

1

“十二五”国家重点出版规划项目

装备综合保障工程理论与技术丛书

丛书主编 于永利

丛书副主编 张柳

装备保障工程 基础理论与方法

ZHUANGBEI BAOZHANG GONGCHENG
JICHU LILUN YU FANGFA

■ 于永利 张柳 著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

“十二五”国家重点出版规划项目
装备综合保障工程理论与技术丛书

装备保障工程 基础理论与方法

于永利 张 柳 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

装备保障工程基础理论与方法/于永利,张柳著. —北京:
国防工业出版社,2015. 11

(装备综合保障工程理论与技术丛书/于永利主编)

ISBN 978-7-118-10664-0

I. ①装... II. ①于...②张... III. ①武器装备—
军需保障 IV. ①E237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 290603 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 100048)

三河市众誉天成印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 16 字数 248 千字

2015 年 11 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 56.00 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

《装备综合保障工程理论与技术丛书》

编著委员会

主任委员 于永利

副主任委员 张 柳

委 员 (按姓氏笔画排序)

王立超	王松山	王毅刚	叶 飞
史俊斌	付 勃	付 康	朱小冬
刘文武	汤心刚	孙志刚	李三群
李东东	李国库	李星新	杨 军
杨 懿	杨英杰	宋海霞	张 伟
张 波	张建荣	陈玉波	封会娟
郝建平	柳 辉	姜朝毅	聂成龙
徐 英	盛 飞	绳 慧	董 岳
韩雪魁			

序

21 世纪以来,世界范围内科学技术革命的崛起,信息技术飞速发展并在军事领域广泛应用,有力地冲击着军事领域变革,战争形态逐渐由机械化战争向信息化战争演变,同时对装备保障能力产生的基本形态产生了深刻影响。认真落实习主席“能打仗、打胜仗”指示要求,着眼打赢未来基于信息系统体系作战,我军装备将逐渐形成以军事信息系统为支撑、以四代装备为骨干、以三代装备为主体的装备体系格局。信息化作战需要信息化保障,体系化对抗需要体系化保障。我军装备保障面临着从机械化保障向信息化保障、从单一装备保障向装备体系保障、从线性逐级保障向立体精确保障、从符合性考核向贴近实战考核转变等严峻挑战,未来信息化作战进程中的装备保障实践,对系统科学的装备保障基础理论与方法,提出了时不我待的紧迫要求。

伴随着军事技术和作战形态的发展要求,装备保障理论与技术不断创新发展。针对装备保障的系统研究,在国外始于 20 世纪 40 年代中后期,特别是 20 世纪 90 年代以来,随着“聚焦保障”“基于性能的保障”等新的理念提出,以及相关工程实践的不断深化,装备保障工程在装备全寿命过程中的基础性、全局性的战略地位和作用得到了进一步强化。我国从 20 世纪 70 年代末开始引进、消化、吸收外军装备保障先进理念,运用系统科学思想研究装备保障问题,并在装备型号论证研制以及装备保障能力建设工作中不断应用,取得了大量的理论与实践研究成果,极大地推动了装备保障工程发展。经过 40 多年的研究与实践,装备保障工程在我军装备建设和军事斗争准备中的地位 and 作用不断升华,已经成为装备保障能力建设的基石,正在深刻地影响着装备保障能力和作战能力的形成与发展。装备保障工程既是型号装备建设的基础性工程,也是装备成系统成建制形成作战保障能力建设的通用性工程,还是作战进程中装备保障实施的重要技术支撑。

装备保障工程是应用系统科学研究解决装备保障问题的学科和技术,是研究装备全寿命过程中战备完好与任务持续能力形成与不断提高的工程技术。它运用系统科学与系统工程的理论和方法,从系统的整体性及其同外界环境的辩证关系出发,分析研究装备使用、装备保障特性与装备保障系统之间的相互作用机理,装备保障特性、保障系统的形成与演化规律,以及相关的理论与方法,并运用这些机理与规律、理论与方法,通过一系列相关的工程技术与指挥管理活动,实现装备的战备完好性与任务持续性以及保障费用与保障规模要求。装备保障工程技术包括装备保障特性工程、装备保障系统和装备保障特性与保障系统综合等技术。

