

# 智能理论在 *BIT* 设计与故障诊断中的应用\*

温熙森 徐永成 易晓山

(国防科技大学机电工程与仪器系 长沙 410073)

**摘要** 近20年来机内测试(*BIT*)技术从理论到应用取得了显著进展,已成为提高产品测试性和诊断能力的有效途径。本文概述了*BIT*技术的特点,分析了国内外*BIT*的发展趋势,对*BIT*智能化从系统设计、信息处理到综合决策各阶段进行概括,对专家系统、神经网络、模糊理论、信息融合等智能理论在*BIT*中的应用进行了综合分析,并初步建立智能*BIT*的理论框架。

**关键词** 机内测试, 人工智能, 测试性, 神经网络

**分类号** *TN06*

## The Application of Intelligent Theory to the Built-in Test Design and Fault Diagnosis

Wen Xisen Xu YongCheng Yi Xiaoshan

(Department of Mechantronics Engineering and Instrumentation, NUDT, Changsha, 410073)

**Abstract** During the last twenty years, the theory and application of built-in test (*BIT*) have made prominent progress. The *BIT* technology has been the effective method of improving product's testability and diagnosis ability. The paper summarizes the trait of *BIT* technology, analyzes its developing trends all over the world, and generalizes the intelligence of *BIT* during its phrases of system design, information process and synthetic decision, then synthetically analyzes the application to *BIT* of expert system, neural network, fuzzy theoetic, information fusion and other intelligent theories and builds up the theory frame of intelligent *BIT*.

**Key words** built-in test, artificial intelligence, testability, neural network

### 1 *BIT* 技术的发展

*BIT* (Built-in Test, 机内测试) 定义为系统和设备内部提供的检测、隔离故障的自动测试能力。*BIT* 是改善系统或设备的测试性和诊断能力的重要途径。美国在70年代将*BIT*用于军用航空电子设备,80年代逐步扩展应用于其它军用电子产品和民用高科技产品。

*BIT* 具有以下特点: (1) 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,实现检测、隔离故障的自动化; (2) 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、备件补给库存量、维修人员数量; (3) 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,但能降低产品全寿命周期费用。

随着VLSI和计算机技术的日益发展,国内外*BIT*的研究呈现几个发展趋势:

(1) *BIT*与ATE的日渐融合: 为减少ATE设备的种类、降低保障费用,ATE正走向通用化、模块化,电子集成程序的提高使得ATE小型化甚至芯片化成为可能;另一方面*BIT*的功能更加强大,具有很多原先ATE才具备的故障检测、隔离和定位功能<sup>[1,2]</sup>。

(2) 拓宽应用领域: 原先的*BIT*主要应用于军用航空电子设备,随着传感器技术(如分布式光纤)、智能前端信号采集处理器的发展和中央处理器的小型化、集成化,*BIT*正逐步运用到复杂机电系统中去<sup>[4]</sup>。

(3) *BIT*发展为状态监控、故障诊断的综合系统: 新型*BIT*肩负的任务不仅限于检测、诊断,还包

\* 1998年4月28日收稿

第一作者: 温熙森,男,1945年生,教授

含控制、保护，具有综合状态监测、复杂故障诊断、精确故障定位、反馈控制、关键部件保护等多种功能。BIT 结构日趋复杂、功能日趋强大，正发展为一个状态监控、故障诊断的综合系统<sup>[2]</sup>。

(4) BIT 走向智能化: 传统BIT 的单一算法不能准确、完整地反映系统的状态信息，往往造成故障误报、漏报。随着人工智能及相关理论的发展，BIT 智能化设计、BIT 信息智能化处理、故障诊断智能决策等领域的研究成果已陆续见诸报道<sup>[2]</sup>。

