

某型舰船逆变器测试性设计与分析方法研究

孙佳星¹, 杨刚², 孙军²

(1. 海军装备部驻芜湖地区军事代表室, 安徽 芜湖 241000; 2. 海军工程大学电气工程学院, 武汉 430033)

摘要: 测试性作为装备通用质量特性之一, 在舰船装备研制中逐渐受到重视, 随着舰船综合电力技术的发展与应用, 电力电子设备的作用越来越关键, 针对当前舰船电力电子设备未考虑测试性设计的问题, 研究了某型舰船逆变器的测试性设计与分析方法; 首先分析了舰船逆变器的结构和工作特点, 并结合维修保障要求对其进行层次划分; 然后对舰船逆变器进行了故障模式、影响及危害性分析, 并基于多信号流程图模型, 利用 TEAMS 软件建立了测试性模型; 最后将测试性定量指标分配至可更换单元, 为后续舰船逆变器的诊断设计等工作打下基础, 并给同类型设备测试性技术的研究提供一些参考。

关键词: 舰船逆变器; 故障模式、影响及危害性分析; 测试性建模; 测试性分配

Research on Testability Design and Analysis Methods of a Certain Type of Ship Inverter

Sun Jiaying¹, Yang Gang², Sun Jun²

(1. Military Representative Office, Naval Equipment Department, Wuhu 241000, China;
2. College of Electrical Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: As one of the general quality characteristics of equipment, testability has been paid more and more attention in the development of ship equipment. With the development and application of ship integrated power technology, the role of power electronic equipment is becoming more and more critical. In order to solve the problem that the testability design is not considered in the current ship power electronic equipment, the testability design and analysis method of a certain ship inverter is studied. Firstly, the structure and working characteristics of the ship inverter are analyzed, and the inverter is also divided into different levels according to the maintenance guarantee. Then the failure mode, effect and criticality analysis (FMECA) of the ship inverter are conducted, and based on the multi-signal flow diagram model, the testability model is established by using the TEAMS. Finally, the testability quantitative index is assigned to the replaceable unit, which lays a foundation for the subsequent diagnostic design of the ship inverter, and provides some references for the research on testability technology of the same type of equipment.

Keywords: ship inverter; FMECA; testability modeling; testability allocation

0 引言

随着舰船综合电力技术的不断发展, 逆变器作为主要的电能变换设备, 已成为舰船综合电力系统中的关键技术装备^[1]。在实际应用过程中, 舰船逆变器一旦发生故障, 将严重影响用电设备的电力供应。舰船逆变器等电力电子设备的故障变化多样, 且发生的时间具有随机性^[2], 如何快速准确地检测到故障, 并将其隔离至现场可更换单元(LRU, line replaceable unit), 提高舰船逆变器的故障诊断效率, 是当前亟需解决的问题, 而测试性技术研究正是解决这一问题的重要途径之一。

测试性(Testability)也称可测性, 是指“产品能及时准确地确定其状态(可工作、不可工作或性能下降)并有效地隔离其内部故障的一种设计特性”^[3]。良好的测试性设计

可以有效地提高装备故障诊断效率, 降低维修保障费用^[4]。为了指导测试性工作的开展, 我国先后颁布了 GJB2547-1995《装备测试性大纲》和 GJB2547A-2012《装备测试性工作通用要求》, 将测试性要求贯穿装备的整个生命周期, 并成功应用于雷达、导弹、航天等重要装备的设计中^[5-9]。然而, 对于舰船逆变器等舰船电力电子设备, 虽然装备部门加大了对测试性的重视程度, 但仍缺乏具有针对性的标准对测试性设计与分析进行指导。

目前, 国内对于舰船装备的测试性设计与分析的研究主要有: 文献[10]提出了一种基于相关性模型的舰船系统级产品的测试性建模与分析方法; 文献[11]对舰船电子装备的测试诊断技术进行了研究, 为舰船电子装备的诊断设计提供了借鉴; 文献[12]研究了舰船装备总体测试性指标定量要求的确定方法; 文献[13]根据测试性相关原则对舰船交流机组的测试性设计进行。综上所述, 由于舰船逆变器等电力电子设备的测试性研究仍处于起步阶段, 对于如何开展测试性设计与分析缺乏系统的论述。本文结合舰船逆变器的特点, 对某型舰船逆变器的测试性设计与分析方法开展研究, 为同类型舰船电力电子设备的测试性

