

军事装备试验学主干课程教材

ZHUANGBEI SHIYAN SHEJI YU PINGGU

装备试验设计与评估

曹裕华 主编



国防工业出版社

National Defense Industry Press

装备试验设计与评估

曹裕华 主编

国防工业出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

试验设计与评估是装备试验工作的重要环节,关系到装备试验的成败和效益。本书系统阐述了装备试验设计方法、评估方法以及建模与仿真在试验设计与评估中的应用,主要内容包括试验正交设计和均匀设计方法、统计验证试验设计和序贯试验设计方法、战技性能分析与评估方法、装备作战适用性分析与评估方法、作战效能分析与评估方法、基于贝叶斯的小子样装备试验评估方法、建模与仿真支持试验设计与评估应用。

本书可作为军队院校装备试验专业和其他相关专业的教材,也可作为从事装备试验鉴定工作的工程技术人员和管理人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

装备试验设计与评估/曹裕华主编. —北京:国防工业出版社,2016.1

ISBN 978-7-118-10488-2

I. ①装... II. ①曹... III. ①武器装备-武器试验-试验设计②武器装备-综合评价 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 014988 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印刷

新华书店经售

*

开本 710×1000 1/16 印张 15 字数 300 千字

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—1500 册 定价 59.00 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

总装备部“1153”人才工程专项资助

编写人员名单

主 编 曹裕华

副 主 编 李巧丽 高化猛 尚 娜

参编人员 (以对本书内容贡献大小排序)

陈小卫 周雯雯 丁向丽 刘淑丽

杨永志 韦国军 王 晶 祝冀鲁

苏宪程

前 言

设计与评估是装备试验工作的两个重要组成部分。试验设计是装备试验任务的起点,试验评估是装备试验任务的落脚点,两者都是装备试验的总体工作,是关系装备试验质量和成败的关键环节。试验设计与评估理论相当于作战行动中的战役战术理论,指导技术指挥线制定科学合理的试验方案,经济高效地实施试验与鉴定。美军试验与鉴定高层认为,试验设计理论同时适用于研制试验和作战试验,有利于美军对“试验置信水平、试验力度和试验跨系统作战极限的程度”进行定量分析。为此,美国国防部作战试验与鉴定局、美国海陆空军作战试验主管部门和联合互操作性司令部正不断修订相关政策和指南,确保在作战试验中运用试验设计理论方法。

“装备试验设计与评估”是军事装备领域专业硕士和学术硕士研究生的职业能力培养课程,主要学习掌握装备试验设计与评估的基础理论和方法,是军事装备试验学的一门主干课程。国外对“装备试验设计与评估”课程的理论培训相当重视,只要是试验与鉴定领域的培训项目,通常都会开设该课程或在其他课程学习相关内容。如美国 Georgia 理工学院试验与鉴定研究与教育中心证书培训项目、美国 Georgia 理工学院职业教育中心“试验与鉴定短期培训”项目、美国 Alabama 大学试验与鉴定证书教育项目、美国 Florida 大学工程与研究教育部“试验与鉴定方向”研究生教育等都把它作为一门核心或主要课程,美国国防采办大学试验与鉴定培训“水平Ⅲ”的核心课程“高级试验与鉴定”(TST303)包含试验设计与评估的理论知识,美国国防部作战试验与鉴定局把它作为新进人员的必训科目和试验科学的一项主要内容。

“装备试验设计与评估”也是一门难度较大的课程,需要有一定的数理统计学基础,需要一部系统实用、针对性强的教材。为了解决学员学习该课程没有教材的问题,在总装备部“1153”人才工程和“2110 工程”三期建设的支持下,作者们通过补充、修改和完善给研究生授课的讲义,编写了这部教材。教材内容共分八章。第1章介绍了试验设计和试验评估的基本概念、任务、原则、方法以及两者的关系;第2、3章介绍了试验设计常用的方法,包括正交设计、均匀设计、统计验证试验设计和序贯试验设计方法;第4、5、6、7章介绍了试验评估的方法,包括

装备战技性能评估与分析方法、装备作战适用性评估与分析方法、装备作战效能分析与评估方法和基于贝叶斯的小子样试验评估方法;第8章介绍了建模与仿真技术在试验设计与评估中的应用。