## 2 BIT 设计、诊断智能化的关键技术与主要研究内容

常规 BIT 存在着虚警率高、功能相对简单、诊断能力差等问题。人工智能在理论、应用中不断成熟，而功能日趋强大、结构日趋复杂的电子系统对 BIT 的功能提出了更加全面、更加准确的要求，因此将智能理论引入 BIT 是个重要发展方向。BIT 智能化主要解决传统BIT 在最优设计、信息获取、分析处理、综合决策等方面的不足。对国内外大量文献分析、综合知，智能 BIT 主要包含BIT 智能设计、智能检测、智能诊断、智能决策等几个关键技术。其中BIT 的智能设计是智能 BIT 的基础和核心，BIT 的智能检测、诊断、决策是提高 BIT 效能的关键。针对这几个关键技术，有神经网络、专家系统、边界扫描、信息融合等主要研究内容。现在主要述评 BIT 智能化的几个关键技术和主要研究内容：

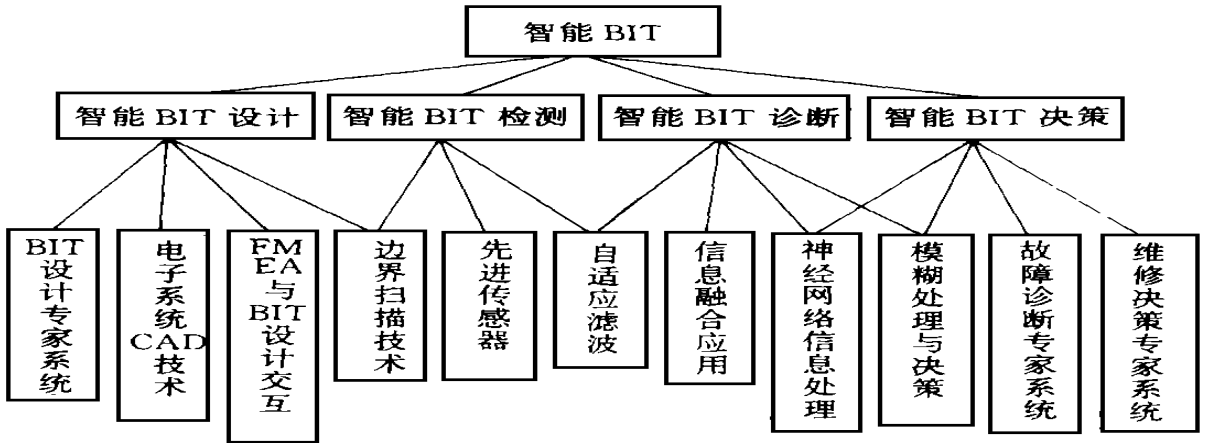


图1 智能 BIT 关键技术与主要研究内容结构图

Fig.1 Architecture of intelligent BIT technology keys and main tasks

### (1) BIT 智能 CAD 技术

BIT 设计是一切 BIT 技术发展应用的基础和关键。BIT 设计分为几个层次：芯片级、电路板级、系统级。在芯片级，BIT 设计要求测试向量的完备性和测试过程的快速性，这需要各类应用芯片的测试代码等技术资料数据库的支持；在电路板级，BIT 硬件应尽量少，BIT 电路硬件一般不超过原系统硬件的10%；在系统级，要求合理设计层次化的测试结构，合理划分外场可更换单元，方便进行综合决策和维修更换。BIT 智能 CAD 技术是 BIT 智能化的基础。

1989年格鲁曼 (Grumman) 航空公司的 Monahos 等人开发了一个 CADBIT 系统<sup>[9]</sup>，该系统力图在 PCB 中集成 BIT 技术过程的自动化，一旦充分发展，可以满足在各种操作系统 (如 Unix)、编程语言 (如 C)、图形交换规范下的通用平台工作。其中应用了许多 BIT 技术：板上 ROM、微处理器 BIT、微诊断、VLSI 芯片 BIT 的板上集成、内建逻辑块观测器、错码检测及纠正、带多输入移位寄存器的伪随机模式发生器、比较器、数字模拟环绕、冗余等；初步建立了 CADBIT 软件结构、便于编码的交换规范和 BIT 数据库。1993年休斯 (Hughes) 航空公司的 Davis 等人开发出 CADBIT II<sup>[13]</sup>，该系统基于 Unix 平台，包含电子 CAD 软件和承包商开发的 CAD 软件模块，系统具有四大功能：①浏览功能：可在线访问用于模拟、数字、数模混合的电路板设计的最新 BIT 技术数据库信息；④选择功能：帮助设计者针对被测电路 (CUT) 选择 CADBIT 数据库中最合适的 BIT 技术；④插入功能：把与被选中的 BIT

