

基于色差和光谱特性的海面船只隐身效果评估

白雪琼^{1**}, 廖宁放^{1*}, 黄浩¹, 柯斌¹, 程灏波^{1,2}

¹北京理工大学光电学院, 北京 100081;

²北京理工大学深圳研究院, 广东 深圳 518057

摘要 物体的反射光谱数据能够反映其表面情况和光谱吸收特性,利用该数据可辨别人眼难以直观发现和识别的伪装目标,并定量表示不同的目标船只与海洋背景的差异。从色度学角度出发,提出了基于颜色和光谱特性的两个特征评价参数,即色差和光谱匹配系数,以这两个评价参数作为评价伪装系统效能的参考指标,对目标船只和我国东南南部海域的海洋背景进行相应的颜色特征提取,并分析比较目标船只与海洋背景的反射光谱分布,对目标进行伪装效果评估。结果表明,通过景物的反射光谱数据,以色差和光谱匹配系数为评价指标,为海面船只隐身效果评估提供了新的技术途径。同时,初步提出了目标识别概率公式,给出了相应的实验结果,为更加准确的隐身效果定量评价提供了参考。

关键词 色度学; 反射光谱特性; 色差; 光谱匹配系数; 目标识别; 隐身效果评估

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.093301

Evaluation of Ship Camouflage Effect on Sea Based on Color Difference and Spectral Characteristics

Bai Xueqiong^{1**}, Liao Ningfang^{1*}, Huang Hao¹, Ke Bin¹, Cheng Haobo^{1,2}

¹School of Opto-Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

²Shenzhen Research Institute, Beijing Institute of Technology, Shenzhen, Guangdong 518057, China

Abstract The surface condition and spectral absorption characteristics of objects can be accurately reflected by their spectral reflectance data. The information of spectral distribution distinguishes the camouflaged objects which are difficult to be found and identified by human eyes, and measures the difference between a target and the background quantitatively. According to colorimetry, there are two characteristic parameters, color difference and spectral matching coefficient. Using these two evaluation parameters as reference indices, we extracted color characteristics of the target ship and the south of the East China Sea, analyzed their spectral reflectance distribution, and evaluated the effectiveness of the camouflage system. Meanwhile, we proposed the probability formula of target recognition for more effective evaluation of ship camouflage effect and obtained corresponding experiment results. The results show that the color difference and spectral matching coefficient can be used as evaluation parameters for evaluating the camouflage effect of target ships effectively.

Key words colorimetry; reflection spectral characteristics; color difference; spectral matching coefficient; target recognition; camouflage effect evaluation

OCIS codes 330.1730; 300.6075; 330.1690

1 引言

军事装备的可见光隐身方式与动物的伪装方式相似,均为通过颜色和形态将目标混杂在背景中达

到隐身的目的^[1-2]。静态隐身技术主要作用在可见光范围内,通过采用与背景颜色一致的材料、迷彩图案或隐身涂料等来降低整个场景的色彩对比度,从而使隐身目标与背景相互混淆。随着科技的进步,

收稿日期: 2018-03-04; 修回日期: 2018-03-27; 录用日期: 2018-04-02

基金项目: 国家自然科学基金(61575020)、深圳科学技术创新基金(ZDSYS201604211455119, JSGG20160229115138818)

* E-mail: liaonf@bit.edu.cn; ** E-mail: amybx2006@sina.com

目标的迷彩纹理及形状与背景越来越相近,使得人眼甚至仪器也难以快速分辨背景与隐藏的目标,因此可进一步通过颜色和光谱特征对目标与背景加以区分。人眼以及其他可见光测量仪器可通过在被测量目标场景的光谱范围内对能量进行积分从而获得场景的图像信息,这样的图像信息包含了目标、背景与照明光源的共同作用,因此一幅图像可以反映不同的场景,图像与真实场景具有多对一的映射关系。所以仅通过图像处理和分析的方式难以准确评价目标的隐身效果,同时也为探测和识别伪装隐身的目标增加了难度。

