【兵器与装备】

基于主成分分析法的装备维修资源保障能力评估*

王海涛,阳平华

(军械工程学院 基础部,石家庄 050003)

摘要:运用主成分分析法对装备维修资源保障能力的多项指标进行了综合聚集,在理想点的基础上,建立了综合优化决策模型,并进行了实例分析和验证,所得结果合理,且符合客观实际,为指挥者进行决策提供了合理的依据和方法.

关键词:主成分分析法;优化决策模型;装备维修

中图分类号:E917 **文献标识码**:A **文章编号**:1006-0707(2008)02-0030-03

维修资源是装备维修所需的人力、物资、经费、技术、信息和时间的统称,它是实施装备维修的物质基础和重要保证.无论是平时训练还是战时抢修,维修资源保障都占据着十分重要的地位,它不仅直接影响着装备的寿命周期费用和费用效果,还直接影响着装备的战备完好性、部队战斗力的保持和恢复[1].

当前,维修资源配置的不合理性、无序性的不断增大,已成为我军装备作战和保障能力提高的主要"瓶颈".因此,维修资源保障能力评估方法的研究,对于客观地反映维修保障中存在的问题与不足,促进装备维修保障能力的提高,具有十分重要的意义.

1 维修资源保障能力评估体系的建立

1.1 维修资源保障能力指标体系建立的原则.

1) 科学性原则.运用科学的方法,对各评估对象的特点、各部分之间的联系等进行分析,并结合各评估对象的实际情况确定指标,使其计算建立在科学的基础上.

2) 系统性原则.把指标放置在系统的整体中综合考虑,使指标从各个方面全面地反映出评估对象的各个影响因素和产生的效果.

3) 可行性原则.指标体系中各指标的含义要易于理解,能很大程度地适应评估对象,有统计基础,易于计算.

4) 可比性原则.同一个指标对所有的评估对象具有相同的标准尺度,便于指标间相互比较和分析.

5) 简捷性原则.指标的描述要简捷准确,含义要明确具体,避免指标之间的相互交叉和重复.

6) 层次性原则.指标体系应反映评估因素的系统性,从下层往上层逐层聚合,从上层往下层逐步具体.

1.2 指标体系的建立.

装备维修保障资源的确定,受环境、资源和费用等条件的约束.在综合考虑以上约束条件的基础上,遵循装备维修保障能力评估指标的建立原则,根据装备保障平时的各项业务,按照一定的程序,经广泛征求专家意见,以装备维修资源保障能力为目标层,从保障指挥、保障人员、保障装备、设备工具、维修器材、保障资料和保障设施7个方面建立评估指标体系.如表1所示.

表1 装备维修保障能力评估体系

1级指标	2级指标	3级指标
装备维修保障能力(A)	保障指挥(B_1)	分析决策效率(C_1)
		指挥协调效率(C_2)
	保障人员(B_2)	人员满编率(C_3)
		人员称职率(C_4)
	保障装备(B_3)	装备满编率(C_5)
		装备完好率(C_6)
	设备工具(B_4)	设备工具满编率(C_7)
		设备工具完好率(C_8)
	维修器材(B_5)	品种达标率(C_9)
		基数达标率(C_{10})
	保障资料(B_6)	品种达标率(C_{11})
		基数达标率(C_{12})
	保障设施(B_7)	设施配套率(C_{13})
		设施完好率(C_{14})

* **收稿日期**:2008-01-17

作者简介:王海涛(1980—),男,山东烟台人,硕士研究生,主要从事军事运筹学研究.

2 主成分分析法

主成分分析法是将多个指标化为少数指标的一种统计方法.利用主成分分析法对多维变量进行降维,降维后的变量是原变量的线性组合,并能反映原变量绝大部分的信息,使信息的损失最小,对原变量的综合解释能力强.该方法通过主成分的方差贡献率来表示变量的作用,可避免在系统分析中对权重的主观判断,使权重的分配更合理,尽可能地减少重叠信息的不良影响,克服变量之间的多重相关性,使系统分析简化.当主成分变量所包含的指标信息量占原始指标信息量的85%以上时,认为分析达到效果.

主成分的求解步骤:

步骤1 为了消除各指标之间因为度量单位不同引起的差异,将数据 $x_{ij}(i=1,2,\cdots,m;j=1,2,\cdots,n)$ 采用 Z-Score 法进行标准化处理:

$$Z_{ij}=(x_{ij}-\bar{x}_j)/\sigma_j \tag{1}$$

其中 $\bar{x}_j=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}x_{ij}$;$\sigma_j=\sqrt{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}(x_{ij}-x_j)^2}$.得到标准化样本决策矩阵 $Y=(y_{ij})_{m\times n}$.

