

doi: 10.7690/bgzdh.2014.04.015

# 一种基于多信号流图的雷达系统测试性建模分析方法

欧爱辉

(中航工业雷达与电子设备研究院第一研究部, 无锡 214063)

**摘要:** 为了在产品的设计早期获得检测率、隔离率等测试性数据, 提出一种应用多信号流图模型方法进行系统测试性建模与分析的方法。基于雷达等电子产品结构复杂、解析建模困难的特点, 分析了雷达系统的功能结构、工作模式及 FMEA 结果, 并以某雷达系统为例建立系统的多信号流图, 利用 TEAMS 软件提供的工具, 对系统的测试性水平进行了分析和评估。实例分析结果表明: 改进的雷达系统的测试性设计能够满足指标要求, 多信号流图建模分析方法对于测试性分析和评估行之有效。

**关键词:** 多信号流图; 故障模式及影响分析; 故障检测率; 故障隔离率

**中图分类号:** TP391.9 **文献标志码:** A

## An Modeling and Analysis Method of Testability for Radar System Based on Multi-Signal Flow Graphs

Ou Aihui

(No. Research Department, Radar &amp; Avionics Institute of China Aviation Industry, Wuxi 214063, China)

**Abstract:** In order to obtain fault detection rate and fault isolation rate at early design phase of electronic product, an approach to model and analyze system testability based on multi-signal flow graphs is proposed. Based on the complicated structure and the characters of analytical model of the radar system, the function and operation modes and FMEA results are analyzed. And then the multi-signal model of the radar system is established based on the tools of TEAMS. Then, the testability level and fault diagnose capability are evaluated. Results show that the improved design for testability of the radar system can serve for the requirements. The multi-signal flow graphs modeling method is effective in the analyzing and evaluating for testability.

**Keywords:** multi-signal flow graphs; failure mode and influence analysis; fault detection rate; fault isolation rate

### 0 引言

当前, 武器装备系统故障检测能力差, 严重影响了部队飞行器出勤率和备件储备成本, 使得后勤保障成为作战部队效率提升的短板; 因此, 提高测试性水平成为武器装备系统的迫切要求。但是, 武器装备系统结构功能复杂, 如何在产品的设计早期获得检测率、隔离率等测试性数据, 分析评估测试性设计的不足, 从而进行改进和提高, 对产品的故障检测乃至后期的维修保障具有重要意义<sup>[1-2]</sup>。

笔者对多信号流图模型的定义及建模方法进行了描述, 并在 TEAMS 软件工具中以某雷达系统为例, 进行了多信号流图的建模和分析, 结果证明多信号流图建模方法对于产品测试性建模及评估是可行、有效的。

### 1 多信号流图模型概念及定义

多信号流图模型法是一种分层建模方法。利用分层有向图表示被测对象的组成单元、测试以及被测对象性能特征之间的相关关系, 可方便看出故障

传播途径及故障模式对其他组成单元的影响<sup>[3]</sup>。

多信号流图模型 (multi-signal flow graphs model) 由 Somnath Deb 等于 1994 年提出, 并由美国 Qualtech 系统公司 (QSI) 引入到其测试性工程和维修系统软件 (TEAMS) 方案中<sup>[4]</sup>。TEAMS 提供了直观方便的图形化建模环境, 使建模更加简单; 通过分析系统的测试性设计, 其存在的缺点及相应的建议都可直接标注在模型中或报告中。

根据多信号流图模型的定义<sup>[5]</sup>, 基于简便易用原则, 构建了适合雷达系统的多信号流图模型, 定义如下:

1) 根据分析的层次需要, 建立层次化有限的系统构成元件集  $C = \{C_1, C_2, \dots, C_j, \dots, C_l\}$ ,  $1 \leq j \leq l$ ,  $C$  为整个系统,  $C_j$  一般定义为外场可更换单元 (LRU); 进一步划分,  $C_j = \{c_{j1}, c_{j2}, \dots, c_{jm}\}$ ,  $c_{jm}$  一般定义为内场可更换单元 (SRU), 根据分析需要, 可再进一步划分模块和子模块等。