基于反射光谱特性的可见光隐身效果评估方法,通常是通过比较分析目标船只与海洋背景的颜色光谱特性的差异来进行评价。物体的反射光谱分布能够更加准确地反映物体的表面纹理和光谱吸收特性,故本文从色度学以及光谱特性出发,定义了两个基于反射光谱分布的特征参数,即色差和光谱匹配系数作为评价海面隐身效果的参考指标,并对两者分别进行了比较分析。此外还提出了结合这两种评价指标的目标识别概率公式,并给出了相应的初步实验结果。

2 评价理论

根据色度学原理,在同一光源照明下,两个样品颜色相同,但反射的辐通量光谱成分不同,具有不同色刺激函数,这一现象称为同色异谱现象^[3]。因此,仅采用目测、全色照相和彩色照相等光学侦察手段可能会引起误判。目标船只与海面背景在可见光范围内的反射光谱体现了材料的本质特征。以反射光谱特性作为研究目标船只与海洋背景的基础,有助于船只隐身系统的开发研制。本文基于光谱反射特性提出了两种不同的海面船只隐身效果评价方案以及目标识别概率公式,并对其进行相应的比较分析得到最终的实验结果。

2.1 色差

目标船只的船身往往与海洋背景的颜色差异很小,加之迷彩的纹理与背景混淆,使得目标在海上不易被人眼直接察觉。色差可从整体的角度来定量评价两种颜色之间的视觉差异。色空间的三刺激值分别对应了样本在色空间的三维坐标,色差即为样本对应坐标点在色空间中的欧氏距离。CIELAB、CMC、CIE94 和 DE2000 等常见的色差公式均是基于均匀色块设计的,只能计算特定条件下两色块之间的色差,无法预测不同观察条件下的复杂空间图

像的颜色差别。色貌色差则是将图像空间视觉和色差测量相结合,进而预测空间分布复杂的色刺激的视觉差异。采用的样本海洋背景极为复杂,不同时间会产生不同变化,还会受到光照、风力、气流等自然因素的影响,故应用色貌色差能更为准确地说明目标和背景的颜色差异。

基于 CIECAM02 色貌模型的 CAM02-LCD、CAM02-SCD、CAM02-UCS^[4],其色差公式为

$$\Delta E' = \sqrt{(\Delta J'/K_L^*)^2 + \Delta a'^2 + \Delta b'^2}, \quad (1)$$

$$J' = \frac{(1 + 100c_1)J}{1 + c_1J}, \quad (2)$$

$$M' = (1/c_1) \ln(1 + c_2M), \quad (3)$$

$$a' = M' \cos h, b' = M' \sin h, \quad (4)$$

式中: $\Delta J'$ 、 $\Delta a'^2$ 、 $\Delta b'^2$ 分别为明度差、彩度差和色调角差。不同 CIECAM 色差公式的系数如表 1 所示。

表 1 不同 CIECAM 色差公式的系数

Table 1 Coefficients for each version of CIECAM

Version	CAM02-LCD	CAM02-SCD	CAM02-UCS
K_L	0.77	1.24	1.00
c_1	0.007	0.007	0.007
c_2	0.0053	0.0363	0.0228

2017 年, Li 等^[5] 提出了新的色貌模型 CIECAM16,并推导出基于该色貌模型的色差公式 CAM16-UCS,即

$$J' = \frac{1.7J}{1 + 0.007J}, \quad (5)$$

$$M' = \ln(1 + 0.0028M) / 0.0028, \quad (6)$$

$$a' = M' \cos h, b' = M' \sin h. \quad (7)$$

不同的色差公式适用于不同的观察条件,照度对色差公式也有较大影响^[6]。为提高隐身效果评估的准确性,加入另一评价参数——光谱匹配系数。

2.2 光谱匹配系数

近年来,光谱成像侦察技术迅猛发展。常见的光谱信息匹配测度法分为基于距离和基于形状两类^[6-8]。光谱匹配算法计算是比较测得的目标光谱曲线与参考光谱曲线集合,求得两条光谱曲线之间的相似性或差异性。目前常见的光谱相似度算法有光谱信息散度匹配(SID)和光谱角匹配(SAM)。

