

doi: 10.11720/wtyht.2016.5.13

王宏宇,李涛.双频激电法在西澳矿产勘查中的应用[J].物探与化探,2016,40(5):923-928.http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.5.13

Wang H Y, Li T. The application of dual frequency IP method to the exploration of mineral resources in Western Australia[J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2016, 40(5): 923-928. http://doi.org/10.11720/wtyht.2016.5.13

双频激电法在西澳矿产勘查中的应用

王宏宇^{1,2}, 李涛³

(1. 西北有色地质勘查局, 陕西 西安 710054; 2. 西色国际投资有限公司, 陕西 西安 710054; 3. 西北有色地质勘查局七一七地质总队, 陕西 宝鸡 721015)

摘 要: 结合双频激电法在西澳大利亚典型覆盖区(热带稀树草原覆盖区)的应用实践, 讨论了在特殊地质景观条件下, 双频激电法在工作设计中装置选择、工作频率选择、接地电阻改善、电磁耦合克服等方面遇到的问题以及解决这些问题所提出的技术方法, 总结整理了一些具有代表性的工作准则和野外工作经验。结论表明: 双频激电法在澳洲某金矿的特殊地理环境下的应用效果良好, 圈定的激电异常符合地质预期, 有进行工程验证的必要; 使用双频激电法, 在设计及施工过程中应综合分析各方面的影响因素, 科学决策, 并对可能影响测量数据准确性的因素采取有效的措施, 这样才能充分发挥其技术优势, 取得令人满意的成果。

关键词: 双频激电法; 隐伏矿体; 幅频率; 偶极-偶极装置; 电磁耦合; 澳大利亚

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2016)05-0923-06

近年来, 随着我国国民经济的发展, 在国家“走出去”的战略号召下, 我国众多地勘企业在国外取得矿权, 参与到国际矿业勘查、开发领域中, 取得了优异的成绩。

双频激电法^[1]作为重要的物探方法在国外矿产勘查实践中有着广泛的应用, 据不完全统计, 在伊朗、马来西亚、秘鲁、印度尼西亚、尼日利亚、沙特阿拉伯、澳大利亚等国家, 双频激电法都展示了其明显优势。然而对于西澳大利亚等地的某些地质条件复杂、地表景观特殊的地区在应用双频激电法进行勘查工作时必须考虑到各方面的影响因素, 具体问题具体分析, 施工设计过程中应根据地质任务要求, 充分考虑矿种类型、地电条件、及人文干扰等因素, 科学地选择合适的装置类型、工作频率等技术参数, 这样才能发挥双频激电法的技术优势, 获得令人满意的地质效果^[2]。

1 方法原理

双频激电法的技术核心是利用双频发送机将包括高频和低频两种频率的电流合成为具有特殊波形

的双频电流供入地下, 双频接收机同时接收经大地传导后的两种频率电流的响应^[1-2]。利用观测得到的高频电位差 ΔV_h 和低频电位差 ΔV_l 计算视幅频率 F_s , $F_s = (\Delta V_l - \Delta V_h) / \Delta V_l \times 100\%$ 以及根据高频电位差 ΔV_h , 供电电流 I , 装置系数 K , 计算得到视电阻率值 $\rho_s = K \Delta V_h / I$ 。双频激电除可利用视电阻率、幅频率这两个反映激电效应^[3-4]的基本观测参数之外, 还可以计算出视金属因素 M_F 和视激电率 G_s 这两个导出参数, 其物理实质是利用视电导率、电阻率对 F_s 进行加权:

$$M_F = \frac{\rho_{sl} - \rho_{sh}}{\rho_{sl} \cdot \rho_{sh}} = \frac{F_s}{\rho_{sl}} = F_s \cdot \sigma_{sl}, \quad (1)$$

$$G_s = K \cdot \frac{\Delta V_l - \Delta V_h}{I} = F_s \cdot \rho_{sh}, \quad (2)$$

式中: $\rho_{sl} = K \cdot \frac{\Delta V_l}{I}$ 和 $\rho_{sh} = K \cdot \frac{\Delta V_h}{I}$ 分别表示用低频、高频电位差计算的电阻率, σ_{sl} 是 ρ_{sl} 的倒数, 表示低频电导率。

