

doi: 10.7690/bgzdh.2020.12.015

# 基于状态信息的装备完好性评估方法

王 丁<sup>1</sup>, 龚 丹<sup>1</sup>, 李 昂<sup>1</sup>, 裘 实<sup>2</sup>, 冷 冰<sup>1</sup>

(1. 军事科学院防化研究院总体研究所, 北京 102205; 2. 中国人民解放军 32281 部队, 成都 610200)

**摘要:** 为解决当前装备完好性评估判据不准确的问题, 对基于状态信息的装备完好性评估方法进行分析。给出状态信息获取途径和选择依据, 建立装备完好性评估体系模型, 确定装备关键单元, 根据状态信息特点, 采用 D-S 证据理论和模糊综合评判对数据进行处理, 结合评估体系指标权重实现装备完好性评估, 并通过实例进行验证。结果表明, 该评估模型和计算方法在装备完好性评估中具有一定的实用性和有效性。

**关键词:** 装备完好性; 状态信息; 检查评估; D-S 证据理论

**中图分类号:** E241 **文献标志码:** A

## Evaluation Method of Equipment Integrity Based on Status Information

Wang Ding<sup>1</sup>, Gong Dan<sup>1</sup>, Li Ang<sup>1</sup>, Qiu Shi<sup>2</sup>, Leng Bing<sup>1</sup>

(1. Overall Planning Lab, Institute of Chemical Defense, Academy of Military Sciences PLA China, Beijing 102205, China; 2. No. 32281 Unit of PLA, Chengdu 610200, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of inaccurate evaluation criterion of equipment integrity, the evaluation method of equipment integrity based on state information was analyzed. Put forward acquiring path and selection criterion of state information, establish equipment integrity evaluation system model, and ascertain equipment key unit. According to the characteristics of the state information, D-S evidence theory and fuzzy comprehensive evaluation were adopted to process the data, and the equipment integrity evaluation was realized by combining with the index weight of the evaluation system, and verify through examples. The results show that the evaluation model and calculation method are practical and effective in equipment integrity evaluation.

**Keywords:** equipment integrity; state information; inspection and evaluation; D-S evidence theory

## 0 引言

在训练动用、抽查普查和调配交接时进行装备完好性评估, 能够为评估装备能力提供科学依据, 为装备管理提供原始信息, 为新装备论证和现役装备升级改造提供参考信息, 为制定训练和保障计划提供装备技术状态和完好性水平相关依据。笔者对装备完好性评估相关概念进行分析, 对装备完好性与状态信息评估工作的重要性及获取途径进行探讨。

## 1 状态信息评估理论基础

### 1.1 装备完好性与状态信息

装备的战备完好性是在平时和任务条件下, 保持和承担全部工作的程度或能力, 是衡量装备使用效能的重要标志, 直接影响装备使命任务能否顺利完成; 装备完好率是装备能随时遂行任务的完好数与实有数的百分比<sup>[1]</sup>。

状态信息是反映装备技术状况或故障征兆的可

检测参数信息及其判据<sup>[2]</sup>, 是指导装备使用单位管好、用好装备系统, 充分发挥其使用效能的重要依据。通过对采集的装备完好性相关状态信息进行综合分析、评价和预计, 装备管理部门能够为装备使用效能做出客观评定, 指出论证设计、研制、生产和使用中存在的问题, 提出改进方向; 完好性状态信息还能反映装备寿命周期各阶段的完好性状况、变化规律及各种相关因素的影响, 是管理部门实施装备完好性评估的基础, 也是进行装备设计、评审、实验、管理、监督与控制, 并保证装备完好性的重要支持和依据。

### 1.2 D-S 证据理论计算方法

D-S 证据理论的特点是采用信度函数取代具体概率作为度量, 能够用信任测度与似然测度处理不确定性问题。这里的证据不仅是“证据确凿”的数据, 而且是专家知识经验, 是对某一类问题进行观察和研究的描述。

D-S 证据合成法则应用范围很广, 在文中装备

收稿日期: 2020-08-05; 修回日期: 2020-09-30

基金项目: 装备科研重点项目 (JK20182A020305)

