

基于多源信息加权融合的研制阶段测试性评估方法

邓 露¹, 许爱强², 席 靛², 黄权欣³

(海军航空工程学院 1. 研究生三队; 2. 飞行器检测与应用研究所; 山东 烟台 264001, 3. 91055 部队, 浙江 台州 318500)

摘要: 装备在研制阶段通常缺乏有效的试验和使用数据, 其测试性水平往往难以评估, 针对上述问题, 提出基于多源信息加权融合的研制阶段测试性评估方法; 方法综合考虑了装备研制阶段可利用的仿真信息、专家经验信息以及类似装备的历史信息, 构建了以 3 类信息为基础的装备测试性指标值密度分布函数, 同时依据可信度原则确定了 3 类信息的融合权重; 在此基础上, 利用证据折扣组合方法评估装备当前的测试性水平; 最后, 通过案例应用证明了该方法的有效性。

关键词: 研制阶段; 多源信息; 加权融合; 测试性评估; 证据折扣

Testability Evaluation Method Based on Multi-source Information Weighted Fusion in Development Phase

Deng Lu, Xu Aiqiang, Xi Liang, Huang Quanxin

(1. Third Graduate Student team; 2. Research Institute of Aircraft Detection and Application, Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 3. Unit 91055, Taizhou 318500, China)

Abstract: In the phase of equipment development, there is often short of effective test and application data, and the level of its testability is difficult to evaluate. Aiming at the above-mentioned problem, a testability evaluation method based on multi-source information weighted fusion in development phase is proposed. In the method information such as simulation information, expert information and historical information of similar equipment which can be used of testability evaluation in the development phase is synthetically considered. Test indexes density functions are constructed by the three kinds of information, while fusion weight of the three kinds of information is confirmed by the credibility. On this basis, the current test level of the equipment is evaluated by evidence discount combination method. At last, an example is given to show the validity of the proposed method.

Keywords: development phase; multi-source information; weighted fusion; testability evaluation; evidence discount

0 引言

测试性是系统及设备的一种设计特性, 用于描述和确定系统的故障检测和隔离能力^[1]。具有良好测试性水平的系统和设备可以及时、快速地检测与隔离故障, 提高执行任务的可靠性与安全性, 缩短故障检测与隔离时间, 提高系统可用性, 降低系统使用保障费用^[2-3]。然而, 装备研制阶段的特点是没有全状态的初样机或正样机, 无法采用传统的方法对其测试性进行验证试验与评价, 所以迫切需要在装备研制阶段通过科学、合理的测试性评估, 暴露测试性设计的问题, 提高装备的测试性水平, 为装备研制转入定型阶段提供科学的决策依据。

目前, 装备研制阶段的测试性评估一般采用模型预计的方法, 如刘刚^[4]、林志文^[5-6]、杨智勇^[7]、周平^[8]等基于相关性模型和多信号模型对雷达、舰艇等装备的测试性指标进行分析

和评估。王成刚^[9]、连光耀^[10]等研究了基于贝叶斯网络的测试性指标分析和评估方法, 提出采用概率信息来确定系统不确定相关矩证。石君友等^[11]提出了基于研制阶段数据的评估验证方法, 介绍了研制阶段数据评估验证方法的含义以及该方法适用的测试性参数类型。张勇等^[12]提出了基于虚拟样机的测试性评估方法。常春贺等^[13]提出基于试验和预计的雷达装备测试性评估方法, 该方法结合雷达装备功能结构和研制工作特点, 将雷达系统按沿用、改进和新研系统进行划分, 并分别开展测试性评估研究。

在上述研究的基础上, 本文站在使用方的角度, 以装备研制阶段的测试性评估为研究对象, 提出了一种基于多源信息加权融合的研制阶段测试性评估新思路。

1 多源信息分析

装备在研制阶段可供测试性评估分析的信息主要包括: 仿真信息、专家经验信息和类似产品的历史信息。

1.1 仿真信息

假装备利用建立的仿真模型共进行了 m 次试验, 每次试验的结果为 (n_i, c_i) , 其中, n_i 为第 i 次试验的样本, c_i 为第 i 次试验的失效次数, $i = 1, 2, \dots, m$ 。根据经典概率统计理论可

