

doi: 10.7690/bgzh.2026.01.016

基于目标与背景红外融合度的伪装效果评估方法

罗 晗^{1,2}, 吕永胜^{1,2}, 郑熙川^{1,2}, 黄 杰^{1,2}, 张焕胜³

(1. 哈尔滨工程大学信息与通信工程学院, 哈尔滨 150001;

2. 青岛哈尔滨工程大学创新发展中心, 山东 青岛 266000; 3. 北京奥特维科技有限公司, 北京 100015)

摘要: 为评估目标的红外伪装效果, 基于目标与背景的红外斑块边缘特征、红外热像纹理、温度-颜色直方图、红外频谱特征, 提出一种基于融合度的红外伪装效果评估方法。开展目标与背景红外特性试验, 获取不同时刻下不同目标的红外图像数据; 研究分析不同时刻下目标与背景红外融合度的变化情况, 并结合数据对该评估方法的适用性进行验证。试验结果表明: 该方法计算过程简单直观, 能消除主观因素影响, 结果易于解析, 可为伪装辅助决策提供依据。

关键词: 伪装评估; 红外融合度; 目标与背景; 红外特征; 神经网络模型

中图分类号: TP391.41 **文献标志码:** A

Evaluation Method of Camouflage Effect Based on Infrared Fusion Degree of Target and Background

Luo Han^{1,2}, LYU Yongsheng^{1,2}, Zheng Xichuan^{1,2}, Huang Jie^{1,2}, Zhang Huansheng³

(1. College of Information and Communication Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China;

2. Qingdao Innovation and Development Center, Harbin Engineering University, Qingdao 266000, China;

3. Beijing Aotewei Technology Co., Ltd., Beijing 100015, China)

Abstract: In order to evaluate the infrared camouflage effect of the target, an infrared camouflage effect evaluation method based on fusion degree is proposed, which is based on the infrared patch edge characteristics, infrared thermal image texture, temperature-color histogram and infrared spectrum characteristics of the target and background. The infrared image data of different targets at different times were obtained by carrying out the infrared characteristic test of the target and the background. The changes of the infrared fusion degree of the target and the background at different times were studied and analyzed, and the applicability of the evaluation method was verified by combining the data. The experimental results show that the calculation process is simple and intuitive, the influence of subjective factors can be eliminated, and the results are easy to analyze, which can provide the basis for camouflage assistant decision-making.

Keywords: camouflage evaluation; infrared fusion degree; target and background; infrared feature; neural network model

0 引言

红外伪装是一种旨在使目标对红外探测系统不可见的技术, 其原理是改变目标发出的热辐射, 使目标与背景热辐射相匹配。针对不同目标不同时段红外特点, 如何评估目标的红外伪装性能, 进而指导目标进行有效的红外伪装, 降低目标被红外侦察和精导武器发现、识别和打击的概率, 已成为当前军事领域的重点研究问题。为此, 国内外学者开展了大量研究工作。

成晓鹏^[1]针对复杂背景下红外目标的伪装效能开展实时评估研究, 提出了基于图像显著性的目标红外伪装效能评估算法、基于多分行理论的目标红外伪装效能评估算法, 可以有效地比较不同目标在同一背景中的伪装效能以及相同目标在不同背景下

伪装效果的差异。Selj 等^[2]试验获取了不同时刻下, 目标与背景的热对比度信息, 基于平均热对比度研究分析早、中、晚不同时段目标的红外伪装效果, 可用于有效评估静态目标和动态目标的红外伪装性能。宋若鹏^[3]提出一种数字图像处理的红外伪装效果综合评价方法, 确定目标纹理、目标模糊不确定性和目标与典型背景结构相似度 3 个特征, 引入层次-模糊综合评价法, 完成了对于伪装效果的综合评价。美国军方在 20 世纪 70 年代就开始基于 NVL 模型的最小可分辨温差曲线来估算红外探测器的探测能力, 进而评估目标的伪装效果^[4]。Newman 等^[5]建立了 Camaeleon 软件, 以人脑的认知规律完成对目标和背景的特征提取及分析, 计算出目标和背景的相似度量而做出红外伪装效果评价。郑自强等^[6]

收稿日期: 2024-11-01; 修回日期: 2024-12-21

基金项目: 基础加强计划重点项目 (2020-JCJQ-ZD-138-11)

