DOI:10.11918/202601078

低温环境路面覆冰分布特征红外可见双光探测技术研究

陈袁瀚旻[1], 宋孟杰[1], 石 含[1], 王洪金[2], 罗龙溪[1], 张三泰[1]

(1. 北京理工大学 机械与车辆学院, 北京 100081; 2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082)

摘 要: 无人驾驶汽车是未来交通与战场的重要载运工具,道路覆冰积冰严重威胁其行驶稳定性。为实现低温环境路面覆冰分布特征的探测,本文获取了多参数影响下覆冰的红外热成像图,分别采用图像分割算法与逼近理想解算法进行实验数据提取处理,依据可见光相片判定识别颜色阈值与准确率间数值映射关系并据此选取最佳阈值,提出并验证了一种基于红外可见双光图像分割算法的路面覆冰分布特征探测技术。研究结果表明:与形状因素不同,冰块嵌入深度与厚度、环境温度、对比材料发射率均会影响识别的最佳颜色阈值;在嵌入深度从0 mm增至20 mm、厚度从10 mm增至30 mm、环境温度从-0.98 ℃降低至-4.71 ℃时,该阈值分别从0.20降至0.04、从0.18降至0.05、从0.10增至0.25;为定量衡量覆冰分布特征,提出了基于有效均比例、失真次数、有效平均差三指标综合构造的探测准确率,以冰块识别最佳颜色阈值探测的准确率达0.81~1。本文可为随车红外热成像探冰传感技术提供底层算法和测试数据参考,弥补现有可见光图像分割法受光照限制、难识别黑冰及红外传感法存在固定位置安装、无法识别路面杂物等不足。

关键词: 低温环境;路面覆冰探测;红外传感;无人驾驶;图像分割;最佳颜色阈值

中图分类号: TP751.1; TN219 **文献标志码**: A **文章编号**: 0367-6234(2026)08-0099-14

Study on infrared-visible dual-light detection technology for distribution characteristics of pavement ice accretion in low-temperature environments

Chen Yuanhanmin[1], Song Mengjie[1], Shi Han[1], Wang Hongjin[2], Luo Longxi[1], Zhang Santai[1]

(1. School of Mechanical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;
2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Autonomous vehicles are important transport tools in future transportation and on battlefields, and pavement ice accretion seriously threatens their driving stability. To detect the distribution characteristics of pavement ice accretion in low-temperature environments, this paper acquired infrared thermal images of ice accretion under the influence of multiple parameters, adopted an image segmentation algorithm and the technique for order preference by similarity to ideal solution to extract and process experimental data respectively, and determined the numerical mapping relationship between the recognition color threshold and accuracy according to visible light images. It selected the optimal threshold accordingly and proposed and verified a detection technology for the distribution characteristics of pavement ice accretion based on an infrared-visible dual-light image segmentation algorithm. The research results show that unlike the shape factor, the optimal color threshold for recognition is affected by the embedding depth and thickness of the ice, ambient temperature, and the emissivity of the contrast materials; when the embedding depth increases from 0 mm to 20 mm; the thickness increases from 10 mm to 30 mm, and the ambient temperature decreases from -0.98 ℃ to -4.71 ℃, the threshold decreases from 0.20 to 0.04, decreases from 0.18 to 0.05, and increases from 0.10 to 0.25, respectively; to quantitatively measure the distribution characteristics of ice accretion, this paper proposed a detection accuracy comprehensively constructed based on three indicators: effective uniformity ratio, distortion frequency, and effective average deviation, and the detection accuracy based on the optimal color threshold for ice recognition reaches 0.81-1. This paper can provide an underlying algorithm and test data reference for onboard infrared thermal imaging ice-detecting sensing technology and make up for the shortcomings that existing visible light image segmentation methods are limited by illumination and difficult to identify black ice and that infrared sensing methods have fixed installation positions and are unable to identify pavement debris.

收稿日期: 2026-01-16;**录用日期**: 2026-02-11;**网络首发日期**: 2026-03-23
网络首发地址: https://link.cnki.net/urlid/23.1235.t.20260321.1617.008
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52576006);2024年度燕赵黄金台聚才计划骨干人才(科技平台)项目(244A7625D);首都信息服务数据中心低碳运行技术研究及示范,碳减排、碳中和科技支撑(Z231100006123010);中央引导地方科技发展资金项目(科技成果转移转化项目)(254Z4504G)
作者简介: 陈袁瀚旻(2001—),男,硕士研究生;宋孟杰(1984—),男,教授,博士生导师
通信作者: 宋孟杰,mengjie.song@bit.edu.cn

Keywords: low-temperature environment; pavement ice detection; infrared sensing; autonomous vehicle; image segmentation; optimal color threshold

冰是液态水经凝固作用形成的物质[1],结冰与积冰现象在日常生活与生产活动中十分常见[2-3]。这一现象在航天[4-6],航海[7-11],工业[12-15]等多个领域,往往会引发诸多负面影响,尤其在交通领域,造成的影响更为显著[16]。相关研究数据显示,遭遇大雪天气时,快速路车流量下降约 39%,车辆行驶速度降低 10 ~ 20 km/h,来车时距普遍增加 2 ~ 4 s,道路饱和流率下降约 25%[17]。与此同时,相对于晴朗天气,冰雪天气下的交通事故率会出现明显上升,冬季整体的交通事故发生率也显著高于全年水平[18]。由此可见,如何保障结冰积冰条件下道路交通与运输的安全顺畅,一直是行业亟待解决的难题之一[19]。

随着自动驾驶技术的逐渐成熟,人们开始关注其与积冰积雪道路相关的风险[20]。一方面,积冰积雪对驾驶环境有严重影响[21]。与普通沥青路面相比,积冰积雪路面附着系数显著降低,导致自动驾驶车辆的实际制动距离与减速距离延长;此外,冰雪可能部分或完全覆盖道路标线,影响车道线与道路边界的识别精度。另一方面,积冰积雪也对车辆的性能存在制约[22]。在积冰积雪路面上行驶会严重削弱自动驾驶汽车的启动、制动性能以及稳定性和机动性。为避免积冰积雪路面导致的自动驾驶交通事故,根本的解决办法是消除或减小积冰积雪路面对自动驾驶汽车的影响,即通过轨道规划避开积冰积雪,或者降低自动驾驶汽车速度至由路面附着系数确定的安全速度之下[23]。因此,对探冰方法进行研究,探索冰的性质对探冰结果的影响[24-26],从而准确识别路面覆冰积雪的分布,供自动驾驶车辆规划轨道或控制速度具有重要意义[27]。

使用接触式路面传感器对路面状况进行测量是目前的主流方法之一[28],又可细分为被动式和主动式[29]。被动法测量的主要方法是测量盐水混合物的电导率,从而判断路面的湿度和相变状态,主动式测量方法是人为改变一小块区域的温度,制造一个相变过程,同时测量相变时的温度,从而判断道路的冰点。目前这两种传感器都已有商业供应的产品,技术成熟,准确率高,但仅能测量固定场所的路面状况,且易受腐蚀影响。

非接触式路面状况传感器能够在不与路面接触的条件下获取路面状况,但需要有介质来传播信息。自动驾驶过程中采集到的可见光图像可用于识别路面覆冰积雪分布,从而对路面状况进行分类,以更好地规划自动驾驶汽车的行车轨迹与速度[30-32]。文献[33]使用安装在非专用车辆上的低成本摄像头来采集图像,使用支持向量机用提取的特征进行训练,该类方法传播信息的介质为可见光,其局限性在于受光照条件影响大[34-35]。文献[36]提出了一种基于红外测温仪远程测温的路面结冰检测方法,文献[37]开发了一种可远程检测干燥、湿润、积雪及结冰路面的低成本简易传感器,该类方法传播信息的介质为红外波[38-39],不受光照条件影响,但常用于识别固定场所的路面情况[40],需要定期清理维护,并且对路面杂物识别能力不足。

除可见光与红外光之外,也可通过其他介质传播信息,实现非接触式路面状况探测。文献[41-42]采用工作频率为 87.5 ~ 92.5 GHz 和 77 ~ 81 GHz 的极化雷达实现了路面结冰层检测,结果表明:不同粗糙度的沥青路面具有显著可区分性。该类方法中,传递信息的介质为无线电波,允许传感器随车进行路面状况的识别,但受识别速度影响,对车辆的速度有一定限制。文献[43]提出基于数字行车记录仪传感器数据的两种检测方案,经测试表现出卓越性能。此类汽车动力学方法必须在汽车运行时才能识别,有一定的延时,并且对汽车的速度有要求,一般小于等于 90 km/h。文献[44-45]提出一种基于超声波传感器反射强度的材料判别方法,可识别沥青、草坪、土壤和水坑,在样本数量足够时准确率能接近 100%,但未考虑到路面结冰的情况。

目前的路面状况监测方法种类较多,每种方法都有各自的优点与缺陷。通过对采集到的可见光相片进行图像分割,能够对各种驾驶环境进行监测并识别。该技术已在自动驾驶汽车中得到广泛应用,技术较成熟,识别准确度约 87%。但这种方法也具有一定的局限性,受光照条件限制大,并且难以对黑冰进行准确的识别。红外传感器能够弥补可见光图像识别法受光照条件影响大的缺点,精度较高,但该类红外探测器通常安装在固定场所,无法随车,对路面杂物的识别能力不足,且仅能根据冰的温度进行识别,无法进一步探测冰的类型、成分、嵌入深度等条件。针对上述两种识别方法,本文提出一种新的红外传感器探冰方法,将红外成像技术与图像分割算法结合,互相弥补二者的缺陷,并使用可见光图像识别技术对红外探测结果进行验证,分析该方法的识别准确率,为开发随车红外成像探冰传感器提供底层算法和数据支持。

