华北大地涡旋电流现象机理及对管道管地电位影响

梁志珊1, 肖 霄1, 罗雄麟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: 一维分块大地周围的特定电性结构能够在该分块大地中产生涡旋电流。通过反演等效电流源 并根据实际地形构造大地电性模型,分析了涡流处的等效电流和电性结构对其特性的影响,揭示了该特定区域 中产生涡流并使得涡流移动的机理;对铺设在该区域中的输油管道给出了管地电位(PSP)的分布特征。计算 得到的管道 PSP 与实际监测得到的管道 PSP 分布规律的一致性表明了涡旋电流能够加重地磁扰动对管道的 影响。

关键词: 地磁扰动; 等效电流源; 涡旋电流; 大地电导率; 管地电位
 中图分类号: TE832
 文献标志码: A doi:10.11884/HPLPB201931.190120

Mechanism of earth eddy current in North China and its effect on pipeline pipe-soil potential

Liang Zhishan¹, Xiao Xiao¹, Luo Xionglin¹, Zuo Xin¹, Bi Wuxi², Lan Wei²

College of Information Science and Engineering, China University of Petroleum (Beijing), Beijing 102249, China;
 PetroChina Pipeline Research and Development Center, Langfang 065000, China)

Abstract: The specific electrical structure around the homogeneous earth can generate eddy current in this homogeneous geology. In this paper, the equivalent current source is inverted from the data of several geomagnetic stations and the geoelectric model is constructed according to the actual topography. The research explores the influence caused by equivalent current and electrical structure on eddy current characteristics where the eddy current exists, and the mechanism of eddy current generation and eddy current movement in the specific area is revealed. Finally the distribution characteristics of pipe-soil potential (PSP) of oil pipelines laid in the area are calculated. The consistency between the calculated PSP and the observed PSP shows that the eddy can aggravate the influence of geomagnetic disturbance on the pipeline.

Key words: magnetic storm; equivalent current source; eddy current; earth conductivity; pipe-soil potential

PACS: 91.25. Wb; 93.85. Tf; 94.30. Kq

太阳活动爆发形成的干扰以太阳风的形式对地球空间的磁层和电离层造成巨大冲击^[1],并在大地中产生 感应地电流(GIC)。地电流在各处结构中的流通会在不同地区产生电位差^[2],使得管线各处的管地电位(PSP) 失常。地磁感应电流会加重杂散电流对管道的腐蚀,对我国总长超过 50 000 km 的输油气管道可能造成危害。

由于磁暴发生时,空中电流体系复杂,而建立模型时又需要给定激励,因此在确立场源时需要进行简化和 等效。Risto J. Pirjola 将空中电流体系简化后等效为线电流或者面电流,并研究了其规模对电磁场计算所造 成的影响^[3];在其以往的研究中,通常将研究的大地电导率模型简化为电导率只存在深度方向上的变化而水平 方向均匀的一维结构,进而采用平面波法^[4]、复镜像法^[5]等方法求解地面电场。而在后来的研究中 Weaver 和 Gilbert^[6-7]提出了薄壳模型,建立了一维和二维模型针对北美和欧洲大范围的地区进行了电场分析。在实际计 算中,考虑我国已建成或者在建的管网,其横跨多个省,在水平方向上跨越了不同的大地断裂带,采用平面波法 忽略电导率水平方向上的差异会影响结果的可靠性。对于这种情况,我国开展了大量的针对大地电导率分布 的研究,并取得了很大的进展^[8-10]。根据国家地电台的监测,在东北和华北平原处存在有顺时针稳定的涡旋电

^{*} 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(2016YFC0800100)

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。

流,分别位于哈尔滨长春之间以及华北平原上,涡旋电流形成的原因尚不清楚,但其变化必然会对管地电位分 布造成影响。因此,研究涡旋电流形成机理及其对管道腐蚀的影响有重大的研究意义。

本文以国家地磁台实时数据为基础,确定了空中等效电流源,建立了三维大地电导率模型,计算模型内的 电场分布规律,使用该电场计算管道 PSP。对于华北平原的复杂地理位置,本文根据其电性结构构建了大地三 维电导率模型,验证了华北平原所存在的复杂涡旋电流现象;并针对涡旋电流的现象机理和其对管道的 PSP 分布特征做出分析。

