

何继善教授从事地球物理工作 60 周年学术成就回顾

汤井田^{1,2}, 戴前伟^{1,2}, 柳建新^{1,2}, 朱自强^{1,2}, 李帝铨^{1,2}

- (1. 中南大学 地球科学与信息物理学院, 长沙 410083;
2. 中南大学 有色金属成矿预测教育部重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 何继善教授, 我国著名地球物理学家、教育家、工程管理学家, 我国电(磁)法集大成者之一。1934 年出生于湖南省浏阳县。1960 年毕业于长春地质学院物探系。1994 年当选为中国工程院首批院士。曾任中南工业大学校长、中国有色金属学会副理事长、中国地球物理学会副理事长、中国工程院能源与矿业工程学部主任、湖南省科协主席; 1991 年~2001 年担任《中国有色金属学报》和《中国有色金属学报(英文版)》首任主编; 现任湖南省科协名誉主席、中国工程院第五届主席团成员、工程管理学部常委、美国勘探地球物理学家协会(SEG)终身会员。何继善教授长期从事地球物理研究, 学术成就卓越。创立了双频激电法, 发明了双频激电仪; 提出了三元素群的自封闭加法, 实现了 2ⁿ 系列伪随机信号的快速递推编码, 创立了伪随机信号电法体系; 创立了高分辨率检测堤坝管涌渗漏入水口的“流场法”, 为病险水库隐患探测和汛期堤坝查险提供了必不可少的技术支撑和科学抢险决策依据; 统一了频率域电磁法全区电阻率的定义和算法, 创立了广域电磁法, 为电磁勘探开辟了崭新的研究领域; 创建了中国第一个以地电场与观测系统为特色的国家级重点学科; 发明了一系列具有国际先进水平和自主知识产权的地电场观测仪器和装备, 为中国资源勘探和工程勘察事业作出了重大贡献。他创立和发展的以伪随机信号电磁法和双频激电法为特色的勘探地球物理理论体系, 被国际上誉为应用地球物理界的一重大事件。他的研究成果和学术思想对中国地球物理学的发展有重要指导意义。

关键词: 何继善; 地球物理; 双频激电法; 伪随机信号; 拟流均法; 广域电磁法

中图分类号: **文献标志码:** A

Academic achievements of Professor HE Ji-shan dedicated to geophysics for six decades

TANG Jing-tian^{1,2}, DAI Qian-wei^{1,2}, LIU Jian-xin^{1,2}, ZHU Zi-qiang^{1,2}, LI Di-quan^{1,2}

(2. School of Geosciences and Info-Physics, Central South University, Changsha 410083, China;

1. Key Laboratory of Metallogenic Prediction of Nonferrous Metals, Ministry of Education,
Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Professor HE Ji-shan is a famous geophysicist, educator, engineering management expert and one of the masters who epitomize the electromagnetic methods in China. He was born in Liuyang County, Hunan Province in 1934, graduated from the Department of Geophysics, Changchun College of Geology in 1960. He was elected to be an academician of the Chinese Academy of Engineering in 1994. He once served as the president of Central South University of Technology, the vice chairman of the Nonferrous Metals Society of China, the vice president of Chinese Geophysical Society, the director of Energy and Mineral Engineering Division of Chinese Academy of Engineering, the Chairman of Hunan Association for Science and Technology, and the chief editor of *The Chinese Journal of Nonferrous Metals and Transactions of Nonferrous Metals Society of China* from 1991 to 2001. Currently, he is not only the honorary chairman of Hunan Association for science and technology, but also the fifth presidium member and a member

of the Standing Committee of the Division of Engineering Management of the Chinese Academy of Engineering, as well as a life member of the Society of Exploration Geophysicists. Professor HE Ji-shan has been involved in the geophysics research for a long time to make remarkable academic achievements. He created the Dual Frequency IP method and invented the Dual Frequency IP instrument. He has not just proposed the closed addition in a three-element set, but achieved the fast recursive coding of 2^n Sequence Pseudo-Random Signal, and established the electrical system based on Pseudo-Random Signal as well. Moreover, he has established the Flow-Field method with high-resolution to detect the water inlet of the piping and seepage in dykes and dams, which provides the essential technical support and the scientific decision-making basis of emergency restoration for detecting the hidden dangers of dilapidated reservoirs and investigating the hazards of embankments in flood season. He has unified the definition and algorithm of the entire field resistivity of the frequency domain electromagnetic methods, and created the Wide Field Electromagnetic method to open up a brand-new research area for the electromagnetic exploration. He has also created the first national key discipline of China, which features the geo-electric field and observation system. What's more, Professor HE has invented a series of geo-electric field observation instruments and equipments with international advanced levels and independent intellectual property rights, and made significant contribution to the resource exploration and engineering survey development of China. The exploration geophysics theory system characterized by the Pseudo-Random Signal Electromagnetic method and Dual-Frequency IP method that Professor HE has created and developed, has been hailed as a major event of applied geophysics internationally. His study has important guiding significance on the development of geophysics of China.

Key words: HE Ji-shan; geophysics; Dual-Frequency IP method; pseudo random signal; flow field method; wide field electromagnetic method

1 初露锋芒, 提出地形改正新方法

1970年代, 我国地球物理勘探界为消除地形对探测效果的干扰, 推广了“座标网转换法地形改正方法”, 该方法简单地利用二维的场源去解决三维场源问题。何先生发现该方法存在很多缺陷, 误差很大, 他指出了前苏联书中的错误, 提出了基于三维点源场的“电阻率法地形改正”方法^[1], 在实际应用中, 这种方法简单而且准确, 有效地消除了地形对探测结果的影响, 同时还对电阻率法在山区应用中的各种干扰异常及其消除方法进行了系统研究, 使电阻率法的地质效果明显提高。为此, 国家冶金部专门召开会议, 向全国推广。1978年, “直流电阻率消除干扰异常研究”获全国科学大会奖。

1.1 座标网转换法

座标网转换法的实验基础是导电纸模拟实验, 而它的理论依据是复变函数论中的保角映射。

如图 1(a), 将导电纸的一边按照一定比例尺剪好地形, 作为 Z 平面中的地形线, 将纸的另一边作为 W 平面中的水平线。在直边上按照等距离布上测点 $1'$, $2'$, $3'$, \dots , 在导电纸两端用“线”电极供给水平均匀电场, 然后从直边上各等距测点向上追索等位线, 在

地形线上分别得到相应的 $1, 2, 3, \dots$, 暂且把这些点叫做“转换点”。在下边的附近, 由于电场受地形影响很小, 各等位线都垂直纸边, 即彼此平行且等距, 各相邻点之间的电位差都相等。靠近上部各等位线发生弯曲, 因此各相邻的“转换点”之间的水平距离不相等, 但电位差却相等。找好了转换点后, 撤去“线”电极。然后按转换点布极观测, 所得的视电阻率曲线将是一条水平线, 即不出现地形异常。如果在导电纸上模拟矿体, 则可测得矿体的异常。导电纸模拟是一种二度模拟, 导电纸上的一个“点”应是垂直导电纸的一条无限长的线, 因此, 在导电纸上用点电极供电, 实质上是用平行地形走向的线电极供电, 而非点电源。

根据复变函数理论, 一定存在一个解析函数 $W=f(z)$, 且 $f'(z) \neq 0$, 将 Z 平面中的地形线 RS 及其下部映射到 W 平面中的水平线及其下部(图 1(b)及(c))。如果以平行于 X 轴的水平均匀电场供电, 因地形起伏而使电场畸变, 但此时有: $V_A = V'_A$, $V_M = V'_M$, $V_N = V'_N$, 等等。如果在地表上有一平行于地形走向的线电极 A 供电, 单位长度上流出的电流为 θ , 则有

$$\Delta V_{MN}^{XA} = \Delta V_{M'N'}^{XA'} = \frac{\rho\theta}{\pi} \ln \frac{|A'N'|}{|N'M'|} \quad (1)$$

式中: ΔV_{MN}^{XA} 和 $V_{M'N'}^{XA'}$ 分别表示线电源 A (或 A') 供电时在 MN (或 $M'N'$) 之间产生的电位差。从式(1)可见, 对于线电极来说, 在地形线上按照转换点布极观测, 相

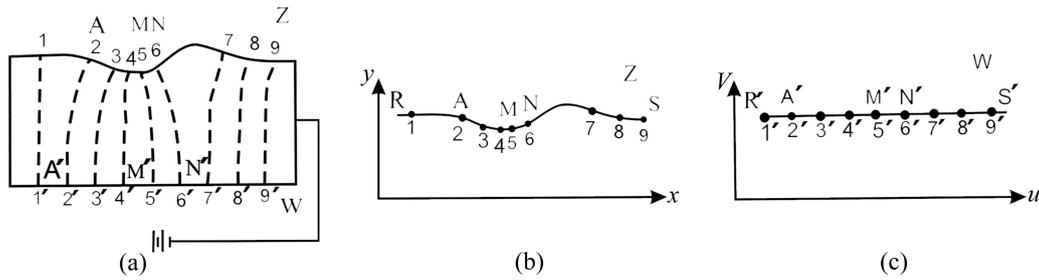


图 1 座标网转换法原理

Fig. 1 Principle of coordinate transformation method

当于在 W 平面中的水平线上按等距点布极观测, 因而可以消除地形影响。这对于二度地形线电源场来说是正确的, 但在野外实际应用时, 即使地形满足二度要求, 按野外的地形线在导电纸上找到转换点, 在实地按转换点布极时, 不是用线电极, 而是用点电极供电。点电源场不是二度场, 不能实现二度保角映射。因此, 将座标网转换法用于野外时, 理论上是错误的。

