

第一章 机内测试技术

§ 1.1 BIT 的由来

当今世界形势和现代战争特点决定了武器装备不但要求其具有先进的战术性能,而且要求其具有良好的测试性、维修性、可靠性。现代武器装备在功能越来越先进的同时,结构越来越复杂,测试与维修越来越困难,因此,对复杂武器装备的测试性、维修性进行深入研究对保证新型武器装备保持和发挥高的作战效能,大幅度降低维修保障费用具有重要意义。

1.1.1 测试性技术的发展

随着装备的复杂程度和技术含量越来越高,维修性、测试性对装备的作战能力、生存能力、机动性、维修人员、保障费用产生了越来越重要的影响^[4,8,9,10]。

测试性 (Testability) 是指产品能及时准确地确定其状态 (可工作、不可工作、性能下降) 和隔离其内部故障的设计特性^[1,2,3]。以提高产品测试性为目的进行的设计被称为测试性设计 (DFT)。测试性作为产品的一种重要性能为人们所认识是在 20 世纪 70 年代中期。1976 年 F. Liour 等人在《设备自动测试性设计》一文中首次提出了测试性的概念。随后,测试性相继用于诊断电路的设计及其它各个领域^[3]。

据统计,在武器装备寿命周期内,根据具体武器装备的不同,其维修保障费用一般为其购买费用的 3~20 倍^[1,4];80 年代中,我国对某型号主战坦克的全寿命周期费用的估算表明,用于维修保养的费用约为其购买费用的 4.4 倍。武器装备的维修保障费用正

在武器装备的全寿命过程中占有越来越重的份额^[4,12]。至今,维修性设计才真正如同可靠性设计一样,被所有设计人员自觉地看成是新装备设计中必须考虑的组成部分,是设计过程的要素和固有的设计特性。在减少武器装备使用及维修费用的众多因素中,改善可测试性是主要因素。据美国海军调查^[1,4,8,9]对 F/A-18、F-14、A-6E 和 S-3A 四种海军主要飞机的 200 余项关键部件测试性所作出的技术改进,将使它们的使用和维修费用减少 30%。如果在飞机研制初期就充分开展可测试性设计,则可降低飞机寿命周期费用的 10%~20%。

大型装备的测试问题已经成为研制、生产和使用中的突出问题。现代武器系统为进行测试需要复杂而昂贵的测试设备,增加采购和保障费用,而提高武器系统设计时的测试性是减少保障设备和费用、提高保障效率的最有效手段之一。美军 1985 年颁布了 MIL-STD-2165 《电子系统和设备测试性大纲》,该大纲把测试性作为与可靠性及维修性等同的设计要求,并明确规定了电子系统及设备各研制阶段中应实施的测试性分析、设计及验证的具体实施方法。1993 年该标准的修订版已将它扩展到电子系统之外的其它各类系统和设备。MIL-STD-2165 的颁发标志着测试性已成为一门与可靠性、维修性并列的独立学科^[4,12]。

由于测试性问题的重要性,现在国外已将其从可靠性和维修性领域分离出来,提高到与可靠性、维修性同等重要的地位。

1.1.2 BIT 技术的提出

测试性的内涵主要有自动测试设备 (ATE) 和 BIT 两个方面^[1,6]。传统的测试主要是利用外部的测试仪器 (ETE) 对被测设备进行测试, ATE 是 ETE 的自动化产物。由于 ATE 费用高、种类多、操作复杂、人员培训困难,而且只能离线检测。随着武器装备维修性要求的提高,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,所以, BIT 在测试性研究当中占据了越来越重要的地位,成为维修性、测试性领域的重要研究内容^[20,21]。