收稿日期: 2020-04-30; 修回日期: 2020-05-20。

作者简介: 孙佳星(1986-), 男, 安徽芜湖人, 大学本科, 助理工程师, 主要从事船舶电力方向的研究。

通讯作者: 杨刚(1992-), 男, 江苏南京人, 硕士生, 助教, 主要从事船舶电力设备测试性方向的研究。

研究提供一定的参考。

1 某型舰船逆变器工作原理及特点分析

舰船逆变器是实现直流到交流变换的装置, 按照输出波形的类型, 可以分为电压型逆变器和电流型逆变器, 主要应用于舰船静止交流电源、不间断电源、主变流装置、直流区域配电系统以及电机驱动变频器等^[4]。某型舰船逆变器的结构如图 1 所示。

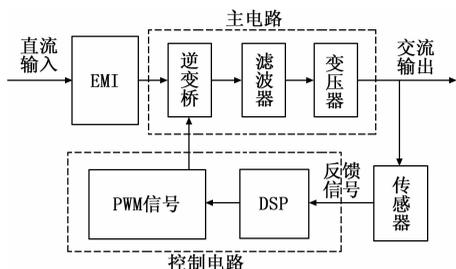


图 1 某型舰船逆变器结构框图

图中, 直流电源是逆变器的输入, 经过滤波后, 通过逆变桥将直流电压变成一系列方波电压, 方波的脉宽按照正弦函数的规律变化, 再通过滤波器将方波电压转化为正弦交流电压, 最后通过变压器将输出电压变换成负载使用的电压。基于数字信号处理器 (DSP, digital signal processor) 的控制器为逆变桥提供脉冲宽度调制 (PWM, pulse width modulation) 驱动信号, 同时根据传感器检测到的输出端电流和电压信号实时调整驱动信号。

该舰船逆变器的特点主要有以下几个方面:

1) 工作方式: 舰船逆变器承担着为舰船推进电机等重要交流用电设备连续供电的任务, 需要开展经常性的维修保养工作。

2) 测试方法: 舰船逆变器一旦发生故障, 输出交流电压波形将发生畸变, 导致推进电机等用电设备故障甚至停机, 造成非常严重的后果, 因此必须具备在线测试诊断能力, 能够实时进行状态监测和故障诊断。

3) 设计要求: 由于舰船逆变器长期工作在高温、高盐、高湿的环境中, 并且需要考虑电磁兼容的问题, 对机内测试 (BIT, builtintest) 设计、传感器的性能以及布局提出了很高的要求。

2 舰船逆变器测试性设计与分析流程

根据 GJB2547A-2012《装备测试性工作通用要求》, 测试性工作包括测试性需求分析、测试性管理、测试性设计与分析、测试性验证与评价、使用期间测试性评价与改进等 5 个方面。其中, 测试性设计与分析是测试性工作的主体, 主要在装备工程研制和定型阶段开展。

测试性设计与分析包括: 建立测试性模型、测试性分配、测试性预计、故障模式、影响及危害性分析 (FMECA, failure mode, effect and criticality analysis)、制定测试性设计准则、固有测试性设计和分析、诊断设计等, 具体工作流程如图 2 所示。

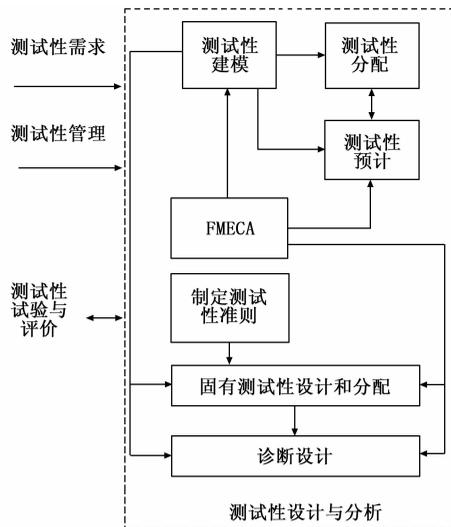


图 2 测试性设计与分析流程图

由于目前舰船逆变器的测试性设计与分析处于起步阶段, 制定测试性准则、诊断设计等工作还不具备开展的条件和要素, 按照测试性工作项目剪裁的原则, 结合舰船逆变器的原理和工作特点, 本文重点对舰船逆变器测试性建模、测试性分配和 FMECA 三个方面开展研究。