1　实验方法

为模拟实际路面覆冰场景中环境温度不一、冰体形态多样且存在多种路面杂物的典型特征,本研究搭建内置盘管换热器的温控实验舱体,采用红外可见双光相机,对不同材料属性、不同厚度、嵌入深度及形状的冰体,在多梯度环境温度工况下开展探测实验,系统性获取不同实验条件下的红外与可见光相片。基于该相片编写图像分割算法,完成探测冰体面积数据的提取。随后,将红外图像的覆冰探测结果与可见光图像的结果进行对比分析,通过数据处理得到有效均比例、失真次数、有效平均差 3 个关键指标。最后,使用逼近理想解算法建立基于上述 3 个指标综合构造的探测准确率, 构建不同工况下路面覆冰探测的颜色阈值与识别准确率间的数值映射关系,据此选定最佳颜色阈值。该数值可为后续开发随车红外热成像探冰传感技术的算法提供依据。

1.1　实验装置

低温环境覆冰分布红外可见双光探测实验系统见图 1。用亚克力板制作边长为 40 cm 的正方体盒体,盒体顶部可拆卸,并加工一直径约 10 cm 的圆形开口供红外摄像仪、冷光源和热电偶伸入,盒体周围用保温棉包裹,顶部保温棉同样加工一开口。使用长 15 m,外径 10 mm,内径 9 mm 的紫铜管制成一直径约 30 cm,高约 30 cm 的盘管,将其放置在盒体内,连接恒温水浴,用于营造低温环境的同时保证环境温度的空间均匀性,为低温条件下的路面覆冰相关实验提供稳定的测试环境。盒体内的上方放置一冷光源以照明,保证能够获得清晰的可见光相片;盒体中加入约 10 cm 高的土壤作为背景材料,并在盒体的 8 个角落附近设置 8 个热电偶以监测盒体内的环境温度。在背景材料表面放置待测的冰块、其他材料如铁块等,并在其附近放置 2 个热电偶以监测二者的温度。热电偶采集到的数据通过安捷伦数据采集单元收集至计算机中,能够采集到盒体内的平均环境温度与冰和其他材料的温度。热电偶型号均为 T-TT-36 型,精度为 ±0.5 ℃。相机的型号为 InfReC R550,分辨率为 1 280 ×960。

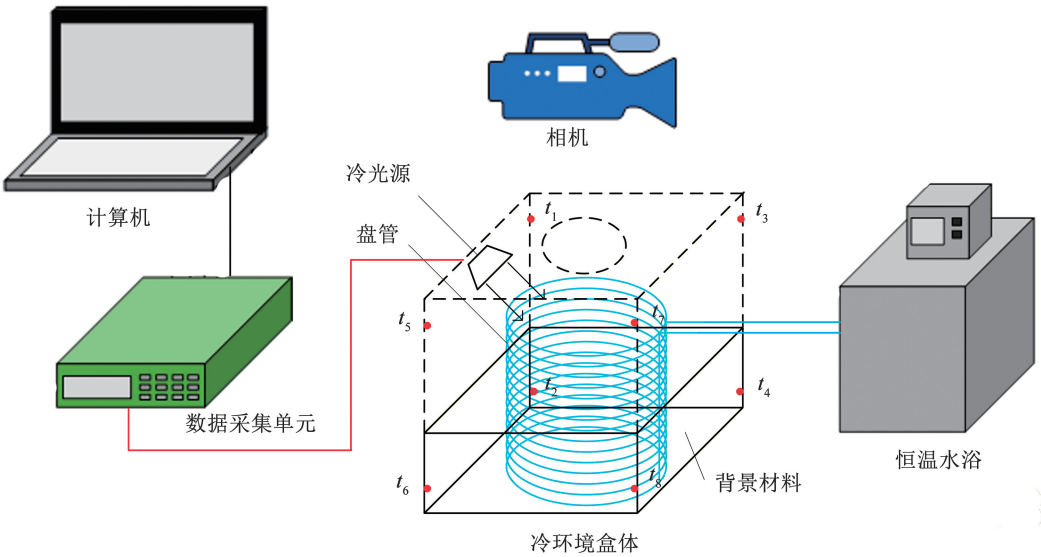


图 1　低温环境覆冰分布红外可见双光探测实验系统

Fig. 1　Experimental system diagram of infrared-visible dual-light detection for ice accretion distribution in low-temperature environments

1.2　实验步骤和条件

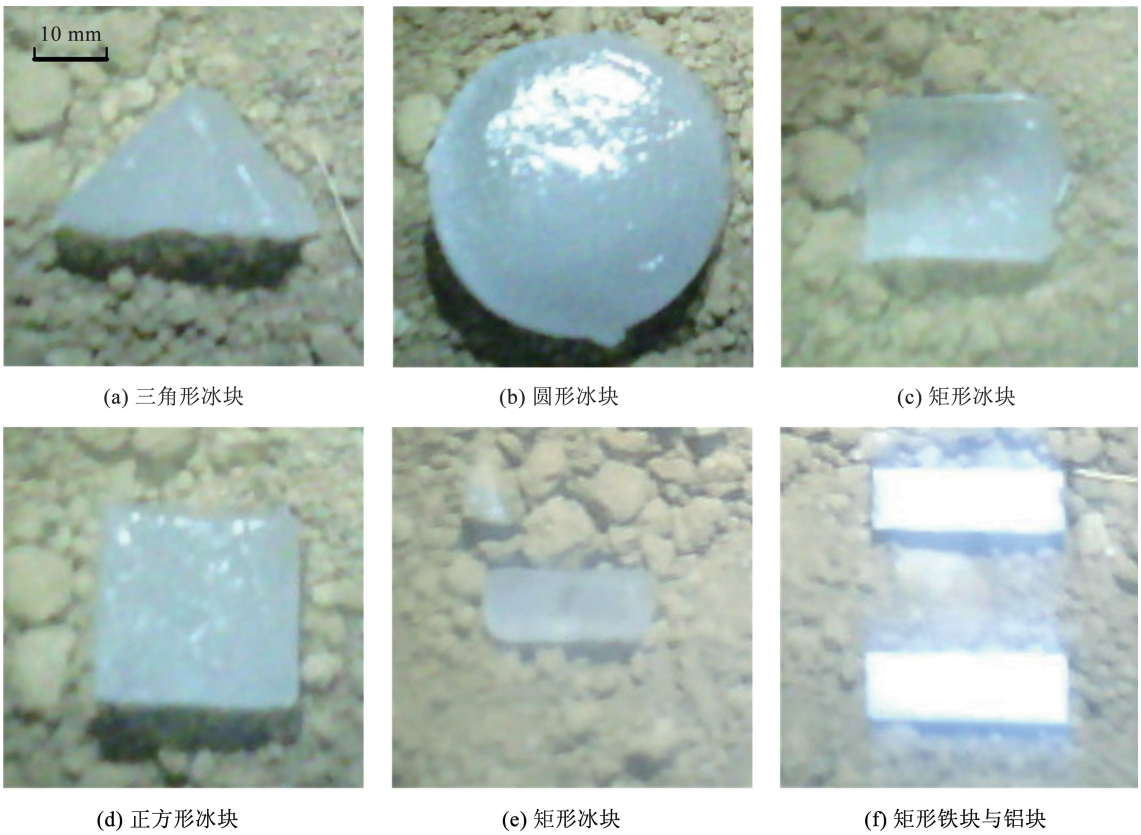
实验步骤:首先,将材料放置于背景材料上,开启冷源并通过热电偶监测盒体内温度,待温度达到预设温度后,将冰块置于盒体中背景材料上,待 20 min后开始摄像。摄像时,将顶部的亚克力板与保温棉开口打开以供摄像头伸入,摄像头距结冰表面约 30 cm,摄像完毕后关闭该开口,每隔 1 min 获得 1 组红外可见双光成像相片,共持续 10 min,每组工况共可获得 11 对双光相片。每隔 1 min 拍照一次是为连续获得 10 min 内 11 组相片,达到减小误差的目的,实际测试时可以缩小间隔,实现实时拍摄探冰。最后,设定不同颜色阈值的图像分割算法,对红外成像相片进行处理,分析各种因素对于红外相片识别的最佳颜色阈值的影响。材料种类,冰的厚度、嵌入深度、形状以及环境温度,是实际路况最常面临的关键影响因子,对最佳颜色阈值的影响最关键、最常见,因此本文首先研究这 5 种因素对最佳颜色阈值的影响,设立以环境温度、材料种类、材料的形状、厚度、嵌入深度为变量的 5 组实验,每组实验设定不同条件的工况,具体见表 1。

表 1 低温环境覆冰分布红外可见双光探测实验工况

Tab. 1 Experimental conditions of infrared-visible dual-light detection for ice accretion distribution in low-temperature environments

序号	形状	嵌入深度/mm	厚度/mm	环境温度/ ℃	测试材料
1-1	圆形	0	10	-5	冰
1-2	矩形	0	10	-5	冰
1-3	三角形	0	10	-5	冰
1-4	正方形	0	10	-5	冰
2-1	矩形	0	30	-5	冰
2-2	矩形	5	30	-5	冰
2-3	矩形	10	30	-5	冰
2-4	矩形	15	30	-5	冰
2-5	矩形	20	30	-5	冰
3-1	矩形	10	10	-5	冰
3-2	矩形	10	15	-5	冰
3-3	矩形	10	20	-5	冰
3-4	矩形	10	25	-5	冰
3-5	矩形	10	30	-5	冰
4-1	矩形	0	10	-1	冰
4-2	矩形	0	10	-2	冰
4-3	矩形	0	10	-3	冰
4-4	矩形	0	10	-4	冰
4-5	矩形	0	10	-5	冰
5-1	矩形	0	10	-5	冰
5-2	矩形	0	10	-5	铁
5-3	矩形	0	10	-5	铝

