

装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法

Infrared Weak Target Recognition Method for Cracks in Easily Deformable Structures of Prefabricated Engineering

陈军, 王青, 周辉阳

(浙江大学建筑设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310063)

摘要: 针对裂缝红外微弱目标识别效果差, 像素点灰度值具备突变性, 存在背景杂波的问题, 提出装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法。分析装配式工程易变形结构裂缝的类别, 采用反演可见光图像方法, 获取装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标, 抑制图像背景杂波的同时, 采用光谱匹配方法, 二次定位与确认红外微弱目标真实位置, 实现装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别。试验结果表明, 该方法的应用下, 虚检率、平均 FPS、识别率皆较高, 图像滤波效果较为明显, 保证实际应用过程的可靠性。

关键词: 装配式工程易变形结构裂缝; 红外微弱目标; 识别方法; 图像预处理

中图分类号: TN911.73 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2023) 04-0122-06

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2023.04.020

CHEN Jun, WANG Qing, ZHOU HuiYang

(Zhejiang University Architectural Design and Research Institute Co., Ltd., Hangzhou 310063, China)

Abstract: In view of the poor recognition effect of infrared weak targets in cracks, the abrupt gray value of pixel points and the existence of background clutter, an infrared weak target recognition method for cracks in prefabricated engineering deformable structures is proposed. Analyze the category of the cracks in the easily deformable structure of the assembly engineering, use the inversion visible light image method to obtain the infrared weak target of the cracks in the easily deformable structure of the assembly engineering, suppress the background clutter of the image, and use the spectral matching method to locate and confirm the true position of the infrared weak target twice, so as to realize the infrared weak target recognition of the cracks in the easily deformable structure of the assembly engineering. The experimental results show that under the application of this method, the false detection rate, average FPS and recognition rate are higher, and the image filtering effect is obvious, which ensures the reliability of the actual application process.

Keywords: Easy-deformable structural cracks in prefabricated engineering; weak infrared target; identification method; image preprocessing

0 引言

楼盖是装配式工程在建筑过程中的重要组成部分, 它是装配式建筑工程内的主要构件^[1-2], 在建筑时, 楼盖的刚度可以保障装配式建筑的整体质量, 令楼房具备抗风抗震的作用。但在装配式建筑存在一种极易产生变形的易变形结构, 导致施工人员对空心板灌缝时容易出现裂缝问题, 从

作者简介: 陈军 (1982—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 工程总承包管理、市政建筑工程施工管理。

通信作者: 王青 (1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 工程总承包管理、市政建筑工程施工管理。

收稿日期: 2022-07-27

而降低了装配式建筑的整体刚度，建筑物也会因此发生漏水、渗水现象。针对这一问题，装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标的识别就成了当前主要问题研究。

许来祥等^[3]提出基于改进 CNN 的红外目标识别方法研究，该方法首先将卷积神经网络与红外目标特性相结合，对卷积神经网络中的卷积层和池化层的数量调整，并引入变换网络，以此提升数据在变换过程中的鲁棒性，再利用神经网络层次选取红外目标，达到增强目标识别率的效果，从而完成红外目标识别，该方法的调整结果不完善，存在识别效果差的问题。史国军^[4]提出深度特征联合表征的红外图像目标识别方法，该方法利用卷积神经网络获取了红外目标图像特征，并表征待识别目标特征，再对各个特征之间的相关性实行约束，基于约束结果对联合系数表示输出结果，依据最小误差原则分类红外目标输入样本，实现红外图像目标识别的目的，该方法获取的特征不稳定，存在虚检率高的问题。王倩等^[5]提出基于移动分割与轻量化分类网络的红外目标实时识别方法，该方法通过检测目标完成对目标图像的像素分割，经处理后，对个体目标定位，并将定位结果输入到嵌入式平台内，从平台中选取网络特征，对建立的 softmax 模型训练，从而实现对外红外目标的分类，完成红外目标识别，该方法的分割结果不明显，存在平均 FPS 低的问题。

