

文章编号:1001-2486(2011)02-0125-05

面向任务的导弹测试性需求分析与指标确定*

苏永定,邱静,杨鹏

(国防科技大学 机电工程与自动化学院,湖南 长沙 410073)

摘要:针对当前缺乏科学合理的理论和方法确定导弹系统级测试性指标的现状,提出一种面向任务需求的测试性指标确定方法。将导弹任务剖面划分为贮存、出库、部署和发射四个阶段,并提出各个阶段相应的测试需求;分别建立基于贮存可用度、战斗准备任务成功率、部署战备完好率和发射任务成功率为性能要求的测试性需求子模型,给出各个性能指标与测试性参数的关联关系,并选择影响性能较大的测试性参数作为设计参数;提出评价导弹任务性能综合指标,采取修正任务阶段性性能要求的方法解决各个任务阶段测试性指标要求不一致的问题,综合得到可信的导弹测试性指标要求。

关键词:测试性需求;贮存可用度;战斗准备任务成功率;部署战备完好率;发射任务成功率;测试性指标
中图分类号:TP302 文献标识码:A

Missile Testability Requirement Analysis and Index Determination Oriented to Mission

SU Yong-ding, QIU Jing, YANG Peng

(College of Mechatronics Engineering and Automation, National Univ. of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In view of the lacking of theory and method in determining missile system level testability indices, this research presents a testability indices determining method oriented to mission requirements. The missile mission is divided into four phases, such as storing, combat preparation, disposition and launch. Then the test requirement of each phase was proposed. Based on the performance requirements of store availability, combat preparation mission success rate, disposed combat readiness rate and launch mission success rate, some testability requirement models were built. The relationship between the performance requirements and testability parameters were given, and the testability parameters which were the key factors on the performance were selected. It defines an aggregative index to evaluate the missile mission performance, and then modifies the mission phases performance requirements to unify the testability indices which may vary in deferent missions. The credible testability indices are gained synthetically.

Key words: testability requirement; store availability; combat preparation mission success rate; disposed combat readiness rate; launch mission success rate; testability index

测试性设计逐渐成为提高系统可用性、降低系统使用保障费用的一个关键技术途径,开展装备测试性设计已经成为装备系统工程的主要组成^[1]。根据装备系统的任务要求和测试需求,通过测试性需求分析,提出装备测试性要求是测试性工程的首要步骤。目前,装备系统测试性定量要求(即测试性指标要求)主要通过类比法和经验法确定,缺乏相应的理论和模型支持,提出的指标具有较大主观性,造成某些指标过高,导致资源浪费,某些指标又可能过低,而达不到系统最终要求^[2]。国内在测试性方面的研究起步较晚,特别是在测试性需求和指标确定方面缺乏深入的研究^[3]。

根据系统工程的思想,测试性指标的确定应从系统层性能需求入手,才能保证提出的测试性指标满足系统性能要求^[4]。为保证导弹满足任务需求,开展导弹系统测试性需求的研究和分析显得更加重要。本文拟从导弹各个任务阶段分析其可用性、战备完好性和任务成功性,重点考虑测试性参数对导弹系统性能的影响,给出基于导弹贮存、使用和保障等任务过程的测试性需求模型;通过构建任务性能综合指标,采取修正任务阶段性性能要求的方法对存在不一致或矛盾的各个任务阶段测试性指标进行修正,最后得到导弹整体上一致的、合理的测试性指标要求。

* 收稿日期:2010-11-17

基金项目:国家部委资助项目(51317040102)

作者简介:苏永定(1980—),男,博士生。

1 导弹任务划分和测试需求

明确导弹系统的任务要求和测试需求,是开展导弹测试性需求分析与设计依据。导弹主要任务剖面可划分为贮存、战斗准备、部署和发射四个阶段。为保证导弹性能满足各个阶段要求,必须进行定期检测、出库测试、开机检测和发射前自检,并采取相应维修保障措施。

