地 球 物 理

大回线源瞬变电磁技术在西藏山南地区探矿中的应用

薛国强[1], 秦克章[1], 黄树峰[2], 陈 雷[1], 李 貅[3], 戚志鹏[3]
(1. 中国科学院矿产资源研究重点实验室, 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029;
2. 中国冶金地质总局第二地质勘查院, 福建莆田 351111; 3. 长安大学地质与测绘工程学院, 陕西西安 710054)

[摘 要]对大回线源瞬变电磁非中心点场和中心点场响应进行对比讨论, 认为核函数具有相似的函数形态和函数性质, 因此对于非中心点各分量也可以表示成与中心点垂直分量类似的多项式形式, 采用待定系数法, 完成视电阻率定义, 通过模型检验认为方法可行, 结果可靠。使用这一技术对西藏山南地区的帕南、努日等两个矿区进行探测, 解释结果与钻探验证一致, 取得了较好的效果, 研究成果对于大回线瞬变电磁法的进一步发展应用具有重要的指导意义。

[关键词]大回线源瞬变电磁 非中心点场 中心点场响应 山南地区 探测
[中图分类号]P631.3 [文献标识码]A [文章编号]0495-5331(2011)01-0100-07

Xue Guo-qiang, Qin Ke-zhang, Huang Shu-feng, Chen Lei, Li Xiu, Qi Zhi-peng. Application of large-loop TEM technology to mineral exploration in the Shannan area, Tibet[J]. Geology and Exploration, 2011, 47(1): 0100-0106

1 前言

瞬变电磁场法(Transient Electromagnetic Method, 简称 TEM)对低阻异常体有更高的灵敏度, 对施工场地有着极强的适应能力, 因此回线装置的 TEM 方法得到了广泛应用(朴化荣, 1990; Taylor, 1992; Edwards, 1997; 蒋邦远, 1998; Chen, 1998; Zhang, 2001; 李貅, 2002; Xue, 2004)。实际应用中, 回线装置发射线框边长一般 200m~800 m, 对于几百米长的发射线框, 只观测发射线框中心一个点就移动位置势必会大大降低 TEM 法的工作效率。这样, 在后来的实际生产中, 回线内瞬变电磁测量装置(俗称大回线源瞬变电磁法)逐步代替了中心回线和重迭回线装置(薛国强, 2007; 石显新, 2009)。即只在回线边长三分之一到三分之二范围内进行观测。这样, 理论上, 需要解决的问题就变成了非共中心点响应计算问题。在非共中心点情况下, 由于观测点位置偏离中心点, 需要解决形双贝塞尔函数积分的计算问题(Raiche, 1987; Xue, 2010)。由于不容易求解含有多重贝塞尔函数的积分方程式, 没有形成专门的适用于大回线内各场点的视电阻率计算公式, 所以实际应用中的视电阻率计算等数据处理和解释仍然以中心回线公式作为依据。

随着物探方法向精确勘探方向的发展, 发现线框内观测区的边缘点与中心点相比, 感应电动势数值偏离达 15%~25%, 这与某些地质目标体, 如埋深几百米的陷落柱、导水小断层, 埋深上千米的金属矿床等引起的异常相比, 已经不可忽略(石显新, 2009)。对于非中心点情况下, 积分比较复杂, 不能直接化成多项式形式, 更不能直接进行傅氏变换, 这也是大回线源瞬变电磁法解释技术迟迟不能进步的主要原因之一。因此, 将大定源回线理论公式引入中心回线装置中, 把两者统一起来形成了趋势; 在此基础上研究视电阻率算法成了当前研究的热点。

对大回线源瞬变电磁非中心点场和中心点场响应进行对比讨论, 认为核函数具有相似的函数形态和函数性质, 因此对于非中心点各分量也可以表示成与中心点垂直分量类似的多项式形式, 采用待定

[收稿日期]2010-10-19; [修订日期]2010-11-28; [责任编辑]郝情情。
[基金项目]本文受中国冶金地质总局"冈底斯东段南部矽卡岩-斑岩 Cu-Au-Mo矿床成矿模式及成矿条件综合研究"、十一五科技支撑计划冈底斯成矿课题(2006BA01A04)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-Q04-07), 国家自然科学基金面上项目(40774066)和国家自然科学基金重点项目(50539080)联合资助。
[第一作者]薛国强(1966年-), 男, 博士, 副研究员, 从事瞬变电磁法及其勘查应用研究。E-mail: ppxueguoqiang@163.com。

