

防空导弹自动驾驶仪测试性建模研究与应用

邵俊宇, 张宏军, 吴伟, 向超

(上海机电工程研究所, 上海 201109)

摘要: 为了得到防空导弹自动驾驶仪的故障检测与诊断策略, 减少自动驾驶仪的测试费用, 建立了自动驾驶仪的测试性模型并进行分析, 解决了建模的难点; 通过多层抽象混合推理故障建模方法推导了自动驾驶仪结构与测试点之间的关系, 根据测试点的特征和自动驾驶仪工作原理建立信息流模型, 在此基础上, 利用故障与测试间的相关性矩阵来描述测试性模型; 基于此模型设计了诊断策略构建方法; 实际应用表明, 建立测试性模型的方法完全正确, 通过模型能够构建有效的检测与诊断策略, 缩短测试时间。

关键词: 自动驾驶仪; 测试性建模; 相关性矩阵; 测试与诊断策略

Research and Application on Air Defense Missile Autopilot Testability Modeling

Shao Junyu, Zhang Hongjun, Wu wei, Xiang Chao

(Shanghai Eletro-Mechanical Engineering Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to get the fault detecting and diagnostic strategy of the air defense missile autopilot and reduce the cost of autopilot testing, a testability model of autopilot was built and analyzed, and the difficulties to build model were solved. The relationship between system structure and test points was calculated with multiple level abstraction and hybrid reasoning algorithm the information flow model was built according to the test points characteristic and working principle of autopilot. on this basis, the testability model was described by the relativity matrix between failure and test according to the testability model, the diagnostic strategy constructing method was designed. The practical application shows that the modeling approach is exactly correct and the built testability model could construct effective detecting and diagnostic strategy which is able to reduce the time of autopilot testing.

Keywords: autopilot; testability modeling; relativity matrix; detecting and diagnostic strategy

0 引言

随着科技的进步, 防空导弹的性能大大增强, 结构越来越复杂, 对测试设备和测试技术提出了更高的要求。人们在研究和工程实践中日益发现, 仅仅强调测试设备的研发并不能从根本上解决导弹武器复杂的测试问题。要实现高效准确的测试, 必须从导弹设计研制一开始就开展测试性设计。武器装备的测试性设计经历了从基于经验的设计、结构化的设计到基于模型的设计的发展历程。基于模型的测试性设计是目前测试性设计的主流和未来的发展趋势^[1], 由于导弹建模的复杂性, 现在很多型号的测试性设计依然停留在基于经验的阶段。需要有效的建模方法构建测试性模型, 并以此为基础进行测试性设计。

1 测试性建模概述

相关性矩阵是反映各实体间相关性的布尔矩阵, 故障与测试间的相关性矩阵记为:

$$\begin{matrix} & \mathbf{T}_1 & \mathbf{T}_2 & \cdots & \mathbf{T}_n \\ \mathbf{F}_1 & ft_{11} & ft_{12} & \cdots & ft_{1n} \\ \mathbf{F}_2 & ft_{21} & ft_{22} & \cdots & ft_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{F}_m & ft_{m1} & ft_{m2} & \cdots & ft_{mn} \end{matrix} \quad (1)$$

其中: ft_{ij} 为布尔变量, 如果 $ft_{ij} = 1$ 表示测试 t_j 可以检测到故障 f_i ; $ft_{ij} = 0$ 表示测试 t_j 不能检测到故障 f_i 。矩阵第 i 行矢量 $\mathbf{F}_i = [ft_{i1}, ft_{i2}, \dots, ft_{in}]$ 描述了故障 f_i 发生时全部测试的输出结果, 可视为故障 f_i 的故障征兆; 第 j 列矢量 $\mathbf{T}_j = [ft_{1j}, ft_{2j}, \dots, ft_{mj}]^T$ 描述了测试 t_j 可以检测到的所有故障, 可反映 t_j 的故障检测能力。当系统中较复杂时, 直接得到系统的相关性矩阵是很困难的, 可以通过信息流模型来得到。