为了解决上述方法中存在的问题，提出装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法。

1 易变形结构裂缝图像获取与反演

1.1 裂缝影响因素分析

装配式空心楼裂缝是装配式工程中的易变形结构，空心楼裂缝在施工时极难彻底消除裂缝，板缝也会对装配式建筑的美观造成影响，严重的还会导致板缝内出现渗水或漏水的现象，降低了居民的整体生活质量。所以装配式工程中易变形结构对建筑施工造成的影响不容忽视，针对这一问题提出了以下详细分析。

(1) 安装不牢固

装配式空心板在安装时，需要利用水泥砂浆在建筑墙上找平，找到平层后墙上要有一定的强度才能安装装配式空心板，为了保证空心板的平稳，空心板中要有坐浆。部分单位在施工时只将水泥砂浆涂抹在墙上，而没有坐浆空心板，这种操作会导致空心板不牢固，加上本身的易变形结构，最后导致墙体不够平整产生裂缝，导致墙体板缝开裂。

(2) 操作不规范

工人在施工建筑时会有灌缝施工的操作流程，部分施工人员会觉得灌缝对整体工程质量造成的威胁小，所以施工人员灌缝时容易出现操作不规范的问题。例如板缝灌缝前不对板缝清洁处理，令板缝内存在大量灰尘，板缝中的材料及黏结性变小。板缝交宽时，会有人在板缝中投放杂物，再用水泥纸袋塞住板缝缝隙，操作完成后再次灌浆。这样的操作会导致水泥袋从板缝中掉落，板缝的黏结性差，极易产生裂缝。

(3) 水泥品种选择不当

施工时所用的水泥品种较多，各类品种的水泥具备的性能均不相同，比如硅酸盐水泥的抗冻性及耐磨性最易有，但是这种水泥极易被腐蚀。根据不同水泥的不同性能选取适合装配式工程易变形结构材质的使用，像空心板就可以选择普通水泥或硅酸盐水泥灌缝，不容易出现裂缝的问题。

根据以上分析，获取了装配式工程易变形结构极易出现裂缝的主要因素，基于这一分析结果，明确装配式工程易变形结构裂缝类型。

1.2 裂缝红外微弱目标图像反演

采用反演可见光图像方法取得装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标，具体操作如下所示。

(1) 分割图像

利用可见光图像对装配式工程易变形结构裂缝反应，并采用分割的方法分割出裂缝图像中的细节信息^[6-7]。分割可见光图像时，首先要使图像格式保持一致，均为 256 色的灰度图像，再采用下述方程对灰度图像变换，其方程表达式定义如下：

$$H = [0.3R + 0.49G + 0.01B] \quad (1)$$

式中： H 表述灰度值转换； R 、 G 、 B 表述红、绿、

研究与应用

蓝色分量。

基于变换结果采用手动分割方法完成对可见光图像的分割。

(2) 基于可见光图像反演的裂缝红外微弱目标图像获取

由于图像分割后与大气和物体之间的辐射效果不同, 所以需要对各个区域中的特性参数进行设置, 从而得出红外热像仪在辐射装配式工程易变形结构裂缝时的出射度。

设定物体区域中的温度为 T_{obj} , 而红外热像仪的发射率为 U_{obj} [8], 周边环境温度表述为 T_{amb} , 大气温度表述为 T_{atm} , 采样距离为 d , 根据设置结果计算红外热像仪对装配式工程易变形结构裂缝的总辐射出射度, 表示如下:

$$W_{tot} = \varepsilon_{obj} + U_{obj} + W_{obj} + (1 - \varepsilon_{obj}) U_{obj} + W_{amb} + (1 - U_{obj}) W_{atm} \quad (2)$$

式中: ε 表述物体发射率; U 表述透射率; $(1 - \varepsilon_{obj})$ 表述平均大气发射率; W_{tot} 标记为出射度; W_{amb} 标记为反射幅度; W_{atm} 标记为大气辐射。

大气区域在图像分割过程中属于特殊物体,

$$W'_{obj} = \frac{\varepsilon_{obj} + U_{obj} + W_{obj} + (U_{obj} - U_{obj} + \varepsilon_{obj} - \tau_c + \tau_c \varepsilon_c) W_{amb} + (\tau_c - \tau_{obj}) + W_{atm}}{\varepsilon + \tau_c} \quad (5)$$