1.2 理论分析

为了确认座标网转换法在电阻率法地形改正中正确与否, 必须进行理论和实验验证, 但当时二者都有很大困难。由于写不出纯地形的点源电场解析表达式, 也没有先进的计算工具, 不能对纯地形的视电阻率计算。何先生将水平地面下两种介质垂直接触带的一侧设为空气, 令其电阻率为无限大, 并将另一侧形成一个坡度为 45° 的双棱面二度对称无限长山脊, 用手摇计算机对山顶部分视电阻率异常的解析表达式进行了理论计算。图 2 和 3 所示分别为计算结果。对于线电源来说, 每点都有 $\rho_s^{XA} = \rho_s^{XB} = 1$, 即用座标网的转换法确实完全消除了地形影响, 说明公式和计算过程是正确的。对于点电源来说, 座标网转换法出现了强大的地形异常, 在山顶为低阻正交点, “山脊”上异常超过 400%, 而相同情况下水平等距点的纯地形异常约 200%, 比水平等距点的纯地形异常大得多。由此可见, 在这种情况下使用座标网转换法, 不但没有削弱地形异常, 反而使地形影响增大了。

1.3 水槽模型实验

何先生为了检验理论计算结果的正确性, 特地修建了大水槽进行物理模拟实验。图 4 和 5 所示分别为 30° 山脊及山谷上联合剖面法的实验结果。在山脊顶上出现低阻正交点, 异常达到 90%, 这个数值与水平等

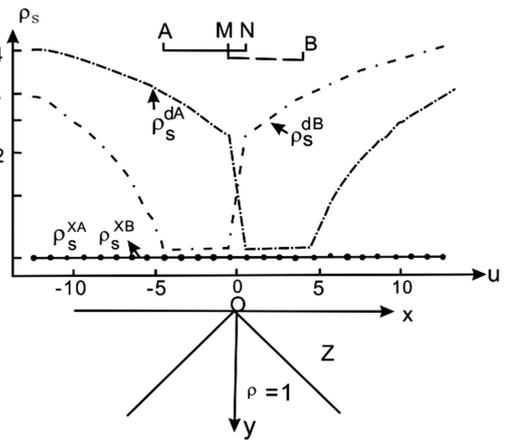


图 2 坡度为 45° 对称二度无限长山脊上的座标网转换法纯地形异常理论计算结果

Fig. 2 Theoretical result of coordinate transformation method with infinite length ridge model (Slope= 45°)

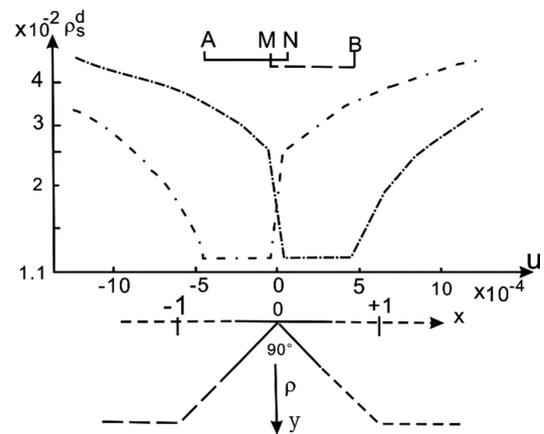


图 3 坡度为 45° 对称二度山脊的山顶部分座标网转换法纯地形异常理论计算结果

Fig. 3 Theoretical result of coordinate transformation method with finite length ridge model (Slope= 45°)

距点观测的纯地形异常相近。在山谷上方出现高阻反交点, 异常达到 250%, 这个数值比水平等距点观测

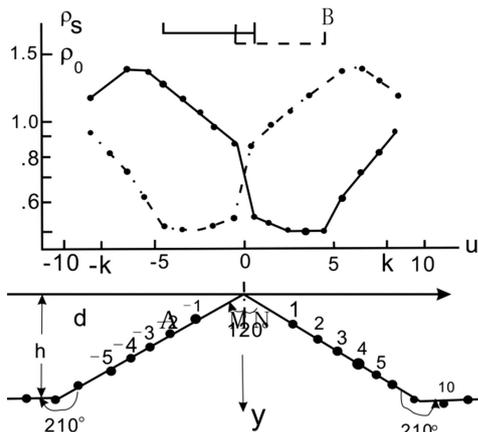


图4 坡度为30°的对称二度山脊上座标网转换法模型实验
Fig. 4 Experiment of coordinate transformation method with ridge model (Slope=30°)

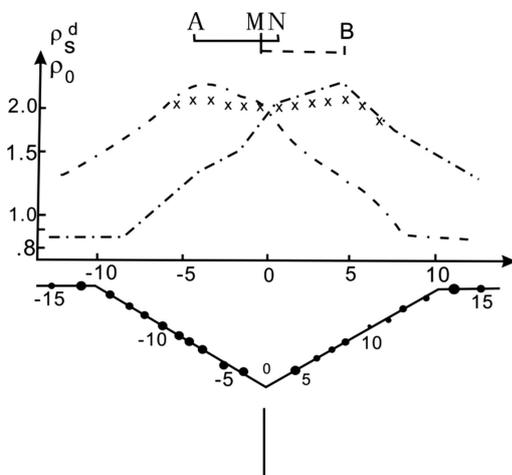


图5 坡度为30°的对称二度山谷上座标网转换法模型实验
Fig. 5 Experiment of coordinate transformation method with valley model (Slope=30°)

的纯地形异常大两倍。良导矿体上联合剖面异常一般只有百分之几十，在这样强大的纯地形异常下，是无法分辨矿体异常的。为了慎重起见，在观测了纯地形异常后，在山脊(谷)正下方垂直放入铜板，厚5 mm，延伸100 mm，走向长200 mm，顶深15 mm。图5中的“×”便是表示放铜板后的观测结果，其他点上放铜板前后观测结果是一样的。从图5可见，放铜板前后两条曲线的最大差别小于10%，亦即无法分辨出铜板异常。

理论计算和实验结果表明，把座标网转换法用于点电源，不但不能削弱地形影响，甚至比不这样做还要糟。因此，将它用于野外，不但在理论上是错误的，在实际上也是行不通的。

2 一鸣惊人，创立双频道激电法

2.1 变频法与奇次谐波法

国内的激发极化研究始于1958年前后。初期都是沿用前苏联的方法技术，多是在时间域进行。大约在1960年代后，国内学者开始对频率域激电方法产生浓厚兴趣，并取得了初步的应用效果，所应用的方法技术是变频法，后来才有了奇次谐波法。

变频法发送机先发送一个较高频率的电流，接收机观测高频电位差 ΔV_H ，并且调节接收机的增益，不论 ΔV_H 的值大小如何，都使其输出保持为某一数值。这一过程称为“归一”化，并将归一化后的 ΔV_H 值作为1。接收机完成归一化测量后，发送机发送频率较低的电流。发送机必须保持低频电流的强度和低频电流强度相同。接收机在保持其增益不变的情况下测量低频电位差 ΔV_L 。此时 ΔV_L 相对于 ΔV_H 的改变量即为视幅频率：

$$F_s = \frac{\Delta V_L - \Delta V_H}{\Delta V_H} \times 100\% \quad (2)$$

变频法用简单的装备就可测量激电效应，然而它有明显的缺点：1)在每个测点要分别以高、低频进行两次观测，增加了单个测点的观测时间；2)发送机要随接收机的操作情况而改变频率，既增加了相互间的通讯消耗，又难以实现1台发送机供电，多台接收机测量，从而使面积生产效率难以提高；3)高、低频电位差测量不同步，电流的稳定性及外界干扰等对结果影响大。这样一来，在大面积快速普查时，与时间域激电全面对比，使得其较为轻便的优点也大为失色。

在频率域激电中，原则上可以采用正弦波电流。但在野外观测中，为了使观测信号有一定强度，要求较大的激励电流。发送大功率的正弦电流，在技术上有许多困难，实际上是发送矩形波。根据傅立叶分析，矩形波可展为基波与一系列奇次谐波之和。

奇次谐波观测方案的发送机发送某一频率的方波电流，接收机的两个通道，分别同时接收基波和三次谐波的振幅和二者之间的相对相位。基波作为低频，三次谐波作为高频。由于三次谐波的振幅为基波振幅的1/3，因而采用下式计算视幅频率：

$$F_s = \frac{\Delta V_1 - 3\Delta V_3}{3\Delta V_3} \times 100\% \quad (3)$$

式中： ΔV_1 和 ΔV_3 分别表示基波和三次谐波的振幅。

奇次谐波方案可以实现多频信号同时观测，这较

变频方案是个进步。由于各次谐波频率是同时从方波取出的, 在测量视幅频率时, 发送机电流的变化对观测结果的影响较变频方案小得多。但随着谐波次数增加, 谐波电流的幅度随次数成反比减小。例如: 13 次谐波电流的幅度只有基波的 1/13, 这便要求加大供电电流。对于基波而言, 这样大的供电电流是不必要的。除浪费外, 关键是使整个发送装备十分笨重。如果利用次数较低的谐波, 则频率范围又太窄, 频差太小, 观测到的异常就不明显。因此, 奇次谐波最大的缺点是谐波强度的衰减。特别是用于普查目的时, 若取频差太小, 则异常太小, 不利于发现目标, 观测精度也低; 若加大频差, 则使低频电流太大, 与普查时对装备轻便的要求相矛盾。