在测试性研究中,BIT 技术应用范围越来越广,正发挥着越来越重要的作用。“为了判定复杂武器系统是否处于正常工作状态,或者为了发现并隔离故障,采用 BIT 技术已经成为无可替代的选择”^[21]。有研究表明,在复杂航空电子系统中使用 BIT 技术至少可以降低 50% 的维修时间。武器装备的现代化伴随着系统的复杂程度和维修保障费用日益提高,BIT 技术能够提高故障诊断的精确性、显著地缩短诊断时间、降低维修保障成本和对维修人员的技能要求,从而提高武器装备的战备完好率^[10~20,22]。BIT 技术是复杂武器装备整体设计、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。所以美国军方对 BIT 技术的需求非常迫切,十分重视 BIT 技术在提高武器装备整体性能中的作用,斥巨资对 BIT 及其相关技术进行立项研究^[18,20,22~25]。我国部分现役军用飞机由于没有全面开展可靠性及维修性设计,在外场使用中故障较多、维修困难,已成为影响飞机战备完好性的主要问题,因此目前我国军方对 BIT 技术已经相当重视,在研新型复杂武器装备系统中开始大量采用 BIT 等测试性和维修性技术。

§ 1.2 BIT 的历史

1.2.1 BIT 的定义

BIT 在国内学术界的翻译有多种^[1,4,21] 如机内测试、机内自检、机内自测试、机内自检等等 国外对 BIT 的定义很多^[22~25] 但是最基本的含义大致相同,下面为美军标 MIL-STD-1309C 对 BIT 的定义:

定义 1:BIT 就是指系统、设备内部提供的检测、隔离故障的自动测试能力。

定义 2:BIT 的含义是:系统主装备不用外部测试设备就能完成对系统、分系统或设备的功能检查、故障诊断与隔离以及性能测试,它是联机检测技术的新发展。

1.2.2 BIT 技术的作用

BIT 技术是改善系统或设备测试性与诊断能力的重要途径。现代化武器系统设计非常复杂,而试验和维修手段仍然采用常规方法,这就是推动 BIT 技术产生、发展的原动力。BIT 是测试和维修的重要手段,它使以前系统中用手工完成的绝大多数测试实现了自动化。

实际应用中,常规 BIT 技术在提高武器装备测试性和维修性、简化测试维修设备、提高测试维修效率、降低测试维修费用等方面起到了极大作用^[1~4,17~22]。在复杂的航空电子系统和设备中,手工完成的基层级设备检测要占用 60% 以上的维修工时来进行测试、故障诊断与隔离,使用 BIT 技术则至少可以降低 50% 的维修时间。BIT 的好处不仅体现在设计定型试验中,而且也体现在设备的生产、安装、检验、训练和维修过程中。美国 ITT Gilfillan 公司生产的新一代 SPS-48E 型警戒和武器控制雷达采用 BIT 技术,使得系统试验时间从 16 周缩短到 8 周,设备安装检验时间缩短了 50%,同时人员培训的训练课时减少了 25%。单就设备前期的设计、试验成本而言,这种雷达与早期没有 BIT 系统的 SPS-48C 雷达相比,每套系统就大致节约 100000 美元。F-18 飞机由于重视了可靠性、维修性、测试性及 BIT 设计,减少了维修工时和维修人员数量。美国海军对飞机的调查研究表明,若对 F/A-18、F-14、A-6E、S-3A 四个机种的 239 项关键产品的测试性、可靠性、维修性(包括 BIT 和诊断技术)进行改进,将减少维修费用 30% (即 3.32 亿美元 1987 财年)。LST-1179 舰推进系统非电子设备的 BIT 研究表明,应用 BIT 可使每条舰每年维修费用减少 7 万美元。

简言之, BIT 技术在以下几方面具有重要作用^[1] : 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,实现故障检测、故障隔离自动化; 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，但综合试验、维修、检测和提高设备可靠性等各个方面来看，能显著降低产品全寿命周期费用。