本教材由曹裕华设计框架结构,曹裕华、李巧丽、高化猛、尚娜、陈小卫、周雯雯、丁向丽、刘淑丽、杨永志、韦国军、王晶、祝冀鲁共同编写。其中,曹裕华编写第1章,参与第2章编写;李巧丽编写第5章,参与第8章编写;高化猛编写第4章,参与第2、第8章编写;尚娜编写第3章;陈小卫编写第6章;周雯雯编写第7章;丁向丽参与编写第2章,刘淑丽参与编写第1章,杨永志参与编写第4章,韦国军参与编写第5章,王晶、祝冀鲁参与编写第6章。全书由曹裕华、李巧丽负责统稿和修改。

本教材在编写过程中,得到了许多人的指导、支持和帮助。军事科学院江敬灼研究员、装甲兵工程学院郭齐胜教授、63928部队黄建新研究员、63961部队唐雪梅研究员、63921部队苏建刚研究员、63870部队吴颖霞高级工程师、63892部队徐忠富研究员等专家教授在百忙中审阅了教材,提出了许多宝贵的意见;装备学院装备试验系王保顺主任,训练处张军奇处长以及机关的其他同志给予了大力支持;教材编写也参阅了有关专家的论文和著作,在此一并表示衷心的感谢。

由于时间和经验有限,不妥之处在所难免,诚请读者批评指正。

作者

2015年3月7日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 装备试验设计	1
1.1.1 基本概念	1
1.1.2 试验设计任务	3
1.1.3 试验设计原则	16
1.1.4 试验设计方法	17
1.2 装备试验评估	27
1.2.1 基本概念	28
1.2.2 试验评估任务	30
1.2.3 试验评估原则	31
1.2.4 试验评估方法	33
1.3 装备试验设计与评估的关系	34
1.3.1 评估需求牵引试验设计	34
1.3.2 试验设计服务试验评估	35
习题	36
第 2 章 装备试验正交设计与均匀设计方法	37
2.1 正交试验设计	37
2.1.1 基本概念	37
2.1.2 正交试验设计思想的直观解释	40
2.1.3 正交试验设计原理	41
2.1.4 正交试验设计方法应用	44
2.2 均匀试验设计	52
2.2.1 基本概念	53
2.2.2 均匀试验设计思想的直观解释	54
2.2.3 均匀设计原理	55

2.2.4 均匀设计方法应用	60
2.3 正交和均匀试验设计的数据分析与处理	65
2.3.1 因素效应估计	65
2.3.2 方差分析	66
2.3.3 回归分析	68
习题	73
第3章 统计验证试验设计和序贯试验设计	74
3.1 统计验证试验设计	74
3.1.1 装备技术参数指标值估计的试验设计	76
3.1.2 装备指标假设检验的试验设计	78
3.2 序贯试验设计	90
3.2.1 序贯试验基本原理	91
3.2.2 二项分布的序贯试验设计	92
3.2.3 二项分布的序贯试验设计截尾概率比检验	93
3.2.4 正态分布的序贯试验设计	94
3.2.5 序贯网图检验的试验设计	94
习题	97
第4章 装备战技性能分析与评估方法	98
4.1 概述	98
4.2 点估计	99
4.2.1 矩估计法	99
4.2.2 极大似然法	100
4.2.3 估计量的评价	101
4.2.4 火炮射程试验数据的点估计	103
4.3 区间估计与假设检验	104
4.3.1 区间估计	104
4.3.2 假设检验	104
4.4 二项分布参数估计与检验	105
4.4.1 成功概率 p 的估计	105
4.4.2 成功概率 p 的假设检验	108
4.4.3 某变频设备的二项分布指标估计与检验	110

