

主成分分析法在航空反潜机性能评估中的应用

杨利平, 邹赞波, 吴值民

(解放军理工大学工程兵工程学院, 江苏南京 210007)

摘要: 针对航空反潜机机动性能评估的问题, 确立了反潜机机动性能的评估指标集, 建立了待评估样品的数据矩阵, 用多元统计中的主成分分析法对样本矩阵进行统计分析, 以样品第一主成分得分值构造系统排序评估指数, 以评估指数对各个样品进行排序。用此方法对各种不同反潜机的综合机动性能进行评估并排序, 所得结果与实际情况相符合, 能客观有效反映飞机的综合机动性能。

关键词: 航空反潜; 性能评估; 主成分分析法

中图分类号: V271 文献标识码: A 文章编号: 1009-3516(2007)02-0014-04

由于高科技的应用, 潜艇综合性能不断增强, 攻击能力和生存能力大幅度提高。为了对付潜艇的威胁, 反潜能力正变得日益重要。而在反潜体系中, 航空反潜以其特有的优势占据了越来越重要的地位。航空反潜以其机动灵活, 反应迅速而优于舰艇反潜^[1]。它可以在接到命令后第一时间赶到目标海域并展开搜索。研究发现, 反潜机的机动性能决定了搜索范围的大小, 而搜索范围与潜艇被发现概率有很大直接关系。所以评价反潜机的优劣, 其机动性能的评价是一个很重要的方面。影响反潜机的机动性能的因素很多, 主要有反潜机最大起飞重量、最大平飞速度、巡航速度、最大续航时间、发动机功率、垂直爬升率、航程、升限。对于这多个指标问题, 常用的评价方法有层次分析法, 多属性决策分析法, 这两种方法都有一个较大的弊端, 就是用人为主因素确定指标的权重, 不仅要耗费人力物力, 而且存在较大的人为误差。多元统计分析法是一种不依赖人为因素的评价方法, 其中主成分分析方法是利用降维的思想, 在损失很少信息的前提下把多个指标转化为少数几个综合指标的多元统计方法^[2-8]。通常把转化生成的综合指标称为主成分, 其中每个主成分都是原始变量的线性组合, 且各个主成分之间互不相关, 这就使得主成分比原始变量具有某些更优越的性能。所以通过主成分分析这些指标, 能较好地分析出不同型号反潜机的机动性能优劣。

1 反潜机机动性能与潜艇发现概率的关系

反潜机搜索范围是随时间变化的, 到达目标区时刻的搜索范围可以这样确定: 在不能确定潜艇运动要素的情况下, 可以认为潜艇的位置分布为以初始发现点为圆心, 以 $v_q T_0$ 为半径 (v_q 为敌潜艇的规避速度, T_0 为从初始发现时刻到反潜机到达目标区域时刻的时间差), 并在该区域内服从均匀分布。根据搜索论, 得到动态的目标区域搜索目标的发现概率公式。

$$p_f(T) = 1 - \exp[-wV_s T_s / \pi R(R + V_q T_q)] \quad (1)$$

式中: w 为单架飞机的搜索宽度; V_s 为搜索速度; T_s 为搜索时间; V_q 为敌潜艇规避速度; R 为飞机到达目标区时刻的搜索半径。

w 、 V_s 、 T_s 、 v_q 、 R 均为影响发现概率的自变量。而 R 又跟 V_q 和 T_0 有关。对各个自变量求偏导数, 发现 R 的大小对 $p_f(T)$ 影响最为明显。而增加搜索时间对提高发现概率的增大几乎没有作用。因此, 在其他条件一定的情况下, 缩短初始发现时刻到飞机到达预定海域时刻的时间差对提高部队反潜能力显得尤其重要。

收稿日期: 2006-04-13

基金项目: 军队科研基金资助项目

作者简介: 杨利平(1968-), 男, 江苏南京人, 博士生, 主要从事优化理论与方法研究。

而这个时间差跟飞机的机动性能参数有关。

2 主成分分析

第一主成分是原始变量数据变异最大的方向。故可用于多指标系统的排序评估问题。它排除了人为的影响,更客观、更科学地将一个多指标问题综合为单个指数的形式。为多指标系统的评估提供了可行的方法。这里用第一样品主成分得分构造系统排序评估指数。

设样本包含 n 个样品,每个样品的指标数目为 p 。数据阵见式(2)。分析步骤如下:

1) 为排除不同量纲的影响,对原始数据阵 X 进行标准化变换见式(3)。式中: $i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m$ 。
 $\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_{ij}, \sigma_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_j)^2$, 得标准化矩阵 X^* 。

2) 计算样本相关矩阵 R 。事实上,经过标准化处理的样本 X ,其相关矩阵 R 就是其协方差矩阵 S 。相关矩阵见式(4)。其中, $r_{jk} = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n X_{ij} X_{ik} = \frac{1}{n-1} x_{ij} x_{ik}, j, k = 1, 2, \dots, m$ 。

