

Radar BIT Status Monitoring and
False Alarm Suppression Technology

雷达BIT状态监测 与虚警抑制技术

胡文华 刘利民 郭宝锋 著
薛东方 徐 艳 朱常安

 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

本书针对雷达 BIT 技术中存在的状态监测点设置不合理、监测深度不够、虚警率高等问题,从雷达监测点优化设计、整机性能监测、虚警机理分析与虚警抑制等方面进行了理论与技术研究,主要内容包括雷达智能 BIT 技术、雷达状态监测点的优化与诊断策略设计、雷达智能 BIT 整机性能监测、雷达 BIT 系统结构模型及虚警分析、BIT 系统虚警抑制技术。

本书可为雷达 BIT 设计、监测以及故障诊断领域人员提供理论基础与方法指导,也可为高校人才的培养提供理论和技术支撑。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

雷达 BIT 状态监测与虚警抑制技术 / 胡文华等著. --
北京:北京理工大学出版社,2023.3
ISBN 978-7-5763-2274-3

I. ①雷… II. ①胡… III. ①雷达信号处理-设备状
态监测-研究 ②恒虚警检测器-研究 IV. ①TN957.51

中国国家版本馆 CIP 数据核字(2023)第 064452 号

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68944723(其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京捷迅佳彩印刷有限公司

开 本 / 710 毫米×1000 毫米 1/16

印 张 / 12.25

字 数 / 160 千字

版 次 / 2023 年 3 月第 1 版 2023 年 3 月第 1 次印刷

定 价 / 78.00 元

责任编辑 / 多海鹏

文案编辑 / 闫小惠

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前 言

现代雷达涉及多学科和应用领域,随着各种高新技术的应用,雷达呈现复杂化、精密化和自动化的发展趋势,对其测试性和维修性也提出了更高的要求。在提高雷达测试性和维修性的众多措施中,机内测试(Built-in Test, BIT)技术是近年来最成功、最有效的技术手段,是复杂电子装备整体设计、分系统设计、状态监测、故障诊断、维修决策等方面的关键共性技术,是改善雷达测试性、提高诊断能力和维修效率的重要途径。在当前雷达 BIT 技术中,存在状态监测点设置不合理、监测深度不够、虚警率高等问题,这些问题一直阻碍着雷达 BIT 效能的充分发挥和更广泛、更深入的应用。为解决常规 BIT 中存在的各种问题,急需得到智能 BIT 技术的支持,特别是在状态监测与虚警抑制方面。本书重点介绍雷达装备智能 BIT 状态监测和虚警抑制技术。

全书共分 6 章:第 1 章是绪论,介绍了国内外 BIT 技术发展概况,分析了 BIT 技术中的状态监测和虚警问题;第 2 章是雷达智能 BIT 技术,介绍了雷达 BIT 的分类与性能,从 BIT 的层次模型、状态监测系统、综合故障诊断系统 3 个方面介绍了雷达智能 BIT 的实现方式;第 3 章是雷达状态监测点的优化与诊断策略设计,介绍了基于故障树分析(FTA)和基于多信号流图(MSFG)模型的监测点优化与诊断策略设计,可以在满足故障

检测率和故障隔离率的基础上减少监测点，优化诊断方案；第 4 章是雷达智能 BIT 整机性能监测，结合 ATE 与 BIT 的发展趋势介绍整机性能监测的理论与方法，分析雷达天线馈电线系统、接收系统、发射系统、天线控制系统等典型系统中整机性能监测原理与方法；第 5 章是雷达 BIT 系统结构模型及虚警分析，建立了两种 BIT 系统结构模型，分别从两种诊断模型的相关参数出发，分析了不同诊断方法对参数的影响及导致 BIT 系统产生虚警的机理，给出了降低雷达 BIT 虚警的思路与技术途径；第 6 章是 BIT 系统虚警抑制技术，介绍了基于传感器数据证实与检测融合的虚警抑制技术以及基于高斯包络线性调频自适应信号分解（AGCD）快速算法的广义似然比信号检测降噪技术。

