

舰船装备可靠性、维修性和保障性指标量化方法研究

黄佳典¹, 李彦强¹, 董理²

(1. 中国人民解放军91872部队, 北京 102442; 2. 海军工程大学, 武汉 430033)

[摘要] 通过基准比较分析法、相似产品类比和德尔菲法、模型估算法和统计推断法4种方法对舰船装备可靠性、维修性和保障性指标量化适应性进行了研究分析和数据验证, 提出了舰船装备顶层参数指标、单项指标和“三性”指标量化的原则。

[关键词] 可靠性; 维修性; 保障性; 指标量化

[中图分类号] E925 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2015)05-0014-06

1 前言

舰船装备可靠性、维修性和保障性指标量化是装备研制论证和立项阶段的重要工作, 目前装备指标量化包括多种方法, 其中较为常用的分为3类: 相似基准比较分析法、模型估算法和统计推断法。进行装备论证时, 应根据论证阶段、任务模式、选择的顶层参数以及分系统、设备类型等因素综合权衡, 选择合适的指标量化方法^[1-2]。

2 基准比较分析法

2.1 基准比较分析法定义

基准比较分析法, 是利用基准比较系统数据, 对新研装备或保障系统的特性进行初步分析的一种方法。通过基准比较分析, 在舰船装备研制初期能够确定装备系统有关的“三性”参数及其保障系统的部分特性和约束, 判明保障性指标的可行性, 确定其改进目标, 并可用于明确影响装备系统战备完好性、任务持续性和费用的主要因素。一般情况下, 通过基准比较分析能够初步确定保障系统及其保障资源相关参数(如人员数量需求及专业划分等)。该方法适用于装备立项论证初期, 新研装

备信息掌握较少的情况下, 是装备研制早期用于确定可靠性、维修性和保障性要求及约束的一种重要方法。

2.2 基准比较系统

基准比较分析应用的关键是建立BCS。BCS是现有系统或分系统的组合, 它具有最接近于新研装备系统的装备设计特性与保障系统特性^[3]。

对于保障系统而言, BCS就是从订购方现有的保障系统中找出与当前新研装备保障相似的保障要素所构成的保障系统雏形。新装备研制、生产结束后, 将投入军方使用和保障, 但实际上无论新装备是否部署, 军方已经存在着一个庞大的保障系统, 新研装备的保障方案除了要受到装备自身设计特性影响外, 还要受到现存的保障系统的约束。此时的BCS就是从现有军方保障系统中找出与新研装备可能相似的保障要素构成保障系统雏形。基准保障系统中包含了对保障功能、保障组织和保障资源的描述, 只是这种描述一般情况下不可能完整清晰。对于起初那些不完整的保障要素信息, 将随着新装备的研制而逐渐明确。

BCS的组成部分全部来源于现有使用系统, 因此可以提供成熟有效的信息, 从而推导出新系统所

[收稿日期] 2015-03-05

[作者简介] 黄佳典, 1962年出生, 男, 山东青岛市人, 高级工程师, 主要研究方向为舰船装备动力工程及保障; E-mail: hjd173@sohu.com

需数据。实际上,基准比较分析方法就是分析和利用BCS的数据,对新研系统的特性进行初步研究、分析的方法。在基准比较分析过程中,一般都会自然地直接分析到具体的保障要素,如保障设施、保障设备和人力人员等,但为了实现装备的整体保障能力,同时也应该关注到保障系统的系统级要求。

应该指出,虽然BCS适应于建立装备初始保障方案等研制早期,但其应用阶段远不限于此,也可以在方案、初步设计、详细设计阶段使用。由于构建BCS可选的目标不同,因此BCS的数量可能会有多个。

2.3 BCS的建立

一般来说,BCS的选取应该遵循如下的原则:BCS的功能、性能必须与新系统类似;BCS必须是可运行的真实系统或真实系统的部分组合;BCS的运行环境必须与新系统的运行环境相同或者非常接近;BCS必须能够提供可用于确定保障资源需求的使用信息记录等。

