

基于集对分析的飞机战伤抢修性评价模型*

Evaluation Model of Aircraft Battle Damage Repair Capability Based on SPA

东北大学机械工程及自动化学院 张均勇 闻邦椿
中国人民解放军炮兵学院机械工程教研室 张登霞
中国人民解放军93115部队 吴林 李武奇

[摘要] 分析了飞机战伤抢修性的影响因素,建立了战伤抢修性评价指标体系。以集对分析的同异反联系度为基础,构造了飞机战伤抢修性评价模型,进行了深入探讨。最后,通过实例计算表明了该评价模型的可行性和有效性。

关键词: 飞机战伤抢修性 指标体系 集对分析

[ABSTRACT] The factors that effect on aircraft battle damage repair capability are analyzed, and an index system is built for repair capability evaluation. The evaluation model of aircraft battle damage repair capability based on identical discrepancy contrary(IDC)of set pair analysis(SPA) is established. At last,the practical calculation shows the evaluation model is feasible and effective.

Keywords: Aircraft battle damage repair capability Index system Set pair analysis

飞机战伤评估与修理(Aircraft Battle Damage Assessment and Repair, ABDAR)也称为“飞机战伤抢修”,指的是战时在前线环境下,通过有效地使用一切可以利用的维修资源,在有限的时间内对战伤飞机进行评估,并施以标准修理和非标准的应急修理,使之恢复到具有一定程度执行下次任务或自救的能力^[1]。

战伤抢修性是除可靠性、维修性、安全性之外的军用飞机的一种新特性,它体现了战伤飞机通过维修能够恢复使用功能的能力的大小。研究飞机的作战生存力,提高飞机生存力设计,势必要对飞机战伤抢修性做出评价。目前,国外常用的飞机战伤抢修性评价方法主要有模型试验、实弹试验和建立在实战及试验基础上的计算机仿真等。由于这些方法的成本太高、风险较大,而且影响飞机战伤抢修性的因素很多,通常情况下只能进行笼统的比较,难以满足研究需要。国内常用的飞机战伤抢修性评价方法主要有层次分析法、模糊综合评价法和

灰色综合评价法等^[2]。层次分析法确定评价因素的主观性强,计算结果的精度难以保证;模糊综合评价法的核心是建立隶属函数而模糊隶属度的确定带有很强的主观性和随意性,操作难度较大;灰色综合评价法运算简便,但当涉及到多个评语等级时计算量较大。在此,提出利用集对分析方法对影响飞机战伤抢修性的相关因素进行量化描述,构造飞机战伤抢修性评价模型,并运用该模型进行实例分析,对飞机战伤抢修性做出了综合评价。该模型的应用,为评价飞机战伤抢修性提供了一种新的途径。

1 集对分析思想

1.1 集对分析简介

集对分析^[3](Set Pair Analysis, SPA)是赵克勤在1989年包头召开的全国系统理论会议上提出的一种新的系统分析方法。它从同、异、反三个方面研究两个事物的确定性与不确定性,全面描述了两个不同事物的联系。可以用一个能充分体现上述思想的联系度 μ 来统一地描述模糊、随机、中介和信息不完全所致的各种不确定性,从而把对不确定性的辩证认识转换成一个具体的数学工具。联系度 μ 的表达式为:

$$\mu = a + bi + cj \quad (1)$$

其中, a 表示两个事物的同一程度,称为同一度; b 表示两个事物差异的不确定程度,称为差异度; c 表示两个事物的对立程度,称为对立度。 i 为差异标记符号或相应系数,取值于 $[-1, 1]$; j 为对立标记符号或相应系数,规定取值为 -1 。根据定义, a 、 b 、 c 满足归一化条件 $a + b + c = 1$ 。

这种刻画是对确定性与不确定性的定量描述,其中 a 、 c 是相对确定的,而 b 是相对不确定的。这种相对性是由于客观对象的复杂性和可变性以及客观对象认识与刻划的主观性和模糊性造成的不确定性。因而式(1)是一种确定不确定结构函数,它体现了确定不确定系统的对立统一关系,具有较深刻的方法论意义。