而方程 (3) 与方程 (4) 获取的红外热像仪在大气区域中的辐射出射度, 由下式表述:

$$W'_{obj} = \frac{\tau_c W_{atm} - (1 - \varepsilon_c) + \tau_c W_{amb}}{\varepsilon_c + \tau_c} \quad (6)$$

根据表达式 (5)、(6) 的获取结果, 利用 W'_{obj} 取得各个区域中的温度 T , 以此依据红外图像温度 T 与灰度值之间的关系, 取得装配式工程易变形结构裂缝的红外微弱目标图像灰度值, 完成红外微弱目标图像反演。

2 裂缝红外微弱目标识别方法

2.1 疑似红外微弱目标定位

由于外界因素会导致获取的红外图像存有噪声及杂波, 所以需要采用自适应阈值分割方法抑制红外图像中的背景杂波 [9-10], 并从中提取可疑的红外微弱目标。

设置大气透射率满足条件为 $U > 0$, 在大气区域中, 红外热像仪对装配式工程易变形结构裂缝所产生的总辐射能量要高于 d 中的辐射能量。

设置大气的辐射出射度 $U(1 - U) W_{atm}$, 当两者之间的距离范围属于 $(n - 1)d \sim nd$ 时, $U^{n-1}(1 - U) W_{atm}$ 就是大气的辐射出射度, 根据设定条件, 计算总辐射度表示如下:

$$W_{tot} = \sum_{n=1}^{\infty} U^{n-1} + (1 - U) W_{atm} = (1 - U) W_{atm} \cdot \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1 - U^n}{1 - U} = W_{atm} \quad (3)$$

式中: n 标记为自然数; \lim 标记为函数的极值。

由于红外热像仪只能设定一个发射率, 即 ε_c , 设置完成后对红外热像仪中的大气参数所得值计算, 表述如下:

$$W_{tot} = \varepsilon_c \tau_c W'_{obj} + (1 - \varepsilon_c) + \tau_c W_{amb} + (1 - \tau_c) W_{atm} \quad (4)$$

式中: τ_c 标记为大气所得值。

基于方程 (2) 与方程 (4), 获取红外热像仪在物体区域内的辐射出射度, 通过下述方程定义:

利用多光谱传感器对红外图像中的第 x 行、 y 列的像素单元光谱辐射强度接收, 其接受结果由 $Q(x, y)$ 表述, 那么第 $K * 1$ 维光谱辐射向量就标记如下:

$$Q(x, y) = [Q_1(x, y), \dots, Q_k(x, y)]^T \quad (7)$$

式中: K 标记为红外光谱波段; $Q_k(x, y)$ 表述为量化接收信息, 那么多光谱传感器在焦平面中接收的图像就定义如下:

$$Q_k = \begin{cases} q_k(1, 1), q_k(1, 2), \dots, q_k(1, Y) \\ q_k(2, 1), q_k(2, 2), \dots, q_k(2, Y) \\ \vdots \\ q_k(X, 1), q_k(X, 2), \dots, q_k(X, Y) \end{cases} \quad (8)$$

利用滑窗卷积模板计算红外图像的局部均值, 表示如下:

$$\bar{Q}_k = \frac{1}{S^2} \sum_{i=1}^S \sum_{j=1}^S q_k(i + p, j + q) \quad (9)$$

式中： i 、 j 均标记为波段； (p, q) 标记为红外图像的顶点子图像； \bar{Q}_k 标记为背景均值； S 表述为滑窗。

由于获取的红外图像背景不同，所以以 1 : 8 的比例为主，分割图像，其分割阈值表述： $Q_k = \lambda_k \bar{Q}_k$ 。式中， λ_k 标记为光谱因子。

各个滑动窗由 $S \times S$ 表述，那么将 Q_k 输入到滑动窗内，并分割中心点，提取出疑似奇异点。各个波段中，灰度值要高于 Q_k 时，就设定疑似奇异点为“1”，若低于 Q_k ，就设定疑似奇异点为“0”。提取完成后得出新的红外图像矩阵，即 $t_k(x, y)$ 。