1 基于地磁台数据的 PSP 计算方法

首先采用国家地磁台的数据进行反演构造空中的等效面电流;将构造得到的等效面电流作用于大地模型, 得到地电场分布;最后计算管道 PSP。

1.1 局部等效面电流

1.1.1 局部地电场等效面电流幅值确定

若在确定空中的等效电流源时,需要用到地面磁台的地磁数据。在地磁暴干扰较大的时候,地磁台上的磁场数据 H 会出现较大波动,选取合适的地磁暴干扰时间段 t₀-t_T,对该时间段的地磁数据 H 进行三角级数的分解(傅里叶变换)。假设地磁台数据为 H(t),选取时间段的信号周期为 T,根据三角级数的傅里叶分解可以得到

$$H(t) = h_0 + \sum_{n=1}^{\infty} h_n \sin(n\omega_n t + \theta_n)$$
⁽¹⁾

式中:h₀,h_n, ω_n 和 θ_n 计算方法参考傅里叶系数计算方法。

考虑产生地磁台数据的电流源可以得出,地磁台数据由许多不同高度的电流产生,电流相互影响并作用于 地磁台的测量段,形成地磁场数据;空中等效电流源距离地面大约为100 km,厚度为2 km,长宽与地面模型长 宽一致,方向指向正东方向,该电流源若能够对于地磁台所测一点能够产生等效的地磁场数据,则可以确定该 等效电流源的幅值。

选取合适的 m,重构地磁场函数为

$$H_{\gamma}(t) = h_0 + \sum_{n=1}^{m} h_n \sin(n\omega_n t + \theta_n) \quad (n = 1, 2, 3, \dots, m)$$
(2)

使得相对误差 $\left| \frac{H_{\gamma}(t) - H(t)}{H(t)} \right|$ 小于给定值 δ 。

由于该等效面电流 $I_{\gamma}(t)$ 与重构地磁函数变化率一致,故在频域上,其频率和相位应该与 $H_{\gamma}(t)$ 一致,在幅 值上应该表现为线性关系即 $I_{\gamma}(t) \propto H_{\gamma}(t)$,在选定 m 后可以构造等效面电流为

$$I_{\gamma}(t) = K \left[h_0 + \sum_{n=1}^{m} h_n \sin(n\omega_n t + \theta_n) \right]$$
(3)

构成的 $I_{\gamma}(t)$ 为 *m* 个主要频率的叠加,*K* 为重构的频域磁场函数 $H_{\gamma}(t)$ 及等效面电流函数 $I_{\gamma}(t)$ 之间的线 性关系系数。

1.1.2 局部地电场等效面电流源方向确定

如图 1 所示,确定方向时,以磁台位中幅值最大的地磁台 a 处磁场计算空中一定高度 h 等效电流源的大小,在确定该高度下等效电流源大小后选定合适的偏角 φ 使得电流源和其在磁台面上的投影能够在磁台 b 和 磁台 c 上产生偏角 γ 和 φ 。因为地面磁台位置确定,设定磁台位 b 和磁台位 c 的圆柱坐标分别为(ρ , $-\theta$, 0), (λ , ω , 0);由已知电流求定电磁场的计算公式可以知道对应的磁场强度分别为

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{h^2 + \rho^2 \left[\sin(\theta + \varphi)\right]^2}}$$
(4)

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi \sqrt{h^2 + \lambda^2 \left[\sin(\theta + \varphi)\right]^2}}$$
(5)

这样根据另外两个可靠地磁台的数据可以求出偏角 q,即求出该时刻的电流方向。对于按时间变化的地 磁台数据来说,在没有发生磁暴时,地磁台的数据基本不会发生很明显的变化,此时可以计算这一段时间等效 电流的方向。其算法框架如图 2 所示。



1.2 大地建模

将存在有涡旋电流现象和主要干线管道的区域进行划分,根据实际地形将其简化为矩形模块并根据实际 地理尺寸,建立表层的管线模型。每个矩形模块的除电导率以外的电性相同,电导率则由模块主要物质确定。 模型横截面区域应大于所选择区域,避免边界上可能给模型仿真计算时带来误差。模型表层应根据实际地形 进行划分,并同时对其形状进行合理改变使得其区域划分更为明显。地下模型根据文献[11]将其划分为4层, 每层厚度进行合理假设。

