

DOI: 10.13382/j.jemi.B2407209

水泥混凝土含水率传感器设计与应用

金庆鹏¹ 刘璐¹ 吕侃骏¹ 孔明¹ 牟赛杰²

(1. 中国计量大学 杭州 310018; 2. 台州市黄岩区计量与产品质量安全检测研究院 台州 318020)

摘要:水泥混凝土是一种被广泛应用于工程建设中的复合材料,它的凝结状态对工程进度与安全至关重要,研究发现水泥混凝土的凝结时间与含水率有关。因此,为测量水泥混凝土含水率设计了基于电容检测原理的含水率测量传感器。根据水泥混凝土的介电特性和电容式传感器的检测原理,并利用边缘电场增大测量范围,设计了平行板式及圆柱式的电容式边缘电场传感器。利用COMSOL软件进行了有限元仿真分析,通过比较两种传感器结构的穿透深度、灵敏度与信号强度,优选出了圆柱式结构。再通过正交实验对不同参数组合的圆柱式传感器进行性能比较,确定了传感器的最优参数组合为电极间距5 mm、电极宽度50 mm、电极半径15 mm,使所研制传感器的穿透深度可达66.86 mm、信号强度为11.387 pF、灵敏度为0.267。最后,利用所研制传感器对不同含水率的水泥混凝土进行了实际测量,传感器输出电容值与含水率有良好的线性关系,非线性误差为 $\pm 1.276\%$,并与称重法相比最大相对误差为1.533%,具有良好的测量效果。

关键词:圆柱式传感器;COMSOL;边缘电场;水泥混凝土

中图分类号: TB971;TN603 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1040

Design and application of cement concrete moisture content sensor

Jin Qingpeng¹ Liu Lu¹ Lyu Kanjun¹ Kong Ming¹ Mou Saijie²

(1. China Jiliang University, Hangzhou 310018, China;

2. Taizhou Huangyan District Institute of Metrology and Product Quality and Safety Testing, Taizhou 318020, China)

Abstract: Cement concrete is a composite material employed in a multitude of engineering construction projects. The setting state of cement concrete exerts a profound influence on the advancement and security of such endeavours. It has been demonstrated that the setting time of cement concrete is contingent upon the water content. Therefore, a water content sensor based on the principle of capacitance detection is designed to measure the water content of cement concrete. According to the dielectric properties of cement concrete and the detection principle of capacitive sensors, and utilising the edge electric field to extend the measuring range, capacitive edge electric field sensors of parallel plate and cylindrical types were designed. A finite element simulation analysis was conducted using COMSOL software, and the cylindrical structure was selected based on a comparison of the penetration depth, sensitivity and signal strength of the two sensor structures. Subsequently, the performance of the cylindrical sensors with different parameter combinations was compared by orthogonal experiments, and the optimal parameter combinations of the sensors were determined as electrode spacing of 5 mm, electrode width of 50 mm, and electrode radius of 15 mm. This configuration enabled the sensors to reach a depth of penetration of 66.86 mm, a signal strength of 11.387 pF, and a sensitivity of 0.267. Finally, the developed sensor was utilised for the actual measurement of cement concrete with varying water contents, and the output capacitance value exhibited a satisfactory linear relationship with the water content, with a non-linear error of $\pm 1.276\%$ and a maximum relative error of 1.533% in comparison with that of the weighing method, which demonstrated a satisfactory measurement effect.

Keywords: cylindrical sensor; COMSOL; edge electric field; cement concrete

0 引言

水泥混凝土是指由水泥、砂、石等与水混合搅拌而成的工程复合材料,具有原料来源广泛、抗压强度高以及耐久性强等优势,在工业和建筑业中广泛应用。水泥混凝土的凝结时间在工程应用中具有重要意义,将直接影响工程进度及施工安全。目前大部分工人对于水泥混凝土的凝结时间都是凭借估计或者经验来判断,此种方法对于工程不确定性太大,很容易造成事故危险。有研究表明水泥混凝土的凝结时间可以通过公式计算得到,而其影响因素主要是温度、风速、含水率,其中只有含水率较难测得^[1],因此水泥混凝土的含水率测量成为当今的重要研究之一。

