

大直径灌注桩浇筑均匀性检测的 ERT 技术研究

王梓浩, 田正宏, 孙 啸, 赵锦平

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 为探究电阻层析成像(ERT)技术在大直径灌注桩混凝土浇筑均匀性检测中的有效性, 利用有限元仿真软件 Comsol, 通过数值模拟探讨了 ERT 传感器关键参数的优化设计, 并以直径为 1000 mm 的传感器为例进行了物理模型试验, 采用信噪比、灵敏度均匀性、灵敏度矩阵条件数以及空间图像误差、相对误差和相关系数对传感器性能和效果进行了评价。结果表明: 传感器高度对传感器性能的影响有限, 电极材料电导率对传感器性能没有影响, 电极长度、宽度与传感器性能之间存在复杂的非线性关系; 当 ERT 传感器的高度取直径的 0.8 倍、电极取铜电极、电极长度和宽度分别取筒周长的 1/16 和 1/32 时, 大直径灌注桩混凝土浇筑均匀性的检测效果良好。

关键词: 电阻层析成像技术; 传感器优化设计; 混凝土浇筑; 灌注桩; Comsol; 重建图像评价

中图分类号: TU317

文献标志码: A

文章编号: 1006-7647(2025)02-0075-07

Research on ERT method for testing concrete placement uniformity of large-diameter bored piles//WANG Zihao, TIAN Zhenghong, SUN Xiao, ZHAO Jinping(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In order to explore the effectiveness of electrical resistance tomography (ERT) technology in testing the concrete placement uniformity of large-diameter bored piles, numerical simulation was conducted to optimize the key parameters of ERT sensors. A physical model test was carried out using a sensor with a diameter of 1000 mm as an example. The signal-to-noise ratio, sensitivity uniformity, and sensitivity matrix condition number, as well as the error, relative error and correlation coefficient of spatial images were used to evaluate the performance and effect of the sensor. The results show that the sensor height has a limited effect on the sensor performance, while the conductivity of electrode material has no impact on the sensor performance. There exists a complex nonlinear relationship between the electrode length, width, and sensor performance. When the height of ERT sensor is 0.8 times the diameter, the electrode is copper, and the length and width of the electrode are 1/16 and 1/32 of the circumference of the cylinder, respectively, the ERT sensor demonstrates good performance in testing the concrete placement uniformity of large-diameter bored piles.

Key words: electrical resistance tomography; sensor optimization design; concrete placement; bored pile; Comsol; reconstruction image evaluation

混凝土灌注桩在浇筑施工阶段由于其隐蔽工程的特性导致其浇筑质量无法确定,且事后难以补救,因断桩、缩颈等缺陷导致废桩的情况屡见不鲜,故急需一种浇筑过程中可实时、无损、可视化检测的方法。电阻层析成像(electrical resistance tomography, ERT)技术具有非接触、非侵入式、可视化、实时性等特点^[1-2],常用于多相流检测中。当前,ERT技术在土木水利工程领域的应用主要集中于混凝土裂缝、表面损伤检测以及小体积混凝土检测,如 Kawai 等^[3]检测了水通过混凝土内部裂缝的运动情况,提

出可以通过电测量来评估;Hallaji^[4]基于 ERT 技术开发了传感蒙皮,用于监测混凝土结构中的不饱和和水分运动并捕捉开裂模式;Suryanto 等^[5]使用 ERT 技术监测混凝土内的水运动,研究了表面损伤的影响;孙世栋^[6]通过内掺碳纤维的方式改良混凝土非良导体特性,提高了 ERT 系统的采集精度;赵锦平等^[7]将 ERT 技术应用于混凝土均质性检测,实现了混凝土浇筑缺陷类别及严重程度的定量判别。目前还缺少对 ERT 技术用于大直径灌注桩混凝土现场浇筑过程检测的可行性研究,传感器设计参数及其

基金项目:国家自然科学基金项目(51879094)

作者简介:王梓浩(1998—),男,硕士研究生,主要从事土木与水利工程新材料与新技术研究。E-mail:zhking@hhu.edu.cn

通信作者:田正宏(1966—),男,教授,博士,主要从事土木与水利工程新材料与新技术研究。E-mail:zh-tian@hhu.edu.cn

使用效果都无法确定。故本文利用有限元仿真软件 Comsol 研究大直径 ERT 传感器设计,并结合物理模型试验,验证传感器检测效果及其用于大直径灌注桩浇筑均匀性检测的可行性。

1 ERT 基本原理及系统组成

ERT 是一种能够评估电导率变化的技术,被测介质以导电介质为连续相。ERT 系统通常对一对电极输入激励电流,并测量每两个相邻电极之间的电势差,以此计算物体内部的电导率分布^[3,8]。ERT 系统由 3 大部件组成,即传感器、数据采集与信号处理系统、图像重建系统^[9]。本文以典型的 16 电极传感器为研究对象,电极等间隔安装在筒壁,采用相邻激励、采集方式,如图 1 所示。根据互异原理,传感器每次独立测量数据共 104 个^[10]。