1.2.3 BIT 技术国外发展简史

国外的 BIT 技术研究主要由大型航空公司和军火生产企业发起。大型航空公司（例如波音公司、休斯公司和格鲁曼公司）在 BIT 自动化设计和 BIT 的应用研究等方面都发挥了重要的领导作用，并且成功地把最先进的 BIT 理论、技术和方法应用到他们生产的各种军、民用飞机中，其理论和技术都代表了世界领先水平[1,4~7,22]。如波音公司为了减少机载设备维修时间、降低航班延误次数、减少航班营运费用，其客机设计从 70 年代开始大量采用 BIT 技术，使波音 747、757、767 等大型宽体客机的故障隔离时间和维修时间大大缩短，提高了飞机的出勤可靠度。此外，欧洲一些著名军工企业生产的先进武器装备中也进行了一定程度的测试性和 BIT 设计，例如瑞士厄里空—康特拉夫斯公司生产的双 35 牵引高炮系统，不但系统性能世界一流，而且测试性设计相当完备，使该武器在国际武器市场上成为抢手货。

国外最早制订 BIT 设计规范的是美国航空无线电公司（ARINC），该公司实质上是一个由美国各大型飞机制造公司、航空运输公司、少数国外空运公司、客运公司组成的类似于行业协会性质的组织，它在航空电子业各种标准的制定方面作出了突出贡献，它制定的 ARINC604《BITE 设计和使用指南》和 ARINC624《机载维修设计指南》为美国民用飞机的 BIT 规范化设计和推广应用发挥了重要作用。

70 年代后期，美国国防部率先制订了军用装备的 BIT 设计指南，用于统一各种武器装备的 BIT 设计规范：

1976 年，美国海军电子实验室的 BIT 设计指南、美国空军的模块化自动测试设备计划等都涉及到测试性的研究。

1978 年，美国国防部联合后勤司令部建立了自动测试专业委员会以协调并指导自动测试计划的实施，该委员会下设测试性技

术协调组，负责国防部系统测试性研究计划的组织、协调及实施。同年 12 月，美国国防部颁发的 MIL-STD-471A 通告 2——《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》规定了测试性的验证及评价方法及程序。

1983 年，美国国防部颁发的 MIL-STD-470A《系统及设备维修性管理大纲》特别强调测试性是维修性大纲的一个重要组成部分，承认 BIT 及外部测试不仅对维修性设计特性影响重大，而且影响到武器系统的采购及寿命周期费用。

上述军标的制定和执行使得 BIT 技术在 80 年代迅速地应用于飞机、舰船、战车等诸多领域^[1,4~7,12,17~20]。美军战斗机 F-16、F/A-18、F-22、轰炸机 B-2、隐形战斗机 F-117、主战坦克 M1 都大量采用了 BIT 设计；具有良好 BIT 设计的海军 AN SPS-48E 警戒和武器控制雷达装备巡洋舰和驱逐舰之后，成为战斗力升级的重要组成部分。90 年代美军新一代军事装备从系统设计研制开始就非常重视 BIT 技术的设计和应用，使得美军新一代武器装备的维修性、测试性以及战备完好性都上了一个新台阶。

1.2.4 BIT 技术国内发展简史

我国 BIT 技术的起步大致从 20 世纪 80 年代中后期开始^[1~4,13,17,19,21]。如航空系统 611 所应用多状态系统可靠性理论、马尔可夫方法、贝叶斯方法等，在测试性和 BIT 论证、权衡、设计、分析、仿真、验证等方面完成了多项研究工作，并承担了原国防科工委技术 A 类课题“BIT 技术在非电子系统和设备中的应用研究”。航空系统 301 所、628 所与北京航空航天大学合作，出版了有关 BIT、测试性的专著，并开发了 BIT、测试性分析软件。信息产业部 28 所在研究指挥自动化系统监控技术的基础上，现正在制定“指挥自动化系统监控 BITE 行业规范”。此外，航空系统 628 所也进行了“测试性及诊断技术的应用与发展”研究。