首先对舰船逆变器进行层次划分, 层次划分是确保测试性设计与分析正确性与有效性的关键, 直接关系到不同维修体制下故障检测与隔离的最小单元。我国舰船装备通常采用三级维修体制, 由顶至下分别为舰员级维修 (O 级, 使用现场), 中继级维修 (I 级, 修理所) 和基地级维修 (D 级, 修理厂)。在舰船出海、执行任务过程中, 若逆变器发生故障, 往往直接采取措施更换发生故障的电路模块, 因此, 为了适应舰员级维修的需要, 本文将逆变器各模块定为 LRU, 如表 1 所示。

表 1 舰船逆变器层次划分表

系统	分系统	LRU	数量	
舰船逆变器	滤波单元	滤波模块	1	
	逆变单元	IGBT 模块	3	
	EMI 电路	EMI 模块	1	
	控制单元		DSP 模块	1
			驱动板	3
			二次回路电源	1
	变压器单元	变压器	1	
	传感器		电流传感器	3
			电压传感器	4
温度传感器			3	

3 故障模式、影响及危害性分析

FMECA 是开展测试性工作的基础, 是在层次划分的基础上, 分析系统每个 LRU 可能的故障模式、故障影响、严酷度、发生概率和检测方法等, 分析结果通过表格形式呈现。FMECA 需要设计人员和专家根据系统的结构、功能和

环境条件等综合分析,并在系统运行和维修中不断完善。基于系统 FMECA 的结果,可以开展测试性建模、建立诊断策略、进行测试性设计等工作。

根据 GJB/Z1391^[15],严酷度类别根据故障模式最终可能导致的人员伤亡、任务失败、产品损坏等方面的影响程度进行确定,通常分为四类:Ⅰ类(灾难的)、Ⅱ类(致命的)、Ⅲ类(临界的)、Ⅳ类(轻度的)。

故障概率等级通常分为 5 类:

- 1) A 级——经常发生,故障发生概率大于产品总故障概率的 20%;
- 2) B 级——有时发生,故障模式发生概率大于产品总故障概率 10%,小于 20%;
- 3) C 级——偶然发生,故障模式发生概率大于产品总故障概率的 1%,小于 10%;
- 4) D 级——很少发生,故障模式发生概率大于产品总故障概率的 0.1%,小于 1%;
- 5) E 级——极少发生,故障模式发生概率小于产品总故障概率的 0.1%。

舰船逆变器最常见的故障现象包括过流、过压、欠压、过热及过载等,其成因较为复杂,可由一个或多个原因引起。主要的故障模式包括:

- 1) 电容、电感、电阻等元件失效故障;
- 2) IGBT 驱动故障;
- 3) IGBT 短路/开路故障;
- 4) 偶发性故障(元件虚焊、接触不良等)。

对舰船逆变器进行故障模式、影响及危害性分析,共梳理出 20 种故障模式,部分如表 2 所示。

4 测试性建模

测试性建模是装备开展测试性设计与分析工作的重要项目之一,是进行测试性预计、测试点优化改进和测试性评估的重要手段。文献 [16] 对逻辑模型、信息流模型、多信号流图模型、结构模型、混合诊断模型等典型的测试性模型进行了总结,分析比较了每种模型的特点和适用阶段。其中,多信号流图模型是进行测试性预计、测试性设计与分析的重要模型,可以较好地描述系统功能—故障—测试的关系,并适用于装备的整个生命周期。常用的测试性

建模工具有 TEAMS、eXpress、TADS 等。

舰船逆变器组成元器件多、综合化程度高,故障传播机制复杂,通过多信号流图模型可以将其组成单元、信号、故障模式、测试以及它们之间的相互关系进行准确描述,便于使用计算机辅助分析,从而极大地提高测试性设计的效率。本文采用 TEAMS 对舰船逆变器进行测试性建模,得到故障检测率、故障隔离率的分析值,具体步骤如下:

- 1) 根据逆变器层次划分的结果,在软件中添加相应的 LRU 模块,结合逆变器各 LRU 的特点和关联关系,定义 LRU 的端口和属性,并使用连线进行连接;
- 2) 根据逆变器 FMECA 的结果,在各 LRU 下添加相应的故障模式,定义故障模式的属性,建立故障模式间、故障模式与 LRU 端口间的连接关系;
- 3) 结合逆变器实际,添加测试并设置测试的基本属性,主要包括测试类型、测试费用、置信度等;
- 4) 执行测试分析,根据需求可以得到故障隔离率、故障检测率、冗余测试等信息。

