

## 面向装备健康管理的可测性指标研究\*

杨述明, 邱静, 刘冠军, 杨鹏

(国防科技大学装备综合保障技术重点实验室, 湖南长沙 410073)

**摘要:**可测性指标是开展可测性设计、验证和评估的依据。针对传统可测性指标主要用于故障可检测性和故障可隔离性水平评价,不能全面反映面向装备健康管理可测性水平的问题,在定性分析装备健康管理对可测性的本质需求基础上,从全域和瞬态角度提出了五个可测性指标以定量描述面向装备健康管理的可测性水平;并基于故障模式状态矢量给出了可测性指标的分析计算流程。最后以某装备柴油机的机体子系统为案例详细说明了可测性指标的计算过程,应用结果表明所提指标具有一定的可行性和合理性,可以有效指导面向装备健康管理的可测性优化设计。

**关键词:**可测性指标;装备健康管理;需求分析;故障模式状态矢量;分析计算流程

**中图分类号:**TP302 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-2486(2012)01-0072-06

## Research on testability indexes for equipment health management

YANG Shuming, QIU Jing, LIU Guanjun, YANG Peng

(Laboratory of Science and Technology on Integrated Logistics Support, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Testability indexes are the basis of testability design, validation and evaluation. To address the problems that the traditional testability indexes are mainly used to evaluate fault detectability level and fault isolability level, and are unable to describe testability level for equipment health management (EHM) comprehensively, based on the qualitative intrinsic requirements analysis of EHM on testability, five testability indexes were defined from the universe and instantaneous angles to describe the testability level for EHM quantitatively, and the detailed analysis and calculation process of the proposed indexes were presented based on failure mode state vector. A certain diesel engine body subsystem was introduced as a case example to illustrate the testability indexes calculation process, and application results show that the proposed indexes are feasible and rational, and they can guide the testability optimization design for EHM effectively.

**Key words:** testability index; equipment health management; requirements analysis; failure mode state vector; analysis and calculation process

装备健康管理(Equipment Health Management, EHM)系统利用测试信息,结合各种模型和算法来监控、诊断、预测和评估装备健康水平,并结合各种可用资源和约束条件触发最佳维修时机<sup>[1-4]</sup>。EHM系统对于提高装备安全性、可靠性、维修性和经济可承受性,降低全寿命周期费用,实现自主维修、预知维修具有重要意义<sup>[5-6]</sup>。随着健康管理理念的不断成熟,以及故障预测技术、健康评估技术的迅速发展,健康管理必然成为未来装备设计生产和使用的有机组成部分。目前国内国外对EHM的研究主要集中在体系<sup>[7-8]</sup>、方法和模型<sup>[9-11]</sup>等方面,很少关注其前端的信息感知与测试。然而,信息感知与测试是实现EHM的前提和基础<sup>[2-3,12-13]</sup>,应用和研究表明EHM能力

更多地依赖于测试信息而不是所采用的模型和算法<sup>[14]</sup>。

另一方面,传统的装备研制后附加测试与监控手段的方式日益受限。近年来,基于并行思想的可测性设计技术越来越受到人们的关注,其相关支撑技术和工具也不断完善,已在装备故障检测及维修中发挥了重大作用<sup>[15-17]</sup>。面向EHM系统需求,更加关注感知与测试前端,在装备设计时并行进行可测性设计被认为是提高装备健康管理能力的根本途径。

可测性指标是开展可测试优化设计、评估和验证的依据,传统的可测性指标如故障检测率(FDR)和故障隔离率(FIR)主要描述可测性对故障诊断的支持程度,无法描述可测性对EHM系

\* 收稿日期:2011-10-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175502)

作者简介:杨述明(1982-),男,四川渠县人,博士研究生,E-mail:ysmcsu@163.com;

