

基于 RMS 参数的水雷使用可用度分配模型研究

夏中亚, 李兴生

(中国船舶集团有限公司第七一〇研究所, 湖北 宜昌 443003)

摘要 为了确定合理有效的使用可用度, 综合考虑水雷装备任务需求、保障方案以及相似装备的 RMS 指标等信息, 构建了基于多影响因素的水雷装备使用可用度分配计算模型。以某型水雷为例, 综合权衡后分配给子系统使用可用度和相关 RMS 参数指标, 验证了该方法的可行性。该分配模型合理、可信, 具有通用性, 可根据实际情况修改影响因素的权值系数, 满足不同参数的需求, 可为相似武器装备的论证与设计、使用管理提供理论依据和方法支持。

关键词 使用可用度; 分配模型; 水雷

中图分类号 TJ610.2

文献标识码 A

文章编号 2096-5753(2022)01-0059-07

DOI 10.19838/j.issn.2096-5753.2022.01.010

Research on Allocation Model of Mine Operational Availability Based on RMS Parameters

XIA Zhongya, LI Xingsheng

(No. 710 R&D Institute, CSSC, Yichang 443003, China)

Abstract In order to obtain reasonable and valid A_o , allocation model of mine operational availability based on multi-factor is constructed by taking mission requirement, support plan of mine equipment and RMS data from similar systems into account. The paper takes one type of mine as example, allocates operational availability and relative RMS parameters of subsystems synthetically, and verifies the feasibility of this method. This allocation model is reasonable, credible and universal, and can modify the weight coefficient of influence factors based on actual conditions. It can offer theoretical basis and method support for the argumentation and design, use and management of similar weapon equipment.

Key words operational availability; allocation model; mine

0 引言

武器装备的可靠性、维修性、保障性(reliability, maintainability and supportability, RMS)是重要的战术技术指标,体现了装备的质量优劣,已经成为新研装备论证、在研装备考核的重要内容之一。战备完好性是指装备在使用环境下处于能执行任务的完好状态的程度,作为 RMS 顶层指标,综合了装备的可靠性、维修性以及保障系统的特性、保障资

源的数量及位置的影响,是系统综合保障的总体指标,也是衡量武器装备战斗力的重要指标之一^[1]。使用可用度是装备可用性和战备完好性的概率度量参数^[2],是指某一装备在某种作战使用环境下,在任意随机时刻应召时,可以方便和满意地投入使用的能力^[3]。

水雷是海军攻防封锁作战的常规战略武器装备,常年担负战备值班任务,因此要求其随时处于良好战备状态^[4]。水雷使用可用度是描述水雷装备

可用状态的统计量,也是衡量水雷战备完好性的重要数值指标之一。因此,本文采用 RMS 参数分解结合现役水雷部队实际保障情况,开展水雷使用可用度评估模型研究,结合水雷服役的相关数据,对水雷装备使用可用度进行评估验证,对于实现水雷战备完好性评估与维修保障资源优化配置具有重要指导意义。

1 使用可用度概述

GJB 451A—2005《可靠性维修性保障性术语》对可用性的定义为:“产品在任一时刻需要和开始执行任务时,处于可工作或可使用状态的程度。可用性的概率度量称为可用度^[5]。”使用可用度是与系统能工作时间和不能工作时间密切相关的可用性参数,其常用计算方法为产品的能工作时间和不能工作时间的和之比,其典型计算公式如下:

$$A_0 = \frac{\text{系统能工作时间}}{\text{系统能工作时间} + \text{系统不能工作时间}}$$

使用可用度全面考虑了产品的工作时间、待机时间、修复性维修时间、预防性维修时间、保障资源延误时间和管理延误时间,因而最能真实反映产品的可用性特性,是全面评估产品可随时投入使用程度的有效工具,因此,把使用可用度作为度量现役装备战备完好性的主要指标之一。

