

装备通用质量特性及寿命评估

基于 FAHP 与灰色聚类的航空地面电源车功能损伤状态评估

孙玉琳^a, 吕瑞强^a, 田磊^b, 王双川^a

(空军勤务学院 a.航空四站系; b.科研部, 江苏 徐州 221000)

摘要: **目的** 航空地面电源车战损情况下的功能损伤状态评估。**方法** 以电源车的功能结构层次为基础建立指标体系, 应用改进的模糊层次分析法 (Fuzzy Analytical Hierarchy Process, FAHP) 法确定指标权重。建立灰色聚类评估模型, 并提出指标灵敏度分析方法。**结果** 通过实例验证了方法的可行性和有效性。**结论** 基于 FAHP 与灰色聚类的方法能够最大限度地利用了有效信息, 对电源车功能损伤状态进行科学、合理和全面的评估。

关键词: 功能损伤; 状态评估; 灰色聚类; FAHP; 电源车

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2017.10.021

中图分类号: TJ07; TG147

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2017)10-0110-05

Function Damage Condition Evaluation of Power Truck Based on FAHP and Grey Clustering

SUN Yu-lin^a, LYU Rui-qiang^a, TIAN Lei^b, WANG Shuangchuan^a

(Air Force Logistics College a. Department of Aviation Ground; b. Scientific Department, Xuzhou 221000, China)

ABSTRACT: Objective To evaluate function damage condition of aircraft power truck. **Methods** An index system was established based on the functional structure layer of power truck. The FAHP (Fuzzy Analytic Hierarchy Process) was adopted to determine the weight of index. An evaluation model for gray clustering was established. And methods for analysis of index sensitivity were proposed. **Results** The applicability and the effectiveness of this model were verified by an example. **Conclusion** The method of FAHP and grey clustering can make full use of the information to evaluate the function damage condition of power truck.

KEY WORDS: function damage; condition evaluation; grey clustering; FAHP; power truck

装备在物理状态上发生损伤后, 会导致其出现一定程度的功能劣化或丧失^[1]。装备功能损伤状态的评估是物理战损状态的聚合分析, 同时也是单装损伤定级和集群装备战斗力丧失评估的基础, 是装备战损评估的重要环节。目前针对航空地面电源车的功能损伤状态评估, 多采用粗略的损伤定级方法, 根据电源车能否完成保障任务和保障人员个人经验来判断电源车损伤状态和损伤等级, 科学性和准确性不高。因此,

急需研究电源车功能损伤状态的评估方法, 以完善电源车战损评估理论体系。

装备功能损伤状态评估的方法主要有: 基于 DMEA 与损伤树的评估方法^[2-3]; 基于案例的评估方法^[4]; 基于贝叶斯网络的评估方法^[5-6]; 基于神经网络的评估方法^[7]; 基于幂指数的评估方法^[8-9]; 基于多指标决策或模糊综合评判的评估方法^[10-11]等。其中, 基于 DMEA 与损伤树的评估方法是基本的战损分析方

收稿日期: 2017-05-12; 修订日期: 2017-05-12

作者简介: 孙玉琳 (1992—), 男, 河北唐山人, 硕士, 主要研究方向为航空四站保障技术。

通讯作者: 吕瑞强 (1964—), 男, 江苏徐州人, 博士, 教授, 主要研究方向为装备保障理论与应用。

法，应用该方法的分析结果具有典型性，但是不能进行精确的量化分析。基于案例的评估方法在数据量和案例集较少时应用准确性不高。基于贝叶斯网络的评估方法和基于神经网络的评估方法可以实现数据不全情况下的双向推理，初步解决了贫信息条件下的战损评估问题，但是所建网络模型适用于精确定位分析，在宏观上的功能损伤评估中计算不够简便。文献[10]针对装甲装备建立了 AHP 与幂指数方法相结合的功能损伤评估模型，较好地实现了功能损伤程度的定量评估，但是在模型中没有考虑到评估的灰色性和模糊性。文献[11]提出的基于模糊层次分析的评估方法考虑到了评估的模糊性，但是在评估的灰色性上没有较好的解决。

电源车战损评估方面的历史数据少、影响因素多，其功能损伤状态的评估具有信息不充分、评判因素不明确两个主要特点。因此，该方面的评估是一项灰色性和模糊性兼具的复杂系统工程。针对此，文中建立了基于模糊层次分析法（Fuzzy Analytical Hier

archy Process, FAHP）和灰色聚类法的评估模型，并对方法进行了针对性的改进。该模型中 FAHP 法可以最大限度地利用定性指标的模糊有效信息，灰色聚类法能有效处理指标的不确定性问题，二者综合应用可以使电源车功能损伤状态的评估更加科学、合理。

