

装备测试性工程系列丛书

装备测试性试验 与评价技术

邱静 刘冠军 张勇 吕克洪 等著



科学出版社

装备测试性工程系列丛书

装备测试性试验与评价技术

邱 静 刘冠军 张 勇 吕克洪等 著

科学出版社

内 容 简 介

测试性是装备便于测试和诊断的重要设计特性,开展测试性试验与评价技术研究具有重要的学术价值和工程指导意义。本书针对测试性试验与评价问题进行了系统论述。主要内容包括:经典测试性试验方案、测试性试验方案优化设计、测试性试验实施与故障注入、测试性指标评估方法、测试性增长试验技术、测试性虚拟试验技术等。

本书可作为高等院校相关专业研究生和高年级本科生的参考书,也可供装备测试性、维修性及测试诊断等领域的科研人员与工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

装备测试性试验与评价技术/邱静等著. —北京:科学出版社,2017. 10
(装备测试性工程系列丛书)
ISBN 978-7-03-054885-6

I. ①装… II. ①邱… III. ①武器装备-测试 IV. ①TJ06

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 254529 号

责任编辑:裴 育 纪四稳 / 责任校对:桂伟利
责任印制:张克忠 / 封面设计:蓝 正

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销



*

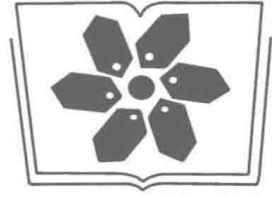
2017 年 10 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2017 年 10 月第一次印刷 印张:23 1/4

字数:450 000

定价:150.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



中国科学院科学出版基金资助出版

《装备测试性工程系列丛书》序

现代装备功能与性能越来越先进,技术与结构越来越复杂,对装备测试、诊断与维修保障的挑战越来越严峻。传统的以外部测试为主的测试模式已无法从根本上解决复杂装备的测试问题。要实现准确、快速、全面的测试,就必须按照并行工程与集成科学的思想,在装备论证、设计与研制开始时就综合考虑测试与诊断问题。测试性工程作为装备“五性”工程的主要内容之一,正是应对这种变革与思想,旨在实现装备测试与诊断能力的“优生”和“优育”的总体优化,是从根本上提高装备测试与诊断水平的技术途径,也是当前国内外装备保障领域研究与应用的热点之一。

测试性概念和技术自 20 世纪末进入我国,在我国装备管理、研制部门和科研工作者的高度重视与共同努力下,取得了长足发展。部分新型装备明确提出了测试性要求,开展了测试性工程实践,积累了一定的测试性工程经验。

从总体上来看,我国装备测试性工程还处于以经验、规则为主导的阶段,严格按照有关国军标规范、系统科学地开展测试性论证、设计、分析与验证的案例还较少。从技术发展看,装备测试性工程已经从经验设计阶段发展到基于模型的科学设计阶段。相关部门也正组织编撰新标准,替代现行的 GJB 2547—95《装备测试性大纲》,旨在以基于模型的测试性分析与设计理论为指导,系统科学地开展装备测试性工程。

国防科学技术大学装备综合保障技术重点实验室在学科学术带头人温熙森教授、邱静教授的带领下,自“九五”以来一直致力于测试性领域的学术研究与工程应用,在智能机内测试、机内测试降虚警、测试性建模与分析、测试性设计、测试性验证与评估等方面取得了丰硕的研究与应用成果。《装备测试性工程系列丛书》正是对其最新研究成果的全面总结和体现。该丛书以测试性新标准为指导,结合典型案例,系统而全面地阐述了测试性工程的技术流程、测试性建模分析理论、测试性设计方法、测试性验证与评估技术等,并重点针对该领域存在的国际性难题——机内测试虚警问题,阐述了机电系统机内测试降虚警技术。

该丛书体系完整、结构清晰、理论深入、技术全面、方法规范、案例翔实,融系统

性、理论性、创新性和指导性于一体。我相信该丛书必将为测试性领域的管理与技术工作者提供非常好的参考和指导,对推动我国装备测试性工程发展也将起到积极的促进作用。

Handwritten signature of Xu Hui in black ink.

