

doi: 10.7690/bgzd.2016.01.011

## 复杂可修系统任务测试性建模

翟助群<sup>1</sup>, 许正<sup>2</sup>, 刘刚<sup>3</sup>

(1. 海军 92232 部队, 北京 100161; 2. 海军 92957 部队, 浙江 舟山 316000;  
3. 海军工程大学管理工程系, 武汉 430033)

**摘要:** 为了更加合理地衡量复杂可修系统执行任务过程中的测试性, 建立一种符合复杂可修系统功能特性和任务特点的物理模型和数学模型。分析了复杂可修系统任务测试性参数, 选取任务故障检测率和任务故障隔离率作为度量参数, 结合系统测试性功能层次结构, 建立系统任务测试性物理模型, 并在此基础上, 建立系统串并混联的任务测试性数学模型, 针对某型潜艇燃油分系统开展验证分析工作。分析结果表明: 该模型贴近实际, 适用于复杂可修系统任务测试性建模。

**关键词:** 复杂可修系统; 任务测试性; 建模; 任务故障检测率; 任务故障隔离率

**中图分类号:** TP202 **文献标志码:** A

## Modeling of Testability Based on Complex Repairable System

Zhai Zhuqun<sup>1</sup>, Xu Zheng<sup>2</sup>, Liu Gang<sup>3</sup>

(1. No. 92232 Unit of Navy, Beijing 100161, China; 2. No. 92957 Unit of Navy, Zhoushan 316000, China;  
3. Department of Management Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** In order to measure mission testability of complex repairable system reasonably, physical model and mathematical model of are constructed, considering function and mission character. Mission testability parameters are analyzed, and mission fault detection rate and mission fault isolation rate are chosen as metric parameter, then the physical model of mission testability is constructed, combining testability functional hierarchy. On this basis, hybrid series-wound/shunt-wound mathematical model of mission testability is constructed, and verification work is operated for fuel subsystem of submarine power system. The analytical result shows that the models constructed in this paper are close to physical truth, adaptive to the modeling of mission testability.

**Keywords:** complex repairable system; mission testability; modeling; mission fault detection rate; mission fault isolation rate

### 0 引言

现代战争对武器装备的性能要求越来越高, 在实际执行作战或使用任务期间, 要迅速有效地恢复战斗力, 要求装备不仅具有较高的任务可靠性, 还要具有较高的任务维修性和任务测试性, 以便夺取战争胜利或完成预定任务。而现代战争中的高性能武器装备, 如坦克、舰船等复杂系统, 在任务期间都是可以修理的; 因此, 在实际作战或使用中, 对于这类系统, 往往需要衡量其作为一个整体的测试性, 即任务测试性。任务测试性的概念是与任务维修性紧密联系在一起, 同任务维修性相似, 任务测试性也是在执行具体任务时所呈现出的测试性, 是影响任务成功的基本因素之一。国内的测试性研究起源于 20 世纪 80 年代中后期, 并得到了较快的发展。尤其是 1995 年颁布的 GJB 2547《装备测试性大纲》对规范测试性技术的应用和推动测试性技

术的研究起到了重要的作用。近年来, 国防科学技术人学、北京航空航天大学、军械工程学院、电子科技大学、海军工程大学、海军航空工程学院等院校在测试性相关领域先后开展了广泛的研究, 取得了不少的研究成果<sup>[1-4]</sup>。

对复杂可修系统开展任务测试性建模工作, 是为了建立符合其功能特性和任务特点的物理模型和数学模型, 明确其任务测试性目标和指标, 并将其作为测试性设计与定量评估的重要手段, 这是装备测试性设计工作的重要项目<sup>[5]</sup>。因此, 笔者通过分析任务测试性参数, 结合复杂可修系统任务测试性特点, 研究其任务测试性建模, 能发现系统设计中的薄弱环节, 为系统设计的改进提出改进意见, 从而提升系统的测试性水平, 保证其任务的成功完成。

### 1 任务测试性参数分析

不同于基本测试性, 任务测试性与致命性故障

收稿日期: 2015-08-11; 修回日期: 2015-09-25

基金项目: 总装技术基础课题(4314231428)

