

# 基于集对分析的防空导弹装备红外伪装能力评估

张海瑞, 李彦彬, 邢瑞康, 马新鹏

空军工程大学防空反导学院, 陕西 西安 710051

**摘要** 随着高技术的发展及其在军事上的广泛应用,现代红外侦察能力得到不断提升,这也促进了红外伪装能力的发展。针对目前防空导弹装备红外伪装能力的指标体系不健全及其量化评估困难等问题,提出了综合评估其红外伪装能力的指标体系和方法。该体系从红外侦察能力、红外隐真能力和红外示假能力三个方面系统地分析了防空导弹装备的红外伪装能力,通过基于综合赋权法的集对分析模型对防空导弹装备的红外伪装能力进行综合评估,再通过算例分析,对该评估体系及方法进行数据分析。分析结果表明,防空导弹装备红外伪装能力的建设方向是全方位、多波段和体系化。

**关键词** 红外; 防空导弹装备; 红外伪装能力; 综合赋权法; 集对分析

中图分类号 E951.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.070402

## Evaluation of Air Defense Missile Infrared Camouflage Capability Based on Set Pair Analysis

Zhang Hairui, Li Yanbin, Xing Ruikang, Ma Xinpeng

Air and Missile Defense College, Air Force Engineering University, Xi'an, Shaanxi 710051, China

**Abstract** With high technology development and its extensive application in the military, the modern infrared reconnaissance capability has been continuously improved, which also promotes the development of infrared camouflage capability. For the imperfect index system of the air defense missile infrared camouflage capability and the difficulty in quantitative evaluation, a comprehensive index system is proposed. We analyze the air defense missile infrared camouflage capability from the three aspects of infrared reconnaissance capability, infrared implicit capability, and infrared false capability. The evaluation of air defense missile infrared camouflage capability is conducted by the set pair analysis model based on the comprehensive weighting method, and the method is verified through an example. The analysis results show that the construction direction of the air defense missile infrared camouflage capability is all-directional, multi-band, and systematic.

**Key words** infrared; air defense missile; infrared camouflage capability; comprehensive weighting method; set pair analysis

**OCIS codes** 040.3060; 130.3060; 260.3060

## 1 引言

随着现代侦察技术的发展,特别是红外技术的不断发展<sup>[1-3]</sup>,战场信息的透明化程度越来越高,导致防空导弹装备的红外伪装日益困难。这在一定程度上促进了红外伪装技术的发展,从而产生了大量对抗红外侦察的伪装材料、技术和方法,如纳米材料在红外伪装方面的应用、半导体涂料的研究应用以

及智能伪装材料的研究等,这些方法在一定程度上提升了红外伪装能力。

对目标红外伪装技术的评估也成为红外技术研究的热点之一,现有的评估方法主要包括现场实地判别或通过图像进行判别的实地检测人工判别方法<sup>[4]</sup>,提取伪装前后红外图像特征数据的图像检测方法<sup>[5-8]</sup>,以及基于红外目标可探测性模型的计算机模型方法<sup>[9]</sup>等。各评估方法均有一定的科学性和合

收稿日期: 2018-01-12; 收到修改稿日期: 2018-01-18

作者简介: 张海瑞(1994—),男,硕士研究生,主要从事国防采办与项目管理方面的研究。E-mail: 15529307508@163.com

导师简介: 李彦彬(1968—),男,硕士,副教授,主要从事国防采办与项目管理方面的研究。E-mail: yuanchen4@sina.com

理性,但尚未形成一整套适用于军事领域的红外伪装综合评估流程,并且大多数方法都是从红外伪装目标的角度进行伪装能力评估,具有一定的局限性。

本文从伪装与侦察的角度出发,提出了针对侦察与伪装双方的多指标评估体系,并建立了红外伪装能力的评估模型,通过实验与计算验证了该方法的有效性。

## 2 防空导弹装备红外伪装能力分析

防空导弹装备是以天线收发车、导弹发射车、电源车等需产生红外辐射以完成其规定动作的系列装备。由于作战任务的需求,防空导弹装备的红外辐射能力较强,这为红外成像侦察装备提供了可靠信息,因而其战场生存能力明显下降。同时,随着高技术红外侦察器材的更新换代,防空导弹装备的红外伪装能力建设已成为迫切需要体系化研究的重点内容。结合相关文献及指标体系建立原则,防空导弹装备的红外伪装能力可以从红外侦察能力、红外隐身能力和红外示假能力三个方面进行评估。