第一作者: 罗 晗 (1998—), 女, 贵州人, 硕士。

利用主成分分析对目标的热红外伪装效果进行评估,该方法分析目标的热红外伪装效果时,由于信息损失、非线性关系等存在一些弊端。应家驹等^[7]提出了一种基于特征融合度策略的红外动态伪装效果评估方法,该方法选择了亮度对比度、直方图特征、纹理特征以及边缘形状特征作为目标的伪装效能评估指标,利用指标信息熵的大小合理分配特征因素的权重,保证红外评估效能的可靠性。上述学者提出了各种评价方法,从不同的角度评估红外目标伪装性能。实际上,红外伪装的有效性主要取决于伪装目标与背景之间的融合度,但基于融合度的红外伪装性能评估却较为少见。融合度作为一种度量指标,可以直接反映目标与背景之间的差异,通过计算目标与背景之间的红外融合度,可以直接评估红外伪装效果的优劣,不依赖于特定的特征选择和提取过程,同时基于融合度的评估方法具有一定的通用性,适用于不同类型的目标和背景。

考虑到目标红外伪装的实质是降低目标与背景的红外特征差异,进而提高二者的红外融合度;因此,为有效评估目标的红外伪装效果,笔者基于伪装目标与背景的红外斑块形状、红外热纹理、红外频谱、温度-颜色直方图种特征,结合神经网络,提出了一种基于红外融合度的伪装效果评估方法,可以客观准确地评估目标的红外伪装效果。

1 红外融合度模型构建

1.1 红外特征指标

为建立红外融合度模型,选取目标红外特征指标,特征指标的优劣可以影响融合度的可靠性。综合考虑提取伪装目标与背景的红外斑块边缘特征、红外热像纹理、温度-颜色直方图和红外频谱 4 种特征。

1) 红外斑块边缘特征。

用轮廓信息来代表红外图像中伪装目标与背景的红外斑块边缘特征。利用 OpenCV 中的特定函数 findContours 来获取红外图像中伪装目标与背景的轮廓信息。对于每个轮廓计算面积、周长和圆形度等特征,将所有特征值合并在一起得到一个特征向量。该向量可表示该目标图像的红外斑块形状特征。对于给定的伪装目标与背景的红外图像,分别计算红外斑块分布情况以及典型红外斑块的形状特征向量,然后计算这 2 条向量之间的巴氏距离。巴氏距离可衡量 2 个概率分布之间的相似度,即考虑特征之间的协方差信息,并基于概率密度函数的重叠程

度来计算距离。相比于欧氏距离,巴氏距离对于概率分布中的协方差信息更敏感,可以更好地反映红外特征之间的统计相关性;因此,选择巴氏距离来度量形状特征相似度,通过对其进行指数函数的计算,将其转换为红外斑块边缘特征相似度分数。具体的计算过程步骤如下:

① 获取轮廓信息:使用 OpenCV 的函数 findContours 来获取红外图像中伪装目标和背景的轮廓信息,可以得到伪装目标的轮廓列表 contours_T和背景的轮廓列表 contours_B。

② 计算形状特征:对于每个轮廓,可以计算以下形状特征:

面积(Area):使用 OpenCV 的函数 contourArea 计算轮廓的面积,得到 area_T和 area_B。

周长(Perimeter):使用 OpenCV 的函数 arcLength 计算轮廓的周长,得到 perimeter_T和 perimeter_B。

圆形度(Circularity):计算公式为:

$$\text{Circularity} = 4 * \pi * \frac{\text{area}}{\text{perimeter} * \text{perimeter}} \quad (1)$$

得到 circularity_T和 circularity_B。

③ 计算形状特征向量:将计算得到的形状特征值合并成一个特征向量,表示该目标图像的红外斑块形状特征。假设特征向量分别为 feature_vector_T和 feature_vector_B,其中包含面积、周长和圆形度等特征值。

④ 计算巴氏距离:使用巴氏距离来度量形状特征的相似度。巴氏距离的计算公式为:

$$\text{Bhattacharyya} = \sqrt{1 - \exp(-0.25 * ((\text{feature_vector_T} - \text{feature_vector_B})^T * \text{inverse}(\text{covariance_matrix}) * (\text{feature_vector_T} - \text{feature_vector_B})))} \quad (2)$$

