

doi: 10.7690/bgzd.2019.09.002

面向仿真的航天装备维修保障效能评估指标参数体系

许庆^{1,2}, 侯兴明¹, 张永福¹, 张琳琳¹

(1. 航天工程大学航天保障系, 北京 102206; 2. 航天工程大学士官学校, 北京 102200)

摘要: 评估指标体系是维修保障效能状况的度量标准, 同时也是维修保障效能表征的具体化。分析航天装备维修保障效能的影响因素, 分类描述其表征形式, 给出指标体系构成的原则及步骤, 归纳、删选、确定评价任务、维修保障对象及维修保障体系相关效能指标, 建立指标参数表达形式, 构建面向仿真的航天装备维修保障效能指标参数体系。该研究可为航天装备维修保障业务仿真描述提供定量的数据表达支撑。

关键词: 航天装备; 维修保障; 效能评估; 指标体系

中图分类号: TJ86 **文献标志码:** A

Evaluation Index System for Maintenance Support Effectiveness of Space Equipment for Simulation

Xu Qing^{1,2}, Hou Xingming¹, Zhang Yongfu¹, Zhang Linlin¹

(1. Department of Space Support, Space Engineering University, Beijing 102206, China;

2. School of Non-commissioned Officer, Space Engineering University, Beijing 102200, China)

Abstract: The evaluation index system is not only a measure of maintenance support effectiveness, but also a concrete representation of maintenance support effectiveness. The paper analyses the influencing factors of maintenance and support effectiveness of space equipment, classifies and describes its representation forms, gives the principles and steps of its index system, summarizes, deletes, determines the evaluation tasks, maintenance and support objects and related efficiency indexes of maintenance and support system, establishes the expression form of index parameters, and constructs a index system of maintenance and support effectiveness of space equipment. This research can provide quantitative data expression support for simulation description of space equipment maintenance support business.

Keywords: space equipment; maintenance support; effectiveness evaluation; index system

0 引言

航天装备维修保障效能是维修保障体系完成预期任务或达成预定目标的程度和能力, 反映了航天装备遂行任务的能力、维修保障体系的运行状态以及维修保障活动的效果^[1]。对效能进行评估是航天装备维修管理人员掌握现行维修保障体系运行状态和维修保障效果最为直观的形式。通过反映效能评估对象各个要素指标所构成的有机整体即为评估指标体系^[2]。评估指标体系是维修保障效能状况的度量标准, 是维修保障效能表征的具体化; 因此, 笔者对其体系构建进行研究。

1 航天装备维修保障效能影响因素

航天装备维修保障包括管理、维修、筹措、储备、供应等多类业务活动, 科学评估航天装备维修保障的效能必须充分考虑装备遂行任务、维修保障对象、维修保障体系等多类问题, 而分析这些影响因素是确定维修保障效能装备参数的基础条件。

维修保障效能的影响因素可分为静态要素和动态要素 2 大类。静态要素即为维修人员、设备设施、维修器材、维修保障对象和装备任务环境等, 动态行为要素包括航天装备遂行任务、维修保障组织管理、维修保障两级作业活动、器材筹措储备供应保障和维修保障训练等^[3]。航天装备维修保障是由以上诸类静态实体和动态行为综合而成的有机整体推动的。这些静态影响因素与动态影响因素系统集成, 对装备完好率产生作用, 进而影响保持状态完好水平与支撑航天装备任务行动的效果。其具体关系如图 1 所示。

1) 静态影响因素。静态影响因素是维修保障过程中以静态形式存在的各种实体要素。通过有机组合对维修保障体现为促进与约束 2 方面的作用。其中: 保障对象是航天装备维修保障工作的客体; 维修人员是航天装备维修保障活动的实施主体; 维修设备设施是实施航天装备维修保障的必要条件; 维修器材是执行两级维修的必要物质条件; 环境因素

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-05-26

基金项目: 军内科研项目(TJ20172B05001)

