

doi: 10.3969/J.ISSN.1006-1576.2010.05.017

基于集对理论的航材保障效能分析及评估

陈校平¹, 车飞², 薛茹玲²

(1. 空军工程大学 电讯工程学院, 陕西 西安 710077; 2. 空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘要: 航材保障是航空兵部队技术保障的物质基础, 其效能直接影响空军武器装备的作战效能。通过应用集对分析方法在确定随机系统中的某一特性上具有同异反定量刻画的特点, 通过建立各系统航材保障效能评估指标的集对, 建立了航材保障效能评估指标体系, 对航材保障效能进行分析与评估。通过实例计算, 验证了集对分析方法对效能评估的有效性, 为装备管理决策者制定航材保障方案提供了科学的依据。

关键词: 集对分析; 航材保障; 效能评估

中图分类号: N945.17 **文献标识码:** A

Effectiveness Analysis and Evaluation of Air Material Support Based on Set Pair Theory

CHEN Xiao-ping¹, CHE Fei², XUE Ru-ling²

(1. College of Telecommunication Engineering, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an 710077, China;
2. Engineering Institute, Air Force Engineering University of PLA, Xi'an 710038, China)

Abstract: Air material support is material foundation of the air force technical support, its effectiveness influence operational effectiveness of the weapons and equipments of air force directly. Utilizing the theory of SPA (Set Pair Analysis), which have the characteristic of ensuring same different and opposite of unsure system rational depict on certain specialty, establish the pairs of evaluation index of air material support effectiveness, and establish the index system of air material support effectiveness. Hereby, analyze and evaluate the air material support effectiveness. At last, validate the theory of SPA, and proved scientific basis of the project of air material support by equipment management decision maker constituted.

Keywords: SPA; Air material support; Effectiveness evaluation

0 引言

航空器材保障简称航材保障, 是空军装备工作的组成部分^[1], 航材保障效能直接影响空军武器装备的作战效能^[2]。近些年, 一批新式战机陆续装备我空军部队, 航材保障问题日益突出, 为完善航材保障系统, 提高航材保障能力, 研究航材保障效能的分析及评估方法具有重要的现实意义。航材保障作为一个复杂的体系, 包括组织实施航材的筹措、储备、供应、管理等多项专业工作, 对其效能进行评估属于多目标决策问题。航材保障效能评估涉及方面较多, 诸因素之间具有明显的不确定性、随机性和模糊性特征, 选取的评价指标也可能存在指标权益的冲突。故通过应用集对分析方法具有的确定随机系统同异反定量刻画的特点, 以及我军航材保障工作的实际, 对其效能进行评估和分析。

1 集对分析的基本原理

集对分析 (SET PAIR ANALYSIS, SPA)^[3-4]是中国学者赵克勤于 1989 年提出的一种关于确定随机

系统同异反定量分析的系统分析方法。集对分析理论, 也称为“联系数学”^[5]。所谓集对, 就是由具有一定联系的 2 个集合所组成的对子, 例如战场态势中的进攻与防守即可作为一个集对。

一般地, 对于 2 个给定的集合组成的集对 $H = \{A, B\}$, 在某个具体问题 W 中进行分析, 共得到 N 个特性, 其中, 有 S 个特性相同, Q 个特性对立, 在其余的 P 个特性 ($N = S + P + Q$) 上关系不确定, 那么此集对的联系度通用表达式为:

$$\mu = a + bi + cj = \frac{S}{N} + \frac{P}{N}i + \frac{Q}{N}j, \quad i \in [-1, 1], \quad j = -1 \quad (1)$$

$$a + b + c = 1 \quad (2)$$

其中, a 、 b 、 c 分别称为集对的同一度、差异度和对立度。 i 为避免差异度符号或相应系数, 取值 $[-1, 1]$; j 为对应符号或相应系数, 取值为 -1 。联系度的意义是在某一问题背景下, 对集对中两集合的联系进行相对确定和相对不确定的辩证定量刻画。由此看出, 集对分析最重要的一点就是将相对

收稿日期: 2009-12-29; 修回日期: 2010-02-11

作者简介: 陈校平 (1973-), 男, 湖南人, 硕士, 讲师, 2008 年毕业于空军工程大学电讯工程学院, 从事军事装备学研究。

确定的数 a 、 c 、 j 和相对不确定的数 b 、 i 辩证统一于一个数学表达式。故可利用该式描述一个特定系统的确定不确定程度。

2 基于集对分析的航材保障效能评估

2.1 建立效能评估指标体系

航材保障效能评估指标是评价航材保障目标、能力的准则和依据。其体系的建立一般遵循体系化、

唯一性、客观性、严格性、前瞻性这5个基本原则。通过评价指标,使保障目标、能力具体化、规范化和数量化,客观地反映航材保障状况,有利于改进航材保障工作,提高科学管理水平^[1,6]。