导弹贮存期间,根据导弹贮存可靠度进行周期检测,有需要维修的导弹,转入维修程序,否则继续转入库房贮存状态。当接到部署任务要求时,必须对导弹进行出库检测,在规定时间内测试通过规定数量的完好导弹,并进行导弹部署。在接到进入战斗准备状态的命令时,部署的导弹进行开机检测,如果发现故障,则立即维修更换,并将故障弹送回上一级维修。接到发射命令时,对导弹进行发射前自检(采用 BIT),并执行作战命令。整个导弹任务划分过程和测试需求如图 1 所示。

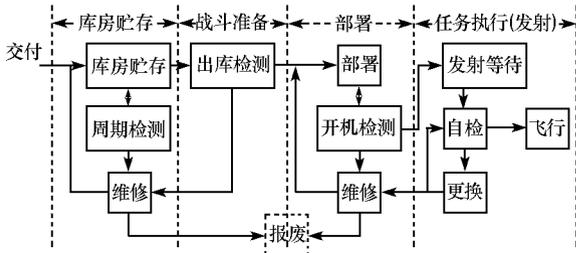


图 1 导弹任务划分及测试过程

Fig.1 Missile mission divided and test process

2 导弹测试性需求分析

建立导弹测试性需求模型是确定测试性指标

要求的关键。由于导弹在不同的任务阶段具有不同性能要求、测试要求,对导弹的测试性需求也不同,难以用一个统一的、综合的模型来描述导弹总体的测试性需求。本文根据不同的任务阶段,分别考虑贮存任务可用度 A_s , 战斗准备任务成功率 P_{PMS} 、部署阶段战备完好率 P_{DR} 和发射任务成功率 P_{LMS} 四个不同的系统性能参数要求,建立相应的测试性需求分析子模型,确定不同的测试性指标要求。

2.1 贮存可用度 A_s 对测试性指标的要求分析

导弹武器系统,其绝大部分时间处于贮存状态。由于受到环境因素的影响,导弹的可靠性不断降低,当降低到一定程度或发生故障时,必须通过有效的检测和维修手段来确保导弹的可用性。导弹在贮存条件下一般采取定期检测的方式。文献[5-6]分析了装备系统的瞬时可用度和稳态可用度,提出了优化选择检测周期的方法,但忽略了测试结果对可用度的影响。检测活动对系统可用性的影响主要表现在两个方面:检测结果对维修活动的影响和检测周期对可靠度的影响。

假设在贮存条件下,导弹平均故障间隔时间为 $MTBF_s$ (故障率为 λ),检测周期为 t_{BD} ,故障检测率为 r_{FD} ,平均检测时间为 $MFDT$,故障平均修复时间为 $MTTR$ (只要能检测到故障,就能完全修复,相对于贮存时间和检测周期,故障检测和修复时间可忽略)。导弹贮存的状态转移如图 2 所示,其中 A_i 表示第 i 次周期检测后导弹可用度, F_i 表示在第 i 次周期检测前导弹可能的故障状态, $i = 0, 1, \dots, n + 1, \dots$ 。

