生 张海莹 赵方庚 等译

甘茂治 审校



国防工业出版社

National Defense Industry Press

著作权合同登记 图字: 军 -2012 -174 号

图书在版编目 (CIP) 数据

维修备件供应链分析与算法/(美) 米克施塔特 (Muckstadt, J. A.) 著;
孙江生等译. — 北京: 国防工业出版社, 2016. 4

(国防科技著作精品译丛)

书名原文: Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains
ISBN 978-7-118-10671-8

I. ①维… II. ①米… ②孙… III. ①军事装备—备件—设备管理—
供应链管理 IV. ①E23

中国版本图书馆CIP数据核字 (2016) 第 036316 号

Translation from English language edition:

Analysis and Algorithms for Service Parts Supply Chains

by John A. Muckstadt

Copyright © 2005 Springer New York

Springer New York is a part of Springer Science+Business Media

All Rights Reserved

版权所有, 侵权必究。

维修备件供应链分析与算法

[美] John A. Muckstadt 著

孙江生 张海莹 赵方庚 等译

出版发行 国防工业出版社

地址邮编 北京市海淀区紫竹院南路 23 号 100048

经 售 新华书店

印 刷 北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

开 本 710 × 1000 1/16

印 张 19¼

字 数 293 千字

版 印 次 2016 年 4 月第 1 版第 1 次印刷

印 数 1—2000 册

定 价 108.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010) 88540777 发行邮购: (010) 88540776

发行传真: (010) 88540755 发行业务: (010) 88540717

翻译组名单

主 译: 孙江生 张海莹 赵方庚

翻 译: 连光耀 蔡 娜 蔡丽影

曹卫宁 张连武 甘玉虹

王 凯 周云川 吕艳梅

李会杰 梁伟杰 郭星宇

审 校: 甘茂治

译者序

本书是维修备件库存优化控制模型和算法领域的一部十分宝贵的专著。作者约翰·安东尼·米克施塔特 (John Anthony Muckstadt), 密歇根大学数学专业博士, 曾在美国空军总部就职, 后任美国康耐尔大学运筹学研究与工业工程学院教授。作者主要从事供应链管理研究, 其几十年的开创性研究成果在美国空军和富士施乐公司等军地多领域得到广泛应用, 在该领域具有重要影响和崇高地位。

约翰·安东尼·米克施塔特教授以自己的研究成果为主, 集成了本领域众多学者的创新性研究成果, 对维修备件库存优化控制模型和算法进行了系统总结。本书对该领域的应用背景、理论基础、基本模型和工程算法等进行了充分论述与证明, 并对基于时间的服务水平约束的连续时间多级多项目系统、多级系统中的横向供应和共用、有限能力系统和实时执行系统等问题进行了系统研究。本书内容为我们展现了以作者为代表的该领域众多研究学者们深厚的理论功底和严谨的逻辑论证, 也为我们研究解决军地维修备件库存优化控制问题提供了一套可借鉴的理论、方法和技术。本书可为相关专业研究人员、院校师生提供理论指导, 也可供从事该领域工作的管理人员和工程技术人员参考。

本书翻译工作主要由孙江生、张海莹和赵方庚完成。孙江生主持实施了本书的翻译工作, 对全书进行了系统全面的理解、消化与核证, 完成了对全书的翻译统稿、加注和勘误等工作。张海莹承担了本书相关数学定理证明与模型推导的再推演工作, 对书中相关案例进行了校核。赵方庚组织完成了本书的初译, 开展了部分算法的验证工作。参与

完成本书翻译工作的还有连光耀、蔡娜、蔡丽影、曹卫宁、张连武、甘玉虹、王凯、周云川、吕艳梅、李会杰、梁伟杰和郭星宇等。

本书由长期从事装备保障教学科研工作的甘茂治老师审校,在此表示由衷敬意和诚挚感谢。译者在翻译过程中,始终得到了国防工业出版社崔晓莉编辑的鼓励和支持,在此一并表示感谢。特别要衷心感谢中国人民解放军原总装备部政治部干部部机关,正是由于干部部组织实施的“青年英才”培养计划,才使译者得以完成此书的翻译工作。