2) 每个元件 I/O 端口信号集, 输入端口  $V_j = \{v_{j1}, v_{j2}, \dots, v_{jk}\}$ , 输出端口  $V'_j = \{v'_{j1}, v'_{j2}, \dots, v'_{jk}\}$ 。

3) 建立模型元件的故障模式集:  $F(c_{jm}) =$

收稿日期: 2013-12-17; 修回日期: 2014-01-14

作者简介: 欧爱辉(1977—), 女, 湖南人, 工学硕士, 高级工程师, 从事可靠性、测试性、故障诊断研究。

$\{M_{jm}, F_{jm}, A_{jm}\}$ ,  $M_{jm}$  为对应元件的故障模式, 应根据故障模式及影响分析 (failure modes and effect analysis, FMEA) 的结果建立;  $F_{jm}$  为故障模式的故障率,  $A_{jm}$  为元件的故障现象, 根据观察到的故障现象建立相应诊断树, 有利于故障的定位。

4) 建立测试点集:  $TP = \{tp_1, tp_2, \dots, tp_p\}$ ; 测试点为系统设计的 BIT 测试点、专门的 ATE 测试口或人工测试点等。

5) 建立每个测试点对应的一组测试集:  $SP(TP) = \{sp_1, sp_2, \dots, sp_n\}$ ; 在雷达系统中, 一般定义为在 ATE 口或人工测试点根据设计要求进行的多重测试。

6) 有向图  $DG = \{C, TP, E\}$ , 其中, 有向图的边 E 表示系统的信号流向。

## 2 测试性模型建立

建立测试性模型的步骤如下:

1) 明确系统的分层结构。

一般雷达系统由多个外场可更换单元 (LRU) 组成, 如天线、处理机等; 每个 LRU 又划分为多个内场可更换单元 (SRU), 如天线组件、扫描器、发射机、接收机前端、信号处理板、数据处理板、电源等。每个 SRU 再按照功能划分功能模块, 如天线组件划分为天线阵面、波控机等。分层结构如图 1。

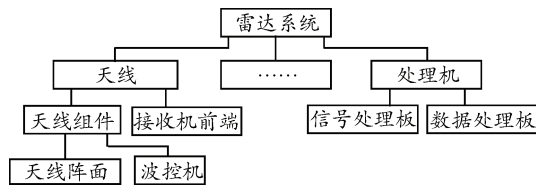


图 1 雷达系统分层结构

2) 明确每一级各功能单元的输入、输出端口信号, 并建立对应的信号流关系。

由于雷达内部各组成部分的信号输入和输出端口很多, 建模时可适当简化, 以能够表明各部分间

的信号流向关系为宜。以天线组件为例, 接口关系如表 1。

表 1 天线组件对外接口关系

序号	端口方向	名称	连接的单元	连接的端口
1		##发射信号	发射机	##发射信号
2		#发射信号	发射机	#发射信号
3	输入	波控机 422	处理机	波控机接收控制 422
4		##校准信号	处理机	##校准信号
5		#校准信号	处理机	#校准信号
6		电源输入	处理机	电源输入
7	输出	##和路信号	##接收机前端	##和路回波信号
8		##差路信号	##接收机前端	##差路回波信号
9		#和路信号	#接收机前端	#回波
10		波控机 422	处理机	波控机返回 422

3) 获得故障模式及故障率信息。

对系统进行故障模式及影响分析, 得到较全面的系统故障模式, 并通过预计获得各故障模式的故障率信息。天线组件的故障模式信息如表 2 所示。

表 2 天线组件故障模式及故障率信息

Module	故障模式 FM	故障模式故障率 $\lambda_{fm}(10^{-6})$
天线阵面	天线不辐射和接收微波	26.68
	##移相器故障	120.00
	##功分网络故障	
	##波段环形器损坏	
波控机	波控板 422 通讯异常	83.43
	波控 Flash 异常	
	波控 SCI 通讯异常	
	波控 CPLD 失效	
...		