中国工程院院士

2011年12月于北京

前 言

测试是装备使用和保障的信息源。装备的快速发展、实战化的使用要求和保障模式的变革,对装备测试诊断提出了更高的要求 and 更大的挑战。在研究和工程实践中发现:高新技术装备结构密集性和技术复杂性相对于现役装备显著增加,故障机理和表现更为复杂,状态信息的获取途径严重受限,传统的在使用后附加外部测试系统的模式无法从根本上解决这些复杂装备所面临的测试问题,测试模式的变革势在必行。

测试性,又称可测性,是指装备能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能降低),并隔离其内部故障的一种设计特性。装备测试性工程正是一种测试模式的变革。它按照并行工程的思想,在装备论证阶段就统筹考虑其测试诊断问题,通过与装备性能并行设计,使之具有良好的自测试和整体综合测试能力,实现装备测试能力的“优生”和测试的总体优化,从而快速、全面和准确地感知装备技术状态,实现装备快速智能检测、诊断与维修保障。良好的测试性设计对于提高装备的维修保障水平和战备完好性、降低全寿命周期费用等具有重要意义。

近年来,测试性作为装备的一个重要特性越来越受到重视,订购方对飞机、导弹、雷达等新型装备提出了明确的测试性指标要求。随着装备测试性工程的推进,如何发现测试性设计不足、指导测试性改进,如何判断装备的测试性指标是否达到合同规定的要求,如何给出订购方和承制方都认可的合理评价,成为装备面临的现实问题,也正是开展测试性试验与评价工作的意义所在。

20世纪80年代以来,测试性试验与评价技术在国内外取得了一些成果和应用,也发布了测试性试验与评价方面的部分规范和工作指南,一定程度上指导了测试性试验与评价工作。但总览技术应用与实践,如何在减少测试性试验风险、成本、周期的同时科学准确地评估测试性水平,实现“快、准、好、省”的测试性试验与评价,仍是需要深入研究的问题。因此,作者在吸收国内外测试性试验与评价技术研究成果的基础上,结合多年来科研、教学和装备型号研制工程经验撰写此书,以全面阐述测试性试验与评价技术内涵、研究现状、工作流程、技术内容及关键技术。书中在总结、阐述测试性试验与评价主要内容、基本流程、经典试验与评价技术的基础上,重点阐述测试性试验方案优化设计技术、等效故障注入方法、测试性指标

综合评估方法、测试性增长试验技术、测试性虚拟试验技术等。

本书在撰写过程中得到了学科带头人温熙森教授的悉心指导。各章作者分别为：第1章邱静、刘冠军、张勇，第2章张勇、赵志傲，第3章张勇、赵志傲，第4章邱静、刘冠军、李天梅、王超，第5章刘冠军、张勇、李天梅、杨鹏，第6章邱静、李天梅、王超，第7章吕克洪、赵晨旭，第8章张勇、杨鹏、赵晨旭。博士生刘瑛、李华康、季明江、王刚、沈亲沐、谢皓宇、吴超、李乾以及硕士生王贵山、何其彧、林辰龙、方中正、程先哲等参加了全书内容的整理与校对以及部分内容的编撰工作。

本书涉及的相关技术研究与应用得到了军队主管部门、原总装备部通用测试技术专业组和中国航天科技集团公司第一研究院、中国电子科技集团公司第十四研究所、中国航空工业集团公司第一飞机设计研究院、中国航空研究院611所等单位的大力支持，在此深表谢意。空军装备部韩峰岩高工、空军工程大学肖明清教授、湖南大学周志雄教授以及国防科学技术大学胡芑庆教授对本书进行了审阅，并提出了宝贵意见，在此深表感谢。本书的出版得到了科学出版社的大力支持和中国科学院科学出版基金的资助，在此表示衷心的感谢。书中参考和引用了许多国内外有关学者的论文和著作，在此向各位学者表示感谢。

测试性是一门与装备应用结合非常紧密的学科，许多问题尚待进一步研究和探索，特别是将测试性先进理论和技术系统深入地贯彻落实到装备型号研制工程中的路还很长，需要装备管理、论证、设计、研制、试验、使用人员的共同努力。由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或不足之处，恳请读者批评指正。