步骤2 计算所有样本的指标相关矩阵 $R=(r_{ik})_{m\times n}$,其中

$$r_{jk}=\frac{1}{m-1}\sum_{i=1}^{m}y_{ij}\cdot y_{ik},(i,j=1,2,\cdots,n). \tag{2}$$

步骤3 求相关矩阵 R 的特征值 $\lambda_1\geqslant\lambda_2\geqslant\cdots\geqslant\lambda_n\geqslant0$ 及相应的特征向量:

$$\alpha_j=[\alpha_{j1},\alpha_{j2},\cdots,\alpha_{jn}]^{\mathrm{T}},(j=1,2,\cdots,n). \tag{3}$$

步骤4 通过 λ_i 计算各分量的方差贡献率:

$$p_i=\lambda_i/\sum_{i=1}^{n}\lambda_i,(i=1,2,\cdots,n) \tag{4}$$

选取满足 $\sum_{i=1}^{p}\lambda_i/\sum_{j=1}^{n}\geqslant e$(一般取 $e=0.85$)的前 p 个主成分作为新的决策指标,从而得到低维指标的主成分决策矩阵 $Z=(z_{ij})_{m\times p}=[z_1,z_2,\cdots,z_p]$.

根据主成分分析的结果,可得主成分指标权重:

$$\mu_j=\lambda_j/\sum_{k=1}^{p}\lambda_k,(j=1,2,\cdots,p) \tag{5}$$

进而可构造主成分加权决策矩阵 $U=(u_{ij})_{m\times p}=[\mu_1z_1,\mu_2z_2,\cdots,\mu_pz_p]$.

3 建立优化决策模型[2]

定义1 对主成分加权决策矩阵 $U=(u_{ij})_{m\times p}$ 的指标属性值,取 $u_j^+=\max\{u_{ij}\mid i=1,2,\cdots,m\}$,$u_j^-=\min\{u_{ij}\mid i=1,2,\cdots,m\}(j=1,2,\cdots,p)$,则称由 $A^+=(u_1^+,u_2^+,\cdots,u_p^+)$ 和 $A^-=(u_1^-,u_2^-,\cdots,u_p^-)$ 构成的方案分别为主成分正理想方案(正理想点)和主成分负理想方案(负理想点).

定义2 称

$$d_i^+=[\sum_{j=1}^{p}u_{ij}-u_j^+]^{\frac{1}{2}},(i=1,2,\cdots,m) \tag{6}$$

$$d_i^-=[\sum_{j=1}^{p}u_{ij}-u_j^-]^{\frac{1}{2}},(i=1,2,\cdots,m) \tag{7}$$

为方案 $A_i(i=1,2,\cdots,m)$ 对主成分正理想方案和主成分负理想方案的偏离度.

定义1中的主成分正理想方案和主成分负理想方案显然不存在,否则就无需决策,作此定义的宗旨是把它们作为衡量其他可行方案的准绳以权衡各方案的优劣.假设综合主成分指标 q_i 为方案 A_i 期望排序,则 $q_id_i^+$ 为方案 A_i 距离主成分正理想方案的期望偏离度,$(1-q_i)d_i^-$ 为方案 A_i 距离主成分负理想方案的期望偏离度.我们的目标是,使每一方案 A_i 要么偏离主成分负理想方案(贴近主成分正理想方案),要么偏离主成分正理想方案(贴近主成分负理想方案),这样就可以将各方案的优劣性明显地区别开来,为此建立综合优化决策模型:

$$\max F(q_1,q_2,\cdots,q_m)=$$
$$\max\{\sum_{i=1}^{m}(q_id_i^+)^2+[(1-q_i)d_i^-]^2\}=$$
$$\max\sum_{i=1}^{m}[q_i^2\sum_{i=1}^{m}(u_{ij}-u_j^+)^2+(1-q_i)^2\sum_{j=1}^{p}(u_{ij}-u_j^-)^2] \tag{8}$$

令 $\frac{\partial F}{\partial q_i}=0$,得:

$$q_i=\frac{\sum_{j=1}^{p}(u_{ij}-u_j^-)^2}{\sum_{j=1}^{p}(u_{ij}-u_j^+)^2+\sum_{j=1}^{p}(u_{ij}-u_j^-)^2} \tag{9}$$

由式(9)可得在主成分分析和理想点基础上的各方案总体优化决策排序向量 $q=(q_1,q_2,\cdots,q_m)$,决策者可据此结果进行决策.

