

doi: 10.7690/bgzd.2015.07.018

## 同时面临防空和防潜的水面舰艇编队队形评估研究

刘生学, 王公宝

(海军工程大学理学院, 武汉 430033)

**摘要:** 针对目前对编队队形问题进行综合评估的方法存在的不足, 基于主成分分析法对水面舰艇编队同时面临防空与防潜作战的队形开展综合评估。系统阐述该方法的基本原理、数学模型和实施步骤, 以三角模糊数量化指标为数据样本, 对 7 种典型水面舰艇编队队形的防空与防潜作战性能开展评估分析, 并与离差最大化方法的综合评估结果进行对比。研究表明: 菱形队形是一种较优的水面舰艇编队队形, 且主成分分析法理论完备、参数涵义明确、评估结果可靠, 在水面舰艇编队队形评估中具有的一定的推广和实用价值。

**关键词:** 防空与防潜队形; 水面舰艇编队; 主成分分析法; 指标体系; 综合评估

**中图分类号:** TJ03 **文献标志码:** A

## Assessment Study of Warship Formation with the Mission of Anti-air and Anti-submarine Defenses Simultaneously

Liu Shengxue, Wang Gongbao

(College of Science, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

**Abstract:** The principal component analysis method is applied to the comprehensive assessment for the warship formation with the mission of anti-air and anti-submarine defenses simultaneously in present paper. Based on the warship capabilities of evasive maneuver, early warning detection, command and control, maneuver cooperation, hard interception, soft interception and information acquire, the comprehensive assessment system is established for the warship formation. The specific principles and implementation steps of this method are illustrated systematically. On the sample of seven kinds of typical formations quantified by the triangle fuzzy approach, the assessment is carried out for the warship formation with the anti-air and anti-submarine simultaneously, whose results are compared with those by the maxing deviation method. Present study shows that the diamond formation is the best one to defense the attacks from the air and submarine. The principal component analysis method is theoretically perfect, characteristic of obvious meaning and exact and reliable evaluation results. The application of this method in the comprehensive assessment of warship formation is scientific and effective.

**Keywords:** formation for the anti-air and anti-submarine defenses; warship formation; principal component analysis; index system; comprehensive assessment

### 0 引言

随着水面舰艇编队作战样式的转变, 飞机、导弹与潜艇等武器装备成为舰艇的主要作战与防御安全威胁, 现代水面舰艇的作战空间由二维陆地或海面延伸至三维立体空间。新型的水面舰艇编队只有大力强化防空与防潜作战性能、选择较优的作战队形、形成较严密的编队作战与防御体系, 才能有效夺取战区制海权的任务。

众多学者致力于构建使用方便且行之有效的舰艇编队队形评估方法, 以期望对编队作战防御队形作出科学合理的综合评估, 进而指导编队选择作战样式的决策。目前, 对编队队形问题进行综合评估的方法一般包括<sup>[1-3]</sup>三角模糊评估法、模糊层次分析法和自适应遗传算法等。但是, 上述理论与方法侧重于从水面舰艇编队的防空或防潜中的某项性能开展评估, 未见有将防空与防潜作战有效结合起来综合考虑的文献发表。笔者基于主成分分析法, 对水面舰艇的防空与防潜作战开展了队形评估研究, 该

方法原理简单、算法简便、计算量小、评估结果可靠, 在编队队形综合评估中具有较强的适用性。

### 1 主成分分析法基本原理

主成分分析法(principal component analysis)<sup>[4]</sup>具有严格的数学理论作基础, 其主要目的是希望用较少的变量去解释原来资料中的大部分参数信息, 并将许多相关性很高的变量转化成彼此相互独立或不相关的变量。该方法通常筛选出的变量比原始变量个数较少, 因此是一种有效的降低变量维数的分析方法。在水面舰艇编队同时面临防空和防潜的队形评估问题中, 由于主成分分析法可深入挖掘原始资料中的数据信息, 故可较为客观地反映各编队方案的内在特征属性及规律。