1993 年，由国内相关单位发起的“测试性、BIT 技术研讨会”，曾对测试性、BIT 及诊断技术的设计、应用及发展进行过全面研

讨^[13,17];1996 年,国内有关主管部门专门立项对 BIT 技术进行预先研究。

目前 我国 BIT 的研制主要集中在大型武器装备系统,其中最为典型的是各式雷达系统和机载设备^[14~16,19]。

西安 206 所研制的某型雷达的 BIT 系统兼有检测、诊断和控制功能,成为系统调试不可缺少的技术手段,该系统除了实现操作自动化外,还可以实时监视系统的运行状态,在故障发生时,能以在线或脱机的方式将故障定位到可更换模块。该 BIT 系统设计充分利用雷达系统多微机的特点,在各个分系统中结合检测电路和微机接口实现了雷达分系统的故障隔离,不但能够将数字电路故障隔离到板级,而且结合 A/D 转换开关可以将模拟电路定位到可更换模块。依据“软件与硬件结合,以软件为主,人工与自动结合,以自动为主”的原则,该系统 BIT 的测试大多由软件自动完成,且投入运行后效果良好。

由南京电子技术研究所研制的某型雷达的 BIT 系统提出了对于大型复杂设备的分布式检测、集中式控制处理的 BIT 设计原则,把雷达系统的故障检测和性能检测融为一体,改变了 BIT 仅具备故障检测能力的惯例。通过在数据处理中采用多次检测、多次传送、相关处理、多数判决等手段,提高了故障定位率,减少了虚警。国内其它 BIT 研究应用的成果还有航空系统 613 所的某型飞机计算机控制子系统的 BIT 设计,对加电 BIT、周期 BIT 和启动 BIT 进行了研究和实现;电子部 10 所的某型机载抗干扰电台的 ATE&BIT 测试性设计研究;以及某型导弹发射车基于微机系统的 BIT 设计。

总体来看,我国的 BIT 理论、技术和应用大致处于美国 90 年代初期水平,目前国内对 BIT 的研究工作主要由相关的研究所承担,研制对象主要是雷达系统和机载设备。各单位在各自领域都积累了相当多的研制经验,并相继形成自己的 BIT 设计体制和规范。

必须看到,由于我国长期以来侧重量型号任务中 BIT 的应用,

与 BIT 具体实现技术相比较 ,BIT 基础理论和方法的研究相对显得薄弱 ,BIT 应用大多仍处于常规 BIT 的水平。由于 BIT 系统设计主要依据设计人员的经验积累,缺乏系统规范和理论指导。因此,将研究所的技术优势和应用优势与大专院校的理论研究优势相结合是提高我国 BIT 理论、技术和应用水平的重要途径。

目前,我国指导 BIT 分析、设计、验证、管理的行业规范 GJB2547《装备测试性大纲》已经制定,为武器装备研制规定了明确的 BIT 指标(如故障检测率、故障隔离率和虚警率等)。相信此举将极大地推进 BIT 技术的研究和应用。

参 考 文 献

- 1 徐永成 .BIT 中智能故障诊断理论与方法研究[博士学位论文] 长沙:国防科技大学机电工程及自动化学院,1999
- 2 刘冠军.基于边界扫描的智能板级 BIT 技术研究[博士学位论文].长沙:国防科技大学机电工程及自动化学院,2000
- 3 胡政.边界扫描测试理论与方法研究[博士学位论文].长沙:国防科技大学机电工程及自动化学院,1998
- 4 曾天翔.电子设备测试性及诊断技术.北京:航空工业出版社,1996
- 5 Gerard J.The B-1B Central Integrated Test System Expert Parameter System.Proc.of NAEC,1987:1170~1175
- 6 Colins M.A Universal Framework for Managed Built-in Test.International Test Conference,1993:21~29
- 7 Richards W.Smart Built-in Test.N90-25512,1990:123~126
- 8 郭耀红.机载设备自动检测技术及应用.测控技术,1994,13(4):24~26
- 9 曲东才.系统可测试性与航空武器系统测控技术,1997,16(2):8~10
- 10 叶建军.航天计算机自检测技术.上海航天,1996,2:58~60
- 11 朱万年.航空电子综合系统自检测、重构与故障监控技术综述.航空电子技术,1997,4:42~47
- 12 王立群.BIT 和 ATE 的发展趋势.测控技术,1993,12(6):2~4
- 13 曾天翔.测试性及诊断技术的发展.1993 年测试性、BIT 技术研讨会,1993:1~13
- 14 肖鉴.某雷达激励器故检系统的改进设计.火控雷达技术,1997,26:56~58