根据舰船逆变器的功能结构、FMECA 等信息,利用 TEAMS 软件得到的模型如图 3 所示。

建模分析结果如表 3 所示。

将测试性建模分析结果与测试性指标要求进行对比,可以预计当前舰船逆变器测试性设计水平,通过分析结果可以看出,舰船逆变器当前测试性设计水平较低,特别是发生故障后,难以将故障定位至某个模块,不利于舰员及时进行维修更换。在此基础上,通过改进测试设计,可以优化测试点布局,提高测试性水平。

5 测试性分配

测试性分配是将系统级测试性定量指标按照一定规则分配给各组成单元的过程。测试性分配方法较多,大致可以分成两类,一类是基于智能算法的分配方法,另一类是传统的基于函数的测试性分配方法。工程上常用的是等值分配法、按故障率分配法、加权分配法等。测试性分配的基本程序如下:

- 1) 建立测试性模型,确定系统各层次的故障率;
- 2) 选择合适的分配方法;
- 3) 对分配结果进行分析和权衡。依据系统第个组成单

表 2 舰船逆变器 FMECA 例表

序号	LRU	故障模式	故障影响	严酷度类别	发生概率等级	测试点	测试参数
1	IGBT 模块	短路失效	电流过大、逆变无法正常工作	Ⅰ	A	IGBT 两端	电流
2		开路失效	无法输出或者输出电压不正常	Ⅰ	A	IGBT 两端	电压
3	控制电路	误动作	驱动信号失常、保护功能失常	Ⅱ	B	短路保护电路输出端	电压
4	驱动电源	不动作	稳压失效	Ⅲ	B	电源输出端	电压
5	滤波电路	开路/短路失效	输出电能质量下降、无输出	Ⅲ	C	变压器输出端	电压
6	EMI 模块	开路失效	主电路输入端失电	Ⅲ	D	差模电容两端	电压
7		短路失效	不影响逆变器正常工作,但是其电磁兼容特性下降	Ⅳ	D	差模电感	电流
8	变压器	开路失效	逆变输出电压失常	Ⅲ	C	变压器原、副边	电压
9		短路失效	逆变输出电压失常	Ⅲ	C	变压器原、副边	电压

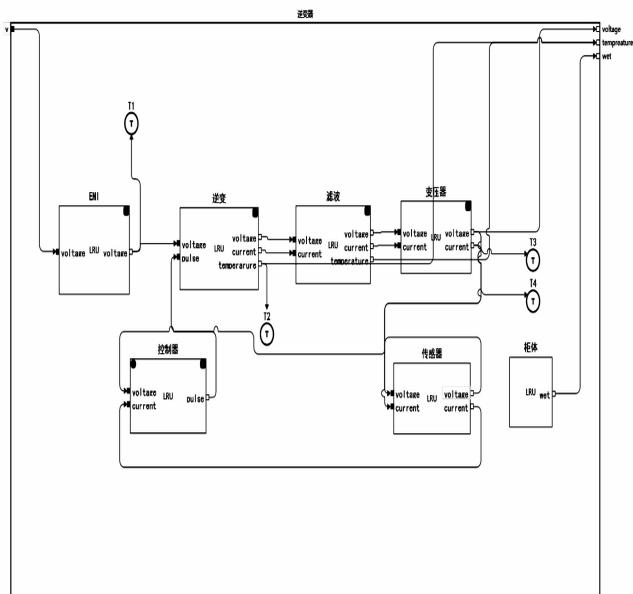


图 3 舰船逆变器测试性模型图

表 3 舰船逆变器测试性建模分析结果

测试性参数	结果
故障检测率/%	88.9
故障隔离率/%	12.5

元的分配值综合得到的系统指标, 必须满足 $P \gg P_s$, 其中:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i P_i}{\lambda_s} \quad (1)$$

则分配工作完成。式中, P 为根据各单元指标计算得出的系统指标; P_i 为系统第 i 个单元的分配值; P_s 为系统的指标要求。

以故障检测率指标为例, 测试性要求中系统的故障检测率通常为 95%, 采用加权分配法, 选取故障率、故障影响、诊断难易程度 3 个因素对舰船逆变器进行分配, 加权系数取值范围为 0~5。得到舰船逆变器故障检测率指标分配如表 4 所示。