正是上述两种方法存在的明显不足, 何先生从

1970 年代初期开始此方面的研究^[2], 并在 1980 年代初期正式提出双频道激发极化法^[3-5], 后来又发展成为以多频为特色的伪随机地电场理论^[6]。

2.2 双频道激电原理

双频激电法的中心思想是把两种频率的方波电流叠加起来, 形成双频组合电流(见图 6), 同时供入地下, 接收来自地下的含有两个主频率(也含其他频率成分)的激电总场的电位差信息, 经过仪器内部的放大、选频、检波等一系列步骤, 一次同时得到低频电位差 $\Delta V(f_L)$ 和高频电位差 $\Delta V(f_H)$, 按式(4)计算视幅频率 F_s :

$$F_s(\%) = \frac{\Delta V(f_L) - \Delta V(f_H)}{\Delta V(f_L)} \times 100\% \quad (4)$$

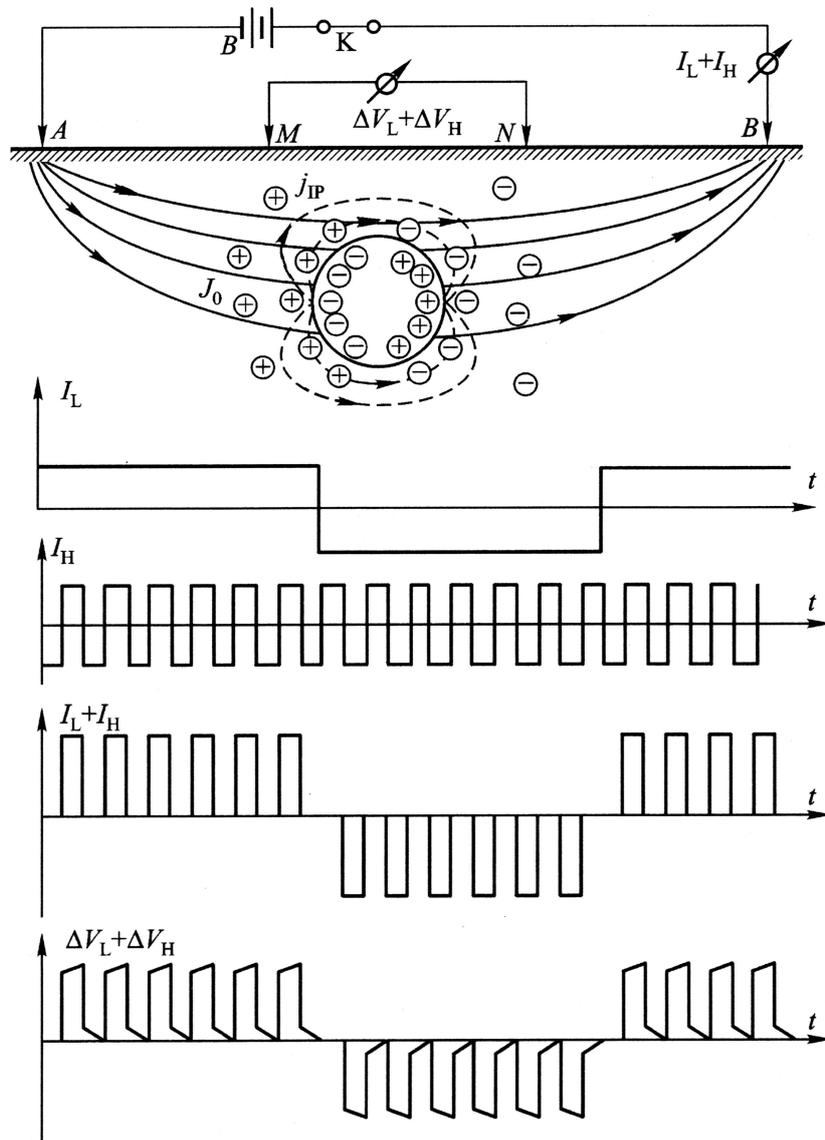


图 6 双频激电原理示意图

Fig. 6 Principle of Dual-frequency IP method

2.3 双频激电的电流波形

双频道激电法的核心是同时供双频电流和同时测双频电位差。发送机将两种频率的矩形波电流合成双频电流供入地下,这两种电流的频率可根据需要加以改变。双频接收机同时接收双频信号,根据需要可以测它们的振幅或(和)相位,既可只测一组双频信号的各个参数,也可根据需要测多组双频信号以形成频谱测量。

高、低两频率电流 $I_G(t)$ 和 $I_D(t)$ 均供矩形波,二者的矩形波幅度相等,取低频电流的初始相位为零,则可写为

$$I_D = \frac{4}{\pi} I_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin(2n-1)\omega_D t \quad (5)$$

$$I_G = \frac{4}{\pi} I_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_G t - \varphi] \quad (6)$$

式中: I_0 为矩形波振幅。

令 $\omega_G/\omega_D=s$, 则双频电流 $I=I_D+I_G$ 为

$$I = \frac{4}{\pi} I_0 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \{ \sin[(2n-1)\omega_D t + \sin(2n-1)s\omega_D t - \varphi] \} \quad (7)$$

当 s 为偶数, $\varphi=0$ 时,式(7)化为式(8),此时高频电流基波与低频电流基波的振幅与相位均相同。

$$I = \frac{4}{\pi} I_0 \{ \sin \omega_D t + \sin \omega_G t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_D t + \sin(2n-1)s\omega_D t] \} \quad (8)$$

当 s 为偶数, $\varphi=\pi$ 时,式(7)化为式(9)。此时高、低频电流基波幅度相等,但相位相反。

$$I = \frac{4}{\pi} I_0 \{ \sin \omega_D t - \sin \omega_G t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_D t - \sin(2n-1)s\omega_D t] \} \quad (9)$$

当 s 为奇数, $\varphi=0$ 和 $\varphi=\pi$ 时,式(7)分别化为式(10)和(11),第一项表示低频电流的基波,第二项表示高频电流的基波与低频电流的 s 次谐波之和,求和号下的第三项表示高、低频电流的其他各次谐波之和。由于求和号的作用,将已合并到第二项的低频电流的 s 次谐波又计算进去了,因此在求和号的后面应减去重复计入了的项,这就是第四项。

$$I = \frac{4}{\pi} I_0 \{ \sin \omega_D t + \frac{s+1}{s} \sin \omega_G t +$$

$$\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_D t + \sin(2n-1)s\omega_D t] \} - \frac{1}{s} \sin s\omega_D t \quad (10)$$

$$I = \frac{4}{\pi} I_0 \{ \sin \omega_D t - \frac{s-1}{s} \sin \omega_G t + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{2n-1} \sin[(2n-1)\omega_D t - \sin(2n-1)s\omega_D t] \} - \frac{1}{s} \sin s\omega_D t \quad (11)$$

在这两种情况下,虽然高、低频电流基波的振幅不相等,但相差不大,且具有固定的关系。不论 $\varphi=0$ 或 $\varphi=\pi$,双频电流中都不含偶次谐波,只有奇次谐波。这就是双频道激电法采用的电流信号,它与矩形波的振幅谱具有很大的不同,高低频波的振幅相差很小(图7)。

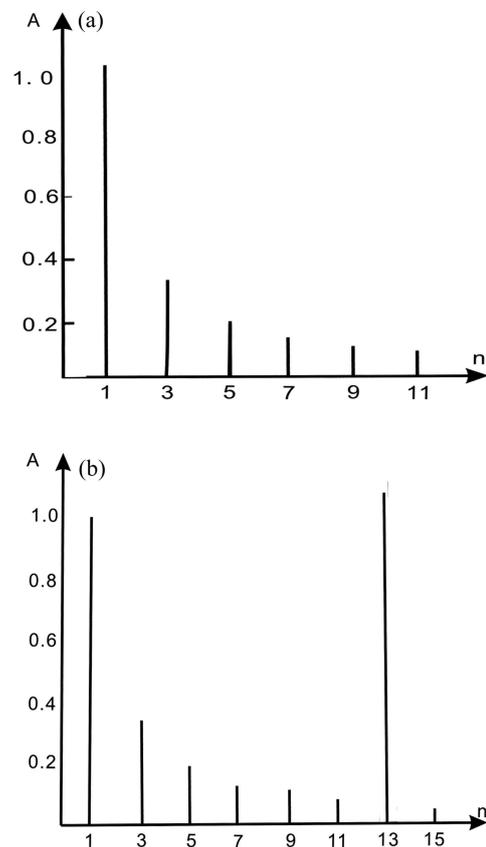


图7 矩形波与双频波的振幅谱($s=13$, $\varphi=0$): (a) 矩形波; (b) 双频波

Fig. 7 Wave amplitude spectrum of square wave and Dual-frequency wave ($s=13$, $\varphi=0$): (a) Square wave; (b) Dual-frequency wave

2.4 双频道激电仪

图8所示为双频道幅频观测的示意图。双频发送机向地下同时供频差13倍的两频率,双频接收机同

时测量双频信号。双频接收机主要包括以下几部分：
 1) 共同通道将高频和低频电位差同时放大；
 2) 分选通道将经放大的信号分选出高频电位差与低频电位差；
 3) 计算、显示部分。根据需要，可以计算和显示出相位差的下列参数的一部分或全部：高频振幅 A_G 、低频振幅 A_D 、高频相位 φ_G 、低频相位 φ_D 、高频实分量 R_G 、低频实分量 R_D 、高频虚分量 I_G 、低频虚分量 I_D 、幅频率 F_s 、高低频电位差之间的相对相位差 $\Delta\varphi$ 。