1.2 集对分析的基本思路

* 军队预研基金资助项目。

在一定的背景(W)下,将集合 A 和集合 B 组成集对 H , 然后对集对 H 的某一特性展开分析, 对集对 H 在该特性上的联系进行分类定量刻画。通常, 用 N 表示所论值域内的总特性个数, 把具有相同特性的记为同联系(设有 S 个), 而把具有相反特性的记为反联系(设有 P 个), 其余的特性既不同一, 又不对立, 称为差异联系(共有 $F=N-S-P$ 个)。由此建立起两个集合在指定问题背景下的同异反联系度表达式: $\mu=S/N+F/N_i+P/N_j$ (令 $S/N=a, F/N=b, P/N=c$, 于是 μ 可简记为 $\mu=a+bi+cj$), 在此基础上开展进一步研究。当一个系统由 $m>2$ 个集合组成时, 可以根据问题的要求, 把 m 个集合作成 n 个集对, 分别建立起每个集对的同异反联系度表达式, 借助一定的数学建模和运算, 推导出整个系统的同异反联系式, 由此去深入研究系统的有关问题。

2 飞机战伤抢修性集对分析评价模型的构建

2.1 构建原始评价指标初始矩阵

假设飞机战伤抢修性待评价的方案集为 $E=\{E_1, E_2, \dots, E_m\}$, 影响因素指标集为 $I=\{I_1, I_2, \dots, I_n\}$, 矩阵 $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 表示评价指标初始矩阵, 即

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{m1} & \dots & a_{mn} \end{bmatrix},$$

其中, a_{ij} 表示第 i 种抢修性方案的第 j 种指标量化值。

2.2 指标规范化处理

将影响飞机战伤抢修性的各主要因素作为评价指标, 由于各指标间物理量纲互不相同, 因此, 为了消除量纲和量纲单位不同所带来的不可公度性, 首先需要对各种指标进行无量纲化处理。无量纲化处理的方法很多, 从强调被分析对象之间的差异表现得越明显越好为基本原则, 本文采用均值化处理方法:

$$x_{ij} = \frac{a_{ij}}{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m a_{ij}} \quad (2)$$

因此对原始评价指标初始矩阵进行无量纲化处理, 结果是

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix},$$

其中, $i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$ 。

2.3 确定指标权重集

指标权重一般可以通过专家打分的方式获得, 鉴于所考察的指标因素间彼此相关性小或不相关, 可采用熵值法确定各因素的权值。用直线型归一化比重法对规

范化的决策矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 进行归一化处理:

$$p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (3)$$

得到标准化特征矩阵 $P=(P_{ij})_{m \times n}$, 且 $0 \leq P_{ij} \leq 1$, 则第 j 项评价指标的熵值

$$H_j = \begin{cases} -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \ln p_{ij}, & 0 < p_{ij} \leq 1 \\ 0, & p_{ij} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中, k 为正数, 通常取 $k=1/\ln m$, m 表示被评价对象的个数。

第 j 项指标的差异系数:

$$G_j = 1 - H_j \quad (5)$$

则第 j 项指标的熵权

$$W_j = G_j / \left(\sum_{j=1}^n G_j \right) \quad (6)$$

得到基于熵权的评价指标权值向量

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \quad \circ$$

2.4 确定理想方案和负理想方案

设理想方案为 $B^+ = \{b_1^+, b_2^+, \dots, b_n^+\}$, 负理想方案为 $B^- = \{b_1^-, b_2^-, \dots, b_n^-\}$ 。这里, b_{j+}, b_{j-} 分别为理想方案 B^+ 和负理想方案 B^- 关于第 j 个指标 I_j 的属性值 ($j=1, 2, \dots, n$)。

根据系统目标, B^+ 和 B^- 中元素的选取需考虑到不同的指标类型。

对于效益型指标(越大越好):

$$b_j^+ = \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij}, \quad b_j^- = \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij} \quad \circ \quad (7)$$

对于成本型指标(越小越好):

$$b_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} x_{ij}, \quad b_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} x_{ij} \quad \circ \quad (8)$$

对于固定型指标(设 D 为最优值, 越接近 D 越好):

$$b_j^+ = \min_{1 \leq i \leq m} |x_{ij} - D|, \quad b_j^- = \max_{1 \leq i \leq m} |x_{ij} - D| \quad \circ \quad (9)$$