作者简介: 王 丁(1987—), 男, 陕西人, 硕士, 助理研究员, 从事防化装备与技术总体论证与设计研究。E-mail: 330769263@qq.com。

完好性估算中要用到，基本数学表达是若  $\text{Bel}_1, \dots, \text{Bel}_n$  是同一空间上的信度函数，且基本可信度分配为  $m$ ，则：

$$m(A) = K \sum_{\substack{A_1 \dots A_n \subseteq \Theta \\ A_1 \cap \dots \cap A_n = A}} m_i(A_i), \quad \forall A \in \Theta, A \neq \emptyset, i = 1, \dots, n.$$

式中  $K = [1 - \sum_{\substack{A_1 \dots A_n \subseteq \Theta \\ A_1 \cap \dots \cap A_n = \emptyset}} m_i(A_i)]^{-1}$ 。该法则反映了一个子

系统或关键单元(部组件)的若干状态参量对上一级系统单元(部组件)的共同影响。式中基本可信数  $m(A)$  的计算是关键，设有门限值  $\alpha_1$  和  $\alpha_2$ ，且存在  $\forall A_x$  与  $A_y \in \Theta$ ，则有：

$$\begin{cases} m(A_x) - m(A_y) > \alpha_1 \\ m(\Theta) < \alpha_2 \\ m(A_x) > m(\Theta) \end{cases},$$

其中  $\left. \begin{aligned} m(A_x) &= \max \{m(A_i), A_i \in \Theta\} \\ m(A_y) &= \max \{m(A_j), A_j \in \Theta \text{ 且 } i \neq j\} \end{aligned} \right\}$ 。

如果计算出的基本可信度满足以上条件，评价结果则为  $A_x$ ，将其转化为百分数可得被评估装备关键单元主项技术指标评分值。

## 2 状态信息的选择和采集

装备完好性评估需要一些信息来直观地反映设备状态是否良好，包括状态参量如流量、油温、转速等，其他数据如外观是否完好、保养是否及时等。这些信息是完好性评估的重要依据。嵌入式数据终端具有内核小、专用性强、系统精简等优点，逐步应用于相关装备的测试、状态信息采集存储及效能评估等领域。

### 2.1 信息的选择

信息选择主要包括 2 方面内容：1) 要涵盖受检装备所有的子系统和部件；2) 测量的数据种类要全面，涵盖受检装备状态的各方面。

完好性状态信息一般集中在装备实际运行中反映出来，除一些子系统或部组件的次项指标通过外观检查、仪器检测、查询统计等方式获取外，装备系统关键单元主项指标参数可通过嵌入式数据终端获取，如按日历时间采集装备的启动、正常停机与故障停机、故障定位、运行参数、任务开始、任务变化、任务中断以及装备能否正常工作等数据；关键单元性能储备指标参数，如某车辆类装备的车体摩托小时、储备里程、剩余电量、气瓶压力等数据。

## 2.2 信息的采集

目前，应用嵌入式数据终端并不能获取系统的所有指标信息，还需要辅助手段，如：外观检查，通过目视、手触等对装备各子系统和部组件组成、外观、连接、保养等进行检查；仪器检测，利用专用仪器对装备部组件的密封状况、传动装置以及其他嵌入式系统不能采集的信息进行检测；查询统计，按照清单对装备随装工具、备品、附件、维修器材、资料等逐项进行清点；实装动用，采用启动或实操，检查装备有关技术性能指标。该实装动用专指检测装备的非量化指标，定量的参数数据通过装备数据终端获取。

## 3 装备完好性评估体系建模

装备完好性评价主体内容是定量检测在编装备战备完好性及其要素的实际确定值，包括体系模型的建立、关键单元的确定和评估过程的计算。

### 3.1 建立评估体系模型

通过对受检装备所需状态信息分析，参照 GJB4386—2002《武器装备维修质量评定要求和办法》，根据具体装备特点，可建立评估体系模型并提出对应的完好性评定指标<sup>[3]</sup>。对装备关键单元检查实行一票否决制，有一项不完好，则判定整个装备系统不完好。笔者建立评估体系模型如图 1 所示。