对于水雷产品,使用可用度可理解为装备服役后,在保障资源、使用条件和任务要求既定的条件下,当有任务需求时装备能够投入使用的能力。研究水雷装备使用可用度需要考虑装备服役后一系列时间要素。根据 GJB 451—2005 对时间的图解进一步细化可得到水雷装备服役后的时间分解图,如图 1 所示。

水雷是一种长期贮存、一次连续使用的产品,结合实际使用保障情况,由图 1 可知水雷产品不能工作时间主要包括平均维修时间(MTTR)和平均后勤延误时间(MLDT),能工作时间为平均故障间隔时间(MTBF)。因此以时间表示的水雷产品的使用可用度表达式如下。

$$A_0 = \frac{\text{能工作时间}}{\text{能工作时间} + \text{不能工作时间}} = \frac{\text{MTBF}}{\text{MTBF} + \text{MTTR} + \text{MLDT}}$$

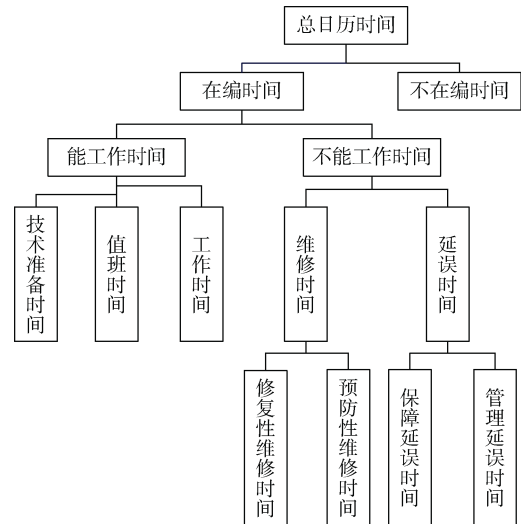


图 1 水雷装备服役时间分解图

Fig. 1 Detail sketch of mine equipment's service life

由以上分析可知,使用可用度论证的基本过程是根据任务需求分析,对水雷产品的 A_0 提出初步要求为起点,然后利用 A_0 分解出的 RMS 参数来确定其可行性,自上而下反复多次迭代,最后确定合理的指标值。

2 使用可用度的分配

2.1 使用可用度的分配过程

使用可用度指标的确定和分配过程用图 2 表示,其特点是用户只规定使用可用度 A_0 初值,再由设备承制方将其分配到子系统和设备层次,按可用性指标自主确定设备 R、M 指标并由设备向下分配,其过程如下所述:

- 1) 由用户确定系统级 A_0 目标值和门限值;
- 2) 由用户设定 MLDT 指标范围;
- 3) 建立“系统→子系统→设备”的 A_0 指标分配模型(类似可靠性框图);
- 4) 将系统级的 A_0 指标分配到子系统和设备;
- 5) 在指定范围内设定 MLDT 指标值;
- 6) 建立 A_0 指标的计算模型;

7) 在设备级以分配的 A_o 指标为目标, 使用 A_o 的计算模型, 按设定的 MLDT 目标值和门限值, 通过权衡确定设备的 MTBF 和 MTTR 的目标值和门限值, 作为设备的 MTBF 和 MTTR 的指标验证要求 (在权衡时考虑经济和现有技术水平的制约,

用迭代方法计算);

8) 将设备的 MTBF、MTTR 指标值在设备内部逐级分配, 作为可靠性和维修性设计要求;

