

基于电容等效模型的路面覆盖物检测系统研究 *

周家涛¹ 李敏^{1,2} 沙秩生¹ 张加宏^{1,2} 曹越洋¹

(1. 南京信息工程大学江苏省大气环境与装备技术协同创新中心 南京 210044;
2. 南京信息工程大学集成电路学院 南京 210044)

摘要:针对传统电容式路面覆盖物检测方法在低温下辨识能力弱、区分度不高的问题,基于电容器的串联等效模型,从电介质极化原理出发,研究了电容器和覆盖物存在的介电损耗和弛豫现象,分析了覆盖物和检测频率对电容器等效串联电容和等效串联电阻的影响,设计并搭建了电容器高通滤波电路,通过比较高通滤波电路输出与输入信号的幅度衰减比和相位偏移,间接测量电容器等效串联电容和等效串联电阻的变化,实现覆盖物类型的识别。在恒温箱中进行样本测试,实验结果表明,当温度在10℃~60℃时,干燥时的相位差大于30°,衰减比例小于0.8;积水时的相位差在10°以内,衰减比例接近1。当温度在-30℃~0℃时,干燥、结冰和积雪时的衰减比例存在交叉。相位差随着温度缓慢变化,干燥时平均相位差大于40°,结冰时平均相位差小于30°,而积雪时的平均相位差介于二者之间。利用温度、相位差和衰减比例构建神经网络分类模型,部署到单片机后进行实测。实测数据表明在0℃~60℃之间,干燥和积水的区分准确率达到95%;在-30℃~0℃之间,干燥、结冰和积雪的区分准确率达到83%,能够满足路面覆盖物检测的需求。

关键词:电容器;覆盖物检测;相位差;衰减比

中图分类号: TP212; TN206 文献标识码: A 国家标准学科分类代码: 460.40

Research on road covering detection system based on capacitance equivalent model

Zhou Jiatao¹ Li Min^{1,2} Sha Zhisheng¹ Zhang Jiahong^{1,2} Cao Yueyang¹

(1. Jiangsu Collaborative Innovation Centre for Atmospheric Environment and Equipment Technology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. School of Integrated Circuits, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In response to the problem that the traditional capacitive road covering detection method has weak identification ability and low discrimination at low temperatures, the dielectric loss and relaxation phenomena of capacitors and covers are studied based on the series equivalent model of the capacitor and starting from the principle of dielectric polarization. The effects of covers and detection frequency on the equivalent series capacitance and equivalent series resistance of the capacitor was analyzed and a capacitor high-pass filter circuit was designed and built. By comparing the amplitude attenuation ratio and phase difference between the output and input signals of the high pass filtering circuit, the changes in equivalent series capacitance and equivalent series resistance of capacitors can be indirectly measured to achieve the identification of the type of covering material. The sample was tested in the incubator. The experimental results show that when the temperature is between 10℃ and 60℃, the phase difference during drying is greater than 30°, and the decay ratio is less than 0.8. The phase difference is less than 10°, and the decay ratio is close to 1. When the temperature is between -30℃ and 0℃, the decay ratio of dry, freezing and snow cover is crossed. The phase difference varies slowly with temperature, with an average phase difference of more than 40° when dry, less than 30° when frozen, and somewhere in between when covered with snow. The neural network classification model is constructed by using temperature, phase difference and decay ratio, which is deployed to the single chip computer and measured. Measured data show that the method achieves an accuracy of 95% in distinguishing between dry and stagnant

water between 0 °C and 60 °C, and the accuracy of distinguishing between dry, frozen, and snow cover is about 83% in the range of -30°C and 0°C, which can meet the needs of road covering detection.

Keywords: capacitor; covering detection; phase difference; attenuation ratio

0 引言

交通道路基础建设是现代化发展的基石,我国长期致力于交通道路的建设,截至 2022 年底,我国已经建立了全球最大的高速公路网络^[1-2]。随着交通运输的发展,交通道路安全问题逐渐凸显^[3]。据统计,超过 1/3 以上的交通道路安全问题源于恶劣天气,雨雪天气事故发生的概率是晴朗天气的 5 倍以上^[4]。雨雪过后,积水、冰雪覆盖的道路非常光滑,造成摩擦系数下降,导致汽车行驶过程中的制动距离增加,极易引发车辆失控、侧滑等事故,影响道路安全。实现路面覆盖物检测,有助于交通管理部门预测和应对恶劣天气,对减少交通事故和提高行驶安全性具有重要意义^[5]。

近些年来,道路覆盖物检测研究分成接触式和非接触式两大类^[6]。2020 年,周浩^[7]和桂康^[8]基于阻抗式原理设计了电容式传感器,测量电容器在不同覆盖物和激励频率下的阻抗变化,实现覆盖物区分。2022 年,王岩等^[9]选用压电陶瓷(PZT)设计谐振式结冰探测器,得到谐振频率随冰层厚度和温度的变化关系,从而检测结冰并测量厚度。2023 年,Sibilia 等^[10]利用石墨烯纳米片构建电容式传感器,通过测量其电阻抗实现结冰检测。同年,Li 等^[11]采用 PZT 和导电粘合剂粘合的合金设计了谐振式传感器,测量传感器的谐振频率变化以识别冰、水等覆盖物。2023 年,张颖^[12]基于红外激光反射法开发了一种道路结冰检测系统。利用激光发射器发射红外光线,遇到路面积水、结冰时发生反射,光电探测器接收反射光并分析反射光强、反射角等参数,以判断路面情况。上述的不同路面覆盖物检测方法各有优缺点,其中电容式测量方法成本低、准确性较高,应用最为广泛。

但电容式接触传感器进行道路覆盖物检测容易受到极端环境干扰的影响。传统方法通过电容充放电波形的峰值电压进行区分,在-20 °C 以下,干燥和结冰情况下波形相似,难以辨识,积雪时的介电特性更增加了辨识难度。本文针对传统电容式路面覆盖物检测方法存在的区分度低、低温下分辨覆盖物能力弱等问题,考虑电容器的串联等效模型,使用电容器搭建高通滤波电路,通过直接测量高通滤波电路输出和输入信号之间的幅度衰减比与相位差,间接测量出电容器等效串联电容和电阻的变化,实现准确区分。经实验验证,该方法区分准确率高、成本低,成功克服了传统检测技术存在的问题。

1 路面覆盖物检测原理

本文设计的路面覆盖物检测系统主要实现对空气、水、冰和雪 4 种类型的识别。电容式传感器嵌入道路中,传感器上表面与路面齐平,覆盖物与电容器上表面接触后,由于不同物质的相对介电常数、电导率等电学参数存在差异,会改变电容器的容值、阻抗等。一般情况下,不同覆盖物的相对介电常数如表 1 所示。

表 1 覆盖物的相对介电常数

Table 1 Relative permittivity of the covering

覆盖物	空气	水	冰	雪
相对介电常数	1	78.5	3~4	1~4

空气、水、冰和雪都是电介质。在外部电场力的作用下,内部的正负电荷出现相对位移,产生电偶极矩并发生极化,同时伴随介电损耗和弛豫现象^[13-14]。介电损耗表现为电能被转化为热能的过程,当电介质处于交变电场中时,其分子或原子因电场的变化而不断极化和反极化,导致能量耗散^[15]。弛豫现象是指电介质在外加电场作用下瞬时极化,去除电场后无法立即恢复原状,这种滞后效应是电介质对电场响应的特殊行为。电介质的极化使不同覆盖物与电容器在不同检测频率下呈现不同的电学特性。

空气是无极性电介质,其相对介电常数通常为 1,对温度变化不敏感,随检测频率变化较小。水是极性电介质,常温下的介电常数约为 78.5^[16]。随着温度升高,水分子热运动增加,导致其相对介电常数变化。随着检测频率增加,分子无法跟随电场变化,导致相对介电常数降低。冰的晶体结构由水分子通过氢键连接,在外加电场下产生极化现象。冰的相对介电常数随温度的降低而逐渐减小,随检测频率升高而进一步降低,当频率足够高时,温度对冰的相对介电常数的影响显著降低。雪的情况比较复杂,本文主要研究干雪。其相对介电常数介于空气和冰之间,主要与密度有关,一般在 1~4 之间^[17-18]。

本文研究的敏感电容器如图 1 所示。电容器为有限长圆柱体,内导体与外导体中间填充介质胶,其介电常数视作常数,且对温度变化不敏感。电容器底部引出两根导线作为电极,一根连接内导体,位于同轴电容器中心,是空心的圆柱形导体。另一根连接外导体,外导体为圆柱形的金属外壳。