### 2 基本数学模型

2.1 水面舰艇编队防空和防潜能力指标体系的建立  
为建立同时面临防空和防潜的水面舰艇编队队

收稿日期: 2015-03-02; 修回日期: 2015-04-10

作者简介: 刘生学(1985—), 男, 吉林人, 工学学士, 从事军事系统建模与优化决策研究。

形评估模型，首先需确定影响其作战效果的关键因素，这些因素应体现实战环境下舰艇编队的战斗力与生存性能，主要包括机动规避能力、预警探测能力、指挥控制与协同能力、硬抗击能力、软抗击能力和信息获取能力，具体如图 1 所示。如菱形队形中的舰艇位于菱形的 4 个顶点处，便于迅速展开和变换队形、有效组织机动迎敌作战、组织编队各舰的技术观察器材及目视观察，因此其机动规避能力和信息获取能力较优；而环形队形中的各舰易被反舰导弹对编队舰艇进行二次捕捉，故其硬抗击能力不强；另外，其他各项指标均可反映不同队形之间的性能差异，因此笔者选取上述 6 方面性能作为衡量水面舰艇编队同时面临防空与防潜作战的评估指标体系。一般地，评估指标可分为效益型指标、成本型指标、固定型指标和区间型指标<sup>[5]</sup>。分析可知：图 1 所示的 6 个指标均为效益型指标，这里的效益型指标指的是其属性值越大越好的指标。

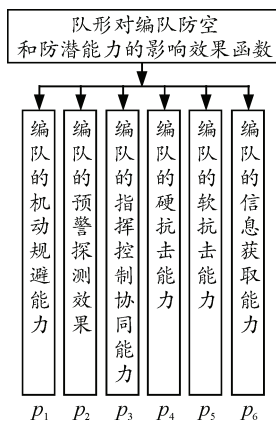


图 1 面临防空和防潜的水面舰艇编队队形评估指标体系

2.2 数据预处理

在防空与防潜作战中，假设待备选的水面舰艇编队共有  $n$  个方案集合，即  $C=(C_1, C_2, \dots, C_n)$ ，图 2 给出了典型的 7 种作战队形，即文中  $n$  取值为 7。

而指标集(或属性集)共有  $p$  个，这里的某方案  $C_i$  对第  $j$  个指标的指标值为  $y_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1, 2,\dots, p)$ ，并定义矩阵  $Y=(y_{ij})_{n \times p}$  为原始资料矩阵，表示方案集  $C$  对指标集  $Y$  的属性值。为有效消除不同指标间的量纲差异，在开展方案综合评估之前应将原始资料矩阵标准化处理<sup>[6]</sup>，这里基于数据的平均和方差作原始资料矩阵的预处理。

对指标集  $Y$  作标准化处理，即对每一个指标分量作标准化变换，具体变换公式为

$$x_{ij} = \frac{y_{ij} - \bar{Y}_j}{S_j} \quad (i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,p) \quad (1)$$

式中： $\bar{Y}_j$  为样本均值； $S_j$  为样本的标准差，其表达式为：

$$\bar{Y}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{kj} \quad (2)$$

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (Y_{kj} - \bar{Y}_j)^2} \quad (3)$$

采用上述标准化变换后，可获得标准化数据矩阵  $X=(x_{ij})_{n \times p}$ 。

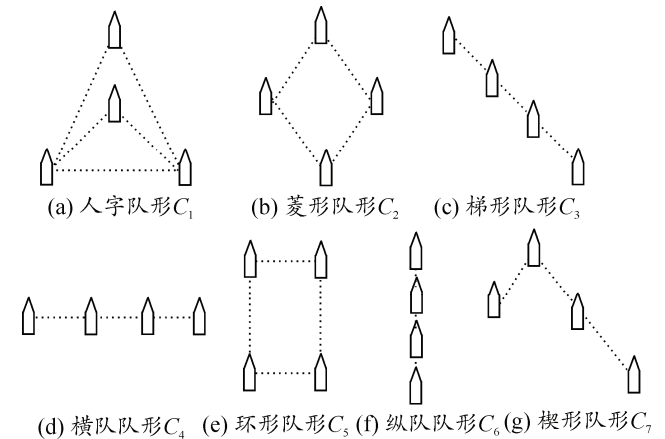


图 2 水面舰艇编队的典型防空和防潜队形

2.3 主成分的求解

2.3.1 相关矩阵的计算

对于给定的 7 个备选方案，应先求取样本空间的相关矩阵，这里相关矩阵中的每一个元素由相应的相关系数所表示，相关矩阵为

$$R = XX' = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & \dots & r_{1p} \\ r_{21} & 1 & \dots & r_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{p1} & r_{p1} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $r_{ij}$  是第  $i$  个指标与第  $j$  个指标之间的相关系数，其计算式为

$$r_{ij} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n x_{kj} x'_{jk} \quad (5)$$