建立BCS的步骤如图1所示。

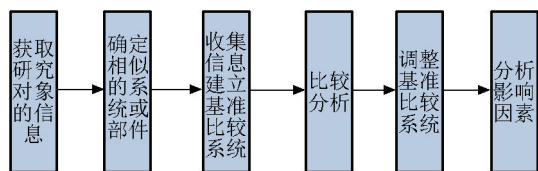


图1 BCS建立步骤

Fig. 1 Design of benchmark system

1)获取装备或保障系统等研究对象的信息,包括产品组成、产品设计特性等。在该项工作中,需要根据装备或保障系统的设计方案,获取各组成部分的性能参数、可靠性、维修性和保障性参数要求,以及装备的使用特点。

2)确定相似的系统或部件。确定已有相似产品,列举相似产品所需要的信息。根据第一步工作收集到的产品信息,查询已有的同类型装备或产品,选取相似的产品、收集相似产品的对应信息。

3)收集信息建立BCS。本项工作根据新研产品和收集到的相似产品信息建立装备保障方案BCS,构建BCS时一定要考虑新研装备的组成特点。

4)比较分析。根据建立的BCS进行比较分析,该分析可以从保障系统三维结构出发,分别比较两者的保障功能、保障组织和保障资源,获取保障方案的初步分析结果。

5)调整BCS。随着研制过程的推进,调整BCS中的部分参数,使得BCS的参数要求更接近装备实际的保障方案要求。调整BCS参数的主要依据是装备实际的使用任务、工作环境、产品技术改进等。

6)分析影响因素。针对调整后的装备保障方案BCS进行影响因素分析,对保障方案组成要素的重要性进行评估,得出影响装备保障的主要因素,为后续工作给出有针对性的改进措施提供参考和借鉴。

3 相似产品类比和德尔菲法相结合的方法

相似产品类比和德尔菲法相结合的方法是基准比较方法的升级补充^[4,5],是在基准比较方法的基础上尽量减小主观因素影响的一种指标确定方法。本文以装备顶层参数(使用可用度)为例,介绍相似产品类比和德尔菲法相结合应用。

3.1 主要影响因素分析

选择一个或多个已有的相似装备作为参考,分析并确定装备系统战备完好性或任务成功性参数的主要影响因素。

通常包括的主要影响因素有:装备使用要求(使用范围、使用强度)、装备执行任务的时间、装备复杂程度、装备“三性”的改进程度、装备的使用保障能力。

1)确定影响因素的权重,推选 n 名专家对以上所有 m 个因素的影响程度打分, k_{ij} 为分数($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$),分别计算出各因素的权重:

$$\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m k_{ij}} \quad (1)$$

2)建立评分矩阵,对比新装备系统与相似装备间的差异,利用专家对以上各个影响因素进行评分,建立如下评分矩阵:

	δ_1	δ_2	δ_3	δ_4	δ_5
	较低	稍低	相同	稍高	较高
μ_1	V		V		
μ_2	V				
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
μ_m					V

其中: μ_i 为影响因素,共 m 个,评价等级分为5等,为较低、稍低、相同、稍高和较高,可以分别对应

($\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5$)分,分数 δ_i 的量值由人工确定。对正相关因素(即因素要求越高战备完好性越高),须满足 $\delta_1 < \delta_2 < \delta_3 < \delta_4 < \delta_5$,对负相关因素(即因素要求越高战备完好性越低),须满足 $\delta_1 > \delta_2 > \delta_3 > \delta_4 > \delta_5$,可得到综合评分:

$$C = \sum_{i=1}^m \alpha_i \beta_i, \beta_i = [\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5] \quad (2)$$

如有多名专家进行评分,则 δ_i 取所有专家评分的平均值。

3)得到装备系统战备完好性参数的初始值。

$$Q_i = 1 - \frac{(1 - Q_0)\delta_3}{C} \quad (3)$$

式(3)中, C 为参数的综合评分; δ_3 为该参数评分矩阵中对应“相同”栏的分数值; Q_0 为相似装备对应参数的数值。

3.2 使用可用度指标确定

使用该方法确定装备使用可用度。具体步骤如下。

1)确定装备比较分析时影响使用可用度的主要因素。装备的使用强度,使用强度越大,使用可用度越低;装备的复杂程度,复杂程度越高,使用可用度越低;装备的“三性”的改进提高程度,改进程度越高,使用可用度越高;装备的使用维修保障能力,保障能力越强,使用可用度越高。

