

Research and Application of Effective Distance of Transient Electromagnetic Forward Detection in Excavation Roadway

Zengqing Cheng

China General Administration of Coal Geology Geophysical Exploration Research Institute, Zhuozhou Hebei
Email: chengzq287@126.com

Received: Feb. 7th, 2018; accepted: Feb. 19th, 2018; published: Feb. 26th, 2018

Abstract

In this paper, the transient electromagnetic advanced detection of tunneling working roadway is studied, which is a function of the rock resistivity, electromagnetic wave propagation time and transmission line frame size in the vertical direction. In mine normal geological conditions, transient electromagnetic field is a symmetric field in front of the heading face in geological structure, under the condition of full space transient electromagnetic field is the symmetry of the transient electromagnetic field of a symmetric destruction, which is a symbol of heading face water. The transient electromagnetic field near field high speed, advanced speed is low, heading off the blind spot detection is generally 13 m, SNR related transient electromagnetic detection distance and instrument system, the instrument system signal-to-noise ratio is larger than 2, which can effectively detect the abnormal flood 100 m ahead of excavation face.

Keywords

Transient Electromagnetic, Detection, Mining, Water Area, Tunnel Excavation

掘进工作面瞬变电磁超前探测积水区有效距离的研究与应用

程增庆

中国煤炭地质总局地球物理勘探研究院, 河北 涿州
Email: chengzq287@126.com

收稿日期: 2018年2月7日; 录用日期: 2018年2月19日; 发布日期: 2018年2月26日

摘要

本文研究了掘进工作面瞬变电磁超前探测距离的问题,瞬变电磁场在垂直方向传播速度是岩石电阻率、电磁波传播时间及发射线框尺寸的函数。在矿山巷道正常地质条件下瞬变电磁场是一个对称的场,在掘进工作面前方遇到地质构造时,全空间条件下瞬变电磁场的对称性就遭到破坏,这是识别掘进工作面前方构造和水害的一个重要标志。瞬变电磁场近场速度较高,随着旅行时间的增加瞬变电磁波的速度降低;掘进工作面的探测盲区一般为13 m,瞬变电磁探测距离与仪器系统的信噪比相关,在仪器系统信噪比大于2时可以有效地探测到掘进工作面前方100 m的水害异常。

关键词

瞬变电磁, 探测, 采空, 积水区, 掘进工作面

Copyright © 2018 by author 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

煤矿利用瞬变电磁法探测掘进工作面前方积水区及富水构造的研究报道的较多,但是探测距离研究的较少,报道研究成果关注探测效果的较多。实际做法是根据二次场衰减曲线的特征判断地下地质体的电性、性质、规模和产状等,结合地质资料推断解释断层、采空区、采空积水区、陷落柱等地质问题[1] [2] [3] [4] [5]。往往是根据异常特征结合掘进资料进行综合解释。对于瞬变电磁的探测深度,闫述(2009)等人用时频分析详细研究了瞬变电磁探测深度问题[6]。

瞬变电磁法应用于煤矿掘进工作面超前探测起源于1992年,已广泛应用于各种找矿和地质灾害调查工作中,特别是在煤矿采空积水区探测中,已成为煤矿安全工作主要手段之一。目前由于各勘探单位采用的仪器和工作方法不同,探测结果各异,甚至由于选择不当给煤矿安全隐患排查工作带来困难或误导[7]-[13]。

对于煤矿井下实际条件和施工场地的限制,探测装置多采用重叠回线装置,井巷条件下的线框尺寸受到限制;线框匝数选取太多则自偶磁感应影响过大,影响探测效果[14]。本研究在探测盲区(最小探测距离)和最大探测距离进行了研究。

2. 瞬变电磁波的传播速度与旅行时的关系

重叠回线瞬变电磁法超前探测的视电阻率公式是一个复杂的函数关系式,这个表达式不是电阻率与探测距离的显式关系式。用电磁波的传播速度 V_d 来计算视电阻率视深度剖面可以近似得到电阻率与探测距离的关系式。将探测距离 $D(t)$ 定义为电磁波速度对于传播路径的积分函数:

$$D(t) = \int_0^t V_d(\rho, t') dt', \quad (1)$$

式中 ρ 是地层的电阻率, t 是电磁波的传播时间。利用公式1可以得到视电阻率视探测距离剖面。为了研究问题的方便,我们选择瞬变电磁感应磁场变化率 dA/dt 最大值定义为传播速度定义 V_d 。当瞬变电磁仪器关断发射电流后,瞬变电磁感应磁场 A 会在岩层中传播和随时间的增长而发生衰减,直至瞬变电磁仪