本书由陆军工程大学石家庄校区电子与光学工程系组织编写，由胡文华、刘利民、郭宝锋、薛东方、徐艳、朱常安著，付强、赵喜、史林、尹园威参与编写。

随着雷达及相关智能 BIT 技术的不断发展，一些新的理论和方法不断涌现，同时由于作者水平所限，本书在编写过程中难免存在疏漏和不足之处，恳请读者批评指正。

著 者

2022 年 10 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 雷达 BIT 技术概述	1
1.2 国内外 BIT 技术发展概况	4
1.2.1 BIT 的应用与发展	4
1.2.2 智能 BIT 技术	6
1.2.3 我国 BIT 技术现状	9
1.3 相关技术发展概况	10
1.3.1 BIT 状态监测	10
1.3.2 BIT 虚警问题	14
第 2 章 雷达智能 BIT 技术	19
2.1 雷达 BIT 的分类与性能	19
2.1.1 雷达 BIT 的基本要求	19
2.1.2 雷达 BIT 的分类	21
2.1.3 雷达 BIT 的指标	22

2.2	雷达故障的特点及其对检测诊断系统的要求	24
2.2.1	复杂电子系统故障的特点	24
2.2.2	雷达故障的特点及故障机理	26
2.2.3	对检测诊断系统的要求	29
2.3	雷达结构与故障的层次分析	29
2.3.1	层次分析理论与应用	29
2.3.2	雷达系统的层次结构	31
2.3.3	雷达故障的层次分析	32
2.4	雷达智能 BIT 的实现方式	34
2.4.1	雷达智能 BIT 层次模型	34
2.4.2	雷达智能 BIT 状态监测系统	35
2.4.3	雷达智能 BIT 综合故障诊断系统	37
2.5	本章小结	39
第3章	雷达状态监测点的优化与诊断策略设计	41
3.1	监测点的选择与设置	42
3.1.1	监测点的类型	42
3.1.2	监测点的设置原则	42
3.1.3	监测点的选择与设置方法	43
3.2	基于故障树分析 (FTA) 的监测点选取与诊断策略设计	45
3.2.1	故障树的概念及其数学描述	45
3.2.2	故障树分析中几种典型的重要度	48
3.2.3	基于故障树分析的状态监测点的选取	52
3.2.4	基于 FTA 与 BDD 的雷达 BIT 状态监测点的 优化选取	55
3.2.5	基于故障树分析的 BIT 故障诊断策略设计	58
3.3	基于多信号流图模型的监测点优化与诊断策略设计	60

3.3.1	多信号流图模型方法	60
3.3.2	多信号流图模型表示	61
3.3.3	监测点优化与诊断策略设计	63
3.4	本章小结	68
第4章	雷达智能 BIT 整机性能监测	69
4.1	雷达智能 BIT 整机性能监测的可行性探讨	69
4.1.1	雷达 BIT 状态监测的特点与需求	69
4.1.2	基于 BIT 与 ATE 结合的雷达整机性能监测	71
4.2	整机性能监测总体方案	73
4.2.1	整机性能监测结构模型	73
4.2.2	整机性能监测工作流程	75
4.2.3	整机性能监测实现方式	77
4.3	整机性能监测原理与方法	78
4.3.1	天线馈电线系统性能监测	78
4.3.2	接收系统性能监测	91
4.3.3	发射系统性能监测	97
4.3.4	天线控制系统性能监测	99
4.4	本章小结	103
第5章	雷达 BIT 系统结构模型及虚警分析	105
5.1	BIT 系统结构模型	105
5.1.1	雷达 BIT 动态系统数学模型	105
5.1.2	基于信息处理流程的雷达 BIT 系统结构模型	108
5.2	BIT 系统中的虚警及其对雷达的影响	113
5.2.1	虚警及虚警率的概念与现象	113
5.2.2	虚警对雷达的影响	116