9) 根据确定的 MTBF 和 MTTR 指标值, 作为装备使用可用度的验证指标。

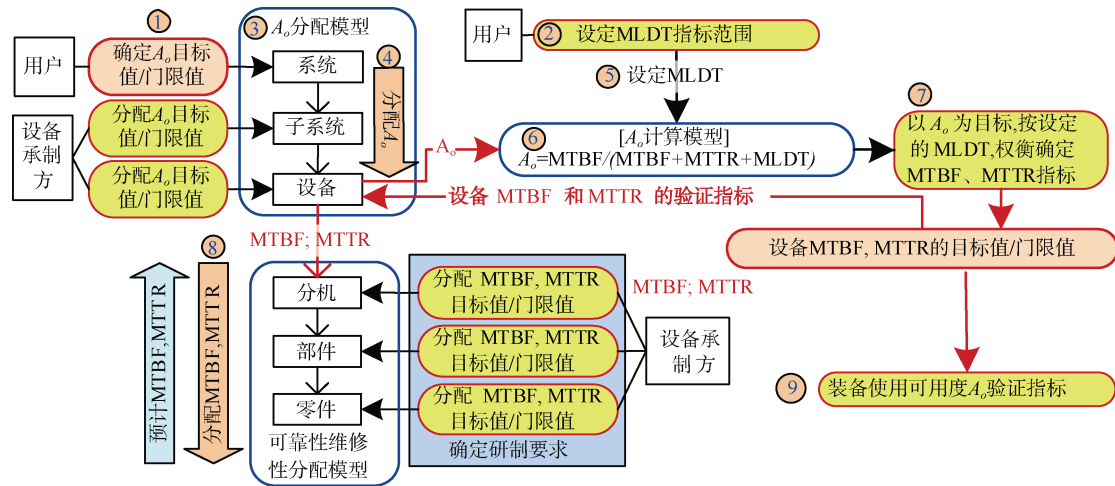


图 2 A_o 、MTBF、MTTR 的指标分配和验证过程

Fig.2 Index allocation and verification process of A_o , MTBF and MTTR

使用可用度指标分配是以可用度指标分配模型为基础, 采用类似于可靠性分配的方法, 首先建立系统的可用度指标分配框图, 明确各子系统和设备的可用度关系, 包括串联、并联等^[6]。水雷产品的各子系统之间基本为串联关系, 故对其使用可用度分配作如下假设:

- 1) 水雷产品由多个子系统串联组成;
- 2) 各子系统的“失效”“修复”“延误”皆服从指数分布;
- 3) 子系统的修复是完全修复, 即修旧如新;
- 4) 若子系统的修复时间超过装备的允许停机时间, 则需要更换备件, 将会产生延误时间, 否则不需要更换备件;
- 5) 各子系统的失效相互独立。

2.2 使用可用度的分配模型

装备使用可用度是指装备能工作时间与能工作时间和不能工作时间之和的比值, 从数学的角度来看公式不复杂, 然而仅这 2 项时间与其他很多因素有着密切的联系, 因此, 为了分析各种影响因素的权重, 需要建立使用可用度分配模型, 采用合理

的数学处理方法。针对水雷产品的系统组成、作战使用及保障的特点, 本节主要介绍串联系统的重要性不同的使用可用度分配模型。

2.2.1 重要性、复杂度

在武器装备担负战备值班任务中, 不同的子系统在战备值班任务中的作用不同。有些子系统在所有等级战备值班中都需要使用, 有的子系统仅在部分战备值班中需要使用。使用频率高、组成复杂的子系统工作强度大, 出现故障的概率大, 使用可用度要求也高; 而使用频率低、组成简单的子系统工作强度较小, 出现故障的概率当然也会减少, 使用可用度要求也会有所降低。因此, 将不同武器装备的子系统根据使用频率、组成复杂度的影响层次进行划分, 不同的层次有不同的使用可用度要求, 2 个相邻的层次之间使用可用度降低 10%。为了保证所有层次重要程度的使用可用度都小于 1。将最高层次的重要性、复杂度的使用可用度权重设为 ≤ 1 , 这样就形成了如表 1 和表 2 所示的重要性和复杂度与使用可用度的对应关系。