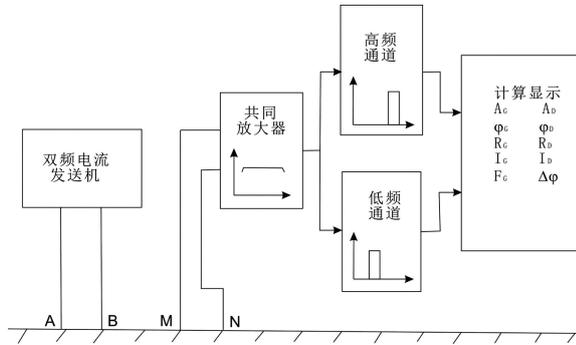


图 8 双频道激电法观测系统

Fig. 8 Observation system of Dual-frequency IP method

双频激电法经过多年的发展，形成了系列产品，包括“SQ-1 双频道数字激电仪”、“SQ-2 双频道数字激电仪”、“SQ-3 双频道数字激电仪”、“SQ-3C 双频激电仪”、“SQ-5 双频道轻便型激电仪”、“DQ-1000 大深度双频激电仪”、“WSJ-3 伪随机信号激电仪”等。双频道激电仪已获国家发明奖、国家发明专利、电子工业部科技进步奖、国际发明展览(北京)银奖。“我国双频激电研究与应用”获国家科技进步二等奖，成为金属矿勘探和工程探测利器。

2.5 双频道激电的特点

双频激电法的核心是同时供双频电流并同时观测双频的电位差。这使得它与变频方案和奇次谐波方案相比有一系列重要的也是本质性的优点。

1) 两种频率的频差可根据需要而人为选择，且二者的振幅是接近的。例如图 9 中的双频电流，高频基波的频率与低频基波的频率差异为 13 倍，但二者的振幅比为 12/13，十分接近。奇次谐波方案中频差与幅度无法克服的矛盾被双频激电轻易克服了。在减小供电功率的条件下，准确地测量视幅频率或相对相位差均十分有利。

2) 发送电流的变化对双频观测结果的影响可以忽略。在电流线性变化的情况下，当对变频方案影响为 -12% 时，对奇次谐波方案影响为 -1.06%，而对双频观测的结果影响仅为 0.148%。变频法中为减小电流变化，必须采用稳流措施，而发送机稳流不但降低电源利用率，且使仪器结构变得复杂。双频发送机可不必稳流，这对于简化发送机结构和减轻发送机重量相当有利。

3) 双频激电的抗干扰能力强。由于双频激电同时供测双频信号，并采用了同步检波、相关、积累等技术，利用选频接收，通频带较窄，干扰受很大压制，并且双频激电同时接收高低频电位差，取其差值，因而各种偶然干扰也受到很大压制。双频接收机采用同步检波和积分采样，同步检波甚至对同频率的干扰也具有很强的压制能力。双频激电法积分采样对对称性干扰压制极强。因此，双频激电法对工业干扰、偶然干扰、随机干扰(包括对接收机的固有随机噪声)等都有很强的压制能力。

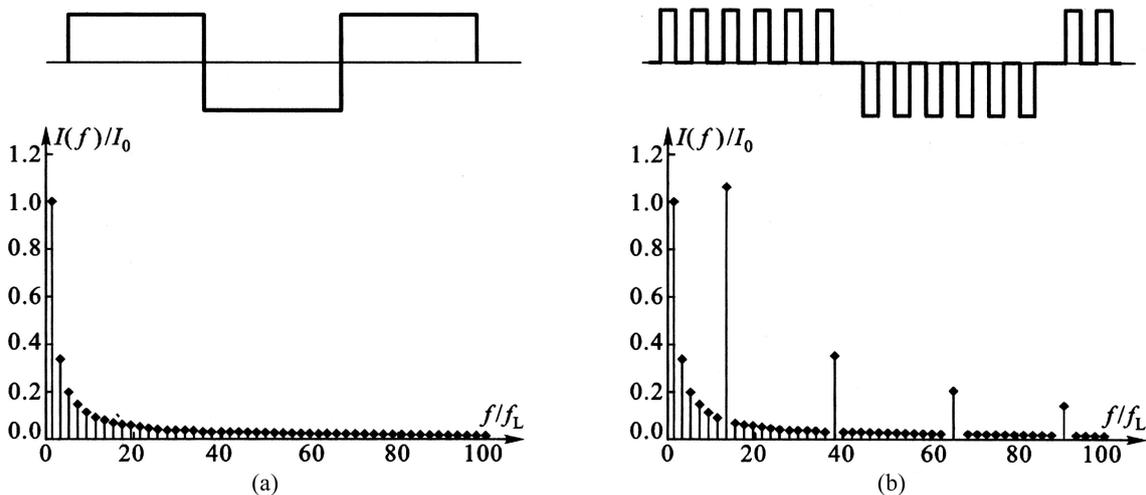


图 9 两种观测方案的电流波形与振幅谱

Fig. 9 Current waveform and amplitude spectrum of square wave and dual-frequency wave

4) 双频激电的观测装置轻便。一般而言, 频率域激电装置都较时间域的轻便。这主要因为频率域观测总场, 而时间域则要观测二次电位。例如: 在时间域中, $\eta_s = (\Delta V_2 / \Delta V) \times 100\%$ 。当 $\eta_s = 2\%$, $\Delta V = 50 \Delta V_2$, 假设接收机最小可测准电位差为 1 mV, 那么必须要求 $\Delta V \geq 50$ mV, 在电阻率为 500 $\Omega \cdot \text{m}$ 地区, 用中梯装置时, 设 $AB = 1\ 000$ m, $MN = 20$ m, 且 MN 位于 AB 中心时, 装置系数 $K = 39\ 254$ m, 故要求供电电流为 $I = K \cdot \Delta V / \rho = 3.928$ A, 即供电电流需约 4 A, 这就必须使用发电机。而且为使供电线上电压损耗小, 供电线必须用粗的铜线(如果供电线每 km 电阻为 20 Ω 时, 供电线上电压降可达 80 V)。此外, 为了供如此大的供电电流, 供电电极也要很多, 从而使发电机、汽油、导线、电极等显得笨重, 特别在山区难以工作。

频率或激电测量总场, 在同样情况下, 其电流可减小至 1/50, 不需要很大的供电电流, 就能可靠地获得异常。在一般地电条件下只需几十毫安电流和几个瓦特功率的电源就可以了。从而使整个设备轻便, 人力减少, 提高了生产效率。

5) 双频激电法快速、灵活。一般变频仪虽较直流激电仪轻便, 但在观测速度上却难以提高。首先是它的归一化过程占用时间。其次, 它要采用整流滤波将超低频转变成直流, 需要很大的时间常数, 因此很慢, 特别在做频谱测量时更慢。其三, 变频观测供电-测量之间需要通信联系占用了时间。其四, 变频方案不能一机供电, 多机测量, 只能“单干”, 效率低下。

双频激电法采用高精度线性平均值同步检波的方式, 并采取了相应的技术措施, 去掉了归一化过程, 从而使读数大大加快。

6) 双频仪稳定性好, 观测精度高。由于高、低频信号的放大全部由共同通道完成, 又同时观测双频信号并取其差值, 因此, 温度、湿度等的变化对观测结果影响小, 仪器性能易稳定。双频仪的稳定性一般都在 $\pm(0.1\% \sim 0.2\%)$ 。

仪器在野外的观测精度除与仪器本身精度有关外, 还与仪器的抗干扰能力和观测速度有关。双频激电的抗干扰能力很强、观测速度很快, 因此, 双频仪的观测精度也很高。

7) 双频激电法可以方便地抑制电磁耦合影响。

总之, 双频激电法快速、轻便、灵活, 不需稳流, 抗干扰能力强, 因而观测精度高。在作大面积激电普查时, 便可获得有关异常源性质的详查信息。利用双频激电, 还可方便地压制电磁感应耦合效应, 也为激电非线性效应的研究提供了方便、有效的手段。这些

特点使得双频激电相对其他频率域激电方法和时间域激电方法具有无可比拟的优越性。

2.6 双频道激电的推广和应用案例

双频激电法问世以来, 得到广大物探和地质工作者的支持, 已在全国推广应用。从地域来说, 除台湾省外, 包括从黑龙江到西藏, 从新疆到福建, 遍及全国各地。从矿种来说, 包括金、银、铜、铅、锌、钼、锡、锰、硫等, 还在地震监测、地下水勘查和工程地质等方面得到了成功的应用。从所属部门来说, 除原中国有色金属工业总公司外, 主要有地质矿产、冶金、石油、核工业、煤炭、化工等部门。通过全国许多物探工作者的辛勤探索, 已在各种地质环境、各种气候条件、不同矿种上进行了大量工作, 发现了许多有价值的异常, 经过验证, 找到了一大批工业矿体, 取得了良好的地质效果, 创造了巨大的经济价值和社会效益。推广应用的实践又促进了理论研究更加深入, 仪器设备不断改进, 野外工作方法技术日臻完善。现在, 双频激电法已经发展成为激电中的一个成熟的独立方法。

