

·结构与工艺·

基于PHM的机载模块BIT设计及故障诊断系统构建

胡亮,张尧

(中国电子科技集团公司光电研究院,天津 300308)

摘要 通过深入研究PHM技术的概念和内涵,分析了构建机载模块BIT设计及故障诊断系统的基本条件,提出了在现有机载模块和地面故障检测系统的基础上,构建机载模块BIT设计及故障诊断系统的具体构架。通过分析总结,从建模的角度提出基于PHM的故障预测模型设计的思路,结合机载模块BIT设计及故障诊断的方法及流程,为机载模块及的在线测试、产品测试性和维修性工作提供理论支持。

关键词 预测与健康管理;故障诊断;故障预测模型;机载模块

中图分类号:TN207

文献标识码:A

文章编号:1673-1255(2018)-02-0073-06

Airborne Module BIT Design and Fault Diagnosis System Construction Based on PHM

HU Liang, ZHANG Yao

(Academy of Opto-Electronics, China Electronics Technology Group Corporation (AOE CETC), Tianjin 300308, China)

Abstract: Based on the study of the concept and connotation of prognostics and health management (PHM), the basis of the airborne module build in test (BIT) design and the fault diagnosis system is analyzed. Based on the airborne module and the ground fault inspection system, the detailed frame of the airborne module BIT design and the fault diagnosis system is put forward. Through analysis, summary and simulating, the fault prediction model design idea on the basis of PHM is presented. With airborne module BIT design, fault diagnosis method and process, the theoretical support is provided for on line test, production testability and maintainability of the airborne module.

Key words: prognostics and health management (PHM); fault diagnosis; fault prediction model; airborne module

PHM (prognostics and health management) 预测及健康管理技术是利用人工智能技术和现代信息技术的最新研究成果而提出的一种全新的管理健康状态的解决方案^[1]。PHM代表了一种方法的转变,即从传统的基于硬件传感器的诊断转向基于智能系统的预测,反应式的通讯向在准确时间对准确部位进行准确维修的先导式活动。

随着机载设备的系统复杂度和后期维护成本的提升,维修性和测试性对设备的作战能力、生存能力和机动性起到了越来越重要的作用。机载设备的测试性工作已经成为研制过程中的重要一

环。随着计算机技术、人工智能技术等信息技术的高速发展,机载设备的故障预测正在从每个功能电路的状态监控向面向整机所有分系统、部件的预测与健康管理(PHM)方向发展。

目前国内外在新型机载设备研制的初期就要开展BIT(build in test)设计和故障诊断,并且贯穿整个设备研制周期。在功能上,BIT设计和故障诊断已经逐步覆盖到原先ATE(外场检测设备)才具备的故障检测、隔离和定位。使用专用自检电路会增加设备规模,降低设备可靠性,且不具备通用性^[2]。

1 PHM的结构和工作原理

PHM技术的核心是利用先进传感器的集成,借助各种算法和智能模型来预测、监控管理设备的健康状态^[2],是BIT测试和状态监控技术的进一步拓展。

机载设备PHM结构综合了有关组元,分为三个层次。最底层是分布在各个功能电路中的硬件传感器及监控程序;中间层为区域管理器;顶层是机载设备管理器^[3]。最底层作为识别故障的信息源,将有关信息传送给中间层的区域管理器,区域管理器将故障信息汇总、综合并传递至机载设备核心处理单元,将预测结果上报至平台。

中间层和顶层可以完成以下类型的推理:诊断推理—对监控结果结合其他输入进行评估,确定所报故障的原因和影响;预测推理—确定机载设备正向某种已知故障状态发展及相关的潜在影响;异常推理—通过识别原来未预测到的情况,帮助机载设备改进设计^[4]。