目前,国内外对于测量水泥混凝土含水率的测量方法,主要可分为重量法、化学法、射线法、介电法、电阻法、探地雷达法^[2]。其中重量法和化学法无法实时连续测量且测量时间较长,不适用现场测量,往往作为实验真值组进行对比实验,而射线法、探地雷达法、电阻法因其存在辐射隐患或受外界因素影响较大不常使用。

相较于其他方法,介电法可以实时、连续、快速的进行测量,具有更高的可靠性和实用性,成为当前测量水泥混凝土含水率的主要方法。其中,电容法具有非接触、无损检测、灵敏度高、测量实时快速准确等优点,更加适用于工程中水泥混凝土的含水率检测,也不会对水泥混凝土产生影响或破坏。

电容法测量水泥混凝土含水率的传感器结构种类较多,Kandala 等^[3]通过平行板式的电容传感器测量木片含水率,测量范围较小且最大相对误差在 3% 左右。张颖等^[4]和张萌^[5]通过圆柱式传感器探头测量土壤含水率,虽然测量范围增大,但误差也增大为 4% 左右。黄滔等^[6]、高志涛等^[7]设计了环形和圆弧式电容传感器测量含水率,但是测量范围较小。Alam 等^[8]研究发现叉指形和同心圆环形边缘电场传感器检测混凝土含水率是可行的,但是易损坏并且穿透深度不足。

传统电容式传感器的测量对象往往需要在电极之间,测量范围有限,并且灵敏度和信号强度较低。本文设计了一种基于边缘电场的圆柱式水泥混凝土含水率传感器,使用圆柱式的电极实现非接触式的无损检测,并且采用边缘电场解除空间上的限制,增大传感器的测量范围。通过建立传感器的三维模型,比较平行板式和圆柱式的电容传感器性能,确定了圆柱式的传感器结构,通过正交实验得到传感器的最优参数组合,提高传感器的穿透深度、信号强度和灵敏度。最后,利用所研制传感器进行了

实际测量,并将测量结果与称重法进行了比较,测量结果最大相对误差预期在 1.5% 左右。

1 含水率测量原理分析

正常的水泥混凝土的介电常数在 3~8,而水介电常数通常是 81,两者介电常数差异显著。因此,当水泥混凝土中的水分发生变化,在电场的作用下,水泥混凝土的介电常数会发生明显变化,可以根据水泥混凝土介电常数的变化计算出含水率的变化。

电容式传感器主要受电极间距、电极间接触面积、电极间介质介电常数影响,常分为变间距式、变面积式、变介质式 3 种电容传感器。而常见的电容式传感器结构又分为圆柱式、平行板式、圆弧式。在之前的研究中边缘电场都被认为是电容式传感器测量误差的来源之一,直到 Nolyngk 等^[9]提出了基于边缘电场的测量系统以后,研究人员才意识到边缘电场可以作为测量的工具,才开始重视尝试使用边缘电场进行测量。基于边缘电场的圆柱式电容传感器由于边缘电场的非接触性和不受空间限制的特性^[10],弥补了以往因为圆柱式电容传感器探测范围小的缺点,并且对被测物体的电导率要求低,更加易于屏蔽。

基于边缘电场的圆柱式电容传感器主要由面积相同的圆环状激励电极和感应电极组成,如图 1 所示。主要的工作原理是通过给激励电极施加电压后,电极会发射出向外扩散的电场,电场线向外不断扩散穿过保护管作用于外部水泥混凝土,从而实现非接触式测量,传感器插入水泥混凝土时电场会发生变化,相当于传感器与水泥混凝土形成了一个可变电容器。基于边缘电场的电容式传感器属于变介质式电容传感器,当水泥混凝土的含水率变化其介电常数也会改变,导致激励电极和感应电极之间形成的电场的电场强度也会发生改变,由此传感器测得的电容值也会发生改变^[11]。基于此,设计了基于边缘电场的圆柱式电容水泥混凝土含水率传感器。

