

BIT 技术发展及应用综述

王鉴渊, 李光升

(装甲兵工程学院 控制工程系, 北京 100072)

摘要: BIT (built-in-test, 也称机内测试、机内自检测) 技术作为系统和设备故障检测、定位和隔离的一种手段, 对于一些机载设备来说, 是一种非常重要的自检方法, 主要针对其系统故障, 通过其自检的手段改善机载系统的测试性能或者提高设备的诊断能力; 目前该技术的使用频率不管是在国防领域还是在民营领域的系统研制中都很高; 该文从机内测试技术的定义、类型、研究现状和展望未来发展趋势这几个方面进行了阐述; 总结了大量的文献资料, 介绍了 BIT 应用的功效: 投入使用后缩短了设备系统的平均修复时间 (MTTR); 在战备时期提高了武器装备的完好性, 在任务时期提高了任务成功率; 另外还能缩减装备维修人员, 放宽了对于技术人员的水平要求。总之随着装备复杂程度和技术含量越来越高, BIT 技术在维修性和测试性领域占据重要的一席, 是该领域的重要研究内容。

关键词: 机内测试; 测试性; 智能 BIT

A Summary of BIT Technology and Its Application

Wang Jianyuan, Li Guangsheng

(Department of Control Engineering, Academy of Armored Forces Engineering, Beijing 100072, China)

Abstract: BIT (Built-In-Test, also known as machine testing, built-in self testing) technology as a means of detection, fault location and isolation systems and equipment for airborne equipment, it is a very important approach, mainly for the system failure, improve the performance of airborne test system through the means of self or improve diagnostic equipment. At present, the frequency of the use of this technology is very high in both the national defense field and the private sector. This paper from the built-in test technology the definition, types, status quo and Prospect of the future development trend of this a few aspects; summarize the literature, introduces the application of BIT function; put into use to shorten the mean time to repair equipment system (MTTR); in combat time to enhance the weaponry incompleteness in the period, the task to improve mission success rate; also can reduce equipment maintenance personnel, technical personnel for relaxed level requirements. In short, with the increasing complexity and technology content of the equipment, BIT technology plays an important role in the field of maintainability and testability. It is an important research content in this field.

Keywords: built-in test; testability; intelligent BIT

0 引言

BIT (built-in-test, 也称机内测试、机内自检测) 的定义是系统或设备自身为故障检测、隔离或诊断提供的自动测试能力^[1]。从技术发展的角度来看, BIT 技术的产生是一个必然结果, 因传统的工程设计手段已经不能满足现阶段“并行工程”的要求。BIT 技术的核心目的就是提高装备系统的可靠性、维修性和测试性。从各实际应用案例分析来看该技术是近年来提高电子系统测试性、维修性的最有效果的技术之一。被广泛应用于各种军民飞机、船舶、车辆等对可靠性有较高要求的大型复杂系统中, 该技术主要被用于各系统装备的设计中, 另外在状态监测、故障诊断和决策维修等方面也起着重要的作用。

与传统的故障诊断与监控技术不一样的是, 在 BIT 技术中包含了一种新的“测试性设计”, 它所要考虑的问题是在系

统设计的一开始就把该系统的测试性考虑在其中, 然后再进行测试性设计; 实现良好的测试性就是利用已经设计在被测单元中的具有自测试的硬件或软件来对被测件进行测试与分析, 这就需要从被测系统的结构和层次方面考虑。通过这种设计可以实现各级故障的自动检测与隔离。

1 BIT 技术国内外研究现状

BIT 技术在国外应用较早。从 20 世纪 70 年代开始, 由于军用装备不断增长的可测试性需求, BIT 技术开始在航空电子等大型武器装备领域上得到应用, 相关的理论研究也随之展开。作为新发展的理论技术, 在这个时期相关研究机构为 BIT 技术制定了行业标准和规范, 这里面包括美国航空无线电公司 (ARINC) 的《BITE 设计和使用指南》与《机载维修设计指南》^[2], 美国国防部的《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》与《系统及设备维修性管理大纲》等。