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

系数法, 完成视电阻率定义, 通过模型检验认为方法可行, 结果可靠, 使用这一技术对西藏山南地区的帕南、努日等两个矿进行探测, 取得较好的效果。

2　非零偏视电阻率定义式

中心点垂直分量可以表示成多项式形式 (李貅, 2002), 即

$$H_z|_{r=0}=\frac{I_0}{k_1^2a^3}\left[3-(3+3k_1a+k_1^2a^2)e^{-k_1a}\right] \tag{1}$$

非中心点响应为

$$\varepsilon(t)=\xi^{-1}\left[-i\omega\mu_0\pi a^2 I\int_0^{\infty}R_n(\lambda)J_1(\lambda a)J_0(\lambda\rho)d\lambda\right] \tag{2}$$

式中, a为发送回线半径, ρ为偏移距离。该式为双重贝塞尔函数, 不能利用特殊积分直接展开如式 (1)的形式, 从而就更不能直接定义视电阻率表达式。

为便于分析, 计算了中心场点和非中心场点频率域响应曲线 (戚志鹏, 2009) (图 1), 将不同偏移距下响应与中心点垂直分量的频率域响应相比较, 虽然中心点与非中心点响应幅值大小不同, 但是认为它们具有相似的函数形态和函数性质, 因此对于非中心点各分量也可以表示成与中心点垂直分量类似的多项式形式, 如式 (3)所示。

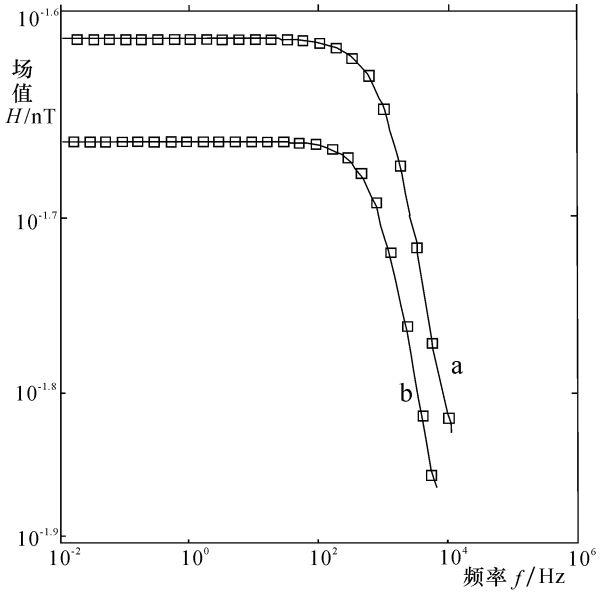


图 1　垂直分量响应曲线图

Fig. 1　Response curves of vertical components

a- 中心点垂直分量响应曲线; b- 非中心点垂直分量响应曲线

a- response curve of central point; b- response curve of none- offset point

$$H_z^{\wedge}=\frac{I_0}{k_1^2a^3}\left[C_{z0}+(C_{z1}+C_{z2}k_1a+C_{z3}k_1^2a^2)e^{-k_1a}\right] \tag{3}$$

其中 c_{z0}、c_{z1}、c_{z2}、c_{z3}为垂直分量拟合多项式系数, 对与非中心点垂直分量多项式系数的求取可以采用最小二乘方法得到不同偏移距下各项系数的值。

根据傅里叶变换的性质, 对多项式表达式的各项进行傅氏变换可得到垂直分量的时间域响应表达式:

$$\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}=\frac{I_0\rho}{a^3}f(u) \tag{4}$$

其中 $B_z(t)$为磁场分量; $f(u)=c_{z0}+c_{z1}(1-\Phi(u))+c_{z2}\sqrt{\frac{2}{\pi}}ue^{-\frac{u^2}{2}}+c_{z3}\sqrt{\frac{2}{\pi}}u^3e^{-\frac{u^2}{2}}$, c_{z0}、c_{z1}、c_{z2}、c_{z3}为非中心磁场垂直分量对应项的系数。

令 $u<<1$, 即$\frac{2\pi a}{\tau}<<1$。将 $\Phi(u)$和 $e^{-\frac{u^2}{2}}$泰勒展开, 并将其代入时间域响应表达式 (4)中, 可以得到非中心点垂直分量的视电阻率表达式, 即如 (5)式

$$\rho_t\left(\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}\right)=\frac{\mu_0}{\pi\cdot t}\left[\frac{c_z\pi I_0\mu_0}{4t\cdot\frac{\partial B_z(t)}{\partial t}}\right]^{\frac{2}{3}}$$