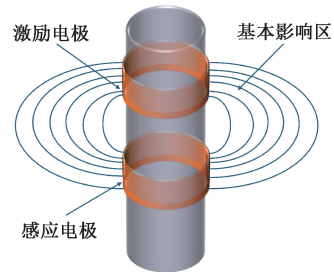


图 1 基于边缘电场的圆柱式电容传感器

Fig. 1 A cylindrical capacitance sensor based on the edge electric field

2 边缘电场传感器设计

2.1 边缘电场传感器的数学模型

基于边缘电场的电容式水泥混凝土含水率传感器结构参数复杂,在计算电容值时无法使用现有的公式去计算和分析其电场的分布情况,本文首先采用有限元法进行解析^[12]。有限元是一种网格划分法,通过将区域划分为许多小单元进行解析离散化的方法^[13]。根据经典麦克斯韦方程组的微分形式,边缘电场传感器形成的内部电磁场相对稳定可以视为稳定静电场^[14]。求解静电场的求解器满足泊松方程:

$$\Delta\varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

其中, Δ 为拉普拉斯算子, φ 为电势, ε 为介质的介电常数, ρ 为电荷密度。由于边缘电场传感器两个电极表面的总电通量为0,导致电荷密度为0,此时边缘电场传感器所形成的静电场,可表示为:

$$\nabla \cdot [\varepsilon_0 \varepsilon_r(x, y, z) \nabla \Phi(x, y, z)] = 0 \quad (2)$$

其中, ∇ 为散度算子, $\varepsilon_0 \varepsilon_r(x, y, z)$ 为边缘电场传感器外部待测物的介电常数分布函数, $\Phi(x, y, z)$ 为电势分布。其边界条件为:

$$\Phi = \begin{cases} V_U, (x, y, z) \in \Gamma \\ 0, (x, y, z) \in \Gamma \\ \frac{\partial \Phi}{\partial n} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

其中, Γ 为电极所处的空间位置,当给激励电极施加电压 V_U 时,感应电极的电位为0V,其余为诺依曼边界,法向导数 $\partial\Phi/\partial n$ 为0。对感应电极 i 的感应电荷 Q_i 进行计算可通过 Gauss 定理,公式表示为:

$$Q_i = -\int \varepsilon_0 \varepsilon_r(x, y, z) \nabla \Phi(x, y, z) d_r \quad (4)$$

则边缘电场传感器的电容值 C 可由感应电荷和激励电极电压计算得。

$$C = \frac{Q_i}{V_U} \quad (5)$$

2.2 不同结构边缘电场传感器性能对比

为了进一步确认基于边缘电场的圆柱式电容传感器更加适合用于水泥混凝土的含水率检测,从穿透深度、灵敏度、信号强度3个指标对圆柱式和平板式结构的传感器进行比较^[15]。

穿透深度是指边缘电场传感器电场线所能到达最大距离,随着距离增大,电场线会逐渐减少,所测得的电容值增长也会逐渐下降直到不再增长^[16]。目前对于穿透深度的定义并不统一,本文规定电容测得值到达传感器最大电容的97%时,电场线所到位置为传感器的有效穿

透深度,计算公式如下:

$$\frac{C_r - C_{\text{air}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{air}}} \times 100\% = 97\% \quad (6)$$

其中, C_{air} 为空气环境下传感器的电容值, C_r 为被测物达到穿透深度 r 处传感器的电容值, C_{max} 为传感器输出的最大电容值。

信号强度是反应传感器输出电容大小的指标,强度越大,信噪比越好,更能得到准确的测量结果。

灵敏度表示边缘电场传感器测得的电容值随含水率的变化情况,将直接影响电容测量结果^[17]。传感器灵敏度的计算公式如下:

$$S = \frac{C_\varepsilon - C_{\text{air}}}{C_{\text{max}} - C_{\text{air}}} \quad (7)$$

其中, C_ε 水泥混凝土的相对介电常数为 ε 时的电容值, C_{air} 空气环境下传感器的电容值, C_{max} 传感器的最大电容值。

通过 COMSOL 软件建立了两种相同尺寸的传感器三维模型,如图2所示。再利用 COMSOL 软件参数化扫描功能,分别改变平行板式和圆柱式电容传感器外部的水泥混凝土的厚度和相对介电常数,最后通过公式计算得到两种传感器的穿透深度、信号强度、灵敏度,并绘制出性能对比图,如图3所示。

