

大地电磁勘探中的电力线工频干扰

梁生贤^{1,2}, 张胜业¹, 黄理善³, 孙士超¹

(1. 中国地质大学 地球物理与空间信息学院, 湖北 武汉 430074; 2. 中国地质调查局 成都地质调查中心, 四川 成都 610081; 3. 广西桂林矿产地质研究院 地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 大地电磁法勘探中, 因电力线频率不单一, 产生的工频干扰场量级大, 给数据处理造成困难。为给削弱、压制干扰提供依据, 进行了试验。在地表上方某一高度无限长直导线模拟输电线路, 推导、计算在其通以谐波电流时的电磁场值。计算结果表明: 即使距离输电线路 500 m 处, 其干扰场依然可以完全淹没目标信号; 但该干扰场有固有特性和规律。通过探讨得出, 在一个波长之外, 电力线产生的电磁场为平面波转而成为有用信号, 在一个波长之内, 可以根据其电、磁场的方向性有选择地布极, 以避免两个方向的视电阻率同时受到干扰。

关键词: 电力线; 工频干扰; 大地电磁勘探

中图分类号: P631.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-8918(2012)05-0813-04

大地电磁勘探受到的人文噪声干扰中, 以高压输电线路和民用输电线路产生的电磁干扰最为严重, 特别是在基岩裸露或碳酸岩分布的地区, 由于电阻率大而导致电磁信号衰减缓慢, 干扰影响范围广。我国的工业用电频率为 50 Hz, 但在实际中频率并非固定, 会在 50 Hz 左右漂移, 且其电压、电流的畸变还会产生 150、250 Hz 甚至更高次的谐波, 也就是说, 工频干扰的频率并非单一, 而且, 其强大的干扰场往往是目标信号的几十倍。这些给常规大地电磁资料处理(如陷波滤波)带来很多麻烦, 实际生产中往往加以避让。

目前, 有关大地电磁测深的技术规范都要求距高压输电线路 500 m 之外^[1,2], 然而输电线路产生的场不仅和其自身负载的电流幅值、载线根数有关, 还和地下电阻率有关, 因此不同情况下其干扰程度也会有所差异。电力部门和铁道部门一般利用模拟电荷法、矩量法等静态场数值计算方法计算输电线路产生的电磁场, 研究电磁污染对居民健康及日常生活等的影响, 这种计算方法实际上只是计算了一次场, 忽略了地下电导率对场的贡献。李桐林、刘福春等采用自行研制的阵列同步大地电磁测深仪观测长春—哈尔滨 50 万伏高压输电线路的电磁噪声, 并讨论了电力线远场区的情况, 研究其影响范围以及衰减规律等^[3]。对于电磁法勘探, 输电线路产生的工频干扰场可看做是无限长直导线在通以谐波电流时产生的。

考虑到地下电阻率对输电线路的贡献, 以及场的各分量之间的关系, 从平面波叠加原理和麦克斯韦方程组出发, 推导、计算了无限长导线产生的电磁场, 探讨其场随空间的变化情况和规律, 并结合我国目前高压输电线路等级和相关大地电磁测深规范, 为电磁法勘探数据采集集中避免和压制电力线工频干扰提供依据。

1 干扰场基本理论

引入直角坐标系, 使 xOy 面与地面重合, z 轴垂直向下, 并假设沿 y 轴方向 h 高度处有一通以谐波电流的无限长直导线, 如图 1 所示。则在半空间, 其地表电场分量为^[4]:

$$E_{Oy} = \frac{i\omega\mu I}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{1}{u_0} \left[e^{u_0(z+h)} + \frac{u_0 - u_1}{u_0 + u_1} e^{-u_0(z-h)} \right] \cos(\lambda x) d\lambda, \quad (1)$$

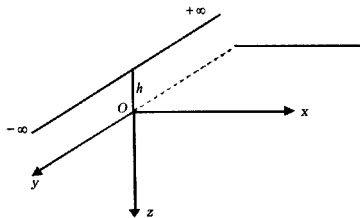


图1 地面上方电力线源

式中: ω 为角频率; μ 为自由空间磁导率; I 为电流强度; $u_1^2 = \lambda^2 - k_1^2$, k_1 为介质的波数。上式经过化简等一系列推导, 得

$$E_{0y} = \frac{i\omega\mu I}{\pi(k_0^2 - k_1^2)} \left[\int_0^\infty u_1 \cos(\lambda x) e^{u_0 \lambda} d\lambda - \int_0^\infty u_0 \cos(\lambda x) e^{u_0 \lambda} d\lambda \right], \quad (2)$$

