

航空救生系统实战效能评估

Operational Effectiveness Evaluation of Aeronautic Rescue System

王耀华¹ 高清振^{1,2} 王云峰¹ 张晓南¹

1 解放军理工大学工程兵工程学院 2 中国人民解放军94655部队

摘要:依据航空救生系统的战术技术指标,建立了航空救生系统的评价体系。运用灰色层次分析法和串并联系系统理论,对ADC模型及其扩展模型进行修正,结合实例进行分析计算,给出了修正扩展模型下航空救生系统的效能,更有效地反映出救生系统的全面综合实战能力,给决策者提供可靠的理论依据。

关键词:航空救生系统;ADC扩展模型;灰色综合评价;效能评估

Keywords: aeronautic rescue system; extending ADC model; grey comprehensive evaluation; effectiveness evaluation

0 引言

航空救生系统在现代空战中发挥着越来越重要的作用,现有航空装备中如战斗机座舱盖抛盖系统、弹射座椅系统以及运输机的应急逃生系统都属于航空救生系统^[1],其作用是在紧急情况下,为了机组人员的生命安全,迅速触发并完成预定的功能。对救生系统的作战效能进行定量分析,可为制定相应的战术原则提供可靠的理论依据。如何有效评估救生系统的作战效能已成为挽救作战人员生命、保存战斗力的重要研究内容^[2]。

武器系统效能评估的方法较多,本文以美国工业界武器效能咨询委员会(WSEIAC)提出的ADC模型为基础,运用经修正的ADC扩展模型来评判救生系统的优劣程度,并对某型飞机救生系统的作战效能进行具体计算。

1 ADC扩展模型的修正

1.1 ADC模型

不同的军事装备系统可以用不

同的方法定义其效能。根据WSEIAC的定义^[3],系统效能是预期一个系统能满足一组特定任务要求程度的度量,是系统的有效性、可信性和能力的函数。其表达式为 $E=A \cdot D \cdot C$,其中, A (availability)=[$A_1, A_2, \dots, A_n$],为系统的有效性行向量,表示系统在开始执行任务瞬间处于不同状态的概率, A_i 为开始执行任务时处于 i 状态的概率; D (dependability)=[$D_{i,j}$] $_{n \times n}$,为系统的可靠性矩阵, $D_{i,j}$ 表示系统在执行任务时处于第 i 种状态,而在执行任务的过程中处于第 j 种状态的概率; C (capability)=[$C_{j,k}$] $_{n \times m}$,为系统的能力矩阵, $C_{j,k}$ 表示系统执行任务过程中处于第 j 种状态、第 k 品质因素的号码。

1.2 ADC模型的扩展

文献[4]中将ADC模型扩展为 $E=qAKDQC$ 。根据航空救生系统的特点,重新定义扩展模型中参数的意义,其中, $K=k_j(i, j=1, 2, \dots, n)$ 为考虑人的因素模块, k_{ij} 表示系统在维修或维护前处于第 i 种状

态,经专业人员维修后处于第 j 种状态。

q 表示救生系统在未损毁条件下发射的概率, $q=P_{\text{触发}}+(1-P_{\text{触发}})(1-P_{\text{破坏}}P_{\text{损伤}})$ 。其中, $P_{\text{触发}}$ 表示破坏危险发生之前触发的概率; $P_{\text{损伤}}$ 表示救生系统所属平台(机体)遭受损伤的概率; $P_{\text{破坏}}$ 表示破坏的条件杀伤概率。

Q 为对抗模块,表示救生系统在工作过程中抵抗外界破坏的能力。 $Q=g_{ij}(i, j=1, 2, \dots, n)$, g_{ij} 表示触发成功后,对抗前处于 i 状态,经对抗后处于 j 状态的概率。

1.3 扩展模型的修正

扩展模型比基础模型增加了破坏影响因素、对抗模块和人的因素模块,它更能反映实战水平。但经典模型中,模块 D 和 C 的计算过于简单化,实际因素考虑的不够;人的因素模块也应考虑实战条件^[5]。针对某型飞机救生系统,依据扩展模型对人的因素模块 K 进行修正,运用串并联系系统理论细化模块 D ,根据灰色层次分析法计算模块 C 。

