

doi: 10.7690/bgzd.2022.08.005

## 舰船装备保障能力评估指标及建模方法

杨云生, 柴 凯, 丰少伟

(海军工程大学舰船与海洋学院, 武汉 430033)

**摘要:** 针对舰船保障能力的精准评估问题, 建立舰船全寿命保障能力评估指标体系及各指标的计算模型。构建舰船装备保障能力评估指标体系, 包括各种指标的计算模型; 制定调研策略、基本数据结构 and 数据处理方法; 选取某个舰船系统进行案例计算。结果表明: 构建的简易、实用舰船装备保障能力评估指标体系及各种指标的简易计算模型, 可用于舰船相关系统的保障能力评估。

**关键词:** 保障能力评估; 舰船装备; 全寿命; 指标体系

**中图分类号:** TJ83 **文献标志码:** A

## Evaluation Index and Modeling Method of Warship Equipment Support Capability

Yang Yunsheng, Chai Kai, Feng Shaowei

(College of Warship and Ocean, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of accurate evaluation of warship support capability, the evaluation index system of warship support capability in full life cycle and the calculation model of each index are established. The evaluation index system of warship equipment support capability is constructed, including the calculation model of various indexes. The research strategy, basic data structure and data processing method are formulated. A warship system is selected for case calculation. The results show that the simple and practical evaluation index system of warship equipment support capability and the simple calculation model of various indexes can be used for the support capability evaluation of warship related systems.

**Keywords:** support capability evaluation; warship equipment; full life cycle; index system

### 0 引言

装备保障性是舰船系统的设计特性和计划保障资源满足平时战备完好和战时使用要求的能力, 是舰船装备的固有属性, 既是装备战技术性能的重要组成部分, 又是装备作战效能的重要决定因素<sup>[1]</sup>。准确评估舰船装备保障能力, 对于优化装备保障系统, 提高装备可用度和经费使用效益具有重要意义。为客观评价舰船装备改装、高等级计划修理或执行重大任务等前后的保障能力, 并科学指导开展相关工作, 可利用舰船装备保障能力评估指标体系及建模等关键技术, 对舰船装备保障能力进行评价, 进而优化舰船装备保障系统<sup>[2]</sup>。

美军一向重视装备维修保障能力指标的论证, 制订并颁布了可靠性及维修性指令, 研发了给出指标数据的仿真程序<sup>[3]</sup>; 开发了用于计算舰船装备可用性水平的 TIGER 计算机仿真程序, 并在其基础上开发了“以可靠性为中心的库存模型”, 通过计算平均保障延误时间 (mean logistic delay time, MLDT) 值, 使设备可用度达到最大<sup>[4]</sup>; 将 TIGER 软件与

ACIM 模型相结合, 建立以战备完好性为基础的备件配置模型, 用于舰船装备可靠性、维修性和保障性 (reliability maintainability supportability, RMS) 评估<sup>[5]</sup>; 并推出了“要求生成系统”<sup>[6]</sup>。美军维修保障能力研究不断向大系统级发展, 从最初单舰 RMS 指标参数, 到舰队的维修保障指标体系, 再到航母战斗群的维修保障指标体系, 采用的仿真研究技术也不断提升拓展, 且更加智能化<sup>[7]</sup>。

我国海军对 RMS 的研究主要集中在单舰的维修保障能力指标。在指标参数选取方面, 舰船装备 RMS 指标从无到有, 将使用可用度和任务可靠度作为舰船总体层次指标现已得到共识; 在指标范围确定方面, 从最初采用统计分析法、相似产品类比法和 Delphi 法, 到中期采用解析分析法和 Monte Carlo 数字仿真法, 再到后期建立基于作战仿真的 Monte Carlo 仿真法等<sup>[8]</sup>。在舰船总体 RMS 论证的科学研究和工程实践中, 已形成了一套工程适用性强的 RMS 指标论证方法: 在初步建立舰艇编队保障能力评价指标体系和模型的基础上, 提出了舰艇及编队任务成功判据, 并从现有修理工程中总结舰艇编队

收稿日期: 2022-04-27; 修回日期: 2022-05-28

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51679245, 51579242); 湖北省自然科学基金 (2020CFB148)