作 者

2016年10月于湖南长沙国防科学技术大学

目 录

《装备测试性工程系列丛书》序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 测试性试验与评价内涵	1
1.1.1 测试性试验与评价概念及意义	1
1.1.2 装备全寿命周期测试性试验与评价工作内容	1
1.2 基于故障注入的测试性试验与评价流程及关键技术	4
1.2.1 基本流程	4
1.2.2 关键技术	5
1.3 测试性试验与评价现状	6
1.3.1 测试性试验与评价标准方面	6
1.3.2 测试性试验与评价关键技术方面	6
1.3.3 测试性使用评价方面	13
1.4 本书内容安排及所提供的技术支持	14
参考文献	17
第 2 章 测试性试验的数理统计基础	21
2.1 概述	21
2.2 测试性参数	22
2.2.1 故障检测率	23
2.2.2 故障覆盖率	24
2.2.3 故障隔离率	24
2.2.4 虚警率	25
2.2.5 平均故障检测时间	26
2.2.6 平均故障隔离时间	27
2.2.7 BIT/ETE 的可靠性维修性参数	27
2.2.8 测试性指标观测值的随机性	28
2.2.9 测试性预计的局限性	29

2.3	随机变量及其分布	32
2.3.1	基本事件与样本空间	32
2.3.2	大数定律与中心极限定理	32
2.3.3	随机变量	34
2.3.4	测试性试验中常用的分布	34
2.4	经典数理统计理论	36
2.4.1	抽样理论基本概念	37
2.4.2	统计推断	38
2.4.3	测试性试验中的抽样检验理论	44
2.4.4	经典数理统计方法的优缺点	47
2.5	Bayes 统计理论	48
2.5.1	Bayes 统计使用的三类信息	48
2.5.2	Bayes 定理	49
2.5.3	先验分布	49
2.5.4	后验分布	52
2.5.5	Bayes 统计推断	53
2.5.6	Bayes 统计理论的优缺点	54
2.6	本章小结	54
	参考文献	54
第3章	经典测试性试验方案	56
3.1	概述	56
3.2	测试性试验样本量确定方法	57
3.2.1	基于二项分布的样本量确定方法	57
3.2.2	基于正态近似的样本量确定方法	66
3.3	样本量分配与故障模式抽样	69
3.3.1	按比例简单随机抽样方法	69
3.3.2	按比例分层分配方法	71
3.4	故障率估计方法	71
3.4.1	基于专家数据的故障率估计方法	72
3.4.2	基于 Bootstrap 方法的故障率极大似然估计及分析	74
3.5	本章小结	77
	参考文献	77

第 4 章 测试性试验方案优化设计	79
4.1 概述	79
4.2 经典测试性试验方案问题分析	80
4.3 测试性多源先验数据分析及处理	81
4.3.1 测试性摸底先验数据分析及处理	81
4.3.2 测试性增长试验信息分析及处理	84
4.4 测试性试验方案优化设计	87
4.4.1 基于比例因子的试验方案	87
4.4.2 基于 Bayes 后验风险准则的试验方案	89
4.4.3 基于 SPOT 方法的试验方案	95
4.4.4 基于截尾 SPOT 方法的试验方案	107
4.5 本章小结	114
参考文献	114
第 5 章 测试性试验实施与故障注入	116
5.1 概述	116
5.2 测试性试验准备与实施	116
5.2.1 测试性试验准备	116
5.2.2 测试性试验实施	117
5.3 故障注入基本原理与常用故障注入方法	120
5.3.1 故障注入基本原理	120
5.3.2 故障注入方法分类	120
5.3.3 基于模拟的故障注入方法	121
5.3.4 基于物理的故障注入方法	126
5.3.5 典型的故障注入系统	134
5.4 基于故障传递特性的位置不可访问故障注入方法	136
5.4.1 测试性验证试验故障注入有效性分析	137
5.4.2 故障传递特性分析与量化	143
5.4.3 基于故障传递特性的故障建模	150
5.4.4 基于故障传递特性的位置不可访问故障注入	150
5.4.5 应用案例	152
5.5 本章小结	155
参考文献	155