为了积极适应未来信息化作战对装备保障提出的要求,我们组织人员对军械工程学院维修工程研究所十余年来在装备保障工程领域的科研成果进行了系统的总结,形成了装备保障工程系列丛书(共22本,其中有16本列入“十二五”国家重点出版规划项目),旨在为装备型号论证研制以及部队面向实战装备保障与运用提供理论和技术支撑。

整套丛书分为基础部分、面向型号论证研制关键技术部分和面向部队作战训练关键技术部分。

基础部分,主要从装备保障的哲学指导、装备保障作用机理以及装备保障模型体系等方面,构建完善的装备保障工程基础理论,打牢装备保障工程技术持续发展的基础,包括《装备保障论》《装备保障工程基础理论与方法》《装备保障工程技术型谱》《装备综合保障工程综合数据环境建模与控制》《装备保障系统基础理论与方法》《装备使用任务模型与建模方法》和《装备作战单元维修保障任务模型与建模方法》。

面向型号论证研制关键技术部分,主要从装备保障的视角出发,解决装备论证、研制过程中保障特性与保障系统规划、权衡和试验验证等问题,包括《装备保障体系论证技术》《型号装备保障系统规划技术》《型号装备保障特性与保障系统权衡技术》《型号装备保障特性试验验证技术》和《现役装备保障特性评估技术》。

面向部队作战训练关键技术部分,主要面向部队作战训练从维修保障需求确定、维修保障方案制定、维修保障方案评价和维修保障力量动态运用等方面构建完善的技术方法体系,为面向实战的装备保障提供方法手段,包括《装备作

战单元维修保障要求确定技术》《装备作战单元维修保障力量编配技术》《装备作战单元维修保障资源预测技术》《装备作战单元维修保障建模与仿真》《装备作战单元维修保障能力评估方法》《装备作战单元维修保障力量运用》《装备作战单元保障方案综合评估方法》《基于保障特性的装备需求量预测方法》《多品种维修器材库存决策优化技术》和《面向任务的维修单元专业设置优化技术》。

着眼装备建设和军事斗争准备迫切需求,同时考虑到相关研究工作的成熟性,本丛书率先推出基础部分和面向部队作战训练关键技术部分的主要书目,今后随着研究工作和工程实践的不断深入,将陆续推出面向型号论证研制关键技术部分。

装备保障工程是一门刚刚兴起的新兴学科,其基础理论、技术方法以及工程实践的开展远没有达到十分成熟的阶段,这也给丛书的编著带来了很大的困难。由于编著人员水平有限,这套丛书不可避免会有很多不妥之处,还望读者不吝赐教。

丛书编委会

2015年11月

前 言

装备保障工程是装备成系统成建制形成保障能力和作战能力的战略性、全局性和基础性工程,其基础理论与方法是推动装备保障工程内涵发展、创新发展、跨越发展和持续发展的根本源动力。通过基础理论研究揭示装备保障工程客观存在的现象及规律,明确各种因果关系和原理关系,奠定装备保障工程发展的基础。

本书是在认真总结国内外装备保障相关研究的成果和工程实践,以及军械工程学院维修工程研究所装备保障团队 10 多年来研究工作的基础上编写完成的。装备保障工程基础理论与方法是装备全寿命过程开展保障工作的重要基础性指导,对装备保障工程技术体系建设具有重要的意义。本书从装备使用、装备保障特性和装备保障相互作用机理出发,重点分析研究了装备保障工程概念内涵,分别建立了使用任务、保障特性、保障系统以及相互作用的关系模型,分析了相互作用的基本规律,明确了装备保障工程全寿命实践基本问题与方法,奠定了装备保障工程应用技术体系研究的基础。

