

测试性分析与评估体系的研究

张伟昆

(91872 部队 北京 102442)

摘要: 测试性是一种能及时准确地确定电子系统状态并隔离其内部故障的设计特性,通过测试性分析与评估来发现电子设备测试性设计中存在的缺陷并加以改进。为了有效评价系统测试性的好坏,迫切需要一个完善的测试性分析与评估体系。通过研究相关矩阵的测试性分析与评估过程,分析并总结得到测试冗余与故障掩盖之间的关系,即可通过简单测试组合减少故障掩盖以此来提高系统的测试性,并对常用测试性参数指标总结并分析提出了2个新的测试指标重点故障检测率与综合故障隔离率。以盒式磁带录放机为例,以不同模型设计两种测试性方案并进行计算分析。其结果表明新提出的测试性指标能够分辨出具有更好测试性的设计方案。

关键词: 测试性分析;相关性矩阵;检测率;隔离率

中图分类号: TN606 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 520.604

Research on testability analysis and evaluation system

Zhang Weikun

(PLA91872, Beijing 102442, China)

Abstract: System testability is a design characteristic of judging the working state of products and isolating their inside faults exactly. By the method of testability analysis and evaluation we can find the defects in the testability of electronic equipment and improve it. In order to effectively evaluate the testability of a system, we need to customize some of the measurable indicators. Through research on the process of analysis and evaluate based on the Dependency Matrix, we analyze and summarize the relationship between the test redundancy and fault masking, which is fault masking can be reduced through a simple combination of test, and the testability can be improve by this method. Then we summary and analysis of the parameters of testability to give the Major FDR and Composite FIR. The cassette tape recorder as an example, design two testability program based on different model to calculation and analysis. The results show that the new testability indicators can distinguish targets with better testability.

Keywords: testability analysis; dependency matrix; FDR; FIR

1 引言

测试性分析与评估同测试性建模一样也是测试工程中极其重要的组成部分^[1],通过对测试性指标的定量分析来评估系统测试性设计的好坏,从而进一步改进系统的测试性设计达到故障诊断的要求。当前,测试性分析辅助软件设定的一些常用评估指标能够帮助计算与分析评估方案的可测试性^[2-3],如在 TEAMS 软件中能够分析并计算故障检测率(加权/未加权)、隔离率(加权/未加权)方法^[4]。但对于实际工程而言,这些软件仅仅能够定性分析出一些固有指标,并不能分析出这些指标之间的关系。而且对于某些系统核心模块要

求更为严格故障的检测,但软件仅能分析系统的整体情况,而且对于整体系统不同测试隔离的建模方案可能会计算出相同的故障检测率和隔离率,导致无法评估选用哪种方案更优。因此,在基于相关性矩阵的测试性分析测试与故障间的关系,同时设计并增加了有助于评估系统测试性重点的故障检测率和综合故障隔离率计算。

2 系统状态与相关性模型定义

2.1 无故障状态的界定分析

目前,虽然对于国内外一些学者对于一些指标定义仍

收稿日期:2015-05

存在争议^[5-6],如如何界定无故障状态与“全部故障数目”、“故障隔离范畴”等问题的定义。

在该文中作出两个定义:

定义1:“全部故障数目”包含系统所有可能发生的故障,但不包含无故障状态。

定义2:“故障隔离”包含无故障状态。

这是因为无故障状态仅仅是系统所呈现的一种状态,并不属于一种故障模式,而故障模式是指能够影响某一个或几个系统功能的状态。对于故障检测率来说,计算的是可检测的故障模式占全部故障数目的百分比,所以对于全部故障数目不应包含系统的无故障状态。但是对于故障隔离来说,其目的是诊断确认出系统目前处于何种状态所进行的分析,作为系统的一种特殊状态,理应包含在内。而在实际的故障诊断中,区分系统所有状态(包括无故障状态)的能力是测试性的一个重要评估标准。

2.2 相关性模型

根据测试性故障诊断策略思路^[7],在构建了测试性模型之后,需要对模型进行故障-测试的相关性分析以提取相关测试性信息,通过这些信息对模型进行测试性分析,根据测试性模型提取出故障与测试的相关性模型通过数学矩阵的形式表示如式(1):

$$D_{m \times n} = \begin{matrix} & t_1 & t_2 & \cdots & t_n \\ \begin{matrix} f_1 \\ f_2 \\ \cdots \\ f_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

