

基于多信号模型的引信测试性建模

任月清, 徐立新

北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 针对目前武器系统测试性设计技术滞后于装备研制水平的问题, 提出采用多信号模型法评估系统测试性。多信号模型法基于一种分层建模的思想, 在系统结构的基础上以分层有向图表示信号流向和各组成单元的连接关系, 通过定义功能、故障模式、测试与信号之间的关联性来表征系统的一种模型表示方法。文中建立了引信系统的多信号模型, 针对引信作用失效故障模式, 对系统测试性进行了评估并给出了量化结果, 如故障检测率、故障隔离率、故障隔离模糊群组、未被检测的故障、未被使用的测试等。仿真结果表明, 该方法能够快速、准确地实现故障检测与隔离, 具有建模简单、模型失真度小、通用性强等特点, 对提高产品可靠性, 降低全寿命周期费用具有重要意义。

关键词 引信; 测试性; 多信号模型; 故障检测率; 故障隔离率

中图分类号 TJ430.6

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)02-0067-04

Testability Model of Fuze Based on Multi-signal Model

REN Yueqing, XU Lixin

School of Mechatronics Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract The modern weapon systems become more and more complex with the performance improvement. High integration and miniaturization have increased the risk of the potential fault, while the number of possible test points is reduced, which reduces the capability of test and diagnosis and affects the system security. Therefore, testability modeling and analysis technology are more and more emphasized by product designers. A system with adequate testability can diagnose and isolate faults promptly, rapidly, and accurately, with improved reliability and safety for specific tasks. In order to apply the testability technology to the development of weapons, an approach is proposed in this paper to analyze and evaluate the system testability based on the multi-signal model, as a hierarchical model. On the basis of the system structure, a hierarchical directed graph is used to indicate the direction of signals, the component of individual unit and the mutual relationship. The characteristics of the system can be represented by defining its function, the pattern of fault, and by testing the relationship between signals. Multi-signal modeling does not need detailed information about the failure mode, so it can be used to diagnose and isolate unexpected failure mode. It does not need detailed information about the design of the system, so it can be used to model even a conceptional product. In this paper, a multi-signal flow graph model of fuze is set up and the system testability is evaluated quantitatively and some effective strategies for diagnosis are proposed, by use of the fault detection rate, fault isolation rate, fault isolation of ambiguity group, unidentified fault and unused test. Meanwhile, testability suggestions such as the location of the test point, the location of isolation point to eliminate the feedback loop can be tagged directly in the functional module. It also provides accurate graph or text format testability reports. Simulation results indicate that a fast and accurate fault detection and isolation can be achieved by using this method, with the following features: easy modeling, low distortion and high generality. Its application can improve reliability and save maintenance cost of products.

Keywords fuze; testability; multi-signal model; fault detection rate; fault isolation rate

收稿日期: 2009-11-25

作者简介: 任月清, 博士研究生, 研究方向为引信测试性与故障诊断能力研究, 电子信箱: yq_r@yahoo.cn; 徐立新 (通信作者), 教授, 研究方向为目标探测与毁伤控制, 电子信箱: lxxu@bit.edu.cn

0 引言

现代武器在性能提升的同时,系统的复杂度不断提高。高度集成和小型化使得潜在故障源增加、可设置的测试点减少,设备的测试与诊断能力降低,给武器系统的安全和维护带来了挑战,因此系统的测试性也越来越受到重视。具有良好可测试性的系统可以及时、快速、准确地检测并隔离故障,提高执行任务的可靠性与安全性,缩短故障检测与隔离的时间,降低系统的维护费用。测试性的概念最早产生于航空电子领域,由 F. Liour 等^[1]1975 年在《设备自动测试性设计》中提出,是指设备能及时、准确地确定其状态并隔离其内部故障的设计特性。该特性反映了系统有效进行故障检测与诊断的能力,是设计时赋予产品的一种固有属性。测试性概念提出后,被用于电子产品诊断电路设计及研究等各个领域。20 世纪 70 年代以后,国外在测试性方面开展了广泛的研究。期中,美军意识到测试性在装备维护和保障中的潜力,开始致力于在装备研制和使用中推广测试性技术,取得了良好的效果。国内开展测试性研究起步较晚,但发展很快,到 20 世纪 90 年代后期,中国对所有武器装备都提出了测试性要求,制定了《装备测试性大纲》(GJB 2547—95)及《测试与诊断术语》(GJB 3385—98)等国家军用标准,但目前的测试技术远滞后于装备的研制水平。因此,如何建立一套有效的方法对正在研制或已有的产品进行建模、对其测试性评估日益受到人们的关注。测试性设计的优良直接影响故障诊断的难易程度、故障隔离率和检测率的高低,其发展和应用对于提高产品质量、降低产品全寿命周期费用具有重要意义。

