

可靠性·维修性·保障性技术丛书 ⑨

丛书主编 王自力

RMS

保障性设计 分析与评价

Design, Analysis and Evaluation of Supportability

主编 马 麟

Reliability
Maintainability
Supportability



国防工业出版社
National Defense Industry Press

可靠性·维修性·保障性技术丛书

保障性设计分析与评价

Design, Analysis and Evaluation of Supportability

主 编 马 麟
副 主 编 郭霖瀚
编写组成员 肖波平 王乃超

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书根据复杂武器装备研制的保障性工程实践需求,系统地介绍了保障性设计、分析、评价的技术与方法,内容包括保障性的概念与要求、保障性系统工程过程、FMEA 与 DMECA 技术、以可靠性为中心的维修分析技术、修理级别分析技术、使用与维修工作分析技术、保障资源的确定方法、保障性试验与评价以及保障性设计分析与评价集成环境等。

《保障性设计分析与评价》可供从事型号研制的工程技术及管理人员阅读参考,亦可作为大专院校本科生和研究生的教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

保障性设计分析与评价/马麟主编. —北京:国防工业出版社,2012. 1

(可靠性·维修性·保障性技术丛书)

ISBN 978-7-118-07841-1

I. ①保... II. ①马... III. ①装备—保障—技术
IV. ①TJ01

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 251339 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)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 16 $\frac{3}{4}$ 字数 296 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 46.00 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

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》 编辑委员会

主任委员 王自力

副主任委员 康 锐 屠庆慈

委 员 (按姓氏笔划排序)

于永利	马 麟	石君友	田 仲	付桂翠
吕 川	吕明华	朱小东	刘 斌	刘春和
阮 镰	孙有朝	孙宇锋	李建军	宋晓秋
陆民燕	陈 新	罗汉生	金惠华	房祥忠
赵 宇	赵廷弟	姜同敏	章国栋	曾天翔
曾声奎	曾曼成	徐居明	戴慈庄	

1995年,国防科技及教育界著名专家杨为民教授组织编辑出版了国内第一套《可靠性·维修性·保障性丛书》,对推动武器装备质量观念的转变,提高武器装备的可靠性、维修性、保障性水平,发挥了重要的推动作用。

15年后的今天,树立现代质量观,持续提高可靠性、维修性、保障性水平,已成为武器装备建设与国防科技发展中的共识,特别是《武器装备质量管理条例》的颁布实施,表明可靠性、维修性、保障性在现代质量观中具有战略性、全局性和基础性的地位和作用,高可靠、长寿命、好维修、易测试、能保障、保安全已成为武器装备研制、生产和使用中的普遍要求,可靠性、维修性、保障性工程活动已全面进入武器装备寿命周期各阶段,为提高武器装备的效能、降低寿命周期费用发挥了不可替代的作用。

在上述背景下,在武器装备建设与国防科技发展中,无论在技术上还是在管理上,都对可靠性、维修性、保障性提出了更高的要求。为适应这种新形势,我们组织有关专家重新编辑出版了这套《可靠性·维修性·保障性技术丛书》,共12册,以满足广大工程技术和管理人员的迫切需求。

本套丛书认真总结了15年来国内外武器装备可靠性、维修性、保障性最新实践经验,全面吸收了我国在预先研究和技术基础研究领域中的取得的主要研究成果,从装备、系统、设备、元器件等多个产品层次和硬件、软件等不同产品类别,可靠性、维修性、测试性、保障性、安全性等多种质量特性,以及论证、研制、生产和使用与保障等寿命周期各阶段,全方位地论述了相关领域的基本概念、技术方法、实践经验及发展方向,具有系统性、实用性和前瞻性,从而有助于读者全面、系统地了解 and 掌握该项技术的全貌。本套丛书中阐述的可靠

性、维修性、保障性理论与技术,对武器装备和一般民用工业产品均具有普遍的适用性。

《可靠性·维修性·保障性技术丛书》是一套理论与工程实践并重的著作,它不仅可以为广大工程技术和管理人员提供有用的指导和参考,也可作为有关工程专业本科生、研究生的教学参考书。我们相信,这套丛书的出版,对我国武器装备可靠性、维修性、保障性工程的全面深入发展将起到重要的推动和促进作用。