式中:上标 T 为特征向量的转置;inverse(covariance_matrix)为协方差矩阵的逆。

⑤ 红外斑块边缘特征相似度计算:利用指数函数计算巴氏距离,并将其转换为红外斑块边缘特征相似度分数。

以上公式描述了基于巴氏距离计算红外图像中伪装目标与背景的红外斑块边缘特征相似度的具体过程。通过计算轮廓的面积、周长和圆形度等特征,将其合并成特征向量,然后使用巴氏距离度量红外斑块边缘特征的相似度,可以得到一个表示红外斑块边缘特征的相似度分数。

2) 红外热纹理特征。

纹理特征是指从红外图像的纹理信息中提取出的统计特征。笔者用纹理方向直方图来对图像中的纹理进行描述和分析；首先，对红外图像中的伪装目标与背景分别进行局部二值模式(local binary patterns, LBP)特征提取^[8](LBP 是一种用于描述图像纹理特征的计算方法，通过对图像中的每个像素点及其周围像素点的灰度值进行比较和编码来提取特征)，计算灰度直方图；然后，计算每个像素的纹理方向，获得伪装目标与背景的纹理方向分布，将分布情况统计到对应直方图条目中；最后，用式(3)来计算纹理分布直方图的相似度：

$$S = \frac{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})(I_i - \bar{I})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I})^2}} \quad (3)$$

式中： T_i 和 I_i 分别为待比较的伪装目标与背景的纹理方向直方图中的第 i 个 bin (“bin” 为直方图的一个区间或柱子，每个区间就是一个 “bin”，纹理方向直方图中，每个 bin 代表了特定纹理方向范围内的统计信息。例如，如果将纹理方向范围划分为 8 个区间，那么纹理方向直方图将有 8 个 bin。每个 bin 记录了该方向范围内的纹理像素数量或频率) 的值； n 为直方图中 bin 的数目； $\bar{T}$ 和 $\bar{I}$ 分别为 2 个直方图中所有 bin 值的平均值。

式(3)计算的是 2 个纹理方向直方图之间的线性相关性，取值范围为[0, 1]，值越接近 1 表示 2 个纹理方向直方图越相似。

3) 温度-颜色直方图特征。

红外图像中伪装目标与背景呈现出来的亮度和颜色都与其温度有关：温度较高时，红外图像的像素会呈现出较亮的颜色，与其对应的颜色通常是红色、橙色或者黄色等暖色调；反之，通常为冷色调。基于红外图像的此特性，将不同温度区与不同的颜色进行关联，生成颜色-温度映射表，对红外图像进行颜色映射，生成可视化的基于辐射温度的颜色分布直方图。采用直方图之间的差异作为度量，计算 2 个该类密度函数之间的距离或者差异，常见的度量方法是 Bhattacharyya 系数和交叉熵。Bhattacharyya 系数是一种用于度量 2 个概率分布相似性的统计量，在红外图像中，伪装目标与背景的温度-颜色直方图可以被视为 2 个概率分布，用于描述它们的颜色分布特征。Bhattacharyya 系数的范围易于解释和理解，能够综合考虑直方图的形状和分布情况，同时，Bhattacharyya 系数的计算相对简单

和高效，不需要进行额外的优化或迭代过程。相比之下，交叉熵方法涉及对概率分布进行对数运算和求和，需要更多的计算资源和时间。综上所述，笔者选用 Bhattacharyya 系数计算红外图像中伪装目标与背景的温度-颜色直方图相似度，具体的计算步骤如下：

① 颜色-温度映射表生成：定义温度范围，将不同温度区域映射到对应的颜色。选择热色调(如红色、橙色、黄色)表示高温区域，冷色调(如蓝色、绿色)表示低温区域。根据温度范围和颜色选择，创建颜色-温度映射表，记录不同温度值对应的颜色。

② 基于辐射温度的颜色分布直方图生成：对红外图像中的目标区域与背景区域分别进行温度计算，将每个像素点的温度值映射到对应的颜色。统计目标区域与背景区域的每个颜色区间的像素数量，分别生成目标区域的基于辐射温度的颜色分布直方图 H_T 和背景区域基于辐射温度的颜色分布直方图 H_B 。

③ 直方图相似度计算：对于给定的伪装目标和背景的颜色分布直方图，计算 Bhattacharyya 系数。Bhattacharyya 系数的计算涉及 2 个直方图的归一化，然后计算平方根和对数，最后进行求和。Bhattacharyya 系数越接近 1，表示 2 个直方图越相似，反之越接近 0，表示 2 个直方图差异较大。