2 修正扩展模型的计算

2.1 人的因素模块K

人的素质和使用水平对救生系统的性能有着极大的影响。对救生系统而言,一旦所属平台升空作战后便不可维修。因此,将此模块修正为 $K=k_1k_2k_3$,其中 k_1 、 k_2 和 k_3 分别表示飞行员操控飞机适应救生系统进行救生的素质、水平和能力系数,其数值小于1。根据资料得到某型飞机救生系统 $K=0.94$ 。

2.2 可靠性矩阵D

某型飞机救生系统由启动装置、传导系统、发射系统构成^[6],结构框图如图1所示。

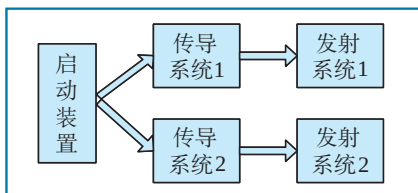


图1 救生系统结构框图

该型救生系统为串、并联混合系统,各分系统的寿命服从指数分布^[7],其可靠度 $R(t) = e^{-\frac{t}{MTBF}}$,将各分系统的平均故障间隔时间代入后,得到启动装置的可靠度 $R_{启动}(t) = e^{-\frac{t}{500}}$,传导系统的可靠度为 $R_{传导}(t) = e^{-\frac{t}{600}}$,发射系统的可靠度 $R_{发射}(t) = e^{-\frac{t}{150}}$ 。当 $t=1\text{h}$ 时,由串并联系统理论^[8]可得两套发射系统及相应的传导系统构成的并联分系统的可靠度:

$R_{发射传导} = R_{发射}R_{传导} + 2R_{发射}R_{传导} - R_{发射}^2R_{传导}^2 = 0.9999$;串联系统的可靠度是各分系统可靠度的乘积,即 $d_{11} = R_{发射传导}R_{启动} = 0.9979$,从而 $d_{12} = 1 - d_{11} = 0.0021$;又由于救生系统在执行任务的过程中是不可修复的,所以, $d_{21} = 0, d_{22} = 1$ 。因此,

$$D = \begin{bmatrix} 0.9979 & 0.0021 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

2.3 能力矩阵C

能力矩阵是系统性能的集中体现,也是求解效能的关键所在。对一个复杂的武器系统的能力进行测定和预测是较为困难的,本文采取用灰色综合评价结合层次分析法来度量某型救生系统的能力矩阵。

1) 能力矩阵多层次灰色评价及评价样本矩阵

定量指标可以直接评定其优劣性,定性指标则要转化成定量指标才能评定。可通过评价指标的评分等级标准来实现转化,指标评分标准见表1,其中 f 为评分值。

表1 评分标准

分值	$8 \leq f < 10$	$6 \leq f < 8$	$4 \leq f < 6$	$f < 4$
指标	优	良	中	差

设 U 为一级评价指标 u_i 组成的集合,即 $U = (u_1, u_2, \dots, u_n)$, u_i 为二级指标按评价指标 u_{ij} 组成的集合,即 $u_{ij} = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{im})$,利用层次分析法原理可以确定各指标的权重。体系结构进行评价时,设有 $K=1, 2, \dots, p$ 个专家分别对所有受评对象按上述的等级评分标准进行评分,得分 c_{ijk} 组成的评价样本矩阵:

$$C = \begin{bmatrix} c_{111} & c_{112} & \dots & c_{11p} \\ c_{121} & c_{122} & \dots & c_{12p} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ c_{ij1} & c_{ij2} & \dots & c_{ijp} \end{bmatrix}。$$

2) 评价灰类的确定及灰色评价矩阵的计算

确定评价灰类($e=1, 2, \dots, g$),即要确定评价灰类的等级数、灰数与白化权函数,此处采用如下的灰类和白化权函数^[9]。灰数表示统计指标 c_{ijk} 对应的等级,灰数中的数值分别表示评分可能分布的区间,中间的数值表示属于该灰类的

最佳评分值。

第一灰类“优”($e=1$),灰数 $h_1 \in [0, 8, +\infty]$,白化权函数为 f_1 ,

$$f_1(c_{ijk}) = \begin{cases} c_{ijk}/8, & c_{ijk} \in [0, 8] \\ 1, & c_{ijk} \in [8, +\infty] \\ 0, & c_{ijk} \notin [0, +\infty] \end{cases}$$

