

# 微波透射检测集料含水率可靠性的多元线性回归分析

洪伟华<sup>1</sup>, 黄前龙<sup>2,3,4</sup>, 麻旭荣<sup>5</sup>, 蔡燕霞<sup>2,3,4</sup>, 李富林<sup>6</sup>

(1. 浙江交投矿业有限公司, 舟山 316000; 2. 中路高科(北京)公路技术有限公司, 北京 100088; 3. 公路建设与养护新材料技术应用交通运输行业研发中心, 北京 100088; 4. 交通运输部公路科学研究院, 北京 100088; 5. 浙江交通资源投资集团有限公司, 杭州 310000; 6. 河北工程大学 土木工程学院, 邯郸 056000)

**摘要:** 为满足工业化生产集料含水率的检测需求, 基于微波透射和多元线性回归模型理论构建分析模型, 对其显著性及检测结果可靠性进行了研究, 建立了对比偏差及其均方根误差、标准差、变异系数评价指标以表征 0~4.75 mm, 4.75~16.00 mm, 16.00~31.50 mm 不同粒径范围集料含水率离线与在线检测结果的重复性和检测精度。结果表明: 多元线性回归分析模型拟合优度较高, 离线与在线检测数据对比偏差范围为±0.3%, 均方根误差为 0.148%, 0.130%, 0.147%, 检测结果高度契合, 满足工程检测需求。

**关键词:** 微波透射; 在线检测; 多元线性回归; 含水率

**中图分类号:** TU521.2+5; TG115.28

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-6656(2023)11-0047-06

## Multiple linear regression analysis on the reliability of aggregate water content detection by microwave transmission method

HONG Weihua<sup>1</sup>, HUANG Qianlong<sup>2,3,4</sup>, MA Xurong<sup>5</sup>, CAI Yanxia<sup>2,3,4</sup>, LI Fulin<sup>6</sup>

(1. Zhejiang Trading and Mining Co.Ltd, Zhoushan 316000, China; 2. Beijing Zhonglu Gaoke Highway Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China; 3. Research and Development Center of Transport Industry of New Materials, Technologies Application for Highway Construction and Maintenance, Beijing 100088, China; 4. Research Institute of Highway Ministry of Transport, Beijing 100088, China; 5. Zhejiang Communications Resources Investment Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 6. School of Civil Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056000 China)

**Abstract:** In order to meet the demand of detecting moisture content of aggregates in industrial production, an analysis model was constructed based on microwave transmission and multiple linear regression model theory, its significance and the reliability of its detection results were studied. The comparison deviation and its root mean square error, standard deviation and coefficient of variation evaluation indexes were established to represent the repeatability and accuracy of the off-line and on-line measurement results of the water content of aggregates with different particle size ranges of 0~4.75 mm, 4.75~16.00 mm and 16.00~31.50 mm. The results showed that the multiple linear regression analysis model had a high goodness of fit, the deviation range of offline and online detection data was ±0.3%, and the root mean square error was 0.148%, 0.13%, 0.147%. The test results were highly consistent and meet the requirements of engineering detection.

**Key words:** microwave transmission; online detection; multiple linear regression; water content

收稿日期: 2023-03-15

作者简介: 洪伟华(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事建筑材料检测、研究与应用工作

通信作者: 黄前龙, 806438934@qq.com

在混合料中起到填充和骨架作用的粒料, 包括碎石、砾石、砂等均称为集料。集料的含水率作为规模化生产与应用中的重要评价指标, 目前仍多以离

线监测手段为主,费时、费力、检测结果不及时,影响了集料质量的稳定性和可靠性,难以及时满足质量控制需求。因此,为适应集料工业化发展趋势,确保集料含水率在线检测精度满足实际需求,有必要针对集料含水率在线检测可靠性进行研究。