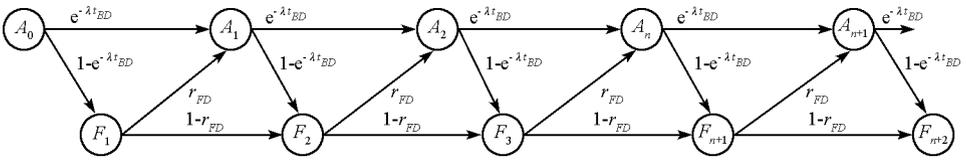


图 2 导弹贮存的状态转移

Fig.2 Missile storing state transition

设导弹贮存开始时刻的可用度为 1, 在 t_{BD} 时刻(检测维修前)可用度为

$$A(t_{BD}) = R(t_{BD}) = e^{-\lambda t_{BD}} \quad (1)$$

进行检测和维修后,可用度为

$$A'(t_{BD}) = R(t_{BD}) + (1 - R(t_{BD}))r_{FD} \quad (2)$$

在第 n 次检测时刻 nt_{BD} 的可用度为

$$A(nt_{BD}) = A'((n - 1)t_{BD})e^{-\lambda t_{BD}} \quad (3)$$

检测后,

$$A'(nt_{BD}) = A(nt_{BD}) + (1 - A(nt_{BD}))r_{FD} \quad (4)$$

当 n 较大时,在检测时刻前的最低贮存可用度趋于稳定值 A_s :

$$A_s = \frac{r_{FD} \cdot e^{-\lambda t_{BD}}}{1 - e^{-\lambda t_{BD}}(1 - r_{FD})} \quad (5)$$

由式(5)可知,贮存可用度 A_s 对故障检测率 r_{FD} 和检测周期 t_{BD} 提出了设计需求。

2.2 战斗准备任务成功率 P_{PMS} 对测试性指标的要求分析

导弹贮存阶段的战斗准备时间 t_R 是指库房接到导弹部署命令时,在规定时间内准备好规定 N_r 枚导弹的时间。单个导弹的平均测试时间为 t_{MD} , 导弹的平均可靠度为 R_{TBD} , 故障检测率为 r_{FD} , 只要在 t_R 内准备好 N_r 个导弹, 战斗准备任务就算成功, 否则为失败。

测试结果分为通过和不通过两种情况, 通过测试的导弹又分为两种情况: 一是导弹无故障且检测准确, 二是导弹有故障但因漏检而被认定为正常。用 F 表示导弹有故障, \bar{F} 表示导弹无故障, T 表示测试结果指示导弹有故障, \bar{T} 表示测试结果指示导弹无故障, 存在:

$$\begin{cases} P(T|F) + P(\bar{T}|F) = 1 \\ P(T|\bar{F}) + P(\bar{T}|\bar{F}) = 1 \\ P(F) + P(\bar{F}) = 1 \end{cases} \quad (6)$$

导弹测试结果为无故障的概率为

$$P(T_p) = P(\bar{T}|F)P(F) + P(\bar{T}|\bar{F})P(\bar{F}) \quad (7)$$

$P(\bar{T}|F)$ 表示为漏检率, 用 $(1 - r_{FD})$ 来衡量, $P(T|\bar{F})$ 表示虚警率 (r_{FA}), 则式(7)化为

$$P(T_p) = (1 - r_{FD}) \cdot (1 - R_{TBD}) + (1 - r_{FA}) \cdot R_{TBD} \quad (8)$$

设 $N = t_R/t_{MD}$ 表示在允许战斗准备时间内可进行测试的导弹数, 只要不少于 N_r 个导弹通过测试, 战斗准备任务成功。将导弹检测看成随机事件, 每次测试通过的概率为 $P(T_p)$, 则通过测试的导弹数服从二项分布, 即 $X \sim b(N, P(T_p))$, 因此战斗准备任务成功率 P_{PMS} 可通过求解 $P(X \geq N_r)$ 获得

$$\begin{aligned} P_{PMS} &= P(X \geq N_r) \\ &= \sum_{k=N_r}^N \binom{N}{k} (P(T_p))^k (1 - P(T_p))^{N-k} \end{aligned} \quad (9)$$

虚警率越小, $P(T_p)$ 越大, P_{PMS} 就越大; 但当检测率越小时, $P(T_p)$ 越大, P_{PMS} 也越大, 这是以增加漏检风险为代价的, 必须增加风险指标 α 加以限制。将错误指示良好的概率表示为 $P(F|\bar{T})$ 。根据 Bays 公式可得

$$\begin{aligned} \alpha = P(F|\bar{T}) &= \frac{P(\bar{T}|F)P(F)}{P(\bar{T}|\bar{F})P(\bar{F}) + P(\bar{T}|F)P(F)} \\ &= \frac{(1 - r_{FD}) \cdot (1 - R_{TBD})}{(1 - r_{FA}) \cdot R_{TBD} + (1 - r_{FD}) \cdot (1 - R_{TBD})} \end{aligned} \quad (10)$$