- 15 黄均祥 . 某雷达 BIT 研制工作回顾 . 火控雷达技术 ,1993,22:1~4
- 16 李春化 黄均祥 张云展 . 关于雷达系统 BIT 模块化工作的考虑 . 火控雷达技术 , 1995,24:5~10
- 17 王立群 . BIT 和 ATE 的发展趋势 . 1993 年测试性、BIT 技术研讨会 ,1993:1~5
- 18 曾天翔 . 测试性在现代军用飞机中的应用测控技术 , 1993,12(2):2~5
- 19 曲东才 . 系统可测试性与航空武器系统 . 测控技术 ,1997,16(2):8~10
- 20 顾伟豪 . 美国的可靠性、维修性研究与发展 . 国际航空 ,1992,(1):39~41
- 21 林玉琛 . 防空导弹武器系统维修工程 . 北京 宇航出版社 ,1994
- 22 John Z, Chuck C. CNDs and RTOKs: Are We Addressing These Problems Correctly? Proc. of NAEC, 1994:402~410
- 23 Brent A, Gary K. An Analyzer for Detecting Intermittent Faults in Electronic Devices. IEEE 1994 AUTOTESTCON, 1994:417~421
- 24 Li Ai H, Zhou H Y. A Bare PCB Test Method Based on AI. SPIE, 1995, 2620:535~540
- 25 Dale W R. SMART BIT: An AI Approach to Better Systems-Level Built-in Test. Proc. of Annual Reliability and Maintainability Symposium, 1987:31~34

第二章 常规 BIT 技术基础

本章是全书的技术基础。智能 BIT 正是在常规 BIT 技术的基础上，针对常规 BIT 在应用过程中表现出的功能缺陷，通过在 BIT 的设计、检测、诊断和决策等阶段采用智能理论与技术，从各个层面提高 BIT 的综合效能。

本章分为三个部分：通用的 BIT 技术、数字电路 BIT 技术、模拟电路 BIT 技术。这些常规技术是 BIT 设计检测、诊断、决策的基础。

§ 2.1 通用的 BIT 技术

2.1.1 BIT 通用测试性设计准则

下列测试性准则适用于所有形式的 BIT 设计技术，按照该准则设计即可保证模块的测试性要求^[1,5~7]：

- (1) 在模块连接器上可以存取所有 BIT 的控制和状态信号，从而可使 ATE 直接与 BIT 电路相连；
- (2) 在模块内装入完整的 BIT 功能和机内测试设备 (BITE)；
- (3) BITE 应比被测电路具有更高的可靠性，否则就失去了采用 BITE 的意义；
- (4) 关键电压应能进行目视监控；
- (5) BIT 测试时间应保持在一个合理的水平，模块中的 BIT 程序应限于 10min 内；
- (6) 如果在一个模块内有許多 BIT 程序，那么 ATE 能够对每个程序进行独立的存取和控制；
- (7) BIT 程序通常由一个处理机控制。如果在模块中存在一

个这样的处理机，那么该 BIT 程序即可由 ATE 从外部控制。

2.1.2 电子产品的模块划分

电子产品复杂性和综合程度的提高使得电子产品故障检测和隔离日益困难，解决这个问题最有效的方法之一就是在电子产品测试性设计中对电子产品进行模块划分^[1,2]。这项工作通常在系统逻辑功能确定后进行，通过划分将完整的系统分解成几个较小的、本身可以作为测试单元的子系统，从而保证可以准确确定故障位置。