表 1 重要性分级
Table 1 Mission importance grading

MEC	重要性分级标准描述	重要性	使用可用度权重取值/%
1	不影响任务:该单元或功能失效不会影响装备执行任何任务的方法、步骤或能力。不会影响安全	一般	50~59
2	对任务需要而不重要:该单元或功能失效会影响装备执行任何任务的方法和步骤,但是不能防止或排除装备执行任何一项任务。不会影响安全	比较重要	60~69
3	对单个任务重要:该单元或功能失效将导致装备执行任何一个或仅 1 个任务能力丧失。不会影响安全	重要	70~79
4	对多个任务重要:该单元或功能失效将导致装备执行超过 1 个以上任务能力丧失。不会影响安全	很重要	80~89
5	危及装备/使用人员安全:该单元或功能失效将导致装备和/或使用人员的安全危险	非常重要	90~99

注:任务重要性码(Mission Essentiality Codes, MEC)

表 2 复杂度分级
Table 2 Mission complexity grading

等级	复杂度	K_{ij} 权重取值/%	等级	复杂度	使用可用度权重取值/%
1	一般	50~59	4	很复杂	80~89
2	比较复杂	60~69	5	非常复杂	90~99
3	复杂	70~79			

2.2.2 串联系统的使用可用度分配模型

假设某装备是由 n 个子系统串联组成的系统,各子系统的重要度、复杂度不同。设系统使用可用度为 AoS , 第 i 个子系统使用可用度为 Aoi , 每个子系统可用度加权系数为 K_i , 下面给出使用可用度的加权分配公式^[7]。

1) 使用可用度的平均分配。

若 n 个串联子系统使用可用度要求相同, 则系统的使用可用度 AoS 为

$$AoS = \prod_{i=1}^n Aoi \quad (1)$$

式中:

$$i = 1, 2, \dots, n$$

反之, 第 i 个子系统的使用可用度为

$$Aoi = (AoS)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

2) 使用可用度的加权分配。

若串联的各子系统使用可用度要求不相同, 则第 i 个子系统的使用可用度为

$$Aoi = Ki \times (AoS)^{\frac{1}{n}} \quad (3)$$

式中, K_i 为第 i 个子系统的使用可用度加权系数, 且 $K_i \leq 1$ 。则系统的使用可用度 AoS 为

$$AoS = \prod_{i=1}^n Aoi = \prod_{i=1}^n Ki \times (AoS)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

3) 多个影响因素的加权系数 K_i 和加权因子 K_{ij} 。

因该子系统的加权系数受多个因素的影响, 将每个影响因素称为 1 个加权因子。设系统有 n 个子系统, 每个子系统的加权系数 K_i 有 m 个加权因子, 第 i 个子系统的第 j 个加权因子表示为 K_{ij} , 则第 i 个子系统可用度加权系数 K_i 是由 m 个加权因子 K_{ij} 的综合计算得到。

本文中给出的以 K_{ij} 为函数的 K_i 计算模型式, K_i 为第 i 个子系统的 m 个加权因子 K_{ij} 的算术平均值 $\alpha = (\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m}$ 与 n 个子系统中 m 个加权因子的

算术平均值 $\beta = (\sum_{i=1}^n ((\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m})) \times \frac{1}{n}$ 的比值:

$$K_i = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{(\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m}}{(\sum_{i=1}^n ((\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m})) \times \frac{1}{n}} \quad (5)$$

则公式 (3) 中第 i 个子系统的使用可用度 Aoi 为

$$A_{O_i} = K_i \times (A_{O_s})^{\frac{1}{n}} = \frac{\alpha}{\beta} \times (A_{O_s})^{\frac{1}{n}} = \frac{(\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m}}{\left[\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m} \right] \times \frac{1}{n}} \times (A_{O_s})^{\frac{1}{n}} \quad (6)$$

式中: K_i 为第 i 个子系统的加权系数; α 和 β 为 K_i 的分子和分母; A_{O_s} 为系统使用可用度; K_{ij} 为第 i 个子系统第 j 个加权因子; n 为子系统个数; m 为加权因子个数。

