

Transient Electromagnetic Structure Radar Research

Ying Ye^{1,2}, Zijian Ye³, Chengping Zhang³

¹Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing

²Beijing Key Laboratory of Underground Engineering Construction Prediction & Precaution, Beijing

³Key Laboratory of Urban Underground Engineering under the Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing

Email: yeying.bjsz@163.com

Received: Apr. 4th, 2019; accepted: Apr. 17th, 2019; published: Apr. 24th, 2019

Abstract

Concrete structure disease can be detected mainly by using ground penetrating radar now. The coring hole should be fit in a few important parts. Due to the limitation of high frequency geological radar penetration capability, reinforced concrete structure has the clusters of steel. There are many problems in the detection of concrete structure diseases and causes. The principle of TEM is first used in Transient Electromagnetic method. The second field of the transient electromagnetic method is used to distinguish the high frequency primary field of the geological radar, using underdamping response central loops unit and the total period apparent resistivity calculation and the seismic wave spectrum processing and display techniques. The transient electromagnetic structure radar was developed successfully, and the comparison of the different concrete structures with the US radar SIR-30E and Italy IDS-RIS radar is in detection of concrete structures. The characteristics and types of apparent resistivity of concrete structural diseases were summarized. The feasibility of using apparent resistivity to detect the structural diseases of concrete is presented. A new application of TEM in concrete structure detection is introduced for Transient Electromagnetic method.

Keywords

Concrete Structure, Ground Penetrating Radar, Transient Electromagnetic Radar, Structure Disease, Leakage Water

瞬变电磁结构雷达研究

叶英^{1,2}, 叶子剑³, 张成平³

¹北京市市政工程研究院, 北京

²地下工程建设预报预警北京市重点实验室, 北京

³北京交通大学城市地下工程教育部重点实验室, 北京

Email: yeying.bjsz@163.com

收稿日期: 2019年4月4日; 录用日期: 2019年4月17日; 发布日期: 2019年4月24日

摘要

目前混凝土结构病害探测仍以地质雷达为主, 在重要部位适当少量配合取芯钻孔, 由于高频微波段地质雷达穿透能力的局限性, 而钢筋混凝土结构钢筋密布, 使得混凝土结构病害及成因检测存在许多难题。本文首次利用瞬变电磁法原理, 区别地质雷达高频一次场而采用瞬变电磁法的二次场, 利用欠阻尼中心回线装置、全期视电阻率计算、拟地震波谱处理与显示等技术, 成功研制了瞬变电磁结构雷达, 并在不同混凝土结构上与美国劳雷SIR-30E雷达、意大利IDS-RIS雷达进行试验对比, 总结了混凝土结构病害的视电阻率特征与类型, 说明用视电阻率法探测混凝土结构病害的可行性, 为瞬变电磁法在混凝土结构探测方面开辟新的应用。

关键词

混凝土结构, 地质雷达, 瞬变电磁雷达, 结构病害, 渗漏水

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

混凝土结构检测的常用方法包括: 钻孔法、声波反射法、回弹-超声综合法、地质雷达法等。由于各种方法自身的局限性, 使得混凝土结构质量检测仍面临许多的难题。

瞬变电磁法历经近百年的发展, 从美国科学家 L.W. Blan (1933 年) 最早提出利用电流脉冲激发供电电偶极形成时域电磁场, 到目前已形成了较为完备的系统, 应用也很普遍[1]。但在浅层瞬变电磁法研究方面, 由于理论和技术上的许多困难, 在国内外这一问题多年来一直处于搁置状态。上世纪 90 年代中后期 (1994~1998) 美国国家自然科学基金会执行了一个专门的研究项目叫 “Avery Early Time Electromagnetic System”, 简称 VETEM 计划, 由 Pellerin 等人领导执行 (Pellerin *et al.*, 1994、1995、1996、1997、2000 年计划)。该项目研究取得了突破性进展, 研究成果形成了一种相对独立的 VETEM 方法。我国在 2004 年, 吉林大学研制了有自主知识产权的 ATTEM 系统。这些研究推动了浅层瞬变电磁法的发展, 在地下水、地热环境及工程勘查中有广泛的应用[2]。

工程质量检测是浅层瞬变电磁法的一个比较新的应用领域, 黄桂柏[3]、高永才[4]、董延朋[5]、徐善杰[6]等分别在埋地钢质管道腐蚀检测、地下隐蔽工程质量检测、桩基础钢筋笼长度等方面都开展了大量的研究工作。但利用瞬变电磁法检测混凝土结构质量目前尚未有报道, 本文基于浅层瞬变电磁法理论、瞬变电磁雷达技术、结构雷达天线及拟地震数据处理与显示, 探索利用瞬变电磁法检测混凝土结构质量及各种缺陷。

2. 瞬变电磁法探测混凝土结构可行性

瞬变电磁法探测结构病害是基于视电阻率差异, 而早期电磁响应、高分辨率信号采集、抗干扰能力则需要研究地质雷达的采样机制、正反向过零叠加、拟地震信号处理等技术。

2.1. 探测混凝土结构的原理

瞬变电磁法探测混凝土结构的原理是利用混凝土结构、岩土体、空气、水等介质电阻率的差异为前提。混凝土结构可认为是有规律分布钢筋的均匀相同介质，混凝土结构病害表现为开裂、渗漏水、空洞，这些病害特征都与视电阻率有关，如图 1，在隧道衬砌、注浆体、围岩中钢筋和水的电阻率低，而混凝土、空洞、岩石都为高电阻率。瞬变电磁法沿着混凝土结构测线测量，混凝土结构病害的视电阻率是随着位置变化的函数。混凝土结构、注浆体、围岩的组合视电阻率特征是判断混凝土结构病害的基础。