全书共分 8 章。第 1 章明确了装备保障工程的地位与作用,分析了国内外研究动态,给出书中主要内容要点;第 2 章分析了装备保障工程的概念内涵,分析了基本作用机理和基本问题,构建了基础理论与技术体系框架;第 3 章明确了任务系统定性定量描述,给出了模型和建模方法,分析了模型全寿命演化;第 4 章明确了保障对象系统保障特性的定性定量描述,给出了模型和建模方法,分析了模型全寿命演化;第 5 章明确了保障系统定性定量描述,给出了模型和建模方法,分析了模型全寿命演化;第 6 章明确了作用机理的定性定量描述,给出了模型和建模方法,分析了作用机理的基本运行规律、模型的全寿命演化;第 7 章分析了瞬时可用度波动现象,给出了波动的定量描述,分析了波动影响因素,明确了波动产生的机理;第 8 章明确了全寿命实践的两类基本问题,即稳态问

题和动态问题,给出问题的数学描述,并对动态问题进行了实例研究。

本书由军械工程学院维修工程研究所于永利、张柳撰写,于永利负责全书的统稿和修改。军械工程学院维修工程研究所董岳博士、封会娟博士、刘文武博士,以及南京理工大学杨懿博士、王立超博士的学位论文对本书的撰写起到十分重要的作用,在此深表感谢。

在本书的撰写过程中得到了军械工程学院李三群、郝建平的大力支持,提出了许多宝贵意见,为出版本书提供了十分有益的帮助,对此深表感谢。

由于编者水平有限,书中缺点和不妥之处在所难免,恳请读者批评指正。

作 者

2015 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 装备保障工程的地位与作用	1
1.2 装备保障工程的发展历程与发展趋势	3
1.2.1 国外发展历程与发展趋势	3
1.2.2 国内发展历程与发展趋势	8
1.3 本书主要内容及结构	11
第 2 章 装备保障工程的论域分析	13
2.1 装备保障工程概念	13
2.1.1 装备保障工程定义分析	13
2.1.2 装备保障工程的内涵	15
2.1.3 装备保障工程与几个相关概念的关系	15
2.2 装备保障工程的基本作用机理	16
2.3 装备保障工程的基本问题	18
2.4 装备保障工程理论与技术体系	19
2.5 装备保障工程技术体系的若干问题	22
2.6 本章小结	26
第 3 章 保障对象的任务系统模型及演化	27
3.1 任务系统定性定量描述	27
3.1.1 现有作战任务和作战行动参数分析	27
3.1.2 考虑装备保障的使用任务参数分析	28
3.1.3 面向装备保障的使用任务参数集合确定	34
3.1.4 几类典型使用任务的参数分析	35
3.2 任务系统模型与建模方法	38
3.2.1 任务系统的模型框架	38
3.2.2 任务层次结构模型	39
3.2.3 任务时序模型	42
3.2.4 任务逻辑关系模型	47

