

测试性框图模型比较研究与改进

杨智勇^{1,2}, 王子玲³, 许爱强⁴, 徐永清⁵

(1. 海军航空工程学院 军事后勤学和军事装备学博士后流动站, 山东 烟台 264001; 2. 91370 部队, 福州 350015; 3. 海军航空工程学院 信息融合研究所, 山东 烟台 264001; 4. 海军航空工程学院 科研部 飞行器检测与应用研究室, 山东 烟台 264001; 5. 福建预备役高炮师, 福州 350001)

摘要: 对 TEAMS 和 eXpress 两款主流测试性建模与分析软件所采用的测试性框图模型——多信号模型和混合诊断模型, 从产品结构单元表示、端口表示、功能(信号)表示、故障模式表示、测试表示等多个方面进行了深入比较研究, 并对二者进行了综合评价; 在此基础上, 综合两者特性提出了一种新的测试性框图模型改进方案——端信号模型; 通过将组元端口所通过信息流直接视作信号、引入结点、扩充信号映射定义、允许定义多值测试等多种设置, 端信号模型方案能够支持基于电路网表创建模型和更为精确化的故障-测试关联性描述。

关键词: 测试性模型; 多信号模型; 混合诊断模型; 端信号模型

Comparison and Improvement of Testability Schema Models

Yang Zhiyong^{1,2}, Wang Ziling¹, Xu Aiqiang¹, Xu Yongqing³

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 2. PLA 91370, Fuzhou 350003, China; 3. Fujian Antiaircraft Artillery Reserve Division, Fuzhou 350001, China; 4. Department of Scientific Research, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 5. Fujian Antiaircraft Artillery Reserve Division, Fuzhou 350001, China)

Abstract: TEAMS and eXpress are two typical commercial softs for testability modeling and analysis. The model used in TEAMS is multi-signal model. The model used in eXpress is hybrid diagnostic model. These two models are all testability schema models. The article compares multi-signal model and hybrid diagnostic model in representation of product structure, port, function, failure mode, test, etc. Based on the comparison, a new testability schema model - port signal model is proposed. The info flows of ports are look as signals in port signal model. Signal mapping definition is extended, and multi-outcome test can be modeled in port signal model. So port signal model can be made from circuit netlist file automatically, also can describe the dependency of faults and tests more accurate.

Keywords: testability mode; multi-signal model; hybrid diagnostic model; port signal model

0 引言

基于模型的测试性设计是目前测试性设计的主流和未来发展方向, 其中, 测试性框图模型已成为目前测试性建模与分析的主流方法^[1]。例如, 国内引进的测试性建模与分析应用软件 TEAMS 和 eXpress 所采用的多信号模型(multi-signal model)^[2]和混合诊断模型(hybrid diagnostic model)^[3], 均以框图形式表述产品的结构、功能、故障、测试等要素, 基于故障和测试相关性分析实现产品的测试性分析和预计。

近年来, 国内学者对多信号模型和混合诊断模型尤其是多信号模型展开了大量的应用研究, 并取得了一定的应用成果^[4-10], 但缺乏这两种测试性框图模型的深入比较研究。为此, 本文对上述两种模型进行深入比较研究, 并综合两者特性提出了一种新的测试性框图模型改进方案——端信号模型。

1 多信号模型和混合诊断模型比较

多信号模型元素包括模块节点(Module Node)、测试点节点(Test Point Node)、与节点(And Node)、开关节点(Switch Node)和链接(Link); 混合诊断模型则由对象(Object)、网络(Net)和测试集(Test Set)组成, 其中, 对象包括元件(Component)、组件(Assembly)、输入/输出标记(I/O Flags)、连接器(Connector)和注释(Annotation)。

例如, 对于图 1 所示的组合逻辑电路, 其多信号模型和混合诊断模型分别如图 2 和图 3 所示。

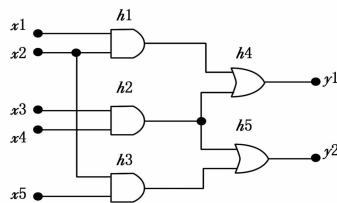


图 1 组合逻辑电路

收稿日期: 2014-11-12; 修回日期: 2015-01-09。

基金项目: 中国博士后科学基金(2013M542535); “泰山学者”建设工程专项经费资助。

作者简介: 杨智勇(1973-), 男, 安徽宣城人, 博士, 高级工程师, 主要从事装备测试性和综合诊断方向的研究。

许爱强(1963-), 男, 山东即墨人, 教授, 博士生导师, 主要从事复杂电子装备测试和故障诊断方向的研究。

1.1 产品结构单元表示

多信号模型以模块节点表示产品结构组成单元, 并在模型图中以矩形符号表示。每个模块节点可以包含子节点, 并可设定对应的层次属性, 模块层次属性包括未定(None)、系统(System)、分系统(Subsystem)、组件(Assembly)、外场可