形状变量组中,环境温度为 -5 ℃,嵌入深度为 0 mm,厚度为 10 mm,材料为冰。横截面形状分别为半径为 20 mm 的圆形,20 mm × 30 mm 的矩形,边长为 30 mm 的三角形,边长为 30 mm 的正方形。嵌入深度变量组中,环境温度为 -5 ℃,横截面形状为 10 mm × 30 mm 的矩形,厚度为 30 mm,材料为冰,嵌入深度分别为 0、5、10、15、20 mm。厚度变量组中,环境温度为 -5 ℃,横截面形状为 10 mm × 30 mm 的矩形,嵌入深度为 10 mm,材料为冰,厚度分别为 10、15、20、25、30 mm。环境温度变量组中,横截面形状为 10 mm × 30 mm 的矩形,嵌入深度为 0 mm,厚度为 10 mm,材料为冰,环境温度分别为 -1 ℃、-2 ℃、-3 ℃、-4 ℃、-5 ℃。材料种类变量组中,环境温度 -5 ℃,横截面形状为 10 mm × 30 mm 的矩形,嵌入深度为 0 mm,厚度为 10 mm,材料种类分别为冰、铁、铝。表中序号 2-3 与 3-5,4-5 与5-1实验工况一致,是因为这两个工况同时用于分析不同变量变化对实验结果的影响规律,该工况实验数据为统一测定,未产生冗余的实验数据采集。不同材料及形状的测试样品相片见图 2。



(a) 三角形冰块 (b) 圆形冰块 (c) 矩形冰块

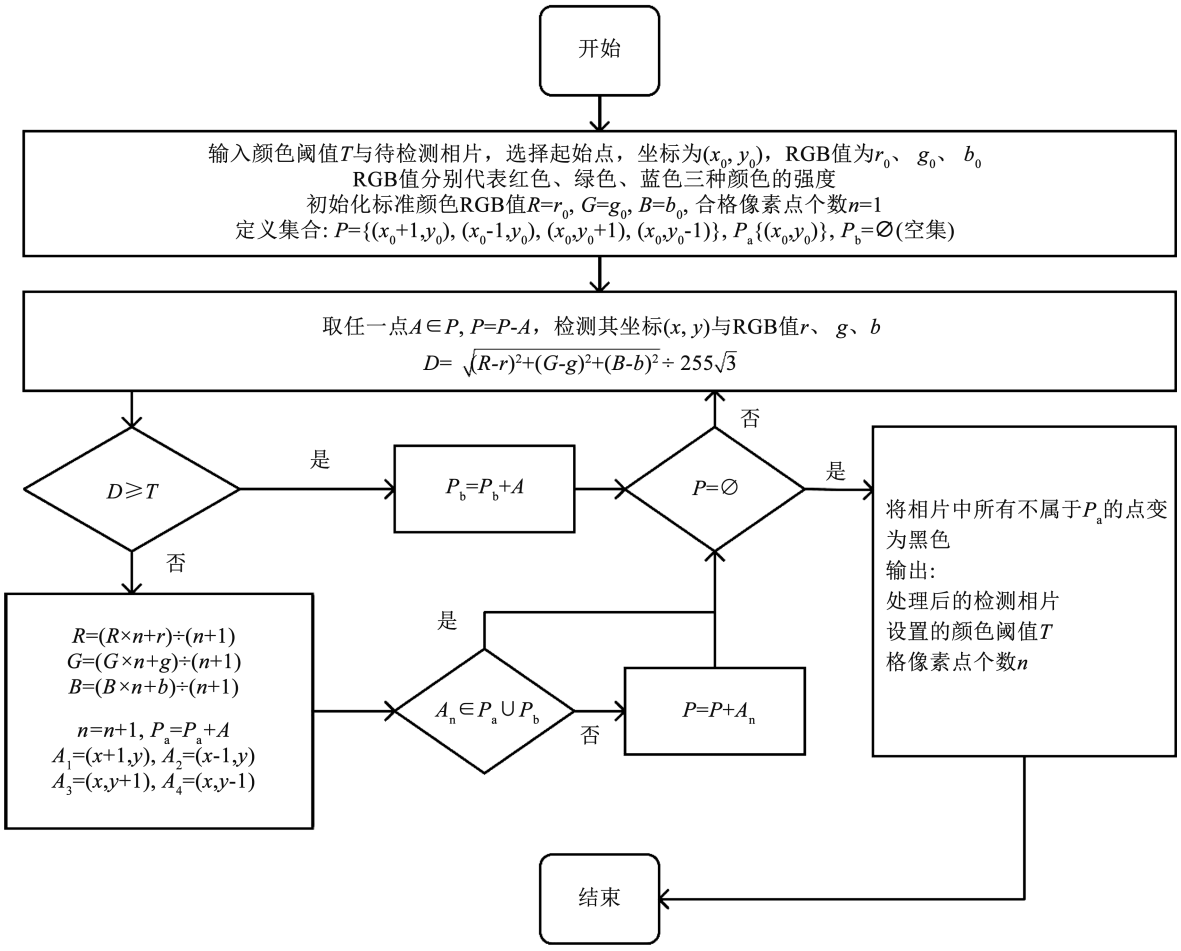
(d) 正方形冰块 (e) 矩形冰块 (f) 矩形铁块与铝块

图 2 不同材料及横截面形状的测试样品相片

Fig. 2 Photos of test samples with different materials and cross-sectional shapes

1.3　数据处理

本文的数据处理可分为 3 部分:首先,用 MATLAB 编写代码,该代码能够依据像素点颜色差值实现不同区域的分割。实现根据颜色的区域分割算法。该算法流程图及核心代码见图 3。



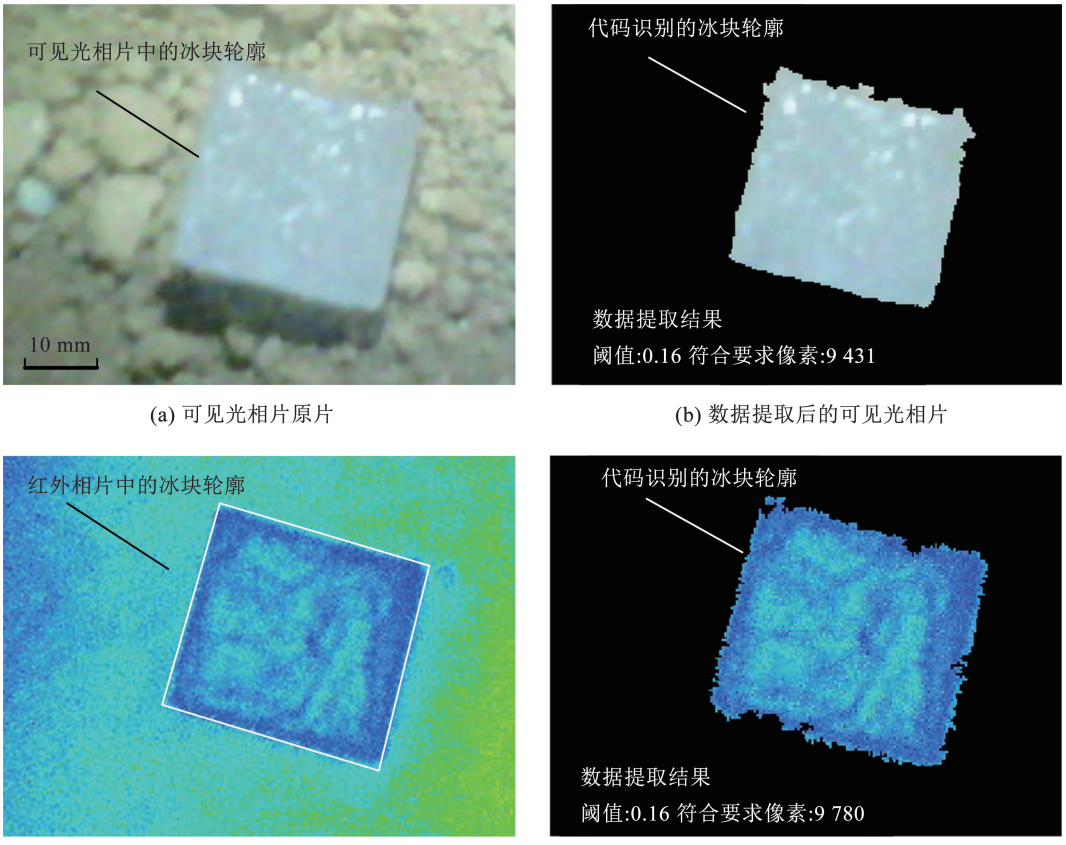
核心代码:

```
#提取当前像素点颜色并计算颜色差
current_color=double(squeeze(img(curr_y,curr_x,:)));
color_diff=norm(current_color-standard_color);
#判断颜色差是否在阈值内
if color_diff<=threshold
#标记合格像素点并更新标准颜色与合格像素点个数
valid mask(curr_y,curr_x)= true;
processed_mask(curr_y, curr_x)= true;
valid_count=valid_count+1;
standard_color=((standard_color*(valid_count-1))+current_color)/valid_count;
```

图 3　基于颜色阈值的图像分割算法流程图及核心代码

Fig. 3　Flow chart and core code of image segmentation algorithm based on color threshold

该算法的遍历逻辑为广度优先扩散检测:以起始像素点为核心,合格像素点向四周扩散检测,不合格像素点形成检测边界,终止扩散。该算法本质为检测周围像素点颜色差距大于阈值的点,并将其定为边界,其相较于传统边缘检测算法的优点在于,通过选定起始点这一方式,避免对全图进行检测,减少计算量的同时,精准识别起始点所在区域的边界,而非全图的所有边界。因此,根据算法的运行逻辑可知,起始点的选择范围较广,只要起始点在冰块区域内,则该点的具体位置选取并不会影响最终结果,该性质已经过测试检验。在实验数据处理时,可手动选择起始点,在实际路面探测时,可根据冰在红外相机下通常温度较低的特性,选择位于覆冰区域内的起始点。在对每组工况的 11 对双光相片进行上述过程后,可得到不同颜色阈值下 11 对双光相片的合格像素点个数。基于双光相片的数据提取示例见图 4,代码对图 4(a)、(c)中的红外相片原片按照前文所述算法进行识别,即可得到图 4(b)、(d)中的信息,包括识别为冰的区域、像素点个数以及所使用的颜色阈值。



