

Research on Transient Electromagnetic Road Radar

Ying Ye^{1,2}

¹Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing

²Beijing Key Laboratory of Underground Engineering Construction Prediction & Precaution, Beijing
Email: yeying.bjsz@163.com

Received: Jun. 7th, 2019; accepted: Jun. 21st, 2019; published: Jun. 28th, 2019

Abstract

Urban road is an important part of urban infrastructure, GPR technology has been widely used in urban road detection due to its advantages of nondestructive, fast, shallow and high resolution. Due to the limitation of penetrating capability of high frequency microwave geological radar, there are many problems in detecting urban road diseases and their causes. This paper uses the principle of transient electromagnetic method for the first time, the secondary field of transient electromagnetic method which distinguishing the high frequency primary field of the ground penetrating radar, the theory of shallow transient electromagnetic method, center loop device, full time apparent resistivity calculation, radar spectrum image processing and working device, etc. to develop transient electromagnetic road radar and compare with GPR in aspects of underground pipeline detection and road disease detection. The application effect of shallow transient electromagnetic method in urban road underground disease detection is verified by engineering examples. The characteristics and types of apparent resistivity of urban road underground diseases are summarized, and the feasibility of using apparent resistivity method to detect road underground diseases is illustrated, which opens up a new application for TEM in urban road detection.

Keywords

Road Diseases, Transient Electromagnetic Radar, Underground Pipeline, Underground Void

瞬变电磁道路雷达研究

叶 英^{1,2}

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
Email: yeying.bjsz@163.com

摘要

城市道路是城市基础设施的重要组成部分，地质雷达技术以其无损、快捷、浅层高分辨率的优势被广泛应用于城市道路检测中。由于高频微波段地质雷达穿透能力的局限性，使得城市道路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，利用浅层瞬变电磁法原理、中心回线装置、全期视电阻率计算、雷达波谱图像处理与工作装置等技术，成功研制了瞬变电磁道路雷达，并在地下管线探测、道路病害探测方面与地质雷达进行试验对比，结合试验和工程实例，验证了浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用效果，总结了城市道路地下病害的视电阻率特征与类型，说明用视电阻率法探测道路地下病害的可行性，为瞬变电磁法在城市道路检测方面开辟新的应用。

关键词

道路病害，瞬变电磁雷达，地下管线，地下空洞

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

近些年城市道路塌陷事故频繁发生，严重影响了城市交通安全及居民生活。路基病害已经引起了社会舆论和专家学者的关注，并进行了大量相关研究。随着检测技术的不断的改进、不断的完善，探地雷达因具有分辨率高和探测速度快等优点已经被广泛应用到公路检测中，也取得了较好的效果。但由于高频微波段地质雷达穿透能力的局限性，受干扰因素多，在实际道路病害检测中仍有许多问题有待解决。

目前道路病害探测方法主要有地质雷达、高密度电法、瑞雷波法、微重力等，若能实现多种物探方法的综合探测，将大大提高路基病害的检测效果，但不管是高密度电法，还是瑞雷波方法，都要对现有设备进行改造才能适用于道路病害的检测，而且检测速度也有待提高。

瞬变电磁法自1933年由美国科学家 L. W. Blan 提出，1951年 J. R. Wait 利用瞬变电磁场法寻找导电矿体，1958年加拿大 Barringer 公司开始研制应用于航空的 INPUT 系统，1977年 G. V. Keller、1979年 Stemberg、随后 J. R. Wait、G. V. Keller、A. A. Kaufman、G. W. Hohmem、A. P. Raiche、B. R. Spies、M. N. Nabighian 等学者都做了大量的研究工作。

我国瞬变电磁法起步于70年代，先后从加拿大引进磁源 EM37、47、67 及 PEM 系统；从澳大利亚引进源 SIROTEMII、TerraTEM；油气田勘探部门引入西方电性源的瞬变电磁法(LOTEM)及俄罗斯的建场测深电法仪(ЦЭС-3 型)，成为深部构造及含油气目标探测的有效方法；国内学者朴化荣(1990)、牛之琰(1992)、蒋邦远(1998)等较早参与研究工作。以前，瞬变电磁法只局限于金属矿勘探，1992年以后随着仪器的智能化与数字化，瞬变电磁法开始步入工程、环境、灾害地质调查中。瞬变电磁法历经近百年的发展，已形成了较为完备的系统，应用也很普遍。除了通常应用于金属矿产及石油资源的勘查外，还应用

在地下水、地热环境及工程勘查中[1]。

上世纪 90 年代中后期,美国国家自然科学基金会的 VETEM (Pellerin, 2000)计划针对浅层瞬变电磁法的研究取得了突破性进展,发射机的关断时间小于 10 ns,接收范围 10~1000 ns,可以探测 0~5 m 内的非导电体和导电体两者的差异。我国学者嵇艳鞠(2004)、于省宝等(2006)、马国财等(2013)针对近地表瞬变电磁法高分辨率探测开展相关研究[2]。

近年来国内吉林大学林君、中南大学席振铎等人在浅层 TEM 仪器研制上取得了重要进展[3]。本文基于浅层瞬变电磁法理论、瞬变电磁雷达技术、中心回线装置及数据图像处理与显示,探索利用瞬变电磁雷达法检测城市道路质量及各种缺陷,这是瞬变电磁法一个新的应用领域。

2. 瞬变电磁法探测地下管线与病害的可行性

道路路基是路面的基础,它与路面构成一个整体结构,是道路的基本结构物。在路基病害快速探测中,首先应致力于对路面行车安全产生影响的路面脱空、路基空洞、溶洞、土洞以及路基中水的异常探测。