传统的故障诊断模型主要有定量、定性、结构和依赖模型。定量与定性模型对于复杂系统来说费用较高,且需要大量的系统信息,而这些信息在设计初期无法获得;结构模型中的节点与实际系统的模块具有直接的对应关系,具有简单、快速的优点,但结构并不能等同于功能,特别是对于嵌入到一个简单方框图中的复杂函数依赖关系,结构模型表现出其不足;依赖模型是目前测试性分析工具中比较常用的建模方法,它利用方向图描述因果关系,也称为推理模型,但对于复杂依赖关系的表示,依赖模型会在很大程度上偏离系统实际结构。本文提出利用多信号模型法对引信系统建立测试模型,分析并量化了系统测试性,得到有效的诊断策略,为产品的测试性设计奠定了基础。

1 引信故障模式

引信作为弹药系统的重要组成部分,在保证弹药准确起爆并击毁目标的过程中具有十分重要的作用。引信的可靠性与安全性直接影响战斗部的毁伤效能。若引信瞎火,则武器系统无法完成预定使命而贻误战机;若引信早炸,则非但不能实现对敌毁伤,反而有可能造成己方人员及装备的毁伤。此外,引信工作环境十分复杂和恶劣,而且是“一次性使用”产品,对其引爆性能无法进行 100% 的检验,使用前即使发现

故障,也不容许就地排除^[2]。为了在战争中抢占先机,要求高性能高可靠性的引信尽快装备部队武器,如何改善和提高引信的可靠性、降低全寿命周期的维护费用已成为一个不容忽视的问题。因此,必须在研制阶段对故障检测和隔离能力进行同步分析与设计,剔除设计缺陷,将隐患消除在研究阶段。

建立多信号模型前,首先要对系统的故障模式进行分析,了解各部件的连接关系,以便在建立多信号模型时进行故障模式的定义及测试点的设置。以引信瞎火为例进行分析,据《引信故障树底事件数据手册》(GJB/Z 212—2002)^[3]可得引信作用失效故障树,如图 1 所示。其中, T_{41} 表示引信瞎火, X_1 表示雷管漏装, X_2 表示雷管瞎火, A_{41} 表示雷管未被引炸, B_{41} 表示引信未解除隔爆, C_{41} 表示引信解除隔爆前雷管引炸, D_{41} 表示引信未自爆。

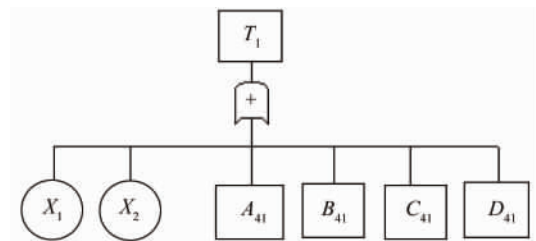


图 1 引信失效故障树

Fig. 1 Failure fault tree of fuze

2 多信号模型

多信号模型法是一种分层建模的思想,由 Deb 等^[4]于 1994 年提出,并由美国 Qualtech 公司(简称 QSI)引入其测试性工程和维修系统软件(Testability Engineering and Maintenance System, TEAMS)中,可用于复杂系统的测试性设计、故障模式影响与危害度分析等。多信号模型的提出主要考虑了以下几点^[5]。