提出战斗准备任务成功率的同时应增加约束

条件: $\alpha \leq \alpha^*$ (α^* 为风险指标约定值)。

因此, 战斗准备任务成功率对故障检测率 r_{FD} 、导弹平均测试时间 t_{MD} 和虚警率 r_{FA} 提出了设计需求。

2.3 部署战备完好率 P_{DR} 对测试性指标的要求分析

导弹战备完好性是指在接到发射准备命令后, 在规定发射前准备时间 t_r 内开机检测、准备完毕的概率。在接到作战准备指令后, 导弹系统进行开机检测(采用 BIT), 通过检测的导弹则进入发射等待状态, 而没通过检测的导弹需在允许的发射准备时间内进行参数调整、维修或者更换备用导弹等, 以达到发射要求。因此, 战备完好率是指导弹完好且通过开机检测的概率与导弹检测指示故障但在规定时间内可修复的概率之和。由于开机检测的内容包括参数标定、加电检测和各项功能的检测, 检测时间 t_d 不可忽略。

由式(6)可知导弹完好且通过检测的概率为 $P(\bar{T}|\bar{F}) = 1 - P(T|\bar{F}) = 1 - r_{FA}$ 。检测没通过的导弹在 t_r 内修好的概率为 $r_{FD} M(t_r - t_d)$ 。 $M(t)$ 为导弹部署阶段的维修度^[7]。则战备完好率为

$$P_{DR} = R(t_m)(1 - r_{FA}) + [1 - R(t_m)(1 - r_{FA})] r_{FD} M(t_r - t_d) \quad (11)$$

$R(t_m)$ 为在 t_m 时刻下达作战指令时导弹的可靠度, t_d 为平均开机检测时间。

因此, 战备完好率对平均开机检测时间 t_d 、故障检测率和虚警率提出了设计需求。

2.4 发射任务成功率 P_{LMS} 对测试性指标的要求分析

导弹发射任务成功率定义为发射并完成作战任务的导弹数与总发射导弹数之比。对于不检测而直接发射的导弹, 其任务成功率主要由导弹发射可靠度决定, 任务成功率 $P_{LMS} = R_L \cdot R_F$ (R_L 为导弹发射可靠度, R_F 为导弹飞行可靠度)。当发射前进行 BIT 自检, 对自检不通过的导弹取消发射, 这将减少故障弹的发射, 提高发射任务成功率。假设要发射 n 个导弹, 其中有 nR_L 个导弹完好, 因自检发现故障而取消发射的导弹数为 $n(1 - R_L)r_{FD}$, 则任务成功率为

$$\begin{aligned} P'_{LMS} &= R'_L \cdot R_F = \frac{nR_L}{n - n(1 - R_L)r_{FD}} \cdot R_F \\ &= \frac{R_L}{1 - (1 - R_L)r_{FD}} \cdot R_F \end{aligned} \quad (12)$$

显然,提高自检 BIT 故障检测率将有利于提高任务成功率。导弹发射可靠度越低,发射自检 BIT 越关键,自检 BIT 故障检测率越高,发射任务成功率就越高。

3 基于系统任务性能综合要求的导弹测试性指标确定

测试性指标要求确定越早,所得测试性设计效果就越好^[8]。由第 2 节分析可知,导弹不同任务阶段的性能要求提出的指标不相同,甚至存在矛盾。本文拟通过修正不同阶段性能要求,给出一致的测试性指标要求,其前提是确保导弹系统性能综合要求不会降低。