一、设备级的划分

1. 功能划分

功能划分是指对较为复杂的系统或设备按其功能实现模块化的方法。该方法可确定故障检测和隔离所需的测试点。如果在系统或设备的研制中保证每个组件块均代表一个封闭的功能单元，那么就可以对该系统或设备进行功能划分。进行功能划分有两个主要优点：一是有助于测试程序的定义；二是便于故障定位。

2. 物理划分

在设备级，也可采用物理划分，即根据电路种类划分。对于混合电路，如果可能的话，应将其分为模拟和数字两部分并分配到不同的组件内。

二、组件级的划分

在组件级进行电路划分时，应保证划分所产生的元件组（Cluster）从电气上分解为便于测试的模块。

1. 功能划分

同系统或设备级一样，元件组的构成应保证每个元件组的功能独立，同时应保证独立功能元件组不应在空间上相互重叠。

2. 物理划分

如果元件组由混合电路组成，且可进行功能分解，那么应尽可能在局部对模拟和数字功能进行分离。

3. 逻辑系列划分

当设计某些功能时，我们可能希望获得只有通过某些技术才能达到的特殊特性，如利用射极耦合逻辑获得高速度；利用 CMOS 技术获得低功耗。如果需要将几种技术综合使用，那么就必须保证测试连接器处的逻辑信号必须相同，接口应设计一致，以避免由于采用不同技术所带来的匹配问题。

4. 电源电压分隔划分

对于复杂组件，如果结构上不可分隔的话，那么就应从电气上进行划分，为了便于测试，去掉一个或多个有源部件（如集成电路）的任一条电源线。这样整个功能就可按一组子功能对待，其中每个子功能可以在不考虑其它子功能的情况下进行单独测试。

2.1.3 BIT 测试点的选择与设置

测试点是故障检测及隔离的基础^[1~3,5~7] 测试点选择的好坏直接影响到被测系统测试性的好坏。测试点选择的基本原则是测试点要能保证使 BIT 故障检测率和隔离率最佳。

一、测试点的类型

一般来讲 测试点主要有三类 无源测试点、有源测试点、有源和无源测试点。

1 无源测试点

无源测试点是指在电路内某些节点上可以提供测试对象瞬间状态的测试点。通常信号能同时转移到几个其它功能块的节点（扇出节点）几个信号能汇合到一个最终输出信号的节点（扇入节点），冗余电路中信号分支或综合的节点以及各功能块之间的连接点均是无源测试点。无源测试点仅用于观察电路内部情况，不能检测对内部的影响及其外部行为。

2. 有源测试点

有源测试点允许在测试过程中对电路内部过程产生影响和进行控制。在测试程序设计中应特别注意这样的外部干扰，测试程序的规模与有源测试点的选择有关。有源测试点的选择应保证只

需在有源测试点的输入上施加有限的测试矢量就能精确地确定电路状态，测试点的数量应保证安排合理、数量最少、故障隔离能力最佳。

有源测试点主要用于：

引入模拟信号；数字电路初始化（例如重置计数器和移位寄存器）；借助于门电路中断反馈回路；中断内部时钟信号以便从外部施加时钟信号。

3. 有源和无源测试点

它主要用在数字总线结构中，在测试期间，设备作为一个总线器件连接到总线本身。这些测试点对测试过程中既有有源影响也有无源影响 在有源状态 它是一个控制器 在无源状态 它是一个接收器。

二、测试点的特性

选择的测试点应允许：

确认故障是否存在或性能参数是否有不允许的变化；在当前修理级，确定故障位置；对一个设备或组件的功能测试保证以前的故障已经排除、性能参数不允许的变化已经消除、设备或组件已经可以重新使用；利用外部测试仪器进行测量，在这种情况下，测试点可能需要附加一些缓冲器、驱动器或隔离电路以保证在没有信号失真的情况下连接。

