



国防科技图书出版基金

导弹武器系统可用度 评估、优化与预测方法

Availability Evaluation, Optimization and
Prediction Methods of the Missile Weapon System

徐廷学 杨继坤 奚文骏 著



国防工业出版社
National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

导弹武器系统可用度 评估、优化与预测方法

**Availability Evaluation, Optimization and Prediction
Methods of the Missile Weapon System**

徐廷学 杨继坤 奚文骏 著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

导弹武器系统可用度评估、优化与预测方法/徐延学,杨继坤,奚文骏著. —北京:国防工业出版社,2017.1

ISBN 978-7-118-10946-7

I. ①导… II. ①徐… ②杨… ③奚… III. ①导弹—武器系统—测试技术 IV. ①TJ760.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 225953 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 710×1000 1/16 印张 12 字数 235 千字

2017 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 72.00 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

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分,又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,加强社会主义物质文明和精神文明建设,培养优秀科技人才,确保国防科技优秀图书的出版,原国防科工委于1988年初决定每年拨出专款,设立国防科技图书出版基金,成立评审委员会,扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是:

1. 在国防科学技术领域中,学术水平高,内容有创见,在学科上居领先地位的基础科学理论图书;在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖,内容具体、实用,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,负责掌握出版基金的使用方向,评审受理的图书选题,决定资助的图书选题和资助金额,以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书,由总装备部国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承担着记载和弘扬这些成就,积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下,原国防科工委率先设立出版基金,扶持出版科技图书,这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物,是对出版工作的一项改革。因而,评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进,这样,才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技和武器装备建设战线广大科技工作者、专家、教授,以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来,为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗!

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第七届评审委员会组成人员

主任委员	潘银喜			
副主任委员	吴有生	傅兴男	杨崇新	
秘书长	杨崇新			
副秘书长	邢海鹰	谢晓阳		
委 员	才鸿年	马伟明	王小谟	王群书
(按姓氏笔画排序)	甘茂治	甘晓华	卢秉恒	巩水利
	刘泽金	孙秀冬	芮筱亭	李言荣
	李德仁	李德毅	杨 伟	肖志力
	吴宏鑫	张文栋	张信威	陆 军
	陈良惠	房建成	赵万生	赵凤起
	郭云飞	唐志共	陶西平	韩祖南
	傅惠民	魏炳波		

前 言

随着数字技术、微电子技术、精确制导技术和隐形技术等高新技术被广泛地应用,导弹武器系统在结构原理、操作使用、战技性能和杀伤效果等方面日趋智能化、自动化和综合一体化。但是,由于科技含量的提高,导弹武器系统在使用、维修、运输、储存、技术支持等活动中的可用性问题的日益突出。武器配套率低、保障体制关系不顺、理论研究与实际脱节等因素对现有导弹武器系统的可用性有很大的影响。因此,如何设计和保障具有高可靠性和高可用性的导弹武器系统成为研究热点。

一种新装备投入使用后,对使用者来说,在任务期间装备是否时刻处于正常工作状态,能否随时投入使用是十分重要的。装备在执行任务时无故障或少故障,即使出现故障也能很快地排除,这种特性被称为可用性,其概率度量称为可用度(Availability)。其分析过程是在系统级上对各种保障性函数的综合,期望结果是战斗人员提供更大能力的投入作战的系统,并尽可能地增强保障能力。

作为可靠性、维修性和保障性的综合,可用性的重要作用已被广泛认同,虽然提出了相关概念,但研究多集中在固有可用度,具体分为:设计指标的优化分配、维修保障策略优化、保障体制优化及它们的综合,对使用可用度建模、仿真与优化技术的研究还很少,更不必说结合具体的武器系统。在使用可用度的研究中,装备研制和使用部门长期关心的是系统的稳态可用度和平均使用可用度,这样一来很多瞬时可用度问题都被人为地忽略了,严重影响了这些部门对装备可用程度的认识,以及对这些高技术复杂武器系统作战能力的评价。传统的可用度统计方法,要求大量的部队实际作战演练数据,这样做既浪费人力物力也不切实际,必须寻求一种新的研究思路来解决这个迫切的问题。