3.1 导弹任务性能综合要求

为评价导弹多任务剖面的综合性能要求 P_M ,可用下式进行度量:

$$P_M = A_S^{a_1} \cdot P_{PMS}^{a_2} \cdot P_{DR}^{a_3} \cdot P_{LMS}^{a_4} \cdot (1 - \alpha)^\beta \quad (13)$$

式中 $a_i (i = 1, 2, 3, 4)$ 为各个任务剖面性能要求的权重因子 ($\sum_{i=1}^4 a_i = 1$), β 为 α 的影响系数。

3.2 导弹测试性参数体系确定

从导弹测试性需求子模型中提取出与导弹测试性有关的测试性参数构成导弹关键测试性参数,如图 3 所示。导弹测试设备主要包括在贮存状态下的内场测试设备(主要是 ATE 等)和在发射场的外场测试设备(主要是 BIT)。因此,在开展导弹测试性设计时主要考虑 ATE 的 t_{BD} 、 r_{FD} 、 t_{MD} 、 r_{FA} 和 BIT 的 t_d 、 r_{FA}^B 和 r_{FD}^B 等测试性参数。

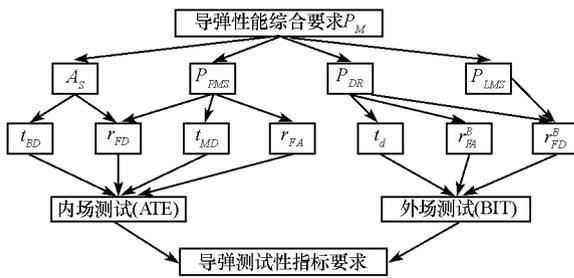


图 3 导弹关键测试性参数体系

Fig.3 Missile key testability parameter architecture

3.3 导弹各任务阶段测试性指标确定

首先获取导弹各个任务阶段性能指标要求和其他相关参数,如表 1 所示。

表 1 导弹性能指标要求和相关参数

Tab.1 Missile performance indices requirement and related parameters

A_S	P_{PMS}	P_{DR}	P_{LMS}	t_R	MIBF _S	N_r	t_m	t_r	M_α	R_L	R_F	α^*
0.80	0.85	0.97	0.98	65h	43800h	50	240h	0.5h	0.25	0.90	0.99	0.01

将 $a_1 = a_2 = 0.2, a_3 = a_4 = 0.3, \beta = 0.5$ 代入式(13),计算得 $P_M^* = 0.9072$ 。

然后,根据导弹各个任务阶段测试性需求子模型确定相应的测试性参数指标。

(1)由式(5)画出可用度 A_S 与故障检测率关系曲线,如图 4 所示。当故障检测率增大到一定程度后,系统可用度将缓慢增长,因此在系统可用度要求已确定时,只需使系统的故障检测率达到满足可用度要求即可,而无需追求过高的故障检测率。通过计算可知,在检测周期不大于 8760h 时,故障检测率 $r_{FD1} \geq 88\%$ 可满足贮存可用度要求。

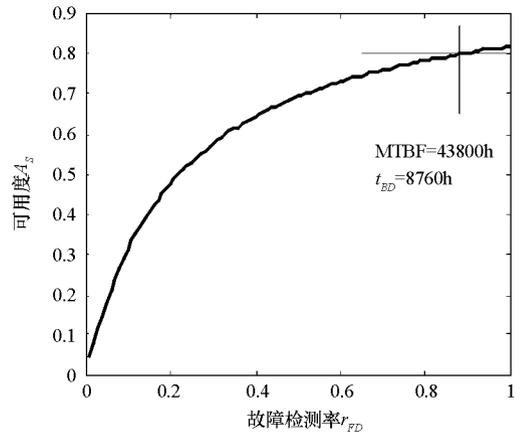


图 4 可用度与故障检测率关系

Fig.4 Relationship between A_S and r_{FD}

(2)由式(8)、(9),可得到虚警率同任务成功率的关系曲线(图 5),用贮存可用度替代导弹贮存期间的可靠度,即 $R_{TBD} = 0.8$,当 $T_d = 1h$,由 P_{PMS} 要求得 $r_{FA} \leq 2.3\%$ 。由 $\alpha^* = 0.01$,可计算得 $r_{FD2} \geq 98\%$ 。

