

基于多信号流图模型的导弹系统级故障诊断技术研究

魏清新, 王坤明, 孙萍

(北京机电工程研究所, 北京 100074)

摘要: 为了实现对导弹装备系统级故障的诊断, 提出了基于多信号流图模型的导弹故障诊断方法; 该方法利用多信号流图模型建立系统的层次结构模型, 在对导弹系统级测试性指标进行分析的同时, 生成故障模式—测试相关性矩阵; 在导弹测试出现故障时, 利用故障模式与测试的相关性对相关性矩阵进行化简后, 可将故障定位到具体 LRU; 最后, 利用某型导弹电气系统对该方法进行了验证, 试验结果证明, 该方法对于导弹系统级的测试性建模与分析是有效的, 利用该模型能够对导弹系统级故障进行准确定位。

关键词: 多信号流图; 测试性建模; 故障诊断

Research on Missile System Levels' fault Diagnosis Technique Based on Multi—signal Flow Graphs Model

Wei Qingxin, Wang Kunming, Sun Ping

(Beijing Electro—mechanical Engineering Institute, Beijing 100074, China)

Abstract: In order to achieve diagnosis on missile system levels' fault, this paper proposes a method of diagnosis on missile based on multi—signal flow graphs model. This method makes use of multi—signal flow graphs models to build system' s layer structure models. Then analyze the missile system levels' testability index, the correlated matrix (fault mode to test) will be produced simultaneously. When faults are found on missile during test, simplify the correlated matrix with the correlation between fault mode and test, and then the fault can be located to LRU. Finally, prove the method with applying the method on electric system. The result proves that, this method is effective to missile system levels' testability model building and analyze. Utilize the model to locate the fault on missile system levels precisely.

Keywords: multi—signal flow graphs model; test model building; fault diagnosis

0 引言

作为一种复杂的武器装备, 现代导弹中大量采用各种先进的电子设备, 在其技术水平提高的同时, 导弹本身也变得日益复杂, 给使用、维修和保障带来了严重的问题。与其他装备不同, 导弹具有长期贮存, 一次使用的特点, 因此在导弹的设计过程中往往更加重视其本身的主要战技指标, 而对其测试性和维修性等特性考虑较少。这无疑使导弹的故障检测以及排查难度大大增加。现阶段, 对导弹系统级故障诊断的方法主要有三类^[1]: 基于故障树的故障诊断技术、基于知识的故障诊断技术和基于模型的故障诊断技术。故障树方法的诊断结果严重依赖于故障树信息的正确性和完整性, 知识方法存在知识采集瓶颈, 基于模型方法既可解决知识获取的瓶颈问题和知识库维护困难的问题, 又能提高诊断的精确性。在复杂系统的诊断方面, 基于模型的诊断方法具有优势。

1 多信号流图模型

从国内相关文献的检索来看, 多信号流图模型是最受关注的测试性模型, 这主要是由于在模型中引入“功能信号”这一概念, 以功能信号为纽带, 故障与测试的关系清晰, 所建立的模型结构同系统的功能框图类似, 便于测试性知识的表达, 同时模型的检验、核查也比较容易。正因如此, 多信号流图模型

在装备测试性分析与故障诊断中得到了广泛应用^[2-4]。

2 基于多信号流图的测试性建模流程

2.1 多信号流图模型要素

多信号模型有向图构成要素有^[5]: 设备故障模式集 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$, 与故障源相关的独立信号特征集合 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_k\}$, 测试集合 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$, 测试点集 $TP = \{TP_1, TP_2, \dots, TP_p\}$, 每个模块对应的信号集 S_c 和每个测试检测的信号 S_t 。

值得注意的是, 上述要素中的一些概念与平时测试中遇到的概念虽然名称相同, 但在意义上却有一定的差异, 在模型中的概念往往更加宽泛。例如, 平时测试中所说的信号往往指具有具体量值的模拟量、数字量、开关量等参数, 而模型中的信号(功能)是指表征系统或其组成单元特性的特征、状态、属性及参量, 既可以为定量的参数值, 又可以为定性的特征描述, 并能够区分为正常和异常两种状态, 相应测试结论为通过或不通过。

