

# 自航水雷作战效能分析

王毅刚, 侯发林, 罗晓强

(中国人民解放军 91388 部队, 广东 湛江 524022)

**摘要** 针对各国自航水雷发展迅速且其作战效能分析日渐受高度重视的情况, 在分析自航水雷使用特点的基础上, 利用美国工业界武器系统效能咨询委员会提出的作战效能评估模型 ADC, 推导了自航水雷武器作战效能评估方法解析式, 详细分析了影响自航水雷武器作战效能的主要因素。同时, 根据分析影响作战效能的各要素, 提出了自航水雷在设计定型试验中应重点考核的关键指标和能力, 为后续开展自航水雷设计定型试验提供了新的思路。

**关键词** 自航水雷; 作战效能; 可靠性

**中图分类号** TJ61      **文献标识码** A

## Operational Effectiveness Analysis of Self-propelled Mine

WANG Yigang, HOU Falin, LUO Xiaoqiang

(No. 91388 Unit of PLA, Zhanjiang 524022, China)

**Abstract** With the situation that self-propelled mines in the world are developing rapidly and the operational effectiveness is increasingly drawn attention, based on the analysis of the operational characteristics of self-propelled mine, and using the operational effectiveness evaluation model ADC proposed by WSEIAC, the formula of operational effectiveness evaluation method of self-propelled mine weapon is derived. The main factors affecting operational effectiveness of self-propelled mine weapon are analyzed in detail. At the same time, according to the analysis of the factors affecting operational effectiveness, the key indexes and abilities that should be emphatically assessed in the design typing test of self-propelled mine are put forward, which provides a new thought for the follow test of self-propelled mine.

**Key words** self-propelled mine; operational effectiveness; reliability

## 0 引言

自航水雷是离开发射平台后依然具备自主航行能力的水雷, 主要用于封锁敌方港口、航道, 打击大中型水面舰船, 构成攻势水雷障碍。由于其具有航程远、隐蔽性强、发射平台生存率高等优势, 实现了由兵力布雷到兵器布雷的转变, 目前已成为各国海军水雷发展的新方向, 是各国海军进行水雷战的重要装备。

对武器装备作战效能进行评估有多种方法<sup>[1-4]</sup>, 国内对武器系统进行作战效能评估一般采用美国工业界武器系统效能咨询委员会(WSEIAC)提出的 ADC 模型。20 世纪 60 年代, 美国工业界武器系统效能咨询委员会以影响实战中完成任务的 3 个主要因素为主要依据, 建立了通用的自航水雷作战效能方程, 给出了设定情形下完成任务的策略和方法。

### 1 作战效能模型<sup>[5-7]</sup>

WSEIAC 的武器系统效能表达式为<sup>[1, 8-9]</sup>

$$E = A^T DC \quad (1)$$

式中： $E$  为武器系统完成任务程度的量化指标； $A$  为可用度，即需要执行任务的任一时刻系统处于正常工作状态的概率； $D$  为可信度，即在执行任务过程中系统处于正常工作状态的概率； $C$  表示武器系统在各种状态下完成各种作战要求的能力，即作战能力。

#### 1.1 可用度向量

可用度是在开始执行任务时系统可用程度的量度，是武器装备、人员、程序三者之间的函数，与武器装备系统可靠性、维修性、维修管理水平、维修人员数量及其水平、供应水平等因素有关。

可用度行向量为

$$A^T = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_n) \quad (2)$$

式中： $a_i$  为开始执行任务时系统处于第  $i$  种状态的能力， $i=1, 2, \dots, n$ ； $\sum_i a_i = 1$ 。

对自航水雷而言，在岸基储存期间只存在“可投入使用”和“不可投入使用”2 种状态，则系统可行性向量可以表示为

$$A^T = (a_1, a_2) \quad (3)$$

式中： $a_1$  为系统在开始执行任务时，处于正常工作状态的概率，它等于存储使用可用度  $A_{so}$  与装载可靠度  $R_c(t_c)$  的乘积，即  $a_1 = A_{so} \cdot R_c(t_c)$ ，由于水雷装载时间较短，一般可以认为装载可靠度  $R_c(t_c)$  近似为 1； $a_2$  为系统在开始执行任务时，处于发生故障的概率，即  $a_2 = 1 - A_{so} \cdot R_c(t_c)$ 。