由于译者水平有限,在翻译过程中一定会存在不少缺点和不当之处,恳请同行专家、老师及读者们批评指正。

译者

2016年1月

译者简介

孙江生 男,黑龙江克东人。1975年4月生,2009年1月毕业于北京科技大学并获管理学博士学位。军械技术研究所高级工程师,主要研究方向是装备保障工程。硕士生导师。获国家科技进步二等奖1项、军队及省部级科技进步一等奖3项、军队科技进步二等奖9项,总装教学成果一等奖2项。获国家发明专利18项、实用新型专利21项。发表学术论文60余篇。军队学科拔尖人才培养对象、总装“双百计划”青年科技英才培养对象。荣立个人三等功3次。

张海莹 女,黑龙江克东人。1977年4月生,2010年7月毕业于哈尔滨工业大学并获工学博士学位。主要研究方向是图像处理、最优估计和随机微分方程数值解。现任OSA(美国光学学会)会员,OE(《光学快报》)、OL(《光学学报》)、IJCM(《国际计算数学杂志》)、AP(《应用光学》)和JOSAA(《美国光学学会杂志A辑》)等期刊学术审稿人。哈尔滨工业大学应用数学研究所硕士生导师。发表学术论文30余篇,SCI收录7篇。

赵方庚 男,山东单县人。1978年1月生,2009年1月毕业于北京科技大学并获管理学博士学位。蚌埠汽车士官学校副教授,主要研究方向是军事物流系统优化。获省部级科技进步一等奖2项,军队科技进步二等奖2项、三等奖1项,军队后勤学术优秀成果二等奖1项。发表学术论文50余篇。总后“科技新星”培养对象。荣立个人三等功2次。

前言

军中有句格言：永远不要做自告奋勇者。然而，许多人却因为做了自告奋勇者而改变了自己和自己的生活。我就曾说过：“是的，长官，我能做到。”我的前程也因此得以不断改变。

1972年初，我便遇到了这样的事情。我那时是美国空军上尉，被分配到总部，即空军后勤司令部 (AFLC) 工作。当时我是一个从事运筹学研究的参谋人员，直接向弗雷德·格鲁克 (Fred Gluck) 上校负责。由于我与格鲁克上校均曾就职于空军技术学院 (AFIT)，所以我们彼此很熟悉。也由于这层关系，格鲁克上校给了我很大的自主权去选择工作项目。我选择了去协助两个以前曾在空军技术学院学习过的学员：托马斯·哈勒夫 (Thomas Harruff) 先生和迈克尔·皮尔森 (Michael Pearson) 上尉，他们二人都被分配到器材管理部的推进装置处工作。还是在空军技术学院任教员时，我就已经开始与我的学员们共同协作攻关发动机的管理问题了。我们三个人对空军喷气式发动机在战略、战术及运行方面上的筹措、调拨和修理很感兴趣。我当时对这些问题还知之甚少，所以经常与他们进行互动，学习应对在管理这些既昂贵又重要的备件时遇到的各种问题。在我被分配到空军后勤司令部后，这种互动就演变成了专职工作。正如我所说的，是格鲁克上校让我能够有机会在这个领域得以不断开拓工作。

当时，美国空军发生了几种类型发动机备件的严重短缺事件，我们对此开展了大规模的深入研究。影响这种短缺的因素是多方面的，但其中一种因素则是非常明显的，即国防部计算发动机需求的方法忽略了

发动机所处的运行环境。基于此,首先要提出的问题是:是否可以改用一套方法来计算发动机备件的需求,这套方法应可以对性能(各作战基地发动机可用度)给出明显不同的预测,进而得出期望性能的发动机备件需求数量。这个问题促使我去研究兰德公司发表的相关论文,当时的兰德公司无疑是为空军开发装备后勤保障模型的领军团队。同时,我也得以接触到了克雷格·舍布鲁克(Graig Sherbrooke)和他在兰德公司的同事们提出的可回收项目控制多级技术(METRIC)及相关概念。我与同事们构建了基于METRIC的拓展模型,包括用于研究比较宽范围的战术和运行规划问题的最优化模型及相应的仿真模型。这些初步的研究结果也表明,国防部的的方法确实需要改进了。

