

智能电网微电子系统 测试性评价

陈晓梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

智能电网微电子系统 测试性评价

陈晓梅 著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

这是一本比较全面介绍固有测试性评价相关技术的图书。书中结合智能电网的工程背景,在概述测试性评价分类及意义、测试性建模及多信号模型优势的基础上,阐述了测试性评价指标体系、多信号仿真建模、多信号模型的分层递阶系统级整合、故障空间内虚假故障分析、测试空间内测试点优化选取等内容。

本书内容翔实,深入浅出,覆盖面广泛,涉及测试性评价的前沿技术,具有很高的实用价值。本书可供电力、电子、自动化及测试与仪器仪表专业等相关专业的理论研究者和工程技术人员阅读,也可供高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网微电子系统测试性评价 / 陈晓梅著. -- 北京: 中国水利水电出版社, 2011.12
ISBN 978-7-5084-9395-4

I. ①智… II. ①陈… III. ①智能控制—电力系统—系统测试 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第281504号

书 名	智能电网微电子系统测试性评价
作 者	陈晓梅 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部) 北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规 格	145mm×210mm 32开本 5.625印张 151千字
版 次	2012年1月第1版 2012年1月第1次印刷
印 数	0001—2000册
定 价	38.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

在世界各国方兴未艾的智能电网将为 21 世纪带来变革性发展。智能电网将是未来电网的发展方向，可以有效解决供电可靠性、安全性和绿色低碳的问题，并越来越受到各国的关注。在可再生能源接入、智能配电、智能用电、微网系统和大容量储能等领域，各国的新技术不断涌现，呈现出蓬勃发展的态势。我国政府高度重视智能电网发展，将其上升为国家战略，推进智能电网建设。在电网智能化发展过程中，现代电子系统必将扮演越来越重要的角色。

电子产品微型化以及功能的复杂化，使得电子设备成为提高现代化装备可靠性、维修性的一个瓶颈。要解决这个瓶颈，必须借助于可测性设计，提高系统的测试性。然而，为了避免可测性设计过程中的盲目性，测试性分析和评价显得至关重要。在故障诊断之前就进行系统测试性分析，可以实现系统的测试性预测，对于故障诊断和产品的设计维护都具有重要的指导意义。目前出版的测试性专著大多是研究可测性设计，对测试性评价指标，局限于完成测试性，而在固有测试性评价方面，还未见著作出版。本书结合实际工程背景，在分析国内外测试性的最新发展基础上，针对目前测试性分析存在的若干问题，对于电子系统的测试性分析评价进行较为深入的研究。

全书共分 7 章。其中第 1 章为绪论，在未来智能电网蓬勃发展以及现代电子系统在智能电网必将广泛应用的背景下，系统阐述测试性评价的分类，研究意义，研究概况和发展趋势；并

在分析现存建模方法的基础上，确定多信号模型作为电子系统的建模模型。第2章详细地从故障空间和测试空间两个角度阐述了固有测试性评价的指标体系。第3章、第4章重点阐述测试性建模方法。第3章在介绍多信号模型的基础上，详细阐述了基于自适应阈值估计的多信号仿真建模方法。第4章详细阐述分层递阶的系统级多信号模型的整合方法。第5章重点阐述故障空间内基于BNB-HSSE的虚假故障分析。第6章重点阐述测试空间内基于多属性决策的图搜索算法以及基于多目标优化遗传算法(MOGA)测试点优化选取。第7章则对未来进行展望。

作为专著，本书对于电力、电子、自动化及测试与仪器仪表专业等相关专业的理论研究者和工程技术人员以及高等院校相关专业师生具有一定的参考价值，对于今后测试性领域的深入研究以及在智能电网中的应用研究具有一定参考价值。

感谢博士期间导师在学术上的睿智引领和悉心指导，感谢“中央高校基本科研业务费专项资金”对本书的资助，感谢所有关心和支持的朋友。

出版本书，谨以作者近年的研究成果与更多的同行分享。由于作者水平所限，书中难免存在疏漏和不足，敬请同行批评指正。

作者

2011年10月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 智能电网	1
1.2 智能电网与现代电子系统	3
1.3 现代电子系统的测试与诊断	4
1.4 测试性与测试性设计	5
1.5 测试性评价的分类与意义	8
1.6 电子系统测试性评价现状	10
1.7 测试性评价建模方法	21
1.8 本章小结	25
第 2 章 测试性评价指标体系	26
2.1 固有测试性的评价指标体系	26
2.2 完成测试性评价指标体系	29
2.3 本章小结	31
第 3 章 多信号仿真建模	32
3.1 引言	32
3.2 多信号模型基本理论	35
3.3 基于自适应阈值估计的多信号仿真建模方法	37
3.4 实例分析	48
3.5 本章小结	61
第 4 章 分层递阶的系统级多信号建模	62
4.1 引言	62
4.2 基本思路	62