1 评估指标体系

装备的功能损伤具有复杂的多态性，因此为描述装备的功能损伤状态，应将装备功能分解成适当的功能描述层次^[12]。根据电源车的功能特点和保障任务，将电源车的功能划分为总功能、系统级功能和分系统级功能三个层次。以此为基础，按照层次分析法原理，构建电源车功能损伤状态评估的指标体系，如图 1 所示。其中作战保障功能为总功能，即评估总目标；行进系统功能、发电系统功能、电力控制系统功能和操作系统功能四个方面为系统级功能，即评估一级指标；四个方面展开之后的指标为二级指标。

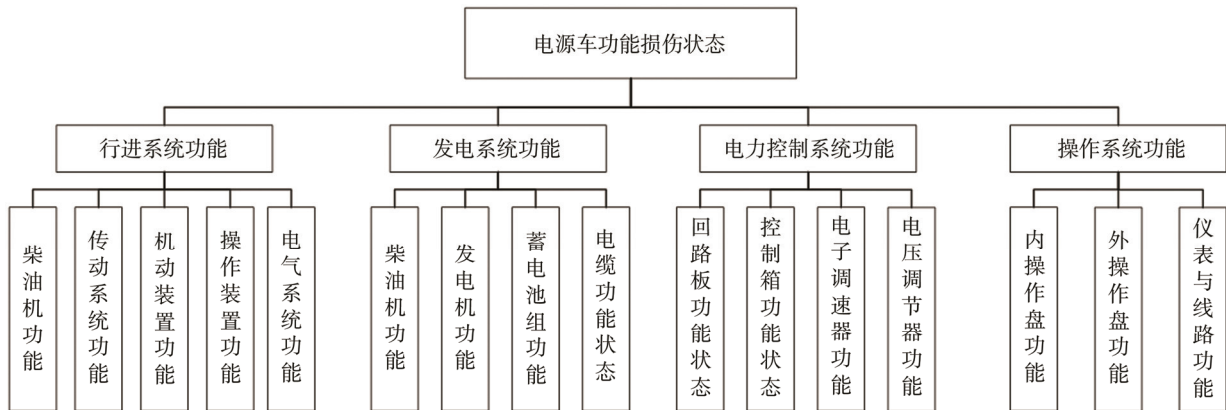


图 1 电源车功能损伤程度评估指标体系

2 基于 FAHP 与灰色聚类的评估模型

2.1 FAHP 法改进与指标权重确定

应用 FAHP 法进行指标权重的确定。FAHP 法是应用模糊评判思想进行定性分析与定量分析的一种方法^[13]，相较于传统的层次分析法，FAHP 法能更好地表述因素间的模糊关系。在该方法的模糊赋值中存在主观性较强的问题，因此决定参考序关系分析原理对其进行改进，使元素重要度模糊判断尺度由关系排序数唯一确定，降低模糊赋值判断的主观性。改进后的指标权重计算步骤如下：

1) 确定指标重要度排序与模糊判断尺度标准。令一级指标元素为 μ_i ，二级指标元素为 a_i ，元素间重要度关系为 p_{ij} ($i, j=1, 2, \dots, q$)。将指标重要度划分为 5 个等级，见表 1，等级间比较的模糊尺度见表 2。

表 1 电源车功能损伤程度评估指标元素重要性简易表

重要度排序	最重要	中值	较重要	中值	不重要
重要度等级	一	二	三	四	五
行进系统功能 μ_1		√			
发电系统功能 μ_2	√				
电力控制系统功能 μ_3			√		
操作系统功能 μ_4				√	

表 2 模糊尺度标准

p_{ij}	尺度说明
0.5	元素 a_i 与 a_j 重要度等级相同
0.6	元素 a_i 比 a_j 重要度高 1 等级
0.7	元素 a_i 比 a_j 重要度高 2 等级
0.8	元素 a_i 比 a_j 重要度高 3 等级
0.9	元素 a_i 比 a_j 重要度高 4 等级
0.1, 0.2, 0.3, 0.4	反向比较，正向比较结果互补