采用的PHM分层智能推理机构,在多个层次上采用多种类型的推理机,并利用更多判据查明原因,以便最大限度减少对单个传感器和算法的依赖提高故障隔离的准确性。

2 基于PHM思想的故障预测模型在工程中的应用实例

PHM是一种全新的系统维修和管理理念,通过全面的故障检测、隔离和预测及状态管理来显著提高对复杂系统工作状态的了解。同时,还收集和处理关键部件的性能信息,用于预测其剩余使用寿命。故障预测功能的实现主要依靠模型的设计。针对PHM这一复杂系统,迫切需要开发设计一种通用的预测构架,选择和集成恰当的诊断和预测方法,完善和提高诊断和预测的水平。结合一般复杂系统的结构特点,将PHM技术的概念具体化、实用化,提出基于PHM思想的故障预测模型^[5]。如图1所示。

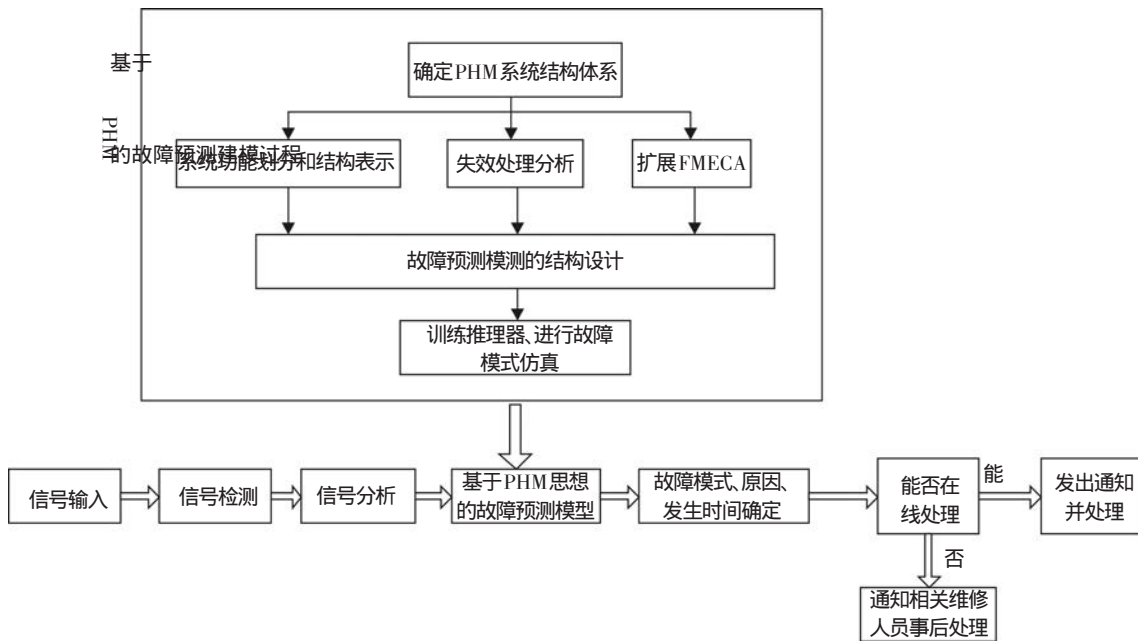


图1 基于PHM思想的故障预测模型

基于PHM的结构和工作原理,以构建机载模块BIT设计和故障诊断系统为例。机载模块BIT设计和故障诊断系统分为三个层次,底层为基础信息层,中层为信息分析、判断交互层,顶层为决策上报层。

基础信息层将基础信息采集后,汇总后的信号由FPGA信息采集系统发送至故障诊断预测推理器

中。数据经过与PHM模型、知识库的多种模型、数据比较。比较后的结果进入综合推进器,综合推进器将当前分析出的健康状况通过内总线上报至核心处理单元,进行最终的健康状况评估和决策。