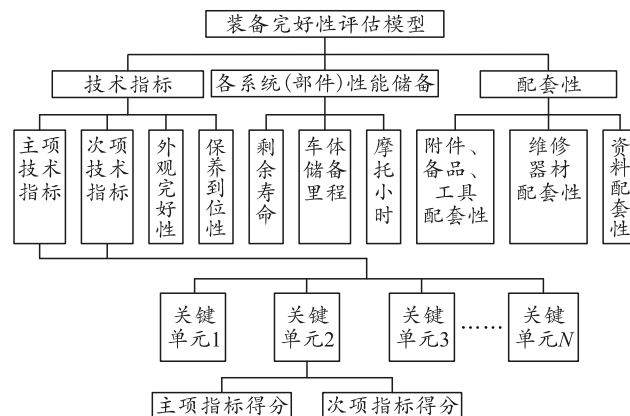


图 1 装备完好性评估体系

### 3.2 确定装备关键单元

为便于进行装备完好性评估，首先要明确装备关键单元，然后评估状态信息确定关键单元主项指标得分。完成任务不可少的单元称为关键单元，可通过分析受检装备任务剖面、从系统分解结构所组成的系统中提取，也可从装备设计、研制和生产方案中获取，可具体到零件、组件或部件级<sup>[4]</sup>。以某装备为例，其上装作业系统关键单元可划分为某泵、

管路部分、引水装置、传动装置、控制装置、仪表、箱体部分、喷枪喷刷、绞盘等。

### 3.3 评估过程

在建立评估体系模型的基础上，采用专家评判对各层指标进行确权，再对采集到的装备各类数据信息进行分析<sup>[5]</sup>，在底层指标评分中，受检装备某关键单元主项技术指标(状态参量可由嵌入式数据终端获取)通过 D-S 证据合成法计算完好概率并转化为百分制，其余底层指标可由装备领域专家模糊综合评判得来(评判参考数据来自于实装动用、仪器检测、外观观察、查询统计和嵌入式数据终端)，最终可得受检装备的整体完好性评分，作为判定其是否完好的量化依据。

对于某关键单元主项指标得分，利用 D-S 证据理论对其技术状态进行评估的流程如图 2 所示。

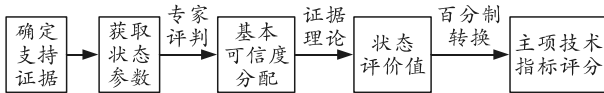


图 2 基于 D-S 证据理论的主项技术状态评分流程

对于受检某关键单元次项指标得分以及其余指标得分，由于其部分状态信息不能通过嵌入式数据终端获取，需要外观检查、仪器检测等手段评估<sup>[6]</sup>。为了简化计算过程、提高评估效率，可通过模糊综合评判法对其评估，流程如图 3 所示。

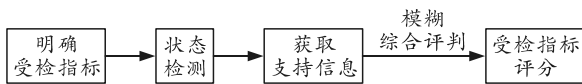


图 3 模糊综合评判法评估过程

根据关键单元主项技术指标评估结果，以及关键单元次项技术指标和装备系统其他指标模糊综合评估结果，结合评估体系各层指标权重，可得受检装备完好性评估结果<sup>[7]</sup>，具体流程如图 4 所示。

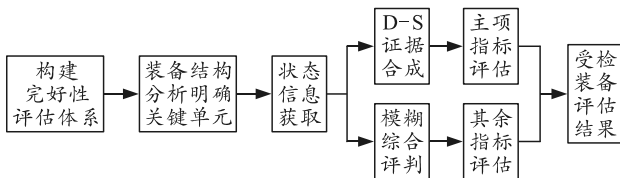


图 4 装备整体完好性评估过程

## 4 应用实例

以某装备完好性评估为例，对具体计算过程和方法详细说明。

### 4.1 确定权重

首先，构建该装备完好性评估指标体系如图 1 所示；其次，利用装备领域专家系统对每层指标权

重进行评分，充分利用专家知识经验和严密的逻辑推理，并通过一致性检验判断是否合理，使参评指标权重最大限度符合客观实际。该体系第 2 层和第 3 层指标分别对应的 4 个比较矩阵分别为：