那时还发生了另外一件事情。当时正在研发F-15武器系统。从很多方面来说,F-15都是一款卓越的飞机。其设计主要聚焦在维修性方面,尤其是发动机的维修性。普拉特(Pratt)和惠特尼(Whitney)以模块化的方式设计了该发动机。维修理念的基本思想是从飞机上拆下发生故障的发动机,并替换为可用的发动机。一旦有故障的发动机从飞机上拆下来,故障模块就可以得到确认、拆卸和更换,从而使故障发动机恢复到可用状态。我们的目标则是将发动机的修理周转时间最小化,进而使机群飞行所需的备用发动机和模块数量也维持在最低限度。只有在每个基地上都有足够数量的可用备件模块的情况下,才能使发动机的修理周转时间缩短。当然,故障的模块也必须是可修复的。当时,飞机经常在得克萨斯州圣安东尼奥的空军后勤基地进行维修,而其修理周转时间也对飞机的可用性产生了显著的影响。这种维修理念与相应的发动机设计策略显然很高明,但却存在这样一个问题:我们应该采购多少发动机和模块?即便是国防部之前备用发动机需求计算方法的支持者都意识到,自己支持的这一方法已不足以解决上述难题了。推进装置处有责任确定这些备件的初始采购数量,并以预算为目标来估计未来相应的备件需求量。显然,推进装置处的领导们面临着一个不知从何下手的难题。

个体展现的机会往往来自于组织的危急关头。我这样说的意思是:只有在大官僚机构再不接受新观念就要注定失败的情况下,他们通常才有可能去拥抱新思想。显然,国防部恰恰就是这样一个庞大的官僚机构,它就是因为标准工作程序明显难以有效运行,所以才不得被迫改变。在这样的关键时刻,我犯了一个大过错,违反了那句重要的格言。我自告奋勇地帮助设计了发动机与模块混合问题的解决方案并且使该方案得以迅速发展。格鲁克上校和他在推进装置处的搭档们也从未畏

缩过,是他们最终获得了授权(从器材管理部的乔治·罗兹(George Rhodes)准将那里)来开展这一方法研究。

基于舍布鲁克提出的原理,我们的团队构建了第一个多级环境下应用的多装配关系可修项目战术规划模型。我们把该模型称为改进的可回收项目控制多级技术或是简称为 MOD-METRIC。这时我们的团队规模也在不断扩大,新成员包括吉恩·珀金斯(Gene Perkins)少校、乔恩·雷诺兹(Jon Reynolds)上尉和罗伯特·金赛(Robert Kinsey)军士长。我们的团队利用上述模型计算了 F-15 所需的所有可修件的数量。在随后的几年里,MOD-METRIC 及其后继模型也被美国空军不断用来计算其他武器系统的备件需求量。

大约 30 年后的今天,当我再回想起当时的情景时,我明白是这么多事情的同时出现,才让我有机会成为自告奋勇者。让人们来支持我们的思想创新与实践是真正意义上的非凡体验。

在我的服役期内,我非常幸运地与许多杰出人士共同工作,乔治·巴比特(George Babbitt)便是其中之一。当乔治还是空军技术学院的学生时我就认识他,当时他是我的学生。在随后我们一起工作的日子里,我清楚地认识到乔治是一位不可多得的人才。从那时起,我们以及我们的家庭就在社交和专业层面进行了广泛交流。我和乔治无休止地探讨后勤系统的管理问题。这些充满激情的定期讨论持续了 30 多年(他的妻子路易丝(Louise)总说我们两个非常无聊的人)。然而,通过互相争论,我更加清晰地理解了如何设计与管理维修备件系统。我也并非唯一一个从乔治的智慧中获得启发的人。他的能力得到了上司的一致认可,他最终在退休前获得了将军军衔并任空军装备司令部(空军后勤司令部的后继组织)司令。

在我们开发第一个基于 METRIC 的模型来管理发动机时,我还遇见了费城陆军库存研究办公室的负责人伯尼·罗森曼(Bernie Rosenman)先生。伯尼很尽责,他个人及其办公室负责开发了许多库存模型,其中很多模型已被收录到了运筹管理和库存控制的教科书中。我们还有一些模型是与赫布·加利厄(Herb Galliher)所在的麻省理工学院合作完成的。在随后的多年里,赫布对我在库存模型的建模理念产生了深远的影响。特别是他教会了我要在选择模型前对数据资料进行仔细审查。伯尼的团队包括艾伦·卡普兰(Alan Kaplan)和卡尔·克鲁泽(Karl Kruse),他们二人曾经不时地在如何构建备件采购模型上对我进行指导帮助。事实上,卡尔的一篇关于等待时间的论文正是本书一节内容的基础。

