

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

军用装备维修保养 资源预测与配置技术

罗 祎 苏执阳 著
阮旻智 刘天华

兵器工业出版社

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

现代海军兵器技术丛书

军用装备维修保障 资源预测与配置技术

罗 祎 苏执阳
阮旻智 刘天华 著

兵器工业出版社

内容简介

本书首先介绍了维修保障基本概念,维修级别分析的基本思路和决策模型;然后以器材资源为重点,分析了当前工程应用中器材资源需求确定存在的问题,并从表征寿命分布的平均寿命、失效率等可靠性参数出发,提出了基于平均寿命相等以及基于累积失效相等的指数等效方法,以便将非指数型备件的需求统一利用指数型模型进行确定;最后针对常见的多级维修供应模式,对可修件的库存方案确定方法和流程,以及消耗件初始库存配置、订购模型等内容进行了论述。

本书可作为从事装备维修保障的工程技术人员、管理人员的参考用书,也可作为高等院校装备维修保障专业高年级本科生、研究生的专业教材。

图书在版编目(CIP)数据

军用装备维修保障资源预测与配置技术 / 罗祎等著
· 一北京:兵器工业出版社,2015.3
(现代海军兵器技术丛书 / 林春生,滕克难主编)
“十二五”国家重点出版物出版规划项目
ISBN 978-7-5181-0095-8

I. ①军… II. ①罗… III. ①武器装备—维修—军需保障—资源预测②武器装备—维修—军事保障—资源配置
IV. ①E237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 039016 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596, 68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:北京圣夫亚美印刷有限公司

版 次:2015 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑:陈红梅

封面设计:正红旗下

责任校对:郭 芳

责任印制:王京华

开 本:710×1000 1/16

印 张:12.25

字 数:214 千字

定 价:58.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

现代海军兵器技术丛书

编审委员会

主 任：程锦房

副主任：林春生 滕克难 王德石

委 员（按姓氏笔画排序）：

田福庆	付 强	齐 欢	许 诚	严卫生
李国林	吴茂林	余湖清	张晓晖	张效民
张静远	陈 川	周穗华	郑学合	赵修平
黄俊斌	龚沈光	颜 冰		

总主编：林春生 滕克难

丛书序

海军肩负着保卫国家海洋领土完整、海洋运输线安全和国家海洋权益的重大使命，先进的海军兵器是海军履行使命的基本保证。新中国建立以后，伴随着我国海军部队的发展和壮大，海军兵器从无到有，在科学原理、设计理论、制造技术、保障方法等方面得到了全方位的发展。我国海军兵器技术的发展经历了二十世纪五十、六十年代的全面仿制阶段和七十、八十年代的原理模仿与技术创新阶段，从九十年代起，进入了全面自主设计阶段，使得我国海军在役兵器的主体具备了完全的知识产权，海军兵器技术理论也逐步得到发展和完善。特别是最近十几年来，随着国家海洋权益意识的不断提高和海军转型改革的不断深入，海军兵器得到了更加迅速的发展，大量新型高技术兵器已经装备部队或者即将装备部队；不少新装备采用了新概念、新技术、新材料、新能源，海军兵器正朝着智能化、信息化、精确打击的目标发展。

随着海军大批高新技术兵器装备部队，以及兵器学科理论的发展与完善，迫切需要一套全面反映海军兵器学科基础理论、设计制造技术、保障方法的丛书，一方面方便广大海军官兵系统掌握现代海军兵器的基础理论、技术原理和使用维护方法，以便科学合理地运用兵器、充分发挥高新技术兵器的作战效能；另一方面，对海军兵器学科理论的发展做一个比较全面系统的归纳和总结，以促进海军兵器学科理论和技术方法的创新。为此，我们组织编撰了《现代海军兵器技术丛书》。该丛书以相关专业教学、科研人员近十年来的学术积累为基础，同时广泛收集国内相关技术领域的代表性研究成果，着重论述新兴技术对海军装备的影响，结合海军装备技术