3 实例评估

3.1 组成与指标分配

现以某水雷产品为例说明使用可用度指标分配方法。某水雷产品由 3 个子系统组成, 分别是引

信装置、控制装置及战斗部, 其使用可用度分配串联模型见图 4。该水雷产品的使用可用度 A_o 门限值取为 0.85, 目标值取为 0.9, 要将其分配到子系统, 依据用户提出的保障性参数 MLDT 的范围并权衡确定子系统的可靠性参数 MTBF、维修性参数 MTTR 的值。

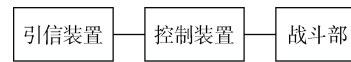


图 3 某型水雷使用可用度分配串联模型

Fig.3 Series model of operational availability allocation for one type of mine

本例中采用 2 种加权因子: 重要性和复杂度, 其权重取值范围参见表 1 和表 2。采用文中第 2 节的使用可用度分配方法, 该水雷产品各子系统加权因子取值和可用度分配结果见表 3。

表 3 某水雷产品各子系统加权因子取值和可用度分配结果

Table 3 Weighting factor value and operational availability allocation for one type of mine's subsystems

加权因子	加权原则	各子系统加权因子取值		
		引信装置 ($i=1$)	控制装置 ($i=2$)	战斗部 ($i=3$)
重要性 ($j=1$)	越重要的子系统要求可用性越高, K_{ij} 越大	$K_{11}=0.98$	$K_{21}=0.95$	$K_{31}=0.85$
复杂度 ($j=2$)	越复杂的子系统实现可用性越低, K_{ij} 越小	$K_{12}=0.90$	$K_{22}=0.95$	$K_{32}=0.96$
	$\alpha = (\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m}$ (加权因子数 $m=2$)	0.911 4	0.902 5	0.912 0
	$\beta = \left[\sum_{i=1}^n (\sum_{j=1}^m K_{ij}) \times \frac{1}{m} \right] \times \frac{1}{n}$ (子系统数 $n=3$)		0.908 6	
	$K_i = \alpha / \beta$	1.003 1	0.993 3	1.003 7
A_{O_i} 门限值	A_{O_s} 门限值=0.85; $(0.85)^{1/3}=0.947$	$0.947 \times 1.0031=0.9499$	$0.947 \times 0.9933=0.9407$	$0.947 \times 1.0037=0.9505$
A_{O_i} 目标值	A_{O_s} 目标值=0.90; $(0.90)^{1/3}=0.965$	$0.965 \times 1.0031=0.9680$	$0.965 \times 0.9933=0.9585$	$0.965 \times 1.0037=0.9686$

3.2 子系统的 RMS 参数估算

按照分配的子系统 A_{O_i} 的目标值和门限值, 采用相似产品法, 参考同类型产品的相关参数, 权衡估算各子系统的 RMS 参数: MTBF、MTTR 及 MLDT。

3.2.1 计算公式

由本文第 1 章节中的使用可用度计算公式

$$A_o = \frac{MTBF}{MTBF+MTTR+MLDT} \text{ 进行如下推导:}$$

$$MTBF + (MTTR+MLDT) = \frac{MTBF}{A_o} \quad (7)$$

$$(MTTR+MLDT) = MTBF \times \frac{1-A_o}{A_o} \quad (8)$$

$$MTBF = (MTTR+MLDT) \times \frac{A_o}{1-A_o} \quad (9)$$

3.2.2 MLDT 参数的预估

平均延误时间 (MDT, 在可用度计算公式中多用 MLDT 表示) 是指系统从进入不能执行任务状态到恢复能执行任务状态所用的平均时间, 通常包括平均保障延误时间 T_{MLD} 和平均管理延误时间 T_{MAD} , 它是水雷产品不能工作的主要原因之一, 主要包括备件延误、保障设备延误、技术资料延误、

维修人员延误以及行政管理延误等^[8]。在使用可用度指标分配时，通常采用用户设定的 MLDT 上限值作为参考，在子系统的 MTBF、MTTR 确定后，在满足使用可用度的基础上，再对 MLDT 进行计算，确定合理的参数，进行合理地保障方案的制定、保障资源的规划。水雷产品用户设定的 MLDT 上限值一般取为 48 h (2 d)。