邱静(通信作者),男,教授,博士,博士生导师,E-mail:qiujiang@nudt.edu.cn

统尤其是故障预测和健康评估的支持程度。基于此,本文详细研究了面向 EHM 的可测性指标,为开展面向 EHM 的可测性设计与优化奠定理论基础。

## 1 基本理论

健康状态(Health State, HS)是健康管理领域中经常使用的概念,但目前没有标准化定义,主要有两种认识。一种侧重于系统级整体健康水平的描述,即健康状态是对系统从完全正常到完全失效这一客观退化过程的主观描述,故障模式(Failure Mode, FM)及其演化过程是导致退化过程发生的本质原因,这种理解与可靠性领域中的剩余使用寿命(Remaining Useful Life, RUL)相对应。另一种侧重于故障模式级演化过程的描述,即把故障演化过程(正常→性能下降→功能丧失)划分为更多的状态(健康状态),而不是传统的正常/失效两分法划分,失效是故障演化过程的最终状态,有时也称为故障,这种理解与可靠性领域中的失效时间(Time To Failure, TTF)相对应。两种观点如图 1 所示,在系统由单组件单故障模式构成的特殊情形下,两种观点等价。

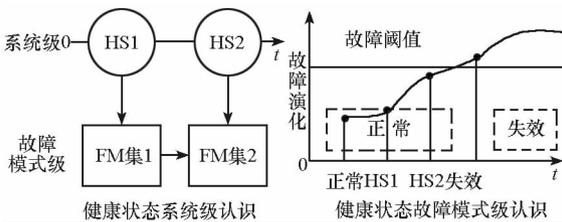


图1 健康状态的两种认识

Fig. 1 The two understandings for health state

EHM 系统在实际应用中往往根据装备的整体性能进行决策调控(视情维修、预知维修、降级运行、冗余管理等),因此,在面向 EHM 可测性理论中基于第一种认识给出健康状态的定义。

**定义 1** 健康状态是装备的整体状态,描述了装备在执行其设计功能时所表现出的能力。

健康状态在研究中通常有离散和连续两种表现形式,离散形式用  $n+1$  个健康状态描述退化过程,即  $S = \{1, 2, \dots, n+1\}$ , 1 表示完全健康,  $n+1$  表示完全失效。连续形式用健康指数(Health Index, HI)描述,它是把装备健康水平映射成 0 到 1 之间的值,即  $S \in [0, 1]$ , 0 表示完全健康, 1 表示完全失效。

在健康状态基础上给出健康状态评估(Health State Evaluation, HSE)的定义。

**定义 2** HSE 是一个由故障模式空间到特征

空间再到健康状态空间的非线性综合决策过程,通常简称为健康评估(Health Evaluation, HE)。可以形式化表示成  $S = \Phi(\text{FM}, \text{KL})$ , KL 为装备领域知识,通常包括装备的结构、功能、行为和运作(外部环境、负载强度、工作模式、工作时间等)。

基于健康状态的定义和健康状态退化过程的离散表达,引入故障模式状态矢量(Failure Mode State Vector, FMSV)的定义。

**定义 3** FMSV 是与装备离散健康状态空间一一相对应的布尔值矢量,若装备处于某个健康状态时,该故障模式存在,相应的位置为 1,反之为 0。

FMSV 描述了故障模式发生、发展的动态演化过程,可以很好地表示缓变故障和瞬态故障(不包括间歇故障)。例如:某装备系统的健康状态空间为  $S = \{1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ , 在健康状态 2 时出现裂纹,随着系统运行,裂纹逐渐增大导致装备失效,则裂纹的故障模式状态矢量表示为  $FMSV_1 = [0, 1, 1, 1, 1, 1]$ ;若系统在健康状态 3 时出现了磨损,但在健康状态 6 时演变成剥落,则磨损的故障模式状态矢量表示为  $FMSV_2 = [0, 0, 1, 1, 1, 0]$ ,而剥落的故障模式状态矢量表示为  $FMSV_3 = [0, 0, 0, 0, 0, 1]$ ,显然,剥落为瞬态故障。再比如在健康状态 4 和 5 分别发生了瞬态故障模式断裂和开路,则相应的故障模式状态矢量为  $FMSV_4 = [0, 0, 0, 1, 0, 0]$ 和  $FMSV_5 = [0, 0, 0, 0, 1, 0]$ 。

## 2 面向装备健康管理的可测性指标建模

### 2.1 装备健康管理对可测性的本质需求分析

理清装备健康管理对可测性的本质需求,才能在现有可测性指标基础上,开展针对性和拓展研究。直观地讲,可测性构成了 EHM 能力的一部分,具有良好可测性的装备可以为 EHM 提供充分的状态信息,因此可以从状态信息获取的角度进行本质需求分析。