式中:对于矩阵元素 d_{ij} 的取值规则为:若测试 t_j 关联的功能与系统故障状态 f_i 所影响的功能一致,则 f_i 与 t_j 对应的 D 矩阵元素为 1,否则为 0。相关矩阵中行向量集合 $\{f_i\} = \{d_{ik} | k = 1, 2, \dots, n\}$ 描述了故障 f_i 相关的测试特征,即通过这些测试结果能够隔离到该故障,列向量集合 $\{t_j\} = \{d_{kj} | k = 1, 2, \dots, m\}$ 描述了测试 t_j 故障检测能力,即该测试检测的功能是否受到这些故障的影响。测试性的分析与评估是通过相关性矩阵进行计算相应的测试性指标参数而进行的。

3 测试性分析

测试性分析是指对系统固有的可测试性进行分析,与测试的输出无关。静态分析能够标识系统缺陷,为了提高故障诊断的能力给予建议。静态分析可以分析模型的不可测故障、故障模糊组、一般冗余测试和特殊冗余测试^[8]。

1) 不可测故障

指该故障由测试无法检测,除系统无故障状态外,故障与测试关系全为 0。

2) 故障模糊组

指具有相同测试特征的一组故障集,不能通过测试将故障从集合中隔离出来。在相关矩阵中表现为:若有 $f_i =$

$f_j (i \neq j)$ 存在,则表明故障 f_i 和 f_j 用测试是无法隔离的,将它们划分成同一个模糊组。而“模糊组中可更换单元(或故障)的个数”称之为模糊度。

3) 一般冗余测试

指能检测相同故障能力相同的测试。若 2 个测试的特征相同,则必然互为冗余关系。在相关矩阵 D 中,如果有 $t_i = t_j (i \neq j)$,则测试 t_i 与 t_j 互为冗余测试。

4) 特殊冗余测试

根据数学向量运算思路的发散拓展,考虑到有一种特殊情况的测试冗余:若存在 $t_i + t_j = t_k (i \neq j \neq k)$,即在测试列向量中出现多个列向量的向量和等于某一测试列的情况,则可以认为 t_i, t_j 的组合与 t_k 互为冗余,即测试。例如表 1 所示的相关矩阵中。

表 1 特殊测试冗余情况下的相关矩阵

	t_1	t_2	t_3	t_4
f_1	1	0	0	1
f_2	0	1	0	1
f_3	0	0	1	1

虽然每一列测试表示的故障发生情况都不一样,但实际上仅需要 $t_1 \sim t_4$ 其中任意个测试就能将故障 $f_1 \sim f_3$ 全部检测并隔离出来。

因此,为了减少非必要冗余情况的出现,在添加测试点时,要求在每个 LRU(或 SRU)后面单独添加测试点,避免多个 LRU(或 SRU)对应一个测试点可能会造成的实际故障分析中实际测试对应模块与预期的不相同。同时在定义测试关联系统级功能时,一个测试只能定义一个功能。但是,这种特殊测试冗余组的出现也可以为提供另一种思路:通过简单的测试组合去替代实现困难、代价较高的测试,以达到减小测试代价的目的。

图 1 表明最基本静态测试性分析过程,在经过上述几项分析之后,同过合并冗余测试以及故障模糊组来简化相关矩阵 D ,然后再对简化后的相关矩阵进行进一步分析。

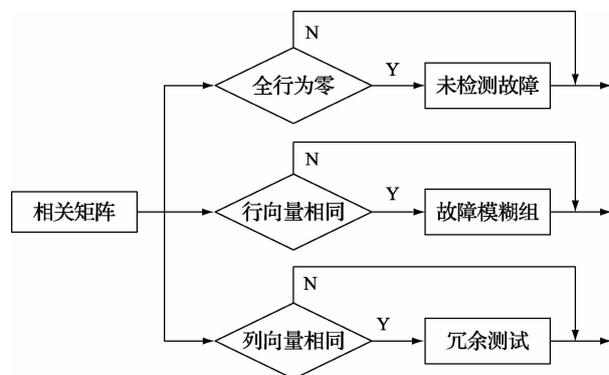


图 1 静态测试性分析示意

对于特殊冗余测试的存在,相对应的也会存在故障之间相互掩盖的情况,比如在用单故障策略隔离一个故障的时候,系统中的某一个故障由于其他故障的存在无法被检

测发现,或者该故障导致了其他元件的故障无法被检测的情况。因此,将故障掩盖分成下述2种情况,这2种情况可能会造成误判或使故障诊断出现遗漏:

1) 伪故障

倘若某个单故障的测试结果与未包含该故障的多个故障集合的测试结果相同,称这种情况为伪故障。即相关矩阵中存在 $f_i + f_j = f_k (i \neq j \neq k)$,说明此时系统中可能存在伪故障的情况。

2) 隐藏故障

倘若多个故障集合的测试结果与这些故障其中之一故障测试结果相同,将这种情况称为故障隐藏。即在相关矩阵中存在 $f_i + f_j = f_k (k = i, k = j)$,说明此时系统中可能存在故障隐藏的情况,如图2所示。

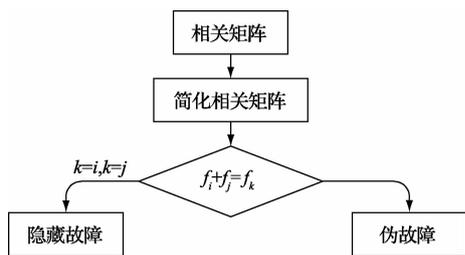


图2 故障掩盖分析流程

由于在最优化解诊断策略中进行的是单故障假设,并不能判断多故障的情况,所以需要减少故障掩盖对测试性分析的影响。结合前文所述的特殊测试冗余情况,可以通过组合测试的方式增大测试序列来增加每个故障的测试特征,以减少故障掩盖的发生。同时,也可以逆向思考,通过解决故障掩盖问题去寻求简单的测试组合,简单低代价的组合测试去替代代价高昂的测试,并且增加测试特征来降低故障掩盖。

4 测试性分析评估指标定义

4.1 未加权检测率和隔离率

故障检测率表示检测到的故障数所占被测单元发生的故障总数的百分比。故障隔离率则表示能够通过测试有效隔离的故障数目占有系统状态的百分比^[9]。

1) 未加权故障检测率(Unweighted FDR)

$$FDR_{uw} = \frac{N_d}{N} \times 100\% \quad (2)$$

式中: N_d 表示在规定的情况下可检测出的故障数,即故障-测试相关矩阵中非零行的行数; N 表示所有可能发生的故障源数目,即相关矩阵除去无故障行的行数。

2) 未加权故障隔离率(Unweighted FIR)

$$FIR_{uw} = \frac{N_L}{N_D} \times 100\% \quad (3)$$

式中: N_L 表示可隔离的故障源数目之和,即相关矩阵中所有无重复行的行数。 L 表示故障隔离模糊度。 N_D 表示所有状态的数目,包括系统无故障状态,即相关矩阵所有行数。

4.2 加权检测率和隔离率

由于每个故障发生概率不同,加权的检测率和隔离率是根据每种故障实际故障发生概率(Failure Rate)来计算的。

1) 加权故障检测率(Weighted FDR)

$$FDR_w = \frac{\lambda_D}{\lambda} = \frac{\sum_{j=1}^m \lambda_j}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \times 100\% \quad (4)$$

式中: λ_D 表示将所有可检测出故障的故障率累加,即将相关性矩阵中所有非0行故障的概率全部相加, m 为非零行的数目; λ 表示将所有可能发生故障的故障率累加,即相关矩阵除去无故障行的故障概率全部相加, n 为总行数。

2) 加权故障隔离率(Weighted FIR)

$$FIR_w = \begin{cases} (1 - \lambda_0) \frac{\sum_{k=1}^M \lambda_k}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \times 100\%, FDR \neq 100\% \\ \lambda_0 + (1 - \lambda_0) \frac{\sum_{k=1}^M \lambda_k}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \times 100\%, FDR = 100\% \end{cases} \quad (5)$$