1.3 管道 PSP 的计算方法

根据局部等效面电流和大地建模建立的电流源和三维大地电导率模型,将等效频域面电流 *I_i(i=1,2,…,m*)的每一个频域信号 *I_i* 代入进行计算,得到每一个频率下管道模型上电场 *E_{xi}E_{yi}*和磁场 *H_{xi}H_{yi}*的分布;将 *m* 个主要频率下的电场和磁场进行叠加,得到该时刻下模型内的 *E_{xi}E_{yi}和H_{xi}H_{yi}*;在得到 *H_{xi}和H_{yi}*后,将其与地磁台数据对比,可以验证等效面电流的构造是否精确。

将求得的管道模型上的 *E_{xi}*和 *E_{yi}*及铺设方法代入 PSP 计算公式中,可以得到该时刻管道上任意一点的 PSP 和 GIC 空间分布;将磁暴时间段内每一个时刻的管道 PSP 和 GIC 空间分布求出,可以得到管道上 PSP 和 GIC 的管域和时域分析。

2 华北大地模型建立

2.1 华北大地模型建立

以日照一东明管道为例。管线位于华北平原中心,途径临沂、平邑、兖州,末端为菏泽东明站。以图 3(a) 中所选择的区域建立大地模型,模型西北方向为太行山脉,其模型的地质结构多为岩石结构。模型中部为黄淮 海平原,为大量泥沙形成的冲积平原。在模型中部偏东为济南附近为泰山山系,其地质结构与太行山脉近似。 模型东南部为南京附近丘陵地区,以低平山区为主,其地质结构主要为低山、滨湖平原和沿江河地等电导率偏 高的地形单元。而对于太行山脉西侧附近的盆地,其地下有多处地下河流通,土质疏松,电导率偏高^[12]。

根据实际地形和地貌示意可以大致将管线附近处表层地形进行模块划分,如图 3(b)所示。太行山系以及 泰山山脉分别分布在模块1,2,3 中,由于其地质结构多为花岗岩,属于低电导率的模块,给定其电导率为 σ_1 ;位 于黄淮海平原以及河流流域冲积地区所形成的低山缓岗处均为湿土或沉积砂石结构其电导率偏高,给定其电 导率 σ_4 ;而在济南泰山东区附近,由于郯庐断裂带的表面属于高电导率部分,较一般湿土或沉积砂石要高,给 定其电导率为 σ_3 ;按照合理地形将地下分为4层,表层为15km;第二、三和四层均为均匀地质结构分别为10, 125,250km。给定其电导率分别为 σ_2 , σ_4 , σ_3 。而对于黄淮海平原以及沿海地区其模块分为第5,7,8,9,10,这 五个模块给定其电导率为 σ_2 。(σ_1 =10⁻⁵ S/m, σ_2 =10⁻³ S/m, σ_3 =10⁻² S/m, σ_4 =5×10⁻³ S/m)。

考虑管道铺设在地下,并且忽略地面曲率,可以构建表层模块如图 3(b)所示的三维分布电导率模型。其

三维大地电导率参数如图 3(d)所示。



图 3 华北大地电导率模型

2.2 涡旋电流产生机理

帕金森矢量是用以分析地磁短周期变化的局部异常与地下电导率异常的有效方法^[13]。可以用于推测涡旋电流流向。图 4 为帕金森矢量的推测涡流流向。图 5 为给定电源频率为 0.001 Hz 仿真结果,其表面电流流向与图 4 中电流流向大致相同。

在图 4 中,黄淮海平原中心和南京江苏一带形成两个逆时针的涡旋电流,两个涡旋电流形状类似,都属于 向中心聚集的涡旋电流,在其上边界均属于低导地区,在右边界和下边界都属于高导地区。在低导模块 1 内 部,电流流向均为正西方向,而在低导模块 3 中,其内部的电流流向受到了位于高导模块 4 中涡旋电流 *I*₁ 影 响,使得其中的电流在有正西方向趋势的情况下,仍然在上下边界遵循涡旋电流的方向。表面模块 1 处东西分 界面上的电流流向在边界面两侧相反,同样为低导模块 2 和 3 中也同样出现了该现象。对于整个非均匀大地, 即模型中的表层模块可以看出,在均为西向的感应电流受到高阻地区的阻挡后,会使得电流矢量在边界上出现 相反的流向,而由于高阻模块 1 的阻挡,在表面形成了主要方向为东偏南的主要电流流向,这使得位于主电流