### 2.1 红外侦察能力

红外侦察能力是指利用目标发射或反射红外线的特性,以红外探测器为工具,通过光电变换作用形成红外图像的能力。在红外侦察时,影响其侦察器材侦察能力的指标主要有空间分辨率、温度分辨率和距离。

#### 2.1.1 空间分辨率

空间分辨率是指像素所代表的地面范围,即扫描仪的瞬时视场。而调制传递函数(MTF)是一个在空间频率范围内信号传递的度量标准,可对空间分辨率进行量化<sup>[10]</sup>。

对一个能量呈正弦分布的物体,其调制度为

$$M_0 = \frac{b_0}{b_1}, \quad (1)$$

式中: $b_0$ 为平均能量; $b_1$ 为能量起伏。设物体经红外成像系统成像后的调制度为 $M_i$ ,则光学系统对某一频率的MTF为

$$\varphi_{\text{MTF}}(f_x) = \frac{M_i}{M_0}, \quad (2)$$

式中: $\varphi_{\text{MTF}}$ 为光学系统的MTF; $f_x$ 为频率。一般的MTF如图1所示。

#### 2.1.2 温度分辨率

温度分辨率是指红外传感器分辨地表热辐射最小差异的能力。噪声等效温差(NETD)是指当红外成像系统输出端产生的峰值信号与方均根噪声电压

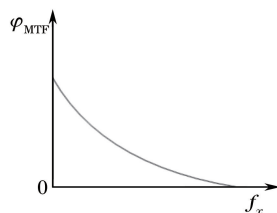


图1 MTF示意图

Fig. 1 MTF schematic

之比为1时的目标与背景的温差,是反映客观信噪比限制的温度分辨率。

对单元探测器光机扫描方式,其NETD为<sup>[10]</sup>

$$\kappa_{\text{NETD}} = \frac{\pi^{3/2} f' \sqrt{W_H W_V F'}}{2\sqrt{\eta} \alpha \beta A_0 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Gamma(\lambda) D^*(\lambda) \frac{\partial M_\lambda(T_B)}{\partial T_B} d\lambda}, \quad (3)$$

式中: $f'$ 为焦距; $W_H$ 、 $W_V$ 为观察视场角; $F'$ 为帧速; $\eta$ 为扫描效率; $\alpha$ 、 $\beta$ 为瞬间视场角; $A_0$ 为入瞳面积; $\Gamma(\lambda)$ 为光谱透过率; $D^*(\lambda)$ 为比探测度; $M_\lambda(T_B)$ 为光谱辐射出射度; $\lambda$ 为系统的工作波长; $T_B$ 为黑体温度; $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 为系统工作的波段范围。

#### 2.1.3 距离

对于军用红外探测系统来说,作用距离包括探测距离、识别距离和确认距离。本文以探测距离为主要指标,基于探测距离可将红外探测器分为I、II、III类<sup>[11]</sup>。

### 2.2 红外隐身能力

红外隐身能力是指主要通过消除、减小或改变目标与背景间中远红外波段两个大气窗口辐射特性的差别来进行伪装的能力。热辐射是物体的固有属性,在对防空导弹装备进行隐身伪装时,要考虑到目标形状、发射率以及温度三个因素对隐身能力的影响。

#### 2.2.1 目标形状

目标形状是红外辐射的主要影响因素,也是量化评估的重要指标。使用涡轮风扇发动机、改造喷管形状、优化内壁构造等措施都能够有效地减少红外辐射。

#### 2.2.2 发射率

根据斯特藩-玻尔兹曼定律,发射率为 $\epsilon$ 的物体在单位时间内单位面积上向半球空间辐射的总能量为

$$M = \epsilon \sigma T^4, \quad (4)$$

式中: $\sigma$ 为黑体辐射常数; $T$ 为物体的表面温度。

物体表面的发射率主要受物体材料种类和表面粗糙程度的影响。在研究发射率时,不仅要掌握物体自身材料的发射率,还要综合对比各种颜料、黏合剂对红外辐射的吸收降低程度。不同粗糙状态下常见材料的发射率如表1所示。

