



叶子剑,叶英,张成平. 2019. 欠阻尼中心回线瞬变电磁效应. 地球物理学进展,34(5):2106-2111, doi:10.6038/pg2019CC0391.

YE Zi-jian, YE Ying, ZHANG Cheng-ping. 2019. Transient electromagnetic effect of the underdamped center loop. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 34(5):2106-2111, doi:10.6038/pg2019CC0391.

欠阻尼中心回线瞬变电磁效应

Transient electromagnetic effect of the underdamped center loop

叶子剑^{1,2}, 叶英³, 张成平^{1,2}

YE Zi-jian^{1,2}, YE Ying³, ZHANG Cheng-ping^{1,2}

1. 北京交通大学,城市地下工程教育部重点实验室,北京 100044

2. 北京交通大学土木建筑工程学院,北京 100044

3. 北京市市政工程研究院,地下工程建设预报预警北京市重点实验室,北京 100037

1. Key Laboratory of Urban Underground Engineering of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

2. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

3. Beijing Key Laboratory of Underground Engineering Construction Prediction and Precaution, Beijing Municipal Engineering Research Institute, Beijing 100037, China

摘要 瞬变电磁法经过近百年的发展,在各行各业都有广泛的应用,常规的瞬变电磁法对于天线的选择都尽可能选取临界阻尼天线,以减少过渡过程的影响.基于地震波检波器原理的启发,地震波检波器采集震动信号的过程,实质上是震动衰减转换为电磁振荡阻尼过程,欠阻尼瞬变电磁接收回线采集电磁波的过程,其实质也是电磁振荡衰减过程,两者接收都是感应电压信号,因此,欠阻尼中心回线的采集原理和地震检波器相同.本文利用欠阻尼中心回线研究探测砼结构的瞬变电磁效应,同时和过阻尼天线进行对比,说明欠阻尼天线在特点条件下探测结构体具有较强的探测能力及较高的异常分辨能力,其拟地震波图谱显示便于对异常体形状的判译.这种装置将揭开瞬变电磁法在混凝土结构探测中新的应用方向.

关键词 中心回线;欠阻尼天线;瞬变电磁法;瞬变电磁雷达

中图分类号 P631

文献标识码 A

doi:10.6038/pg2019CC0391

Abstract After nearly a century of development, the Transient Electromagnetic Method (TEM) has been widely used in various fields. To reduce the influence of the transition process, conventional selection of antenna for the transient electromagnetic method is to select critical damping antenna as far as possible. Inspired by the principle of the seismic geophone, the process of seismic geophone collecting vibration signal essentially is the process of vibration attenuation converting into electromagnetic oscillation damping, meanwhile, the process of electromagnetic wave acquisition by an underdamped transient electromagnetic receiver essentially is the process of the electromagnetic oscillation attenuation, both of them are receive induced voltage signal. Therefore, the collection principle of the underdamped center loop is the same as that of the seismometer. In this paper, the underdamped center loop is used to study the transient electromagnetic effect in the detection of concrete structure, and the effect is compared with using overdamped antenna. It was concluded that the underdamped antenna under the characteristic condition of detection structure has strong ability, and abnormal high discernibility, and fitting seismic wave map shows that it is easy to distinguish abnormal body shape. The device will uncover new application direction of TEM in the detection of concrete structure.

Keywords Central loop; Underdamped antenna; Transient Electromagnetic Method (TEM); Transient Electromagnetic Radar (TER)

0 引言

瞬变电磁法因其探测深度及精度高、成本低、效率高等特点,历经近百年的发展,目前应用也很普遍.瞬变电磁法通常应用于金属矿产及石油资源的勘查、地下水、地热环境及工程勘查 (Danielsena *et al.*, 2003; Jingcun Yu *et al.*, 2008; 张平松等, 2012; 邢修举, 2019), 如利用瞬变电磁法基于岩

层电阻率变化对鄂尔多斯市的煤矿采空区域进行探测 (Guiju Wu *et al.*, 2016); 通过瞬变电磁法对水的敏感性对地下液化石油气储存中的水幕系统的有效性进行评估 (Fang Lin *et al.*, 2016); 以及利用瞬变电磁法对超前地质预报进行应用研究等 (段铮等, 2008; 薛国强和李貅, 2008; 李术才等, 2014). 除此之外, 现有研究利用瞬变电磁法进行工程质量方面的检测较少, 目前, 利用瞬变电磁法检测混凝土结构质量

收稿日期 2018-11-22; 修回日期 2019-09-17.