其中

$$c_z=\frac{c_{z2}}{8}-\frac{c_{z1}}{40}-\frac{c_{z3}}{2} \tag{5}$$

为了检验所计算的系数是否正确, 设计了均匀半空间地电模型 ($\rho_1=100\Omega\cdot m$), 并对其进行计算和分析, 计算结果如图 2所示。图中直线表示均匀半空间视电阻率理论值, 曲线表示按 (2) 式计算的视电阻率, 经过计算可知, 总相对误差为 5.75%。对于早期道, 校正后的视电阻率值与真实值之间的误差相对较大, 最大达 18%, 在晚期道, 相对误差达到 1%, 认为均匀半空间视电阻率曲线尾端基本上趋近于均匀半空间真电阻率 $\rho_1=100\Omega\cdot m$, 理论值与计算值一致, 这说明式 (5)定义的视电阻率公式是正确的。

3　在西藏山南泽当矿田的探测应用

采用 TEM 方法在西藏山南地区泽当矿田进行工作, 目的是了解隐伏的含铜钼矿花岗闪长斑岩 (二长花岗斑岩)走向、倾向分布情况。山南地区位于冈底斯山脉与喜马拉雅山脉之间, 因地处冈底斯山脉以南而得名。平均海拔在 3700m 以上。位于冈底斯山以南的河谷地带, 雅鲁藏布江中游。北接