丛书编辑委员会

2010年12月

自国外综合保障(ILS)的概念引入国内以来,经过相关学者与工程技术人员的研究、推广与应用,已经取得了明显的效果。从20世纪90年代起,我国相继颁布了GJB 1371、GJB 2961、GJB 3837、GJB 3872等国家军用标准,为在装备研制过程中开展综合保障工作奠定了较好的基础。某型飞机作为我国著名的三代战机,是较早在研制阶段开展综合保障工作的装备之一,其保障性水平较以往的二代战机有显著的提高,战备完好性水平大幅上升,深受航空兵部队的欢迎。

在国防武器装备建设领域,对保障性的认识不断深化,装备与保障系统同步研制的理念已经深入人心。但与此同时,伴随着科学技术的不断发展,武器装备的功能与复杂性与日俱增,对如何在装备研制中做好保障性设计工作、提高新装备的保障能力带来了新的挑战。在取得成绩的同时,我们也应该看到差距。例如ALS(自主后勤保障)已在美国F-35战斗机得以实现,成为装备研制保障性水平的新标杆;而与之相比,我们在技术储备、应用基础上还有不少的差距。在当前装备研制的综合保障工作过程中,一定程度上还存在着保障性设计分析工作内容不清晰、保障性设计分析流程不详细等问题,制约了装备保障性水平的提高。

为此,编者在总结国内近年来保障性设计分析技术的应用经验与相关研究成果的基础上编写了本书。与其他综合保障书籍有所区别,本书主要介绍装备研制中保障性的设计、分析与评价技术与方法,其特色包括:

(1) 深入地探讨了装备的自身保障设计特性与保障系统的关系,对保障性的概念给出了清晰的说明。

(2) 提出了保障系统的“功能—资源—组织”的三维结构,对据此保障系统规划设计的内涵进行了阐述。

(3) 介绍了保障性系统工程过程,说明了保障性各分析工作项目之间的逻辑关系,并对相应的保障性设计分析技术进行了描述。

(4) 突出了面向保障性的 FMEA、RCMA、LORA、O&MTA 以及保障资源预测、保障性分析评价等方法的介绍,以方便工程技术人员应用参考。

(5) 介绍了装备保障性设计分析与评价的集成环境以及相应的案例。

本书可供从事型号研制的工程技术及管理人员阅读参考,亦可作为大专院校本科生和研究生的教学参考书。

本书的各章节分别由以下人员编写:马麟(第 1、2、3、4 章),郭霖瀚(第 5、9 章),肖波平(第 6、10 章),王乃超(第 7、8 章),全书由马麟负责统编。

本书由军械工程学院于永利教授、北京航空航天大学康锐教授任主审,并经陈新、曾天翔、屠庆慈等专家审查。在此对为本书付出了大量辛勤劳动的专家表示衷心的感谢。博士研究生刘瑞、文佳、黄兆东等为本书的编写提供了素材,硕士研究生龚莹莹、李磊、曹智胜、王亚兰、高龙、杨清伟、夏聪、周岩、王恺、王倩等为本书的排版、校对做了很多的工作。本书在写作过程中还引用了不少国内外的研究成果,已在参考文献处进行了标识,这里也一并致谢。

由于编者的知识与经验有限,书中的不足或错误之处在所难免。根据编者的研究与认识,在本书中提出了一些新的概念与思路,其是否准确、适用还待实践检验。这里我们抛砖引玉,真诚地希望读者能够提出宝贵的意见,使我们能够及时地进行本书的修改完善。

作者

2011 年 9 月

第1章 绪论	1
1.1 装备保障问题的提出	1
1.2 国内外保障性技术的发展	5
1.2.1 国外保障性技术的发展	5
1.2.2 国内保障性技术的发展	9
1.3 装备保障性技术的构成	9
第2章 保障性的概念与要求	11
2.1 保障性	11
2.1.1 保障性的定义	11
2.1.2 保障性与综合保障	12
2.1.3 装备的保障设计特性	12
2.1.4 计划的保障资源	16
2.2 保障系统与保障方案	19
2.2.1 保障系统	19
2.2.2 保障方案	28
2.3 保障性要求	35
2.3.1 综合要求	37
2.3.2 装备保障设计特性要求	40
2.3.3 保障系统要求	41
2.3.4 保障要素层要求	43
2.4 基准比较分析方法	46
2.4.1 概述	46
2.4.2 基准比较系统	46
2.4.3 基准比较系统的建立	47
第3章 保障性系统工程过程	49
3.1 系统工程	49