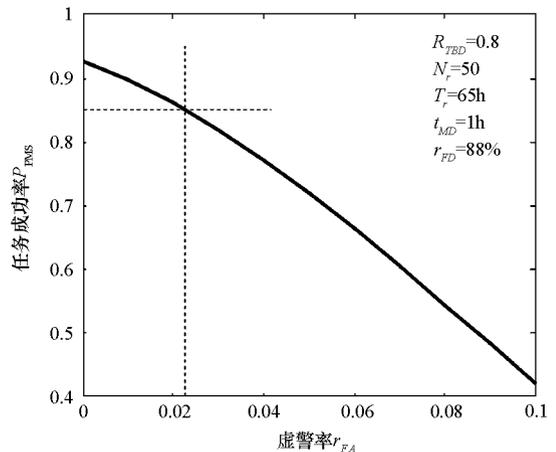


图 5 虚警率与战斗准备任务成功率的关系

Fig.5 Relationship between r_{FA} and P_{PMS}

(3)由式(11)得到平均开机检测时间与战备完好率的关系曲线如图 6 所示。当 $r_{FD1}^B \geq 90\%$ 、

$r_{FA}^B \leq 3\%$ 、 $t_d \leq 0.12\text{h}$ 时,满足 P_{DR} 要求。

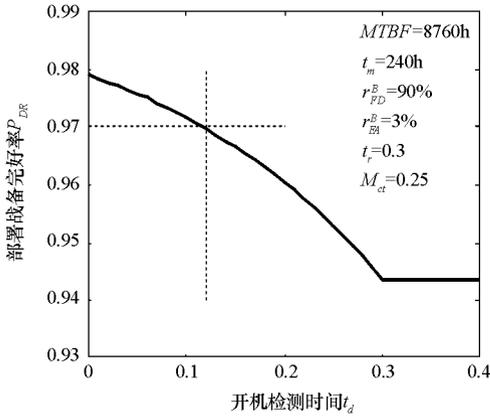


图6 平均开机检测时间与战备完好率的关系
Fig.6 Relationship between t_d and P_{DR}

(4)由式(12)得故障检测率 r_{FD}^B 与发射任务成功率 P_{LMS} 的关系如图7,当 $r_{FD}^B \geq 91\%$ 时满足 P_{LMS} 要求。

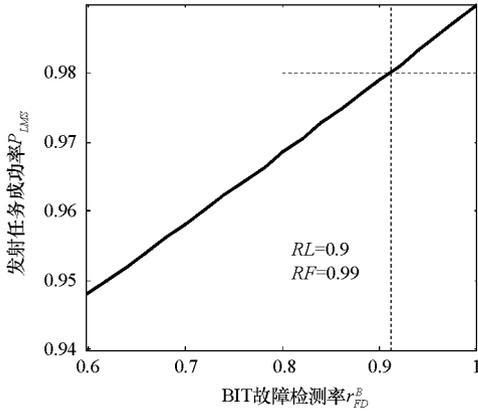


图7 故障检测率 r_{FD}^B 与发射任务成功率 P_{LMS} 的关系
Fig.7 Relationship between r_{FD}^B and P_{LMS}

因此,整个导弹的测试性指标要求值如表2所示。

表2 导弹测试性设计关键指标

Tab.2 Missile testability design key indices

r_{FD}	r_{FA}	t_{BD}	T_d	r_{FD}^B	r_{FA}^B	t_d
98%	2.3%	8760h	1h	91%	3%	0.12h

其中 $r_{FD} = \max\{88\%, 98\%\} = 98\%$, $r_{FD}^B = \max\{90\%, 91\%\} = 91\%$ 。 r_{FD}^B 的两个值差别不大,而 r_{FD} 的两个指标值差距比较大,将造成资源的浪费。