投稿网址 <http://www.progeophys.cn>

基金项目 东天山复杂地质特长公路隧道建设关键工程技术与应用自治区重大科技专项(2018A03003)子课题“隧道围岩精细分级与喷锚衬砌支护技术研究”(2018A03003-5)资助.

第一作者简介 叶子剑,男,1989年生,博士研究生,工程师,主要从事隧道及地下工程方面的研究工作.(E-mail: zijianyejtu@163.com)

还是一个比较新的领域.

由于常规的瞬变电磁的发射接收天线通常都是临界阻尼或过阻尼天线,而欠阻尼天线往往带来理论上的复杂推导与计算,在常规的瞬变电磁仪中很少采用.为此,本文通过研究欠阻尼中心回线装置,基于瞬变电磁雷达技术(叶英等,2014;叶英,2016;Zijian Ye *et al.*,2019),探索欠阻尼中心回线瞬变电磁雷达针对混凝土结构质量的测试和应用效果.

1 瞬变电磁的阻尼效应

阻尼是指任何振动系统在振动中,由于外界作用或系统本身固有的原因引起的振动幅度逐渐下降的特性,以及此特性的量化表征.瞬变电磁接收信号在欠阻尼装置下符合这个特征.

1.1 接收线圈的阻尼

如图1所示,瞬变电磁法是介质在一次电流脉冲场激励下会产生涡流,在脉冲间断期间涡流不会立即消失,在其周围空间形成随时间衰减的二次磁场.二次磁场随时间衰减的规律主要取决于异常体的导电性、体积规模和埋深,以及发射电流的形态和频率(白登海等,2003;薛国强等,2007).

目前,大部分TEM仪器野外工作时使用接收线圈观测感应电压,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2所示.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 为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,为并联在接收线圈两端的阻尼电阻,调节可以使得线圈的过渡过程处于临界状态,一般情况下 $R_r \ll R_a$.

在阶跃电流激励下,接收线圈有一定的响应,其响应特征方程为

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

对(1)式进行时间-频率拉普拉斯变换,可得瞬变电磁接收函数为

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

式中, $s = 2\pi if$ 为复变量,其中为接收线圈的响应频率; $K = \delta/\omega$, δ 为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为

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

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 $\varepsilon(t)$ 所对应接收的 $V(t)$.

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

$$K = \frac{\delta}{\omega} = \sqrt{\alpha} \left(\frac{1}{2R} \right) \sqrt{L/C} + \frac{1}{2} r \sqrt{C/L}, \quad (5)$$

式(1)~(5)中: $V(t)$ 为接收线圈输出电动势; $\delta = (rC + L/$

$R)/2LC$; 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; $\alpha = \omega \sqrt{|K^2 - 1|}$.

(1)当 $0 < K < 1$ 时的解为一对实部为负的共轭复根,系统时间响应具有振荡特征,接收系统处于欠阻尼状态;

(2)当 $K = 1$ 时的解为一对重实根,接收系统处于临界阻尼状态;

(3)当 $K > 1$ 时的解为一对互异实根,接收系统处于过阻尼状态.

如图3所示,线圈在供电、断电过程中,欠阻尼、过阻尼和临界阻尼不同的接收状态对接收信号造成不同的影响.

1.2 品质因数 Q

品质因数 Q 是标志欠阻尼振动系统的重要物理量,特别是在电磁振荡中它的意义更为突出.品质因数 $Q = \text{储能}/\text{耗能}$,定义为

$$Q = 2\pi \frac{t \text{时刻系统储存的能量}}{t \text{至} t+T \text{周期内系统耗散的能量}}. \quad (6)$$

当阻尼很小时, $\frac{\delta}{\omega} \ll 1$,又因为 $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} \approx \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$,所以, $E(t) = \frac{1}{2} kA^2 e^{-2\delta t}$.其中, $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2}$ 是阻尼因数, m 是振子质量, $\omega_0 = \frac{k}{m}$ 是振动的圆频率,是振子固有圆频率, k 是弹性系数.