4 实例评估

设有6个单位,采用专家咨询法对以上14个指标进行预测,结果如表2所示.现通过主成分分析法对各单位的装备维修资源保障能力进行评估.

表2 各单位评价指标预测

指标	单位					
	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
C_1	0.89	0.76	0.58	0.64	0.62	0.91
C_2	0.72	0.76	0.84	0.62	0.56	0.68
C_3	0.86	0.79	0.82	0.91	0.77	0.83
C_4	0.81	0.80	0.69	0.84	0.69	0.74
C_5	0.78	0.90	0.92	0.89	0.85	0.83
C_6	0.73	0.77	0.86	0.79	0.83	0.85
C_7	0.79	0.80	0.78	0.77	0.90	0.86
C_8	0.57	0.67	0.66	0.58	0.63	0.61
C_9	0.85	0.81	0.77	0.88	0.83	0.80
C_{10}	0.71	0.68	0.72	0.81	0.76	0.78
C_{11}	0.83	0.85	0.81	0.80	0.86	0.82
C_{12}	0.83	0.87	0.79	0.81	0.83	0.85
C_{13}	0.57	0.64	0.81	0.63	0.72	0.70
C_{14}	0.79	0.84	0.87	0.82	0.73	0.79

设表 2 中各单位 A_i 对指标 C_j 的样本属性值为 x_{ij}，从而可以构造原始样本决策矩阵 $X=(x_{ij})_{6\times 14}$. 表 2 中数据均为预测的概率值，相差较小，标准化后由式(2)可得到原始数据的相关矩阵 R.

$$R=\begin{bmatrix}
1.0000 & 0.0431 & 0.1258 & 0.3615 & -0.7468 & -0.4058 & 0.0969 & -0.4041 & 0.0663 & -0.1439 & 0.0747 & 0.6252 & -0.5792 & -0.2009 \\
0.0431 & 1.0000 & -0.0478 & -0.0799 & 0.3404 & 0.0357 & -0.5994 & 0.4687 & -0.6565 & -0.6665 & -0.2793 & -0.1415 & 0.2764 & 0.8483 \\
0.1258 & -0.0478 & 1.0000 & 0.6938 & -0.1228 & -0.3235 & -0.6558 & -0.7485 & 0.6158 & 0.5017 & -0.8255 & -0.3944 & -0.4471 & 0.2632 \\
0.3615 & -0.0799 & 0.6938 & 1.0000 & -0.1747 & -0.7913 & -0.5941 & -0.5311 & 0.7263 & 0.0556 & -0.2796 & 0.2639 & -0.8681 & 0.1819 \\
-0.7468 & 0.3404 & -0.1228 & -0.1747 & 1.0000 & 0.4462 & -0.3182 & 0.6953 & -0.3506 & -0.0424 & -0.2134 & -0.2723 & 0.5755 & 0.6466 \\
-0.4058 & 0.0357 & -0.3235 & -0.7913 & 0.4462 & 1.0000 & 0.4065 & 0.4445 & -0.6326 & 0.3679 & -0.1795 & -0.3361 & 0.9196 & 0.0572 \\
0.0969 & -0.5994 & -0.6558 & -0.5941 & -0.3182 & 0.4065 & 1.0000 & 0.1228 & -0.1630 & 0.2132 & 0.6464 & 0.3560 & 0.2481 & -0.8128 \\
-0.4041 & 0.4687 & -0.7485 & -0.5311 & 0.6953 & 0.4445 & 0.1228 & 1.0000 & -0.7668 & -0.5339 & 0.3791 & 0.1725 & 0.6349 & 0.3928 \\
0.0663 & -0.6565 & 0.6158 & 0.7263 & -0.3506 & -0.6326 & -0.1630 & -0.7668 & 1.0000 & 0.4503 & -0.1038 & 0.0000 & -0.7607 & -0.3865 \\
-0.1439 & -0.6665 & 0.5017 & 0.0556 & -0.0424 & 0.3679 & 0.2132 & -0.5339 & 0.4503 & 1.0000 & -0.4752 & -0.3211 & 0.0608 & -0.3438 \\
0.0747 & -0.2793 & -0.8255 & -0.2796 & -0.2134 & -0.1795 & 0.6464 & 0.3791 & -0.1038 & -0.4752 & 1.0000 & 0.6105 & -0.0945 & -0.5584 \\
0.6252 & -0.1415 & -0.3944 & 0.2639 & -0.2723 & -0.3361 & 0.3560 & 0.1725 & 0.0000 & -0.3211 & 0.6105 & 1.0000 & -0.4558 & -0.2627 \\
-0.5792 & 0.2764 & -0.4471 & -0.8681 & 0.5755 & 0.9196 & 0.2481 & 0.6349 & -0.7607 & 0.0608 & -0.0945 & -0.4558 & 1.0000 & 0.2300 \\
-0.2009 & 0.8483 & 0.2632 & 0.1819 & 0.6466 & 0.0572 & -0.8128 & 0.3928 & -0.3865 & -0.3438 & -0.5584 & -0.2627 & 0.2300 & 1.0000
\end{bmatrix}$$

可计算得 R 的特征值和贡献率，如表 3 所示.