第 6 章 测试性指标评估方法	157
6.1 概述	157
6.2 经典测试性指标评估方法	158
6.2.1 点估计方法	158
6.2.2 区间估计方法	159
6.2.3 FDR/FIR 估计精度分析	162
6.3 基于多源先验数据的测试性指标评估	167
6.3.1 先验分布及其参数确定	168
6.3.2 多源先验数据相容性检验及可信度计算	175
6.3.3 基于多源先验数据的测试性指标评估模型	178
6.3.4 应用案例	179
6.4 基于 Bayes 变动统计理论的测试性指标评估	184
6.4.1 总体技术思路	184
6.4.2 FDR/FIR 的 Bayes 评估模型	185
6.4.3 模型稳健性分析	196
6.4.4 验证评估案例	198
6.5 本章小结	206
参考文献	207
第 7 章 测试性增长试验技术	208
7.1 概述	208
7.2 测试性增长的概念与途径	209
7.2.1 测试性增长的基本概念	209
7.2.2 测试性增长的时效性	210
7.3 测试性增长试验的概念与流程	213
7.3.1 测试性增长试验的概念	213
7.3.2 测试性增长试验的流程	214
7.4 测试性增长试验的规划研究	217
7.4.1 基于及时纠正的试验规划研究	217
7.4.2 基于延缓纠正的试验规划研究	223
7.5 测试性增长试验的跟踪预计研究	227
7.5.1 基于 Bayes 统计理论的测试性增长指标评估	227
7.5.2 考虑非理想纠正的增长概率模型	230

7.5.3 测试性增长跟踪预计曲线绘制	237
7.6 本章小结	239
参考文献	239
第8章 测试性虚拟试验技术	242
8.1 概述	242
8.2 测试性虚拟试验的基本流程	243
8.3 测试性虚拟试验的关键技术	243
8.3.1 面向测试性的虚拟样机建模技术	243
8.3.2 基于模型的故障注入样本序列生成技术	270
8.4 测试性虚拟试验案例	296
8.4.1 导弹控制系统	297
8.4.2 航向姿态系统	317
8.5 基于实物试验与虚拟试验相结合的测试性试验技术	330
8.6 本章小结	332
参考文献	332
附录A 标准正态分布表	334
附录B t 分布表	335
附录C F 分布表	338
附录D 二项分布单侧置信下限	350
附录E 二项分布单侧置信上限	354

第 1 章 绪 论

1.1 测试性试验与评价内涵

1.1.1 测试性试验与评价概念及意义

测试性是指装备能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降),并有效隔离其内部故障的一种设计特性^[1,2]。良好的测试性设计对于提高装备的维修保障水平和战备完好性、降低全寿命周期费用等具有重要意义^[3,4]。

近年来,测试性作为装备的一个重要特性越来越受到重视,订购方对飞机、导弹、雷达等新型装备提出了明确的测试性指标要求。随着装备测试性工程的推进,如何发现测试性设计不足、指导测试性改进,如何判断装备的测试性指标是否达到合同规定的要求,如何给出订购方和承制方都认可的合理评价,成为装备面临的现实问题,也正是开展测试性试验与评价工作的意义所在^[5,6]。

广义上,检验或评价产品测试性水平的工作都可以纳入测试性试验与评价的范畴。GJB 3385—98《测试与诊断术语》描述的测试性验证是测试性试验与评价中的关键工作之一,其定义为:为检验研制产品满足合同规定的测试性要求而进行的工作^[7]。测试性试验与评价的目的有:①识别装备的测试性设计缺陷,采取有效的措施予以纠正,实现测试性的持续改进和增长;②承制方对装备的故障检测率、故障隔离率等测试性水平进行摸底,判断装备当前测试性水平与合同规定的设计要求之间的差距;③订购方评估、确认装备的测试性设计水平是否符合规定的测试性定量和定性要求,为装备定型、鉴定或验收提供依据;④评估、确认装备在实际使用中的测试性水平,为测试性熟化、改进测试性水平提供指导。测试性试验与评价工作直接影响装备的研制质量和进度,是保证和检验装备测试性水平的重要环节。

1.1.2 装备全寿命周期测试性试验与评价工作内容

国内外相关标准和文献对测试性试验与评价的内容划分描述不一。按全寿命周期内工作时机和目的,测试性试验与评估内容可分为研制阶段的测试性核查、定型与验收阶段的测试性验证以及实际使用阶段的测试性使用评价。