(a) 可见光相片原片　(b) 数据提取后的可见光相片

(c) 红外相片原片　(d) 数据提取后的红外相片

图 4　基于红外可见双光相片的数据提取示例

Fig. 4　Example of data extraction based on infrared-visible dual-light images

随后,将可见光相片的合格像素点个数记为 $a_1 \sim a_{11}$,将红外相片的合格像素点个数记为 $b_1 \sim b_{11}$。据此可得到 11 对相片的红外光相片识别面积与可见光相片识别面积的比例 $r_1 \sim r_{11}$,其计算方式为

$$r_i = \frac{b_i}{a_i} \tag{1}$$

式中 r 也可看作是红外识别的面积准确率。若该准确率小于 0.5 或大于 2,则将该比例记为失真比例,不再参与后续的数据计算,并记录 11 对相片的失真次数 n。将所有保留的数据记为 r_{ei},据此可得到有效均比例 r_e,其计算式为

$$r_e = \frac{\sum r_{ei}}{n} \tag{2}$$

当面积准确率小于 0.5 或大于 2 时,表明探测面积为真实面积的一半以下或是超过真实面积的 2 倍,这种情况在所有数据中占比较少,但其中的极端值会对面积准确率产生极大的影响,因此设立有效均比例并排除这部分数据,可覆盖大部分探测场景,并且减少了极端异常值对面积准确率评价的影响。据此可计算出所有有效比例与有效均比例的差值,平均得到有效平均差 s,其计算式为

$$s = \frac{\sum |r_e - r_i|}{11 - n} \tag{3}$$

有效平均差能够反映该组数据的离散程度,验证探测结果的可靠性。至此,对于该组工况的每个阈值,都能得到 3 种数据:有效均比例 r_e,失真次数 n 与有效平均差 s,失真次数代表识别出现重大错误的次数,有效均比例与有效平均差则分别代表识别较准确时的具体准确率和稳定程度。

最后,根据逼近理想解算法,使用每个阈值的 3 种数据计算出该阈值的准确率得分。该算法具体过程如下。定义当阈值为 a 时,有效均比例、总失真次数和有效平均差分别为 r_{ea}、n_a、s_a,其中 a 可取 1 ~ 8,分别对应用于识别相片的 8 个不同颜色阈值。算法的第一步是将所有数据正向化。r_{ea}、n_a、s_a 中,r_{ea} 为中间型指标,其值越接近 1 越好,而另外两种为极小型指标,其值越接近 0 越好。在对3 种指标进行正向化处理后,可以将其全部转化为值越大越好的极大型指标,方便后续运算。记正向化后的数据为 r_{ea1}、n_{a1}、s_{a1}。算法第二步为将所有指标标准化,其目的为消除不同数据指标量纲的影响。记标准化后

的数据为 r_{ea2}、n_{a2}、s_{a2},计算式分别为:

$$r_{ea2} = \frac{r_{ea1}}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8} r_{ea1}^2}} = \frac{|r_{ea}-1|}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8}(r_{ea}-1)^2}} \tag{4}$$

$$n_{a2} = \frac{n_{a1}}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8} n_{a1}^2}} = \frac{\max(n_a)-n_a}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8}[\max(n_a)-n_a]^2}} \tag{5}$$

$$s_{a2} = \frac{s_{a1}}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8} s_{a1}^2}} = \frac{\max(s_a)-s_a}{\sqrt{\sum_{a=1}^{8}[\max(s_a)-s_a]^2}} \tag{6}$$

根据正向化标准化后的数据,可得到最优解($\max(r_{ea2})$,$\max(n_{a2})$,$\max(s_{a2})$)与最劣解($\min(r_{ea2})$,$\min(n_{a2})$,$\min(s_{a2})$),据此可计算每个阈值方案与最优解的距离 d_a^+ 和与最劣解的距离 d_a^-,计算方式分别为:

$$d_a^+ = \sqrt{0.5\times(\max(r_{ea2})-r_{ea2})^2 + 0.4\times(\max(n_{a2})-n_{a2})^2 + 0.1\times(\max(s_{a2})-s_{a2})^2} \tag{7}$$

$$d_a^- = \sqrt{0.5\times(\min(r_{ea2})-r_{ea2})^2 + 0.4\times(\min(n_{a2})-n_{a2})^2 + 0.1\times(\min(s_{a2})-s_{a2})^2} \tag{8}$$

准确率得分选取有效均比例、失真次数、有效平均差 3 项指标,并依据各指标对探测效果评价的实际表征价值、贡献度及重要性层级,进行差异化的权重分配,依次设定为 0.5、0.4 和 0.1。该权重取值的原因与依据如下。

有效均比例作为直接反映未失真状态下覆冰探测面积精准程度的量化指标,其数值结果直接关联路面覆冰分布探测的核心目标,即准确获取覆冰区域的实际面积,是判断探测方法是否具备实际应用价值的关键依据,其结果直接决定了探测数据的核心有效性,因此在综合评价中占据主导地位,被赋予最高的 0.5 权重;失真次数用于量化反映探测过程中出现重大失误的频次,在路面覆冰探测实践中,探测重大失真会直接导致覆冰区域的误判、漏判等问题,严重影响探测结果的整体可靠性,若该指标表现不佳,即便探测面积的精准度达到要求,也会因频繁的重大失误大幅降低探测方法的实际应用价值,其对探测结果可靠性的影响仅次于核心的面积精准度,重要性居于次位,故赋予 0.4 的权重;有效平均差则是表征探测数据离散程度的指标,主要反映探测结果的稳定性特征,该指标的评价价值具有明显的从属性,仅当前两项核心指标满足实验测试与实际应用的基本要求时,其才用于辅助判别探测方法在多次重复测试中的稳定性表现,对综合评价结果的实际影响程度远低于前两项核心指标,仅作为辅助评价依据补充判断,因此将其权重设置为最低的 0.1。

此种权重分配方式兼顾了探测结果的核心准确性、关键可靠性与辅助稳定性,使综合评价体系的设计更贴合路面覆冰分布特征探测的实际应用需求,保证评价结果的科学性与合理性。最后,根据上述两个数据计算每个阈值的最终准确率得分 A_a,其计算式为

$$A_a = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \tag{9}$$

准确率得分最高的阈值被记为该组工况条件下的最佳颜色阈值。统计每组工况的最佳颜色阈值,即可分析不同环境温度以及冰的不同形状等变量对最佳颜色阈值的影响规律。该实验的误差主要来自下面几个方面:首先,在热电偶测量环境温度的过程中,会产生 ±0.5 ℃的误差,但该误差不会改变冰块的各种变量对最佳颜色阈值的影响规律。其次,实验还会因不可控因素如人员拍照操作的微小区别产生随机误差,但已通过每组重复 11 次摄像来减少这部分误差。总的来说,实验结果真实可靠。

2　结果与讨论

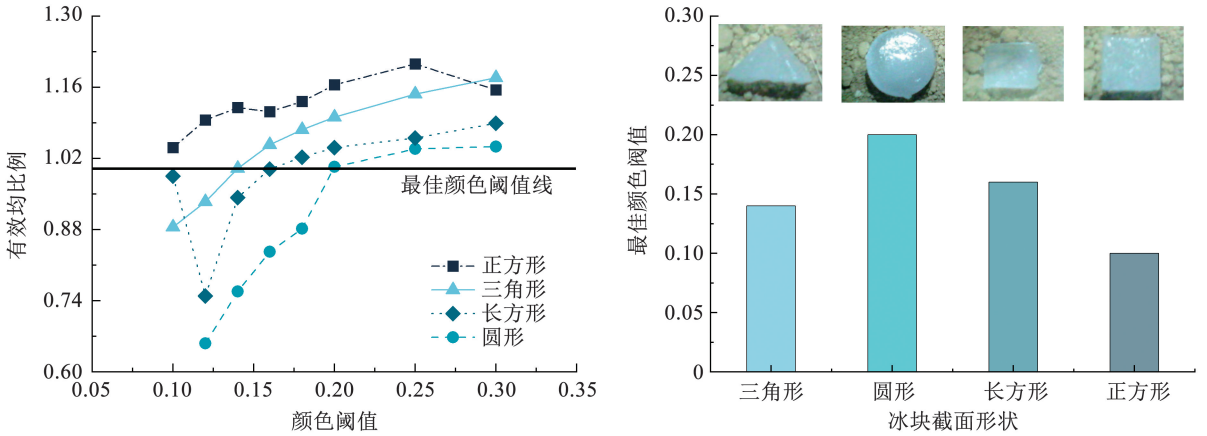
本文共完成了 5 组不同变量的实验,每组实验包括数个工况,总计完成了 22 个工况并得到了 242 组双光相片。结果与讨论分为两部分,第一部分仅依据有效均比例 r_e 进行结果分析,即有效均比例最接近 1 时对应的颜色阈值为最佳颜色阈值。第二部分为用逼近理想解算法综合有效均比例 r_e,失真次数 n 与有效平均差 s 之后的结果分析。

2.1　红外与可见相片中冰识别区域的对比分析

不同形状下有效均比例随颜色阈值的变化及不同形状下的最佳颜色阈值见图 5。形状为三角形、圆形、长方形和正方形的冰块,其最佳颜色阈值分别为 0.14、0.2、0.16、0.1,所对应的有效均比例分别为 1.00、1.00、0.99、1.04。不同形状冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为:正方形、三角形、长方形、圆形。可以看出,仅考虑有效均比例时,不同形状的冰块所对应的最佳颜色阈值不同,且并没有明显规律。