本书从作战任务需求出发,运用装备系统工程、综合保障、智能评估的理论与方法,结合我国装备发展建设的工程实践经验,汲取国内外装备可用性工程理论研究的最新成果,深入研究了导弹武器系统可用度评估、优化与预测方法,提出了对系统可用度的改进措施。

本书共分7章。

第1章绪论。介绍本书著述背景、目的及意义,分析国内外装备可用度研究现状

及建模与优化方法,阐明本书的核心内容与侧重点。

第2章典型导弹武器系统及其可用度分析。在系统分析典型导弹武器系统组成、特点、工作过程以及维修保障要素的基础上,阐述系统可用性内涵,明确选取使用可用度为主要研究对象,提出导弹武器系统可用度的定义,规划装备使用时间序列图,建立基本数学模型,分析影响可用度的主要因素,研究数据收集与预处理方法。为适应精确保障的需要,综合考虑任务阶段与关键设备两方面因素,建立导弹武器系统可用度评估指标体系,并进行合理性验证与适应性分析。

第3章考虑维修保障约束的可用度解析评估方法。针对单一系统的可用度评估的不足,提出考虑维修保障约束的可用度解析评估方法,综合运用更新理论、马尔可夫过程和模糊贝叶斯方法,分别从时间分布与战损、预防性维修、资源、统计数据约束等角度建立可用度评估模型。

第4章基于SEBS的可用度仿真评估方法。面向分队级的可用度仿真评估需求,分析离散事件仿真基本理论与方法在文中的应用,提出体系—实体—行为—状态(System-of-system, Entity, Behavior, State, SEBS)分层组合的描述方法,即SEBS仿真建模方法。结合测试—使用—维修—保障(TOMS)试验空间串联分割理念,构建可用度建模与仿真一体化框架。

第5章基于仿真的可用度波动分析与优化方法。针对系统瞬时可用度的波动问题,分析波动产生的内在机理和规律,提出一组以最小可用度及其发生时刻、可用度振幅为核心的波动刻画参数,并利用这组参数,研究分系统平均故障间隔时间(MTBF)、平均修复时间(MTTR)、平均保障延误时间(MLDT)的变化对瞬时可用度波动的影响。

第6章基于PSO_RBFNN和FAR模型的可用度预测方法。构建导弹武器系统可用度的时间序列,阐述预测行为重要性和方法可行性,描述数据的预处理过程,提出基于经粒子群训练的径向基神经网络(PSO-Radial Basis Function Neural Network, PSO_RBFNN)和函数系数自回归模型(Functional-Coefficient Auto Regressive Model, FAR)的可用度组合预测方法。

第7章可用度综合仿真评估系统构建及应用。构建系统的总体框架、基础数据库以及功能模块,应用云模型从定性和定量相结合的角度,对仿真系统的可信度做出评价。以典型导弹武器系统为应用实例,验证本书所提出的理论、方法及所构建系统的可行性、正确性和有效性。

本书作者自20世纪90年代开始参与装备综合保障国家军用标准的编制工作,多年来在装备综合保障工程、可用性工程理论与应用研究方面取得大量成果。本书集成了作者近20年对装备可用度评估、优化与预测的研究成果和近年来国内

外相关学者的研究精华,是当前国内外仅有的一本全面、系统阐述导弹武器系统可用度评估、优化与预测方法的专著。本书的出版对装备可用性工程理论的发展,对我军装备综合保障工作和民用设备保障工作的开展等都具有重要的理论价值和指导作用。