2 敏感场仿真分析

2.1 基于 Comsol Multiphysics 的三维仿真模型建立

利用多物理场有限元仿真软件 Comsol Multiphysics 建立 ERT 传感器三维模型。几何建模步骤如下:①添加圆柱、工作平面、拉伸、旋转等组件绘制图形,形成联合体,建立 ERT 三维场域模型;②设置几何模型材料,料筒采用绝缘亚克力材料,外径设置为 1000 mm,厚度设置为 10 mm,防止外界物质对内部检测产生影响,以电导率为 $5.5 \mu\text{S}/\text{cm}$ 的介质作为初始导电相;③恒定电流场,添加 AC/DC 模块中的电流(es)物理场,包含静电场的高斯定理及欧姆定律,定义各终端及接地电极,添加电流激励,激励电流为 1A;④进行网格划分,选择超细化,

并对靠近电极位置的网格剖分采用拆分最长边的方法再细化 3 次,保证构建的网格质量在 0.1 以上,从而确保模拟计算精度;⑤完成模拟计算,进行后处理,在结果中添加电势特征值、灵敏度特征值、电势等值线、灵敏度分布特征图等操作。

2.2 敏感场“软场”特性

传感器电极阵列存在对称性,16 电极传感器共有 7 种不同形状的典型敏感场。图 2 为 7 种典型的灵敏度和敏感区分布,从左到右为对某相邻电极对进行激励时,按逆时针顺序对余下电极进行相邻电极对测量的灵敏度和敏感区分布图像。图 2(b) 的黑色部分为正敏感区,灵敏度为正;其余部分为负敏感区,灵敏度为负。

根据 ERT 技术的原理和特性可知,ERT 传感器的敏感场是非线性“软场”,即敏感场受被测介质分布的非线性影响,ERT 传感器特征参数也会对敏感场分布造成影响。由图 2(a)可知,即使是均匀介质,敏感场分布也不均匀,尤其在激励和测量电极附近出现峰值,变化极大,不同测量电极对的灵敏度值相差也很大。7 种敏感场分布的形状均接近马鞍状,中间低,两侧靠近激励和测量电极处高,这说明传感器中心灵敏度较低,计算误差会增大,重建图像的质量将难以保证。根据图 2(b),正敏感区主要分布在对应电极对间的带状区域内,且越靠近电极,灵敏度值越大,负敏感区的存在与实际情况相符,不可忽视。由此可见“软场”问题的复杂性,也会因此影响检测精度和重建图像质量。