目前诸多学者基于不同检测原理对集料含水率在线检测进行了研究与应用验证。其中,都广雄<sup>[1]</sup>对 Hydronix 传感器的实际应用情况进行了重点研究,分析了影响微波无损检测的实际因素,并与传统含水率测试作对比,分析了结果的可靠性。孙耀强<sup>[2]</sup>自主开发了一套电容式玉米水分测量系统,在电容传感器基础上,使用叉指式电容极板,在测试硬件方面,建立了可靠的数学模型,并分析了信号频率与玉米含水率之间的关系。王会等<sup>[3]</sup>总结了近几年国内红外法的无损检测应用,发现直至 21 世纪初,红外法才被引入国内。OTTEN 等<sup>[4]</sup>研究电阻法测量多孔性建筑材料含水率的可行性,分别建立了木材和砂浆两个独立模型,使木材含水率测量结果波动比较大±4%,砂浆的测量精度可以控制在±1%以内。PETERS 等<sup>[5]</sup>使用共振传感器,通过 4 个共振谐振腔对流化床颗粒含水率的频率响应进行检测,提高了工厂检测速率,加强了对不合格产品的及时预警。汪蓓蓓等<sup>[6]</sup>使用电容传感器对板材材料进行无损检测试验,试验中利用有限元分析研究电容结构与电场分布的规律,从而提高测量精度。郭志恒等<sup>[7]</sup>使用电容法测量乳粉含水率,通过正交试验研究乳粉含水率、测量信号频率与乳粉密度对测量结果的影响程度。李秋忠等<sup>[8]</sup>介绍了 8 种路基材料含水率的检测方法,检测时需要根据针对不同的环境来选择不同的方法。苏圆圆等<sup>[9]</sup>研究了一种低成本低功耗的混凝土湿度检测传感器,分析微波在混凝土构件中的传播特性,发现水泥含量越高,水泥标号越高,介电常数越小;含水率从 0 增加到 13%时,混凝土电导率增加了近 30 倍。CHEN 等<sup>[10]</sup>使用探地雷达来测量混凝土混合物的体积含水量,研究中提出了一种新的混合电容模型,结果表明,水和温度对试验的预测结果影响很大,掺入的粉煤灰和钢渣对试验结果的影响有限。

为构建研究微波透射法在线检测集料含水率的检测精度,对微波透射在线检测集料含水率的可靠性进行分析,从而为实现集料质量管理与智能化发展、促进集料含水率在线检测技术的实际工程应用提供参考。

## 1 理论分析

### 1.1 微波透射检测含水率原理

水分子具有较强的极化特性,在外加电场的作用下会沿着外加电场方向重新排列,而水偶极子的频繁换向消耗了大量电能,含水物质在微波场中的极化损耗特性可用其微波场中的复合介电常数来表示。干物质引起的微波能量损失远小于水分子引起的损失,而介电常数的实部和虚部也受物质中含水率的影响,微波具有强大的穿透性能,可穿透至被检测物质内部,而水分是高损耗介质,会与微波发生相互作用,影响微波的功率、相位、频率等相关信息,故通过检测微波的功率衰减、相变、谐振频率等与介电常数有关的物理量可实现物质的含水率检测。

### 1.2 多元线性回归模型

数据处理是整个检测系统的关键环节。集料含水率在线检测可靠性研究过程中,往往是多因素对试验结果产生影响,因此采用多元线性回归分析对检测系统进行拟合校准得到标定曲线,从而表征物理量之间的函数关系。多元线性回归分析是一种较为简便的研究方法,其利用线性拟合求出因变量  $y$  与多个自变量  $x_j$  ( $x_1, x_2, \dots, x_m$ ) 之间的近似函数关系  $y = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$ 。多元线性回归方程为

$$\hat{y} = a + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_mx_m \quad (1)$$

式中:  $b_1, b_2, \dots, b_m$  为偏回归系数。

当自变量  $x_1, x_2, \dots, x_m$  取不同试验值时,得到  $n$  组试验数据  $x_{1i}, x_{2i}, \dots, x_{mi}$ , ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), 将其代入式(1)可得对应的函数计算值  $\hat{y}$ 。由此可得残差平方和,表示为

$$S_e = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (2)$$

为了简便且使求得的数据与实际数据误差的平方和最小,根据最小二乘法原理,需满足式(3)条件,利用式(2)对多元函数中的所有系数  $a, b_1, b_2, \dots, b_m$  求偏导,并使其结果等于 0,求得拟合多项式中系数的最优解。为使方程组有解,试验次数  $n$  需大于自变量的个数  $m$ 。

$$\begin{cases} \frac{\partial(S_e)}{\partial a} = 0 \\ \frac{\partial(S_e)}{\partial b_j} = 0, \quad j = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