作者简介: 翟助群(1968—), 女, 河北人, 硕士, 工程师, 从事电子工程、装备综合保障工程、装备管理研究。

紧密相关, 度量的是在系统发生故障后, 采取一定的检测与隔离手段, 快速检测出系统故障并将其隔离, 从而为后续的修理提供合理的依据<sup>[6-7]</sup>。对于单个装备而言, 其任务测试性有多个评价参数, 如常用的任务故障检测率、任务故障隔离率、任务平均诊断时间等。对于复杂可修系统而言, 无论是作为平时的基本使用单元还是任务时的使用单元, 其使用过程和任务特点均与单装类似; 因此, 也可以相应地定义其任务测试性参数。笔者选取任务故障检测率和任务故障隔离率这 2 个典型参数作为任务测试性的度量参数。系统的“任务故障检测率”指在任务规定的时间内, 用规定的方法正确检测到的故障数与影响任务执行的被测装备发生的故障总数之比; 系统的“任务故障隔离率”指在任务规定的时间内, 用规定的方法正确隔离到不大于规定的可更换单元数的故障数与同一时间内检测到的故障数之比。同基本测试性不同的是, 这种度量方式与实际的诊断策略相关。系统虽然在某种意义上可以看作一个缩小的“单装”, 但是执行任务的过程又不同于单装。单装是作为一个整体进行诊断的, 即每进行一次诊断, 单装就停机一次。但是系统中的每个装备是单独实施诊断的, 如果某个装备故障后可以马上进行诊断, 而这个装备故障又不影响系统执行任务, 则这次诊断就不能算作度量任务测试性的“一次”; 相反, 如果某个装备故障后, 而这个装备故障影响系统执行任务, 必须对这个装备进行诊断, 则这种诊断就能算作度量任务测试性的“一次”。因此, 在应用任务测试性参数时, 与系统在整个任务过程中的地位有关, 必须规定与之相适应的诊断策略。同任务维修性相似, 任务测试性是系统在某个任务下基本测试性的反映。

## 2 复杂可修系统任务测试性特点分析

开展复杂可修系统任务测试性建模, 必须依据其任务测试性特点<sup>[8-11]</sup>, 其主要的特点如下:

1) 系统测试性数据有限。与批量生产且应用广泛的简单通用装备相比, 复杂系统的生产数量极其有限, 以舰船为例, 定型的舰船型号一般也才建造十几艘, 甚至更少; 因此, 对于同一型号装备而言, 在测试性信息的统计方面没有大量数据积累, 样本空间有限, 因而难以应用常规数理统计方法开展测试性分析工作。

2) 系统内绝大部分设备在任务期间都是可维修的。与飞机等任务期间不可修的系统相比, 复杂

可修系统一般在役时间较长, 单次任务执行周期也较长, 在任务期间大部分设备能够开展诊断活动及进行维护修理, 并且这些工作不影响任务的执行。

3) 系统基于任务的测试性。在执行任务期间, 系统的测试性一般与基层级测试能力息息相关, 也与系统的诊断方案有关。良好的测试性设计可以增加自动测试的成分, 减少外部测试工作, 便于基层级开展测试工作, 从而增强系统的任务测试性, 提高任务的成功率。

4) 不宜开展复杂的测试工作。由于系统执行任务的环境、测试级别、携带的检测设备等条件限制, 系统内较复杂装备的测试工作无法开展或者无法完全开展; 因此, 需要设计替代诊断方案或简化诊断方案, 也需要开展良好的测试性设计工作, 尽量避免此类情况的发生。

## 3 复杂可修系统测试性建模

### 3.1 任务测试性物理模型

带诊断方案的系统功能层次框图是表示从系统到部件的各个层次所体现的测试特点、相互间测试关系和各组成部分测试工作的系统框图<sup>[12-14]</sup>, 便于把握系统与其组成部分在执行任务过程中的测试性关系以及测试职能的细节, 这种层次框图关系如图 1 所示。