2.3 传感器性能评价指标

根据上文所述 ERT 传感器敏感场“软场”特性,

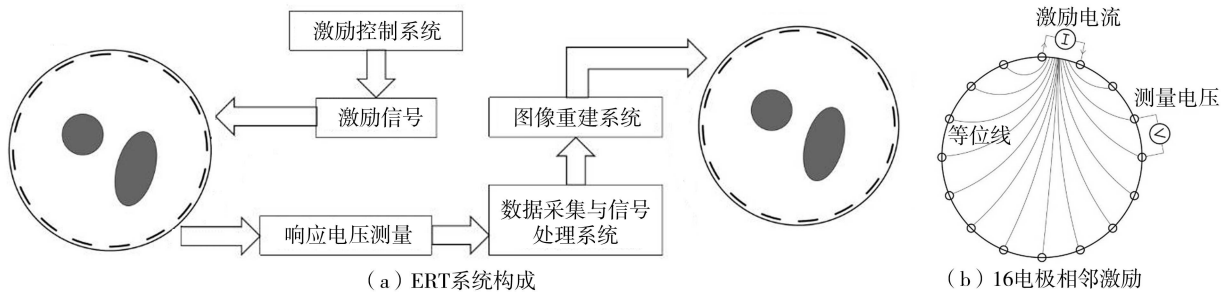


图 1 ERT 系统及原理

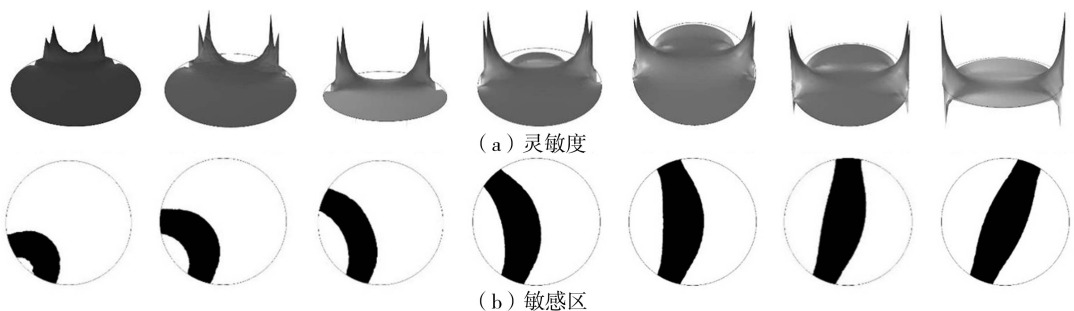


图 2 7 种灵敏度和敏感区分布

在设计用于大直径灌注桩混凝土浇筑均匀性检测的 ERT 传感器时,需进行优化设计以降低敏感场的不均匀性,使检测效果符合要求。本文总结现有研究,通过分析电极材料、传感器高度、电极宽度和电极长度对信噪比、灵敏度均匀性指标、灵敏度矩阵条件数的影响规律,对各项参数进行优选。

a. 信噪比。噪声幅值及其来源不会随边界响应电压改变,测量电压增大,信噪比会随之变高,而信噪比越大,ERT 系统成像精度越高,因此测量电压越大,对成像越有利,故可通过调整各项参数提高 ERT 系统的信噪比^[11]。

b. 灵敏度均匀性指标。敏感场差异性评价采用灵敏度均匀性指标。其值越小,传感器成像区域敏感场的均匀性越好^[12]。

c. 灵敏度矩阵条件数。矩阵条件数为矩阵最大与最小奇异值的比值,可用于表征灵敏度矩阵的病态程度^[13]。矩阵条件数越大,矩阵越接近奇异,矩阵的病态越严重。

2.4 仿真结果与分析

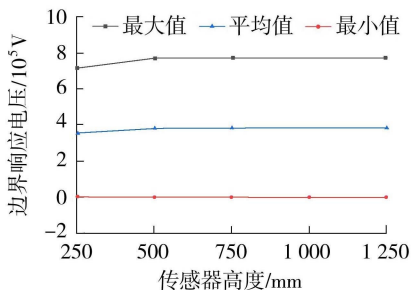
2.4.1 电极材料对敏感场的影响

ERT 系统工作时电极与被测介质接触,电极作为信号的传输介质,需要考虑其性质对检测结果的影响。基于 ERT 传感器三维仿真模型,保持其他条件不变,对目前较常见的钛、镍钴合金、高强合金钢、铝合金、铜 5 种金属材料进行仿真模拟,计算其性能指标值(表 1),对电极材料进行影响分析。

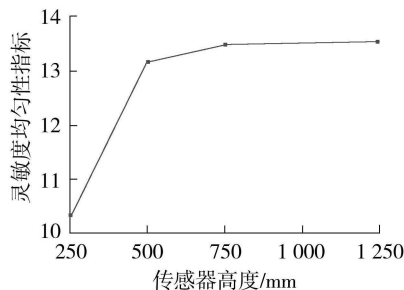
表 1 5 种金属材料对应性能指标

传感器直径/mm	边界响应电压			灵敏度均匀性指标/(A ² /m ⁴)	灵敏度矩阵条件数
	最大值/ 10 ⁵ V	最小值/ 10 ⁻¹² V	平均值/ 10 ⁵ V		
600	13.82	-8.09	6.89	117.5958	63.9778
800	10.29	-7.44	5.14	36.3608	62.9625
1000	8.19	-4.63	4.10	14.4729	70.1022
1200	6.78	-4.64	3.39	6.8999	64.7190
1400	5.81	-3.72	2.90	3.7146	59.5455

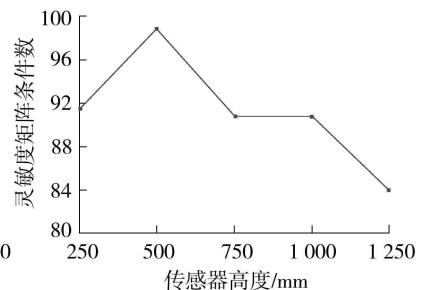
根据仿真模拟结果,对同一传感器,5 种金属对应的性能指标值完全一致,由此可知电导率对边界响应电压、灵敏度均匀性和灵敏度矩阵病态性没有



(a) 边界响应电压



(b) 灵敏度均匀性指标



(c) 灵敏度矩阵条件数

图 3 不同传感器高度的性能指标

影响,故可推断电导率对传感器本身的性能几乎没有影响。因此,选择电极材料时无需考虑材料电导率,应主要考虑设备开发的需求和对施工现场恶劣环境的适用性,材料的耐磨性、耐腐蚀性等特性,以及经济成本和加工难易程度。表 2 为 5 种金属材料特性。在实际开发运用中,需要金属材料具有易加工、价格较低的特性。考虑复杂恶劣的现场环境、混凝土对金属具有腐蚀性、在混凝土中运动时坚硬骨料对金属可能造成破坏等情况,还应选择强度高、耐磨、耐腐蚀的材料。电极材料的选择仅需考虑耐磨、耐腐蚀等特性以及成本和加工因素,5 种材料中铜的强度、耐磨性、耐腐蚀性均较好,且相对价格便宜、易加工,因此本文拟采用铜。