EHM 系统中在工作中监控重要故障模式、检测和隔离故障、对关键组件进行故障预测,在监控、诊断和预测基础上,评估装备健康状态,最后根据健康状态评估结果进行决策调控。由此可以看出, EHM 的最高要求是实现装备健康状态可评估,从而为决策调控管理提供直接指导。状态监控、故障诊断、故障预测均是较低层次要求,构成健康状态评估的输入。因此,面向 EHM 的可测性应该保证装备的健康状态可评估。根据健康状态和健康状态评估的定义,给出健康状态空间、故

障模式空间和广义测试空间之间的层次逻辑关系,如图 2 所示。

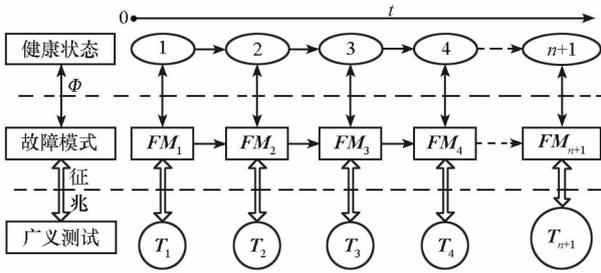


图 2 健康状态对可测性的本质需求分析

Fig. 2 Intrinsic requirements analysis of health state on testability

图 2 中,健康状态空间采用有限状态马尔可夫过程描述,即  $S = \{1, 2, 3, 4, \dots, n+1\}$ ;  $FM_i$  表示在健康状态  $i$  时的故障模式空间,  $T_i$  表示在健康状态  $i$  时的测试空间 ( $i = 1, 2, \dots, n+1$ )。健康状态空间与故障模式空间通过健康状态评估算法  $\Phi$  关联,故障模式空间和广义测试空间 (BIT, ATE, 传感器等)通过故障征兆关联。从图 2 中可以看出,要保证装备健康状态可评估,可测性 ( $T_i$ ) 应保证在各个健康状态下的故障模式空间 ( $FM_i$ ) 可观测。而复杂装备的故障模式具有如下特点:

**情形 1** 故障模式贯穿装备健康状态退化全过程,并且可以用同一种测试手段检测,如烧损、泄漏,一旦发生(不维修)就一直存在,可通过检测金属磨粒进行测试。

**情形 2** 故障模式贯穿装备健康状态退化全过程,但在不同阶段需用不同的测试手段,如裂纹,在早期阶段用涡流或超声测试,在后期阶段可用加速度传感器测试。

**情形 3** 故障模式在装备健康状态退化全过程中具有演化性,比如,在某个健康状态时的裂纹可演变成后续某个健康状态时的破裂。

**情形 4** 故障模式是在装备某个健康状态时产生的。

由此可以得到如下结论:

**结论 1** 由于缓变故障模式的存在(如情形 1、情形 2),  $\bigcap_{i \in S} FM_i$  可能非空。

**结论 2** 故障模式集具有动态性,其原因可能为:新健康状态下产生新故障模式(情形 4);故障模式演化量变到质变产生新故障模式,如裂纹导致断裂,磨损导致剥落(情形 3);由于故障传播、耦合、并发等产生新故障模式,统称诱发性故障。

广义测试与故障模式通过故障征兆关联。由

于测试与征兆、征兆与故障模式均不是简单的线性映射关系,因此测试与故障模式间是多对多的映射关系,即存在一个故障模式可以被多个测试检测和一个测试可以检测多个故障模式的情形。再结合故障模式的分析,可以得出如下结论:

**结论 3** 由于测试与故障模式间非线性映射关系的存在,  $\bigcap_{i \in S} T_i$  可能非空,记装备健康状态退化过程中整个测试空间为  $T$ ,  $T = \bigcup_{i \in S} T_i$ 。

**结论 4** 测试-故障模式关联关系存在动态性,其原因可能为:故障模式集的动态性;广义测试对故障模式的不同退化状态具有不同的真/假检测关系。

综上所述,EHM 对可测性的要求主要体现在健康状态评估对可测性的要求,再根据分析结论 1~4 可以得出,保证装备健康状态可评估,本质需求就是要保证故障模式及其演化过程具有充分的可观性。下面分两种情形进行进一步分析:

(1) 系统由单组件单故障模式构成,显然,故障模式的演化过程就是系统健康状态的退化过程,保证对该故障模式及其演化具有充分的可观性就能保证系统的健康状态可评估。

(2) 系统由多组件多故障模式构成,根据健康状态评估的定义,健康状态评估的输入主要有故障模式和装备的领域知识。在装备设计阶段,装备的结构、功能往往由装备的作战任务、作战要求确定,而装备的运作由装备的任务剖面、应用环境确定。因此,要保证健康状态可评估,在设计阶段主要是保证装备的故障模式空间具有充分的可观性。

诊断和预测是观测故障模式状态的两个过程,诊断是基于观察到的征兆对当前(和过去)状态进行评估,而预测是对未来状态的评估。因此,故障可观的含义应包括故障可检测、故障可隔离和故障可预测。为了描述可测性对故障可检测、故障可隔离和故障可预测的支持程度,拟从全域和瞬态角度提出可测性指标来定量描述。

## 2.2 面向装备健康管理的可测性指标形式化描述

### 2.2.1 可测性指标一般要求

面向 EHM 的可测性指标构建是否科学、合理,直接关系到面向 EHM 可测性评价的真实性和全面性。指标构建一般遵循如下原则:完整性,指标应能全面反映面向 EHM 的可测性水平;简洁性,指标应具有明确的物理含义,便于计算、评估和验证;一致性,指标在装备的各个层次具有一致的物理含义和计算方法;指导性,指标应具有指

导可测性设计、优化的功能。

### 2.2.2 可测性指标定义

基于定性分析,结合指标构建基本原则,从横向角度提出全域故障可检测率(Universe Fault Detectable Rate, UFDR)、全域故障可隔离率(Universe Fault Isolable Rate, UFIR)和全域故障可预测率(Universe Fault Predictable Rate, UFPR)来描述可测性对装备全域故障的可观性。先给出UFDR和UFIR的定义<sup>[16]</sup>。

**定义4** UFDR为在规定时间内,由广义测试可正确检测到的故障数与装备的故障总数之比。

$$UFDR = N_D / N_T \quad (1)$$

$N_D$ 为可正确检测的故障数, $N_T$ 为装备的故障总数。

**定义5** UFIR为在规定时间内,由广义测试可正确隔离到不大于规定可更换单元数的故障数与同一时间内可检测到的故障数之比。

$$UFIR = N_L / N_D \quad (2)$$

$N_L$ 为可隔离到小于等于 $L$ 个可更换单元的故障数, $N_D$ 为可正确检测的故障数。

故障的可预测性取决于两个基本因素:一是客观因素,即故障是缓变故障;二是必要因素,即故障为关键故障或关键重要件的故障。由此给出可能可预测故障(Possible Predictable Fault, PPF)的定义。

**定义6** PPF为具有缓变性的关键故障或关键重要件的故障。

定义6仅从故障本身的属性说明了故障可预测性应具备的基本条件,除此之外,故障的可预测性还与测试对故障的检测特性有关。如果一个故障在临近失效或失效后才被检测到,故障预测变得没有意义;同时,如果测试对故障的演化过程不具有可跟踪性,(数据驱动的)故障预测则无法进行。由此给出可预测故障(Predictable Fault, PF)的定义。

**定义7** PF为故障早期状态可检测且故障演化过程可跟踪的PPF。

**定义8** UFPR为在规定时间内,由广义测试可正确确定的可预测故障数与装备的可能可预测故障总数之比。

$$UFPR = N_p / N_{pp} \quad (3)$$

$N_p$ 为可正确确定的可预测故障数; $N_{pp}$ 为装备的可能可预测故障总数。

基于定性分析,结合指标构建基本原则,从纵向角度提出瞬态故障可检测率(Instantaneous Fault Detectable Rate, IFDR)和瞬态故障可隔离率(Instantaneous Fault Isolable Rate, IFIR)来描述可

测性对装备在某个健康状态时故障模式空间的可观性。

**定义9** IFDR为装备在某个健康状态时,由广义测试可正确检测到的故障数与装备在该健康状态时的故障总数之比。

设任意时刻 $t$ ,装备的健康状态为随机变量 $X(t)$ ,则此时的IFDR表示为

$$IFDR_t = N_{D_t} / N_{T_t} \quad (4)$$

$N_{D_t}$ 为装备健康状态为 $X(t)$ 时的可正确检测故障数, $N_{T_t}$ 为装备健康状态为 $X(t)$ 时的故障总数。

**定义10** IFIR为装备在某个健康状态时,由广义测试可隔离到不大于规定可更换单元数的故障数与该健康状态时的可检测故障数之比。

$$IFIR_t = N_{L_t} / N_{D_t} \quad (5)$$

$N_{L_t}$ 为装备健康状态为 $X(t)$ 时的可隔离到小于等于 $L$ 个可更换单元的故障数, $N_{D_t}$ 为装备健康状态为 $X(t)$ 时的可正确检测故障数。