作者简介: 杨云生 (1973—), 男, 浙江人, 硕士, 副教授, 从事舰船装备综合保障研究。E-mail: chaikai0805@163.com。

维修需求,开发了部分维修保障的仿真软件原型<sup>[9]</sup>。

随着各国军队对装备维修保障能力指标体系认识的不断深入和基于装备维修保障指标决策需求的拓展与提升,装备维修保障指标体系也在同步持续丰富和优化。同时,不同的装备必须在全面深入分析其功能要求、故障模式、使用规律和维修保障等特点的基础上,才能建立具有针对性的指标体系。为此,笔者提出舰船装备保障能力指标体系的构建原则和评价参数及模型,通过调研提取某型舰船动力系统用于保障能力评估的数据信息,验证评估方法的可行性和有效性。

## 1 指标体系及建模

### 1.1 指标体系的构建原则

构建舰船装备保障能力指标体系必须遵循既适用又有效的一般性原则。一般性原则通常包括独立性原则、可解性原则、可验证性原则、完备性原则和需求性原则<sup>[10]</sup>。

#### 1) 独立性原则。

在同一层次同一类指标之间的非相容性,即不允许出现一个指标包容另一个指标的情况。在建立 RMS 评价指标体系过程中,必须充分考虑各指标之间的相关性、层次性和适用性问题。

#### 2) 可解性原则。

建立的指标体系具有可建模、能解算的能力。对于定量指标,要尽量选择能够通过建模计算的指标进入评价体系;对定性指标,应尽量转化为可定量衡量的参数,对可解性较差的指标应予以删除。

#### 3) 可验证性原则。

所建立的指标体系不仅在装备研制、制造时可以使用,而且在实际运用中能得到检验;因此,在选择指标参数时,必须提前考虑今后实际应用中检验和验证指标的要求及方法。

#### 4) 完备性原则。

所建立的指标体系能充分反映装备的可靠性、维修性、保障性水平,选定的指标参数既有能表现单一能力又有能反映综合能力,既要有分指标又要有总指标,力求能够全面准确地反映系统的 RMS。

#### 5) 需求性原则。

所选择的指标必须具有代表性,不宜过多也不宜过少。指标过多容易违反独立性原则,参数过于繁杂;指标过少,可能违反完备性原则,不能全面反映装备 RMS 的真实水平。

### 1.2 基本指标参数

保障能力指标体系是开展保障能力评估的基础,而各项具体的指标参数又是构成指标体系的重要元素。目前,常用的保障能力指标包括平均保障延误时间 (MLDT)、任务前保障资源准备时间 (TSre)、使用可用度 (Availability)、备件利用率、备件周转率、装备效费比等<sup>[11]</sup>。根据前述指标体系构建原则要求,指标参数多并不一定就好,有些指标会因为缺乏参数而无法计算或估算,导致很难用于舰船装备的保障能力评估。在此,主要选取平均保障延误时间、任务前保障资源准备时间和使用可用度作为主要指标参数。

#### 1) 平均保障延误时间 MLDT。

平均保障延误时间是指为修复故障,在资源保障方面出现的各种延误时间(如等待人员、备品备件、维修设备等资源配备所用时间)之和的平均值。

为方便建模,将舰船装备分为舰船、舰船系统、设备 3 级系统,设舰船系统有  $m$  个,第  $i$  个系统有  $N_i$  个设备,第  $i$  个系统的第  $j$  个设备的平均保障延误时间为  $MLDT(i, j)$ 、平均故障间隔时间为  $MTBF(i, j)$ ,  $MTBF(i)$  为第  $i$  个舰船系统的平均故障间隔时间,  $MLDT(i)$  为第  $i$  个舰船系统的平均保障延误时间,则系统平均保障延误时间的计算模型如下:

$$MLDT(i) = MTBF(i) \sum_{j=1}^{N_i} (MLDT(i, j) / MTBF(i, j)); \quad (1)$$

$$MTBF(i) = 1 / \sum_{j=1}^{N_i} (1 / MTBF(i, j)); \quad (2)$$

$$MLDT = \sum_{i=1}^m (MLDT(i) / MTBF(i)) / \sum_{i=1}^m (1 / MTBF(i)). \quad (3)$$

#### 2) 任务前保障资源准备时间 TSre。

任务前保障资源准备时间是指从接到命令的时刻开始,直到保障资源准备完毕,舰船可满足随时出航执行任务所经历的时间。可见,TSre 直接影响舰船执行任务的及时性。由于舰船执行任务需要备件、技术人员、保障设施等多种资源,且每种资源所属的舰船系统和所需的准备时间不同;因此,需根据舰船系统来区分保障资源。单次任务 TSre 可采用以下方法计算:

设舰船系统有个  $m$ ,第  $i$  个舰船系统需要  $K_j$  种资源,第  $j$  种资源的准备时间为  $Tre(i, j)$ ,则舰船的 TSre 为各种资源准备时间的最大值,即

$$TSre = \max(Tre(i, j))。 \quad (4)$$

舰船平均 TSre 的计算模型如下：

$$\overline{TSre} = \left( \sum_{k=1}^S TSre(k) \right) / S。 \quad (5)$$

式中： $\overline{TSre}$  为平均任务前保障资源准备时间； $TSre(k)$  为第  $k$  次舰船的任务前保障资源准备时间； $S$  为任务次数。

TSre 与舰船的任务类别有很大关系，因此 TSre 通常针对某个类别任务的而言；若将不同类别任务的保障资源准备时间混合计算，则计算结果将失去意义。

3) 使用可用度。

使用可用度是指装备在任一随机时刻开始执行任务时，处于可工作状态的概率，是装备可用性的概率度量。通常按时间划分为瞬时可用度、平均可用度和稳态可用度 3 种。

① 瞬时可用度  $A(t)$ 。

对任一随机时刻  $t$ ，若令

$$X(t) = \begin{cases} 0 & (t \text{时刻装备处于可工作状态}) \\ 1 & (t \text{时刻装备处于不可工作状态}) \end{cases}。 \quad (6)$$

则装备在时刻  $t$  的可用度为：

$$A(t) = P\{X(t)=0\}。 \quad (7)$$

可见， $A(t)$  只涉及  $t$  时刻装备是否可工作，而与  $t$  时刻以前装备是否发生故障或是否经过修复无关。

当装备的故障间隔时间与修复时间分别服从参数  $\lambda$  和  $\mu$  指数分布时，其  $A(t)$  可按下式计算：

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t}。 \quad (8)$$

② 平均可用度  $\bar{A}(t)$ 。

装备在给定时间  $[0, t]$  内的可用度的平均值：

$$\bar{A}(t) = \frac{1}{t} \int_0^t A(t) dt。 \quad (9)$$

③ 稳态可用度  $A$ 。

若极限  $\lim_{t \rightarrow \infty} \bar{A}(t) = A$  存在，则称  $A$  为稳态可用度，

表示装备在长期运行过程中处于可工作状态的时间比例。在实际使用中，稳态可用度可表示为某一给定时间内装备能工作时间  $U$  与整个给定时间(能工作时间  $U$  和不能工作时间  $D$  之和)的比值，即：

$$A = \frac{U}{U + D}。 \quad (10)$$

装备不能工作的因素很多，图 1 给出了装备的在编时间划分图解。

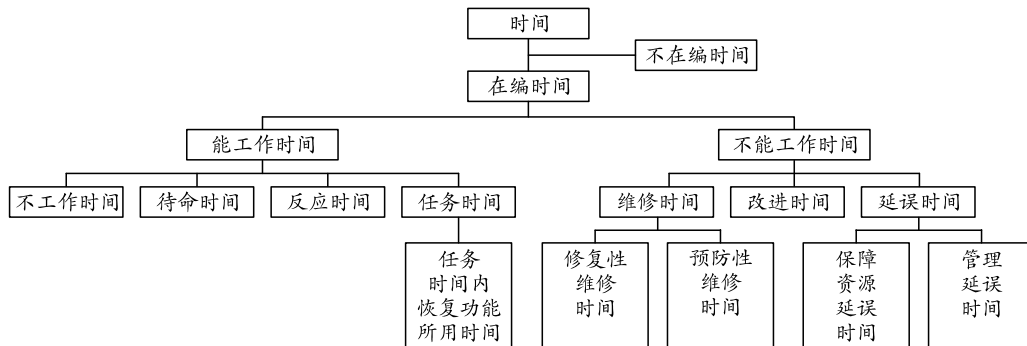


图 1 装备时间图解

在工程实践中，根据装备不能工作时间包含的内容，通常使用固有可用度、可达可用度和使用可用度 3 种稳态可用度。其中：固有可用度  $A_i$  是考虑装备因故障不能工作，需修复后再转入可用状态时的可用度，取决于装备的固有可靠性和维修性；可达可用度  $A_a$  是考虑修复性维修和预防性维修在内的装备可用度，不仅与装备固有可靠性和维修性有关，还与装备的预防性维修制度有关；使用可用度  $A_o$  是考虑除装备改进所需时间以外的一切不能正常工作因素在内的可用度，不仅与设计 and 维修制度有关，而且与装备保障系统直接相关，并受保障体制、管理水平和人员素质等因素影响。3 种稳态可