2.1. 城市道路下常见基础设施与病害特征

道路结构从上到下分为面层、基层和路基 3 层,市政道路面层厚度 15 cm 左右,基层厚 20 cm 左右,路基厚度变化较大。由于路基土体长期在自然、人为因素下遭到破坏,但又不能及时发现,慢慢向路表发展,同时在不断地扩大范围,当病害发展至基层下方时,由于基层不能将来自路面车辆的重力传送给路基,而基层又不能承载车辆的重力,导致路面发生塌陷。如图 1 所示,路基通常由地下管线等市政设施、路基病害(空洞、疏松、含水)体、岩土体介质组成。

- 1) 地下管线:通常由非金属、钢筋砼、钢管、球墨铸铁管等材质构成,其电阻率较低(除非金属管线),与周围介质之间存在明显的物性差异。
- 2) 路基病害:指城市道路地下方出现不同程度的空洞、水囊、疏松等不密实病害。其中空洞电阻率呈高阻,水囊与疏松体为低阻,与周围介质之间存在明显的物性差异。
- 3) 岩土体性质变化:道路下岩土体结构因性质不同、含水率不同,呈现不同的电阻率差异;而岩土体的含水率通常又与其结构、密实度等密切相关。

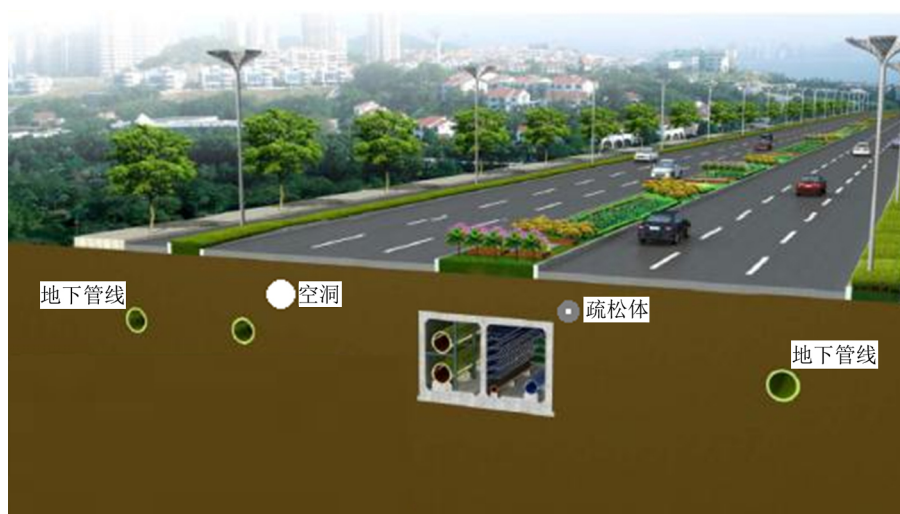


Figure 1. Underground pipelines of urban roads and surrounding geotechnical environment
图 1. 城市道路地下管线与周围岩土环境

2.2. 探测道路病害的前提

瞬变电磁法探测道路病害的原理是利用道路结构、岩土体、空气、水等介质电阻率的差异为前提。城市道路可认为道路结构、路基、管线等市政基础设施、路基病害等组合的混合体。道路结构与路基是均匀分布的介质；管线等市政基础设施通常由铁质或钢筋砼材质组成；道路病害表现为空洞、疏松、含水体(水囊)。这些病害特征都与视电阻率有关，根据模型实际尺寸及道路下不同材质的物理参数设计如表 1 所示，其理论模拟曲线如图 2 所示。由理论模拟曲线可知，不同的路基病害会对应不同的视电阻率曲线类型。

Table 1. Parameter table of theoretical simulation model

表 1. 理论模拟模型参数表

层数	介质	电阻率($\Omega\cdot m$)	厚度(m)
1	道路面层基层	1000	0.5
	密实(土体)	200	1
2	水囊、疏松体	10	1
	脱空(空气)	1,000,000	1
3	路基土	100	∞

受诸多因素影响，道路岩土体相关介质的物理参数见表 2。从表 2 中可知：管线、地下空洞、疏松体与岩土体之间存在着物性差异；缺陷部位路基被水或空气充填，与密实路基的物性有明显的物性差异。因此，采用瞬变电磁法(视电阻率)对道路病害进行检测是可行的。