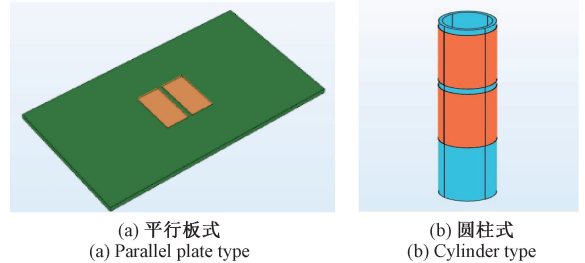


图2 COMSOL 软件建立的传感器模型

Fig. 2 Sensor model established by the COMSOL software

由图3可以看出,圆柱式传感器的穿透深度更大、信号强度更高、灵敏度更好能够更准确地检测出水泥混凝土的含水率,因此,本文选用圆柱式结构设计边缘电场传感器。

3 正交实验

由于电极宽度、电极半径、电极间距都会对传感器性能造成影响,并且影响大小、影响趋势并不相同。为获得传感器的最优参数组合,采用正交实验分别对间距、宽度、半径进行分析,选用穿透深度、灵敏度、信号强度进行评估^[18]。根据实际应用情况对3个参数各选取3个值,所设计正交设计表 $L_9(3^3)$,以及对应的穿透深度、信号强度、灵敏度仿真数据,如表1所示。利用极差分析法对

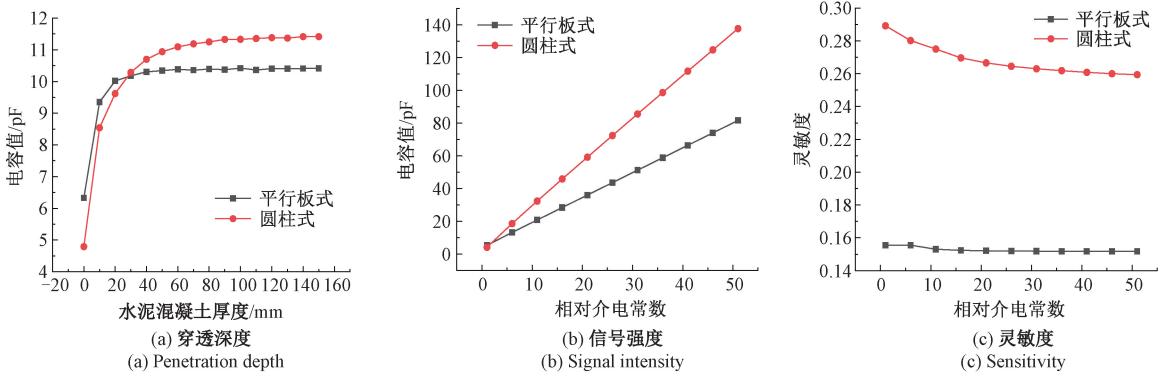


图 3 不同结构传感器性能对比

Fig. 3 Comparison of sensor performance of different structures

上述正交实验进行分析,分别得到灵敏度、穿透深度、信号强度的 K 值、 K_{avg} 值、 R 值其中 K 值为某因素下其中一

个水平的试验数据总和, K_{avg} 值为其平均值, R 值为极差值,即某一因素下的 K_{avg} 最大值减去 K_{avg} 最小值^[19]。

表 1 正交设计及仿真结果汇总

Table 1 Summary table of orthogonal design and simulation results

实验号	电极间距 d/mm	电极宽度 h/mm	电极半径 r/mm	灵敏度	穿透深度/ mm	信号强度/ μF
1	5	30	10	0.181	46.39	6.869
2	5	40	12.5	0.227	48.4	9.127
3	5	50	15	0.267	66.86	11.387
4	10	30	12.5	0.139	53.61	7.044
5	10	40	15	0.176	61.01	9.053
6	10	50	10	0.139	67.56	6.999
7	15	30	15	0.147	58.58	7.433
8	15	40	10	0.119	64.7	5.873
9	15	50	12.5	0.149	73.68	7.623

通过极差分析表 2 可得,随着电极间距和宽度的增加,灵敏度呈现下降趋势,但电极半径与灵敏度之间呈正相关关系。根据表中 R 值可推断出电极间距对灵敏度的影响最为显著,而电极宽度的影响最小。因此,为了提升灵敏度,可以考虑适当增大电极半径,并减小电极宽度和间距。