检测获取的新红外图像，得出红外图像中各个像素都是通过噪声信号、目标信号、背景信号构成，因而需要分析红外图像中的目标信息及背景光谱信息。子波段中与红外图像相对应的像素点灰度值具备突变性，而图像中的目标与辐射强度两者之间的能量具有相关性，针对这一特点，对新的红外目标图像进行滤波处理，其方程表达式定义如下：

$$t_k(i, j) = \prod_{i=1}^k t_k(i, j) \quad (10)$$

式中： \prod 标记为求积运算； t_k 标记为新红外目标图像； (i, j) 标记为波段。通过处理结果，得出装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标图像能量矩阵：

$$T = \begin{cases} t_k(1, 1), t_k(1, 2), \dots, t_k(1, Y) \\ t_k(2, 1), t_k(2, 2), \dots, t_k(2, Y) \\ \vdots \\ t_k(X, 1), t_k(X, 2), \dots, t_k(X, Y) \end{cases} \quad (11)$$

式中： T 表述为稀疏阵。该稀疏阵与 0, 1 相关，因而矩阵内的“1”均属于疑似目标。

2.2 基于光谱匹配的红外微弱目标识别

红外微弱目标图像经背景抑制及阈值分割后，可以获取潜在目标，从而反应出红外辐射强度，红外图像的灰度变化曲线可以对红外辐射特征实施表征，所以识别目标时利用光谱匹配法匹配潜在目标灰度变化特征曲线及红外图像辐射特征曲线^[11-12]，依据匹配结果可以获取红外图像中的真实目标，从而实现装配式工程易变形结构裂缝红

外微弱目标的识别。

对自适应阈值分割处理的红外微弱目标图像开展光谱重构，从中获取潜在红外微弱目标的光谱矢量，标记为： $\vec{Q}(i, j)$ ，同时设置红外微弱目标图像的光谱特征矢量为 $\vec{O}(i, j)$ ，那么形成的光谱角就定义为：

$$\alpha = \arccos \frac{\vec{Q} + \vec{O}}{\|\vec{Q}\| \cdot \|\vec{O}\|} = \arccos \frac{\sum_{i=1}^n Q_{\lambda_i} \cdot O_{\lambda_i}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n Q_{\lambda_i}^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n O_{\lambda_i}^2}} \quad (12)$$

式中： α 标记为光谱夹角； n 表述波段数； Q 标记为潜在目标特征光谱向量； O 表述真实目标特征光谱向量； λ 标记为影响因子。

基于夹角余弦值理论，对红外微弱目标图像的光谱曲线相似性实行度量，利用光谱角余弦计算结果对红外微弱目标识别，以此确认目标点在红外图像内的真实位置。

3 试验与分析

为了验证装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法的整体有效性，需要对该方法开展试验对比测试。

装配式工程易变形结构裂缝红外图像采集过程如图 1 所示。

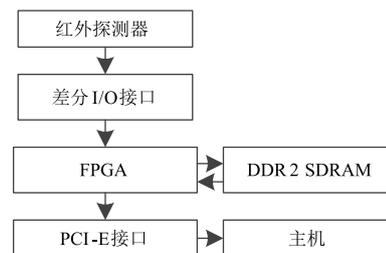


图 1 红外图像采集系统
Fig. 1 Infrared image acquisition system

图 1 中，以 FPGA 作为整个系统的核心采集控制器，通过红外探测器采集到装配式工程易变形结构裂缝图像后，需要利用差分 I/O 接口将图像输送到 FPGA 中，FPGA 接收到图像后对采集的图像实施控制及处理，在 DDR2 SDRAM 内缓存，最

研究与应用

终经缓存图像从 PCI-Exl 通道输送到主机中, 实现装配式工程易变形结构裂缝红外图像的采集。

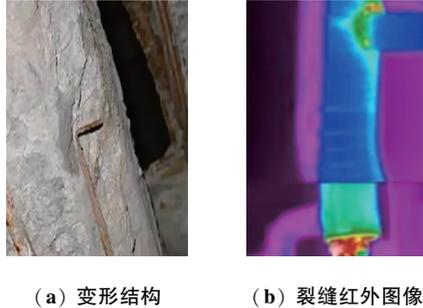


图 2 装配式工程易变形结构裂缝

Fig. 2 Prefabricated engineering is prone to deformation of structural cracks

图 2 中, 图像尺寸为 $250 \times 350 \text{ pixel}^2$, 每张图像的帧频为 25 Hz, 且每张红外图像的图像像素值取值范围在 0~255。基于图 2, 采用装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法 (方法 1)、基于改进 CNN 的红外目标识别方法研究 (方法 2) 和深度特征联合表征的红外图像目标识别方法 (方法 3) 实行测试。