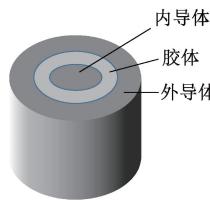


图 1 敏感电容器结构

Fig. 1 Sensitive capacitor structure

在简化模型下,未考虑表面覆盖物时,圆柱型敏感电容器的电容可以根据传感器的尺寸与介电常数进行计算。根据圆柱形电容器的计算公式,可得:

$$C_{\text{圆柱}} = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln(b/a)} \quad (1)$$

式中: $C_{\text{圆柱}}$ 是圆柱电容器的电容值; ϵ 是填充在圆柱体间的电介质的介电常数; l 是电容器的高度; a 是内导体的半径; b 是外导体的半径。

由于电容器的尺寸及填充物的介电常数已确定,其本身的电容值不会改变。当敏感电容器表面覆盖空气、水、冰或雪等覆盖物时,它的电容值为:

$$C_{\text{总}} = C_{\text{圆柱}} + C_{\text{上表面}} + C_{\text{下表面}} \quad (2)$$

式中: $C_{\text{总}}$ 为圆柱电容器总电容; $C_{\text{圆柱}}$ 为柱体部分电容,固定不变; $C_{\text{上表面}}$ 、 $C_{\text{下表面}}$ 为电容器上下表面的电容值,由于圆柱电容器下表面环境基本不会变化,因此 $C_{\text{下表面}}$ 也保持不变,此时只需考虑 $C_{\text{上表面}}$ 。

将电容器上表面电容等效成环形电容器,根据高斯定理与静电场边界条件,利用镜像法分析,设内导体带正电荷,外导体带负电荷,根据电容与电势差公式,推导出圆柱电容器上表面产生的总电容 C 为^[19-20]:

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\pi 10^{-9}(\epsilon_1 + \epsilon_2)}{6[\frac{1}{a} \ln \frac{2}{a} + \frac{1}{L-l} \ln \frac{2}{L-l} + (\epsilon_1 - \epsilon_2)A]} \quad (3)$$

式中: Q 为环形电容器表面电荷总量; a 为内圆环半径; ϵ_1 为表面覆盖物介电常数; ϵ_2 为中间填充物的介电常数; L 为内圆环外边缘与外圆环外边缘的距离; l 为内圆环与外圆环之间空腔的宽度。其中 A 记作:

$$A = \frac{2d}{a^2} - \frac{\sqrt{a^2 + 4d^2}}{a^2} + \frac{1}{a} \ln \frac{2d}{a + \sqrt{a^2 + 4d^2}} + \frac{\sqrt{(L-l)^2 + 4d^2}}{(L+l+2a)(L-l)} - \frac{2d}{(L+l+2a)(L-l)} + \frac{a+l}{(L+l+2a)(L-l)} \ln \frac{L-l + \sqrt{(L-l)^2 + 4d^2}}{2d} \quad (4)$$

A 值仅随覆盖物厚度 d 变化。

根据上述分析,除了覆盖物的相对介电常数 ϵ_1 以及覆盖物厚度 d 外其余均为定值,当覆盖物及其厚度发生

变化时,电容值会发生改变。

实际电容器因制造工艺限制,内部存在寄生电阻和电感^[21]。内部电阻导致信号激励下的充放电过程能量损耗,产生热效应。内部电感使电容器在高频范围内阻抗增加。为更准确描述实际电容器,将其等效为一个理想电容 C 、一个电阻 R 和电感 L 的串联。

$$Z = \sqrt{R^2 + (2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC})^2} \quad (5)$$

本文系统信号处于低频,可忽略电容器内部电感的影响。根据电介质的极化现象和介电损耗以及德拜弛豫效应,不同检测频率和覆盖物会影响电容器的等效串联电容和电阻^[22]。在固定频率下,等效串联电容和电阻仅随覆盖物的不同而改变。因此通过测量电容器的等效串联电容和电阻的变化即可分辨覆盖物。

但直接测量等效串联电容和电阻较为复杂且区分度较低。本设计将敏感电容与固定电阻构成无源RC高通滤波电路^[23]。检测电路的设计思路如图2所示。将覆盖物和检测频率对电容器等效串联电容和等效串联电阻的影响最终转变成幅度衰减比和相位差的变化。

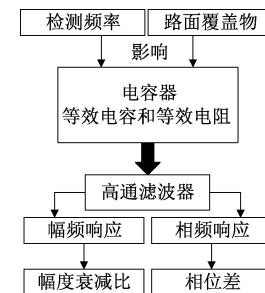


图 2 检测电路设计

Fig. 2 Detection circuit design

通过测量一定频率正弦波信号通过高通滤波后的信号衰减及相移来反映 R_s 与 C_s 的变化。当激励信号频率为 f 时,可以计算得到输出信号与输入信号的幅度衰减比为:

$$A_v = \frac{R}{\sqrt{(R + R_s)^2 + (\frac{1}{2\pi f C_s})^2}} \quad (6)$$

式中: R_s 为串联等效电阻; C_s 为串联等效电容; R 为固定电阻。

相位差为:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\frac{1}{2\pi f C_s}}{R + R_s}\right) \quad (7)$$

2 路面覆盖物检测系统设计

本文设计的检测系统硬件框图及实物如图3所示。

测温传感器使用四线制 PT100 铂电阻连接检测电路。通过分析覆盖物和检测频率对电容器的影响,选择合适的激励信号频率。利用电容器与固定电阻搭建高通滤波电路,通过其输出与输入信号的相位差和幅度衰减比反映电容器等效电容与电阻的变化。最终,通过温度、相位差和衰减比,实现覆盖物的有效区分。

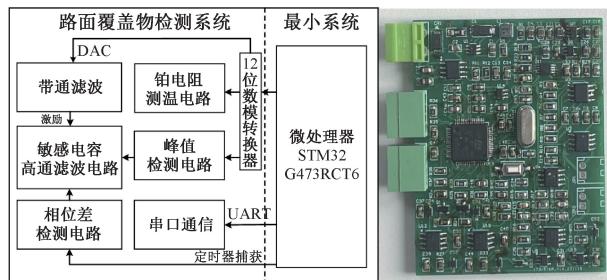


图 3 硬件框图及实物

Fig. 3 Hardware block diagram and physical diagram

2.1 铂电阻测温电路

铂电阻测温电路部分如图 4 所示,将铂电阻与恒流源连接,恒流源利用负反馈控制输出电压,确保恒定电流,避免负载电阻变化的影响。铂电阻对温度比较敏感,控制恒流源电流大小减少铂电阻发热,可有效减小测温偏差。当气温变化时,由于电流不变,铂电阻阻值的变化会导致电压的变化。在 $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$ 范围内,铂电阻两端电压处于 mV 级别,使用差动放大电路将电压放大后接入 ADC。

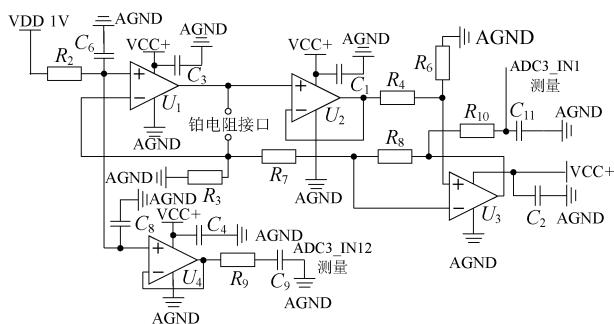


图 4 铂电阻测温电路

Fig. 4 Platinum resistance temperature measurement circuit

2.2 电容器激励电路

单片机 DAC 产生 10 kHz 正弦激励信号对电容器搭建的高通滤波电路进行激励,如图 5 所示,系统使用运放搭建二阶有源带通滤波器,正弦激励信号经过带通滤波器,实现激励信号的滤波与放大,最后进入电容器与电阻串联构成的高通滤波电路。

2.3 峰值检测电路

峰值检测电路用于检测输入输出信号的峰值电压,

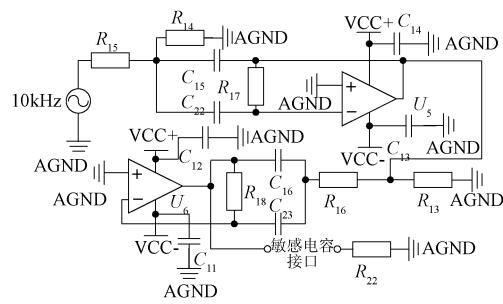


图 5 电容器激励电路

Fig. 5 Capacitor excitation circuit

如图 6 所示。两路峰值检测电路,一路输入信号来自敏感电容与电阻构成的高通滤波电路的输入端,另一路输入来自其输出端。两路信号运放构成的电压跟随器后,对电容 C_{37}, C_{41} 充电,电容电压不断增加,当达到波形的峰值电压时停止。此时电容上的电压即为波形峰值电压,通过单片机的 ADC 引脚进行测量。 Q_1 和 Q_2 为 NMOS 管,控制 C_{37} 和 C_{41} 的充放电。NMOS 默认状态下关闭,此时输入波形对电容充电,当 NMOS 管导通时,电容通过 NMOS 放电,进行下一次电压峰值检测。