表 2 5 种金属材料特性

材料	密度	强度	耐腐蚀性	耐磨性	成本	加工难易程度
钛	小	高	耐腐蚀	较耐磨	高	易加工
镍钴合金	大	高	耐腐蚀	耐磨	高	不易加工
高强合金钢	较大	高	不耐腐蚀	耐磨	低	不易加工
铝合金	小	低	耐腐蚀	较耐磨	较高	易加工
铜	大	高	耐腐蚀	耐磨	较低	易加工

2.4.2 传感器高度对敏感场的影响

基于三维仿真模型,电极材料采用铜,电极宽度取 96 mm,在其他条件不变的情况下,改变传感器高度 h 的取值,以 250 mm 为增加步长,求解 250 ~ 1250 mm 的 5 种传感器高度对敏感场的影响。图 3 为不同传感器高度对应的性能指标,由图 3 可知:

a. 边界响应电压值基本不受传感器高度变化的影响,仅在传感器高度为 250 mm 时,电压最大值和平均值略小。为保证 ERT 系统能够获得更大比例的正常信号,提高成像精度,传感器可选择稍大的高度;同时考虑过大的传感器高度会导致成本上升,传感器高度亦不宜太大。

b. 灵敏度均匀性指标在传感器高度小于 750 mm 时呈逐渐减缓的上升趋势,在传感器高度达到 1000 mm 后变化幅度非常小,但总的来说灵敏度均匀性是往不利的趋势发展的。故为使灵敏度均匀性尽可能好,传感器高度应取较小值。

c. 灵敏度矩阵条件数在 80~100 区间内波动, 整体变化幅度不大。总体而言, 在传感器高度较小时, 灵敏度病态程度较高; 传感器高度较大时, 灵敏度病态程度较低。故传感器高度选取不宜过小, 应取 750~1250 mm。

同时考虑在现场应用时, 应降低设备开发成本, 尽可能减少设备对灌注桩混凝土的扰动, 传感器高度要尽可能取较小值。

2.4.3 电极宽度对敏感场的影响

基于三维仿真模型, 在其他条件不变的情况下, 改变传感器电极宽度 d 的取值, 以 20 mm 为增加步长, 仿真求解 20~160 mm 的 8 种电极宽度对敏感场的影响。图 4 和图 5 分别是不同电极宽度对应的传感器性能指标。

由图 4 可知, 当电极长度不变时, 随着电极宽度的增加, 边界响应电压的最大值和平均值逐渐降低, 最大值的变化幅度更大, 而最小值几乎不变, 这表明随着电极宽度减小, ERT 系统能够获得更大比例的正常信号, 同时边界响应电压最大值和最小值之间的差距不断变大, 这需要采集电路不断增大放大倍数, 会导致测量精度下降。故选择较小的电极宽度

有利于提高信噪比和成像精度, 但同时不宜过小。

由图 5 可知, 电极宽度和灵敏度均匀性指标为非线性关系。当电极长度 $l \geq 120$ mm 时, 随着电极宽度增加, 灵敏度均匀性指标呈现减小趋势, 且变化幅度逐渐减小; 当 $l \leq 80$ mm 时, 随着宽度增加, 灵敏度均匀性指标呈现先减后增趋势, 取得最小值时 d 为 80~120 mm。由于灵敏度均匀性指标越小, 敏感场越均匀, 故当 $l \geq 120$ mm 时电极宽度应尽可能取大值, 当 $l \leq 80$ mm 时电极宽度可取 80~120 mm。当电极宽度增加时, 灵敏度矩阵条件数逐渐递增, 往不利的方向变化, 且随着电极长度增大, 灵敏度矩阵条件数变化幅度越小。故电极宽度取较小值可降低灵敏度矩阵病态性, 提高传感器性能, 但当电极长度较大时, 电极宽度选取范围可放宽。

2.4.4 电极长度对敏感场的影响

基于三维仿真模型, 在其他条件不变的情况下, 改变传感器电极长度 l 的取值, 以 40 mm 为增加步长, 仿真求解 40~320 mm 的 8 个电极长度对敏感场的影响。图 6 和图 7 分别为不同电极长度对应的传感器性能指标。

