

# 中国东部沿海管道海岸—断裂带复合效应

方莉1,夏鹏程1,梁志珊1\*,熊树海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,廊坊 065000 \* 通信作者,lzs1960@cup.edu.cn

收稿日期: 2020-12-04 国家重点研发计划(2016YFC0800103)资助

**摘要** 低频扰动地磁场在大地中感应出地磁感应电流(GIC)和地面感应电势(ESP),直接影响埋地管道管地电位(PSP)。为研究中国东部沿海地区海岸和断裂带复合效应对日东线管道PSP的影响,基于傅里叶变换和反变换的思想提出了管道傅里叶—有限元法,该方法采用地面磁场时频转换理论,建立低频地磁扰动下管道PSP计算模型以获取实时信息。本文首先建立了三维海岸—断裂带理论模型探索沿海地区的电场分布与断裂带电导率之间的关系;然后根据大地电磁测深数据构建了中石油日东线所在地区的大地三维电导率模型,应用地磁台磁场数据作为大地导体边界条件计算磁扰动期间实时管道PSP时空分布,以2016年10月12—14日期间的磁扰动为例对日东线PSP的计算值和实测值进行对比分析。在空间分布特性上分析了管道PSP的两种基本分布形态以及重要节点处受管道参数变化的影响,在时间分布特性上不仅验证了计算模型的准确性,还揭示了海岸—断裂带复合效应对沿海管道PSP的影响,为管道腐蚀防护提供了理论依据。

关键词 海岸—断裂带;管道傅里叶—有限元法;管地电位;时空分布

# Combined effect of coast and fault zone on pipeline in Eastern China

FANG Li<sup>1</sup>, XIA Pengcheng<sup>1</sup>, LIANG Zhishan<sup>1</sup>, XIONG Shuhai<sup>1</sup>, BI Wuxi<sup>2</sup>, LAN Wei<sup>2</sup>

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** The geomagnetic induced current (GIC) and earth surface potential (ESP) in conductive earth induced by the low-frequency geomagnetic disturbances directly influence pipe-soil potential (PSP) on buried pipelines which may contribute to the pipeline corrosion. It can be difficult to study the coastal telluric field and its influence to pipeline at large temporal and spatial scale because of complexity of earth conductor and geo-electric field. Firstly, we constructed a three-dimensional thin shell model to explore the relationship between electric field distribution and fault zone conductivity in coastal areas. We found that the electric field in the coast-fault zone was increased when the resistance in the fault zone was smaller than that in the coast fault zone. Then, with the earth conductivity data in coastal areas of Eastern China, we constructed the three-dimensional earth conductivity model where Ri-dong pipeline of China National Petroleum Corporation's (CNPC) went through. Based on the Finite element method (FEM) coupled with the Fourier transform, the theoretical model for PSP during magnetic perturbation was established in this paper. Taking the magnetic disturbance between October 12, 2016 and October 14, 2016 as an example, we calculated numerical PSP by PFFEM applying the magnetic data from geomagnetic observatory as boundary condition. Finally, the calculated and

引用格式:方莉,夏鹏程,梁志珊,熊树海,毕武喜,蓝卫.中国东部沿海管道海岸一断裂带复合效应.石油科学通报,2023,05:660-670 FANG Li, XIA Pengcheng, LIANG Zhishan, XIONG Shuhai, BI Wuxi, LAN Wei. Combined effect of coast and fault zone on pipeline in Eastern China. Petroleum Science Bulletin, 2023, 05: 660-670. doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.05.062 measured value of PSP in Rizhao and Yanzhou stations along PetroChina Ri-dong line were compared, which proved the validity and feasibility of the model and the algorithm. From the spatial distribution, we could analyze the relationship between the important nodes of pipeline PSP and the changes of pipeline model parameters. The temporal distribution showed that the numerical value and fluctuating amplitude of PSP in coast-fault zone is larger, which further verifies the influence of the fault zone effect on the pipeline. Analysis results of both the model and the measured data revealed the distribution of PSP in coastal pipelines under the combined effect of coastal and fault zones, and provide a prediction way for subsequent pipeline maintenance.