装备全寿命周期内测试性试验与评价工作流程如图 1.1 所示。

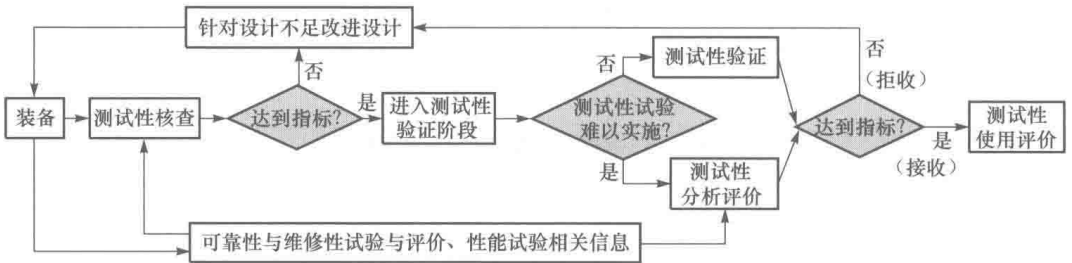


图 1.1 全寿命周期内测试性试验与评价工作流程

1) 测试性核查

测试性核查是承制方为实现装备的测试性要求,贯穿于整个设计研制过程的试验与评价工作。测试性核查的主要目的是对各种研制试验过程中的故障检测、隔离结果及虚警情况进行分析和评价,发现测试性设计缺陷并采取改进措施,使装备测试性得到持续改进。

测试性核查主要包括测试性分析与预计、固有测试性核查、测试性研制试验等^[8,9]。测试性分析与预计一般是在方案阶段进行测试性建模与分析,估计装备可达到的测试性水平,为选择设计方案或转入新的研制阶段提供依据,目前可采用的测试性建模与分析工具包括 TEAMS、eXpress、TADES 等^[4,10-12]。固有测试性核查有助于识别固有测试性设计的缺陷,确保固有测试性设计的有效性。测试性研制试验一般是在产品样机研制出后,为确认产品的测试性设计特性和暴露产品的测试性设计缺陷,由承制方或指定的试验机构,在产品的半实物模型/样机/试验件上开展的故障注入/模拟试验与分析过程。测试性摸底试验是指为在定型阶段的装备测试性验证前做到“心中有数”,全面检查产品测试性设计效果的一种测试性研制试验。测试性分析与预计、测试性研制试验等是测试性增长的重要过程^[13,14]。

2) 测试性验证

测试性验证是指由订购方指定的试验机构在实验室或实际使用环境下,按抽样设计的试验方案,对装备实物样机注入一定数量的故障,用测试性设计规定的方法进行故障检测与隔离,评估装备的测试性水平,判断是否达到规定的测试性定量要求。测试性验证一般在定型阶段进行。“测试性验证”术语来源于 GJB 3385—98《测试与诊断术语》和 GJB 2547—95《装备测试性大纲》^[7,15]。在 GJB 2547A—2012《装备测试性工作通用要求》中,将“测试性验证”改称为“测试性验证试验”,但工作内容基本没变^[2]。考虑到测试性验证的工作内容既包括试验又包括评价,“测试性验证试验”术语不便于涵盖所有验证工作,本书在此沿用 GJB 3385—98《测试与诊断术语》和 GJB 2547—95《装备测试性大纲》中的术语,还是称为“测试性验证”,而将测试性验证中开展的试验称为“测试性验证试验”。

测试性验证包括为装备设计定型提供依据而进行的测试性鉴定和为验收批量

装备的测试性水平而进行的测试性验收。对于难以实施测试性验证的产品,可收集产品与测试性有关的设计资料、试验数据、运行数据等,通过工程分析、虚拟样机建模分析等途径进行综合分析,评价装备是否满足规定的测试性要求,即以综合分析评定代替测试性验证来确定是否符合规定的测试性要求,为装备设计定型提供依据。这种手段在 GJB 2547A—2012《装备测试性工作通用要求》中称为“测试性分析评价”。近年来,基于虚拟样机的测试性虚拟试验得到了一定程度的研究与发展,可作为测试性分析评价的一种有效手段^[16-19]。

测试性验证是订购方主导、承制方参与,一般委托第三方评价机构进行的测试性试验与评价活动,主要服务于装备的设计定型,验证结果是装备设计定型的重要依据。其规程与质量体系要求严格,技术与实施过程规范,是装备测试性试验与评价中的关键工作,也是具有技术代表性的测试性试验与评价工作。

3) 测试性使用评价

测试性使用评价是指在实际使用条件下,为评价装备的实际测试性水平而进行的工作。其主要目的是评价装备在实际使用条件下达到的测试性水平,确定是否满足规定的测试性要求,发现装备的测试性缺陷,为外部测试设备的改进、装备改型和新装备研制等提供支持信息。装备部署后,通过收集装备在实际使用中的测试性数据,获得足够的数量后,用选定的统计分析方法(如区间估计、点估计等)确认装备的测试性水平,评价其是否满足规定的要求。此阶段不再采取故障注入试验,而是让装备自然发生故障并实施故障检测/隔离,所收集到的测试性数据是最可信的,评估结果也最接近真实值,但需要很长的时间。