BIT 技术发展于大型武器装备系统, 并且也是最早在这些领域上得到成熟应用, 典型代表有美军的轻型战斗机 F-16、第四代隐身战斗机 F-22、隐身轰炸机 B-2 和主战坦克 M1 等, 经过实际的验证, 借助于 BIT 技术, 上述武器装备的测

收稿日期: 2017-12-02; 修回日期: 2017-12-27。

作者简介: 王鉴渊 (1994-), 男, 江苏无锡人, 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

李光升 (1972-), 男, 山东安丘人, 副教授, 主要从事电力电子与电力传动方向的研究。

试性得到了很大程度的提高。随着 BIT 技术的进一步发展, BIT 技术朝着别的领域发展, 如军用电子设备和民间高科技电子产品领域, 集成电路 (IC) 设计便是其中之一。为满足规模越来越大的集成电路的测试性需求, 联合测试行动组织 (JTAG) 提出了边界扫描技术这一适用于数字电路的机内测试方法, 随后 IEEE 测试技术委员会将其设为 IEEE1149 系列测试标准, 促进了机内测试技术在超大规模集成电路中的发展, 并且对于数模混合电路的测试研究也起到了促进作用, 这极大地改善了电子设备的可测试性。

在 BIT 技术的发展与应用中, 虽然其在帮助装备改善测试性上取得了显著的效果, 但也在实际运用中暴露出了一些问题, 如虚报误报、使用维护费用高、测试效果不如预期等。国外军方与工业部门对其相当重视并对其进行深入的研究, 他们认为这些问题的根源在于实际的测试检测中缺乏综合各诊断要素的手段。对此, 美国国防工业协会 (NDIA) 提出了“综合诊断”的概念, 旨在使用一定途径对能够帮助进行武器装备诊断的各方要素进行综合。从 20 世纪 90 年代至今, 武器装备系统的信息化与综合化程度有了大幅度的提高, 系统也随之越发复杂。传统的以机械修复为主的维不是往常的定期维护和事后维修, 而是对其运行状态进行的实时监控, 并据此制定合适的维护计修保障开始逐渐转变为通过获取、传输、处理信息来进行的维修决策, 这些新型装备需求的划与维修方案, 以此来综合提高装备的测试性与可靠性。至今, BIT 技术的发展已从最开始的一个相对独立的测试诊断技术转化为综合故障检测与诊断系统中的一个核心技术。

对比国外研究状况, 国内 BIT 技术研究起步较晚, 从整体上来说, 国内的 BIT 技术研究着重于应用与具体实现方面, 理论研究则相对较少, 但也已经引起了相关专业研究者的重视。

对于 BIT 的研制运用较多的集中于大型或关键的武器装备系统上。如吕隽、刘维罡为解决导弹的测试性水平低问题使用了 BIT 技术, 并且充分运用到了既有的硬件条件实现边界扫描 BIT 技术, 避免因外加的额外硬件而导致的可靠性隐患。权赫等人对运载火箭电气系统全面实现 BIT 的可能性进行了研究, 在提高故障检测率、故障隔离率的同时也防止引入 BIT 测试模块故障导致的虚警告, 提出了控制系统 BIT 的设计方案和工作原理^[3], 最后从故障检测率、故障隔离率、虚警率等方面对系统方案进行了分析评价^[4]。该方案同样是利用到了当前该系统既有的微处理器等硬件设备设计 BIT 方案, 在提高故障检测率、故障隔离率的同时也防止引入 BIT 测试模块故障导致的虚警告^[5]。而孙旭升等对工作环境恶劣的核动力装置运用 BIT 技术构建了 PHM, 即预测与健康管理系统。李志强、缪毅等则是在已经应用 BIT 技术比较广泛的雷达领域内进一步对 BIT 技术进行优化改进, 他们先是在雷达 BIT 系统中使用经遗传算法优化后的 BP 神经网络故障诊断技术, 随后进一步将 BIT 技术的虚警告问题细分为“假报”与“错报”, 使用隐马尔可夫模型抑制假报, BP 神经网络和 D-S 证据理论进行故障定位, 从而抑制错报现象^[6]。