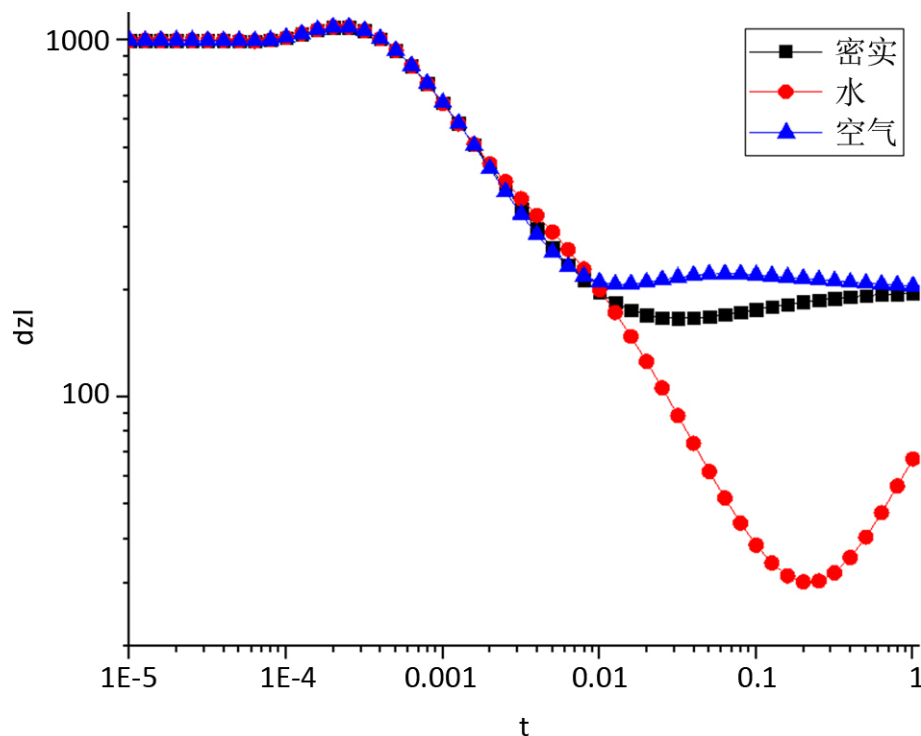


Figure 2. Theoretical curve of road disease simulation

图 2. 道路病害模拟理论曲线

Table 2. Physical parameters related to road structure**表 2.** 与道路结构相关的物理参数

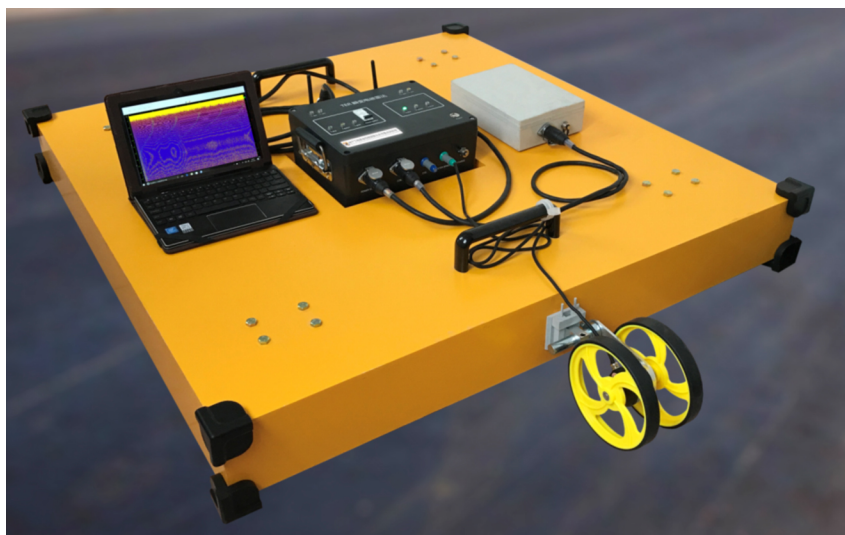
介质	介电常数	电导率/ $\text{ms}\cdot\text{m}^{-1}$	传播速度/ $\text{m}\cdot\text{ns}^{-1}$	衰减系数/ $\text{db}\cdot\text{m}^{-1}$
空气	1	0	0.3	0
水	80	0.5	0.033	0.1
砂岩	6	0.04	/	/
灰岩	4~8	0.5~2	0.12	0.4~1
花岗岩	4~6	0.01~1	0.13	0.01~1
混凝土	4~20	1~100	0.11	/
粘土	5~40	2~1000	0.06	1~300

3. 瞬变电磁道路雷达研制

瞬变电磁法探测路基病害需要解决类似雷达的扫描式探测系统、针对路基病害探测的天线装置、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)由电磁发射机、电磁接收机、天线及处理软件组成[4] [5]。TER 瞬变电磁道路雷达如图 3 所示, TER 道路雷达技术指标见表 3。

**Figure 3.** Transient electromagnetic road radar**图 3.** TER 瞬变电磁道路雷达**Table 3.** Transient electromagnetic road radar technical index**表 3.** TER 道路雷达技术指标

	发射机		接收机
发射频率	0.0625~222 Hz	采样频率	4.096~52.734 KHz
断电时间	<100 us	A / D分辨率	24 Bit高精度
供电电流	0~50 A	动态范围	175 dB

Continued

触发方式	上升沿	同步方式	电缆、GPS可选
发射方式	连续/测量轮/GPS	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	6~12.6 V (锂电内置)		
仪器箱体	280 × 230 × 109 mm		
仪器重量	3 Kg		

3.2. “临界阻尼”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，实际上 TER 瞬变电磁雷达是上升沿触发，通过设置延时来控制采样开始时间的。TEM 仪器使用接收线圈观测瞬变电磁感应电压的常用装置，其模型可以等效如图 4 所示。 V_i 为接收线圈的感应电压， 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 $R_T \ll R_a$ 。

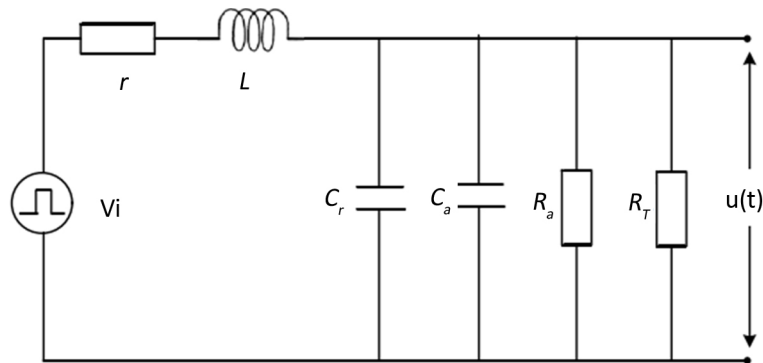


Figure 4. The receiving coil equivalent circuit
图 4. 接收线圈等效电路

V_i 为接收线圈的感应电压，实际接入前置放大器输入端的电压为：

$$V_a = \frac{R_a}{R_a + r + S(L + R_a r C) + S^2 R_a L C} V_i \tag{1}$$

式中 $C = C_r + C_a$ ， $S = j\omega$ ；未接入 R_T ，一般情况， R_a 比其它阻抗项要大的多，故有：

$$V_a = \frac{1}{1 + S r C + S^2 L C} V_i \tag{2}$$

图 5 给出了全程瞬变电磁感应电压曲线示意图，图中虚线为含过渡过程的响应电压。根据电磁振荡理论，电路有谐振与固有频率，电路振荡临界系数可定义为：

$$K = \frac{\delta}{\omega} = \sqrt{\alpha} \left(\frac{1}{2R} \right) \sqrt{L/C} + \frac{1}{2} r \sqrt{C/L} \tag{3}$$