其中:

$$\begin{aligned} \int_0^\infty u_0 \cos(\lambda x) e^{u_0 \lambda} d\lambda &= \left(\frac{k_0^2 x^2}{x^2 + h^2} - k_0^2 \right) K_0(W_0) + \\ &\left[\frac{1}{x^2 + h^2} - \frac{2x^2}{(x^2 + h^2)^2} \right] W_0 K_1(W_0); \\ \int_0^\infty u_1 \cos(\lambda x) e^{u_0 \lambda} d\lambda &= \left(\frac{k_1^2 x^2}{x^2 + h^2} - k_1^2 \right) K_0(W_0) + \\ &\left[\frac{1}{x^2 + h^2} - \frac{2x^2}{(x^2 + h^2)^2} \right] W_1 K_1(W_1); \\ W_0 &= -ik_0 \sqrt{x^2 + h^2}; \\ W_1 &= -ik_1 \sqrt{x^2 + h^2}; \end{aligned}$$

K_0 、 K_1 为第二类变形贝塞尔函数。

沿 x 轴的磁场水平分量为

$$\begin{aligned} H_{0x} &= \frac{I}{2} \left[\frac{2I_1(-ik_1 x)}{ik_1 x^2} - \frac{L_1(-ik_1 x)}{ik_1 x^2} + \right. \\ &\left. \frac{1}{x} I_0(-ik_1 x) - \frac{1}{x} \sum_{m=0}^\infty \left[(m+1) \left(\frac{-ik_1 x}{2} \right)^{2m+1} \right] \right] / \\ &\left[\Gamma(m + \frac{3}{2}) \Gamma(m + \frac{5}{2}) \right], \quad (3) \end{aligned}$$

式中: I_0 、 I_1 为第一类变形贝塞尔函数, L_1 是尼科耳森函数, Γ 是第二类 Euler 积分。

式(1)中的积分核函数的第一项可解释为空气向地面传播的行波; 第二项为地表、空气界面的反射波, 其中 $\frac{u_0 - u_1}{u_0 + u_1}$ 为界面的反射系数, 对其做变换

$$\begin{aligned} \frac{u_0 - u_1}{u_0 + u_1} &= \frac{(u_0 - u_1)^2}{u_0^2 - u_1^2} \\ &\approx \frac{2\lambda^2 - k_1^2 - 2\lambda \sqrt{\lambda^2 - k_1^2}}{k_1^2 - k_0^2}, \end{aligned}$$

并注意到 $k_1^2 = \varepsilon\mu\omega^2 + i\mu\omega/\rho_1$, 因此可得反射系数正比于地下电阻率值, 近而电场值与地下电阻率成正比关系。从式(3)中也可得出磁场值与地下电阻率成正比关系。

从以上讨论及式(2)、式(3)可知, 电力线产生的工频干扰场强度既与其交变电流强度、供电频率和导线高度有关, 又与地下导电性有关。

2 干扰场特征

2.1 干扰场量级大

目前, 我国高压输电线路常采用的等级有 35、60、110、220、330 及 500 kV, 有三相四线, 即 3 根互相相差 $2\pi/3$ 的火线和一根地线, 也有三相五线, 但其火线依然为 3 根。通常, 导线与地面距离根据输电线路等级及线路经过地区不同而有所差异, 一般在 5~8 m, 500 kV 稍高一些, 在居民区最高, 为 14 m^[5]。负载电流则根据输送等级和功率的不同而不同, 一般在 400~3 000 A 不等。以 500 kV 高压输电线路为例, 假设导线高度为 14 m, 电流幅值为 500 A, 地下真电阻率为 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 单根导线产生的电、磁场强度如图 2 所示。

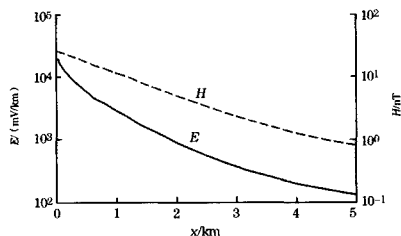


图 2 单根电力线(50 Hz)产生的电、磁场强度曲线

由于电磁法勘探中的 EH4 高频段和 MT 都是利用天然源大地电磁场进行观测的, 在给解释处理带来很多方便的同时, 也带来了信号微弱的缺点。为弥补这一缺点而发展起来的 CSAMT 则利用人工发射的电磁场来增大信噪比。但是相比输电线路, 尤其是高压输电线路产生的电磁场信号, 天然或人工发射的电磁场信号依然非常微弱。根据全球天然电、磁场强度平均振幅谱特征图^[6], 在 50 Hz 左右, 电场强度大约为 0.5 mV/km, 而磁场强度约为 0.004 nT。我国的天然大地电、磁场平均值与全球平均值稍有差异, 但数量级相当。