如图4所示,当经历的时间间隔 Δt 恰为一个周期 T 时,因 T 很小,则系统在 t 至 $t+T$ 的一个周期内所耗散的能量可以写为

$$|\Delta E(t)| \approx 2\delta E(t) T. \quad (7)$$

根据定义 $Q = 2\pi \frac{E(t)}{\delta TE(t)} = \frac{\pi}{\delta T}$,由于 $T = \frac{2\pi}{\omega}$,则 $Q = \frac{\omega}{2\delta}$.

若引入弛豫时间 τ , $2\tau\delta = 1$,由式(8)可以看出, τ 的物理意义是系统储存的能量 E 耗散至 E/e 时所需要的时间.于是 Q 的表示式又可写为

$$Q = \omega\tau \approx \omega_0\tau, \quad (8)$$

从式(8)可看出, Q 就是在弛豫时间内,欠阻尼振动系统的相位变化量,它反映了此振荡系统的衰减特性. Q 值越高,衰减越缓慢.

2 “欠阻尼”中心回线装置

参考地震检波器的原理,我们设计了欠阻尼中心回线装置.

2.1 欠阻尼中心回线制作

如图5所示为欠阻尼中心回线及装置,外圈为发射线圈,内圈为接收线圈,接收线圈连接相应的电感电容元件.装置主振频率:460 kHz;信号频率:450 Hz;功率:0.6 W.该装置可利用二次场震荡产生的同相轴来分辨异常体的.

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

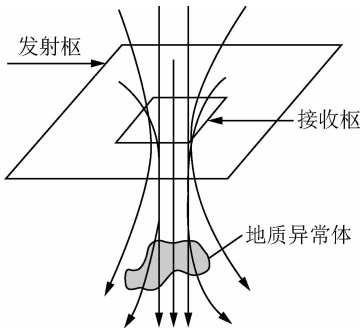


图1 瞬变电磁法原理

Fig. 1 Principle of transient electromagnetic method

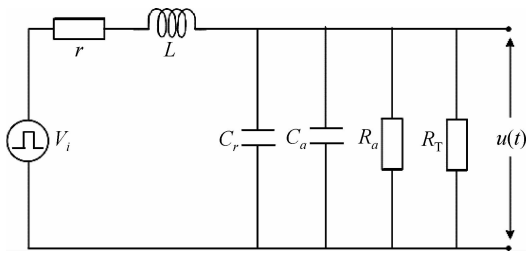


图2 接收线圈等效电路

Fig. 2 The receiving coil equivalent circuit

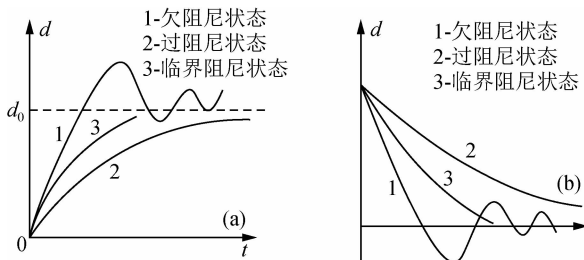


图3 供电(a)断电(b)感应电动势阻尼过程

Fig. 3 Power supply (a) power failure (b) induced electromotive force damping process

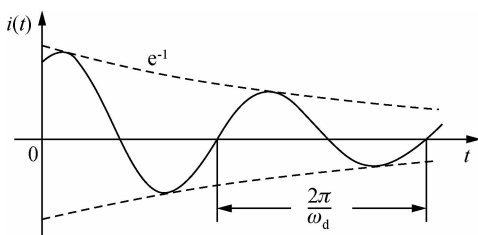


图4 震荡能量耗散曲线

Fig. 4 Oscillating energy dissipation curve

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.

而对于欠阻尼回线,根据需要调节匹配电阻,尽可能地提高阻尼的品质因数 Q ,让二次场的电磁震荡维持的时间更长,当然这也取决于二次场源的能量与周围介质电阻率的高低.

