

# 基于 TDR 的多孔介质中含水/水合物饱和度 测量方法仿真研究

王亚军<sup>1</sup>, 贺世超<sup>1</sup>, 邢兰昌<sup>1</sup>, 魏伟<sup>2</sup>, 韩维峰<sup>2</sup>, 齐淑英<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)控制科学与工程学院, 山东 青岛 266580;

(2. 中国石油勘探开发研究院 新能源研究所, 河北 廊坊 065007)

**摘要:** 为了优化设计时域反射技术(TDR)中的探针结构, 建立基于 TDR 响应的含水/水合物测量模型, 利用有限元数值模拟方法建立了 TDR 测量过程数值仿真模型; 分别以空气、不同浓度氯化钠溶液以及不同水合物含量的石英砂为被测介质验证了模型的正确性、研究了被测介质电导率和介电常数对反射波形的影响规律; 通过改变被测介质的介电常数来模拟含水/水合物饱和度不同的石英砂, 随着石英砂中水合物含量的增加, 含水量逐渐降低, 表观介电常数随之减小, 电磁波传播速度随之以非线性形式增加; 与理论值相比较, 仿真计算所得到的传播速度最大误差处于 5% 以内; 下一步需要在数值模型中的被测区域中填充各向异性材料来更加真实地模拟含水合物沉积物被测介质。

**关键词:** 数值仿真; 时域反射技术(TDR); 含水/水合物饱和度; 多孔介质; 介电常数; 电导率

## Simulation Study on Measurement Method of Water / Hydrate Saturation in Porous Media Based on TDR

Wang Yajun<sup>1</sup>, He Shichao<sup>1</sup>, Xing Lanchang<sup>1</sup>, Wei Wei<sup>2</sup>, Han Weifeng<sup>2</sup>, Qi Shuying<sup>1</sup>

(1. College of Control Science and Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Department of Alternative Energy, PetroChina Research Institute of Petroleum Exploration & Development, Langfang 065007, China)

**Abstract:** To optimize the probe structure in time domain reflectometry (TDR) and establish a water / hydrate saturation measurement model based on TDR response, a numerical simulation model of TDR measurement process was established by using the finite element numerical simulation method. The numerical model was verified by using air as the measured medium first. Then the sodium chloride solution of different concentration and quartz sand with different hydrate saturation were used as the measured media, and the influence of the conductivity and dielectric constant of the measured medium on the reflection waveform was studied. The quartz sand with different water / hydrate saturation was simulated by changing the dielectric constant of the measured medium. It has been shown by the numerical data that the apparent dielectric constant decreases with the increase of hydrate saturation in quartz sand, thus propagation speed of electromagnetic wave increases in a nonlinear form, and the maximum error of the propagation speed obtained is within 5% compared with the theoretical values. Filling the tested area with anisotropic materials in the numerical model to simulate the hydrate-bearing sediment more realistically will be the future work.

**Keywords:** numerical simulation; time domain reflectometry (TDR); water / hydrate saturation; porous media; dielectric constant; conductivity

## 0 引言

天然气水合物是由天然气与水在高压低温条件下形成的类冰状的结晶物质, 自然界中的水合物主要分布于深海沉积物或陆地永久冻土中<sup>[1]</sup>, 原位测量十分困难, 因此通过室内模拟实验模拟储层中天然气水合物的生成/分解过程探究其物性响应规律, 是准确评价实际储层水合物资源量的重要手段。含水合物沉积物样品中含水/水合物饱和度的实时在线监测是水合物模拟实验中的重要环节。目前模拟实验中测量含水/水合物饱和度的方法主要有直接测试估算法<sup>[2]</sup>、压差法<sup>[3]</sup>、时域反射法 (Time Domain Reflectometry, TDR)<sup>[4]</sup>等。

直接测试估算法通过测量样品中水合物分解释放的气

收稿日期: 2020-01-16; 修回日期: 2020-02-19。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51306212); 中国石油科技创新基金项目(2018D-5007-0214); 山东省自然科学基金项目(ZR2019MEE095); 中石油重大科技项目(ZD2019-184-001); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(20CX05005A)。