2.2 多信号流图建模流程

基于多信号流图的测试性建模工作可分为三步: 获取故障模式信息、图形化建模、测试性结果分析。具体工作流程如图 1 所示。

2.2.1 故障模式信息获取

故障模式信息是测试性建模的最基本信息。为有效开展产品的测试性建模分析工作, 并保证模型信息与产品设计技术状态保持一致, 故障模式信息获取的最直接最有效的方法是对可靠性分析得到的 FMECA 报告的相关信息进行分析 and 确认, 主

收稿日期: 2016-09-24; 修回日期: 2016-11-11。

作者简介: 魏清新(1966-), 男, 内蒙古赤峰人, 研究员, 主要从事装备综合保障技术方向的研究。

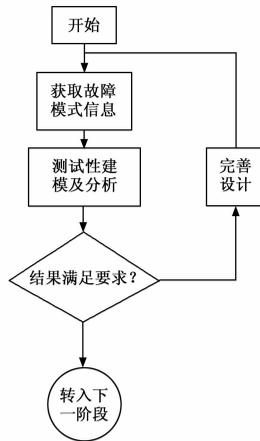


图 1 多信号流程图模型建模流程

要包括对故障模式集的分析确认和故障模式属性内容的分析确认。由于可靠性分析中的 FMECA 分析是按照 GJB1391—2006 以及相关型号规范开展的，其中各个故障模式的属性内容和类型并不能完全满足测试性建模分析工作的开展需求。因此，需围绕能否满足测试性建模分析要求，对故障模式属性进行补充完善。其中：对 FMECA 中满足建模分析要求的部分属性类型和内容直接引用；对类型可用，内容不可用的属性信息进行完善修改，对缺少的属性类型及其内容进行补充。

对 FMECA 故障模式集的分析确认应基于产品实际设计，结合可靠性仿真试验结果、试验及外场统计结果等，对 FMECA 报告中故障模式集的完备性、各故障模式的原因与影响的完备性、故障模式的严酷度等级及故障率等基础属性的正确性进行分析确认；并对故障模式、故障原因与影响的遗漏进行补充，对基础属性进行修订。

分析确认形成的故障模式信息数据再经过迭代修改并通过审查后，应作为建模的统一数据源，支持建模分析工作的开展和完成。

2.2.2 图形化建模

为方便基于多信号流图的测试性建模工作的开展，美国 DSI 公司开发出了计算机辅助建模工具软件 TEAMS。该工具将建模方法和故障隔离算法集成在一个使用方便的图形用户界面里，大大简化了大型复杂的、可重构的、带有故障容错的多重系统的创建、集成、验证和修改。通过一系列静态分析和动态分析，最终 TEAMS 可给出故障检测和故障隔离指标、故障模糊组情况、未被检测故障、未被使用或冗余测试等指标信息。近年来，国内有关单位密切跟踪国外测试性建模技术的发展，也开发出了类似的软件建模工具，如 TESTLab、TMAS、TADDES、TestabilityDA 等等。这些工具更加注重国人的工作方式和习惯，在功能上与 TEAMS 相当，但在界面设计、术语定义等还有自己的特点。本文以 TESTLab 为例简述某型导弹系统级测试性模型的建立过程。

软件建模工具的主要作用是对测试性信息的集成和对测试性结果的分析以及诊断策略的生成，对测试性建模而言，更多的工作是建模之前数据信息的准备。这些信息中除故障模式信息外还包括测试产品组成信息、模块端口信息、测试点信息、测试信息、连接信息、信号信息等。

产品组成信息：产品单元组成用于说明待建模产品的组成结构信息，产品由哪些单元（如分系统，LRU，LRM，SRU、

功能模块等）构成。这些单元将对应生成产品结构模型图中的模块。产品单元组成表应包含多层次的单元信息，应列出产品包含的各层次所有单元。最低层次至少到故障隔离所需层次。

模块端口信息：模块端口信息用于说明模块自身及内部各层次单元的输入输出端口构成和输入输出端口上传输的信号。其中，输入输出端口对应生成产品结构模型图中的各单元端口信息。端口不是实际系统中的物理端口，而是表达功能信号（或故障影响）传播路径的逻辑端口。通过在模型图上描述端口和明确端口上传输的信号，可以建立系统各个组成单元之间的故障依存关系。