不同嵌入深度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同嵌入深度下的最佳颜色阈值见图 6。嵌入深

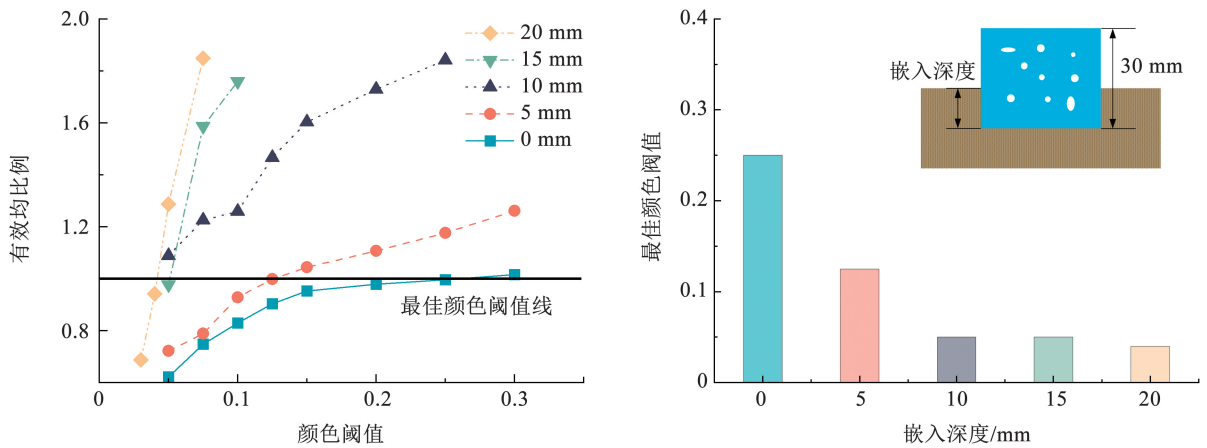
度为 0、5、10、15、20 mm 的冰块,其最佳颜色阈值分别为 0.25、0.125、0.05、0.05、0.04,所对应的有效均比例分别为 0.99、1.00、1.09、0.98、0.94。不同嵌入深度冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为:20、15、10、5、0 mm。可以看出,仅考虑有效均比例时,不同嵌入深度的冰块,其最佳颜色阈值随嵌入深度的增加而降低,当嵌入深度从 0 mm 增加到 20 mm 时,最佳颜色阈值缩小至 16%。



(a) 不同形状下有效均比例随颜色阈值的变化 (b) 不同形状下的最佳颜色阈值

图 5 不同形状下有效均比例随颜色阈值的变化及不同形状下的最佳颜色阈值

Fig. 5 Variation of effective uniformity ratio with color threshold under different shapes and optimal color threshold under different shapes



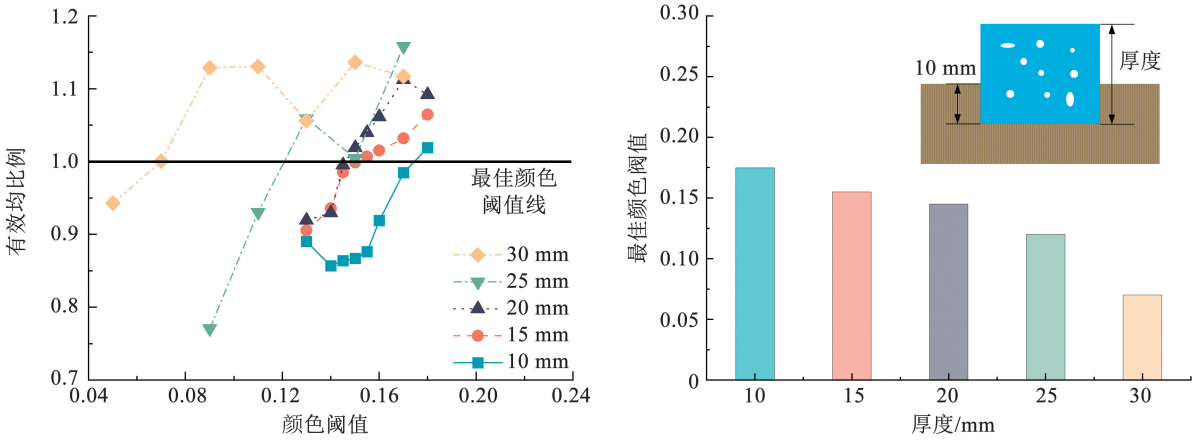
(a) 不同嵌入深度下有效均比例随颜色阈值的变化 (b) 不同嵌入深度下的最佳颜色阈值

图 6 不同嵌入深度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同嵌入深度下的最佳颜色阈值

Fig. 6 Variation of effective uniformity ratio with color threshold under different embedding depths and optimal color threshold under different embedding depths

不同厚度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同厚度下的最佳颜色阈值见图 7。厚度为 10、15、20、25、30 mm 的冰块,其最佳颜色阈值分别为0.17、0.15、0.145、0.13、0.07,所对应的有效均比例分别为 0.98、1.00、1.00、1.06、1.00。不同厚度冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为:30、25、20、15、10 mm。可以看出,仅考虑有效均比例时,不同嵌入深度的冰块,其最佳颜色阈值随厚度的增加而降低,当厚度从 10 mm 增加到 30 mm 时,最佳颜色阈值缩小至 41%。

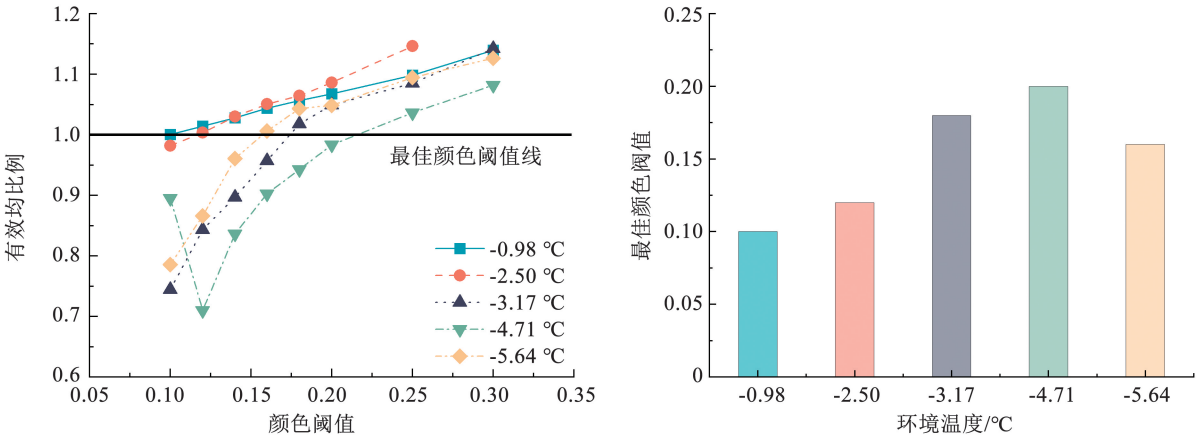
不同环境温度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同环境温度下的最佳颜色阈值见图 8。环境温度为 -0.98、-2.50、-3.17、-4.71、-5.64 ℃下的冰块,其最佳颜色阈值分别为 0.10、0.12、0.18、0.20、0.16,所对应的有效均比例分别为 1.00、1.00、1.02、0.98、1.00。不同环境温度下冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为:-0.98、-2.50、-5.64、-3.17、-4.71 ℃。可以看出,排除环境温度为 -5.64 ℃的数据,仅考虑有效均比例时,不同环境温度下的冰块,其最佳颜色阈值随环境温度的增加而降低,当温度从 -0.98 ℃降低至 4.71 ℃时,最佳颜色阈值增加至 200%。



(a) 不同厚度下有效均比例随颜色阈值的变化　　(b) 不同厚度下的最佳颜色阈值

图 7　不同厚度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同厚度下的最佳颜色阈值

Fig. 7　Variation of effective uniformity ratio with color threshold under different thicknesses and optimal color threshold under different thicknesses

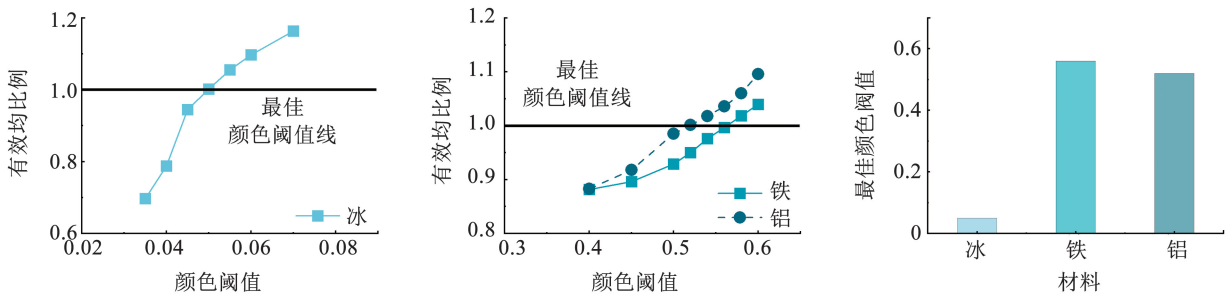


(a) 不同环境温度下有效均比例随颜色阈值的变化　　(b) 不同环境温度下的最佳颜色阈值

图 8　不同环境温度下有效均比例随颜色阈值的变化及不同环境温度下的最佳颜色阈值

Fig. 8　Variation of effective uniformity ratio with color threshold under different ambient temperatures and optimal color threshold under different ambient temperatures