$$G = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 6 \\ 1/5 & 1 & 3 \\ 1/6 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}; \quad C_1 = \begin{bmatrix} 1 & 5 & 8 & 7 \\ 1/5 & 1 & 5 & 4 \\ 1/8 & 1/5 & 1 & 1/3 \\ 1/7 & 1/4 & 3 & 1 \end{bmatrix};$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 5 \\ 1/3 & 1 & 3 \\ 1/5 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}; \quad C_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 5 \\ 3 & 1 & 7 \\ 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix}.$$

调用 Matlab 工具中的 eig 函数对判断矩阵进行计算，可知一致性指标 CR 都小于 0.1，比较矩阵均有效，归一化最大特征根对应的特征向量可得第 2 层指标权重(G)和第 3 层指标权重(C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>)分别为：

$$\omega_G = (0.7173, 0.1947, 0.0880)^T;$$

$$\omega_{C_1} = (0.6438, 0.2205, 0.0472, 0.0885)^T;$$

$$\omega_{C_2} = (0.6370, 0.2583, 0.1047)^T;$$

$$\omega_{C_3} = (0.2790, 0.6491, 0.0719)^T.$$

### 4.2 底层指标评分

将评估体系底层指标分 2 类：第 1 类是关键单元主项技术指标，通过 D-S 证据合成法得来；其余为第 2 类，采用模糊综合评判法得来。以某装备某单元主项技术指标为例，说明 D-S 证据理论评分的详细过程。

#### 1) 主项技术指标计算过程。

选取工作单元转速(m<sub>1</sub>)、压力(m<sub>2</sub>)及工作温度(m<sub>3</sub>)作为评价技术状态完好性的支持证据，各证据分别有 3 个状态，为好(A<sub>1</sub>)、中(A<sub>2</sub>)、差(A<sub>3</sub>)，其评判标准由装备领域专家确定，然后通过合成法则和决策概率函数确定状态评价价值。建立各状态与对应的评估值如表 1 所示。

表 1 与状态对应的评估值

状态	好(A <sub>1</sub> )	中(A <sub>2</sub> )	差(A <sub>3</sub> )
评估值	0.8 < P ≤ 1.0	0.5 < P ≤ 0.8	0 < P ≤ 0.5

经专家评判，可得 3 个主项技术参数的基本可信度分配如表 2 所示。

表 2 各证据基本可信度分配

主项参数	支持状态			
	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	θ
m <sub>1</sub>	0.7	0.1	0.10	0.10
m <sub>2</sub>	0.8	0.1	0.05	0.05
m <sub>3</sub>	0.6	0.2	0.05	0.15

通过证据合成法则算出合成系数 K，求解转速

和压力的合成系数  $K_{12}$  过程如下：

$$K_{12}=[1-(0.07+0.035+0.08+0.005+0.08+0.01)]^{-1} \approx 1.39。$$

求得  $K_{12}$  后，可算出证据  $m_1$  和  $m_2$  合成的结果如表 3 所示。

表 3 前 2 组证据合成结果

压力基本可信度分配	泵转速基本可信度分配			
	$m_1(A_1)=0.7$	$m_1(A_2)=0.1$	$m_1(A_3)=0.1$	$m_1(\Theta)=0.1$
$m_2(A_1)=0.8$	0.56	0.08	0.08	0.08
$m_2(A_2)=0.1$	0.07	0.01	0.01	0.01
$m_2(A_3)=0.05$	0.035	0.005	0.005	0.005
$m_2(\Theta)=0.05$	0.035	0.005	0.005	0.005

由表 3 可得：

$$m_{12}(A_1)=K_{12}(0.56+0.08+0.035)=0.938 3；$$

$$m_{12}(A_2)=K_{12}(0.01+0.01+0.005)=0.034 8；$$

$$m_{12}(A_3)=K_{12}(0.005+0.005+0.005)=0.020 9；$$

$$m_{12}(\Theta) = K_{12} \cdot 0.005 = 0.007 。$$

同理，再将前 2 项证据融合结果  $m_{12}$  与第 3 项参数进行合并，可得表 4 所示结果。

表 4 3 组证据最终合成结果

主项组合参数	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$\Theta$
$m_{12}$	0.938 3	0.034 8	0.020 9	0.007 0
$m_{123}$	0.970 8	0.018 6	0.006 2	0.001 4