收稿日期: 2013-11-16; 修回日期: 2014-01-29。

基金项目: 总装武器装备预研基金(9140A27020212JB14311)。

作者简介: 邓 露(1986-), 男, 安徽人, 博士, 主要从事装备测试性验证试验与评估技术的研究。

以得到第 i 次试验的测试性水平估计值 \hat{q}_i 为

$$\hat{q}_i = \frac{n_i - c_i}{n_i} \quad (1)$$

m 次试验求得的测试性期望 $E(q)$ 和方差为

$$\begin{cases} E(q) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{q}_i \\ \text{Var}(q) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (\hat{q}_i - \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \hat{q}_i)^2 \end{cases} \quad (2)$$

以 Beta 分布作为先验分布, 令仿真信息确定的测试性指标 q 服从 Beta (a, b) 分布, 参数 a 和 b 可以通过式 (3) 求解。

$$\begin{cases} \min(\text{Var}(q) - \text{Var}(a, b))^2 \\ \text{s. t. } \begin{cases} E(a, b) = E(q) \\ a > 0, b > 0 \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $\text{Var}(a, b)$ 为 Beta (a, b) 分布的二阶矩值, $E(a, b)$ 为 Beta (a, b) 分布均值。

则根据仿真信息确定的测试性指标值分布密度函数为:

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{B(a, b)} x^{a-1} (1-x)^{b-1}, & 0 < x < 1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

1.2 专家经验信息

对于研制阶段的装备来说, 测试性专家根据自身经验知识会以连续区间的形式给出装备的测试性水平。设共有 k 位专家, 不同专家的权重不同, 第 i 位专家的权重为 ω_i^0 , 其中 $\sum_{i=1}^k \omega_i^0 = 1$, 给出的测试性估计区间为 $[q_{i,L}, q_{i,H}]$ 。则 k 位专家给出的测试性评估均值、最小值和最大值为:

$$\begin{cases} q_{\min} = \min(q_{1,L}, q_{2,L}, \dots, q_{k,L}) \\ q_{\max} = \max(q_{1,H}, q_{2,H}, \dots, q_{k,H}) \end{cases} \quad (5)$$

记集合 $A = \{q_{1,L}, \dots, q_{k,L}, q_{1,H}, \dots, q_{k,H}\}$, 按升序排列集合 A 中的元素得到集合 $A' = \{q'_1, q'_2, \dots, q'_{2k}\}$, 显然有 $q'_1 = q_{\min}$ 和 $q'_{2k} = q_{\max}$ 。逐一比对集合 A' 中的任意两个相邻的元素, 如果相同, 则删除其中一个元素, 如果不同, 则不做处理。假设处理后得到集合 $A' = \{q'_1, q'_2, \dots, q'_n\}$, 其中 $1 \leq n \leq 2k$ 。以集合 A' 中相邻元素作为上、下限值, 可以将整个专家测试性评估区间 $[q_{\min}, q_{\max}]$ 划分为 $n-1$ 个子区间, 具体如式 (6) 所示:

$$[q_{\min}, q_{\max}] = \bigcup_{1 \leq x \leq n-1} [q'_x, q'_{x+1}] \quad (6)$$

对于任一子区间 $[q'_x, q'_{x+1}]$, 定义测试性指标值位于该子区间内的概率为 $P([q'_x, q'_{x+1}])$, 则有

$$P([q'_x, q'_{x+1}]) = (q'_{x+1} - q'_x) \sum_{i=1}^k \tau_i \omega_i^0 \frac{1}{q_{i,H} - q_{i,L}} \quad (7)$$

式中, $x = 1, 2, \dots, n-1$, τ_i 为

$$\tau_i = \begin{cases} 1, & [q'_x, q'_{x+1}] \subset [q_{i,L}, q_{i,H}] \\ 0, & [q'_x, q'_{x+1}] \not\subset [q_{i,L}, q_{i,H}] \end{cases} \quad (8)$$

显然, 对于子区间 $[q'_x, q'_{x+y}]$, 测试性指标值位于其内的概率为:

$$P([q'_x, q'_{x+y}]) = \sum_{i=x}^{x+y-1} P(q'_i, q'_{i+1}) \quad (9)$$

式中, $y \geq 1, x+y \leq n$ 。且有:

$$P(\bigcup_{1 \leq x \leq n-1} [q'_x, q'_{x+1}]) = \sum_{i=1}^{n-1} P([q'_i, q'_{i+1}]) = 1 \quad (10)$$