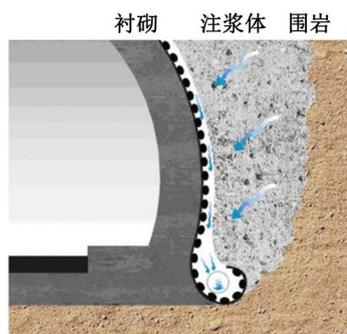


Figure 1. Lateral structure of tunnel lining
图 1. 隧道衬砌横向结构

受诸多因素影响，混凝土结构、岩土体相关介质的物理参数见表 1。从表 1 中可知：混凝土结构与岩体(花岗岩、砂岩、黄土等)之间存在着物性差异；缺陷部位混凝土结构被水或空气充填，与密实混凝土的物性有明显差异。因此，采用地质雷达法、声波法、瞬变电磁法(视电阻率)等对混凝土结构质量进行检测是可行的。

Table 1. Physical parameters related to the concrete structure
表 1. 与混凝土结构相关介质的物理参数

介质	介电常数	电导率/ $\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$	传播速度/ $\text{m}\cdot\text{ns}^{-1}$	衰减系数/ $\text{db}\cdot\text{m}^{-1}$
空气	1	0	0.3	0
水	80	0.5	0.033	0.1
砂岩	6	0.04	/	/
灰岩	4~8	0.5~2	0.12	0.4~1
花岗岩	4~6	0.01~1	0.13	0.01~1
混凝土	4~20	1~100	0.11	/
粘土	5~40	2~1000	0.06	1~300

2.2. 浅层瞬变电磁“感应 - 衰减”过程

瞬变电磁场从时间上把发射波形分为两类，从供电阶跃发射电流关断起始到关断结束为“感应阶段”，关断过程结束以后为“衰减阶段”，一次场与感应二次磁场划分都依据此来定义。从全程瞬变电磁响应曲线理论可以看出，对于 $\mu/\mu_0 = 1$ 时(即被测目标体为无磁性体)，衰减段的瞬变二次磁场总是与一次激励场强度相等，符号相反，两者相互叠加抵消；对感应电压而言，根据麦克斯韦磁场理论，感应段形成的一次感应电压与电流激发形成的二次感应电压符号相反，从而使现场采集电压小于一次感应电压值。但对于 $\mu/\mu_0 > 1$ 的磁性体而言，由于一次电磁场必然磁化该磁性体，实际情况与无磁性体相反。

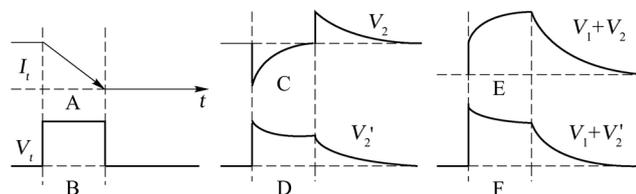


Figure 2. Transient schematic diagram of nonmagnetic and magnetic properties

图 2. 无磁性与磁性体的瞬变过程示意图

图 2(A)为斜阶跃发射电流波形, t 为时间, 图中箭头指示电流衰减趋势, 图 2(B)为发射电流形成一次场在接收线圈中形成的感应电压 V_1 的波形, 假设其为正, 图 2(C/D)分别为电导体与磁导体的一次场在感应段形成二次场电压波形, V_2 与 V'_2 符号相反, V'_2 符号与 V_1 相同, 在实际探测结果中, 所得到的感应电压为一次场电压 V_1 与二次场感应电压 V_2 、 V'_2 矢量叠加之和, 从而有 $V_1+V_2 < V_1$ 和 $V_1+V'_2 > V_1$ 。图 2 给出的是纯发射电流形成的全程瞬变电磁响应, 在实际非纯电阻性线圈装置上, 仪器所采集的信号由于线圈分布电容存在及关断时间造成一定的畸变。

2.3. 影响浅层瞬变电磁探测的因素

通常用于浅层探测的方法有三种: 探地雷达方法(GPR)、频率域电磁法(FEM)以及瞬变电磁法(TEM)。这三种方法中, 每一种都有其优点和一定的局限性。

浅层瞬变电磁法是基于常规 TEM 发展起来的, 由于 TEM 的探测深度是由观测时间的早晚决定, 早期的 TEM 仪器受工艺与电子器件技术的限制, 关断时间和最早采样时间普遍比较长, 使得探测深度通常在数十米以下, 不能满足环境与工程探测的需要, 对于时间域电磁方法来说, 探测深度是由观测时间的早晚决定的。如图 3 所示, 理论上, 瞬变电磁方法是可以实现近地表的探测, 但是国内外研制的测量系统都不能达到零时间关断; 而且在实际工作中, 由于发射电流的关断时间不为零, 接收装置所测量的瞬变电磁信号在相当长的一段时间内受到严重影响而发生畸变, 如果用于解释将产生错误的结果。于是, 目前时间域瞬变电磁法仪器记录的几乎全部是晚期信号, 或者在数据处理时仅采用了晚期信号, 这种情况将产生两种后果: 第一, 它损失了 TEM 方法探测浅部结构的能力, 因为浅部结构的信息主要由早期信号携带; 第二, 它降低了 TEM 方法的分辨能力, 因为关断电流的影响将使瞬变响应发生畸变。影响瞬变电磁浅层探测的因素主要有:

- 1) 仪器发射机关断时间不够小, 采样率不够高;
- 2) 线圈的暂态过程(过渡过程): 早期一次场与二次场的叠加;
- 3) 仪器的抗干扰能力和环境噪声的矛盾;
- 4) 地质体的电性、埋深、几何参数与地电断面的性质。

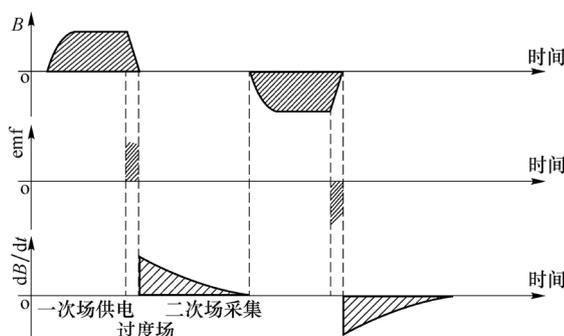


Figure 3. Tem acquisition principle

图 3. 瞬变电磁法采集原理

3. 瞬变电磁结构雷达研制

瞬变电磁法探测结构需要解决类似雷达的扫描式探测系统、针对结构探测的天线装置、数据处理与成像等系列技术。

3.1. 瞬变电磁雷达系统

瞬变电磁雷达系统(Transient Electromagnetic Radar, 简称 TER)是使用调制的瞬变电磁波形和定向天线向地下空间中的特定空域发射电磁波以搜索目标。搜索域内的物体(目标)把能量的一部分反射回雷达接收机处理这些回波,从中提取距离、速度、角度位置和其他目标识别特征等目标信息。TER 系统如图 4 所示。



Figure 4. Transient electromagnetic structure radar
图 4. TER 瞬变电磁结构雷达

TER 瞬变电磁雷达[7]由北京市市政工程研究院研制,TER 系统由电磁发射机、电磁接收机、天线及处理软件组成。具体指标参见表 2。

Table 2. Transient electromagnetic structure radar technical index
表 2. TER 结构雷达技术指标

发射机		接收机	
发射频率	0.0625 Hz~222 Hz	采样频率	4.096 KHz~52.734 KHz
断电时间	<100 us	A/D分辨率	24Bit高精度
供电电流	0 A~16 A	动态范围	175 dB
触发方式	上升沿	同步方式	电缆
发射方式	连续/测量轮	延时窗口	1000
电流波形	双极性方波, 占空比可调	叠加次数	1~9999
操作方式		菜单式人机对话	
通讯接口		WiFi	
工作电源		6 V~12.6 V (锂电内置)	
仪器箱体		240 × 160 × 103 mm	
仪器重量		2 Kg	

其中的连续、测量轮发射方式可用于结构的精细探测。

3.2. “欠阻尼”中心回线装置

对于常规瞬变电磁法来说, 浅层瞬变电磁法记录信息更全面, 所记录信息为电流开始关断时刻以后的纯瞬变二次磁场, 该场定义为全程瞬变二次磁场。

目前, 大部分 TEM 仪器野外工作时通常使用接收线圈观测瞬变电磁感应电压, 主要采用多匝空芯线圈和多匝磁芯线圈两种方式, 其模型可以等效如图 5 所示。\$V_i\$ 为接收线圈的感应电压, 是理论上的瞬变电磁感应电压信号, \$r\$ 为接收线圈的内阻, \$L\$ 为接收线圈的电感, \$C_r\$ 表示接收线圈的分布电容, \$R_a\$ 和 \$C_a\$ 分别为前置放大器的输入电阻与输入电容, \$R_T\$ 为并联在接收线圈两端的阻尼电阻, 调节 \$R_T\$ 的大小可以使得线圈的过渡过程处于临界状态, 一般情况下 \$R_T \ll R_a\$。

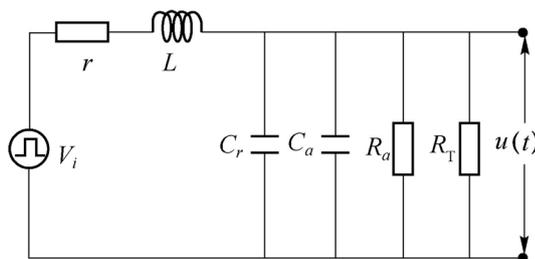


Figure 5. The receiving coil equivalent circuit

图 5. 接收线圈等效电路

在阶跃电流激励下, 接收线圈有一定的响应, 其响应特征方程可以表示为[8]:

$$\frac{d^2V(t)}{dt^2} + 2\delta \frac{dV(t)}{dt} + \omega^2 V(t) = \frac{1}{LC} \varepsilon(t) \quad (1)$$