1) 为实现故障诊断,仅需模拟故障是怎样传播到不同检测点的,只需对故障空间进行建模,不必建立系统完整的模型。

2) 系统的故障空间不是二维的(即简单的通过、失败形式),它与功能空间一样都是多维的。

3) 由于故障状态的任意性,没有必要建立精确定量关系模型,只需确定系统的重要功能属性,并将其与部件和测试相关联。

4) 故障可分为功能故障和系统故障。前者影响系统功能执行;后者通过阻碍信息流的通过,导致系统功能丧失,属灾难性故障。因此,模块失效要么影响特定的信号属性,要么影响经过它的所有信号属性。

2.1 模型定义

基于以上几点考虑,给出多信号模型形式化定义如下。

1) 系统组成单元有限集 $C=\{c_1, c_2, \dots, c_L\}$ 。

2) 与系统相关的独立信号集 $S=\{s_1, s_2, \dots, s_K\}$ 。

3) n 个可用测试有限集 $T=\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 。

4) P 个可用测试点 (探测点) 有限集 $TP=\{TP_1, TP_2, \dots, TP_p\}$ 。

5) 每个测试点对应一个测试集合 $SP(TP_k)(k=1, 2, \dots, p)$ 。

6) 每个组成单元 c_i 影响一个信号集 $SC(c_i)(i=1, 2, \dots, L)$ 。

7) 每个测试 t_j 可用于检测一组信号 $ST(t_j)(j=1, 2, \dots, n)$ 。

定义中的“信号”对应于系统中的独立变量或组成系统功能规范的不同属性。对信号的选取,可根据系统参数的具体测试需求选择。多信号模型是在系统结构和功能分析基础上,以分层有向图表示信号流向和各组成单元的构成及相互连接关系,通过定义功能、故障模式、测试与信号之间的关联性来表征系统的一种模型表示方法。多信号建模法并不要求事先掌握系统故障模式的详尽信息,这意味着该方法能够检测和隔离预料之外的故障^[6]。此外,对信号建模不需要详细的系统信息,因此也可对处于概念阶段的产品进行建模,分析其测试性。

2.2 模型构成

多信号模型由 4 类不同的节点构成。

模块节点 (Module Node): 表示一个具有特定功能集 (依据信号划分) 的硬件单元,每个单元允许分层建模。

1) 测试节点 (Test Point Node): 表示物理的或逻辑的测量操作位置,一个测试点允许进行多项测试。

2) 并联节点 (AND Node): 表示冗余连接,应用于容错系统建模中。例如,如果 A 和 B 都故障, C 才受影响,那么 A 、 B 和 C 连接需用并联节点。

3) 转换节点 (Switch Node): 表示内部连接的变动关系,可用于系统不同工作状态的建模。

2.3 建模步骤

1) 建立系统的结构模型、原理图或概念框图。在 TEAMS 软件中,系统的结构模型能够从 VHDL、EDIF 中自动导入生成,或由用户图形界面直接构建。

2) 向模块和测试点加载信号。信号集能够从功能规范或传递函数基本变量中得到。通常,任何独特的属性都可定义

一个相联系的信号。

3) 根据实际情况调整模型,以满足测试需要。

4) 模型有效性验证。

3 引信测试性建模及分析

以 TEAMS 软件为基础建立引信系统的测试性模型。TEAMS 是由美国 QSI 公司开发的集成化系统软件平台,最早用于美国军工领域系统测试、故障诊断技术和系统维护。TEAMS 使用基于多重信号流模型的因果推理和 AI 算法工具,快速计算模型中所有主要的有价值的测试性特征 (Testability Figures of Merit, TFOM)^[5]。TEAMS 提供了直观方便的图形化建模环境,使建模更加简单;通过分析系统测试性设计,其存在缺点及相应的建议都可直接标注在功能模块上。

建立系统模型采用从上而下层级建模方法,每个模块代表一个物理可替代部件或子系统,一般建模到需要故障诊断的层级即可,并在最底层加入故障模式。图 2 为引信系统的顶层多信号模型,主要包括能源装置、探测器、信号处理器、执行装置、爆炸序列和安全系统六大部分。各子系统之间通过连线相互连接,连线表明了实际系统的耦合和依赖关系。连线可表示电、机械、液压或其他任何形式 (物理或抽象) 的流在系统内的传播方向。对于引信失效模式,关注的重点是爆炸序列和安全系统两部分,因此需要对这 2 个子系统继续进行建模。图中圆圈表示测试点的位置。