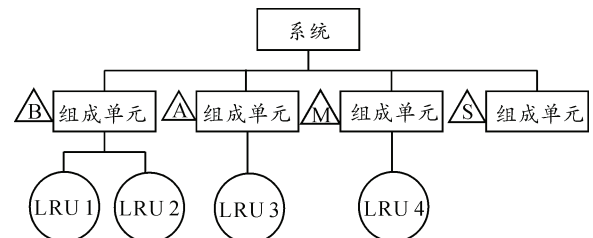


图 1 带诊断方案的系统功能层次框图

系统功能层次的分解是按其结构自上而下进行的, 一般从系统级开始, 分解到能够做到故障检测, 并隔离到规定单元的的层次为止。分解时应结合诊断方案, 在各级产品上标明与该层次有关的重要测试方式(如 BIT、ATE、人工测试或无法测试等), 一般而言, 在开展测试工作之前, 产品都必须进行调整或校正。为了简明, 这些测试措施可用符号表示。如图 1 所示, 各符号意义如下:

1) 圆圈: 在该圈内的单元是经过故障检测与隔离后, 将产品故障隔离到所规定的隔离单元。

2) 方框: 框内的项目要继续向下分解。

3) 含有“B”的三角形: 标明该项目不用外部检测手段, 即采用 BIT 手段可进行故障检测与隔离。

4) 含有“A”的三角形：需要使用外部自动测试设备才能进行故障检测与隔离。

5) 含有“M”的三角形：需要使用人工测试才能进行故障检测与隔离。

6) 含有“S”的三角形：无法开展测试工作，需要送往上一级检测机构进行检测；在任务执行过程中，如果出现这种情况，由于条件限制等情况，只有待任务结束后方能送上一级检测机构检测。

在系统执行任务过程中，开展功能层次分析时，需注意以下 2 种情况：

1) 在分析时，要着重展示有关诊断的要素；因此，它不同于一般的产品层次(系统分解)框图。其一，它并不需要都分解到最低层次产品，而只需分解到可更换件，并且由于任务的不同，其可更换件的层次也不同；其二，规定的隔离单元用圆圈表示；其三，需要标示测试方式或要素。但产品层次框图却是测试性框图的基础。

2) 由于同一系统在不同的测试机构的测试方式(包括机内测试、外部测试等)不同，不同机构的测试能力也不尽相同，系统功能层次框图也会不同；因此，在执行任务过程中，应根据现有条件开展分析工作和绘制框图。

## 3.2 任务测试性数学模型

### 3.2.1 基本数学模型

任务测试性数学模型的主要参数为任务故障检测率(MFDR)和任务故障隔离率(MFIR)。根据前面概念所知，系统的 MFDR 和 TFIR 与故障的性质有关，即所统计的故障是否影响任务执行；因此，MFDR 的基本数学模型可表示为：

$$\gamma_{\text{MFD}} = \frac{N_{\text{MD}}}{N_{\text{MT}}} \times 100\% \quad (1)$$

式中： $N_{\text{MT}}$  为影响任务执行的故障总数； $N_{\text{MD}}$  为正确检测到的此类故障数。

MFIR 的基本数学模型可表示为

$$\gamma_{\text{MFI}} = \frac{N_{\text{ML}}}{N_{\text{MD}}} \times 100\% \quad (2)$$

式中  $N_{\text{ML}}$  为执行任务过程中用规定方法正确隔离到小于或等于  $L$  个可更换单元的故障数。

### 3.2.2 串并混联的任务测试性模型

对复杂可修系统而言，不同组成单元的故障对系统任务执行的影响是不同的。其中不影响任务执行的故障可以在系统任务期间进行修理，或者待任

务结束后再送到相应的修理机构修理，这类故障不影响系统的任务维修性，也同样不影响系统的任务测试性；而其中一部分关键的设备或部件一旦发生故障，则会影响系统任务的执行，严重的甚至会影响系统的安全或造成人员伤亡，这类故障会同时影响系统的任务维修性和任务测试性。