第二灰类“良”($e=2$),灰数 $h_2 \in [0, 8, 16]$,白化权函数为 f_2 ,

$$f_2(c_{ijk}) = \begin{cases} c_{ijk}/8, & c_{ijk} \in [0, 8] \\ 2 - c_{ijk}/8, & c_{ijk} \in [8, 16] \\ 0, & c_{ijk} \notin [0, 16] \end{cases}$$

第三灰类“中”($e=3$),灰数 $h_3 \in [0, 4, 8]$,白化权函数为 f_3 ,

$$f_3(c_{ijk}) = \begin{cases} c_{ijk}/4, & c_{ijk} \in [0, 4] \\ 2 - c_{ijk}/4, & c_{ijk} \in [4, 8] \\ 0, & c_{ijk} \notin [0, 8] \end{cases}$$

第四灰类“差”($e=4$),灰数 $h_4 \in [0, 2, 4]$,白化权函数为 f_4 ,

$$f_4(c_{ijk}) = \begin{cases} 1, & c_{ijk} \in [0, 2] \\ 2 - c_{ijk}/2, & c_{ijk} \in [2, 4] \\ 0, & c_{ijk} \notin [0, 4] \end{cases}$$

记 r_{ije} 为专家就评价指标 u_{ij} 属第 e 个灰类的灰色评价权,可得 u_i 所属指标 u_{ij} 对于各个评价灰类的灰色评价矩阵,

$$R_i = \begin{bmatrix} r_{i1} \\ r_{i2} \\ \vdots \\ r_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{i11} & r_{i12} & \dots & r_{i1g} \\ r_{i21} & r_{i22} & \dots & r_{i2g} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ r_{ij1} & r_{ij2} & \dots & r_{ijg} \end{bmatrix}$$

其中

$$r_{ije} = \frac{x_{ije}}{\sum_{e=1}^g x_{ije}}, \quad x_{ije} = \sum_{k=1}^p f_e(c_{ijk})。$$

3) 利用层次分析法(AHP)^[10]计算指标权重

层次分析法的基本方法与步骤如下。

- 明确问题,建立递阶层次结构。
- 两两比较,构造判断矩阵。

c. 依据判断矩阵,计算权重。本文以根法为例计算权重。

首先计算判断矩阵中每一行元素的乘积 $M_i = \prod_{j=1}^n a_{ij}$,

再计算 M_i 的 n 次方根 $\bar{w}_i = n\sqrt[n]{M_i}$,然后对 $\bar{w}_i$ 进行归一化处理得

$$w_i = \frac{\bar{w}_i}{\sum_{j=1}^n \bar{w}_j} \quad (i=1, 2, \dots, n).$$
由此得出向量 $w_i=(w_1, w_2, \dots, w_n)$

中的元素值即为该层次中各因素对于上一层次某准则的相对权重。

d. 一致性检验,具体计算过程参考文献^[11]。

4) 能力矩阵的灰色综合评价

先对 u_i 做二级综合评价,其结果为 $B_i = w_i R_i = (b_{i1}, b_{i2}, \dots, b_{ig})$,其中, w_i 表示 u_i 中各因素的权重,由层次 u_i 分析法得出。由此可得 u_i 对于各评价灰类的灰色矩阵 $R=(B_1, B_2, \dots, B_m)^T$ 。

同理对 U 作一级综合评价,结果为 $B=WR$,其中, W 表示 U 中各因素的权重。对各灰类等级按“灰水平”赋值,得各评价灰类的值化向量 $F=(f_1, f_2, \dots, f_g)$,则各受评者的能力综合评价值 $c_i=BF^T$ 。