式中: $\delta = (rC + L/R)/2LC$;

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;

$\alpha = \sqrt{|K^2 - 1|}$, 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。通常, 可以通过调节匹配电阻 R_T 来调节整个工作电路处于临界阻尼状态下工作。综合来看, 临界阻尼状态下的输出电压波形其总体效果最好[6]。

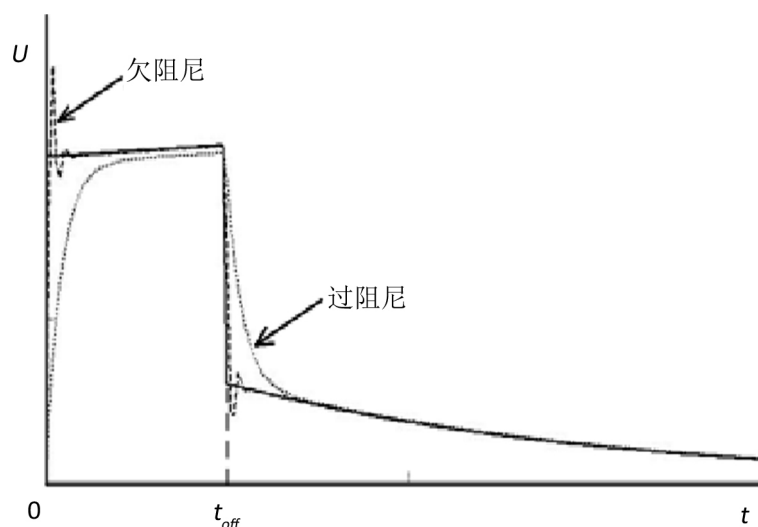


Figure 5. The induction electromotive force underdamping and overdamping process

图 5. 感应电动势欠阻尼和过阻尼过程

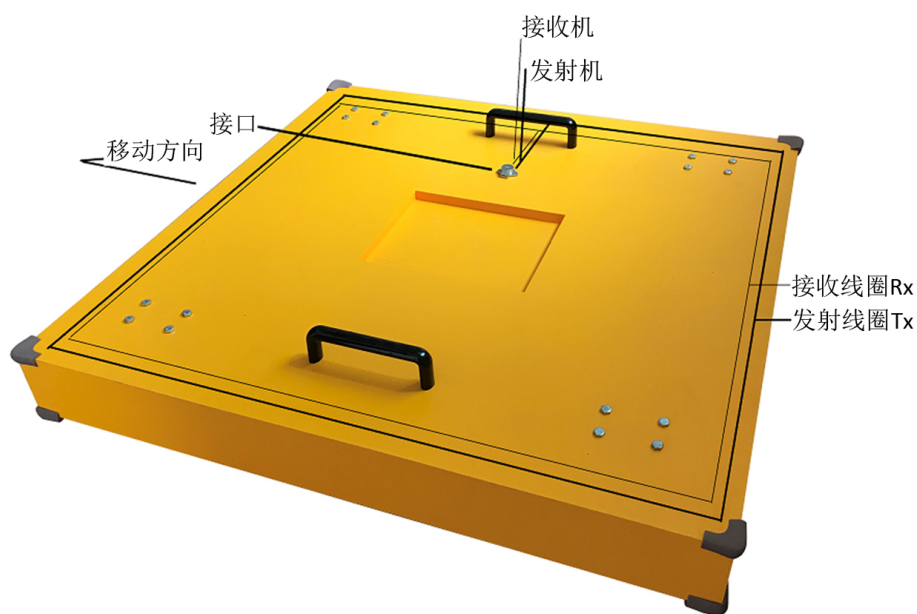


Figure 6. Critical damping central loop device

图 6. 临界阻尼中心回线装置

研制的临界阻尼中心回线装置如图 6 所示，在临界阻尼状态下，采集的感应电压曲线如图 7 所示，图中显示早期信号仍混叠有一次场信号，随后感应电压随时间快速衰减。

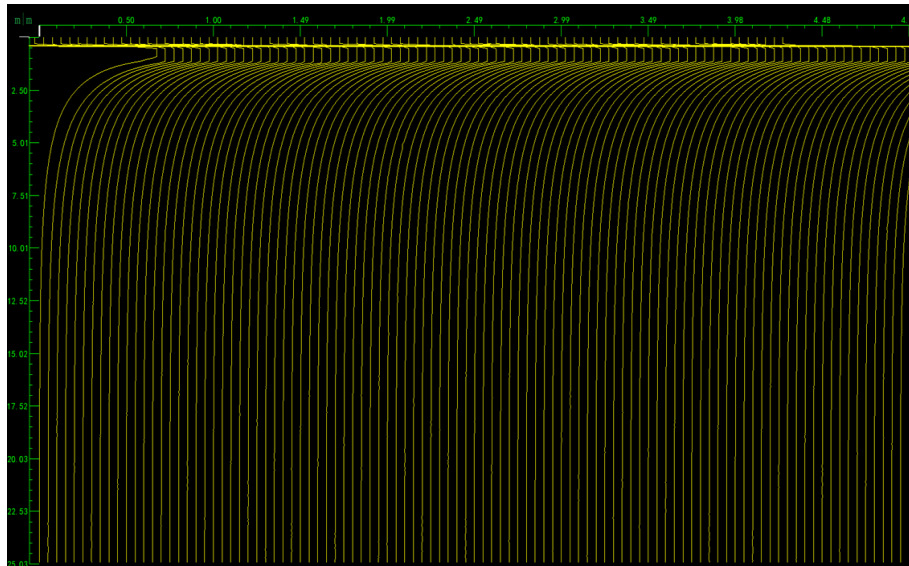


Figure 7. The induced voltage curve obtained by the critical damping central loop device
图 7. 临界阻尼中心回线装置获取的感应电压衰减曲线