3.1.1	系统的概念	49
3.1.2	系统工程的起源	50
3.1.3	系统工程的特征	51
3.1.4	系统工程的主要思想与方法论模型	52
3.2	工程系统工程	55
3.3	系统工程过程	56
3.3.1	系统工程过程的主要内容	57
3.3.2	系统寿命周期的系统工程过程活动	58
3.4	系统工程过程中的保障性工程活动	63
3.4.1	保障性工程活动框架	63
3.4.2	保障性工程活动中的技术方法	66
第4章	FMEA 与 DMECA 技术	75
4.1	概述	75
4.1.1	FMEA	75
4.1.2	DMECA	75
4.2	面向保障性的 FMEA 技术	76
4.2.1	面向保障性的 FMEA 技术的作用	76
4.2.2	面向保障性的 FMEA 实施过程	76
4.2.3	面向保障性的 FMEA 注意事项	79
4.3	DMECA 技术	80
4.3.1	DMEA 的基本概念	80
4.3.2	DMEA 的应用范围	82
4.3.3	DMEA 研究的主要内容	83
4.3.4	DMEA 的分析重点	83
4.3.5	DMEA 的步骤与实施	88
4.3.6	危害性分析(CA)	92
4.3.7	DMECA 的要点	95
4.3.8	应用案例——某型飞机发动机系统 DMECA	96
第5章	以可靠性为中心的维修分析技术	101
5.1	概述	101
5.1.1	RCMA 的目的	101
5.1.2	RCMA 的基本原理	101
5.1.3	RCMA 的范围	106
5.2	RCMA 实施流程	106

5.2.1	确定重要功能产品(FSI)	107
5.2.2	对预防性维修工作进行逻辑决断	109
5.2.3	预防维修间隔期的确定	115
5.2.4	预防性维修工作的维修级别	118
5.2.5	非重要功能产品的预防性维修工作	118
5.2.6	维修间隔期探索	119
5.2.7	填写系统和设备 RCMA 表格	119
5.3	RCM 任务的确定	124
5.3.1	维修任务的汇总	124
5.3.2	维修工作的组合	124
5.3.3	RCMA 大纲	125
5.4	RCMA 的要点	126
5.4.1	方法的剪裁	126
5.4.2	重要功能产品选择的层次	126
5.4.3	隐蔽功能故障与明显功能故障的划分	126
5.4.4	明显功能故障安全性影响的确定	127
5.4.5	操作人员监控、功能检测工作的适用性	127
5.5	RCMA 应用示例	128
第6章	修理级别分析技术	134
6.1	概述	134
6.1.1	LORA 的作用	134
6.1.2	LORA 相关概念	134
6.2	LORA 方法	137
6.2.1	LORA 的步骤及实施	137
6.2.2	输出 LORA 报告	144
6.2.3	LORA 注意事项	146
6.3	应用案例	146
6.3.1	案例1 某型飞机无线电高度表的修理级别确定	146
6.3.2	案例2 某型舰减速设备的 LORA	148
6.3.3	案例3 某型军用飞机控制组件 LORA	149
第7章	使用与维修工作分析技术	153
7.1	概述	153
7.2	维修工作分析过程	154
7.2.1	确定维修工作任务	155

7.2.2	细化维修工作任务	158
7.2.3	确定维修作业间的逻辑关系	159
7.2.4	确定维修作业时间	160
7.2.5	确定维修资源需求	165
7.3	使用工作项目的确定	166
7.4	O&MTA 注意事项	167
第 8 章	保障资源的确定方法	169
8.1	概述	169
8.2	保障资源确定流程	169
8.3	保障资源确定的模型	171
8.3.1	选择目标参数	171
8.3.2	确定约束条件	172
8.3.3	建立目标函数	173
8.3.4	选择求解方法	175
8.4	备件需求的确定方法	176
8.4.1	备件种类及特性	176
8.4.2	备件供应过程	177
8.4.3	备件需求分析	178
8.4.4	战时备件需求分析	183
8.5	保障设备需求的确定方法	185
8.5.1	保障设备的分类	185
8.5.2	保障设备的需求	186
8.5.3	保障设备数量确定	186
8.5.4	研制保障设备	188
8.5.5	保障设备的保障	188
8.6	人力与人员需求的确定方法	190
8.6.1	人力人员的分类	190
8.6.2	人力人员数量、技术专业和技术等级要求	190
8.6.3	人员的来源	193
8.7	保障设施需求的确定方法	193
8.7.1	保障设施的类型	194
8.7.2	设施要求	195
第 9 章	保障性试验与评价	197
9.1	概述	197