基于PHM的机载模块BIT设计和故障诊断系统结构,如图2所示。

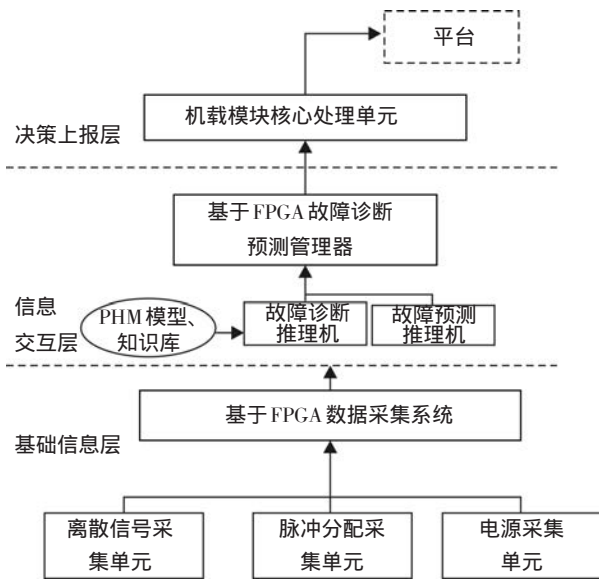


图2 基于PHM的机载模块BIT设计和故障诊断系统结构

2.1 机载模块基础信息层

基础信息层是构建系统的基础,主要采用功能单元中的现有资源,采用FPGA对相关测试点信息进行采集。

(1)离散信号输入单元

每个离散输入信号进入顺序器模块后,分别经过两个通道进行处理,一个通道采用光耦和阻容网络隔离滤波,另一个通道采用专用开关去抖电路。FPGA先检测第一通道输出的信号状态,然后检测第二通道输出的信号状态,进行一致性对比,判断是否存在异常。电路示意图如图3所示。

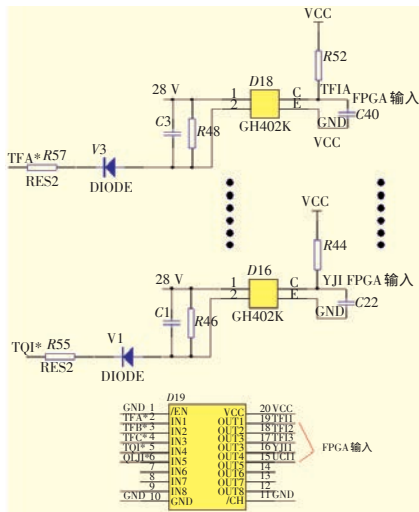


图3 离散信号输入单元

(2)脉冲分配单元

脉冲分配单元利用脉冲分配通路器件、电阻网络和LM139实现,能够进行通道导通检测、电源异常检测和异常控制检测。

通路检测:模块上电后或在上级模块要求的状态下,由FPGA输出KZ1、KZ2到电源驱动电路将电源开关置于关断状态,然后按照将固定的顺序输出A、B、C、D、CS1~CS8、EN1~EN8驱动各种组合状态,通过检测信号JJ1~JJ4、JS1进行逻辑分析,判断通路是否能正常导通,将分析结果存入相应的自检寄存器供上级模块。

电源异常检测:在电源控制模块进行控制时,FPGA实时检测LM139输出的JJS1~JJS4信号,判断机载模块能否正常控制,如检测到异常,FPGA将异常状态上报上级模块,同时存入异常状态寄存器供上级模块查询。

异常控制检测:在机载模块未处于瞬时工作状态时,FPGA实时检测LM139输出的JJS1~JJS4信号,判断分配单元是否存在异常控制,如检测到异常,FPGA关断分配单元控制电路的各种输出,同时产生紧急中断,将异常状态上报上级模块,并将异常状态存入异常状态寄存器供上级模块查询。电路示意图如图4所示。

(3)驱动电源单元

驱动电源单元采用54LS05、54LS08和LM139实现。驱动电源单元将系统RESET信号、本机RESET信号和两路FPGA电源输出控制进行组合运算输出,控制两个串联的驱动电源光MOS开关。并将反应开关状态的测试点连接到FPGA上进行检测。

