

引用格式:赵久奋,唐勤洪,王伟,等.基于主成分分析的空袭目标主攻方向判断[J].电光与控制,2018,25(7):29-33. ZHAO J F, TANG Q H, WANG W, et al. Judgment of main attack direction of air-raid target based on principal component analysis[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(7):29-33.

基于主成分分析的空袭目标主攻方向判断

赵久奋¹, 唐勤洪¹, 王伟², 王海峰³, 史绍琨¹

(1. 火箭军工程大学,西安 710025; 2. 中国人民解放军61683部队,北京 100000;
3. 中国人民解放军94028部队,陕西 咸阳 712200)

摘要: 敌空袭目标主攻方向判断是作战指挥的重要依据。着眼于要地防空作战决策需求,分析了影响空袭目标主攻方向的9个重要指标,考虑到火力单元最小部署间距,运用灰色关联聚类方法,对空袭目标子方向进行合理划分;利用主成分分析法对影响指标降维处理,减少了指标间相关性和计算量,并建立了综合评价模型计算得出方向排序。算例结果表明,该方法正确可行。

关键词: 要地防空; 灰色关联聚类; 部署间距; 主成分分析; 主攻方向判断

中图分类号: V271.4; O213.2 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.07.006

Judgment of Main Attack Direction of Air-raid Target Based on Principal Component Analysis

ZHAO Jiu-fen¹, TANG Qin-hong¹, WANG Wei², WANG Hai-feng³, SHI Shao-kun¹

(1. Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China; 2. No. 61683 Unit of PLA,
Beijing 100000, China; 3. No. 94028 Unit of PLA, Xianyang 712200, China)

Abstract: The judgment about the main direction of the enemy air attack is very important for operational command. This paper focuses on the need of decision-making for air defense of critical area and analyzes the nine major indicators that affect the main direction of the air-raid target. With consideration of the minimum deployment spacing between the firepower units, the gray relational clustering method is used to rationally divide the sub-directions. The Principal Component Analysis (PCA) method is used for dimensionality reduction of the impact indexes, which reduces the correlation among the indexes and the calculation cost. A comprehensive evaluation model is built to calculate the sorting of the directions. The results show that the method is correct and feasible.

Key words: air defense of critical area; gray correlation clustering; deployment spacing; principal component analysis; main direction judgment

0 引言

随着现代兵器的高速发展、作战方式灵活多变、战术战法不断创新,我方重点要害部位可能在未来战争中面临着精确制导武器的多批次、多方向的饱和攻击。在防空阵地部署前对敌方空袭目标主攻方向进行合理判断,有利于提高防御资产的生存能力。主攻方向判断主要体现在两个方面:一是敌方空袭可能方向范围的确定;二是空袭目标可能攻击方向的评估排序。

对于敌方空袭可能方向范围的划分,文献[1]中将空袭方向按照全方位均分为8个方向,虽然考虑全面,但是其划分不太符合实际作战背景,存在随意性;文献[2]中没有定义可能的攻击范围,根据空袭目标的测量数据区分出主攻方向,此方法不能在发现空袭目标之前进行方向判断,不利于防御系统的部署。对于空袭目标可能攻击方向的评估排序,文献[3]利用BP神经网络方法对空袭目标的主攻方向进行判断,考虑的因素不够全面,对专家评判依赖较大;文献[4-5]采用多指标模糊优选方法,将多指标评判与优化算法相结合,但是没有考虑不同影响因素间的相关性。影响敌空袭目标主攻方向的因素很多,有的相互独立,有的相互联系。目前研究空袭目标主攻方向的方法有

收稿日期:2017-07-22

修回日期:2017-08-16

作者简介:赵久奋(1970—),男,陕西合阳人,博士,副教授,硕士,研究方向为导航、制导与控制。

聚类分析方法、层次分析方法和模糊优选方法等^[6]。

针对上述问题,本文首先引入火力单元部署最小间距进行方向初始划分,利用灰色关联度进行聚类分析,建立相对独立的空袭目标进攻子方向。如果对每个因素进行全面讨论将会增加决策的计算量,影响指挥员的决策效率。因此本文综合已有的研究成果并结合实际,分析了3类影响空袭目标主攻方向的因素,利用主成分分析法对9个具体指标进行降维处理,一定程度上消除指标间的相关性,减少了计算量,提高了决策的科学性。