Fig. 4 Parkinson vector estimation of eddy current 图 4 帕金森矢量推测涡流结果



对于整个南京江苏一带而言,东侧为沿海高通地区,而南侧为长江流域冲刷形成的湿土地区,其电流流向 均流向沿海高通区域,位于东侧的电流矢量和位于南侧的电流矢量均受到了沿海高通地区的主要电流的影响, 使得南京江苏一带的涡旋电流 I₂得以构成。

其仿真漩涡结果图 5 也验证了上述结论,涡旋电流位置也与章鑫于中国大陆大地电流时空分布及涡旋现 象研究^[14]中涡旋电流位置接近。

2.3 影响大地涡旋电流的因素

2.3.1 等效电流频率影响

根据实际的地质模型,给定电流源频率为 0.001 Hz,方向为正东方向;而实际上这是在假设电源频率的情况下所得到的表面电流流向,当改变电源频率时,表面电流流向即会发生变化。图 6 为频率由 0.001 Hz 变化 到 0.000 1 Hz 黄淮海平原和南京江苏一带涡旋电流中心的移动示意。



从等效频率降低的比较来看:模型出现与电流方向垂直的边界面时,频率的降低使得表面电流流向在分界 面上出现的效果会被减小。频率降低时,垂直于电流方向的边界面上的电流则会出现垂直于边界面的回流电 流,这个回流效应会受到由于频率降低形成的平行电流的影响,当回流效应由于频率下降对电流的影响减弱到 一定程度时,其主要电流流向就发生了改变,从而导致华北平原涡旋电流中心的移动。同理位于南京江苏一带 涡旋电流也是由于模块3西侧阻挡效应减弱,使得位于南京江苏一带的涡旋电流发生移动。

2.3.2 等效电流方向影响

对于等效电流源来说其方向也能够改变涡旋电流位置并且能够影响其聚集方向。给定电流源同上,方向 为正东方向,给定电流源频率为 0.001 Hz,并给定电流方向分别为与正东方向夹角为 90°和 180°,其仿真结果 如图 7 所示。图 7(a)中 I_4 , I_5 说明当电流方向改变至 90°时其涡旋电流位置发生了变化,这是由于感应电流方 向与电导率分界面的相对方向发生了改变造成的。当电流方向改变至 180°时,涡旋电流的聚集方向发生了改 变,位置没有变化,漩涡 I_1 , I_2 的聚集方向由逆时针变为了顺时针,如图 7(b)中的 I_6 , I_7 。这是由于上述相对方 向没有发生变化,仅改变了感应电流方向造成的。



3 管道 PSP 影响研究

3.1 管道模型背景

华北平原上的主要干线管道为西一线从郑州至南京一段,这一段经过滁州、定远、淮南、淮阳和郑州等压气站,终点为上海市白鹤镇(金山站为上海另一个压气站),其中连接西一线和西二线的平泰支线经过菏泽、济宁等区域;实际中选择日照一东明段管道存在有监测数据的管道进行仿真计算并推测西二线管道的情况。仿真管道模型位于地下1.5 m,整个管道呈折线形,并且角度与正东方向分别为165.96°,-165.5°,-177.95°,见图3。取北京站地磁台站发生磁暴时的数据计算等效电流源,并计算管道上的 *E_xE_y*,通过 *E_xE_y* 按照 LZS-DSPL 管道模型^[15]计算管道上每一公里的 PSP。

3.2 大地涡旋电流对管道效应

采用 2016 年 11 月 6 日北京、枞阳和兰州地磁台的地磁数据 H_x和 H_y反演电流源,并按照 1.1 方法确定等效电流源。以当天为时间跨度,选取对应兖州站和平邑站实际管线位置的仿真测点,以 1.2 的大地电导率模型和 1.3 中的方法计算得到的拟合磁场和 PSP 的分布如图 8 和图 9 所示,仿真计算数据和现场监测数据分别如图 10 和图 11 所示。



