

评估管道地磁暴灾害的大地构造分界面算法^{*}

梁志珊¹, 程 薇¹, 于 洋¹, 左 信¹, 毕武喜², 蓝 卫²

(1. 中国石油大学(北京)信息科学与工程学院, 北京 102249; 2. 中石油管道科技研究中心, 河北 廊坊 065000)

摘 要: 大地电性结构的分界处容易加剧管道腐蚀, 穿过大地分界面的管道在分界点处受到的地磁暴致灾风险比较大, 提出一种可用于评估输油气管道的地磁暴灾害风险自评价描述的算法。改进算法的帕金森矢量在定位大地分界面时比传统算法的帕金森矢量更加准确; 在可以识别大地分界面的前提下, 改进算法的帕金森矢量方位角会在分界面附近完成 $\pm 180^\circ$ 到 0° 或 0° 到 $\pm 180^\circ$ 的过渡变化, 距离分界面越近, 方位角越能够反映大地分界面的倾向, 改进算法的帕金森矢量长度在分界点处达到最小值; 相邻地块电导率差值、空中电流源频率以及大地分界面与测线方向的夹角等因素会影响改进算法帕金森矢量的分布特性; 利用帕金森矢量的方位角图和长度图两个判据可以定位穿过分界面位置的管道, 相邻大地分界面之间存在虚拟界面, 需要分析排除。仿真结果表明了这些结论的正确性, 对管道防护具有重要的指导意义。

关键词: 优势面; 帕金森矢量; 大地分界面; 管道关键节点; 致灾风险评估

中图分类号: TE832

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201931.190119

Geodetic interface algorithm for evaluating geomagnetic storms in pipelines

Liang Zhishan¹, Cheng Wei¹, Yu Yang¹, Zuo Xin¹, Bi Wuxi², Lan Wei²

(1. College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum (Beijing),
Beijing 102249, China;

2. PetroChina Pipeline Research and Development Center, Langfang 065000, China)

Abstract: Pipeline corrosion is easily aggravated at the boundary of the earth's electrical structure. The pipeline passing through the earth interface is subject to greater risk of geomagnetic storm disaster at the demarcation point. The algorithm in this paper can be used to evaluate the self-evaluation description of geomagnetic storm disaster risk for oil and gas pipelines. This paper holds that the improved algorithm's Parkinson vector is more accurate than the traditional algorithm's Parkinson vector in locating the geodetic interface. On the premise that the earth's interface can be identified, the azimuth of the improved algorithm's Parkinson vector will change from $\pm 180^\circ$ to 0° or 0° to $\pm 180^\circ$ near the interface, and the closer to the interface, the azimuth can better reflect the inclination of the earth interface, and the length reaches the minimum value at the boundary point. Factors such as conductivity difference between adjacent plots, the frequency of current sources and the angle between the earth's interface and the line direction will affect the distribution characteristics of the improved algorithm's Parkinson vector. The azimuth map and length map can be used to locate the pipeline through the interface position. There is a virtual interface between adjacent earth's interfaces, which needs analysis and exclusion. The simulation results show that these conclusions are correct and have important guiding significance for pipeline protection.

Key words: preferred plane; Parkinson vector; earth's interface; key node of pipeline; assessment of disaster risk

PACS: 91.25. Wb; 98.35. Tf; 02.70. Dh

随着社会经济的发展, 埋地油气管道网络纵横交错且其输送介质具有易燃易爆的特性, 一旦发生损坏, 对我国经济、环境保护以及人民安全等都将产生巨大的负面影响^[1]。管道腐蚀会严重缩短管道的寿命, 由于太阳活动等一系列复杂的过程而产生的管地电位(PSP)会间接引起管道的腐蚀, PSP是指管道与大地之间的电位

^{*} 收稿日期: 2019-04-19; 修订日期: 2019-06-03

基金项目: 国家重点研发计划项目(016YFC0800100)

作者简介: 梁志珊(1958—), 男, 博士, 教授, 从事地磁暴对埋地油气管道设备影响研究; 1972601365@qq.com。

差,其变化幅度越大,对管道的破坏性越大,严重时会使管道发生泄漏^[2]。

Shepherd 等人发现,不同大地电性结构的分界处,电场易发生突变^[3],这会使管道 PSP 发生较大的波动^[4],加剧管道腐蚀。因此大地分界点可以视为管道腐蚀的关键位置,这些位置的管道是重点防护的对象,但是目前,尚未有人提出明确的方法来识别这些管道关键位置。

Parkinson 提出的帕金森矢量是反映地磁优势面倾斜程度的一个矢量,可以用来反映地下电性结构^[5-6],比如海岸效应^[7]和内陆异常^[8]。目前,还没有人对帕金森矢量做过更深入的研究,比如,大地不同位置帕金森矢量的分布特性以及影响帕金森矢量的因素等,而且,利用 Parkinson 提出的帕金森矢量算法(本文暂时定义为传统帕金森矢量算法)计算出的帕金森矢量存在很大的误差^[9],也没有人进行过改进。