由图 6 可知, 随着电极长度的增加, 边界响应电

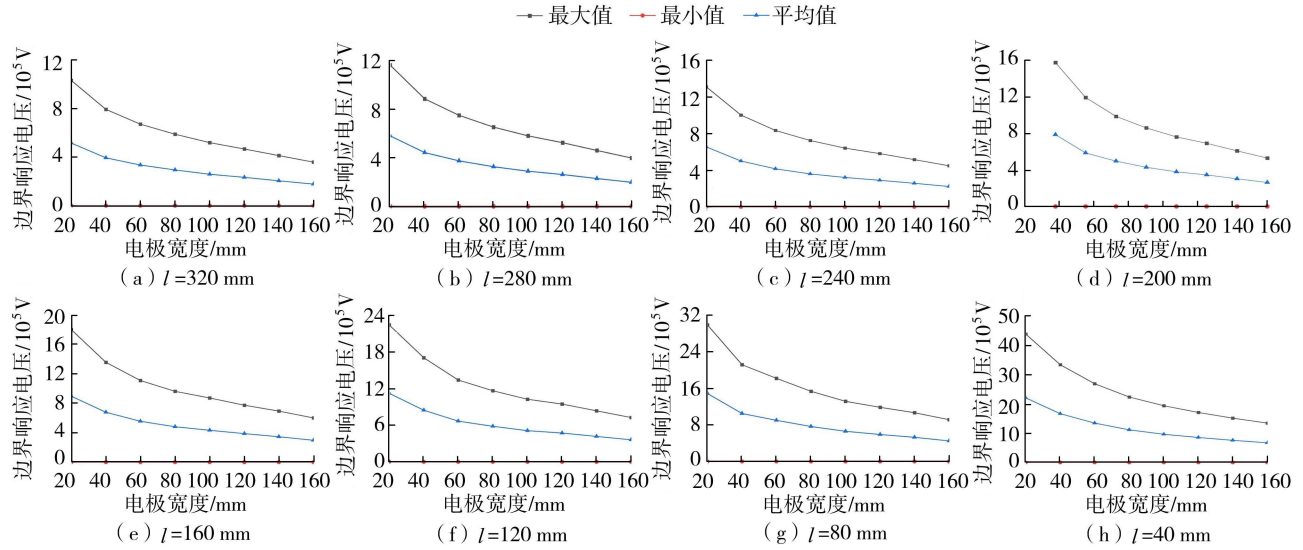


图 4 不同电极宽度的边界响应电压

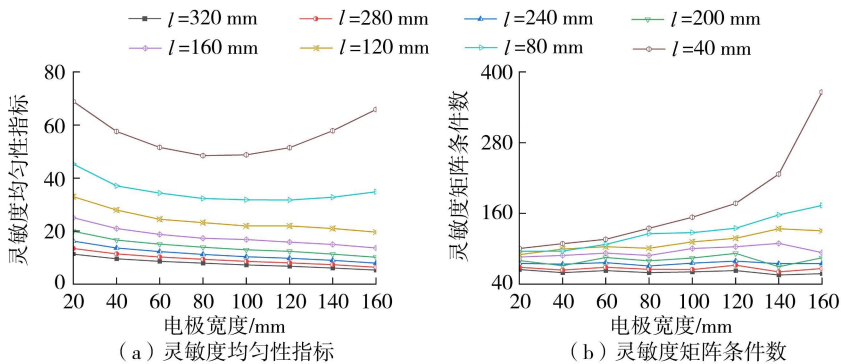


图 5 不同电极宽度的灵敏度均匀性指标和灵敏度矩阵条件数

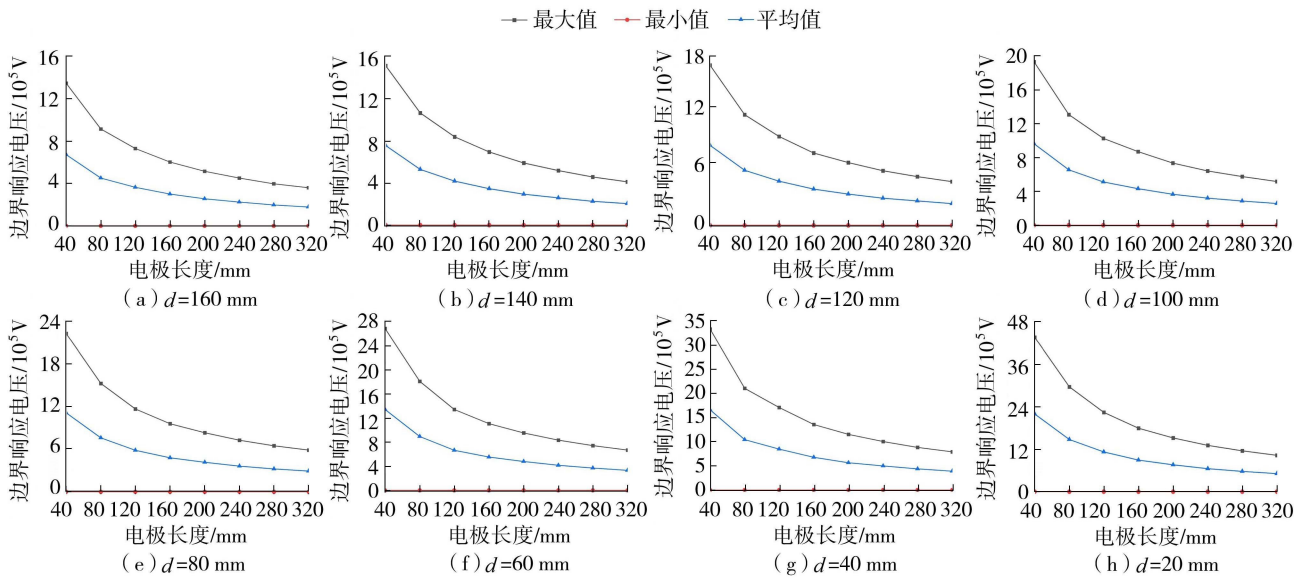


图6 不同电极长度的边界响应电压

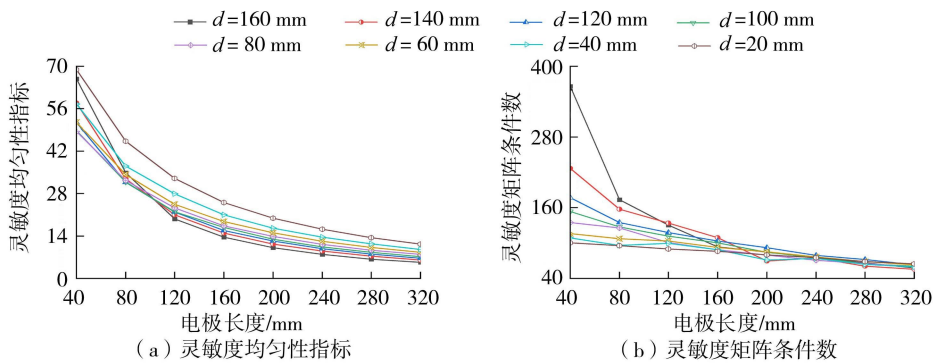


图7 不同电极长度的灵敏度均匀性指标和灵敏度矩阵条件数

压的最大值和平均值逐渐降低,且最大值变化幅度更大,最小值几乎不变,这表明电极长度的增大使ERT系统获得的正常信号比例更少,而正常信号比例越多,成像精度越高,故为提高成像精度,可选择较小的电极长度。同时边界响应电压的最大值和最小值的差距在不断减小,这表明采集电路放大倍数不需要太大,有利于重建图像,故电极长度可稍大一些。

由图7可知,电极长度和灵敏度均匀性是非线性关系,随着电极长度增加,灵敏度均匀性指标呈现逐渐减小的趋势,且变化幅度逐渐减小,往好的方向发展。故为得到较均匀的敏感场,应取较大的电极长度。随着电极长度的增加,灵敏度矩阵条件数整体呈现下降趋势,灵敏度矩阵病态程度降低,故电极长度应取较大值以降低灵敏度矩阵病态程度。但随着电极宽度减小,灵敏度矩阵条件数变化幅度也在减小,同时考虑到成本问题,当电极宽度较小时,电极长度可取稍小值。