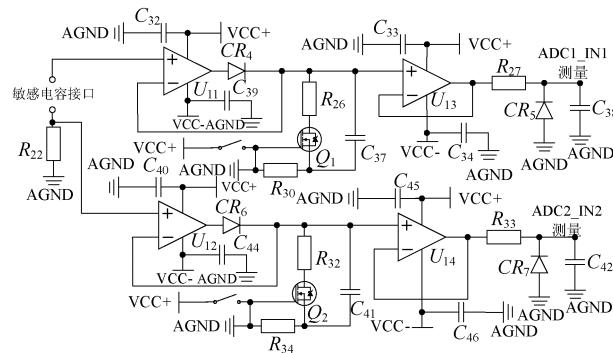


图 6 峰值检测电路

Fig. 6 Peak detection circuit

2.4 相位差检测电路

相位差检测电路如图 7 所示。相位差检测电路的两路输入与峰值检测电路相同,一路输入来自敏感电容器与电阻构成的高通滤波电路的输入端,另一路来自高通滤波电路的输出端。两路信号经过电压跟随器后进入由电压比较器构成的过零比较器,输入信号转换成方波信号。两路方波信号接入 IO 引脚,通过单片机判断两路信号之间的相位偏移。

2.5 软件设计

软件功能设计如图 8 所示。首先初始化单片机及外设,DAC 输出恒流源参考电压,ADC 采样铂电阻电压并计算温度。另一路 DAC 产生正弦信号激励敏感电容。ADC 双通道采集峰值电压计算信号衰减比。利用中断

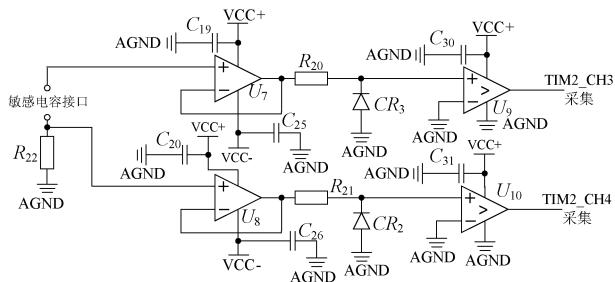


图 7 相位差检测电路

Fig. 7 Phase difference detection circuit

和定时器获取相位差检测电路中两路方波的时间偏移,计算相位差。最终根据温度,相位差和衰减比实现覆盖物分类。

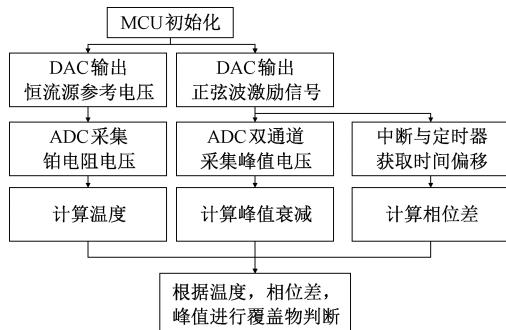


图 8 软件功能设计图

Fig. 8 Software function design diagram

3 实验测试与结果分析

系统测试平台如图 9 所示。左侧利用 LCR 仪在恒温箱内测试不同覆盖物、检测频率和温度对等效串联电容和电阻的影响。右侧为实际检测系统,开发板使用 12 V 供电,并连接铂电阻和敏感电容,测试不同覆盖物下的温度、相位差和衰减比。

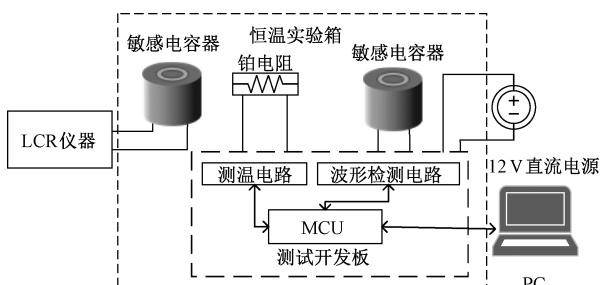


图 9 系统测试平台连接示意图

Fig. 9 System test platform connection diagram

3.1 铂电阻温度测量

温度测试范围从 $-30^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C}$, 经过修正后的温度

测试结果如表 2 所示。

分析得出,铂电阻测量结果与恒温箱设定值温度偏差 $\leq \pm 1.0^{\circ}\text{C}$, 两个传感器之间的温度值差异 $\leq \pm 0.8^{\circ}\text{C}$ 。本应用场景下,温度测量并不需要特别精确,免标定时的这一偏差范围已经能够满足系统的使用需求。

表 2 温度测试数据

Table 2 Temperature test data (°C)

恒温箱设定	1号测量	2号测量
-30	-30.0	-30.1
-20	-20.6	-20.6
-10	-10.7	-10.0
0	0.6	0.6
10	10.4	11.2
20	20.4	20.5
30	30.3	30.8
40	40.6	40.1
50	50.3	50.1
60	60.4	60.4

3.2 等效串联电容电阻测试

为测定敏感电容的等效串联电容和电阻,采用 LCR 仪,选取 $1 \sim 100 \text{ kHz}$ 中多频率点进行测试。

覆盖空气(干燥)和积水情况下,敏感电容的等效串联电容和电阻随频率的变化情况如图 10 所示。覆盖物为空气时,由于空气是无极性电介质,其介电常数相对稳定,敏感电容器的等效串联电容主要和自身材料特性有关,保持在 20 pF 以内,随检测频率的增加缓慢下降。等效串联电阻值,随频率变化下降较快,但是下降趋势逐渐减缓。随着温度的升高,等效串联电容逐渐增加。覆盖物为水时,较高的相对介电常数使等效串联电容显著升高至 nF 级别,随着检测频率的升高,等效串联电容随检测频率升高下降相对较快。水的电导率较高,使得敏感电容器的等效串联电阻相比干燥情况下较小,随着频率的升高下降缓慢。

覆盖物为冰和雪的情况下,敏感电容器的等效串联电容和等效串联电阻随频率的变化情况如图 11 所示。冰的相对介电常数一般比空气大,在检测频率较低时,其等效串联电容高于覆盖空气时的状态,但是随着检测频率升高,其等效串联电容趋近于覆盖物为空气时的情况。结冰状态下,等效串联电阻相较于积水和干燥时明显增大,且无论是等效串联电容还是电阻,均随频率升高呈下降趋势。雪的情况相对复杂,其特性与含水量以及密度密切相关,一般介于空气和冰之间。在检测频率较低时等效串联电容值介于干燥和结冰之间,但是随着检测频率增加,积雪下的等效串联电容比覆盖物为空气时的值高,而与结冰时的等效串联电容值比较接近,并出现交叉现象。对于等效串联电阻,积雪时的值比结冰时的值小,与覆盖空气下的情况较为接近。