表1 不同粗糙状态下常见材料的发射率  
Table 1 Emissivity of common materials  
under different rough conditions

Common material	Emissivity	
	Rough surface	Smooth surface
Aluminum	0.06	0.04
Copper	0.8	0.25
Brass	0.2	0.06
Iron	0.73	0.14-0.38

### 2.2.3 温度

温度是影响红外伪装能力的重要指标之一。这一指标的实际影响因素包括日照、风、目标内热源、换热情况等。

### 2.3 红外示假能力

红外示假能力是指利用红外假目标或模拟原型设备的可探测性特征来达到示假目的的能力。红外假目标一般要在内部配置热源,用来模拟真目标的发热特征<sup>[12]</sup>。在配置红外假目标时,要满足逼真性、便捷性和保密性要求。

#### 2.3.1 逼真性

假目标越逼真,示假效果越好。假目标的形状、颜色、平面尺寸和大于可见尺寸的细节都应被仿制出来。设置红外假目标时,要综合考量敌人能观察到的真目标红外辐射特性,在辐射特性方面与真目标保持一致。

#### 2.3.2 便捷性

假目标应具有制作简单、携带方便等特点,便于快速架设、拆收和运输。

#### 2.3.3 保密性

设置假目标时,应隐蔽进行,遵守伪装纪律,并在设置完成后消除作业痕迹。

## 3 防空导弹装备红外伪装能力评估模型

### 3.1 综合赋权法确定指标权重

综合赋权是从评估的根本目的出发,从指标集的相对重要性、信息量、独立性和可信性综合考虑各指标对于总体目标的影响程度。采用熵值法<sup>[13]</sup>确定客观权重,采用相邻优属度法确定主观权重。

第一步,建立初始矩阵  $D = (d_{ij})_{m \times n}$ ,  $d_{ij}$  为第  $i$  批防空导弹装备第  $j$  个指标的数值。汇总  $m$  批防空导弹装备红外伪装记录数据统计需求值。同时,邀请 15 位专家及基层工作者对防空导弹装备红外伪装能力进行分析和评估,确定主观评估的指标分值,采用加权评分法求得评估对象的平均值,从而得到初始评估矩阵  $D$ 。

第二步,计算归一化矩阵  $X = (x_{ij})_{m \times n}$ ,  $x_{ij}$  为第  $i$  批防空导弹装备第  $j$  个指标归一化后的数值。当指标为效益型指标时,

$$x_{ij} = \frac{d_{ij} - \min_j d_{ij}}{\max_j d_{ij} - \min_j d_{ij}}; \quad (5)$$

当指标为成本型指标时,

$$x_{ij} = \frac{\max_j d_{ij} - d_{ij}}{\max_j d_{ij} - \min_j d_{ij}}。 \quad (6)$$

第三步,计算指标值相对强度的熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m \frac{x_{ij}}{E_j} \ln \frac{x_{ij}}{E_j}, \quad (7)$$

式中:  $E_j = \sum_{i=1}^m x_{ij}$ 。

第四步,计算客观权重

$$\delta_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j}, \quad (8)$$

式中:  $g_j = 1 - e_j$ 。

第五步,计算主观权重。在相邻优属度法中,当  $o_i$  比  $o_l$  重要时,  $0.5 < \beta_{il} \leq 1$ ; 当  $o_l$  比  $o_i$  重要时,  $0 \leq \beta_{il} < 0.5$ ; 当  $o_i$  与  $o_l$  一样重要时,  $\beta_{il} = 0.5$ , 其中  $\beta_{il}$  是  $o_i$  相对  $o_l$  的重要性模糊标度值 ( $i = 1, 2, \dots, m; l = 1, 2, \dots, m$ ) 且  $\beta_{ii} = 0.5, \beta_{il} = 1 - \beta_{li}$ 。则主观权重为

$$\theta_j = \frac{\sum_{l=1}^m \beta_{il}}{\sum_{i=1}^m \sum_{l=1}^m \beta_{il}}。 \quad (9)$$