3.2.5	任务时间模型	51
3.2.6	任务量模型	53
3.2.7	任务完成概率模型	56
3.3	装备全寿命过程中任务模型的演化与应用	58
3.4	本章小结	60
第4章	保障对象系统的保障特性模型与演化	61
4.1	保障对象系统通用质量特性的定性定量描述	61
4.1.1	单一装备保障对象的 RMS 参数描述	61
4.1.2	装备基本作战单元保障对象系统的 RMS 参数描述	63
4.1.3	装备作战单元保障对象系统 RMS 参数描述	63
4.2	保障对象系统通用质量特性模型与建模方法	66
4.2.1	保障对象系统通用质量特性模型框架	66
4.2.2	单一装备保障对象 RMS 模型	67
4.2.3	最小任务单元保障对象系统 RMS 模型	68
4.2.4	装备作战单元保障对象系统 RMS 模型	73
4.2.5	单一装备保障对象的维修任务模型	77
4.2.6	最小任务单元保障对象系统维修任务量模型	79
4.3	装备全寿命过程保障对象系统保障特性模型的演化与应用	82
4.4	本章小结	84
第5章	保障系统模型与演化	85
5.1	保障系统的定性定量描述	85
5.2	保障系统模型与建模方法	85
5.2.1	保障系统的模型框架	85
5.2.2	保障系统的构成模型	87
5.2.3	保障系统的运行模型	96
5.2.4	维修任务分配模型	106
5.3	装备全寿命过程保障系统模型的演化与应用	112
5.4	本章小结	114
第6章	“三个系统”作用机理模型与演化	115
6.1	作用机理的定性定量描述	115
6.1.1	可靠性的概念与主要参数	116
6.1.2	维修性的概念与主要参数	119
6.1.3	保障系统的概念与主要参数	120
6.1.4	战备完好性与任务持续性概念及主要参数	120

6.1.5	常用的概率分布	123
6.2	作用机理模型与建模方法	123
6.2.1	一般概率分布下瞬时可用度模型与建模方法	124
6.2.2	复杂任务下任务可靠度模型与建模方法	137
6.3	作用机理的基本运行规律	143
6.3.1	时间趋于无穷瞬时可用度变化规律	144
6.3.2	$[0, T]$ 区间内瞬时可用度变化规律	158
6.4	全寿命过程作用机理模型的演化与应用	170
6.5	本章小结	172
第 7 章	“三个系统”相互作用波动规律	173
7.1	瞬时可用度波动现象	173
7.2	瞬时可用度波动的定量描述	174
7.2.1	示性函数	175
7.2.2	匹配系统和系统适应时间	176
7.2.3	可用度振幅和最小可用度的发生时刻	177
7.2.4	区间可用度	177
7.2.5	波动稳定速度参数	178
7.3	影响波动的因素分析	186
7.3.1	截尾离散 Weibull 分布	187
7.3.2	一般可修系统的瞬时可用度波动的分析	188
7.3.3	修理有延迟的可修系统的瞬时可用度波动的分析	198
7.3.4	考虑预防性维修的可修系统的瞬时可用度波动的分析	207
7.4	波动产生的机理	213
7.4.1	系统瞬时可用度波动机理解析分析	213
7.4.2	系统瞬时可用度波动机理数值分析	221
7.5	本章小结	229
第 8 章	装备保障工程全寿命实践的基本问题与方法	230
8.1	概述	230
8.2	稳态的问题	230
8.3	动态的问题	232
8.3.1	状态方程和约束条件	232
8.3.2	控制问题	233
8.4	动态示例问题	234
8.4.1	系统最小可用度振幅设计	235

8.4.2 系统最优匹配设计	236
8.4.3 仿真试验	236
8.5 本章小结	240
参考文献	241

第 1 章 绪 论

1.1 装备保障工程的地位与作用

装备保障工程是在装备全寿命过程中研究其战备完好与任务持续能力的形成与不断提高了理论与技术方法,其核心是研究装备使用、装备保障特性(如可靠性维修性保障性)与装备保障系统之间的相互作用以及装备保障特性、保障系统的形成与发展规律等问题。

装备保障工程的概念是 20 世纪 90 年代我国可靠性维修性保障性领域的专家在总结美军综合后勤保障以及装备保障特性工程发展历程的基础上,根据我国武器装备建设与军事斗争准备的需求,按照系统科学的思想创造性地提出的。经过 20 多年的发展实践证明,装备保障工程在武器装备建设与军事斗争准备过程中具有全局性、基础性、战略性和基础性的地位与作用。