光谱信息散度法是基于信息论衡量两条光谱之间差异的波谱分类方法。将光谱向量看作随机变量,基于概率统计理论分析两个随机向量的相似度,表达式为

$$D_{KL}(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} - \frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) \times$$

$$\left[\log \left(\frac{x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \right) - \log \left(\frac{y_i}{\sum_{i=1}^n y_i} \right) \right], \quad (8)$$

式中: \mathbf{x} 和 \mathbf{y} 分别为参考光谱向量和测试光谱向量; $x_i/\sum_{i=1}^n x_i$ 和 $y_i/\sum_{i=1}^n y_i$ 分别为两向量的概率。光谱信息散度的值越小,说明两组光谱越相似。

光谱角匹配法是将光谱向量作为 N 维空间矢量,根据目标光谱和参考光谱之间的夹角数值大小判断两条光谱曲线的相似性,其表达式为

$$\theta = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n x_i y_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n x_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n y_i^2}}, \quad (9)$$

式中: n 为测试光谱与参考光谱重合的波段数量; θ 的取值范围为 $(0, \pi/2)$ 。两个光谱之间的夹角数值越小,说明两组光谱的匹配程度越高。

光谱角匹配法是对两条光谱的形状进行比较,而光谱信息散度法是根据光谱曲线的形状计算各信息点的信息熵,比较信息熵的数值大小进而判断两条光谱曲线的相似度。因此将光谱角匹配法和光谱信息散度法相结合能够提高判断两条光谱相似性的准确性^[9],即

$$S = \theta \cdot D_{\text{KL}}(\mathbf{x} \parallel \mathbf{y}). \quad (10)$$

为了进一步对目标船只进行有效的定量评估,并将色差和光谱匹配系数这两个评价参数进行融合,提出新的目标识别概率公式。

2.3 目标识别概率

为更准确地定量评价海面目标隐身效果,还需通过目标的识别概率来定量评估目标的隐身效果。目标识别是机器视觉和模式识别领域的重要课题,其难点主要是目标图像的多变性、背景条件的多变性、照度条件的变化以及视角的变化等对目标识别的影响。目标捕获的基本机制是纯探测,即在局部为均匀背景情况下察觉一个物体。光谱反射特性受目标或背景的表面状态、颜色、季节、气象条件、入射角等影响。色差和光谱匹配系数均已包含以上特性,故无需单独考虑。为了更准确地识别目标,需将色差和光谱匹配系数两个特征进行融合。

根据地物识别概率经验公式^[10],提出了以色差和光谱匹配系数为评价指标的目标识别概率公式,其表达式为

$$P_D = \frac{K \Delta E}{\exp(BA/h)^2}, \quad (11)$$

式中: B 为地物形状识别系数, $B = \sqrt{GR/S}$, G 为按

地物轮廓计算出的周长, R 为地物轮廓的内切圆与外接圆半径的平均值, S 为地物的实际面积; h 为目标的临界尺寸^[11], $h = \sqrt{W_i H_i}$, 其中 W_i 为目标长度, H_i 为目标高度; ΔE 为目标与背景的色差; A 为光谱分辨率; K 为光谱匹配系数。

3 实验结果

样本由实验室研制的便携式海上目标八通道多光谱成像测量仪测量得到,对我国东海南部的几个典型海域进行采样取景,如图 1 所示,重建了各海域海面光谱辐亮度曲线以及船只涂料的光谱曲线。海洋的情况非常复杂,随天气、阳光、风力、海浪等诸多环境因素千变万化,海水的颜色可能呈现蓝色以外的绿色甚至更深的褐色。选取其中五个典型的海洋光谱反射曲线作为参考,如图 2 所示;选取十个涂料样品光谱曲线作为被测光谱,如图 3 所示。以色差和光谱匹配系数作为评价指标,将这十个样品光谱与参考光谱分别进行比较分析,并计算目标识别概率。