表 3 R 的特征值和贡献率

特征值	λ_1	λ_2	λ_3	λ_4	λ_5	$\lambda_7,\cdots,\lambda_{14}$
	5.2461	3.8666	2.8744	1.2590	0.7539	0
贡献率	0.3747	0.2762	0.2053	0.0899	0.0539	0
累积贡献率	0.3747	0.6509	0.8562	0.9461	1	1

由表 3 可得 $\sum_{i=1}^{4}\lambda_i/\sum_{j=1}^{14}\lambda_j=94.61\%>85\%$，因此，取前 4 项主成分即可达到决策分析的要求. $\lambda_1,\lambda_2,\lambda_3,\lambda_4$ 所对应的特征向量为:

$$\alpha_1=[-0.2277\ \ 0.1955\ \ -0.2897\ \ 0.3565\ \ 0.2812\ \ 0.3293\ \ 0.0896\ \ 0.3827\ \ -0.3819\ \ -0.1269\ \ 0.0652\ \ -0.0895\ \ 0.4017\ \ 0.1459]^{\mathrm{T}}$$

$$\alpha_2=[-0.1457\ \ 0.2859\ \ 0.3470\ \ 0.1844\ \ 0.2493\ \ -0.0156\ \ -0.4655\ \ -0.0358\ \ 0.0135\ \ 0.0276\ \ -0.4306\ \ -0.2986\ \ 0.0371\ \ 0.4305]^{\mathrm{T}}$$

$$\alpha_3=[0.2580\ \ 0.3596\ \ -0.1607\ \ 0.1768\ \ -0.0305\ \ -0.3246\ \ -0.1885\ \ 0.2108\ \ -0.1545\ \ -0.5276\ \ 0.2103\ \ 0.3427\ \ -0.2129\ \ 0.2270]^{\mathrm{T}}$$

$$\alpha_4=[-0.5668\ \ -0.2776\ \ -0.1127\ \ 0.2046\ \ 0.4438\ \ -0.2301\ \ -0.0845\ \ 0.2297\ \ 0.3600\ \ -0.0525\ \ 0.2999\ \ 0.0302\ \ -0.1174\ \ -0.0187]^{\mathrm{T}}$$

选取前 4 个主成分指标，$Z_j=Y\cdot a_j(j=1,2,3,4)$，从而得主成分决策矩阵 $Z=(z_{ij})_{6\times 4}=[Z_1,Z_2,Z_3,Z_4]$，再由式(4)算出主成分指标权重，$u_1=0.3961$，$u_2=0.2170$，$u_3=0.2170$，$u_4=0.0950$. 进而可以构造主成分加权决策矩阵 $U=(u_{ij})_{6\times 4}=[u_1Z_1,u_2Z_2,u_3Z_3,u_4Z_4]_{6\times 4}$，并由此得到主成分正、负理想方案分别为:

$$\begin{cases}A^{+}=(1.3657\quad 0.6431\quad 0.5876\quad 0.0982)\\ A^{-}=(-1.1211\quad -0.8636\quad -0.3704\quad -0.1610)\end{cases}$$

由优化决策模型式(8)及式(9)，得到各单位总体优化决策排序值如表 4 所示.

表 4 各单位总体优化决策排序

单位	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	A_6
排序值	0.1436	0.7233	0.9537	0.2806	0.3450	0.3326
排序	6	2	1	5	3	4

由表 4 得出，单位 A_3 排序第一，经分析发现，该单位的保障装备和保障设施比较完善、指挥协调效率较高. 而排名最差的单位 A_1 在保障装备方面和设施配套率方面得分较差，影响了自身的排名. 这说明在联合作战装备保障中，保障装备和保障设施是相对较为重要的指标，也是提高各保障单位保障能力的重点. 各单位在发展建设中，应对此予以高度重视.