国内对 BIT 理论研究主要是从诊断策略改进与资源配置优化方面进行研究。杜敏杰等使用多信号流图建立测试与故障之间的模型, 并且以故障检测率、隔离率、虚警率为约束进行

测试点的非线性规划, 并且在此基础上建立了以测试代价最小为优化目标的 BITE、ATE 资源分配模型^[7]。于功敬等对当前国内研究较多的四种测试诊断策略优化方法: AO* 搜索算法、蚁群算法、离散粒子群算法以及混合离散粒子群一遗传算法的优缺点进行了比较论述, 并且对装备寿命周期中的各阶段测试项目和测试资源的调度优化进行了讨论与展望。郭明威通过建立待测系统的相关性模型, 综合考虑可靠性和测试代价, 利用 AO* 算法构建决策树, 根据信息量的大小依次选择测试点, 确定出优化的诊断策略序列^[2]。张陟在此基础上引入信息熵理论, 提出了优化的启发式信息熵算法^[8]。

随着武器装备的更新换代, BIT 技术的硬件需求也会得到满足, 扩大 BIT 技术的使用范围将是未来国内研究发展的一个方向。雷凌毅等就针对某型车载炮的电气系统, 设计了 BIT 与 ATE 联合使用的故障诊断系统。在对特种车辆故障诊断与健康管理系统的功能需求、总体架构、硬件和软件组成等技术进行了初步研究的基础上, 提出一套能够利用车辆综合电子系统提供的硬软件资源实现车辆关键系统的功能测试和性能监控的系统^[9]。

2 BIT 关键技术及实现

机内测试技术是提高系统可测试性、稳定性, 降低系统装备维护费用的关键技术^[10]。利用设置在系统内部的软硬件检测部分, 实现对系统内部的在线检测检测功能其具体作用如表 1 所示。

表 1 机内测试技术功能说明

BIT 作用	具体说明
提高诊断能力	具有良好层次性设计的 BIT 可以测试芯片、电路板、系统各级故障, 实现故障检测、故障隔离自动化
简化设备维修	BIT 的应用可以大量减少维修资料、通用测试设备、设备补给量、维修人员数量
降低总体费用	BIT 虽在一定程度上增加了产品设计难度和生产成本, 但综合实验、维修、检测和提高设备可靠性等各个方面来看, 能显著降低产品全生命周期费用

系统的可测试性是指在一定的条件下, 系统能够及时准确的确定其状态 (可工作、不可工作、性能下降) 和隔离其内部故障的设计特性, 而测试性设计就是以提高系统测试性为目的的设计手段^[11]。当前有关测试性研究的迅猛发展, 测试性、稳定性、可靠性、维修性已经成为相关的学科。为了提高系统工作可靠性和可维护性, 一般就是通过提高系统的可测试性来完成。

测试性的内涵主要分为自动测试设备 (ATE) 和 BIT 两个大块。传统的测试手段还是通过使用外部的测试性仪器 (ETE) 对被测设备进行检测分析, ATE 是 ETE 的自动产物。ATE 的缺点显露在, 维护费用较高、设备种类繁多、操作流程相对复杂、人员技术水平要求高, 并且不能对设备进行在线检测。反观 BIT 测试技术, 系统主装备不需要经过外部多家的设备就能完成对各系统的功能检测、故障诊断与隔离以及性能测试, 不仅仅是简单的离线测试^[12]。随着武器装备的跟新换代, 明显针对维修性要求的提高, 需要武器装备自身增添有

检测隔离故障的能力, 具备这种能力以达到缩短维修时间。所以 BIT 技术在目前的研究领域占据了了一席之地。

BIT 技术按不同要求可以分为很多类型, 按照其工作方式和时段不同, 其不同分类如表 2 所示。

表 2 BIT 技术的不同分类

名称	实现方式
主动 BIT	通过将测试激励引入系统而暂时中断系统工作
被动 BIT	不中断也不影响主系统工作状态
连续 BIT	连续监控系统工作状态
周期 BIT	以某一频率执行系统故障检测
手动 BIT	通过手动控制方式才执行系统故障检测
上电 BIT	当系统或设备通电时执行系统故障检测