4.3	图论相关基础理论	63
4.4	分层递阶建模算法描述	66
4.5	实例分析	80
4.6	本章小结	87
第 5 章	故障空间内虚假故障分析	88
5.1	引言	88
5.2	最小碰集的基本理论	90
5.3	基于 HSSE 求全体最小碰集的方法	91
5.4	改进的 BNB-HSSE 方法	99
5.5	实例分析与仿真验证	112
5.6	本章小结	117
第 6 章	测试空间内测试点优化选取	118
6.1	引言	118
6.2	基础理论	119
6.3	基于多属性决策的图搜索算法	121
6.4	基于 MOGA 的优选测点算法	135
6.5	本章小结	152
第 7 章	未来展望	154
	参考文献	156

第 1 章 绪 论

1.1 智能电网

智能电网是涉及多领域、多学科的复杂系统工程，不仅对能源开发利用和电网建设与改造有重要影响，而且对社会稳定、经济发展至关重要。作为国家战略，智能电网的发展实际上是一次中国与欧美发达国家综合实力和抢占未来低碳经济制高点的较量，也是推动中国经济可持续发展，确保未来能源安全的重大措施。

能源在过去、现在和未来始终影响和改变着人类和世界的命运。由于世界上所有国家经济社会发展对能源的依赖性，世界各国经济发展和能源地域分布的不均匀性，全球化石能源资源的有限性，地球气候变化对化石能源利用的限制性，加之全球经济一体化、地缘政治条件、各国能源战略安全和竞争态势等相关的政治经济因素，形成了当今世界围绕着能源的种种错综复杂的矛盾，而且日积月累越来越尖锐，对人类社会发展的可持续性提出了严重挑战，从而酝酿并实际已经展开着世界“绿色产业革命”，其核心为低碳经济。低碳经济实质是高能源利用效率和清洁低碳能源结构，包括经济发展模式变革、能源科技创新、制度创新、人们生活方式转变以及人类生存发展观念的根本转变，这是人类历史发展的必然，低碳经济也已纳入中国发展计划的核心。2008 年秋天以来全球金融危机更集中引发了世界能源深层次变革。在世界“绿色产业革命”的大环境下，欧美国家提出的智能电网得到世界认可，并不是因为它的称呼，而是因为它的战略构思内容符合当今能源变革的宗旨、目的并已局部证实能起到实效。

智能电网代表当今电网发展变革的最新方向。目前欧美许多国

家均在积极规划推动智能电网。在欧洲, 2005 年成立的“智能电网欧洲技术论坛”于 2006~2007 年发布了《欧洲智能电网技术平台: 欧洲未来电网的远景和策略》、《欧洲未来电网的战略研究议程》和《欧洲未来电网发展策略》3 个重要文件, 描绘了欧洲智能电网发展的路线图。2009 年 5 月 18 日, 美国商务部长骆家辉与能源部长朱棣文联合宣布了美国智能电网建设的第一批标准, 标志着美国智能电网建设正式起步。中国国家电网公司也于 2009 年 5 月 21 日首次向社会公布了“智能电网”的发展计划, 并初步披露了其建设时间表, 这标志着中国智能电网建设被正式提上议事日程。一时间, 世界许多国家争相开展智能电网的建设。

智能电网指的是现代化的电力供应系统, 它能够监控、保护和自动优化其内部互联元件的运行。这些互联元件包括: 从集中的和分布式的发电机, 通过输电、配电系统, 到工业用户和楼宇自动化系统、储能装置、终端用户及其温控装置、电动汽车及电器设施等。

智能电网拥有双向流动的电力潮流和数字信息流, 是高度自动化的和分布广泛的电能供应网络。它利用遍及系统的双向通信、高级传感器、电力电子装置、自动化设备和分布式计算以实时优化系统的运行和资源运用。