本文首先对传统的帕金森矢量算法进行了研究改进,讨论了传统帕金森矢量算法与改进帕金森矢量算法之间的区别;然后,通过建立大地模型进行仿真计算,研究了帕金森矢量在大地不同位置的分布特征,对比分析了传统算法与改进算法的帕金森矢量分布特性以及误差大小,探讨了相邻地块电导率差值、电流源频率、电流源幅值及大地分界面与测线方向夹角这 4 个因素对改进算法帕金森矢量的影响;最后,本文通过仿真研究,提出了改进算法的帕金森矢量在埋地油气管道地磁暴灾害风险评估中的应用。

1 改进算法的帕金森矢量

1.1 改进算法的帕金森矢量公式推导

Parkinson 定义地磁差矢量 $\Delta H, \Delta D$ 以及 ΔZ 为“某时刻的地磁分量与 Δt 后时刻的地磁分量之间的矢量差”,随后验证了这三个地磁差矢量有限定在一个平面上的趋势,并将这个平面命名为“地磁变化矢量优势面”^[4-5]。对一个固定地点来说,磁场分量的数值大小满足

$$F = \sqrt{B_x^2 + B_y^2 + B_z^2} \quad (1)$$

式中: F 为磁场总强度; B_x, B_y 和 B_z 分别为磁场强度北向、东向以及垂直方向的分量。将式(1)在时间 t_0 处进行泰勒展开,得到

$$\begin{aligned} F(t) &= F(t_0) + \frac{\partial F}{\partial B_x} \frac{\partial B_x}{\partial t} (t - t_0) + \frac{\partial F}{\partial B_y} \frac{\partial B_y}{\partial t} (t - t_0) + \frac{\partial F}{\partial B_z} \frac{\partial B_z}{\partial t} (t - t_0) + o(B) = \\ &F(t_0) + \frac{\partial F}{\partial B_x} \frac{\partial B_x}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial F}{\partial B_y} \frac{\partial B_y}{\partial t} \Delta t + \frac{\partial F}{\partial B_z} \frac{\partial B_z}{\partial t} \Delta t + o(B) \end{aligned} \quad (2)$$

若 Δt 趋近于无穷小,并忽略掉高阶无穷小 $o(B)$,则式(2)可进一步整理为式

$$\begin{aligned} F(t) - F(t_0) &= \frac{\partial F}{\partial B_x} \frac{(B_x(t) - B_x(t_0))}{\Delta t} \Delta t + \frac{\partial F}{\partial B_y} \frac{(B_y(t) - B_y(t_0))}{\Delta t} \Delta t + \frac{\partial F}{\partial B_z} \frac{(B_z(t) - B_z(t_0))}{\Delta t} \Delta t = \\ &\frac{\partial F}{\partial B_x} (B_x(t) - B_x(t_0)) + \frac{\partial F}{\partial B_y} (B_y(t) - B_y(t_0)) + \frac{\partial F}{\partial B_z} (B_z(t) - B_z(t_0)) \end{aligned} \quad (3)$$

即: $\Delta F = a\Delta B_x + b\Delta B_y + c\Delta B_z$ 。

式(3)中, $\Delta F, \Delta B_x, \Delta B_y, \Delta B_z, a, b$ 以及 c 满足式

$$\Delta F = F(t) - F(t_0), a = \frac{\partial F}{\partial B_x}, b = \frac{\partial F}{\partial B_y}, c = \frac{\partial F}{\partial B_z} \quad (4)$$

$$\Delta B_x = B_x(t) - B_x(t_0), \Delta B_y = B_y(t) - B_y(t_0), \Delta B_z = B_z(t) - B_z(t_0) \quad (5)$$

由式(3)~(5)可以看出,对于一个固定地点,地磁差矢量确实趋于一个平面,这个平面为该点的磁切平面。

改进算法的帕金森矢量为地磁优势面向上单位法向量在水平面的投影(图 1 粗虚线),其方位角 α 指的是帕金森矢量与 B_x 正向的夹角,长度 L 是帕金森矢量的大小。

很明显,图 1 中的各个参数满足^[10]

$$a(B_x - B_{x_0}) + b(B_y - B_{y_0}) + c(B_z - B_{z_0}) = 0 \quad (6)$$

$$a = \sin I \sin \alpha, b = \sin I \cos \alpha, c = \cos I \quad (7)$$

由式(7)可以得出 α, I 和 L 的表达式

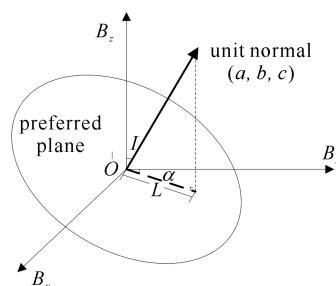


Fig. 1 Diagram of improved algorithm's Parkinson vector

图 1 改进算法的帕金森矢量示意图

$$\alpha = \arctan \frac{b}{a}, \quad I = \arctan \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2}}, \quad L = \sin I$$

(8)