通过对救生系统典型任务过程的分析,确定系统的能力可通过系统的救生能力、安全性、保障性和可靠性4个一级指标来评价。而各级指标又可用诸多二级指标来衡量,选取5个专家对该救生系统的指标按照评分标准进行评分,得到的评分可建立如表2的指标体系。以作功威力为例计算得:

$$\begin{cases} x_{111} = f_1(8) + f_1(9) + f_1(7) + f_1(8) + f_1(8) = 0.5326 \\ x_{112} = f_2(8) + f_2(9) + f_2(7) + f_2(8) + f_2(8) = 0.5326 \\ x_{113} = f_3(8) + f_3(9) + f_3(7) + f_3(8) + f_3(8) = 0.0647 \\ x_{114} = f_4(8) + f_4(9) + f_4(7) + f_4(8) + f_4(8) = 0 \end{cases}$$

则 $r_{111}=0.5326$,同理可得 r_{112} 、 r_{113} 、 r_{114} 。最后得出救生能力、安全性、保障性和可靠性的结果为:

$$\begin{aligned} R_{\text{救生}} &= \begin{bmatrix} 0.5326 & 0.5326 & 0.6470 & 0 \\ 0.5041 & 0.4316 & 0.2138 & 0 \\ 0.4705 & 0.4696 & 0.2150 & 0 \\ 0.5377 & 0.4934 & 0.0483 & 0 \end{bmatrix} \\ R_{\text{安全}} &= \begin{bmatrix} 0.4750 & 0.4750 & 0.0500 & 0 \\ 0.5280 & 0.4872 & 0 & 0 \\ 0.4819 & 0.4684 & 0.0506 & 0 \end{bmatrix} \\ R_{\text{保障}} &= \begin{bmatrix} 0.6125 & 0.4791 & 0 & 0 \\ 0.5328 & 0.5328 & 0.1950 & 0 \end{bmatrix} \\ R_{\text{可靠}} &= \begin{bmatrix} 0.5306 & 0.5306 & 0.2014 & 0 \\ 0.5977 & 0.5795 & 0 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

利用层次分析法以救生系统的救生能力为例计算其4个二级指标的权重分配,通过专家评价获得作功威力、精确性、反应时间、操作性的评判矩阵为

$$x_1 = \begin{bmatrix} 1 & 4/3 & 5/2 & 2 \\ 3/4 & 1 & 1/2 & 2 \\ 2/5 & 2 & 1 & 1 \\ 1/2 & 1/2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \text{则据AHP方法得出作功威力、}$$

精确性、反应时间、操作性的权重分配为 $w_1=(0.2746, 0.2218, 0.2591, 0.2445)$,一致性比例 $C.I.=0.0841<0.1$ 。

对于安全性,通过专家评价获得救生系统的工作破坏力、抗振动失效能力、抗电磁干扰能力的评价矩阵 x_2 ;对于保障性,获得救生系统的维护性、备件易得性的评判矩阵 x_3 ;对于可靠性,获得救生系统的飞行可靠性、工作可靠性的评判矩阵 x_4 ;对

表2 指标评分及权重分配表

项目	专家 指标	1	2	3	4	5	二级指标权重 w_i	一级指标权重 W
救生能力	作功威力	8	9	7	8	8	0.2746	0.3231
	精确性	7	7	8	8	7	0.2218	
	反应时间	8	8	8	8	7	0.2591	
	操作性	8	7	8	7	8	0.2445	
安全性	工作破坏性	8	7	8	8	7	0.2086	0.2320
	抗振动失效能力	8	9	8	8	8	0.4173	
	抗电磁干扰能力	9	8	7	8	8	0.3741	
保障性	维护性	8	7	7	8	8	0.5877	0.1521
	备件易得性	7	8	7	7	8	0.4123	
可靠性	救生可靠性	9	8	9	8	8	0.5318	0.2928
	飞行可靠性	8	8	7	8	9	0.4682	

于总的能力,获得救生系统的救生能力、安全性、保障性和可靠性的评判矩阵 x_5 ,分别如下所示。

$$x_2 = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 1/2 \\ 3/2 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 \end{bmatrix}, \quad x_3 = \begin{bmatrix} 1 & 2 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix},$$

$$x_4 = \begin{bmatrix} 1 & 3/2 \\ 2/3 & 1 \end{bmatrix}, \quad x_5 = \begin{bmatrix} 1 & 2/3 & 1 & 1/3 \\ 3/2 & 1 & 2 & 1/2 \\ 1 & 1/2 & 1 & 1/2 \\ 3 & 2 & 2 & 1 \end{bmatrix}.$$