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

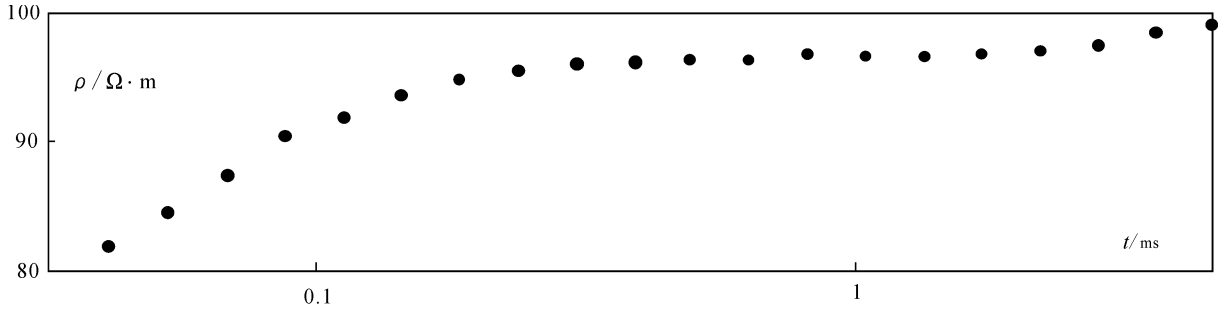


图 2 均匀半空间晚期视电阻率计算结果

Fig 2 Calculation result of late apparent resistivity in homogeneous half- space

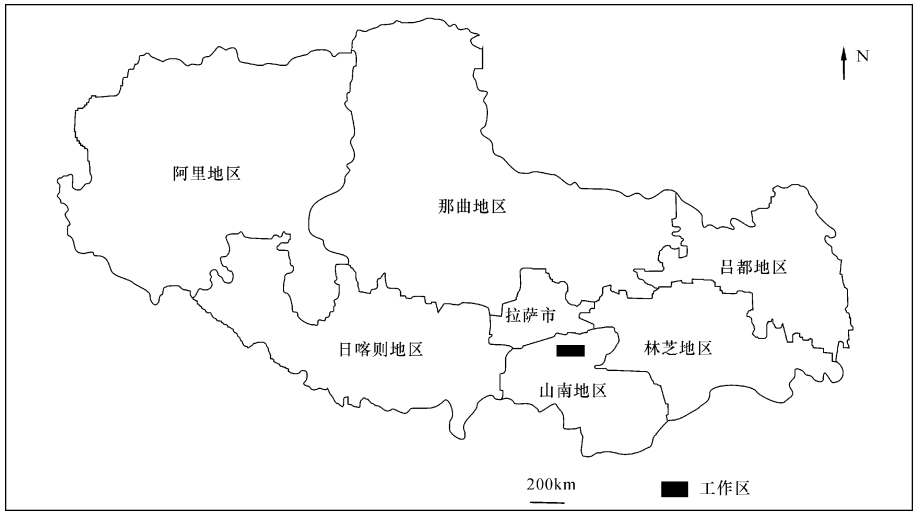


图 3 工区位置示意图

Fig 3 Sketch map showing location of the work area

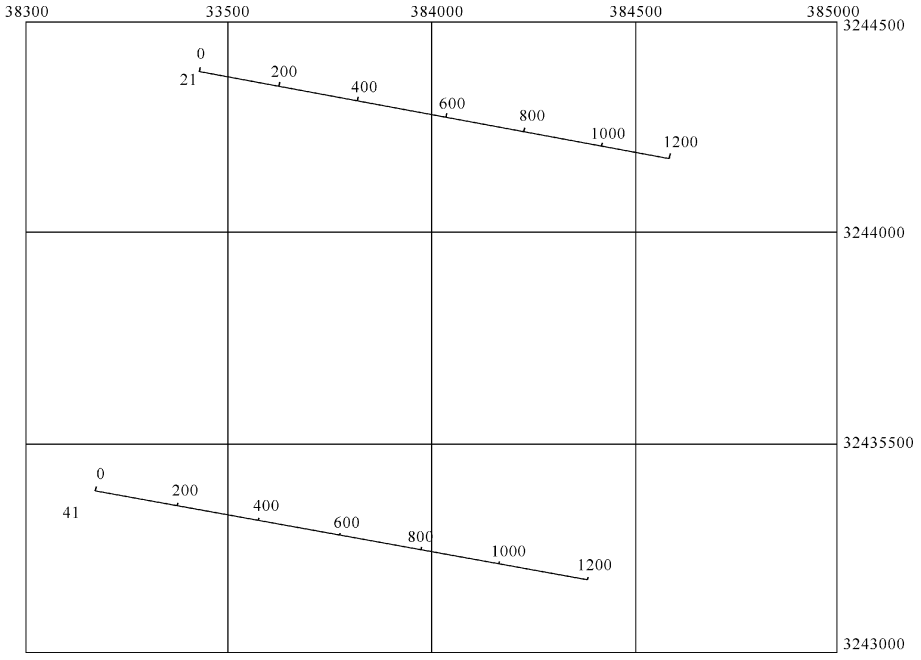


图 4 努日测线布置图

Fig 4 Arrangement of survey lines in the Nuri Cu- W - Mo ore deposit

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

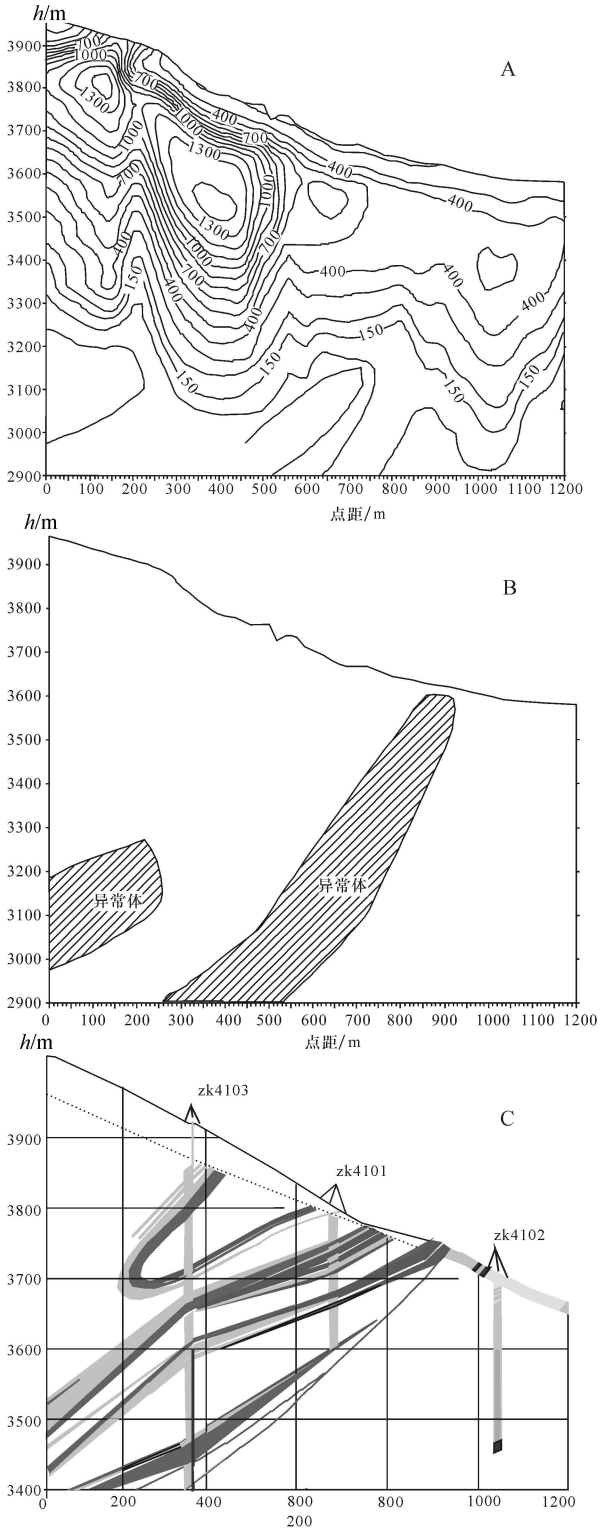


图 5　努日铜钨钼矿区 41线视电阻率等值线断面图推断解释剖面图

Fig 5　Interpretation cross section of TEM data along line No 41 in the Nuri Cu–W–Mo ore district

a–视电阻率等值线图; b–物探解释异常成果; c–地质钻探成果

a– apparent resistivity contour; b– interpreted result; c– geological drilling result