因为只有 Δt 趋近于无穷小时,式(3)才成立,所以式(3)中的 $\Delta F, \Delta B_x, \Delta B_y$ 和 ΔB_z 为 t_0 与 $t_0 + 1$ 时刻的地磁分量的矢量差,其中 t_0 动态变化,为当前时刻的前一时刻值, t_0 时的地磁分量是计算时选取的稳态值。

1.2 传统算法与改进算法帕金森矢量不同点

传统算法与改进算法的帕金森矢量主要有 4 个方面的不同,如表 1 所示。

表 1 传统算法与改进算法的帕金森矢量不同点

Table 1 Difference between traditional algorithm's Parkinson vector and improved algorithm's Parkinson vector

	traditional algorithm's Parkinson vector	improved algorithm's Parkinson vector
preferred plane of geomagnetic variation vector	$a\Delta H_i + b\Delta D_i + (-1)\Delta Z_i = 0^{[9]}$	$\Delta F = a\Delta B_x + b\Delta B_y + c\Delta B_z$
geomagnetic difference vector	the vector difference between the geomagnetic component at time t_0 and $t_0 + \Delta t_i (i = 1, 2, \cdots, n)^{[5-6]}$	the vector difference between the geomagnetic component at time t_0 and $t_0 + 1$
steady state value	no geomagnetic anomalies's average value ^[11]	the value at the previous moment
Parkinson vector	dip angle $I = \arctan \sqrt{a^2 + b^2}^{[9]}$	dip angle $I = \arctan \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2}}$

2 大地不同位置帕金森矢量分布特性研究

2.1 传统算法与改进算法的帕金森矢量研究

(1) 研究背景

为了探讨传统算法与改进算法的帕金森矢量在大地不同位置的分布特性,建立如图 2 所示的模型,该模型由空中电流源和大地两部分组成。大地部分根据电导率的不同分为两个地块,其中地块 I 电导率 $\rho_1 = 0.01 \text{ S/m}$,地块 II 电导率 $\rho_2 = 0.5 \text{ S/m}$,两地块的分界面(图 2 中粗实线)与 x 轴方向的夹角 θ 为 30° 。

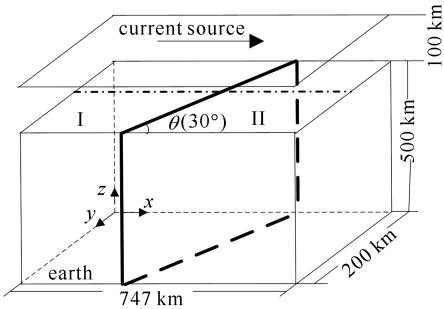


Fig. 2 Block geodetic model
图 2 分块大地模型

(2) 传统算法与改进算法的帕金森矢量分布特性研究

在地表取一条测线,如图 2 中点划线所示,其中 374 km 为地块分界点。利用有限元法计算的测线每一公里改进算法与传统算法的方位角 α 和长度 L 分别如图 3(a)和 3(b)中实线和虚线所示。

由图 3(a)可知,分界点附近改进算法的方位角从 180° 过渡到了 0° ,在距离分界点 1 km 以内位置的 α 角从左到右分别为: $76.759\ 3^\circ, 74.047\ 7^\circ$ 和 $59.517\ 9^\circ$,表明这一段距离内的帕金森矢量垂直于分界面并指向高导区。传统算法的 α 在 368 km 到 369 km 处直接从 180° 变成了 0° ,距分界点 1 km 以内时,其值从左到右分别为: $-0.698\ 7^\circ, -0.698\ 9^\circ$ 以及 $-0.783\ 6^\circ$,说明这一段距离内的帕金森矢量仅仅指向了高导区,并没有垂直于分界面。由图 3(b)可以看出,在分界点处改进算法的长度 L 达到最小值,传统算法的 L 达到最大值。

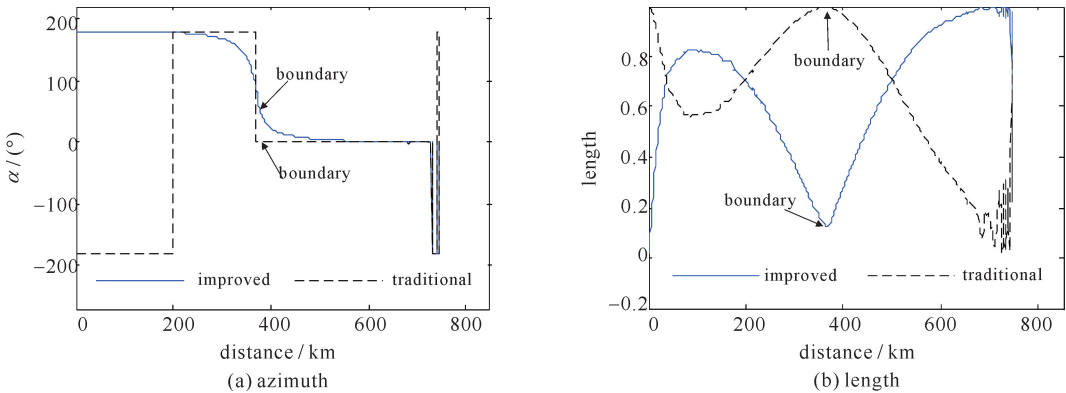


Fig. 3 Azimuth and length of Parkinson vector
图 3 帕金森矢量方位角和长度

图 3 中,高导区边界处 α 和 L 均出现一段震荡,说明这段距离内的帕金森矢量没有明确的指向,不能反映大地电性结构。帕金森矢量应垂直于分界面并指向高导区^[9],由图 3 可知,相比于传统算法的帕金森矢量,改进算法的帕金森矢量不仅能够反映大地电性结构,而且能够较为精确地反映大地分界面的倾向。