用度，既相互联系又有所不同，从不同范围反映了装备可用水平。由于考虑因素的增加，装备能工作时间将缩短，不能工作时间将增长，因此一般有： $A_i \geq A_a \geq A_o$ 。在 3 个可用度中， $A_o$  反映了装备实际使用情况下的可用程度，是目前国内外比较常用的一个评价指标；但是， $A_o$  中涉及的管理与供应保障延误是装备研制、生产中难以控制和验证的因素，主要取决于装备使用阶段的保障水平。

同样将舰船装备分为舰船、舰船系统和设备 3 级系统，设舰船系统有  $m$  个，第  $i$  个系统有  $N_i$  个设备，第  $i$  个系统的第  $j$  个设备的平均维修间隔时间为  $\bar{T}_{bm}(i, j)$ ，第  $i$  个系统的第  $j$  个设备的平均不能工

作时间为  $\bar{D}(i, j)$ ，则该设备平均可用度的计算模型如下：

$$A_o(i, j) = \bar{T}_{bm}(i, j) / (\bar{T}_{bm}(i, j) + \bar{D}(i, j)) \quad (11)$$

由设备计算系统的可用度，需运用系统可靠性理论进行估算。系统可靠性模型包括可靠性框图和相应可靠性数学模型。计算舰船的可用度，考虑串联系统和并联系统即可估算。其中：串联系统中，当任何一个单元发生故障时，整个系统即发生故障，系统的可用度不大于系统中任意一个单元的可用度，单元越多，系统可用度越低；并联系统中，只有所有单元发生故障时，整个系统才发生故障，系统的可用度不小于系统中任意一个单元的可用度，单元越多，系统可用度越高。

若将所有舰船系统、装备当成串联系统，舰船的使用可用度最低，该模型也成为舰船的基本可靠性模型，可为构建优化的维修保障系统、筹措保障资源服务。因此，笔者主要采用串联系统来评估舰船装备的使用可用度。

## 2 调研策略及数据处理方法

舰船寿命一般分为研制阶段、使用阶段和退役阶段。研制阶段需要从论证和研制单位、生产单位等渠道调研数据，主要包括设备或系统的可靠性、维修性和备件初始配置情况等信息；使用阶段主要调研设备或系统的使用与维修信息，主要包括维修人力、物质资源、等待时间等信息。因此，需要构建相应的数据收集项目和表格，形成数据库收集系统，建立调研策略。对于已服役的舰船，其可靠性、维修性和保障性已经在实际使用和保障中得到体现，相关信息可以赴装备服役单位调研获得。

### 2.1 调研策略

选取某型舰船作为调研对象，因不同舷号的舰船服役时间不同，装备累积工作时间不同，等级修理的次数和时间也不同。因此，舰艇装备的使用与维修信息是调研工作的重点和难点。考虑到装备使用时间跨度大，维修管理人员更替多，相关数据可能存在缺失、重复或异常等现象，调研分 2 种主要方式开展：

1) 赴舰船现场咨询舰员，赴维修保障单位咨询维修人员，详细了解有关装备的当前信息；

2) 查看各种装备技术文档，包括装备履历簿、装备工作记录簿、修理工程单、修理技术方案等技术文件，查找相关装备的使用与维修记录。

### 2.2 基本数据结构

舰船装备保障能力评估主要采用平均保障延误时间、任务前保障资源准备时间，以及综合性指标使用可用度进行评估。为此，根据舰船装备的使用和维修情况设计以下调研数据收集统计表格。

#### 1) 装备平均保障延误时间统计表。

主要统计舰船舷号、系统名称、装备名称、平均保障延误时间等信息。

#### 2) 任务前保障资源准备时间统计表。

主要统计舰船舷号、任务名称、系统名称、装备名称、平均准备时间等信息。

#### 3) 舰船任务属性统计表。

主要统计舰船舷号、任务名称、持续时间、任务级别等信息。

#### 4) 装备可靠性和维修性统计表。

主要统计舰船舷号、系统名称、装备名称、平均修复时间、平均预防性维修时间、平均故障间隔时间、年平均预防性维修时间、年平均工作时间等信息。其中：

① 平均修复时间，即排除故障所需实际修复时间平均值。其度量方法：在某个给定期间内，修复时间的总和与修复次数  $N$  之比。当装备由  $n$  个可修复项目组成时，平均修复时间为：

$$\bar{M}_{ct} = \sum_{i=1}^n \lambda_i \bar{M}_{cti} / \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (12)$$