2.2 探测效果

为了研究与利用欠阻尼天线的特征,通过试验比较欠阻尼与过阻尼天线在异常分辨率和探测能力方面的差别.结合盾构隧道施工特点(叶子剑,2018),试验采用盾构管片(钢筋砼)如图7所示,测线如图中所示,主要测试管片(钢筋砼)内部钢筋分布的欠阻尼瞬变电磁效应.试验仪器为TER瞬变电磁雷达,仪器参数:发射6.25 Hz,占空比20%,接收频率26 k,测道数330.

(1)异常分辨率比较.通过分别利用欠阻尼与过阻尼天线在同一测线测试砼预制构件,仪器其他参数相同,图8为测试结果的视电阻率图谱,图8a为欠阻尼中心回线的结果,可看出过渡过程短;砼内部钢筋分布清晰;有清晰的同相轴使得异常分辨率较高;晚期抗干扰能力强.图8b为过阻尼中心回线的结果,可看出过渡过程长;砼内部钢筋早期不清晰;没有同相轴,较大的目标体有明显异常,分辨率低;晚期抗干扰能力低.

(2)探测能力比较.为了研究欠阻尼回线的探测能力,如图9所示,利用欠阻尼与过阻尼天线在同一测线分别测试砼预制构件的视电阻率图谱,仪器其他参数相同.图9a为欠阻尼中心回线的结果,可看出晚期视电阻率异常仍明显;图9b为过阻尼中心回线的结果,可看出视电阻率异常不明显.

2.3 拟地震波谱

在欠阻尼状态下,早期信号产生的振荡使得瞬变二次场出现拟地震波,这种震荡的电磁波在早期信号形成一系列稳态震荡,有规律震荡的同相轴与雷达波、地震波类似.欠阻尼中心回线瞬变电磁雷达软件设计了常见地震波各种波形图,如图10为感应电压波形曲线图,如图11为感应电压波密度图.图形设计主要便于同相轴追踪、结构异常比较与辨识.图12是经视电阻率计算的瞬变电磁拟地震波谱,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.由于切割震荡同相轴而显示出异常体的形状,这对于结构体病害和钢筋分布的准确定位提供了便利.

3 试验与应用

如图13所示,在铁板上方5 cm平行移动欠阻尼中心回线通过铁板,其视电阻率波谱图中可看到铁板的瞬变电磁效应,图中可看到断电早期的过渡场,由于一次场叠加,在铁板上部存在一次场异常影响,在一次场衰减完成后,进入二次场响应,由于采用欠阻尼回线接收,波形显示为系列拟地震波同相轴,在没有异常时,同相轴等间隔分布,有异常时,会切割同相轴显示异常体的规则形状.

图14为欠阻尼中心回线测试砼梁板的视电阻率波谱,砼梁板中由于配筋不同,发现了多处钢筋异常.图中早期仍有过渡过程影响,随后有一些列电磁波同相轴,均匀介质同

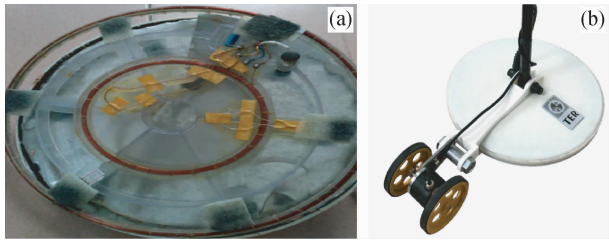


图5 欠阻尼中心回线及装置

(a)欠阻尼中心回线;(b)带测量轮驱动的发射接收一体装置.

Fig.5 Underdamping center loop and device

(a) Underdamping center loop; (b)Transmission receiving device with a measuring wheel.



图11 感应电压波密度

Fig.11 Induction voltage wave density

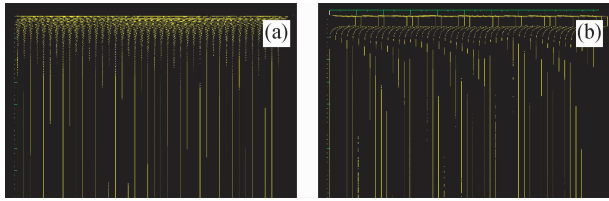


图6 欠阻尼与过阻尼感应电压曲线对比

(a)欠阻尼感应电压曲线;(b)过阻尼感应电压曲线.