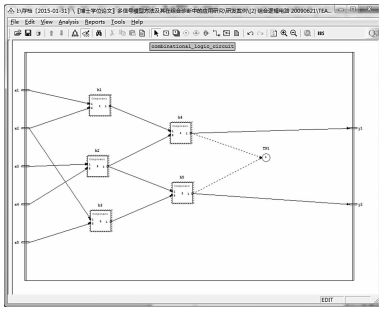


图 2 组合逻辑电路的多信号模型

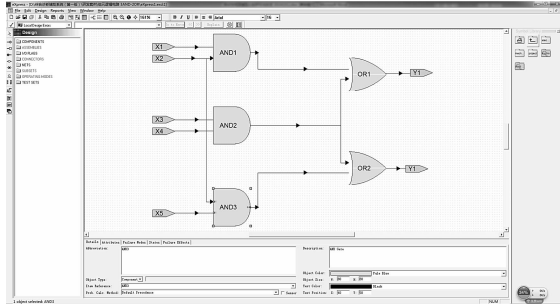


图 3 组合逻辑电路的混合诊断模型

更换单元 (LRU)、内场可更换单元 (SRU)、模块 (Module)、子模块 (Submodule)、元器件 (Component) 和故障模式 (Failure mode)。

混合诊断模型以对象中的元件、组件和连接器表示产品的结构组成单元。其中, 元件表示最底层的结构单元, 如元器件; 组件表示由多个对象组成的结构单元, 如分机、组件、系统等。对象没有统一的图形符号, 用户可以自行定义不同的图形符号表示各类对象, 也可以使用 eXpress 提供的电子、电气、机械、液压等对象符号库。

1.2 元器件端口表示

多信号模型将元器件端口抽象为两类, 即输入端口 (Input) 和输出端口 (Output), 用以表示功能的输入和输出。一个模块至少有一个输入端口和一个输出端口。

混合诊断模型中端口分类基本同于实际元器件端口类型, 即分为输入 (Input)、输出 (Output)、双向 (Bidirectional)、控制 (Control)、未使用 (Unused) 五类。

1.3 功能 (信号) 表示

多信号模型中功能需要由用户自行定义并关联到模块节点。

混合诊断模型中功能与输出或双向端口相对应, 默认一个端口对应一个功能, 用户也可以在一个端口定义多个功能, 并可以为功能设定故障率 (图 4)。

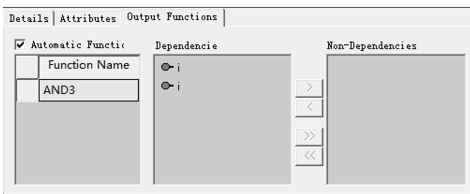


图 4 混合诊断模型端口功能设置

1.4 故障模式表示

多信号模型中故障模式有两种表示方法, 一是直接以故障模式模块节点表示, 二是采用模型隐含的故障模式。多信号模型中将故障分为完全故障 (General Failure) 和功能故障 (Functional Failure) 两类, 完全故障指模块丧失所有功能, 如电阻开路; 功能故障是指模块功能为丧失但发生偏差, 如电阻阻值变大。如一个模块没有定义故障模式子模块, 则多信号模型默认该模块存在完全故障和功能故障两种故障模式, 并根据设定完全故障和功能故障权重确定其频数比。

混合诊断模型中故障模式作为元件和连接器对象的属性, 用户自行设定故障模式名称、频数比和关联功能 (图 5)。故障模式与功能的关系分为 3 种: 一直影响 (Always Affects)、有时影响 (Sometimes Affects)、没有影响 (Never Affects)。

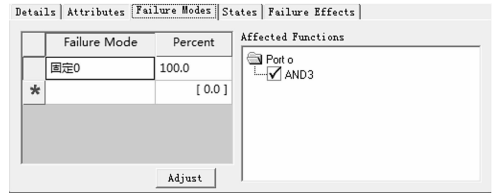


图 5 混合诊断模型对象故障模式设置

1.5 测试点和测试表示

多信号模型中使用绿色圆形符号表示测试点节点, 一个测试点允许定义多个测试。每个测试关联一项或多项功能。每个测试默认为二值测试, 即一个通过输出和一个不通过输出, 二者关联功能集一致。多信号模型支持多值测试, 即可以定义多个关联不同的功能集的测试输出。