4.5	正态分布参数估计与检验	110
4.5.1	正态分布参数的估计	111
4.5.2	正态分布参数的假设检验	112
4.5.3	正态分布的变形	113
4.5.4	导弹射程正态分布指标估计与检验	116
4.6	指数分布参数估计与检验	117
4.6.1	对于 θ 的估计与检验	118
4.6.2	对于 λ 的估计与检验	121
4.6.3	某变压设备指数分布指标估计与检验	121
	习题	121
第5章	装备作战适用性分析与评估方法	123
5.1	可靠性分析与评估	123
5.1.1	可靠性	123
5.1.2	分析与评估方法	124
5.1.3	软件可靠性的分析与评估方法	127
5.2	维修性分析与评估	129
5.2.1	维修性	129
5.2.2	分析与评估方法	130
5.3	保障性分析与评估	134
5.3.1	保障性	134
5.3.2	分析与评估方法	135
5.4	兼容性分析与评估	137
5.4.1	兼容性	137
5.4.2	分析与评估方法	138
5.5	适应性分析与评估	139
5.5.1	适应性	139
5.5.2	分析与评估方法	139
5.6	安全性分析与评估	140
5.6.1	安全性	140
5.6.2	分析与评估方法	141
5.7	可运输性分析与评估	143

5.7.1	可运输性	143
5.7.2	分析与评估方法	143
5.7.3	示例	144
5.8	战时利用率分析与评估	145
5.8.1	战时利用率	145
5.8.2	分析与评估方法	145
5.9	人机工程分析与评估	146
5.9.1	人机工程	146
5.9.2	分析与评估方法	146
	习题	147
第 6 章	装备作战效能分析与评估方法	148
6.1	概述	148
6.1.1	相关概念	148
6.1.2	装备作战效能评估	151
6.1.3	作战效能评估的目的和意义	154
6.2	作战效能评估的基本流程	155
6.2.1	基于“分解—聚合”的作战效能评估流程	155
6.2.2	基于整体性评估的流程	159
6.3	作战效能评估基本方法	160
6.3.1	基于实装的评估方法	160
6.3.2	基于模拟仿真的评估方法	161
6.3.3	解析法	162
6.4	基于作战试验的装备作战效能评估方法	163
6.4.1	基本流程	163
6.4.2	评估准备阶段	163
6.4.3	评估实施阶段	165
6.4.4	评估结束阶段	171
6.5	体系贡献率评估	171
6.5.1	体系贡献率基本内涵分析	172
6.5.2	体系贡献率试验与评估	174
	习题	175

第7章 基于贝叶斯的小子样装备试验评估方法	176
7.1 贝叶斯方法的基础理论	176
7.1.1 贝叶斯公式	177
7.1.2 贝叶斯方法提出的背景	178
7.1.3 贝叶斯方法的原理	180
7.1.4 贝叶斯方法的流程	182
7.2 验前分布的确定	183
7.2.1 验前信息的获取与分类	184
7.2.2 验前分布的确定方法	186
7.2.3 验前信息的可信性检验	188
7.2.4 验前信息的可信度计算	189
7.2.5 验前信息的融合处理	189
7.3 贝叶斯统计推断	192
7.3.1 贝叶斯估计	192
7.3.2 贝叶斯假设检验	192
7.3.3 贝叶斯统计决策理论	193
7.4 实例	198
习题	200
第8章 建模与仿真支持试验设计与评估应用	202
8.1 概述	202
8.1.1 建模与仿真内涵	202
8.1.2 方法步骤	203
8.1.3 模型可信性评价	207
8.1.4 校核、验证和确认(VV&A)	208
8.2 建模与仿真支持试验设计应用	210
8.2.1 优化试验设计	210
8.2.2 辅助制定试验规划	212
8.2.3 装备故障预先分析	213
8.3 建模与仿真支持试验评估应用	213
8.3.1 被试系统作战性能预估	213
8.3.2 被试系统在极限条件下的性能分析	214

8.4 内外场一体化试验设计与评估	214
8.4.1 概念内涵	214
8.4.2 内外场一体化试验系统	217
8.4.3 内外场一体化试验管理	218
8.4.4 仿真数据与实装试验数据的融合应用	220
习题.....	223
参考文献.....	224

第1章 绪 论

装备试验是为满足装备科研、生产和使用的需要,按照规定的程序和条件,对装备进行验证、检验和考核的军事和工程技术活动,包括对装备的技术方案、关键技术、战技性能、作战效能等的试验,分为装备科研试验、定型试验和作战试验等。