2.3.2 特征值与特征向量的求取

依据前面求得的相关矩阵  $R$ ，由下式可求出该矩阵的特征值

$$|R - \lambda_t| = 0 \quad (6)$$

通过求解上述特征方程，可获得  $t$  个 ( $t=1,2,\dots,m; m < p$ ) 特征值和对应于每一个特征值的特征向量  $a_t=(a_{t1}, a_{t2}, \dots, a_{tp})$ ，特征值按其大小排序的结果如下

$$\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_t \geq 0 \quad (7)$$

相关矩阵  $R$  的特征值所对应的特征向量关系表达式详见文献[6]。

### 2.3.3 主成分的确定

主成分分析法的模型通式为

$$F_t = a_{t1}Y_1 + a_{t2}Y_2 + \dots + a_{tp}Y_p \quad (t=1,2,\dots,m) \quad (8)$$

式中  $F_t$  是第  $t$  主分量。求各主成分的关键是求特征根及其相应的特征向量，主成分分析以较少的  $m$  个指标代替了原来的  $p$  个指标对待评估问题进行分析，这给综合评估的开展带来了很大方便。

### 2.3.4 主成分的选择

为合理选择少数几个主成分来有效地描述原来  $p$  个指标所构成的一组样本，要引入主成分贡献率的概念及其计算方法。设  $\lambda_t$  为相关矩阵  $R$  的第  $t$  个特征根，则

$$B_t = \frac{\lambda_t}{\sum \lambda_t} \quad (t=1,2,\dots,m) \quad (9)$$

上式中的  $B_t$  可有效表示第  $t$  个主成分的贡献率，该数值越大则表明第  $t$  主成分综合信息的能力越强。另外，令  $P_t$  表示前  $t$  个主成分的累计贡献率，其计算表达式为

$$P_t = \frac{\sum_{i=1}^t \lambda_i}{\sum_{i=1}^m \lambda_i} \quad (10)$$

数值计算结果表明：选取前若干个主成分则可基本包含全部指标集所具有的信息，即此时的  $P_t$  值为 100%。而保留多少个主成分则主要取决于保留部分的累积方差在方差总和中所占百分比（即累计贡献率），它标志着前几个主成分概括信息的多少。在本问题中，若前  $t$  个主成分的累计贡献率超过 85% ( $P_t \geq 0.85$ )<sup>[7]</sup>，则认定采用前  $t$  个主成分来描述原样本所包含的信息量已可达到评估的要求。

## 3 实例分析

### 3.1 数据输入

为了校验上述评价模型的正确性，选取三角模糊数量化指标<sup>[1]</sup>数据作为模型的输入，这里的三角模糊数方法是基于语言价值变量对最小可能值、最可能取值和最大可能值的逼近形式计算结果。表 1 给出了三角模糊数方法量化后的原始数据矩阵，表 2 为对原始数据矩阵作处理后的标准化数据矩阵。

### 3.2 数值结果与分析

由公式 (5) 和公式 (6)，对标准化后的数据矩阵

作求取相关矩阵及其特征值，计算所获得的 6 个特征根及其贡献率如表 3 所示。

表 1 原始数据矩阵

方案	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$
$C_1$	0.70	0.88	0.83	0.78	0.84	0.87
$C_2$	0.89	0.92	0.91	0.82	0.78	0.93
$C_3$	0.84	0.93	0.90	0.78	0.81	0.83
$C_4$	0.92	0.91	0.82	0.78	0.83	0.72
$C_5$	0.79	0.87	0.92	0.73	0.89	0.82
$C_6$	0.81	0.83	0.91	0.82	0.70	0.77
$C_7$	0.78	0.76	0.93	0.90	0.86	0.83

