



国防科技图书出版基金

现代雷达装备 综合试验与评价

Modern Radar Equipment
Integrated Test and Evaluation

孙凤荣 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press



国防科技图书出版基金

TN95
25

现代雷达装备综合试验与评价

Modern Radar Equipment Integrated Test and Evaluation

孙凤荣 编著

国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

现代雷达装备综合试验与评价/孙凤荣编著. —北京:
国防工业出版社, 2013. 7
ISBN 978-7-118-08645-4

I. ①现... II. ①孙... III. ①雷达系统—模拟系
统—研究 IV. ①TN955

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 087009 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)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

*

开本 710 × 1000 1/16 印张 21³/₄ 字数 398 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—3000 册 定价 88.00 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 第六届评审委员会组成人员

主任委员 王 峰

副主任委员 宋家树 蔡 镭 杨崇新

秘 书 长 杨崇新

副 秘 书 长 邢海鹰 贺 明

委 员 于景元 才鸿年 马伟明 王小谟

(按姓氏笔画排序) 甘茂治 甘晓华 卢秉恒 邬江兴

刘世参 芮筱亭 李言荣 李德仁

李德毅 杨 伟 肖志力 吴有生

吴宏鑫 何新贵 张信威 陈良惠

陈冀胜 周一宇 赵万生 赵凤起

崔尔杰 韩祖南 傅惠民 魏炳波

前言

当今电子装备的试验方法和内容的变化主要体现在电磁兼容性和电子对抗的实战效能评估上,并已成为试验的重点和难点。要求必须能够提供逼真的威胁环境;允许进行安全、逼真的对抗;迅速准确地收集和分析试验/演习结果;量化电子战对现代战争所起的作用;力求获得训练和系统研制投资的最佳效果等。为此,加强了试验方法和试验技术的研究和创新。其中最突出的是舍弃了“飞行—修正—飞行”的外场试验方法,采用了更为科学的“预测—试验—对比”方法,加大了仿真技术的应用。采用“预测—试验—对比”方法的主要目的是进行更有效的外场飞行试验,提高试验效率,节省试验经费。

目前,国内外关于现代雷达试验与评价方面较系统全面的研究文献较少,一些从事装备管理和科研的人员对于试验与评价的了解还不够系统。本书是作者在参考国内外相关文献的基础上,结合多年的相关试验与科研实践,历时三年多时间完成的。本书主要面向装备采办部门、装备试验与科研部门、装备总体论证单位、装备研制单位的技术管理与总体人员。本书也可以作为相关专业教学与科研课题研究参考书。

综合试验与评价(IT&E)(亦称综合试验与验证),是一种基于知识的系统研制途径,它综合协同地利用地面试验和分析,数学建模、仿真和分析,飞行试验和分析等多种试验分析方法,以建模与仿真作为试验与评价知识库以及各种地面试验和飞行试验之间反馈的一种工具,使结构仿真、虚拟仿真和实况仿真有机结合,为研制试验与评价(DT&E)和使用试验与评价(OT&E)的更经济有效的综合提供方法和途径。该技术是从传统的“试验—改进—试验”方法,向建模与仿真—虚拟试验—改进模型的迭代过程的转变。有效地应用综合试验与评价技术,将能在研制项目早期当问题更容易改进且改进费用更低时就能识别问题,能最大程度地减少接受一个有缺陷产品的风险,并促进对缺陷的纠正,因此能够缩短产品研制周期、降低研制费用和减少技术风险。

为满足未来雷达装备的发展需要,必须充分利用现有资源,探索新的试验技术与评价方法以加强试验与评价工作的有效性和试验效率。美军在20世纪90年代中后期开始制定并实施了联合先进分布式仿真联合试验与鉴定计划,对先进分布式仿真(ADS)技术在导弹、C⁴ISR系统和电子战等武器装备试验与鉴定中的应用进行了大量的理论研究和实验探索。美军的实践已表明,先进分布式仿真试验与评价方法弥补了传统试验与评价的不足、支持基于仿真的采办策略、