式中： $\lambda_i$  为第  $i$  项目的平均故障频率； $\bar{M}_{cti}$  为第  $i$  项目故障时的平均修复时间。

② 平均预防性维修时间，即装备每次预防性维修所需时间平均值。该数据比较难以获得，预防性维修项目不同，预防性维修的时间也不同，有的相差很大。在调研中，根据下式模型进行估算：

$$\bar{M}_{pt} = \sum_{j=1}^m f_{pj} \bar{M}_{ptj} / \sum_{j=1}^m f_{pj} \quad (13)$$

式中： $f_{pj}$  为第  $j$  项预防性维修作业的频率，通常以装备每工作小时分担的  $j$  项维修作业数计； $\bar{M}_{ptj}$  为第  $j$  项预防性维修作业所需的平均时间； $m$  为预防性维修作业的项目数。

### 2.3 数据处理方法

由于数据来源不同，可能存在将多处记录的装备故障和维修情况都收集回来，出现重复记录的情况；也可能由于故障修理不及时，存在多次报告故障和多次申报修理的情况；还可能存在一次报告中

涉及多个故障的情况。对于这些冗余和重叠数据，采取删除重复抄录记录、在时间轴上压缩多次报告的故障和修理工程、将一次报告的多个故障展开为多个记录等措施，去除无效信息，展开重叠数据。

由于在记录装备故障和维修信息时，可能存在人为失误而造成数据异常。为此，采用拉依达准则对所收集的数据进行异常数据检验，处理流程如图 2 所示。

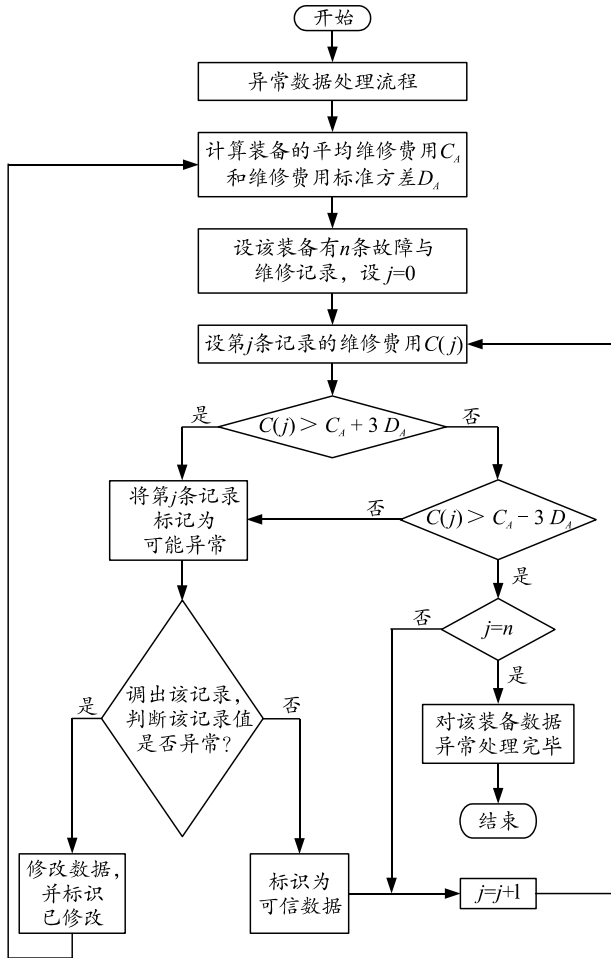


图 2 维修费用异常数据处理流程

1) 计算该装备所有故障与维修记录中的维修费用平均值  $C_A$  和标准差  $D_A$ ，其计算公式为：

$$C_A = \sum_{i=1}^n C(i); \tag{14}$$

$$D_A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (C(i) - C_A)^2}。 \tag{15}$$

式中： $C(i)$ 为该装备第  $i$  次故障和维修中的维修费用； $n$  为收集到的该装备的故障与维修总数。

2) 任意取该装备的第  $j$  次故障和维修记录中的维修费用  $C(j)$ ，只要式(16)中任一个成立，则将故障和维修记录标识为可能异常数据。

$$C(j) > C_A \pm 3D_A。 \tag{16}$$

3) 将标识为可能异常数据的故障和维修记录提取出来，根据故障内容来判断维修的费用数据是否为异常。若认为合理，则不作修改，同时将记录标识为可信；若认为不合理，则将数据修改为合理数据，并同时将其标识为已修改记录。