9.2 单一保障资源要素的试验与评价	198
9.2.1 单一保障资源试验与评价的内容	198
9.2.2 试验类型与评价的方法	199
9.2.3 案例	201
9.3 保障活动的试验与评价	203
9.3.1 保障活动试验与评价的内容	203
9.3.2 保障活动试验与评价方法	204
9.3.3 典型保障活动试验与评价示例	216
9.3.4 注意事项	218
9.4 保障性综合要求的试验与评价	218
9.4.1 保障性综合要求评价的内容	218
9.4.2 综合要求的评价方法	220
9.4.3 注意事项	230
第10章 保障性设计分析与评价集成环境	231
10.1 集成环境概述	231
10.2 集成环境的结构	231
10.2.1 集成环境的结构层次	231
10.2.2 集成环境的工具组成	232
10.2.3 集成环境的特点	234
10.3 集成环境的数据模型	235
10.3.1 目的与特点	235
10.3.2 集成环境信息分类	236
10.3.3 集成环境的数据流	237
10.4 集成环境的应用案例	239
10.4.1 某型导弹保障对象建模	239
10.4.2 某型导弹典型使用任务建模	242
10.4.3 某型导弹保障系统建模	244
10.4.4 某型导弹保障资源预测	249
10.4.5 某型导弹保障方案分析	249
10.4.6 某型导弹保障方案评价	250
参考文献	252

第 1 章 绪 论

1.1 装备保障问题的提出

19 世纪的军事理论家约米尔称保障(Logistics)为“军队运动的实际艺术”。对历史上发生的战争研究会发现,战争的胜负不但取决于作战双方的兵力、兵器、战术、情报以及战场,还取决于一个军事史学家容易忽略的事实,即保障物资器材的需求量、补给品的现有量、保障组织的构成及管理、保障资源的配置及运输情况等。

我国古代史《南皮县志·风土志下·歌谣》中就有“兵马不动,粮草先行”的说法。《孙子兵法》中说“兵法,一曰度,二曰量,三曰数,四曰称,五曰胜。地生并,度生量,量生数,数生称,称生胜。”这句话里的“数”指的就是作战双方的装备数量及其保障资源的数量。这说明了战争中装备的保障问题自古以来就被军事家们所重视,作为决定战争胜负的重要影响因素之一。

在以使用热武器为主的近代战争中,装备保障的地位更加突出。第一次世界大战中,德军施里芬计划从 1897 年初稿至 1905 年定稿花了 7 年时间,但其中主要考虑的是战略因素,而丝毫没有考虑武器装备的保障因素,将保障资源特别是油料和弹药部署在远离主战场的铁路沿线,其计划如图 1-1 所示。随着战场的推进,部队的保障出现严重的问题,导致了德军马恩河战役的失败。

如果说冷兵器时代作战的保障主要集中于供应、作战、后勤方面,热武器时代的保障工作内容随着装备本身的复杂化变得更加丰富,装备的使用与维护保障的地位更加突出。第二次世界大战中,北非战场的隆美尔在 1941 年—1942 年之间遇到的困难,很大程度上也是由于装备的保障问题导致的。一方面,德军的装甲车辆在设计过程中没有预料到沙漠作战需要对装备的散热和防尘进行考虑,导致了德军的装甲车辆容易由于发动机过热而停车,其寿命由 1400 英里~1600 英里减少到 300 英里~900 英里。另一方面由于德军的装备在设计过程中没有考虑零部件的标准化,致使其在使用过程中维修保障工作的开展特别困难。