2.2 改进算法帕金森矢量的影响因素

本文讨论了以下 4 个因素对改进算法帕金森矢量的影响。

(1) 相邻地块电导率差值

改变地块 I 和 II 间的电导率差值,保持 ρ_2 不变,将 ρ_1 依次设为 10^{-4} , 10^{-3} , 10^{-2} 以及 0.1 S/m ,沿测线计算的 α 和 L 分别如图 4(a)和 4(b)中点划线、虚线、直线以及点线所示。由图 4 可以看出,随着相邻地块电导率差值的增大, α 过渡的距离逐渐减小,减小到一定值时, α 的过渡距离将不再随着电导率差值而变化,相邻地块电导率差值越大,分界点附近 L 越小。

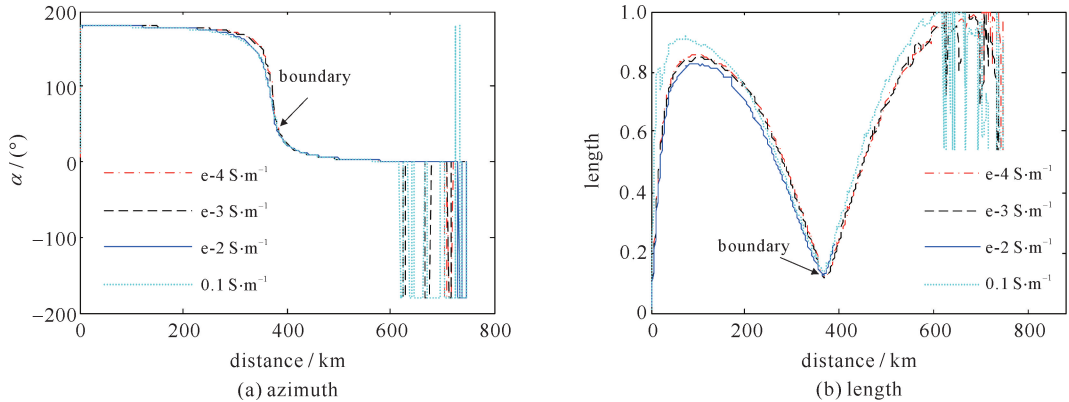


Fig. 4 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 4 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

将 ρ_1 设为 0.49 S/m , ρ_2 保持不变,沿测线计算的 α 和 L 处处表现为震荡特性,即相邻地块的电导率差值不明显时,无法通过改进算法的帕金森矢量来识别大地分界面。

(2) 空中电流源频率

将电流源频率分别设为 3×10^{-5} , 8×10^{-5} 以及 10^{-4} Hz ,沿测线计算的 α 和 L 分别如图 5(a)和 5(b)中点划线、虚线以及直线所示。由图 5 可以看出,随着电流源频率的增大, α 角过渡距离增大,分界点附近 L 减小。

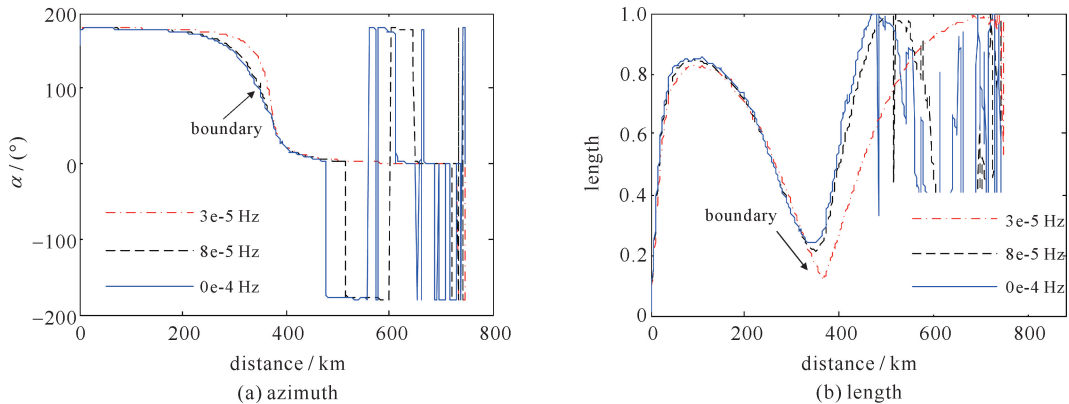


Fig. 5 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 5 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