图 1 海域采样取景例图

Fig. 1 Sample scene of the sea

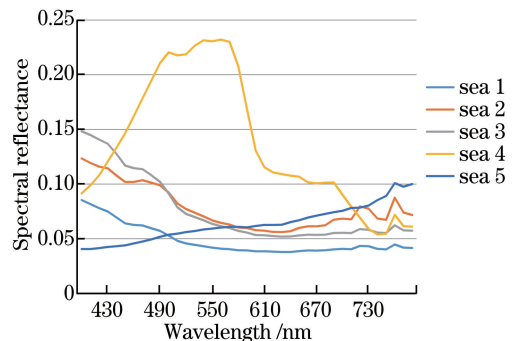


图 2 典型海洋光谱曲线

Fig. 2 Spectral reflectance curves of the sea

3.1 色差

以五个典型的海洋背景光谱曲线作为参考光谱曲线,十个涂料样品的光谱曲线作为被测光谱曲线,通过参考光谱数据与被测光谱数据求出其相应的三刺激值 X 、 Y 、 Z ,然后将被测光谱三刺激值分别与参

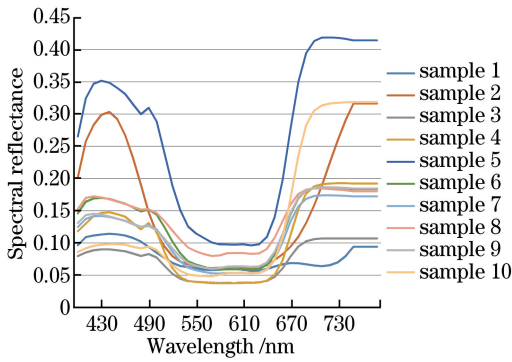


图3 涂料样品的光谱曲线

Fig. 3 Spectral reflectance curves of the samples

考光谱三刺激值比较,求出样品在不同色貌下与海洋背景的色差结果。与参考光谱1~5比较所得的色差结果分别如表2~6所示。表中数值越大表明样本中的目标与背景间颜色的差异越大。

表2 与参考光谱1比较所得色差计算结果

Table 2 Result of color difference compared with the first reference spectrum

Sample	CIECAM	CIECAM	CIECAM	CIECAM
	02-LCD	02-SCD	02-UCS	16
1	8.1298	5.0484	6.2600	6.4346
2	12.6211	7.8373	9.7183	11.6394
3	1.8580	1.1538	1.4307	1.7459
4	4.6861	2.9099	3.6083	4.6893
5	25.2681	15.6907	19.4564	20.5738
6	12.3496	7.6687	9.5092	10.1313
7	9.4948	5.8960	7.3110	7.8100
8	16.5677	10.2880	12.7571	12.9782
9	11.2445	6.9825	8.6583	8.9896
10	6.3483	3.9421	4.8882	4.9749

从表2可以看出,以海洋背景1为参考光谱,在不同色貌下的色差结果均为样品3与海洋背景1的差异最小,可认为涂有样品3涂料的目标船只在该海洋背景下隐身效果最好,其次是被测样品4、10、1、7、9、6、2、8,样品5的隐身效果则最差。

从表2可以看出,与参考光谱2比较,在不同色貌下的色差结果均为样品1与海洋背景2的差异最小,即在海洋背景2中涂有样品1涂料的目标船只隐身效果最好,其次是被测样品7、10、9、6、4、2、3、8,同样样品5的隐身效果最差。

同理,与参考光谱3、4、5比较所得的色差结果表明当海水呈现绿色时,样本5的色差最小,即该样本的隐身效果最佳;当海水颜色为褐色时,则样本10具有较好的隐身效果。因此,通过色差评价参数,可以初步分析得知目标船只的隐身效果。