随着时间的推移,以及我们空军后勤司令部这个团队的不懈努力,我们也非常幸运地与那个时期兰德公司伟大的后勤思想家们进行交流,这其中包括默里·盖斯勒(Murray Geisler)、艾尔维·科恩(Irv Cohen)、鲍勃·保尔森(Bob Paulson)、莫特·伯曼(Mort Berman)、约翰·鲁(John Lu)、海·舒尔曼(Hy Shulman)和史蒂夫·德雷泽纳(Steve Drezner)等人。后来,兰德公司其他人的工作对空军和我的思想也都产生了深远的影响。这些人包括卢·米勒(Lou Miller)、迪克·希尔斯塔德(Dick Hillestad)、M. J. 卡里利奥(M. J. Carrillio)、杰克·亚伯(Jack Abell)和戈登·克劳福德(Gordon Grawford)等。1974年我成为康奈尔大学教师后,还与兰德公司的同事们进行了许多交流。我有幸在圣莫尼卡度过几个夏天,向这些技术娴熟、兢兢业业、正直高尚的人们学习。我对他们永远心存感激。因此,如果说本书大部分内容是直接或间接地来自于在兰德公司的工作以及与此处的同事交流时产生的思维灵感,也就不足为奇了。

进入康奈尔大学后,我对备件库存管理的兴趣和在这方面的的工作仍在继续。除了在兰德公司继续我的工作外,我也很快得到了与美国海军、通用电气公司特别是富士施乐公司合作的机会。富士施乐公司在纽约州的罗切斯特有一个管理科学部门,它是世界上最重要的工业管理科学部门之一。杰克·钱伯斯(Jack Chambers)是该部门的负责人。富士施乐公司在备件及其服务基础设施上投有巨资。从这些方面看,也就不奇怪杰克的团队在这个领域开展了大量研究工作了。罗恩·赫德森(Ron Hudson)是团队成员之一,他使我有兴趣与这个团队合作以对这类问题开展研究。罗恩是管理科学部门后勤领域的核心技术领导。在和我一起工作的许多工业界技术人才之中,罗恩显然是最有能力的人之一。在我与他共事的25年里,他竭尽所能将分析做到最好的专业精神以及他毫不妥协、勇于承担责任的精神,对我产生了重大的影响。当然,我在富士施乐与其他人进行的交流,也塑造了我看待军事系统和高技术备件供应系统之间区别的观点。查克·米切尔(Chuck Mitchell)和罗恩·纳夫罗茨基(Ron Nawrocki)向我和康奈尔的学生揭示了商业备件环境中战略、战术和运行计划与执行的复杂性。富士施乐公司和其他公司的管理科学部门在20世纪80年代初期被解散了。

另一个让我生活发生转折的事件是,1980年我遇见了芝加哥气动工具公司的总裁、首席执行官兼主席的托马斯·P. 拉蒂默(Thomas P. Latimer)。与此同时,我也敏锐地意识到美国制造业正在走向没落。托

马斯使我有机会可以对制造业及其成品和备件配送相关的几个非常有趣的问题进行研究。虽然我在托马斯公司进行的大部分活动都集中在评估多种可供选择的装配零件制造策略上,但在1982年,我确实用了全年时间进行了一项与维修备件相关的重要研究。这项研究涉及到了几个欧洲国家配送中心的备件库存问题。

虽然我知道在整个西欧存在着竞争,但我很快了解到政府的政策和干预是如何影响在那里做生意公司的物流、分配策略以及所需费用的。这些制度影响到了不同国家公司机构间的产品和信息的流动。由政府政策导致的商业社会成本与制约限制随处可见。这些经济运行现实问题极大地影响了我对全球化制造和配送的看法。20世纪80年代后期,在贝尔大西洋公司所做的其他工作也进一步深化了我的这些看法。

20世纪90年代,与备件有关的另外两个重要契机出现了。我的同事,也是非常要好的朋友,丹尼斯·塞弗伦斯(Dennis Severance)创造了这两个机会。1974年,丹尼斯曾在康奈尔大学任教。从个人的角度而言,我们以及我们的家人在那时便成为了亲密的朋友。然而,从专业角度出发,丹尼斯则曾深刻地影响并将继续影响着我的学术思想与教学思路。所以正如你现在将要看到的,他在我生命中出现的重要性怎么说都不为过。