模块上电后由FPGA按照各种组合状态输出KZ1、KZ2到电源驱动电路,检测RESET信号、驱动电源单元的各个中间信号KZ3、KZ4、KZ5、KZA、KZB、KZC、KZD和电源开关单元测试点JJS1~JJS4状态,进行逻辑分析,将检测结果存入相应的自检寄存器供上级模块查询。

进入工作状态后,FPGA实时检测RESET信号、电源驱动电路的各个中间信号KZ3、KZ4、KZ5、KZA、KZB、KZC、KZD和电源开关电路测试点JJS1~JJS4状态,与FPGA的电源控制信号输出进行逻辑分析验证。出现故障时,向上级模块报警,将故障信息存入相应的自检寄存器,供上级模块查询。电路示意图如图5所示。

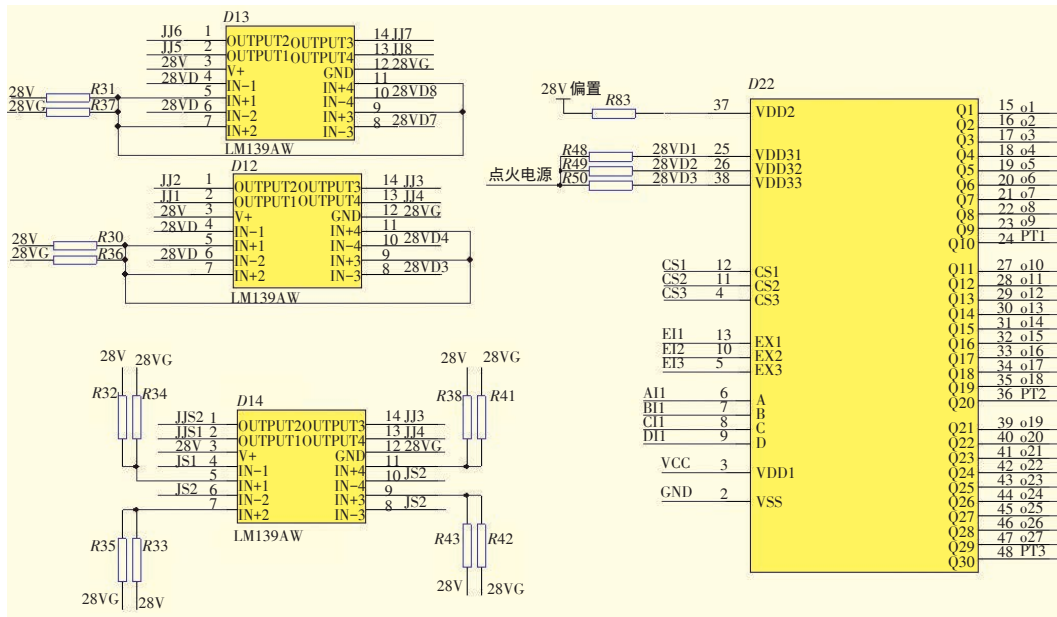


图4 脉冲分配通路检测

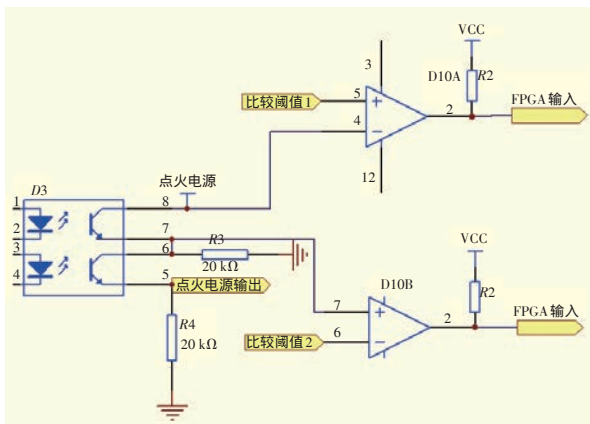


图5 点火开关测试电路

(4)机载模块BIT仿真模型

根据FPGA信息采集系统对功能电路的故障影响模式分析,创建BIT仿真模型。如图6所示。

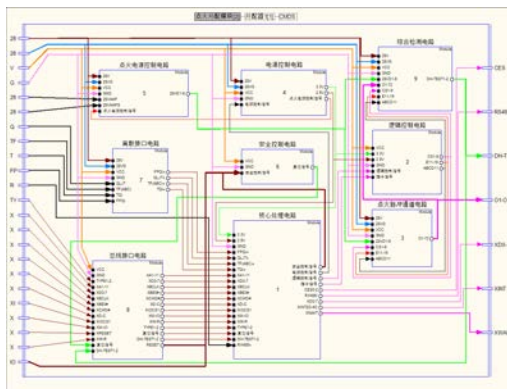


图6 机载模块BIT仿真模型

2.2 机载模块信息交互层

信息交互层通过对基础信息层采集到的故障信息进行分类、分析和判断并发送至决策上报层。

机载模块实时监控逻辑图如图7所示。

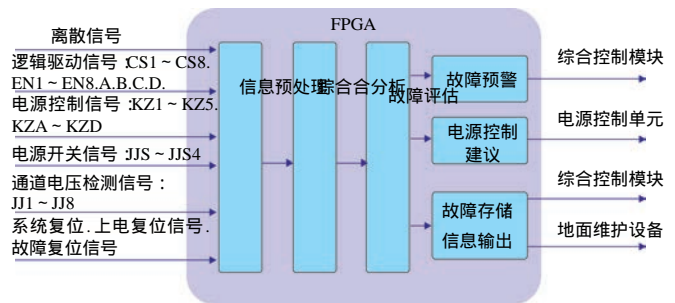


图7 实时监控功能逻辑

进入工作状态后,顺序器模块进入到自动监控状态。FPGA对离散信号、脉冲通道电压状态信号和电源控制信号进行实时监控,将各种信号状态进行逻辑运算和综合分析。根据系统制定的故障标准对顺序器模块功能失效和故障等级进行评估,如评估结果危险等级高,FPGA向上级模块预警,并向安全控制电路发出安全控制信号,关断控制电源和脉冲通道。同时,FPGA将检测和评估结果存储到FPGA内部寄存器,在上级模块发出故障信息申请指令时,FPGA将故障结果送至上级模块。