作者简介: 许庆(1990—), 男, 重庆人, 硕士, 从事航天装备维修保障研究。E-mail: xu950559@sina.com。

对维修保障的实施产生外在影响^[4]。

2) 动态影响因素。动态影响因素是航天装备遂行任务过程以及维修保障体系运行过程各类相关动态行为。其中：装备遂行任务是目标牵引；维修组织管理、器材筹储供以及维修保障训练是业务需求；维修作业活动是维修组织管理、器材筹储供以及维修保障训练的落脚点，同时也是维修保障效能最为关键的动态影响因素^[5]。

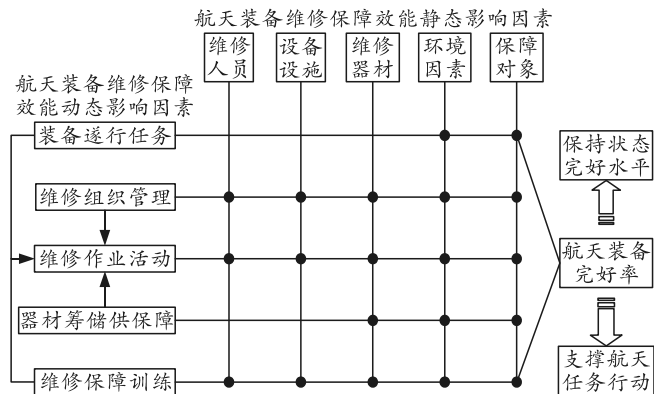


图1 航天装备维修保障效能影响因素构成及关系描述

2 效能评估指标参数体系构建的原则与流程

2.1 指标参数体系构建原则

航天装备维修保障及其管理的现实需求是构建评估指标参数体系的基础。如图2所示，航天装备维修保障所涉及的装备任务多样、维修保障对象繁杂、维修保障体系具有保障手段专业性强、保障环境复杂、保障难度大和决策风险高等特点；所以，在确定维修保障效能指标时，必须遵循目的性、可行性、系统性和可比性的原则。

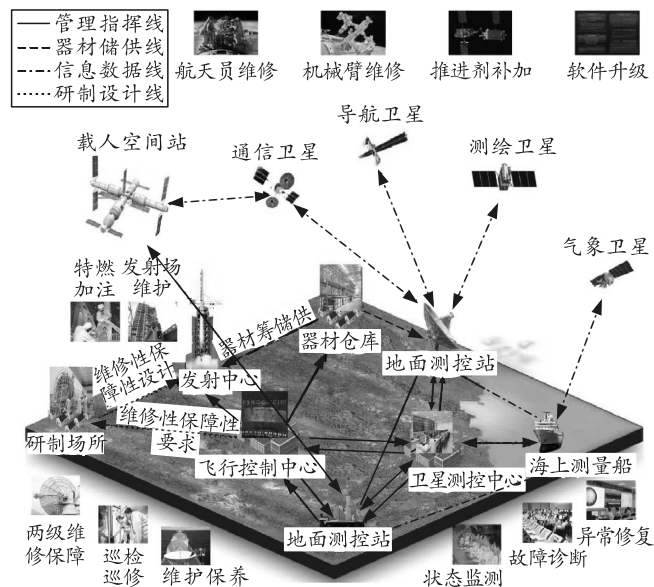


图2 航天装备维修保障概念

1) 目的性。指标参数的选取和确定必须从反映航天装备维修保障任务的真实目的出发，能够反映维修保障体系的主要功能，把握航天装备状态完好性维修保障的根本目的。

2) 可行性。指标参数要紧贴航天装备维修保障任务的现实需求，可以通过适用的方法来获取，并能够通过一定的方法进行评价和检验。面向仿真开展航天装备维修保障效能评估，在所选取的维修保障效能指标应能够通过仿真方法获取基础数据。

3) 系统性。航天装备维修保障是一个复杂大系统，描述效能的指标参数集合要符合科学逻辑，需要权衡不同指标的类别归属以及描述不同类型指标参数之间的关联关系，形成连贯合理的系统。

4) 可比性。评估指标的选取应当兼顾到评估对象可能参加的不同任务行动，并能够相互比较对照。要尽可能地选取相对可比性的指标，而不是特定条件下、单一任务样式的绝对数值^[6]。

2.2 指标体系构建流程

如图3所示，指标体系的构建要采用归纳现有指标、分析任务单位关注的指标、选取并提出面向仿真的维修保障效能指标参数的流程，分别来确定航天装备任务、维修保障对象以及维修保障体系所表征的效能指标^[7]。