本书开展的研究得到了原总装备部军内科研项目的资助。

由于作者水平所限,书中难免有疏漏或不当之处,恳请读者批评指正。

作 者

2016年3月于烟台

目 录

第1章 绪论	1
1.1 导弹武器系统可用度的基本概念	1
1.2 导弹武器系统可用度的意义和作用	1
1.3 装备系统可用度评估、优化与预测研究现状	3
1.3.1 可用度发展历程	3
1.3.2 可用度评估模型建立	6
1.3.3 可用度优化设计	9
1.3.4 可用度预测方法	11
1.3.5 可用度仿真技术	12
1.4 本书主要内容	13
1.4.1 本书的核心与侧重点	13
1.4.2 方法的通用性	14
第2章 典型导弹武器系统及其可用度分析	15
2.1 典型导弹武器系统分析	15
2.1.1 导弹武器系统特点	15
2.1.2 导弹武器系统组成	16
2.1.3 导弹武器系统寿命剖面与故障判据	17
2.1.4 导弹武器系统维修保养要素	17
2.2 导弹武器系统可用度分析	19
2.2.1 参数选取与定义	19
2.2.2 影响因素界定	23
2.2.3 基本数学模型分析	24
2.2.4 装备使用时间序列图规划	25
2.3 数据收集与预处理	27
2.3.1 数据收集	27
2.3.2 数据预处理	27
2.4 评估指标体系构建与验证	28
2.4.1 指标体系构建准则与流程	28
2.4.2 可用度评估指标体系构建	29

2.4.3	指标体系的验证与分析	31
第3章	考虑维修保障约束的可用度解析评估方法	34
3.1	时间分布与部分战损约束下的可用度评估方法	34
3.1.1	预备知识	34
3.1.2	问题描述与假设	36
3.1.3	基于更新过程的可用度评估模型	37
3.1.4	案例分析	40
3.2	考虑预防性维修的可用度评估方法	41
3.2.1	马尔可夫更新过程	41
3.2.2	问题描述与假设	42
3.2.3	基于马尔可夫更新过程的可用度评估模型	42
3.2.4	案例分析	43
3.3	资源约束条件下的可用度评估方法	44
3.3.1	问题描述与假设	44
3.3.2	寿命服从指数分布的可用度评估模型	45
3.3.3	寿命服从一般分布的可用度评估模型	47
3.3.4	案例分析	50
3.4	统计数据不确定条件下的可用度评估方法	51
3.4.1	预备知识	52
3.4.2	问题描述与假设	53
3.4.3	基于模糊贝叶斯的可用度评估模型	54
3.4.4	案例分析	57
第4章	基于 SEBS 的可用度仿真评估方法	60
4.1	仿真评估的总体构想	60
4.1.1	离散事件仿真基本理论与方法	60
4.1.2	SEBS 分层组合的基本思想	67
4.1.3	TOMS 的试验空间串联分割方法	68
4.1.4	可用度 M&S 一体化框架	69
4.2	体系组织集成建模方法	70
4.2.1	基于想定的任务建模	70
4.2.2	基于 IDEF0 的功能建模	72
4.2.3	基于多视图的保障组织建模	79
4.3	实体模型的构建方法	85
4.3.1	实体建模要素分析	86

4.3.2	实体模型的应用类型	86
4.3.3	变结构实体模型的描述	87
4.4	以可用度为中心的维修保障行为建模方法	88
4.4.1	保障行为建模的目的和方法	88
4.4.2	基于认知过程的人员行为模型	89
4.4.3	作战流程的网络模型	91
4.4.4	维修保障事件调度模型	92
4.4.5	转运生存能力分析	97
4.5	基于故障战损的状态建模方法	100
4.5.1	状态的映射和事件收发	100
4.5.2	状态空间建模	101
4.6	仿真模型的调度算法	104
4.6.1	总仿真器算法描述	104
4.6.2	体系、实体、行为仿真器算法描述	105
4.6.3	指标仿真统计算法	106
第5章	基于仿真的可用度波动分析与优化方法	108
5.1	瞬时可用度波动问题	108
5.1.1	波动问题的提出	108
5.1.2	波动刻画参数描述	109
5.2	波动不确定性分析	110
5.2.1	寿命参数变化对波动的影响	110
5.2.2	修复时间参数变化对波动的影响	112
5.2.3	保障延误参数变化对波动的影响	113
5.2.4	预防性维修周期变化对波动的影响	114
5.3	可用度优化算法	114
5.3.1	算法的比较与选取	114
5.3.2	仿真 PSO 算法设计	116
5.3.3	算例与应用	117
第6章	基于 PSO_RBFNN 和 FAR 模型的可用度预测方法	122
6.1	时间序列构建与预测原理	122
6.1.1	可用度时间序列分析	122
6.1.2	数据预处理	123
6.1.3	组合预测原理	124
6.2	时间序列的分解算法	125