图 10 为平邑站和兖州站两点处 PSP 和 GIC 随时间分布。图 11 所示为现场监测数据,包括阴保电压、阴极电流和管地电位。



图 10 兖州站和平邑站 PSP 和 GIC 随时间分布图





由图 10 平邑站和兖州站两个站点的 PSP 和 GIC 的时域分布可以看出,在整个时间段上,兖州站的 PSP 整体幅值约为平邑站的 3 倍,而 GIC 的整体幅值缩小了 1.5 倍。根据图 3(b)管线分布来看,在接近于涡旋地 区的兖州站附近,其 PSP 幅值随时间的分布比远离于涡旋地区的平邑站的幅值大,而 GIC 要小。兖州站和平 邑站的 PSP 随时间变化趋势与地磁随时间变化趋势大致相同,位于 18 000~20 000 s 时出现较大幅值变化,达 到一天中的最大值,而在之后 43 000~47 000 s 时出现最小值。

根据图 11 的现场数据可以看出,平邑站和兖州站的 PSP 随时间分布波动比较明显,集中在 30 000~45 000 s内,并且平邑站和兖州站的管地电位变化趋势均与站点的阴保电压和阴极电流变化趋势相反。比较兖州 站和平邑站可以看出,兖州站的该时间段 PSP 幅值也较平邑站更大,波动更为剧烈。而该时间段为地磁变化 较为剧烈的时间段,与地磁变化也较为吻合。对比平邑和兖州的阴极电流可以看出,在 60 000 s 附近两站均存 在有明显波动,其趋势与地磁后半段波动趋势一致。

由仿真结果和站点位置可以得到:

(1)平邑和兖州均位于三段管道中的第二段管道,且距离管道折点处于相同的位置,管道折点对于两个站 点的影响相同,说明现场监测数据中 30 000~450 00 s 的波动并非管道折点对管道上 PSP 的影响;

(2)根据拟合地磁中的主频选择,其主要频率接近于 0.000 1~0.000 3 Hz 之间,由该频率范围仿真得到 的表面电流如图 12(a),可以明显看出位于 4 附近的涡旋电流边缘能够直接影响兖州站。根据现场监测数据, 受到涡旋电流影响的兖州站的 PSP 明显出现了不同于平邑站 PSP 变化的现象。

根据管道模型的具体位置(图 12(b)),整条管道位于模块 3 南部,兖州站和平邑站所受到分界面 2 的影响效果应是相同的,即兖州和平邑站的监测数据出现的不同波动不应该是分界面 2 对其造成的影响。

而对于分界面1来说,兖州站和平邑站均位于整个分界面1的东部,分界面1对于两个站点 PSP 的影响 应该是呈现单调变化,而现场监测数据中的兖州站和平邑站的变化相反,幅值上区别较大,这表明分界面1不 是造成兖州站和平邑站不同波动的主要因素,可能仅影响到了兖州站和平邑站的幅值大小。

(3)由管道折点和分界面的分析可以得到:兖州站和平邑站现场监测数据的不同波动更可能是位于管道西部的涡旋电流造成的。图 12(b)可以看出,兖州站位于涡旋电流边缘,而平邑站并未直接受到涡旋电流的直接影响。而涡旋电流能够直接影响到表面电流流向,使得兖州站与平邑站附近的电流呈现不同的变化,进而影响到两站的 PSP 变化。这种 PSP 变化在地磁扰动时间段比平时会更加剧烈,出现如上述两站现场监测数据不同的现象。





4 结 论

本文通过建立三维电导率大地模型,采用伽辽金有限元算法对磁暴时特定区域的大地表面电流流向进行 了分析,给出了在时域上和管线分布上管道 PSP 的分布。在一维分块大地周围,若存在有特定电性的大地结 构使得该分块大地中有可能形成成对涡旋电流。空中的等效电流的频率和相位能够影响涡旋电流形成,当频 率和相位发生变化时会使得涡旋电流的位置和聚集方向发生改变。研究结果表明,兖州站和平邑站的现场装 置监测到的结果并非是由于管道折线导致。兖州站在地磁扰动的高峰时段出现较平邑站更大的管地电位和阴 极电流的波动很可能是因为涡旋电流的存在。涡旋电流影响了距离其中心更近的兖州站,而距离较远的平邑 站则可能并未受到涡旋电流的影响,从而出现了现场装置的监测结果。