(3) 空中电流源幅值

设置空中电流源幅值分别为 10^{-5} , 10^{-2} 以及 10 A ,沿测线计算的 α 和 L 分别如图 6(a)和 6(b)中点划线、虚线以及直线所示。由图 6 可以看出,三条曲线完全趋于一致,表明改进算法帕金森矢量的方位角 α 和长度 L 不受空中电流源幅值的影响。

(4) 大地分界面与测线方向的夹角

将分界面与测线方向的夹角 θ 分别设为 20° , 30° 和 60° ,沿测线计算的 α 和 L 分别如图 7(a)和 7(b)中点划线、虚线以及直线所示。由图 7 可以看出, θ 越大, α 的过渡距离越小, L 越大。

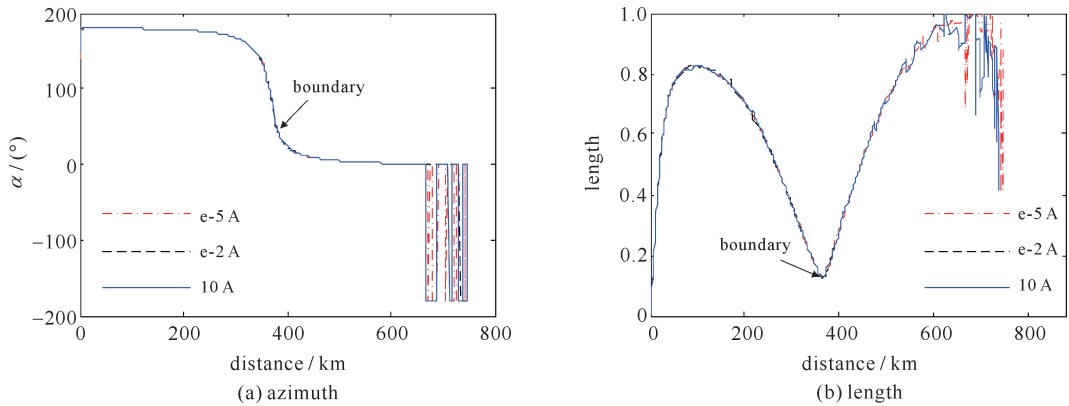


Fig. 6 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 6 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

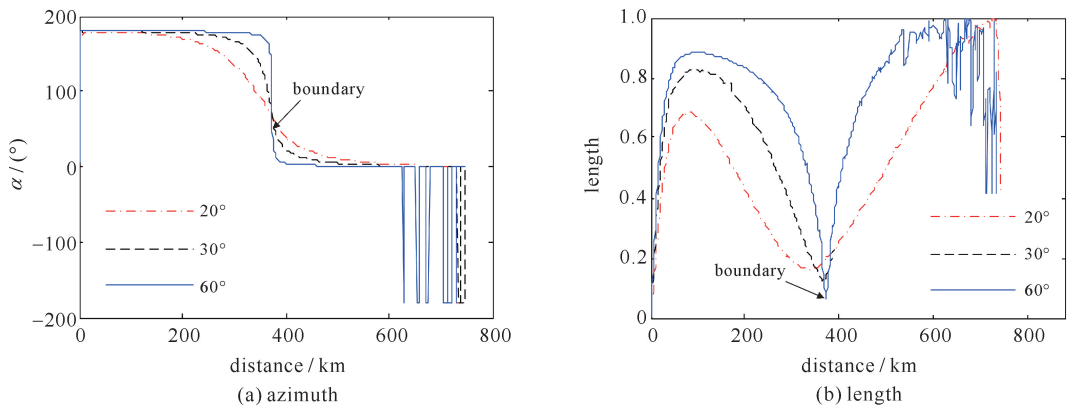


Fig. 7 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 7 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

当 θ 角为 0° 和 90° 时,改进算法的帕金森矢量无法识别大地分界面,即帕金森矢量出现了盲区,为了避免盲区对定位分界面的影响,应将测线与分界面方向保持合适的角度,一般该角度控制在 $20^\circ \sim 70^\circ$ 。

3 改进算法帕金森矢量在地磁暴灾害风险评估中的应用

3.1 定位管道关键位置的方法

假设有管道穿过了大地分界面,则在大地分界面附近,方位角 α 会完成 $\pm 180^\circ$ 到 0° 或 0° 到 $\pm 180^\circ$ 的过渡变化,在大地分界面点处,长度 L 会达到最小值,因此只要计算出沿管道各点改进算法的帕金森矢量,就可以定位管道关键位置。实际管道会穿过多个界面,本文建立了一个含两条大地分界面的模型,如图 8 所示。

在图 8 中,粗实线为地块分界面,点划线为测线,其中 274 km 和 774 km 为分界点,地块 I, II 以及地块 III 的电导率分别为 ρ_1, ρ_2 和 ρ_3 ,其大小分布的可能性讨论如下。