信息流模型的基本元素是“测试”和“故障隔离结论”。信息流模型中测试和故障之间的相关关系是用有向图表示的, 节点之间的有向图线段描述了节点间的关系。如果存在由 f_i 直接指向 t_j 的有向线段, 那么 f_i 可以被 t_j 检测到。如果存在 f_i 到 f_j 的有向通路, 那么 f_i 的故障可以传播到 f_j 。建立信息流模型之后, 分析图中每个故障节点沿传播路径所能达到的测试节点, 从而得到相关性矩阵。

2 典型防空导弹自动驾驶仪概述

防空导弹自动驾驶仪主要由惯性测量装置、弹上计算机、舵系统以及供电电源组成^[2]。

在导弹飞行过程中, 自动驾驶仪各部分的功能:

1) 电源模块为其他部件提供所需的电源;

收稿日期: 2014-09-18; 修回日期: 2014-10-28。

作者简介: 邵俊宇(1990-), 男, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事导弹故障诊断方向的研究。

张宏军(1976-), 男, 黑龙江佳木斯人, 研究员, 硕士研究生导师, 主要从事测试系统总体设计、故障诊断等方向的研究。

2) 惯性测量装置测量 3 个轴的角速度和 3 个轴向加速度, 通过弹上总线将测试结果发送给弹上计算机;

3) 弹上计算机是系统的通信和控制中心, 一方面负责数据通讯, 另一方面根据惯测输出信息实时计算出导弹姿态角偏差, 通过弹上计算机发出舵控制指令;

4) 舵系统接收到弹上计算机的控制指令, 进行判读和解码, 然后驱动 4 个舵机;

5) 舵机驱动舵面实现导弹姿态控制。

3 自动驾驶仪测试性建模

3.1 自动驾驶仪测试性建模分析

虽然测试性建模的文献很多, 但是研究防空导弹自动驾驶仪测试性建模的文章很少, 测试性模型在导弹中也很少使用, 这是由于:

1) 自动驾驶仪中存在弹上计算机, 现有的测试性建模理论偏向于研究硬件电路而很少研究可编程器件中的软件。

2) 自动驾驶仪存在多种工作模式, 在不同模式下输入不同, 输出也会不同, 造成部分 SRU 有多种不同的故障模式;

3) 根据工作模式的不同, 自动驾驶仪存在多种故障检测方法, 测试点在不同的检测方法下, 检测到的故障信息可能不同。

针对以上难点, 在自动驾驶仪测试性建模中采用以下解决方法:

1) 对于弹上计算机的测试, 不仅关注弹上机是否正常, 还很关注弹上机的 3 个通道的程序是否正确, 需考虑“滚动回路程序”、“俯仰回路程序”、“偏航回路程序”3 个故障源, 由于弹上程序对测试人员不可见, 所以需要通过舵反馈来检测。弹上机划分为如图 1 的四个部分。在图 4 所示的信息流模型中有所体现。

2) 在不同工作模式下, SRU 根据故障模式的不同, 划分为几个不同的子故障模式。如舵系统中的四舵有 3 个子故障源: 在滚动回路测试时的“滚动回路错误”、在俯仰回路测试时的“俯仰回路错误”以及舵电压反馈测试时的“电压反馈错误”。以便区分不同工作模式下的故障。

3) 在不同的故障检测方法下, 根据检测的故障信息不同, 把测试点划分为几个不同的“可用测试”。如四舵检测测试点划分为 3 个可用测试: “四舵滚动回路检测”、“四舵俯仰回路检测”以及“四舵电压指令反馈检测”。以便区分不同的检测方法。