3.2.3 MTTR 参数的预估

武器装备的维修通常分为预防性维修和修复性维修^[9]。预防性维修主要包括：技术准备前检查、寿命件更换、定期检查等工作。预防性维修工作采取定期维护（日、周、月、年维护）和不定期维护相结合的方式。年维护时各装备并行开展，期间影响装备的正常使用，日、周、月定期维护一般不影响装备的正常使用。为了保证水雷具有较高的可用度，定期对包装箱里的水雷进行维护和检测。不定期维护，根据装备使用情况及频率，视情进行维护。修复性维修，主要对装备日常检查或使用中发现的故障进行处理，并按照维修作业体系进行处理，一般在水雷的基地级维修场所由专业的技术人员依靠相关检测设备、器材、备件等实施，并将修复合格的水雷装备再次移交列装部队。

恰当地评估并确定维修时间将直接影响到装备使用的安全性及经济性，在使用可用度指标分配

评估时，通常采用平均维修时间 MTTR 作为维修性评估参数，且仅考虑部队基地级维修层面^[10]。水雷产品用户设定的 MTTR 上限值一般取为 1 h，综合考虑维修人员熟练度等因素，放宽余量，MTTR 上限值取为 2 h。

3.2.4 计算符合 A_{oi} 要求的 MTBF

公式 (9) 适用于已经为产品设定 MLDT 的取值上限，计算符合 A_{oi} 目标值和门限值要求的 MTBF，然后再分配 MTTR。如果用户设定的 MLDT 上限值为 48 h (2 d)，MTTR 上限值为 2 h，则据此利用公式(9)可计算出子系统引信装置的 MTBF 指标取值下限，结果见表 4。

表 4 MTBF 的分配指标值范围
Table 4 Allocation index value range of MTBF

A_{oi}	$(1-A_{oi})/A_{oi}$	(MTTR+MLDT) /h	MTBF/h
目标值 97%	0.030	50.00	1 616
门限值 95%	0.052	50.00	950

计算结果说明：该水雷的引信装置在设计初期的 MTBF 目标值分配为 1 616 h，门限值分配为 950 h。按照上述计算方法，依次对该水雷的控制装置、战斗部的 MTBF 的分配值进行了计算，结果见表 5。

表 5 子系统 MTBF 的分配指标值与实际参考值对比

Table 5 Comparison between allocation index value and actual reference value of subsystems' MTBF

名称	$A_{oi}/\%$		(MTTR+MLDT) /h	MTBF/h			分配是否合理
	目标值	门限值		目标值	门限值	现有水平参考值	
引信装置	97	95	50.00	1 616	950	2 000	合理
控制装置	96	94	50.00	1 200	785	1 500	合理
战斗部	97	95	50.00	1 616	950	2 100	合理

经分析可知，在武器装备预研和设计初期，采用第 2 节的加权分配的使用可用度分配方法，可以合理地进行子系统使用可用度分配，分配的 MTBF 下限值符合现有可靠性水平，可作为可靠性设计参数输入。

3.3 依据 RMS 参数设计值对系统 A_{oS} 设计值进行综合

在武器装备的 MTBF 设计值确定之后，需要结合设计方案进行维修方案、保障资源的合理规

划，进而确定合理的系统级 MTTR、MLDT 参数的设计值，以便对装备当前保障性能和保障能力进行评估，确认是否满足使用可用度 A_{oS} 的指标要求。结合实际维修、保障情况，对某型水雷的 RMS 参数进行迭代后的结果如表 6 所示。

分析表 6 可知，对完成设计进入使用阶段的武器装备，采用第 2 节所述的算法进行系统使用可用度的综合评估，合理可行。

表 6 系统级 RMS 参数设计值与分配值对比

Table 6 Comparison between design index value and allocation index value of system RMS parameters