通过决策概率函数设定门限值判断其技术状态评定值，例如设  $\alpha_1=0.2$ ， $\alpha_2=0.05$ ，根据决策概率的选择，可得该单元最终技术状态评价价值  $m_{123}(A_1)=0.970 8$ 。因为此值取值范围为[0,1]，且技术状态评价价值和完好性评分在描述装备技术状态上本质相同，故可将其换算为百分制评分，为 97.08 分。

2) 次项技术指标计算过程。

得到关键单元主项技术参数评分后，对次项指标进行模糊综合量化评分，综合可得该关键单元主、

$$E_1 = EC_1 \cdot \omega_{C_1} = (95.6, 96.2, 94.1, 92.7)(0.643 8, 0.220 5, 0.047 2, 0.088 5) = 95.41；$$

$$E_2 = EC_2 \cdot \omega_{C_2} = (92.3, 97.5, 87.6)(0.637 0, 0.258 3, 0.104 7) = 93.15；$$

$$E_3 = EC_3 \cdot \omega_{C_3} = (93.3, 96.9, 95.1)(0.279 0, 0.649 1, 0.071 9) = 95.77。$$

受检装备完好性综合评定值为：

$$E_{\text{总}} = [E_1, E_2, E_3] \cdot \omega_G = (95.41, 93.15, 95.77)(0.717 3, 0.194 7, 0.088 0) \approx 95。$$

根据装备完好性评定准则，将装备分为 2 类：

1) 完好，即装备达到各项规定的性能指标，保养状况良好，关键单元主要部件性能储备充足，随装工具、备品、附件、维修器材、资料等齐全，能较好完成任务，评定得分在 90 分(含)以上；2) 非完好，与上述标准相悖，评定得分在 90 分以下。该受检装备完好性评估结果为“完好”。

次项指标评分。表 5 为受检装备某工作单元主项指标的评分结果。

表 5 某泵技术指标评分

受检项目	指标分类	检查内容	数据来源	平均得分
某泵	主项指标参数	泵运行参数	数据终端	97.08
		泵转速、泵压、工作温度		
		润滑的润滑良好	实装动用	93.9
	次项指标	各螺丝紧固适当	外观检查	92.6
		密封良好	仪器检测	93.7
		泵体清洁无锈蚀、无油垢	外观检查	91.2
		模糊综合量化得分		92.83

根据以上计算方法和步骤，可得到受检装备所有关键单元主项和次项技术指标评分。因为各关键单元对装备系统的重要程度相同，缺一不可；所以认为其权重相同，将所有关键单元主、次项指标评分分别作算术平均，结果可作为装备整体主、次项技术指标评分。

3) 其余指标计算过程。

外观完好性、保养到位性、各系统性能储备、配套性等其余指标量化评分均可通过模糊综合评判确定，从而得到装备完好性评估体系所有指标评分。

根据以上分析，受检装备完好性指标评分矩阵为：

$$EC_1=(95.6, 96.2, 94.1, 92.7)；$$

$$EC_2=(92.3, 97.5, 87.6)；$$

$$EC_3=(93.3, 96.9, 95.1)。$$

### 4.3 计算综合评定值

通过已计算出的各层指标权重和底层指标评定矩阵，可得该装备完好性综合评分。技术指标、主要部件性能储备指标和装备配套性指标得分如下：

## 5 结论

笔者建立评估模型，根据状态信息获取方式的不同，通过 D-S 证据理论和模糊综合评判分别对评估指标进行量化计算，结合评估体系指标权重，实现装备完好性的评估与检查。算例结果表明：该模型和算法可将不同途径获取的状态信息进行融合，较好解决了当前装备完好性评估判据单一导致的评估不准确问题，对提高装备管理精准性、科学性有一定意义。