不同材料下有效均比例随颜色阈值的变化及不同材料下的最佳颜色阈值见图 9。材料为铁、铝、冰时,其最佳颜色阈值分别为 0.56、0.52、0.05,所对应的有效均比例均为 1.00。不同材料的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为:冰、铝、铁。可以看出,仅考虑有效均比例时,铁块的最佳颜色阈值要略大于铝块,而二者的最佳颜色阈值约为冰块的最佳颜色阈值的十倍。



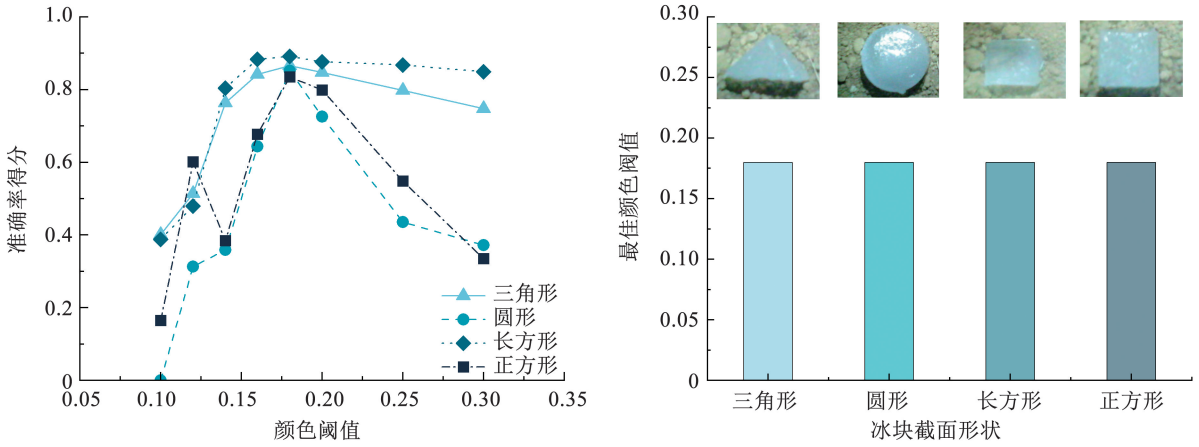
(a) 材料为冰时有效均比例随颜色阈值的变化　　(b) 材料为铁、铝时有效均比例随颜色阈值的变化　　(c) 不同材料下的最佳颜色阈值

图 9　不同材料下有效均比例随颜色阈值的变化及不同材料下的最佳颜色阈值

Fig. 9　Variation of effective uniformity ratio with color threshold under different materials and optimal color threshold under different materials

2.2 逼近理想解算法下最佳颜色阈值分析

为得到更全面的结论，本文继续根据逼近理想解算法计算每种颜色阈值下的准确率得分，分析不同变量下的最佳颜色阈值。与仅考虑有效均比例时相比，准确率得分这一评价指标同时考虑了有效均比例、总失真次数以及有效平均差，可得到更准确全面的结果。逼近理想解算法下不同形状的准确率得分随颜色阈值的变化及不同形状下的最佳颜色阈值见图 10。形状为三角形、圆形、长方形和正方形的冰块，其最佳颜色阈值均为 0.18，对应的准确度得分分别为 0.87、0.88、0.89、0.83。与仅考虑有效均比例时的结论不同，该结果显示，冰块的形状对逼近理想解算法下的红外识别最佳颜色阈值几乎没有影响。

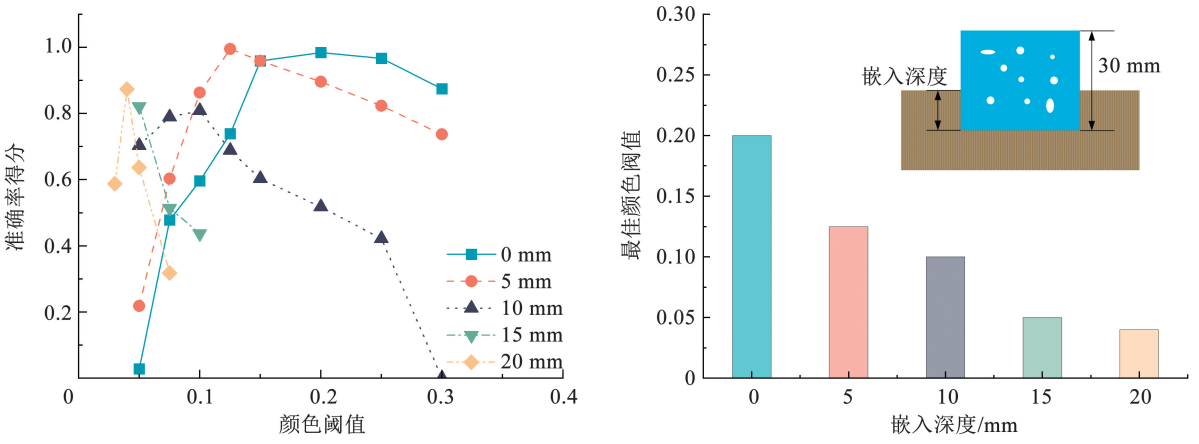


(a) 不同形状下的准确率得分随颜色阈值的变化　(b) 不同形状下的最佳颜色阈值

图 10　不同形状的准确率得分随颜色阈值的变化及不同形状下的最佳颜色阈值

Fig. 10　Variation of accuracy score with color threshold for different shapes and optimal color threshold under different shapes

逼近理想解算法下不同嵌入深度的准确率得分随颜色阈值的变化及不同嵌入深度下的最佳颜色阈值见图 11。嵌入深度为 0、5、10、15、20 mm 的冰块，其最佳颜色阈值分别为 0.20、0.125、0.1、0.05、0.04，所对应的准确率得分分别为 0.98、1.00、0.81、0.82、0.87。不同嵌入深度冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为：20、15、10、5、0 mm。可见，随着嵌入深度的增加，冰的红外识别最佳颜色阈值逐渐减小，当嵌入深度从 0 mm 增加至 20 mm 时，最佳颜色阈值缩小至原本的 20%。该结论与仅考虑有效均比例时的结论相同。分析其原因为嵌入深度会影响冰块与土壤间的换热，当嵌入深度增加时，冰与土壤的接触面积也会增加，这会导致换热更加充分，冰与土壤的温度更接近，所以在红外相片中的颜色也更接近，需要更小的颜色阈值进行识别区分。

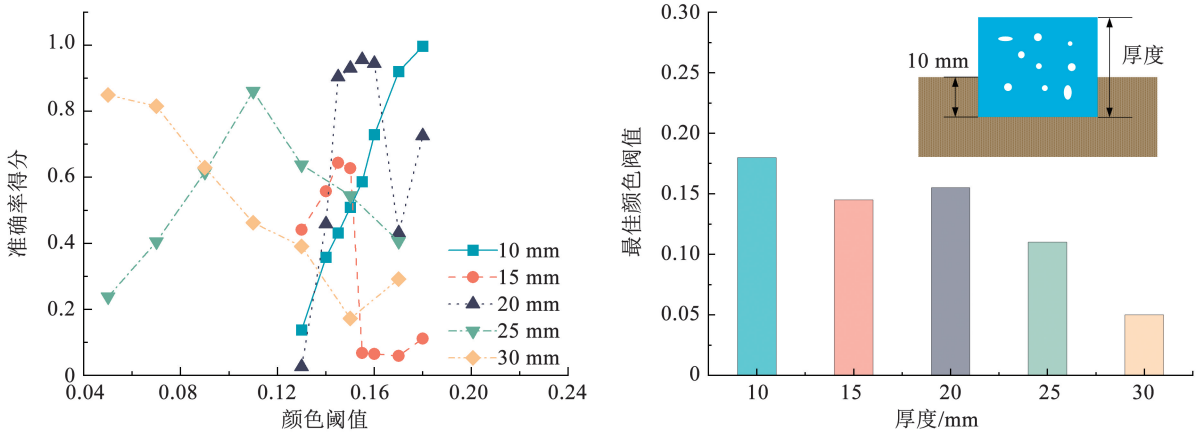


(a) 不同嵌入深度下的准确率得分随颜色阈值的变化　(b) 不同嵌入深度下的最佳颜色阈值

图 11　不同嵌入深度的准确率得分随颜色阈值的变化及不同嵌入深度下的最佳颜色阈值

Fig. 11　Variation of accuracy score with color threshold for different embedding depths and optimal color threshold under different embedding depths

逼近理想解算法下不同厚度的准确率得分随颜色阈值变化及不同厚度下的最佳颜色阈值见图 12。厚度为 10、15、20、25、30 mm 的冰块，其最佳颜色阈值分别为 0.18、0.145、0.155、0.11、0.05，所对应的准确率得分分别为 1.00、0.64、0.96、0.86、0.85。不同厚度冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为：30、25、15、20、10 mm。可见厚度为15 mm时的数据不符合规律。分析数据可知，该组在颜色阈值为 0.155 时有效均比例最接近 1，符合规律，但因为此时总失真次数为 1，而颜色阈值为0.145时总失真次数为 0，并且该组的最大总失真次数为 1，这种情况导致了颜色阈值为 0.155 时，逼近理想解算法下总失真次数的得分为 0，极大影响了准确率得分，所以可以判断该误差是由于实验次数不足及准确率得分的计算方法的局限性导致的，排除掉该误差后，该结论与仅考虑有效均比例时的结论相同，随着厚度的增加，冰的红外识别最佳颜色阈值逐渐减小，当厚度从 10 mm 增加至 30 mm 时，最佳颜色阈值减小至原本的 28%。分析其原因与嵌入深度所引起的变化类似，当厚度增加时，冰与空气的接触面积更大，换热更加充分，这也会导致冰与周围环境温度更接近，所以需要更小的颜色阈值进行识别区分。