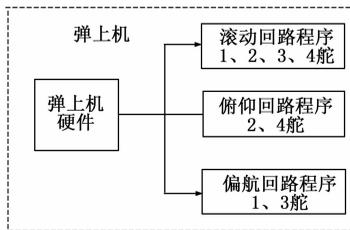


图 1 弹上计算机硬件与回路划分

3.2 基于多层抽象混合推理故障模型建立测试点

在建立模型之前, 必须明确系统中各 SRU、故障传播、故障模式和测试之间的关系。首先必须建立系统的测试点。在导弹系统结构模型的基础上, 对 LRU 内外部测试点之间及它们与 SRU 的关系进行进一步的分析, 对结构层、故障层、征

兆层和测点层进行静态抽象, 同时通过结构知识、测试知识和排故知识进行动态描述, 构建多层抽象混合推理的智能诊断模型^[5], 如图 2 所示。

1) 结构层和故障层之间是用领域深知识联系起来。当测试设备的参数代码超出了正常的门限值, 即认为是发生了故障, 激活诊断系统。

2) 在大量采用串联通路测试时, 可能会出现不同故障原因导致相同故障征兆的情况, 因此故障层和征兆层之间是用领域专家的启发式排故知识联系起来, 推理出各种可能导致故障征兆的 LRU、SRU 信息。

3) 征兆层与测点层则是根据已有的测试信息对嫌疑 LRU、SRU 进行排查, 如果测试信息不完备, 则根据测试知识给出需要补充测试的项目。

4) 测点层与结构层又密切相关。因为机内测试点或者外部测试点是对应于导弹的系统结构模型, 测试点是由导弹的设计特性提供, 在导弹初期的方案设计阶段进行预埋。

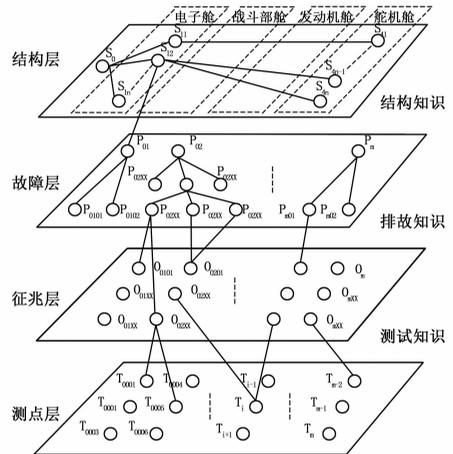


图 2 多层抽象混合推理故障模型

根据多层抽象混合推理故障模型的层层分析, 建立导弹自动驾驶仪的测试点, 如图 3 所示。测点层主要有外部测试点和机内测试点组成。外部测试点来源于外部激励信号源和导弹对外电气接口(发控口、测试口和舵机供电口), 机内测试点是通过弹上计算机获取内埋接口的测试点信息。