2) 构建模糊判断矩阵。在指标模糊重要度排序的基础上,依据重要度模糊赋值得出一级指标判断矩阵 $R_A=(r_{ij})_{q \times p}$, 其中:

$$r_{ij} = (r_i - r_j) / [2(n-1)] + 0.5$$

$$r_i = \sum_{t=1}^q P_{it} \quad (1)$$

$$r_j = \sum_{t=1}^q P_{jt}$$

3) 计算指标权重。将一级指标判断矩阵 $R_A=(r_{ij})_{q \times p}$ 的各个列向量归一化,再按行求和取平均,得 A 对于目标的组合权重:

$$\omega_A = (0.268, 0.389, 0.207, 0.136)$$

同理,经过模糊关系分析、重要度赋权、构建判断矩阵,可得二级指标组合权重为:

$$\omega_{A1} = (0.316, 0.258, 0.231, 0.195)$$

$$\omega_{A2} = (0.284, 0.284, 0.432)$$

$$\omega_{A3} = (0.212, 0.272, 0.516)$$

$$\omega_{A4} = (0.600, 0.400)$$

2.2 灰色聚类评估模型

可以将待评估对象看成是 m 个评估指标, s 个不同的灰类,根据对象关于指标 j 的样本实现值 X_{ij} ,对相应的对象 i 进行评估的过程。具体步骤为^[14]:

1) 确定指标体系中各指标的权重。

2) 划分评估灰类,选取阈值。例如将 j 指标的取值范围划分为 $[\alpha_1, \alpha_2], \dots, [\alpha_{k-1}, \alpha_k], \dots, [\alpha_s, \alpha_{s+1}]$, 其中阈值 $\alpha_k (k=1, 2, \dots, s)$ 的值可根据实际问题的要求或定性研究结果确定。

3) 建立三角白化权函数。令 $\frac{\alpha_k + \alpha_{k+1}}{2}$ 属于第 k 个灰类的白化权函数值为 1, $(\frac{\alpha_k + \alpha_{k+1}}{2}, 1)$ 与第 $k-1$ 个灰类的起点 α_{k-1} 和第 $k+1$ 个灰类的终点 α_{k+2} 连接,得到 j 指标关于 k 灰类的三角白化权函数 $f_j^k(\cdot) (j=1, 2, \dots, m; k=1, 2, \dots, s)$ 。对于 $f_j^1(\cdot)$ 和 $f_j^s(\cdot)$ 可分别根据具体情况将 j 指标取数域沿拓至 α_1, α_{k+2} , 如图 2 所示。

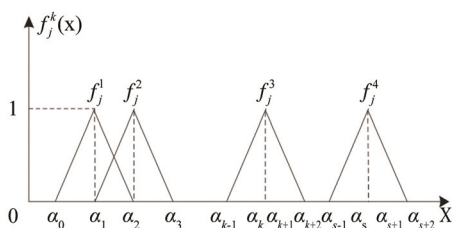


图 2 三角白化权函数

4) 整理各对象指标实现值。对于 j 指标的一个实现值 x , 由 $f_j^k(x)$ 表达式计算出其属于灰类 k 的白化权函数值,其中 $\lambda_k = (\alpha_k + \alpha_{k+1})/2$ 。 $f_j^k(x)$ 表达式为:

$$f_j^k(x) = \begin{cases} 0, & x \notin [\alpha_{k-1}, \alpha_{k+2}] \\ (x - \alpha_{k-1}) / (\lambda_k - \alpha_{k-1}), & x \in [\alpha_{k-1}, \lambda_k] \\ (\alpha_{k+1} - x) / (\lambda_k - \alpha_{k+1}), & x \in [\lambda_k, \alpha_{k+2}] \end{cases}$$

5) 计算对象 $i (i=1, 2, \dots, n)$ 关于灰类 $k (k=1, 2, \dots, s)$ 的综合聚类系数为:

$$\delta_i^k = \sum_{j=1}^m f_j^k(x_{ij}) \cdot \eta_j \quad (2)$$

式中: η_j 为指标 j 在综合聚类中的权重。

由 $\max\{\delta_j^k\} = \delta_j^{k^*}$ 判断对象 i 所隶属的灰类 k 。当有多个对象属于 k 时,可以进一步根据综合聚类系数的大小确定各对象优劣或位次,由此作出综合性的判别结果。

2.3 指标权重灵敏度分析

由于赋权存在一定的主观性,权重的变化可能会引起评估结果的变化。基于此,对指标权重进行灵敏度分析,量化表示权重对于评估结果的影响。

1) 确定边际指标权重。边际指标权重是指使评估结果发生变化的指标权重临界值^[15]。权重为临界值 ω_{A1} 时,存在两个灰类的综合聚类系数相等,即存在 $\delta_j^{k1^*} = \delta_j^{k2^*}$ 。