式中: λ_0 表示系统无故障运行状态的概率; M 表示相关矩阵无重复行的数目; N 表示相关矩阵全部行的数目。

4.3 重点故障检测率

对于舰船环境下,一些重要核心部位的故障会使系统处于危及任务完成、危及人员安全或资源。因此,对这些高危部件故障的检测率单独定义为重点故障检测率(Major FDR),其数学表达式为:

$$MFDR = \frac{N_{CD}}{N_{CT}} \times 100\% \quad (6)$$

式中: N_{CD} 为核心部位需要重点检测的故障数; N_{CT} 为关键故障总数。

MFIR 其实只是 FDR 的一种特殊情况,而 FDR 包括核心与非核心的故障。该指标用于评估那些对核心部位的检测率要求苛刻而整体检测率要求相对低的系统的测试性。对于 MFIR 必须要求 100%。

4.4 综合故障隔离率

在实际测试性评估时发现,当系统存在多个隔离度的故障隔离率时,仅凭简单的隔离率分析结果并不能很好地反应系统的故障隔离能力。

例如:两个相同的系统 A 和 B, A 系统测试设计的单个单元故障隔离率为 40%,而 60%的故障无法隔离,即一个很大模糊组的故障隔离率为 60%;而 B 系统不能隔离到单个单元,但能将模糊度为 2 的故障组进行完全的故障隔离,即单个单元故障隔离率为 0%,模糊度为 2 的模糊组的隔离率为 100%。如果单纯使用 TEAMS 的隔离率(加权/未加权)分析, A 系统将优于 B 系统,可是对实际维修情况 A 系统的隔离能力并不理想。所以,需要一个能够帮助我们对上述情况进行故障隔离能力比较,并将所有模

糊度的故障隔离率进行一个综合的综合故障隔离率指标。

首先假设模糊度为 L 的模糊组的故障隔离率为 λ_L ,

A_{\max} 为最大隔离模糊度, λ_s 为系统的故障率, 有 $\sum_{L=1}^{A_{\max}} \lambda_L = \lambda_s$, 则综合故障隔离率(Composite FIR) 定义为:

$$CFIR = \sum_{L=1}^{A_{\max}} \frac{\lambda_L}{L} \quad (7)$$

根据上述定义, A 系统的 CFIR 约为 0.4(假设 0.6/ $A_{\max} \rightarrow 0$), 而 B 系统的 CFIR 为 0.5, 可以认为 B 系统的综合故障隔离能力优于 A 系统。综合隔离率能够将隔离率与模糊组 2 个指标结合在一起, 帮助分析系统整体隔离能力。

5 测试性分析评估实例分析

以文献[10-11]中盒式磁带录放机为例, 该文献分别

对磁带录放机建立信息流模型(方案 1)和多信号流模型(方案 2), 因此获得 2 种不同的测试方案, 分别对其相关性矩阵进行测试性分析, 计算并评估测试性指标。表 2 表示由信息流模型获得的的相关性矩阵, 表 3 表示由多信号流模型获得的的相关性矩阵。

对表 2 中的相关矩阵进行测试性分析: 不存在不可测故障, 存在具有相同特征的故障模糊组为{磁头损坏, 功放开路, 低音通道短路, 中音通道短路, 高音通道短路}, 该模糊组的模糊度为 5, 测试中不存在冗余测试的情况。

通过式(2)(3)计算未加权故障检测率与隔离率: $FDR_1 = 100\%$, $FIR_1 = 9/14 = 64.3\%$ 。由于故障检测率已经达到 100%, 所以无需再计算重点故障检测率, 只需要计算综合故障隔离率, 由式(7)可得:

$$CFIR_1 = 64.3\% + 35.7\%/5 = 71.5\%$$

表 2 信息流模型的相关矩阵

FT	指示灯不亮	信号电平低	高音音质差	低音音质差	中音音质差	高音失真	无声音
电源	1	0	0	0	0	0	1
LED	1	0	0	0	0	0	0
磁头损坏	0	0	0	0	0	0	1
磁头磁化	0	1	0	0	0	1	0
前置功放	0	1	0	0	0	0	1
功放开路	0	0	0	0	0	0	1
功放过载	0	0	0	0	0	1	0
低音通道短路	0	0	0	0	0	0	1
低音通道开路	0	0	0	1	0	0	0
中音通道短路	0	0	0	0	0	0	1
中音通道开路	0	0	0	0	0	1	0
高音通道短路	0	0	0	0	0	0	1
高音通道开路	0	0	1	0	0	0	0
无故障状态	0	0	0	0	0	0	0