这里以云南某矽卡岩型锡矿为例说明双频激电法的应用效果。该矿出露地层主要为寒武系中统云母片岩、石英片岩、大理岩夹若干层矽卡岩扁豆体, 后者是主要的含矿岩层。矿石以致密块状为主, 次为浸染状, 矿体呈多层倾斜板状体产出。

在该区 59 线进行了双频激电中梯装置和测深装置的试验, 都获得了明显的异常。如图 10 所示在矿体上方显示为高 F_s 低 ρ_s , 根据观测数据勾绘了 F_s 和 ρ_s 断面等值线图, 对应矿体部位 F_s 显示高极化、 ρ_s 显示低电阻的特点, 对以后的找矿工作起了很大的指导作用。

3 开域继踪, 创立 2ⁿ 序列伪随机信号电法

何先生提出了三元素群的自封闭加法, 实现了 2ⁿ 序列伪随机信号的快速递推编码, 从而创立了双频道激电极化法, 形成了包括伪随机三频电法、伪随机多频电法等在内的伪随机信号电法的理论方法体系^[7]。

这里以 2ⁿ 序列伪随机信号说明伪随机信号的理论基础。它是将 -1, 0, 1 三个元素, 按何先生提出的“三元素加法群中自封闭加法”相加而得到的一种周期性编码。

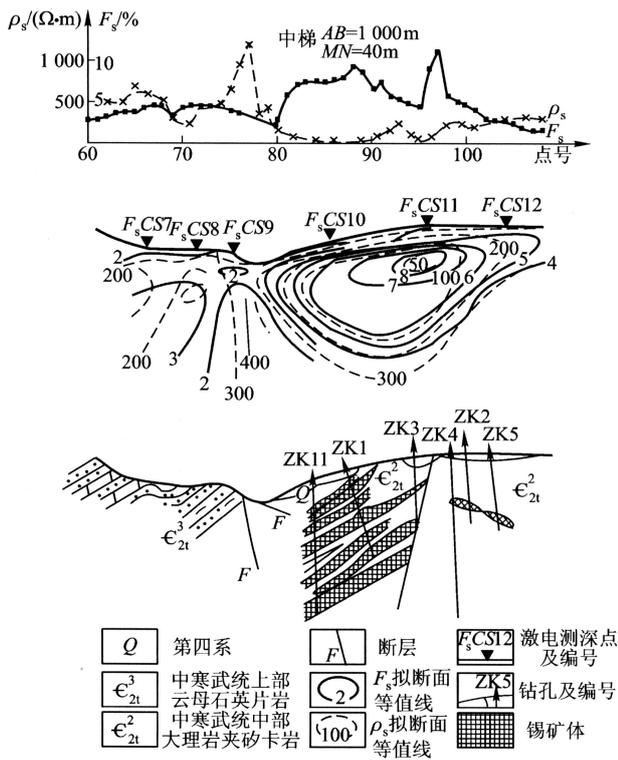


图 10 云南某砂卡岩锡矿 59 线综合剖面图
 Fig. 10 Results of dual-frequency IP method in somewhere of Yunan

3.1 三元素群的自封闭加法

如果存在一个集合 $Z_{|z|<2}$, 它由绝对值小于 2 的整数构成。 $Z_{|z|<2}$ 中共有三个元素: 1, 0, -1。规定在 $Z_{|z|<2}$ 中下列加法运算成立:

1) $1+0=0+1=1$; $1+(-1)=0$; $0+(-1)=-1+0=1$; $1+1=1+1+1=1+1+\dots+1=1$; 有限个 -1 相加 $(-1)+(-1)=(-1)+(-1)+(-1)=(-1)+(-1)+\dots+(-1)=-1$; 有限个 0 相加 $0+0=0+0+0=0+0+\dots+0=0$; 这一规定的实质是, $Z_{|z|<2}$ 中任何两元素之和以及任何一元素本身连加有限次之和, 其结果仍然包含在 $Z_{|z|<2}$ 中。

2) 1, 0, -1 三元素之间加法的单次运算, 满足加法的交换律和结合律: $1+0=0+1$; $0+(-1)=(-1)+0$; $1+(-1)=(-1)+1$; $1+0+(-1)=1+(-1)+0=0+1+(-1)=(1+0)+(-1)=1+[0+(-1)]=[1+(-1)]=0$ 。

3) 在一个算式中, 1 或者 -1 自身重复相加两次或两次以上, 必须顺次相加, 交换律和结合律均不成立。比如 $1+1+0+(-1)=0 \neq 1+(-1)+1+0=1$; $1+1(-1)=0 \neq 1+[1+(-1)]=1$ 。

4) 集合 $Z_{|z|<2}$ 中的 0 元素, 不允许拆分为其它两元素之和再进行运算。比如 $1+0=1$ 中, 不可以把 0 拆开成 $1+(-1)$, $1+0=1 \neq 1+[1+(-1)]=1+1+(-1)=0$; 因为拆

开的结果与事实不符。

将频率按 2 进制递增(减)的 n 个方波用元素 1, -1 的编码来表示:

当 $f_1=1$ 时, 编码为 $\dots, 1, 1, 1, 1, -1, -1, -1, -1, \dots$

当 $f_2=2$ 时, 编码为 $\dots, 1, 1, -1, -1, 1, 1, -1, -1, \dots$

当 $f_4=4$ 时, 编码为 $\dots, 1, -1, 1, -1, 1, -1, 1, -1, \dots$

.....

依照上述“三元素加法群中自封闭加法”的规定把它们相加, 不难得到 $f_1+f_2+f_4=111\bar{1}\bar{1}\bar{1}\bar{1}$; 为了书写整齐方便, 上式中已将“-”号移到 1 的顶上。

这种编码的规律可以用下面的递推公式来描写:

$F_n(t) = \boxplus \sum_{i=1}^n f_i(t)$; 式中 n 表示一共有 n 个二进制的方波相加, \boxplus 表示相加的法则是按上面引述的 1, 0, -1 三元素集合中的自封闭加法, $f_i(t)$ 是描写第 i 个方波的时间函数。

$$f_i(t) = \begin{cases} 1, & 2^i k \leq t < 2^i k + 2 \\ -1, & 2^i k + 2 \leq t < 2^i (k + 1) \end{cases} \quad k \in Z \quad (12)$$

k 值不同的各个傅立叶系数, 其物理意义是周期函数 $f_T(t)$ 的各个不同周期(频率)波动成分的振幅。其中 $k=1$ 的称为基波, k 取其他值的都称为谐波。

3.2 2^n 系列伪随机编码的振幅和能量分布

任何在 $[-T/2, T/2]$ 上满足 Dirichlet 条件的周期函数 $f_T(t)$ 都可展成如下的傅立叶级数

$$f_T(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} (a_k \cos k\omega t + b_k \sin k\omega t) \quad (13)$$

式中: $\omega=2\pi/T$ 是 $f_T(t)$ 的圆频率, 而

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) dt \quad (14)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) \cos k\omega t dt \quad k=1, 2, \dots \quad (15)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f_T(t) \sin k\omega t dt \quad k=1, 2, \dots \quad (16)$$

分别是各频率成分的傅立叶系数。

k 值不同的各个傅立叶系数, 其物理意义是周期函数 $f_T(t)$ 的各个不同周期(频率)波动成分的振幅。其中 $k=1$ 的称为基波, k 取其他值的都称为谐波。 $n=2\sim 15$ 的 2^n 系列伪随机编码的基波和主要谐波成分的归一

表 2 $n=3\sim 15$ 的 2^n 序列伪随机编码的主要成分的能量分配

Table 2 Energy distribution of 2^n pseudorandom signal

n	E_k^n/E_T^n						
	3	5	7	9	11	13	15
$k=1$	0.405 27	0.199 522	0.114 051	0.079 760	0.061 040	0.049 361	0.041 414
$k=2$	0.202 63	0.172 931	0.112 243	0.079 521	0.060 970	0.049 361	0.041 587
$k=4$	0.202 63	0.147 642	0.108 811	0.079 003	0.060 901	0.049 361	0.041 414
$k=8$		0.114 003	0.102 695	0.078 131	0.060 761	0.049 329	0.041 443
$k=16$		0.114 003	0.092 794	0.076 401	0.060 482	0.049 267	0.041 414
$k=32$			0.079 162	0.073 023	0.059 927	0.049 172	0.041 414
$k=64$			0.079 162	0.068 007	0.058 893	0.048 985	0.041 386
$k=128$				0.060 621	0.056 986	0.048 640	0.041 299 38
$k=256$				0.060 622	0.053 726	0.047 926	0.041 185
$k=512$					0.049 078	0.046 635	0.040 927
$k=1\ 024$					0.049 078	0.044 402	0.040 413
$k=2\ 048$						0.041 242	0.039 481
$k=4\ 096$						0.041 242	0.037 868
$k=8\ 192$							0.035 564
$k=16\ 384$							0.035 564
$\sum(E_k^n/E_T^n)$	0.810 53	0.748 101	0.688 919	0.655 296	0.631 845	0.614 923	0.602 374 45

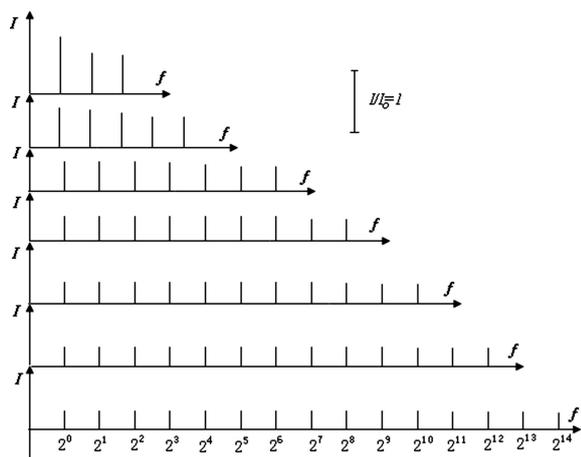


图 11 $n=3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$ 的系列伪随机电流的振幅谱

Fig. 11 Amplitude spectrum of pseudorandom signal when $n=3, 5, 7, 9, 11, 13, 15$