表3 与参考光谱2比较所得色差计算结果

Table 3 Result of color difference compared with the second reference spectrum

Sample	CIECAM	CIECAM	CIECAM	CIECAM
	02-LCD	02-SCD	02-UCS	16
1	0.4457	0.2768	0.3432	0.2567
2	4.0456	2.5122	3.1151	4.9480
3	6.7175	4.1713	5.1725	4.9455
4	3.8894	2.4125	2.9949	2.0020
5	16.6925	10.3655	12.8533	13.8824
6	3.7741	2.3436	2.9061	3.4400
7	0.9193	0.5709	0.7079	1.1187
8	7.9922	4.9629	6.1540	6.2869
9	2.6690	1.6573	2.0551	2.2983
10	2.2272	1.3830	1.7149	1.7164

表4 与参考光谱3比较所得色差计算结果

Table 4 Result of color difference compared with the third reference spectrum

Sample	CIECAM	CIECAM	CIECAM	CIECAM
	02-LCD	02-SCD	02-UCS	16
1	0.4087	0.2538	0.3147	0.7585
2	4.9000	7.8373	3.7730	6.4305
3	5.8631	1.1538	4.5146	4.6231
4	3.0351	2.9099	2.3370	2.4109
5	17.5469	15.6907	13.5111	14.4263
6	4.6285	7.6687	3.5639	3.8902
7	1.7737	5.8960	1.3657	1.5592
8	8.8466	10.2880	6.8119	6.6623
9	3.5233	6.9825	2.7130	2.6640
10	1.3728	3.9421	1.0571	1.7582

表5 与参考光谱4比较所得色差计算结果

Table 5 Result of color difference compared with the fourth reference spectrum

Sample	CIECAM	CIECAM	CIECAM	CIECAM
	02-LCD	02-SCD	02-UCS	16
1	23.2169	14.4169	17.8770	18.1291
2	18.7256	11.6280	14.4187	15.7567
3	29.4887	18.3115	22.7063	22.6154
4	26.6606	16.5554	20.5287	20.5039
5	6.0787	3.7747	4.6806	9.2331
6	18.9971	11.7966	14.6278	15.1719
7	21.8519	13.5693	16.8260	17.1048
8	14.7790	9.1773	11.3798	12.2120
9	20.1022	12.4828	15.4787	15.8865
10	24.9984	15.5232	19.2488	19.3948

3.2 光谱匹配系数

以参考光谱1和参考光谱2为例,通过SID、SA和SID-SA三个光谱相似度匹配算法分别计算出各个样品涂料的光谱曲线与参考光谱的匹配系

表 6 与参考光谱 5 比较所得色差计算结果

Table 6 Result of color difference compared with the fifth reference spectrum

Sample	CIECAM 02-LCD	CIECAM 02-SCD	CIECAM 02-UCS	CIECAM 16
1	2.2945	1.4248	1.7668	6.5177
2	6.7858	4.2138	5.2215	13.0135
3	3.9773	2.4698	3.0625	6.5243
4	1.1493	0.7137	0.8850	8.3804
5	19.4328	12.0671	14.9632	19.0843
6	6.5143	4.0452	5.0160	9.7384
7	3.6596	2.2725	2.8179	8.0385
8	10.7324	6.6645	8.2640	11.1298
9	5.4092	3.3589	4.1651	8.3352
10	0.5131	0.3951	0.3951	5.6973

数,结果分别如表 7 和表 8 所示。

SID、SA 和 SID-SA 算法的匹配系数值越小,说明目标和背景的光谱曲线相似度越高。由表 7 所示结果可知,在 SID 算法中,样本 1 的隐身效果最佳,其次为样本 8、3、6、9、7、5、2、4,而样本 10 的隐身效果最差。在 SA 算法中,样本 1 的隐身效果最佳,其次为样本 8、6、3、7、9、5、2、4,而样本 10 的隐身效果最差。在 SID-SA 算法中,同样样本 1 的隐身效果最佳,其次为样本 8、6、3、9、7、5、2、4,而样本 10 的隐身效果最差。