技术相符的器件集正确地应用到电路原理图中去; ¼ 评价功能: 分析增加的 BIT 电路在面积、重量和功率方面的影响和效益。这两个 CADBIT 系统均由美国大型航空集团研制并与实际应用紧密相连, 这对我国 CADBIT 领域的研究有重大参考价值。

### (2) BIT 中专家系统的应用

专家系统是人工智能技术面向实际应用最成功的分支之一, 已广泛应用于医学、化学、冶金、石油勘探、工艺设计、电路分析、故障诊断、军事指挥、管理与决策、工程控制、空间与决策等领域。

- 在 BIT 设计工程中专家系统能把前人设计的成功经验和失败教训引入设计自动化之中, 提高设计质量, 进行优化设计。在美国休斯公司开发的 CADBIT II<sup>[13]</sup>中就应用了 BIT 设计专家系统知识。

- 专家系统在故障诊断领域 (无论是人类的疾病诊断还是设备的故障诊断) 取得了丰硕成果。美军根据各军兵种 BIT 设备的诊断经验建立了综合诊断专家系统 (IDES)<sup>[5]</sup>, 它采用分层分布设计, 电子系统及其分系统各有独自的规则库和 IDES, 进行分散诊断与集中决策相结合的方法, 可将故障隔离到各个分系统内的外场可更换单元 (LRU)。

- 专家系统不但应用于 BIT 故障检测、隔离, 而且对于 BIT 内外场维修也有应用价值。可以简化维修培训, 降低维修人员要求, 积累维修人员和设计人员的经验, 在内场维修专家系统的帮助下, 可以更快地把故障定位、隔离在内场可更换单元 (SRU)。

专家系统在应用中遇到的困难主要在于知识库的建立和知识的获取, 一个重要的解决方案是在人工获取知识的同时, 计算机利用神经网络、模糊决策等方法自动获取诊断信息, 通过模式识别得到特征, 形成概念, 进行归纳推理, 形成知识<sup>[15]</sup>。这种自动获取知识的系统是专家系统未来发展的重要方向。

### (3) BIT 中神经网络的应用

80 年代以来, 神经网络的研究在经过了曲折的发展后取得了突破性进展<sup>[7]</sup>, 成为信息科学、计算机科学的研究前沿。它的主要优点是: ① 并行结构和并行处理方式, 特别适于快速处理大量并行信息, 可以利用单片机、FPGA 等硬件实现价廉、快速的神经网络计算<sup>[8]</sup>; ④ 具有高度自适应性: ART 等网络可自动快速适应非平稳环境<sup>[11]</sup>, 根据环境信息自组织、自适应以达到自我完善; ④ 具有很强的自学习能力, 克服了传统的确定性理论、Bayes 理论等的局限性, 可根据环境信息和导师监督自动联想、记忆、聚类; ¼ 容错能力强: 输入数据噪声和少量缺损、网络本身局部故障不会影响整个系统的输出性能<sup>[16]</sup>。因此神经网络能够在 BIT 中广泛发挥作用:

- BIT 中神经网络故障诊断: 在众多模式识别方法中神经网络以其非线性映射能力, 很适合于对不确定、非线性数据进行分类, 美军 Rome 航空中心利用神经网络监测在复杂环境条件下 BIT 的输出, 从而滤除由于温度、湿度、振动等因素引起的间歇故障和 BIT 虚警。实验证明: 这种神经网络滤波器能够成功地检测 BIT 故障、减小虚警<sup>[1]</sup>, 其基本原理如图 2 所示。国内南京电子技术研究所利用 BP 网的联想记忆功能对雷达伺服 BIT 中的故障诊断进行了研究<sup>[17]</sup>。