波方案固有缺点的困扰。 2^n 序列伪随机编码用于频率域电磁法, 同样能够克服上述变频和奇次谐波方案的固有缺陷。

2^n 序列伪随机编码用于频率域电磁法, 由于其频率分布对数均匀, 勘探深度分布合理。频率域电磁法的探测深度, 是根据电磁波的趋肤深度与频率的关系:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma}} (\omega)^{-1/2} \tag{19}$$

由式(19)可见, 频率越低, 趋肤深度越大, 获得的勘探深度也越大。频率域电磁法有的采用变频方案, 每次发送一个频率的激励电流, 接收一个频率的地电响应, 只能获得一个深度的地下信息。采用奇次谐波方案, 虽然能够一次获得多个深度的地电信息, 但谐波次数越高, 不但信号越微弱, 而且达到的趋肤深度越来越接近, 得到不同深度的有效信息并不多。 2^n 序列伪随机编码, 由于其含有的 n 个频率的激励和响应强度相当接近, 频率分布(从而趋肤深度)较为合理, 获得的各个深度的信息都是有效的。

与奇次谐波方案相比, 2^n 序列伪随机编码的趋肤深度分布均匀、覆盖深度范围大, 合理得多。不但一次测量能获得多个深度的地下信息, 而且每一个频率的信息都是有效的, 避免了无效劳动。因此, 2^n 序列伪随机编码非常适合于地球物理勘探。

3.4 2^n 系列伪随机编码的优点

伪随机信号电法的核心是发送机将不同频率的电流波形合成为伪随机电流后向地下供电, 接收机则同时接收这些频率经大地后的响应并将其分离, 具有以

下特点:

- 1) 波形所含的主频率均按 2^n 步进;
- 2) 各主频率点的振幅值基本相等, 系统电源利用率高;
- 3) 各主频点起始相位相同, 可进行每组多个频率的振幅值、绝对相位等参数测量, 能实现相位谱精确测量; 可根据振幅谱和相位谱特征判别地下异常源性质, 进而判别“矿与非矿”异常;
- 4) 观测系统轻便, 能实现一机发送多机接收工作方式, 能满足西部中高山地区快速面积性探测;
- 5) 能压制生产矿山工业电磁干扰, 可在生产矿山深边部开展接替资源勘探。

以伪随机信号为基础的伪随机信号电法为中国生产矿山深边部隐伏资源的勘探和西部中高山区的资源勘探提供了一种轻便、快速、观测精度高的新方法和一种异常源性质快速评价新技术和评价指标, 是唯一由中国人发明的、在广袤的中国大地上应用的电磁勘探方法, 为中国矿产资源可持续供给做出了突出贡献。

何先生就该理论方法发表专著 3 本, 论文 200 余篇, 这些专著已成为地球物理领域管理者、技术人员的必备专业书籍, 大部分成为地球物理学研究生教材。其中, 双频激电法是唯一的一种由中国人提出原理, 由中国人发明仪器, 在辽阔的中国国土上取得成功应用的电法勘探方法, 《双频激电法研究》和《双频激电法》这两本专著已成为物探领域的扛鼎之作。

4 尽展长才, 建立拟流场法

何先生发现了水流场与电流密度场的理论关系, 通过高精度测量流体中电流密度矢量, 创立了高分辨率检测堤坝管涌渗漏入水口的“流场法”^[8], 为病险水库隐患探测和汛期堤坝查险提供了必不可少的技术支撑和科学抢险决策依据。

水患自古以来就是中华民族的“切肤之患”。溃堤是汛期最大的灾害。研究表明, 溃堤几乎都是管涌渗漏没有及时发现或处险不当引起的, 因此, 快速准确查明管涌渗漏的进水部位是汛期处险的关键。

何先生为满足抗洪抢险和病险水库隐患诊断的迫切需要, 经过一年多的研究, 根据电流场和水流场的相似性原理, 创立了全新的探测堤坝管涌渗漏隐患的“流场法”理论, 研制出了世界上第一台能在汛期恶劣环境下快速准确探测堤坝管涌渗漏入水口的仪器设

备——“普及型堤坝管涌渗漏检测仪”。

水流是物质运动的一种形式, 电流是物质运动的另一种形式。二者的物理实质不同, 但是在一定条件下, 二者运动的规律有某些相似之处。

4.1 拟流场法的原理

流场法的原理就是水流场和电流场的相似性。

水的运动可以用流速 u 来表述。在直角坐标系中, 它沿坐标轴的三个分量是 u_x 、 u_y 、 u_z 。水是不可压缩流体, 其流动满足连续性方程:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (20)$$

式中: $\nabla \cdot$ 为哈密尔顿算符。水中流场满足 BERNOULLI 方程:

$$\frac{du}{dr} + P(r)u = Q(r)u^n \quad (21)$$

考虑无涡流场, 必有流速势函数 H 存在, 使得

$$u = -\nabla H \quad (22)$$

式中: “-”号表示速度指向势降落的方向。式(22)说明, 流速与势降落的梯度相等。式(22)代入式(20), 则有:

$$\nabla \cdot (\nabla H) = \nabla^2 H = 0 \quad (23)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算符。式(23)说明, 无涡流场的流速势满足拉普拉斯方程。如果场中的某些地方水流不够畅通, 比如通过孔隙介质的流动, 此时式(22)中应增补一系数 k :

$$u = -k\nabla H \quad (24)$$

式(24)就是水力学中著名的达西定律, k 称为渗透系数。

在流体与其它物体的边界上, 如果该边界不透水, 则水不能流过此边界, 即

$$u_n = 0 \quad (25)$$

式中: 下标 n 表示边界的法线方向。如果边界能够透水, 根据连续性方程式(20), 边界上流速 u 的法向分量应当连续, 即 $u_{n1} = u_{n2}$, 其中下标 1、2 分别指代边界的两侧。

描写电流分布状况的是空间某点的电流密度 j 。考虑恒定电流场, 在场源外的空间, j 满足连续性方

程 $\nabla \cdot J = 0$ 。

恒定电流场是无旋的, 存在电场势函数 v , 它与电流密度通过如下微分形式的欧姆定律相联系:

$j = \sigma E = -\sigma \nabla v$, 其中 σ 为介质的电导率。天然水电导率变化在 0.01~10 S/m, 主要视其含离子的浓度而定, 一般可取 1 S/m; E 为电场强度, 即电势的负梯度。电流密度与电势降落的梯度成正比。可以认为天然水体的电导率为常数, 将上两式相代, 有 $\nabla^2 v = 0$, 即电势 v 也满足拉普拉斯方程。

在两种介质的分界面上, 电流密度的法向分量连续:

$$j_{n1} = j_{n2} \quad \text{或} \quad \frac{\partial v_1}{\partial n} = \frac{\partial v_2}{\partial n} \quad (26)$$

如果有一侧的介质是绝缘体, 完全不导电, 则有:

$$j_n = 0 \quad \text{或} \quad \frac{\partial v}{\partial n} = 0 \quad (27)$$

由此可见, 无涡水流场和恒定电流场之间, 水流场的流速和电流场的电流密度之间, 在数学物理上存在相似之点(见表 3)。这些相似性构成了流场拟合原理的基础。

拟流场法的原理就是适当地布置场源建立人工电流场, 使得渗流场与电流场具有相比拟的边界条件, 达到电流场拟合渗流场的目的。

4.2 拟流场法的推广和应用案例

10 几年来, 何先生和他的科技小组, 带着“堤坝管涌渗漏检测仪”, 先后到湖南、湖北、江西、广东、海南、江苏、福建、四川、山东等十多个省市, 为当地堤坝探测管涌。他们探测发现 110 多处堤防险情和 20 多处水库大坝渗漏点, 准确率达到了百分之百, 为

这些地方及时准确地排除重大险情提供了极其重要的依据。他的这项成果, 已形成产品。该方法具有灵敏度高、分辨率高、抗干扰能力强、操作简便、工作高效、可靠性强的特点, 获国家发明专利授权 2 项, 获教育部“1999 年中国高校十大科技进展”、2001 年获湖南省科技进步一等奖。科技部、水利部还在长沙召开堤坝隐患探测技术交流大会, 重点向全国洪涝灾害地区推广何先生研制的堤坝管涌渗漏检测仪。2005 年“堤坝管涌渗漏检测仪”年被国家发改委列为重点产业化支持项目, 目前已装备了中国主要省份的水利技术单位和防汛管理部门。

1999 年、2000 年汛期, 从湖南到湖北、从湘、资、沅、澧、洞庭湖水系到长江、汉水流域的 20 多个县市的抗洪现场应用流场法堤坝管涌渗漏检测仪快速准确探测出近 100 个管涌渗漏的进水部位, 为多个重大险情的成功抢险发挥了巨大作用。仅在湖南省汉寿县窑金口闸溃垸性特大管涌抢险过程中, 就及时准确地找到了多个漏水点和闸前的集中涌漏区, 为现场抢险提供了不可替代的科学决策依据。