1.3 历史信息

装备研制是一个逐步完善的过程, 新型号通常以老型号为基础, 继承了老型号的许多特性。因此, 可以利用老型号的测试性信息评估新型号的测试性水平。

由于老型号装备已经经过长期批量使用, 其测试性水平通常以置信度 γ 和置信下限 $q_{L,\gamma}$ 的形式给出, 即

$$P(q_{L,\gamma} \leq q \leq 1) = \gamma \quad (11)$$

2 确定多源信息融合权重

由于仿真信息、专家信息和历史信息属于不同总体的信息, 其可信度不同, 因此, 在信息融合前需要其不同的权重。

2.1 仿真信息可信度

对于测试性仿真信息, 其可信度通常用可以仿真模型对原理样机测试性特性要素的综合表达程度来表示^[14]。分析原理样机测试性特性要素, 主要包括: 结构特性、功能特性、测试特性和故障表达特性, 其仿真模型的可信度 ρ_S 为:

$$\rho_S = \omega_C R_C + \omega_G R_G + \omega_T R_T + \omega_F R_F \quad (12)$$

式中, ω_C 为结构特性的权重, R_C 为仿真模型对原理样机结构特性的表达程度, ω_G 为结构特性的权重, R_G 为仿真模型对原理样机结构特性的表达程度, ω_T 为结构特性的权重, R_T 为仿真模型对原理样机结构特性的表达程度, ω_F 为结构特性的权重, R_F 为仿真模型对原理样机结构特性的表达程度; 其中

$$\omega_C + \omega_G + \omega_T + \omega_F = 1 \quad (13)$$

2.2 专家信息可信度

专家信息可信度往往根据专家历史评估信息可信度衡量, 记 $\rho_j^i (i = 1, 2, \dots, k; j = 1, 2, \dots, r)$ 为第 i 位专家第 j 次测试性历史评估信息的可信度, 则第 i 位专家历史评估信息平均可信度 ρ_P^i 为:

$$\rho_P^i = \frac{1}{r} \sum_{j=1}^r \rho_j^i \quad (14)$$

以第 i 位专家历史评估信息平均可信度 ρ_P^i 作为现阶段第 i 位专家信息的可信度, 则 k 位专家的加权可信度为:

$$\rho_P = \sum_{i=1}^k \omega_i^0 \rho_P^i \quad (15)$$

2.3 历史信息可信度

历史信息可信度主要通过新系统与老系统的相似程度来表示, 而判断新、老系统相似度可以从设计原理、工作原理、材料组成、功能特性、结构特性和可利用技术等要素进行区分。设新、老两套系统之间相似要素数量确定的相似度为 ρ_ξ^H , 每一相似要素确定的相似度为 ρ_ψ^H , 根据文献 [15] 可得到相似度量值 ρ_H 为

$$\rho_\xi^H = \frac{N}{K + L - N} \quad (16)$$

$$\rho_\psi^H = \omega_\xi^H q(u_1) + \dots + \omega_N^H q(u_N) = \sum_{i=1}^N \omega_\xi^H q(u_i) \quad (17)$$

$$\rho_H = \rho_\xi^H \rho_\psi^H = \frac{N}{K + L - N} \sum_{i=1}^N \omega_\xi^H q(u_i) \quad (18)$$

且有,

$$\begin{cases} \rho_H = 0, N = 0, q(u_i) = 0; \\ \rho_H = 1, K = L = N, q(u_i) = 1; \\ 0 < \rho_H < 1, 0 < N < \min(K, L), q(u_i) \neq 0, 1. \end{cases} \quad (19)$$

式中, K 为老系统组成要素的个数, L 为新系统组成要素的个数, N 为新、老系统公园相似要素的个数, $q(u_i)$ 为相似要素 u_i 的相似度, ω_i^s 为考虑每个相似元对系统相似度影响不同而取的权重系数。

2.4 确定多源信息融合权重

根据确定的仿真信息、专家信息和历史信息可信度, 利用式 (20) 对其归一化处理得到 3 类信息的融合权重。

$$\begin{cases} \omega_S = \frac{\rho_S}{\rho_S + \rho_P + \rho_H} \\ \omega_P = \frac{\rho_P}{\rho_S + \rho_P + \rho_H} \\ \omega_H = \frac{\rho_H}{\rho_S + \rho_P + \rho_H} \end{cases} \quad (20)$$