从基本测试性角度考虑，系统内每个组成单元对系统测试性都会产生影响，这种影响在系统中没有其他单元可以替代；所以系统的基本测试性由组成单元的测试性综合而成，基本测试性框图表现为串联连接。但是从任务测试性角度考虑，由于影响任务执行的设备或部件故障的重要程度是不同的，相互之间存在一定的依赖关系，这样就在系统内部形成了串并混联关系。系统串并混联的任务测试性框图与可靠性、维修性框图类似，可以假设复杂可修系统是由  $m(m \geq 0)$  个串联单元和  $n(n \geq 0)$  个并联单元组成的，如图 2 所示。其中并联单元只在其内部所有单元检测隔离工作无法完成，该单元的检测隔离工作才认为是无法完成的；任一并联单元或串联单元检测隔离工作无法完成，则认为系统的检测隔离工作无法完成。当  $m=0$  时，系统是并联的；当  $n=0$  时，系统是串联的；当  $m, n \neq 0$  时，系统是混联的。

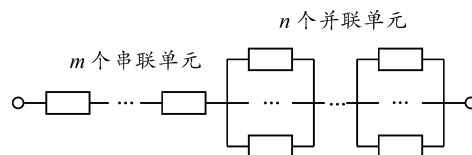


图 2 复杂可修系统任务测试性框图

#### 1) 串联系统的任务测试性数学模型。

当系统任务测试性框图的结构是串联时，其数学模型与基本测试性数学模型是一样的。根据任务故障检测率的概念，可知进行任务测试性分析时，系统的任务故障检测率为

$$\gamma_{\text{MFD}_s} = \frac{\sum \lambda_i \gamma_{\text{MFD}_i}}{\lambda_s} = \frac{\sum \lambda_i \gamma_{\text{MFD}_i}}{\sum \lambda_i} \times 100\% \quad (3)$$

式中： $\gamma_{\text{MFD}_s}$  为串联系统的 MFDR 值； $\gamma_{\text{MFD}_i}$  为第  $i$  个组成单元的 MFDR 值； $\lambda_s$  为串联系统故障率； $\lambda_i$  为第  $i$  个组成单元故障率。

系统的任务故障隔离率为

$$\gamma_{\text{MFI}_s} = \frac{\sum \lambda_{\text{Di}} \gamma_{\text{MFI}_i}}{\lambda_{\text{Ds}}} = \frac{\sum \lambda_{\text{Di}} \gamma_{\text{MFI}_i}}{\sum \lambda_{\text{Di}}} \times 100\% \quad (4)$$

式中： $\gamma_{\text{MFI}_s}$  为串联系统 MFIR 值； $\gamma_{\text{MFI}_i}$  为第  $i$  个组

成单元的 MFIR 值;  $\lambda_{Ds}$  为串联系统可检测的故障率 ( $\lambda_{Ds} = \lambda_s \gamma_{MFDs}$ );  $\lambda_{Di}$  为第  $i$  个组成单元可检测的故障率 ( $\lambda_{Di} = \lambda_i \gamma_{MFDi}$ )。

2) 并联系统的任务测试性数学模型。

当系统任务测试性框图的结构是并联时, 在任务过程中, 只要有一个组成单元是完好的, 则系统任务就可以继续执行。但是, 其各组成单元的故障检测率和故障隔离率有可能是不相同的, 例如某型护卫舰有 2 部不同型号的导航雷达, 在执行导航任务时, 只要有一部雷达能工作, 任务就能完成, 否则, 任务就会失败。但是这 2 部雷达是不同型号的, 其故障检测率和故障隔离率也不相同; 因此, 从任务测试性角度考虑, 可以选取其组成单元中测试性指标值最大的作为系统的测试性指标值, 则其任务故障检测率为

$$\gamma_{MFDs} = \max_i \{\gamma_{MFDi}\} \times 100\% \quad (5)$$

式中:  $\gamma_{MFDs}$  为并联系统的 MFDR 值;  $\gamma_{MFDi}$  为并联系统第  $i$  个组成单元的 MFDR 值。

同理, 其任务故障隔离率为

$$\gamma_{MFI_s} = \max_i \{\gamma_{MFI_i}\} \times 100\% \quad (6)$$

式中:  $\gamma_{MFI_s}$  为并联系统 MFIR 值;  $\gamma_{MFI_i}$  为并联系统第  $i$  个组成单元的 MFIR 值。