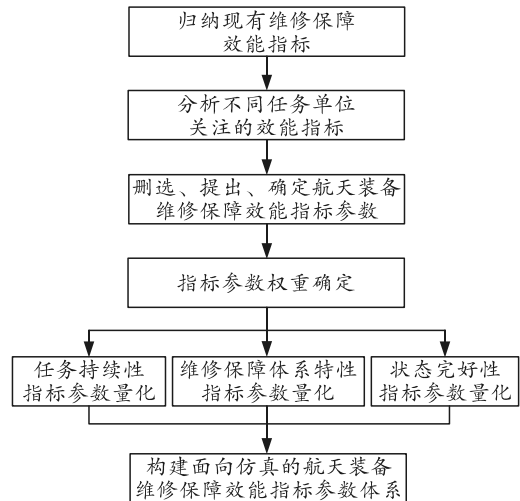


图3 航天装备维修保障效能评估指标确定流程

首先归纳现有航天装备效能评估研究中涉及维修保障效能的指标^[8-11]，然后分析不同任务单位重点关注的维修保障效能侧重点，通过删选、提出、确定以及各指标参数权重的确定，得到系统、全面、完备、适用性和针对性强的航天装备维修保障效能评估指标体系。进一步描述指标体系中各个参数的含义及定量计算方法。最终建立能够全面反映航天装备维修保障体系运行状况与整体特征，紧贴航天

装备维修精细管理需求，并适用于仿真方法求解的航天装备维修保障效能指标参数体系。

3 指标体系建立

3.1 指标参数体系构建

分别从航天装备遂行任务能力、维修保障对象

完好水平以及维修资源保障水平等方面进行量度，分为航天装备的遂行任务能力、装备状态完好水平以及维修保障体系水平 3 类指标，由 20 项单项参数构成，构建适用于仿真方法求解且满足任务管理需求的航天装备维修保障效能指标参数体系如图 4 所示。

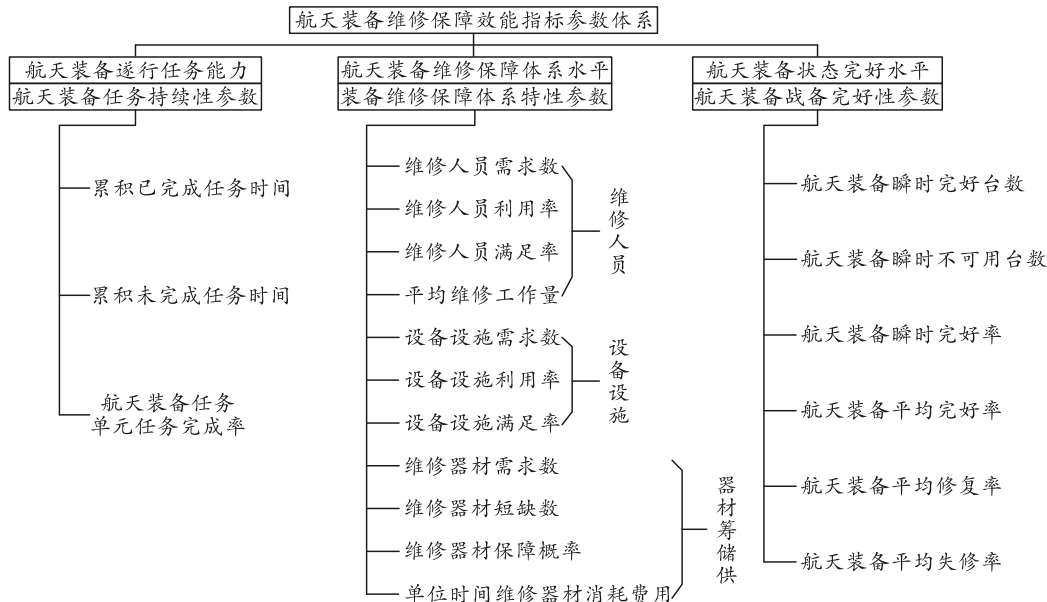


图 4 面向仿真的航天装备维修保障效能指标参数体系

3.2 评估指标参数体系权重确定

航天装备维修保障效能评估的计算与分析，在建立指标参数体系的同时，还要确定各指标参数的权重。借助熵值概念，利用指标数据信息，以指标间的差异大小作为反映指标信息量从而确定权重^[5]。计算方法如下：