6.2.1	奇异值分解滤波算法	125
6.2.2	滤波门限算法	126
6.3	基于 PSO_RBFNN 的可用度趋势成分预测方法	126
6.3.1	可用度趋势成分 RBFNN 模型构建	126
6.3.2	基于收缩因子的 PSO 算法改进	127
6.3.3	预测方法步骤	127
6.4	基于 FAR 的可用度随机成分预测方法	128
6.4.1	可用度随机成分 FAR 模型构建	128
6.4.2	函数系数求解方法	128
6.4.3	结点与模型的选择	129
6.5	案例分析	130
第 7 章	可用度综合仿真评估系统构建及应用	132
7.1	可用度综合仿真评估系统构建	132
7.1.1	总体结构	132
7.1.2	基础数据库	133
7.1.3	功能模块	136
7.1.4	系统实现	137
7.2	仿真系统可信度评估方法	140
7.2.1	可信度评估的指标体系	140
7.2.2	云模型及其数字特征分析	141
7.2.3	构建指标权重云模型	141
7.2.4	可信度结果云化及综合	144
7.2.5	MWSAIESS 可信度分析	144
7.3	仿真评估应用案例分析	146
7.3.1	作战想定编成	146
7.3.2	仿真输入输出参数	146
7.3.3	仿真运行	147
7.3.4	敏感性分析	155
7.3.5	故障现象与成因分析	156
7.3.6	改进措施及建议	157
附录	仿真中常用的随机分布	159
参考文献		161

Contents

Chapter 1 Introduction	1
1.1 Basic concept of missile weapon system	1
1.2 Significance and action of missile weapon system availability	1
1.3 Research status on materiel system availability evaluation, optimization and prediction	3
1.3.1 Development of availability	3
1.3.2 Availability evaluation modeling	6
1.3.3 Availability optimization design	9
1.3.4 Availability prediction methods	11
1.3.5 Availability simulation technology	12
1.4 Main content of this book	13
1.4.1 The core and focus of book	13
1.4.2 Generality of method	14
Chapter 2 Missile weapon system and its availability analysis	15
2.1 Missile weapon system analysis	15
2.1.1 Missile weapon system features	15
2.1.2 Missile weapon system components	16
2.1.3 Missile weapon system life profile and failure criterion	17
2.1.4 Missile weapon system maintenance and support elements	17
2.2 Missile weapon system availability analysis	19
2.2.1 Parameter selection and definition	19
2.2.2 Influence factor determination	23
2.2.3 Basic mathematical model analysis	24
2.2.4 Equipment time sequence diagram planning	25
2.3 Data collection and pretreatment	27
2.3.1 Data collection	27
2.3.2 Data pretreatment	27