**作者简介:** 王亚军(1996-), 男, 山东滕州人, 硕士研究生, 主要从事检测技术与自动化装置方向的研究。

**通讯作者:** 邢兰昌(1983-), 男, 山东德州人, 博士, 副教授, 硕士研究生导师, 主要从事检测技术与自动装置、计算机测控系统、天然气水合物与多相流相关检测理论与方法、多物理场耦合数值模拟方法等方向的研究。

体体积来计算水合物的量进而求得含水合物饱和度,但实验中释放出的气体有可能来自未完全反应所剩余的游离气,从而导致测量结果偏大;压差法根据反应前后容器内气体压力的变化计算甲烷气体消耗量及含水合物饱和度,但此方法需将气体看作理想气体,测量结果同样存在偏差。通过上述两类方法得到的含水合物饱和度是对反应体系的整体描述,并不能对反应体系的局部进行测量。TDR 技术通过测量样品的表观介电常数来监测含水合物饱和度的变化,介电常数几乎不受样品孔隙水盐离子浓度及温度、压力的影响<sup>[5]</sup>,而且通过设计 TDR 探针的结构能够测量样品局部的含水合物饱和度值,因此在含水合物饱和度测量方面具有独特的优势。

TDR 技术最初用于查找通讯电缆的受损点, Topp 等<sup>[6]</sup>提出将 TDR 用于土壤含水量的监测,得到了估算土壤中含水量的经验关系式; Wright 等<sup>[7]</sup>将 TDR 应用于室内水合物模拟实验中,建立了含水合物沉积物的介电常数与含水量之间的关系式。针对电磁波衰减严重的高电导率测试环境,胡高伟等<sup>[8]</sup>应用聚烯烃材质热收缩套管对 TDR 探针进行了改进,并建立了不同盐度下沉积物介电常数与含水量的经验关系式; Chen 等<sup>[9]</sup>基于时域分析提出了表面反射系数法,但未将其应用于沉积物的测量。近年来陈仁朋等<sup>[10]</sup>基于频率步进原理开发了新型的 TDR 系统并应用于测量土体含水率。

含水合物/水沉积物的各向异性、变化的孔隙水盐度、黏土等储层因素影响沉积物的介电常数和电导率,从而对 TDR 响应特性产生复杂的影响,并且对 TDR 探针的结构参数提出了特殊的要求。为了将来优化设计 TDR 探针结构,建立可靠的含水/水合物测量模型,本文利用有限元数值模拟方法建立了 TDR 测量过程数值仿真模型,基于该模型分析了电磁波穿过具有不同电导率、介电常数被测介质时的波形变化特性,讨论了不同被测介质参数对反射波形的影响规律。

## 1 TDR 工作原理及仿真模型建立

### 1.1 TDR 工作原理

TDR 探测仪主要包括发射机、接收机、发射接收系统、电缆、TDR 探头、信号处理器和显示器,各部分之间的连接关系如图 1 所示。图 2 为三针式 TDR 探头及仿真模型结构。TDR 探测仪采用形成时间法,其工作过程为<sup>[11-12]</sup>: TDR 发射机发射一个电压脉冲,其以电磁波的形式经同轴电缆传输至 TDR 探针起始端;电磁波从起始端进入探针和被测介质,传播到探针末端后发生反射,经探针和被测介质后返回到探针起始端;反射波被接收机所接收,经信号处理器处理后由显示器进行波形显示。

参照图 2,电磁波从探针起始端传播到末端并返回到起始端的总时间为  $\Delta t$ ,由  $\Delta t$  和探针长度  $L$  可计算出被测介质的相对介电常数  $\epsilon_r$ <sup>[13]</sup>:

$$\epsilon_r = (C\Delta t/2L)^2 \quad (1)$$

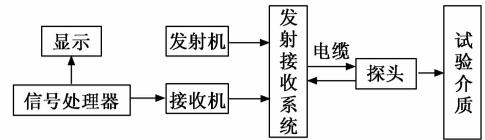


图 1 TDR 探测仪基本组成

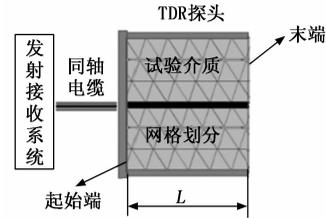


图 2 三针式 TDR 探头及仿真模型结构

式中,  $C$  为真空中电磁波的传播速度。

对于含有水和水合物的沉积物,其体积含水量可以由 Wright 等提出的经验关系式来计算:

$$\theta_v = -11.9677 + 4.50607256\epsilon_r - 0.14615\epsilon_r^2 + 0.0021399\epsilon_r^3 \quad (2)$$