1 影响空袭目标主攻方向的主要因素

现代空袭作战中,主攻方向判断受到很多因素的影响,对影响因素的合理选取与分析量化是主攻方向判断的基础。本文总结梳理出敌方、我方、自然等3类影响因素,并对每类因素中指标进行了具体的阐释和说明^[7-8]。首先提出以下假设。

1) 假设战争前期,我方由情报部门得到敌方的军事力量部署,包括军用机场位置、巡航导弹发射阵地、海基作战力量活动区域及武器性能等。

2) 假设战争前期,敌方掌握我方防空力量部署大体范围。

3) 假设战争前期,敌方掌握我方防御资产的要害部位。

在此基础上,梳理出如图1所示的主要影响因素作为评价指标。

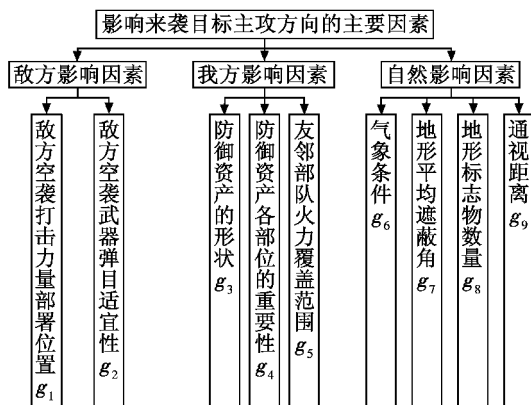


图1 空袭目标主攻方向的主要影响因素

Fig. 1 Main influence factors of the main attack direction of air-raid target

1.1 敌方影响因素

敌方影响因素对空袭目标主攻方向的影响主要体现在2个方面。

1) 敌方空袭打击力量部署位置 g_1 。远程打击力量部署位置影响不同空袭目标到防御资产的航线距离和航路捷径,军事力量航线越短和航路捷径越小的方向,

在杀伤区中停留时间越短,作为主攻方向可能性越大。

2) 敌方空袭武器弹目适宜性 g_2 。不同性能的空袭武器打击的目标不同,敌方武器对防御资产弹目适宜性越好,该武器的部署方向作为主攻方向的可能性越大。

1.2 我方影响因素

我方影响因素对空袭目标主攻方向的影响主要体现在3个方面。

1) 防御资产的形状 g_3 。防御资产的形状不同,空袭目标的打击效果不同。如果防御资产为点目标或面目标,主攻方向对打击效果影响较小;如果防御资产为线状目标,为了增大空袭武器的被弹面,通常从与防御资产纵轴 $30^\circ \sim 60^\circ$ 的方向进入攻击^[9]。

2) 防御资产各部位的重要性 g_4 。如果防御资产中各部位的重要性不同,打击重要性高的部位将会影响战争的进程。我方防御资产价值越重要,该方向作为主攻方向的可能性越大。

3) 友邻部队火力覆盖范围 g_5 。重点防御资产的周围往往存在防空力量的部署,敌方在战争前可能掌握部署情况,因此空袭目标倾向于选择火力覆盖较小的区域进行航迹规划。已知的火力覆盖范围越大,该方向作为主攻方向的可能性越小。

1.3 自然影响因素

自然影响因素对空袭目标主攻方向的影响主要体现在4个方面。

1) 气象条件 g_6 。敌方选择主攻方向时,一般会利用气象条件创造空袭目标便于瞄准和攻击的方向,并且对我方防御系统在搜索射击上造成一定阻碍。越有利于敌方瞄准的方向,作为主攻方向的可能性越大。

2) 地形平均遮蔽角 g_7 。地形遮蔽角影响空袭目标隐蔽进入并发动突然袭击。地形平均遮蔽角越大,该方向作为主攻方向的可能性越大。

3) 地形标志物数量 g_8 。为了方便瞄准并有效毁伤,敌方空袭目标通常选择易于识别的湖泊、山峰、丘陵、特殊建筑、高架桥等明显地标方向作为航向的一部分。某方向地标数量越多,该方向作为主攻方向的可能性越大。