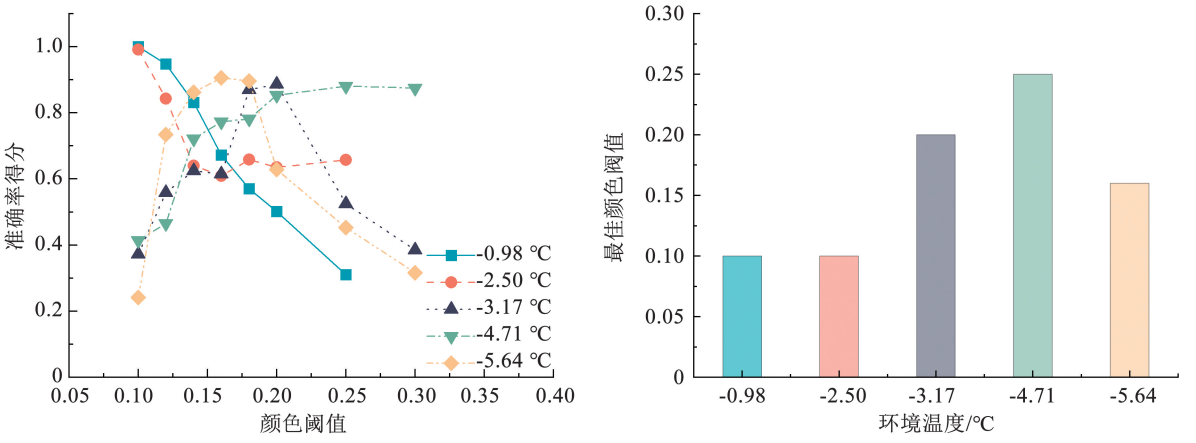
(a) 不同厚度下的准确率得分随颜色阈值的变化　　(b) 不同厚度下的最佳颜色阈值

图 12　不同厚度的准确率得分随颜色阈值的变化及不同厚度下的最佳颜色阈值

Fig. 12　Variation of accuracy score with color threshold for different thicknesses and optimal color threshold under different thicknesses

逼近理想解算法下不同环境温度的准确率得分随颜色阈值的变化及不同环境温度下的最佳颜色阈值见图 13。环境温度为 −0.98、−2.50、−3.17、−4.71、−5.64 ℃下的冰块，其最佳颜色阈值分别为 0.10、0.10、0.20、0.25、0.16，所对应的准确率得分分别为 1.00、1.00、0.89、0.88、0.91。不同环境温度下冰块的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为：−0.98、−2.50、−5.64、−3.17、−4.71 ℃。总的来说，随着环境温度的降低，冰的红外识别最佳颜色阈值增加，当温度从 −0.98 ℃降低至 −4.71 ℃时，最佳颜色阈值提升至原本的 250%。该结论与仅考虑有效均比例时的结论相同。当温度接近 0 ℃时，冰更易融化并浸湿其周围的土壤，导致二者的温度更接近，所以在红外相片上的颜色更接近，需要更小的颜色阈值进行识别区分。而温度为 −5.64 ℃时不符合规律的原因可能是在温度较低时，冰融化的量可忽略不计，此时最佳颜色阈值的变化并不由环境温度的变化引起，而是由实验操作或设备带来的随机误差导致。

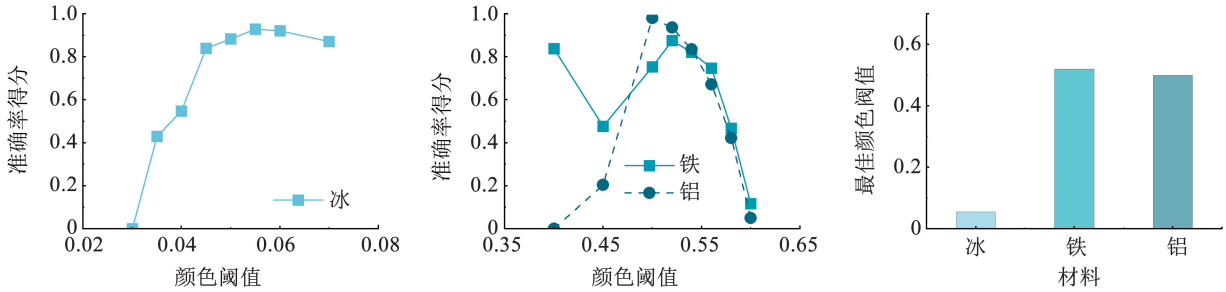
逼近理想解算法下不同材料的红外相片中识别面积与可见相片中识别面积的比例随颜色阈值的变化及不同材料下的最佳颜色阈值见图 14。材料为铁、铝、冰时，其最佳颜色阈值分别为 0.52、0.50、0.05，所对应的准确率得分分别为 0.86、0.98、0.93。不同材料的红外识别最佳颜色阈值从小到大排序为：冰、铝、铁，其中铁、铝的最佳颜色阈值约为冰的 10 倍。该结论与仅考虑有效均比例时的结论相同。分析其原因为不同材料的物体发射率不同，冰的发射率为 0.98，土壤的发射率为 0.92 ~ 0.95，而铁与铝的发射率根据氧化程度的不同分别为0.1 ~ 0.8、0.1 ~ 0.4。因此，材料为铁、铝的物体相较于土壤，在相同温度下时发射的红外辐射强度会小很多，在红外相片中的颜色差异非常明显，而冰块的发射率与土壤接近，因此需要更小的颜色阈值进行识别区分。



(a) 不同环境温度下的准确率得分随颜色阈值的变化　(b) 不同环境温度下的最佳颜色阈值

图 13　不同环境温度的准确率得分随颜色阈值的变化及不同环境温度下的最佳颜色阈值

Fig. 13　Variation of accuracy score with color threshold for different ambient temperatures and optimal color threshold under different ambient temperatures



(a) 材料为冰时准确率得分随颜色阈值的变化　(b) 材料为铁、铝时准确率得分随颜色阈值的变化　(c) 不同材料下的最佳颜色阈值

图 14　不同材料的准确率得分随颜色阈值的变化及不同材料下的最佳颜色阈值

Fig. 14　Variation of accuracy score with color threshold for different materials and optimal color threshold under different materials

3　结　论

为实现基于红外可见双光的路面覆冰分布特征探测，本文搭建了红外可见双光探冰实验台，设立了受形状、嵌入深度等多变量影响的实验工况，编写基于颜色阈值的图像分割代码并据此对双光相片进行数据提取，最后使用逼近理想解算法对实验数据进行综合处理与分析，得到以下结论：

1）形状因素对红外探冰的最佳颜色阈值几乎无影响。与形状因素不同，冰块嵌入深度、冰块厚度、环境温度、对比材料发射率等因素均会影响红外探冰识别的最佳颜色阈值，影响趋势如下：当冰块嵌入深度增加时，最佳颜色阈值降低；冰块厚度增加时，最佳颜色阈值降低；环境温度降低时，最佳颜色阈值增加；对比材料发射率降低时，最佳颜色阈值增加。

2）嵌入深度由 0 mm 增加至 20 mm 时，最佳颜色阈值从 0.20 变为 0.04，降低至原本的 20%，厚度由 10 mm 增加至 30 mm 时，最佳颜色阈值从 0.18 变为 0.05，降低至原本的 28%，环境温度从 −0.98 ℃ 降低至 −4.71 ℃ 时，最佳颜色阈值从 0.10 变为 0.25，提升至原本的 250%。对比材料为铁、铝时，其最佳颜色阈值约为冰的 10 倍。

3）对于路况上不同嵌入深度、厚度以及不同环境温度的冰，可用其他方式测量这些影响因素后，依本文方法调整图像分割算法的最佳颜色阈值，从而实现高精准的覆冰分布特征探测；对于环境中其他杂物，亦可根据材料发射率的差异进行辨识，排除干扰。为定量衡量覆冰分布特征，表示探测准确率，提出了基于有效均比例、失真次数、有效平均差三指标综合构造的准确率得分。依冰块识别最佳颜色阈值探测的准确率，根据冰块参数不同，最低可达 0.81，最高可达 1。为提高准确率，可以使用更多颜色阈值对该参数下冰块的红外相片进行测试，从而找到更准确的最佳颜色阈值，也可以考虑提高红外相机的分辨率。该准确率与使用单一的可见光图像识别或红外传感器时准确率相近，但弥补了可见光图像识别法受光照条件影响大、无法识别黑冰的缺点，同时解决了现有的红外传感器只能安装在固定场所、对路面杂物识别能力不足的缺陷。

参考文献

[1] Shi Han, Song Mengjie, Ge Junfeng, et al. A high-precision saltwater ice thickness and salinity detection method based on capacitive coupled planar microwave resonator[J]. Cold Regions Science and Technology, 2025, 231: 104417. DOI: 10.1016/j.coldregions.2024.104417

[2] Shao Keke, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Experimental study on the distribution and growth characteristics of trapped air bubbles in ice slices at different freezing temperatures[J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 244: 122600. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2024.122600

[3] 焦明顺,陈苗苗,金哲岩,等. 低温环境下水滴在冷表面结冰过程的实验研究[J]. 制冷学报, 2020, 41(1): 74
Jiao Mingshun, Chen Miaomiao, Jin Zheyan, et al. Experimental study on freezing process of water droplet on cold surface at low ambient temperatures[J]. Journal of Refrigeration, 2020, 41(1): 74

[4] Chuang Huiya, Mao Yali, Zhou Binbin, et al. R2O transition of NCAR's icing and turbulence algorithms into NCEP's operations [J]. Pure & Applied Geophysics, 2019, 176(5): 2057. DOI: 10.1007/s00024-018-1975-x

[5] Nickovic S, Cvetkovic B, Petkovi ćS, et al. Cloud icing by mineral dust and impacts to aviation safety[J]. Scientific Reports, 2021, 1(1): 6411. DOI: 10.1038/s41598-021-85566-y