通过对基础信息的分析,形成扩展FMEA文件,扩展FMEA基本原理是故障的模糊性、设计多种对象

间的映射关系。就每一个功能单元而言,包括故障征兆与故障模式及其影响之间、传感器设置与采集的信号之间、故障征兆与北侧参数之间的映射关系^[6]。

由扩展FMEA得到设备所有可能发生的影响因素集,记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 。所有故障点的集合记为 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$, U 和 V 之间对应着模糊隶属度矩阵

$$R = F(U \times V) = \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} = (r_{ij})_{n \times m} \quad (1)$$

式中, R 是 U 到 V 的模糊关系; r_{ij} 为经过模糊推理得到的故障因素 u_i 与故障点 v_j 之间的模糊隶属度,也就是第 i 中故障因素导致第 j 个故障点故障的置信度。对域故障影响集 U , 定义向量 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$, a_i 标示

出现的程度,即 u_i 的权重。由此得出故障预测的综合评判模型

$$A = F(U), \quad R = F(U \times V), \quad V = F(U)$$

图8 模糊综合评判模型

当权重隐私 A 和隶属度矩阵 R 确定之后,根据模糊合成运算,就可以得到模糊预测评判结果:

$$B = A \times R = A \times \begin{pmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & \dots & r_{nm} \end{pmatrix} = \{b_1, ba_2, \dots, b_n\} \quad (2)$$