根据可靠性理论，有

$$A_{so} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (4)$$

式中：MTBF 为系统平均故障间隔时间；MTTR 为系统平均修复时间。

装载可靠度  $R_c(t_c)$  是时间的函数，随着时间的增加而降低。

#### 1.2 可信度矩阵

可信度是在已知开始执行任务时系统状态情况下，在执行任务过程中的某一个或几个时刻系统

状态的量度，可以表示为系统在完成某项特定任务时将进入和（或）处于他的任一有效状态，且完成与这些状态有关的各项任务的概率。也可以表示为其他适当的任务量度。可信度矩阵描述了系统在执行任务过程中的状态随机转移特性。

可信度有  $n$  种状态，则有  $n \times n$  种可能的转换状态，可信性矩阵是一个  $n \times n$  阶的矩阵，即

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中， $d_{ij}$  为已知系统在开始执行任务时处于第  $i$  种状态，而在执行任务过程中处于第  $j$  种状态的概率。

自航水雷在装载期间只存在“正常”和“故障”两种状态，则

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} \\ d_{21} & d_{22} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中： $d_{11}$  为自航水雷发射前处于正常状态条件下，在执行自航任务期间处于正常工作状态的概率，即  $d_{11} = R_m(t_m)$ ； $R_m(t_m)$  为自航水雷布雷任务可靠度； $d_{12}$  为自航水雷发射前处于正常状态条件下，在执行自航任务期间处于故障工作状态的概率，即  $d_{12} = 1 - R_m(t_m)$ ； $d_{21}$  为自航水雷发射前处于故障状态条件下，在执行自航任务期间处于正常工作状态的概率，即  $d_{21} = 0$ ； $d_{22}$  为自航水雷发射前处于故障状态条件下，在执行自航任务期间处于故障工作状态的概率，即  $d_{22} = 1$ 。

于是，可信性矩阵可变为

$$D = \begin{bmatrix} R_m(t_m) & 1 - R_m(t_m) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

#### 1.3 作战能力矩阵

作战能力是在已知执行任务期间的系统状态情况下，系统完成任务能力的量度。更准确地说，作战能力是系统各种性能的集中体现。

作战能力为  $C = (C_{ij})_{nm}$ 。式中， $C_{ij}$  为系统有效状态  $i$  条件下，第  $j$  个品质因数的值。计算作战能力  $C$ ，在很大程度上取决于所评价的武器装备系统任务。

自航水雷攻击过程只存在“正常”和“不正常”

两种状态。因此:

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中:  $C_1$  为自航水雷在战斗服役期内, 完成任务的能力, 它是由水雷各项战术技术性能所确定的作战能力  $C$ , 即  $C_1 = C$ ;  $C_2$  为自航水雷在战斗服役期内处于故障的状态下, 完成任务的能力, 显然  $C_2 = 0$ 。

水雷的作战能力可以理解为在规定条件下水雷障碍达到布雷作战预期目标的程度。按照水雷作战效能指标体系结构, 其效能一般包括: 毁伤效能、障碍生命力、封锁作用和间接损失 4 个方面。水雷给敌方造成的间接损失涉及多方面, 且与水雷武器使用的具体作战背景有密切相关, 难以用一个较为统一的指标来全面衡量, 一般只能结合特定条件下做出具体的效能分析。水雷障碍生命力和封锁作用是由水雷本身特性、海区自然环境特性和敌方反水雷等诸多特性决定的, 本文的水雷作战效能主要讨论损伤效能。

### 1.3.1 布放水雷完好率

布放水雷完好率是指自航水雷投送水雷到预定雷位点附近, 水雷在布放过程中保持完好, 自动进入工作状态的程度, 用  $P_b$  表示。

### 1.3.2 投送精度

投送精度表示自航水雷投送水雷到预定地点的准确程度, 包括纵向平面精度和水平精度。主要影响因素为初始位置误差、自主导航偏差、控制误差等。自航水雷只有准确地把引信战斗部投送到指定的位置才能起到封锁敌方港口、航道等作战任务, 用  $P_c$  表示。