表 4 舰船逆变器故障检测率指标分配结果

LRU	加权系数			分配指标	调整结果
	故障率系数	故障影响系数	诊断难易系数		
滤波模块	1.5	3.0	3.0	0.931	0.93
IGBT 模块	5.0	5.0	5.0	0.966	0.97
EMI 模块	1.0	3.0	2.0	0.914	0.92
DSP 模块	4.0	4.0	4.0	0.957	0.96
驱动板	4.5	4.5	2.5	0.955	0.96
二次回路电源	3.0	4.0	2.0	0.943	0.94
变压器	2.0	3.0	2.0	0.926	0.93
电流传感器	2.0	4.0	4.5	0.951	0.95
电压传感器	2.0	4.0	4.5	0.951	0.95
温度传感器	2.0	4.0	4.5	0.951	0.95
总计				0.95	0.952

通过计算得到的结果可以看出, 经过修正后的综合指标大于系统的故障检测率要求值, 满足分配要求。需要修正的原因是当某个单元的各加权系数均较高或较低时, 可能出现分配的测试性指标超过 1 或者过小的情况。根据测试性指标分配结果, 可以对系统和每个单元进行测试的布局, 确保最终的系统能够满足定量指标要求。

6 结束语

本文针对当前舰船电力电子设备未考虑测试性设计的问题, 对某型舰船逆变器测试性设计与分析方法进行了研究, 主要从 FMECA、测试性建模、测试性分配等 3 个方面, 阐述了舰船逆变器开展测试性相关工作的流程和方法, 并给出了相应分析计算结果, 为舰船逆变器的诊断设计等后续测试性工作打下基础。当然, 随着对功率器件失效机理的研究不断深入, 电力电子设备的故障预测、健康管理等技术也不断发展, 如何在现有测试性技术的基础上, 制定面向故障预测和健康管理测试性分析设计的需求和方法值得进一步研究。

参考文献:

- [1] 马伟明. 舰船动力发展的方向—综合电力系统 [J]. 海军工程大学学报, 2002, 14 (6): 1-6.
- [2] 王正德. 舰船逆变器的故障诊断 [J]. 舰船科学技术, 2012, 34 (2): 97-99.
- [3] 石君友. 测试性设计分析与验证 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
- [4] 李玉洁, 吴延军. 武器装备的测试性设计方法研究 [J]. 舰船电子工程, 2017, 37 (11): 126-129.
- [5] 林典伦, 田仲, 贾培盈, 等. 装备测试性大纲: GJB2547-95 [S]. 北京: 国防科学技术工业委员会, 1995.
- [6] 张宝珍, 曾天翔, 田仲, 等. 装备测试性工作通用要求: GJB 2547A-2012 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2012.
- [7] 李伟. 航空电子设备研制的测试性设计考虑 [J]. 民用飞机设计与研究, 2018 (2): 80-84.
- [8] 赵继承, 顾宗山, 吴昊, 等. 雷达系统测试性设计 [J]. 雷达科学与技术, 2009, 7 (3): 174-179.
- [9] 卢明章, 宋永军. 基于 PHM 的导弹装备测试性设计 [J]. 测绘技术, 2017, 44 (1): 27-29.
- [10] 刘晓白, 梁鸿, 王丹. 基于相关性模型的舰船系统测试性建模与分析 [J]. 装备技术, 2017, 39 (11): 158-163.
- [11] 刘志宏. 舰船电子装备测试诊断技术发展研究 [J]. 仪表技术, 2017 (1): 25-28.
- [12] 谢宗仁, 吕建伟, 徐一帆, 等. 舰船装备总体测试性指标定量要求的确定方法 [J]. 海军工程大学学报, 2017, 29 (6): 49-54.
- [13] 蒋超利, 吴旭升, 高崑, 等. 某型舰船变流机组的测试性研究 [J]. 船电技术, 2018, 38 (9): 44-48.
- [14] 马伟明, 张晓锋. 船舶电气工程, 中国电气工程大典 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [15] 康锐, 石荣德, 王江山, 等. 故障模式、影响及危害性分析指南: GJB/Z 1391 [S]. 总装备部, 2006.
- [16] 张勇, 邱静, 刘冠军. 测试性模型对比及展望 [J]. 测试技术学报, 2011, 25 (6): 504-514.