式中,  $\theta_v$  为沉积物的体积含水量。通过测量得到样品的初始孔隙度  $\Phi$ ,进而可得出含水合物饱和度  $S_h$  为:

$$S_h = (\Phi - \theta_v)/\Phi \times 100\% \quad (3)$$

### 1.2 数值仿真模型的建立

#### 1.2.1 几何结构与网格

根据电磁波在波导中的传播规律, TDR 探头的中间探针可模拟为同轴电缆的内导体,外部探针模拟为同轴电缆的外导体,探针间的试验介质则充当同轴电缆的填充介质<sup>[14]</sup>。本研究选取探针起始端与末端之间的部分进行建模,考虑到所研究部分的几何结构具有轴对称特性,因此建立二维模型。参照图 2,探针长度  $L$  为 15 cm、探针直径为 2 mm,相邻探针间距为 2 cm。

模型网格划分越精细,计算结果的准确度越高,但是所需的计算时间越长。为保证模拟结果的准确性并考虑计算速度和计算量,该模型采用最大单元尺寸为  $5 \times 10^{-5}$  m 的三角形网格。

#### 1.2.2 模型参数设置

1) 发射信号:选取调制高斯脉冲信号为 TDR 发射机输出的发射信号,其时域表达式为式 (4),脉冲频率  $f$  为 100 MHz,脉冲幅值为 1 V,脉冲宽度为 40 ns。

$$V_0 = S(t) \sin(2\pi ft) \quad (4)$$

式中,  $V_0$  为输入 TDR 探针的信号,  $S(t)$  为调制前的高斯脉冲,  $f$  为正弦波频率。

2) 材料特性参数:根据被测介质的不同性质设计了 3 组仿真实验,即空气、浓度不同的氯化钠溶液和水合物含量不同的石英砂。通过设定材料的特性参数来模拟上述 3 种被测介质,主要材料参数包括:相对介电常数、电导率和相对磁导率,其中相对磁导率值均设为 1。

模拟空气时, 相对介电常数为 1、电导率为 0 mS/m; 模拟浓度不同的氯化钠溶液时, 相对介电常数为 81, 电导率变化范围为 0~500 mS/m; 模拟水合物含量不同的石英砂时, 相对介电常数的范围为 12~18 (参照式 (2))、电导率为 0 mS/m。

3) 边界条件和求解模型: 在 TDR 探针的末端, 即被测介质底部 (参见图 2) 设置 3 种不同的边界条件来模拟负载情况, 即: 理想导体 (PEC)、完美磁性导体 (PMC) 和集总端口 (波激励为关闭状态), 分别用来模拟电磁波传播过程中的短路、开路和阻抗完全匹配的情况。

根据同轴线的传输理论, 定义电磁波沿探针传播方向为  $z$ , 电磁波在其中以 TEM 波的形式传播, 则仿真中求解电场参数的解析式如下<sup>[15]</sup>:

$$V = V^+ e^{-\gamma z} + V^- e^{\gamma z} \quad (5)$$

其中:  $V$  为内外电极之间的电压;  $z$  代表传输线中的位置;  $V^+$ 、 $V^-$  是一般解的未知常数, 可通过边界条件确定;  $\gamma$  为传输线的传播常数。

在数值仿真模型求解过程中, 实时获取了 TDR 探针起始端的信号波形数据, 通过分析入射脉冲信号与反射信号的波形特征来讨论被测介质特性参数与反射波之间的关系。

## 2 模型应用与结果分析

### 2.1 仿真模型的检验

首先模拟被测介质为空气 (介电常数为 1, 电导率为 0) 的情况, 通过分析模型求解结果来验证仿真模型的正确性。图 3 所示为分别对 TDR 探针末端边界设置为短路、开路和阻抗完全匹配等 3 种情况时在探针起始端采集到的信号波形。