图 3 为偶极源 50 Hz 不同收发距赤道装置的电、磁场幅值曲线。在 CSAMT 测量中, 通过增大收发距来避免近场效应, 一般收发距最小也在 5 m 左右。图 3 中 5 km 处电场强度为 2.5 mV/km, 磁场强度在 0.01 nT, 与天然场源相比增大了几倍, 但对对比图 2 中输电线路产生的场, 天然源和人工源信号都显得非常微弱, 在 5 km 以内工频干扰都异常强大, 以至于可以完全淹没微弱的目标信号。

这只是单根导线产生的电、磁场强度。在实际

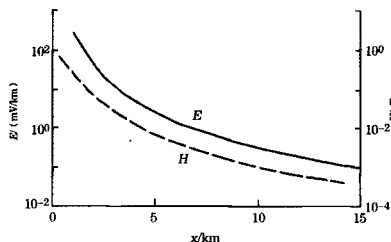


图3 电极源(50Hz)电、磁场幅值

中多为3根火线,每根火线水平间距在1.5 m以内,相对观测点位置而言,火线水平间距及相对高度都可忽略,因此三相高压输电线实际产生的场的强度是单根导线的3倍。当然,不同等级高压输电线、民用线产生的电、磁场强度因负载电流不同而有所差异,但其场强与电流成线性关系(表1)。目前,有关大地电磁测深的技术规范都要求距离高压输电线500 m之外,而表1中500 m处只有载流为1 A的单根导线产生的电、磁场强度和收发距为5 km的CSAMT电、磁场强度在同一量级之上,它比天然场还要大一个量级。

表1 不同负载的单根导线500 m处的电、磁场值

$\frac{I}{A}$	1	10	50	100	500	1000
$\frac{E}{mV/km}$	58.905	589.05	2945.3	5890.5	29453	58905
$\frac{H}{nT}$	0.175	1.751	8.755	17.510	87.547	175.095

2.2 远距离平面波特性

由于输电线是不接地的,产生的场为纯感应场,线源周围的一次交变磁场在地下激发二次电场,后者又产生二次磁场,一次磁场和二次磁场叠加在一起形成总场。在远离输电线的地方,二次磁场占优势,场具有不均匀平面波的特点,并由地表垂直向地下传播,此时它对CSAMT以及MT观测是有效信号。如图4所示,在距离输电线3~4 km以外,由电磁场计算的卡尼亚视电阻率与地下真电阻率值完全吻合,说明此时的场为平面波场。

图4显示,在“近区”,一次磁场占优势,视电阻率高出真电阻率很多倍;随着测点远离输电线而逐渐减小直至接近真电阻率值时,视电阻率首先稍低于真电阻率,然后逐渐达到真电阻率值,这个视电阻率稍低的区域可近似划为“过渡区”;而达到真电阻率的区域为二次场占优势,电磁波为不均匀平面波,划为“远区”。

电磁波的频率越高,波长就越小,因而其进入远

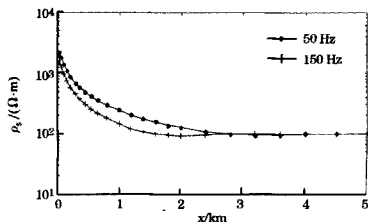


图4 电力线50 Hz及其150 Hz谐波电磁场的卡尼亚视电阻率曲线

区的距离就越小。图4中150 Hz的谐波在2.5 km左右就进入远区,而50 Hz的基波则在4 km左右才进入远区,也就是说,在大约一个波长的距离之外,输电线产生的电磁波为平面波;同理,半空间地下电阻率越大,进入远区的距离就越大,反之亦然。这从物理意义上可解释为电阻率小,电磁场衰减快,影响范围小。注意到水平方向电场和磁场都是电流幅值的线性函数,通过求阻抗时两者比值已消除了视电阻率与电流的关系,因而,上述波区也就与电流幅值无关,而只是频率和地下电阻率的函数。