**Keywords** coast-fault zone; pipeline fourier transform-finite element method; Pipe-soil potential(PSP); temporal and spatial distribution

doi: 10.3969/j.issn.2096-1693.2023.05.062

# 0 引言

太阳活动和星际空间共同作用生成地球的磁层— 电离层电流,这个变化的电流产生变化的地磁场,在 埋地管道设备中引起地磁感应电流(Geomagnetically Induced Current, GIC),直接影响管道与土壤之间的 管地电位(pipe-soil potential, PSP)。管道GIC和PSP 异常加速管道设备的腐蚀,威胁管道输送系统的安全 运行,增大了维护成本<sup>[1]</sup>。

近年来,中国石油管道公司在管道运行中发现, 山东日照阴极保护站管道PSP干扰大,恒电位仪经常 出现异常甚至报警<sup>[2]</sup>,若管道长时间处于欠保护状态, 漏电处将加快腐蚀。因此,油气管道地磁暴干扰监测 和地磁暴对油气管网和电网的致灾机理研究被中石油 管道公司列为"十二五"重点研发计划项目。中国石 油大学(北京)承担了埋地管道研究,研制了国内首台 埋地管道GIC和PSP监测装置并在中石油西气东输、 陕京线、日东线等沿线阴保站投入使用<sup>13</sup>,为石油管 道GIC和PSP预测提供了实测数据支持。同时,使用 回路电流法计算管道GIC和PSP<sup>[4]</sup>。经调查研究后发 现,日照东临黄海,西侧有郯庐大断裂<sup>[5]</sup>,猜测日照 站PSP异常原因是受到海岸和断裂带两者的相互作用。 对于沿海地区存在断裂带的复杂地质情况下,位于海 岸--断裂带之间区域电场受到海岸和断裂带双重电导 率横向突变的影响,本文将之称为海岸--断裂带复合 效应。

国外,Boteler D H和Pirjola R等学者早前研究表 明地磁感应电流在电网和埋地管道中的存在和危害<sup>[6]</sup>。 2002 年 Boteler D H采用平面波法通过分层波阻抗法得 到大地电场对均匀长输管道模型(DSTL)的管道 PSP在 时域的变化<sup>[7]</sup>,此方法和复镜像法<sup>[8]</sup>都忽略了地质结 构电导率的横向变化,不适用于沿海地区。Gilbert和 Weaver<sup>[9–10]</sup>后来提出了一维、二维和薄壳模型计算半 空间线电流在海岸线附近的地电场分布,尚未计算三 维空间电场分布。Kuvshinov<sup>[11-12]</sup>应用快速积分方程法 计算海岸附近的地电场,但是解析法求解地面电磁场 只适用于简单形态地质模型。2013 年Kuvshinov基于 卫星磁测数据建立全球模式下的三维磁暴感应地电场 模型<sup>[13]</sup>,研究只针对海岸附近电场异常。国内已有研 究<sup>[14-15]</sup>针对埋地管道GIC的特性和评估,刘连光等<sup>[16]</sup> 基于大地分层模型和均匀传输线管道模型建立了管道 PSP磁暴干扰评估大地模型,但这两种模型均存在缺 陷,大地分层模型未考虑到横向电导率差异,均匀传 输线管道模型中未涉及大地电阻。综上,目前国内外 还未有对沿海复杂地质下埋地管道PSP时空分布特性 的研究报道。这就需要探索一种适应性更强、具备可 操作性和实际预测意义的计算方法。