试验设计与评估是装备试验中两项十分重要的技术总体工作,关系到装备试验的质量和成败。试验设计是装备试验任务的起点,是试验目标/要求、试验成本和试验时间的综合权衡,设计形成的试验方案是装备试验的实施依据;试验评估是装备试验的落脚点,目的是给出装备是否满足研制总要求、是否满足作战需求的结论,以及装备需要改进的建议,服务武器装备采购决策和部署使用。

1.1 装备试验设计

任何一种装备试验,都要根据试验的目的和要求,采用必要的方法来获取适当的可靠的试验数据资料。通过对试验数据资料的分析和处理,评估被试系统的战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)。然而,不管是科研试验、定型试验,还是作战试验,试验实施首先需要把试验方法变成有效的试验方案,进行试验设计,这是装备试验的一个关键环节,需要综合考虑被试装备的特点、试验资源使用、评估结论置信水平等因素。

1.1.1 基本概念

军事装备试验是一类科学实验,因此,装备试验设计源于科学试验设计。试验设计,维基百科的解释是:“试验设计(Design of experiments, DOE),又称实验设计,是数理统计学的一个分支,科学研究的一部分,涉及‘用何方法可更好地设计一个实验’,属于方法论的范畴。由于任何实验都会受到外部环境影响,实验设计的目的就是如何使外部环境的变化能够对实验造成最小的影响。”GB3358.3—93《统计学术语 第三部分 试验设计术语》对试验设计的解释是:“对试验规划,主要指选择参加试验的因素,确定各因素的水平,挑出要试验的水平组合。”《现代科学技术词典》对试验设计的解释是:“在统计分析中,要求以

次数尽可能少的试验来获得足够有效的资料,从而得到较可靠的评估结论。试验设计就从这个要求出发,考虑到试验结果或观察时可能产生的随机误差,运用数学方法来研究如何合理抽样试验,控制各个因素在试验中的条件,同时还研究在各种允许的试验条件下最优的试验方案的存在性和求法等问题。”不管是哪种解释,试验设计都是基于统计学意义,寻求一个试验次数既少、又能达到试验目的的优化方案的过程。

装备试验设计就是根据试验目的和要求,在确定的试验模式、类型和试验工程方法基本框架上,运用数理统计学原理和方法,研究如何合理选取试验样本,控制试验中各种因素及其水平的变化,制定出优化可行的试验方案的过程。装备试验设计的目的是用尽可能少的试验次数获取足够的、有效的、用于可靠推断试验结论的数据资料。试验设计把试验方法变成有效的试验方案,是试验方法的工程化。开展装备试验设计,必须熟悉装备试验方法,从被试系统的战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)指标的评估需求出发,在近实战使用的环境条件下,科学确定试验任务和项目,选择和控制影响试验的各种因素及其水平,合理选取试验样本,获取足够用于推断出被试系统总体性能的数据资料,并对试验实施保障方案尤其是数据收集、测量保障方案提出要求。

装备试验设计的关键问题是试验方案优化。一个好的试验方案,既要满足对被试系统战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)指标的考核要求,还要考虑试验时间、试验经费、试验设施、试验装备等实际条件,设法以较少的试验资源获取最大数量的有用数据资料。试验方案寻优是一个复杂的探索过程,需要把大量的定量和定性信息与试验方法、战术战法、装备运用和数理统计知识等联系起来,综合分析,反复比较。

如果把装备试验看作一个信息生产过程,如图 1-1 所示,这个过程由试验装备、试验方法和试验人员组成,通过操作使用被试系统或体系(包括配试装备)产生被试系统评估鉴定所需的信息资料。信息资料是通过试验装备可测量获取或通过试验人员可采集的、与被试系统密切相关的数据,可称之为响应参数,如火炮射击试验的落点偏差(面目标或集群目标)、射程、命中目标次数(点目标)等。试验中,一些过程参数($x_1, x_2, \dots, x_p$)是可控的,如火炮射击角度、射击速度、弹药种类等,而另一些过程参数($z_1, z_2, \dots, z_q$)是不可控的,有时称为噪声参数,例如试验环境温度、湿度、风速、作战对象干扰和对抗因素,以及测量测试设备的随机误差等。装备试验本质上是一个有限的探索过程,把被试系统放在一定试验条件(过程参数)下使用,产生评估所需信息资料,这是基于抽样试验进行统计推断的活动。试验条件中的过程参数及其取值越多,试验越充分,结论就越可信,然而试验时间也就越长、试验消耗越大。从($x_1, x_2, \dots, x_p$)和