2.4	Evaluation index system construction and verification	28
2.4.1	Evaluation index system construction criteria and process	28
2.4.2	Availability evaluation index system construction	29
2.4.3	Index system verification and analysis	31
Chapter 3	Availability analytical evaluation methods consider	
	maintenance support constraints	34
3.1	Availability evaluation method under the constraints of time	
	distribution and some battle damage	34
3.1.1	Preparative knowledge	34
3.1.2	Problem description and hypothesis	36
3.1.3	Availability evaluation method based on Renewal Process	37
3.1.4	Example analysis	40
3.2	Availability evaluation method consider preventive maintenance	41
3.2.1	Markov renewal process	41
3.2.2	Problem description and hypothesis	42
3.2.3	Availability evaluation method based on Markov Renewal Process	42
3.2.4	Example analysis	43
3.3	Availability evaluation method under resources constraints	44
3.3.1	Problem description and hypothesis	44
3.3.2	Availability evaluation method when lifetime is exponential	45
3.3.3	Availability evaluation method when lifetime has an arbitrary	
	continuous distribution	47
3.3.4	Example analysis	50
3.4	Availability evaluation method under statistical data uncertainty	51
3.4.1	Preparative knowledge	52
3.4.2	Problem description and hypothesis	53
3.4.3	Availability evaluation method based on Fuzzy Bayesian	54
3.4.4	Example analysis	57
Chapter 4	Availability simulation evaluation	
	methods of SEBS-based	60
4.1	Overall concept of simulation evaluation	60
4.1.1	Basic theory and methods of discrete event simulation	60
4.1.2	Basic idea of SEBS	67

4.1.3	TOMS experimental space series partition	68
4.1.4	Availability M&S framework	69
4.2	System of system organization integrated modeling method	70
4.2.1	Task modeling based on scenario	70
4.2.2	Functional modeling based on IDEF0	72
4.2.3	Support organization modeling based on multi-view	79
4.3	Entity model's construction methods	85
4.3.1	Entity modeling factor analysis	86
4.3.2	Type of application about entity model	86
4.3.3	Description of entity model with variable structure	87
4.4	Maintenance and support behavioral modeling method of availability centered	88
4.4.1	Purpose and method of behavioral modeling	88
4.4.2	Human behavior model based on cognitive process	89
4.4.3	Technical preparation process network model of three positions	91
4.4.4	Maintenance and support scheduling model	92
4.4.5	Transporter viability analysis	97
4.5	Availability states modeling method based on fault and battle damage	100
4.5.1	State mapping and event transceiver mechanism	100
4.5.2	State space modeling	101
4.6	Scheduling algorithm of simulation model	104
4.6.1	Algorithm description of general emulator	104
4.6.2	Algorithm description of sub-emulator	105
4.6.3	Indicator simulation statistical algorithms	106

Chapter 5 Simulation-based availability fluctuation

	analysis and optimization	108
5.1	Problem of instantaneous availability fluctuation	108
5.1.1	Fluctuation	108
5.1.2	Description of fluctuation characterize parameters	109
5.2	Fluctuation uncertainty analysis	110
5.2.1	Life parameters impact on fluctuation	110
5.2.2	Repair time parameters impact on fluctuation	112
5.2.3	Support delays parameters impact on fluctuation	113

5.2.4	Preventive maintenance cycle impact on fluctuation	114
5.3	Availability optimized algorithms	114
5.3.1	Algorithms contrast and selection	114
5.3.2	PSO simulation algorithms design	116
5.3.3	Examples and applications	117
Chapter 6 Availability prediction method based on PSO_RBFNN and FAR		122
6.1	Time sequence constructed and prediction principle	122
6.1.1	Availability time series analysis	122
6.1.2	Data pretreatment	123
6.1.3	Combination prediction principle	124
6.2	Time sequence decomposition algorithms	125
6.2.1	SVDFFA	125
6.2.2	Filter threshold algorithm	126
6.3	Availability trend component prediction method based on PSO_RBFNN	126
6.3.1	Availability trend component RBFNN modeling	126
6.3.2	PSO improved algorithm based shrinkage factor	127
6.3.3	Prediction method steps	127
6.4	Availability random component prediction method based on FAR	128
6.4.1	Availability random component FAR modeling	128
6.4.2	Function coefficients solving method	128
6.4.3	Nodes and model selection	129
6.5	Example analysis	130
Chapter 7 Availability integrate evaluation system design and implementation		132
7.1	Availability integrate evaluation system construction	132
7.1.1	General structure	132
7.1.2	Database	133
7.1.3	Function module	136
7.1.4	System implementation	137
7.2	Simulation credibility evaluation method	140
7.2.1	Evaluation index system of credibility	140
7.2.2	Analysis of cloud model and its numerical characteristics	141