装备保障特性和装备保障系统的属性是武器装备重要的战术技术指标,是武器装备全系统的固有设计属性,是影响装备整体性能技术指标发挥和保持的内在根本因素。在作战指挥中,装备保障特性和装备保障系统的属性是合理运用装备、实现作战目标的重要决策依据。例如,导弹的发射可靠度、飞行可靠度表征了导弹成功完成预定作战任务的可信程度;军用飞机的出动架次率、再次出动准备时间直接关系到投入作战飞机的种类和数量,因而保障特性是武器装备战斗力的“倍增器”。在装备保障指挥中,装备保障特性和装备保障系统的属性是确定装备保障预案,计算预测完成作战任务需携行装备、备品备件品种和数量,筹划维修和测试设备的数量,组织维修保障力量的决策依据,是做好装备技术保障工作的重要基础和依据。例如,平均故障间隔时间、平均修复时间、平均预防性维修时间、保障力量的运用方式等是决定装备

维修保障费用、影响维修保障力量的直接因素。因此,在未来信息化战争和军事斗争准备中,装备保障工程工作将直接作战和保障指挥行动,具有重要的战略性地位和作用。

当前,我军武器装备建设已从测绘仿制转向自主研制。装备建设以测绘仿制为主,装备质量建设的重点就是生产过程质量控制;装备建设以自主研制为主,装备质量建设的重点就是研制过程质量控制,而装备保障工程中的保障特性工程则是实施研制过程质量控制的核​​心。我军武器装备建设正从转机械化向信息化,在装备机械化建设中,建设的重点之一就是要提高单一装备的保障特性和保障能力,在装备信息化建设中,不仅要提高单一装备的保障特性,更要提高装备体系的保障特性和保障能力。在这一过程中,装备保障工程具有全局性的地位与作用。

装备保障特性工程能力是装备研制过程中装备保障特性形成的重要支撑,是装备研制单位承担装备研制任务的核心竞争力,也是国防科技工业技术基础能力的重要组成部分。装备的保障特性水平和保障能力是开展竞争、进行评价、实施监督、落实激励的重要依据。因此,在提升国防科技工业基础能力和加快部队装备作战能力和保障能力形成过程中,装备保障工程具有基础性的地位和作用。

装备保障工程基础理论围绕着装备战备完好与任务持续能力形成以及持续提高的规律认识,从单一属性和综合属性研究的角度出发,可以有两个层次:装备保障工程综合基础理论以及装备保障特性工程基础理论和装备保障系统基础理论。

装备保障工程综合基础理论主要研究任务系统、保障对象系统和保障系统之间的相互作用机理,以及上述三个系统对战备完好与任务持续能力以及保障费用与保障规模的影响,为研究对象域中各层次研究对象的战备完好与任务持续能力的设计、分析与评估及持续改进奠定理论基础。保障特性工程基础理论主要研究装备的故障“发生”(可靠性)、“发现”(测试性)的机理与规律、故障“恢复与预防”(维修性)过程的机理与规律、故障引发的事故“发生”与“控制”(安全性)的机理与规律以及“保障系统资源特性与装备的保障特性”相互作用(保障性)的机理与规律,为装备“好保障”奠定理论基础。保障系统基础理论主要研究装备保障物资资源、人力资源、信息资源、保障组织机构和保障法规制度

等要素的相互作用影响规律,为保障系统实施持续改进,提高运行效率,最大限度满足装备保障需求,确保装备“保障好”奠定理论基础。保障特性工程基础理论针对每个单一特性研究工作比较丰富,保障系统基础理论也有一定的研究,本书重点研究装备保障工程综合基础理论与方法。