5.3	雷达 BIT 虚警机理分析	117
5.3.1	BIT 故障诊断不确定性分析及建模	117
5.3.2	基于信息处理流程的虚警机理分析	120
5.3.3	基于动态系统数学模型的虚警机理分析	126
5.4	雷达 BIT 虚警原因与虚警抑制方案	133
5.4.1	虚警产生的原因概括	133
5.4.2	减少雷达 BIT 虚警的思路与技术途径	134
5.5	本章小结	139
第 6 章	BIT 系统虚警抑制技术	141
6.1	基于传感器数据证实与检测融合的虚警抑制技术	141
6.1.1	方法的提出	141
6.1.2	传感器数据证实与检测融合 BIT 系统模型	143
6.1.3	传感器数据证实虚警性能分析	148
6.1.4	传感器数据证实与检测融合系统虚警性能分析	152
6.2	基于 AGCD 快速算法的广义似然比信号检测降噪技术	157
6.2.1	现代降噪方法概述	157
6.2.2	AGCD 快速算法降噪方法	160
6.2.3	AGCD 原理及其快速算法	162
6.2.4	基于 AGCD 快速算法的广义似然比信号检测 降噪原理	165
6.2.5	仿真结果及分析	171
6.3	本章小结	172
	参考文献	175

第 1 章

绪 论

1.1 雷达 BIT 技术概述

随着电子技术和计算机技术的迅猛发展,各种高新技术相继应用到雷达装备的设计与生产中,现代雷达呈现日益复杂化、精密化和自动化的发展趋势,其组成越来越复杂,功能越来越强大,随之而来的问题是系统的测试和维修变得越来越困难。测试性和维修性对装备的作战能力、生存能力、保障费用等产生很重要的影响,迫切需要武器装备本身具备检测、隔离故障的能力,以缩短维修时间。正因为如此,采用自动检测、在线测试手段对雷达系统的内部运行情况进行状态监测及故障诊断成为雷达领域研究的一个新方向。有关资料表明,在美国雷达研究机构中,有一半人从事雷达本体研究,另一半人从事支持和保障工作,其中最主要的是进行自动测试及自动检测技术的研究,这也反映了这种新的研究趋势。

在提高装备测试性和维修性的众多措施中,BIT 技术是近三十年来最成功、最有效的技术手段。所谓 BIT 技术,是指装备内部提供的检测、诊断或隔离故障的自动测试能力,它利用涉及被测单元内部的机内测试设备 (Built-in Test Equipment, BITE) 或自动测试硬件或软件对被测单

元全部或部分进行测试。BIT 技术是复杂电子装备整体设计、分系统设计、状态监测、故障诊断、维修决策等方面的关键共性技术。BIT 技术自 20 世纪 70 年代初开始应用, 之后发展迅速, 通过 BIT 自动检测和隔离故障, 能够提高故障诊断的精确性, 显著缩短系统或设备的平均修复时间 (Mean Time to Repair, MTTR); 通过 BIT 可以减少维修人员的数量, 降低对维修人员的技术要求, 进而提高武器装备的战备完好率和出勤率; BIT 技术对高效保持和发挥装备的作战效能, 大幅度降低维修保障费用具有重要意义。

BIT 技术从发展初期就引起了各国的普遍关注, 现已应用于军用飞机、雷达、舰船、战车、民用高科技产品等诸多领域。研究表明, 在复杂航空系统中, 当采取手工方式进行基层级设备检测时, 设备测试、故障检测和隔离需占用 30%~60% 的维修时间, 应用 BIT 技术则可降低 50% 的维修时间。美军综合数据统计也表明, 在武器装备的全寿命周期费用中, 使用与保障费用占总费用的 72%, 而使用先进的 BIT 技术则可大大降低这一比例。美国在这一领域研究最早、开展时间最长, 研究内容也最为深入, 美军 F-15、F-16、F-18、F-22、F-35 (A、B、C 型) 战斗机, F-117 隐形战斗机, B-2 轰炸机, M1 主战坦克, AN/TPQ-36、AN/TPQ-37 型全向炮位侦察雷达, 波音 767 和波音 777 等都大量采用了 BIT 技术。欧洲一些著名军工企业生产的先进武器装备中也采用了 BIT 设计, 如瑞士厄利空-康特拉夫斯公司生产的“防空卫士”火控系统, 不但性能世界一流, 而且测试性设计相当完备, 在国际武器市场上极受欢迎。