将评估对象集合记为 $\{A_i\} (i=1,2,\dots,m)$ ，评估指标参数集记为 $\{X_j\} (j=1,2,\dots,n)$ ，第 i 个方案第 j 个指标参数的原始值记为 x_{ij} 表示。

1) 将 x_{ij} 做正向化处理，并计算第 j 个指标第 i 个方案所占的比重

$$p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)。 \quad (1)$$

2) 计算第 j 个指标的熵值

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij} (j=1,2,\dots,n), k \geq 0, e_j \geq 0。 \quad (2)$$

3) 计算第 j 个指标的差异系数

$$g_j = 1 - e_j (j=1,2,\dots,n)。 \quad (3)$$

4) 计算第 j 个指标的权重

$$u_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}。 \quad (4)$$

向量 $u = [u_1, u_2, \dots, u_n]^T$ ，即为用熵权法确定的第 j 个指标的权重向量。运用 Matlab 软件计算出指标参数体系各权重值如表 1 所示。

表 1 航天装备维修保障效能指标参数体系权重关系

指标权重	参数权重	
航天装备遂行任务能力 0.300	累积完成任务时间	0.299
	累积未完成任务时间	0.365
	航天任务单元任务完成率	0.366
航天装备状态完好水平 0.400	瞬时完好台数	0.168
	瞬时不可用台数	0.168
	瞬时完好率	0.193
	平均完好率	0.106
	平均修复率	0.257
	平均失修率	0.108
航天装备维修保障体系水平 0.300	维修人员需求数	0.089
	维修人员利用率	0.089
	维修人员满足率	0.090
	平均维修工作量	0.093
	设备设施需求数	0.095
	设备设施利用率	0.091
	设备设施满足率	0.098
	维修器材需求数	0.084
	维修器材短缺数	0.090
	维修器材保障概率	0.094
单位时间维修器材消耗费用	0.087	

4 效能评估指标参数量化表达

4.1 航天装备任务持续性参数

面向航天任务单位管理需求的航天装备任务持续性参数，主要包括装备累积完成任务时间、累积未完成任务时间以及任务单元完成率等。

1) 累积完成任务时间 T_d ，指一定时间阶段内，作战单元内某型航天装备从任务执行开始到统计时刻结束，累积完成任务时间的总值， T_d 能在一定程度上反映航天装备作战单元遂行任务的能力。

2) 累积未完成任务时间 T_{ud} ，指一定时间阶段内，航天装备任务单元中的某型航天装备从任务执行开始到统计时刻为止，累积未完成任务时间的总值，等于预定总任务时间 T_m 与累积完成任务时间的 T_d 差。

$$T_{ud} = T_m - T_d。 \quad (5)$$

3) 航天装备任务单元完成率 P_{tm} ，指遂行航天任务时，各单元成功完成任务时间占预定任务时间的比值。航天装备任务单元任务完成率计算模型如下：

$$P_{tm} = \frac{T_d}{T_m} = \frac{T_d}{T_d + T_{ud}}。 \quad (6)$$

式中 T_d 、 T_{ud} 、 T_m 表达同上。

4.2 航天装备维修保障体系特性参数

在对现有维修保障体系特性参数和任务单位关注的维修保障体系特性参数分析基础上，为契合航天装备维修管理决策需求，笔者提出面向仿真的维修保障体系特性参数。

4.2.1 维修人员相关效能参数

维修人员相关效能参数包括维修人员状态、维修人员满足率和维修人员利用率等。

1) 维修人员需求数 N_{hn} ，指修复性维修或预防性维修活动对维修人员需求数量在一段时间内的均值。维修人员需求数由修复性维修和预防性维修作业任务量及作业任务要求所决定，其计算模型如下：