2.5 构造集对 (x_{ij}, b_j^+) 的联系度

评估矩阵中的每一个元素 ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 都可与其相应的 b_j^+ 组成一个集对, 即集对 (x_{ij}, b_j^+) , 设其联系度表达式为 $(x_{ij}, b_j^+) = a_{ij} + b_{ij}i + c_{ij}j$ 。其中, 同一度 a_{ij} 、差异度 b_{ij} 、对立度 c_{ij} 的定义如下:

对于效益型指标:

$$a_{ij} = \frac{x_{ij}}{b_j^+ + b_j^-} \quad (10)$$

$$c_{ij} = \frac{(x_{ij})^{-1}}{(b_j^+)^{-1} + (b_j^-)^{-1}} \quad (11)$$

对于成本型指标:

$$a_{ij} = \frac{(x_{ij})^{-1}}{(b_j^+)^{-1} + (b_j^-)^{-1}}, \quad (12)$$

$$c_{ij} = \frac{x_{ij}}{b_j^+ + b_j^-}。 \quad (13)$$

对于固定型指标 (设 D 为最优值):

$$a_{ij} = \frac{|x_{ij} - D|^{-1}}{(b_j^+)^{-1} + (b_j^-)^{-1}}, \quad (14)$$

$$c_{ij} = \frac{|x_{ij} - D|}{b_j^+ + b_j^-}。 \quad (15)$$

由于 a_{ij} 、 b_{ij} 、 c_{ij} 满足归一化条件,则有:

$$b_{ij} = 1 - a_{ij} - c_{ij}。 \quad (16)$$

2.6 计算集对 (E_i, B^+) 的联系度

第 i 个方案 E_i 与理想方案 B^+ 组成集对 (E_i, B^+) , $i=1, 2, \dots, m$, 其同一度、差异度、对立度分别用 a_i 、 b_i 、 c_i 表示。考虑到各指标的权重影响,可得:

$$a_i = \sum_{j=1}^n w_j a_{ij}, \quad (17)$$

$$c_i = \sum_{j=1}^n w_j c_{ij}, \quad (18)$$

由于 a_i 、 b_i 、 c_i 满足归一化条件,则有:

$$b_i = 1 - a_i - c_i, \quad (19)$$

即集对 (E_i, B^+) 的联系度表达式为

$$u(E_i, B^+) = a_i + b_i + c_i j。 \quad (20)$$

2.7 方案的优劣排序

通过上面的计算,得到了各方案与理想方案之间的同一度、差异度和对立度,在此基础上就可以依据一定的原则对方案的优劣进行分析和评价。同一度和对立度反映了被评价方案与理想方案的接近程度,同一度越大或者对立度越小,说明方案越优;而差异度则反映了系统内的不确定性,可以根据不同的应用背景,对 i 的取值展开进一步的讨论。本文选取 $r_i = \frac{a_i}{a_i + c_i}$ 作为方案的评价系数^[4],可见 r_i 的值越大,方案越优。

3 飞机战伤抢修性评价因素

影响飞机战伤抢修性的因素主要表现在战伤飞机的固有属性、外部配套抢修资源和环境因素 3 个方面,主要评价因素的层次结构如表 1 所示。

表1 飞机战伤抢修性的评价因素

飞机战伤抢修性	第 1 层	第 2 层
	战伤飞机属性	战伤可达性 战伤可测性 战伤结构模块化程度 战伤结构的互换性 战伤结构关键件的余度
	配套抢修资源	战伤抢修人力资源 战伤抢修工具 战伤抢修备件储备
	环境因素	工作环境 自然环境

4 飞机战伤抢修性评价

4.1 原始评价指标初始矩阵数据的获得

飞机战伤抢修性评价方案的初始数据可以通过飞机设计师或战伤抢修专家综合衡量打分的方式得出,也可通过采用合理方法估算得出。例如:衡量飞机可达性的具体指标是飞机的开敞率,即飞机表面可打开窗口盖和维护口盖面积总和占飞机表面积百分比。战伤可测性指标是通过获得可采用原位检测的结构数量占结构总数的百分比确定。飞机结构的模块化程度可以通过估算已采用的模块化结构件数量与可以采用模块化的结构件数量的比值进行赋值等^[2]。然后将各方案间的原始数据进行横向比较并做出进一步修正。通过对飞机战伤抢修性各影响因素的定性分析和量化处理,可得到反映飞机战伤抢修性的指标量本身的性质,还兼顾了各方案间该指标的优劣顺序。