根据双频激电原理研制的 SQ-3C 系列双频激电仪具有精度高、装置轻便、抗干扰能力强、勘探深

度大的特点,双频激电及配套仪器在国内外矿产勘查、工程勘查领域中应用广泛^[5]。

2 应用实例

工区位于西澳大利亚皮尔巴拉(Pilbara)地台中部的玛丽娜盆地内^[6]。盆地内部地质构造复杂,岩浆活动强烈,盆地内断裂主要以韧性剪切带为主,其中最主要的是自盆地中部横穿而过的玛丽娜(marina)剪切带,该剪切带长约60 km,宽约1 km,走向近东西,倾向向南陡倾,局部倒转。剪切带东、西分别被2条北东向的后期断裂所错断,伴随有基性—超基性、酸性岩脉侵入。工区内出露的地层主要有太古代德格雷(De Grey)群的玛丽娜组杂砂岩、页岩以及康斯坦丁组(Constantine)杂砂岩。工区内矿体成因主要与断层、岩性有关,矿体形态较简单,多呈透镜状,陡倾;矿石矿物主要有黄铁矿、磁黄铁矿等金属硫

化矿物;围岩主要为页岩、粉砂岩和杂砂岩^[7]。

工区成矿地质条件优越,找矿潜力巨大,但由于其属于典型的澳洲稀树草原地区,地表覆盖严重,岩石露头零星,地表矿化信息少,以往地质填图和测量工作效果欠佳,因此物探方法成为寻找隐伏矿体的重要手段。表1列出了工区周边钻孔岩、矿石物性参数测量统计结果,表明矿体与围岩具有较高的幅频率差异,在本区开展双频激电法具有良好的地球物理工作前提。双频激电扫面测量结果见图1、图2所示。测量选用偶极-偶极装置,偶极距 $a=40\text{ m}$,隔离因子 $n=3$ 。

图1中视幅频率异常明显,异常主要集中在区内东南部接近中心区域的位置,异常走向近于北东70°方向,异常强度较大, F_s 值在4%以上。以4.5%的 F_s 值圈定的异常体在走向上长约400 m,宽约180 m,异常封闭;工区西南、西北边缘也存在 F_s 异

表 1 工区岩、矿石物性参数测量统计

岩性	标本数量/块	幅频率/%	幅频率算数平均值	电阻率/($\Omega\cdot\text{m}$)	电阻率算数平均值
石英脉型矿体	18	2.4~4.5	3.38	65~390	210
页岩型矿体	20	2.6~8.4	4.42	26~350	192
粉砂岩	4	1~1.6	1.33	15~140	83
页岩	50	1.3~3.2	2.07	32~210	125
杂砂岩	66	0.7~2.4	1.57	19~120	75
出露岩体	10	1.2~4.1	2.75	165~870	470