归一化后的伪装目标直方图为： $H_{T_norm} = H_T / \text{sum}(H_T)$ ；

归一化后的背景直方图为： $H_{B_norm} = H_B / \text{sum}(H_B)$ ；

Bhattacharyya 系数计算公式为： $BC = \sum (\text{sqrt}(H_{T_norm}[i] * H_{B_norm}[i]))$ ， i 代表直方图的每个 bin。

4) 红外频谱特征。

红外图像的频谱特征是由图像中物体的反射、辐射、透射、散射等特征共同决定的，不同的目标物体在红外光谱中的吸收和反射特征不同，所以频谱特征也不同。可以基于此特性来对红外图像中不同的物体进行比较分析。频谱特征主要通过傅里叶变换提取，傅里叶变换可以将一个信号在时域上的波形转换到频域上的波形，从而实现对信号的频谱分析。红外图像可以看作是一个 2 维信号，将图像中的像素点通过傅里叶变换到频域，通过获取感兴趣区域、取对数等，就可以得到红外图像的频谱特征。利用归一化互相关(normalized cross-correlation)

算法来实现伪装目标与频谱的相似度计算，其基本思想是将一个模板图像滑动到目标图像上，并计算它们之间的相似度。归一化互相关算法有很好的平移不变性和尺度不变性，在处理缩放、旋转等图像变换时具有较好的鲁棒性。具体可按照以下步骤进行：

① 数据预处理：从红外图像中选择感兴趣的区域或者目标作为模板图像，将目标图像与模板图像进行尺寸匹配，确保具有相同的大小。

② 傅里叶变换：对目标图像和模板图像进行 2 维傅里叶变换，将它们从时域转换到频域，获取频域中的幅度谱或相位谱作为频谱特征表示。

③ 频谱特征预处理：在进行归一化互相关之前，对频谱特征进行进一步的预处理（取对数、归一化或滤波等），以增强特征的表达能力或抑制噪声的影响。

④ 归一化互相关：将模板图像滑动到目标图像的不同和位置上，在每个位置上，计算模板图像域目标图像之间的归一化互相关值，作为相似度度量，归一化互相关通过式(4)计算：

$$NCC = \frac{\sum (T_i * I_i)}{\sqrt{\sum (T_i^2) * \sum (I_i^2)}} \quad (4)$$

式中： T_i 为模板图像在频域中的第 i 个频谱值； I_i 为目标图像在频域中相应位置的第 i 个频谱值。

⑤ 相似度计算：对所有滑动位置上的归一化互相关的值进行统计和比较，选择最大值作为相似度度量，表示模板图像在目标图像中的最佳匹配位置。

1.2 权重计算

权重计算方法一般有专家评分、层次分析和灰色关联^[9]等，这些方法都掺杂着主观性，当各因素之间具有不同性质时，难以客观确定其权重分配。与传统的权重计算相比，神经网络^[10-11]可以自动学习特征之间的非线性关系，处理一些传统方法不能处理的非线性模型。笔者选择神经网络来解决多特征权重分配问题。具体的计算过程如下：

1) 数据准备：提取红外目标与背景的特征计算相似度，并将其作为神经网络的输入。相似度定义为 2 个特征之间的相似程度或相关性，通常用于衡量特征在某种度量空间中的接近程度。

2) 定义神经网络：构造具有线性层的神经网络模型，线性层的输入维度为特征数量，输出维度为

1，用于预测特征相似度的权重。

3) 模型训练：使用训练数据对神经网络模型进行训练。训练的目标是使模型能够根据输入的特征数据，预测出相应的特征相似度权重。

4) 权重提取：在训练完成后，通过访问模型中的线性层权重，获取特征相似度的权重。

综上所述，用于计算特征相似度权重的神经网络模型由一个线性层组成，用于从输入的特征数据中学习特征相似度的权重。通过在前向传播函数中定义了一系列的操作，将输入数据通过线性层并进行激活函数处理，最终得到预测的特征相似度权重。相似度和融合度是 2 个相关的概念。相似度用于衡量单个特征或相似度度量结果之间的相似性。在某些情况下，单个特征或相似度度量可能无法全面准确地描述对象的相似性，而融合度可以用于将多个特征或相似度度量结果融合起来，以获得更全面、准确的相似度度量，还可提高系统的鲁棒性和性能。计算特征相似度的权重是融合度的一部分，在融合多个特征或相似度度量结果时，需要考虑各个特征的重要性或贡献度。融合度是将多个特征或相似度度量结果进行组合或融合，以得到综合的相似度度量。在融合过程中，特征相似度的权重起着重要的作用，通过为每个特征分配权重，可以控制不同特征在融合过程中的影响力，从而影响最终融合度的结果。