由式(2)可得:

$$\delta_j^{k1^*} = \sum_{j=1}^m f_j^{k1}(x_{ij}) \cdot \eta_j \quad (3)$$

$$\delta_j^{k2^*} = \sum_{j=1}^m f_j^{k2}(x_{ij}) \cdot \eta_j \quad (4)$$

2) 确定使评估结果变化的权重区间。当权重变化超过边际值时,评估结论将发生变化,则权重灵敏。为直观表示权重变化与结论变化之间的关系,可由图 3 的方式表示灵敏区间。其中上轴为 ω_i 权值,下轴为 ω_j 权值; ω'_i 与 ω'_j 为边际指标权重。

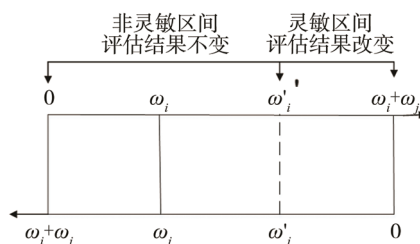


图 3 指标权重灵敏度区间

3 实例分析

以某次战损抢修试验中的某型损伤电源车为例进行评估分析。通过专家评估、装备检测与数据分析获取电源车状态的初始数据值,运用灰色聚类的方法来评估其功能损伤程度。

根据指标参数的变化范围,列出各指标的阈值、

延拓值。将各指标划分为完好、轻损、中损、重损等 4 个灰类。应用德尔菲法对电源车初始进行评价打分，以各专家装备功能状态评分的均值作为其实现值，见表 3。

根据表 3 中的数据，将其代入对应的灰类白化权

函数隶属度计算公式，从而得到各分类指标灰类的白化权函数值^[16]，见表 4。

根据表 4，结合综合聚系数计算公式，得到各项指标关于灰类 $k(k=1, 2, 3, 4)$ 的聚类系数 δ^k ，结果见表 5。

表 3 各指标灰类、阈值、延拓值及实现值

指标		序号	灰类				延拓值		实现值
一级指标	二级指标		重损 $f_j^1(x)$	中损 $f_j^2(x)$	轻损 $f_j^3(x)$	完好 $f_j^4(x)$	X^0	X^6	
行进系统 功能	底盘 柴油机	X_1	[0.1,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,0.95)	0	1	0.20
	传动 系统	X_2	[0.1,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,0.95)	0	1	0.28
	机动 装置	X_3	[0.1,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,0.95)	0	1	0.15
	操作 装置	X_4	[0.1,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,0.95)	0	1	0.30
	电气 系统	X_5	[0.1,0.25)	[0.25,0.50)	[0.50,0.75)	[0.75,0.95)	0	1	0.35
发电系统 功能	后车 柴油机	X_6	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	69
	发电机功能	X_7	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	75
	蓄电池组功能	X_8	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	30
	电缆功能状态	X_9	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	50
电力控制 系统功能	回路板功能	X_{10}	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	40
	控制箱功能	X_{11}	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	44
	电子调速器	X_{12}	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	25
	电压调节器	X_{13}	[10,25)	[25,50)	[50,75)	[75,95)	0	100	60
操作系统 功能	内操作盘功能	X_{14}	[35,50)	[50,75)	[75,85)	[85,95)	0	100	80
	外操作盘功能	X_{15}	[35,50)	[50,75)	[75,85)	[85,95)	0	100	85
	仪表与线路	X_{16}	[35,50)	[50,75)	[75,85)	[85,95)	0	100	75

表 4 分类指标灰类白化权函数值

序号	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}	X_{11}	X_{12}	X_{13}	X_{14}	X_{15}	X_{16}
$f_j^1(x)$	9.7	9.8	8.5	9.2	0	2.3	0	5.3	0	0	2.7	1.3	0	0	0	0
$f_j^2(x)$	6.3	5.3	4.2	8.2	6.6	5.2	4.3	7.2	2.7	3.8	6.3	8.5	5.3	0	0	0
$f_j^3(x)$	1.3	0	2.1	5.4	2.7	2.9	3.3	7.5	0.5	9.3	4.4	2.6	4.8	5.2	3.1	
$f_j^4(x)$	0	0	0	0	1.3	0	7.4	0	3.9	3.8	0	0	0	4.3	8.5	6.2

表 5 综合聚类系数 δ^k

聚类系数	行进系统	发电系统	电力控制 系统	操作系统	综合指数
重损 δ_1^k	22.5679	2.2358	8.2581	0	33.0681
中损 δ_2^k	4.9830	24.7341	10.5761	0	55.2932
轻损 δ_3^k	2.1382	10.5262	3.3204	7.5382	23.5230
完好 δ_4^k	0	0	0	12.6702	12.6702