智能电网的意义可以归结为以下 5 点:

(1) 电能的可靠性和电能质量的提高。

(2) 电力设备、人身和网络安全方面的收益。智能电网持续地进行自我监测, 及时找出可能危及其可靠性以及人身与设备安全的状况, 为系统和运行提供充分的安全保障。

(3) 能源效率收益。通过引导终端用户和与电力公司互动进行需求侧管理, 从而降低峰荷需求, 减少能源使用总量和能量损失。智能电网的效率更高。

(4) 环境保护和可持续发展的收益。智能电网是“绿色”的。通过支持分布式可再生能源的无缝接入以及鼓励电动车辆的推广使

用,可减少温室气体的排放。

(5) 直接经济效益。智能电网是电网最经济的运行方式。它可以带来的直接经济效益包括削减运行费用和提高资产利用率等。它也能振兴经济,带动众多产业发展。企业家可加快把新技术引进到电能的生产、分配、存储和应用当中去。

美国电科院在 2004 年对其后 20 年在美国实现智能电网成本所做的初步估算(以 2002 年美元的价值计)是:电网智能化所需追加的总成本为 1650 亿美元(其中输电 380 亿美元,配电和用户参与 1270 亿美元),效益为 6380 亿~8020 亿美元,效益与投资比为 4:1~5:1。

1.2 智能电网与现代电子系统

电网由于增加了“智能”二字而进一步加深了与电子信息产业的联系,它将给信息产业带来新的发展契机。智能电网的核心内涵是实现电网的信息化、数字化、自动化和互动化。这些特征的实现都需要电子信息技术的支持,其中包括大量现代化电子系统。

随着建设坚强智能电网的开展,迫切需要研制智能设备,使现有电气设备具有自我检测、自我诊断和自我控制功能,以适应信息化、自动化、互动化的要求,从而使之成为智能电网的一个有机组成部分。设备智能化是一种理念、一种方法、一个发展和进步的过程,其目的是使设备通过人工智能的部分或全部功能,使产品达到最佳工况。而智能化的手段则需要借助现代电子技术。

有分析人士指出,未来 5 年,随着智能电网部署的增长,智能电表在全球安装的数量将高达 2 亿块。在中国,与智能电网相关的 5960 亿美元经济刺激计划正在实施过程中,预计在未来 3~5 年内将部署 1.7 亿块智能电表。而在美国,政府为升级本国电网的拨款中,有一部分是用于使 13% 的家庭(1800 万户)在未来 3 年之内

能装上智能电表。在欧洲，意大利及瑞典已经完成先进计量基础设施（简称 AMI）的部署，将所有普通电表更换为智能电表；法国、西班牙、德国和英国预计在未来 10 年内完成先进计量基础设施部署。从 2009 年开始，智能电表渐渐成为微控制器（简称 MCU）业的应用热点，几大微控制器公司竞相发布新产品。不久前，飞思卡尔、ADI 和 NXP 公司推出了新产品。电表芯片成为创新热点。可以预见，智能电表代表了其他智能化设备的发展趋势，越来越多的智能化设备最终都将终结为电子芯片和系统的设计。

1.3 现代电子系统的测试与诊断

高性能的现代综合电子系统，直接关系到许多现代化装备的可靠性、维修性。随着智能化、自动化的不断提高，智能电网必将越来越依赖于以复杂电子系统为核心的智能设备和仪表，因此，测试这些复杂电子系统，以确保其可靠性的需求也与日俱增。然而，测试是个较难解决的问题，据估计目前产品的测试问题占据电子制造商的产品成本的 30%~50%。而事实上，这个比例并没有表示出许多系统的实际测试代价，因为它忽略了维修代价。一个关于快速可更换单元（简称 LRU）可支持性问题的研究（作为 F-22 战斗机的改善测试方法的建议的一部分）表明，60% 的代价都可以归结为不可测模块。

目前，微电子系统测试诊断主要采用基于外部测试设备（简称 ATE）和机内测试设备（简称 BIT）进行，诊断的准确性差，虚警率高。造成这种现象的主要根源在于测试问题没有解决。测试与故障诊断是不可分割、相辅相成的。测试是获取信息的途径和手段，它为故障诊断提供信息来源，而故障诊断则是针对测试得来的数据信息进行后处理，从而最终定位故障。如果不能提供故障诊断所需要的充足的信息量，则必然造成诊断难度增加，诊断正确率下降。现代电子系统必然是高科技密集型设备，微电子技术的飞速发展造成电子产品的微型化越来越剧烈，使得传统的物理接触方法所能进