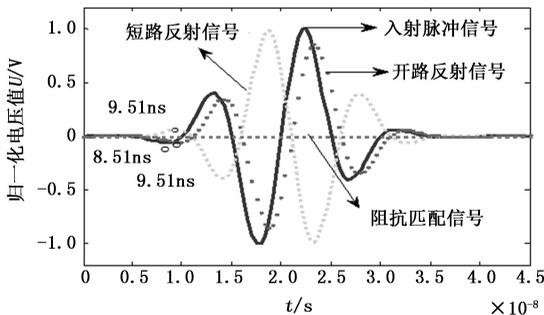


图 3 被测介质为空气时所获取信号的波形

分析图 3 可见: 当负载阻抗为 0 (短路) 时, 反射信号幅值等于入射脉冲信号幅值, 两者极性相反; 当负载阻抗为  $\infty$  时 (开路), 反射信号幅值等于入射脉冲幅值, 两者极性相同; 负载阻抗匹配时, 无反射信号产生。

选取图 3 所示入射脉冲信号的第一个波谷点作为信号起始位置, 反射信号的第一个波峰 (谷) 点作为反射起始点。负载为开路时, 两点之间的时间差为约 1.03 ns, 已知 TDR 探针长度为 15 cm, 计算得到电磁波传播速度为  $2.91 \times 10^8$  m/s; 负载为短路时, 两点之间的时间差约为 1.001 ns, 传播速度为  $2.99 \times 10^8$  m/s。电磁波在真空中传

播速度为  $2.9979 \times 10^8$  m/s, 仿真结果的误差处于 3% 以内。

上述结果表明仿真计算与理论分析一致, 从而验证了所建立仿真模型的正确性。

### 2.2 以不同浓度氯化钠溶液为被测介质

通过调节电导率值来模拟氯化钠溶液浓度的变化, 电导率的变化范围是 0~500 mS/m, 图 4 所示为电导率分别为 0 mS/m、100 mS/m 和 350 mS/m 时的信号波形。由图可见, 电导率为 0 mS/m 时, 介质对电磁波信号无抑制作用, 反射信号幅值等于入射信号幅值。当电导率不为 0 时, 反射信号的幅值出现衰减, 电导率越大衰减越严重。当  $\sigma = 350$  mS/m 时, 反射信号幅值衰减为原来的 1%。

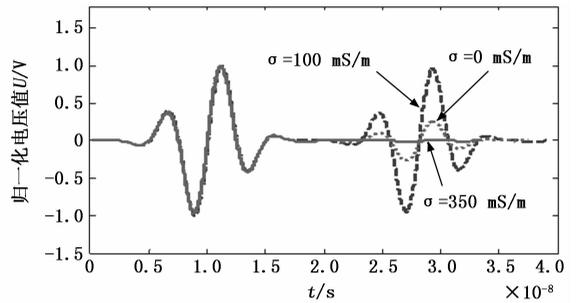


图 4 不同浓度的氯化钠溶液为被测介质时的波形

电磁波在均匀有耗导电媒质中传播, 当频率  $f$  满足式 (6) 时, 媒质中位移电流占主导地位, 传导电流影响很小, 可以忽略不计<sup>[17]</sup>。此时, 反射信号衰减系数与介质介电常数、电导率之间的关系可表示为式 (7)。由式 (7) 可知, 当被测介质为不同浓度的氯化钠溶液时, 假定介电常数不变, 则衰减系数只与电导率有关<sup>[18]</sup>。

$$f \geq \frac{\sigma}{2\pi\epsilon} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{60\pi\sigma}{\sqrt{K\epsilon}} \quad (7)$$

沿着插入介质中的 TDR 探针传播的电磁波信号, 其电压幅值按照式 (8) 所表示的规律衰减。

$$\frac{V_R}{V_T} = e^{-2\alpha L} \quad (8)$$

式中,  $V_R$  是探头末端反射信号的电压幅值;  $V_T$  是入射脉冲信号的电压幅值;  $\alpha$  为衰减系数;  $L$  为探针长度的 2 倍 (数值模型中信号获取点为探针起始点)。