西藏首府拉萨, 西与日喀则地区毗邻, 东与林芝地区相连, 南与印度、不丹两国接壤 (图 3)。

区域侵入岩主要形成于燕山晚期和喜山期, 其中燕山晚期侵入岩以中酸性为主, 喜山期侵入岩以

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

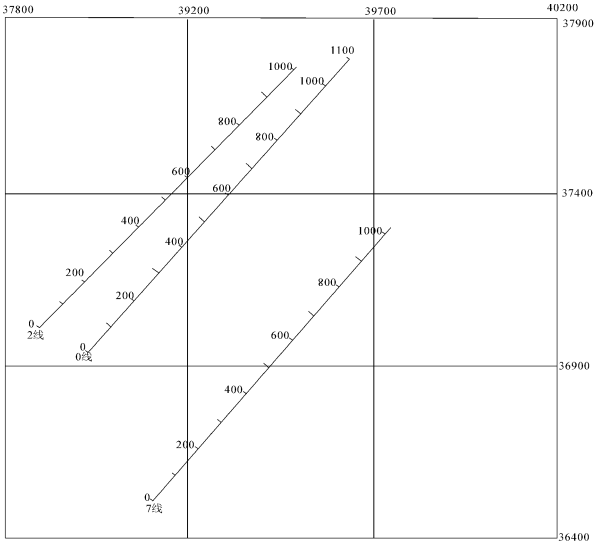


图 6 帕南钨钼矿区测线布置图

Fig. 6 Survey line layout in the Panan W – Mo deposit

酸性为主。侵入岩以发育巨大的复式花岗岩基为特征,主要岩性为石英闪长岩、石英二长岩、花岗闪长岩、黑云二长花岗岩、二长花岗岩、钾长花岗岩、花岗斑岩等。本区含矿标志层为一套石榴石、透辉石、硅灰石为主的块状矽卡岩和层纹条带状矽卡岩,含矿层位主要为下白垩统特定的区域性铜矿源层(李光明,芮宗瑶, 2004;江化寨等, 2005;李光明等, 2006)。

努日铜多金属矿属于矽卡岩型矿床,含矿标志层为一套含石榴石(含 10% 左右的透辉石、透闪石或绿帘石)的厚层块状矽卡岩和层纹条带状矽卡岩,矿化集中于硫酸盐相与碎屑岩相的过渡带,受层间剥离断层控制(阎学义等, 2010)。

经前期概略普查和综合研究,早期认为成因类型属热水环流交代岩浆热液迭加改造型层控铜钼矿床(江化寨等, 2005),现多认为矿床工业类型为岩浆热液成因层矽卡岩型钨铜钼矿床(李光明等, 2006)。初步探明矿床规模可达大型以上。

帕南矿区位于程巴 – 陈巴矿区的东部,冈底斯 – 念青唐古拉板片次级构造单元冈底斯火山 – 岩浆弧东段南缘、雅鲁藏布江弧 – 陆碰撞缝合带北缘之相接部位。

区内出露地层较单一,为第三系罗布莎群(R_l)、白垩系的麻木下组(K_1m)、比马组(K_1b)及三叠系姐德秀组(T_3j)。

矿区中部出露的岩体为喜山早期的花岗闪长岩($\gamma\delta E_2$),岩性为灰白色、深灰绿色,中粒半自形晶粒状结构,块状构造。矿物成分主要为斜长石、钾长石、石英,次为暗色矿物角闪石、黑云母等。