3 BIT 测试点选择

测试点的选取是基于 BIT 技术的测试方法研究中的重要内容, 也是实现故障检测与隔离的基础。测试点选取的好坏直接影响到 BIT 的故障检测与隔离性能, 进而决定了被测对象的测试效果即直接影响到被测系统 BIT 的性能^[13]。进行测试点选择的基本原则是保证该组测试点能够提升系统的故障检测率、隔离率等各项指标, 但是也需要考虑到测试点的测试难易度、测试费用、可靠性等因素进行综合评判。

3.1 测试点的类型

总的来说测试点主要有三类: 无源测试点、有源测试点和有源/无源测试点。

1) 无源测试点。这类测试点的主要功能就是在电路中能够给出测试对象瞬间状态量的测试点。从图 1 和图 2 可形象的看出, 通常信号点位置位于扇入或者扇出节点, 这种测试点所能传达的信息只是电路内部的, 但是不能检测对内部的作用及其影响, 当然也不能检测到外部的行为。

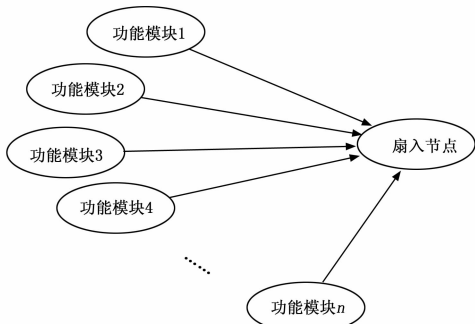


图 1 扇入节点

2) 有源测试点。这种测试点在测试过程中可以对电路内部的具体情况进行控制, 这种测试点的选取主要原则是要确保在加上有限的测试矢量输入后就能够明确电路的运行状态, 还必须考虑到测试点的数量和其分布要安排合理, 要做到把故障面完全覆盖。

3) 有源/无源测试点。这类测试点在总线结构中出现的频率较高, 在做测试时, 设备被当做是一个总线上的一个单元。选择这些测试点就必须考虑到其在测试期间, 必定有有源和无源的双重影响。在无源状态时, 它是作为接收器使用; 而在有

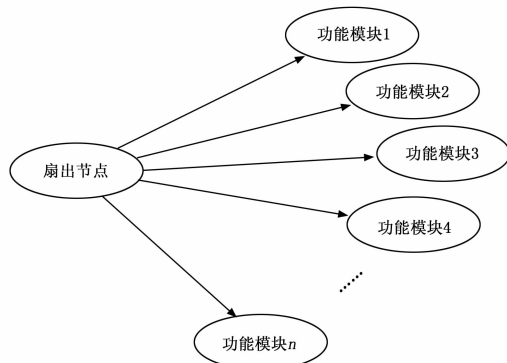


图 2 扇出节点

源状态时, 则作为一个控制单元使用。

3.2 测试点选择的原则

测试点选择是 BIT 测试性设计的一个重要步骤, 测试点的选择是否恰当直接关系到系统 BIT 的测试水平。

测试点应该具备以下功能:

- 1) 必须能准确判断故障存在与否, 或者能准确判断性能参数有较大幅度的变化;
- 2) 确定满足适当修理级别的故障位置;
- 3) 不管是在制造阶段还是维修阶段都得确保测试点都是使用的;
- 4) 无论是手动检测设备还是自动检测单元都要考虑其兼容性。

4 BIT 技术发展及展望

从大量应用中得出结论, 常规 BIT 虽然在提高武器效能方面起着积极作用, 但是由于设计不够完善、计划方面的限制, 在实际设计好随之投入使用后, 出现了一些列问题, 诸如测试和诊断能力差、虚警率较高等。为解决这些问题, 为了改善和提高 BIT 性能, 现在的主要研究工作放在人工智能技术、计算机技术和半导体技术结合在一起, 其发展趋势可以概括为如下 4 个部分^[14]:

1) BIT 与 ATE 相容度提高。BIT 与 ATE 在测试过程中完成不同的功能。BIT 和 ATE 的主要功能的不同之处是 BIT 把故障设备隔离至外场可以更换的单元 (LRU) 或者是可更换的模块 (LRM), 而 ATE 的功能是把可更换单元或者可更换的模块中的故障隔离到内场可更换单元。BIT 与 ATE 应该相互搭配使用, 在设备设计的一开始就进行同步研制, 只有这样才能在设备投入使用时就对设备进行有效的检测管理, 增加战斗力。

2) BIT 技术大量运用于复杂武器系统。随着武器装备的更新换代, BIT 必集数据采集、性能测试、故障诊断等功能于一体。它会和整个系统内的 BIT 构成一个系统, 可称之为分布式综合检测系统, 该检测系统必然涵盖了状态监控、故障诊断、控制决策的功能, 其所要做的就是对设备的各个部位实施实时的检测。从现在发展状况来分析, BIT 的任务不仅限于最开始定位的检测、诊断, 实际应用还包括了控制、保护。总而言之会综合有状态监测、复杂故障诊断、精确故障定位、系统状态控制、关键部件保护等众多功能, 它的结构会越来越

样, 组成为越来越复杂。

3) 重点发展 BIT 的智能测试和智能诊断技术。常规 BIT 由于受硬件条件和技术的限制, 控制和信息处理停留在简易的技术阶段, 并且大量使用了硬件电路, 用固定测试容差的方法可能会把正常状态判断为故障或者把故障状态判断为正常, 用判断瞬态值可能会把环境应力引起的间歇性故障作为故障状态处理^[15]。从整体上看, 整个系统缺乏灵活性和自适应能力。BIT 智能化就是为了解决这个问题, 在智能化过程中最明显的不同就是使用到了智能传感器, 其结构如图 3 所示, 目前研究和使用的智能 BIT 技术, 主要包括灵巧 BIT、自适应 BIT、基于时间应力测量的增强 BIT 等。

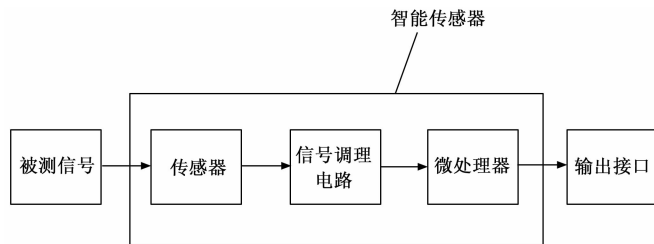


图 3 智能传感器结构

4) 半导体技术会大量使用。通常设计师把测试和一些维修问题放到设计的后再进行考虑, 这样明显没有前瞻性, 忽略了武器装备的测试性。再设计之后一般采取简单的附加电路实现 BIT, 这就让 BIT 所获的测试信息不完整。由于电子器件、电子设备发展日益快速, 使得会大量使用边界扫描技术。这在航空电子设备领域已经得到证实。

测试性提高这一研究领域, 将来的研究重点将会向综合诊断以及健康状况管理这两个方面倾斜^[16], 总结如下:

1) 由原先单一诊断方式向综合诊断方向发展。结合装备的发展特性, 单一诊断模式暴露出多种问题: 故障检测率低、故障隔离率低、虚警率高等问题。而综合诊断的方式不同的是综合了多种要素从而使诊断效果达到最好, 其中包含有自动测试技术、人工测试、维修辅助手段、信息技术等。其目的就是解决单一诊断所暴露出的问题。

2) 预测与健康管理将是研究的前沿领域。故障预测与健康管理技术包括“预测”和“健康管理”两个部分。PHM 技术是在故障诊断发展的前提条件下, 结合综合诊断, 然后向故障预测和健康管理发展。故障预测是根据现在或历史性能状态记录, 预测性的诊断部件或者系统完成其功能的状态, 包括确定部件或者系统的剩余寿命或正常工作时长; 健康管理则是基于对系统及其组成部分信息的获取, 然后对其进行状态监测、故障诊断、趋势分析, 最后可以对系统进行寿命预测。