2)确定影响因素的权重。推选 n 名专家对以上4种因素对装备使用可用度 A_o 的影响程度打分,并分别计算出各因素的权重。分数等级分为4等,分别对应(4,3,2,1),分数越高,影响程度越大,专家打分如下。

	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
E_1	k_{11}	k_{12}	k_{13}	k_{14}
E_2	k_{21}	k_{22}	k_{23}	k_{24}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
E_n	k_{n1}	k_{n2}	k_{n3}	k_{n4}

其中, E_i 为专家,共 n 位; μ_m 为影响因素,共4种; k_{ij} 为分数($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4; k_{ij}=[4, 3, 2, 1]$)依据式(1)计算各因素的权重。

3)对比装备和相似装备之间的差异,由专家对以上各个影响因素进行打分。

评分等级分为5等,分别为100分、75分、50分、

25分、0分。100分表示针对使用可用而言,某因素的程度和相似装备对比,改善最多;50分表示相当;0分表示相差最远。

n 位专家对各个因素进行打分,分别得出各个因素的平均分数 δ_j ($j=1, 2, 3, 4$)。

	μ_1	μ_2	μ_3	μ_4
E_1	Q_{11}	Q_{12}	Q_{13}	Q_{14}
E_2	Q_{21}	Q_{22}	Q_{23}	Q_{24}
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
E_n	Q_{n1}	Q_{n2}	Q_{n3}	Q_{n4}

其中, E_i 为专家; μ_j 为4种影响因素; Q_{ij} 为分数($i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, 3, 4$)。则舰船装备系统评分:

$$C = \sum_{j=1}^4 \alpha_j \beta_j, \delta_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_{ij} \quad (4)$$

计算装备的使用可用度 A_o

$$A_o = 1 - (1 - A_{ov}) \times \frac{50}{C} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, A_o 为装备使用可用度指标; A_{ov} 为相似装备使用可用度指标; α_j 为第 j 个因素的权重。

利用表1进行计算指标。假设专家数量为4,相似装备的使用可用度为0.8,则装备使用可用度 A_o 为0.863。

4 统计推断法

统计推断法的基本思想是:根据装备典型任务剖面 and 任务要求,对任务进行详细分析,将难以统计的某参数转换为便于统计的多项参数,利用相似装备类比法或借助历史数据通过统计分析确定各分项参数的指标,最终推断获得该参数的论证指标。该方法适用于舰船装备“三性”顶层指标和综合特性指标的确定。以装备使用可用度为例,介绍利用统计推断法进行指标确定方法和过程。

根据装备使用可用度定义,有如下模型:

$$A_o = \frac{T_o}{T_o + T_{CMT} + T_{ALT}} \quad (6)$$

式(6)中, T_o 为能工作时间; T_{CMT} 为修复性维修总时间, T_{ALT} 为等候备件、维修人员或运输等的管理和保障资源延误时间。

表1 使用可用度 A_o 指标
Table 1 Operational availability (A_o)

专家评分类别	使用可用度 A_o 的影响因素				备注
	使用强度 μ_1	装备复杂程度 μ_2	装备RM改进程度 μ_3	使用维修保障能力 μ_4	
E_1	4	3	1	2	
E_2	3	1	2	4	
E_3	3	2	1	4	
E_3	3	1	2	4	分数 $k_{ij} = [4, 3, 2, 1]$
影响因素权重 $\alpha_j = \frac{\sum_{i=1}^n k_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^4 k_{ij}}$	0.325	0.175	0.15	0.35	
E_2	75	75	75	100	
E_2	75	75	75	75	分数
E_3	50	75	75	75	$Q_{i1}, Q_{i2} = [100, 75, 50, 25, 0]$
E_3	75	75	50	75	$Q_{i3}, Q_{i4} = [0, 25, 50, 75, 100]$
δ_j	62.5	75	75	81.25	
$C = \sum_{j=1}^4 \alpha_j \beta_j$			73.125		
$A_o = 1 - (1 - A_{ov}) \times \frac{50}{C}$			0.863		设 $A_{ov} = 0.8$