对穿透深度的影响最为显著,而电极半径的影响相对较小。因此,为了提高穿透深度,应优先考虑增大电极宽度和电极间距。

表 2 灵敏度的极差分析

Table 2 Extreme difference analysis table of sensitivity

项	水平	电极间距 d/mm	电极宽度 h/mm	电极半径 r/mm
K 值	1	0.675	0.555	0.439
	2	0.454	0.522	0.515
	3	0.415	0.467	0.590
K_{avg} 值	1	0.225	0.185	0.146
	2	0.151	0.174	0.172
	3	0.138	0.156	0.197
R		0.087	0.029	0.050

表 3 穿透深度的极差分析

Table 3 Table of differential analysis of penetration depth

项	水平	电极间距 d/mm	电极宽度 h/mm	电极半径 r/mm
K 值	1	161.650	158.580	178.650
	2	182.180	174.110	175.690
	3	196.960	208.100	186.450
K_{avg} 值	1	53.883	52.860	59.550
	2	60.727	58.037	58.563
	3	65.653	69.367	62.150
R		11.770	16.507	3.587

通过极差分析表 3 可得,电极间距、半径和宽度均与穿透深度呈正相关关系。由表中 R 值可推断出电极宽度

根据极差分析表 4 可得,电极半径和宽度增大时,信号强度增强,但电极间距与信号强度呈负相关。由表中 R 值可推断出电极间距对信号强度的影响最大,而电极半径的影响最小。因此,为了增强信号强度,可以适当增大电极半径、宽度,减小电极间距。

表 4 信号强度的极差分析

Table 4 Extreme difference analysis table of signal intensity

项	水平	极板间距 d/mm	电极宽度 h/mm	极板半径 r/mm
K 值	1	27.383	21.346	19.741
	2	23.096	24.053	23.794
	3	20.929	26.009	27.873
K_{avg} 值	1	9.128	7.115	6.580
	2	7.699	8.018	7.931
	3	6.976	8.670	9.291
R		2.151	1.554	2.711

根据极差分析表的分析结果与正交实验的仿真结果,选择传感器的最优参数组合是: $d = 5\text{ mm}$; $r = 15\text{ mm}$; $h = 50\text{ mm}$,其性能为穿透深度可达 66.86 mm、信号强度为 11.387 pF、灵敏度为 0.267。

4 水泥混凝土含水率检测实验

4.1 传感器标定实验

由于黄铜具有良好的导电性和可塑性易加工形成环状结构,基于边缘电场的圆柱式水泥混凝土含水率检测传感器的电极选用黄铜进行制作^[20]。所设计传感器主要由 PVC 管以及贴附的环形电极组成,实物如图 4 所示。



图 4 传感器实物图
Fig. 4 Sensor physical diagram

传感器外围的微小电容检测电路选用 FDC2214 芯片,其分辨率为 28 位,测量范围为 0~250 nF,精度达到 0.3 fF,多通道采集的同时采用了窄带结构,抗电磁干扰能力强也不易受环境光的影响,适合用于工程水泥混凝土的含水率检测^[21]。通过控制水泥和水的比例放入搅拌机配置含水率为 10~80 g/m³ 的水泥混凝土,将传感器与 FDC2214 芯片连接,通过上位机软件确定测量结果准确稳定后,将传感器分别插入不同含水率的水泥混凝土中进行测量,电路连接如图 5 所示,其实地测量如图 6

(a) 所示,进行多次测量后取平均值绘制出水泥混凝土含水率与电容的关系如图 6(b) 所示。

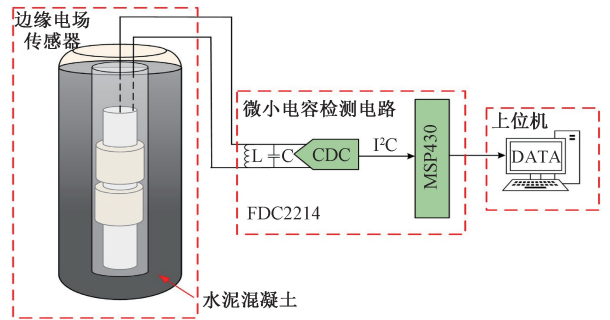
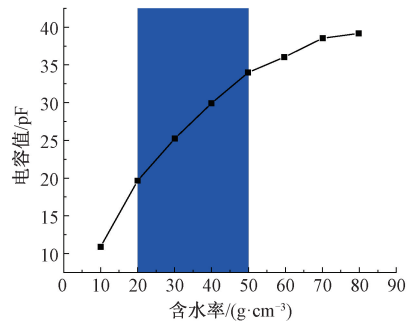