行的测试访问机会越来越少,从而形成测试瓶颈,使故障诊断不能获取足够的信息量,必然导致虚警率高。而解决这个瓶颈的唯一方法就是提高系统的测试性。

1.4 测试性与测试性设计

最具活力与革新性的新一代信息技术作为战略性新兴产业之一,已经成为中国“十二五”规划的发展重点。高性能集成电路系统是关系国民经济和社会发展全局的基础性、先导性和战略性新兴产业,是新一代信息技术产业发展的核心和关键。而测试性技术则是测试环节中具有深远影响力及决定性战略价值的基础技术,该领域的任何突破,都将有利于新一代信息技术产业的快速发展。对于国家安全、航天安全以及有关民用电子基础设施的安全都将具有战略性价值。

测试性的概念最早起源于美国军事领域,并随后逐渐被推广到电力、化工、液压、机械等领域的各种复杂系统。测试性定义为系统或设备能够及时并准确确定其状态(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,是电子设备的一种重要的设计特性。测试性(Testability)这一术语是1975年首先由F Liour等人在《设备自动测试性设计》一文中提出的,随后相继应用于诊断电路设计及研究等各个领域。1985年,美国国防部颁发了MIL—STD—2165《电子系统及设备的测试性大纲》,该大纲把测试性作为与可靠性及维修性等同的设计要求,并规定了电子系统及设备研制阶段中应实施的测试性分析、设计与验证的要求及实施办法。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。为了与MIL—STD 1814《综合诊断》标准相协调,并扩大应用范围,美国国防部于1993年颁发了MIL—STD—2165A《系统和设备测试性大纲》取代MIL—STD—2165。

测试性对现代化设备系统及各种复杂系统,特别是各种电子系统的可用性及寿命周期费用有着重大的影响。测试性与可靠性及维

修性密切相关,对具有良好测试性的设备可以及时、快速地发现并确定其存在的故障,提高系统的任务可靠性及安全性;还可以缩短故障检测和隔离时间,进而缩短维修时间,提高系统的可用性,减少系统的使用和保障费用。测试性差的被测设备则会对自动测试系统(简称ATS)的性能造成重要影响,使ATS的故障检测和隔离时间增加,甚至根本无法测试,造成ATS的故障覆盖率、故障检测率和故障隔离率降低。

而提高系统测试性的手段就是进行可测性设计:即采用“并行工程”的思想,在产品的设计阶段就考虑测试性,通过添加一些特殊的电路结构,从而实现方便测试的目的。只有提高电子系统的可测试性,才能从根本上解决电子系统的测试问题,并提高其诊断的准确率,降低虚警率。可测性设计的方法很多,有特定目标(可测试性)方法、结构化设计方法。而结构化设计方法主要包括基于边界扫描标准总线的方法以及机内测试方法。

采用标准化的边界扫描总线结构进行可测性设计,是当今可测性设计(简称DFT)的主流技术。其本质是采用虚拟测试机制取代传统物理接触方法的测试访问机制,来提高原电路内部节点的可控性和可观性,从而达到方便测试的目的。将其应用于新一代电力设备的电子系统设计中,有助于新一代电子系统在设计上形成开放式系统结构,降低科研成本,缩短科研、生产周期,便于扩充和升级,产品维修和后勤保障较为方便,维修保障费用低,符合新一代电子系统的综合化、通用化、模块化要求。

参考文献[1]针对当前军事应用虚警率高,不可重现现象严重的现状,在比较评价各种可测性设计方案基础之上,提出采用递阶和结构化的设计方法和相应的测试方法。如图1-1所示。并推荐在板级采用1149.1边界扫描结构化可测性设计方法,而在系统级采用1149.5测试总线。另外,已经有多个成功地将边界扫描技术应用于航空航天电子系统测试的例子。参考文献[5]指出,1149.5 MTM—BUS现在已经被美国空军“宝石柱”和“宝石台”