第六步,计算综合权重

$$\omega_j = \lambda \delta_j + (1 - \lambda) \theta_j。 \quad (10)$$

### 3.2 集对分析模型的建立

集对是指具有一定联系的两个集合,而集对分析是对不确定性系统的两个有关联的集合构建集对,再对集对的特性作同一性、差异性、对立性分析,并建立集对的同异反联系度。建立集对分析模型时,对两个防空导弹装备中各红外伪装能力指标所具有的特性作同、异、反分析并加以度量。假设两个集合  $P$  和  $Q$  具有  $N$  个共有属性,其中相同属性  $S$  个,相反属性  $P$  个,相异属性  $F = N - S - P$  个,则同一度  $a = S/N$ , 差异度  $b = F/N$ , 对立度  $c = P/N$ , 由此可得出联系度

$$\mu_{P \sim Q} = a + bi + cj, \quad (11)$$

式中:  $a + b + c = 1$ 。

第一步,构造理想指标评估值。集对分析法认为,根据各项评估指标的优劣,选取其中最优者,构

成一个虚拟理想指标,计算指标数据与理想指标数据的联系度,并根据联系度确定现实中的最优结果。若  $C_j$  是成本型指标,则令

$$x_{0j} = \max\{x_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}; \quad (12)$$

若  $C_j$  是效益型指标,则令

$$x_{0j} = \min\{x_{ij} \mid 1 \leq j \leq n\}. \quad (13)$$

第二步,求出联系矩阵。在评估中,只需讨论每一个系统的单一指标值与构造的理想指标值的接近程度(联系度),即只讨论同一度。而求联系矩阵就是计算被评估结果与理想结果的同一度。在计算同一度  $r_{ij}$  时,总是较小的数除以较大的数,即

$$r_{ij} = \begin{cases} x_{ij}/x_{0j}, & x_{0j} \geq x_{ij} \\ x_{0j}/x_{ij}, & x_{ij} > x_{0j} \end{cases}, \quad (14)$$

可得联系矩阵

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix}. \quad (15)$$

第三步,联系度指标合成。利用综合赋权法得到指标权重,将求得的关系矩阵进行加权合成,得到最终评估矩阵

$$Y = R \cdot W = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \cdots & r_{mn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \vdots \\ \omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \quad (16)$$

第四步,评估结果排序。按  $y_1, y_2, \dots, y_n$  的值对防空导弹装备红外伪装能力进行排序,  $y_j$  值越大,其红外伪装能力越好<sup>[14-15]</sup>。

## 4 算例分析

根据防空导弹装备红外伪装能力分析,建立指标体系如图 2 所示。现用评估指标  $C_j$  ( $j=1, 2, \dots, 9$ ) 对 5 批防空导弹装备红外伪装能力进行评估。

根据防空导弹装备红外伪装记录数据及专家经验法可得到初始数据,如表 2 所示。

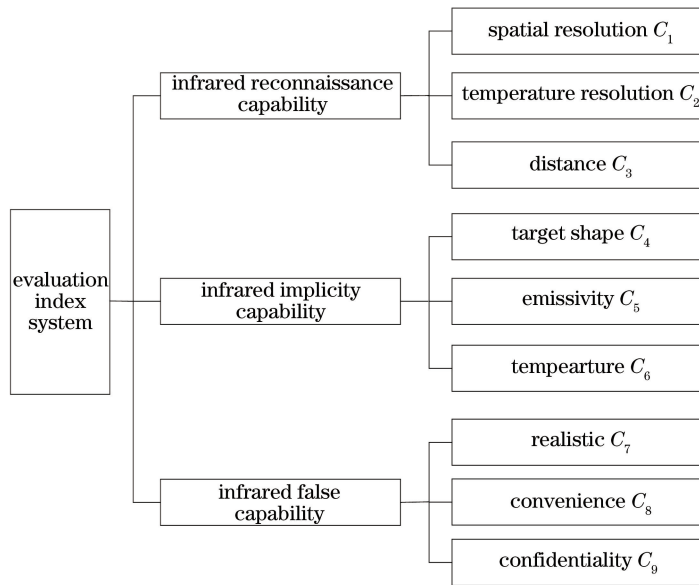


图 2 评估指标体系

Fig. 2 Evaluation index system

表 2 初始数据

Table 2 Initial data

Batch	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$	$C_8$	$C_9$
1	0.10	0.09	3000	0.85	0.55	82	0.84	0.82	0.92
2	0.15	0.05	2000	0.75	0.96	92	0.92	0.79	0.83
3	0.12	1.00	5000	0.78	0.15	88	0.90	0.83	0.85
4	0.13	1.01	4000	0.60	0.73	86	0.86	0.85	0.90
5	0.18	0.08	2500	0.80	0.20	95	0.82	0.90	0.95