图 5 电路连接示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the circuit connection



(a) 实地测量图
(a) Field survey map



(b) 含水率与电容的关系
(b) The relationship between water content and capacitance

图 6 传感器标定实验

Fig. 6 Sensor calibration experiment

正常工程应用中水泥混凝土的含水率一般在 20~50 g/m³,通过图 6(b) 阴影区域可知,电容传感器测得的电容值与含水率之间具有良好的线性关系。含水率在 20 g/m³ 以下时电容变化幅度较大,是因为此时水泥混凝土中水分较少水泥占比较大,水泥与水还未充分搅拌均匀;而含水率 50 g/m³ 以上时水泥混凝土中水分占比过大达到饱和状态,电容变化缓慢。因此为了避免非线性误差,并且更符合工程应用情况,选取含水率 20~50 g/m³ 的实验数据进行直线拟合,得到水泥混凝土含

水率与电容值的拟合公式:

$$f(x) = 10.531 + 0.476 4x \tag{8}$$

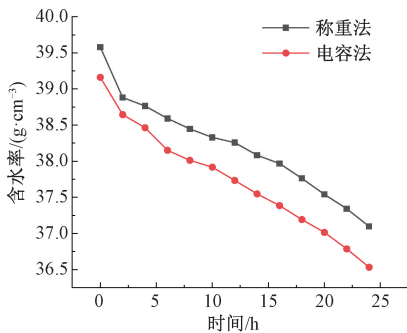
其中, x 为水泥混凝土的含水率, $f(x)$ 为不同含水率下传感器测得的电容值。拟合的直线的相关系数 $R^2 = 0.994 87$, 说明基于边缘电场的圆柱式水泥混凝土含水率传感器具有良好的相关性。根据公式^[22] $\pm(\text{最大偏差值}/\text{满量程})$ 计算出曲线的非线性误差为 $\pm 1.276\%$ 。

4.2 对比实验

为了进一步验证传感器的准确性, 配置一份含水率为 $40 \text{ g}/\text{m}^3$ 水泥混凝土取样后分别使用称重法和传感器进行含水率的 24 h 连续检测, 通过与称重法进行比较, 分析传感器的测量效果^[23]。通过电子秤连续称重测得水泥混凝土的实际含水率, 并同时传感器放入配置好的水泥混凝土中进行连续测量, 将传感器测得的电容值通过传感器标定的公式得到对应的含水率, 实验装置如图 7(a) 所示, 绘制出对应的含水率与时间的变化如图 7(b) 所示。



(a) 实验装置图
(a) Experimental device diagram



(b) 水泥混凝土监测结果
(b) Monitoring results of cement concrete

图 7 水泥混凝土含水率检测

Fig. 7 Water content test of cement concrete

通过将电容法和称重法连续监测得到的水泥混凝土含水率进行比较, 绘制出传感器测得的含水率对于称重法的相对误差曲线如图 8 所示。由图 8 分析得到基于边缘电场的圆柱式水泥混凝土含水率传感器与称重法在 16 h 初达到最大相对误差 1.533%, 满足实验的预期目标, 具有良好的测量效果, 可以应用于工程应用中水泥混