4) 通视距离 g_9 。在有遮蔽条件下,一定高度的主攻方向上具有的通视距离越大,越有利于空袭目标瞄准并攻击防御资产。

2 基于灰色关联聚类-主成分分析的主攻方向判断

灰色关联聚类是将多个研究对象序列之间关系的紧密性作为聚类的判定依据,序列间紧密性越强,关联度越大。通过聚类分析,可以将划分后的空袭空域进

行一定整合,更符合作战实际^[10-11]。主成分分析是一种采用少量综合指标来代替原来多个指标大部分信息的降维分析方法,以主成分的方差贡献率为权重,构建综合评价模型,完成对敌主攻方向的判断。

2.1 空袭空域初始划分

在以往的空袭目标主攻方向研究中,空袭方向划分大概有两种方式:1) 按照方位分为“东、西、南、北、东北、东南、西南、西北”等 8 个方向;2) 按照某一个角度对某个空袭方向进行均分,划分存在随意性。本文对空袭方向引入火力单元最小部署间距进行初始划分,为进一步空袭空域聚类分析打下基础。

1) 确定空袭目标的可能范围。

以最大探测距离 R_{\max} 为远界,安全线 R_{bombing} 为近界。假设当敌军进攻防御资产的武器沿最短路径飞行,以防御资产为圆心,最大探测距离为半径画圆,过 T_1 和 T_3 分别做该圆的切线,分别交于 A 和 B,此时方位角 θ_1, θ_2 ($\theta_1 < \theta_2$) 构成的扇形区域表示空袭目标的进攻方向范围,如图 2 所示。

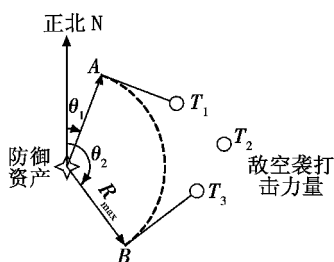


图 2 空袭目标攻击方向范围

Fig.2 Attack direction range of air-raid target

2) 空袭范围子方向划分。

空袭范围子方向的大小与防御系统武器性能有关,考虑到火力单元占地范围、防护角度和安全射击距离等,每个子空域宽度至少可以并排部署 2 部中程防空武器,设子空域的数量为 n_{hf} ,则

$$n_{hf} = \frac{(\theta_2 - \theta_1) R_{\text{bombing}}}{d_{\min}^e} \quad (1)$$

式中: d_{\min}^e 表示 2 部末端防御系统部署的最小间距。

2.2 灰色关联聚类原理

存在一个聚类问题,设 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 为 n 个空袭方向, $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 为 m 个影响指标。

1) 影响指标量化。对样本 x_i ($1 \leq i \leq m$), 按属性 u_j ($1 \leq j \leq n$) 进行量化,得到 x_i 关于 u_j 的属性值 x_{ij} ,量化的标准参照文献[1]的量化方法,得到序列如下

$$\begin{cases} X_1 = (x_{11}, x_{12}, \dots, x_{1n}) \\ \vdots \\ X_m = (x_{m1}, x_{m2}, \dots, x_{mn}) \end{cases} \quad (2)$$

从而构成数据矩阵 $A = (x_{ij})_{m \times n}$ 。由于对不同影响指

标的量化值在量纲、单位、数量级等方面存在不一致的情况,所以要进行数据的标准化处理,本文采用的方法为极差变换法^[12-13]。

2) 计算关联度矩阵。

由定理得,对于式(2)中的相关序列,当 $\xi \in (0, 1)$ 时,令

$$\gamma(x_0(k), x_i(k)) = \frac{\min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (3)$$

$$\gamma(X_0, X_i) = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \gamma(x_0(k), x_i(k)) \quad (4)$$

则 $\gamma(X_0, X_i)$ 满足灰色关联四公理,其中, ξ 为分辨系数, $\gamma(X_0, X_i)$ 称为 X_0 与 X_i 的灰色关联度。

根据式(3)和式(4),计算出 X'_i 与 X'_j 的灰色关联度 $\gamma(X'_i, X'_j)$, 记作 γ_{ij} ^[14]。得到关联度矩阵为

$$A_1 = \begin{pmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \dots & \gamma_{1m} \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \dots & \gamma_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \gamma_{m1} & \gamma_{m2} & \dots & \gamma_{mm} \end{pmatrix} \quad (5)$$