$$N_{hn} = N_{hnm} + N_{hpm}。 \quad (7)$$

式中： N_{hnm} 为修复性维修作业维修人员需求数； N_{hpm} 为预防性维修作业维修人员需求数。

2) 维修人员满足率 P_{hf} ，指当维修人员需求数大于或等于现有能够提供数量时，能够提供的维修人员数量与需求数之比，表示现有航天装备某专业维修人员满足维修作业需求的程度，数学模型为

$$P_{hf} = N_h / N_{hn} = N_h / (N_{hnm} + N_{hpm})。 \quad (8)$$

3) 维修人员利用率 P_{hu} ，指当配置的维修人员数量大于或等于实际需要数量时，实际需要的维修人员数量与现有配置数量之比，数学模型如下：

$$P_{hu} = \frac{N_{hn}}{N_h} = \frac{N_{hnm} + N_{hpm}}{N_h}。 \quad (9)$$

4) 平均维修工作量 W_h ，用来考察修理机构维修人员工作能力的一项重要参数，指一定时间内，预防性维修总工时和修复性维修总工时之和与维修次数之比， W_h 值越小，表明该修理机构维修人员工作能力越高^[12]。计算模型如下：

$$W_h = \frac{W_{rm} + W_{pm}}{X_{rm} + Y_{pm}}。 \quad (10)$$

式中： W_{rm} 和 W_{pm} 分别为某阶段内执行修复性维修与预防性维修所需总工时数； X_{rm} 和 Y_{pm} 分别为某阶段内执行修复性维修及预防性维修的总次数。

4.2.2 设备设施相关效能参数

航天装备维修设备设施相关效能参数主要包括设备设施状态、设备设施满足率、设备设施利用率等。

1) 维修保障设备设施需求数 N_{dm} ，指修复性维修或预防性维修作业活动对维修人员的需求数量在一段时间内的均值，由修复性维修和预防性维修作业任务量及作业任务要求所决定，数学模型如下：

$$N_{dm} = N_{drm} + N_{dpm}。 \quad (11)$$

式中， N_{drm} 和 N_{dpm} 分别表示修复性维修作业与预防性维修作业对维修保障设备设施的需求数。

2) 维修保障设备设施满足率 P_{df} ，指当需要的设备设施大于或等于现有能够提供设备设施数量时，能提供的设备设施数量与需求数量之比，表示现有某类维修设备满足维修作业需求的程度，数学模型^[13]为

$$P_{df} = \frac{N_d}{N_{dm}} = \frac{N_d}{N_{drm} + N_{dpm}}。 \quad (12)$$

3) 维修保障设备设施利用率 P_{du} ，指当配置的设备设施数量大于或等于实际需要的设备设施数量时，实际需要数量与现有配置数量之比，数学模型为

$$P_{du} = \frac{N_{dm}}{N_d} = \frac{N_{drm} + N_{dpm}}{N_d}。 \quad (13)$$

4.2.3 器材筹储保障相关效能参数

航天装备状态完好水平、任务持续能力以及高额的采购维护费用对器材保障水平提出较高要求，器材存储种类和数量既要满足维修保障需求，又要尽可能降低费用。器材筹储供的种类和数量是维修

作业的直接约束，器材保障水平对于提升维修保障效能具有直接影响作用，主要由需求数、利用率和短缺风险等参数来反映。

1) 维修器材需求数 N_{sn} ，指随着任务执行时间累积，装备发生故障或预防性维修时间到达，由于修复性维修与预防性维修产生的器材需求数，反映了航天装备在完成计划任务下维修器材的消耗情况。

2) 维修器材利用率 P_{su} ，指维修作业所消耗的某类器材数量与现有存储的某类器材总量之比，反映了装备在完成规定航天装备任务的约束条件下器材的消耗情况，计算公式如下：