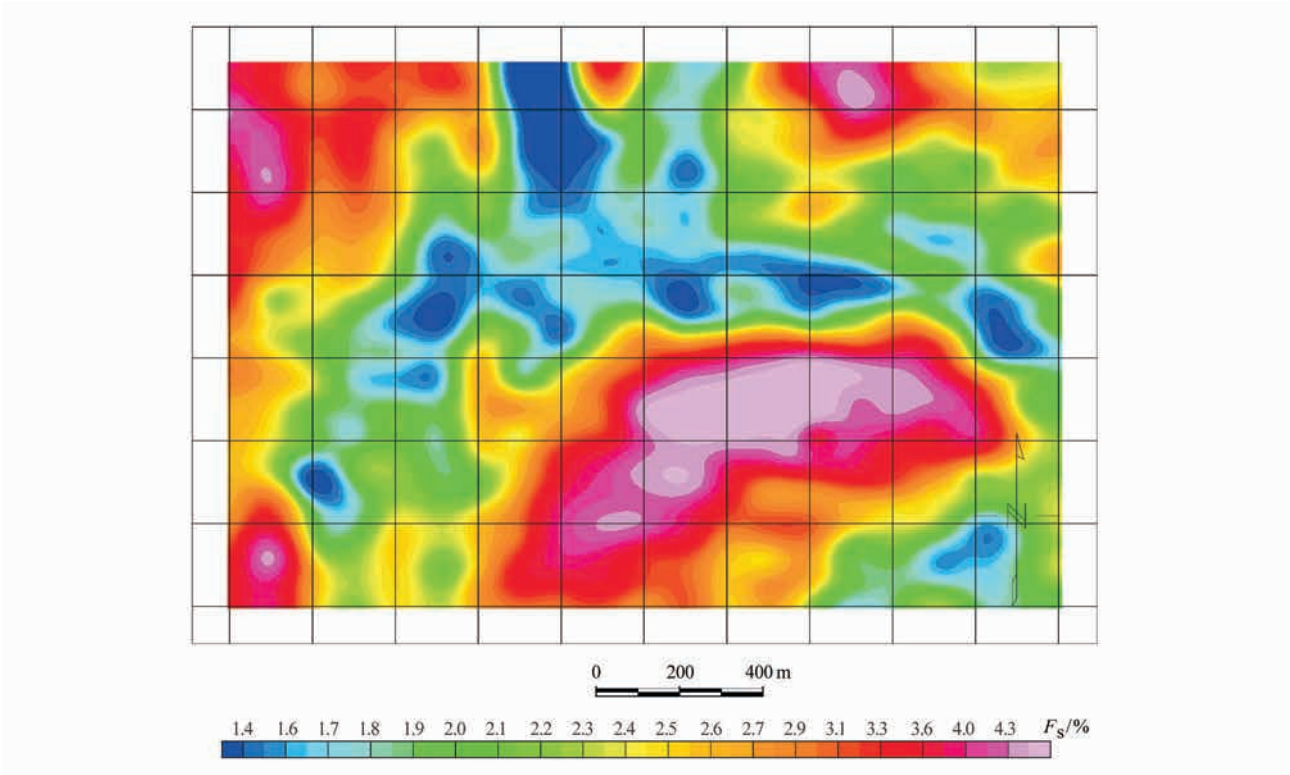


图 1 西澳工区双频激电测量视幅频率等值线平面

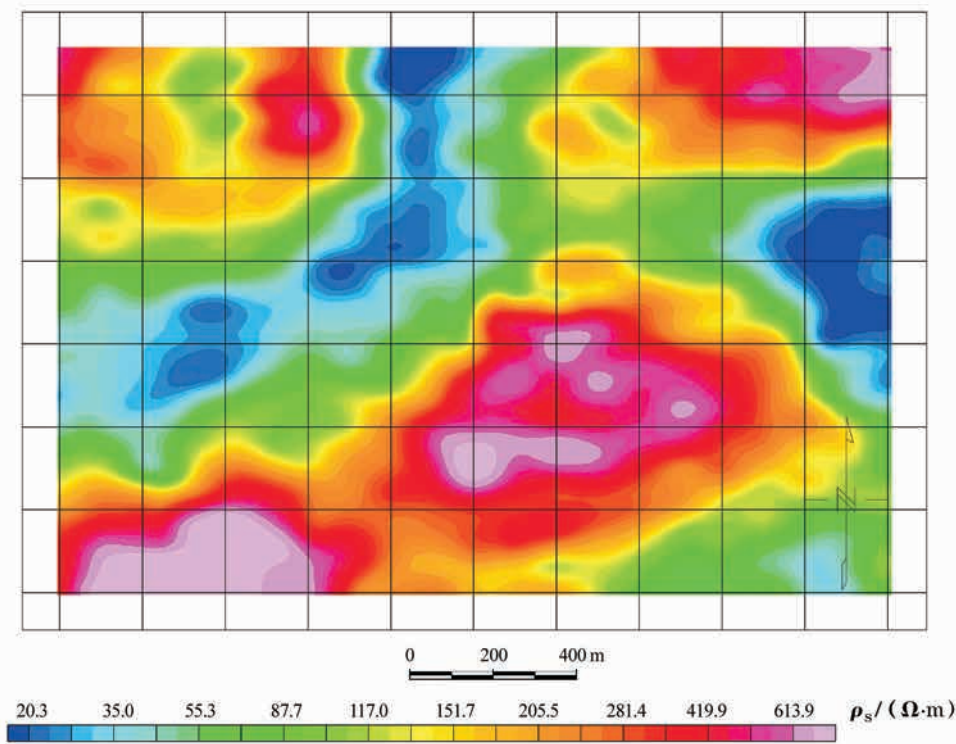


图 2 西澳工区双频激电测量视电阻率等值线平面

常,但规模较小;同样,工区的东北边缘也存在这种 F_s 异常,并且这类异常等值线不封闭。推测这些位于工区边缘、规模小、等值线不封闭的幅频率异常是工区外部激电异常体的边缘部位的反映,如果进一步扩大工区范围,有望在工区的外围发现有规模的异常。