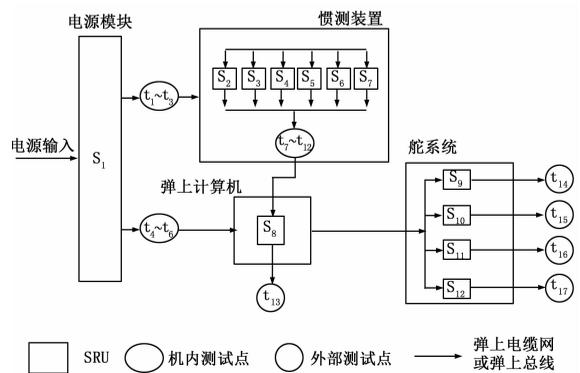


图 3 典型防空导弹自动驾驶仪测试点示意图

3.3 基于信息流模型的自动驾驶仪测试性建模

根据测试点的信息和自动驾驶仪的故障模式建立信息流模型。建立信息流模型时, 必须十分明确故障与故障间、故障与测试间的关系。

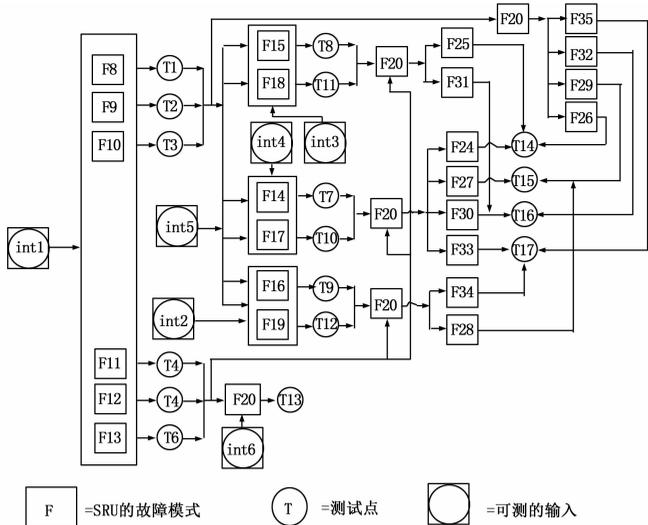


图 4 自动驾驶仪信息流模型

建立的信息流模型如图 4 所示，采用有向图表示测试和故障结论之间的相关关系，图中节点为测试和故障隔离结论，有向边为信息流动的方向。表 1、表 2 是信息流模型中故障模式和测试点的信息。

表 1 和表 2 中，F 表示故障，int 表示可测试的输入，T 表示测试点。根据信息流模型，应用可达性分析方法^[4]，分析图中每个故障节点沿传播路径所能达到的测试节点，得到自动驾驶仪的故障与测试间的相关性矩阵。相关性矩阵如表 3 所示。

表 1 某型防空导弹故障模式信息表

编号	故障源	故障模式编号	故障模式
int1	一次电源	F1	一次电源故障
.....			
M1	电源模块	F8	电压故障 1
		
		F13	电压故障 6
.....			
M12	4 舵	F30	4 舵滚动回路错误
		F31	4 舵俯仰回路错误
		F32	4 舵电压反馈错误

表 2 某型防空导弹系统测试信息表

测试点	测试点名称编号	可用测试	
int1	一次电源输 t1	一次电源检测	
.....			
T1	电压检测 1t8	电压检测 1	
.....			
T17	4 舵检测	t30	4 舵滚动回路检测
		t31	4 舵俯仰回路检测
		t32	4 舵电压反馈检测

其中，int1 至 int7 由仪器面板直接显示，且保证了 100% 的可靠性。

4 基于仿真模型的测试性验证

为了验证测试性建模的正确性，在自动驾驶仪仿真模型的基础上构建自动驾驶仪测试性验证仿真模型，如图 5 所示，并

表 3 自动驾驶仪故障与测试间相关性矩阵

	t1	...	t20	t21	t22	t23	...	t31	t32
F1	1	...	0	0	0	0	...	0	0
F2	0	...	0	0	0	0	...	0	0
...
F9	0	...	0	1	1	0	...	1	0
F10	0	...	0	1	1	0	...	1	0
F11	0	...	1	1	1	1	...	1	1
F12	0	...	1	1	1	1	...	1	1
...
F31	0	...	0	0	0	0	...	1	0
F32	0	...	0	0	0	0	...	0	1

进行故障注入。故障注入分为单故障注入和多故障注入，在故障注入后观察各测试点检测到的故障是否与相关性矩阵一致，以此验证推导出的相关性矩阵是否正确。在某型号已成功应用的自动驾驶仪模型的基础上构建测试性仿真模型，提高了模型的准确性，并大大减少了故障注入和测试性验证的时间和费用。最终得出，推导出的相关性矩阵完全正确。