### 1.3.3 水雷工作可靠度

水雷工作可靠度是指布放完好的水雷在规定使用条件下保持正常工作的概率, 用  $R(t)$  表示, 其中  $t$  为时间。对于布放完好的水雷, 可以认为其初始工作可靠度为 1, 但由于水雷并不都是布放后立即或很短一段时间内就发起攻击, 往往需要长时间在水中值更, 受自身因素和外部环境的影响, 水雷工作的可靠度将随着时间的推移而降低。

### 1.3.4 遭遇雷障的概率

目标舰船遭遇水雷障碍的概率主要受雷位误

差、舰船航线分布的规律性、舰船航行误差等因素影响。遭遇水雷的概率用  $P_z$  表示。

### 1.3.5 水雷动作概率

水雷动作概率是指目标舰船从水雷动作区域经过时, 引起水雷动作的概率, 用  $P_d$  表示。

### 1.3.6 水雷虚警率

水雷虚警是指在水雷引信作用距离 2 倍半径之外由于自身或外界环境影响而造成的水雷引信误动。水雷虚警率用  $P_x$  表示。一般可以认为, 水雷在引信作用距离 2 倍半径之外爆炸对打击的目标舰船没有影响。

### 1.3.7 作战能力

自航水雷的作战能力计算模型为

$$C = P_b \cdot P_c \cdot R(t) \cdot P_z \cdot P_d \cdot (1 - P_x) \quad (9)$$

式中:  $P_b$  为布放水雷完好率;  $P_c$  为投送精度;  $R(t)$  为水雷工作可靠度;  $P_z$  为遭遇雷障的概率;  $P_d$  为水雷动作概率;  $P_x$  为水雷虚警率。水雷作战能力分解示意图见图 1。

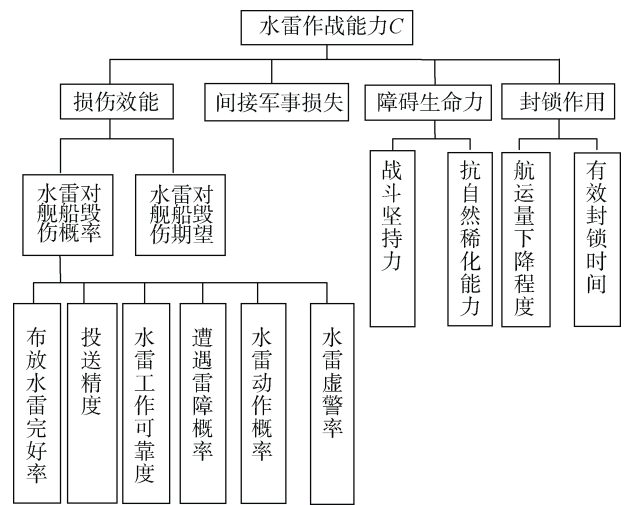


图 1 水雷作战能力分解示意图

Fig. 1 Decomposition schematic diagram of mine operational capability

## 1.4 作战效能表达式

把公式 (4)、(7)、(9) 带入公式 (1) 中, WSEIAC 的武器系统效能表达式为

$$E = \begin{bmatrix} A_{so} \cdot R_c(t_c) & 1 - A_{so} \cdot R_c(t_c) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R_m(t_m) & 1 - R_m(t_m) \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C \\ 0 \end{bmatrix} = A_{so} \cdot R_c(t_c) \cdot R_m(t_m) \cdot C = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \cdot R_c(t_c) \cdot R_m(t_m) \cdot P_b \cdot P_c \cdot R(t) \cdot P_z \cdot P_d \cdot (1 - P_x) \quad (10)$$

## 2 基本模型提供的自航水雷设计定型启示

在对自航水雷作战效能进行分析研究的同时,必然要求水雷设计定型试验人员思考总结另一个相关问题——基于作战效能的自航水雷设计定型试验方法研究。

### 2.1 自航水雷可靠性对作战效能的重要性

从公式(10)中我们可以知道,自航水雷作战效能 $E$ 是由存储使用可用度 $A_{so}$ 、装载可靠度 $R_c(t_c)$ 、自航水雷布雷任务可靠度 $R_m(t_m)$ 和作战能力 $C$ 的乘积,而其中4个参量中可靠性参量就占3个。因此,可以看出自航水雷可靠性指标在决定自航水雷作战效能上占有重要的地位,具有作战能力 $C$ 无法比拟的重要作用。在此我们可以举例说明可靠性指标的重要性。假设存在5种型号的自航水雷,其中的MTBF、MTTR、 $A_{so}$ 、 $R_c(t_c)$ 、 $R_m(t_m)$ 指标见表1,并假设作战能力 $C=1$ (实际上作战能力绝对不可能为1,在此只是为了说明自航水雷的可靠性而做此假设)。