4.2 实例分析

现给出 5 组不同飞机战伤抢修性待评方案的初始参考数据如表 2 所示。

表2 战伤抢修性待评方案初始数据

战伤抢修指标	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5
战伤可达性	0.4400	0.6200	0.5700	0.3400	0.7600
战伤可测性	0.5600	0.7870	0.5790	0.8160	0.5800
战伤结构模块化程度	0.6300	0.3200	0.5500	0.5200	0.4400
战伤结构的互换性	0.8290	0.7170	0.9610	0.6640	0.6340
战伤结构关键件余度	0.4700	0.6800	0.7300	0.3500	0.6000
战伤抢修人力资源	0.2560	0.9700	0.5160	0.8200	0.7810
战伤抢修工具	0.7400	0.6700	0.7900	0.3500	0.5700
战伤抢修备件储备	0.5320	0.3700	0.6810	0.6290	0.8810
工作环境	0.5400	0.6600	0.4300	0.6500	0.5600
自然环境	0.7940	0.3610	0.7940	0.3560	0.4500

则原始评价指标初始矩阵 A 为:

$$A = \begin{bmatrix} 0.4400 & 0.5600 & 0.6300 & 0.8290 & 0.4700 & 0.2560 & 0.7400 & 0.5320 & 0.5400 & 0.7940 \\ 0.6200 & 0.7870 & 0.3200 & 0.7170 & 0.6800 & 0.9700 & 0.6700 & 0.3700 & 0.6600 & 0.3610 \\ 0.5700 & 0.5790 & 0.5500 & 0.9610 & 0.7300 & 0.5160 & 0.7900 & 0.6810 & 0.4300 & 0.7940 \\ 0.3400 & 0.8160 & 0.5200 & 0.6640 & 0.3500 & 0.8200 & 0.3500 & 0.6290 & 0.6500 & 0.3560 \\ 0.7600 & 0.5800 & 0.4400 & 0.6340 & 0.6000 & 0.7810 & 0.5700 & 0.8810 & 0.5600 & 0.4500 \end{bmatrix}$$

根据公式(2)对原始评价指标初始矩阵进行无量纲化处理,可得:

$$X = \begin{bmatrix} 0.8059 & 0.8429 & 1.2805 & 1.0894 & 0.8304 & 0.3829 & 1.1859 & 0.8600 & 0.9507 & 1.4410 \\ 1.1355 & 1.1845 & 0.6504 & 0.9422 & 1.2014 & 1.4508 & 1.0737 & 0.5981 & 1.1620 & 0.6552 \\ 1.0440 & 0.8715 & 1.1179 & 1.2628 & 1.2898 & 0.7718 & 1.2660 & 1.1009 & 0.7570 & 1.4410 \\ 0.6227 & 1.2282 & 1.0569 & 0.8725 & 0.6184 & 1.2264 & 0.5609 & 1.0168 & 1.1444 & 0.6461 \\ 1.3919 & 0.8730 & 0.8943 & 0.8331 & 1.0601 & 1.1681 & 0.9135 & 1.4242 & 0.9859 & 0.8167 \end{bmatrix}$$

上面所述的各指标对于战伤抢修性来说都属于效益型指标,因此根据公式(7)可得:理想方案 $B^+ = \{1.3919, 1.2282, 1.2805, 1.2628, 1.2898, 1.4508, 1.2660, 1.4242, 1.16$

$20, 1.4410\}$, 负理想方案为 $B^- = \{0.6227, 0.8429, 0.6504, 0.8331, 0.6184, 0.3829, 0.5609, 0.5981, 0.7570, 0.6461\}$ 。