$$P_{su} = \frac{N_{sc} - N_{sm}}{N_s} \quad (14)$$

式中： N_{sc} 为某类器材需求数； N_{sm} 为某类器材修复数； N_s 为某类器材现有库存数。

3) 维修器材短缺数 BO，指未能满足供应需求的器材数量，通常以期望短缺数 $EBO(s)$ 来衡量，其数学模型为

$$EBO(s) = \sum_{x=s+1}^{\infty} (x-s)p_r(x) \quad (15)$$

式中： s 为器材库存量； $p_r(x)$ 为待收器材数的稳态概率分布，服从泊松分布：

$$p_r(x) = \frac{(mT)^x e^{-mT}}{x!} \quad (16)$$

式中： mT 为泊松均值 $E(x)$ ； m 为年平均需求量； T 为年度内测量的平均时间周期。

4) 维修器材保障概率 P_{sf} ，对于航天装备任务单元， P_{sf} 表示规定任务执行周期内，航天装备对维修器材的需求被满足的概率，与维修器材需求数量和供应周期紧密相关，其数学模型^[14]如下：

$$P_{sf} = \sum_{i=0}^{N_{sn}} \frac{(n\lambda t)^i}{i!} \exp(-n\lambda t) \quad (17)$$

式中： N_{sn} 为某部件对应器材的需求量； n 为某部件的单机安装数； λ 为某部件的失效率； t 为某部件对应器材的供应周期。

5) 单位时间器材消耗费用 C_s ，指某一时间段内执行维修活动所消耗的器材总费用与装备所消耗单位时间内的总数之比，反映了装备动用计划安排的综合效益。器材平均消耗费用越高，表明该单位执行任务器材保障费效比越差，一定程度上体现了维修保障体系的总体水平。其数学模型为

$$C_s = \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^{N_{sq}} x_i C_i \quad (18)$$

式中： C_i 为时间 T 内某型号装备所消耗的第 i 件器材的价格； M_T 为某型号装备所消耗单位时间的总值； N_{sq} 为某型号装备消耗的器材总项数； x_i 为型号 i 的器材消耗数量。

4.3 航天装备状态完好性参数

基于航天装备维修保障实践和上述对相关效能参数分析可以得出以下结论：1) 上述装备系统效能参数多是站在装备研制角度来描述的，一些效能参数不能紧贴使用阶段维修保障管理需求；2) 任务单位通常采用航天装备完好率的计算方式，侧重于静态评价，实际应用时很难反映出任务驱动下装备技术状态的动态变化^[15]，因此，有必要研究适用于任务单位需求，能够适用于仿真方法求解的航天装备维修保障效能参数。

1) 航天装备瞬时完好台数 $N_O(t_k)$ ，表示 t_k 时刻某类装备完好台数，用来描述作战单元中瞬时可用装备台数，是状态完好性的一项重要参数，同时也是维修管理人员进行决策时重点关注的一项内容。

2) 航天装备瞬时不可用台数 $N_M(t_k)$ ，表示 t_k 时作战单元中某类装备不可用台数，是表示航天装备状态完好性的一项重要参数，数学模型为

$$N_M(t_k) = N_{WR}(t_k) + N_{WM}(t_k) + N_{PM}(t_k) + N_{RM}(t_k) \quad (19)$$

式中： $N_{WR}(t_k)$ 为 t_k 时刻某类装备由于缺维修人员、设备设施等资源而处于待修状态的台数； $N_{WM}(t_k)$ 为某类装备处于不可用且由于缺维修器材处于待修状态的台数； $N_{PM}(t_k)$ 为某类装备处于预防性维修状态的台数； $N_{RM}(t_k)$ 为某类装备处于修复性维修状态的台数。

3) 航天装备瞬时完好率 $P_{OR}(t_k)$ ，为使装备完好率反映出任务驱动下的动态变化特征，笔者提出瞬时完好率的概念，指在任意时刻装备完好数与实有总数之比。结合航天装备使用和维修保障实际，笔者将航天装备状态分为工作、待命、待修(等待维修人员、设备、维修器材等)以及维修(修复性维修和预防性维修)。数学模型如下：

$$P_{OR}(t_k) = \frac{N_O(t_k)}{N(t_k)} = \frac{N_W(t_k) + N_A(t_k)}{N_W(t_k) + N_A(t_k) + N_{WR}(t_k) + N_{WM}(t_k) + N_{PM}(t_k) + N_{RM}(t_k)} \quad (20)$$