降低试验成本和缩短试验周期及支持试验预演等作用。在雷达试验与评价中,威胁电磁环境生成技术最能体现雷达区别于其他武器装备试验的显著特点和难点。本书共 11 章,第 1 章“概论”,主要介绍了综合试验与评价提出的背景、美军武器装备试验鉴定的模式、综合试验与评价的特点、综合试验与评价方法、综合试验与评价中知识库的运用、美军装备采办中的试验与评价、综合试验与评价的应用及效益;第 2 章“雷达装备的试验与评价”,主要论述了我国雷达装备采办发展过程、我国装备采办阶段的划分特点、传统雷达装备试验与评价体系的缺陷、雷达装备的综合试验与评价策略;第 3 章“雷达建模与仿真及其 VV&A”,主要论述了建模与仿真的基本概念,模型的校核、验证与确认(VV&A),雷达建模与仿真,雷达对抗仿真系统模型的 VV&A 案例;第 4 章“雷达综合实验室试验与评价”,主要论述了现代雷达特点分析、雷达综合实验室的需求分析、雷达综合测试与分析平台构建、雷达软件模型与物理测试、雷达综合实验室闭环测试;第 5 章“雷达半实物仿真试验与评价”,主要论述了虚拟试验验证技术、雷达半实物仿真实验室构建、基于 ADS 的新型半实物仿真试验等;第 6 章“雷达外场试验实施”,包括试验特点、试验条件、试验内容、雷达外场试验技术方案、雷达信号模拟源输出功率的确定、雷达数据录取和评估、雷达系统层次指标及测试方法等;第 7 章“雷达系统效能评价”,主要论述了雷达系统效能模型、雷达作战效能鉴定方法、雷达系统作战效能仿真试验平台、复杂电磁环境下的雷达效能试验与评价应用案例等;第 8 章“雷达系统适用性试验与评价”,包括作战适用性的相关问题、采办各阶段的雷达系统适用性试验与评价、作战适用性要素、案例分析等;第 9 章“战场复杂电磁环境构建”,主要论述了现代雷达所面临的复杂电磁环境特点、战场复杂电磁环境构建策略、构建战场复杂电磁环境的关键技术等;第 10 章“复杂电磁干扰环境构建难点问题解决方案”,包括复杂电磁相干干扰环境的构建,针对单脉冲雷达的干扰对策,针对 PD 体制雷达的干扰对策,针对多功能相控阵雷达的干扰对策,针对自适应捷变频雷达的干扰对策,针对低截获相参雷达的干扰对策,针对频率分集、双频雷达的干扰对策,针对双基地雷达的干扰对策,针对 SAR 及 ISAR 雷达的干扰对策,针对特体雷达的干扰对策,针对高密度电磁环境下的信号分选问题等;第 11 章“F-22/F-35 雷达(AN/APG-81)的研制管理与评价”,主要论述了 F-22/F-35 雷达(AN/APG-81)研制试验与评价的过程情况。

本书的编写工作得到了总装备部国防科技图书出版基金专项经费资助,国防科技大学周一宇教授审阅了全书,并提出了许多建设性的意见。在此向所有关心和支持本书编写的单位和个人表示诚挚的感谢。同时,感谢国防工业出版社为本书编辑出版所做的大量工作。

由于本书内容涉及面较广,很多问题有待进一步深入研究,加之资料来源与作者知识水平有限,书中错误和不当之处,恳请读者批评指正。

作者

2012 年 10 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 综合试验与评价(IT&E)提出的背景	1
1.2 外军武器装备试验鉴定的模式	1
1.2.1 综合试验鉴定模式	1
1.2.2 一体化试验鉴定模式	2
1.2.3 多军种联合试验鉴定模式	3
1.3 综合试验与评价的特点	5
1.4 综合试验与评价方法	6
1.4.1 综合试验与评价的方案模型	6
1.4.2 建模和仿真作为 IT&E 的知识库	8
1.5 综合试验与评价中知识库的运用	11
1.5.1 仿真方法的综合	11
1.5.2 系统间的综合	12
1.5.3 采办阶段的综合	13
1.6 美军装备采办中的试验与评价	13
1.6.1 美国国防部装备采办阶段的划分	13
1.6.2 装备方案分析阶段的试验与评价	13
1.6.3 技术开发阶段的试验与评价	28
1.6.4 工程和制造研制阶段的试验与评价	28
1.6.5 生产和部署阶段的试验与评价	30
1.6.6 使用与保障中的试验与评价	30
1.7 综合试验与评价的应用及效益	31
第 2 章 雷达装备的试验与评价	33
2.1 我国雷达装备采办发展过程	33
2.2 我国装备采办阶段的划分特点	34
2.2.1 需求论证阶段	34
2.2.2 方案阶段	35
2.2.3 工程研制阶段	35
2.2.4 定型阶段	36