连接信息：产品连接信息表明模型中各组成单元端口互连关系。产品各单元（系统，LRU，LRM 等）之间的信号传递关系可以从产品功能框图及原理图中分析得到。功能框图可以说明系统内各组成单元之间的交联，通过框图可进一步生成产品连接信息表，并对应到系统结构模型图中各个组成单元的连接。

测试信息：产品及各单元的测试信息用于对应生成测试性模型图中的测试和测试点信息。通过给出测试可以检测的功能信号（或故障影响），可以建立测试和故障模式之间的依存关系。测试信息表包括测试基础信息表、测试参数配置表和测试输出配置表。

2.2.3 测试性分析

模型图输入数据准备完成后，即可借助于建模软件进行图形化建模，根据前面所述的模型图输入数据对应建立模型图上的各个模型元素以及模型元素之间的连接关系（依存关系）。具体工作包括：建立结构模型图、建立底层故障模式图、建立测试点及测试、集成与状态控制、测试性分析、优化分析等。此外，对故障诊断而言，测试性分析的重要结果是相关性矩阵，该矩阵是后续测试过程中故障诊断的基础和前提。

3 基于测试性模型的故障诊断技术

3.1 某型导弹测试基本方法

现阶段，该型导弹测试仍以地面自动测试系统（ATS）为主。测试系统的主流设计方案是采用 ATS 技术，基于 VXI 总线、VPP 技术规范 and 虚拟仪器开发环境，由模块化的仪器组成的第 3 代自动测试系统。

在测试方法上，尽管部分型号测试中在一定程度上采用了并行测试技术，但总体而言，仍以序贯式测试方法为主。所谓序贯式测试方法，一方面是指先按一定的顺序对弹上各设备逐一进行单元测试，再进行协同检查，最终进行综合测试；另一方面在具体的测试过程中也是按一定的顺序对设备的各项功能指标进行逐一测试。

在具体参数的测试上，主要是采用“激励—响应”式基于模型的方法，即首先由测试系统直接或通过控制其他设备向被测对象施加一定的激励信号，在被测对象的输出端获取相应的响应信号并与规定的值进行比较，最终判断该参数是否符合指标要求。

随着数字信息技术的深入发展，导弹数字化程度逐步提高，使得选取的测试点能够逐步深入“黑箱”内部，采集更多的从激励到输出中间的“过程信息”，为故障检测和定位提供更精准的依据，同时地面设备能够对采集到的信号进行更全面的分析和综合评判，在对故障进行检测的同时给出某一级别的故障定位信息，测试深度和测试覆盖率有所提高。

3.2 相关性矩阵

相关性矩阵又称依存矩阵，简称 D 矩阵，是指反映某一

给定系统结构中故障源 (单元或单元故障) 和测试相关 (依存) 关系的布尔矩阵。其中: 行向量 F_i 描述了故障发生时全部测试的输出结果, 可视为故障 F_i 的征兆; 列向量 T_j 表示测试可以检测到的所有故障源, 可反映为 T_j 的故障检测能力。如果测试 T_j 可以检测到故障源 F_i , 则 $d_{ij}=1$, 否则 $d_{ij}=0$ 。

$$D_{m \times n} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ d_{m1} & d_{m2} & \cdots & d_{mn} \end{bmatrix}$$

相关性矩阵可用于在采集各测试点信息后, 综合判断被测对象是否有故障或哪个组成单元发生故障; 基于相关性矩阵可生成待建模产品的诊断推理逻辑/算法, 支持产品设计。利用相关性矩阵可以生成电子产品的诊断策略, 这项工作既可以人工完成, 也可以利用测试性分析软件工具自动完成。对于本文涉及到的导弹测试, 如本文 3.1 所述, 测试方法与测试流程都是事先制定, 而该流程与利用 D 矩阵分析得到的故障诊断流程会存在较大的差异。故障诊断的要求是在按照制定流程对故障进行检测的同时给出某一级别的故障定位信息。显然, 利用测试性建模工具产生的诊断策略并不能满足此项要求。

3.3 基于相关性矩阵的故障诊断技术

故障诊断就是在故障-测试相关性矩阵基础上, 根据测试结果利用推理算法进行故障定位, 从所有可能的故障源中排除没有发生的故障源, 从而定位故障。诊断流程如图 2 所示。