#### 4.1 计算指标权重

根据(5)~(6)式可得到归一化矩阵为

$$L = \begin{bmatrix} 1 & 0.9583 & 0.6667 & 1 & 0.5062 & 1 & 0.2000 & 0.2727 & 0.7500 \\ 0.3750 & 1 & 1 & 0.6000 & 0 & 0.2308 & 1 & 0 & 0 \\ 0.7500 & 0.0104 & 0 & 0.7200 & 1 & 0.5385 & 0.8000 & 0.3636 & 0.1667 \\ 0.6250 & 0 & 0.3333 & 0 & 0.2840 & 0.6923 & 0.4000 & 0.5455 & 0.5833 \\ 0 & 0.9688 & 0.8333 & 0.8000 & 0.9383 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据(7)式可得到指标值相对强度的熵为(0.8268, 0.6947, 0.8200, 0.8507, 0.7972, 0.7935, 0.7684, 0.7846, 0.7753);根据(8)式可计算出指标客观权重向量为(0.0917, 0.1616, 0.0953, 0.0791, 0.1074, 0.1093, 0.1226, 0.1141, 0.1190);根据(9)式计算出指标主观权重向量为(0.1443, 0.1323, 0.0856, 0.1007, 0.1286, 0.1183, 0.0900, 0.0836, 0.1167);根

据(10)式可得出指标综合权重向量为(0.1063, 0.1286, 0.0898, 0.0771, 0.1204, 0.1357, 0.1119, 0.1173, 0.1129)。

#### 4.2 排序分档

根据(11)~(14)式可确定理想指标数据值为  $x_{0j} = (0.10, 0.05, 2000, 0.85, 0.15, 82, 0.92, 0.90, 0.95)$ ;根据(15)式可得联系矩阵为

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.5556 & 0.6667 & 1 & 0.2727 & 1 & 0.9130 & 0.9111 & 0.9684 \\ 0.6667 & 1 & 1 & 0.8824 & 0.1563 & 0.8913 & 1 & 0.8778 & 0.8737 \\ 0.8333 & 0.0500 & 0.4000 & 0.9176 & 1 & 0.9318 & 0.9783 & 0.9222 & 0.8947 \\ 0.7692 & 0.0495 & 0.5000 & 0.7059 & 0.2055 & 0.9535 & 0.9348 & 0.9444 & 0.9474 \\ 0.5556 & 0.6250 & 0.8000 & 0.9412 & 0.7500 & 0.8632 & 0.8913 & 1 & 1 \end{bmatrix}。$$

根据(16)式计算  $Y$  为(0.7970, 0.8112, 0.7489, 0.6438, 0.8125),并将批次按其由大到小排序。

利用集对分析模型,可得5批防空导弹装备红外伪装能力从优到劣的顺序为批次5、批次2、批次1、批次3、批次4。通过算例分析可知,基于综合赋权法的集对分析模型能够有效地对防空导弹装备红外伪装能力进行量化评估。

## 5 结论

防空导弹装备红外伪装能力是决定其战场生存能力的重要部分,信息化战争要求我国军队必须全方位、多波段和体系化地研究建设防空导弹装备的红外伪装能力,以全面提升防空导弹装备的红外伪装能力。通过系统地对防空导弹装备的红外伪装能力进行分析,从红外伪装能力、红外隐真能力和红外示假能力三方面系统地建立了红外伪装能力的评估指标体系。针对目前防空导弹装备红外伪装情况,构建了基于集对分析的评估模型。该模型可以对防空导弹装备红外伪装能力进行合理排序,为其红外伪装能力建设提供指导,具有一定的理论意义和现实价值。