Fig.6 Comparison of underdamped and overdamped induction voltage curves

(a) Underdamped induction voltage curve; (b) Overdamped induction voltage curve.

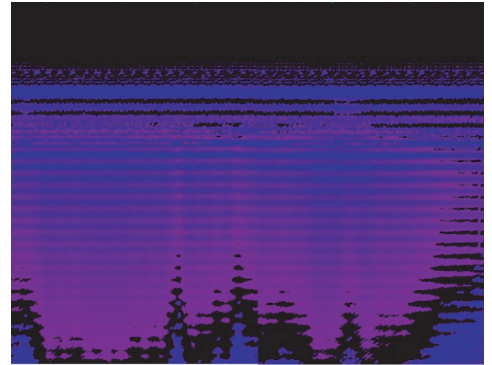


图12 拟地震波谱图

Fig.12 Simulating seismogram



图7 试验现场布置

Fig.7 Test site layout

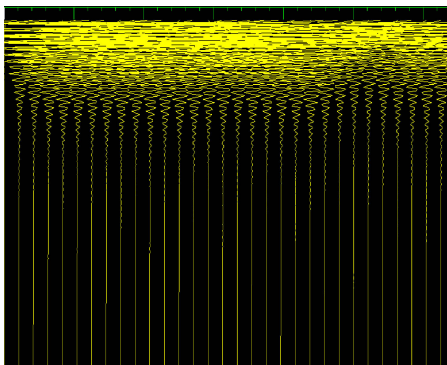


图10 感应电压波形曲线

Fig.10 Induction voltage waveform curve

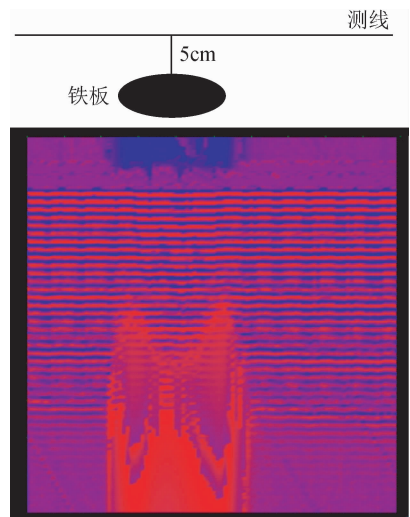


图13 测线通过铁板视电阻率波谱

Fig.13 The measuring line passes through the iron plate apparent resistivity spectrum

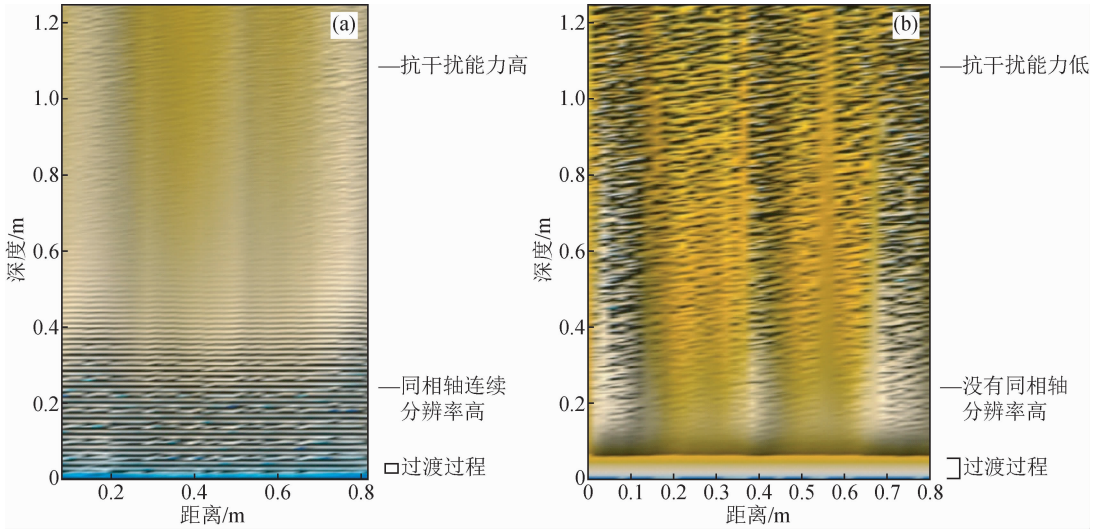


图 8 欠阻尼与过阻尼中心回线视电阻率比较

(a)欠阻尼中心回线;(b)过阻尼中心回线.