通常, T_{CMT} 难以统计, 所以式(6)可以采用其他工程模式代替。可以结合装备的实际使用情况对各种时间因素进一步明确并区分舰艇的使用状态, 对各种状态的时间进行统计以获得使用可用度的计算公式。通常装备状态分为在用、停用和修理3种状态, 在用状态包括各种类别的在用; 停用状态包括检修、故障等; 修理状态, 为装备进工厂进行计划修理状态, 包括小修、中修、大修等。因此, 装备使用时间可以划分为如图2所示的时间分解图。

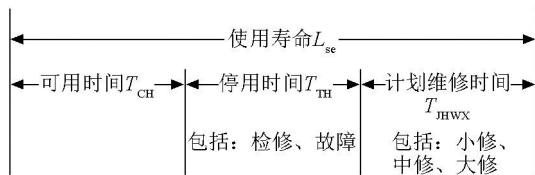


图2 装备时间分解图

Fig. 2 Equipment time decomposition

如果规定寿命剖面内装备使用寿命为 L_{se} , 则使用寿命为舰艇可用时间 T_{CH} (等同于能工作时

间), 停用时间 T_{TH} (等同于 $T_{CMT} + T_{ALT}$) 和计划维修时间 T_{JHWX} 之和。根据装备寿命剖面, 若小修次数 N_1 及时间 T_{WX} , 中修次数 N_2 及时间 T_{XX} , 大修次数 N_3 及时间 T_{DX} , 则计划维修时间为:

$$T_{JHWX} = N_1 T_{WX} + N_2 T_{XX} + N_3 T_{DX} \quad (7)$$

装备停用时间 T_{TH} 一般可根据相似型号装备情况给予一定比例 k , 则停用时间可表示为:

$$T_{TH} = k L_{se} \quad (8)$$

则装备可用时间可表示为:

$$T_{CH} = L_{se} - T_{TH} - T_{JHWX} \quad (9)$$

所以使用可用度可转化为:

$$A_o = \frac{T_{CH}}{T_{CH} + T_{TH}} = \frac{L_{se} - T_{TH} - T_{JHWX}}{L_{se} - T_{JHWX}} \quad (10)$$

利用式(10), 结合装备寿命剖面(小修、中修和大修时间及次数), 可以从使用需求出发, 获得其使用可用度 A_o 。

5 模型估算法

模型估算法包括解析模型估算法和仿真模型

估算法两种估算方法^[6],其基本思想是:根据装备系统的典型任务剖面 and 作战使用需求,结合“三性”参数定义,建立其指标估算模型,通过解析公式或利用仿真的手段计算得到装备“三性”指标初始值。模型估算方法常常和统计推断法等方法相结合使用,确定装备的系列“三性”指标。一般利用模型估算法建立某一顶层指标(或综合特性指标)和多个单项设计特性指标之间的分解关系,利用统计推断法或基准比较法确定各单项指标初始值,再通过综合权衡分析确定装备的综合特性指标和各单项指标。

本节以任务成功率顶层参数为例,介绍利用解析模型估算法指标确定过程。任务成功率模型如下:

$$P_{MC} = R(t_m) + M(t_a)[1 - R(t_m)] \quad (11)$$

式(11)中, $R(t_m)$ 为规定时间 t_m 内的任务可靠度; t_m 为动力系统航行任务时间; $M(t_a)$ 为被检测故障在规定的 t_a 时间内被修复的概率; t_a 为任务过程中允许的最大修复时间。

从上述任务成功率模型可以看出,任务可靠度 R_m 和维修度 M 之间有如下关系,如果动力系统遂行任务过程中,一段时间内可以保持较高的维修度,那么任务可靠度的要求就可以适当降低;如果维修工作无法获得充足保证,即装备在较低的维修度条件下,就要求遂行任务过程中保持较高的可靠度。因此,在任务可靠度和维修度论证过程中,应根据装备作战任务需求和特点,综合权衡确定任务成功率、任务可靠度、维修度及维修时间等指标。