建立多元线性回归方程后,采用相关系数检验

法进行显著性检验,以反映自变量与多个因变量之间的线性相关程度,判定其可靠性。

总平方和为

$$S_T = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (4)$$

回归平方和为

$$S_R = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

复相关系数的平方称为多元线性回归方程的决定系数,用 $R^2$ 表示,如式(6)所示。

$$R^2 = \frac{S_R}{S_T} = 1 - \frac{S_e}{S_T} \quad (6)$$

## 2 试验设备与方案

### 2.1 试验设备

基于微波透射检测原理,试验采用微波透射在线检测含水率设备进行检测,其外观及布置现场如图1所示。该测量仪器主要包括微波传感器和微波数据处理单元两部分。微波传感器又称为微波天线,是电磁波的载体,包含一对1 GHz~5 GHz的功率天线,一端用于发射微波信号,另一端用于接收微波信号,二者空间垂直分布于所检测集料的两侧。微波信号处理单元即主机(设备的核心部件),是微波信号源的控制与分析运算处理中心,是校准曲线的执行端,也是含水率信号的输出端。



图1 试验仪器及布置现场

微波处理数据单元采用SPECTER 9软件建立多元线性回归分析模型,其较准示例如图2所示。其中,W1~W5为5种不同频率的微波信号; $H$ 为实验室中检测的样品固有含水率数据; $P$ 为微波水分测量仪测得的样品含水率数据; $E$ 为实际含水率与测量仪所测得含水率之间的误差,即对比偏差。系统校准的具体操作步骤为:取部分检测样品进行

室内试验,确定本组样品固有含水率数据;在SPECTER 9软件上设定5个不同频率的微波参考测量值,通过微波传感器一发一收,确定微波透射集料后的微波测量值,进而得到5个不同频率微波信号的衰减值,并将样品固有含水率数据和5个微波衰减值组成一个数据条。通过上述步骤,进行不同试验样品、不同质量、不同含水率等多种工况下的含水率检测试验,从而提升校准模型曲线的准确性,对多种工况下检测的固有含水率数据与5种衰减值数据进行多元线性回归分析,得到含水率与衰减值的拟合曲线。

该检测设备具体检测过程如图3所示,待集料通过微波传感器时,微波传感器发射端发射多段频率为1 GHz~5 GHz的微波,微波经过含水的集料后部分能量被集料中的水分吸收,能量衰减后的微波被微波传感器接收端所接收,最终通过特制的信号电缆把发送端和接收端所得到的微波信号传送给微波数据处理单元,利用微波数据处理单元对数据进行处理,最后将检测结果在显示屏中显示出来。

### 2.2 试验方案

试验选用浙江某矿区加工生产的凝灰岩集料,根据GB/T 14685—2022《建设用卵石、碎石》要求对集料进行了物化性能试验,结果表明所用集料的洁净程度以及坚固程度满足试验要求,从而可有效保证试验数据的准确性。根据该矿生产的0~4.75 mm,4.75~16.00 mm,16.00~31.50 mm 3种规格水洗后集料的含水率状况,利用离线与在线检测手段对其进行取样检测,得到固有含水率与5种不同频率微波衰减值数据,然后利用多元线性回归分析构建微波透射在线检测集料含水率计算模型。其中离线监测参照JTG E42—2005《公路工程集料试验规程》,利用烘干法进行试验,每次取样检测试验进行两次平行测试,以两次试验结果的平均值作为固有含水率数据;利用微波透射在线检测含水率设备对每种规格集料测定其在5种不同频率下的微波衰减值。试验过程中需确保操作人员、测量对象和检测方式相同,以保证数据结果的精准性。最后利用校准分析模型的设备分析多元线性回归分析模型的有效性,及在线检测不同规格集料含水率的检测精度。