图 2 中的视电阻率异常也很明显。高阻异常主要集中在工区西南边缘、东南部近中心区域及工区东北边缘,异常自南西至北东方向规模逐渐变小,3 处异常体分散不连通,中间存在中高阻、低阻间隔,形成密集电阻率梯级带,异常体连线走向近于北东 50° 方向;高阻电阻率异常幅值很大,在 $500 \Omega \cdot \text{m}$ 以上。同时注意到工区西北边缘存在中高阻异常显示,异常主体不在工区范围之内。

综合工区已有地质资料,对比物性参数测定结果,推测工区的高阻异常是由火山岩体引起的,并且 3 处高阻异常体在深部可能有一定的连带关系。中高阻异常反映的是火山岩体与砂岩、页岩之间的接触过渡部位以及含有基性岩成分的砂岩、页岩混合体。根据区域地质资料,该处有一规模较大的断裂构造通过,该断裂是主剪切带在工区西部的一个重要分支,该断裂不仅经过工区,其向西南方向一直延伸至工区西南部。断裂总体走向接近北东向。高阻异常沿工区主断裂走向分布,据此推测工区的火山

岩体也是沿着主断裂走向方向发育,在工区外围的北东—南西向也有火山岩体存在,这些岩体的形成可能与玛丽娜主剪切带的近北东向的断裂构造关系密切。由于工区黄铁矿化发育,金异常与黄铁矿化关系密切,综合物性参数测定结果,推测视幅频率异常是由黄铁矿化蚀变引起,异常间接反映了金矿化信息,具有进一步研究的价值。

为了解异常体产状、埋深及连续性等特征,在垂直异常走向上布置了双频激电测深剖面。一般情况下,应该优选多个隔离系数的偶极—偶极测深装置,但是由于随着 n 的增加,接收到的测量信号变得微弱,在不增加更大工作量的情况下,为达到更大的测量深度,综合考虑选用对称四极测深装置, $AB/2$ 距离最大达到 260 m,测深点点距 40 m。测量结果见图 3、图 4 所示。图中可见,在电阻率二维反演断面 20~80 m、120~260 m 之间都有一明显高阻异常体,呈椭圆状。在幅频率二维反演断面上,高极化特征的异常体顶板埋深一般都在 40 m 以下,异常主要集中在高阻异常体下部或是 2 个高阻异常体之间的部位。

总结激电测深反演结果,可以看出:①激电异常比较明显,反演之后的幅频率可达到 6% 以上,背景值一般在 4% 以下;②高极化体异常一般存在于高阻异常体之间或是其下腹部位的接触带上,高极化