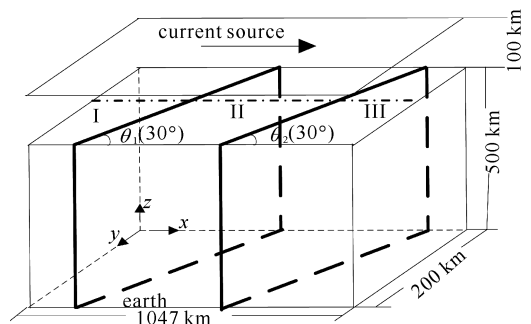


Fig. 8 Block geodetic model

图 8 分块大地模型

(1) 电导率依次增高或依次降低

图 9(a) (b) 为 ρ_1, ρ_2 以及 ρ_3 依次增高时的 α 和 L , 图 9(c) (d) 为 ρ_1, ρ_2 以及 ρ_3 依次降低时的 α 和 L 。

在图 9(a) 中,274 和 774 km 附近,方位角从 180° 过渡到 0° ,与 α 在分界面的分布特性一致,表明这两个位置存在大地分界面,实际上,274 和 774 km 分别对应于模型的左右分界面(图 8 左右粗实线)。501 km 附近, α 从 0° 过渡到 180° ,可以表明此位置存在大地分界面,但实际模型中这条分界面并不存在,本文把这种具有分界面处改进算法的帕金森矢量分布特性,然而实际上并不存在的分界面定义为虚拟界面。在图 9(b) 中,274, 774, 501, 0 以及 1047 km 处长度 L 均达到最小值,表明这几个位置存在大地分界面,其中,274 和 774 km 对应

模型的大地分界面,0 和 1047 km 对应模型的边界,501 km 处出现了虚拟界面。

由图 9(c),(d)可知,电导率依次降低与电导率依次增高的情况类似,改进算法帕金森矢量的方位角图和长度图在实际相邻的大地分界面之间均出现了一条虚拟界面。

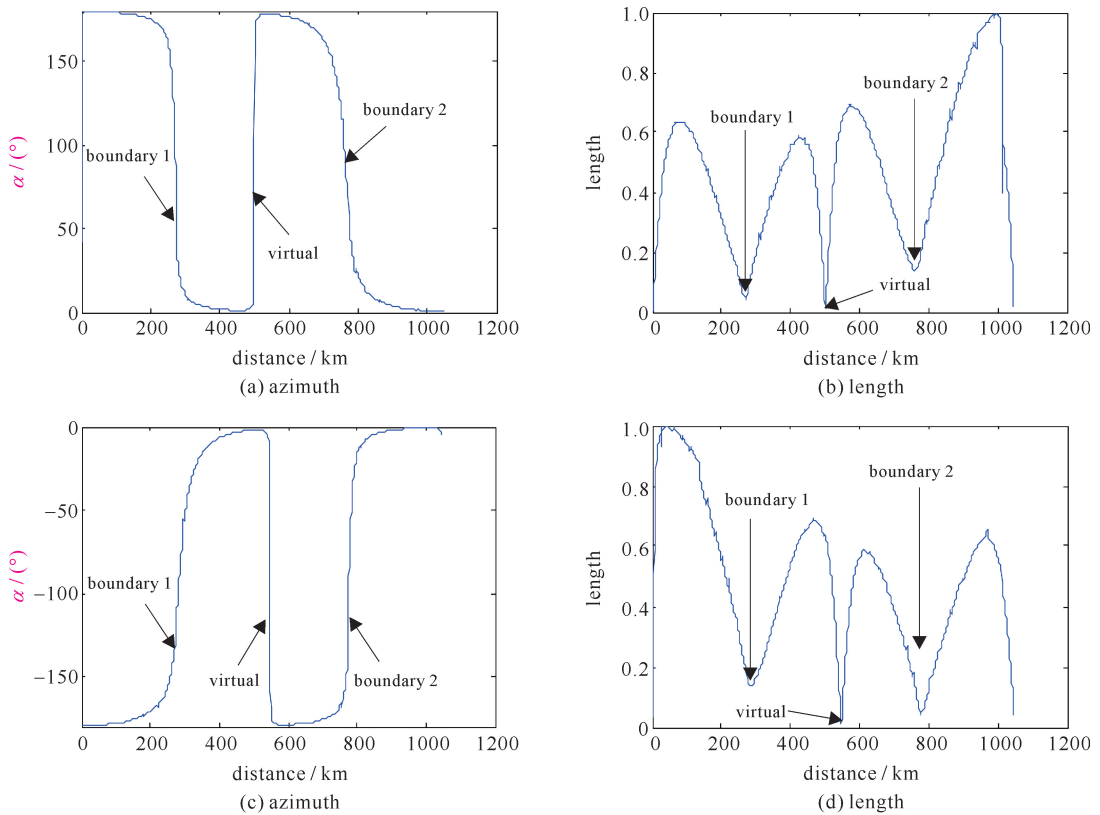


Fig. 9 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 9 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