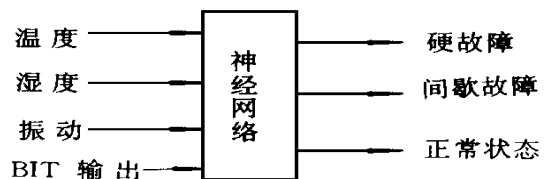


图 2 神经网络虚警滤波器示意图

Fig. 2 Sketch map of neural network false alarm filter

- BIT 中神经网络容错分析: 在大型电子系统中作为 BIT 输出的测试点很多, 失效概率较大, 因此对 BIT 故障诊断系统的容错性要求很高, 神经网络因其独特的分布式存储、并行处理机制而具有良好的容错性, 它不但对输入数据具有抗噪声能力, 就是网络硬件局部损伤也不会导致整体功能衰退和丧失。这对于不完整数据和噪声干扰数据而言具有极大的优越性, 而这种情况在复杂电子设备中常有发生。文献 [16] 对容错 BP 网络及容错 BP 学习算法进行了研究; 文献 [10] 讨论了神经网络在实时紧要任务分布处理系统中的应用, 这些方面的研究的进展和成果有望应用于下一代 BIT 设计使用中。

· BIT 中神经网络知识处理: 在专家系统中存在知识获取瓶颈和推理的组合爆炸问题, 而神经网络知识处理系统中, 知识存储于各节点权值中, 知识获取就是神经网络通过学习改变权重矩阵的过程, 还特别适于处理不精确、不完整数据, 并且不存在知识获取瓶颈问题, 因此神经网络在知识工程领域取得了大量研究成果<sup>[15]</sup>。BIT 中的设计、诊断、维修专家系统都能利用神经网络进行知识的存储处理, 特别是 BIT 诊断专家系统中神经网络的知识获取、存储、推理具有很好的交融性。文献 [12] 研究了神经网络的结构化知识表示问题, 文献 [9] 对神经网络与符号推理的结合进行了研究, 这对于构造 BIT 专家系统提供可能的有效途径。

· BIT 神经网络趋势分析: 设备的状态监测与故障诊断策略已由原来的定期维修变为视情维修和预防维修, 设备状态的趋势分析就显得更为重要, ARMA 模型、灰色理论、神经网络在趋势分析中都得到应用, 其中国内外对神经网络预测方法进行了大量研究, 尤其对于大型电子设备 BIT 状态分析和趋势预测, 神经网络会大有用武之地。

#### (4) 信息融合

复杂对象的信息种类、形式、容量及速度等方面的发展超出人脑信息综合能力, 由此产生了信息融合技术, 它的基本原理是充分利用多个传感器信息资源, 对其合理支配和使用, 把它们在时间、空间上的冗余或互补信息依据某种准则来进行组合, 以获取被测对象的一致性解释, 由此得到比单个子系统更优越的性能<sup>[6]</sup>。信息融合通常分为数据层直接融合、特征层关联融合、决策层推理融合三个层次。

由于大型电子设备中 BIT 测点多, 各类信息较为丰富, 另外现在 BIT 系统普遍采用层次化结构和分布式机制, 这为 BIT 在数据层、特征层和决策层三个层次上进行融合提供了基础。在 Rome 航空中心的神经网络虚警滤波器项目中<sup>[11]</sup>实际上就是采用神经网络进行 BIT 输出特征与温度、振动等环境应力特征进行融合。现在信息融合热点方向——决策层融合在基于层次性结构和分布机制的 BIT 系统决策中有很大的应用潜力, 主要方法有贝叶斯推断<sup>[3]</sup>、D—S 证据理论<sup>[14]</sup>和模糊集理论<sup>[18]</sup>。

#### (5) 模糊理论

诸如机械设备系统、大型电子设备等涉及大规模信息处理的系统, 不仅存在随机性意义下的不确定性, 而且还存在系统内涵和外延上的不确定性, 即模糊性<sup>[7]</sup>。在复杂设备诊断中, 若故障原因和现象之间关系明确, 可以用模糊贴进度进行模糊模式识别, 利用模糊关系矩阵进行模糊综合评判; 若现象与原因关系不明了, 就需利用模糊聚类方法找出它们之间的关系。