## 参 考 文 献

- [1] Liu R, Wang D J, Jia P, *et al.* Overview on small target detection technology in infrared image [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 050004.  
刘让, 王德江, 贾平, 等. 红外图像弱小目标探测技术综述[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 050004.
- [2] Yang F C, Yang D D, Mao N, *et al.* Robust infrared target tracking based on histograms of sparse coding [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(11): 1115002.  
杨福才, 杨德东, 毛宁, 等. 基于稀疏编码直方图的稳健红外目标跟踪[J]. *光学学报*, 2017, 37(11): 1115002.
- [3] Sun Y J, Chen H T. Circuit board infrared image enhancement based on butterfly universe algorithm [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(7): 071102.  
孙云娟, 陈洪涛. 基于蝶形宇宙算法的电路板红外图像增强研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(7): 071102.
- [4] Yang Z J, Cui D X. Introduction of military objective camouflage stealth technology[M]. Beijing: National

- Defense Industry Press, 2014: 87-88.
- 杨照金, 崔东旭. 军用目标伪装隐身技术概论[M]. 北京: 国防工业出版社, 2014: 87-88.
- [5] Wang H, Bai T Z. Infrared camouflage image evaluation using Atanassov's intuition fuzzy sets[J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(3): 181-184.
- 王贺, 白廷柱. 基于直觉模糊集的红外图像伪装评价研究[J]. *红外技术*, 2012, 34(3): 181-184.
- [6] Huang F, Wang Y F, Dong W, *et al.* Study on infrared camouflage effect evaluation based on gray correlation[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, 35(6): 928-931.
- 黄峰, 汪岳峰, 董伟, 等. 基于灰度相关的红外隐身能力评价方法研究[J]. *光子学报*, 2006, 35(6): 928-931.
- [7] Zhang P, Chen Y W, Fu Q. Fast algorithm for camouflaged people detection in infrared imagery using GMM BS[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 975-983.
- 张品, 陈亦望, 傅强. 使用 GMM 背景减除的红外伪装人体目标快速识别算法[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 975-983.
- [8] Tian S H, Chen H S, Hu Z Y, *et al.* An analysis on examination indexes of thermal infrared camouflage[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(1): 57-60.
- 田少辉, 陈宏书, 胡志毅, 等. 热红外伪装效果检测指标分析[J]. *红外技术*, 2010, 32(1): 57-60.
- [9] Fang H, Li A H, Pan Y L, *et al.* The effect evaluation of infrared camouflage simulation system based on visual similarity[J]. *Acta Armamentarii*, 2017, 38(2): 351-357.
- 方浩, 李艾华, 潘玉龙, 等. 面向视觉相似的红外伪装仿真能力评估[J]. *兵工学报*, 2017, 38(2): 351-357.
- [10] Di X. *Microlight and infrared imaging technology* [M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2012: 100-107.
- 邸旭. *微光与红外成像技术* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 100-107.
- [11] Wang Y F, Yu L J, Chen J, *et al.* Classification of military infrared detectors based on detection range[J]. *Infrared*, 2011, 32(6): 34-38.
- 王忆锋, 余连杰, 陈洁, 等. 基于探测距离的军用红外探测器分类[J]. *红外*, 2011, 32(6): 34-38.
- [12] Xing X, Cao Y, Tang G P, *et al.* The foundation of stealth camouflage technology[M]. Hunan: National University of Defense Technology Press, 2012: 66-67.
- 邢欣, 曹义, 唐耿平, 等. *隐身伪装技术基础* [M]. 湖南: 国防科技大学出版社, 2012: 66-67.
- [13] Ma Y L, Shao Q F, Sun M, *et al.* Assessing theories and methods and their military applications [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013: 54-55.
- 马亚龙, 邵秋峰, 孙明, 等. *评估理论和方法及其军事应用* [M]. 北京: 国防工业出版社, 2013: 54-55.
- [14] Ren B Y, Sun Y C, Zhou Z Y, *et al.* Comprehensive evaluation model of reservoir operation based on improved set pair analysis [J]. *Transactions of Tianjin University*, 2013, 19(1): 25-28.
- [15] Wang T, Chen J S, Wang T. Entropy weight-set pair analysis (SPA) for dam leakage detection[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2014, 36(11): 2136-2143.
- 王涛, 陈建生, 王婷. 熵权-集对分析模型探测堤坝渗漏[J]. *岩土工程学报*, 2014, 36(11): 2136-2143.