通过对(1)式进行时间 - 频率拉普拉斯变换, 可得瞬变电磁接收系统接收函数:

$$g(s) = \frac{1}{LC(s^2 + 2K\omega s + \omega^2)} \quad (2)$$

上式中, \$s = 2\pi if\$ 为复变量, 其中 \$f\$ 为接收线圈的响应频率; \$K = \delta/\omega\$, \$\delta\$ 接收系统的阻尼系数。对(2)式进行频率 - 时间拉普拉斯逆变换, 可得瞬变电磁探测系统接收脉冲函数表达式[8]:

$$g(t) = L^{-1}[g(s)] = \begin{cases} \frac{1}{LC\alpha} e^{-\xi} sh(\alpha t), (\xi \geq 1) \\ \frac{1}{LC\alpha} e^{-\xi} sh(\alpha t), (\xi < 1) \end{cases} \quad (3)$$

根据电路信号数理理论及信号线性时不变理论, 电路理论信号被线圈接收以后输出的电动势发生一定的变化, 其值为频率与效度乘积, 即:

$$V(t) = g(t) \times \varepsilon(t) \quad (4)$$

通过(4)式可以求出斜阶跃电流脉冲下理论电信号 \$\varepsilon(t)\$ 所对应接收 \$V(t)\$。根据电磁振荡理论可知, 电路有谐振与固有频率, 电路振荡临界系数可定义为 \$K = \frac{\delta}{\omega} = \sqrt{\alpha} \left(\frac{1}{2R} \right) \sqrt{L/C} + \frac{1}{2} r \sqrt{C/L}\$。

式(1~4)中: \$V(t)\$ 为接收线圈接收参数即输出电动势;

$$\delta = (rC + L/R)/2LC$$

\$r\$ 为瞬变电磁电路系统中接收线圈 \$R_x\$ 内阻;

R 为外接电阻即配置电阻； L 为接收线圈电感；

C 为系统中接收线圈的分布电容；

$\omega = \sqrt{(r/R+1)/LC}$ 为接收线圈的谐振频率；

$\alpha = \omega\sqrt{|K^2-1|}$ ，当 $K < 1$ 、 $K = 1$ 、 $K > 1$ ，接收系统分别处于欠阻尼、临界阻尼和过阻尼状态，不同的接收状态对接收信号造成不同的影响。

图 6 给出了欠阻尼和过阻尼状态时全程瞬变电磁感应电动势过渡过程示意图，欠阻尼状态下，早期信号产生了严重的振荡；过阻尼状态下，过渡过程持续时间较长。通常，可以通过调节匹配电阻来调节整个工作电路处于临界阻尼状态下工作，从而可避免外界电磁信号干扰致使线圈处于欠阻尼状态下工作。

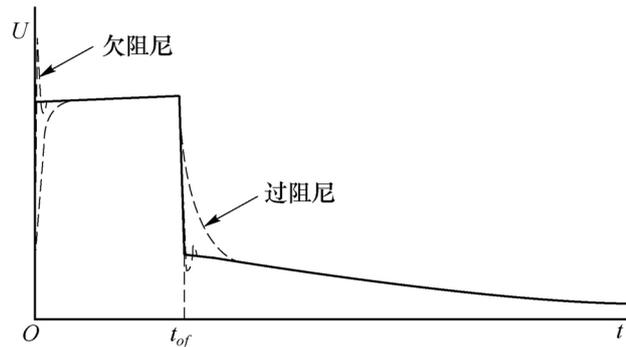


Figure 6. The induction electromotive force underdamping and overdamping process

图 6. 感应电动势欠阻尼和过阻尼过程

但是欠阻尼状态下，早期信号产生的振荡使得瞬变二次场出现拟地震波，如图 7 所示，这种震荡的电磁波在早期信号形成一些列稳态震荡，有规律的震荡的同相轴与雷达波、地震波的类似。

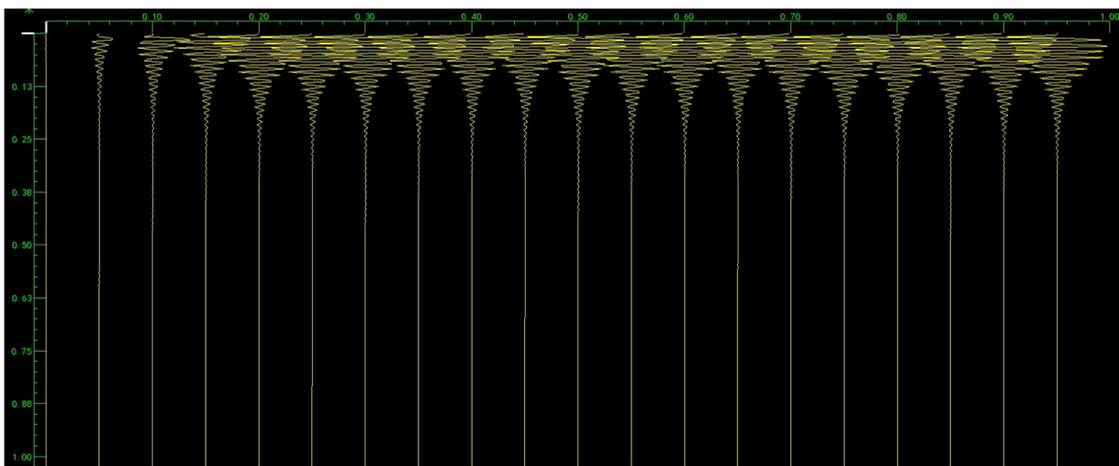


Figure 7. The oscillation of underdamping

图 7. 欠阻尼产生的震荡

研制的欠阻尼中心回线装置如图 8 所示，它利用二次场震荡产生的同相轴来分辨异常体的。由于混凝土结构的钢筋或病害会引起欠阻尼中心回线二次场震荡变化，从而表现出切割同相轴的异常。如图 9 所示，由于切割震荡同相轴而显示出异常体的形状。