2.4.5 传感器参数选择与设计原则

综合以上分析,结合设备开发和现场应用的考量,最终确定直径1000mm的传感器高度取

800mm,选择铜材料;鉴于筒内径周长的1/32和1/16即96mm和192mm均在电极宽度和长度适宜的取值范围内,为方便确定电极尺寸,以96mm和192mm作为电极宽度和长度。

基于1000mm直径ERT传感器优化设计方案,并结合后续进行的600、800、1200、1400mm直径的ERT传感器数值模拟计算,最终确定了以下几点大直径ERT传感器设计原则:①电极材料电导率对传感器性能基本没有影响,可根据具体需求进行选取;②传感器高度对传感器性能的影响相对较小,在设计时,通常取直径的0.8~1.0倍较适宜,同时考虑成本因素,可取直径的0.8倍;③电极宽度对传感器性能的影响较复杂,达到最优性能时,宽度的取值范围包括传感器筒内径周长的1/32,为方便选取,在设计时可就近取整;④电极长度对传感器性能的影响也是非线性的,三项主要性能指标均随电极长度的增大而减小,达到最优性能时,长度的取值范围包括传感器筒内径周长的1/16,为方便选取,在设计时可就近取整。

表3 重建图像误差

介质分布情况	空间图像误差	相对误差	相关系数
①	1.1006	0.9999	0.7191
②	1.0828	1.0000	0.6167
③	1.0973	1.0000	0.6795