4) 测试信息收集。

模型中测试点的建立依据设计系统时考虑的可行和有效的测试点布局。根据测试性指标对不同维修级别的要求, 还需将测试点进行分类: BIT 检测或人工检测或 ATE 检测等。定义每个测试所能检测的故障模式, 每个测试点可设置不同的测试<sup>[6]</sup>, 如表 3 所示。

5) 建立模型。

获得以上信息后, 应用 TEAMS 软件<sup>[7]</sup>, 建立有向图, 添加测试点及测试, 添加故障模式的故障率信息等。

表 3 测试信息收集

序号	模块名称	测试点	测试	级别	故障模式
1	天线阵面	移相器	移相器故障个数	BIT	##移相器故障
2		PG 信号检测	电压检测	BIT	总输出不正常
3	电源		+5 V 电压检测	ATE	转换电压不正常
4		ATE 口	+15 V 电压检测	ATE	转换电压不正常
5	扫描器	旋转变压器	测量转动波形	人工检测	天线转动不正常
...	...	...	...	...	...

## 3 测试性模型分析

笔者以某雷达系统为例建立测试性模型, 并进行分析。根据雷达各组成部分实际信号流向及前述

信息建立有向图, 本模型采取 4 层结构 LRU—SRU—功能模块—故障模式进行建模。如图 2 所示, 矩形为各元件, 可层层深入, 圆形为加入的测试点。图 2(a)为雷达系统多信号流图模型, 表示系统由 2

个 LRU 组成；图 2(b)为图 2(a)中 LRU2 的多信号流图模型，LRU2 由 5 个 SRU 组成。该雷达使用了 2 个频段分时完成不同工作，所以建立了雷达的 2 种工作模式，并且利用软件中的开关节点 (SWITCH node) 表示在不同工作模式下的接收通路，使得模型

更加接近雷达实际工作情况。图 2(c)为图 2(b)中 SRU2 的多信号流图模型 (模块级)，包含 2 个功能模块；图 2(d)为天线组件的故障模式多信号流图模型，此时矩形为故障模式，根据 FMEA 分析结果，该模块有 9 个故障模式。