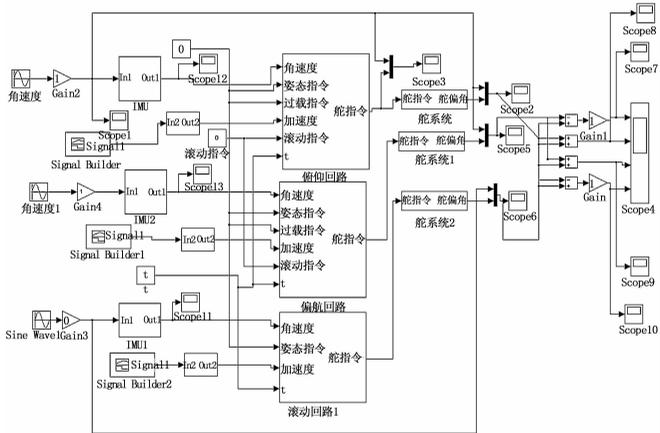


图 5 自动驾驶仪测试性验证模型

5 模型应用

以上的测试性建模已应用于某十二五重点课题中。驾驶仪测试较复杂，多个测试点关联多个 SRU。为了测试和诊断的快速性，课题提出了“一次测试，二次诊断”的方法，并在测试性模型的基础上采用基于 TestStand 的自动测试软件设计方案^[5]设计了一种测试序列动态管理机制。

一次测试时，以检测出故障所用的时间最短为优化目标，采用遗传算法对表 3 中的相关性矩阵进行优化，构建最优的测试序列。

建立染色体为：

$$X = [x_1, x_2, \dots, x_n], \quad x_1, x_2, \dots, x_n \in \{0, 1\} \quad (2)$$

式中， n 表示可用测试总个数。编码 $x_i = 1$ 表示选择可用测试 t_i ，否则表示不选择该测试点。

设可用测试的费用矩阵为：

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n], \quad c_1, c_2, \dots, c_n > 0 \quad (3)$$

c_i 表示可用测试 t_i 的费用，这里的费用需要综合考虑可靠性和故障率的影响。可计算选择的测试点的总费用 $Cost$ 为：

$$Cost = X \times C^T \quad (4)$$

$$\theta_{\text{停射滞后角}} = \tau_{\text{时延}} \times \omega_{\text{调转角速度}} \quad (1)$$

通常跟踪目标过程中，导弹发射装置运动角速度最大不会超过 300 mrad/s，通过计算得知最大的停射滞后角。

$$\theta_{\text{max}} = \tau \times \omega = 62.5 \text{ ms} \times 300 \text{ mrad/s} \approx 1.07^\circ \quad (2)$$

据此设计该型号武器系统的禁射曲线，即将禁射范围稍微缩小，每条线边约预留出 1.07° 的空隙余量，其三维视图展示如图 7 所示，其中图 7 (a) 为总体给定的轮廓线，图 7 (b) 为烧写入禁射模块的禁射曲线，其中着色部分为发射装置运动半球中禁止发射的部分，明显看出完善以后可发射区域减小。

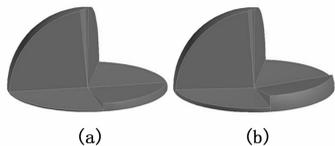


图 7 安全射界三维视图

完成了软硬件设计以及测量时延引起的误差修正之后，借助武器系统控制计算机对禁射曲线进行扫描，速度选取 300 mrad/s，结果如表 2 所示。

参数修正之后，测量结果与实际系统高度吻合，满足系统工作与发射的要求，参数余量解决了发射角滞后现象，确保发射过程中设备与人员的安全。

表 2 修正后 300 mrad/s 安全射界测试结果

项目	第一次	第二次	第三次
方位 150°禁射角	84.98°	84.97°	84.98°
方位 75°禁射角	0.89°	0.88°	0.88°
方位 0°禁射角	8.47°	8.42°	8.45°
方位 -75°禁射角	0.96°	0.90°	0.91°
方位 -150°禁射角	84.98°	84.98°	84.96°

5 结论

本文在分析了舰载武器系统安全射界必要性与重要性的基础上，阐述了安全射界装置的组成，对模块装置的软硬件进行了设计，以某型号舰载武器系统为例，分析了停射滞后现象对安全射界轮廓曲线乃至发射装置安全性的影响，最后计算提前角并确定禁射曲线应当的预留空隙值。安全射界的设计有益于武器系统火力分配关系，是完成作战使命任务的必要条件。本文所述的安全射界模块设计方法对舰载武器系统相关模块的开发有借鉴性乃至指导的作用。