为实现聚类,利用 $B = (A_1 + A_1^T)/2$, 取 γ_{ij} 和 γ_{ji} 的平均值,得到 $B = (b_{ij})_{m \times n}$, 其中

$$b_{ij} = (\gamma_{ij} + \gamma_{ji})/2 \quad 1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq m \quad (6)$$

3) 设定关联度阈值进行聚类分析。

取关联度阈值 $r \in (0, 1)$, 一般要求 $r > 0.5$, 当 $b_{ij} \geq r$ ($i \neq j$), 且划分的空袭空域 2 个序列相邻, 则将 X_i 与 X_j 视为同一类, 即将空袭空域子方向进行合并。

2.3 主成分分析原理

设 x_1, x_2, \dots, x_p 分别代表 p 个影响指标, 集合 $C = \{c_1, c_2, \dots, c_p\}$ 表示各影响因素对应的权重。将每个可能空袭方向各影响指标加权和表示为

$$s_j = c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_p x_p \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

采用新变量 s_1 来代替原来 p 个变量, 该变量用于反映原变量信息, 如果第 1 主成分不能够将原信息反映完全, 那么将继续引入第 2 主成分 s_2 , 以此类推。当 s_1, s_2, \dots, s_n 的值很分散时, 表明容易决策主攻方向。问题的数学模型为

$$C_{\text{opt}} = \arg \max_c \text{var}(c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_p x_p) \quad (8)$$

约束条件为

$$\sum_{i=1}^p c_i^2 = 1 \quad (9)$$

1) 主成分计算分析。

根据灰色关联聚类原理中对数据矩阵和规范化矩阵的描述, 设相关系数矩阵为 $D = (d_{ik})_{n \times n}$, 其中

$$d_{ik} = \frac{\sum_{j=1}^m a_{ji} a_{jk}}{n - 1} \quad i, k = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

式中, d_{ik} 是第 i 个指标和第 k 个指标的相关系数, 满足 $r_{ii} = 1, r_{ik} = r_{ki}$ 。计算相关系数矩阵 D 的特征值 (满足 $\lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_n \geq 0$) 和对应的特征向量 (u_1, u_2, \dots, u_n), 其中 $u_j = (u_{1j}, u_{2j}, \dots, u_{nj})^T$, 所以新变量 $s_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 可以表示为

$$\begin{cases} s_1 = c_{11}\tilde{x}_1 + c_{12}\tilde{x}_2 + \dots + c_{n1}\tilde{x}_n \\ s_2 = c_{12}\tilde{x}_1 + c_{22}\tilde{x}_2 + \dots + c_{n2}\tilde{x}_n \\ \vdots \\ s_n = c_{1n}\tilde{x}_1 + c_{2n}\tilde{x}_2 + \dots + c_{nn}\tilde{x}_n \end{cases} \quad (11)$$

式中: s_1 是第 1 主成分, s_2 是第 2 主成分, 以此类推。

2) 累计方差贡献率计算。

根据贡献率的定义, 接下来依次计算特征值 $\lambda_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 的方差贡献率和累计方差贡献率。设 $b_j = \lambda_j / \sum_{j=1}^n \lambda_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为主成分 s_j 的方差贡献率; $\alpha_j = \sum_{m=1}^j b_m$ 为主成分 s_j 相对应的累计方差贡献率。在此设定 α_j 的阈值, 当 $\alpha_j \geq 0.95$ 时, 选择前 j 个主成分替代原始指标影响因素, 进行空袭目标主攻方向的分析判断。

3) 建立综合评价模型。

将选择的主成分贡献率作为评价模型的权重, 建立评价模型为

$$Z = \sum_{m=1}^j b_m S_m \quad (12)$$

式中, b_m 为第 m 个主成分的方差贡献率。结合灰色关联聚类得到的空袭方向划分, 对其进行综合评价并排序, 完成空袭目标主攻方向的判断。

3 算例仿真

假定某防御资产面临敌方突袭威胁, 防御资产周围地形和敌方远程打击力量部署如图 3 所示, 设防御资产投弹圈 $R_{amp} = 50 \text{ km}$, 各地标的具体位置如表 1 所示。