20世纪80年代后期,丹尼斯把我介绍给后来成为爱罗奎普公司(Aeroquip Corporation)总裁的霍华德·塞兰德(Howard Selland)。80年代后期在我针对制造与配送问题上协助霍华德之后,他要求我和丹尼斯协助他重组爱罗奎普公司的制造与配送体制。虽然他们的大部分市场在美国,但运作范围却是全球化的。爱罗奎普公司经营的是液压制动软管与装配业务,其装配器件包括机械零部件等。我早期对制造业实践的研究主要是由汤姆·拉蒂默(Tom Latimer)和芝加哥气动工具公司支持的,这使我清楚地认识到爱罗奎普公司应该做什么。爱罗奎普公司大约一半的业务与备件相关。因而,我们解决遇到的问题也就轻车熟路了。与芝加哥气动工具公司遇到的情况一样,爱罗奎普公司的备件需求模式是极不稳定的,而且备件的数量也是成千上万量级的。问题的实质立刻表明,爱罗奎普公司和许多其他公司所采用的传统批量式制造模式和以物资需求计划为基础的计划策略已完全不适应当时情况了。在这个项目上,我开始与具有很好职业素养、专注敬业和持之以衡精神的迈克·霍夫曼(Mike Hoverman)合作,并设计出了极其有效的制造与配送体系。迈克开发的软件环境让爱罗奎普公司充分了解了不同用户订单模式的特质。该分析为制定产品的生产策略、零件与产品的生产计

划, 以及形成潜在的库存策略奠定了基础。作为此项工作的一部分, 迈克成为了设计新配送中心及其所有的运行规则和相关软件的坚实后盾。这个配送中心及其核心制造策略使备件的低成本生产成为可能, 并极大地提高了对顾客的服务水平。

我与丹尼斯从霍华德、迈克以及差不多数百名爱罗奎普公司员工那里学到了很多知识, 这些知识的重要性怎么强调都不为过。总的来说, 他们使我们逐渐接受大众概念, 并且和他们一起就制造和配送系统的设计与运行共同提出新的具体创意。团队通过通力协作构建了卓越的环境。他们激发了我的思想, 为我们进一步深化关于维修备件管理的思想和概念提供了机会。

虽然在爱罗奎普公司的工作刚起步, 丹尼斯还是把我介绍给了通用公司维修备件运营部战略规划室主任斯图·瓦格纳 (Stu Wagner)。这个部门负责数十万不同型号备件的采购、处理和储存, 以及配送给数以千计的汽车经销商、批发商和广大的市场买主。通过斯图和他的团队, 大卫·萨金特 (David Sergeant)、玛丽·肖 (Mary Shaw) 及其他的一些人让我们有机会学习这个令人着迷且可以在广度与深度上与美军相匹配的行业。在过去的 10 年间, 我们曾接触过无数与这个系统相关的问题。

虽然斯图·瓦格纳现已退休, 但他曾是这个部门的领军人物。在通用汽车公司里他不遗余力地探索揭示着更先进的思想, 并将这些新的思想与公司其他人进行交流。他敏锐的思维与犀利的言辞往往促使我们的思维更加清晰, 思想表达更加有力。他这种言简意赅地分析问题与机遇以及陈述分析结果的方法, 对我们的行为产生了极大的影响。我们对他的领导和公司里很多同事给我们提供的帮助表示诚挚的感谢。

最近, 我与彼得·杰克逊 (Peter Jackson) 以及我在威斯康星州立大学的同事吉姆·拉波尔德 (Jim Rappold) 和凯西·卡贾诺 (Kathy Caggiano), 还有威廉-玛丽学院的大卫·默里 (David Murray) 都接触到了一些高科技公司、飞机制造商以及航空公司面临的广泛而有趣的问题。如通常那样, 这些问题的引入来自于罗恩·赫德森 (Ron Hudson) 早期的激励。曾记得 25 年前, 是罗恩让我第一次了解到了商业备件的再供应系统。2000 年时, 罗恩正在为 XELUS 公司工作, XELUS 是针对维修备件的采购与配送等多方面提供软件支持的公司。罗恩清楚地表达了他对现有模型的不满。在对原因进行探讨之后, 他激励我们去探索新的建模方法并解决多种类型维修备件的战略、战术和运行方面问题。当然, 这种探讨过程还尚未结束, 我们仍在为 XELUS 公司提供给我们

的机会而奋斗。虽然我们的朋友、尊敬的同事罗恩·赫德森最近逝世了,但他的探索精神将永驻我们心中,我们会倾尽全力去完善我们的建模方法以缅怀罗恩。

在过去的 20 年里,我也有机会与我的朋友兼同事彼得·杰克逊(Peter Jackson)一起工作。我与彼得为通用公司和 XELUS 公司的几个项目工作,但这也只是我们诸多合作中的两个。在过去的 10 多年里,我与彼得为许多研究问题而共同奋斗,这些问题大多集中在维修备件相关的方面。我们也曾花费大量的时间来准备相关的教学材料。彼得展现了他作为一名教师与同事应该具有的所有优秀品质,我很荣幸可以与他共事。