3 结论

由于电力线的高度、负载电流等是根据当地气候条件和地形地貌而设计的,具体参数不同。通常情况下,假设导线离地高度7 m,地下电阻率为 $100 \Omega \cdot m$,从单个电场或磁场分量来看,即使负载10 A电流的单根导线,在距其5 km的地方,电、磁场值才衰减到与天然场同一量级。因此在MT及CSAMT测量中,单纯避让电力线干扰并不切实际。根据讨论,电力线产生的电磁场有波区和非波区之分,而其划分又跟电流、电压以及载流根数无关,只是频率和地下导电性的函数。相对观测点,导线高度还可简化为一个固定的值或忽略,这样就无需关注电力线的具体参数,而其谐波波长小于基波波长,进入远区的距离近,因此只需关注50 Hz基波的波长。在实际大地电磁勘探中,可先根据已有资料或者其他先验信息,估算出输电线基波电磁波波长,在一个波长以外观测,电力线产生的电磁场不仅不是干扰信号,相反,其频率的不固定性还可以提高信噪比,成为有用信号。在条件允许的情况下,应尽量达到这一要求,而不是单纯地在距高压输电线500 m以外工作。

还应当注意到电力线工频干扰的方向性。由于输电线产生的电场分量为一个方向,即沿着输电线

的方向,而磁场分别为垂直于电场的水平分量和垂直向下的分量,因而对于 MT 矢量或张量测量,其干扰会对 E_x-H_y 对或 E_y-H_x 对有所偏重。基于这点,在距离电力线一个波长内观测时,应将 x, y 轴的其中一个布设得与输电线方向相同,从而避免两对电磁场同时受到工频干扰,导致 ρ_{xy} 和 ρ_{yx} 都失真。

参考文献:

- [1] 国家石油和化学工业局. 石油大地电磁测深法技术规程: SY/T 5820—1999[S]. 1999.
- [2] 中华人民共和国地质矿产部. 大地电磁测深法技术规程: DZ/T 0173—1997[S]. 1997.
- [3] 李桐林, 刘福春, 韩英杰, 等. 50 万伏高压输电线的电磁噪声的研究[J]. 长春科技大学学报, 2000, 30(1): 80—83.
- [4] 沃德 S H. 地球物理用电磁理论[M]. 新疆工学院电磁法科研组, 译. 北京: 地质出版社, 1978.
- [5] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. 110~500 kV 架空送电线路设计规程[S]. 1999.
- [6] 杨生. 大地电磁测深法环境噪声抑制研究及其应用[D]. 长沙: 中南大学, 2004.
- [7] 倪光正. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [8] 李锦才. 数学物理方程[M]. 武汉地质学院数学教研室, 1983.
- [9] 石昆法. 可控源音频大地电磁法理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 溪定平. 贝塞尔函数[M]. 北京: 高等教育出版社, 1998.
- [11] 魏文博. 估计大地电磁测深干扰源位置的简单方法[J]. 地球科学: 中国地质大学学报, 1990, 15(增刊): 121—124.
- [12] Unsworth M. Studying continental dynamics with magnetotelluric exploration[J]. Earth Science Frontiers, 2003, 10(1): 25—38.
- [13] McCracken K G, Oristallo, Hohmann G W. Minimization of noise in electromagnetic exploration system[J]. Geophysics, 1986, 51: 819—832.
- [14] Mette S Munkholm, Esben Auken. Electromagnetic noise contamination on transient electromagnetic sounding in culturally disturbed environment[J]. Journal of Environment and Engineering Geophysics, 1996, 1(2): 119—127.

THE POWERLINE INTERFERENCE IN THE MAGNETO-ELECTROTELLURIC EXPLORATION

LIANG Sheng-xian^{1,2}, ZHANG Sheng-ye¹, HUANG Li-shan³, SUN Shi-chao¹

(1. Institute of Geophysics and Geomatics, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Chengdu Center, China Geological Survey, Chengdu 610081, China; 3. Guilin Research Institute of Geology for mineral Resources, Guilin 541004, China)

Abstract: Because the power frequency is complex and will produce heavy electromagnetic noise in magnetotelluric sounding, the distortion of electromagnetic signal and the troubles in data processing and interpretation may occur under the condition of serious disturbance. In order to provide reference for weakening and suppressing the interference, the authors set the line current source above the ground level to simulate the power lines, inferred the formula and calculated the electromagnetic field. The results show that, even if the transmission distance is 500 m, the disruption field can still completely submerge target signals. However, this interference field has its fixed features, so the following conclusions can be drawn through the calculation and discussion of these features: On the one hand, the electromagnetic field generated by power lines is a plane wave which can be converted into useful signal outside a wavelength; On the other hand, within the wavelength, the situation that apparent resistivity in both directions encounters interference at the same time can be avoided by arranging the electrodes according to the direction of the electric field and magnetic field.

Key words: power-line; power-line interference; MT

作者简介: 梁生贤(1984—),男,中国地质大学(武汉)地球物理工程硕士研究生,主要学习和研究有关电法勘探。

通信作者: 张胜业(1954—),男,中国地质大学(武汉)地球物理与空间信息学院教授,主要研究方向为电法勘探。