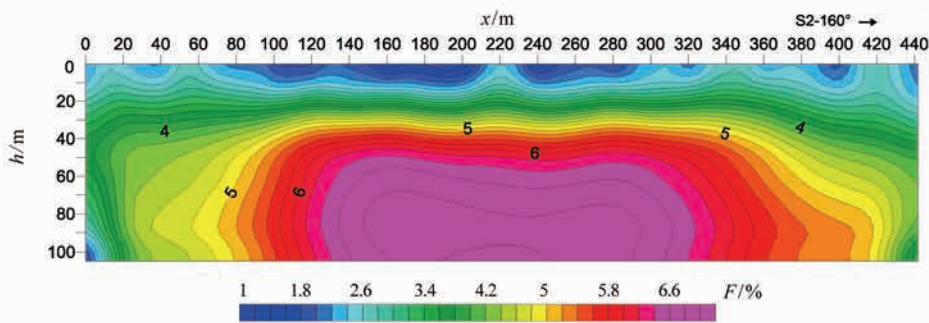


图 3 激电测深幅频率反演等值断面

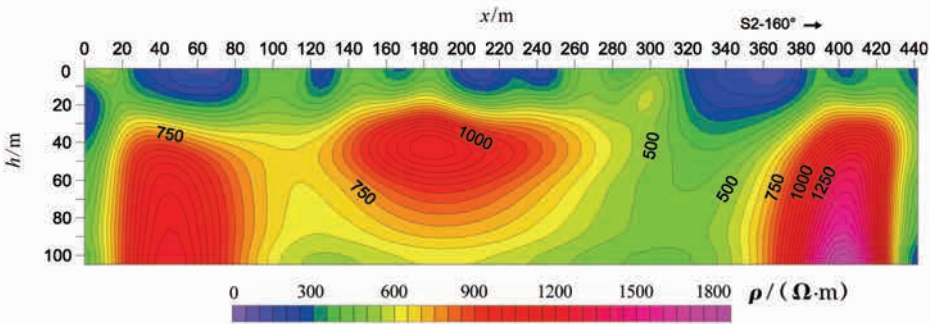


图 4 激电测深电阻率反演等值断面

异常体是以具有高阻特征的火山岩为背景围岩的；
③高阻围岩背景对于激发极化现象具有放大的作用，这一点需引起注意，避免将一些无工业价值的矿化现象当作矿体来对待。

3 技术问题探讨

双频激电的设计与施工涉及诸多方面的内容，本次工作过程中遇到的装置选择、频率选择、接地电阻改善、电磁耦合克服等问题^[8-9]具有一定的代表性。

3.1 装置选择

电极装置指的是电极排列形式。电极排列形式多种多样，常用的有中间梯度、偶极-偶极等排列方式。各种装置各有优缺点，到底选用哪一种装置完成测量工作应该根据客观要求和主观愿望，结合地质任务、地质效果、经济效益等因素来综合考虑。

本次工作中选用的是偶极-偶极测量装置，主要原因如下：

1)已有钻孔揭示区内矿体产状较陡，中间梯度装置对陡倾斜、良导、极化体的电阻率异常反映不明显，偶极-偶极装置对各种形态、产状的极化体的电阻率异常、激电异常都有很好的反映。

2)工区地下水发育，个别区域电阻率不高，电磁耦合效应严重，偶极-偶极电磁耦合效应相对于中间梯度等装置来说较弱^[10-11]。

3.2 频率选择

SQ-3C 双频激电仪具有 4 种频率组合可选，分别是 1、1/13 Hz，2、2/13 Hz，4、4/13 Hz，8、8/13 Hz。具体选择哪一组频率组合要根据矿种类型、工作效率、电磁耦合效应来讨论。

1)各种岩、矿石的幅频率特性各不相同，实践表明对于具有面极化特征的致密块状结构的金属硫化矿，选用双频激电低频段的频组，幅频率异常更加明显；而对于斑岩型铜矿等细脉、细粒浸染状结构的呈体极化特征的矿体，选用高频段频组效果更好一些。

2)双频激电的工作频率最低 0.077 Hz，最高 8 Hz。工作中，双频接收机一般需要接收 4 个周期以上的双频信号才能读取准确数值。选用高频频组的工作效率高于使用低频频组。

3)双频激电法属于频率域激电法的范畴，同样存在着电磁耦合效应。对于常用的中间梯度装置和偶极装置，其工作频率最高频率参照

$$f_{\max} \leq \rho_s \left(\frac{100}{AB/2} \right)^2,$$
$$f_{\max} \leq \rho_s \left(\frac{180}{(n+1) \cdot a} \right)^2$$

进行选择，式中： $f_{\max}$ 为双频频组的高频频率， ρ_s 为大地电阻率， AB 为中梯装置的电极距， n 为隔离因子， a 为偶极子长度。

基于以上三点考虑,本次工作中选用双频 2 频点的 4、4/13 Hz 频组。

3.3 接地电阻改善

接地电阻包括供电电极之间的接地电阻和测量电极 MN 间的接地电阻。

1)减小供电电极间接地电阻,增大供电电流,不仅可以提高信噪比,还可以减小接地电阻上的能耗,提高电源利用率,减小电磁耦合效应。减小接地电阻的关键之一在于要增加土壤与电极间的有效接触面积,这次工作中使用了多根电极并联供电,这样增加了电极与大地的有效接触面积,达到了有效减小接地电阻的目的。