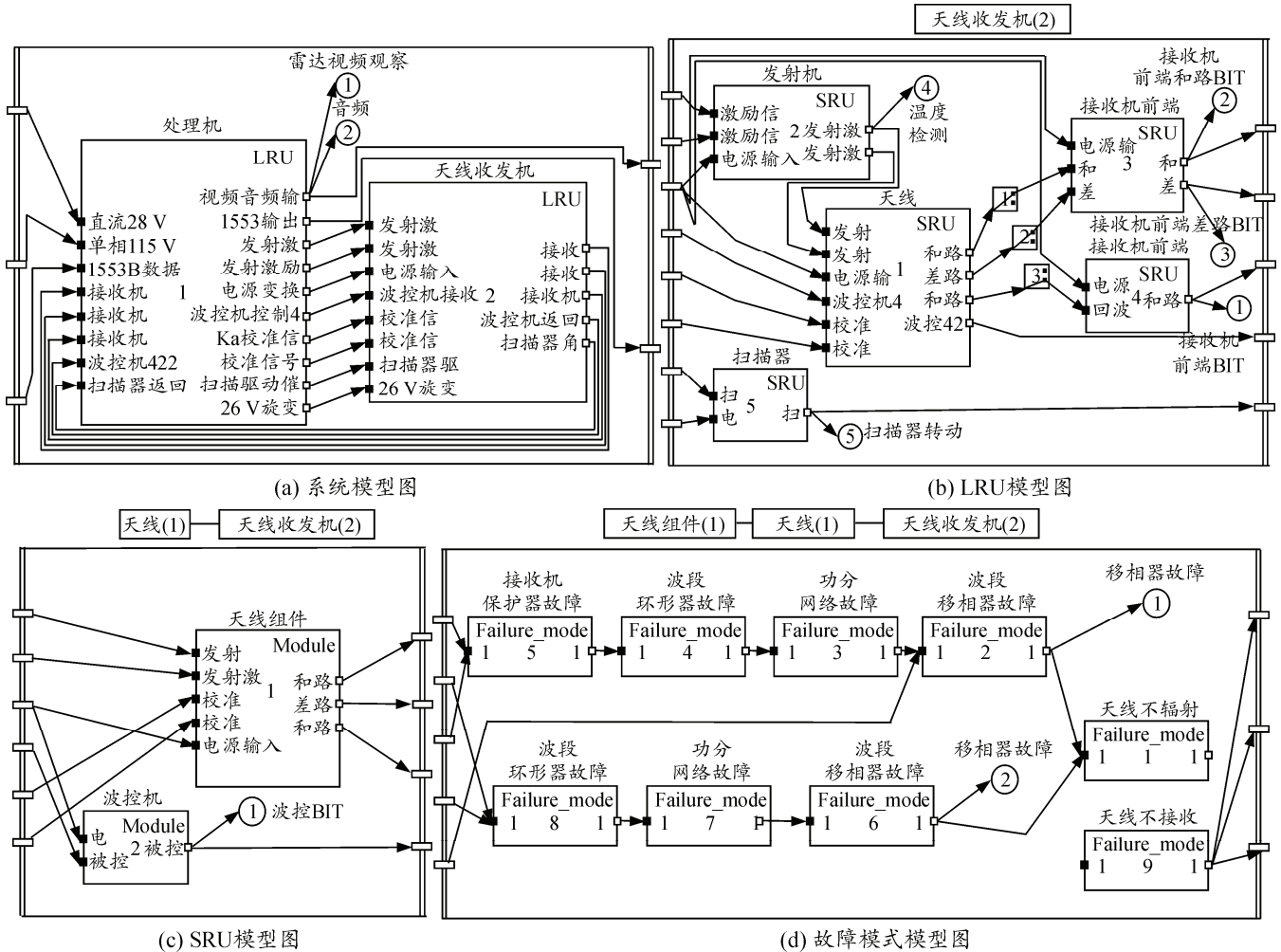


图 2 某雷达 4 层测试性模型示意图

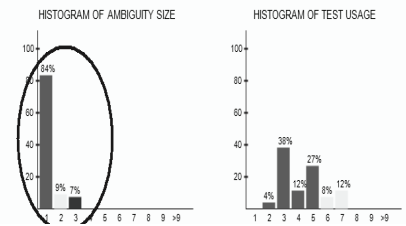
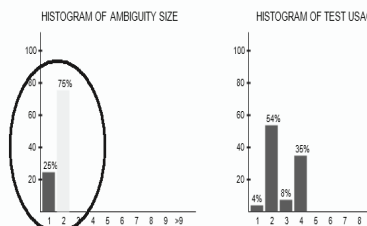
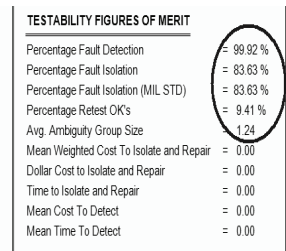
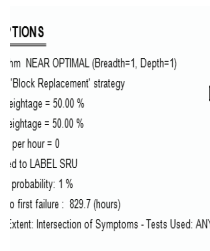
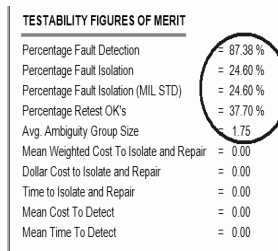
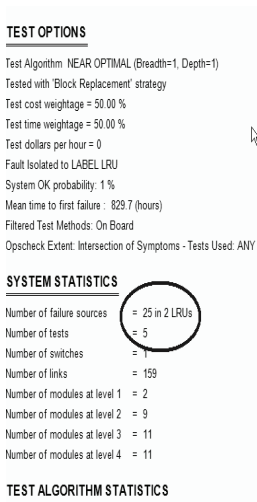


图 3 模型完善前测试性结果图 (LRU 级)

图 4 模型完善前测试性结果图 (SRU 级)

给出的测试性分析报告如图 3、图 4 所示，表示模型中共分析 25 个故障模式(左中部圈出)时，分别为 LRU 级别和 SRU 级别的测试性分析结果，图中右上部分表示检测率、隔离率等信息，下部柱状图为隔离到的模糊组。从数据可知检测率不高，而隔离率更是不可接受，测试性分析得出的结果未达到指标要求，说明系统分析不全面或测试点设置得不完善，需要继续改进。