2.2.5	生产阶段	37
2.2.6	使用与保障阶段	37
2.2.7	退役处理阶段	37
2.3	传统雷达装备试验与评价体系的缺陷	37
2.3.1	传统研发方式和流程的缺陷	38
2.3.2	没有有效利用建模与仿真	40
2.3.3	研制试验与使用试验脱节	41
2.3.4	没有充分利用现代统计方法	42
2.3.5	没有在全寿命周期进行试验与评价	42
2.4	雷达装备试验与评价策略	42
2.4.1	进行基于联合能力的需求论证与需求管理评价	42
2.4.2	实行基于仿真的采办	46
2.4.3	采用先进的现代雷达装备研发平台和研发流程	51
2.4.4	有效利用建模与仿真	56
2.4.5	采用综合试验与评价模式	57
2.4.6	制订综合试验规划	60
2.4.7	在全寿命周期进行雷达使用试验与评价	63
2.4.8	实施雷达综合试验与评价需解决的关键问题	70
第3章	雷达建模与仿真及其 VV&A	72
3.1	建模与仿真的基本概念	72
3.1.1	建模与仿真的定义	72
3.1.2	仿真的类型	73
3.1.3	试验设计中的建模与仿真	74
3.1.4	试验评价中的建模与仿真	75
3.2	模型的校核、验证与确认(VV&A)	76
3.2.1	VV&A 的概念	76
3.2.2	校核、验证(V&V)	77
3.2.3	模型的确认	78
3.2.4	VV&A 过程	79
3.2.5	建模与仿真的 VV&A 技术	79
3.3	雷达建模与仿真	81
3.3.1	雷达系统快速原型验证平台	82
3.3.2	从全系统到分系统的指标规划分配	86
3.3.3	提供开放的接口,与其他软件联合仿真	87
3.3.4	系统中关键部件的仿真验证	87

3.3.5	软件仪表互联半实物验证平台	88
3.3.6	复杂电磁环境仿真验证平台	88
3.4	雷达对抗仿真系统模型的 VV&A 案例	90
3.4.1	天线模型	92
3.4.2	目标模型	94
3.4.3	干扰信号模型	95
3.4.4	VV&A 结论	95
第 4 章	雷达综合实验室试验与评价	97
4.1	概述	97
4.2	雷达综合实验室的需求分析	98
4.2.1	分析功能的完整性	98
4.2.2	测试对象的完整性	98
4.2.3	对数字信号的分析功能	98
4.2.4	对干扰信号的分析功能	98
4.2.5	扩展性能	98
4.3	雷达综合测试与分析平台构建	99
4.3.1	测试系统组成	99
4.3.2	雷达测试系统的典型应用	103
4.3.3	雷达分析系统的组成	104
4.3.4	雷达分析系统的典型应用	107
4.4	雷达软件模型与物理测试	108
4.4.1	LFM 信号形成	109
4.4.2	接收机和后期检测	110
4.4.3	雷达干扰	112
4.4.4	“连接”信号生成	114
4.4.5	“连接”信号分析	114
4.5	雷达综合实验室闭环测试	116
4.5.1	综合实验室测试的系统层次指标	116
4.5.2	速度响应测试方法	121
4.5.3	目标截获时间测试方法	122
4.5.4	同时目标处理能力测试方法	122
4.5.5	目标分辨率测试方法	123
4.5.6	多普勒分辨率测试方法	123
4.5.7	角度分辨率测试方法	124
4.5.8	电磁兼容性(EMC)测试方法	125