1.2 装备保障工程的发展历程与发展趋势

1.2.1 国外发展历程与发展趋势

装备综合保障源于美军的综合后勤保障(Integrated Logistics Support)。美军的综合后勤保障来源于后勤保障(Logistics Support)。在第二次世界大战中,后勤保障问题并没有凸现出来。在第二次世界大战后,美军开始大量装备具有电子设备的装备。美军在朝鲜战争和越南战争中,装备的開箱合格率很低(电子设备大约只有50%),故障率高、备件需求量大,维修工作频繁。美国空军几乎有1/3的人员和1/3的维修经费用于维修,后勤保障问题十分突出。在寿命周期费用中,保障费用所占比重高达60%甚至70%~80%,并有不断增长的趋势,而装备战备完好性却很低,有些飞机能执行飞行的全任务率只有30%~40%。这期间美军的后勤保障负担很重,经过认真分析发现,大量的后勤保障问题是装备研制过程中存在的“先天缺陷”。因此,1964年6月,美国国防部首次颁布了指令性文件DoDI 4100.35《系统和设备的综合后勤保障要求》,明确规定要在装备设计中同步开展综合后勤保障的管理和技术活动。1968年,这个文件更改为DoDI 4100.35G《系统和设备的综合后勤保障的采办和管理》,提出了综合后勤保障的11个组成要素,其中包括综合后勤保障的3个管理要素和8个资源要素。初期的综合后勤保障主要强调整个保障体系结构的设计。为了推动综合后勤保障工作的开展,美国国防部于1973年颁布了MIL-STD-1388-1《后勤保障分析》和MIL-STD-1388-2《国防部对后勤保障分析记录的要求》两个重要的军用标准,规定了所有装备均应开展后勤保障分析工作。

1980年,美国国防部首次颁布了DoDD5000.39《系统和设备的综合后勤保障的采办和管理》,1983年又重新颁布该文件,突出了战备完好性要求,明确规定:“综合后勤保障的主要目标是以可以承受的寿命周期费用,实现武器系统的

战备完好性目标。”并全面规定了综合后勤保障的政策、程序、职责、组成部分以及采办个阶段的工作内容。这个文件的颁布标志着美军综合后勤保障进入了成熟阶段。

在此期间和之后,美国三军先后颁布了一系列有关综合后勤保障的指令性文件。1972年,美国空军颁布空军条例 AFR800-8《综合后勤保障工作要求》;1987年,美国海军颁布海军作战部长办公室指示(OPNAVINST)5000.49A《采办过程中的综合后勤保障》;1988年,美国陆军颁布陆军条例 AR700-127《综合后勤保障》。这些文件分别规定了各军兵种开展综合后勤保障工作的政策、程序和职责。

20世纪90年代,美国国防部在总结以往装备采办经验的基础上,于1991年颁布了新的采办文件 DoDD 5000.1《防务采办》和 DoDD 5000.2《防务采办管理政策》,将综合后勤保障作为采办的重要组成部分。由此确立了综合后勤保障已经成为整个装备系统采办不可分割的组成部分,主要体现如下:

(1) 将“系统”定义为不仅包括主装备,还包括使用和维修人员、保障基础设施以及其他保障资源组成的保障系统。

(2) 突出了与保障相关特性的地位,将“性能”重新定义为:“系统应具有作战和保障特性。系统的保障特性包括系统作战所必需的设计和保障两个方面的要求。”并规定:“性能指标中必须包括可靠性、维修性、保障性等关键要求。”

(3) 明确提出,贯彻综合后勤保障政策的目标是:“将保障要求有效地纳入系统设计”“在采办系统的同时,同步获得装备保障所需的保障系统,以便使部署的装备系统既是易保障的,也是可以得到保障的。”

(4) 明确将后勤保障分析(Logistics Support Analysis, LSA)作为系统工程组成部分。

(5) 有关综合后勤保障的政策、程序更加合理和明确,对装备研制中如何开展综合后勤保障工作给出了明确的规定。

1996年,美国国防部重新颁布 DoDD 5000.1《防务采办》和国防部条例 DoDD 5000.2-R《重大防务采办项目和重大自动化信息系统采办项目必须遵循的程序》,其中突出了“采办后勤”(Acquisition Logistics)的概念,以此进一步明确了综合后勤保障的地位以及实现综合后勤保障的途径。同时,规定在武器系统的整个采办过程中应当开展采办后勤的活动,以确保系统的设计和采办能够