### 2.3 结果可靠性评价方法

根据试验结果,以对比偏差、对比偏差的均方根



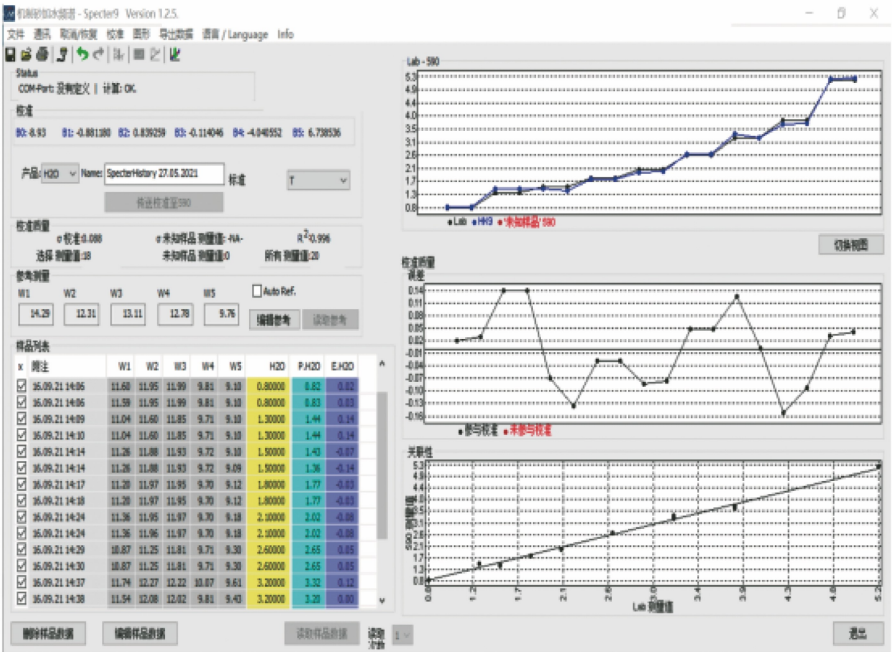


图2 微波数据处理单元校准示例

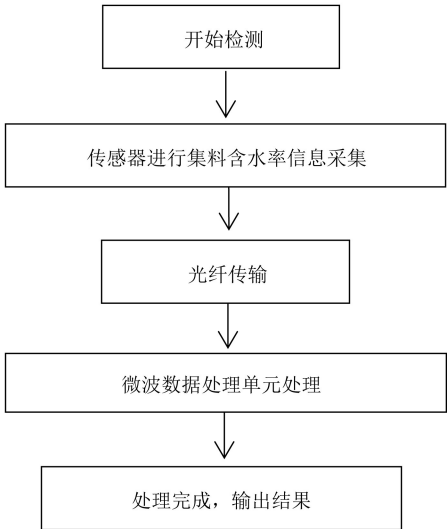


图3 微波透射检测集料含水率流程

误差、标准差以及变异系数为评价指标对集料含水率离线与在线检测数据进行分析,通过对比偏差表征离线监测与在线检测结果的吻合度,对比偏差计算公式如式(7)所示。式(7)中  $E_i$  为每次试验的对比偏差,  $i$  为试验次数 ( $i = 1, 2, \dots, n$ ),  $H_i$  为第  $i$  次烘干法试验所测得的集料含水率,  $P_i$  为第  $i$  次微波水分测量仪所测得的集料含水率。

$$E_i = H_i - P_i \tag{7}$$

通过对比偏差的均方根误差表征检测数据精度,均方根误差是观测值与真值偏差的平方与观测次数比值的平方根,反映了测量数据与真实数据的偏离程度,

误差值越小说明测量精度越高,计算公式如式(8)所示。

$$X_{\text{RMSE}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (E_i)^2}{n}} \tag{8}$$

式中: $X_{\text{RMSE}}$  为均方根误差;  $n$  为试验总次数。

通过标准差表征检测数据的重复性和离散程度,标准差越小说明测量数据重复性越好,离散程度越低,计算公式如式(9),(10)所示。

离线监测

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - \overline{H})^2}{n - 1}} \tag{9}$$

在线检测

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \overline{P})^2}{n - 1}} \tag{10}$$

式中: $\sigma$  为标准差;  $\overline{H}$ ,  $\overline{P}$  为所有离线与在线检测试验结果平均值。

通过变异系数表征检测数据的波动情况,又称离散系数,是概率分布离散程度的一个归一化量度,其定义为标准差与平均值之比,如公式(11)所示,式中  $c_v$  为变异系数,  $\overline{x}$  为平均值。变异系数越小,说明试验数据的波动幅度越小。

$$c_v = \frac{\sigma}{\overline{x}} \tag{11}$$

3 试验结果与分析

3.1 多元线性回归分析

试验确定的固有含水率与微波衰减值数据如表 1 所示,可看出微波衰减值随含水率的增大呈一定增长趋势。据此利用 SPECTER 9 软件进行计算建模,得到多元线性回归模型