根据红外图像获取结果, 为验证装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别性能, 采用方法 1、方法 2 和方法 3 开展以下几种测试, 通过测试结果验证三种方法的有效性及其可靠性。

裂缝红外微弱目标的虚检效果会对红外微弱目标识别性能产生影响, 虚检率越高, 说明该方法的识别性能越差, 虚检率越低, 证明该方法的识别性能越好。虚检率测试结果如图 1 所示。

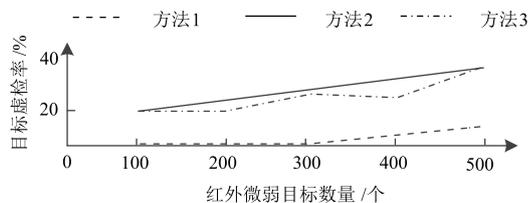


图 3 裂缝红外微弱目标虚检率对比测试

Fig. 3 Comparison test of virtual detection rate of crack infrared weak target

图 3 中, 共识别 500 个红外微弱目标, 从整体上看, 方法 1 在前 300 个目标识别中, 虚检率始终保持最低, 而方法 2 和方法 3 的测试结果与方法 1 之间相差较大, 由此即可断定方法 1 的识别性能要优于方法 2 和方法 3。

测试三种方法平均 FPS, 测试结果如图 4 所示。

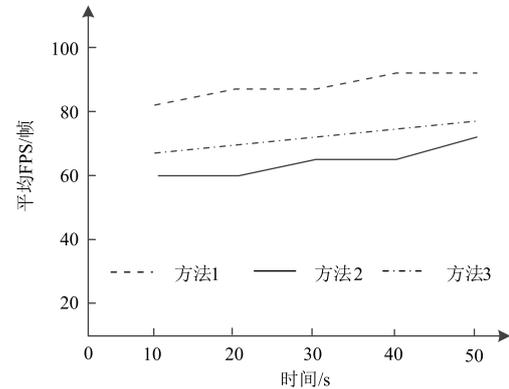


图 4 平均 FPS 对比测试

Fig. 4 Average FPS comparison test

从图 4 可见, 三种方法的平均 FPS 均随着时间的增长而不断提升, 但各个方法的上升速度不一致, 方法 1 的整体上升速度最快, 证明了方法 1 的每秒传输帧数最高, 说明方法 1 的平均 FPS 最优, 反之方法 2 的运动轨迹最低, 说明方法 2 的平均 FPS 最差。

进一步测试三种方法的裂缝红外微弱目标识别率, 测试结果如图 5 所示。

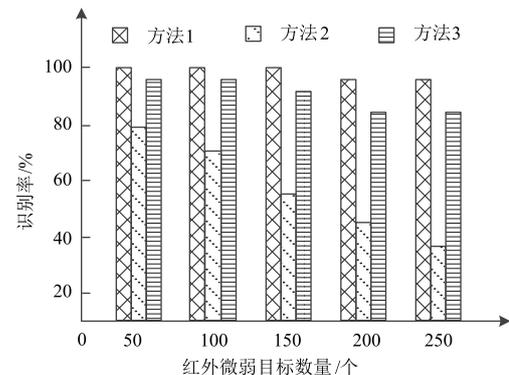


图 5 裂缝红外微弱目标识别率对比测试

Fig. 5 Comparison test of recognition rate of crack infrared weak target

图 5 中, 在裂缝红外微弱目标图像中仅有 250 个目标, 三种方法在识别时, 方法 1 的识别率最高, 而方法 2 由于虚检率及识别速度的测试结果不佳, 导致方法 2 在三种方法中识别率最低。