3 传感器参数优化效果

为确定 ERT 传感器优化设计的效果,以 1000 mm 直径传感器为例,采用物理模型试验方法对其用于灌注桩混凝土均匀性检测的效果进行验证。

3.1 ERT 系统逆问题求解

本文对 ERT 系统逆问题的求解方法采用线性反投影算法,采集的 104 个边界响应电压数据以纯水为基点进行归一化处理。第 j 个边界响应电压数据的归一化响应值为

$$R_{ij} = -\lg(U_j/U_{ij}) \quad (1)$$

式中: U 为检测介质电压; U_{ij} 为纯水电压。

3.2 重建图像评价指标

ERT 系统的重建图像是用以表现传感器内部介质电导率分布的,重建图像的质量可以反映传感器检测精度,对传感器优化设计效果进行评价。参考现有研究,确定 3 个重建图像质量评价指标:空间图像误差、相对误差和相关系数^[12]。空间图像误差表示重建物体在形状、空间位置上的误差,其值越小,重建效果越好。相对误差表示重建图像绝对误差与实际图像之比。相对误差越小,重建效果越好。相关系数数值越接近 1,重建效果越好。

3.3 物理试验

用于物理试验验证 ERT 系统检测效果的传感器物理模型为直径 1000 mm、厚 10 mm、高 800 mm 的亚克力筒,电极为铜电极,宽 96 mm,长 192 mm。

为验证优化设计的传感器检测效果,设计两组物理试验。第一组试验设置被测介质为:①均匀水介质;②水中存在 80 mm×80 mm×600 mm 的木板;③水中存在直径 200 mm、高 400 mm 的亚克力筒。试验情况和试验结果如图 8、图 9、表 3 所示。

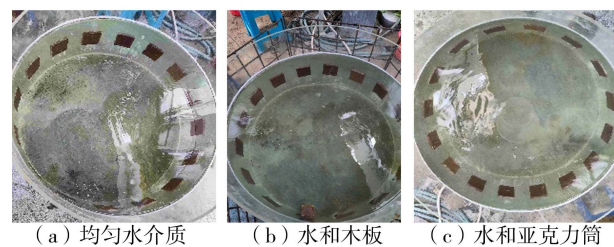


图8 被测介质设置

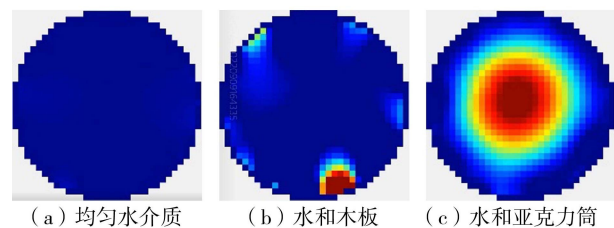


图9 不同介质条件下的重建图像

由表 3 可知,与现有研究相比,重建图像的空间图像误差、相对误差和相关系数良好,这表明该 ERT 系统重建图像质量较高,ERT 系统的检测精度达到了应用要求,传感器性能能够满足检测需求。

为了验证 ERT 系统在混凝土灌注桩检测中的识别效果,第二组试验设置 3 种不同断面入侵程度(30%、20%、10%),进行黏土泥浆在混凝土基体中不同断面入侵程度的识别试验。使用的混凝土中水、水泥、砂、石的配合比为 2:4.6:6.67:10.2,减水剂掺量为 0.8%,坍落度为 140 mm。试验情况如图 10、图 11 所示,分析 ERT 系统对混凝土浇筑过程中介质侵入程度识别及成像的质量,结果见表 4。

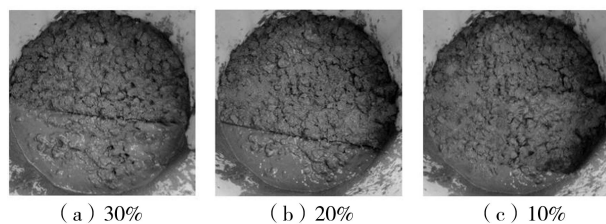


图10 泥浆在混凝土基体中的不同断面入侵程度设置

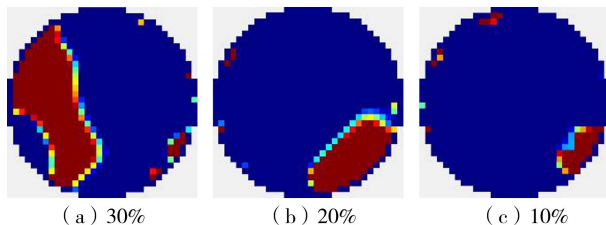


图11 泥浆在混凝土基体中的不同断面入侵程度的重建图像

表4 泥浆侵入混凝土 ERT 检测重建图像误差

断面入侵程度/%	空间图像误差	相对误差	相关系数
30	5.2473	1.6607	0.6520
20	5.5999	1.6054	0.6037
10	5.7519	1.2734	0.5922