用  $1 - V_R/V_T$  来表示电磁波沿探针传播过程中的衰减幅度。依据仿真结果与式 (7) 和式 (8), 得到反射信号衰减幅度随电导率变化的曲线, 如图 5 所示。当电导率小于 290 mS/m 时, 反射信号幅值随电导率的增加而衰减的较快, 当电导率为 290 mS/m 时衰减幅度达到 90%; 当电导率大于 290 mS/m 时, 反射信号幅值衰减变缓, 当电导率为 500 mS/m, 电磁波信号能量衰减到 0。由图可知, 反射信号衰减幅度的仿真曲线与理论曲线几乎重合, 二者所反映的规律一致, 验证了仿真模型的准确性。

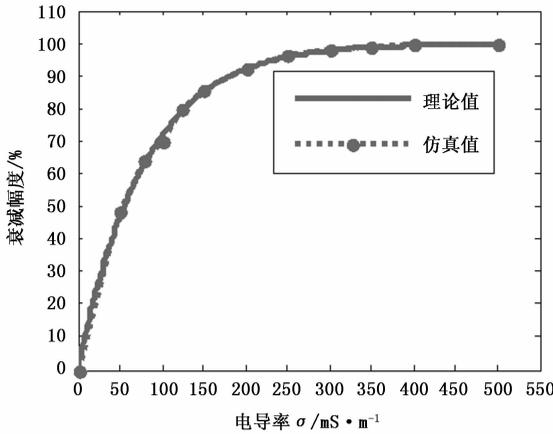


图 5 反射信号衰减幅度随电导率变化的曲线

### 2.3 以不同水合物含量的石英砂为被测介质

当被测介质为水合物含量不同的石英砂时，保持电导率和相对磁导率不变 ( $\sigma=0, \mu=1$ )，依据现有模拟实验数据中样品的饱和度变化范围，分别取含水合物饱和度在 0%~40% 变化范围内相应的相对介电常数值进行研究<sup>[18]</sup>。假定样品孔隙度为 40%，此时体积含水量为 40%~24%，由式 (2) 计算得到表观介电常数的变化范围为 23~12。

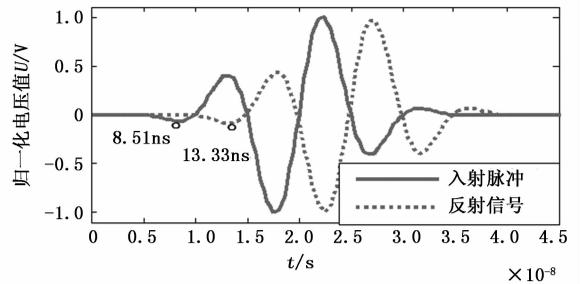
图 6 所示分别为含水合物饱和度等于 0% 和 40% 时电磁波的入射信号和反射信号的仿真结果图。当含水合物饱和度等于 0% 和 40% 时，信号的传播总时间分别为  $\Delta t_1 = 13.33 - 8.51\text{ns}$  和  $\Delta t_2 = 12.06 - 8.51\text{ns}$ ，结合式 (1) 计算得到表观介电常数分别为 23.13 和 12.58。利用介电常数与电磁波传播速度之间的关系，即： $V = C / \sqrt{\epsilon_r}$ ，可以计算出电磁波在水合物含量不同的石英砂中的传播速度。采用仿真所得到的介电常数和由式 (2) 计算所得到的介电常数对电磁波传播速度进行计算，分别作为速度的仿真值和理论值进行比较 (如图 7 所示)。由图可见，随着石英砂中水合物含量的增加，含水量逐渐降低，表观介电常数随之减小，电磁波传播速度随之以非线性形式增加；与理论值相比较，仿真计算所得到的传播速度最大误差处于 5% 以内。

### 3 讨论

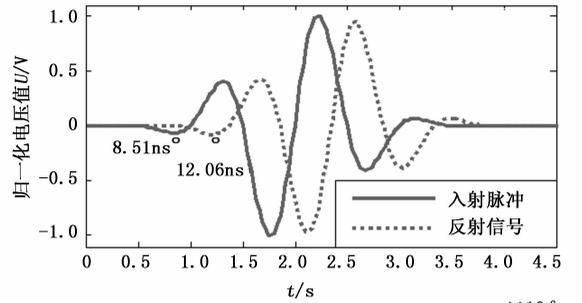
在目前所进行的仿真工作中，设定材料参数为固定值，即被测介质的材料具有理想的均一性。而在含水合物沉积物模拟实验的实际应用中，水合物在多孔介质中的分布并不均匀，这将会对 TDR 测量波形造成干扰，如产生反射杂波、测量误差增大等。因此，在下一步仿真工作中，可将被测区域填充各向异性材料，这对于研究 TDR 在实际环境下的测量特性具有重要指导意义。