测试点应保证在制造和维修的各阶段（即设备级、组件级和单个电路板级）均是适用的。测试点选择应保证与自动或手动测试设备的测试兼容。

通过附加维护（Service）连接器或工作（Working）连接器可达的电路节点通常认为是单纯的面向制造或维修的测试点。另外还有一种测试点，它们通过工作或维护连接器被引到外部，这些测试点通常安装在组件上（探针焊点），纯粹是一种面向制造或维修的特性，它们主要用于组件级或模块级以简化部件故障定位，这类测试点通常用测试探针、传感头等进行人工模拟或观察。在印制电路板上这类测试点应保证外部可达。

最后需要指出的是测试点在电路文件中应清楚标出。

三、测试点的选择

测试点的选择是测试性设计的一个重要步骤，测试点选择是否恰当直接关系到系统、设备等的测试性水平。因而，在测试点选择时，应进行充分的分析、研究，认真做好下述工作：

- (1) 确切地对电路加以说明；
- (2) 对电路进行详细分析；
- (3) 确定制造及维修中的测试策略；
- (4) 了解测试性或自测试电路现有的内部情况；
- (5) 了解测试对象所要求的特性；
- (6) 进行功能划分；
- (7) 分析测试对象的结构，保证其便于测试。

此外，在测试点选择时还应注意以下问题：

- (1) 测试点应设在显示电路的控制部分；
- (2) 为冗余电路提供测试点；
- (3) 在信号对负载或噪声敏感的地方，应从外部印制电路连接器隔离测试点；
- (4) 当使用单触发器件时，应在其输出处设置测试点；
- (5) 测试点能方便地通过系统或设备的插头或测试插头连到自动测试设备上；
- (6) 测试点选择对高电压和大电流的测量符合安全要求；
- (7) 测试点的测量值应以设备的公共地为基准；
- (8) 应消除测试点与自动测试设备之间的相互影响，以保证被测设备连接到自动测试设备上后，性能不会降低；
- (9) 高电压或大电流的测试点在结构上要同低电平信号的测试点隔离；
- (10) 应适当考虑自动测试设备的实现，符合自动测试设备合理的频率、精度要求。

表 2-1 给出了一些重要电路及其测试点，这些测试点专门用于这些电路的初始化、观察和控制^[1]。

表 2.1 重要电路及其测试点

电路	测试点		
	初始化	有源测试点	无源测试点
时钟脉冲发生器	无需初始化	不能受外部影响	可以监控主时钟以及所有驱动时钟频率
单稳态调谐振荡器	无需初始化	如果延迟时间过长,以致测试时间受到消极的影响,那么振荡器就应提供附加的触发信号	一个测试点,用于决定延时
总线结构	无需初始化	应可访问所有控制、数据和地址线	为了观察数据信息量,应保证可访问所有控制、数据和地址线
反馈电路	反馈不允许初始化	反馈回路应能用一个有源测试点中断,此外,应可以从外部将信号反馈到这些测试点	反馈回路应在所有电路节点设置无源测试点
组合逻辑电路	组合逻辑电路不允许初始化	在电路的所有输入上应设置有源测试点	在所有逻辑输出、扇出和扇入节点设置观察点
触发器	触发器应能够设置到某已知状态	应装有触发信号以便确定数据输入	应设置用于观察输出的测试点
锁存器	同触发器	应设置有源测试点以控制输入端的测试数据	在所有数据输入和输出端应提供无源测试点
移位寄存器与计数器	应可进行初始化以便达到预先确定的初始状态	在所有输入端应提供有源测试点以便控制输入数据	在所有输入和输出端应提供无源测试点
只读存储器	不能初始化	应为地址线的选取提供有源测试点	用于观察数据输入
随机存取存储器	每个储存位置可以自由设址并写入或消除,应预先决定是否要装入用于测试的已知的测试模式	在地址和控制线应提供有源测试点	在所有的数据输出端