2)对于测量电极着重考虑的是测量电极的稳定性,工作中选用化学性质稳定的紫铜棒作测量电极使用,而铁棒或是铝棒由于其极化性质不稳定,不适合作为测量电极使用。SQ-3C 输入阻抗大于 5 MΩ,测量工作中在电极周围浇水使电极 MN 间接地电阻达到 50 kΩ 以下,这样接收机可以接收到 99%以上的信号,避免由于 MN 间接地电阻过大引入干扰,保证了观测数据的质量。

3.4 电磁耦合克服

电法工作中,电磁耦合现象不可避免。当电磁耦合效应显著时,会引起 F_s 值畸变,因此在双频激电工作中必须充分掌握电磁耦合效应的规律和特点,这样才能采取有效措施克服电磁耦合效应对测量数据造成的影响。电磁耦合效应包括电容耦合和感应耦合两种^[12]。

1)电容耦合是由供电导线、测量导线与大地之间的分布电容引起的,其大小可以用下式计算:
中间梯度排列

$$\Delta F_s = 2\pi f c R \frac{(AB/2)^2 - (MN/2)^2}{MN/2}.$$

$$\ln \left(\frac{AB/2 - MN/2 + \sqrt{d^2 + (AB/2 - MN/2)^2}}{AB/2 + MN/2 + \sqrt{d^2 + (AB/2 - MN/2)^2}} \right)^2,$$

偶极-偶极排列

$$\Delta F_s = 2\pi f c R a n(n+1)(n+2) \ln \left[\frac{(n+1)^2}{n(n+2)^2} \right],$$

式中: f 为频率, R 为接地电阻, c 为分布电容, d 为 AB、MN 的水平距离,其他参数意义同上文。

理论计算结果显示电容耦合效应一般影响较小,但需注意到当导线在潮湿的地表上或者水中时,分布电容 c 显著增大,可达到地表干燥地区的几十倍以上,因此要避免雨后地表潮湿时工作。

2)感应耦合是供电回路与测量回路之间、供电回路与大地之间的由于电磁互感而引起的电磁耦合

效应。

水平均匀大地模型上中间梯度装置与偶极-偶极装置的感应耦合效应与装置参数和大地物理参数有关。偶极-偶极装置的感应耦合影响为正值,大小取决于综合参数 $\frac{a^2 \cdot f \cdot \mu}{\rho}$;中梯装置的感应耦合效应的影响为负值,其绝对值大小取决于综合参数 $\frac{(AB/2)^2 \cdot f \cdot \mu}{\rho}$,两式中 μ 是大地导磁率, ρ 是大地电阻率。分析可知:一般情况下使用低频频组时感应耦合比使用高频频组小,偶极-偶极装置的抗干扰能力强于中梯装置^[13-14]。

通过对电容耦合、感应耦合的分析,工作中为减小电磁耦合效应影响采取的措施有:①合理选择测量装置,工区地下水发育,大地电阻率较低,感应耦合影响不容忽视,选择抗电磁耦合能力最强的偶极-偶极装置;②避免雨天作业,在雨后等地表极其潮湿的情况下暂停数据采集工作,以免较强的电容耦合效应引起干扰;③注意导线铺设细节,导线不过水、打结、缠绕,避免了漏电等情况的发生。

工作区虽然存在电磁耦合效应的潜在干扰,但上述措施最大限度地削弱了影响,保证了数据质量的可靠性与真实性,为后续的数据解译工作奠定了坚实的基础^[15]。

4 结论

双频激电在澳洲西部某金矿床的应用实践表明,该方法在澳洲西部的特殊地质、地貌条件下同样可以发挥其装置轻便、工作效率高、分辨能力强等优点,工作区圈定的激电异常符合地质预期,已向相关方提出工程验证建议。

同时还要注意到澳洲西部地域辽阔,地质景观各异,地电条件不尽相同,因此双频激电法在工作设计及野外施工过程中应根据地质任务要求、矿种类型、矿体可能的埋深及产状、地电条件等因素,综合分析,全面考虑,科学地选择装置类型、工作频率等技术参数,并对可能存在的影响测量数据准确性的因素采取有效措施,这样才能充分发挥双频激电法的技术优势,取得令人满意的效果。

参考文献:

[1] 何继善.双频激电法[M].北京:高等教育出版社,2006.
[2] 何继善.频率域电法的新进展[J].地球物理学进展,2007,22(4):1250-1254.
[3] 罗延钟,张桂青.频率域激电法原理[M].北京:地质出版社,1988.