从其他的结果报告中还能了解到每个 SRU 的检测率和隔离率的详细信息，获得具体哪个故障模式未被检测和隔离，为后期的改进设计提供很大帮助。图 5 为 SRU 级检测率和隔离率的详细信息，0 为未隔离到的模块。

Module FD/FI Statistics for: [redacted]

2013-08-11 07:54:01Z

Module	FD	FI
1 接收射频伺服驱动放 [1]-处理机 [1]	0.64968	0.64968
2 信号处理板 [2]-处理机 [1]	0	0
3 数据处理板 [3]-处理机 [1]	0.166667	0.166667
4 电源 [4]-处理机 [1]	1	1
5 天线 [1]-天线收发机 [2]	0.89973	0.89973
6 发射机 [2]-天线收发机 [2]	1	1
7 接收机前端 [3]-天线收发机 [2]	1	1
8 接收机前端 [4]-天线收发机 [2]	1	1
9 扫描器 [5]-天线收发机 [2]	0	0

TEAMS®-Designer 12.0.5, Copyright (c) Qualtech Systems, Inc.

图 5 SRU 级的检测率和隔离率信息

级达到 100%，SRU 级达到 97%以上，达到该雷达系统测试性指标要求。

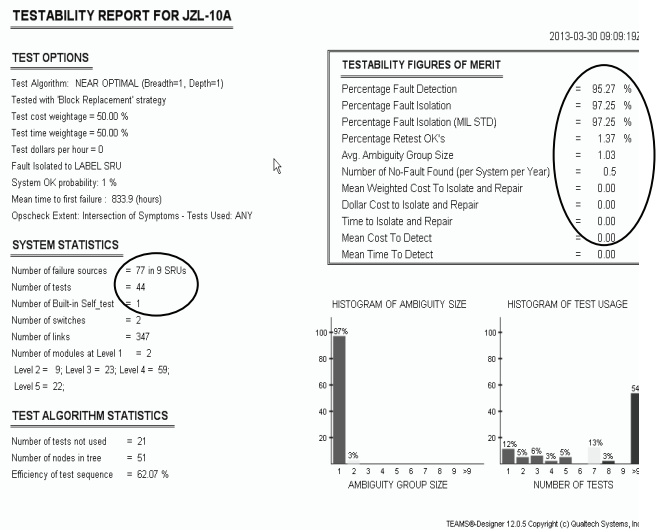


图 7 模型完善后 SRU 级检测率和隔离率结果

TEAMS 软件还可以给出基于近优算法的诊断树如图 8 所示，通过设定测试点的优先级，并权衡比较雷达系统中各检测通路实现的难易程度和效率后，构造适合本雷达系统的故障诊断隔离流程图，如图 9 所示。