计划的航空电子系统体系结构所采用,为了进一步提高航空电子系统的可靠性而采用了双余度的 MTM—BUS。总线结构现在已被用于美国空军下一代 F—22 歼击机和 RAH—66 武装直升机的测试维护中。机内测试的主导思想就是将外部测试设备的功能嵌入到电子系统中,即将测试设备微型化,从而达到方便测试的目的。

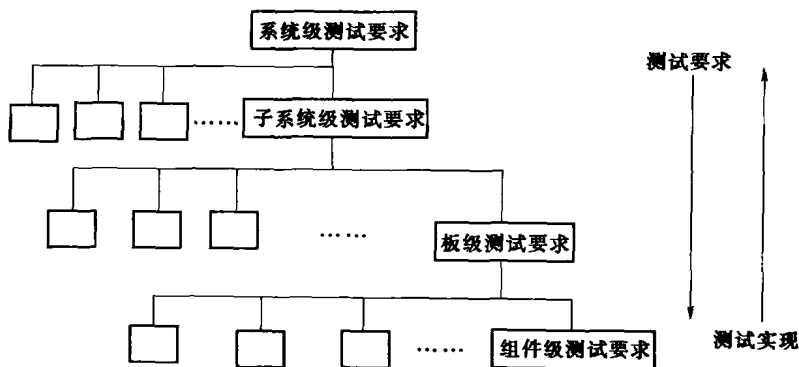


图 1-1 递阶测试结构概念框图

然而,不管是哪种可测性设计方法,仅仅解决了微型化电子系统如何进行测试的问题。换言之,可以认为可测性设计所添加的硬件单元都仅仅是一些传感器测点,却忽略了改善测试性过程中的另外一个重要问题——测试性的分析与评价。通过测试性的分析与评价,对于特定系统而言,可以确定其当前设计是否具有足够的测试性,如果不够,在那些地方应该添加新的测点,然后再评价,再改进设计,如此循环往复,才能最终得到一个测试性较好的系统。而如果没有测试性的分析和评价,则可测性设计往往带有很大的盲目性。

军工领域,特别是航空航天领域是各行业各方面高端科技的集成和综合,是一个国家科学技术水平的衡量标志。测试性在军事领域的首先应用,说明了该项技术的前沿性,而随着智能电网的发展,该项技术也必将有广泛的应用。

1.5 测试性评价的分类与意义

1.5.1 测试性评价分类

固有测试性的概念是由 Simpson 在 1990 年提出的。Simpson 指出,测试性含义包括两个层面:一是固有测试性(简称 IT),称为事前测试性;另一个是完成测试性(简称 AT),称为事后测试性。在本书后面的叙述中,若没有特殊强调,则可测性均指固有测试性。

如果将电子设备的全寿命周期大致分为产品设计阶段和产品维护阶段的话,则固有测试性分析和评价以及完成测试性的分析和评价发生的相对位置如图 1-2 所示。

1.5.2 测试性评价的意义

固有测试性与完成测试性在图 1-2 中的相对位置,决定了各自的作用和意义。

1. 固有测试性评价意义

(1) 产品设计阶段。在产品的设计阶段,进行固有测试性分析和评价,可以指导和优化产品设计过程。对于原始的设计产品,对其进行固有测试性分析,可以知道哪些地方测试性比较好,哪些地方测试性比较差,从而使设计者及时发现问题,对于测试性比较差的地方采用相应的可测性设计方案,修改产品设计。可测性设计的实质是在适当的位置添加观察点或者控制点,而在哪里插入这些可测点,则要依赖于固有测试性的分析结果,从而避免可测性设计的盲目性。在设计阶段就能将测试性加以考虑,从根本上改变了传统的先设计,再测试,然后诊断,最后再修改的思路,从而大大缩短了产品的优化设计周期。同时省掉了大量测试和诊断环节,而测试环节是造成产品成本增加的重要环节,这样就可以大大削减产品成本开销。

(2) 产品维护阶段。由于固有测试性的分析和评价是在故障诊断之前,所以,可以指导和优化产品维护阶段的故障诊断过程。通过固有测试性的分析和评价,可以获得故障空间和测试空间的信