窑金口闸位于汉寿县浣南垸临南湖撇洪河大堤下游, 是一座引临南湖撇洪河水灌溉垸内农田的涵闸。1999 年 7 月 22 日, 该闸出现少量渗水, 7 月 23 日 17 时, 出水量突然加大到 1.5m³/s, 且夹带大量黑色泥沙。险情发生后, 省市各级领导和水利专家迅速赶赴现场, 紧急动员 4 000 多劳力、900 多解放军官兵、100 多台翻斗车以及 70 多条船只等在水闸金口部位抛投土袋、米袋和块石, 筑围坝, 再利用机械填土, 出水量有所下降, 但始终维持在 0.35 m³/s。为了彻底排除险情, 省防汛抗旱指挥部电请中南大学予以支援。中南大学有关专家对现场进行勘查后, 决定采用流场法在涵闸进口处以及临水坡北侧 26 m 的范围内进行广泛实时

表 3 水流场和电流场的相似性

Table 3 Similitude of water flow field and current field

水流场	电流场
流速 u	电流密度 j
水流连续 $\nabla \cdot u = 0$	电流密度连续 $\nabla \cdot j = 0$
水力位满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 \phi = 0$	电场位满足拉普拉斯方程 $\nabla^2 V = 0$
流速与水力梯度成正比 或者	电流密度与位的梯度成正比 $j = \sigma E = -\sigma \nabla V$
渗透系数 k	电导率 σ
边界条件: 流速法向分量连续 $u_{n1} = u_{n2}$ (透水边界) 或者 $u_n = 0$ (不透水边界)	边界条件: 电流密度法向连续 $j_{n1} = j_{n2}$ (导电边界) 或者 $j_n = 0$ (绝缘边界)
流线与等位面处处正交	电流线与等电位面处处正交

反复检查,发现了集中进水口 10 余个和一条沿堤角的弱渗水带。潜水员当即下水摸查,在集中进水口施放有色染料或小麦,证明存在管涌进水口和涵闸出水口连通。随后又在涵闸临水坡南侧发现渗水带和漏水洞,并在涵闸临水坡已封填平台前方发现面积性渗水区域,现场指挥部调整抢救方案,经数小时作业,涵闸出水流量明显减小,漏水量减小到 $0.002 \text{ m}^3/\text{s}$, 阁金口险情被彻底控制,这一全省关注的特大险情转危为安。图 12 所示为阁金口闸 5 号剖面 1999 年 7 月 26 日和 7 月 30 日的流场法观测结果。图中尖峰状异常指示漏水的部位。从图 12 可以看出 7 月 26 日测的流场异常宽而强烈,经过抢救后,到 7 月 30 日流场异常不复存在。1999 年冬天,对阁金口闸进行开挖彻底整治。开挖后发现涵闸第一次接长部位严重破裂。在涵闸临水坡北侧有 10 余条通道呈伞状集中指向涵闸破裂处,通道内淤塞着外来泥土。涵闸临水坡南侧也存在一个淤塞外来泥土的通道指向破裂处。在涵闸临水坡前方,当挖除 2~3 m 盖层后,发现有通道指向涵闸^[8]。

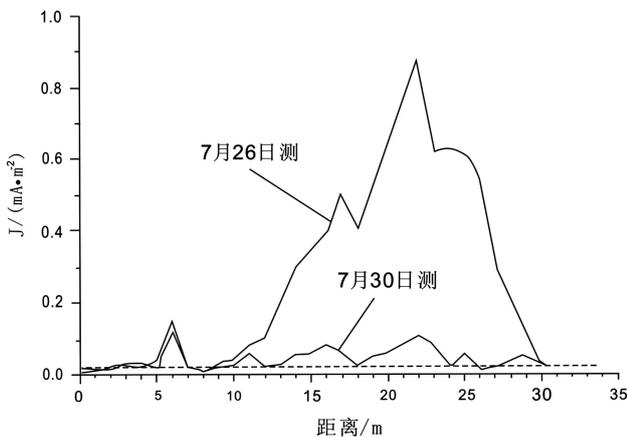


图 12 汉寿县阁金口闸 5 号剖面流场法探测结果

Fig. 12 Detect result of flowing field method at a dam of Yangtze River

5 高屋建瓴, 发明广域电磁法

何先生统一了频率域电磁法全区电阻率的定义和算法,构建了包括广域三维电磁场全波形数据采集、分析、处理和信号提取、三维电磁场张量的全波形正反演理论技术体系,成功研制了广域电磁法的仪器和装备,并在油气勘查、固体矿产、工程勘察等领域应用,取得了突出的地质效果和经济效益,为电磁勘探

开辟了崭新的研究领域。

广域电磁法^[7]是相对于传统的可控源音频大地电磁法 (Controlled source audio frequency magnetotellurics, 简称 CSAMT)^[9]和磁偶源频率测深法 (Frequency sounding with magnetic dipole, 简称 MELOS)方法提出来的。CSAMT 采用人工场源,克服了大地电磁法(Magnetotellurics, 简称 MT)场源的随机性和信号微弱的缺点。但是它沿用远区测量一对正交电、磁分量,按远区近似公式计算视电阻率的做法,又限制了它的适用范围。远区测量的信号微弱,背离了采用人工源使信号强大的初衷;如果在近一些的地方测量,确实能增大信号强度,可是远区近似公式又难以成立(略去了不可略去的高次项,牺牲了精度)。出现了新的矛盾。MELOS 方法突破了“远区”的限制,大大拓展了频率域电磁法的观测范围,与 CSAMT 相比,本来可以取得一定优势,但是它把非远区的测量结果“校正”到远区去的作法,增加了野外和室内工作的代价,又回到了远区的老路,有点得不偿失。

针对上述两种常用电磁法的不足,何先生提出了广域电磁法。广域电磁法继承了 CSAMT 使用人工场源克服场源随机性的优点,也继承了 MELOS 方法非远区测量的优势;摒弃了 CSAMT 远区信号微弱的劣势,扩展了观测适用的范围;也摒弃了 MELOS 方法的校正办法,保留了计算公式中的高次项。广域电磁法利用适合于全域的公式计算视电阻率,大大拓展了人工源电磁法的观测范围,提高了观测速度、精度和野外效率。广域电磁法和伪随机信号电磁法结合起来,形成了独具特色的一种新的电法勘探方法。

5.1 广域电磁法原理

所谓“广域”,就是指突破“远区”的局限,在包括远区,也包括非远区的广大地区进行测量,把电磁测深的观测范围扩大到包括非远区的广大区域。其算法是直接从电偶源全区精确公式出发:

$$E_x = \frac{IdL}{2\pi\sigma r^3} [1 - 3\sin^2\varphi + e^{-ikr}(1 + ikr)] \quad (28)$$

式(28)是均匀大地表面上水平电偶极源的 E_x 的严格的、精确的表达式。根据式(28)可以定义广域意义上的视电阻率:

$$\rho_a = K_{E-E_x} \frac{\Delta V_{MN}}{I} \frac{1}{F_{E-E_x}(ikr)} \quad (29)$$

$$\text{式中: } K_{E-E_x} = \frac{2\pi r^3}{dL \cdot MN}, \Delta V_{MN} = E_x \cdot MN。$$

式(29)构成了广域电阻率的计算基础。

在包括远区也包括部分非远区在内的广大区域进行测量, 观测人工源电磁场的一个分量(而不是彼此正交的一组电、磁分量), 计算广域视电阻率值, 这就是广域电磁法的基本原理。

5.2 广域电磁法的特点

广域电磁法也是一种人工源频率域电磁勘探方法, 通过发送与接收不同频率的信号来探测不同深度的地电信息。广域电磁法发送的是伪随机电流信号, 而不是普通 CSAMT 的变频方法, 一次所发送的伪随机电流信号中包含多个主频成分, 它们的振幅大小相近。广域视电阻率的计算公式是严格的, 没有近似舍弃的, 可以在非远区工作, 而且只需要测量电磁场的一个分量。广域电磁法摒弃了 CSAMT 法变频发送、只能在远区测量、且必须测量正交两个电磁场分量的弱点, 总而言之, 广域电磁测深法有以下主要特点:

- 1) 只需要测量电磁场的一个分量, 大大提高了勘探速度和精度。
- 2) 广域电磁勘探不必要求在“远区”工作, 可以在“非远区”测量。
- 3) 广域电磁发送伪随机电流信号, 一次发送就包含了多个有效频率, 且每个频率幅值接近, 相对于 CSAMT 法每次只能发送一个频率信号的变频法而言, 效率大大提高, 电源利用率高。
- 4) 广域电磁接收机只需测量一个电磁场分量, 信号通道量最低可减少到一个, 因而接收机的成本相对较低, 能够实现一台发送机发送、许多台接收机同时接收, 实现大规模三维电磁勘探, 极大地提高了电磁法勘探效率以及勘探的精度和勘探效果。
- 5) 非远区测量获得的接收信号大, 观测精度和效率都能得到明显提高。

采用多收发距工作方法广域电磁法还具有以下基本特点:

- 1) 在远区利用电磁感应原理测深, 在中近区通过多次覆盖利用了几何测深的原理测深, 因而将电磁感应测深和直流电法几何测深有机融合, 具有坚实的理论基础, 是电磁勘探的方法创新。
- 2) 增加了不同收发距这个新增的一维信息量, 频谱激电的信息就蕴含其中, 又由于可以得到高信噪比和高精度的数据, 因而为电性全信息(电阻率与激电参数)同时反演成像奠定的坚实基础, 为高分辨率反演成