第二次世界大战之后,战争的特点发生巨大的变化,现代战争呈现出“海、陆、空、天、信息”多维一体化的趋势,产生了众多的新特点:超视距精确打击、战

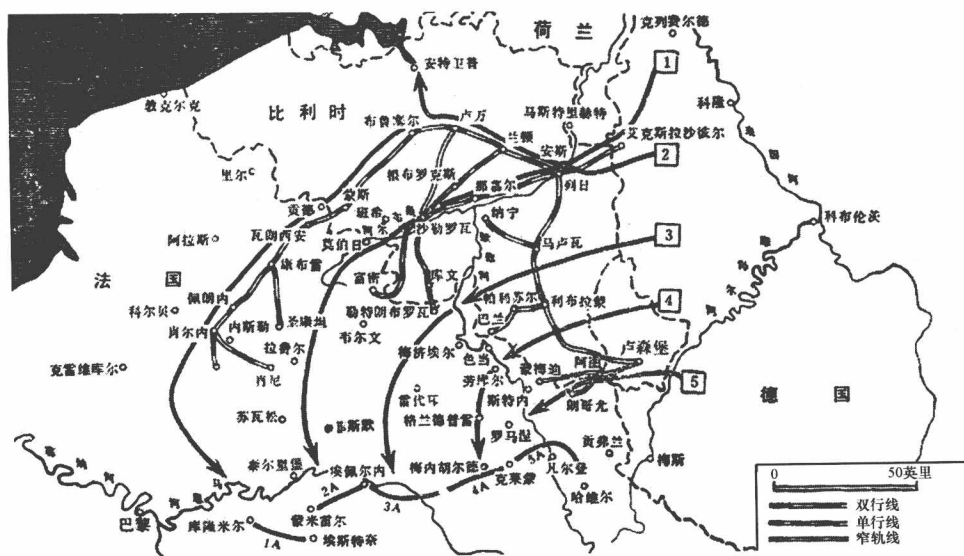


图 1-1 第一次世界大战中施里芬计划的实施示意图

争空间的立体化非线性、战斗的非直接触性、战场的界限模糊等。为了满足激烈的军事对抗需求,世界各国都大力推进自身武器装备的发展,许多高新技术被大量应用于军事装备,使得现代化的武器装备集机械、电子、信息科学等高新技术为一体,武器装备的复杂程度和高新技术密集程度成倍增加,装备保障问题日益严重。装备是否能够快速形成战斗力并长期保持较高的战斗力变得更加依赖于武器装备的保障。一方面,武器装备性能的提高使得现代化战争变得异常激烈,导致了武器装备的战损率大为增加。另一方面,武器装备性能的发挥更加依赖于装备保障能力。20 世纪 80 年代以来发生的几场高技术局部战争表明,现代战争已不单是战争双方单一装备之间对抗,而是作战体系之间的全面对抗,其中装备的保障已经是战争对抗中重要的组成部分。即使武器装备性能很先进,如果不能形成装备体系整体的保障能力和作战能力,也不能有效地赢得战争的胜利。

随着技术的发展,装备在功能、性能得到显著提升的同时,对保障能力的需求也急剧增加。当前,装备的保障问题主要体现在如下方面。

(1) 装备寿命周期费用急剧增加,装备保障经济性问题突出。随着装备性能的提高、复杂程度的增加,装备的采购费用急剧增加。以美军为例,20 世纪 60 年代的 F-4 战斗机采购价格为 20 万美元,在 20 世纪 90 年代一架 F-15 战斗机的造价约为 3000 万美元,而当前的 F-22 的采购费用高达 1.3 亿美元。同时,装备的保障费用,特别是战时装备保障费用也急剧增长。美国国防部的数据

显示,在1960年—1995年期间,军费预算基本不变,但是使用与保障的费用以每年3%的速度保持增长。据报道,一架F/A-18飞机每小时飞行维护费用约为5000美元;一艘“尼米兹”级航空母舰服役30年保障费用约为111亿美元,舰上90架两代舰载机的采购和维护费用约为198亿美元,导弹驱逐舰、导弹巡洋舰等护航舰艇的保障费用为67亿美元,油、水和食物的费用为55亿美元,即一艘“尼米兹”级航空母舰全寿命周期的费用高达430多亿美元。有资料显示一艘“尼米兹”级航空母舰年平均运行费中,人员费用约占57%,燃料保障费用约占23%,备件、消耗品及训练保障费用约占20%。