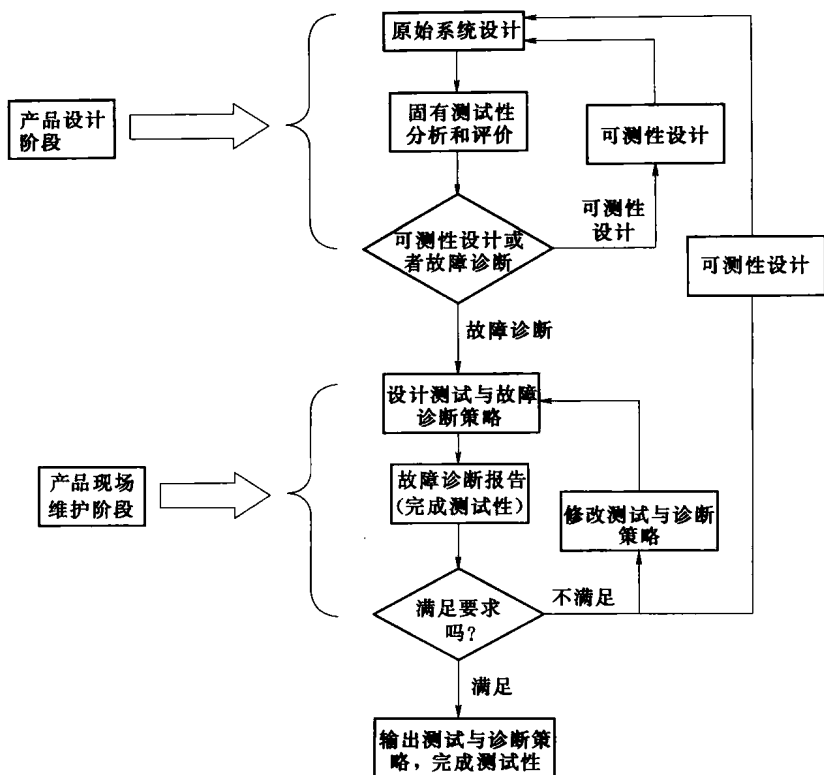


图 1-2 完成测试性与固有测试性

息，比如，在故障空间，可以预知该系统最多可同时定位出多少个故障，哪些故障是不能通过故障诊断策略来区分的，哪些故障是根本不能定位的故障等；在测试空间，可以预知要诊断该系统究竟需要多少个测试点信息，在若干个测试点信息中，选择哪些测试点能够保证要求的故障诊断率，哪些测试信息是多余的，等等。这些通过固有测试性分析和评价获得的信息对于后期的故障诊断具有重要的指导意义。

2. 完成测试性评价意义

如果把固有测试性的分析和评价看成是对系统测试性的预测的

话，则完成测试性则是在实施完测试和故障诊断策略后所实际获得的测试性，可以看成是对系统测试性的一个实际值。虽然完成测试性对系统测试性的评价较为真实准确，但是，由于其位于测试和故障诊断策略实施之后，是在测试和诊断开销已经消耗完之后的评价结果，这个结果显得为时已晚。虽然，根据此评价结果可以重新修改测试和诊断策略，但是这无疑会带来更大的开销，且显然大大延长了产品的设计周期，造成了产品成本开销的巨大浪费。同时，单凭完成测试性分析评价结果去修改测试和诊断策略，也具有一定的盲目性，因为，从前面固有测试性的分析过程可以知道，有些故障任凭如何更改诊断策略，都不可能进行定位的，而且，故障定位的精度不是由诊断策略唯一决定的，还跟系统的固有测试性直接相关。

由此可见，在故障诊断之前就进行系统固有测试性分析，可以实现系统的测试性预测，为故障诊断、测试性设计以及测量选取和测试信号生成提供指导作用，对于故障诊断和产品的的设计维护都具有重要的意义。

1.6 电子系统测试性评价现状

如果对于某个故障而言，利用现有的测试条件能够检测它，则称该故障是可测试的。如果当故障集中的每个故障都是可测试的，则称电路对该故障集是可测试的。可测性设计是为了使测试生产和诊断过程简单化而在设计过程添加约束的一类设计特征，从而减少测试时间和开销，降低测试生成的难度。

电子系统属于同类系统，即组件或者子系统之间相互作用是紧密耦合在一起的。电子系统可分为数字电子系统和模拟电子系统。而这两部分由于其所处理的信号的本质上的区别，其分析和设计方法都是完全不同的，对其进行测试性分析和评价的方法也是有区别的。目前，关于电子系统的测试性分析主要按照数字和模拟来分开进行。