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[7]:

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

其中 a 为发射回线半径， $u_0 = 4\pi * 10^{-7}$ ， t 发射电流关断后的延迟时间， u 为与电阻率和测量装置相关的参数，中心回线 $u = \sqrt{\frac{\mu_0 a^2}{4\rho t}}$ ， ρ 为均匀半空间电导率。

图 8 为北京地铁平安里车站地下管线探查视电阻率波密度图与等值线图，红色代表高阻，蓝色代表低阻。

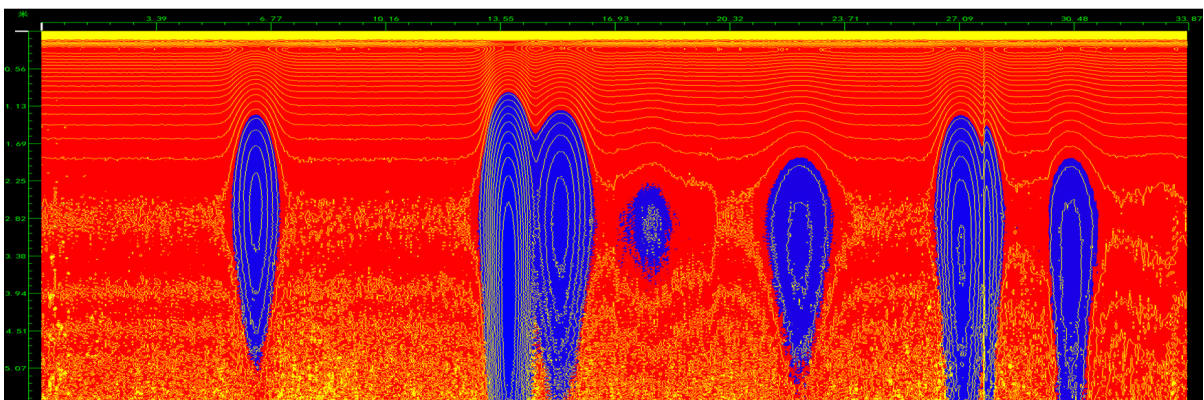


Figure 8. Apparent resistivity spectrum of underground pipeline in Beijing subway Pinganli Station
图 8. 北京地铁平安里车站地下管线视电阻率波谱图

4. 与地质雷达试验对比

地质雷达其频率范围一般为 $n \times 10 \sim n$ MHz，探测范围可从 n cm $\sim n \times 10$ m。而实际在城市道路上探地雷达的最佳探测范围只有不到十米，特别在低阻覆盖层下探测深度更小。