1.3 融合度模型

k 类背景下类型 j 目标与背景的融合度：

$$D_{jk} = \sum_i W_{ijk} S_{ijk} \quad (5)$$

式中： D 为目标与背景的融合度， $D \in [0, 1]$ ； W_{ijk} 为第 i 个指标权重， $\sum W_{ijk} = 1$ ； S_{ijk} 为第 i 个特征相似度值， $S_{ijk} \in [0, 1]$ 。目标与背景的融合度值越大，说明目标的伪装效果就越好，越不容易被发现。

红外目标与背景的融合度模型构建如图 1 所示。

对于红外目标与背景的融合度模型，同时考虑了多种指标因素。对伪装目标和背景进行分类，明确待评价的伪装目标与背景的类型，选取合适的指标并科学计算各指标的权重，从而建立伪装目标与背景的融合度模型。

2 验证试验及结果分析

2.1 试验设计

如图 2 所示，试验中涉及到的目标有伪装布 1

与伪装布 2、伪装目标 T_1 与伪装目标 T_2 等。为研究伪装目标与背景的红外融合度，笔者选择伪装目标 T_1 、伪装目标 T_2 作为研究目标，在某处草坪开展红外特性试验。

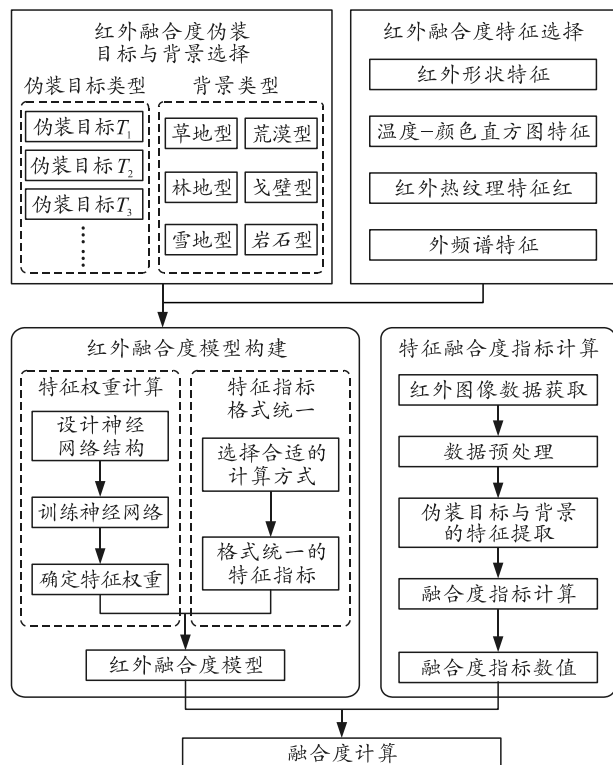
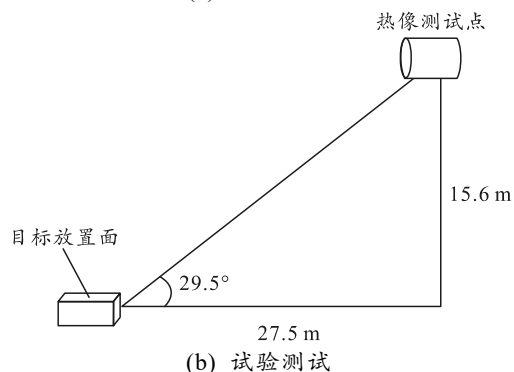


图 1 目标与背景的红外融合度模型构建



(a) 试验场景



(b) 试验测试

图 2 红外特性试验

如图 2(a)所示，采用长波红外热像仪(波段 8~14 μm)、三脚架、配套工作站等搭建测试系统获取目标与背景的红外图像数据，其中，测试系统距地

高度约 16 m，俯角约 75°。为获取目标与背景完整的数据信息，调整红外热像仪测试角度，使研究目标位于红外热像仪视场中心，试验测试如图 2(b)所示。

该试验时间为 2022 年 9 月 22 日 0~24:00 每隔 30 min 记录一次红外热图。背景环境包括试验场周围的草地，尽可能模仿真实的应用环境。

2.2 试验数据

为了尽可能地消除红外实验中的变量，在研究过程中，设计了 2 种不同类型的伪装目标。这 2 种伪装目标的设计采用了材质不同、纹理颜色等存在差异的伪装网覆盖在目标表面，即使将其放置于相同的背景当中，目标伪装效果的好坏还是要取决于伪装目标与背景之间的融合度，伪装目标与背景的融合度越高，伪装效果则越好，越难以被发现。