[6] Zhang Xuan, Liu Xin, Wu Xiaomin, et al. Impacting-freezing dynamics of a supercooled water droplet on a cold surface: Rebound and adhesion[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 158: 119997. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119997

[7] Yu Yongping, Zhao Daisen, Li Chenyang, et al. Research on ship-ice collision model and ship-bow fatigue failure mechanism based on elastic-plastic ice constitutive relation [J]. Ocean Engineering, 2024, 306: 118005. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2024.118005

[8] Shi Han, Song Mengjie, Narita F, et al. Experimental study on high-precision detection technology for the freezing front height in brine on a horizontal cold plate surface in cold regions [J]. Renewable Energy, 2025, 246: 122928. DOI: 10.1016/j.renene.2025.122928

[9] Mintu S, Molyneux D. Ice accretion for ships and offshore structures. Part 1 – State of the art review[J]. Ocean Engineering, 2022, 258: 111501. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2022.111501

[10] Shi Han, Song Mengjie, Kim D R, et al. Experimental study on the location detection method of deionized water freezing front based on microwave resonance theory [J]. Measurement, 2025, 242: 115859. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.115859

[11] 邵苛苛,宋孟杰,沈俊,等. 极地低温环境结冰预探测方法与防除破冰技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2025, 57(2): 1
Shao Keke, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Research progress on icing prediction and detection methods, and anti/de-icing and ice-breaking technologies in polar low-temperature environments[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2025, 57(2): 1. DOI: 10.11918/202407059

[12] 隋冬雨,金哲岩,杨志刚. 冷表面上水滴结冰问题的实验研究进展[J]. 制冷学报, 2015, 36(2): 14
Sui Dongyu, Jin Zheyan, Yang Zhigang. Experimental progress of water droplet freezing on cold surface[J]. Journal of Refrigeration, 2015, 36(2): 14

[13] Zhang Long, Jiang Yiqiang, Dong Jiankai, et al. An experimental study of frost distribution and growth on finned tube heat exchangers used in air source heat pump units [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 132(8): 38. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2017.12.047

[14] Zhang Yi, Zhang Guanmin, Zhang Aiqun, et al. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in china: an analysis and review [J]. Energies, 2018, 11(10): 2642. DOI: 10.3390/en11102642

[15] Gao Runmiao, Song Mengjie, Chao C Y H, et al. Review on condensation frosting and defrosting experiments for superhydrophobic surfaces [J]. Applied Thermal Engineering, 2024, 236 (Part C): 121691. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2023.121691

[16] 余思锐,宋孟杰,沈俊,等. 低温静止与运动表面结冰特性预测技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2024, 56(10): 150
Yu Sirui, Song Mengjie, Shen Jun, et al. Research progress on icing characteristic prediction technologies for low temperature stationary and moving surfaces[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2024, 56(10): 150. DOI: 10.11918/202402006

[17] 刘力力,翁剑成,荣建. 降雪条件下城市快速路交通流特性研究[J]. 交通信息与安全, 2012, (1): 10
Liu Lili, Weng Jiancheng, Rong Jian. Characteristics of urban expressway traffic flow under snowfall conditions[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2012, (1): 10

[18] 董斌,唐伯明,刘唐志. 冰雪路面事故成因分析及对策探讨[J]. 交通标准化, 2010, (13): 137
Dong Bin, Tang Boming, Liu Tangzhi. Cause analysis and countermeasures for accidents on ice-snow pavements [J]. Communication Standardization, 2010, (13): 137

[19] 谭忆秋,李济鲈,徐慧宁. 冰雪路面摩擦特性与运营风险管控研究综述[J]. 中国公路学报, 2022, 35 (7): 1
Tan Yiqiu, Li Jilu, Xu Huining. Review of friction characteristics and operational risk control for ice-snow pavements [J]. China Journal of Highway and Transport, 2022, 35(7): 1. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2022.07.001

[20] Carvalho M, Moradi S, Hosseinnouri F, et al. Towards a model of snow accretion for autonomous vehicles[J]. Atmosphere, 2024, 15(5): 548. DOI: 10.3390/atmos15050548

[21] Pan Jialu, Wang Jianqiang, Xing Shengsheng. Dynamic trajectory planning and optimization for automated driving on ice and snow covered road[J]. IEEE Access, 2023, 11: 1. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3266006

[22] Ou Tinghai, Hu Yumei, Torbjörn G, et al. On the relationship between the risk of hoar frost on roads and a changing climate in Sweden[J]. International Journal of Climatology, 2019, 39(5): 2601. DOI: 10.1002/joc.5974

[23] Li Shaohua, Wang Guiyang, Wang Hesen, et al. Automatic emergency braking/anti-lock braking system coordinated control with road adhesion coefficient estimation for heavy vehicle[J]. IET Intelligent Transport Systems (Wiley-Blackwell), 2022, 16(11): 1521. DOI: 10.1049/itr2.12229

[24] Shao Keke, Zhang Xuan, Song Mengjie, et al. Manipulating trapped air bubbles in ice for message storage in cold regions[J]. Cell Reports Physical Science, 2025, 6(6): 102622. DOI: 10.1016/j.xcrp.2025.102622

[25] Shao Keke, Song Mengjie, Zhang Xuan, et al. Growth and distribution characteristics of trapped air bubbles in ice slices[J]. Physics of Fluids, 2023, 35(11): 1. DOI: 10.1063/5.0175106

[26] Shao Keke, Song Mengjie, Cai Biaohua, et al. Effects of environmental temperature and trapped air bubbles on the mechanical properties of ice cubes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2024, 16(46): 63482. DOI: 10.1021/acsami.4c12227

[27] Patrik J, Benny T, Johan C, et al. Road surface status classification using spectral analysis of NIR camera images[J]. IEEE Sensors Journal, 2015, 15 (3): 1641. DOI: 10.1109/JSEN.2014.2364854

[28] 龙俊宇, 吴德操, 罗彬彬, 等. 双波长激光路面气象传感方法[J]. 光子学报, 2023, 52 (6): 108
Long Junyu, Wu Decao, Luo Binbin, et al. Pavement weather sensing method using dual-wavelength lasers[J]. Acta Photonica Sinica, 2023, 52(6): 108

[29] Döring J, Lütkehaus L, Krieger K L. Study on the effect of electrical conductivity on road surface wetness classification using capacitive measurement data[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22 (20): 1. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3204111

[30] Valme D, Galindos J, Liyanage D C. Road condition estimation using deep learning with hyperspectral images: detection of water and snow[J]. Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 2024, 73(1): 77. DOI: 10.3176/proc.2024.1.09

[31] Khan M N. Snow detection using in-vehicle video camera with texture-based image features utilizing k-nearest neighbor, support vector machine, and random forest[J]. Transportation Research Record, 2019, 2673(8): 221. DOI: 10.1177/0361198119842105

[32] Moroto Y, Maeda K, Ogawa T, et al. Snow-or ice-covered road detection in winter road surface conditions using deep neural networks[J]. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering, 2024, 39(19): 2935. DOI: 10.1111/mice.13233

[33] Omer R, Fu Liping. An automatic image recognition system for winter road surface condition classification[C]//13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems. [S. l.]: IEEE, 2010: 1375. DOI: 10.1109/ITSC.2010.5625290

[34] Lee H J, Kang M H, Song J I, et al. The detection of black ice accidents for preventative automated vehicles using convolutional neural networks[J]. Electronics, 2020, 9(12): 2178. DOI: 10.3390/electronics9122178

[35] Kim J W, Kim E K, Kim D W. A black ice detection method based on 1-dimensional CNN using mm wave sensor backscattering[J]. Remote Sensing, 2022, 14(20): 5252. DOI: 10.3390/rs14205252

[36] Riehm M, Gustavsson T, Bogren J, et al. Ice formation detection on road surfaces using infrared thermometry[J]. Cold Regions Science and Technology, 2012, 83/84: 71. DOI: 10.1016/j.coldregions.2012.06.004

[37] Jonsson P. Remote sensor for winter road surface status detection[C]//SENSORS, 2011 IEEE. [S. l.]: IEEE, 2011: 1285. DOI: 10.1109/ICSENS.2011.6127089

[38] Chen Zhuo, Xiong Gengang, Sun Yao, et al. An internet-of-things-enabled system for road icing detection and prediction[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2022, 9(20): 20257. DOI: 10.1109/JIOT.2022.3175220

[39] Ruiz-Llata M, Rodríguez-Cortina M, Martín-Mateos P, et al. LiDAR design for road condition measurement ahead of a moving vehicle[C]//2017 IEEE Sensors. IEEE, 2017: 1. DOI: 10.1109/ICSENS.2017.8234230

[40] Colace L, Santoni F, Assanto G, et al. A near-infrared optoelectronic approach to detection of road conditions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2013, 51(5): 633. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2013.01.003

[41] Vassilev V. Road surface recognition at mm-wavelengths using a polarimetric radar[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2022, 23(7): 6985. DOI: 10.1109/TITS.2021.3066312

[42] Vassilev V. Road surface characterization using a 77 – 81 GHz polarimetric radar[J]. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 2024, 25(9): 1. DOI: 10.1109/TITS.2024.3360702

[43] Jang Jinhwan. Pavement slipperiness detection using wheel speed and acceleration sensor data[J]. Transportation Research Interdisciplinary Perspectives, 2021, 11: 100431. DOI: 10.1016/j.trip.2021.100431

[44] Nakashima S, Aramaki S, Kitazono Y, et al. Road surface condition distinction method using reflection intensities obtained by ultrasonic sensor[C]//2016 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C). IEEE, 2016: 120. DOI: 10.1109/IS3C.2016.41

[45] Nakashima S, Arimura H, Yamamoto M, et al. Improving the accuracy of road surface distinction based on reflection intensity variations using ultrasonic sensor[J]. IEEE Sensors Journal, 2022, 22(18): 17399. DOI: 10.1109/JSEN.2020.3033015

(编辑 赵丽莹)