5 结束语

主成分分析法是一种科学、简便的评估方法. 采用主成分分析法对装备维修资源保障能力进行评估，原理比较简单，其准确率较高，所得的结论也比较客观. 并且指标增加时，这种方法在处理数据、进行有效决策方面更具优势，可以很快得到科学的结果，从而为实施装备维修提供科学的决策支持.

（下转第 35 页）

度,b_3 是效果差的程度,因此 b_1 越大,b_3 越小,设置备件的效果就越好.也就是说部件关键程度、耗损量越大,以及经济性越好,设置备件的效果就越好,否则就可不设备件或权衡分析后而定.效果一般的零部件则应结合备件数量计算结果和费用分析结果更进一步判定是否作为备件处理.

2.5 利用综合模糊评判法确定备件品种时依据的准则.

1) 当 $b_1+b_2\geqslant 0.90$ 时,则确定该零部件为计算备件数量的项目.

2) 当 $0.90>b_1+b_2\geqslant 0.70$ 时,则确定该零部件可以作为备件也可以不作为备件,具体情况需用户自己确定,因为用户可以根据装备使用的具体情况,以及手中经费的多少进一步考虑备件需求规划问题.

3) 当 $b_1+b_2<0.70$ 时,暂不作备件考虑,待其发生故障后再对备件供应目录进行调整,即使作为备件来考虑,也应该配置在较高层次上,如基地级、基层级,由于多储存常用低价位的备件,所以不在基层级考虑.

3 实例分析

例如邀请3名专家,利用综合模糊评判法,确定某装备弹射起飞分系统中,作动筒是否作为备件考虑.

1) 确定权重集.进行关键性、耗损性、经济性3个因素的排列分析,专家中有2位认为关键性排在第1位、耗损性次之,而另一位专家也认为关键性应放在第1位,但将经济性排在第2位.依据这样的排列,可以得出权重集 $A=\{0.5,0.28,0.22\}$.

2) 将评价因素进行A,B,C分类.按照关键性因素,根据FMECA结果,作动筒内部故障,将影响到发射杆的伸出,最终影响任务中断,属于严酷度Ⅲ级,根据关键性分析原则,属于B类.

按照耗损性因素,作动筒的 MTBF = 1 732,低于弹射起飞分系统其他零部件的平均故障间隔时间,属于需求量较大的零部件,按照FMECA数据,换算出该零部件的年耗损量,可以判定其耗损性属于A级.

3) 确定隶属度向量模糊矩阵.由上述分析可以得出作动筒的隶属度向量:$R_{u1}=[0.2,0.6,0.2]$,$R_{u2}=[0.6,0.3,0.1]$,$R_{u3}=[0.1,0.3,0.6]$,则模糊矩阵:

$$R=\begin{bmatrix}0.2 & 0.6 & 0.2\\ 0.6 & 0.3 & 0.1\\ 0.1 & 0.3 & 0.6\end{bmatrix}$$

4) 确定综合评价矩阵.

$$B=AR=[0.5,0.28,0.22]\begin{bmatrix}0.2 & 0.6 & 0.2\\ 0.6 & 0.3 & 0.1\\ 0.1 & 0.3 & 0.6\end{bmatrix}=[0.32,0.42,0.26]$$

5) 依据判断准则,由于 $b_1+b_2=0.74$,属于可作为备件考虑的情况.

4 结束语

在武器装备综合保障越来越重要的现代战争条件下,综合保障为确定装备备品品种需求提供了一个很好的解决办法,可供部队参考.

参考文献:

[1] 郝杰忠,杨建军,杨若鹏.装备技术保障运筹分析[M].北京:国防工业出版社,2006.

[2] 单志伟.装备综合保障工程[M].北京:国防工业出版社,2007.

[3] 赵武奎.装备保障学[M].北京:解放军出版社,2003.

[4] 陈学楚.装备系统工程[M].北京:国防工业出版社,2005.

[5] 张乃尧,阎平凡.神经网络与模糊控制[M].北京:清华大学出版社,2000.

[6] 蔡自兴.智能控制[M].北京:电子工业出版社,2007.

(上接第32页)

参考文献:

[1] 甘茂治,康建设,高崎.军用装备维修工程学[M].北京:国防工业出版社,2005.

[2] 刘家学,陈世国.基于主成分分析的投资决策[J].运筹与管理,2006,15(2):77-80.

[3] 程力,李勇,韩国柱.基于神经网络的装备维修资源保障能力评估[J].军事运筹与系统工程,2006,20(3):77-80.

[4] 高尚.基于神经网络的武器系统费用效能分析[J].上海航天,1999(6):30-33.

[5] 闻新,周露,李翔,等.Matlab神经网络仿真与应用[M].北京:科学出版社,2003.