采用方法 1、方法 2 和方法 3 分别对装配式工程墙面裂缝图像开展滤波处理, 并将处理结果与实际结果对比, 验证三种方法的滤波效果, 具体

测试结果如图 6 所示。

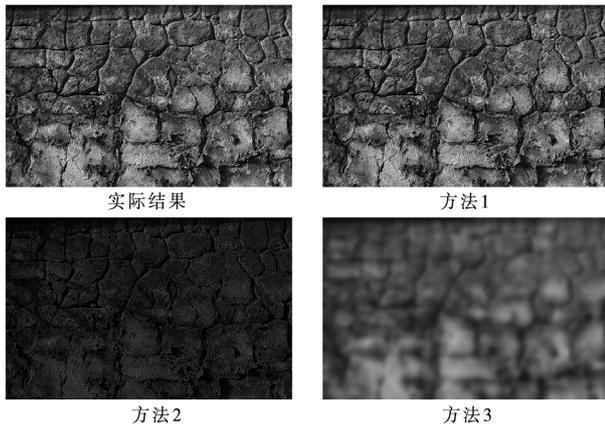


图 6 裂缝图像滤波处理对比测试

Fig. 6 Comparative test of crack image filtering processing

三种方法对裂缝图像处理, 方法 1 的处理结果与实际结果相同, 而方法 2 和方法 3 的处理结果与实际结果不一致, 表明了方法 1 的滤波处理结果最好。

综上所述, 方法 1 在装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别整体测试中, 最终测试结果均为最优结果。这是因为方法 1 对获取的装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标图像实施了预处理, 以此抑制了红外微弱目标图像中的背景杂波, 大大的增强了方法 1 的识别性能, 进而提升了方法 1 的识别率。

4 结束语

受到外界因素影响, 在识别装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标的过程中, 极易出现识别困难的问题, 由此, 提出装配式工程易变形结构裂缝红外微弱目标识别方法, 分析了装配式工程易变形结构出现裂缝的影响因素, 获取了裂缝红外微弱目标图像, 对该图像开展预处理后采用光谱匹配方法, 完成对红外微弱目标的识别。

参 考 文 献

- [1] 陈伟, 杨主张, 熊威, 等. 装配式建筑工程施工安全风险传导 DEMATEL-BN 模型 [J]. 中国安全科学学报, 2020, 30 (7): 1-6.
- [2] 刘凯, 丁晓欣, 刘春伟, 等. 基于灰色故障树的装配式建筑设计风险 [J]. 土木工程与管理学报, 2020, 37 (3): 162-167.
- [3] 许来祥, 刘刚, 刘森, 等. 基于改进 CNN 的红外目标识别方法研究 [J]. 火力与指挥控制, 2020, 45 (8): 136-141.
- [4] 史国军. 深度特征联合表征的红外图像目标识别方法 [J]. 红外与激光工程, 2021, 50 (3): 113-118.
- [5] 王倩, 张海峰, 米娜, 等. 基于移动分割与轻量化分类网络的红外目标实时识别方法 [J]. 光学技术, 2021, 47 (4): 483-488.
- [6] 霍星, 张飞, 邵堃, 等. 改进的元启发式优化算法及其在图像分割中的应用 [J]. 软件学报, 2021, 32 (11): 3452-3467.
- [7] 董道广, 芮国胜, 田文懿. 折棍变分贝叶斯图像分割算法 [J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2020, 32 (2): 270-276.
- [8] 荆建行, 孔明东, 王强, 等. 基于红外热像仪的光学薄膜吸收测试方法 [J]. 光电工程, 2021, 48 (6): 87-93.
- [9] 刘树超, 李晓彤, 覃先林, 等. GF-4 PMI 影像着火点自适应阈值分割 [J]. 遥感学报, 2020, 24 (3): 215-225.
- [10] 贺福强, 罗红, 姚学练, 等. 基于局部图像分割与多特征滤波的自适应桥梁露筋检测算法 [J]. 应用光学, 2020, 41 (3): 508-515.
- [11] 廖奕鸥, 刘聪, 赵素云. 电感耦合等离子体原子发射光谱-内标法和基体匹配法测定氧化铝基催化剂中铂含量 [J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40 (S1): 295-296.
- [12] 李绿叶, 杜米芳. 电感耦合等离子体原子发射光谱法测定船用钢中硼铅铋钨 [J]. 冶金分析, 2021, 41 (1): 75-79.