器不能纪录到有效信号为止。实际上瞬变电磁的传播与衰减过程就是瞬变电磁感应磁场以 dA/dt 速度衰减与传播的过程。

在一个给定的距离 H , 瞬变电磁感应磁场变化率 dA/dt 从初始为零的状态递增达到最大值后再衰减到零, 晚期基本上就是噪声。我们把在这个深度 z 的 dB/dt 达到最大值的时间定义为垂向时间 $T_p(z)$ 。对于一个给定的时间 t , 我们把 dB/dt 达到最大值时的深度定义为垂向深度 $D(t)$ 。因此, 把某点的 dB/dt 最大值的传播速度定义为 V_d 。

$$V_d = dD/dt. \quad (2)$$

有

$$C_1(\gamma) = e^\gamma \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\Gamma(k+5/2)}{k!(k+1)!} (-\gamma)^k \quad (3)$$

或,

$$D = \frac{a}{2\gamma^{1/2}} \left\{ C_1(\gamma) + [C_1^2(\gamma) + 2]^{1/2} \right\}, \quad (4)$$

现在, 我们用公式(4)来计算传播速度,

$$V_d = \frac{\partial D}{\partial t} = \frac{\sqrt{\gamma}}{\sigma\mu a} \left[C_1 + (C_1^2 + 2)^{1/2} + \left(1 + \frac{C_1}{(C_1^2 + 2)^{1/2}} \right) \gamma C_2 \right], \quad (5)$$

其中 $C_2(\gamma) = \frac{3\sqrt{\pi}}{4} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(2k-1)!!}{k!(k+2)!} \left(\frac{\gamma}{2}\right)^k$, 对于一个装置为偶极子, (5)式可以简化为 $V_d' = \lim_{\gamma \rightarrow 0} V_d = \frac{2.898}{(\pi\sigma\mu t)^{1/2}}$ 。

瞬变电磁波的传播速度与旅行时间的平方根成反比, 当瞬变电磁场在沿着掘进工作面向前传播时, 瞬变电磁波的高频分量相对于低频分量衰减要快, 在晚期的时候烟圈频带宽度逐渐地变窄, 逐步由宽频向由低频过度, 此时瞬变电磁波的传播速度由快变慢。从图 1 可以看出, 早期场瞬变电磁波的传播速度较快, 在传播大于 1 ms 时瞬变电磁波的传播速度下降了 3.12 倍, 由零时刻的 73,120 m/s 下降到 23,122 m/s, 在晚期速度下降速率为 1300 m/s。这就是说瞬变电磁波的传播速度早期速度较高, 晚期速度较低。在早期速度下降速率大于晚期。

3. 关断时间观测与掘进工作面前方盲区

掘进工作面前方探测盲区与瞬变电磁仪器的关断时间相关, 瞬变电磁仪关断时间是指一次场对二次场影响的截止时间, 关断时间是瞬变电磁仪的重要技术指标之一, 关断时间长, 将失掉浅层信号, 压制和减弱二次场强度, 直接影响探测效果。回线边长、线圈匝数、关断性能、波形(振荡电路)、及发送电流大小与关断时间大小相关[15] [16]。关断时间表达式为:

$$t_{of} = \frac{L}{R} \ln \frac{2V}{v+1.5}$$

L 为发送回线电感; R 为回线的电阻; V 为加于回线的电压。

通过井下试验计算: 采用新的施工方法进行瞬变电磁试验工作, 分别采集了两组数据, 每组数据共计 80 道, 每组数据重复 10 次, 共 800 个有效数据。我们在同一深度, 计算 10 组视电阻率的均方误差, 数据均方误差大于 15% 的数据都予以剔除, 这样通过数据计算, 算出有效的探测距离, 结果见图 2, 此次计算可以发现第 32 道数据之前基本为一次场影响, 为无效探测数据, 根据反演视深度即 13 米左右, 这就是瞬变电磁仪器的探测盲区。