3.4 基于任务性能综合要求修正的测试性指标权衡分析

上一节确定的测试性指标中, r_{FD}^B 的两个候选指标要求差别不大,而 r_{FD} 的两个指标值差距比较大,将造成资源的浪费,必须对其进行修正。首先必须降低战斗准备阶段 r_{FD1} 的要求,造成 r_{FD1} 过高的主要因素是 α^* ,同时,适当提高贮存阶段的可用度要求 A_S ,进而提高对 r_{FD2} 的要求。因此,问题转化为在增加风险系数和贮存阶段可用度的过程

中,搜索最佳的 r_{FD} ,尽量达到 r_{FD1} 、 r_{FD2} 的一致性要求,同时满足综合性能要求 P_M^* 。采用迭代的方法进行修正,具体步骤为:

(1)设 $r'_{FD1} = r_{FD1} - \Delta_1$ (Δ_1 为搜索步长),并计算风险系数 α 。

(2)设 $r'_{FD2} = r_{FD2} - \Delta_2$ (Δ_2 为搜索步长),并计算 A_S 和 P_M 。

① 如果 $r'_{FD2} \geq r'_{FD1}$ 且 $P_M \geq P_M^*$, $r_{FD} = r'_{FD2}$, 结束。

② 如果 $r'_{FD2} \geq r'_{FD1}$ 且 $P_M < P_M^*$, $r_{FD} = r'_{FD1}$, 结束。

③ 如果 $r'_{FD2} < r'_{FD1}$ 且 $P_M < P_M^*$,转步骤(2)。

④ 如果 $r'_{FD2} < r'_{FD1}$ 且 $P_M \geq P_M^*$,转步骤(1)。

对本例进行仿真运算,当 $r_{FD} \geq 94\%$ 时满足综合性能要求 P_M^* ,修正后的 $A_S = 0.81$ 、 $\alpha^* = 0.015$ 。该结果修正了系统性能要求存在的 inconsistency,同时也降低了对 r_{FD} 的要求。

4 结论

针对目前难以合理确定导弹测试性指标要求的问题,提出了一种面向任务性能需求的导弹测试性需求分析与指标确定方法。首先将导弹的任务需求划分为贮存、出库、部署和发射四个阶段,并提出各个阶段相应的测试需求;然后根据不同的性能要求,构建了各个阶段的测试性需求子模型,给出导弹的测试性参数需求和各个任务阶段的性能指标与测试性指标的关联模型;然后提出了评价导弹任务性能的综合指标,基于此针对导弹测试性参数体系中存在不一致的指标,采用修正导弹任务阶段性能要求的方法,通过迭代运算搜索最佳的测试性指标要求,降低了阶段任务测试性要求过高、过低和不一致的风险,使得综合确定的导弹整体测试性指标更加科学、合理。

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,2003:1-20.
- [2] 钱彦岭,邱静,温熙森.确定系统级测试性参数的广义随机Petri网模型[J].系统工程与电子技术,2002(5):4-7.
- [3] 王厚军.可测性设计技术的回顾与发展综述[J].中国科技论文在线,2008,(1):52-58.
- [4] 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.
- [5] 沈剑波,李金林,崔利荣.导弹储存维修性统计分析[J].系统工程与电子技术,2004,26(11):1731-1735.
- [6] Cassady C R, Iyob I M, Schneider K. A Generic Model of Equipment Availability Under Imperfect Maintenance[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2005, 54(4): 564-571.
- [7] 甘茂治,康建设,高崎.军用装备维修工程学[M].北京:国防工业出版社,1999:97-117.
- [8] Sujit D R, Rabindra K R. Considering Testability During High-level Design[C]//Proceedings of Asia and South Pacific Design Automation Conference (ASP-DAC), 1998:1-6.