红外检测试验要考虑天候条件，一般选择一天中温度变化剧烈的时间段进行测量、采样。图 3 为不同时刻的红外图像。这 6 个时刻是红外数据采集当日气温变化较为剧烈的时间点。

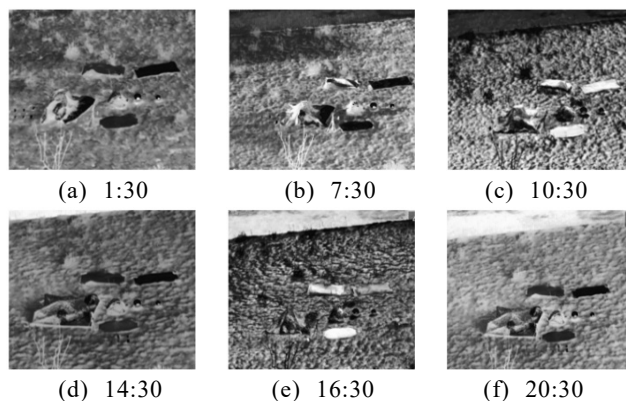


图 3 不同时刻的红外热图像

为了验证本文中所提的方法的通用性与可靠性，另选择文献[6]中的红外数据集用本文中方法进行红外伪装效果的验证。文献[6]将合成锌材质仿真坦克模型作为试验目标，设计区分水泥路面、青草地、沙地以及荒土地共 4 类常见作战背景，依次选取 8:00、12:00、16:00 时共 3 个时间段，利用热成像仪采集数据进行试验，如图 4—7 所示。

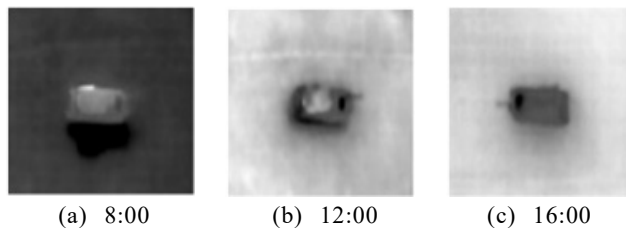


图 4 水泥路面背景下坦克红外图像

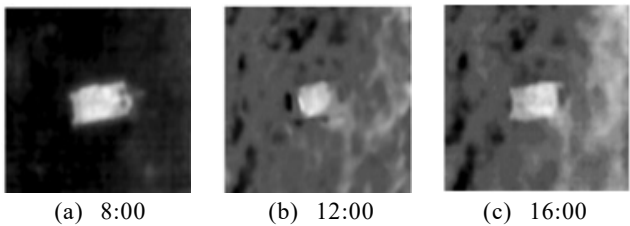


图 5 沙地背景下坦克红外图像

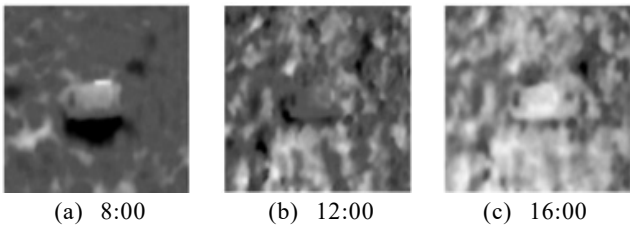


图 6 青草地背景下坦克红外图像

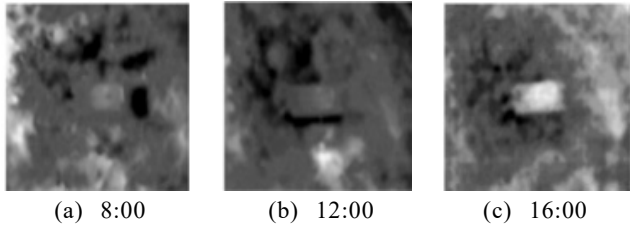


图 7 荒土地背景下坦克红外图像

2.3 结果分析

首先，根据本文中试验采集到红外图像以及图 8 中的红外图像数据，提取红外图像中目标与背景的红外斑块边缘特征、纹理特征、温度-颜色直方图特征、频谱特征，计算特征相似度；然后，将计算出来的特征相似度作为融合度指标输入到设计好的神经网络中计算 4 种指标的权重；最后，根据红外融合度模型计算融合度，由融合度的得分来判断最终的伪装效果优劣，融合度的数值越大，目标的伪装效果就越好。