由图 10、图 11 和表 4 可知:由于泥浆和混凝土均具有流动性,且密度、质量不同,互相挤压移动导致二者界限模糊,存在过渡区,同时也改变了介质分布情况,与初始的介质占比分布之间存在差异,最终导致重建图像与理论上的实际电阻率分布不完全一致,重建图像的空间图像误差变大,相对误差和相关系数相对第一组试验略差,但结合第一组试验结果,忽略泥浆和混凝土流动导致介质分布变化的影响仍可看出 ERT 传感器进行混凝土检测的精度是良好的,初步判断采用优化设计的 ERT 传感器能够用于

灌注桩混凝土质量检测;同时也可看出随着泥浆占比下降,重建图像评价指标变差,结合表3数据综合分析,可知当不同介质间的区分度不明显,存在过渡区域时,侵入介质占比越少,ERT系统的检测效果越差,故需进一步提升ERT系统检测精度。

基于上述试验结果综合分析可得:优化设计的传感器检测的重建图像空间图像误差、相对误差和相关系数良好,重建图像质量较高,ERT系统检测精度可以得到保证,能够满足大直径灌注桩浇筑均匀性检测的需求。

4 结 语

传感器高度对性能的影响非常有限,电极材料电导率对传感器性能没有影响,电极长度、宽度与性能指标间具有复杂的非线性关系。结合设备开发和实际工程应用的需求,确定用于大直径灌注桩检测的ERT传感器优化设计原则:传感器高度取直径的80%,电极材料可根据具体需求选取,电极长度和宽度分别取筒内径周长的1/32和1/16,为设计方便可就近取整。优化设计的传感器能够用于大直径灌注桩混凝土浇筑均匀性检测。

ERT系统检测精度仍可进一步提高。由于施工现场条件恶劣,ERT系统设备还需要考虑防水、数据传输等方面的问题,实际应用时需要改进并进行现场试验验证。

参考文献:

[1] 董峰,崔晓会.电阻层析成像技术的发展[J].仪器仪表学报,2003(增刊2):703-705.(DONG Feng, CUI Xiaohui. The development of electrical resistance tomography[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2003(Sup2):703-705.(in Chinese))

[2] 张海发,马士谦,梁越,等.基于电阻率层析扫描的水下抛石体内部空洞探测[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):123-128.(ZHANG Haifa, MA Shiqian, LIANG Yue, et al. Internal cavity detection of underwater riprap based on resistivity tomography[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(4):123-128.(in Chinese))

[3] KAWAAI K, UJIKE I. Electrical resistance tomography for assessing water movement in cracked cementitious

mixtures[J]. MATEC Web of Conferences, 2018, 199: 11016.

[4] HALLAJI M. Monitoring damage and unsaturated moisture flow in concrete with electrical resistance tomography (ERT) [D]. Raleigh: North Carolina State University, 2015.

[5] SURYANTO B, SARAIREH D, KIM J, et al. Imaging water ingress into concrete using electrical resistance tomography [J]. International Journal of Advances in Engineering Sciences and Applied Mathematics, 2017, 9(2): 109-118.

[6] 孙世栋. 基于 ERT 的混凝土探测成像监测技术研究 [D]. 济南: 济南大学, 2020.

[7] 赵锦平, 田正宏, 孙啸, 等. 基于 ERT 的地下含水区域混凝土浇筑均质性质评价方法 [J]. 水电能源科学, 2022, 40(10): 161-164. (ZHAO Jinping, TIAN Zhenghong, SUN Xiao, et al. Homogeneity evaluation method of concrete pouring in underground water-bearing area based on ERT [J]. Water Resources and Power, 2022, 40(10): 161-164. (in Chinese))

[8] 曹海燕, 王化祥. 电阻层析成像系统全电极模型仿真研究 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 117-119. (CAO Haiyan, WANG Huaxiang. Simulation study of complete electrical model for electrical resistance tomography [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 117-119. (in Chinese))

[9] 张海丹, 席艳, 于晶, 等. 基于 COMSOL 的 ERT 阵列电极优化设计 [C] // Proceedings of 2012 2nd International Conference on Future Computers in Education (ICFCE 2012 V24). Shanghai: Information Engineering Research Institute, 2012: 6.

[10] 陈德运, 吴瑞芬. 电阻层析成像系统敏感场特性分析及仿真 [J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(9): 53-55. (CHEN Deyun, WU Ruifen. Analysis and simulation of sensitivity field characteristics for electrical resistance tomography system [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 43(9): 53-55. (in Chinese))

[11] 姜勇. 基于电阻率层析成像的水泥基材料的渗透监测 [D]. 济南: 济南大学, 2020.

[12] 张馨. ERT 传感器优化及图像重建 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.

[13] 问雪宁. 基于 ANSYS 的 ECT/ERT 电磁场仿真及阵列电极优化设计 [D]. 天津: 天津大学, 2007.

(收稿日期: 2024-04-08 编辑: 俞云利)