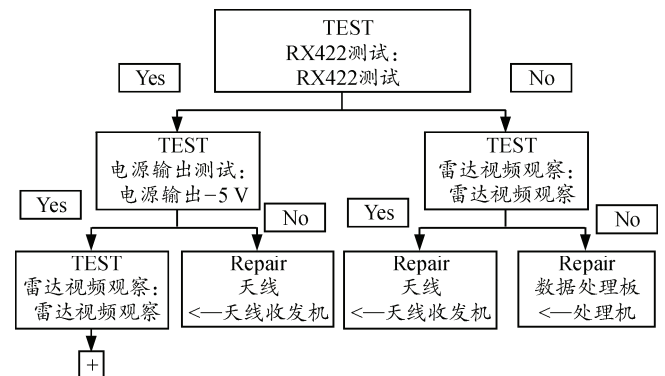


图 8 软件给出诊断树

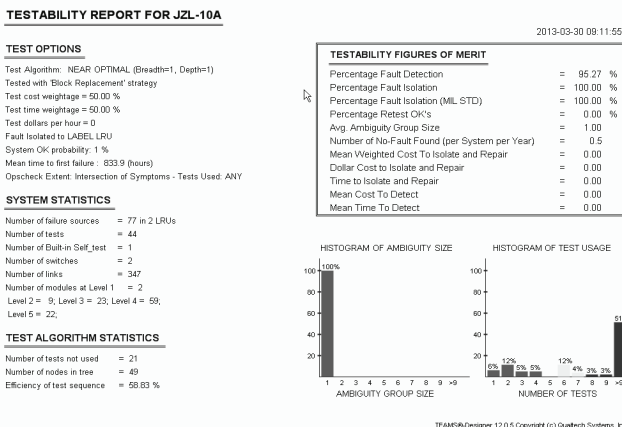


图 6 模型完善后 LRU 级检测率和隔离率结果

通过对雷达系统故障模式的补充分析及测试点的完善设计后，对多信号流图模型进行相应补充和完善，对故障模式的分析从 25 个增长到 77 个，对测试点的布局进行了完善设计，对不能断开的反馈环路，考虑从软件方面或测试方法上加以改进。改进后的多信号流图模型分析结果，如图 6、图 7 所示。故障检测率达到 95%以上，故障隔离率 LRU

### 4 结论

复杂电子产品的测试性与后期的维修性和保障性密切相关，测试性设计是否优良直接影响产品的综合性能。笔者对多信号流图概念进行解析，对建立多信号流图模型的步骤进行了分解，并以某雷达系统为例建立其多信号流图模型，对其测试性进行了分析和改进，最终得到了满足指标要求的量化报告结果及合理可行的诊断序列。结果表明：基于多信号流图模型的测试性建模和分析方法，能够在产品的设计初期或样件阶段快速并准确地提供各项测试性相关数据，满足评估测试性水平的需要，并为产品设计故障隔离算法提供有用参考。