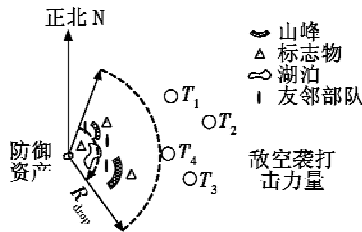


图 3 防御资产周围地形和敌方空袭力量部署

Fig. 3 The terrain around defense asset and enemy air-attack forces deployment

表 1 地标同防御资产间位置关系

Table 1 Relationship between landmark and defense assets

地标	方位/(°)	距离/km	海拔/m
空袭力量 1	59	175	0
空袭力量 2	75	200	0
空袭力量 3	110	180	0
空袭力量 4	90	155	0
标志物 1	55	80	100
标志物 2	60	30	100
标志物 3	105	108	100
山峰 1	33 ~ 58	53	600
山峰 2	95 ~ 130	90	400
湖泊	61 ~ 128	48	0
友邻部队 1	30	50	100
友邻部队 2	85	75	120
友邻部队 3	109	78	130

3.1 空袭空域初始划分

设弹炮结合末端防御系统最小部署间距为 1 km, 安全线 $R_{bombing}$ 为 4 km, 防御资产看作线性目标, 坐南朝北。根据式 (1) 计算得到 $n_{bf} = 5$, 所以对空袭范围进行划分并评价量化, 如表 2 所示。

表 2 空袭子方向量化表

Table 2 Sub-space quantization of air attacking

主攻方向/(°)	敌方影响			我方影响			自然影响		
	g_1	g_2	g_3	g_4	g_5	g_6	g_7	g_8	g_9
20 ~ 44.8	1	1	1	1	4	1	3	2	3
44.8 ~ 69.6	1	1	3	1	4	2	1	3	1
69.6 ~ 94.4	3	2	2	2	5	2	3	2	3
94.4 ~ 119.2	2	3	2	3	3	2	2	2	1
119.2 ~ 144	1	3	3	2	2	1	1	1	2

3.2 空袭子方向聚类分析

由量化表得到初始数据矩阵 A , 对数据进行归一化处理, 由式 (3)、式 (4)、式 (6) 求得灰色关联度矩阵。经过两次聚类, 最终得到灰色关联度矩阵为^[15]

$$b_{ij}(2) = \begin{pmatrix} 1 & 0.65 & 0.64 & 0.49 \\ 0.65 & 1 & 0.51 & 0.58 \\ 0.64 & 0.51 & 1 & 0.64 \\ 0.49 & 0.58 & 0.64 & 1 \end{pmatrix}$$

当设定阈值 $r = 0.8$, 第一次聚类中空域子方向 (94.4° ~ 119.2°) 与 (119.2° ~ 144°) 可以合并, 第二次聚类中空域子方向不能继续合并, 所以空袭范围划分方向分别为 (20° ~ 44.8°), (44.8° ~ 69.6°), (69.6° ~ 94.4°) 和 (94.4° ~ 144°)。

3.3 主成分分析确定空袭主攻方向

3.3.1 计算相关系数矩阵

由2.3节中主成分原理的计算步骤,根据式(10)得到9个影响指标的相关系数矩阵为

$$D = \begin{pmatrix} 1 & 0.636 & \cdots & -0.522 & -0.302 \\ 0.636 & 1 & \cdots & -0.522 & -0.302 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ -0.522 & -0.522 & \cdots & 1 & -0.577 \\ -0.302 & -0.302 & \cdots & -0.577 & 1 \end{pmatrix}。$$

3.3.2 主成分确定和累计方差贡献率计算

通过矩阵计算,相关系数矩阵的部分特征值和累计贡献率如表3所示。

表3 主成分分析结果

Table 3 Results of principal component analysis

主成分	特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	4.002	44.470	44.470
2	3.279	36.433	80.903
3	1.179	19.098	100

从表3可知,特征值 $\lambda_1 = 4.002, \lambda_2 = 3.279, \lambda_3 = 1.179$,前3个主成分的累计方差贡献率达100%,即涵盖了绝大部分信息,表明前3个主成分能够代表9个影响指标来分析影响各空袭子方向的因素。