4) 各项测试性试验与评价工作对比与联系

从试验阶段、试验目的、试验方式、试验场所、实施者等方面进行对比,各项测试性试验与评价工作对比情况见表 1.1。

表 1.1 各项测试性试验与评价工作对比

类型	试验阶段	试验目的	试验方式及内容	受试品	试验场所	优缺点	实施者
测试性 核查	研制 阶段	暴露测试性设计缺陷、改进测试性、测试性增长、测试性摸底	测试性分析与预计、固有测试性核查	设计方案、图纸	实验室	代价小,准确性低	承制方或委托第三方评价机构
			测试性研制试验;以故障注入为基本手段的试验	实物样机	实验室	准确性高,代价大	
测试性 验证	定型、 验收 阶段	确定装备的测试性指标是否满足合同规定的要求	测试性验证试验;以故障注入为基本手段的试验为主,必要时辅以测试性分析评价	实物样机为主,虚拟样机为辅	实验室 为主	订购方采信的主要方式,代价大,准确性高	订购方主导,委托第三方评价机构
测试性 使用 评价	使用 阶段	确定装备的测试性水平是否满足规定的使用要求	收集装备在使用中的测试性数据,评价装备测试性水平	实物装备	使用 现场	准确性高,数据收集时间长	使用单位或第三方评价机构

上述工作既有区别,又相互联系。测试性核查主要是在装备研制阶段通过试验和分析等方式检查测试性设计工作的有效性,纠正设计缺陷,实现测试性增长,逐步达到测试性的各项要求,为确保测试性验证顺利通过奠定基础。测试性核查信息可为测试性验证提供支持;测试性验证的结果可以为检验测试性核查工作的正确性提供依据和参考。测试性核查报告中的各种有关数据还是测试性验证阶段测试性分析评价所收集数据的重要组成部分,测试性核查和测试性验证的最终目的是确保投入使用的装备测试性满足要求。测试性使用评价结果可用于检验测试性核查和测试性验证工作的正确性,也可用于指导使用期间测试性改进。

测试性验证是要求规范、具有技术代表性的测试性试验与评价工作,对试验方案的确定、试验实施与故障注入方式、指标评估方法都有规范、严格的规定。测试性核查中的测试性研制试验方案制定比较灵活,既可以采用规范、确定的试验方案,也可根据设计要求、测试性工作计划和具体评价项目需求等确定,故障注入方式与验证中的故障注入试验基本相同。测试性使用评价中主要是收集装备使用阶段发生的故障及测试信息进行评价。测试性核查、测试性验证、测试性使用评价三者的指标评估方法都是基于概率统计理论,但其数据来源不同。

可以看出,上述工作在技术上存在一定的共性。其中,在实物装备上注入故障为基本手段进行的测试性试验与评价是现阶段典型的试验与评价方式,主要包括研制阶段的测试性研制试验与评价、定型验收阶段的测试性验证等。如何准确、高效地进行该方面的工作综合反映了测试性试验与评价中的共性关键技术问题,如试验方案的科学合理设计、故障注入、指标评估等。该方面技术的研究,对于装备测试性研制试验与评价、测试性增长、测试性摸底、测试性验证及测试性使用评价都具有重要意义。本书即主要围绕其基本过程与关键技术进行阐述,测试性试验与评价中的其他内容如固有测试性核查等,可参考 GJB 2547A—2012《装备测试性工作通用要求》^[2],基于模型的测试性分析与预计技术可参考本套《装备测试性工程系列丛书》之二——《装备测试性建模与设计技术》等^[4]。

1.2 基于故障注入的测试性试验与评价流程及关键技术

1.2.1 基本流程

在实物装备上注入故障为基本手段进行的测试性试验与评价基本流程如图 1.2 所示,主要包括试验组织建立、产品技术状态确认、产品故障模式及影响分析确认、测试性试验大纲制定与评审、试验方案设计与试验前检查、测试性试验实施、测试性试验报告编写与评审等环节。其中,试验组织建立、产品技术状态确认是进行测试性试验的前提,产品故障模式及影响分析确认是测试性试验与评价的