根据上述原则,运用系统工程的思维方法,通过数据收集和专家调查,针对航材保障指标的特性,结合航空兵部队航材保障任务的要求,最终建立了航材保障效能评估指标体系如图1。

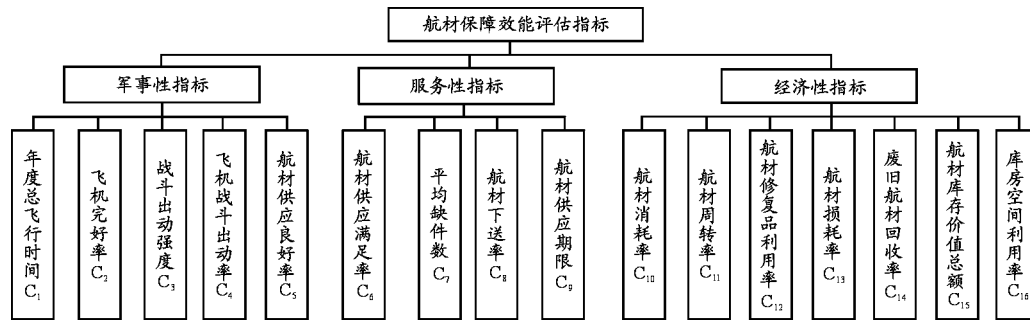


图1 航材保障效能评估指标体系

2.2 基于集对分析的航材保障效能评估

根据集对分析原理,可设航材保障效能评估问题为 $F = (S, E, \omega, D)$ 。其中 $S = \{s_1, s_2, \dots, s_m\}$ 表示航材保障效能评估的方案集,即待评估的航材保障系统集; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$ 表示航材保障效能评估的指标集,如图1;方案 $s_k (k=1, 2, \dots, m)$ 关于指标 $e_r (r=1, 2, \dots, n)$ 的属性值 d_{kr} ,即待评估的航材保障系统关于评估指标的具体指标值,则构成判断问题 F 的决策矩阵 $D = (d_{kr})_{m \times n}$; $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 表示指标权重集,即 ω_r 为评估指标 e_r 的权重,因此 $\sum_{r=1}^n \omega_r = 1, \omega_r > 0$ 。为了提高方案的可靠性,选取“理想方案”与“可行方案”作为一个集对,并对此集对做同异反定量分析,寻找与“理想方案”最接近的方案,从而确定各评估方案的优劣排序。

通过以上分析,“理想方案”与“可行方案”作为一个集对,实际就是各方案所对应的指标所组成的集对。因此,考虑指标集 E 中的指标特点,对于指标 e_r 存在效益型和成本型之分,且不同指标的量纲不尽相同,为便于分析计算,将决策矩阵 $D = (d_{kr})_{m \times n}$ 中的成本型指标转化为效益型指标,并进行规范化处理,统一量度,得到规范化矩阵^[7] $X = (x_{kr})_{m \times n}$ 。

根据给出的 m 个方案,确定最优方案和最劣方

案,记最优方案和最劣方案对应 e_r 的指标值分别为 u_r 和 v_r ,因为此时指标值均为效益型,经无量纲化,可得最优方案 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$ 和最劣方案 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。由 $[v_r, u_r]$ 构成了指标 e_r 的比较区间,从而确定 $[V, U]$ 构成方案 s_k 的比较空间,记评估方案为 $s_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kn}) (k=1, 2, \dots, m)$ 。在该比较空间中定义集对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的联系度为:

$$a_{kr} = \frac{x_{kr}}{u_r + v_r} \tag{3}$$

$$c_{kr} = \frac{u_r v_r}{(u_r + v_r) x_{kr}} \tag{4}$$

由式(2)可得:

$$b_{kr} = 1 - (a_{kr} + c_{kr}) \tag{5}$$

进而得到集对 $\{x_{kr}, u_r\}$ 的联系度 $\mu\{x_{kr}, u_r\}$ 。

由于此时的 $\mu\{x_{kr}, u_r\}$ 只表示对于某一个评估指标 e_r ,航材保障系统 s_k 趋优和趋劣的程度。但各个评估指标对效能评估的作用有轻重之分,所以引进权重集 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$,由此定义比较空间 $[V, U]$ 中集对 $\{s_k, U\}$ 的综合联系度为:

$$\mu\{s_k, U\} = a_k + b_k i + c_k j \tag{6}$$

其中, $a_k = \sum_{r=1}^n \omega_r a_{kr}$, $b_k = \sum_{r=1}^n \omega_r b_{kr}$, $c_k = \sum_{r=1}^n \omega_r c_{kr}$,