### 2.2.3 可测性指标间关联关系分析

从全域和瞬态角度描述面向EHM的可测性水平是合理、全面的。正如定性分析指出,缓变故障在不同的健康状态所用的测试手段可能不同,此外,缓变故障随着时间从量变到质变演变成新的故障模式,全域可测性指标无法刻画这些情形,而瞬态可测性指标则能反映这些细致变化。传统的可测性指标如FDR和FIR在进行分析计算时,通常把演化故障算作一个故障模式,这样处理忽略了演变故障不同状态可能对应不同测试手段的事实。若在分析演变故障时,增加“性能下降”故障模式,则FDR和FIR可在一定程度上反映故障演化过程与测试的关联关系。

装备在设计阶段,可用知识有限,很难对装备的健康状态做出明确的划分,并且装备在某个健康状态时的故障模式空间的界限也不明确。提出瞬态可测性参数的含义旨在从理论上清晰地描述和刻画面向EHM的可测性水平,对故障演化过程有一个完整的认识,可以作为装备使用、验证过程的评价指标。在早期设计阶段,主要还是以全域可测性指标为指导进行优化设计。

## 3 基于故障模式状态矢量的可测性指标计算流程

FMSV的引入可以很好地表示故障的动态演化过程,并且也能清晰地表达故障早期状态的可检测性。基于FMSV的可测性指标分析计算流程如图3所示。

运算规则1:  $FMSV - T$ 相关性矩阵 $B$ 的行

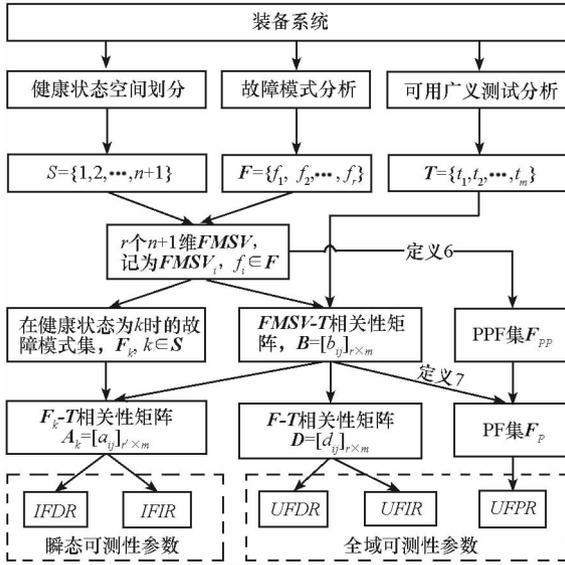


图 3 可测性指标计算分析流程

Fig. 3 The analysis calculation process of testability indexes

对应  $r$  个  $FMSV$ , 列对应  $m$  个测试, 其元素  $b_{ij}$  为  $n+1$  元组, 用  $b_{ij}(k)$  表示  $b_{ij}$  的第  $k$  个元素,  $k \in S$ 。若测试  $t_j$  能够检测故障  $f_i$  的第  $k$  个状态, 则  $b_{ij}(k) = 1$ , 否则,  $b_{ij}(k) = 0$ 。

运算规则 2:  $F-T$  相关性矩阵  $D$  的行对应  $r$  个故障模式, 列对应  $m$  个测试, 其元素  $d_{ij}$  为布尔值, 若测试  $t_j$  能够检测故障  $f_i$ , 则  $d_{ij} = 1$ , 否则  $d_{ij} = 0$ 。  $d_{ij}$  与  $b_{ij}$  的关系为  $d_{ij} = \bigcup_{k \in S} b_{ij}(k)$ ,  $\cup$  为逻辑或运算。