式中： t_k 为任意时刻； $P_{OR}(t_k)$ 为某类装备在 t_k 时刻的瞬时完好率； $N_O(t_k)$ 为 t_k 时刻某类装备完好台数； $N(t_k)$ 为 t_k 时刻某类装备实有总台数； $N_W(t_k)$ 为 t_k 时刻某类装备处于工作状态的台数； $N_A(t_k)$ 为 t_k 时刻某

类装备处于待命状态的台数。

需要说明的是，瞬时完好率具有即时性，反映了所统计单位在某一个时刻的即时完好水平。以实际中常见的关于航天装备相关检查工作为例，在检查当天以完好航天装备台数和该单位当天航天装备总台数来求解航天装备完好率，所得数值就是航天装备瞬时完好率。航天装备瞬时完好率，仅能反映统计时刻的航天装备完好水平，并不能全面反映被统计单位在其他时间阶段的装备完好水平。

4) 航天装备平均完好率 P_{ORn} ，在瞬时完好率的基础上，可得出某类装备某一段时间内的平均完好率，其具体含义是指装备任意一段时间内完好率的均值，其数学模型为

$$\overline{P_{ORn}} = \frac{\sum_{k=1}^n P_{OR}(t_k)}{n} \quad (21)$$

式中： P_{ORn} 为某一时间间隔内某类装备平均完好； t_k 为任意时刻； $P_{OR}(t_k)$ 为 t_k 时刻某类装备的瞬时统计完好率； n 为统计次数。由于在某一时间段内，航天装备实有数和完好数可能是不断变化，因此对某一段时间内的平均完好率也可用如下模型统计：

$$\overline{P_{ORn}} = \frac{\sum_{n=1}^N N_o(t_k)}{\sum_{n=1}^N N(t_k)} = \frac{\sum_{n=1}^N (N_w(t_k) + N_A(t_k))}{\sum_{n=1}^N (N_w(t_k) + N_A(t_k) + N_{WR}(t_k) + N_{WM}(t_k) + N_{PM}(t_k) + N_{RM}(t_k))} \quad (22)$$

式中： P_{ORn} 为某一时间间隔内某类装备的平均完好率； n 为统计次数。

5) 航天装备平均修复率 P_M ，指某一时间阶段内，将不可用装备恢复至完好状态的台数与不可用装备总台数之比，是衡量修理机构维修保障能力的一项重要参数。造成装备不可用的原因分为修复性维修和预防性维修 2 类情况。其数学模型表示为

$$\overline{P_M} = \frac{N_M}{N_{PM} + N_{RM}} \quad (23)$$

式中： P_M 为某一时间段内将不可用装备恢复至完好状态的台数； N_{PM} 为发生故障的装备台数； N_{RM} 为需执行预防性维修的装备台数。

6) 航天装备平均失修率 P_N ，指某一时间段内，因为某些原因需要维修而未能修复的航天装备台数与需要维修的航天装备台数的比值，也是衡量修理机构维修保障能力的一项重要参数。航天装备平均失修率数学模型表示为：

$$\overline{P_N} = \frac{N_N}{N_{PM} + N_{RM}} = 1 - \overline{P_M} \quad (24)$$

上式表明：航天装备平均失修率与平均修复率之和为 1，从侧面反映了航天装备维修保障体系的保障水平。

由各类参数的数学模型可知：为求解任务驱动下的某类航天装备状态完好性参数，必须得到相应处于工作、待命、待修、修理中等状态装备的数量，这些数值是得出瞬时完好率的基础，也是采用仿真方法求解维修保障效能需重点解决的问题。

5 评估指标参数体系应用

在上述评估指标参数体系的基础上，笔者采用 C#与 Matlab 混合编程实现航天装备维修保障仿真评估数据采集系统，并以典型航天测控装备维修保障过程的基础数据，验证了评估指标参数体系构建的可行性和有效性。仿真系统的界面和功能采用 C#设计，主体运算部分基于 Matlab 编程实现，同时在 C#中调用 Matlab 编译器生成的动态链接库文件，实现录入和运算。开发环境为 Visual Studio C# 2012 和 Matlab R2014a。仿真评估数据采集系统运行界面如图 5、图 6 所示。下一步，笔者将依托 Vensim、Matlab 和 Anylogic 软件，构建系统动力学模型，对航天装备维修保障方案进行仿真实验运行，以此获取效能评估提供指标参数体系相应的评估数据。