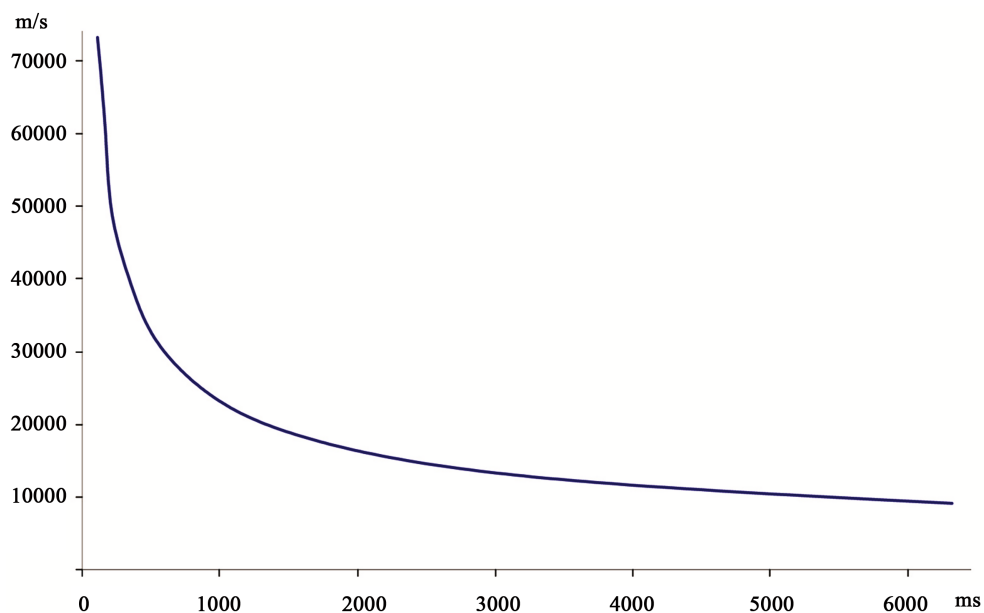


Figure 1. Transient electromagnetic wave propagation velocity and travel time diagram
图 1. 瞬变电磁波的传播速度与旅行时关系图

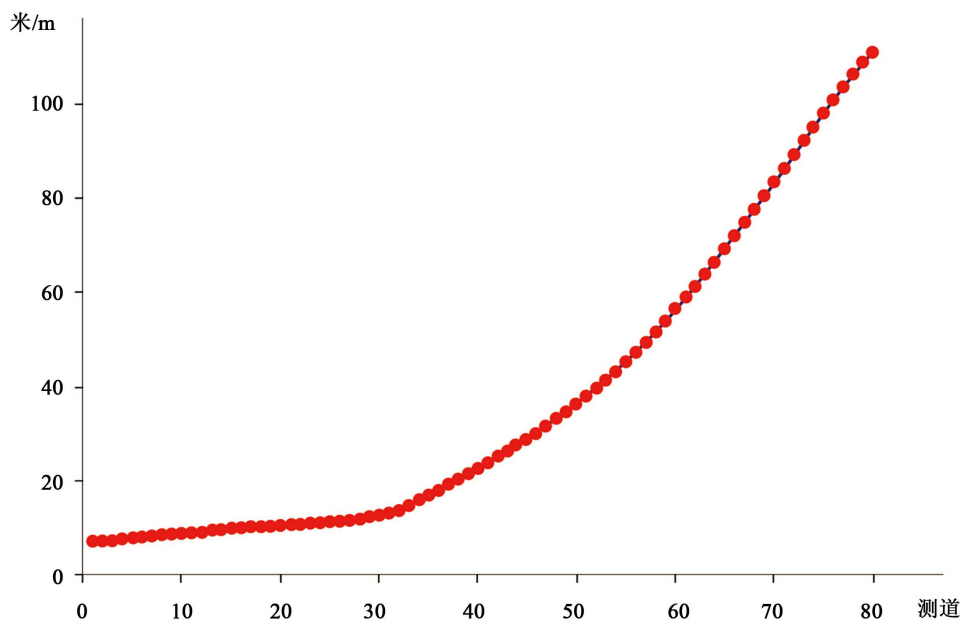


Figure 2. Inversion result map of blind area in inversion of actual data
图 2. 实际资料反演盲区反演成果图