参考文献:

- [1] 李进军, 汪德虎. 舰载武器体系结构发展研究 [J]. 舰船科学技术, 2002, 24 (3): 27-29.
- [2] 刁端信. 舰炮停射提前角在舰船设计中的应用研究 [J]. 船舶, 2012, 23 (1): 26-28.
- [3] 杨军荣, 杨国来, 陈运生. 某车载自动迫击炮的炮口动态仿真 [J]. 南京理工大学学报, 2005, 29 (6): 648-652.
- [4] 刘方, 邱志明, 马溢清, 等. 多类型舰载武器共架发射弹位选择策略 [J]. 舰船科学技术, 2011, 33 (5): 87-90.
- [5] 邱宗辉. 战术级地形分析 OCOKA 模型的建立与系统设计 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2010.
- [6] 王晓霞, 夏立, 王向军, 等. 一种舰船水下电场信号采集与分析软件设计与实现 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (9): 3068-3070.
- [7] 陈双龙. 以太网在舰载武器系统中的应用 [J]. 舰船科学技术, 2005, 27 (2): 50-55.
- [8] 朱利锋, 鲍其莲, 张炎华, 等. 舰载炮的射击误差分析及消除方法 [J]. 中国造船, 2006, 47 (3): 70-76.
- [9] 万自明, 孙星, 唐毓燕. 防空导弹武器系统的信息处理与通信延迟建模 [J]. 现代防御技术, 2004, 32 (4): 54-57.

6 结论

针对部分导弹型号测试性设计依靠经验，缺乏理论依据的情况，详细介绍了导弹自动驾驶仪测试性建模的过程，突破驾驶仪测试性建模的难点，最终建立了测试性模型，并提出基于仿真模型的测试性验证方法，验证其正确性。基于模型构建了最优的测试序列和动态的诊断序列。在实际使用中，故障测试检测率和故障隔离率都有所提高，同时使得自动驾驶仪的测试和诊断时间大大缩短。

参考文献:

- [1] 邱静, 刘冠军, 等. 装备测试性建模与设计技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [2] 李岩, 杨洪柱. 防空导弹测试技术与遥测系统应用设计 [M]. 北京: 中国宇航出版社, 1995.
- [3] 蒋东翔, 黄文虎. 多层抽象混合推理的智能诊断模型 [J]. 振动工程学报, 1996, 9 (4): 353-357.
- [4] 许辉, 梁力. 基于多信号模型的测试性分析方法研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (4): 914-916, 920.
- [5] 吴伟, 张宏军, 刘康, 等. 基于 TestStand 的自动测试系统软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2014, 22 (7): 2321-2323.

(上接第 1594 页)

选择测试点的约束条件是覆盖所有故障，优化目标是总费用最小，数学模型为：

$$\begin{cases} \min Cost \\ s. t. \prod \mathbf{F}T \times \mathbf{X}^T > 0 \end{cases} \quad (5)$$

使用遗传算法求取最优的测试点，遗传算法的框图如图 6 所示。

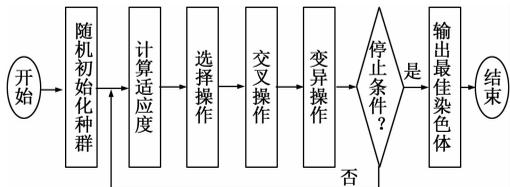


图 6 遗传算法运算框图

通过遗传算法可构建最优的测试序列。

使用最优的测试序列进行测试，测试结果异常时，可以直接激发故障诊断程序，根据测试性模型与测试获得的知识，排除不可能发生的故障，动态生成诊断测试子序列，TeatStand 引擎将其加载执行，获得足够的测试信息后决策诊断故障部位，提高了测试与诊断的效率。