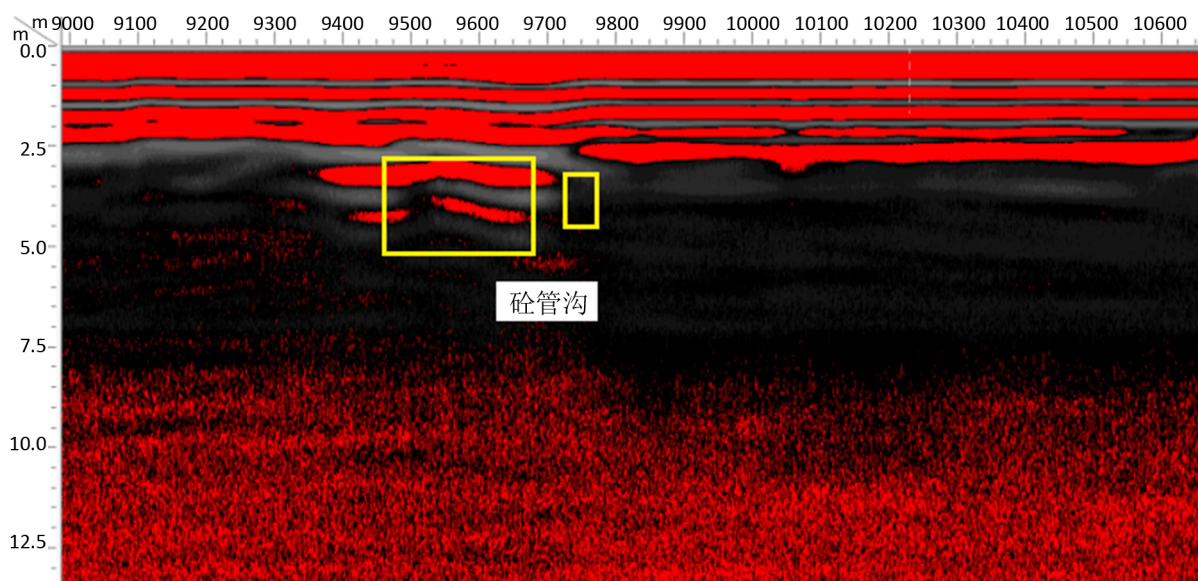


Figure 9. Geological radar detection of reinforced concrete trench spectrum

图 9. 地质雷达探测钢筋砼管沟波谱

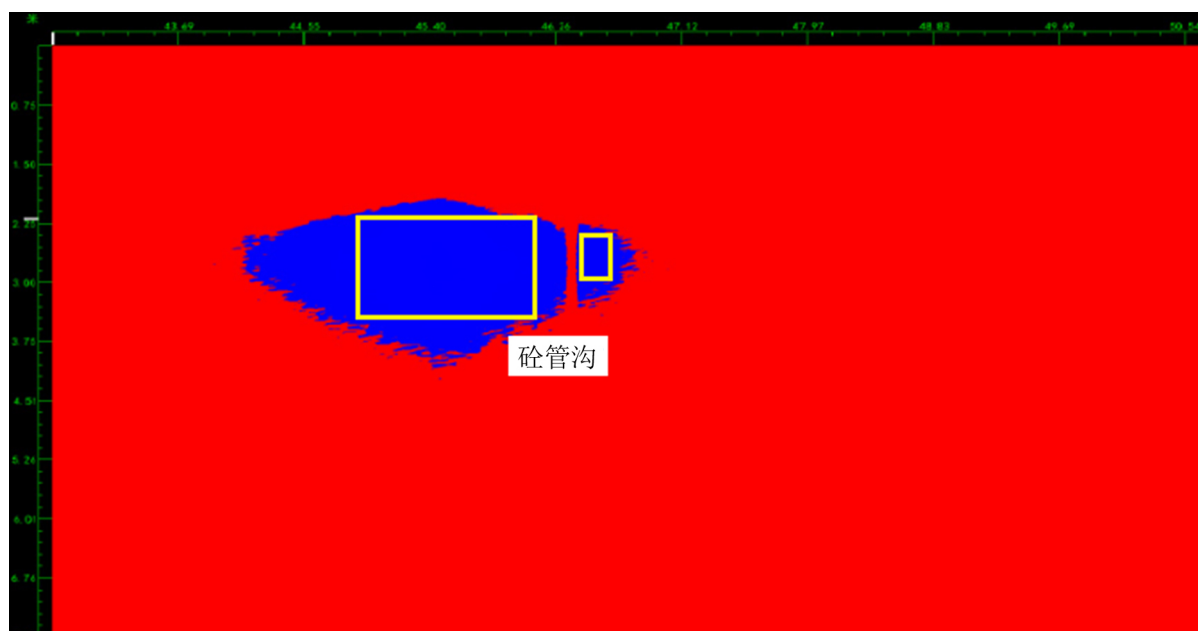


Figure 10. Image of apparent resistivity of reinforced concrete pipe trench detected by transient electromagnetic road radar

图 10. 瞬变电磁道路雷达探测钢筋砼管沟视电阻率像图

在北京车公庄道路检测中，利用 TER 瞬变电磁雷达与地质雷达进行了对比试验，图 9、图 10 为并列大小钢筋砼管沟引起的地质雷达波谱异常和瞬变电磁雷达视电阻率异常。由于钢筋砼管沟与路基土介质存在较大的介电常数和视电阻率差异，跟据电磁波的传播特性，则砼管沟与周围物质接触的界面产生的

反射电磁波很明显。而钢筋砼管沟比路基土介质的电阻率较低，在瞬变电磁雷达视电阻率剖面上呈现低阻异常。

通过对比常规地质雷达异常图谱，瞬变电磁雷达在道路探测中特点如下：

1) 地质雷达以介电常数为差异，而瞬变电磁雷达以地下电阻率为差异，其对目标体异常解释更为简单、直观、清晰。

2) 由于地质雷达图像易受现场各种信号干扰，通常虚假异常多，后期处理难于识别、判译，而瞬变电磁雷达视电阻率成像解释结果更接近实际目标体。

3) 地质雷达频率高、功率小、穿透能力差、探测深度浅，而瞬变电磁雷达更适合于大深度探测，其横向分辨率可达厘米级，对不同含水率土性、不同管材分辨力较高。

5. 工程应用

城市道路下主要有地下管线、地下空洞、疏松体病害和岩土介质。下面分别结合实际工程介绍利用 TER 瞬变电磁雷达探测地下管线[8] [9]和道路病害实例。TER 雷达图谱解释是利用横向追踪视电阻率的变化来推演各种道路结构物和地下病害。

5.1. 探测地下管线

2017 年 05 月项目组利用瞬变电磁道路雷达在“一带一路高峰论坛”会前对国家大剧院周边进行地下管线安全复查。

由于地质雷达探测深度的局限性，本项目采用 TER 瞬变电磁道路雷达对地质雷达探测的异常进行抽检、复核及验证。现场布置了 6 条测线，由于瞬变电磁雷达异常解释简单、易判读，可对地质雷达的异常区平行验证，经与实际地下管线竣工图进行对比，完全满足了对地下管线安全普查的精度要求。图 11 为现场实际采集图，图 12、图 13 为 L5、L6 测线的实际解释图。检测结果与实际完全吻合。



Figure 11. On-site data collection around the National Center for the Performing Arts