凝土的含水率检测。

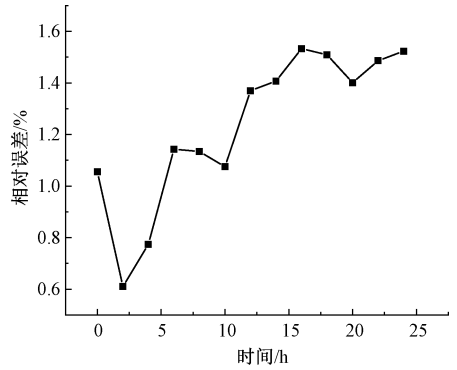


图 8 相对误差曲线

Fig. 8 Relative error curve

5 结 论

本文针对水泥混凝土的含水率测量, 设计了一种基于边缘电场的圆柱式水泥混凝土含水率传感器。通过对传感器的结构选型、参数优化, 实现了工程实际水泥混凝土的含水率检测。首先通过 COMSOL 仿真软件建立了传感器模型, 并且通过比较圆柱式与平行板式传感器的性能, 选择了性能更加优良的圆柱式结构。其次, 通过正交实验和极差分析得到了传感器的最优参数组合, 电极间距 d 为 5 mm, 电极半径 r 为 15 mm, 电极宽度 h 为 50 mm, 传感器穿透深度可达 66.86 mm、信号强度为 11.387 pF、灵敏度为 0.267。再次, 通过测量不同含水率的水泥混凝土, 得到传感器的标定曲线, 非线性误差为 $\pm 1.276\%$, 具有良好的线性关系。最后对水泥混凝土进行 24 h 连续监测, 将传感器得到的含水率与称重法相比发现最大相对误差为 1.533%, 测量误差减小, 具有良好的测量效果。

本文所设计的传感器具有非接触、无损测量、测量范围大等优点, 但只能对单一深度进行检测, 后续可增加电极对数量, 实现不同深度的水泥混凝土含水率检测, 使测量结果更加准确。同时, 测量过程易受外界温度等参数影响^[24], 如何消除外界因素影响提高测量结果的准确性和精度^[25], 在后续工作中还需进一步研究。

参考文献

[1] 许文彬. 基于下层水分状态的混凝土分层施工控制方法研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.
 XU W B. Research on control method of concrete based on lower moisture state [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019.

[2] 孙满利, 付菲, 沈云霞. 土的含水率测定方法综述[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(2):

- 219-229.
- SUN M L, FU F, SHEN Y X. Summary of methods for determination of soil [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49 (2): 219-229.
- [3] KANDALA C V, HOLSER R, SETTALURI V, et al. Capacitance sensing of moisture content in fuel wood chips [J]. IEEE Sensors Journal, 2016, 16 (11): 4509-4514.
- [4] 张颖, 行鸿彦, 张旭, 等. 土壤水分传感器探头的仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(4): 55-65.
- ZHANG Y, XING H Y, ZHANG X, et al. Simulation analysis of soil moisture sensor probes [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35 (4): 55-65.
- [5] 张萌. 阵列式电容传感器探测土壤水分方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- ZHANG M. Research on soil moisture detection by array capacitive sensor [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [6] 黄滔, 赵春宇, 朱成刚, 等. 同面弧面电容式种子水分传感器的研究[J]. 农机化研究, 2016, 38(11): 252-256.
- HUANG T, ZHAO CH Y, ZHU CH G, et al. Research on capacitive seed moisture sensor with coplanar arc surface [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(11): 252-256.
- [7] 高志涛, 刘卫平, 赵燕东. 基于电容法的非接触式土壤水分传感器设计与性能分析[J]. 农业机械学报, 2016, 47(11): 185-191.
- GAO ZH T, LIU W P, ZHAO Y D. Design and performance analysis of non-contact soil moisture sensor based on capacitive method [J]. Journal of Agricultural Machinery, 2016, 47 (11): 185-191.
- [8] ALAM M N, BHUIYAN R H, DOUGAL R A, et al. Concrete moisture content measurement using interdigitated near-field sensors [J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(7): 1243-1248.
- [9] NOLYINGK B E. A Novel proximity gauge[J]. Journal of Physics E: Scientific Instruments, 1969, 2 (2): 356-360.
- [10] 赵燕江, 房玉康, 张永德. 基于有限元的套管柔性针穿刺软组织弯曲建模研究[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(3): 202-211.
- ZHAO Y J, FANG Y K, ZHANG Y D. Finite element-based modeling of soft tissue bending by flexible cannula needle puncture [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41 (3): 202-211.
- [11] 戴恒震. 变压器绝缘纸板微水分介电测量原理及其测量系统的研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2004.
- DAI H ZH. Research on the principle of micromoisture dielectric measurement and its measurement system of transformer insulated cardboard board [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2004.
- [12] HAINSWORTH J M, YLMORELG A. The use of computer-assisted tomography to determine spatial distribution of soil water content [J]. Australian Journal of Soil Research, 1983, 21(4): 435-443.
- [13] 杨雪. 基于早期电阻率进行水泥 28d 抗压强度预测的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- YANG X. Study of cement 28d compressive strength prediction based on early resistivity [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [14] SENIN S F, HAMID R. Ground penetrating radar wave attenuation models for estimation of moisture and chloride content in concrete slab [J]. Construction & Building Materials, 2016, 106(1): 659-669.
- [15] 端木子昂. 基于早龄期混凝土介电常数的抗压强度测量方法与实验研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2022.
- DUANMU Z ANG. Measurement method and experimental study of compressive strength based on the dielectric constant of concrete at early age [D]. Chongqing: Chongqing University, 2022.
- [16] 赵凯华, 陈熙谋. 电磁学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1985.
- ZHAO K H, CHEN X M. Electromagnetism [M]. Beijing: Higher Education Press, 1985.
- [17] AL-QADI I L, HAZIM O A, SU W, et al. Dielectric properties of portland cement concrete at low radio frequencies[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 1995, 7(3): 192-198.
- [18] 刘瑞江, 张业旺, 闻崇炜, 等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. 实验技术与管理, 2010, 27(9): 52-55.
- LIU R J, ZHANG Y W, WEN CH W, et al. Orthogonal trial design and analytical methods study [J]. Experimental Technology and Management, 2010, 27 (9): 52-55.
- [19] 刘亚军, 祝连庆, 杨德斌, 等. 基于空气湿度的土壤含水量估计模型研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(11): 2582-2587.
- LIU Y J, ZHU L Q, YANG D B, et al. Soil water content estimation model based on air humidity [J]. Chinese Journal of Scientific Instrumentat, 2016, 37 (11): 2582-2587.
- [20] 陈栋, 温宗周. 基于频域反射法的土壤水分传感器设计[J]. 电子测量技术, 2016, 39(3): 106-109.
- CHEN D, WEN Z ZH. Design of soil moisture sensor