表 2  $FMSV-T$  关联关系

Tab. 2  $FMSV-T$  dependencies

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
$f_1 [0, 1, 0, 0, 0]$	(0, 1, 0, 0, 0)	(0, 1, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)
$f_2 [1, 1, 1, 1, 1]$	(0, 0, 1, 1, 1)	(1, 1, 1, 1, 1)	(1, 1, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 1, 1)
$f_3 [0, 1, 1, 1, 0]$	(0, 1, 1, 1, 0)	(0, 1, 0, 0, 0)	(0, 0, 1, 0, 0)	(0, 0, 0, 1, 0)	(0, 0, 0, 1, 0)
$f_4 [0, 0, 1, 1, 0]$	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 1, 0)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 1, 0)
$f_5 [0, 1, 1, 1, 1]$	(0, 0, 0, 1, 1)	(0, 1, 1, 0, 0)	(0, 1, 1, 1, 1)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 1)
$f_6 [0, 0, 0, 0, 1]$	(0, 0, 0, 0, 1)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 1)	(0, 0, 0, 0, 0)	(0, 0, 0, 0, 1)

根据运算规则 2 得到  $F-T$  关联关系如表 3 所示。

表 3  $F-T$  关联关系

Tab. 3  $F-T$  dependencies

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
$f_1$	1	1	0	0	0
$f_2$	1	1	1	0	1
$f_3$	1	1	1	1	1
$f_4$	0	0	1	0	1
$f_5$	1	1	1	0	1
$f_6$	1	0	1	0	1

运算规则 3: 在健康状态  $k$  时的故障模式集为  $F_k = \{f_i | f_i \in F, FMSV_i(k) = 1\}$ ,  $k \in S$ 。

运算规则 4:  $F_k-T$  相关性矩阵  $A_k$  的行对应  $r' = |F_k|$  个故障, 列对应  $m$  个测试, 其元素  $a_{ij}$  为布尔值, 若测试  $t_j$  能检测故障  $f_i, f_i \in F_k$ , 则  $a_{ij} = 1$ , 否则  $a_{ij} = 0$ , 并且有  $a_{ij} = b_{ij}(k)$ 。

### 4 案例分析

以某装备柴油机的机体子系统为案例进行说明, 该系统共有 6 个故障模式、5 个可用测试, 划分为 5 个健康状态, 即  $S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ 、 $F = \{f_1, f_2, f_3, f_4, f_5, f_6\}$ 、 $T = \{t_1, t_2, t_3, t_4, t_5\}$ , 假设所有故障模式的故障率相同。由健康状态空间划分和故障模式分析, 得到 6 个 5 维故障模式状态矢量, 如表 1 所示。

表 1 机体子系统故障模式状态矢量

Tab. 1 Failure mode state vectors of the diesel engine body subsystem

故障模式	状态矢量	故障模式	状态矢量
$f_1$	[0, 1, 0, 0, 0]	$f_4$	[0, 0, 1, 1, 0]
$f_2$	[1, 1, 1, 1, 1]	$f_5$	[0, 1, 1, 1, 1]
$f_3$	[0, 1, 1, 1, 0]	$f_6$	[0, 0, 0, 0, 1]

根据运算规则 3 可得:  $F_1 = \{f_2\}$ 、 $F_2 = \{f_1, f_2, f_3, f_5\}$ 、 $F_3 = \{f_2, f_3, f_4, f_5\}$ 、 $F_4 = \{f_2, f_3, f_4, f_5\}$ 、 $F_5 = \{f_2, f_5, f_6\}$ 。根据运算规则 1 得到  $FMSV-T$  关联矩阵如表 2 所示。

根据表 3, 再根据定义 4 和定义 5 可以计算得出  $UFDR = 100\%$ ,  $UFIR = 66.7\%$ 。

根据定义 6 得  $F_{PP} = \{f_2, f_3, f_5\}$ , 根据表 2 并结合定义 7 得  $F_P = \{f_2, f_3, f_5\}$ , 根据定义 8 得  $UFPR = 100\%$ 。

根据运算法则 4 得在健康状态 1 时的  $F_1-T$  关系如表 4 所示, 根据定义 9 和定义 10 可得  $IFDR = 100\%$ ,  $IFIR = 100\%$ 。

表 4  $F_1 - T$  关联关系  
Tab. 4  $F_1 - T$  dependencies

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
$f_2$	0	1	1	0	0

在健康状态 2 时的  $F_2 - T$  关系如表 5 所示, 由此可得  $IFDR = 100\%$ ,  $IFIR = 50\%$ 。

表 5  $F_2 - T$  关联关系  
Tab. 5  $F_2 - T$  dependencies

	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$t_4$	$t_5$
$f_1$	1	1	0	0	0
$f_2$	0	1	1	0	0
$f_3$	1	1	0	0	0
$f_5$	0	1	1	0	0