表 2 标准化数据矩阵

方案	$p_1$	$p_2$	$p_3$	$p_4$	$p_5$	$p_6$
$C_1$	0.122 2	0.144 3	0.133 4	0.139 0	0.147 1	0.150 8
$C_2$	0.155 3	0.150 8	0.146 3	0.146 2	0.136 6	0.161 2
$C_3$	0.146 6	0.152 5	0.144 7	0.139 0	0.141 9	0.143 8
$C_4$	0.160 6	0.149 2	0.131 8	0.139 0	0.145 4	0.124 8
$C_5$	0.137 9	0.142 6	0.147 9	0.130 1	0.155 9	0.142 1
$C_6$	0.141 4	0.136 1	0.146 3	0.146 2	0.122 6	0.133 4
$C_7$	0.136 1	0.124 6	0.149 5	0.160 4	0.150 6	0.143 8

表 3 主成分分析的过程计算结果 %

项目	特征根	贡献率	累计贡献率
$t=1$	2.149 740	35.83	35.83
$t=2$	1.400 770	23.35	59.18
$t=3$	1.150 190	19.19	78.37
$t=4$	0.712 495	11.87	90.24
$t=5$	0.549 425	9.17	99.41
$t=6$	0.036 258	0.60	100.00

因为前 4 项特征根的累计贡献率为 90.24% > 85%，所以可以用第一、二、三、四主成分作为评价的综合指标，且评价的可信度可达 90.24%。另外，依据表 3 中的特征根  $\lambda_t$  可获取相应的特征向量  $a_t$ ，进而可求得前 4 个主分量，即

$$\begin{aligned} F_1 &= -0.462 2Y_1 - 0.878 1Y_2 + 0.681 1Y_3 + 0.788 8Y_4 - 0.039 0Y_5 + 0.278 5Y_6 \\ F_2 &= 0.700 9Y_1 + 0.003 5Y_2 + 0.144 2Y_3 + 0.385 2Y_4 - 0.773 8Y_5 - 0.377 9Y_6 \\ F_3 &= 0.161 1Y_1 + 0.458 1Y_2 + 0.402 5Y_3 - 0.050 1Y_4 - 0.211 9Y_5 + 0.839 6Y_6 \\ F_4 &= 0.468 3Y_1 - 0.030 5Y_2 + 0.415 4Y_3 - 0.043 0Y_4 + 0.546 9Y_5 - 0.136 9Y_6 \end{aligned}$$

因此，采用主成分分析法的综合评估值函数  $A$  可表示为

$$A = 0.358 3F_1 + 0.233 6F_2 + 0.191 7F_3 + 0.118 7F_4 \quad (11)$$

由此可得 7 个备选队形的综合评估值数据，详见表 4。由表中数据可知：菱形队形从 7 个队形方案中脱颖而出，具备最优的水面舰艇防空和防潜的作战性能，而其他的评估排序结果依次为人字、梯形、横队、环形、纵队和楔形队形。另外，表 4 还给出了基于离差最大化法的评估结果，离差最大化方法<sup>[8]</sup>是一种客观评估方法，其指标权重来源于原始数据矩阵中的实际输入数据。分析可知：2 种不同方法所获得的综合排序结果完全一致，进一步表明了采用主成分分析法可定性反映不同编队队形方案之间的差异性。另外，主成分分析法所获得的综合评估值在不同方案之间的量值差异较大，这反映

出该方法在编队方案评估时具有较好的区分度。

表 4 备选队形方案的综合评估值及排序

方案	主成分分析法		离差最大化方法	
	综合评估值	综合排序	综合评估值	综合排序
C <sub>1</sub>	1.183 8	2	0.144 8	2
C <sub>2</sub>	1.465 9	1	0.150 1	1
C <sub>3</sub>	1.072 9	3	0.143 4	3
C <sub>4</sub>	0.843 8	4	0.142 8	4
C <sub>5</sub>	0.542 3	5	0.142 6	5
C <sub>6</sub>	0.225 8	6	0.139 3	6
C <sub>7</sub>	0.034 1	7	0.137 0	7

### 4 结束语

实例分析表明,应用主成分分析法对水面舰艇编队同时面临防空与防潜作战的队形问题进行综合评估是有效且可靠的,并可得到如下结论:

1) 影响水面舰艇编队作战性能的指标较多,且易受到各指标物理属性和数学量纲不同的干扰,因此构建科学、合理、可行的编队队形综合评估指标体系至关重要。

2) 可通过主成分分析法有效消除水面舰艇编队队形评估指标之间的耦合关系,并可有效降低输入数据矩阵的维度,为复杂且大型的综合评估问题提供了工程实用的数学评估方法。

3) 在同时面临防空与防潜作战中,水面舰艇编队采用菱形队形方式可获得较优的综合作战性能。

\*\*\*\*\*

(上接第 46 页)