式中, ω_S 为仿真信息的融合权重, ω_P 为专家信息的融合权重, ω_H 为历史信息的融合权重。

3 基于证据理论的多源信息加权融合

3.1 证据理论

证据理论也称 Dempster-Shaper 证据理论 (简称为 D-S 理论), 是由 Dempster 首先提出并由他的学生 Shaper 改进推广发展而形成的一种证据推理方法, 是对 Bayes 方法的扩展^[16]。

证据理论中最基本的概念是所建立的非空集合 Θ , 即辨识框架。在证据理论中, 辨识框架 Θ 中的元素满足互不相容的条件。对于辨识框架 Θ 的每个子集, 赋予其一个概率, 称为基本信任分配, 具体定义如下:

定义 1: 设 Θ 为辨识框架, 基本信任分配函数 m (也称 mass 函数) 是一个从集合 2^Θ 到 $[0, 1]$ 的映射, A 表示 Θ 的一个子集, 记作 $A \subseteq \Theta$, 当且满足条件: $m(\Phi) = 0, \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1$ 时, 称 $m(A)$ 为事件 A 的基本任务分配函数, 它表示证据对 A 的信任程度。如果辨识框架 Θ 中的子集 A 满足 $m(A) > 0$, 那么称 A 为焦点。

然而对于数据来源不同的同样证据, 会得到多个不同的 mass 函数, 需要一定的规则对其进行融合, 这就是 D-S 证据合成规则。D-S 证据合成规则是证据理论的核心, 是一个反映证据联合作用的法则, 它将来自不同信息源的独立证据信息融合, 产生更可靠的证据信息。

定义 2: 设 m_1, m_2, \dots, m_n 是同一辨识框架 Θ 上的 n 个证据的 mass 函数, 焦点分别是 $A_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 则经 D-S 证据合成的 mass 函数 $m = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$ 可表示为:

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq i \leq N} m_i(A_i)}{1 - \sum_{\cap A_i = \Phi} \prod_{1 \leq i \leq N} m_i(A_i)} & \forall A \in \Theta, A \neq \Phi \\ 0 & A = \Phi \end{cases} \quad (21)$$

3.2 mass 函数构造

假设研制方给定的测试性指标值为 p_0 , 使用方最低可接受值为 p_1 。定义辨识框架 $\Theta = \{A_1, A_2, A_3\}$, 其中 A_1 代表产

品的测试性指标大于或等于设计指标值 p_0 ; A_2 代表产品的测试性指标大于最低可接受值 p_1 , 而小于设计指标值 p_0 ; A_3 代表产品的测试性指标小于或等于最低可接受值 p_1 。

3.2.1 基于仿真信息的 mass 函数构造

根据第 1 节中仿真信息的分析结果, 可以构建仿真信息在辨识框架 Θ 下的基本分配函数 $m(A)$ 如下:

$$\begin{cases} m(A_1) = 1 - \text{Beta}(q_0 | a, b) \\ m(A_2) = \text{Beta}(q_0 | a, b) - \text{Beta}(q_1 | a, b) \\ m(A_3) = \text{Beta}(q_1 | a, b) \end{cases} \quad (22)$$

3.2.2 基于专家信息的 mass 函数构造

根据第 1 节中专家信息的分析结果, 且存在 $q_{\min} < q_1 < q_0 < q_{\max}$, 建立专家信息的 mass 为:

$$\begin{cases} m(A_1) = P([q_0, q_{\max}]) \\ m(A_2) = P([q_1, q_0]) \\ m(A_3) = P([q_{\min}, q_1]) \end{cases} \quad (23)$$

3.2.3 基于历史信息的 mass 函数构造

根据第 1 节中历史信息分析结果, 构造历史信息的 mass 为:

$$\begin{cases} m(A_1) = \gamma_1, & q_{L \cdot \gamma_1} = p_0 \\ m(A_2) = \gamma_2 - \gamma_1 \\ m(A_3) = 1 - \gamma_2, & q_{L \cdot \gamma_2} = p_1 \end{cases} \quad (24)$$