在大型电子设备中具有大量的模糊信息, 其复杂度越高, 模糊性越强, 就需用到模糊数学这一工具对其进行科学的定量处理。特别是在电子设备 BIT 中, 由于环境应力、电子干扰、电源冲击等引起的电子元件状态不确定, 用传统的确定性数据处理方法来处理可靠性领域各变量间的复杂关系必然会带来较大误差, 用模糊理论进行模糊识别和模糊决策更易理解、更具说服力。它与神经网络的结合研究是复杂设备故障诊断领域的重要方向<sup>[7, 15]</sup>。

### 3 结论

国内外近 20 年的研究证明, BIT 技术是提高电子装备测试性和作战效能的最为有效的技术途径之一。BIT 的智能化是发展趋势, 这主要体现在 BIT 的智能设计、智能检测、智能诊断与智能决策。另外, BIT 的外延也不断拓展, 下一代 BIT 系统将会是一个集检测、诊断、隔离、定位、控制、保护于一体的小型化、智能化、芯片化、模块化、通用与专用结合的机电系统。它不但能提高电子设备的可靠性、测试性、维修性, 而且能简化维修, 降低费用, 应用前景非常广阔。

### 参考文献

- 1 F Aylstock, L Elerin, J Hintz, C Learoyd and R Press. Neural Network False Alarm Filter. ADA293097, Rome Laboratory Air Force Materiel Command Griffiss Air Force Base, New York, 1995
- 2 曾天翔. 电子设备测试性及诊断技术. 航空工业出版社, 1995
- 3 H F. Durrant-Whyte. Consistent Integration and Propagation of Disparate Sensor Observation, Inter Journal of Robotics Research, 1987, 6 (3): 3~24

- 4 顾飞. F/A—18 飞机航空电子设备故障树分析器. 国际航空, 1984, 11
- 5 王立群. BIT 和 ATE 的发展趋势. 测控技术, 1993, 12 (6): 2~4
- 6 郁文贤, 雍少为, 郭桂蓉. 多传感器信息融合技术述评. 国防科技大学学报, 1994, 16 (3): 1~11
- 7 黄文虎等. 设备故障诊断原理、技术及应用. 北京: 科学出版社, 1996
- 8 陈虎. 环形阵列神经计算机的研究与实现. 国防科技大学计算机工程系 [硕士论文], 1997
- 9 杨忠等. 神经网络与符号推理集成系统及其学习算法. 东南大学学报, 1997, (6): 39~43
- 10 Peter W. Protzel, Daniel L. Palumbo etc. Fault Tolerance of Artificial Neural Networks With Applications in Critical Systems, NASA TP-3187, April 1992: 49
- 11 韩小云等. 自适应神经网络 CHAR 故障诊断系统. 东南大学学报, 1997, 27 (5A)
- 12 李志刚等. 表示结构知识化的神经网络模型. 国防科技大学学报, 1997, (1): 41~44
- 13 Davis, Michael, Kwan, Sonny etc. CADBIT II: Computer-Aided Design for Built-In-Test, Volume 1, RL-TR-93-117-VOL-1, Jun 01, 1993: 79
- 14 Garey T P, et al. An Inference Technique for Integration Knowledge from Disparate Source. Proc the Inter. Joint Conf on Artificial Intelligence, Vancouver, August 1981: 319~325
- 15 曾昭君等. 故障诊断神经网络的发展与前景. 机械工程学报, 1992, 28 (1): 1~7
- 16 杨忠等. 容错 BP 神经网络及容错 BP 学习算法. 东南大学学报, 1997, (5A): 41~44
- 17 汪木兰, 王秀春. 一种神经网络联想记忆模型在雷达伺服 BIT 设计中的应用. 现代雷达, 1994, 16 (1): 89~95
- 18 Huntsherger T L, et al. A Framework for Multisensor Fusion in the Presence of Uncertainty. Proc. of Workshop on Spatial Reasoning and Multi-sensor Fusion, St. Charles, Oct. 1987: 345~350
- 19 Monahos, Baluta, Kelly, etc. Computer-Aided Design for Built-In-Test (CADBIT). Volume 1: Technical issues, RADC-TR-89-209-VOL-1, 2, 3, Oct 01, 1989: 164; Volume 2: BIT Library, : 315; Volume 3: Software specification: 146