发展热点，全面阐述海军兵器的新理论、新技术、新发展；丛书内容涉及舰炮、鱼雷与反潜武器、水雷与反水雷、导弹等多种海军兵器；丛书编撰注重学科理论和技术原理的阐述，同时兼顾内容的系统性，力争使丛书兼备较高的学术水平和较好的实用性。

本丛书可供海军兵器论证、设计、制造、使用和维护领域的技术人员和管理人员阅读参考，也可用作相关高等院校专业师生的教学参考书。

《现代海军兵器技术丛书》编委会

2015 年 2 月

前 言

保障资源是军用装备维修保障的物质基础，对军用装备战备完好率、寿命周期费用等保障特性具有决定性影响。随着我军装备建设加速推进，大批国产新型先进装备逐步列装部队，为了确保这些新装备成系统、成建制快速形成作战能力和保障能力，必须准确预测这些装备所需的保障资源，并进行合理配置，以逐步实现装备保障的精确化。

保障资源包括器材、人员、设施和设备、技术资料、计算机资源、供应保障、训练保障等。其中器材资源(简称备件)是保障资源的主要组成部分，据不完全统计，器材消耗经费占装备保障总经费的 1/3 左右。但从世界范围内的军用装备保障情况来看，器材的准确预测和筹措是最为困难、最具有挑战性的工作之一。维修实践表明，在影响装备可用度三种主要停机时间因素中，等待维修资源及相关备件所造成的停机时间，已经超过修复性维修停机时间和预防性维修停机时间，成为制约装备可用度提高的瓶颈。备件配置与备件的精确保障目标差距较大，经常出现“不需要的备件大量积压，而真正所需要的备件却没有”的被动局面。分析当前备品备件配置存在的问题，造成备件配置不合理的原因主要有以下几点：一是现有的备件需求预测理论不完善，需求预测技术“不好用”。部分备件预测模型不仅形式复杂，而且预测能力有限，例如，在工程中较为常见分布类型的备件需求模型中，除了服从指数分布的备件具有精确的预测模型以外，其他常见服从威布尔分布、正态分布、伽马分布等寿命分布类型的备件精确预测模型形式都比较复杂，实际工程中难以使用。二是为了方便工程使用，有关文献中推荐使用近似方法预测非指数类型的备件需求量，然而实践表明这些近似方法的精度不高，预测误差较大，造成备件需求预测结果“不能用”的现象十分突出。因而实际中依靠主观经验或类似装备进行推断的现象较为普遍。三是当前装备系统备件配置常常采用单项法分析，较少

从装备全系统全寿命角度定量分析装备系统的备件配置方案,导致备件的供应与储备策略不合理,而造成装备的备件配置方案不合理,造成现有常见的备件配置技术确定的备件配置方案在实际中“不敢用”。

因此,准确预测器材资源需求,合理制订器材配置方案,已成为制约科学开展军用装备维修保障的一个重要问题。本书以作者近几年在军用装备维修保障资源预测与配置方面的工程实践及学术成果为基础,参考了国内外同行的部分成果,以器材资源的维修保障需求及配置问题为研究重点,对器材需求预测的基本方法进行了系统论述,对可修器材的需求预测与配置优化、不可修器材的需求预测与配置优化等问题进行了详细论述,是对目前国内关于军用装备综合保障工程理论的有益探索。

全书共分8章。第1章绪论,主要介绍国内外研究现状、存在的主要问题。第2章维修工程及维修级别分析,主要介绍军用装备维修工程涉及的基本概念,维修级别分析的基本思路和决策模型。第3章维修人员、设备及技术资料的确定,简要介绍维修保障资源中维修人员、维修设备等的确定方法。第4章维修器材需求预测方法及分析,论述各种典型寿命分布类型的备件需求的确定方法。第5章不可修备件需求量确定方法,针对不可修备件,寻找将非指数分布等效成指数分布的方法,利用指数分布的备件模型近似计算备件需求量。第6章可修备件需求量确定方法,针对可修备件,利用指数等效方法确定非指数型备件需求。第7章多级维修供应系统的可修备件初始库存优化,论述在多级维修供应模式下,针对可修件给出库存方案确定方法和流程。第8章消耗件的库存配置优化方法及协同订购策略,主要论述消耗件初始库存配置、消耗件的订购模型。