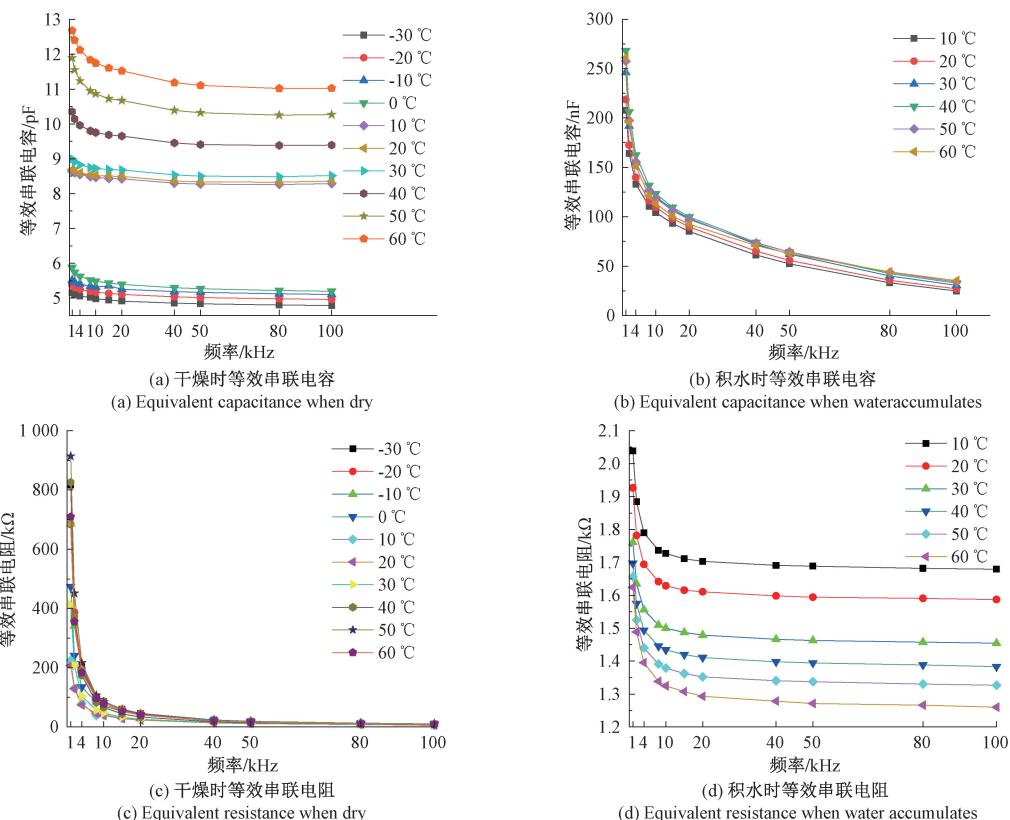


图 10 不同检测频率干燥和积水等效串联电容和电阻

Fig. 10 Equivalent series capacitance and resistance of dryness and water accumulation at different detection frequencies

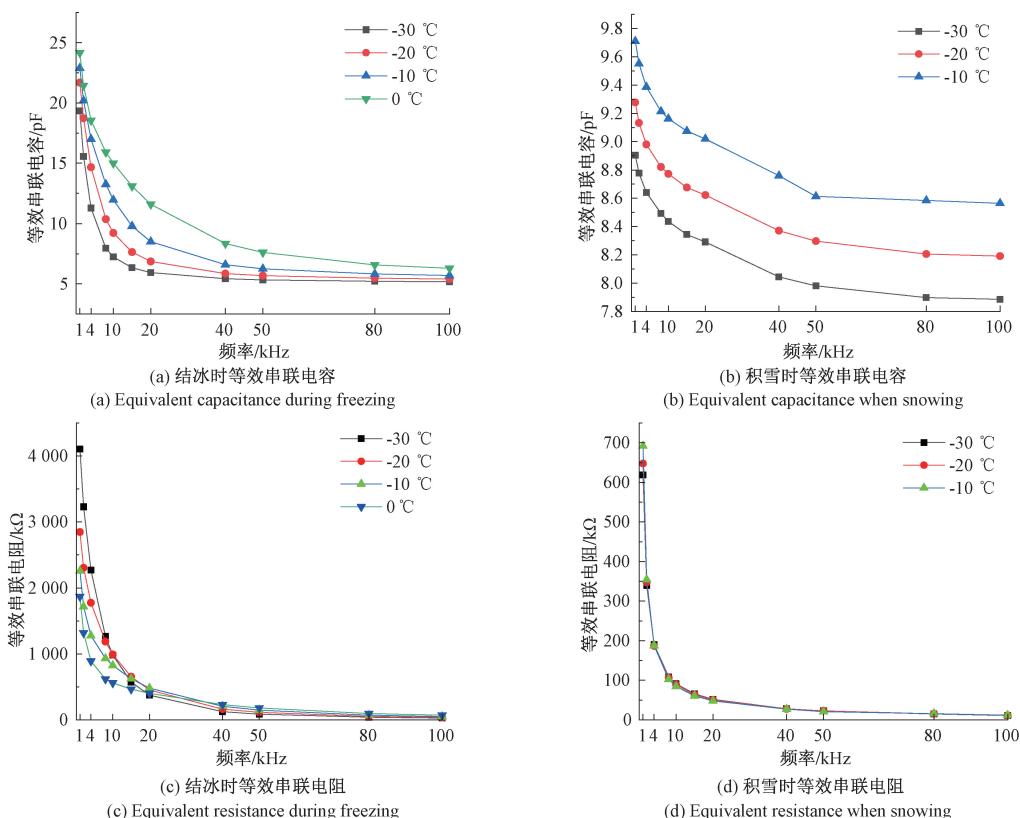


图 11 不同检测频率结冰和积雪等效串联电容和电阻

Fig. 11 Equivalent series capacitance and resistance of ice and snow at different detection frequencies

根据检测频率对等效串联电阻和等效串联电容的影响,在本文系统设计中,选择 10 kHz 的检测频率进行软硬件设计,实现覆盖物区分。

在 10 kHz 的检测频率下,干燥和积水时的等效串联电容和电阻的平均值如表 3 所示。干燥时的等效串联电阻大于 40 kΩ,电容小于 20 pF;积水时,电阻小于 10 kΩ,电容为 nF 级别。覆盖物为空气和水之间的等效串联电阻和电容值差异显著,根据 C_s 和 R_s 可以实现两者的准确区分。

表 3 干燥和积水时的等效串联电容和电阻

Table 3 Equivalent series capacitance and resistance when dry and waterlogged

温度/℃	等效串联电阻 R_s /kΩ		等效串联电容 C_s	
	干燥	积水	干燥	积水
10	40.60	1.72	8.46	104.21
20	38.37	1.62	8.52	109.55
30	46.55	1.49	8.72	120.18
40	66.00	1.43	9.75	123.30
50	84.35	1.37	10.86	118.78
60	77.52	1.32	11.74	113.19

在 10 kHz 检测频率下,干燥、积雪和结冰的等效串联电容和电阻的平均值如表 4 所示。干燥时的等效串联电阻最小,结冰最大,积雪时介于两者之间。相同温度下,干燥的等效串联电容最小,结冰最大,积雪时介于两者之间。尽管干燥和积雪的结果接近,仍可通过 C_s 和 R_s 有效区分。

表 4 干燥、积雪和结冰时的等效串联电容和电阻

Table 4 Equivalent series capacitance and resistance in dry, snowy and icing conditions

温度/℃	等效串联电阻 R_s /kΩ			等效串联电容 C_s /pF		
	干燥	雪	冰	干燥	雪	冰
-30	85.47	90.69	982.88	6.62	7.36	13.84
-20	86.09	88.51	990.66	6.86	7.69	13.66
-10	83.82	84.47	825.73	7.09	10.61	19.31
0	71.25	—	560.05	7.34	—	21.71

综上,结冰和积雪时 R_s 变化较大,显著影响电容器的阻抗角,因此可通过 R_s 区分干燥、结冰和积雪。对于积水, C_s 变化显著,对电容器阻抗模有较大影响,因此可通过 C_s 来区分积水与其他情形。

根据高通滤波电路幅度衰减比和相位差公式,积水时 C_s 增大,电容器的阻抗模显著减小,信号几乎无衰减地通过高通滤波电路,因此通过测量信号幅度可将积水与其他状态区分开。而在干燥、积雪、结冰时,尽管 R_s 有较大变化,但 C_s 变化不大,电容器的阻抗模较大,信号幅

度有一定程度衰减,通过衰减比无法有效区分干燥、积雪、结冰。而通过突出反映 R_s 的变化可以对此 3 种情形进行区分。

3.3 相位差和衰减比测试

根据测试得到的等效串联电阻和电容值,利用式(6)和(7),对输入和输出高通滤波电路信号幅度衰减比和相位差进行计算,得到理论值。图 12、13 分别所示为覆盖物为空气、积水、积雪、结冰时相位差和衰减比例的理论值。无论何种覆盖物,在不同频率下,随着温度升高,衰减比例逐渐增加,相位差逐渐减少。在零上时,在不同频率点下,随着温度变化,干燥时衰减比例在 0.42~0.7,相位差在 30°~65°;积水时衰减比例在 0.99 左右,相位差在 0°左右。当敏感电容器上覆水时,会使电容器的等效串联电容明显增大。因此在零上通过衰减比例能够区分干燥和积水。在零下时,在不同频率点下,随着温度变化,干燥、结冰、积雪时的衰减比例都较为接近,在 0.5 左右,通过衰减比例不易区分。通过观察相位差,发现随着温度变化,当频率小于 10 kHz 时,干燥时相位差大于 60°,积雪时相位差在 38°~52°,积雪时相位差在 8°~37°,三者区分明显。当频率较高时,三者的相位差有交叉,难以进行区分。通过选取合适的激励频率,可以利用相位差区分干燥、结冰、积雪。因此通过敏感电容与固定电阻构成高通滤波电路,测量一定频率正弦信号通过高通滤波后的信号衰减及相移来反映 R_s 与 C_s 的变化,可以实现干燥、积水、积雪、结冰的区分。