参考文献:

- [1] Pirjola R. Review on the calculation of surface electric and magnetic fields and of geomagnetically induced currents in ground-based technological systems[J]. Surveys in Geophysics, 2002, 23(1):71-90.
- [2] Tay H C, Swift G W. On the problem of transformer overheating due to geomagnetically induced currents[J]. IEEE Power Engineering Review, 1985, 5(1):48-49.
- [3] Zheng K, Pirjola R J, Boteler D H, et al. Geoelectric fields due to small-scale and large-scale source currents[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2013, 28(1):442-449.
- [4] Zheng K, Trichtchenko L, Pirjola R, et al. Effects of geophysical parameters on GIC illustrated by benchmark network modeling[J]. IEEE Trans Power Delivery, 2013, 28(2):1183-1191.
- [5] 张蓬鹤,何俊佳,黄伟超,等.基于复镜像法的接地网地表电位分布计算[C]//中国电机工程学会高电压专业委员会 2009 年学术年会. 2009.
 (Zhang Penghe, He Junjia, Huang Weichao, et al. Calculation of grounding grid surface potential distribution based on complex mirror method//2009 Annual Meeting of High Voltage Professional Committee of CSEE. 2009)
- [6] Weaver J T. Electromagnetic induction in thin sheet conductivity anomalies at the surface of the earth[J]. Proceedings of the IEEE, 1979, 67(7):1044-1050.
- [7] Gilbert J L. Modeling the effect of the ocean-land interface on induced electric fields during geomagnetic storms[J]. Space Weather-the International Journal of Research & Applications, 2005, 3(4):211.
- [8] 魏文博,谭捍东,金胜,等.华北中部岩石圈电性结构—应县-商河剖面大地电磁测深研究[J]. 地球科学, 2002, 27(5):645-650. (Wei Wenbo, Tan Handong, Jin Sheng, et al. Conductivity structure of lithosphere in Central North China: Magnetotelluric study of Yingxian-Shang-he profile. Earth Sicence, 2002, 27(5):645-650)
- [9] 徐光晶,汤吉,黄清华,等.华北地区上地幔及过渡带电性结构研究[J]. 地球物理学报, 2015, 58(2):566-575. (Xu Guangjing, Tang Ji, Huang Qinghua, et al. Study on the conductivity structure of the upper mantle and transition zone beneath North China. Chinese Journal of Geophysics, 2015, 58(2):566-575)
- [10] 詹艳,赵国泽,王立凤,等. 河北石家庄地区深部结构大地电磁探测[J]. 地震地质, 2011, 33(4):913-927. (Zhan Yan, Zhao Guoze, Wang Lifeng, et al. Deep structure in Shijiazhuang and the vicinity by magnetotellurics, seismology and geology, 2011, 33(4):913-927)
- [11] Püthe C, Kuvshinov A, Khan A, et al. A new model of Earth's radial conductivity structure derived from over 10 yr of satellite and observatory magnetic data[J]. Geophysical Journal International, 2016, 203(3):1864-1872.
- [12] 喻克智.山西地质构造及地震活动特征[J].山西地震, 1977(1):48-55. (Yu Kezhi. Geological tectonics and seismic activity characteristics

of Shanxi province. Earthquake Research in Shanxi, 1977(1):48-55)

- [13] 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(1):47-63. (Gong shaojing, Liu shuangqing, Liang Mingjian. Characteristics of geomagnetic Parkinson vector in Chinese mainland and their tectonic implication. Acta Seismologica Sinice, 2017(1))
- [14] 章鑫.中国大陆大地电流时空分布及涡旋现象研究[D]. 兰州:中国地震局兰州地震研究所, 2016. (Zhangxin. The study of time and spatial distributed of tulluric currents and the vortex currents in mainland China. Lanzhou: Lanzhou Institute of Seismology, China Earthquake Administration, 2016)
- [15] 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: CN105260504B[P]. 2018-02-02. (Liang Zhishan. A calculation method of GIC and PSP for buried oil and gas pipeline affected by geomagnetic storm. CN105260504B. 2018-02-02)