图 11. 国家大剧院周边现场数据采集

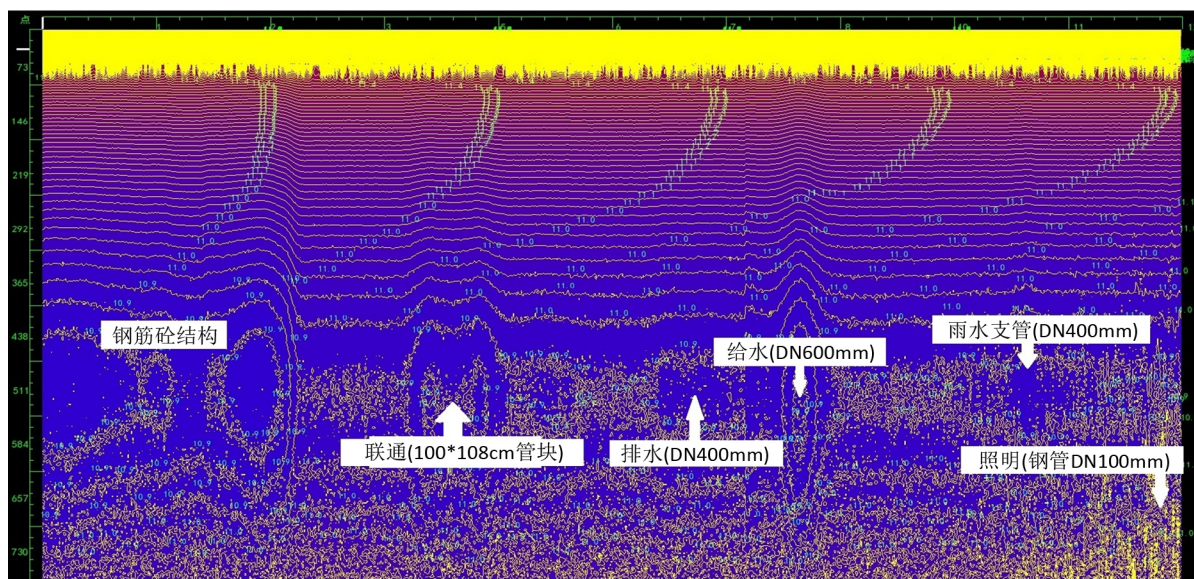


Figure 12. TER radar L-5 apparent resistivity profile

图 12. TER 雷达 L-5 视电阻率断面图

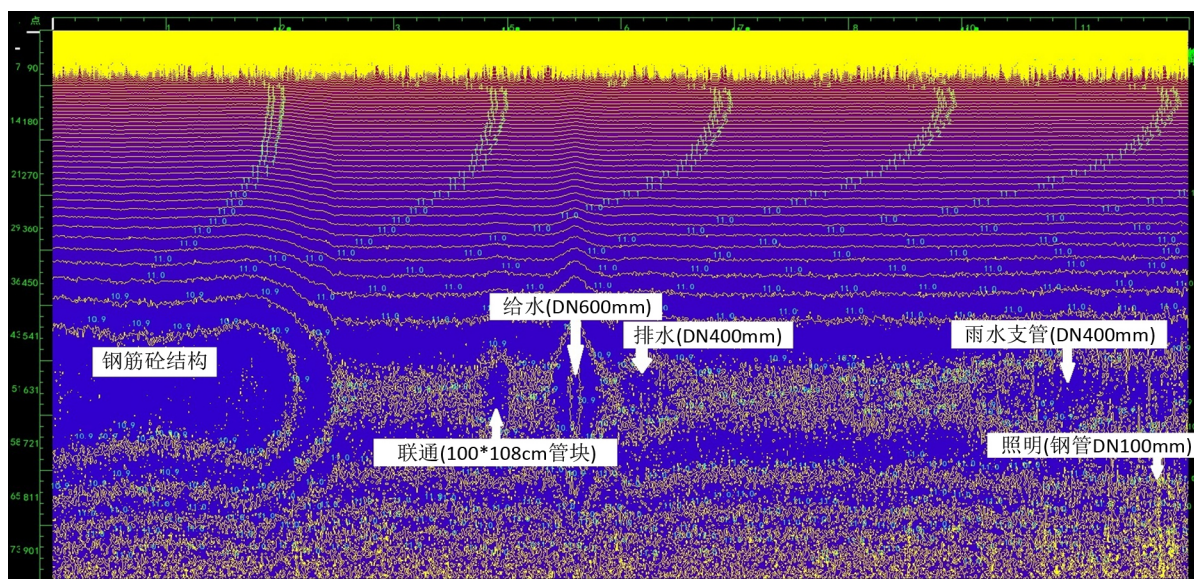


Figure 13. TER radar L-6 apparent resistivity profile

图 13. TER 雷达 L-6 视电阻率断面图

5.2. 探测道路病害

2018年8月,北京大兴亦庄同济南路路面局部区段出现路面沉降,经管理方要求对沉降部位进行探测。项目组利用TER瞬变电磁道路雷达进行现场方法试验,取得了预期效果。图14为某测线探测的地下管线与疏松体病害的视电阻率解释图。图15为某测线探测的不同埋深钢管和砼管与疏松体病害的视电阻率剖面解释图。