(续)

电路	测试点		
	初始化	有源测试点	无源测试点
微处理器与接口 (PIA)	应提供用于初始化的测试点	在地址和控制线应提供有源测试点	在地址和数据结构以及所有输出控制线上应提供无源测试点
微型计算机	通过测试提供初始设施,包括寄存器和固件	在所有控制线 and 数据输入点提供有源测试点	在所有数据,地址和控制线上提供无源测试点
数字/模拟变 换 器 (DAC)	仅在复位输入	在所有数字电路输入端提供有源测试点	在模拟输入和参考输入端提供无源测试点
模拟/数字变 换 器 (ADC)	通过复位输入	在模拟电路输入端应提供有源测试点	在数字输入和参考输入端提供无源测试点
模拟电路	不可能	在所有功能块的输入点提供有源测试点	在所有功能块提供测试输出,如果可能的话,只要不影响主功能,就要在内部节点提供无源测试点
电压调节器	不可能	不要求	仅在输出端提供观察点
电源	不可能	不要求	仅在输出端

2.1.4 余度 BIT 技术

BIT 可以通过在设计中重复被测的功能电路 (产生余度) 来实现^[1,7]。余度单元和被测电路 (CUT) 接受相同的功能输入信号。这样实际上就有了两个 CUT 电路, 通过比较这两个电路的输出即可了解电路的工作状态, 如果输出值不同并且其差别超过某一阈值, 那么就说明发生了故障。

这种类型的 BIT 通常较为昂贵, 原因是整个模块是重复的, 并且需要附加一些用于实现余度的硬件。所以余度 BIT 通常只用于关键功能部件中。余度 BIT 的一个主要优点是它可在模块

执行其功能的同时运行 BIT 附加的 BIT 电路不会影响功能电路。

图 2.1 所示是余度 BIT 例子，在该例中，模拟电路被重复；输出间的差别可以进行比较。如果差别超过了预先确定的门限，那么就会产生故障信号并锁定故障。

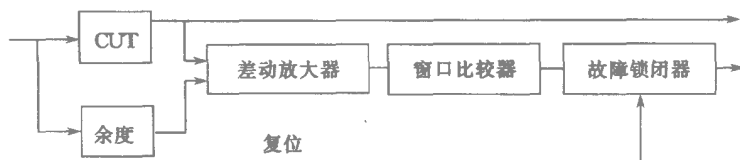


图 2.1 余度 BIT 原理示意图

另外还可利用多个余度单元，余度单元数越多，故障检测和隔离的能力越强。如果存在两个或多个余度单元，那么就可隔离到故障的余度单元。CUT 信号和每个余度单元的输出信号被反馈到能比较这些信号的电路。这种类型的比较电路通常是采用表决电路的形式，与多数信号相违背的信号即可确定为故障的信号，而其它相类似的信号则认为是正确的。

2.1.5 环绕 BIT 技术

环绕技术目前已成为测试微处理机系统的一种标准方法 [1~3,5]，被测系统可能是单个微处理机电路板或由许多这类电路板所组成的系统。环绕技术要求对微处理机及其输入输出器件进行测试。

测试开始时需要决定以微处理机为基础的芯片是否是可用的，在某些情况下，这项工作可利用硬件余度来完成。微处理机芯片、ROM、RAM 检查都通过后，下一步就是检查电路的其它部分。为了完成此项工作，必须构建一个闭环系统以便系统微处理机可以利用储存在 ROM 区中的测试矢量激励其它部分的运算电路。在该系统中必须包含处理机控制的选通以便可以循环使用数据（如图 2.2 所示 [1]）。这样所得测试响应通过与输出线有关电路返回，保证微处理机可以将实际测试响应与储存在 ROM 中的已知