本书撰写分工:第1、2、4章由罗祎撰写,第3章由苏执阳撰写,第5、6章由刘天华撰写,第7、8章由阮旻智撰写,全书由罗祎统稿。华中科技大学齐欢教授认真审阅了本书,提出了宝贵建议和修改意见,在此表示衷心感谢。

受作者学术水平的限制,本书难免存在缺陷和不足,欢迎读者批评指正。

作者

2014年11月于武汉

目 录

第1章 绪 论	1
第2章 维修工程及维修级别分析	6
2.1 维修性及保障性	6
2.1.1 维修性	6
2.1.2 保障性	8
2.2 系统可用度分析	10
2.2.1 可用度	10
2.2.2 固有可用度	14
2.2.3 使用可用度	16
2.2.4 战备完好率	17
2.3 系统效能分析	18
2.3.1 效能分析方法	18
2.3.2 系统效能模型	20
2.4 系统费用—效能分析	24
2.4.1 寿命周期费用	25
2.4.2 系统费用效能分析模型	27
2.5 维修级别分析	29
2.5.1 引言	29
2.5.2 舰载装备维修级别的划分及规划准则	30
2.5.3 考虑经济/非经济性因素的 LoRA 综合决策模型	31
2.5.4 基于理想方案法的 LoRA 模糊多指标决策优化	34
2.5.5 基于自适应粒子群优化的模型求解算法	36
2.5.6 算例分析	37

第3章 维修人员、设备及技术资料的确定	41
3.1 维修人员的确定	41
3.1.1 程序与约束条件	41
3.1.2 维修人员技术专业及数量的确定	42
3.2 维修设备的确定	45
3.2.1 维修设备分类	45
3.2.2 影响维修设备选配的因素	46
3.2.3 维修设备需求确定	47
3.3 技术资料	49
第4章 维修器材需求预测方法及分析	52
4.1 备件故障消耗的影响因素分析	52
4.1.1 装备技术状况	53
4.1.2 装备组成结构	53
4.1.3 备件质量等级	54
4.1.4 装备使用环境	54
4.1.5 装备工作强度	54
4.1.6 备件的管理因素	55
4.1.7 故障消耗的随机因素	55
4.2 备件保障指标及需求建模	56
4.2.1 备件保障指标及其定义	56
4.2.2 备件保障概率模型	57
4.3 指数型备件需求确定方法与分析	59
4.3.1 指数型备件保障概率模型	59
4.3.2 保障概率的特性分析	61
4.4 威布尔型备件需求确定方法与分析	62
4.4.1 威布尔型备件保障概率模型	62
4.4.2 备件需求的工程确定方法与分析	63
4.5 正态型备件需求确定方法与分析	68
4.5.1 正态型备件保障概率模型	68
4.5.2 备件需求确定的工程方法与分析	69
4.6 一般寿命型备件需求确定方法与分析	72

4.6.1 一般寿命分布型备件需求工程近似方法	72
4.6.2 工程近似方法存在的问题	74
第5章 不可修备件需求量确定方法	77
5.1 引言	77
5.2 非指数分布与指数分布的贴近度分析	78
5.2.1 威布尔分布与指数分布的贴近度分析	78
5.2.2 正态分布与指数分布的贴近度分析	79
5.2.3 伽马分布与指数分布的贴近度分析	80
5.3 基于 E - 等效的备件量需求确定方法	81
5.3.1 E - 等效原则	81
5.3.2 精度分析	82
5.3.3 威布尔型备件的 E - 等效方法与算例分析	84
5.3.4 正态型备件的 E - 等效方法与算例分析	86
5.3.5 伽马型备件的 E - 等效方法与算例分析	88
5.4 基于 λ - 等效的备件需求量确定方法	89
5.4.1 λ - 等效原则	90
5.4.2 λ - 等效方法精度分析	91
5.4.3 威布尔型备件的 λ - 等效方法与算例分析	92
5.4.4 正态型备件的 λ - 等效方法与算例分析	94
5.4.5 伽马型备件的 λ - 等效方法与算例分析	96
第6章 可修备件需求量确定方法	98
6.1 引言	98
6.2 现场维修下非连续工作可修备件需求量确定	99
6.2.1 备件保障概率模型	99
6.2.2 非指数型备件需求量的近似确定方法	100
6.2.3 模拟算法设计	103
6.2.4 算例设计及分析	108
6.3 现场维修下连续工作可修备件需求量确定	111
6.3.1 备件保障概率模型	111
6.3.2 非指数型备件需求量的近似确定方法	113
6.3.3 模拟算法设计	113