(2) 电导率两端高中间低或两端低中间高

图 10(a),(b)为电导率两端高中间低时的 α 和 L ;图 10(c),(d)为电导率两端低中间高时的 α 和 L 。

在图 10(a)中,274 和 774 km 附近, α 从 $\pm 180^\circ$ 过渡到 0° ,说明这两个位置存在大地分界面,实际中,这两个位置分别对应实际模型的左右两条分界面。524 km 附近, α 也从 0° 过渡到 180° ,但与实际模型的分界面不对应,即 524 km 处出现了虚拟界面。在图 10(b)中,0,274,774,以及 1047 km 处 L 达到了最小值,实际中,274 和 774 km 分别对应于实际模型的大地分界面,0 和 1047 km 为模型的边界。

由图 10(c),(d)可知,电导率两端低中间高与电导率两端高中间低的情况类似,改进算法帕金森矢量的方位角图在相邻大地分界面之间出现了一条虚拟界面,长度图没有出现虚拟界面。

通过对地块间电导率两种分布情况的研究可知,在定位大地分界面时,应将改进算法的帕金森矢量方位角图作为主判据,利用其排除大地中的虚拟界面并确定大地分界面的位置,将长度图作为辅判据。

3.2 地磁暴对埋地油气管道致灾风险评估方法

理论上,地磁暴对埋地油气管道致灾风险评估的方法,可通过以下 3 个步骤完成:

(1) 经仿真研究,发现间隔 15 km 时,基于改进算法的帕金森矢量能够较好的识别大地分界面,因此应沿管道正上方每隔 15 km 设置一个管道监测点。测量时选中第一个管道监测点并沿地理北、地理东以及垂直向下三个方向分别测量 B_x , B_y 以及 B_z ,直到监测到合适的地磁短周期变化,然后沿地理北偏西 45° 、地理北偏东 45° 以及垂直向下三个方向再次测量 B_x , B_y 以及 B_z ,测量完成后就顺移至管道下一监测点继续测量,直至将所有管道监测点测量完毕。

需要注意的是,测量的每一个监测点地磁短周期变化应尽量相同,测量地磁分量的时候,精度应与地磁台精度保持一致,即小于等于 $1 \text{ nT}^{[12]}$ 。