6. 结论

城市道路塌陷、地下管线事故每天都会发生,城市道路病害检测目前仍有许多问题,目前常规的方

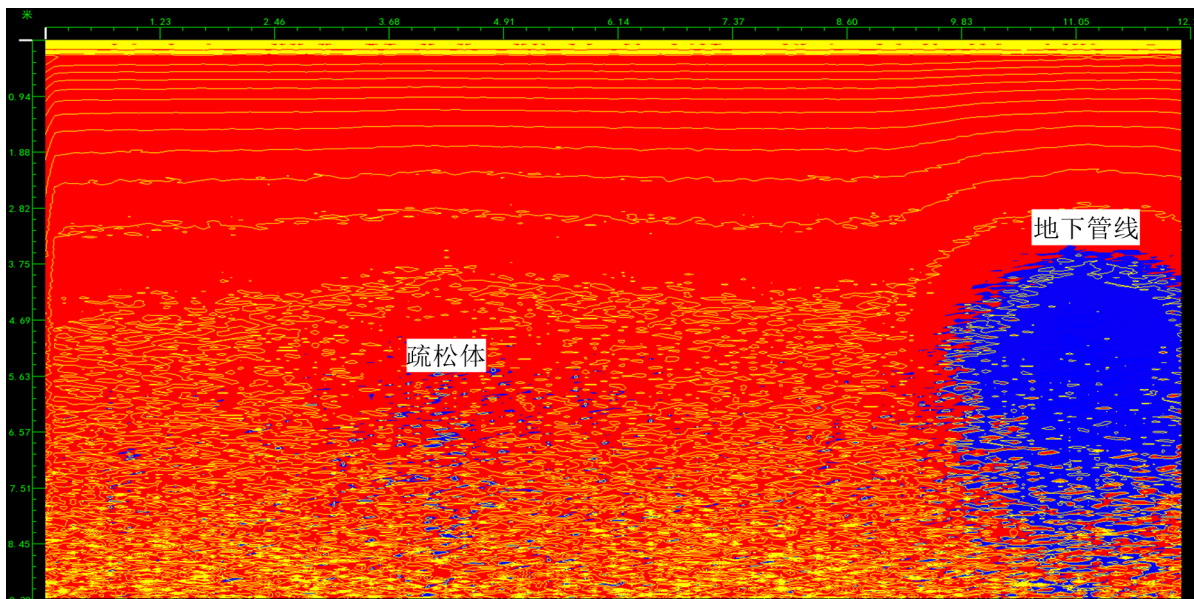


Figure 14. TER apparent resistivity diagrams for the exploration of underground pipelines and loose body diseases
图 14. TER 探测地下管线与疏松体病害的视电阻率解释图

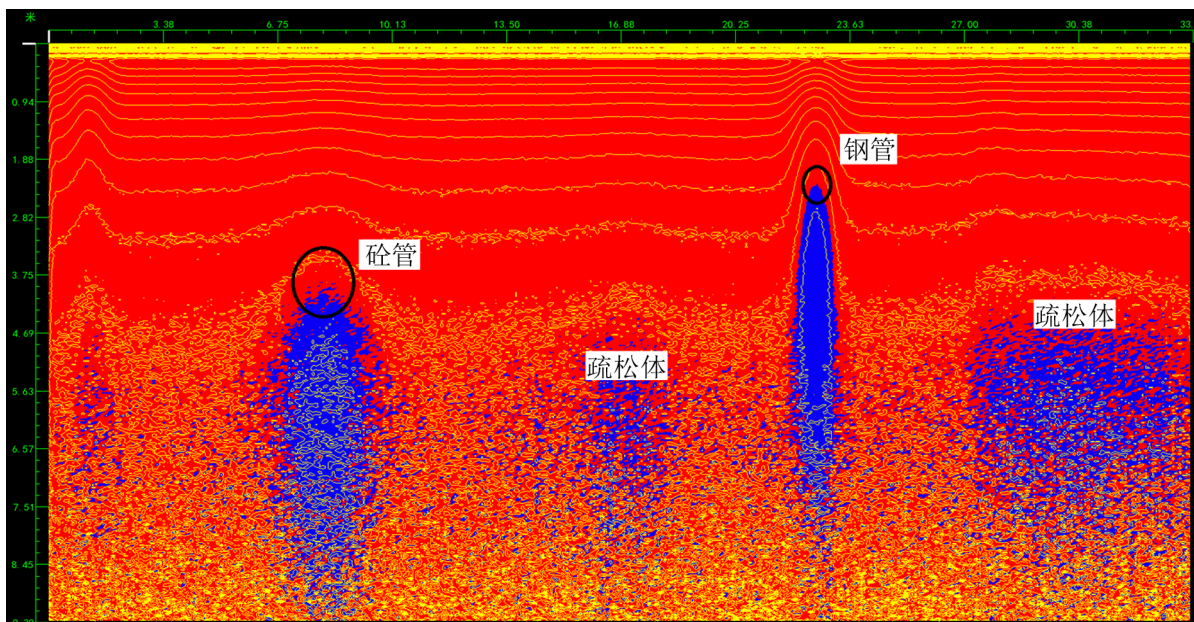


Figure 15. TER apparent resistivity profile interpretation of steel pipe, concrete pipe and loose body disease
图 15. TER 探测钢管、砼管与疏松体病害视电阻率剖面解释图

法仍是以地质雷达为主结合钻探法验证，但是地质雷达功率小、频率高、易受干扰、穿透能力低、探测深度有限。试验研究表明：瞬变电磁道路雷达功率大、频率低、视电阻率断面解释以及无损快速探测有望拓展城市道路质量检测的内容，通过进一步的试验与设备功能改进，将揭开瞬变电磁道路雷达在道路结构探测中新的应用方向[10]。

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] 嵇艳鞠, 林君, 于生宝, 等. ATTEM 系统中电流关断期间瞬变电磁场响应求解的研究[J]. 地球物理学报, 2006, 49(6): 1884-1890.
- [3] 赖刘保, 陈昌彦, 张辉, 等. 浅层瞬变电磁法在城市道路地下病害检测中的应用[J]. 地球物理学进展, 2016, 1(6): 2743-2746.
- [4] 叶英. 浅层瞬变电磁雷达[M]. 北京: 地质出版社, 2016.
- [5] 叶英, 侯伟清. 一种瞬变电磁雷达探测系统及探测方法[S]. 201410054703.2.
- [6] 嵇艳鞠. 浅层高分辨率全程瞬变电磁系统中全程二次场提取技术研究[D]: [博士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2004.
- [7] 白登海, Maxwell A Meju, 卢健, 等. 时间域瞬变电磁法中心方式全程视电阻率的数值计算[J]. 地球物理学报, 2003, 46(5): 697-704.
- [8] 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.
- [9] 林立松, 王吟泽, 孔娟, 等. 瞬变电磁三分量在地下管线勘察中的综合应用[J]. 测绘通报, 2016(S1): 195-196.
- [10] 叶英, 叶子剑, 张成平. 瞬变电磁结构雷达研究[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(4): 218-229.

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