4.5.9	ECM 易损性测试方法	125
第5章	雷达半实物仿真试验与评价	127
5.1	概述	127
5.2	虚拟试验验证技术	127
5.2.1	虚拟试验样机技术	128
5.2.2	虚拟试验环境和平台技术	128
5.2.3	数学模型与半实物试验模型异构集成技术	128
5.2.4	虚拟试验方案生成和实验设计技术	128
5.2.5	基于虚拟现实技术的试验过程可视化技术	129
5.2.6	实物模拟和虚拟试验样机之间的映射技术	129
5.2.7	虚拟试验验证分析、评估与参数修正技术	129
5.3	雷达半实物仿真实验室构建	129
5.3.1	半实物射频仿真实验室组成	129
5.3.2	导引头抗干扰性能试验方法	130
5.3.3	功率标定与控制方法	135
5.4	基于 ADS 的新型半实物仿真试验	136
5.4.1	部件建模及系统验证	137
5.4.2	雷达信号模拟与雷达系统测试	138
第6章	雷达外场试验实施	142
6.1	概述	142
6.2	试验特点	142
6.3	试验条件	143
6.4	试验内容	143
6.5	雷达外场试验技术方案	144
6.5.1	雷达试验总体组成	144
6.5.2	雷达地面试验的实施	144
6.5.3	雷达飞行试验实施	146
6.5.4	地面电子战环境构建平台	150
6.5.5	机载设备车	152
6.6	雷达信号模拟源输出功率的确定	153
6.6.1	试验场上远场条件的确定	153
6.6.2	雷达接收的最大功率的计算	153
6.6.3	模拟源最大辐射功率的确定	154
6.6.4	欺骗干扰源的辐射功率问题	154
6.6.5	压制性干扰模拟机最大功率的确定	154

6.7	雷达数据录取和评估	155
6.8	雷达系统层次指标及测试方法	156
6.8.1	检测距离和范围测试方法	157
6.8.2	杂波下可见度测试方法	158
6.8.3	目标截获时间测试方法	159
6.8.4	雷达分辨率测试方法	159
6.8.5	角跟踪响应测试方法	159
6.8.6	雷达角精度的测试方法	160
6.8.7	电磁兼容性(EMC)测试方法	162
6.8.8	雷达抗干扰(ECCM)测试方法	163
6.8.9	雷达截获与定位的易受干扰性测试方法	173
6.8.10	目标识别测试方法	176
第7章	雷达系统效能试验与评价	177
7.1	概述	177
7.2	系统效能模型	178
7.2.1	乘法模型	178
7.2.2	加法模型(ASDL)	182
7.2.3	模糊评价法	183
7.2.4	云重心评价法	184
7.2.5	系统属性层次	185
7.3	雷达作战效能鉴定方法	186
7.3.1	系统效能鉴定计划	186
7.3.2	雷达装备作战效能评估的步骤	187
7.4	作战效能评价试验平台	188
7.5	复杂电磁环境下的雷达效能试验与评价应用案例	191
7.5.1	基于WSEIAC模型评价雷达系统效能	191
7.5.2	基于模糊综合法模型评价雷达系统效能	194
7.5.3	基于三级指标的相控阵雷达系统效能评价	197
7.5.4	基于相控阵雷达系统二级指标效能评价	202
7.5.5	基于模糊综合评价法的雷达抗干扰能力评价	207
7.5.6	基于云重心理论的相控阵雷达系统效能评估	212
第8章	雷达系统适用性试验与评价	215
8.1	概述	215
8.2	作战适用性的相关问题	215
8.3	采办各阶段的雷达系统适用性试验与评价	216

8.4 作战适用性要素	217
8.4.1 可靠性试验与评价	218
8.4.2 维修性试验与评价	235
8.4.3 可用性	237
8.4.4 后勤保障性	238
8.4.5 兼容性	239
8.4.6 相互适应性	240
8.4.7 训练要求	241
8.4.8 可运输性	242
8.4.9 安全性	243
8.4.10 人机工程	243
8.5 案例分析	243
第9章 战场复杂电磁环境构建	248
9.1 现代雷达所面临的复杂电磁环境特点	248
9.2 战场复杂电磁环境构建策略	249
9.2.1 战场电子战环境构建思路	249
9.2.2 战场复杂电磁环境的总要求	250
9.3 构建战场复杂电磁环境的关键技术	251
9.3.1 干扰/回波/杂波信号模拟器	251
9.3.2 雷达信号模拟器	254
9.3.3 复杂电磁环境监测与分析系统	255
第10章 复杂电磁干扰环境构建难点问题解决方案	261
10.1 复杂电磁相干干扰环境的构建	261
10.2 针对单脉冲雷达的干扰对策	262
10.2.1 闪烁干扰	262
10.2.2 “交叉眼”干扰	264
10.3 针对PD体制雷达的干扰对策	269
10.4 针对多功能相控阵雷达的干扰对策	270
10.4.1 相控阵雷达设计上的特点分析	270
10.4.2 相控阵雷达抗干扰措施研究	270
10.4.3 对相控阵雷达的干扰技术	273
10.5 针对自适应捷变频雷达的干扰对策	281
10.6 针对低截获相参雷达的干扰对策	283
10.6.1 对相控阵雷达信号的截获	283
10.6.2 对低截获相参雷达的干扰对策	290