Figure 8. Undamped center loop device
图 8. 欠阻尼中心回线装置

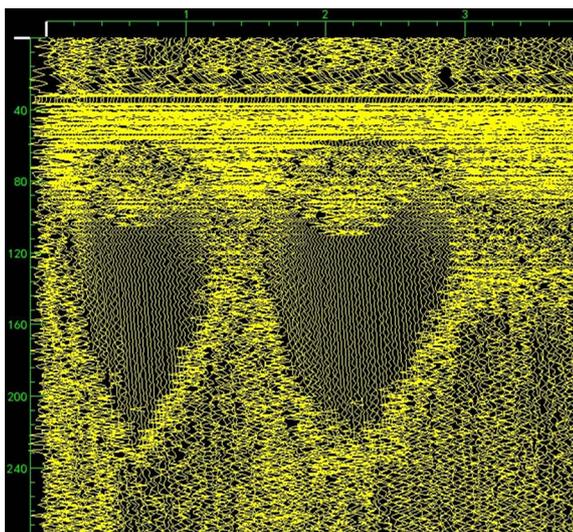


Figure 9. Simulating seismogram
图 9. 拟地震波谱图

3.3. 全期 ρ_i 视电阻率计算

在瞬变电磁法中，视电阻率等于相同瞬变电磁系统和测量装置下，在同一时刻产生与测量值相同瞬变场响应的均匀导电半空间的电阻率。中心回线全期的 $\rho_i(t)$ 视电阻率计算[8]:

在理想场源激发下，均匀大地地表处的感应电压或磁场响应分别为

$$U_i(t) = \frac{I\rho}{a^3} \left[3\text{erf}(u) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} u (3 + 2u^2) e^{-u^2} \right] \quad (5)$$

$$B_z^i = \frac{I\mu_0}{2a} \left[\frac{3}{\sqrt{\pi}u} e^{-u^2} + \left(1 - \frac{3}{2u^2} \right) \text{erf}(u) \right] \quad (6)$$

其中 a 为发射回线半径， ρ 为均匀半空间电导率， t 发射电流关断后的延迟时间， $U_i(t)$ 为中心回线感应电动势。误差函数 $\text{erf}(u) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^u e^{-t^2} dt$ ， u 为与电阻率和测量装置相关的参数。

$$\text{中心回线, } u = \sqrt{\frac{\mu_0 a^2}{4\rho t}} \quad (7)$$

$$f(u) = g(t) - g_m(t) = 0 \tag{8}$$

其中 $g(t)$ 为(5)(6)式中的感应电压或磁场， $g_m(t)$ 为工程测量数据， i 表示中心回线。由(9)式反演迭代计算出 u ，再由式(5)(8)即可计算出中心回线在任意延时时刻的视电阻率值。

$$\rho_i(t) = \frac{\mu_0 a^2}{4tu^2} \tag{9}$$

图 10 为某地铁管片两环视电阻率波密度图，红色代表高阻，蓝色代表低阻。

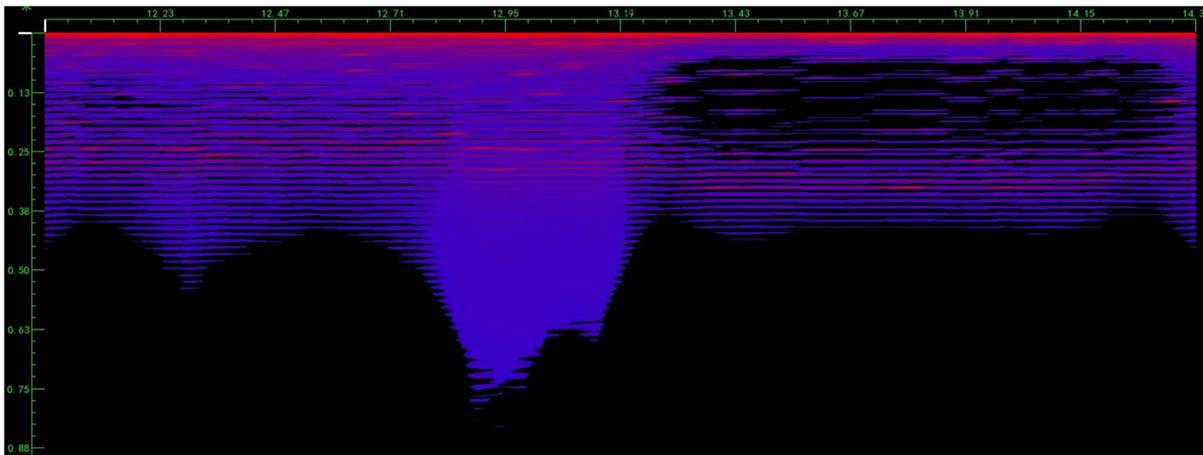


Figure 10. Tunnel segment apparent resistivity wave density map

图 10. 地铁管片两环视电阻率波密度图

3.4. 拟地震波谱显示

TER 瞬变电磁雷达软件设计了常见地震波各种波形图，分别有波形曲线见图 11、波型变密度见图 12、等值线见图 13、变密度加等值线见图 14。图形设计主要便于同相轴追踪、结构异常比较与辨识[9]。