4) 重复上述步骤 1)~3)，直到所有可能为异常数据的记录处理完毕。

### 3 保障能力评估验证

选取某型舰船动力系统作为研究对象，列举所属系统的主要关键设备，根据调研获取的数据，利用计算模型对系统的保障能力进行评估验证。

#### 3.1 系统基本数据

根据该动力系统装备类型，将其主要设备分为汽轮机、主锅炉、辅锅炉及调节控制保护系统和辅助设备等 28 类，依次用 Q1—Q28 表示。根据舰船 1 年内执行的任务情况，构建其任务属性，依次用 T1—T4 表示。依据调研，可以预测得到装备的平均保障延误时间。系统中各装备的平均保障延误时间如图 3 所示，由图可知，MLDT 为 1 h 装备有 14 个，MLDT 为 2 h 装备有 10 个，MLDT 为 1.5 h 装备有 2 个，MLDT 为 3 h 装备有 2 个。不同任务下的平均任务前保障资源准备时间如图 4 所示，由图可知，T1 和 T4 任务下的 TSre 相同，有 13 个装备集中在 8 h，有 10 个装备集中在 10 h，因为 T1 和 T4 任务级别均为一般，且任务持续时间相同；T2 任务下，有 17 个装备集中在 18 h，该任务级别为中等，任务持续时间大于 T1 或 T4；T3 任务下的 TSre 波动较大，有 13 个装备集中在 24 h，最大为 48 h，T3 任务级别最高，任务持续时间最长。动力系统可靠性和维修性调研如图 5 所示。

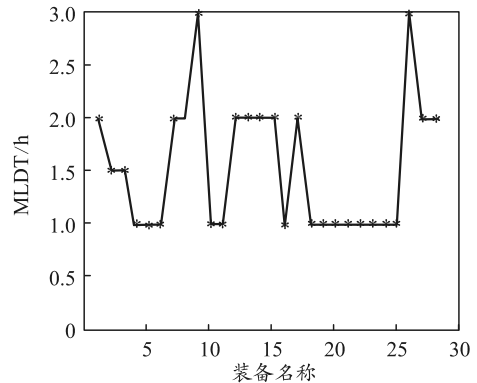


图 3 装备的平均保障延误时间

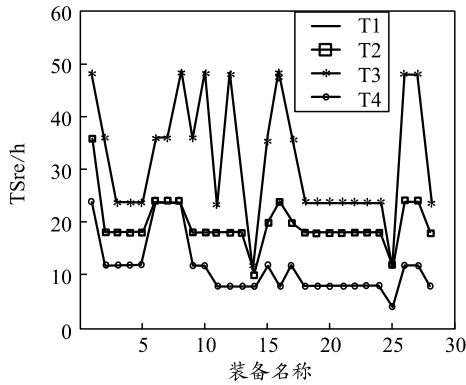
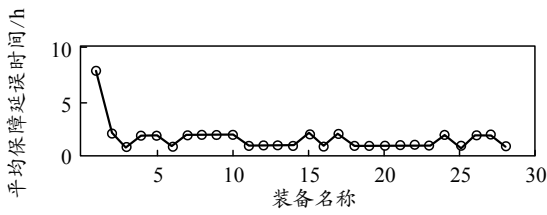
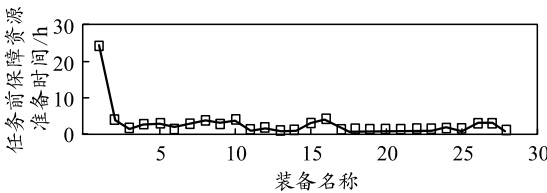