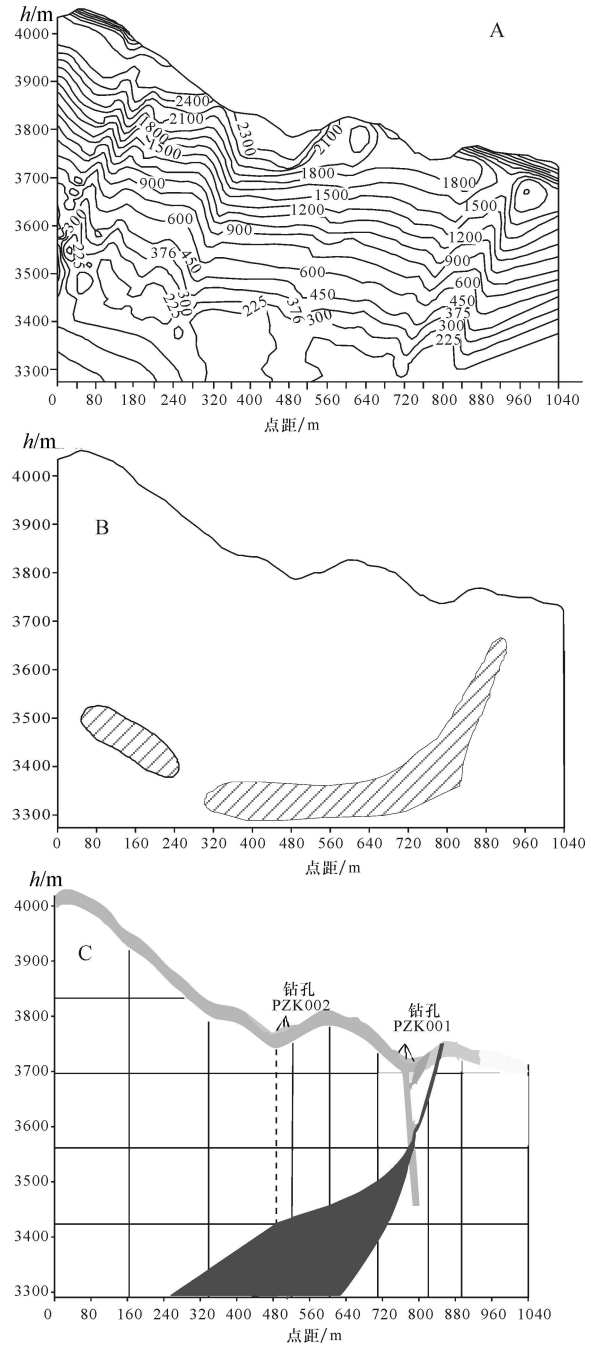


图 7 帕南钨钼矿区 0线视电阻率等值线断面图推断解释成果图

Fig. 7 Interpretation of TEM data along line No. 0 in the Panan W – Mo deposit

a– 视电阻率等值线图; b– 物探解释异常成果; c– 地质钻探成果

a– Apparent resistivity contour; b– interpreted result; c– geological drilling result

瞬变电磁仪器选用加拿大生产的 V8多功能电法仪。采用的大回线源瞬变电磁法进行探测,在回线中心三分之一范围内进行测量,发送回线边长

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

350m, 用探头接收测磁场分量 dB/dt值, 接收面积 10000m^2, 发送频率 25Hz, 迭加次数为 200次, 用公式(5)所定义的视电阻率公式进行计算。

3.1　努日铜钨钼测区成果

为了查明深部矿化情况, 共布置了两条测线, 分别为 21线和 41线(图 4), 测线长度为 1200m, 21线位于矿区的中段异常带上, 41线位于矿区的南段。两条测线大致平行。测线方向为近东西方向。(图 4)

在横向方向上, 视电阻率值变化明显(图 5a), 说明横向电性分布不均匀, 在 500号测点到 800号测点范围内, 电阻率值较低, 推测存在低阻异常体(图 5b), 另外, 在 0号测点到 200号测点之间的深部范围, 也存在一个较低的视电阻率等值线封闭圈, 推测在相应位置发育规模较小的低阻异常体。异常体呈倾斜状, 从浅部到深部向小号测点方向倾斜, 并且下部变大。根据钻探资料(图 5c), 在 500号测点到 800号测点范围内的异常体与钻探资料一致, 异常体上部形态推测与层状矽卡岩型矿体有关, 下部形态推测与斑岩型矿体有关。在 0号测点到 200号测点之间的深部范围的小规模异常体, 没有布置钻探验证, 需要进一步向小号测点方向扩大探测范围, 以确定该异常的赋存边界。

3.2　帕南测区资料解释成果

对于帕南测区, 通过 2008年度的地质、物化探测量以及槽探工程揭露、施工钻探等工作手段, 在地表发现一条规模较大的含矿构造破碎蚀变带, 已在破碎带内发现一个钨(钼)矿体。施工的钻孔深度为 399.72m, 仅见铜、钼矿化, 未打到含矿斑岩体, 为查明地下 400m以下的矿化情况, 首先布置了 0线(图 6), 然后布置了 2线和 7线。