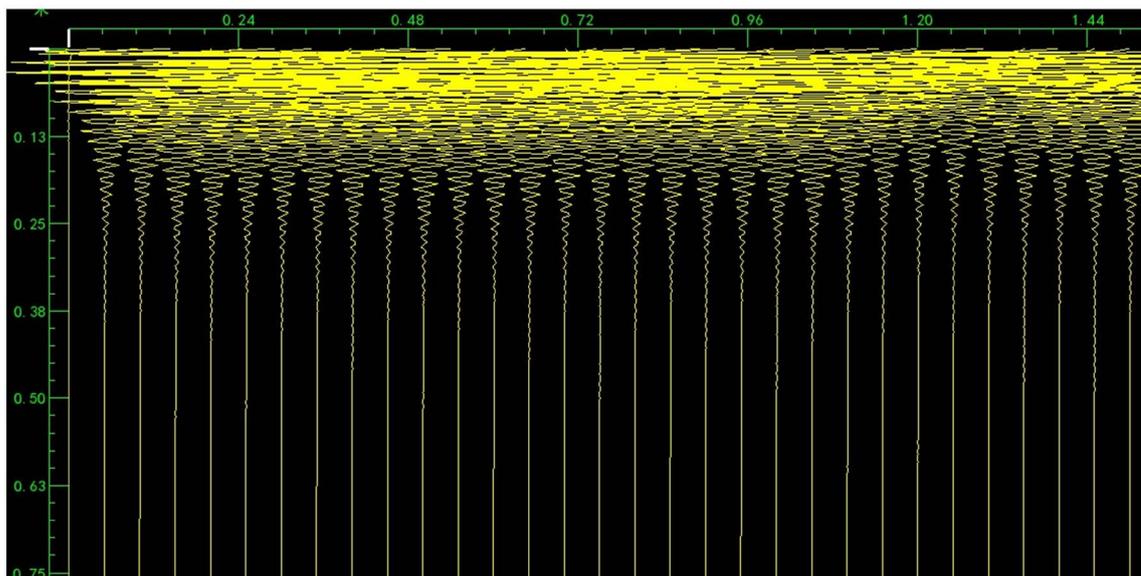


Figure 11. Induction voltage waveform curve

图 11. 感应电压波形曲线

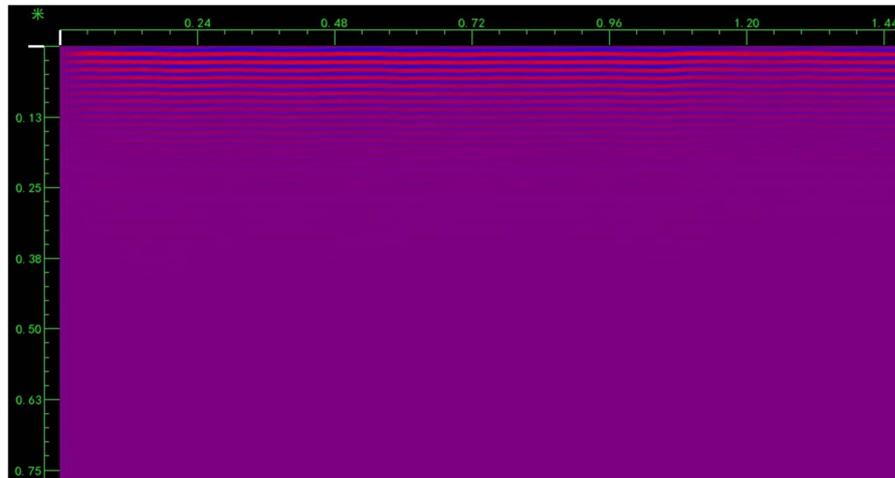


Figure 12. Induction voltage wave density
图 12. 感应电压波密度

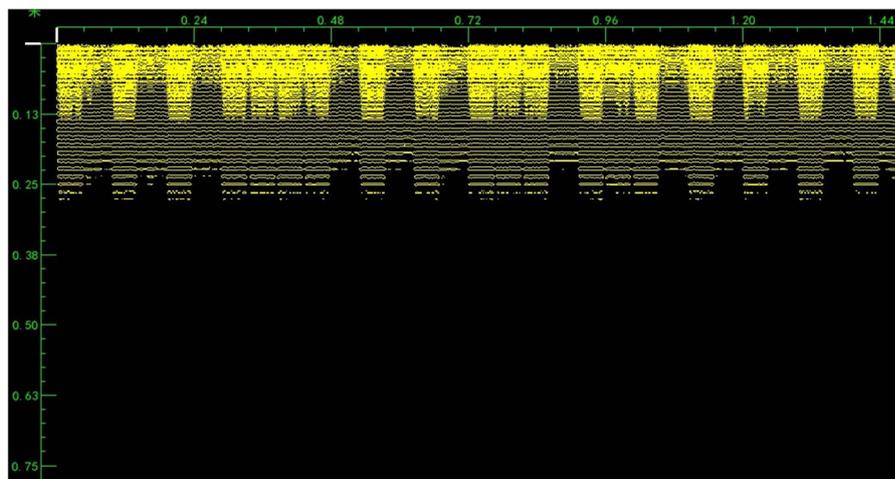


Figure 13. Induction voltage contour map
图 13. 感应电压等值线图

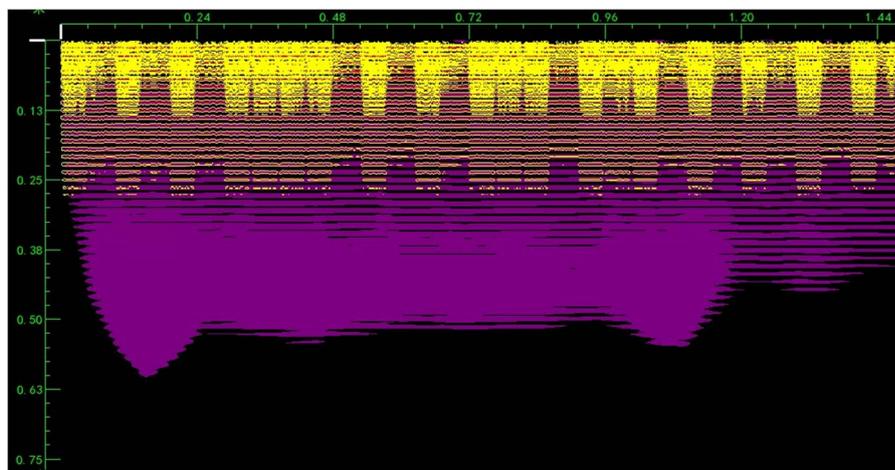


Figure 14. Induction voltage wave density and contour map
图 14. 感应电压变密度加等值线

4. 混凝土结构探测试验

混凝土结构本身是由砂石骨料、水泥及钢筋组成，自身病害主要是钢筋分布、开裂、渗漏水，其中钢筋和水为低阻异常。在 TER 雷达图谱中，主要是横向追踪视电阻率的变化来推演各种结构病害。

4.1. 楼板测试