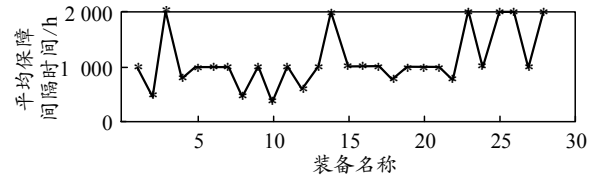
图 4 不同任务下装备的平均任务前保障资源准备时间



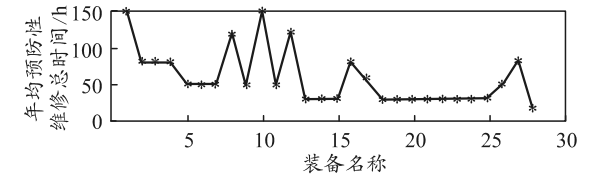
(a) 平均保障延误时间



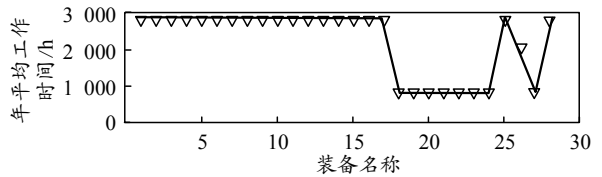
(b) 任务前保障资源准备时间



(c) 平均故障间隔时间



(d) 年均预防性维修总时间



(e) 年平均工作时间

图 5 动力系统可靠性和维修性调研

### 3.2 保障能力评估结果

依据上述简易、实用的舰船装备保障能力评估指标体系及其各种指标的简易计算模型，运用调研得到的动力系统基本数据，得出该船动力系统使用可用度计算结果如表 1 所示。

表 1 动力系统使用可用度计算结果

h

装备名称	平均修复时间	平均保障延误时间	平均故障间隔时间	年均预防性维修总时间	年平均工作时间	年均修复时间	年均保障延误时间	年可工作时间	使用可用度
Q1	8	2.0	1 000	150	2 800	22.400	5.600	8 582.000	0.980
Q2	2	1.5	500	80	2 800	11.200	8.400	8 660.400	0.989
Q3	1	1.5	2 000	80	2 800	1.400	2.100	8 676.500	0.990
Q4	2	1.0	800	80	2 800	7.000	3.500	8 669.500	0.990
Q5	2	1.0	1 000	50	2 800	5.600	2.800	8 701.600	0.993
Q6	1	1.0	1 000	50	2 800	2.800	2.800	8 704.400	0.994
Q7	2	2.0	1 000	50	2 800	5.600	5.600	8 698.800	0.993
Q8	2	2.0	500	120	2 800	11.200	11.200	8 617.600	0.984
Q9	2	3.0	1 000	50	2 800	5.600	8.400	8 696.000	0.993
Q10	2	1.0	400	150	2 800	14.000	7.000	8 589.000	0.980
Q11	1	1.0	1 000	50	2 800	2.800	2.800	8 704.400	0.994
Q12	1	2.0	600	120	2 800	4.667	9.333	8 626.000	0.985
Q13	1	2.0	1 000	30	2 800	2.800	5.600	8 721.600	0.996
Q14	1	2.0	2 000	30	2 800	1.400	2.800	8 725.800	0.996
Q15	2	2.0	1 000	30	2 800	5.600	5.600	8 718.800	0.995
Q16	1	1.0	1 000	80	2 800	2.800	2.800	8 674.400	0.990
Q17	2	2.0	1 000	60	2 800	5.600	5.600	8 688.800	0.992
Q18	1	1.0	800	30	800	1.000	1.000	8 728.000	0.996
Q19	1	1.0	1 000	30	800	0.800	0.800	8 728.400	0.996
Q20	1	1.0	1 000	30	800	0.800	0.800	8 728.400	0.996
Q21	1	1.0	1 000	30	800	0.800	0.800	8 728.400	0.996
Q22	1	1.0	800	30	800	1.000	1.000	8 728.000	0.996
Q23	1	1.0	2 000	30	800	0.400	0.400	8 729.200	0.996
Q24	2	1.0	1 000	30	800	1.600	0.800	8 727.600	0.996
Q25	1	1.0	2 000	30	2 800	1.400	1.400	8 727.200	0.996
Q26	2	3.0	2 000	50	2 000	2.000	3.000	8 705.000	0.994
Q27	2	2.0	1 000	80	800	1.600	1.600	8 676.800	0.991
Q28	1	2.0	2 000	20	2 800	1.400	2.800	8 735.800	0.997

动力系统使用可用度

0.806

依据调研结果和前述保障能力评估指标体系，可以计算得出舰船动力系统保障能力：平均保障延

误时间为 1.499 h，平均使用可用度为 0.806。不同任务下系统的任务前保障资源准备时间如表 2 所示。

表 2 不同任务下动力系统的任务前保障资源准备时间

序号	任务级别	任务前保障资源准备时间/h	备注
1	一般	24	任务时间在 1 周内
2	中级	36	任务时间在 1 周以上 1 月内
3	重大	48	任务时间在 1 月以上 3 月以内