我国雷达专家、学者以及使用与研制机构等都在 BIT 技术的理论与应用方面做了深入的研究, 在提高雷达的可靠性、可测性、可维修性与可操作性方面做了大量卓有成效的工作, BIT 技术在简化雷达装备的维修过程、提高装备的保障效率、降低装备的保障费用、保持和发挥装备的作战效能方面起到了重要的作用。然而, 总体上我国 BIT 的理论、技术和应用水平不高。与 BIT 具体实现技术相比较, 由于侧重型号任务中的 BIT 应用, 因

此 BIT 的基础理论和方法研究显得相对薄弱, BIT 的应用仍然处于常规 BIT 的水平。常规 BIT 存在最突出的问题是故障诊断能力差、虚警率高、不能隔离间歇故障等。这些问题严重降低了 BIT 诊断结果的可信度,影响了使用和维修人员对 BIT 的信任,阻碍了 BIT 效能的充分发挥和更广泛、更深入的应用。当前雷达 BIT 的研究与应用存在状态监测点设置不合理、状态监测深度不够、虚警率高等问题,主要体现在以下 3 个方面:

①状态监测点设置不合理,没有对监测点实现优化设计。雷达属于大型复杂系统,要对雷达系统的所有故障模式实现在线监测与诊断是不可能的。一方面,雷达 BIT 在设计时受故障检测率与故障隔离率等指标的影响,往往会使监测诊断系统复杂化,当片面追求故障检测率时,出现监测点冗余现象;另一方面,BIT 系统设计时对故障原因、故障模式考虑不够,当故障检测率下降时,又发现监测点不够。如何平衡这两者之间的关系,进行状态监测点的优化选择,实现对雷达系统运行状态的有效监测,做到隔离故障、定位准确,是一个值得探讨的问题。

②状态监测深度不够,在无明显故障征兆的情况下不能对雷达的整机性能进行有效监测。雷达整机性能指标的好坏直接关系到雷达效能的发挥,对整机性能的监测是衡量雷达是否处于最佳工作状态的主要手段。通常,雷达的状态可以分为正常状态、异常状态和故障状态 3 种情况。正常状态是指雷达整体或其局部没有缺陷,或虽有缺陷但其性能仍在允许的限度以内。异常状态是指缺陷已有一定程度的扩展,使雷达相关信号发生一定的变化,性能已经劣化,但仍能维持工作。此时,雷达应在监护下运行,开始制订相关检修计划。故障状态是指雷达性能指标已明显下降,不能维持正常工作。一种情况是常规 BIT 不能对雷达的整机性能进行监测,有些整机性能下降的异常状态任其发展会导致灾难性故障,因此有必要监测整机性能指标的变化;另一种情况是常规 BIT 无故障征兆或故障指示,而雷达却出现功能故障(如雷达无法发现目标、跟踪失败或跟踪不稳定),这是因为雷达的整机性能出现问题,其往往不是某一部分出现硬

故障的问题，而是系统整机性能参数变化（或调整不当）的问题。造成这一问题的原因是没有对雷达的整机状态进行有效监测。

③虚警率高，虚警问题严重。雷达 BIT 系统中虚警率高是一个共性的问题，是阻碍 BIT 进一步发展和应用的主要原因之一，如何降低和防止虚警是 BIT 技术中亟待突破的关键问题。究其原因可能在于：装备 BIT 设计过程中，考虑较多的是 BIT 的故障检测率和故障隔离率，对 BIT 虚警问题分析不够；具有 BIT 设计的装备一般尚未或刚刚投入使用，缺乏 BIT 的实际使用数据和经验；对 BIT 虚警问题的系统性分析与研究不够等。从国内来看，由于 BIT 技术发展较晚，目前仍然缺乏 BIT 的实际使用数据和经验，对虚警问题分析不够，这方面的资料相对缺乏。目前虽然各种智能 BIT 技术在 BIT 虚警抑制理论和应用方面取得了较为明显的效果，但在智能 BIT 研究中仍存在以下问题：雷达 BIT 虚警原因分析仍主要是工程经验的总结，从机理上对虚警问题的分析不够，并且缺乏定量的理论分析；单纯地强调故障检测率和故障隔离率，而没有从故障诊断过程的实质去考虑如何提高 BIT 故障诊断能力、降低虚警率。