据式(3)对 X 归一化处理,得标准化特征矩阵 P :

$$P = \begin{bmatrix} 0.1612 & 0.1686 & 0.2561 & 0.2179 & 0.1661 & 0.0766 & 0.2372 & 0.1720 & 0.1901 & 0.2882 \\ 0.2271 & 0.2369 & 0.1301 & 0.1884 & 0.2403 & 0.2902 & 0.2147 & 0.1196 & 0.2324 & 0.1310 \\ 0.2088 & 0.1743 & 0.2236 & 0.2526 & 0.2580 & 0.1544 & 0.2532 & 0.2202 & 0.1514 & 0.2882 \\ 0.1245 & 0.2456 & 0.2114 & 0.1745 & 0.1237 & 0.2453 & 0.1122 & 0.2034 & 0.2289 & 0.1292 \\ 0.2784 & 0.1746 & 0.1789 & 0.1666 & 0.2120 & 0.2336 & 0.1827 & 0.2848 & 0.1972 & 0.1633 \end{bmatrix}$$

根据式(4),可得评价指标熵值:

$$H = [0.9775 \ 0.9912 \ 0.9851 \ 0.9924 \ 0.9802 \ 0.9498 \ 0.9788 \ 0.9764 \ 0.9930 \ 0.9590];$$

根据公式(5)和公式(6),可计算出评价指标的权重向量:

$$W = [0.1039 \ 0.0406 \ 0.0688 \ 0.0351 \ 0.0914 \ 0.2318 \ 0.0979 \ 0.1090 \ 0.0323 \ 0.1892]$$

根据公式(10)和(11),可计算出所有集对 (x_{ij}, b_j^+) , (其中, $i=1,2,\dots,5; j=1,2,\dots,10$),联系度中的同一度矩阵 a 、对立度矩阵 c 可以表示如下:

$$a = \begin{bmatrix} 0.4000 & 0.4070 & 0.6632 & 0.5198 & 0.4352 & 0.2088 & 0.6491 & 0.4253 & 0.4954 & 0.6904 \\ 0.5636 & 0.5719 & 0.3368 & 0.4495 & 0.6296 & 0.7912 & 0.5877 & 0.2958 & 0.6055 & 0.3139 \\ 0.5182 & 0.4208 & 0.5790 & 0.6025 & 0.6759 & 0.4209 & 0.6930 & 0.5444 & 0.3945 & 0.6904 \\ 0.3091 & 0.5930 & 0.5474 & 0.4163 & 0.3241 & 0.6688 & 0.3070 & 0.5028 & 0.5964 & 0.3096 \\ 0.6909 & 0.4215 & 0.4632 & 0.3975 & 0.5555 & 0.6370 & 0.5000 & 0.7043 & 0.5138 & 0.3913 \end{bmatrix}$$

$$c = \begin{bmatrix} 0.5338 & 0.5930 & 0.3368 & 0.4608 & 0.5034 & 0.7912 & 0.3278 & 0.4898 & 0.4821 & 0.3096 \\ 0.3789 & 0.4220 & 0.6632 & 0.5328 & 0.3479 & 0.2088 & 0.3620 & 0.7043 & 0.3945 & 0.6808 \\ 0.4121 & 0.5736 & 0.3858 & 0.3975 & 0.3241 & 0.3925 & 0.3070 & 0.3826 & 0.6055 & 0.3096 \\ 0.6909 & 0.4070 & 0.4081 & 0.5753 & 0.6759 & 0.2470 & 0.6930 & 0.4143 & 0.4005 & 0.6904 \\ 0.3091 & 0.5726 & 0.4823 & 0.6025 & 0.3943 & 0.2594 & 0.4255 & 0.2958 & 0.4649 & 0.5462 \end{bmatrix}$$

表3 集对联系度值

待评方案	联系度 (E_i, B^+)	同一度 a_i	差异度 b_i	对立度 c_i	评估系数 r_i
E_1	$0.4667+0.0254i+0.5079j$	0.4667	0.0254	0.5079	0.4789
E_2	$0.5304+0.0148i+0.4548j$	0.5304	0.0148	0.4548	0.5384
E_3	$0.5618+0.0611i+0.3771j$	0.5618	0.0611	0.3771	0.5984
E_4	$0.4558+0.0320i+0.5122j$	0.4558	0.0320	0.5122	0.4709
E_5	$0.5495+0.0524+0.3981j$	0.5495	0.0524	0.3981	0.5799

根据式(17)~(20),可计算出各方案与理想方案所组成集对 (E_i, B^+) (其中, $i=1,2,\dots,5$) 的联系度以及各方案的评估系数,如表3所示。