3.3 多源信息加权融合

根据第 2 节权重系数的求解结果, 对于不同权重的证据, 在组合之前分别进行如下的“折扣”处理。

$$\begin{cases} m'_k(A_i) = \frac{[m_k(A_i)]^{\omega_k/\omega_{\max}}}{\sum_j [m_k(A_j)]^{\omega_k/\omega_{\max}}} \\ m'_k(\Phi) = 0 \end{cases} \quad (25)$$

式中, $\omega_{\max} = \max(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_k), k = 1, 2, 3$ 。当各证据权重相等时, 有 $\omega_k/\omega_{\max} = 1$, 即调整前后的基本可信度分配函数保持不变。根据式 (21) 的证据组合方法, 确定多源信息加权融合方法为:

$$m(A) = \frac{\sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq i \leq N} m'_i(A_i)}{1 - \sum_{\cap A_i = \Phi} \prod_{1 \leq i \leq N} m'_i(A_i)} \quad (26)$$

4 案例应用

以某新研装备的电源分系统为例, 对其设计测试性水平进行评估。经研制方和生产方协商确定 $q_0 = 0.90, q_1 = 0.80$ 。

1) 仿真信息。利用建立的仿真模型对电源分系统进行测试性仿真实验, 共进行了 5 次实验, 实验结果为 (35, 8)、(48, 5)、(67, 9)、(23, 5)、(52, 10)。根据式 (1) 和式 (2) 求解得到 $a = 45, b = 9.5$ 。

2) 专家信息。共有 3 位专家根据自身经验知识给出了电源分系统的测试性指标评估区间, 评估结果为 $[0.75, 0.85]$ 、 $[0.80, 0.90]$ 、 $[0.85, 0.95]$, 3 位专家的权重分别为 (0.25, 0.30, 0.45)。

3) 历史信息。根据老型号电源分系统的测试性历史信息,

确定老型号电源分系统测试性指标评估结果为: 置信度为 70% 的故障检测/隔离下限为 0.8, 置信度为 25% 的故障检测/隔离下限为 0.9。

对于仿真信息, 利用式 (22) 得到仿真信息的 mass 函数; 对于专家信息, 先利用式 (7) 确定子区间概率密度, 再利用式 (23) 得到仿真信息的 mass 函数; 对于历史信息, 利用式 (24) 得到其 mass 函数。最后, 得到识别框架 Θ 上的 mass 函数如表 1 所示。

表 1 mass 函数表

| mass 函数 | $m(A_1)$ | $m(A_2)$ | $m(A_3)$ |
|------------|----------|----------|----------|
| 仿真信息 m_1 | 0.056 3 | 0.655 0 | 0.288 7 |
| 专家信息 m_2 | 0.225 0 | 0.650 0 | 0.125 0 |
| 历史信息 m_3 | 0.250 0 | 0.450 0 | 0.300 0 |

限于篇幅, 仿真信息、专家信息和历史信息的可信度计算过程省略, 这里直接给出利用第 2 节方法计算得到的 3 类信息的可信度, 分别为: $\rho_S = 0.75, \rho_P = 0.90, \rho_H = 0.85$ 。根据确定的 3 类信息的可信度, 再利用公式 (20) 得到 3 类信息的融合权重, 分别为: $\omega_S = 0.3, \omega_P = 0.36, \omega_H = 0.34$ 。最后, 利用式 (25) 对 3 类信息进行“折合”处理, 处理后的 mass 函数如表 2 所示。

表 2 “折合”处理后 mass 函数表

| mass 函数 | $m'(A_1)$ | $m'(A_2)$ | $m'(A_3)$ |
|-------------|-----------|-----------|-----------|
| 仿真信息 m'_1 | 0.135 3 | 0.529 1 | 0.335 6 |
| 专家信息 m'_2 | 0.269 9 | 0.547 6 | 0.182 5 |
| 历史信息 m'_3 | 0.250 0 | 0.450 0 | 0.300 0 |

对表 1 和表 2 中的 mass 函数, 通过式 (21) 和式 (26) 组合处理, 得到证据组合后识别框架 Θ 上基本信任分配如表 3 所示。

表 3 证据组合后的信任分配表

| 信任分配 | A_1 | A_2 | A_3 |
|-------------------------------------|-------|-------|-------|
| $m_1 \oplus m_2 \oplus m_3(A_i)$ | 0.019 | 0.937 | 0.044 |
| $m'_1 \oplus m'_2 \oplus m'_3(A_i)$ | 0.069 | 0.832 | 0.099 |