对于评判结果 B , 可采用最大隶属度原则或加权平均法进行最后确定,得到的 b_j 即表示故障将在 j 点发生^[7]。

机载模块的扩展FMEA分析如表1所示。

表1 机载模块的扩展FMEA表

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	故障模式基本信息				故障演变特点	故障症状/先兆分析			故障检测信息				故障诊断分析	
2	产品或功能标志	故障模式	严酷度类别	故障模式发生概率等		故障原因	故障先兆	关联产品/功能	测试点	故障注入类型	试验手段	故障注入成功判据	故障诊断方法	故障诊断指示
3		1.1.1.1a CPU第1路RS422串口发送数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fk CPU U3 AD4脚失效	--	第1路RS422串口通信失效	U12-44P	开脚	U12-44P脱离焊盘	用示波器测量U13-3P无高低数据变化,处于固态(电平大于0.7V)	加电BIT/启动BIT/周期BIT	故障码:
4		1.1.1.1b CPU第1路RS422串口接收数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fj CPU U3 AD2脚失效	--	第1路RS422串口通信失效	无	无	无	无	人工检测	
5		1.1.1.1c CPU第2路RS422串口发送数据失效	IV	E	突发故障	1.1.1.1.102fi CPU U3 AG7脚失效	--	第2路RS422串口通信失效	无	无	无	无	人工检测	
6		1.1.1.1d CPU第2路RS422串口接收数据失效	IV	E	突发故障	1.1.1.1.102fm CPU U3 AE4脚失效	--	第2路RS422串口通信失效	无	无	无	无	人工检测	
7		1.1.1.1e CPU第3路RS422串口发送数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fn CPU U3 AF10脚失效	--	第3路RS422串口通信失效	U15-3P	开脚	U12-41P脱离焊盘	用示波器测量U15-3P无高低数据变化,处于固态(电平大于0.7V)	加电BIT/启动BIT/周期BIT	故障码:
8		1.1.1.1f CPU第3路RS422串口接收数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fo CPU U3 AG9脚失效	--	第3路RS422串口通信失效	无	无	无	无	人工检测	
9		1.1.1.1g CPU第4路RS422串口发送数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fp CPU U3 AH13脚失效	--	第4路RS422串口通信失效	U16-3P	开脚	U12-40P脱离焊盘	用示波器测量U16-3P无高低数据变化,处于固态(电平大于0.7V)	加电BIT/启动BIT/周期BIT	故障码:
10		1.1.1.1h CPU第4路RS422串口接收数据失效	II	E	突发故障	1.1.1.1.102fq CPU U3 AJ12脚失效	--	第4路RS422串口通信失效	无	无	无	无	人工检测	

2.3 机载模块决策上报层

机载模块主要通过上电BIT、周期BIT、启动BIT和维护BIT等四种BIT模式上级系统上报,流程如图9所示。

模块上电后,进行上电BIT模式,如果上电BIT未发现故障,则设备进入正常工作状态;否则,软件根据上电BIT数据进行故障诊断,若能够隔离到功

能单元级别,则诊断结束,根据诊断结果进行维修,如果不能隔离故障,则设备停机,进入离线模式。

模块正常工作后,进入周期BIT模式,设备内部各个测试点向设备的测试单元定期发送测试数据,通过软件对所有数据进行故障诊断,若一个周期中所有的BIT均正常,则进入下一个诊断周期。一旦发生故障,如果不能隔离故障到LRU,则设备停机,进入离线模式。