Fig. 8 The apparent resistivity comparison of underdamped and overdamped center loop

(a) Underdamped center loop; (b) Overdamped center loop.

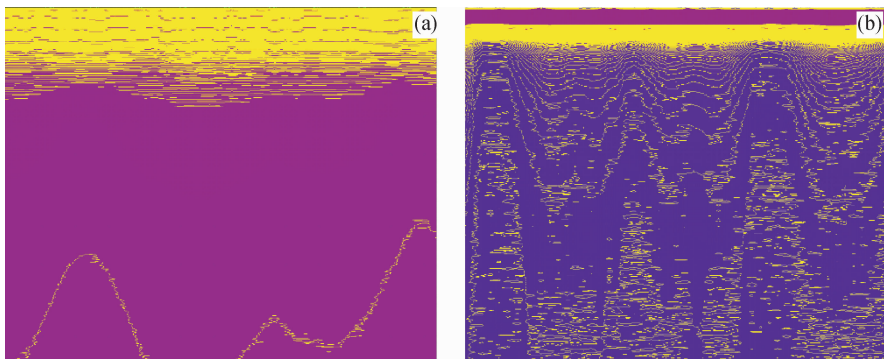


图 9 欠阻尼与过阻尼中心回线视电阻率比较

(a)欠阻尼中心回线;(b)过阻尼中心回线.

Fig. 9 The apparent resistivity comparison of underdamped and overdamped center loop

(a) Underdamped center loop; (b) Overdamped center loop.

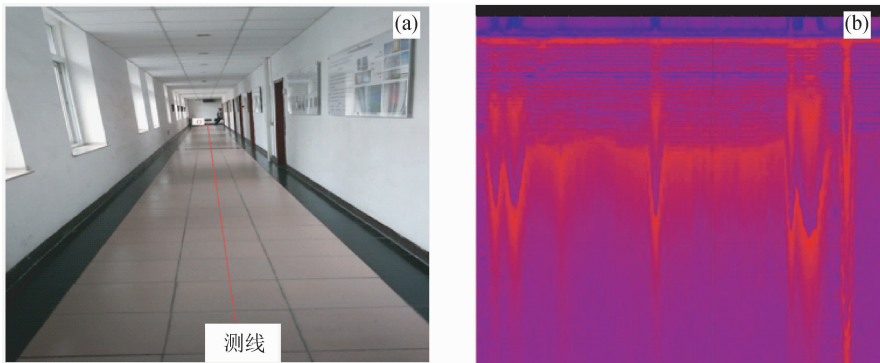


图 14 砼梁板视电阻率波谱

(a)现场测线布置;(b)局部段视电阻率波谱.

Fig. 14 Apparent resistivity spectrum of concrete beam plate

(a) Underdamped center loop; (b) Overdamped center loop.

相轴会连续、规则分布,遇到钢筋或结构病害异常时,这些异常会切割或影响同相轴的分布,从而可探测到异常的形状,由于钢筋电阻率较低,其异常体往往向下延伸较多,若异常体电阻率略高,其异常体形状会扁平,这也是判断异常体材质的方法。

4 结 论

通过对欠阻尼中心回线的瞬变电磁效应的研究,该天线充分利用电磁震荡信号,与地震波检波器信号相似,可采用系列地震勘探的数据处理方法,将电磁信号拟地震波处理,增强探测能力,具有较高的异常分辨能力,其拟地震波图谱显示便于对异常体形状的判译。这种装置将揭开瞬变电磁法在混凝土结构探测中新的应用方向。

致 谢 感谢审稿专家提出的修改意见和编辑部的大力支持!