相位差和衰减比的测试在 -30 ℃~60 ℃ 范围, -30 ℃~0 ℃ 之间,进行干燥、结冰和积雪的测试;10 ℃~60 ℃ 之间,进行干燥和积水的测试。将开发板与敏感电容和铂电阻相连接,整体放入恒温箱中进行测试,测试连接如图 14 所示。

10 ℃~60 ℃ 范围内干燥和积水的衰减比数据如图 15(a)所示。干燥时,信号经过高通滤波电路后幅度有一定衰减,衰减比稳定在 0.6 左右。随温度升高,由于恒温箱潮湿暖风的影响,衰减比升高。积水时,等效串联电容明显增大,信号基本无衰减通过高通滤波电路,衰减比例保持在 0.9~1,基本不随温度变化。通过衰减比可以准确的区分干燥和积水。10 ℃~60 ℃ 范围内干燥和积水的相位差数据如图 15(b)所示。积水和干燥情况下,信号经过高通滤波电路后均会产生相移。由于两种情况下电容器等效串联电容和电阻相差较大,因此相位差之间也存在显著差异。积水时相位差小于 10°,而干燥时的相位差一般大于 30°。在高温下,干燥时的相位差可能因潮湿暖风影响而有所降低。综合衰减比和相位差的数据分析,无论是通过衰减比例还是相位差,都可以有效准确地区分干燥和积水两种情况。

在 0 ℃ 以下的干燥、结冰和积雪情况下, -30 ℃~

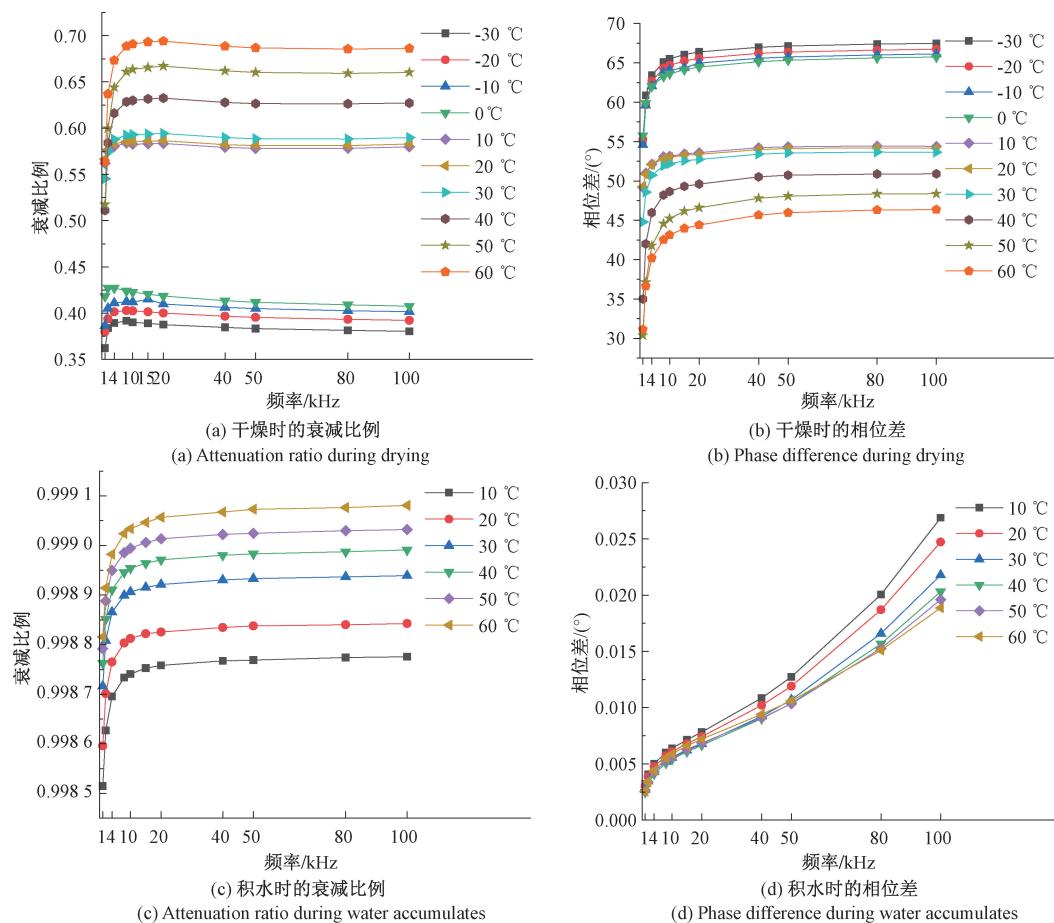


图 12 不同频率下干燥和积水衰减比和相位差理论值

Fig. 12 Theoretical values of drying and water accumulation attenuation ratio and phase difference at different frequencies

0 °C 范围内的衰减比例数据揭示了经过高通滤波电路的信号均出现不同程度的衰减如图 16(a) 所示。干燥时的衰减比例最低, <0.55, 且随着温度降低逐渐下降, 结冰和积雪的衰减比例较大。由于 3 种情况下的等效串联电容差异较小, 衰减比例存在部分重叠。在温度接近 0 °C 时, 冰和雪可能部分融化, 导致底部存在水分, 从而使衰减比增加。因此, 仅凭衰减比例难以区分这 3 种情况。在 0 °C 以下, 干燥、结冰和积雪情况下的相位差数据如图 16(b) 所示。由于干燥的等效串联电容和电阻最小, 其相位差较大, 通常在 40° 以上; 结冰情况下相位差最小, 一般在 30° 以下, 积雪的相位差介于两者之间。不同温度点下, 干燥、结冰和积雪的相位差不存在交叉, 并且存在一定界限, 因此可以根据相位差有效准确地区分这 3 种覆盖物。

3.4 覆盖物厚度测试

根据对覆盖物检测原理的分析, 覆盖物厚度对检测存在一定影响, 针对结冰与积雪两种情况, 分别进行薄冰、厚冰与薄雪、厚雪的测试。记录不同厚度冰雪的相位差和衰减比数据, 如图 17 所示。

由图 17 可知, 不同厚度的雪对相位差的影响较小, 在 -30 °C ~ 0 °C 范围, 不同厚度的雪相位差波动范围在 34° ~ 41.8° 之间, 不影响覆盖物区分。不同厚度的冰相位差差异较大, 数据波动明显, 厚冰时相位差最大可达 33°, 接近雪的相位差, 在实际测试判断过程中, 对覆盖物分类结果有一定影响。

3.5 稳定性测试

为验证系统可靠性, 本文在 2023 年 11 月 25 日、2023 年 12 月 20 日、2024 年 1 月 7 日和 2024 年 2 月 26 日 4 个时间段进行稳定性测试。10 °C、20 °C、30 °C 和 40 °C 下覆盖空气和水时的衰减比例如图 18 所示。当覆盖物为空气时, 衰减比例在 0.5 ~ 0.7 之间, 多次测试结果差异 <0.1。当覆盖物为水时, 衰减比例接近 1。在 4 次测试中, 各个温度点下干燥和积水的衰减比例差异非常明显, 能够准确区分干燥和积水, 测试结果稳定性较好。