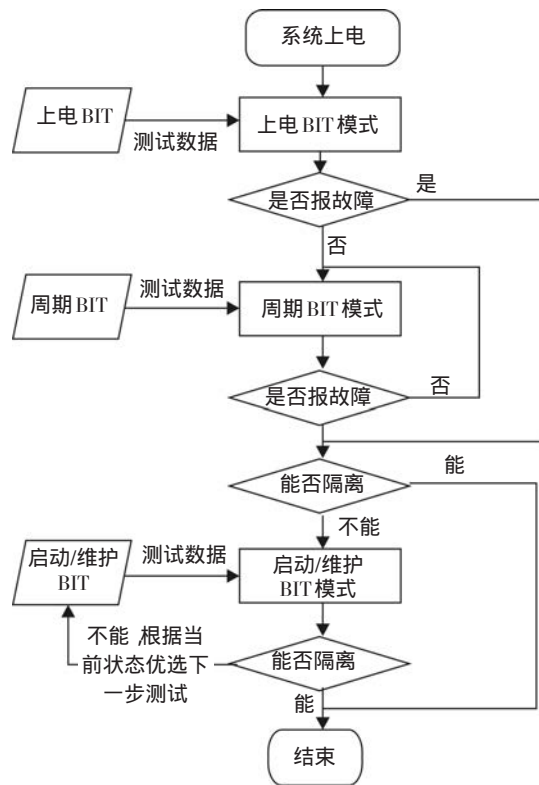


图9 诊断故障流程图

进入离线模式后,设备根据之前初步诊断结论,优化选择下一步测试,通常为启动BIT、维护BIT,根据结果,再诊断,最后隔离出故障所在功能单元^[8-9]。

BIT分析结果如图10所示。

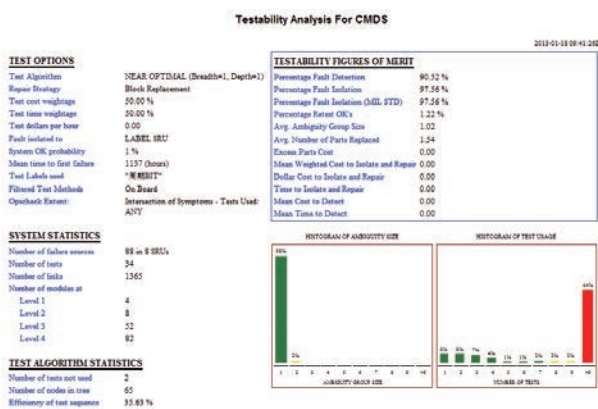


图10 BIT仿真结果

3 结束语

随着科技的发展,PHM技术的应用越来越广泛。在机载模块中随着传感器网络的布局,为实施PHM技术搭建了良好的资源平台,针对目前机载设备的BIT功能相对简单,诊断技术单一,诊断能力差,虚警率高的缺点^[10],通过基于PHM的BIT设计和故障诊断进行了研究和实践,从建模角度提出了故障预测模型设计的基本思路。提高了机载模块在使用中的故障诊断预测的水平,增强了装备的测试性和维修性。在实际工程应用中具有很大的意义。

参考文献

- [1] 张宝珍,曾天翔.先进的故障预测与状态管理技[J]. 2003,22(11):22-31.
- [2] 王青,谢利军.某机载计算机系统测试性分析与研究[J].航空计算机技术,2008,38(5):76-80.
- [3] 张宝珍.国外综合诊断、预测与健康管理技术的发展和应[J].计算机测量与控制,2008,16(5):591-594.
- [4] 郭伟,唐西平,张佳佳.大型飞机的PHM健康监控技术研究[J].民用飞机设计与研究,2009(增刊):159-162.
- [5] 刘志伟,刘锐,徐劲松,等.复杂系统故障预测与健康管理(PHM)技术研究[J].计算机测量与控制,2010,18(12):2687-2689.
- [6] 石君友.测试性设计与验证[M].北京:国防工业出版社,2005.
- [7] 方子豪.装备测试性建模与分析软件框架设计[J].电子产品可靠性与环境试验,2013,31(4):27-30.
- [8] 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.
- [9] 龙兵,姜兴渭,宋政吉.基于多信号模型航天器多故障诊断技术研究[J].宇航学报,2004,25(5):591-594.
- [10] 杨东健,王红,刘金甫.航空设备的测试性设计和验证技术概述[J].测控技术,2006,25(10):1-5.