References

- Bai D H, Maxwell A Meju, Lu J, *et al.* 2003. Numerical calculation of all-time apparent resistivity for the central loop transient electromagnetic method [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 46(5): 697-704.
- Danielsen JE, Auken E, Jørgensen F, Søndergaard V, Sørensen KI. 2003. The application of the transient electro-magnetic method in hydrogeophysical surveys[J]. *J Appl Geophys* 53:181-198.
- Duan Z, Li T B, Li Y S, *et al.* 2008. Application of TEM for Geologic Prediction at Tongluoshan Tunnel [J]. *Modern tunnelling technology (in Chinese)*, 45(2): 58-62, 78.
- Li S C, Sun H F, Li X, *et al.* 2014. Advanced geology prediction with parallel transient electromagnetic detection in tunnelling [J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering (in Chinese)*, 33(7): 1309-1318.
- Lin F, Chen S G, Ma G W. 2016. Transient electromagnetic detection method in water-sealed underground storage caverns [J]. *Underground space*, 1(1): 44-61.
- Wu G J, Yang G L, Tan H B. 2016. Mapping coalmine goaf using transient electromagnetic method and high density resistivity method in Ordos City, China [J]. *Geodesy and geodynamics*, 7(5): 340-347.
- Xing Xiuju. 2019. 3D transient electromagnetic advanced detection technology for karst tunnel[J]. *Tunnel construction* 39(2): 287-293.
- Xue G Q, Li X. 2008. The technology of TEM tunnel prediction imaging [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 51(3): 894-900.

- XUE Guo Qiang, LI Xiu, DI Qing Yun. 2007. The progress of TEM in theory and application [J]. *Progress in Geophysics (in Chinese)*, 22(4): 1195-1200.
- Ye Y. 2016. Shallow transient electromagnetic radar [M]. Beijing: Geological Publishing House.
- Ye Y, Hou W Q, Xu P. 2014. A transient electromagnetic radar detection system & detection method [P]. 201410054703. 2, invention patent.
- Ye Zijian. 2018. Construction risk analysis for shield tunnel undercrossing existing structure[J]. *Construction technology*, 47(S4):1294-1297.
- Ye Z J, Ye Y. 2019. Comparison of Detection Effect of Cavities Behind Shield Tunnel Segment Using Transient Electromagnetic Radar and Ground Penetration Radar [J]. *Geotechnical and Geological Engineering*, 37(5): 4391-4403, doi: 10.1007/s10706-019-00916-y.
- YU Jing-cun, WANG Yang-zhou, LIU Jian, *et al.* 2008. Time-depth conversion of transient electromagnetic method used in coal mines [J]. *J China Univ Mining & Technol*, 18:0546-0550.
- Zhang P S, Li Y S, Hu X W. 2012. Applied analysis of advanced detection for containing water body ahead of tunnel by transient electromagnetic method[J]. *Rock and Soil Mechanics (in Chinese)*, 33(9):2749-2753.

附中文参考文献

- 白登海, Maxwell A Meju, 卢健, 等. 2003. 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*, 46(5): 697-704.
- 段铮, 李天斌, 李育枢, 等. 2008. 瞬变电磁法超前地质预报技术在铜锣山隧道中的应用[J]. *现代隧道技术*, 45(2): 58-62, 78.
- 李术才, 孙怀凤, 李貅, 等. 2014. 隧道瞬变电磁超前预报平行磁场响应探测方法[J]. *岩石力学与工程学报*, 33(7): 1309-1318.
- 邢修举. 2019. 岩溶隧道瞬变电磁三维超前探测技术研究[J]. *隧道建设*, 39(02):121-127.
- 薛国强, 李貅. 2008. 瞬变电磁隧道超前预报成像技术[J]. *地球物理学报*, 51(3): 894-900.
- 薛国强, 李貅, 底青云. 2007. 瞬变电磁法理论与应用研究进展[J]. *地球物理学进展*, 22(4):1195-1200.
- 叶英. 2016. 浅层瞬变电磁雷达[M]. 北京: 地质出版社.
- 叶英, 侯伟清, 许鹏. 2014. 一种瞬变电磁雷达探测系统及探测方法[P]. 201410054703. 2, 发明专利.
- 叶子剑. 2018. 盾构穿越既有构筑物的施工风险分析[J]. *施工技术*, 47(S4):1294-1297.
- 张平松, 李永盛, 胡雄武. 2012. 坑道掘进瞬变电磁超前探水技术应用分析[J]. *岩土力学*, 33(9):2749-2753.