6.3.4	算例分析	114
6.4	多级维修条件下可修备件需求量确定	116
6.4.1	备件保障概率模型	116
6.4.2	非指数型备件需求量的近似确定方法	118
6.4.3	模拟算法设计	122
6.4.4	算例分析	123
第7章	多级维修供应系统的可修备件初始库存优化	126
7.1	引言	126
7.2	多级维修供应系统描述及模型参数定义	126
7.2.1	保障过程描述	126
7.2.2	模型假设	128
7.2.3	模型参数定义及符号说明	129
7.3	可扩展的多等级多层级备件库存优化模型	132
7.3.1	备件维修更换率通用递推计算式	132
7.3.2	备件供应渠道均值及方差	134
7.3.3	备件期望短缺数的计算	136
7.3.4	备件维修供应效能评估指标	138
7.4	不完全修复件的库存补充及采购方案	140
7.4.1	问题描述与分析	140
7.4.2	近似拉普拉斯需求分布的备件短缺函数	140
7.4.3	订购模型的建立及求解方法	141
7.5	备件方案优化算法及分析流程	143
7.5.1	初始库存优化模型	143
7.5.2	边际优化算法	143
7.5.3	备件方案的优化分析流程	145
7.6	算例分析及结果验证	146
7.6.1	案例想定及初始备件库存分配结果	146
7.6.2	报废件采购方案的确定	148
7.6.3	结果验证	150

第 8 章 消耗件的库存配置优化方法及协同订购策略	156
8.1 引言	156
8.2 消耗性备件的初始库存配置优化	157
8.2.1 基于更新理论的单部件保障概率	157
8.2.2 系统保障概率模型	158
8.2.3 算例分析	160
8.3 固定延误时间下单站点订购方案的确定	161
8.3.1 (R, Q) 库存系统描述	161
8.3.2 备件订购模型的建立	162
8.3.3 模型求解的 Lagrange 乘子法	164
8.3.4 算例分析	164
8.4 随机延误时间下多级供应系统的协同订购方案	165
8.4.1 订购过程描述及模型参数定义	165
8.4.2 多级 (R, Q) 库存对策下的协同订购模型	167
8.4.3 模型分解的启发式求解算法	169
8.4.4 算例分析	172
参考文献	175
索引	179

第1章 绪 论

保障资源是军用装备维修保障的物质基础,对军用装备战备完好率、寿命周期费用等保障特性具有决定性影响。

随着新军事变革的加速发展,与装备处于同等重要地位的维修保障在观念、方式、手段等方面也在发生着深刻的变化,展现出新的发展趋势——由信息化带动装备保障及时化、综合化、精确化和经济性。自第四次中东战争之后,美军装备保障思想就从“越多、越快、越好”向“适时、适地、适量”的后勤保障转变,并在海湾战争之后正式提出了“精确保障”的概念。在伊拉克战争中,美军以“精确保障”取代“规模保障”,通过全资源可视化信息平台,比较精确地保障了美军作战行动,引起了世界各国的高度重视。我国近几年的国防白皮书中都明确提出了按照体系保障、精确保障和集约保障的要求提高综合保障信息化水平。

简单来讲,精确保障就是在准确的时间、准确的地点为部队提供准确数量的资源和技术保障活动。精确是相对于传统的粗放规模型保障而言的,并非达到完全准确,而是尽可能使装备保障的供求之间达成或接近一致,尽可能用最小的资源消耗,以最少的经费投入,最大限度地满足装备保障要求,达到最佳的效费比。因此,实现精确保障一直是世界各国保障领域所追求的目标。