目前，雷达装备中的 BIT 已具有基本的功能，需要解决常规 BIT 中存在的各种问题，急需得到智能 BIT 技术的支持，特别是在状态监测与虚警抑制方面。智能 BIT 状态监测与虚警抑制相关问题对雷达系统的 BIT 设计具有重要价值，对提高雷达的维修性、测试性和完好性方面具有重要意义。

1.2 国内外 BIT 技术发展概况

1.2.1 BIT 的应用与发展

BIT 的研究和应用开始于美军航空电子设备。20 世纪 50 年代末期，美国为机载雷达等装备配置了简易的 BIT 装置，用于检测设备中的少量故

障。20世纪60年代, BIT增加了故障隔离能力, 能够检测重要的功能故障, 并将故障隔离到外场可更换单元 (Line Replaceable Unit, LRU)。20世纪70年代, BIT技术得到了迅速发展, 性能大大提高, 包括BIT在内的测试理论和方法也逐步建立起来。事实上, 早期的航空电子设备为了增强自身的系统可靠性, 有关重要部件就有了分散的自检, 它通过附加在系统内的硬件电路对其进行在线的自动检测, 这种技术逐渐发展成一门独立的学科——BIT技术。BIT技术可以改善电子装备的测试性、维修性, 减少故障查找及隔离时间, 以及降低对外部测试设备的要求。

BIT技术一出现, 美国军方就高度重视, 并开展了大量工作。美国海军1976年率先实施BIT设计指南; 美国国防部1978年颁发《设备或系统的BIT、外部测试、故障隔离和测试性特性要求的验证及评价》(MIL-STD-471A), 规定了BIT验证及评价的方法及程序; 1983年颁发《系统及设备维修性管理大纲》(MIL-STD-470A), 承认BIT及外部测试不仅对维修性设计特性产生重大影响, 而且影响武器系统的采购及寿命周期费用; 1985年专门颁发《电子系统及设备测试性管理大纲》(MIL-STD-2165), 规定了武器装备中测试性的管理、设计、分析和验证等方面的要求。1993年MIL-STD-2165的修改版MIL-STD-2165A《系统及设备测试性大纲》将测试性、BIT扩展到除了电子系统之外的其他各类系统和设备。1995年美国国防部将MIL-STD-2165A改编为MIL-HDBK-2165《系统和设备测试性手册》。2001年, IEEE颁布了IEEE STD 1149.6《高级数字网络的边界扫描标准》。2004年, IEEE颁布了IEEE P1522《可测性与诊断性特征和测度标准》、IEEE P1598《测试需求模型 (TeRM) 标准》、IEEE P1636《维修信息收集与分析接口 (SIMICA) 标准》等。随着片上系统 (System on Chip, SoC)、片上网络 (Net on Chip, NoC) 和微机电系统 (MEMS) 等产品出现, 超大规模嵌入式系统的测试问题成为测试学界的研究热点。2005年, IEEE基于IEEE Std 1149.1颁布了IEEE STD 1500《嵌入式芯核的测试标准》, 近期IEEE又颁布了IEEE STD 1500《基于边界扫描的可编

程器件的嵌入式系统配置标准》。

伴随着一系列标准的制定和执行, BIT 技术从 20 世纪 80 年代迅速应用于飞机、雷达、舰船、战车等诸多领域, 得到了前所未有的快速发展, 并逐步扩展应用于其他军用电子产品和民用高科技产品。BIT 技术在发展的过程中经历了 3 个阶段: 第一阶段主要是根据相关经验、设计指南等, 按照电路系统的具体要求, 通过在电路内部增加一定的测试电路实现 BIT; 第二阶段结构化 BIT 逐渐成熟, 该阶段以 BIT 体系结构设计技术和边界扫描技术为主要特征, 层次 BIT 是该阶段 BIT 结构设计的主流, 很多先进的装备均采用这种结构, 如 F-16、F-22、F-35 等, 一些民用系统, 特别是航空系统中也广泛采用这种设计; 第三阶段智能 BIT 逐渐成为 BIT 技术的主流, 主要针对常规 BIT 的设计不够完善, 当装备常规 BIT 的武器系统投入外场使用后, 性能下降, 远远满足不了设计要求, 普遍存在故障检测率和故障隔离率低、虚警率高、故障不能复现、重测合格率高等问题。美国空军作战试验和评估中心对 APG-63 (F-15)、APG-66 (F-16) 及 APG-65 (F-18) 雷达 BIT 的分析表明, 这些 BIT 的诊断能力仅达 50%~70%, 虚警率高达 65%, 从武器系统拆下的外场可更换单元大约有 70% 是没有故障的。