4. 瞬变电磁有效探测距离

4.1. 掘进工作面瞬变电磁场的特征

对于频率域的一个电磁场，理想情况下对于一个单频的电磁波可以在任何一个深度传播，因此在理论上来说，瞬变电磁场是没有探测深度限制的，见图 3 所示，对于重叠回线装置模拟了全空间条件下瞬变电磁场的传播特征，该图示是在在全空间条件下瞬变电磁场在垂直于巷道瞬变电磁场的变化情况，在

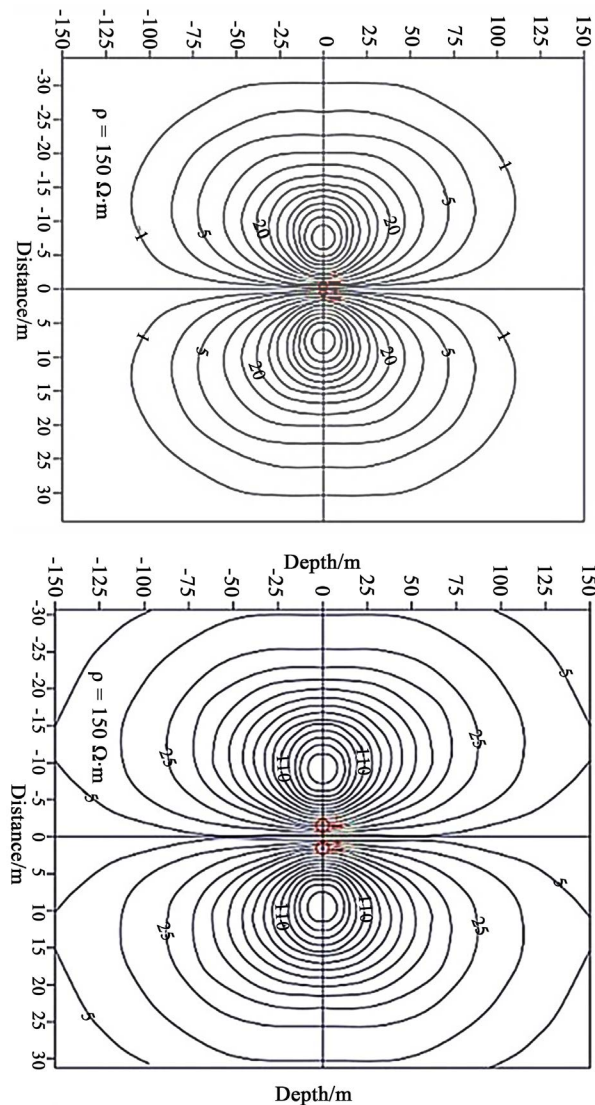


Figure 3. Transient electromagnetic simulation snapshot of different wire frame sizes; The device of $3\text{ m} \times 3\text{ m}$; Below is the $1\text{ m} \times 1\text{ m}$

图3. 不同线框尺寸的瞬变电磁场模拟快照图, 上为 $3\text{ m} \times 3\text{ m}$, 下为 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$

巷道正前方场强最弱, 是一个对称的图形, $3\text{ m} \times 3\text{ m}$ 和 $1\text{ m} \times 1\text{ m}$ 的装置获得的电磁场的形态是一致的, 只是他们的场强不一致, 前者场强大于后者。

4.2. 瞬变电磁波的探测距离

理论上讲瞬变电磁的探测距离可以不受限制, 只要瞬变电磁仪器的内部噪声足够小和勘探系统的噪声足够低, 对于小的线框装置也可以探测较远的距离, 但是实际上瞬变电磁仪器勘探系统的噪声是不能足够的小, 目前瞬变电磁波的有效传播距离采用趋附深度 $H = 0.55 \left(\frac{L^2 I \rho}{\eta} \right)^{\frac{1}{5}}$ 来表达, 假设其中 I 为发射电流 2.6 安, L 为发送回线边长 2 米; ρ 为迎头前方层电阻率 200 欧姆米, η 为最小可分辨电平 9.9×10^{-8}