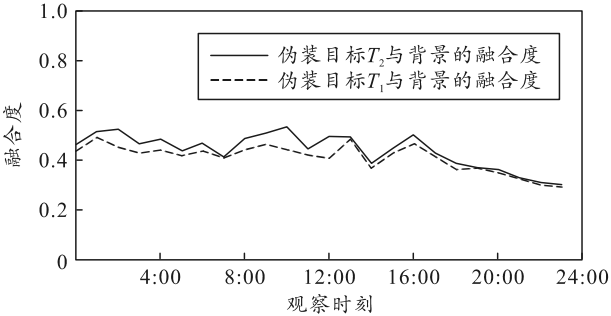


图 8 不同目标与背景融合度随时间的变化情况

由图 8 可知：相同时刻不同目标与背景的融合度不同，伪装目标 T_2 与背景的融合度始终高于伪装目标 T_1 与背景的融合度。目标与背景的融合度越高，就越不容易被发现，伪装效果也越高；所以，

在该类草坪背景中，伪装目标 T_2 的伪装效果最好，符合专业人员通过红外仪器现场评估结果。

表 1 是利用本文中方法和文献[6]中的方法对图 8 中的红外目标进行伪装效果评估的结果。

由本文中方法计算出红外目标与背景的融合度进而依据融合度得分来判断最终的伪装效果优劣的结果(排序 2)可知：在相同时间不同背景下，目标在 4 种背景下的伪装效果优劣具体排序为：荒土地 > 青草地 > 沙地 > 水泥路面；按照整体综合排序来看，目标在 8:00 荒土地背景下热红外伪装效果最好；在 16:00 水泥路面背景下热红外伪装效果最差，该结果与文献[6]方法得到的判断结果(排序 1)相同，验证了本文中提出的通过计算红外融合度来评估热红外伪装效果的方法是通用且可靠的。

表 1 目标热红外伪装效果评估结果

不同时刻背景类型	文献中伪装效果综合评分值	排序 1	融合度值	排序 2
8:00 水泥	1.628	9	1.202 03	9
8:00 沙地	2.470	11	0.826 88	11
8:00 青草	-1.275	3	1.382 40	3
8:00 荒土	-2.108	1	1.566 49	1
12:00 水泥	2.120	10	0.955 98	10
12:00 沙地	-0.635	5	1.304 43	5
12:00 青草	-1.237	4	1.308 39	4
12:00 荒土	-2.089	2	1.534 74	2
16:00 水泥	3.149	12	0.715 58	12
16:00 沙地	0.158	8	1.202 03	8
16:00 青草	-0.161	7	1.280 80	7
16:00 荒土	-0.575	6	1.280 95	6

文献[6]中基于主成分分析的方法来评估目标热红外效果时，如果输入的数据维度过高，例如红外图像中的像素点数目很大，主成分的计算复杂度将会很高，导致算法在实际应用中面临维度灾难问题，还存在对异常值敏感、忽略非线性关系、无法区分重要特征和数据分布假设等问题。而本文中的利用红外融合度来评估热红外伪装效果的方法，综合考虑红外目标与背景之间的相互适应程度和一致性，从而提供对伪装效果的整体评估。由于融合度是通过计算红外目标与背景之间的数学度量得出的结果，具有客观性和可量化性，可以消除主观因素的影响，提供一种客观、可比较的伪装效果评价指标。基于数学模型或算法进行计算，结果易于解析，可以直观地反映出目标与背景之间的融合程度，为伪装决策提供依据。

3 结束语

笔者提出一种基于红外融合度的伪装效果评估

方法,通过对采集到的红外图形进行特征提取,计算伪装目标与背景的特征相似度,将特征相似度作为融合度指标输入神经网络计算出每个指标的权重,根据融合度模型计算得到目标与背景的融合度值,根据融合度值的大小来判断目标的红外伪装效果。通过计算红外目标与背景的融合度来评估伪装效果,不仅关注目标与背景的相似性,而且考虑在红外图像中的整体融合度,同时消除了主观因素的影响,提供了一种客观的伪装效果评价方法,有较强的普适性,可以应用于红外伪装效果的评估任务。