图 5 故障数据采集记录界面



图 6 仿真评估指标参数信息界面

6 结束语

笔者从分析维修保障效能影响因素入手，阐述 5 类静态因素和动态因素，确定从装备遂行任务、维修保障对象完好水平及维修资源保障水平等方面表征航天装备维修保障效能的思想，提出指标选取与确定的原则和流程。以此为基础，按照归纳现有效能指标、分析任务单位关注的效能指标、提出面向仿真的效能参数的步骤，分别确定了由 3 大类别共计 20 项单项参数描述构成的适用于仿真方法求解且满足实际需求的航天装备维修保障效能指标参数体系，采用熵权法确定了权重，并利用 C#与 Matlab 混合编程实现了仿真评估基础数据的采集和评估指标参数生成，为航天装备维修保障效能建设的进一步发展奠定理论基础。

参考文献：

[1] 侯兴明, 王保顺. 试验装备保障[M]. 北京: 国防工业出版社, 2016: 186-192.

[2] MOORE S C, STOCKFISCH J A, MATTHEW S. Goldberg. Measuring Military Readiness and Susstainability[R]//R-3842-DAG, Santa Monica USA:Rand(0-8330-1058-1), 1991.

[3] Air Force Intruction 10-602. Dctermining logistics support and readiness requirements[S]. 2001.

[4] 李鑫. 航天试验装备保障效能评估研究[D]. 北京: 装备学院, 2012: 38-40.

(上接第 3 页)

参考文献：

[1] 苏璐璐. Q235 钢和不锈钢海水腐蚀机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.

[2] 胡金东, 刘希琴, 刘子利, 等. 铬含量对薄壁高强度桩管钢腐蚀性能的影响[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(30): 1027-1032.

[3] 徐晋勇, 高清. 表面高铬高碳合金层耐蚀性能的研究

[5] 杜晓明. 基于仿真的装备保障效能评估[M]. 北京: 国防工业出版社, 2017: 138-141.

[6] 马洪文, 魏俊, 高艳章, 等. 基于模糊综合评判的装备维修保障系统效能评估[J]. 兵工自动化, 2010, 29(7): 32-34.

[7] 于永利, 康锐. 装备综合保障基础理论及技术的若干问题[J]. 装甲兵工程学院学报, 2010, 24(6): 1-8.

[8] 柯宏发. 电子装备体系效能评估理论及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2018: 41-43.

[9] 尹江丽, 王莉. 军用卫星通信系统效能评估指标体系研究[J]. 兵工自动化, 2008, 37(6): 9-11.

[10] 陈浩光, 秦大国, 李云芝. 军用卫星系统效能评估的基本原则与方法研究[J]. 装备指挥技术学院学报, 2001, 8(2): 27-30.

[11] 尹江丽, 王莉. 基于 PFT 的航天电子侦察系统作战效能指标体系构建[J]. 航天电子对抗, 2017, 33(4): 26-30.

[12] 崔凯旋, 石全, 胡起伟, 等. 基于区间数与可拓理论的装备维修保障人员训练效果评估[J]. 兵工自动化, 2013, 32(2): 12-16.

[13] 章文晋, 郭霖瀚. 装备保障性分析技术[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 58-66.

[14] Sherbrooke Craig C. 装备备件最优库存建模—多级技术[M]. 贺步杰, 译. 北京: 电子工业出版社, 2008: 260-261.

[15] 许庆, 侯兴明. 基于 DAF 综合评价法的航天装备维修保障效能评估[J]. 兵工自动化, 2019, 38(1): 48-51.

[J]. 腐蚀与防护, 2005, 26(12): 507-509.

[4] 魏开金, 刘大扬, 王建辉, 等. 不锈钢在榆林海域暴露 8 年的腐蚀行为[J]. 材料开发与应用, 1999, 14(5): 5-8.

[5] 林志坚, 庄焱. 不锈钢在厦门海域的长周期腐蚀行为[J]. 材料保护, 2003, 36(7): 6-8.

[6] 黄桂桥, 郁春娟, 李兰生. 海水中钢的电偶腐蚀研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2001, 21(1): 46-52.