5 总结

随着武器装备系统的不断换代升级, BIT 技术的创新发展也成为了必要。经实例验证完善的 BIT 设计可以大大减少维修、保障环节, 节省大量人力、物力, 所以国内外对 BIT 技术非常重视并且已开展了大量的研究工作, 主要针对其能否独立而迅速的检测、定位和隔离故障这几个方面的研究。本文在总结了大量的文献的基础上从 BIT 技术发展的背景意义、BIT

技术发展的国内外现状、BIT 测试点选择、BIT 技术发展趋势及展望这四个方面进行了阐述, 旨在对想要了解 BIT 技术的读者有借鉴学习的作用。

参考文献:

- [1] 黎琼炜, 胡政, 易晓山. 系统级 BIT 设计中的测试选择方法 [J]. 计算机工程与应用, 2001 (19): 127-129.
- [2] 于功敬, 厚泽, 王振华. 装备测试性设计与诊断策略优化技术研究 [J]. 电子测量技术, 2012 (7): 8-11.
- [3] 权赫, 张嗣锋. 运载火箭控制系统的 BIT 设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (11): 3577-3578, 3581.
- [4] 王旭. 空空导弹测试性定量指标的现状及建议 [J]. 四川兵工学报, 2013 (2): 21-23.
- [5] 李奕, 姬长法, 聂士权. 军用飞机开展测试性设计技术 [J]. 航空标准化与质量, 2011 (4): 31-34.
- [6] 李志强, 缪毅, 胡文华, 等. 基于 HMM-BP-DS 的雷达装备 BIT 虚警抑制方法 [J]. 测控技术, 2015 (6): 48-51.
- [7] 杜敏杰, 蔡金燕, 刘利民. 面向综合诊断的电子装备测试资源优化分配 [J]. 光电与控制, 2013 (1): 74-76, 88.
- [8] 张陟, 王伟平, 李宇. 基于信息熵的机内测试诊断策略优化技术 [J]. 计算机测量与控制, 2012, (7): 1744-1746.
- [9] 刘勇, 胡建军, 夏咏梅. 特种车辆 BIT 故障诊断与健康管理系统技术探讨 [J]. 车辆与动力技术, 2012, 1 期, 56-60.
- [10] 谢永成, 董今朝, 李光升, 等. 机内测试技术综述 [J]. 计算机测量与控制, 2013 (3): 550-553.
- [11] 郭汉桥. 基于故障树的 BIT 系统在机车电子柜检测中的应用研究 [D]. 西南交通大学, 2008.
- [12] 丁剑, 张琦. 基于 BIT 的挖掘机液压系统测试系统研究 [J]. 机械制造与自动化, 2013 (1): 36-38.
- [13] 蒯伟. 测试点的优化选择 [J]. 电子测试, 2012 (2): 91-94.
- [14] 马晓艳. 基于仿真分析的复杂电子装备测试性预计技术研究 [J]. 环境技术, 2016 (5): 44-49.
- [15] 詹景坤, 付江, 代京. 型号产品测试性技术及发展趋势研究 [J]. 电子测试, 2015 (15): 108-109, 155.
- [16] 张秋菊, 张冬梅. 电子系统故障预测与健康管理系统研究 [J]. 光电技术应用, 2012 (1): 19-24.
- [17] 赵旭. BIT 机内测试方法在数字矿山综合通信控制器中的应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [18] 温熙森. 智能机内测试理论与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2002.
- [19] 丁昊. 基于多信号流图的系统测试性建模分析及软件设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013.
- [20] 杨伟, 章卫国, 杨朝旭, 等. 容错飞行控制系统 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [21] 朱霞. 基于故障树分析的雷达机内测试技术研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2008.
- [22] 张晓斌. 电气测试原理与方法 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007.
- [23] 刘雪. 具有 BIT 能力的加速度计模拟器设计 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2008.
- [24] 程德福. 智能仪器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [25] 李海皓. BIT 的设计准则和评估方法研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.