根据视电阻率等值线的变化情况(图 7a), 在 0线的中部位置, 共查出两处异常, 异常体的中心位置分别在 100号、640号测点。分别定名为一号异常体、二号异常体(图 7b)。异常都呈上小下大的葫芦状。在地下 400m以, 异常体规模相对较小, 在地下 500m~600m的位置处, 异常变大。与钻探资料(图 7c)基本一致。对于 1号异常体需要进一步钻探验证。

4　结论

考虑到本次勘探的主要目的任务, 工作方法选择瞬变电磁法。瞬变电磁法的装置选择大回线源装置。由于该装置发送源固定, 这种场源具有发射磁矩大, 场均匀及随距离衰减慢等特点。这种装置对铺设回线的要求不那么严格, 一旦铺好回线后, 可在线框一定范围内直行测量, 因此工作效率高, 成本低。这种场源具有发射磁矩大, 场均匀及随距离衰减慢等特点, 适合于密集点距采样, 但资料处理时借用中心方式的公式进行计算, 带来一定的误差。本文对大回线源瞬变电磁非中心点场和中心点场响应进行对比讨论, 认为核函数具有相似的函数形态和函数性质, 因此对于非中心点各分量也可以表示成与中心点垂直分量类似的多项式形式, 采用待定系数法, 完成视电阻率定义, 通过模型检验认为方法可行, 结果可靠, 使用这一技术对西藏山南地区的帕南、努日两个矿进行探测, 取得较好的效果, 研究成果对于大回线瞬变电磁法的进一步发展应用具有重要的指导意义。

[References]

Chen C. S. 1998. Mapping plate boundaries using TEM method along the Longitudinal Valley[J]. Taiwan Geophysics, 63: 868-879.

Edwards R. N. 1997. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using seafloor transient electric dipole-dipole methods[J]. Geophysics, 131(3): 751-766.

Jiang Hua-zhai, Chen Zi-kang. 2005. Geological characteristics of Lierbu Cu deposit, Naidong country, Xizang[J]. Contributions to Geology and Mineral Resources Research, 20(Supp.): 81-86(in Chinese with English abstract).

Jiang Yuan-bang. 1998. A practical near-zone magnetic source transient electromagnetic exploration[M]. Beijing: Geological Publishing House: 52-53(in Chinese with English abstract).

Li Guang-ming, Huang Shu-feng, Ju Yi-tai. 2010. The geochemical characteristics and origin of skarn rocks in Nuri Cu-Mo-W deposit, Southern Tibet[J]. Geology and Exploration(in review).

Li Guang-ming, Liu Bo, She Hong-quan, Feng Cheng-you, Qu Wen-jun. 2006. Early Himalayan mineralization on the southern margin of the Gangdise metallogenic belt, Tibet, China: Evidence from Re-Os ages of the Chongmuda skarn-type Cu-Au deposit[J]. Geological Bulletin of China, 25(12): 1482-1486(in Chinese with English abstract).

Li Guang-ming, Qin Ke-zhang, Ding Kui-shou, Li Jin-xiang, Wang Shao-huai, Jiang Shan-yuan, Zhang Xin-chun. 2006. Geology and mineral assemblage of Tertiary Skarn Cu-Au-Mo deposits in the Southeastern Gangdese arc: implications for deep exploration[J]. Acta Geologica Sinica, 80(9): 1407-1421(in Chinese with English abstract).

Li Guang-ming, Rui Zong-yao, Wang Gao-ming, Lin Fang-cheng, Liu Bo, She Hong-quan, Feng Cheng-you, Qu Wen-jun. 2005. Molybdenite Re-Os dating of Jiama and Zhibula polymetallic copper deposits in Gangdese metallogenic belt of Tibet and it significance[J]. Mineral Deposits, 24(5): 482-489(in Chinese with English abstract).

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Li Guang-ming, Rui Zong-yao. 2004. Diagenetic and mineralization ages for the porphyry copper deposites in the gangdise metallogenic belt, southern Xizang[J]. Geotectonica et Metallogenia, 28(2): 165-170(in Chinese with English abstract). Li Xiu. 2002. Theory and application of transient electromagnetic method sounding[M]. Xi'an: Shaanxi Scientific& Technological Press: 25-27, 35-36, 56-58(in Chinese).

Piao Hua-rong. 1990. Theory of electromagnetic sounding[M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-10(in Chinese).

Qi Zhi-peng. 2009. TEM multi-components interpreting technology[D]. Xi'an: Chang'an university: 1-20.

Raiche A. P. 1987. Transient electromagnetic field computations for polygonal loops on layered earth[J]. Geophysics, 52(6): 785-793.

Shi Xian-xin, Yan Shu, Fu Jun-mei, Chen Ming-sheng. 2009. Improvement for interpretation of central loop transient electromagnetic method[J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(7): 1931-1936.