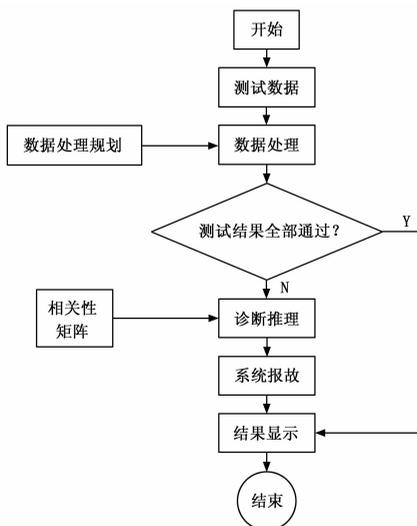


图 2 诊断流程图

在诊断流程中, 测试数据直接来自于导弹的测试结果, 数据处理规则需要根据测试项目和待测参数指标进行预先设定, 主要是判断测试指标是否符合规范要求。主要思想是: 根据所有的测试结果, 利用故障-测试相关性矩阵进行故障推理, 不断排除故障源, 最终定位确定出导致测试结果异常的故障源。

3.4 导弹电气系统故障诊断验证

某型导弹电气系统由电气控制装置 (LRU)、电源变换装置 (LRU)、电池 1 (LRU)、电池 2 (LRU)、安全开关 (LRU) 组成。在某次单元测试中出现“电气指令信号 1”测试项目报错。

利用 TesLab 生成的 D 矩阵行、列分别为 40 和 33, 即电气系统有 40 种故障模式和 33 个测试。在 40 种故障模式中, 与测试“电气指令信号 1”相关联的故障模式有 8 种。以此为

基础对 D 矩阵进行简化, 简化后的 D 矩阵如表 2 所示。简化后的 D 矩阵, 有 7 种故障模式存在于电气控制装置, 1 种故障模式存在于安全开关。在故障定位到 LRU 的前提下, 只要找出安全开关的“不能发出松开信号”故障模式的特征点既可。这样, 检索“安全开关松开信号测试”的测试结果, 发现该结果正常。于是故障定位于电气控制装置。

表 2 简化后的电气系统 D 矩阵

序号	故障模式	T0 信号检查	安全开关松开信号测试	弹翼动作筒供电电压测试	电点火装置供电电压测试	电气指令信号 1	电气指令信号 2	尾翼动作筒供电电压测试	引信供电电压测试	引信供电电压测试	脱落信号测试
1	电气控制装置-不能发出火工品电池激活指令	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
2	电气控制装置-不能发出锌银电池激活指令	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
3	电气控制装置-误发出 T0 指令	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	电气控制装置-不能发出 T0 指令	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	电气控制装置-不能向电点火装置供电	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
6	电气控制装置-不能向尾翼动作筒供电	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
7	电气控制装置-发出弹翼展开指令失败	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
8	安全开关-不能发出松开信号	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1

4 结论

本文通过对基于多信号流图模型研究, 详细分析了多信号流图模型建立过程中的各项步骤, 如故障模式信息获取、图形化建模和测试性分析; 并以该导弹电气系统为例, 完成了某导弹综合诊断方案设计, 并且验证了诊断方法的可行性, 为该装备的生产和维护提供了重要的保障。

在实际诊断推理过程中, 无论是系统级还是分系统级产品, 都可根据通过测试性建模得到的相关矩阵, 利用测试信号, 不断排除正常元件, 最后得到发生故障的元件集合, 达到故障诊断的目的。

参考文献:

[1] 何敏, 张志利, 等. 故障诊断技术方法综述. 国外电子测量技术 [J]. 2006 (5): 6-9.
 [2] 韩斌, 秦思渊. 基于多信号模型的诊断推理机设计 [J]. 计算机测量与控制, 2015, 23 (6): 1902-1904.
 [3] 宋丽琼, 宋东, 李经委. 基于多信号模型的机载设备综合诊断方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (4): 977-978.
 [4] 石万山, 江政杰. 多信号诊断模型在海军装备中的应用研究 [J]. 舰船电子工程, 2013, (8): 132-134.
 [5] 吕晓明, 黄考利, 连光耀. 基于多信号流图的分层系统测试性建模与分析 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011 (9): 1153-1155.