模型建立后可对系统进行静态和可测性分析。静态分析是对系统总体的测试性进行评估,如:未检测故障、模糊组数及其大小、冗余测试、隐藏故障等。图 3 给出了一个包含 2 个模块的模糊组,也就是说当故障发生在该组部件里,不能确切识别是由哪一个部件引起。

可测试性分析将给出详尽的测试性评估结果。进行可测试性分析前可选择对某一子系统或整个系统进行分析并确定故障隔离到哪一层。评估结果可得到图形与文本格式的测试报告。图 4 为系统的有价值测试性特征 (Testability Figures

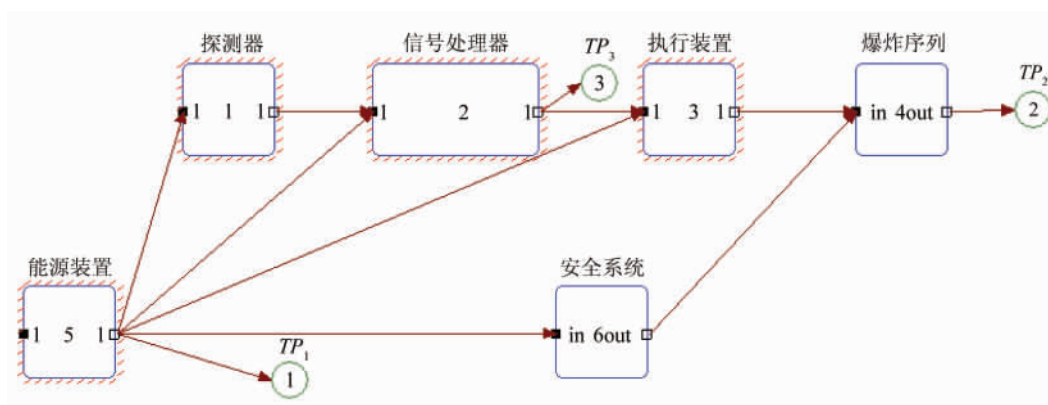


图 2 引信顶层多信号模型

Fig. 2 Top level multi-signal model of fuze

Group#1 [-]	
List of modules in this group:[-]	
	Module Name
1	电点火管[1]<-爆炸序列[4]<-FUSE-SYSTEM[1]
2	火焰雷管[2]<-爆炸序列[4]<-FUSE-SYSTEM[1]

图 3 关于模糊组的静态测试报告

Fig. 3 Static test report on ambiguity group

of Merit,TFOM)报告。报告主要包含以下 3 部分内容。

图 4 中左边一列说明性文字包括测试选项、系统及测试算法统计。报告显示,采用的测试算法是近似最优法,测试时间和费用所占的比重各为 50%(该项可根据实际情况设定,

这里本文假设各占 50%),系统共设置了 8 个测试点,有 10 个故障源,故障隔离到器件一级,模型从第 1 层到第 3 层的模块数分别为 1,6,6,测试序列的有效性为 93.62%。

1) 图 4 中测试指标数据 (Testability Figures of Merit)显示,系统故障检测率为 90%,故障隔离率为 69.3%,模糊组的大小为 1.31,平均检测时间和费用分别为 1.11 和 5.61。

2) 图 4 中柱状图(Histogram of Ambiguity Size)用于表示不同大小的模糊组所占的百分比,如:含 1 个模块的模糊组占 69%,含 2 个模块的模糊组占 31%,根据这 2 个数可计算出模糊组平均大小为 1.31,柱状图(Histogram of Test Usage)显示,为了尽可能地隔离故障需要用到 2 个测试的占 27%,3 个测试的占 18%,4 个测试的占 55%。此外,该测试还可得到以二叉树的形式给出的最优故障诊断策略。