- based on frequency domain reflection method [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2016, 39 (3): 106-109.
- [21] 黄云志, 郑亮, 汪蓓蓓. 多波长边缘电场传感器介电测量系统的研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2015, 29(6): 853-859.
HUANG Y ZH, ZHENG L, WANG B B. Research on the dielectric measurement system of the multi-wavelength edge electric field sensor [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2015, 29 (6): 853-859.
- [22] 王睿怀, 高鹤明. 平面阵列电容式固体颗粒速度测量方法研究 [J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(5): 133-139.
WANG R H, GAO H M. Study on the velocity measurement of solid particles [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34 (5): 133-139.
- [23] BOAST W B. *A Conductometric Analysis of Portland Cement Pastes and Mortars and Some of its Applications* [M]. Ames: Iowa State University, 1936.
- [24] WANG X, SUBRAMANIAM K V. Ultrasonic monitoring of capillary porosity and elastic properties in hydrating cement paste [J]. *Cement & Concrete Composites*, 2011, 33(3): 389-401.
- [25] KLYSZ G, BALAYSSAC J P. Determination of volumetric

water content of concrete using ground-penetrating radar [J]. *Cement and Concrete Research*, 2007, 37 (8): 1164-1171.

作者简介



金庆鹏, 2022 年于中国计量大学现代科技学院获学士学位, 现为中国计量大学硕士研究生, 主要研究方向为精密仪器设计。
E-mail: jin2013121312@163.com

Jin Qingpeng received his B. Sc. degree from China Jiliang University College of Modern Science and Technology in 2022. Now he is a M. Sc. candidate in China Jiliang University. His main research interest includes precise instrument design.



刘璐(通信作者), 2011 年于兰州理工大学获得学士学位, 2014 年于天津大学获得硕士学位, 2019 年于天津大学获得博士学位, 现为中国计量大学讲师, 主要研究方向为精密仪器设计、微纳结构及检测系统设计。
E-mail: lu_liu@cjl.u.edu.cn

Liu lu (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Lanzhou University of Technology in 2011, M. Sc. degree from Tianjin University in 2014, and Ph. D. degree from Tianjin University in 2019, respectively. Now she is a lecturer in China Jiliang University. Her main research interests include precision instrument design, micro nano structure, and detection system design.