10.7	针对频率分集、双频雷达的干扰对策	291
10.8	针对双基地雷达的干扰对策	291
10.8.1	对双基地雷达的干扰机理	291
10.8.2	双基地雷达抗干扰试验环境的构建	295
10.9	针对 SAR 及 ISAR 雷达的干扰对策	298
10.9.1	基于 SAR 对抗过程的仿真系统	298
10.9.2	SAR 压制式干扰	300
10.9.3	ISAR 图像欺骗干扰源的设计	301
10.9.4	去斜基带干扰信号生成算法	303
10.9.5	复杂目标回波信号实现方法	304
10.10	针对特体雷达的干扰对策	305
10.11	针对高密度电磁环境下的信号分选问题	306
第 11 章	F-22\F-35 雷达(AN/APG-81)的研制管理与评价	308
参考文献		321

Contents

Chapter1 Overview	1
1.1 Test and evaluation (IT & E) background	1
1.2 Foreign armies, weapons and equipment, test evaluation, mode	1
1.2.1 The comprehensive experimental identification of mode	1
1.2.2 The integration test identification mode	2
1.2.3 The multi-service joint test evaluation model	3
1.3 Integrated test and evaluation of the characteristics	5
1.4 Integrated test and evaluation methods	6
1.4.1 Integrated test and evaluation program model	6
1.4.2 Modeling and simulation as a knowledge base of IT & E	8
1.5 Test and evaluation (IT & E) in the use of the knowledge base	11
1.5.1 Simulation method	11
1.5.2 System integrated	12
1.5.3 Acquisition stages of the integrated	13
1.6 U. S. defense acquisition in the test and evaluation (OT & E)	13
1.6.1 U. S. department of defense equipment acquisition phase of division	13
1.6.2 The equipment program analysis phase of the test and evaluation	13
1.6.3 Technology development phase of the test and evaluation	28
1.6.4 Engineering and manufacturing development phase of the test and evaluation	28
1.6.5 Production and deployment phase of the test and evaluation	30
1.6.6 Use and protection of the test and evaluation	30
1.7 Test and evaluation (IT & E) applications and benefits	31
Chapter 2 Radar equipment, test and evaluation	33
2.1 China's radar equipment acquisition process of development	33
2.2 China's defense acquisition phase of the division of the	

characteristics of	34
2.2.1 Requirement demonstration of stage	34
2.2.2 Program stage	35
2.2.3 The project development phase	35
2.2.4 Stereotypes stage	36
2.2.5 The production stage	37
2.2.6 The use and protection of stage	37
2.2.7 Retired processing stage	37
2.3 Conventional radar equipment testing and evaluation system, lack of limits	37
2.3.1 Tradition of research and development methods and processes of the lack of filling	38
2.3.2 There is no effective use of modeling and simulation	40
2.3.3 Developmental test and operational test out of touch	41
2.3.4 Did not make full use of modern statistical methods	42
2.3.5 There is no full life cycle of test and evaluation	42
2.4 Radar equipment test and evaluation strategy	42
2.4.1 Carry out the evaluation based on the needs of the joint capabilities demonstration and demand management	42
2.4.2 The implementation of simulation based acquisition	46
2.4.3 The use of advanced modern radar equipment R&D platform and R&D process	51
2.4.4 The effective use of modeling and simulation	56
2.4.5 Using the integrated test and evaluation mode	57
2.4.6 Develop a comprehensive test plan	60
2.4.7 In the full life cycle radar operational test and evaluation	63
2.4.8 Implementation of the radar, integrated test and evaluation of key issues to be addressed	70
Chapter 3 Radar Modeling and Simulation VV & A	72
3.1 Modeling and simulation of the basic concepts	72
3.1.1 Modeling and simulation of the definition	72
3.1.2 Simulation of the type	73
3.1.3 Experimental design modeling and simulation	74
3.1.4 Test evaluation modeling and simulation	75
3.2 Verification of the model, validation and	