$$y = -50.96 + 0.52x_1 - 0.27x_2 + 4.9x_3 - 5.18x_4 - 0.92x_5 \tag{12}$$

表 1 固有含水率与微波衰减值数据

微波衰减值/dB					固有含水率 y/%
$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	
35.56	24.94	14.89	7.10	3.72	0.8
35.56	24.94	14.89	7.10	3.73	0.8
35.92	25.30	15.25	7.46	4.08	1.2
35.93	25.30	15.25	7.46	4.09	1.2
36.42	25.80	15.75	7.96	4.59	1.5
36.42	25.80	15.75	7.96	4.58	1.5
37.17	26.55	16.50	8.71	5.33	1.8
37.17	26.55	16.50	8.71	5.34	1.8
37.49	27.80	17.57	9.79	5.91	2.0
37.50	27.80	17.57	9.79	5.91	2.0
38.26	27.73	17.78	9.93	6.39	2.5
38.46	27.92	17.98	10.19	6.57	2.7
38.47	28.45	17.91	9.91	6.27	3.5
38.49	28.45	17.92	9.92	6.27	3.5
39.13	28.75	18.19	10.29	6.70	4.0
39.13	28.75	18.19	10.29	6.70	4.0
41.64	31.05	21.03	13.30	9.82	5.5
41.64	31.04	21.03	13.30	9.82	5.5
44.80	34.03	24.05	16.30	12.88	8.5
44.80	34.03	24.05	16.30	12.88	8.5
45.74	35.12	25.07	17.28	13.90	9.5
45.74	35.12	25.07	17.28	13.91	9.5
46.23	35.80	26.20	18.32	14.30	10.5
46.25	35.90	26.23	18.32	14.30	10.5
47.30	36.13	27.05	19.24	15.24	11.0
47.32	36.10	27.06	19.24	15.27	11.0
48.40	38.05	28.01	20.19	16.90	12.5
48.41	38.05	28.01	20.19	16.90	12.5

对该模型进行显著性检验,结果如表 2 所示,可知,该回归模型修正后的  $R^2 = 0.996$ ,拟合优度较高,自变量可适用于解释因变量 99.6%的变化。

表 2 多元线性回归模型显著性检验结果

复相关系数 R	$R^2$	修正后 $R^2$	标准误差
0.998	0.997	0.996	0.258

3.2 结果可靠性分析

对 0~4.75 mm,4.75~16.00 mm,16.00~31.50 mm 3 种规格的集料进行了含水率离线和在线检测,检测结果及对比分析如表 3、4 所示。

由表 3 可知,3 种规格集料通过两种方法检测的含水率结果的标准差与变异系数相差不大,微波透射在线检测数据结果波动较为平稳,重复性较好。由表 4 可知,3 种规格集料结果对比偏差为  $-0.14\% \sim 0.24\%$ , $-0.26\% \sim 0.15\%$ , $-0.14\% \sim 0.26\%$ ,对比偏差范围仅为  $\pm 0.3\%$ ,均方根误差仅为 0.148%,0.130%,0.147%,表明两种方法所得检测结果吻合度较好,检测精度较高,可将集料含水率检测控制在较小的波动范围,满足实际工程检测要求。

表 3 含水率离线与在线检测试验结果

项目	含水率/%					
	0~4.75 mm		4.75~16.00 mm		16.00~31.50 mm	
	在线	离线	在线	离线	在线	离线
1#	9.49	9.47	4.21	4.14	2.00	1.87
2#	10.27	10.14	4.22	4.13	1.74	1.87
3#	10.52	10.76	4.39	4.13	1.68	1.73
4#	11.41	11.50	3.73	3.80	1.47	1.73
5#	11.67	11.80	3.66	3.65	1.78	1.68
6#	11.34	11.20	3.81	3.65	1.74	1.68
7#	11.46	11.60	3.81	3.70	1.85	1.72
8#	11.51	11.60	3.66	3.80	1.70	1.72
9#	11.47	11.70	3.50	3.55	1.73	1.85
10#	11.69	11.83	3.60	3.75	1.59	1.85
$\bar{x}$	11.03	11.16	3.86	3.83	1.73	1.77
$\sigma$	0.736	0.797	0.304	0.222	0.142	0.080
$c_v$	0.066	0.071	0.079	0.058	0.082	0.045