像提供了必需的信息, 为实现勘探目标的定量分析、解释和评价提供了可能性, 对提高勘探效果十分有益。

广域电磁法的核心是采用电磁场的全域精确公式迭代计算提取视电阻率, 这样可以在“非远区”进行测量, 大大拓展了人工源电磁法的观测范围, 提高了观测速度、精度和野外勘探效率, 形成了独具特色的一种新的电法勘探方法。

5.3 广域电磁法的应用

广域电磁法已在新疆吐哈盆地、青海柴达木盆地、宁夏固原地区、山东招远、安徽淮南、内蒙查干、湖南龙山、湖南保靖等地开展了大量野外实验与研究, 在油气藏探测、页岩气勘探、金属矿探测、煤田采空区探测等方面取得了很好的效果, 为石油天然气, 特别是湖南省非常规天然气勘探做出了不可替代的科学贡献。

为了促进湖南省页岩气的勘探开发, 2012 年 5 月, 何先生课题组在龙山地区采用广域电磁法开展页岩气调查评价, 以了解工作区内 1 500 m 以浅的地层(尤其是页岩地层)分布、埋深、产状及构造断裂情况。为页岩气调查研究项目的钻井设计、井位选择提供地球物理参数及电磁法勘查成果资料, 为勘查开发提供基础资料数据。

依据龙山地区部分实测物性标本, 各岩性层物性参数值统计见表 4。不同地层岩性之间的电性差异为广域电磁法的应用提供了良好的地球物理前提。

表 4 物性参数统计表

Table 4 Statistics of electrical parameter of rock samples

地层	主要岩性	电阻率范围/ (Ω·m)	电性 特征
清虚洞组 (ε _{1q})	灰岩和白云岩	N×10 ² – n×10 ³	次低阻
金山顶组 (ε _{1j})	砂质页岩、细砂岩、 粉砂岩	60–150 (100)	低阻
明心寺组 (ε _{1m})	砂质页岩、细砂岩	120–350 (200)	次高阻
牛蹄塘组 (ε _{1n})	灰黑-黑色炭质页岩 夹少量粉砂岩、细砂岩, 底部夹炭质灰岩	50–150 (90)	低阻
震旦系 上统(Z ₃)	灰岩、白云岩	1 050 – 6 080 (1 500)	高阻

图 13 为剖面的二维反演及推断解释断面图, 整个电阻率断面分层信息清楚。结合已知地质资料和岩石标本电性测试数据, 推断认为第一电性层为清虚洞组

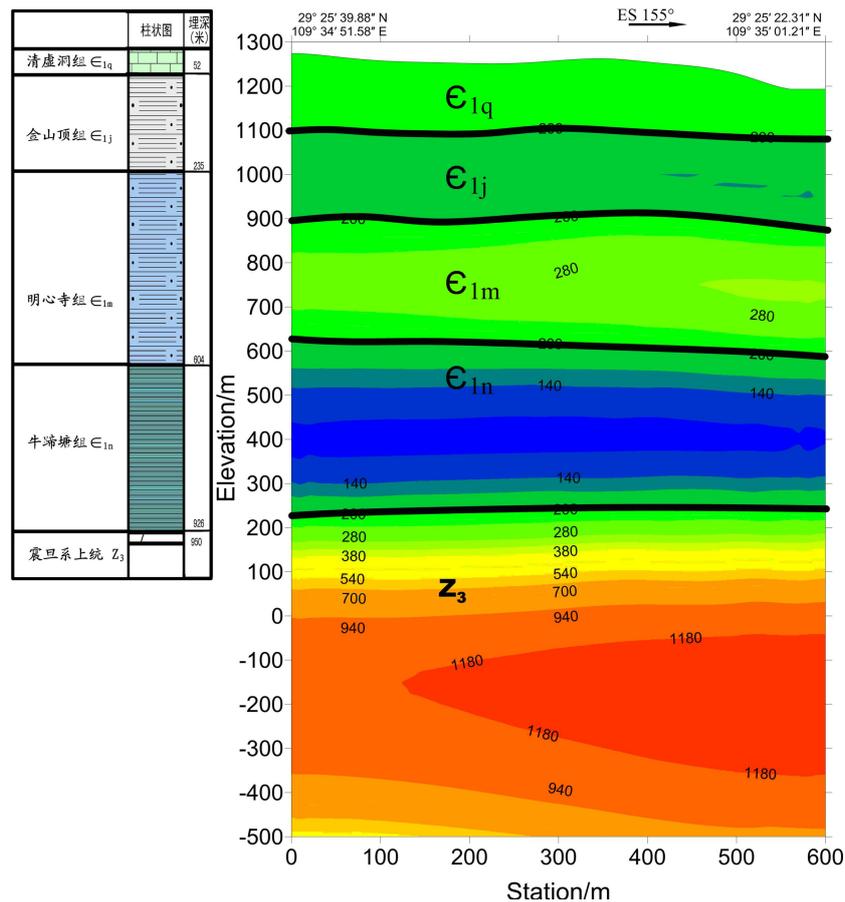


图 13 龙山地区页岩气广域电磁法反演解释断面图

Fig. 13 Cross section of Wide Field EM

灰岩和白云岩，第二电性层为金山顶组砂质页岩、细砂岩、粉砂岩，第三电性层为明心寺组砂质页岩、细砂岩，第四电性层为牛蹄塘组炭质页岩，第五电性层为震旦系上统的灰岩、白云岩。地质解释结果与龙山2#揭示的地层柱状图吻合。

6 结语

何先生从事高等教育及科学研究60年，长期致力于勘探地球物理理论、方法与观测系统的研究，以及相关领域的才人培养。成果丰硕、桃李满天，迄今发表论文370余篇、出版专著12部，获得国家发明专利授权13件，培养硕博研究生及博士后100余位。曾荣获李四光地质教师奖、宝钢教育特等奖。领衔完成的科研项目屡获嘉奖，“均匀广谱伪随机电磁法理论及应用研究”2006年获国家技术发明二等奖，“中国双频激电研究与应用”1995年获国家科技进步二等奖，“电阻率勘探干扰异常消除方法的研究”1978年获全

国科学大会奖，“双频激电法”2005年被中国地质调查局列为重点推广技术。何先生1990年被授予“全国高等院校先进科技工作者”，1992年被授予“全国有色金属工业劳动模范”。

何先生学贯中西，严谨治学、著作等身，豪迈豁达、宽厚待人。何先生学术造诣精湛，更具宏观战略思维和领导才干，赢得广泛尊崇；此外在书法、诗词上的深厚功底也充分展示出何先生的广博情怀和儒雅魅力。

何先生以“云麓正气”自励，在他的办公室挂着的那副自勉联：“开域继踪，蓄伟志：通外弘中，因成大业；诚心善教，勉诸生：励精图治，尽展长才”，正是他的人生追求最贴切、最恰当的真实写照。

REFERENCES

- [1] 何继善, 周正秀. 电阻率法地形改正中的点电源场与线电源场问题[J]. 地质与勘探, 1975, 11(8): 45-51.
HE Ji-shan, ZHOU Zheng-xiu. 2-D terrain influence to

- resistivity method [J]. *Geology and Prospecting*, 1978, 14(7): 69-72.
- [2] 何继善. 双频道交流激发极化法初步研究[J]. *中南矿冶学院学报*, 1978, 9(2): 1-11.
HE Ji-shan. Preliminary study on Dual-frequency IP method [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*, 1978, 9(2): 1-11.
- [3] 何继善, 鲍光淑. 论双频道幅频法的电流波形[J]. *中南矿冶学院学报*, 1981, 12(2): 29-37.
HE Ji-shan, BAO Guang-shu. Waveform discussion of Dual-frequency IP method [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*, 1981, 12(2): 29-37.
- [4] 何继善, 鲍光淑. 双频道幅频观测的异常[J]. *中南矿冶学院学报*, 1982, 6(2): 49-54.
HE Ji-shan, BAO Guang-shu. The observed anomalous of Dual-frequency IP method [J]. *Journal of Central-South Institute of Mining and Metallurgy*, 1982, 6(2): 49-54.
- [5] 何继善, 鲍光淑. 频率域激发极化法中的双频道幅频观测[J]. *物探与化探*, 1983, 7(3): 182-192.
HE Ji-shan, BAO Guang-shu. The observation of Dual-frequency IP method in frequency domain [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 1983, 7(3): 182-192.
- [6] 何继善. 双频激电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
HE Ji-shan. *Dual-frequency IP method* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [7] 何继善. 广域电磁法和伪随机信号电法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
HE Ji-shan. *Wide field electromagnetic sounding methods and pseudo-random signal coding electrical method* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [8] 何继善, 邹声杰, 汤井田, 王恒中, 杜华坤. 流场法用于堤防管涌渗漏实时监测的研究与应用[C]//当代矿山地质地球物理新进展. 2004: 217-222.
HE Ji-shan, ZOU Shen-jie, TANG Jing-tian, WANG Heng-zhong, DU Hua-kun. Research and applications of flowing field method for real-time monitoring levee piping and seepage control [C]// *New Progress of Contemporary Mine Geology and Geophysics*, 2004: 217-222.
- [9] 何继善. 可控源音频大地电磁法[M]. 长沙: 中南工业大学出版社, 1990.
HE Ji-shan. *Control source audio-frequency magnetotellurics* [M]. Changsha: Central South University of Technology Press, 1990.

(编辑 彭超群)