ω_r 为评估指标 e_r 的权重。

因为 a_k 和 c_k 相对确定,表示 s_k 接近最优方案集 U 的肯定和否定程度,为了避免对每个方案的 a_k, b_k 和 c_k 值逐一进行比较,由此定义比较空间 $[V, U]$ 中集对 $\{s_k, U\}$ 的相对贴近度为:

$$\lambda_k = \frac{a_k}{a_k + c_k}, k=1, 2, \dots, m \quad (7)$$

相对贴近度数值越大,表示航材保障系统 s_k 越接近最优方案集 U ,保障效能越好。因此,最后根据 λ_k 值的大小进行各个评估方案的优劣排序。

2.3 航材保障效能评估实例分析

根据所建立的效能评估指标体系,选取 A, B, C, D, E 五个空军场站航材股的基本数据如表 1。

表 1 空军场站航材股航材保障效能评估基本数据

评估指标	指标权重*	A	B	C	D	E
C_1	0.117 6	20 698	18 562	19 718	21 258	17 937
C_2	0.126 2	74.44%	81.41%	80.37%	79.53%	78.86%
C_3	0.073 5	1	0.5	0.3	1	0.25
C_4	0.073 5	90.14%	85.84%	80.30%	83.33%	80.58%
C_5	0.101 2	91.48%	84.35%	97.87%	93.27%	88.75%
C_6	0.062 9	89.41%	88.43%	85.26%	92.63%	75.15%
C_7	0.042 5	5.71%	8.53%	7.37%	5.64%	7.68%
C_8	0.042 5	86.71%	85.28%	75.64%	80.36%	80.62%
C_9	0.022 1	23	24	23	22	28
C_{10}	0.095 2	1.2	1.8	1.7	1.6	1.6
C_{11}	0.040 8	1.25	1.57	1.76	0.98	1.49
C_{12}	0.020 4	65.35%	78.62%	76.36%	66.71%	70.52%
C_{13}	0.040 8	3.25%	1.02%	1.18%	0.98%	3.01%
C_{14}	0.020 4	96.05%	91.05%	98.47%	99.33%	97.63%
C_{15}	0.061 2	30 102 634	25 255 408	22 762 622	27 106 049	23 907 467
C_{16}	0.061 2	90.06%	95.45%	87.42%	85.08%	88.72%

注:指标权重通过层次分析法计算得出。

其中 C_1 至 C_{16} 分别代表年度总飞行时间、飞机完好率等 16 项评估指标,除了平均缺件数、航材供应期限、航材消耗率和航材损耗率 4 个指标属于成

本型指标外,其余指标均为效益型指标。按照集对分析的理论,以及航材保障效能指标体系的建立,得到 5×16 的决策矩阵为:

$$D = (d_{kr})_{m \times n} = \begin{pmatrix} 20\ 698 & 0.744\ 4 & 1 & 0.901\ 4 & 0.914\ 8 & 0.894\ 1 & 0.057\ 1 & 0.867\ 1 & 23 & 1.2 & 1.25 & 0.653\ 5 & 0.032\ 5 & 0.960\ 5 & 30\ 102\ 634 & 0.900\ 6 \\ 18\ 562 & 0.814\ 1 & 0.5 & 0.858\ 4 & 0.843\ 5 & 0.884\ 3 & 0.085\ 3 & 0.852\ 8 & 24 & 1.8 & 1.57 & 0.786\ 2 & 0.010\ 2 & 0.910\ 5 & 25\ 255\ 408 & 0.954\ 5 \\ 19\ 718 & 0.803\ 7 & 0.3 & 0.803\ 0 & 0.978\ 7 & 0.852\ 6 & 0.073\ 7 & 0.756\ 4 & 23 & 1.7 & 1.76 & 0.763\ 6 & 0.011\ 8 & 0.984\ 7 & 22\ 762\ 622 & 0.874\ 2 \\ 21\ 258 & 0.795\ 3 & 1 & 0.833\ 3 & 0.932\ 7 & 0.926\ 3 & 0.056\ 4 & 0.803\ 6 & 22 & 1.6 & 0.98 & 0.667\ 1 & 0.009\ 8 & 0.993\ 3 & 27\ 106\ 049 & 0.850\ 8 \\ 19\ 737 & 0.788\ 6 & 0.25 & 0.805\ 8 & 0.887\ 5 & 0.751\ 5 & 0.076\ 8 & 0.806\ 2 & 28 & 1.6 & 1.49 & 0.705\ 2 & 0.030\ 1 & 0.976\ 3 & 23\ 907\ 467 & 0.887\ 2 \end{pmatrix}$$