由表 8 可知,三种光谱相似度算法的光谱匹配系数排序与表 7 顺序相同,均为样本 1 的隐身效果最佳,样本 10 隐身效果最差。

表 7 与参考光谱 1 比较所得样本光谱匹配系数

Table 7 Spectral matching coefficients of samples compared with the first reference spectrum

Sample	SID	SA	SID-SA
1	0.0097	0.1547	0.0015
2	0.1177	0.4560	0.0518
3	0.0644	0.3731	0.0624
4	0.1351	0.4948	0.0015
5	0.1001	0.4333	0.0420
6	0.0653	0.3603	0.0230
7	0.0768	0.3992	0.0299
8	0.0412	0.3050	0.0124
9	0.0753	0.4059	0.0297
10	0.2786	0.7462	0.1892

由上述结果可得,在 SID、SA 和 SID-SA 三种光谱相似度算法中,隐身效果最佳的为样本 1,效果最差的为样本 10,样品的匹配程度结果基本相同,其中样本 3 和样本 6、样本 7 和样本 9 的匹配系数较为相近,因此相似度的排序有些许不同。以上实

表 8 与参考光谱 2 比较所得样本光谱匹配系数

Table 8 Spectral matching coefficients of samples compared with the second reference spectrum

Sample	SID	SA	SID-SA
1	0.0063	0.1214	0.0007
2	0.1036	0.4267	0.0429
3	0.0508	0.3294	0.0164
4	0.1152	0.4521	0.0503
5	0.0823	0.3889	0.0312
6	0.0515	0.3166	0.0160
7	0.0619	0.3561	0.0216
8	0.0310	0.2632	0.0081
9	0.0613	0.3648	0.0219
10	0.2786	0.7043	0.1619

验结果说明以光谱匹配系数为评价参数也可作为评估隐身效果的一种手段。

3.3 目标识别概率

已知目标船只的长度 W_i 约为 40 m,高度 H_i 约 10 m,故由临界尺寸公式可得 h 为 20 m,地物形状识别系数 B 为 1.45^[10]。以 CIECAM16 色貌色差和 SID-SA 光谱相似度算法为例,将已知参数代入(11)式,所得目标识别概率如表 9 所示。

表 9 目标识别概率

Table 9 Probability of target recognition

Sample	Reference spectrum 1	Reference spectrum 2
1	0.00965190	0.00017969
2	0.60292092	0.21226920
3	0.10894416	0.08110620
4	0.00703395	0.10070060
5	0.86409960	0.43313088
6	0.23301990	0.05504000
7	0.23351900	0.02416392
8	0.16092968	0.05092389
9	0.26699112	0.05033277
10	0.94125108	0.27788516

将色差与光谱匹配系数两个评价参数结合所得的综合隐身效果评估结果(表 9)表明,在与参考光谱 1 比较的情况下,样本 10 的目标识别概率值最大,为 0.94125,样本 4 的概率值最小,为 0.00703,说明样本 10 的隐身效果最差,即在该海洋背景下易被识别,样本 4 的隐身效果最好,不易被察觉。在与参考光谱 2 比较的情况下,样本 5 的目标识别概率值最大,为 0.43313,样本 1 的概率值最小,约为 0.00018,说明样本 1 的隐身效果最好,即在该海洋背景下不易被察觉,而样本 5 的隐身效果最差,易被识别。

本文初步提出的目标识别概率未考虑到图像各

个特征的影响,或是在应用中侧重于某一特征的比较的情况。下一步工作还需进一步考量各个特征的影响,对各个特征取一个权重值,如设色差评价参数的权重为 W_C ,光谱匹配系数的权重为 W_M ,且满足 W_C 与 W_M 之和为 1。