Taylor K., Widmer M, Chesley, M. 1992. Use of transient electromagnetics to define local hydrogeology in an arid alluvial environment[J]. Geophysics, 57(2): 343-352.

Xue G. Q., E. A. Elzein, Mohammed W. B. Guo. 2010. The response of large-loop transient electromagnetic method[J]. University of Africa Journal of Science, 1: 18-31.

Xue G. Q. Song J. Yanshu. 2004. Detecting shallow caverns in China using TEM[J]. Leading Edge (Tulsa, OK), 23(7): 694-695.

Xue Guo-qiang. 2007. The feature of TEM respond base on large loop[J]. Oil Geophysical Prospecting, 42(5): 586-590.

Yan Xue-yi, Huang Shu-feng. 2010. Discovery of large Zedang tungsten-copper-molybdenum orefield, eastern Gangdese arc, and new understanding on strike-slip type epicontinental mineralization[J]. Geological Review, 56(1): 9-20(in Chinese with English abstract).

Zhang Z, Xiao J. 2001. Inversions of surface and borehole data from large-loop transient electromagnetic system over a 1-D earth[J]. Geophysics, 66(4): 1090-1096.

[附中文参考文献]

江化寨, 陈自康. 2005. 西藏自治区乃东县劣布铜矿综合地质特征[J]. 地质找矿论丛, 20(Supp): 81-86.

蒋邦远. 1998. 实用近区磁源瞬变电磁法勘探[M]. 北京: 地质出版社: 52-53.

李貅. 2002. 瞬变电磁测深的理论与应用[M]. 西安: 陕西科学技术出版: 9, 25-27, 35-36, 56-58.

李光明, 刘波, 佘宏全, 丰成友, 屈文俊. 2006. 西藏冈底斯成矿带南缘喜马拉雅早期成矿作用-来自冲木达铜金矿床的Re-Os同位素年龄证据[J]. 地质通报, 25(12): 1482-1486.

李光明, 秦克章, 丁奎首, 李金祥, 王少怀, 江善元, 林金灯, 江化寨, 方树元, 张兴春. 2006. 冈底斯东段南部第三纪矽卡岩型Cu-Au Mo矿床地质特征、矿物组合及其深部找矿意义[J]. 地质学报, 80(9): 1407-1421.

李光明, 芮宗瑶, 王高明, 林方成, 刘波, 佘宏全, 丰成友, 屈文俊. 2005. 西藏冈底斯成矿带甲马和知不拉铜多金属矿床的Re-Os同位素年龄及其意义[J]. 矿床地质, 24(5): 482-489.

李光明, 芮宗瑶. 2004. 西藏冈底斯成矿带斑岩铜矿的成岩成矿年龄[J]. 大地构造与成矿学, 28(2): 165-170.

朴化荣. 1990. 电磁测深法原理[M]. 北京: 地质出版社: 1-10.

戚志鹏. 2009. 瞬变电磁多分量解释技术研究[D]. 西安: 长安大学: 1-20.

石显新, 闫述, 傅君眉, 陈明生. 2009. 瞬变电磁法中心回线装置资料解释方法的改进[J]. 地球物理学报, 52(7): 1931-1936.

薛国强, 李貅, 郭文波, 底青云. 2007. 大回线源瞬变电磁场响应特性[J]. 石油地球物理勘探, 42(5): 586-590.

闫学义, 黄树峰. 2010. 冈底斯东段泽当大型钨铜钼矿新发现及走滑型陆缘成矿新认识[J]. 地质论评, 56(1): 9-20.

Application of Large-Loop TEM Technology to Mineral Exploration in the Shannan Area, Tibet

XUE Guo-qiang[1], QIN Ke-zhang[1], HUANG Shu-feng[2], CHEN Lei[1], LI Xiu[3], QI Zhi-peng[3]

(1. *Key Laboratory of Mineral Resources, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100029;
2. *No. 2 Geological Exploration Institute of CMGB, Putian, Fujian* 351111;
3. *School of Geology and Survey, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi* 710054)

Abstract Comparison of responses of central-point and none-zero-offset point fields suggests that there exists similarity between the kernel functions of the both fields, thus the formula of none-zero offset point response can be expressed by the form of polynomial as that of the central point component. So we define apparent resistivity formula by using the undetermined coefficient method. The model test shows that this method is feasible and the result is reliable. This technique has been applied to exploration in the two ore deposits, Panan and Nuri of the Shannan area, southern Tibet. The interpretation agrees with drilling records, indicative of a fairly good achievement. The research result will be of importance for further development of the large-loop TEM technology and its application.

Key words TEM, response of central-point with none-zero-offset point fields, Shannan area, exploration

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net