作为精确保障的基础与关键性工作,如何准确进行保障资源需求预测与配置是当前维修保障研究中的一个热点问题,也是一直困扰世界各海军强国实现精确保障的关键。

保障资源包括器材、人员、设施和设备、技术资料、计算机资源、供应保障、训练保障等。保障资源中器材资源(简称备件)是尤为重要组成部分,据不完全统计,器材消耗经费占装备保障总经费的 $1/3$ 左右。

在 20 世纪末之前,各国军队对备件管理工作的开展都面临十分被动

的局面,基本上是依靠类比、经验来对备件需求和配置进行预测和规划,往往存在为了保证供应而过量采购和储备的现象,极大地增加了备件的储存和管理成本,并造成大量的浪费。例如,据《简氏防务年鉴》报告,英国海军的 21 型护卫舰在全部退役时,尚有价值近 2 亿英镑的该型舰艇专用备件库存因不能得到再利用而报废,有价值 1000 余万英镑的该型舰专用修理设施设备和工装因建设时没有考虑到通用性、不能再利用而不得不拆除;在 20 世纪 90 年代初的海湾战争中,美军为了保证部队的后勤供应,不计成本地向前线输送了大量的保障物资,直到战争结束,还有 8000 多个集装箱没有打开,有价值超过 20 亿美元的保障物资还没有开启封条,就又原封不动地运回了美国。因此,过度的采购和储备备件器材来满足保障需求,既增加了管理成本,也浪费了大量的资源,同时还大大降低了装备保障效益。

据美国海军海上系统司令部(Naval Sea Systems Command, NAVSEA)统计表明,舰艇两次等级修理间的三年左右的在航期间中,60%的备件需求不能得到满足,舰船备件只有 8% 满足了故障维修的需求,有 92% 的备件没有被用到。印度海军从苏联购买的 140 艘舰艇中 20% 已不能使用,16 艘潜艇(包括 4 艘德制潜艇)中 35% 也都因为备件不足无法修理而无法使用。

为了有效消除备件配备不合理现象,美军最早制定了相应的初始备件供应规划标准,如 MIL-STD-1375“初始供应保障通用要求”、MIL-STD-1561B“国防部统一的供应程序”。近年来,为了进一步改进备件预测过程,减少备件寿命周期内需求预测的系统性缺陷,美国国会在《2010 财年国防授权法》要求国防部制定计划,对备件需求预测程序进行全面的评审,并要求在预测方法、评估指标、预测机制、库存设置以及备件供应商五个方面采取改进措施。美国海军已相继研发了“基于需求的方法”、“以可用度为中心的方法”以及“基于战备完好性的方法”等军用装备备件需求确定方法,近年来还研究了“多层次基于战备完好性的备件配备模型”等方法。据相关资料显示,该备件配备模型改进后,“密集阵”近程武器系统的使用可用度由 45% 提高到 87%,“宙斯盾”系统的使用可用度由 24% 提高到 91%。

我军装备维修保障体系经过几十年的建设,已经形成了一定的规模和

能力,尤其是在备件需求理论与实践方面也取得了许多研究成果,并编制了相关国家军用标准,为指导备件保障工作奠定了良好的基础。如 GJB1371—1992《装备保障性分析》从程序上明确了新研装备保障方案和相关保障资源的确定过程; GJB4355—2002《备件供应规划要求》作为 GJB1371 的配套标准,更加详细地提供了备件品种与配置数量的确定方法和程序。上述标准为装备保障部门和使用单位确定备件数量提供了有益的参考依据。然而,也应当认识到这些标准还存在着许多问题,特别是在大型复杂装备的备件品种与数量确定方法、全寿命备件需求预测方法等方面还存在明显的不足,加上备件管理制度方面不够健全等原因而造成装备使用方备件短缺或积压浪费现象较为普遍。