3) 计算相关矩阵的特征值 λ_i 和单位正交特征向量 $l_i (i = 1, 2, \dots, p)$, 设其中最大的实数特征值为 λ , 对应的模为 1 的特征向量为 $l_1 = (a_{11}, a_{21}, \dots, a_{p1})$ 。

4) 根据步骤 3) 得到第一主成分的表达式: $Z_1 = a_{11} X_1 + a_{21} X_2 + \dots + a_{p1} X_p$ 。把各样品各项指标值代入上式得到的值就是用来排序的综合得分值^[9]。

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \dots & y_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ y_{n1} & \dots & y_{np} \end{pmatrix} \quad (2) \quad X^* = \begin{pmatrix} x_{11} & \dots & x_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{np} \end{pmatrix} = ((y_{ij} - \bar{y}_j) / \sigma_j) \quad (3)$$

$$R = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1p} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{np} \end{pmatrix} = \frac{1}{n-1} X X' \quad (4)$$

3 算例

根据专家对反潜机机动性能的研究,选取跟机动性有密切关系的以下指标: X_1 , 最大起飞重量 T ; X_2 , 最大平飞速度 V_{max} ; X_3 , 巡航速度 V_x ; X_4 , 最大续航时间 t ; X_5 , 发动机功率 W ; X_6 , 垂直爬升率 V_p ; X_7 , 航程 S ; X_8 , 升限 H 。

3.1 算例的数据

把国内外 7 种飞机的数据作为样本数据阵,列于表 1。

表 2 样本数据阵

序号	评估指标	1	2	3	4	5	6	7
		SH-2F	小羚羊	SH-60F	Ka-28	AS-365	P-3C	超黄蜂
1	T/kg	6 123	4 100	9 182	12 600	4 100	64 410	13 000
2	$V_{max}/(\text{km/h})$	256	296	300	250	296	761	231
3	$V_x/(\text{m/s})$	260	260	250	240	250	381	220
4	t/h	5	4.4	2.3	4.5	4.4	17.2	3.1
5	W/kW	2 × 1 350	2 × 770	2 × 1 690	2 × 2 190	2 × 749	4 × 4 910	2 × 1 790
6	$V_p/(\text{m/s})$	5.4	4.2	3.55	9.5	4.5	10.2	6.4
7	S/km	885	910	600	1 000	865	8 950	680
8	H/m	7 285	4 000	5 700	5 000	5 000	8 625	4 000

使用 SAS/STAT 软件中的 PRINCOMP 过程,由相关阵出发进行主成分分析,得到相关阵特征值对应的单位正交化特征向量,见表 2。

表2 相关阵特征值对应的标准正交化特征向量

变量	标准得分系数							
	PCR1 -1	PCR2 -1	PCR3 -1	PCR4 -1	PCR5 -1	PCR6 -1	PCR7 -1	PCR7 -1
A	0.372 042	0.117 611	-0.156 837	-0.529 368	-0.181 371	-0.198 759	-0.214 394	-0.651 573
B	0.369 306	-0.170 067	-0.302 359	-0.004 969	0.361 011	0.755 615	-0.204 737	0.006 645
C	0.365 810	-0.272 289	-0.116 749	0.443 704	0.522 579	-0.531 765	0.011 761	0.159 802
D	0.374 437	-0.018 869	-0.090 215	0.486 322	-0.659 805	-0.010 488	-0.394 609	-0.153 702
E	0.374 629	0.091 062	-0.086 514	-0.471 889	0.109 939	-0.275 132	-0.105 689	-0.722 664
F	0.272 333	0.837 574	0.340 304	0.220 852	0.215 983	0.097 005	0.028 163	0.053 574
G	0.376 735	-0.023 146	-0.190 497	0.021 280	-0.261 138	0.093 043	0.862 522	0
H	0.307 793	-0.415 184	0.838 231	-0.120 229	-0.037 626	0.113 543	0.018 878	0.033 688

根据表2,得到第一主成分的表达式。

$$Z_1 = 0.372x_1 + 0.369x_2 + 0.366x_3 + 0.374x_4 + 0.375x_5 + 0.272x_6 + 0.377x_7 + 0.307x_8 \quad (5)$$

将各种飞机经过标准化的指标数据代入式(5),得到各种飞机机动性能综合指标数据。经过排序,得到如表3所示的排列次序。

表3 样品第一主成分得分排序结果

名次	1	2	3	4	5	6	7
名称	P-3C	ka-28	SH-2F	SH-60F	AS-365	小羚羊	超黄蜂
排序值	2.247 4	-0.179 5	-0.199 5	-0.426 4	-0.443 4	-0.493 6	-0.504 5