分别覆盖空气、雪和冰, 连续测量多次的相位差数据如图 19 所示。干燥和雪的相位差波动较小, 约为 5°。结

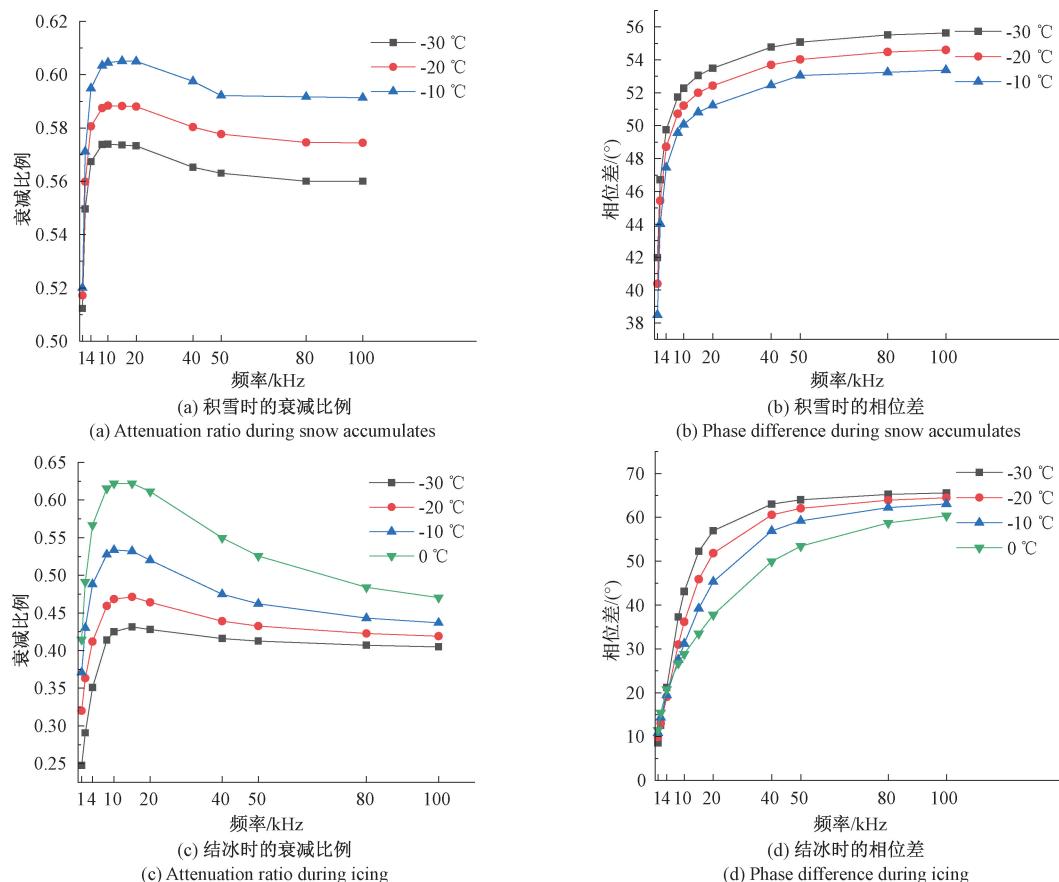


图 13 不同频率下积雪和结冰衰减比和相位差理论值

Fig. 13 Theoretical values of snow accumulation and ice attenuation ratio and phase difference at different frequencies

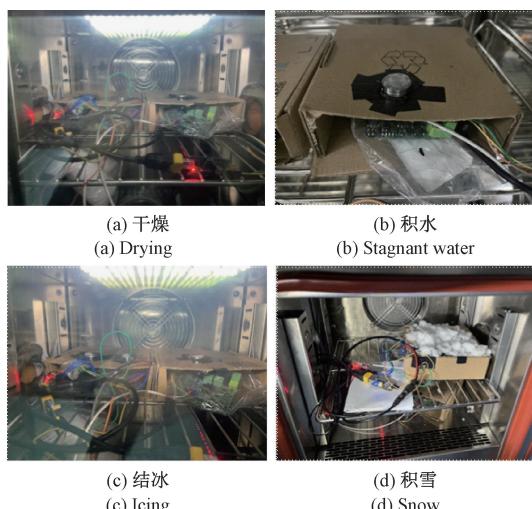


图 14 覆盖物测试连接示意图

Fig. 14 Cover test connection diagram

冰时相位差波动较大,且出现偏低情况。总体来看,4次测试各个温度点下干燥、积雪和结冰的相位差之间存在明显梯度差,能够实现覆盖物的区分。

在多次测试中,结冰相位差波动较大,尤其在12月20日的时候,结冰相位差偏低了 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$,这一现象可能与敏感电容的漂移有关。漂移原因包括温度变化、长期使用导致电容受损,电路元件稳定性下降。实验过程中外界的电磁干扰和测量设备的误差也可能进一步加剧漂移现象。

4 覆盖物分类

测试数据分析表明,不同覆盖物的衰减比和相位差存在差异,但是衰减比在某些情况下存在交叉,且两者会随着温度的变化而改变,且不同传感器也存在差异,因此无法采用固定阈值进行分类。为提高区分准确性并降低传感器差异的影响,本文利用 MATLAB 分类器训练模型,并将其部署到系统中实现分类。本设计采用3层全连接前馈神经网络,前两层各含10个神经元,使用ReLU激活函数。最后一层含4个神经元,使用Softmax激活函数将分类分数转换为后验概率,输出分类结果。迭代训练次数设置为1 000次。

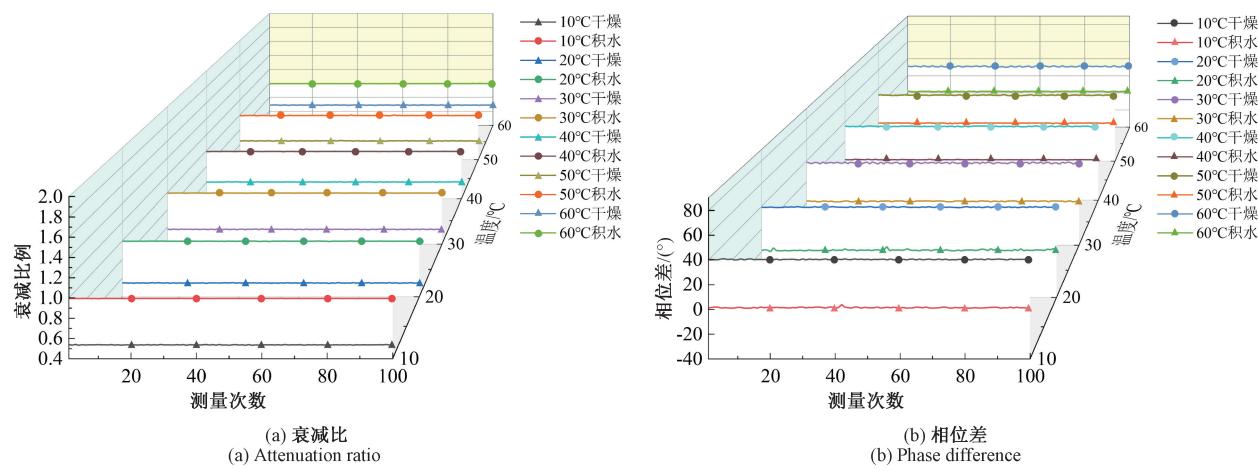


图 15 不同温度下干燥和积水衰减比例和相位差数据

Fig. 15 Attenuation ratio and phase difference data of drying and water accumulation at different temperatures

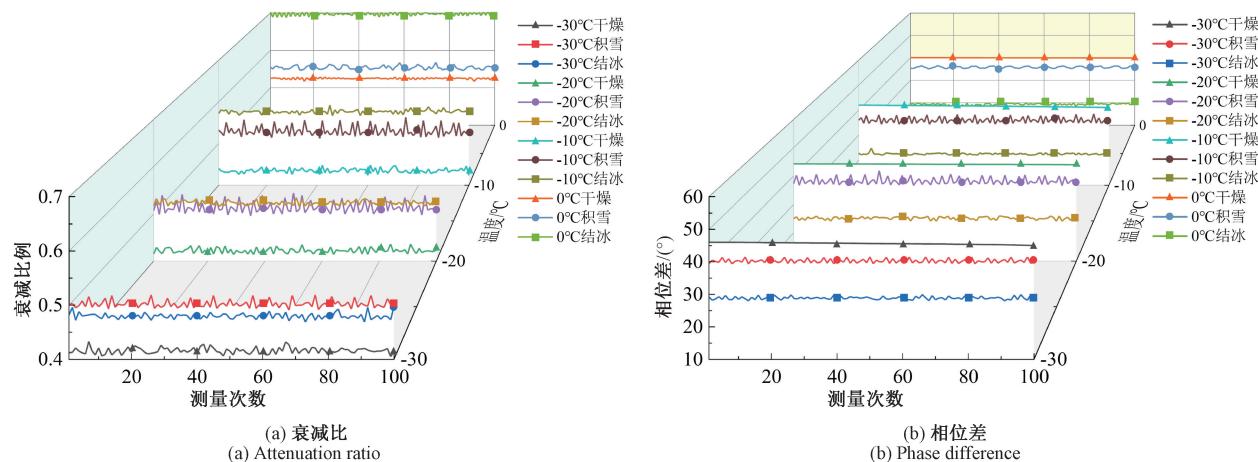


图 16 不同温度下干燥、结冰和积雪衰减比例和相位差数据

Fig. 16 Drying, icing and snow attenuation ratio and phase difference data at different temperatures

表 5 数据集样本

Table 5 Data set sample

相位差/(°)	温度/℃	衰减比/℃	分类标签
30.56	60.5	0.69	1
31.91	60.5	0.69	1
30.08	60.5	0.69	1
1.69	50.4	0.99	2
1.87	50.4	0.99	2
1.82	50.4	0.99	2
29.33	-24.9	0.48	3
28.47	-24.9	0.48	3
28.47	-24.9	0.47	3
37.98	-30.1	0.51	4
38.05	-30.2	0.51	4
39.61	-30.2	0.55	4