3) 混联系统的任务测试性数学模型。

当系统任务测试性框图的结构是混联时, 即系统由  $m(m \geq 0)$  个串联单元和  $n(n \geq 0)$  个并联单元组成, 可以将各并联单元看作系统的一个串联点, 先计算其检测和隔离值, 然后与其他串联单元一起计算系统总的检测和隔离值; 因此, 系统的任务故障检测率为:

$$\gamma_{MFDs} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i \gamma_{MFDi} + \sum_{j=1}^n \lambda_j \cdot \max_k \{\gamma_{MFDjk}\}}{\sum_{p=1}^{m+n} \lambda_p} \times 100\% \quad (7)$$

式中:  $\gamma_{MFDs}$  为混联系统 MFIR 值;  $\gamma_{MFDi}$  为混联系统串联单元中第  $i$  个组成单元的 MFIR 值;  $\gamma_{MFDjk}$  为混联系统第  $j$  个并联单元中第  $k$  个组成单元的 MFIR 值;  $\lambda_p$  为第  $p$  个串联单元可检测的故障率(混联系统中的一个并联单元可以整体看作是其中的 1 个串联单元)。

系统的任务故障隔离率为

$$\gamma_{MFI_s} = \frac{\sum \lambda_{Dp} \gamma_{MFIp}}{\lambda_{Ds}} = \frac{\sum \lambda_{Dp} \gamma_{MFIp}}{\sum \lambda_{Dp}} \times 100\% \quad (8)$$

式中:  $\gamma_{MFI_s}$  为混联系统 MFIR 值;  $\gamma_{MFIp}$  为第  $p$  个组成单元的 MFIR 值;  $\lambda_{Ds}$  为混联系统可检测的故障率 ( $\lambda_{Ds} = \lambda_s \gamma_{MFDs}$ );  $\lambda_{Dp}$  为第  $p$  个组成单元可检测的故障率 ( $\lambda_{Dp} = \lambda_p \gamma_{MFDp}$ ,  $1 \leq p \leq m+n$ )。

4 验证

以某型潜艇的燃油分系统进行任务测试性建模验证分析, 该燃油分系统的相关情况见参考文献 [15]。通过分析可知: 该燃油分系统在执行任务过程中为混联系统, 其结构见图 3, 各单元的测试性数据见表 1。

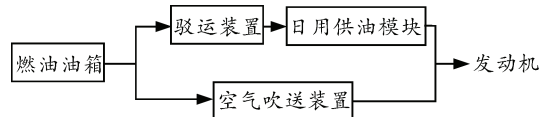


图 3 燃料分系统结构图

表 1 单元故障率及故障检测率

项目	$a_1$ 燃油 油箱	$ba_1$ 驳 运装置	$ba_2$ 日用供 油模块	$b_2$ 空气吹送 装置
故障率	0.001 2	0.002 7	0.003 6	0.001 4
测试性指标	0.940 0	0.930 0	0.950 0	0.970 0

通过所建立的任务测试性模型进行计算, 将数据代入公式 (3)、(5)、(7) 中, 可得该燃油分系统任务过程中故障检测率为 0.96; 而通过固有测试性数学模型进行计算, 计算过程可参考文献 [16] 中方法, 可得该燃油分系统的故障检测率为 0.94。通过分析该燃油系统结构图及任务过程实际情况, 可以得出: 在执行任务过程中, 由于燃油可通过 2 个分路输送到发动机, 其任务测试性指标应该大于其固有测试性指标; 因此, 文中所建立的模型是符合实际情况的。

5 结论

笔者对复杂可修系统任务测试性参数进行了分析, 选取了任务故障检测率和任务故障隔离率作为任务测试性的度量参数, 分析了复杂可修系统任务测试性的特点; 通过分析考虑测试性的系统功能层次结构, 建立了复杂可修系统的任务测试性物理模型; 依据任务测试性物理模型和测试性基本数学模型, 建立了串并混联的任务测试性模型, 最后通过实例进行了验证分析。分析结果表明: 该模型贴合实际, 能够有效地计算系统的任务故障检测率和任务故障隔离率, 便于开展系统的计算机仿真编程。