同理,可计算安全性中各因素的权重分配 w_2 ,保障性中各因素的权重分配 w_3 ,可靠性中各因素的权重分配 w_4 以及救生能力、安全性、保障性和可靠性的相对权重分配 W ,具体计算结果见表2。

则相应的救生能力、安全性、保障性和可靠性评价结果向量为:

$$B_{\text{救生}} = W_{\text{救生}} R_{\text{救生}} = (0.5163, 0.4928, 0.1007, 0),$$

$$B_{\text{安全}} = W_{\text{安全}} R_{\text{安全}} = (0.5329, 0.4571, 0.0748, 0),$$

$$B_{\text{保障}} = W_{\text{保障}} R_{\text{保障}} = (0.5771, 0.4196, 0.0538, 0),$$

$$B_{\text{可靠}} = W_{\text{可靠}} R_{\text{可靠}} = (0.5024, 0.4917, 0.0986, 0).$$

然后进行一级灰色综合评价,得到的最后评价结果为:

$$B = W \begin{bmatrix} B_{\text{救生}} \\ B_{\text{安全}} \\ B_{\text{保障}} \\ B_{\text{可靠}} \end{bmatrix} = (0.3231, 0.2320, 0.1521, 0.2928)$$

取优、良、中和差各等级对应的评分标准的中值作为各评价灰类等级的值化向量。由表1可知,值化向量为 $F=(9,7,5,3)$,可得评价值 $c_1=8.5017$, $C = \begin{bmatrix} 8.5017 \\ 0 \end{bmatrix}$ 。

2.4 其余模块的计算

由文献[4]得 $A=(a_1, a_2) = (\frac{MTBF_s}{MTBF_s + MTTR_s}, \frac{MTTR_s}{MTBF_s + MTTR_s})$,

代入该型救生系统的有关数据,得到 $A=(0.9981, 0.0019)$ 。

对于对抗模块 Q 与 q 的算法在此不予具体研究,根据该救生系统的技术资料取 $Q = \begin{bmatrix} 1 & 1/40 \\ 0 & 1/3 \end{bmatrix}$; $q=0.83$ 。

综上所述,得到该型救生系统的效能值为 $E=qAKDQC=6.6067$ 。对照表1知其作战效能属于“良”类。

3 结束语

运用ADC的修正扩展模型,对某型飞机救生系统的作战效能进行了评估,该方法考虑因素更加全面、综合性高,对模型进一步的细化和充实,更能反映出救生系统的实际救生水平,便于决策参考。

AST

参考文献

- [1] 侯晓蒙. 军用飞机的应急系统[J]. 现代军事, 2002, 6: 28.
- [2] 韩梦珍. 国外航空救生技术现状及展望[J]. 航空科学技术, 2003, 2: 23-25.
- [3] 陈浩, 雷英杰. 基于防空预警使命的预警机系统效能分析[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 20(4): 25-26.
- [4] 金哲, 张金春. 基于WSEIAC模型的武器系统效能分析[J]. 战术导弹技术, 2004, 3: 11-13.
- [5] 史玮伟, 鞠传文. 空空导弹武器系统实战效能评估[J]. 战术导弹技术, 2009(2): 7-9.
- [6] 沈尔康. 航空弹射救生装备[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [7] 李锐. 第四代弹射座椅的关键性技术[J]. 航空科学技术, 1995(4): 14-16.
- [8] 郭齐胜, 邵志刚. 装备效能评估概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005.
- [9] 朱传志, 孙旭明. 基于三角白化权函数的导弹分队信息作战能力评估[J]. 兵工自动化, 2006, 25(6): 9-10.
- [10] 张素梅, 黄天辰. 基于神经网络模型的武器装备作战效能评估[J]. 军事运筹与系统工程, 2006, 20(4): 40.
- [11] 陈浩光, 李云芝. 基于模糊推理的武器系统效能评估新方法[J]. 军事运筹与系统工程, 2004, 18(4): 64-65.

作者简介: 王耀华, 少将军衔, 首席教授、博士生导师。主要研究方向为军事装备学。

高清振, 安徽芜湖人, 工程师, 博士, 主要研究方向为军事装备学。