[4] 傅良魁.激发极化法 [M].北京:地质出版社,1982.

[5] 白宜城,崔燕丽,等.SQ 型双频激电仪的研制 [J].物探与化探,2002,26(6):457 - 460;2009,45(6):669 - 675.

[6] Wellman P. Upper crust of the Pilbara Craton, Australia;3D geometry of a granite/greenstone terrain [J]. Precambrian Res, 2000,vol.104;175 - 186.

[7] Phil Bierwirth.Hyperspectral Mapping of Mineral Assemblages Associated with Gold Mineralization in the Central Pilbara, Western Australia [J].Economic Geology,2002,Vol.97;819 - 826.

[8] 白宜城,左恒,罗维斌.双频激电在普查找矿工作中应注意的几个技术问题 [J].矿产与地质,2003,17(97):451 - 454.

[9] 武炜,张宝林,梁光河,等.双频激电法在我国西部两类典型覆盖区金属矿体预测中的应用 [J].地质与勘探,2009,45(6):669-675.

[10] 强建科,何继善.椭球体上双频激电法的正演与反演算法 [J].中南大学学报:自然科学版,2007,38(6):1199 - 1205.

[11] Wynn J C,Zong K L.Electromagnetic coupling [J].Geophysical Prospecting,1977,25(1):29 - 51.

[12] Xiang J P,Jones N B,Cheng D,et al.A new method between a valid IP response and EM coupling effects [J].Geophysical Prospecting,2002,50(6):565 - 576.

[13] 王亮,杨武,邹立志.总结中梯装置双频激电负异常观测的几种情况 [J].工程地球物理学报,2009,6(5):607 - 611.

[14] 熊彬,余云春.双频激电法感应耦合的数值计算与分析 [J].物探化探计算技术,2009,31(1):30 - 35.

[15] 屈有恒.井地电阻率及双频激电三维数值模拟与反演研究 [D].北京:中国地质大学,2008.

The application of dual frequency IP method to the exploration of mineral resources in Western Australia

WANG Hong-Yu^{1,2}, LI Tao³

(1. Northwest Mining and Geological Exploration Bureau for Nonferrous Metals, Xi'an 710054, China; 2. Northwest Nonferrous International Investment Co., Ltd., Xi'an 710054, China; 3. No. 717 Geological General Party, Northwest Nonferrous Geological Exploration Bureau, Baoji 721015, China)

Abstract: This paper briefly describes the principle and characteristics of the dual frequency induced polarization method on the basis of the application in typical overburden area (savanna area coverage) of Western Australia, and discusses such aspects as to how to solve the problems met in work plan design, array selection, selection of working frequency, and conductivity improvement, and how to overcome inductively coupled problems under the special geological landscape condition. What is more, the authors give the solutions of these problems and make a summary of some work principles of universal value. In conclusion, the dual frequency induced polarization method has good application effect in the special environment of a gold mine in Australia, the delineation of the IP anomalies is consistent with the expectation of geologists, and engineering verification is necessary for further work. It is held that the dual-frequency IP method in the process of design and field construction in overseas mineral exploration work should be based on the comprehensive analysis of the influencing factors in various aspects as well as scientific decision-making, and effective measures should be adopted to eliminate the possible factors affecting the accuracy of the measurement data. Only in this way can we enjoy the full play of the technical advantages of the dua-frequency IP method and obtain satisfactory results.

Key words: dual frequency induced polarization; concealed orebody; amplitude frequency; dipole-dipole device; electromagnetic induction; Australia

作者简介: 王宏宇(1987-),男,硕士,黑龙江绥化人,从事地球物理勘查与研究 工作。E-mail:why_wutan@ 163.com