伏特/米，在信噪比为 1 时计算得 74 米，即最大探测距离为 74 米左右；在信噪比为 2 时计算得 85 米，即最大探测距离为 85 米左右；在信噪比为 10 时计算得 118 米，即最大探测距离为 118 米左右。假设其中 I 为发射电流 2.6 安， L 为发送回线边长 3 米； ρ 为迎头前方层电阻率 200 欧姆米， n 为最小可分辨电平 9.9×10^{-8} 伏特/米，在信噪比为 1 时计算得 87 米，即最大探测距离为 87 米左右；在信噪比为 2 时计算得 100 米，即最大探测距离为 100 米左右；在信噪比为 10 时计算得 138 米，即最大探测距离为 138 米左右(图 4)。

4.3. 煤矿井下超前水害探测实例

井下瞬变电磁探测成果，共推测出 3 处采空冒落带弱富水区，2 处采空旧巷不积水区，如图 5 所示，

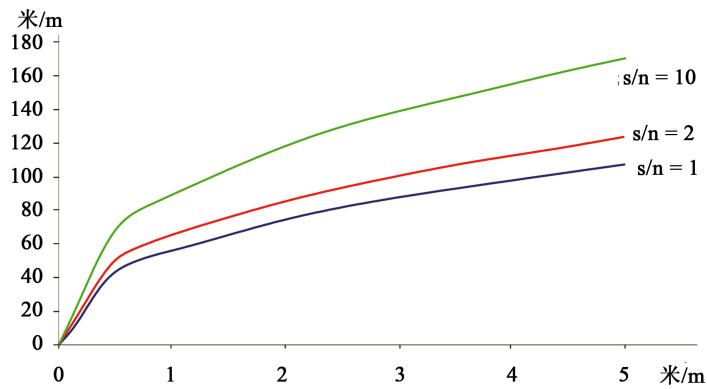


Figure 4. Relation diagram of detecting distance of transient electromagnetic field and device size and signal to noise ratio of minimum signal
图 4. 瞬变电磁场探测距离与装置尺寸及最小信号信噪比关系图

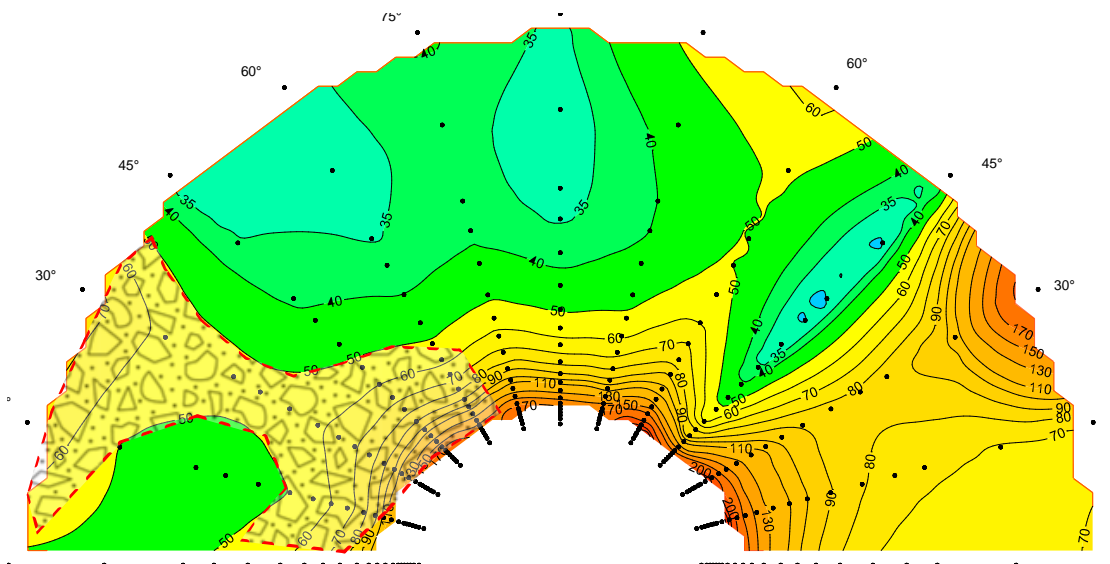


Figure 5. The results of underground integrated geophysical exploration and exploration. Fan sector is the result of underground transient electromagnetic detection, the middle rectangular column is DC electrical detection results, the blue area is low resistivity, and yellow is high resistivity