从表1我们可以看出,无论自航水雷的战术技术指标如何高(即使是 $C=1$ ,如表1假设),只要可靠性指标低,作战效能就很低。所以自航水雷的可靠性指标在自航水雷作战效能中占有重要的地位,在靶场进行设计定型试验考核时不仅要关注战术技术性能的考核,而且更要关注可靠性指标的考核,对可靠性指标进行“一票否决”制度。

表1 水雷作战效能因素分析

Table 1 Analysis of mine operational efficiency factors

序号	$A_{so}$	$R_c(t_c)$	$R_m(t_m)$	$C$	$E$
1	0.99	0.99	0.95	1	0.93
2	0.98	0.96	0.91	1	0.86
3	0.97	0.94	0.86	1	0.78
4	0.96	0.92	0.82	1	0.7
5	0.95	0.90	0.77	1	0.66

### 2.2 自航水雷作战能力考核

由公式(10)可知,在自航水雷存储使用可用度 $A_{so}$ 、装载可靠度 $R_c(t_c)$ 和自航水雷布雷任务可靠度 $R_m(t_m)$ 一定的条件下,要使自航水雷的作战

效能最大,就要使作战能力 $C$ 最大。在靶场进行设计定型试验的时候,就必须对影响作战能力 $C$ 的因素进行考核。由公式(9)-(10)可知,作战能力 $C$ 主要受布放水雷完好率 $P_b$ 、投送精度 $P_c$ 、水雷工作可靠度 $R(t)$ 、遭遇雷障的概率 $P_z$ 、水雷动作概率 $P_d$ 和水雷虚警率 $P_x$ 影响,而这些影响因素中,彼此之间是相互影响和相互制约的,在诸多的影响因素中,对作战能力 $C$ 的影响权重是彼此各不相同的。因此在设计定型试验中,对影响作战能力 $C$ 较大的因素进行着重考核。经过分析我们可以知道,遭遇雷障的概率 $P_z$ 主要受投送精度 $P_c$ 影响,布放水雷完好率 $P_b$ 和水雷工作可靠度 $R(t)$ 主要与水雷的总体设计有关,因此自航水雷作战能力 $C$ 的主要影响因素为投送精度 $P_c$ 、水雷动作概率 $P_d$ 和水雷虚警率 $P_x$ 。这样,在自航水雷的设计定型试验中,要着重对 $P_c$ 、 $P_d$ 和 $P_x$ 进行考核。

## 3 结束语

本文首先对WSEIAC的武器系统效能表达式进行了修改,然后得出了影响自航水雷武器效能的表达式,详细分析了自航水雷武器效能的影响因素,并指出了自航水雷在设计定型试验考核中的关键指标。

## 参考文献

- [1] 颜冰,董理,张晓兵,等.水雷作战效能分析[M].北京:国防工业出版社,2018.
- [2] 李志猛,徐培德,冉承新,等.武器系统效能评估理论及应用[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [3] 时俊红.武器系统效能评估方法浅论[J].火控雷达技术,2003,32(4):47-50.
- [4] 许瑞恩.武器装备效能模型和方法概论[J].装备指挥技术学院学报,2002,13(1):1-5.
- [5] 陈蓓,尹以新,张元发,等.反辐射无人机攻击效能评估[J].空军雷达学院学报,2002,16(1):11-13.
- [6] 周延安,梅刚.反辐射无人机作战效能分析[J].舰船电子对抗,2007,30(1):42-45.
- [7] 张元发,陈蓓.多架反辐射无人机的作战效能分析[J].空军雷达学院学报,2002,16(2):9-1.
- [8] 郭齐胜,罗小明,潘高田.武器装备试验理论与检验方法[M].北京:国防工业出版社,2013.
- [9] 方洋旺,伍友利,方斌.机载导弹武器系统作战效能评估[M].北京:国防工业出版社,2010.

(责任编辑:肖楚楚)