根据“评估系数 r_i 的值越大,方案越优”的评价准则,从表3可以得出,上述方案反映的飞机战伤抢修性由优到劣的次序为:方案3,方案5,方案2,方案1,方案4。

(下转第96页)

样本的指标值与其对应的刀具期望寿命值同样采用文献[5]中的数据。

表3中序号1~10是模型对样本数据集的训练结果,经训练得到的模型预测准确度达93%,样本最大误差率仅为6.31%,刀具寿命预定精度值为0.07,此模型训练的结果满足精度要求。表3中序号11~15是模型对样本测试集进行计算的结果,经计算得到的模型分类准确度达94%,样本最大误差率为5.74%。测试证明,由本模型计算得到刀具的使用寿命值与刀具期望寿命值基本吻合,预测与寿命期望值基本吻合。

表3 刀具寿命预测情况

序号	期望寿命/min	预测寿命/min	误差/%
1	200	193.42	-3.29
2	220	208.79	-5.10
3	240	250.67	-4.45
4	180	189.56	5.31
5	210	199.17	-5.16
6	230	219.46	4.59
7	160	170.09	6.31
8	180	186.89	3.83
9	200	213.68	6.84
10	120	115.95	-3.38
11	150	158.34	5.56
12	160	153.67	-3.95
13	120	126.89	5.74
14	140	147.63	5.45
15	180	185.23	2.91

利用BP神经网络模型的高度非线性的映射能力及其极强的自适应能力,可以非常精确地根据刀具寿命的影响因素预测出刀具的实际使用寿命。结合已有的刀具寿命试验和车间实际切削参数数据,并运用BP神经网络模型,为刀具寿命预测提供了一种行之有效的方法。另外,在预测模型的整个计算过程中排除了主观因素,因此计算结果更加客观,而且更加科学,更加接近实际状况。

4 结束语

本课题应用人工神经网络技术建立了刀具寿命预估模型,该模型计算得出的刀具预估寿命基本与期望寿

命吻合,表明运用人工神经网络模型预测刀具使用寿命的方法是有效的、可行的。这种寿命预估模型利用有限的纷杂的数据,得到了满足精度要求的寿命预估值,能较好地帮助车间工作人员准确判断刀具的即时状况,在刀具完全破损之前强制进行报废。由于预测模型的输入层指标值的数据来源于文献,文献中很难囊括全部的实时指标值信息,所以预测模型在实际应用方面有一定的局限性。今后应把研究的重点转向如何通过在线监测获得实时的指标值。

参考文献

[1] 韩荣第,周明,孙玉洁,等.金属切削原理与刀具.哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1988.
 [2] 张立明.神经网络及其应用.上海:复旦大学出版社,1993.
 [3] 焦李成.神经网络系统理论.西安:西安电子科技大学出版社,1990.
 [4] 杨坤怡.制造技术.北京:国防工业出版社,2007.
 [5] 陈宏钧.金属切削速查速算手册.北京:机械工业出版社,2003.

(责编 阳光)

(上接第92页)

5 结论

(1) 本文采用集对分析方法将方案决策中的定性问题量化,通过建立评判模型和实例计算,对飞机战伤抢修性进行综合分析,得到满意的结果,为评价飞机战伤抢修性提供了一种新途径。相比其他方法,该方法具有思路清晰、计算简明、快速便捷、可信度高等特点。同时,这种评价模型综合了待评价方案与理想方案在同、异、反三方面的联系,因而它对方案的评价较其他方法更加全面和客观。

(2) 该评价方法的应用,对于确定飞机战伤抢修性方案和提高飞机抢修性设计都具有很好的指导作用。

(3) 本课题就集对分析在飞机战伤抢修性评价中的应用做了一点探索,作为一种新的评价方法,仍然有许多地方有待深入研究,比如:考虑的影响因素更多,则精度会更高,决策也会更准确。

参考文献

[1] 张建华.飞机战伤抢修工程学.航空工业出版社,2001.6
 [2] 侯满义,李曙林.一种军用飞机战伤抢修性评价体系.航空维修与工程,2006,(2):27-29.
 [3] 赵克勤.集对分析及其初步应用.杭州:浙江科学技术出版社,2000.
 [4] 张斌.集对分析与多属性决策.农业系统科学与综合研究,2004,20(2):123-125.

(责编 侧卫)