$(z_1, z_2, \dots, z_q)$ 中选取哪些参数, 这些参数取什么值, 显然是一个权衡折中的问题, 这个问题只能通过试验设计来解决, 在达成试验目标、满足试验要求的前提下, 尽量用较少的、典型性的试验条件试验。

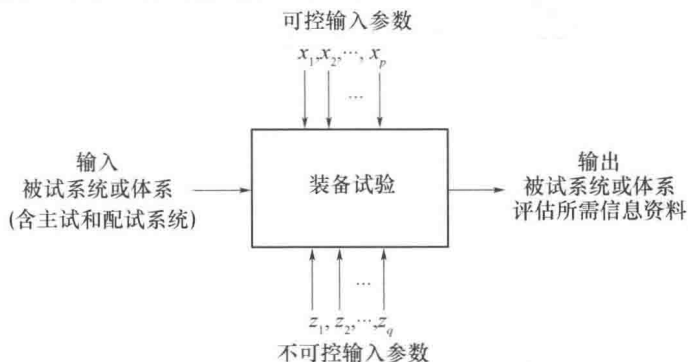


图 1-1 装备试验信息生产过程

装备试验设计的目的可能包括:

(1) 确定哪些因素对被试系统战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)指标(响应)影响最大, 即指标与因素的灵敏度分析。

(2) 分析确定考核指标影响因素的取值水平, 主要有三类: 使被试系统战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)指标(响应)发挥到最好程度的因素水平(即武器装备的最佳使用条件); 使评估指标(响应)的分散度(或方差)尽可能减小的因素水平(即武器装备的稳定使用条件); 使不可控参数(噪声参数)对评估指标(或者响应变量)的影响尽可能减小的因素水平。

(3) 确定试验状态条件、试验样本、试验资源等。

广义的装备试验设计是装备试验的一般程序知识, 包括从试验任务分析提出、试验剖面设计、试验因素及其水平选择与组合(形成试验方案), 到装备试验结果分析、试验报告撰写等一系列内容。它给试验人员展示如何进行装备试验的概貌, 解决装备战技性能、作战效能、作战适用性试验评定问题的全过程。显然, 此处装备试验设计并不只是统计学意义上的试验设计, 而是从工作层面进一步拓展, 包含多方面的内容。当然, 试验设计的核心部分还是选择与组合试验因素及其水平, 形成试验方案的过程。

1.1.2 试验设计任务

试验设计的主要任务是规划安排好装备试验任务, 制定一个可以实施的、能够获取足够准确数据的试验方案, 同时, 对试验实施保障提出具体要求。根据广

义的装备试验设计,其任务包括试验任务设计、战情与试验剖面设计、试验变量及其水平选取、试验变量水平组合以及试验方案分析优化等五个方面。其中,试验方案分析优化主要基于试验系统的仿真进行,评估所用试验资源能否在全过程和全频域正确采集、传输试验信息,获取的试验信息是否足够充分支持被试系统评价,在保证达成试验目标的前提下所用试验资源最少,这一任务在8.2节建模与仿真支持试验设计应用中有所介绍,为了避免重复,本小节主要介绍前四项任务。

1. 试验任务设计

试验任务设计就是根据装备试验的总要求和实际可能的限制条件,挑选出若干试验项目进行试验,利用这些项目试验的结果,来推断被试系统的战技性能、作战适用性和作战效能(包括体系贡献率)。实质上,试验任务设计最终确定试验项目,就是在统计推断总体中抽取试验样本。确定试验任务的主要依据是被试系统《试验与鉴定总计划》或《试验任务总要求》和国家、军队制定的装备试验法规、标准及试验与鉴定主管部门下达的年度试验任务计划等文件以及被试系统《研制总要求》或《研制任务书》等技术文件和资料。