3.3.3 主攻方向确定

通过矩阵计算,求得前3个主成分对应的特征向量,3个主成分可以表示为

$$\begin{cases} s_1 = -0.1569 \tilde{x}_1 + 0.0195 \tilde{x}_2 + \cdots - 0.4635 \tilde{x}_9 \\ s_2 = 0.4154 \tilde{x}_1 + 0.5446 \tilde{x}_2 + \cdots - 0.1213 \tilde{x}_9 \\ s_3 = 0.4418 \tilde{x}_1 - 0.1228 \tilde{x}_2 + \cdots + 0.2312 \tilde{x}_9 \end{cases}。 (13)$$

对特征向量进行分析,第1主成分综合反映了第3,5,7,8个影响指标,第2主成分综合反映了第2,4个影响指标,第3主成分综合反映了1,6,9个影响指标。

由式(12)可得,综合评价模型表示为

$$Z = 0.4447s_1 + 0.3643s_2 + 0.1910s_3。 (14)$$

对每个空袭子方向计算3个主成分,代入评价模型并排序,结果见表4。

表4 空袭子方向排序

Table 4 Sorting of air-attack sub-directions

	空袭方向/(°)			
	20~44.8	44.8~69.6	69.6~94.4	94.4~144
排序	4	2	3	1
评价值	-2.935	1.326	-0.259	1.868

由排序可以得到,在(94.4°~144°)子方向最可能为空袭目标主攻方向,(44.8°~69.6°)子方向次之。

4 结束语

防空袭目标主攻方向判断能够为末端防御系统优

化部署打下坚实基础,是要地得以生存的重要举措。本文首先总结梳理出影响空袭目标主攻方向的9个重要指标,利用灰色关联聚类方法对空袭目标子方向进行了科学合理的划分,减少了评价对象的数量和算法求解的计算量。其次,采用主成分分析法对9个指标进行降维处理,通过3个主成分反映了影响主攻方向的因素,一定程度上消除了指标间的相关性。最后,通过算例仿真得出,该方法计算过程得到优化,计算结果比较合理。下一步工作将优化指标量化方法并改进综合评价模型,以提高判断结果的准确性。

参考文献

- [1] 刘蕊,李相民,刘立佳.要地防空空袭目标主攻方向判断[J].兵工自动化,2012,31(10):60-63.
- [2] 董奎义,杨根源,粘松雷.基于模糊聚类方法的空袭目标攻击方向判断[J].舰船科学技术,2011,33(1):108-111.
- [3] 吴家明.地面防空武器系统混合部署方法研究[D].长沙:国防科学技术大学,2009.
- [4] 杨涛,王玉生,谭斌.多指标优选方法在敌主攻方向判断中的应用[J].舰船电子工程,2010,30(4):50-53.
- [5] 周海军,曹宁,熊平.基于多指标模糊优选方法对敌空袭主攻方向的判定[J].战术导弹技术,2005(2):39-40.
- [6] 程启月,邱苑华.作战指挥效能评估的模糊优选决策分析[J].系统工程理论与实践,2002,22(9):112-116.
- [7] 胡林,刘仁,权建峰.基于地形梯度法的巡航导弹来袭方向判断[J].电光与控制,2008,15(4):78-80,97.
- [8] 缪旭东,王永春.舰艇编队潜在空中威胁估计的解析几何方法[J].电光与控制,2014,21(1):7-10,27.
- [9] 武文军.美军空袭作战研究[M].北京:军事科学出版社,2005.
- [10] 公丽艳,孟宪军,刘乃侨.基于主成分与聚类分析的苹果加工品质评价[J].农业工程学报,2014,30(13):276-284.
- [11] 吕俊伟,樊利恒,邓江生,等.基于聚类集成的半监督多/高光谱图像分类方法[J].电光与控制,2016,23(5):30-36.
- [12] 许云飞.灰色聚类分析方法介绍[J].山东交通科技,1999(2):41-44.
- [13] 曾辉,王颖龙,郭浩波.一种优化模糊聚类方法在空情分析中的应用[J].电光与控制,2007,14(3):66-68.
- [14] 付永强.灰色关联模糊聚类法的研究及应用[D].西安:西安建筑科技大学,2014.
- [15] 李相民,刘立佳,颜骥,等.要地防空阵地部署前空袭兵器进袭方向预先判断[J].系统工程理论与实践,2014,34(5):1330-1338.