从表 3 中可以看出, 当不对 3 类信息进行“折合”处理时, 系统测试性指标达到研制方设计指标的概率为 1.9%, 满足最低接收指标的概率为 95.6%, 不满足要求的概率为 4.4%。而当根据信任权重对 3 类信息进行“折合”处理时, 系统测试性指标达到研制方设计指标的概率为 6.9%, 满足最低接收指标的概率为 90.1%, 不满足要求的概率为 9.9%。

由于 3 类信息属于不同总体, 可信度不同, 在证据组合时不能平等对待。因此, 在利用证据理论进行组合融合前, 需要对 3 类信息进行证据“折合”处理, 以得到更为准确的评估结果。

5 结论

针对研制阶段装备测试性难以评估的问题, 提出了基于多

源信息加权融合的研制阶段测试性评估方法。对于仿真信息, 以 beta 分布为验前分布, 构建利用仿真信息确定的系统测试性指标值分布密度函数; 对于专家经验信息, 利用区间划分和加权组合的方法确定系统测试性指标值位于各子区间内的概率; 对于历史信息, 以置信度和置信下限的方式给出系统测试性指标在不同置信下限时的置信度。在此基础上, 以可信度为基础确定上述 3 种信息的融合权重, 并利用证据折扣融合理论求解识别框架内 mass 函数的基本信任分配, 从而获得装备当前的测试性水平。最后, 以电源分系统为例证明了该方法的有效性。

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.
- [2] Laurent O. Using formal methods and testability concepts in the avionics systems validation and verification (V&V) process [A]. Proc. of 2010 Third International Conference on Software Testing, Verification and Validation [C]. 2010: 1-10.
- [3] 石君友, 纪 超, 李海伟. 测试性验证技术与应用技术现状分析 [J]. 测控技术, 2012, 31 (5): 29-32.
- [4] 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 (4): 47-52.
- [5] 林志文, 贺 喆, 杨士元. 基于多信号模型的雷达测试性设计分析 [J]. 系统工程与电子技术, 2009, 31 (11): 2781-2784.
- [6] 林志文, 贺 喆, 刘松风. 基于多信号模型的系统测试性分析与评估 [J]. 计算机测量与控制, 2006, 14 (2): 222-226.
- [7] 杨智勇, 许爱强, 牛双诚. 基于多信号模型的系统测试性建模和分析 [J]. 工程设计学报, 2007, 14 (5): 364-369.
- [8] 周 平, 刘东风. 基于多信号模型的舰船柴油机测试性研究 [J]. 测试技术学报, 2011, 25 (2): 95-99.
- [9] 王成刚, 周晓东, 王学伟. 基于贝叶斯网络的复杂装备测试性评估 [J]. 电子测量与仪器学报, 2009, 20 (9): 1027-1023.
- [10] Lian G Y, Huang K L, Chen J H, et al. Study of testability measurement method for equipment based on Bayesian network model [J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2009, 20 (9): 1017-1023.
- [11] 石君友, 田 仲. 测试性研制阶段数据评估验证方法 [J]. 航空学报, 2009, 30 (5): 901-905.
- [12] 张 勇, 丘 静, 刘冠军, 等. 面向测试性虚拟验证的功能-故障-行为-一测试-环境一体化模型 [J]. 航空学报, 2012, 33 (2): 273-286.
- [13] 常春贺, 杨江平, 卢 雷. 基于试验和预测的雷达装备测试性评估方法研究 [J]. 装备学院学报, 2012, 23 (3): 87-92.
- [14] 王 石, 伍丁红, 瞿 量, 等. 复杂仿真系统可信度评估框架研究 [J]. 计算机仿真, 2012, 29 (4): 116-123.
- [15] 常传勇, 周美立. 系统相似度量中特征选择方法 [J]. 机械工程师, 2005, (6): 68-70.
- [16] Zhu H W, Otman B. A scheme for constructing evidence structures in Dempster-Shafer evidence theory for data fusion [A]. Proceeding of ISCIRA [C]. Kobe, Japan, 2003: 960-965.