为解决上述问题, 美国一些科研机构组织力量进行有关研究, 分析电子系统故障产生的原因, 探索故障检测及诊断的方法, 逐渐形成了较为系统的理论和方法。特别是 20 世纪 80 年代中期以后, 随着大规模集成电路在电子装备中的广泛应用, 以及人工智能理论的发展及应用, BIT 技术的发展进入一个新阶段——智能 BIT (Intelligent BIT)。

1.2.2 智能 BIT 技术

智能 BIT 就是将包括专家系统、神经网络、模糊理论、信息融合等在内的智能理论应用到 BIT 的设计、检测、诊断、决策等方面, 提高 BIT 综合效能, 从而降低设备全寿命周期费用的理论、技术和方法。

智能 BIT 的概念由美国罗姆航空发展中心 (RADC) 的 Dale W. Richards 于 1987 年首次提出, 当时的主要目的是把人工智能理论引入 BIT 的故障诊断中, 解决常规 BIT 不能识别间歇故障的问题。在智能 BIT 概念提出之前, 美国曾于 1984 年提出一个类似的概念——灵巧 BIT (Smart BIT)。1984 年, RADC 与 Grumman 航空公司签署了“Smart BIT”计划, 于 1985 年完成, 并形成一份总结报告“Smart BIT” (RADC-TR-85-148)。该灵巧 BIT 主要包括综合 BIT、信息增强 BIT、改进决策 BIT、维修历史 BIT 4 个部分, 重点在于用不同来源的多方面知识 (内部测试数据、外部环境参数和暂态监控等) 对 BIT 的结果做出更为可靠的判断, 以代替原来简单的“YES/NO”判断机制, 从而提高 BIT 的能力。在“Smart BIT”的基础上, RADC 于 1989 年完成了“Smart BIT-2”项目, 该项目主要研究自适应 BIT 技术, 包含 K 最近相邻算法、BP 神经网络算法、瞬态监测器的马尔科夫模型。美国空军莱特实验室于 1985 年实施的“宝石柱”计划, 以及后来的“宝石台”计划, 使 BIT 技术得到更大的发展。计划包含综合诊断专家系统、时间-应力测量模块和维修接口系统, 该综合诊断专家系统通过记录时间-应力测量模块的数据, 综合各种因素进行决策, 能提供较强的机内故障测试和隔离能力, 系统内各 LRU 的 BIT 故障检测率达到 99%, 故障隔离率也达到 98%。1992 年, RADC 与 Raytheon 公司开展的神经网络虚警滤波器 (NNFAF) 的技术研究, 进一步使智能 BIT 技术走向成熟。Raytheon 公司在 NNFAF 项目基础上, 于 1996 年完成了美国国防部高级研究计划局 (DARPA) 和美国陆军联合策划的“全球卫星通信维修 (GMM)”合作项目, 设计开发出一种基于 BIT 设计的综合决策和维修专家系统。它结合故障历史数据库、专家系统、趋势分析和异常检测工具库、维修记录数据库等, 以卫星通信为手段, 把军队维修中心的维修数据、专家知识、更新软件传输到野战维修终端, 增强了前方维修终端中 BIT 的决策能力, 降低了虚警率和误拆率。