参考文献:

- [1] 成晓鹏. 复杂背景条件下红外目标伪装效能实时评估研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2021.
- [2] SELJ G K, HEINRICH D H. A field-based method for evaluating thermal properties of static and mobile camouflage[C]//SPIE Conference on Target and Background Signatures. Berlin, 2018.
- [3] 宋若鹏. 基于数字图像处理算法的红外伪装效果综合评价[D]. 北京: 北京理工大学, 2018.
- [4] RUBEŽIENĖ V, PADLECKIENĖ I, BALTUŠNIKAITĖ J, et al. Evaluation of Camouflage Effectiveness of Printed

Fabrics in Visible and Near Infrared Radiation Spectral Ranges[J]. ISSN 1392-1320 materials science, 2008, 14: 361-365.

- [5] NEWMAN S, GILMORE M A, MOORHEAD I R. Validation of the use of synthetic image for camouflage effectiveness assessment[C]//SPIE Int. USA, 2002: 35-45.
- [6] 郑自强, 李凌, 乔宇, 等. 基于主成分分析的目标热红外伪装效果评价研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(3): 431-438.
- [7] 应家驹, 何永强, 陈玉丹, 等. 基于特征综合的红外动态伪装效果评估[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 407-411.
- [8] 申柯, 陈熙, 张云飞. 基于图像表面形状指数的图像纹理特征提取[J]. 现代计算机, 2022, 28(24): 71-77.
- [9] 王展, 颜云辉, 焦学勇. 基于灰色理论的迷彩伪装多指标综合评价[J]. 兵工学报, 2013, 34(10): 1250-1257.
- [10] 王彬, 吴海宏, 李庚华. 基于 BP 神经网络确定评价体系指标权重[J]. 广州航海学院学报, 2021, 29(1): 55-59.
- [11] 许扬, 蔡安民, 吴梓秋, 等. 基于 BP 神经网络和多因素权重分析的气热除冰温度影响因素研究[J]. 热力发电, 2022, 51(12): 13.

(上接第 38 页)

- [10] CHEN J, LIU M, MILANO F. Aggregated model of virtual power plants for transient frequency and voltage stability analysis[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4366-4375.
- [11] 董家伟, 龚春阳, 包俊, 等. 事件触发改进一致性算法的孤岛运行多逆变器微电网系统分布式二次调频方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 476-489.
- [12] 周军, 石生超, 祁富志, 等. 储能电池辅助火电机组二次调频控制策略研究[J]. 中国测试, 2024, 50(10): 51-58.
- [13] FAN H, TANG M. A two-layer control strategy of the wind farm participating in grid frequency regulation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(8): 6371-6381.
- [14] 沈子伦, 尹忠东, 陈俊晔, 等. 基于 SOC 预测的火储联合调频控制策略[J]. 电力建设, 2023, 44(9): 129-136.
- [15] 李志军, 苗庆玉, 张家安. 基于虚拟领导节点改进的孤岛微电网完全分布式二次调频策略[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 333-342.

- [16] 段潇涵, 孙丹, 赵琛, 等. 计及调频能力和经济效益的储能集群多状态区间优化策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 58-67.
- [17] 于昌海, 庞腊成, 吴继平, 等. 计及多点电池储能系统的电网二次调频协同控制[J]. 电力工程技术, 2024, 43(1): 68-76.
- [18] CHEN W, QIU J, ZHAO J, et al. Bargaining game-based profit allocation of virtual power plant in frequency regulation market considering battery cycle life[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 2913-2928.
- [19] 姚文龙, 裴春博, 池荣虎, 等. 基于无模型自适应控制的船舶微电网二次调频控制策略[J]. 电机与控制学报, 2023, 27(3): 135-146.
- [20] 刘传斌, 矫文书, 吴秋伟, 等. 基于模型预测控制的风储联合电场参与电网二次调频策略[J]. 上海交通大学学报, 2024, 58(1): 91-101.
- [21] FAN H, TANG M. A two-layer control strategy of the wind farm participating in grid frequency regulation[J]. Alexandria Engineering Journal, 2022, 61(8): 6371-6381.