楼板由钢筋、横梁及混凝土组成，图 15 为美国劳雷 SIR-30E (270M)测试楼板的波谱，图 16 为 TER 雷达视电阻率波谱。图中可以看出在横梁接触部位两者均有异常，但 TER 雷达视电阻率波谱更为清晰。

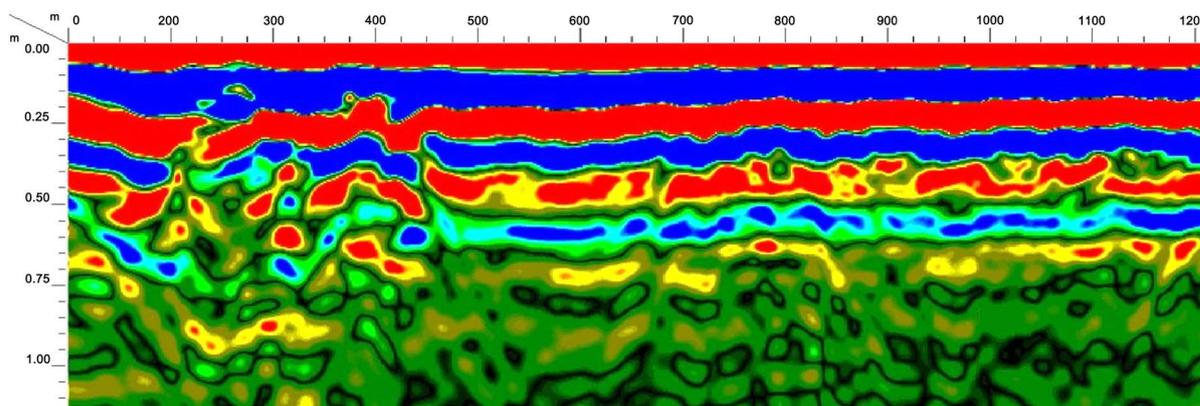


Figure 15. SIR-30E (270M) radar spectrum

图 15. 劳雷 SIR-30E (270M)雷达波谱

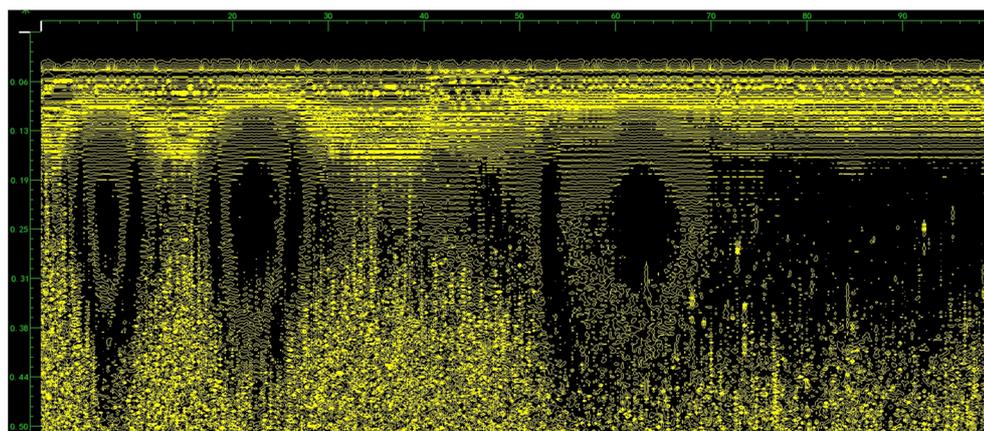


Figure 16. TER radar apparent resistivity spectrum

图 16. TER 雷达视电阻率波谱

4.2. 隧道衬砌试验

地铁内管片结构比较均匀，每种管片有相同类型的视电阻率异常特征，对同一种类型的管片进行横向 TER 视电阻率特征比较，寻找同种管片与背后注浆体、围岩的耦合异常特征。图 17、图 18 分别为意大利 IDS-RIS (900M)地质雷达与瞬变电磁雷达在同一条测线上的测试结果。两个图中均可看出在 6 m~10 m 为地铁联络通道，在 6 m、10 m 处两处钢板衬砌，两个边墙由两种类型管片组成，两种管片分布有规律但又不完全相同。这个基本规律地质雷达和瞬变电磁雷达图谱上都有很明显的显示，是反映两种管片的配筋规律不同。