所示。其中,横坐标为预测类,表示预测的覆盖物类型,纵坐标为真实类,表示实际的覆盖物类型。标签 1~4 分别表示干燥、积水、结冰和积雪。干燥和积水者的相位差和衰减比差异显著,分类准确率超过 90%。而在低温下,干燥、结冰和积雪的特征存在交叉,导致误判,准确率降至 83.3%左右。

模型移植后,在不同温度和覆盖物条件下进行多次测试,得到实际分类结果如图 21 所示。横坐标表示实际覆盖物类型,纵坐标表示分类器判定的类型。温度>0 ℃时,干燥和积水的分类准确率超过 95%,几乎无误判。当温度<0 ℃时,干燥有时被误判为结冰或积雪,这是由于这三者的衰减比重叠,分类依赖相位差,而干燥和积雪的相位差接近,误判率较高。接近 0 ℃时,冰雪融化后会被误判为水。低温下,干燥、结冰和积雪的区分准确率接近 83%。

训练后的分类模型通过混淆矩阵评估性能,如图 20

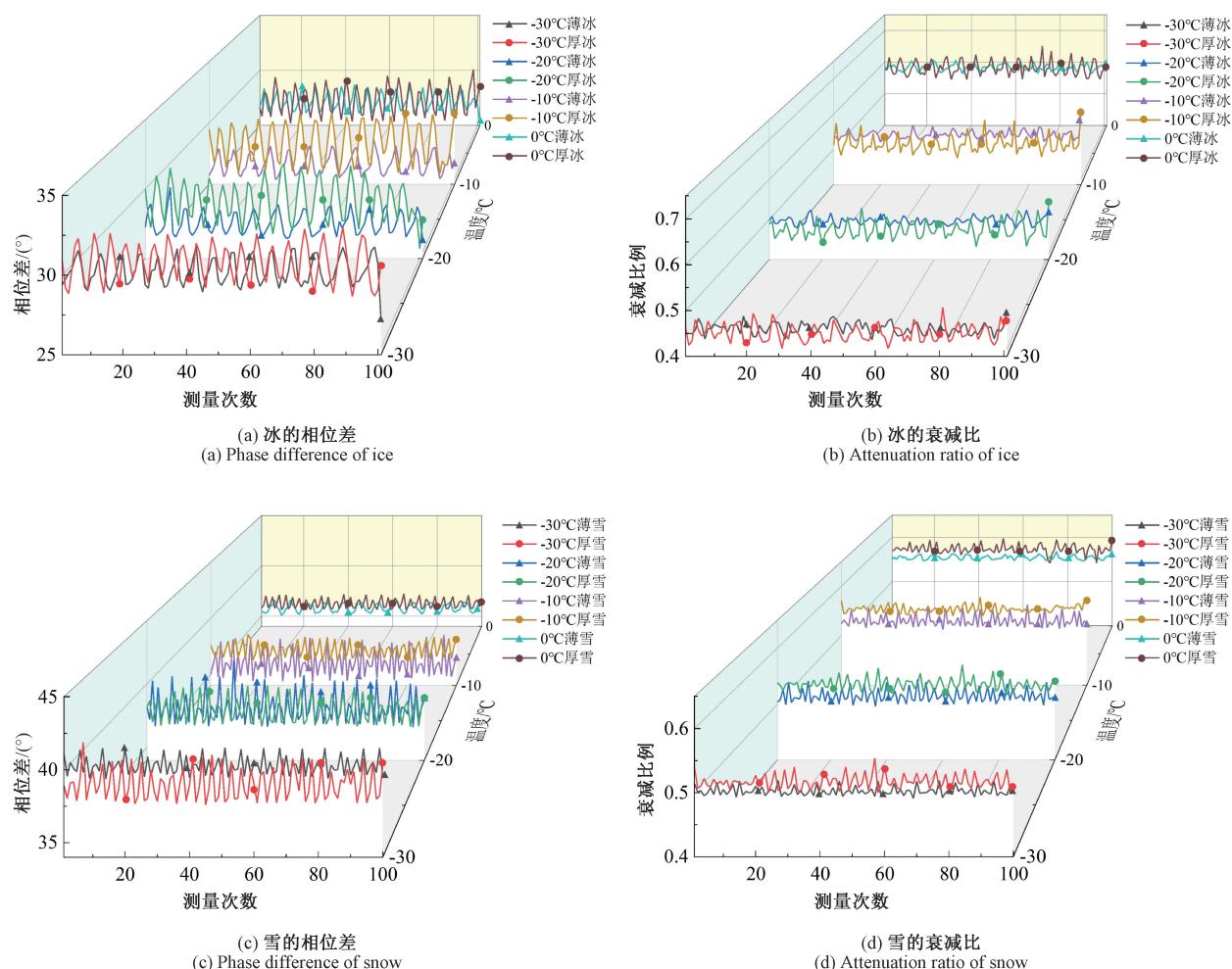


图 17 不同厚度的冰和雪的相位差和衰减比数据

Fig. 17 Phase difference and attenuation ratio data of ice and snow with different thicknesses