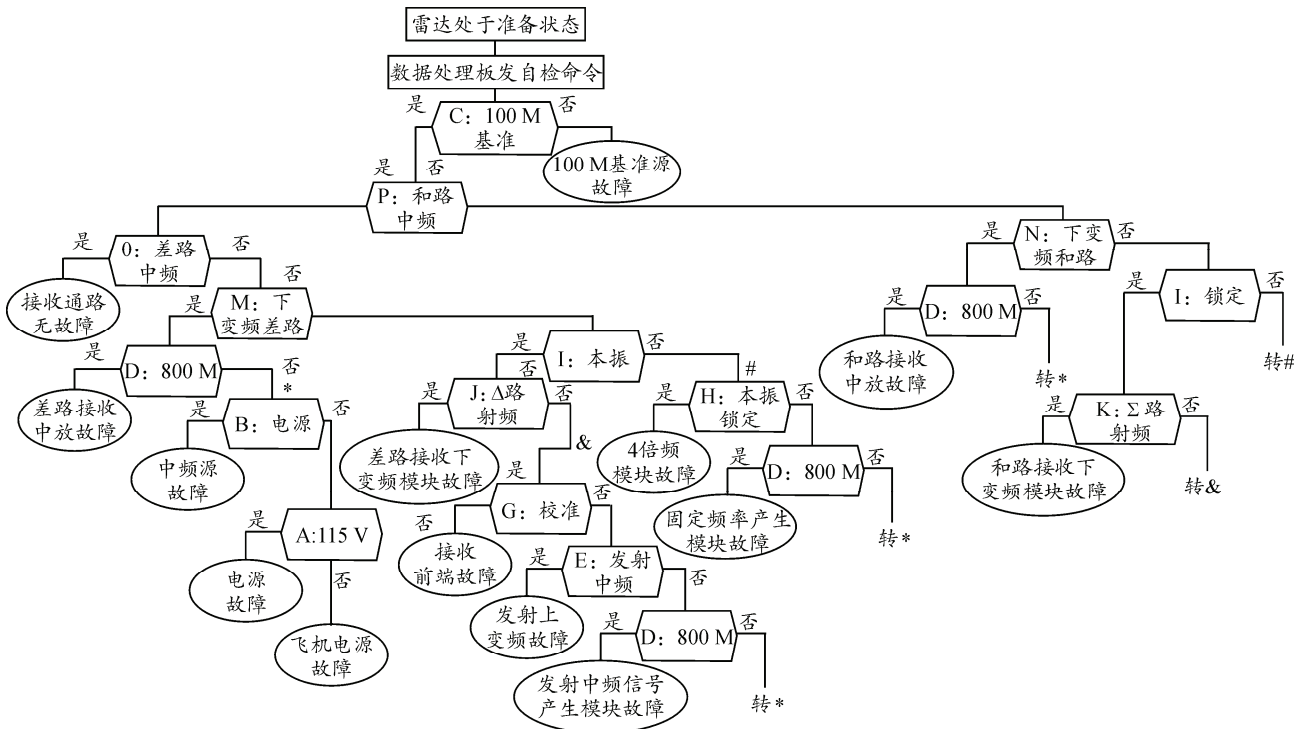


图 9 某雷达系统的诊断隔离流程

参考文献:

[1] 田仲, 石君友. 系统测试性设计分析与验证[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003: 17-22.

[2] 杨啸天, 冯金富, 钟麟. 不确定信息下雷达系统效能评估方法[J]. 兵工自动化, 2012, 31(9): 40-43.

[3] Deb S, Pattipati K R, Raghavan V, et al. Multisignal flow graphs: a novel approach for system testability analysis and fault diagnosis[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon 1994. New York: IEEE Press, 1994: 361-373.

[4] Deb S, Pattipati K R, Shrestha R. QSI's integrated

diagnostic toolset[C]//Proceedings of IEEE Autotestcon, 1997. New York: IEEE Press, 1997: 361-373.

[5] Deb S, Ghoshal S, Mathur A, et al. Multisignal modeling for diagnosis, FMECA and reliability[C]//Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. New York: IEEE Press, 1998: 3026-3031.

[6] 柏航, 冯继伟, 陈俊强, 等. 雷达状态检测数据非均匀稀化方法[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 49-51.

[7] Qualtech System. Teams user guide[EB]. <http://www.teamsQSI.com>, 2003.

\*\*\*\*\*  
(上接第 55 页)

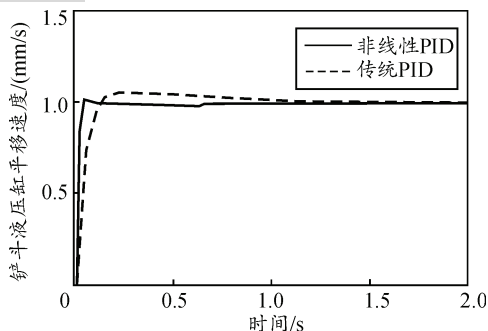


图 4 采用 PID 控制器与非线性 PID 控制器单位阶跃响应仿真结果表明: 使用基于传统 PID 控制器参数的非线性 PID 控制器函数相对于传统 PID 超调量减小了 5%, 上升时间降低 0.1 s, 达到设计指标要求。

5 结束语

笔者针对挖掘机反铲铲斗电液比例位置控制系统阶跃响应实验得到的数据, 对挖掘机铲斗电液比

例位置开环控制系统广义被控对象进行建模分析, 并分别对采用传统 PID 控制器与非线性 PID 控制器的电液比例位置控制进行系统仿真。仿真结果表明: 采用非线性 PID 控制器可以改善传统 PID 控制器超调大、速度慢等特点, 可以满足系统设计要求。

参考文献:

[1] 邵力平. 液压挖掘机机器人伺服控制系统研究[D]. 硕士学位论文, 浙江: 浙江大学, 2004: 9-10.

[2] 张春华, 唐迎佳, 杨帆, 等. 基于时间基准的挖掘机器人轨迹规划方法[J]. 兵工自动化, 2013, 32(9): 80-83.

[3] 郭正玉, 梁晓庚. 弹道修正弹模糊自适应 PID 控制器设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(4): 104-106.

[4] 张凌云. 非线性调节技术在大滞后系统中的应用[J]. 广角, 2005(4): 65-66.

[5] 张向南, 周丽娟, 李全俊. 模糊自适应 PID 在气液增力缸压力控制中的应用[J]. 兵工自动化, 2013, 32(8): 71-74.