名称	MTBF/h		MTTR/h		MLDT/h		$A_{oi}/\%$	
	分配值	设计值	分配值	设计值	分配值	设计值	分配值	设计值
引信装置	1 616	2 200	2	1	48	20	97	99
控制装置	1 200	1 600	2	1	48	20	96	98
战斗部	1 616	2 300	2	1	48	20	97	99
水雷系统	450	1 500	2	1	48	20	90	98.6

3.4 结论

经分析可知,在武器装备论证与设计阶段,采用第 2 节所述的算法进行子系统使用可用度的分配与评估,作为子系统的 RMS 设计参数;在武器装备使用与保障阶段,采用第 2 节所述的算法对最新采集的 RMS 数据进行反推,综合计算得出系统使用可用度,更新装备当前的使用可用度,对作战与训练具有一定的实际指导价值。通过上述论述,可以得出以下几点结论:

1) 在计算可用度时, MTBF、MTTR 取值要根据最近所统计的时间进行求解,以使之符合系统的最新状况,为此,在日常工作中,相关单位要做好有关水雷装备工作时间、修理时间统计工作,为分析水雷使用可用度提供必要的基础数据;

2) 水雷可用度分析在部队的装备管理中应作为一项经常性工作,使之可以对水雷装备运行状况起到监测作用,以便可以实时掌握水雷装备所处的状态;

3) 通过水雷可用度的分析,可为水雷使用管理及维修提供依据。

4 结束语

使用可用度作为战备完好性参数之一,是综合保障的顶层参数,对武器装备的可靠性、维修性、保障性指标论证、设计起到关键作用。本文对影响水雷装备战备完好性的使用可用度参数进行了研究,给出了与使用可用度有关的 RMS 参数的表述,构建了基于多影响因素的水雷装备使用可用度分配计算模型,对子系统的使用可用度进行了分配,分配结果与现有相似装备子系统的可靠性、维修性、保障性水平基本一致,有效地对该模型进行了

评估验证。并结合实际水雷装备服役信息的相关统计信息,采用该算法模型反推并集成系统使用可用度,实际结果表明该方法可实时验证服役时的水雷装备战备完好性。为开展水雷装备论证设计阶段使用可用度分配、使用阶段使用可用度评估提供了一种工程实践尝试。

参考文献

- [1] 王自力,屠庆慈,曾声奎. 武器装备可靠性、维修性、保障性要求论证程序和方法综述[J]. 可靠性工程, 2004, 3(1): 1-6.
- [2] 李院生,时和平. 装备战备完好性及其影响因素分析[J]. 电子产品可靠性与环境试验, 2007, 25(1): 38-41.
- [3] 冯川,汪文峰,杨建军. 使用可用度分配模型研究[J]. 可靠性与环境适应性研究, 2009, 27(6): 49-52.
- [4] 郭东旭,候发林. 基于专家打分法的自航水雷使用可用度评估方法[J]. 数字海洋与水下攻防, 2018, 1(3): 41-44.
- [5] 宋太亮,张宝珍,丁利平,等. GJB451A—2005 可靠性维修性保障性术语[S]. 北京:总装备部军标出版发行部, 2005.
- [6] 杨建元. 使用可用度分解方法研究[J]. 系统工程与理论实践, 2005, 31(2): 129-133.
- [7] SMIDT-DESTOMBESA K S, HEIJDEN M C, HARTEN A. On the availability of a k-out-of-N system given limited spare and repair capacity under a condition based maintenance strategy[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2004(83): 287-300.
- [8] 吴新宏,马溢清,燕永敦. 战术导弹装备使用可用度评估分析[J]. 兵工学报, 2015, 36(S2): 11-14.
- [9] 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.
- [10] 郭霖瀚. 基本作战单元修复性维修过程建模仿真[J]. 北京航空航天大学学报, 2007, 33(1): 27-31.

(责任编辑: 曹晓霖)