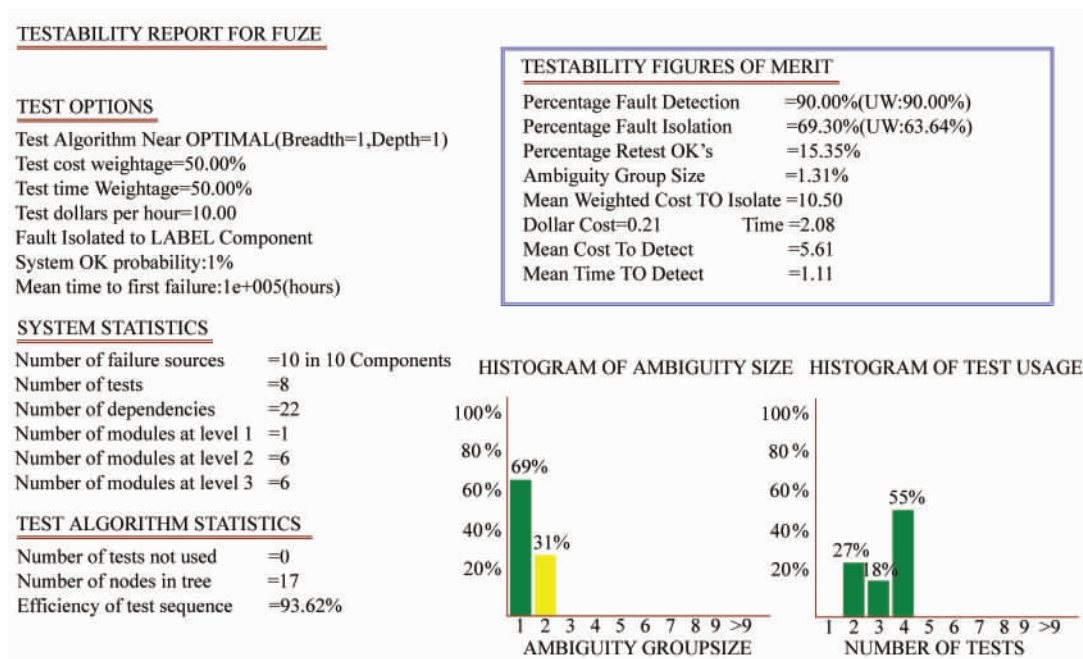


图 4 有价值测试性特征报告

Fig. 4 TFOM report

4 结论

系统的可测性与其安全性、可靠性和可维护性密切相关,测试性设计的是否优良直接影响武器装备性能。文中通过建立引信系统的多信号模型对其测试性进行分析和量化评估,得到了有效的测试序列和评估报告。仿真结果表明,该方法能够快速、准确地实现故障检测与隔离,具有建模简单、模型失真度小、通用性强的特点,为武器系统的可测性设计提供了参考。

参考文献 (References)

- [1] 林志文, 贺 , 刘松风. 基于多信号模型的系统测试性分析与评估[J]. 计算机测量与控制, 2006, 14(2): 222-224.
Lin Zhiwen, He Zhe, Liu Songfeng. *Computer Measurement & Control*, 2006, 14(2): 222-224.

- [2] 崔占忠, 宋世和, 徐立新. 近炸引信原理[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2005.
Cui Zhanzhong, Song Shihe, Xu Lixin. *The principle of proximity fuze* [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2005.
- [3] 张亚, 赵河明. 引信故障树底事件数据手册. 中华人民共和国国家军用标准 GJB/Z 212—202[S]. 2002.
Zhang Ya, Zhao Heming. *Data book of basic events in a fuze fault-tree*. PRC military standard GJB/Z 212—202[S]. 2002.
- [4] Deb S, Pattipati K R, Shrestha R. QSI's integrated diagnostic toolset[C]// Proceedings of the IEEE Autotestcon, 1997: 408-421.
- [5] Qualtech Systems. Teams user guide [EB/OL]. www.teamsQSI.com
- [6] Deb S, Pattipati K R, Vijay R, *et al.* Multi-signal flow graphs: A novel approach for system testability analysis and fault diagnosis [J]. *IEEE Aerospace and Electronics Magazine*, 1995, 10(5): 14-25.

(责任编辑 刘志远)