4 结 论

采用色差和光谱匹配系数这两种评价参数对样本图像进行隐身效果评价分析。色差是对整个反射光谱进行积分计算得到的,由于海洋环境极为复杂,且观察条件与照明条件千变万化,因此需要根据不同情况、不同色差公式来进行多方面的比较分析。光谱匹配系数利用了反射光谱数据,不仅可以评价目标与背景的一致程度,还可应用于人造目标的识别。但上述两种评价方法仍需结合其他参数指标,从而给出更为合理的评价结果。因此,初步提出了结合色差和光谱匹配系数两种评价参数的目标识别概率公式,为下一步工作打下基础。另外还可结合颜色分布信息、纹理特征以及光谱特性对目标船只的隐身性能作进一步的评估。

目前国内外对海面船只隐身效果的评价研究多集中在热红外隐身、声隐身、电磁隐身等领域,对可见光条件下的隐身效果研究不多。本文利用光谱反射特性来辨别人眼难以直观发现和辨别的位置目标,并定量表示目标船只与海洋背景的差异。根据反射光谱数据以及颜色量化方法,以色差和光谱匹配系数为评价指标,为可见光波段的隐身效果评估工作提供了一条技术途径。

参 考 文 献

- [1] Huang F, Wang Y F, Wang J Y, *et al.* Study on application of high-repetition-rate solid state lasers in photoelectric counter measure[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2003, 32(5): 465-467.
黄峰,汪岳峰,王金玉,等.高重频固体激光器在光电对抗中的应用研究[J].*红外与激光工程*, 2003, 32(5): 465-467.
- [2] Liu J J. Technology and system of electro-optical warfare[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2004.
刘京郊.光电对抗技术与系统[M].北京:中国科学技术出版社,2004.
- [3] Hu W J, Tang S Q, Zhu Z F. Modern color science and application [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2007: 94-97.
胡威捷,汤顺清,朱正芳.现代颜色技术原理及应用[M].北京:北京理工大学出版社,2007: 94-97.
- [4] Luo M R, Cui G H, Li C J. Uniform colour spaces based on CIECAM02 colour appearance model [J]. *Color Research and Application*, 2006, 31(4): 320-330.
- [5] Li C J, Li Z Q, Wang Z F, *et al.* Comprehensive color solutions: CAM16, CAT16, and CAM16-UCS [J]. *Color Research and Application*, 2017, 42(6): 703-718.
- [6] Zhao B, Zheng Y L. Evaluation on the performance of color-difference formula under various viewing conditions[J]. *China Printing and Packaging Study*, 2012, 4(2): 24-28.
赵博,郑元林.基于复杂观察条件的色差公式评价[J].*中国印刷与包装研究*, 2012, 4(2): 24-28.
- [7] Guo T, Hua W S, Liu X, *et al.* Comprehensive evaluation of optical camouflage effect based on hyperspectra[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(10): 101002.
郭彤,华文深,刘恂,等.一种基于高光谱的光学伪装效果综合评价方法[J].*激光与光电子学进展*, 2016, 53(10): 101002.
- [8] Wang W C, Wang H Q, Wang K, *et al.* A kind of spectral information divergence pigment identification method based on statistical manifold [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(1): 013002.
王伟超,王慧琴,王可,等.一种基于统计流形的光谱信息散度颜料识别方法[J].*激光与光电子学进展*, 2018, 55(1): 013002.
- [9] Liu W J, Yang X H, Qu H C, *et al.* Hyperspectral unmixing algorithm based on spectral information divergence and spectral angle mapping[J]. *Journal of Computer Application*, 2015, 35(3): 844-848.
刘万军,杨秀红,曲海成,等.基于光谱信息散度与光谱角匹配的高光谱解混算法[J].*计算机应用*, 2015, 35(3): 844-848.
- [10] Lu J Y, Zhu C, Liu D. Analysis on target recognition probability under aerial digital photography conditions [J]. *Electro-Optic Technology Application*, 2006, 21(6): 12-14.
卢俊宇,朱超,刘丹.航空数码照相条件下目标的识别概率分析[J].*光电技术应用*, 2006, 21(6): 12-14.
- [11] Zhou L W. Target detection and recognition [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2004.
周立伟.目标探测与识别[M].北京:北京理工大学出版社,2004.