上式行数表示空军场站航材股,列数表示对应的指标值,将数值规范化处理,得到规范化矩阵:

$$X=(x_{kr})_{m \times n} = \begin{pmatrix} 0.8314 & 0.01 & 1 & 1 & 0.5274 & 0.8158 & 0.9758 & 1 & 0.8333 & 1 & 0.3462 & 0.01 & 0.01 & 0.6039 & 1 & 0.4802 \\ 0.1882 & 1 & 0.3333 & 0.5630 & 0.01 & 0.7597 & 0.01 & 0.8708 & 0.6667 & 0.01 & 0.7564 & 1 & 0.9824 & 0.01 & 0.3396 & 1 \\ 0.5363 & 0.8508 & 0.0667 & 0.01 & 1 & 0.5784 & 0.4014 & 0.01 & 0.8333 & 0.1667 & 1 & 0.8297 & 0.9119 & 0.8961 & 0.01 & 0.2257 \\ 1 & 0.7303 & 1 & 0.3079 & 0.6598 & 1 & 1 & 0.4264 & 1 & 0.3333 & 0.01 & 0.1025 & 1 & 1 & 0.5917 & 0.01 \\ 0.01 & 0.6341 & 0.01 & 0.0285 & 0.3254 & 0.01 & 0.2941 & 0.4499 & 0.01 & 0.3333 & 0.6538 & 0.3896 & 0.1057 & 0.7947 & 0.1560 & 0.3510 \end{pmatrix}$$

在矩阵规范化的同时, 效益型指标的最小值和成本型指标的最大值将被计算为 0, 这里可用 0.01 代替, 并不影响决策判断。由矩阵 $X=(x_{kr})_{m \times n}$ 可以得到最优值和最劣值的一维规范化矩阵为:

$$u=(1 \ 1)^T$$

$$v=(0.01 \ 0.01)^T$$

根据式 (3)~式 (6), 得到 5 个空军场站航材股与保障效能评估最优值之间的同异反矩阵为:

$$\begin{pmatrix} 0.6594 & 0.1441 & 0.1965 \\ 0.4848 & 0.2845 & 0.2307 \\ 0.4882 & 0.3088 & 0.2030 \\ 0.6441 & 0.2387 & 0.1172 \\ 0.2647 & 0.4162 & 0.3191 \end{pmatrix}$$

具体计算结果如表 2。

表 2 航材保障效能集对分析评估结果

航材股	a_k	b_k	c_k	λ_k	效能排序
A	0.6594	0.1441	0.1965	0.7704	2
B	0.4848	0.2845	0.2307	0.6776	4
C	0.4882	0.3088	0.2030	0.7063	3
D	0.6441	0.2387	0.1172	0.8461	1
E	0.2647	0.4162	0.3191	0.4534	5

其中 λ_k 根据式 (8) 计算得出, 比较 λ_k 的大小得到 5 个航材股航材保障效能的优劣顺序依次为: D、A、C、B、E。

集对分析方法不仅可以用于方案的评估和优选, 还可以进行聚类分析, 以进一步研究各单位的航材保障能力水平及其发展趋势。集对分析方法用于聚类分析的同异反态势排序如表 3。

表 3 同异反态势排序表

序号	$a、b、c$ 的大小关系	同异反态势名称	含义
1	$a > b, b < c, b \neq 0$	强同势	系统以同一的趋势为主
2	$a > c, b = 0$	准同势	系统有同一的趋势是确定的
3	$a > c, b \geq c, b < a$	弱同势	系统同一的趋势比较弱
4	$a > c, b \geq a$	微同势	系统同一的趋势很微弱
5	$a = c, b = 0$	准均势	系统的同一趋势和对立趋势均力敌
6	$a = c, b < a$	强均势	系统的同一趋势和对立趋势明显相等
7	$a = c, b = a$	弱均势	系统的同一趋势和对立趋势虽相等但程度微弱
8	$a = c, b > a$	微均势	同一和对立趋势虽相等但具有明显的不确定特征
9	$a < c, b = 0$	准反势	系统对立的趋势是确定的
10	$a < c, b < a, b \neq 0$	强反势	系统以对立的趋势为主
11	$a < c, b = c$	弱反势	系统对立的趋势比较弱
12	$a < c, b > c$	微反势	系统对立的趋势很微弱