### 4 结束语

利用有限元数值模拟方法建立了 TDR 测量过程数值仿真模型，分别以空气、不同浓度氯化钠溶液以及不同水合物含量的石英砂为被测介质验证了模型的正确性、研究了被测介质电导率和介电常数对反射波形的影响规律。



(a) 含水合物饱和度为 0%



(b) 含水合物饱和度为 40%

图 6 不同水合物含量石英砂的相对介电常数对电磁波传播速度的影响

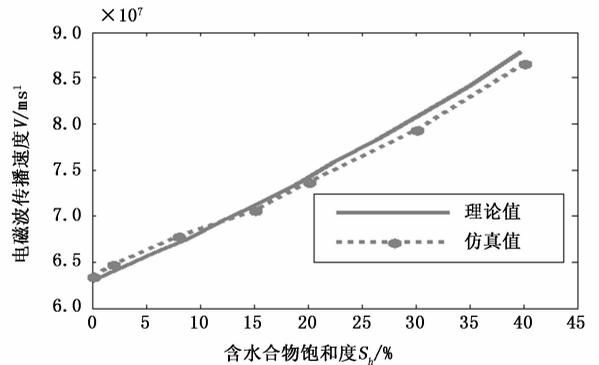


图 7 电磁波传播速度随含水合物饱和度变化的曲线

通过改变被测介质的介电常数来模拟含水/水合物饱和度不同的石英砂，随着石英砂中水合物含量的增加，含水量逐渐降低，表观介电常数随之减小，电磁波传播速度随之以非线性形式增加；与理论值相比较，仿真计算所得到的传播速度最大误差处于 5% 以内。

建立 TDR 测量过程数值仿真模型为优化设计 TDR 探针结构，建立基于 TDR 响应的含水/水合物测量模型提供了研究工具。下一步需要在被测区域中填充各向异性材料，更加真实地模拟含水合物沉积物被测介质。

### 参考文献:

[1] Makogon Y F. Natural gas hydrates - a promising source of energy [J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 2010, 2 (1): 49 - 59.