### 4 结束语

针对舰船保障能力评估问题，建立舰船装备保障能力评估指标体系以及各指标的计算模型。主要工作和结论总结如下：

1) 构建了简易的可用于工程应用的舰船装备保障能力评估指标体系，并建立了各种指标的简易计算模型；

2) 建立了保障能力评估所需的基础数据结构，便于进行数据收集，为应用本课题所构建的指标体系和计算模型开展舰船装备保障能力的评估奠定了基础；

3) 通过动力系统保障能力评估案例，验证了所建立的评估指标体系和建模方法的有效性。

### 参考文献：

[1] 史跃东, 金家善. 船舶动力装备保障重难点分析及对策研究[J]. 海军工程大学学报(综合版), 2020, 17(2): 49-52.

\*\*\*\*\*

(上接第 14 页)

[9] JOSEFSSON L, PERSSON P. Conformal Array Antenna Theory and Design[M]. Hoboken, New Jersey: IEEE Press, 2006.

[10] 张光义. 共形相控阵天线的应用与关键技术[J]. 中国电子科学研究院学报, 2010, 5(4): 331-336.

[11] 胡劲松, 王健, 郭琳, 等. 机载天线动态变形实时测量与补偿方法[J]. 电子机械工程, 2019, 6(3): 1-4.

[12] 唐波, 汤俊, 唐猛, 等. 共形相控阵信号处理技术研究[J]. 航空科学技术, 2009, 10(5): 36-40.

[13] 高飞, 谢文冲, 王永良. 机载共形阵雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子学报, 2010, 38(9): 2014-2020.

[14] 蒋浩, 翟雯, 饶妮妮. 基于多级维纳滤波的机载共形阵雷达杂波抑制方法研究[J]. 电子与信息学报, 2014, 36(10): 2477-2483.

[2] 于风竺, 张博, 高骞. 舰船装备维修保障基础数据体系建设及维护方法研究[J]. 海军工程大学学报(综合版), 2020, 17(2): 53-58.

[3] 祝本玉, 刘焱, 朱洪波, 等. 装备保障数据集成的认识与思考[J]. 装备学院学报, 2015, 26(5): 91-94.

[4] 周钢, 郭福亮. 军械装备综合保障的数据体系分析[J]. 兵工自动化, 2017, 36(2): 23-26.

[5] 肖丁, 陈进军, 苏兴, 等. 装备保障能力评估指标体系研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2011, 22(3): 42-45.

[6] 唐梦妮, 董鹏, 余鹏. 后方仓库管理保障能力评估指标体系设计[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(11): 51-56.

[7] 张勇, 祁标, 郑龙生. 装备保障指挥效能评估指标体系研究[J]. 装备学院学报, 2013, 24(2): 31-34.

[8] 刘伟, 贾希胜, 胡起伟, 等. 战时装备维修保障效能及评估指标体系研究[J]. 军械工程学院学报, 2010, 22(6): 1-6.

[9] 潘星, 张振宇, 张艳梅, 等. 基于 Sobol 敏感性分析的装备体系保障效能评估[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(2): 390-398.

[10] 王申坪, 李忠海, 李忠光, 等. 基于 ANFIS 的装备维修保障能力生成度评估[J]. 兵器装备工程学报, 2020, 41(2): 10-13.

[11] 赵存生, 何其伟, 朱石坚. 基于核心保障能力的舰船装备军民融合保障研究[J]. 中国工程科学, 2015, 17(5): 96-100.

[15] 段克清, 谢文冲, 王永良. 共形阵机载雷达杂波非平稳特性及抑制方法研究[J]. 中国科学: 信息科学, 2011, 41(12): 1507-1516.

[16] JOSEFSSON L, PERSSON P. Conformal array antennas[M]. Singapore: Springer, 2016.

[17] ROBERT C H. Conformal arrays in phased array antennas[M]. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2010: 399-464.

[18] 张新苗. 传感器飞机机翼形变对共形雷达系统性能的影响研究[J]. 兵器装备工程学报, 2019(7): 4-8.

[19] 鲁斯. 动态载荷下共形承载阵列天线电性能的高效计算与补偿方法研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2020.

[20] 刘波, 沈齐, 李文清. 空基预警探测系统[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012: 74-75.

[21] 平丽浩. 雷达热控技术现状及发展方向[J]. 现代雷达, 2009(5): 1-6.