同理可得在健康状态 3 时的瞬态可测性指标:  $IFDR = 75\%$ ,  $IFIR = 100\%$ 。

在健康状态 4 时的瞬态可测性指标:  $IFDR = 75\%$ ,  $IFIR = 100\%$ 。

在健康状态 5 时的瞬态可测性指标:  $IFDR = 100\%$ ,  $IFIR = 33.3\%$ 。

从案例的计算过程更加清晰地认识到所提指标从全域和瞬态的角度全面刻画了可测性对故障模式及其演化过程可观性的支撑程度,从而为健康状态评估进而为装备健康管理提供充分的信息支持。

## 5 结 论

大量研究和应用表明,可测性构成了 EHM 能力的一部分,面向故障检测和隔离的可测性技术不能满足 EHM 对可测性的需求,开展面向 EHM 的可测性技术成为必然发展趋势。而理清面向 EHM 的可测性技术与传统可测性技术的本质区别、建立面向 EHM 的可测性指标是研究面向 EHM 可测性技术的基础。本文首先深入地分析了 EHM 对可测性的本质需求,基于此,从全域和瞬态角度提出了面向 EHM 的可测性指标,并给出了指标计算流程和方法。案例计算与分析表明所提指标具有一定的可行性和有效性,为后续开展面向 EHM 的可测性建模、优化设计等奠定理论基础。

## 参考文献 (References)

[1] Michael G P. Prognostics and health management of electronics[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.  
[2] Cheng S, Azarian M, Pecht M. Sensor systems for prognostics and health management [J]. Sensors, 2010, 10(6): 5774

-5797.  
[3] Cheng S, Tom K, Thomas L, et al. A wireless sensor system for prognostics [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(4): 856-862.  
[4] Dong M, Peng Y. Equipment PHM using non-stationary segmental hidden semi-Markov model [J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2011, 27(3): 581-590.  
[5] Kalgren P W, Byington C S, Roemer M J, et al. Defining PHM—a lexical evolution of maintenance and logistics [C]//IEEE Systems Readiness Technology Conference Proceedings, Anaheim, CA, USA, 2006: 353-358.  
[6] Orsagh R F, Brown D W, Kalgren P W, et al. Prognostic health Management for avionic systems [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, Big Sky, MT, 2006: 1-7.  
[7] Prosser W H, Allison S G, Woodard S E, et al. Structural health management for future aerospace vehicles [C]//Proc. of the 2nd Australasian Workshop on Structural Health Monitoring, 2004: 1-8.  
[8] Keller K W, Swearingen K. An architecture to implement integrated vehicle health management system [C]//IEEE Systems Readiness Technology Conference Proceedings, 2001: 2-15.  
[9] Byington C S, Roemer M J, Galie T. Prognostic enhancements to diagnostic systems for improved condition-based maintenance [C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2002: 2815-2824.  
[10] Brotherton T, Jahns G, Jacobs J, et al. Prognosis of faults in gas turbine engines [C]//IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2000:163-171.  
[11] Roemer M J, Kacprzynski G J, Orsagh R F. Assessment of data and knowledge fusion strategies for prognostics and health management [C]// IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2001: 2979-2988.  
[12] Kumar S, Dolev E, Pecht M. Parameter selection for health monitoring of electronic products [J]. Microelectronics Reliability, 2010, 50(2): 161-168.  
[13] Santi L M, Sowers T S, Aguilar R B. Optimal sensor selection for health monitoring systems [R]. NASA/TM-2005-213955, 2005.  
[14] Zhang G F. Optimum sensor localization/selection in a diagnostic/prognostic architecture [D]. Georgia: Georgia Institute of Technology, 2005.  
[15] Gong Y, Jing X N, Chen Y X, et al. Real-time fault diagnosis for flight control system based on multi-signal flow graph [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 13(6): 89-92.  
[16] 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.  
TIAN Zhong, SHI Junyou. System testability design, analysis and verification [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003. (in Chinese)  
[17] 杨鹏. 基于相关性模型的诊断策略优化设计技术[D]. 长沙:国防科技大学, 2008.  
YANG Peng. Optimization technology of design for diagnostic strategy based on dependency model [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008. (in Chinese)