我仅仅简单回顾了一些生活中可以引导我研究维修备件系统的事件,这一系列事件看起来都有一个不错的开端。我的自告奋勇显然完全改变了我的生活方向。我遇到过的优秀人士和给我启发的人们,让我成为了一个十分幸福并深知感恩的人。除了他们的专业指导,他们的友谊也让我的生活变得更加美好。我希望所有人都能有如此美好的经历。不过,我的建议是:当要自告奋勇时须谨慎,因为它所带来的将是一个漫长的求索过程。

杰克·米克施塔特
康奈尔大学
2004 年 9 月

致谢

就像我在前言中提到的,我在职业生涯中曾和许多杰出的人士一起工作,这些经历让我获益匪浅。除了前言中提到的人士外,很多人还通过其他诸多有效方式帮助我形成自己的思想。这些人包括:我的博士生导师也是我的老朋友理查德·威尔逊 (Richard Wilson),我亲密的康奈尔大学同事和许多论文的合作者威廉·马克斯韦尔 (William Maxwell) 和罗宾·朗迪 (Robin Roundy),还有我们多方面的良师与领导安德鲁·舒尔茨 (Andrew Schultz)。

我也非常荣幸地与许多优秀学生进行了交流互动。尤其是吉姆·拉波尔德 (Jim Rappold)、凯西·卡贾诺 (Kathy Caggiano)、甘尼什·嘉纳基拉曼 (Ganesh Janakiraman)、艾马·萨普拉 (Amar Sapra)、王辉 (Hui Wang) 和贾尼斯·常 (Janis Chang) 等,他们在本书的准备与写作上都提供了帮助。我还要特别感谢王辉在整理书稿期间给我提供的持续协助。

我特别感谢吉姆·拉波尔德 (Jim Rappold)、凯西·卡贾诺 (Kathy Caggiano)、甘尼什·嘉纳基拉曼 (Ganesh Janakiraman) 和彼得·杰克逊 (Peter Jackson) 对本书的突出贡献。他们与我合作的研究论文为本书的许多章节提供了写作基础。他们的热情和创造力是我不竭的灵感源泉。

最后,我要感谢莎伦·霍比 (Sharon Hobbie) 对本书稿的精心准备,因为我相信辨认我的笔迹是一项耗费时间并充满挑战的工作。

目录

第 1 章 引言	1
1.1 维修备件库存系统分类法	4
1.1.1 项目	6
1.1.2 库存策略	11
1.2 本书概览	11
第 2 章 背景简介: $(s-1, s)$ 和订至点策略分析	15
2.1 单一库存地点、周期性检查和延期交货环境下 订至点策略的最优性	16
2.2 串行系统中订至点策略的最优性	22
2.2.1 单一库存地点情况下的单项目单用户方法	24
2.2.2 随机订购提前期	30
2.2.3 串行系统	31
2.2.4 连续性检查系统	31
2.3 第 2 章习题	34
第 3 章 背景概念: 泊松和复合泊松需求下的 $(s-1, s)$ 策略导论	36
3.1 再供应单元数量的稳态分布	37
3.1.1 延期交货情况	38

3.1.2 订单流失情况	44
3.1.3 另一种延期交货的情况: 用户时间延误.....	46
3.2 性能指标	48
3.3 性能指标特性	52
3.4 寻求 $(s-1, s)$ 策略系统库存水平:	
最优化问题建模与算法	57
3.4.1 埃弗雷特 (Everett) 定理.....	57
3.4.2 例 1: 库存投资约束条件下最小化	
期望延期交货量	59
3.4.3 例 2: 库存投资约束条件下最大化	
系统期望平均满足率	64
3.5 第 3 章习题	65

第 4 章 后方仓库 — 基地两级库存与修理系统的

精确模型..... 68

4.1 引言	68
4.2 模型推导	69
4.3 扩展模型	72
4.4 第 4 章习题	76

第 5 章 可回收项目管理的战术规划模型 79

5.1 METRIC 系统	79
5.1.1 系统运行及定义	80
5.1.2 最优化问题	81
5.2 等待时间分析	97
5.3 多装配关系系统	100
5.3.1 一个两级两层装配关系的再供应系统	101
5.3.2 再供应系统中单元数量稳态概率分布的计算	102
5.3.3 计算后方仓库和基地 LRU 及 SRU 的库存水平	104
5.4 第 5 章习题	107