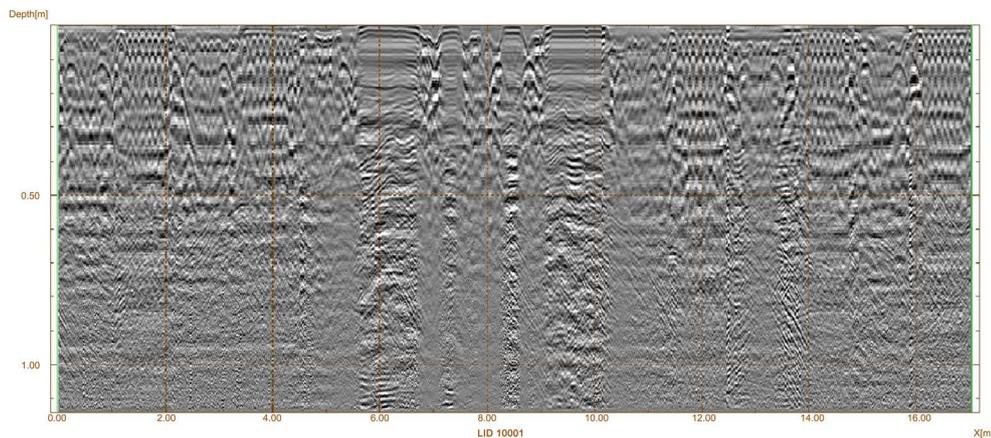


Figure 17. Italy IDS-RIS (900M) radar spectrum
图 17. 意大利 IDS-RIS (900M) 雷达波谱

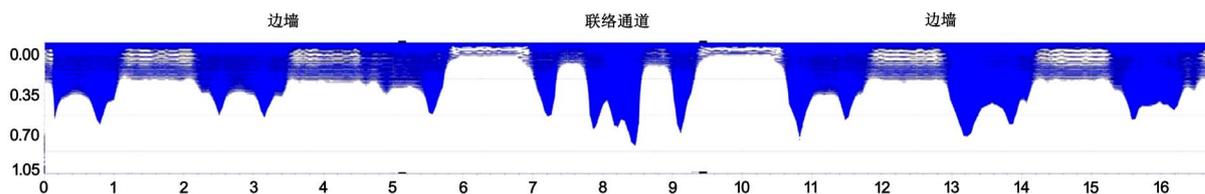


Figure 18. TER radar apparent resistivity spectrum
图 18. TER 雷达视电阻率波谱

5. 结论

混凝土结构质量检测目前仍有许多问题[10], 由于地质雷达功率小、频率高, 在遇到混凝土钢筋密布时, 地质雷达穿透能力大大降低。试验研究表明: 瞬变电磁结构雷达功率大、频率低、拟地震波谱的处理解释以及无损快速探测有望拓展混凝土质量检测的内容, 通过进一步的试验与设备功能改进, 将揭开瞬变电磁结构雷达在混凝土结构探测中新的应用方向。

参考文献

- [1] 牛之链. 瞬变电磁法原理[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 2003.
- [2] 薛国强, 底青云, 王若, 等. 多通道瞬变电磁法资料处理方法技术综述[J/OL]. 地球物理学进展: 1-11, 2019-04-19, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.p.20190304.0947.062.html>
- [3] 黄桂柏. 瞬变电磁法在埋地钢质管道腐蚀检测中的应用[J]. 石油化工腐蚀与防护, 2001, 18(4): 39-42.
- [4] 高永才, 李永年, 王绪本, 等. 瞬变电磁法金属管道腐蚀检测理论初探[J]. 物探化探计算技术, 2005, 27(1): 29-33.
- [5] 董延朋, 万海. 瞬变电磁法在地下隐蔽工程质量检测中的应用[J]. 质量论坛, 2006, 14(1): 39-40, 67.
- [6] 徐善杰. 利用瞬变电磁法检测桩基础钢筋笼长度[J]. 治淮, 2006(5): 33-34.
- [7] 叶英, 侯伟清, 许鹏. 一种瞬变电磁雷达探测系统及探测方法[P]. 中国专利, CN103777247B, 2017-01-18.
- [8] 叶英. 浅层瞬变电磁雷达[M]. 北京: 地质出版社, 2016: 12.
- [9] 叶子剑, 叶英, 张成平. 欠阻尼中心回线瞬变电磁效应[J/OL]. 地球物理学进展: 1-8, 2019-04-19, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2982.P.20190307.1205.026.html>
- [10] 吴慧敏. 结构混凝土现场检测技术[M]. 长沙: 湖南大学出版社, 1988.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2163-3967，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：ag@hanspub.org