总体来讲,在备件资源需求预测方面,现有的指标模型还不够完备,缺乏对各种指标内在关系的阐述,有些指标还没有公认的定论。无论是不可修件还是可修件,都存在一个共性问题,即当部件寿命或维修均为指数分布时,建立模型与求解都比较方便。而对于其他分布或者更加复杂的情况,常常通过各种假设来简化或采用近似的解析方法^[1-3]。对此,很多学者提出采用计算机仿真的手段^[4-7],对部件的寿命或使用过程进行大量模拟,能够解决更加复杂的问题。如利用蒙特卡洛模拟方法设计求解非指数分布可修部件最优储备量的随机模拟算法,解决具有不同寿命分布、不同修复时间分布的独立可修件的备件保障概率计算问题等。虽然仿真的方法在很大程度上能够弥补解析方法假设过多的缺点,也可以用来验证解析方法得到的结果,是一种有效的手段,然而在研究系统的备件需求时,当系统备件种类较多(如有 100 种)时,假设每个零部件最多配置 2 个备件,也有 3^{100} 种组合,每种组合进行 10^4 次仿真,也要计算 $10^4 \times 3^{100}$ 次,比较耗时,效率低,更不利于工程化。将解析方法与仿真手段相结合,寻找各种优化算法以有效降低仿真次数,得到可信度较高的解是重要的研究方向^[8-9]。

在备件维修供应使用方面,尽管世界各国军队在备件筹措与管理工作中曾一度面临十分被动的局面,但国外一些发达国家通过历史经验教训的总结、备件维修供应模式的改善、规章制度的革新、相关军用标准与规范的制定、新概念的提出与探讨,此外,还特别重视理论和方法上的研究与创新,并努力将其研究成果运用于实践,取得了较好的效果,目前基本上

实现了精确化保障。相比国外发达国家而言,我国在备件筹措管理工作中所采用的经验成分偏多,而科学定量的依据少,很少从全系统、全寿命、全费用的角度对备件方案进行规划,缺乏对装备全寿命保障的准确预测和全面掌握,没有形成一套健全的体制、完善的规章制度以及通用规范的军用标准。

在备件配置优化的理论研究方面,国外研究的起步较早^[10-11],始于20世纪60年代,在备件的消耗及需求预测、初始库存配置优化、消耗件的采购策略、装备保障性分析、不同使用条件下的维修保障效能评估及备件方案规划、优化算法应用等方面开展了大量的研究^[12-16],目前已经形成了一套较为完善的理论体系。相比国外而言,我国在该领域研究的起步较晚,始于20世纪80年代末,经过近30年的发展历程,在装备维修保障能力评估、备件优化配置模型、优化算法应用等方面进行了一定的研究^[17-27],但大多数只是针对特定保障模式和特定型号装备的简单应用和分析,目前还没有形成一套通用、完善和系统的理论体系。

在系统的开发及应用方面,欧美等发达国家在成熟的模型和理论体系的基础上,相继开发了VMETRIC、OPUS10、SIMLOX、Tempo、mPOWER、mBOSS等备件优化决策及方案评估工具,近些年来,被广泛应用于各军兵种用于装备采办、初始备件方案优化、费效分析、装备保障效能评估等,取得了较好的效果并产生了良好的军事、经济效益。到目前为止,我国还没有开发出具有自主知识产权、通用、开放的备件规划决策系统及相应的仿真平台。

为保障装备正常使用而进行的备件管理工作越来越受到人们的重视。建立准确、可靠的备件需求预测模型,制订科学、合理、经济的备件配置方案一直是保障工作者所追求的目标之一,具有显著的军事和经济效益。装备配置备件的主要目的就是缩短修理停歇时间,替换装备中出现故障或损坏的零部件,确保装备的正常运行。因此,备件对装备效能的发挥起着至关重要的作用。如果备件的需求数量不清晰、备件的配置不合理,一旦备件的种类和数量不能满足实际需求,就会造成部分重要、急需备件发生短缺,导致不能及时获得所需的保障资源,使得装备处于维修状态或等待状态的时间增加,影响装备的可用度,最终影响部队训练水平和战斗力的提高;反之,如果备件数量配置过多,不仅占用大量空间,同时这些