如果通过效能分析,或者从使用需求出发,提出动力系统某一任务成功率 P_{MC} 为 0.95,并假设装

备服从指数分布时,有:

$$M = 1 - e^{-\mu t_a} \quad (12)$$

式(12)中, t_a 为维修时间; μ 为维修率。

根据对多型装备维修性数据的统计分析,使用和允许的维修时间一般在 2~3 h。则利用上述模型,可以分析获得对应不同维修时间下 R_m 和 M 之间对应组合关系见表 2。通过该对应关系,进一步通过综合权衡分析,可以获得任务成功率下的装备任务可靠度及维修度分解指标。

结合表 2 确定的任务成功率和各“三性”指标之间的关系,在保证任务成功率 0.95 的前提下,如果要保证较高的可靠性,那么可以选择第 3 组指标,即对平均修复时间要求可以适当降低;如果对任务可靠度不作过高要求,那么可以选择第 6 组指标,即对平均修复时间提出较高要求。

6 结语

舰船装备指标量化方法目前基本采用以上 4 种方法,具体可根据实际情况选用。

1) 舰船装备顶层参数指标(综合特性参数指标)确定一般以解析模型估算法为基础,建立顶层指标分解结构,通过基准比较法和统计推断法确定各单项指标。

2) 对于无法通过顶层指标分解获得的低层次单项指标,在难以掌握相似设备相关应用信息的条件下,建议选用基准比较法。在能够掌握相似装备充足统计信息的条件下,建议选用统计推断法。

3) 在舰船装备论证初期,建议选用基准比较法或相似产品类比和德尔菲法相结合的方法;在研制立项

表 2 任务成功率与任务可靠性、维修性关系

Table 2 The relationship between the dependability, mission reliability and maintainability

序号	P	R_m	M	$t=2\text{ h}$ 对应 MTTR		$t=3\text{ h}$ 对应 MTTR	
				MTTR(2)	维修时间 t/h	MTTR(3)	维修时间 t/h
1	0.95	0.90	0.50	2.885 390 082	2	4.328 085 123	3
2	0.95	0.88	0.583 333	2.284 490 485	2	3.426 735 727	3
3	0.95	0.85	0.666 667	1.820 478 453	2	2.730 717 680	3
4	0.95	0.82	0.722 222	1.561 360 883	2	2.342 041 324	3
5	0.95	0.80	0.75	1.442 695 041	2	2.164 042 561	3
6	0.95	0.78	0.772 727	1.349 887 871	2	2.024 831 807	3
7	0.95	0.75	0.80	1.242 669 869	2	1.864 004 804	3

论证时,随着初步使用保障方案等相关信息的逐步明确,建议选用模型估算和统计推断等其他方法。

参考文献

- [1] 曾声奎. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [2] 曾声奎. 可靠性维修性保障性要求论证[M]. 北京:国防工业出版社,2011.
- [3] 张杰,唐宏,苏凯,等. 效能评估方法研究[M]. 北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 康锐. 可靠性维修性保障性工程基础[M]. 北京:国防工业出版社,2012.
- [5] 张志华,王胜兵,金家善. 现场可靠性数据的变点分析[J]. 电子技术与系统工程,2006(6):937-940.
- [6] Crk V. Reliability assessment from degradation data [C]// Proceedings Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2000.

Quantitative methods for warship equipment reliability, maintainability and supportability

Huang Jiadian¹, Li Yanqiang¹, Dong Li²

(1. The 91872th Unit of PLA, Beijing 102442, China; 2. Navy University of Engineering, Wuhan 430033, China)

[Abstract] Four methods of benchmarking analysis, Delphi method with similar products, analog estimation method and statistical inference methods were applied to analyze and confirm the adaptability of the quantitative indicators for warship equipment reliability, maintainability and supportability. The principles for constructing the top-level parameter index and the “three of quality” quantitative indicators for warship equipment were proposed.

[Key words] reliability; maintainability; supportability; quantitative indicators

(上接13页)

of warship equipment support, in order to make sure warship equipment has good supportability, it's important to improve related work for engineered warship equipment integrated logistic support (ILS). The content of engineered warship equipment ILS is discussed, and its major work and efficient method in practice is summarized. Moreover, the problems and corresponding suggestions about engineered warship equipment ILS are discussed.

[Key words] warship; integrated logistic support; engineering; cognition