参考文献：

[1] 石君友, 田仲, 侯文魁, 等. 测试性设计分析与验证[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.  
 [2] 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.  
 [3] 张勇. 装备测试性虚拟验证关键技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.  
 [4] 刘刚, 黎放, 狄鹏. 软件可测试性评估框架构建[J]. 兵工自动化, 2014, 33(8): 90-92.  
 [5] 国防科学技术工业委员会. GJB 2547-95 装备测试性大纲[S]. 北京: 国防科工委军标出版社, 1995.  
 [6] 封会娟, 刘祥凯, 唐彦峰, 等. 基于 Matlab 的导弹营基本任务维修性仿真[J]. 战术导弹技术, 2012(4): 48-52.  
 [7] 路红山, 许建, 张京伟, 等. 潜艇动力系统任务维修性建模[J]. 中国舰船研究, 2008, 4(3): 10-14.  
 [8] SIMPSON W R, SHEPPARD J W. System test and diagnosis[M]. USA: Kluwer Academic Publisher, 1994: 53-55.  
 [9] Sujoy S, Sulakshana S N, Venkata N, et al.

Simulation-based testability analysis and fault diagnosis[C]. Proceedings of the IEEE AUTOTESTCON, 1996: 136-148.  
 [10] Simpson W R, Sheppard J W. System complexity and integrated diagnostics[J]. IEEE Design & Test of Computers, 1991, 8(4): 25-38.  
 [11] Peng Y, James A R. Abductive Inference Model for Diagnostic Problem-solving[Z]. New York: Springer-Verlag, 1990.  
 [12] 刘刚, 黎放, 胡斌. 基于相关性模型的舰船装备测试性分析与建模[J]. 海军工程大学学报, 2012, 24(8): 46-51.  
 [13] 钱彦岭. 测试性建模技术及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2002.  
 [14] 苏永定, 刘冠军, 邱静, 等. 基于 UML 的复杂装备测试性需求建模[J]. 测控技术, 2010, 29(8): 93-97.  
 [15] 路红山, 许建, 张京伟, 等. 潜艇动力系统任务维修性建模[J]. 中国舰船研究, 2008, 3(4): 10-14.  
 [16] 刘刚, 吕建伟, 胡斌. 复杂装备测试性建模问题研究[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(5): 137-140.

\*\*\*\*\*

(上接第 29 页)

表 4 各底事件重要度

底事件名称	概率重要度	结构重要度
DSP 系统失效	0.999 931 800	0.199 524 500
DC 模块失效	0.999 924 800	0.117 366 500
叠加连接器断路	0.999 924 800	0.117 366 500
时钟晶振失效	0.999 924 800	0.117 366 500
前端稳压模块失效	0.999 922 800	0.093 893 010
D/A 器件失效	0.999 921 800	0.082 156 310
滤波器失效	0.999 920 800	0.070 419 620
后推臂断裂	0.999 918 800	0.046 946 320
电源基准失效	0.999 917 800	0.035 209 710
电缆故障	0.999 917 000	0.025 820 430

从计算结果可看出：各底事件中电子元器件的概率重要度和结构重要度较高，结构件和液压元件的重要度较低，在研制中应重点关注电子元器件。

3 结论

笔者利用故障树分析方法，对发射装置弹射机构无法弹射这一重要故障模式进行了故障树定性和定量分析，确定了导致该故障模式发生的 22 种原因

和原因组合；通过计算得出该故障模式的发生概率为  $9.15 \times 10^{-6}$ ，分析确定了故障树各底事件中电子元器件的重要度较高的结论，明确了研制中需重点关注的环节，对于发射装置研制中关键零部件的控制具有重要意义。

参考文献：

[1] 国防科学技术工业委员会. 故障树分析指南[S]. 1998: 13-47.  
 [2] 龚庆祥. 型号可靠性工程手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007: 155-161.  
 [3] 朱继源. 故障树原理和应用[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989: 223-227.  
 [4] 许耀铭. 液压可靠性工程基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1991: 18-50.  
 [5] Carpignano A, Poucet A. Computer Assisted Fault Tree Construction: A Review of Methods and Concerns[J]. Reliability Engineering and System Safety, 1994, 44: 265-278.