《试验与鉴定总计划》或《试验任务总要求》和国家、军队制定的有关法规、标准,对装备研制过程中不同阶段试验与鉴定的性质、目的和工作任务做出了一般性的总体安排;被试系统《研制总要求》和《研制任务书》对被试系统的使命任务、作战范围、战技性能指标和作战使用要求做出明确的规定,给出了试验评估的需求;年度试验任务计划使装备试验与鉴定工作进入实施程序并提出具体任务要求。所有这些文件对装备试验提出了基本的需求和要求,为确定试验任务和试验项目提供了基本的依据。试验设计人员就是要根据这些文件提出的试验总任务和总要求,来确定具体的试验任务和试验项目,制定被试系统的《试验大纲》和《试验实施方案》。

另外,试验资源或技术条件也是制约确定试验任务的因素。在试验任务设计时,不仅要考虑对武器装备的评估鉴定需求,而且要考虑完成试验任务的可能性。由于某些试验条件不具备,或技术水平、试验设备设施达不到试验要求,或资金保障有严重困难,都会影响试验任务的实施。所以,在确定试验任务时,对试验任务的范围不得不进行筛选。

试验任务是根据被试系统试验与鉴定的目的来确定的,明确试验与鉴定的目的是设计试验任务的基础。不同性质的各类试验有着不同的试验与鉴定的目的。

就设计定型试验而言,试验与鉴定的目的主要是在实际作战使用的条件下,对被试系统的战技性能和作战使用性能进行试验和评价,得出是否满足《研制

总要求》和《研制任务书》规定的指标要求的结论,为装备定型和装备部队使用提供决策依据,并为系统改进和部队作战使用提出建议、意见。这是设计定型试验的目的,也是设计定型试验与鉴定的总任务。试验设计人员要对试验目的和总的试验任务进行分析,形成试验任务和试验保障两个方面的基本构想,提出试验的大致范围。然后考虑对被试系统战技性能和作战使用性能指标进行鉴定的实际需求,对试验任务进行分解,形成试验子任务和试验项目清单。就装备作战试验而言,试验与鉴定的目的主要是在近实战环境下,对被试系统的作战适用性、作战效能(包括系统纳入装备体系后的贡献率)评估,得出系统是否满足作战需求,是否存在作战使用风险,回答有关系统的关键作战问题,为装备采办决策和部队战术战法研究提供数据资料支持。这是作战试验与鉴定的总任务。试验设计人员从试验需要回答的关键作战问题出发,逐层分析(图1-2),确定试验需要评估的装备作战适用性和作战效能以及评估需要采集的数据元,把相关数据元的采集活动构成试验项目。

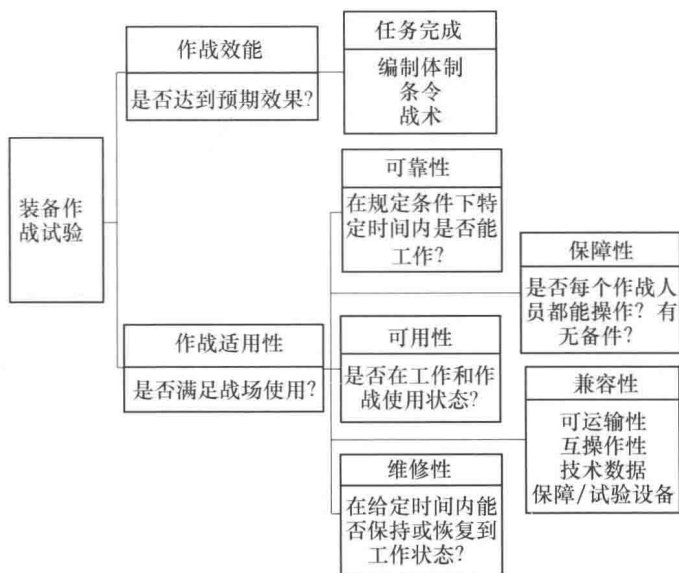


图1-2 系统关键作战问题分解结构

武器装备所要担负的作战任务决定装备试验的任务,也就是像作战一样试验,这是装备试验的基本原则和要求。在确定详细试验任务的时候,必须根据被试系统作战任务要求,对被试系统的各战技性能和作战使用性能指标进行详细的分析。首先,要明确被试系统的性能指标有哪些,把这些性能指标一一列出