可靠性、维修性和保障性 3 个相关因素。可信性的核心是可靠性工程，可靠性设计是以提高可靠性为目的的设计方法，可靠性设计是由产品安全性需要、用户对产品的可靠性要求和产品竞争性需要等因素所决定的。

本设备为火炸药场所专用，安全可靠应贯穿整个设计和施工的始终，因此，可靠性设计是至关重要的。系统采用的可靠性设计方法主要有：

1) 安全性设计法

安全性设计法是提高产品或系统固有可靠性和固有安全性的设计方法。系统采用隔爆技术、本安技术和防静电技术，提高可靠性。为仪表、电器等设计一个足够坚固的外壳或将其安置在足够坚固的壳体内，严格按标准设计、制造和安装所有的界面，使在机壳内发生的爆炸不至于引发机壳外危险性物质的爆炸。系统中所选用的防爆摄像机外壳、防爆电动云台及防爆红外、紫外火焰探测器等都执行隔爆和防爆标准。

2) 冗余设计法

冗余设计是以功能的重复结构确保局部发生故障时整机不丧失功能的设计方法。因为电源是关键设备，必须保证可靠，因此采用冗余技术，提高可靠性系统中稳压电源设备冗余配置。

3) 预防故障设计法

预防故障设计法是由经验积累产生的可靠性设计方法。根据相关安全改造系统工程经验，重点通过软件设计提高可靠性。软件设计了手动调整程序和自动运行程序及故障自诊断程序等。无论是手动调整程序还是自动运行程序，设计中除充分考虑各种互锁、连锁及计数累计外，还有丰富的自诊断功能，用于判断整条生产线的设备运行状态及影响产品质量的工艺参数正确与否。若运行状态错误，系统将报警，并在人机界面上显示该故障的故障点及原因。

另外，为确保系统安全可靠运行，还设计了紧急停车装置，紧急停车装置分布于中央控制室和现场，可以控制突发事件的发生。

4 结束语

在军品技术开发计划的支持下，兵器行业结合企业需求进行了炸药破碎技术的开发与推广。针对系统安全与可靠性要求，对破碎原理及安全控制要求进行了系统分析，在控制系统设计中采用了 5 条

安全保证措施，在可靠性保证方面采用了安全性设计法、冗余设计法和预防故障设计法。试验表明，系统所采用的安全措施及可靠性设计方法有效，保证了系统的正常运行，并为设备使用和集成控制等全面应用提供了技术支持。

参考文献：

[1] 左东红, 贡凯青. 安全系统工程[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
 [2] 张根保, 刘英. 质量管理与可靠性[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.

(上接第 53 页)

根据表 2 和表 3 进行 5 个场站航材股航材保障能力的聚类分析，可以将 A（强同势）、E（弱反势）分别归为一类，B、C、D（弱同势）归为一类。通过聚类分析可以看出，虽然航材股 D 保障效能评估排名第 1，但其中影响航材保障能力的不确定性因素较大，仍需要加强管理力度，确保其航材保障能力的稳定性。

3 结束语

应用集对分析方法评估航材保障效能，分析计算过程概念明确、原理直观、计算简便、结果合理，为解决军事领域类似效能评估、方案论证等问题提供一种定性与定量相结合的研究思路。但文中仅是从宏观上对集对静态的角度进行研究，并没有涉及集对的动态变化规律，而实际中的航材保障在平时和战时有很大不同，研究其效能问题需要对平时向战时转化过程中的动态变化规律及可能出现的结果进行分析，可为下一步研究提供参考。

参考文献：

[1] 韩兴才. 航材保障工程[M]. 北京: 蓝天出版社, 2003.
 [2] 丁静波, 傅涛. 影响航材保障效能的问题与对策[J]. 航空杂志, 2005, 15(5): 52-53.
 [3] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理[J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162-164.
 [4] 赵克勤, 宣爱理. 集对论——一种新的不确定性理论与应用[J]. 系统工程, 1996, 14(1): 18-20.
 [5] 张平, 黄德才. 基于联系度的 ROUGH 集[J]. 杭州电子工业学院学报, 2001, 21(1): 52-53.
 [6] 陈维赞. 航空兵部队航材保障效能评估[D]. 西安: 空军工程大学, 2006.
 [7] 杜海舰, 伍瑞昌. 集对分析在卫生装备评估中的应用研究[J]. 医疗卫生装备, 2003, 24(6): 19-20.
 [8] 康广, 岳强斌, 宋辉. 装备保障训练评估质量分析[J]. 四川兵工学报, 2009(4): 116-118.