表 4 离线与在线检测试验结果对比偏差及其均方根误差

项目	含水率对比偏差/%		
	0~4.75 mm	4.75~16.00 mm	16.00~31.50 mm
1#	-0.02	-0.07	-0.13
2#	-0.13	-0.09	0.13
3#	0.24	-0.26	0.05
4#	0.09	0.07	0.26
5#	0.13	-0.01	-0.10
6#	-0.14	-0.16	-0.06
7#	0.14	-0.11	-0.13
8#	0.09	0.14	0.02
9#	0.23	0.05	0.12
10#	0.14	0.15	0.26
$X_{RMSE}$	0.148	0.130	0.147

4 结论

(1) 为提高集料含水率的检测效率,基于微波透射和多元线性回归模型理论构建分析模型,并对多元线性回归模型进行了显著性检验,结果表明该模型拟合优度较高,自变量可适用于解释因变量 99.6%的变化。

(2) 基于多元线性回归分析模型,与离线烘干法对比分析,研究了微波透射在线检测集料含水率结果的可靠性,提出了对比偏差、对比偏差的均方根误差、标准差以及变异系数为可靠性评价指标。

(3) 使用烘干法与微波透射法对 0~4.75 mm, 4.75~16.00 mm, 16.00~31.50 mm 3 种规格集料进行含水率对比分析,所得检测结果的标准差与变异系数相差不大,数据结果波动较为平稳,重复性较好,结果对比偏差范围为±0.3%,对比偏差的均方根误差为 0.148%,0.130%,0.147%,说明二者检测结果高度契合,检测精度较高,满足实际工程检测要求。

参考文献:

[1] 都广雄. 水泥混凝土搅拌设备砂含水率在线检测技术研究[D]. 西安:长安大学,2015.

[2] 孙耀强. 电容式粮食水分在线检测仪的研究[D]. 长春:吉林农业大学,2014.

[3] 王会,卢雅婷. 近红外水分测定仪的发展及在食品水分检测中的应用[J]. 农业工程,2016,6(1):58-61.

[4] OTTEN K A, BRISCHKE C, MEYER C. Material moisture content of wood and cement mortars- Electrical resistance-based measurements in the high

ohmic range[J]. Construction and Building Materials, 2017,153:640-646.

[5] PETERS J, BARTSCHER K, DÖSCHER C, et al. In-line moisture monitoring in fluidized bed granulation using a novel multi-resonance microwave sensor[J]. Talanta, 2017,170:369-376.

[6] 汪蓓蓓,黄云志,刘永洪. 平面电容传感器设计及在材料探伤中的应用研究[J]. 传感技术学报, 2014, 27(7):997-1001.

[7] 郭志恒,阚哲,张实,等. 电容法在线检测乳粉含水率的影响因素[J]. 中国粉体技术, 2019, 25(6):19-23.

[8] 李秋忠,查旭东. 路基含水量测定方法综述[J]. 中外公路, 2005, 25(2):41-43.

[9] 苏圆圆,何怡刚,邓芳明,等. 基于无源 RFID 的混凝土湿度监测技术研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(8):1235-1243.

[10] CHEN W, SHEN P L, SHUI Z H. Determination of water content in fresh concrete mix based on relative dielectric constant measurement[J]. Construction and Building Materials, 2012, 34:306-312.

[11] 黄明键,刘明军,梁立新,等. 微机在微波纸张湿度在线测量中的应用[J]. 济南大学学报(自然科学版), 2001, 15(3):198-200, 203.

(上接第 23 页)

[3] 李智超,曹益平. 基于改进迭代阈值的白细胞图像分割方法[J]. 光学与光电技术, 2022, 20(2):84-94.

[4] 李雄兵. 曲面工件自动超声检测中若干关键问题的研究[D]. 杭州:浙江大学,2008.

[5] 吕洪涛,李锋,刘志毅,等. 基于超声 C 扫描数字图像处理的缺陷面积分析[J]. 无损检测, 2022, 44(12):37-41, 71.

[6] 张一帆. 数字图像处理技术及其应用[J]. 无线互联科技, 2022, 19(10):108-109.

[7] HUANG Y T. Overview of research progress of digital image processing technology[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2386(1):012034.

[8] 王心雨,毕文波,张进生,等. 基于数字图像处理技术的白麻花岗岩含水率检测[J]. 无损检测, 2022, 44(8):43-47.

欢迎网上投稿

欢迎订阅

欢迎刊登广告