表 3 多信号流模型的相关矩阵

FT	高音	信噪比	低音	失真度	中音	指示灯
电源(G)	1	1	1	1	1	1
LED(G)	0	0	0	0	0	1
磁头(G)	1	1	1	1	1	0
磁头(F)	1	1	0	0	0	0
前置功放(G)	1	1	1	1	1	0
功放(G)	1	1	1	1	1	0
功放(F)	0	1	0	1	0	0
低音通道(G)	0	0	1	1	0	0
低音通道(F)	0	0	1	0	0	0
中音通道(G)	0	0	0	0	1	0
中音通道(F)	0	0	0	0	1	0
高音通道(G)	1	1	0	0	0	0
高音通道(F)	1	0	0	0	0	0
无故障状态	0	0	0	0	0	0

对表3的相关测试性分析:无不可测故障,存在模糊度为2的故障模糊组{中音通道(G),中音通道(F)},与模糊度为3的故障模糊组{磁头(G),前置功放(G),功放(G)},测试中不存在冗余测试的情况。

计算未加权故障检测率与隔离率: $FDR_2 = 100\%$, $FIR_2 = 9/14 = 64.3\%$,这与基于信息流模型的测试方案的指标相同,以传统故障指标来说,2种方案得出的评估结果是相同的。但再计算新增的测试性评估指标综合故障隔离率:

$$CFIR_2 = 64.3\% + 14.3\%/2 + 21.4\%/3 = 78.6\%$$

在实际对比2种方案中的故障模糊组情况可知,方案1具有一个模糊度为5的故障模糊组,但方案2中故障模糊组有2个,模糊度分别为2和3,对于故障诊断隔离的实际应用来说,隔离到多个较小模糊组作用远大于隔离到单个较大模糊度的模糊组,故而方案2的测试性优于方案1。而由上述综合故障隔离率的计算表明,多信号流模型的测试方案2的 $CFIR_2$ 高于信息流模型的测试方案1所计算的 $CFIR_1$ 。因此,该实例分析表明综合故障隔离率的高低能够体现系统故障模糊组的隔离情况,参数值越大对应的方案的测试性更好,对测试性分析做出正确的评估结论,得出最优方案。

6 结论

基于相关性数学模型对模型展开测试性分析。分析并总结系统的测试冗余的特殊情况与故障掩盖问题,提出使用简单低代价的组合测试去替代代价高昂的测试,并且增加测试特征,为降低故障掩盖的可行性方法,以此可以提高系统的测试性水平。总结了常用测试性参数并提出的重点故障检测率与综合故障隔离率,通过实例分析文献中多信号流模型与信息流模型的相关性矩阵,对其进行测试性分析与评估表明,这两项指标参数能够有效比较分析不同系统的测试性方案,并且评估出最优的测试建模方案。

参考文献

- [1] 龙兵,王彩利,高媛,等.基于多特征模型模拟电路可测性指标分析方法[J].仪器仪表学报,2013,34(4):914-919.
- [2] 苏瑞祥,张海鹰,薛红.基于多信号模型的电子装备测试性分析[J].电子世界,2014(15):39-42.
- [3] 陈怀艳,王宝龙,郝莉娜.航天测控系统测试资源优化配置策略[J].电子测量与仪器学报,2013,27(4):281-288.
- [4] 李登,尹亚兰,万福,等.基于TEAMS的短波综合通信系统多信号建模与分析[J].电子测量技术,2013,36(11):124-127.
- [5] WANG ZH Q, YAN X, WANG CH P. Research on modeling method based on multi-signal flow model[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014(494-495):983-988.
- [6] 雷王香,汪远银,徐忠锦.机载电子设备bit技术研究[J].国外电子测量技术,2014,33(8):57-60.
- [7] 尹园威,尚朝轩,马彦恒,等.层次测试性模型的评估方法[J].北京航空航天大学学报,2015,41(1):90-94.
- [8] 雷华军,秦开宇.基于改进量子进化算法的测试优化选择[J].仪器仪表学报,2013,34(4):838-843.
- [9] 邱静,刘冠军,杨鹏,等.装备测试性建模与设计技术[M].北京:科学出版社,2012.
- [10] 杨鹏.基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D].北京:国防科学技术大学,2009.
- [11] 王义琴.基于多信号流模型的电子系统可测性算法及软件设计[D].成都:电子科技大学,2010.

作者简介

张伟昆,1964年出生,硕士研究生,高级工程师。主要研究方向为自动测试、控制系统与工程。