3.2 结果分析

从表3可以看出除了第一名的得分值是正值外其余都是负值,这是因为在用公式(5)时,代入公式的是经过标准化的变量。

P-3C是美国海军主要的反潜巡逻机。它的最大平飞速度、巡航速度、续航时间、航程、最大起飞重量指标均远远超过参与比较的其它各种机型。在其余的各项指标中也是第一。故它的综合机动性能最好是确凿无疑的。从表3的数字我们也可以看出它的得分值要远远高出第二名的ka-28。

ka-28直升机是俄罗斯的双发共轴式旋翼多用途反潜直升机的基本型。它机动性好,航程远。是专门针对反潜而设计的,故其反潜性能较为优越。其排名较为靠前,这跟其实际情况是相符合的。

SH-60F在很多性能指标上要超过SH-2F,却在排名上落后SH-2F。究其原因,它的续航时间、航程、升限这3项指标要远远落后于SH-2F。直观地看,航程近、续航时间短造成其活动范围受限制。

SH-60F跟AS-365作比较。SH-60F的最大起飞重量、发动机功率的指标值是AS-365的2倍多。在最大平飞速度、巡航速度、升限等方面也有不同程度的超越。只在航程和续航时间上落后AS-365不少。但两者的综合得分却差不多。这里又体现了航程和续航时间对提高飞机机动能力的重要性。

小羚羊和超黄蜂作比较。从表1可以看出,小羚羊在飞行速度和航程以及续航时间上较超黄蜂有所超越,在其余指标均为落后或远远落后。但两者得分相差无几。可以认为,提高飞行速度、续航时间对提高飞机的机动性能效果明显。

从以上分析结果,反潜机机动能力的提高主要取决于飞行速度的提高和航程以及续航时间的增加。这三者是密切相关的。就反潜机的机动能力而言,未来的发展应该在上述3方面取得突破。

4 结论

航空反潜机的综合机动性能评估是一项复杂的系统工程,并且具有浓厚的军事特色。在评价时必须做到高度准确。在选择评价方法时,必须强调评价方法的科学性、客观性、和逻辑严密性。把主成分分析方法应用于航空反潜机的机动性能的评估,以各样品的指标数据为依据进行分析。完全排除了人为因素。在第一主成分方向上,各样品具有最大的差异,故以样品第一主成分得分值作为综合机动能力的度量。评价的结果完全是各样品综合信息的反映。相对层次分析法、多属性决策法等方法来说,本文的方法具有更加客观、科学、严密的特点,并且简便易行。

参考文献:

- [1] 纪永清,董文洪,唐金国. 海军兵种武器作战效能评估[M]. 北京:海潮出版社,2000.
- [2] TIPPING M E, BISHOP C M. Probabilistic Principal Component Analysis[J]. Journal of the Royal Statistical Society, Series B, 1999, 61(3):611 - 622.
- [3] 李玉珍,王宜怀. 主成分分析及算法[J]. 苏州大学学报(自然科学版),2005,21(1):32 - 36.
- [4] 姚焕玫,黄仁涛,刘洋,等. 主成分分析法在太湖水质富营养化评价中的应用[J]. 桂林工学院学报,2005,25(2):248 - 251.
- [5] Tian Baoguang. Several Optimalities of Combining Ridge and Principal Components Estimator[J]. Chinese Quarterly Journal of Mathematics, 2000, 15(2): 14 - 18.
- [6] Jia F, Martin E B, Morris A J. Non - Linear Principal Component Analysis With Application to Process Fault Detection[J]. Int J of System Science, 2003, 31(11):1423 - 1487.
- [7] 张志佳,黄莎白,史泽林,等. 基于线性投影的代数空间降维分析[J]. 计算机工程,2005,31(21):25 - 27.
- [8] 李煜华,胡运权,綦良群. 主成分投影法对老工业基地企业技术创新能力评价[J]. 哈尔滨理工大学学报,2005,10(5):108 - 111.
- [9] 殷明娥. 分组主成分评价法及其应用[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版),2005,28(4):408 - 411.

(编辑:姚树峰)

Application of Principal Components Analysis in Evaluating the
Maneuverability of Typical Aircraft

YANG Li - ping, ZOU Yun - bo, WU Zhi - rain

(Engineering Institute of Engineering Corps, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, Jiangsu, China)

Abstract : Aiming at the problem of evaluating the maneuverability of aircraft which is useful for detection and aviation against submarine, this paper establishes the evaluation indexes collection of the aircraft and the index matrix of samples to be sorted, and uses the first principal component value of samples for constructing an evaluation index of multi - index system and sorts the samples with this method. In an illustrative example, the synthetic maneuverability of different kinds of aircraft is sorted by using the method proposed in this paper. The result obtained is consistent with the real situation. The example shows that the method is effective and objective thus can be used to evaluate the synthetic maneuverability of aircraft objectively.

Key words: aviation against submarine; performance evaluation; principal component analysis