混合诊断模型中对于测试点及测试没有相应的图形符号, 因此在模型图中不存在测试点 (测试) 节点。测试划分多个测试集, 每个测试集包含若干个测试。测试集分为不同类型: 故障检测和隔离测试 (Fault Detection and Isolation)、故障检测测试 (Fault Detection only)、故障隔离测试 (Fault Isolation only)、故障预测测试 (Prognostics only)、非诊断测试 (Non-Diagnostic)。测试分为 7 种类型: 运行测试 (Operational Test)、用户启动测试 (User-initiated Test)、探针测试 (Probe Test)、特征测试 (Signature Test)、检查测试 (Inspection Test)、层级测试 (Hierarchical Test)、组合测试 (Group Test)。每个测试的测试点 (Test Location) 仅能与一个端口关联, 测试功能即为该端口功能, 模型根据功能传递自动生成测试覆盖功能或故障集, 用户可在此基础上进行修正。混合诊断模型中测试默认为二值测试, 且不能直接定义多值测试 (图 6)。

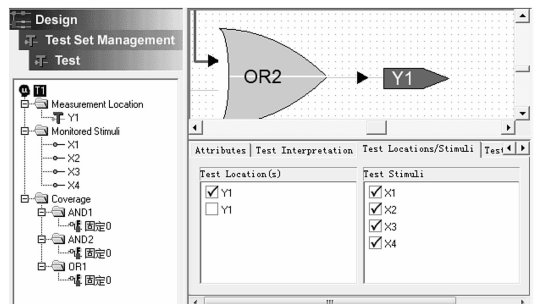


图 6 混合诊断模型测试设置

1.6 任务剖面和工作方式表示

任务剖面是指产品在完成规定任务时间内所经历的事件和环境的时序的描述^[4]。产品往往存在多个任务剖面，每一个任务剖面又由多个任务阶段组成，且每一个任务阶段，又可能有不同的工作方式。对此，多信号模型通过定义不同模式 (Mode) 下开关节点 (Switch Node) 的通断来定义不同任务剖面和工作方式下的功能传递；混合诊断模型则采用状态 (State) 来定义不同任务剖面和工作方式下的元件或组件的功能输出 (图 7)。

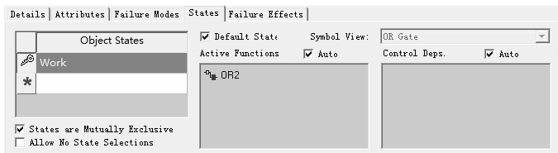


图 7 混合诊断模型状态设置

1.7 冗余和表决结构表示

多信号模型通过与节点实现对冗余和表决结构的建模，例如，与节点有 3 个输入，阈值为 33，则该结构为 3 中取 1 系统。

混合诊断模型未发现类似设置。

1.8 功能传递过程处理

考虑到故障影响传递过程中有可能存在某个元器件能够阻止某些故障的传播，例如，一个放大器和电容相连，则放大器的直流偏移误差将被阻断。对此，多信号模型提供了阻断功能 (Function Blocked) 和阻断完全故障 (General Failure Blocked) 设置。

同时，多信号模型还提供了功能映射 (Function Mapper)，用于描述两个信号之间关联关系，例如模拟信号经 A/D 变换转换为数字信号，模拟信号即为源功能 (Source Function)，转换后的数字信号则为目标功能 (Destination Function)。

混合诊断模型中，由于功能直接由端口定义，功能映射表现为输出端口功能与输入端口功能的相关性，用户可以选择自动分析功能传播 (Automatic Function Propagation) 或自行定义功能相关性 (图 4)。

混合诊断模型将功能传播分为两类，一种是主动传播 (Active Function Propagation)，例如元件有两个输入一个输出，则输出功能与两个输入功能间为主动传播相关，另一种是被动传播 (Passive Function Propagation)，例如元件为单输入单输出，则输出功能与输入功能间被动传播相关。