(2) 现代战争中武器装备的对抗愈加激烈,武器装备出动强度大幅提升,需要及时地开展装备的保障工作。现代战争的激烈对抗,要求武器装备在任务期间保持较高的出动强度。1999年北约对科索沃进行了历时78天的空袭,动用了包括F-117、F-15、F-16、B-2、B-52等在内的1150架飞机,总共出动36000余架次,平均每天出动460架次。在2003年的伊拉克战争中,以美国为首的联军飞机共出动各类飞机1801架,共出动41780架次,特别是战争的前5天,美英联军飞机累计出动5700架次,而日出动架次呈逐渐增长的趋势,最高日出动约2000架次。

现代化武器装备的复杂程度大幅度增加,如果装备设计过程中缺乏对装备维修、保障的考虑,容易出现装备故障率高、装备维修保养频繁、等待备件时间过长等问题,导致装备的战备完好性下滑。在F-15A型飞机装备部队时,每架飞机平均出动飞行一个架次需要维修15h,其中约20%的时间用于等待故障件的备件,30%的时间处于维修状态,其串件率高达56.5%。在F-111D飞机装备部队时,其平均故障间隔飞行小时仅为0.2h,能执行任务率仅为34.4%。

(3) 现代战争中武器装备种类繁多,装备保障任务艰巨,需要精确、高效地开展装备保障工作。现代战争中大量高端武器应用于战场,装备保障任务量呈几何级数增长,单位时间内装备保障的资源需求不减反增。以伊拉克战争为例,美陆、海、空军和海军陆战队日消耗油量逾5万t,其中仅2个“阿帕奇”直升机营昼夜间消耗油量就高达180t。据美国会预算官员称,1个2万人的师在战时每天需要消耗2000t各类物资,数量十分惊人。

与此同时,装备保障工作的复杂程度随着装备的复杂程度急剧增加。美军“尼米兹”级“林肯”号(CVN72)航空母舰上的维修保障工作有时需要大量的维修保障人员共同完成,如图1-2所示。而且在舰载机的保障过程中,有时保障资源需要在回收区、起飞区、停机区、加油区、武器装载区、维修区等区域间来回调度以完成各项保障工作,保障效率较为低下。

在我国亚丁湾护航任务中,需要对“微山湖”舰提供长达239天护航保障。



图 1-2 “林肯”号航空母舰保障工作繁重

由于装备使用强度大、使用环境复杂,对装备本身的保障工作带来了极大的考验。在此过程中,累积进行修复性维修保障工作 116 次,同时每周还要进行半天的预防性维修保障工作。有的学者指出,在未来海战中,按每艘作战舰船(不含登陆舰船)在作战期内(约 50 天)可能进行三四次海上应急抢修计算,海上装备修理量将超过 1000 艘次;按登陆舰船每次往返将有 10% 的舰船需要修理计算,则经过七八次往返后,总修理量也将超过 1000 艘次。

(4) 现代战争节奏的加快,要求在战场快速、有效地部署装备的保障资源,形成保障能力。随着装备复杂程度的增加,保障资源的数量和种类也随之增多。但现代战争节奏的加快,要求装备具有较高的部署机动性。美军部署一个 F-15A 战斗机中队(24 架飞机)约需要 15 架~18 架 C-141B 运输机来运载各种保障资源,包括保障设备、备件、人力人员、资料等;其中仅航空电子设备维修车间就需要五六架 C-141B 飞机来运输。而在 F-22 研制过程中对装备的保障进行了分析和设计,其使用保障工作简便,所以在 30 天内部署 24 架 F-22 战斗机平均需要 C-141B 运输机 6.2 架。在我军亚丁湾护航过程中,仅“微山湖”号补给舰连续执行的两批保障任务就运输保障资源达 50 余次,保障资源总重量达 2 万余 t。

综上,在装备的研制过程中不但要考虑武器装备的性能技术指标,还要充分重视各类武器装备的保障问题,在装备的研制过程中推行综合保障工程,开展保障性设计分析工作,以确保完成装备规定的使用任务,为赢得战争的胜利打下坚实的基础。