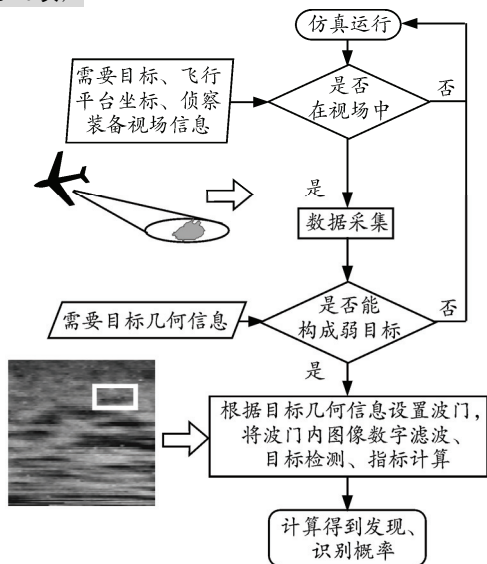


图 4 发现及识别概率基本计算流程

### 5 结论

笔者以分布式仿真技术、目标光学辐射计算理论、光学辐射传输理论和视景仿真技术为基础,在计算机软硬件平台上构造了基于分布式仿真技术的航空成像仿真系统。利用虚拟现实技术能够完整再

4) 主成分分析法可定性和定量评估编队队形的综合性能,在编队航渡阶段的防空与防潜作战应用中具有一定的实用价值。

### 参考文献:

[1] 李浩,王公宝.水面舰艇编队防潜队形优化研究[J].军事运筹与系统工程,2008,22(4):68-72.

[2] 李浩,王公宝.基于模糊 AHP 评判的舰艇编队防空队形优化研究[J].指挥控制与仿真,2008,30(5):43-46.

[3] 夏庆军,张安,张耀中.大规模编队空战队形优化算法[J].控制理论与应用,2010,27(10):1418-1422.

[4] Su C T, Tong L I. Multi-response robust design by principal component analysis[J]. Total Quality Management, 1997, 8(6): 409-416.

[5] Qu J F, Bi Y, Xiao W B. Integrated evaluation of ship maneuverability based on the method of maxing deviation[C]//Proceedings of the International Conference on Energy and Environmental Protection, Hohhot, China: Trans Tech Publications, 2012: 3888-3895.

[6] 罗家洪,方卫东.矩阵分析引论[M].广州:华南理工大学出版社,2013:47-86.

[7] Guo Q, Wub W, Massart D L, et al. Feature selection in principal component analysis of analytical data[J]. Chemo Metrics and Intelligent Laboratory Systems, 2002, 61(1-2): 123-132.

[8] 王应明.运用离差最大化方法进行多指标决策与排序[J].系统工程与电子技术,1998,20(7):24-31.

现成像链的各个环节,并实时根据仿真航拍图像对航空成像装备进行指标评估。利用该仿真系统能够有效缩短航空成像系统的研发周期、降低研发和外场试验成本,克服时间、环境、地域的限制,提高航空成像系统的方案论证、设计、测试、评估和应用的效率。

### 参考文献:

[1] 郭齐胜,罗小明,董志明,等.装备作战仿真概论[M].北京:国防工业出版社,2007:19-33.

[2] Leachtenauer J C. General Image Quality Equation: GIQE[J]. Appl.Opt., 1997, 36(32): 8322-8328.

[3] 康圣,刘侃,杨磊.无人机可见光相机成像质量影响因素分析[C].第八届国防科技前沿论坛论文集,北京:国防工业出版社,2013.

[4] 彭晓源.系统仿真技术[M].北京:北京航空航天大学出版社,2006:34-35.

[5] 黄有为,金伟其,王霞,等.红外视景仿真技术及其研究进展[J].光学与光电技术,2008,12(6):91-96.

[6] 张明明.复杂背景下空中目标红外图像仿真研究[D].中国科技大学,2011.

[7] VT MAK Corporation. SensorFX Users Guide[M]. Cambridge: VT MAK Corporation, 2013.