4 结果分析

4.1 定权评估结果

由于 $\max\{\delta_i^k\} = \delta^3 = 52.2932$ ，评价对象电源车功能损伤状态为“中损”类，并接近于重损。从一级指标来看，行进系统损伤程度较重，因此该电源车的机动性受到较大影响；发电系统和电力控制系统的损伤程度较低，因此该装备仍可担负应急作战保障的任务；操作系统倾向于完好状态，因此装备操作受影响程度较低。

4.2 指标权重变化对结果的影响

在面向不同的任务之时，指标权重会随之发生变化。例如，在担负转场保障任务时，电源车行进系统的重要度将会上升，其他功能重要度会相对下降。一级指标中，行进系统功能与发电系统功能权

重值最高, 该两项指标权重变化对评估结果造成的影响最为显著。因此以 μ_1 与 μ_2 为例进行灵敏度分析。 $\omega_{\mu_1} + \omega_{\mu_2} = 0.580$, 联立式(2), (3)求得边际指标权重为:

$$\omega_{\mu_1} = 0.475, \quad \omega_{\mu_2} = 0.105$$

当指标 μ_1 与 μ_2 的权重变化达到 $\omega_{\mu_1} > 0.475$, $\omega_{\mu_2} < 0.105$ 范围时, 评估结果发生变化。此时 $\max\{\delta_i^k\} = \delta_i^1$, 评价对象聚类属于重损类, 表明在该装备不能承担转场保障任务, 需进行相应的应急抢修。该结果显示了不同任务指向下, 指标权重的变化对评估结果产生的影响。

5 结语

文中提出的基于 FAHP 与灰色聚类法的电源车功能损伤状态评估方法, 能够最大限度地利用有效信息, 对电源车功能损伤状态进行科学、合理和全面的评估。为电源车的功能损伤状态评估提供了理论基础和方法依据, 同时也为装备战损评估的研究提供了新思路。下一步应重点研究评估初始数据信息的来源问题, 以及指标体系的扩展与优化。

参考文献:

- [1] 王广彦, 胡起伟. 装备战斗损伤组合建模技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014.
- [2] 张洋铭, 韩固勇, 罗广旭, 等. 基于 DMEA 的航空地面电源车战场损伤研究[J]. 装备环境工程, 2013, 10(4): 126-130.
- [3] 王润生, 贾希胜. 基于损伤树模型的战场损伤评估研究[J]. 兵工学报, 2005, 26(1): 72-76.
- [4] 许伟, 曾凡明, 刘金林. 基于知识库的舰船应急抢修决策支持系统研究[J]. 中国修船, 2012, 25(4): 43-47.
- [5] 金众, 胡云安, 张瑾. 基于贝叶斯网络的某机载雷达电磁损伤评估[J]. 北京理工大学学报, 2012, 32(9): 960-965.
- [6] 陈健, 李忠民, 王永明. 基于贝叶斯网络的装备部件战斗损伤评估模型[J]. 系统工程与电子技术, 2007, 29(2): 329-334.
- [7] 陈晓洪, 刘川, 浦金云. 舰艇系统损伤等级模糊神经网络评估模型[J]. 海军工程大学学报, 2009, 21(3): 84-88.
- [8] 潘洪平, 陈素文, 邢彪. 基于 AHP 和幂指数法的装甲装备功能状态评估[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(8): 69-73.
- [9] 陈素文. 装甲装备群功能损伤评估方法研究[D]. 北京: 装甲兵工程学院, 2013.
- [10] 陈健, 王永明, 赵革, 等. 多目标群体决策的武器装备战斗损伤评估模型[J]. 火力与指挥控制, 2008, 33(增刊): 45-50.
- [11] 李军, 戚英华. 基于多目标多维模糊决策的装备战场损伤等级评定方法[J]. 装甲兵工程学院学报, 2009, 23(3): 20-25.
- [12] 石全, 米双山, 王广彦, 胡起伟. 装备战伤理论与技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.
- [13] 王双川, 吕瑞强, 李德权, 等. 基于三角白化权函数的装备维修合同商服务质量评估[J]. 装甲兵工程学院学报, 2016, 30(5): 20-24.
- [14] 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. 评估理论和方法及其军事应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2013.
- [15] 翟兴丽, 文福拴, 林振智, 等. 基于模糊层次分析法的电能质量综合评估与灵敏度分析[J]. 华北电力大学学报, 2013, 40(5): 48-53.
- [16] 蔡艳军. 灰色层次分析法战术通信网抗干扰效能评估[J]. 火力与指挥控制, 2012(6): 106-108.