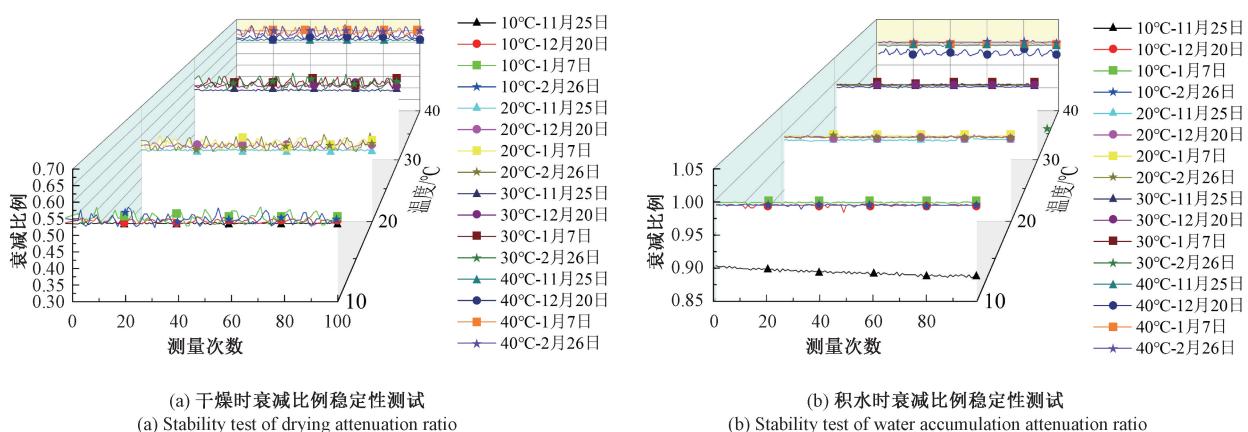


图 18 干燥和积水衰减比例稳定性测试

Fig. 18 Stability test of drying and water accumulation attenuation ratio

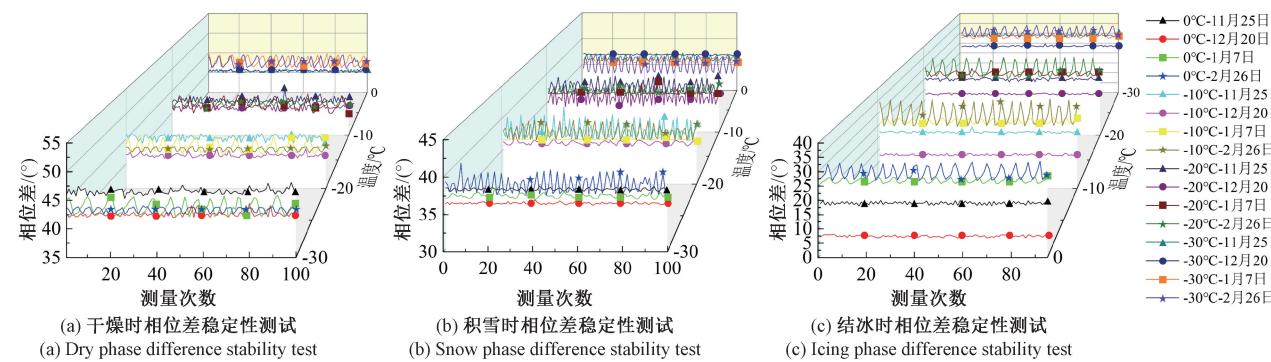


图 19 干燥、结冰和积雪相位差稳定性测试

Fig. 19 Dry, icing and snow phase difference stability test

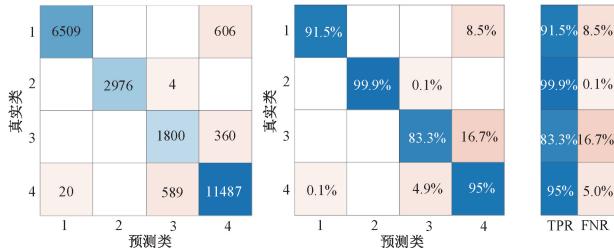


图 20 分类模型混淆矩阵

Fig. 20 Classification model confusion matrix

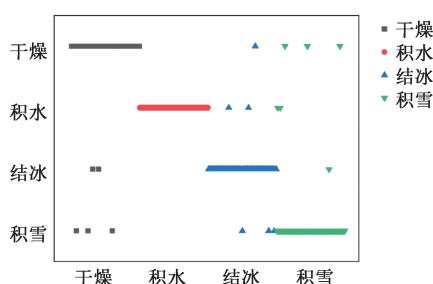


图 21 覆盖物分类测试图

Fig. 21 Cover classification test chart

5 结 论

本文基于电容式测量原理, 针对传统电容式检测手段分辨率低及在低温条件下覆盖物识别能力不足的痛点, 提出电容器等效模型, 设计了一种基于相位差和衰减比的路面覆盖物检测系统, 并开展相关实验。通过验证敏感电容的等效串联电阻和等效串联电容在不同检测频率和不同覆盖物下的变化, 实现系统的软硬件设计。实际测试干燥和积水区分准确率达到 95%, 干燥、结冰和积雪区分准确率接近 83%, 基本满足路面覆盖物检测的需求, 具有重要实用价值和意义。

参考文献

- [1] 杜荣华, 朱胜亿, 魏克湘, 等. 交通环境能量采集及自供能交通设施健康状态监测研究进展 [J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(3): 3-23.
DU R H, ZHU SH Y, WEI K X, et al. Research progress of energy harvesting in transportation environment and self-powered transportation infrastructure health monitoring [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(3): 3-23.
- [2] 杨晓光, 胡仕星月, 张梦雅. 智能高速公路交通应用技术发展综述 [J]. 中国公路学报, 2023, 36(10): 142-164.
YANG X G, HU SH X Y, ZHANG M Y. Development of intelligent motorway traffic application technologies: A review [J]. China Journal of Highway and Transport, 2023, 36(10): 142-164.
- [3] 严永红, 叶珍光, 玉凯元, 等. 基于交通安全的道路照明设施景观化研究 [J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(10): 154-161.
YAN Y H, YE ZH G, YU K Y, et al. Research on landscapilization of municipal road lighting facilities based on road traffic safety [J]. Chinese Journal of Safety Science, 2022, 32(10): 154-161.
- [4] 张晓美, 吕明辉, 王毅, 等. 我国公路交通气象灾害风险隐患特征分析 [J]. 灾害学, 2019, 34(4): 19-24.
ZHANG X M, LYU M H, WANG Y, et al. Analysis of the risk characteristics of highway traffic meteorological disasters in China [J]. Disaster science, 2019, 34(4): 19-24.
- [5] SHEN M, WANG J, YAN M, et al. Study on highway disaster risk classification of lean rainfall [C]. International Conference on Smart Transportation and City

- Engineering (STCE 2023). SPIE, 2024, 13018: 856-862.
- [6] BLANCHE J, MITCHELL D, FLYNN D. Run-time analysis of road surface conditions using non-contact microwave sensing[C]. 2020 IEEE Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT). IEEE, 2020: 1-6.
- [7] 周浩. 复阻抗式路面状况检测技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- ZHOU H. Research on road condition detection technology based on complex impedance measurement [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2020.
- [8] 桂康. 路面气象状态识别关键技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- GUI K. Road surface meteorological condition detection: key knowledge and technology [D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology, 2019.
- [9] 王岩, 王渊, 朱程香, 等. 谐振式飞机结冰探测传感器仿真及实验研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2022, 54(2) : 267-273.
- WANG Y, WANG Y, ZHU CH X, et al. Simulation and experimental study of aircraft icing detection sensor by resonant [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2022, 54(2) : 267-273.
- [10] SIBILIA S, TARI L, BERTOCCHI F, et al. A capacitive ice-sensor based on graphene nano-platelets strips [J]. Sensors, 2023, 23(24) : 9877.
- [11] LI J, MA H, SHI W, et al. Nondestructive detection and early warning of pavement surface icing based on meteorological information[J]. Materials, 2023, 16(19) : 6539.
- [12] 张颖. 基于短波红外激光的非接触式道路积水结冰监测方法研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2023.
- ZHANG Y. Research on the method of non-contact road water and ice monitoring based on short-wave infrared laser [D]. Chongqing: Chongqing University of Technology, 2023.
- [13] 任宏宇, 范丹丹, 桂康, 等. 复阻抗式结冰探测技术的温度补偿方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2021, 42(6) : 88-94.
- REN H Y, YUAN D D, GUN K, et al. A temperature compensation method for complex impedance ice detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2021, 42 (6) : 88-94.
- [14] 周翼, 郭玉东, 桂康, 等. 面向高能效电热除冰的冰结合状态感知方法研究[J]. 仪器仪表学报, 2024, 45(12) : 24-35.
- ZHOU Y, GUO Y D, GUI K, et al. Research on ice binding state sensing method for high energy efficiency electrothermal deicing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2024, 45(12) : 24-35.
- [15] WANG D, YE C, LYU H, et al. Dielectric model of asphalt pavement materials towards the future electrified road[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A, 2023, 381(2254) : 20220164.
- [16] 金庆鹏, 刘璐, 吕侃骏, 等. 水泥混凝土含水率传感器设计与应用[J]. 电子测量与仪器学报, 2024, 38(6) : 225-232.
- JIN Q P, LIU L, LYU K J, et al. Design and application of cement concrete moisture content sensor[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2024, 38(6) : 225-232.
- [17] POPOV I, ISHAI P B, KHAMZIN A, et al. The mechanism of the dielectric relaxation in water [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2016, 18(20) : 13941-13953.
- [18] WEBB R W, MARZILIANO A, MCGRATH D, et al. In situ determination of dry and wet snow permittivity: Improving equations for low frequency radar applications[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22) : 4617.
- [19] DÖRING J, SCHOLTYSEK J, BEERING A, et al. Optimization of road surface wetness classification using feature selection algorithms and sensor fusion[J]. IEEE Access, 2022, 10: 106248-106257.
- [20] 李起飞. 智能路面传感器采样算法与系统结构优化[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- LI Q F. Optimization of system structure and sampling algorithm for intelligent road sensors [D]. Nan Jing: Southeast University, 2015.
- [21] 夏涛, 吴云峰, 王胜利, 等. 基于功率 MOSFET 的高压纳秒脉冲源研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(12) : 18521861.
- WU T, WU Y F, WANG SH L, et al. Research on high-voltage nanosecond pulse generator based on power MOSFET[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(12) : 18521861.
- [22] ALLAGUI A, ELWAKIL A S, FOUDA M E. Revisiting the time-domain and frequency-domain definitions of capacitance[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(6) : 2912-2916.
- [23] 周明娟, 逮迈. 基于高阶滤波的肌电信号采集电路设计[J]. 传感技术学报, 2018, 31(1) : 54-60.
- ZHOU M J, LU M. Design of EMG signal acquisition

circuit based on high-order filter[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2018, 31(1): 54-60.

作者简介



周家涛,现为南京信息工程大学硕士研究生,主要研究方向为传感器。

E-mail: 295384166@qq.com

Zhou Jiatao is currently a M. Sc. candidate at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interest includes sensors.

李敏(通信作者),2010 年于东南大学获得博士学位,现为南京信息工程大学讲师,主要研究方向为微纳电子机械系统、传感器技术以及微能量收集技术。

E-mail: limin_nuist@nuist.edu.cn

Li Min (Corresponding author) received



his Ph. D. degree from Southeast University in 2010. He is currently a lecturer at Nanjing University of Information Science and Technology. His main research interests include micro nano electronic mechanical systems, sensor technology, and micro energy harvesting technology.



张加宏,2009 年于东南大学获得博士学位,现为南京信息工程大学教授、硕士生导师,主要研究方向为微纳电子机械系统、传感器技术、集成电路设计等方面的研究。

E-mail: jhzhang@nuist.edu.cn

Zhang Jiahong received his Ph. D. degree from Southeast University in 2009. He is currently an associate professor and M. Sc. supervisor at Nanjing University of Information and Science and Technology. His main research interests include micro-nano electromechanical systems, sensor technology, and integrated circuit design.