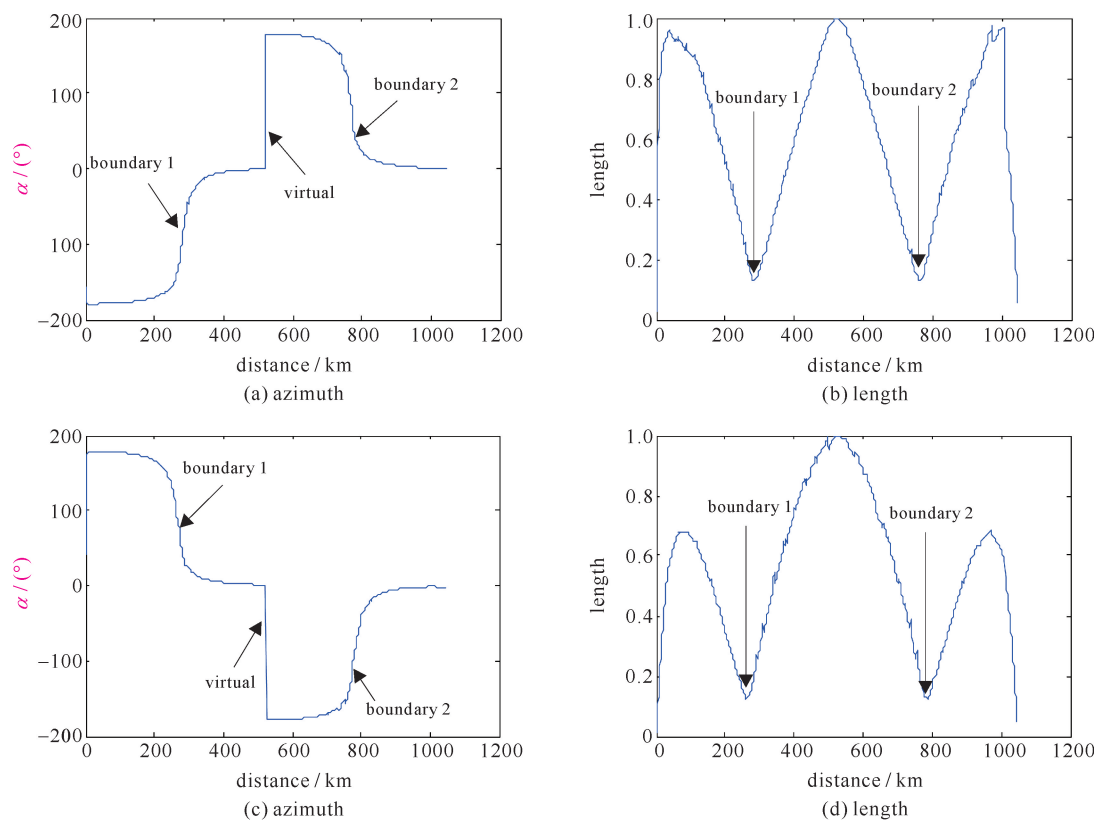


Fig. 10 Azimuth and length of improved algorithm's Parkinson vector

图 10 改进算法的帕金森矢量方位角和长度

(2) 对每一个监测点的数据进行选择处理,然后计算各监测点的帕金森矢量,做出沿管道各监测点的帕金森矢量方位角图和长度图。

(3) 结合改进算法的帕金森矢量在分界点处的特征以及定位管道关键位置的方法,评估地磁暴对各埋地油气管道的致灾风险大小,一般来说,管道关键位置的受灾风险比较大。

4 结 论

本文经过对帕金森矢量的分析研究,对传统算法进行了改进;基于建立的含有分界面的大地模型,对大地不同位置的帕金森矢量分布特性进行了研究;通过对含两条分界面大地模型的仿真计算,对定位管道关键位置的方法进行了总结。本文只进行了仿真计算,基于改进算法帕金森矢量的实际管道评估结果还在研究中,另文发表。本文的结论如下:

(1) 相对于传统算法的帕金森矢量来说,改进算法的帕金森矢量方位角在分界面附近过渡变化,能够更为精确的反映大地分界面的倾向。

(2) 在可以识别大地分界面的前提下,改进算法的帕金森矢量方位角会在分界面附近完成 $\pm 180^\circ$ 到 0° 或 0° 到 $\pm 180^\circ$ 的过渡变化,距离分界面越近,帕金森矢量方位角越能够反映大地分界面的倾向,改进算法的帕金森矢量长度在分界点处达到最小值。改进算法的帕金森矢量受到了相邻地块电导率差值、空中电流源频率以及大地分界面与测线方向夹角的影响,与空中电流源幅值无关。

(3) 相邻大地分界面之间存在虚拟界面,定位管道关键位置时,需利用改进算法的帕金森矢量方位角图和长度图两个判据排除掉虚拟界面并进行定位。

(4) 改进算法的帕金森矢量在分界点处的分布特性以及定位管道关键位置的方法可以用于评估埋地输油气管道的地磁暴灾害风险自评价描述。

参考文献:

[1] 王琪. 浅谈输气管道安全运行必要性[J]. 化工管理, 2016(11): 9. (Wang Qi. Talking about the necessity of safe operation of gas transmission pipeline. Chemical Enterprise Management, 2016(11): 9)

[2] Fernberg P A, Samson C, Boteler D H, et al. Earth conductivity structures and their effects on geomagnetic induction in pipelines[J].

- Annales Geophysicae, 2007, 25(1): 207-208.
- [3] Shepherd S G, Shubitidze F, Lotko W. Calculating induced electric and magnetic fields near coastal regions[C]//EGS - AGU - EUG Joint Assembly. 2003.
- [4] 梁志珊. 一种埋地油气管道受地磁暴影响的 GIC 和 PSP 的计算方法: CN201510579331. X[P]. (Liang Zhishan. A calculation method of GIC and PSP for buried oil and gas pipeline affected by geomagnetic storm: CN201510579331. X)
- [5] Parkinson W D. Directions of rapid geomagnetic fluctuations[J]. Geophysical Journal International, 1959, 2(1): 1-14.
- [6] Parkinson W D. The influence of continents and oceans on geomagnetic variations[J]. Geophysical Journal International, 2010, 6(4): 441-449.
- [7] Schmucker U. Anomalies of geomagnetic variations in the southwestern United States[J]. J Geomag Geoelectr, 1963, 15(4): 193-221.
- [8] 陈伯舫. 渤海西岸的电导率异常[J]. 地球物理学报, 1974(3): 169-172. (Chen Bofang. Conductivity anomaly in west coast of Pohai. Acta Geophysica Sinica, 1974(3): 169-172)
- [9] 龚绍京, 刘双庆, 梁明剑. 中国大陆地磁帕金森矢量特征及其与主要构造关系[J]. 地震学报, 2017, 39(1): 47-63. (Gong Shaojing, Liu Shuangqing, Liang Mingjian. Characteristics of geomagnetic Parkinson vector in Chinese mainland and their tectonic implication. Acta Seismologica Sinica, 2017, 39(1): 47-63)
- [10] Baecher G B, Lanney N A, Einstein H H. Statistical description of rock properties and sampling[C]//The 18th US Symposium on Rock Mechanics(USRMS). 1977: 1-8.
- [11] 龚绍京. 广东省地磁台的帕金森矢量及广州台的系数在河源地震前后的时间变化[J]. 地震研究, 1987(5): 575-582. (Gong Shaojing. Parkinson vector at the geomagnetic stations in Guangdong province and the time-dependent changes of their ratio at Guangzhou station both before and after the Heyuan earthquake. Journal of Seismological Research, 1987(5): 575-582)
- [12] 中国地震局. 地震及前兆数字观测技术规范-地震观测: 试行[M]. 北京: 地震出版社, 2001. (China Earthquake Administration. Earthquake and precursor digital observation technical specifications—Earthquake observation: Trial. Beijing: Seismological Press, 2001)