1.9 故障—测试相关性

多信号模型的故障与测试之间的联系是以功能为纽带，假设模块 c_i 的完全故障 $c_i (G)$ 或功能故障 $c_i (F)$ 影响可达测试点 t_p ， t_j 为该测试点测试， $SC (c_i)$ 为模块 c_i 的故障影响功能集， $ST (t_j)$ 为测试 t_j 的测试功能集，则故障—测试相关性^[2]

$$d_{iGj} = 1$$

$$d_{iFj} = 1, \text{if } SC(c_i) \cap ST(t_j) \neq \phi$$

由于混合诊断模型测试建模时已完成测试覆盖功能集和覆盖故障集定义 (自动生成、人工修正)，因此，若故障模式 f_i 测试 t_i 覆盖故障集 $TF (t_i)$ ，则故障—测试相关性

$$d_{ij} = 1$$

2 多信号模型和混合诊断模型综合评价

多信号模型和混合诊断模型都能支持电子、电气、机械、机电等多种类型产品建模以及支持从系统级到元器件级的各个层次结构建模，因此二者都具备良好的通用性。

混合诊断模型采用与设计图或实物相近的符号表示模型对象，更为形象；多信号模型将测试点加以图形表示，则在整体上更为直观。

多信号模型由于功能和端口都需要用户定义，建模过程主观性强，难以支持自动化建模；混合诊断模型的端口和功能的定义方式使其能够较为方便地从 EDA、CAD 文件直接转化生成模型，并减少了主观差异性。

多信号模型支持多值测试建模以及表决结构建模，较混合诊断模型，能够更为方便和精细化地表述故障—测试的关联性。

针对故障模式尚不确定情况下的建模问题，混合诊断模型允许定义故障与功能的关联关系为 SOMETIMES AFFECTS，并可定义功能故障率，同时基于故障概率和功能概率进行混合诊断推理^[3]；而多信号模型则以 General Failure 和 Functional Failure 表示故障。

总而言之，多信号模型和混合诊断模型各有长短，多信号模型可以更为直观、细致地描述测试和功能传递，混合诊断模型则在自动化建模方面更具明显优势。

3 测试性框图模型改进方案

基于上述研究，面向电子装备测试性建模与分析需求，我们在多信号模型和混合诊断模型的基础上，提出了新的测试性框图模型改进方案——端信号模型。

端信号模型的图元包括组元节点、测试点节点、结点和链接。

组元节点对应于电子装备中的各层硬件组成，包括系统、分机、外场可更换单元、内场可更换单元、元器件等，支持分层建模，即一个模型图中的组元节点可以用另一个包含其子节点的模型图详细描述。组元结点统一采用矩形表示。

故障模式作为组元节点的属性项，故障模式对组元节点输出端信号的影响分为一直影响和有时影响。

测试点节点表示物理的或逻辑的测试操作位置，一般与组元端口或结点相连，使用圆形符号表示。一个测试点可以有若干个测试，每个测试的测试对象为端口信号或结点信号，测试输出集可以包括若干“不通过”输出，测试覆盖故障集可以通过模型图功能传递分析自动生成得到故障—测试概率匹配关系，再经人工修正得到故障—测试精确匹配关系。

结点为模型辅助图元，主要用于表示电路网表中的电路节点等，采用较小的圆形标识。

端信号模型中的端口和功能表示基本上与混合诊断模型一致。组元节点的端口与实际端口相对应，分为输入、输出、双向、控制等类型。每个组元端口和结点对应于一个信号，分别称为端口信号和结点信号。

为描述组元输出端信号与输入端信号之间关系，端信号模型引入了多信号模型的信号映射概念并进行了扩充。信号映射设置参数包括目标信号、源信号、关联任务模式和表决阈值，例如对于开关单元 (图 8) 和表决单元 (图 9) 的信号映射定义如表 1 和表 2 所示。

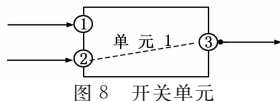


图 8 开关单元

针对故障模式不确定情况下的建模问题, 端信号模型允许定义故障与功能的关联关系为有时影响 (SOMETIMES AFFECTS), 表示故障模式对端口输出功能的可能影响。

表 1 开关单元信号映射

目标信号	源信号集	关联模式	表决阈值
端口信号[3]	端口信号[1]	任务模式①	100%
端口信号[3]	端口信号[2]	任务模式②	100%

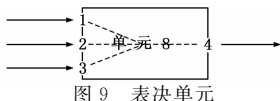


图 9 表决单元

表 2 表决单元信号映射

目标信号	源信号集	关联模式	表决阈值
端口信号[4]	端口信号[1] 端口信号[2] 端口信号[3]	/	67%

基于端信号模型, 我们研发了电子装备综合诊断辅助软件, 支持基于电路网表创建模型, 并实现了 FMECA、测试性分析和预计、故障诊断等功能。图 10 为应用该软件所创建的图 1 所示的组合逻辑电路模型。