图 5. 井下综合物探探测成果图，扇形区域为井下瞬变电磁探测成果图，中间长方形柱子为直流电法探测成果图，蓝色区域为低电阻率，黄色为高电阻率

扇形区域为瞬变电磁探测成果，扇形中间的柱子为直流电法探测成果。该图解释三处弱富水区，3处弱富水区分别位于：迎头左侧15°~左侧60°扫描区之间，距离迎头30~100 m范围内；迎头前方32~36 m范围；迎头右侧15°~右侧45°扫描区之间，距离迎头30~100 m范围内。采空冒落带不含水区位于迎头前方38~46 m、50~68 m范围区段，为直流电法异常区。由于实煤的电阻率性质是高阻的，但是与老空巷相比其电阻率要小的多，表现为相对低阻，这就是直流电法高阻划为老空异常的依据。

5. 结论

瞬变电磁场近场速度较高，晚期速度较低，掘进工作面瞬变电磁法的探测盲区一般为13 m，全空间条件下瞬变电磁场是一个对称的场，在瞬变电磁场的对称性遭到破坏时就是地质异常的反应，这是识别掘进工作面前方水害的一个重要标志，瞬变电磁探测距离与仪器系统的信噪比相关，在仪器系统信噪比大于2时可以有效地探测到掘进工作面前方100 m的有效探测距离。随着瞬变电磁场研究的进一步深入和观测技术的进步，瞬变电磁方法在煤矿含水构造探测中将发挥重要作用，在煤矿安全地质中具有较广泛的应用前景。

参考文献 (References)

- [1] 刘树才, 岳建华, 刘志新. 煤矿水文物探技术与应用[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2005.
- [2] 韩德馨, 彭苏萍. 我国煤矿高产高效矿井地质保障系统研究回顾及发展构想[J]. 中国煤炭, 2002, 28(2): 5-10.
- [3] 程增庆, 王肖颖, 廖萌, 等. 三维地震横向分辨率的研究[J]. 石油地球物理勘探增刊, 1996, 31(1): 778-781.
- [4] 祁民, 张宝林. 高分辨率预测地下复杂采空区的空间分布特征 - 高密度电法在山西阳泉某复杂采空区中的初步应用研究[J]. 地球物理学进展, 2005, 3(21): 304-306.
- [5] 余东俊. 瞬变电磁法在隧道超前预报中的应用和效果研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [6] 闫述, 石显新, 陈明生. 瞬变电磁的探测深度问题. 地球物理学报[J]. 2009, 52(6): 1583-1591.
- [7] 薛国强, 邓湘. 瞬变电磁法对薄层的探测能力[J]. 石油地球物理勘探, 2007, 42(6): 709-713.
- [8] Shuck, E.L., Davis, T.L. and Benson, R.D. (1996) Multicomponent 3-D Characterization of a Coalbed Methane Reservoir. *Geophysics*, **61**, 315-330. <https://doi.org/10.1190/1.1443961>
- [9] 曲寿利. 全方位P波属性裂缝检测方法[J]. 石油地球物理勘探, 2001, 36(4): 390-397.
- [10] 段铮. 瞬变电磁法在隧道超前地质预报中的应用及解译分析[D]: [硕士学位论文]. 成都理工大学, 2008.
- [11] 彭苏萍, 凌标灿. 综采放顶煤工作面地震CT探测技术应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 18(3): 472-476.
- [12] 郑怀昌, 李明. 地下采空区危险性及其分析[J]. 矿山严厉与顶班管理, 2005, 22(4): 127-129.
- [13] 卫桂玲. 中美矿难比较分析及警示[J]. 当代经济, 2009(1): 50-52.
- [14] 梁爽, 李志民. 瞬变电磁法在阳泉二矿探测积水采空区的效果分析[J]. 煤田地质与勘探, 2003, 31(4): 49-51.
- [15] 刘青华, 王祝文. 煤矿采空区及塌陷区的地球物理探查[J]. 煤炭学报, 2005, 34(1): 67-70.
- [16] 于生宝, 王忠, 嵇艳鞠, 林君. 瞬变电磁法浅层探测技术[J]. 电波科学学报, 2006, 21(2): 284-287.

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