- [2] 郭星旺, 祝有海. 永久冻土区天然气水合物饱和度评价技术 [J]. 海洋地质前沿, 2011, 27 (5): 59-66.
- [3] 孙中明. 沉积物中水合物饱和度及其相应力学特性的实验研究 [D]. 青岛: 中国石油大学 (华东), 2013.
- [4] Topp G C, Davis J L, Annan A P. Electromagnetic determination of soil-water content: Measurement in coaxial transmission line [J]. Water Resource, 1980, 16 (3): 574-582.
- [5] 业渝光, 张 剑, 胡高伟, 等. 天然气水合物超声和时域反射联合探测技术 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2008 (5): 101-107.
- [6] Topp G C, Davis J L. Measurement of soil water content using TDR: a field Evaluation [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1985, 49: 19-24.
- [7] Wright J F, Nixon F M, Dallimore S R, et al. A method for direct measurement of gas hydrate amounts based on the bulk dielectric properties of laboratory test media [A]. Fourth International Conference on Gas Hydrate [C]. Yokohama, 2002: 745-749.
- [8] 胡高伟, 业渝光, 刁少波, 等. 时域反射技术测量海洋沉积物含水量的研究 [J]. 现代地质, 2010, 24 (3): 622-626.
- [9] Chen R, Drnevich V P, Yu X, et al. Time domain reflectometry surface reflections for dielectric constant in highly conductive soils [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133 (12): 1597-1608.
- [10] 陈仁朋, 陈 卓, 陆 明, 等. 基于频率步进原理的 TDR 研制及在土体含水率测试中的应用 [J]. 岩土工程学报, 2019, 41 (7): 1191-1199.
- [11] 刁少波, 业渝光, 张 剑, 等. 时域反射技术在地学研究中的应用 [J]. 岩矿测试, 2005 (3): 205-211, 216.
- [12] 岳英洁, 业渝光, 刁少波, 等. 时域反射技术应用与研究新进展 [J]. 海洋湖沼通报, 2007 (s1): 170-175.
- [13] Fellner-Feldegg H. Measurement of dielectrics in the time domain [J]. The Journal of Physical Chemistry, 1969, 73 (3): 616-623.
- [14] 梁志刚, 陈云敏, 陈仁朋. 同轴电缆电磁波反射技术测试土体含水量的反射波形模拟 [J]. 中国农村水利水电, 2004 (12): 82-84.
- [15] 陈 伟. TDR 探头设计及含水量和干密度的联合监测技术 [D]. 杭州: 浙江大学, 2011.
- [16] 陈清礼, 肖 希, 蒋晓斌, 等. 电磁波衰减系数特性分析 [J]. 石油天然气学报, 2014, 36 (8): 43-45.
- [17] Dalton F N, Herkelrath W N, Rawlins D S, et al. Time-domain reflectometry: Simultaneous measurement of soil water content and electrical conductivity with a single probe [J]. Science, 1984, 224 (4652): 989-990.
- [18] 邢兰昌, 祁 雨, 朱 泰, 等. 含甲烷水合物沉积物电一声响应特性联合探测: 装置开发与实验研究 [J]. 新能源进展, 2018, 6 (2): 119-129.
- [14] Kang D, Cha Y J. Autonomous UAVs for structural health monitoring using deep learning and an ultrasonic beacon system with geo-tagging [J]. Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, 2018, 33: 855-902.
- [15] Dung C V, Anh L D. Autonomous concrete crack detection using deep fully convolutional neural network [J]. Automation in Construction, 2019, 99: 52-58.
- [16] Huang G, Liu Z, Laurens V D M, et al. Densely connected convolutional networks [A]. CVPR [C]. 2017. 243, 4700-4708.
- [17] Liu Y H, Yao J, Lu X H, et al. Deep crack: a deep hierarchical feature learning architecture for crack segmentation [J]. Neurocomputing, 2019, 338: 139-153.
- [18] Laefer D F, Truong H L, Carr H, et al. Crack detection limits in unit based masonry with terrestrial laser scanning [J]. NDT & E International, 2014, 62: 66-76.
- [19] Wagner D, Ranc N, Bathias C, et al. Fatigue crack initiation detection by an infrared thermography method [J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010, 33 (1): 12-21.
- [20] Dorafshan S, Thomas R J, Maguire M. SDNET2018: An annotated image dataset for non-contact concrete crack detection using deep convolutional neural networks [J]. Data in Brief, 2018, 21: 1664.
- [21] 苑玮琦, 薛 丹. 基于机器视觉的隧道衬砌裂缝检测算法综述 [J]. 仪器仪表学报, 2017, 38 (12): 3100-3111.

(上接第 61 页)

- [6] 高新闻, 简 明, 李帅青. 基于 FCN 与视场柱面投影的隧道渗漏水面积检测 [J]. 计算机测量与控制, 2019, 27 (8): 44-48.
- [7] Adhikari R S, Moselhi O, Bagchi A. Image-based retrieval of concrete crack properties for bridge inspection [J]. Automation in Construction, 2013, 39 (4): 180-194.
- [8] Mohan A, Poobal S. Crack detection using image processing: a critical review and analysis [J]. Alexandria Engineering Journal, 2017, 57 (2): 787-798.
- [9] Zhang W Y, Zhen Z, Qi D, et al. Automatic crack detection and classification method for subway tunnel safety monitoring [J]. Sensors (14248220), 2014, 14 (10): 19307-19328.
- [10] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G. Image net classification with deep convolutional neural networks [J]. Advances in neural information processing systems, 2012, 25 (2): 1097-1105.
- [11] Karen S, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition [Z]. arXiv e-prints, 2014, arXiv: 1409.1556.
- [12] Szegedy C, Liu W, Jia Y, et al. Going deeper with convolutions [A]. CVPR [C]. 2015. 7298594.
- [13] Sattar D, et al. Comparison of deep convolutional neural networks and edge detectors for image-based crack detection in concrete [J]. Automation in Construction, 2018, 186: 1031-1045.