4 结论

作为主流测试性框图模型, 多信号模型建模需要更多的人工投入, 但模型描述相对更为精细; 混合诊断模型优势则体现在能够支持从 EDA、CAD 文件直接转化生成模型, 同时, 基于模型能够直接得到故障-测试的关联性 (测试覆盖故障集)。

综合二者所长, 模型改进方案通过将组元端口和结点所通过信息流直接视作信号, 组元端口与实际端口相对应, 引入结点, 省掉开关节点和表决节点, 增强了模型图与电子装备原理图一致性, 从而能够支持基于 EDA 文档例如网表文件自动化建模; 通过扩充信号映射定义, 在减少了图元节点的同时细化

(上接第 2503 页)

4 结语

本文针对吊钩特殊结构, 提出并建立吊钩姿态估计模型, 并与高精度产品模块进行对比, 在设计吊钩三维姿态估计平台上进行了测试, 理论分析和实验结果表明:

- 1) 吊钩扭转模型有效地消除了扭转对姿态估计带来的影响;
- 2) 四元数扩展卡尔曼滤波算法有效地对 MEMS 传感器进行数据融合, 迭代解算, 能应用于低成本的吊钩测量模块中;
- 3) 设计的吊钩姿态估计平台能够实现吊钩的三维空间姿态测量与验证。
- 4) 平台所用的吊钩测量模块提供姿态误差角小, 为进一步实现吊钩防摆打下基础。

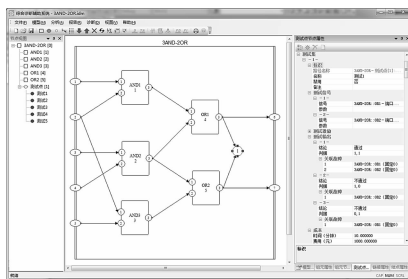


图 10 组合逻辑电路的端信号模型

了对信号传递过程的描述, 允许定义多输出测试, 使得通过模型图能够获得更为精确的故障-测试关联性。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] Somnath Deb, Krishna R. Pattipati, Vijay Raghavan, et al. Multi-Signal Flow Graphs: A Novel Approach for System Testability Analysis and Fault Diagnosis [A]. Proc. IEEE AUTOTESTCON 1994 [C]. 1994: 361-373.
- [3] Eric Gould. Modeling It Both Ways: Hybrid Diagnostic Modeling and Its Application to Hierarchical System Designs [A]. Proc. IEEE AUTOTESTCON 2004 [C]. 2004: 361-373.
- [4] 龙兵, 王日新, 姜兴渭. 基于多信号模型航天器配电系统最优测试技术 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37 (4): 10-13.
- [5] 杨智勇, 许化龙, 许爱强. 基于多信号模型的故障诊断策略设计 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 1616-1619.
- [6] 孔令宽. 基于多信号模型的卫星故障诊断技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2009.
- [7] 林志文, 贺喆, 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.
- [8] 王成刚, 周晓东, 彭顺堂, 等. 一种基于多信号模型的测试性评估方法 [J]. 测控技术, 2006, 25 (10): 13-15.
- [9] 何光进, 叶晓慧, 王红霞. 多信号模型在故障诊断中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (1): 25-27.
- [10] 蒋俊荣, 黄考利, 吕晓明, 等. 基于混合诊断模型的测试性建模技术研究 [J]. 计算机测量与控制, 2010, 18 (12): 2690-2693.

参考文献:

- [1] Li Y, Gong L, Song J H, et al. ARM based load and hook measuring and tracking for precision hoist of tower crane [A]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation [C]. Takamatsu, Japan, 2013: 1191-1196.
- [2] Yu Y, Ou J. P, Zhang J, et al. Development of wireless MEMS inclination sensor system for swing monitoring of large-scale hook structures [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56 (4): 1072-1078.
- [3] 唐小军, 阎杰, 张绪斌. 单球无味卡尔曼滤波在飞船姿态估计技术中的应用 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (9): 1822-1825.
- [4] 夏琳琳, 赵琳, 刘黎明, 等. 陆用 AHRS/GPS 紧耦合系统的迭代 EKF 算法 [J]. 中国惯性技术学报, 2007, 15 (6): 707-712.
- [5] 秦永元. 惯性导航 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
- [6] Guo H Y, Hong C, Xu F, et al. Implementation of EKF for Vehicle Velocities Estimation on FPGA [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (9): 3823-3835.