智能 BIT 技术是降低 MTTR, 提高电子装备系统可靠性、维修性和战

备完好性的一项关键措施。20 世纪 50 年代, 美国火控/监视雷达的平均故障间隔时间 (Mean Time Between Failures, MTBF) 仅有 2~10 h, 20 世纪六七十年代也只有 50~100 h, 20 世纪 80 年代后由于广泛采用集成电路, 特别是智能 BIT 技术的研究与应用, 雷达可靠性明显提高, 其 MTBF 达到 1 000 h; 美军 F-16 飞控维修诊断系统 (FCMDS) 中采用了智能 BIT 技术, 使其诊断时间缩短了 26%, 诊断精度提高了 92%, 没有误拆的设备; 波音 777 的中央维修计算机上采用了基于专家系统的智能 BIT 技术, 该项技术使波音 777 比波音 747-400 节省 30%~40% 的费用。目前智能 BIT 得到了更进一步的发展, 在硬件数量限制的条件下, 尽量运用软件检测的方法, 软硬件相结合, 检测范围更广, 虚警率更低。例如, F-35 战斗机为了避免诊断技术中较高的虚警率, 在综合核心处理器中采用故障预测与健康管理 (PHM) 智能软件程序, 其可经常监控机内检测和来自子系统的参数信息。这种多层次结构的高智能系统利用填埋在机身各处的传感器采集飞机系统状态的技术数据, 由高级管理器利用人工智能技术对这些数据进行推理分析, 确定系统提供的信息是否为真, 从而有效地消除虚警并预测故障。BIT 的检测范围更广, 逐步扩展到结构、子系统、任务系统、虚拟存储器系统、发动机、信号和联合分布式信息系统。随着电子技术和计算机技术的发展, BIT 理论和技术研究呈现以下趋势:

① BIT 与 ATE (Automatic Test Equipment, 自动测试设备) 相融合。BIT 的重要功能是把设备故障隔离到 LRU 或 LRM (Line Replaceable Module, 外场可更换模块), 而 ATE 的功能是把 LRU 或 LRM 中的故障隔离到 SRU (Shop Replaceable Unit, 内场可更换单元), 它们之间在使用上是相互配合的。一方面, 由于受软硬件增量限制, BIT 不可能完全完成性能监测, 达到较高故障隔离率的要求, 而 ATE 正朝着小型化、模块化、便携化、通用化方向发展, 电子集成度的提高使 ATE 小型化甚至芯片化成为可能, 这有利于 ATE 进一步嵌入 BIT 系统, 充分体现了 ATE 向 BIT 融合的特性; 另一方面, 随着 BIT 功能的更加强大, 其逐步具备了很多原来

ATE 才具备的故障检测、隔离、定位功能。高速计算机和集成电路性能的提升,使 BIT 在短时间内能够处理大量信息, BIT 故障覆盖率大大增加,故障定位更加快速、准确。目前美国正努力把包含专家系统在内的人工智能用于 BIT,这样可在 BIT 允许的 10% 软硬件增量范围内,大大提高 BIT 故障定位精度,同时减轻 ATE 的故障定位负担。

②建立综合诊断系统。综合诊断是提高武器系统诊断能力的关键,也是测试性和 BIT 的进一步发展目标。它的目标是接近 100% 的故障检测和隔离,实现系统恢复、外场更换及野战级和后方级修理。发展综合诊断技术,充分利用外部自动测试设备、维修人员经验、各种技术信息等弥补 BIT 的不足,使整个装备的故障检测和隔离的准确率接近 100%。

③人工智能应用于 BIT。传统 BIT 的单一算法不能准确、完整地反映系统的状态信息,往往由“错报”或“假报”造成虚警。20 世纪 80 年代中后期,神经网络与专家系统等智能理论和方法逐步发展,将其应用于 BIT,可使 BIT 具有连续监控、自动重构、知识冗余、学习机制等特点,以期提高诊断效率,减少 BIT 虚警。目前, BIT 智能化设计, BIT 信息智能化处理, BIT 智能诊断、决策,以及 BIT 智能故障趋势预测等领域的研究成果已陆续见诸报道。

总之,下一代 BIT 肩负的任务不仅限于检测、诊断,还包括控制、保护,具有综合状态监测、复杂故障诊断、精确故障定位、系统状态控制、关键部件保护等多种功能,其结构日益复杂,功能日渐强大,正发展为集状态监控、故障诊断、控制决策于一体的智能综合系统。

1.2.3 我国 BIT 技术现状

我国 BIT 技术起步较晚,从 20 世纪 80 年代中后期开始, BIT 的研制主要集中在大型电子系统中,其中最为典型的是各式雷达系统和机载设备。中国航天科工集团、航天测控中心、中国航空工业发展研究中心等多家机构都进行了研究,并取得了比较突出的成果,在 BIT 研究领域积累了