埋地管道PSP研究需要分别建立地电场计算模型 和管道模型,有限元法(FEM)是目前较为简单实用且 有效的电磁数值分析方法,适应各种复杂地质结构且 精度较高,已成功应用横向电导率不均匀大地电场研 究[17]。傅里叶变换(FT)分析合成技术通过对数据的 时频转换,对信号实时处理发挥重要作用,为大地电 磁实时仿真提供了理论方法。LZS-DSPL模型<sup>[18]</sup>在 Boteler的DSTL模型基础上进行改进,更加符合实际 情况。因此本文提出PFFEM法(Pipeline Finite element method based on Fourier transform), 针对 2016 年 10 月 12-14日山东地区日东线管道PSP地磁扰动响应,以 地磁台提供的实际记录磁场数据为基础, 计算日东线 管道 PSP 分布,将沿海日照站与内陆兖州站的计算值 与监测值进行对比,发现位于海岸-断裂带区域的埋 地管道PSP的幅值水平和波动幅度更大,结果揭示了 海岸-断裂带复合效应下沿海埋地管道PSP的分布特 性。

## 1 三维埋地管道 PFFEM 理论

如图1所示,建立三维大地埋地管道PSP预报的



图 1 三维埋地管道 PFFEM 计算方法流程图 Fig. 1 Method steps of PFFEM

PFFEM理论模型。该计算模型基于傅里叶变换的管道 PSP有限元算法,以电磁Maxwell T-Ω方程三维有限 元法为基础<sup>[19]</sup>,结合快速傅里叶变换和反变换的数学 思想,以地面磁场数据正演埋地管道PSP时空分布, 将此方法称为管道傅里叶—有限元法(PFFEM, Pipeline Finite element method based on Fourier transform)方 法。PFFEM方法将时域磁场*H*(*t*)经快速傅里叶变换 FFT分解成频域磁场*H*(*w*)(*t*为时间,*w*为频率),作为 磁场源输入三维电导率模型进行有限元计算得到频域 电场*E*(*w*),电场经傅里叶反变换IFFT后合成时域电场 *E*(*t*),经过管道PSP计算方法得到PSP时空分布结果。

计算管道 PSP 时空分布方法主要分为以下 4 个步骤:

(1)大地磁场FFT分解

将地磁水平分量和垂直分量分别作为大地模型的 初始磁源,那么首先对地磁台磁场数据东向和北向分 量*h*<sub>x</sub>、*h*<sub>y</sub>进行分解为*n*<sub>x</sub>、*n*<sub>y</sub>个谐波之和,即

$$h_{x}(t) = \sum_{i=1}^{n_{x}} H_{x,i} \cos(\omega_{x,i}t + \varphi_{x,i})$$

$$h_{y}(t) = \sum_{i=1}^{n_{y}} H_{y,i} \cos(\omega_{y,i}t + \varphi_{y,i})$$
(1)

式中, $H_{x,i}$ 、 $H_{y,i}$ 分别表示时域 $h_x$ 、 $h_y$ 第*i*个谐波的幅 值, $\omega_{x,i}$ 、 $\omega_{y,i}$ 表示 $h_x$ 、 $h_y$ 第*i*个谐波的频率, $\phi_{x,i}$ 、 $\phi_{y,i}$ 表 示 $h_x$ 、 $h_y$ 的第*i*个谐波的相位。

(2)大地电场FEM计算

磁暴地磁场的频率为 0.0001~0.01 Hz,因此可看 作磁准静态场,与涡流电流密度相比,位移电流可以 略去不计<sup>[20]</sup>。一次电流源 J<sup>p</sup>产生了一次场(一次电场 E<sup>p</sup>和一次磁场 H<sup>p</sup>),一次场在大地导体中产生二次场 (二次电场 E<sup>s</sup>和二次磁场 H<sup>s</sup>),内部无源。时谐磁场中 以 e<sup>-jot</sup>为时谐因子,其中 j 为虚数单位。则二次电磁场 满足

$$\nabla \times \boldsymbol{E}^{s} - j\omega\mu\boldsymbol{H}^{s} = 0$$
  

$$\nabla \times \boldsymbol{H}^{s} = (\gamma - j\omega\varepsilon)\boldsymbol{E}^{s}$$
(2)

式中,假设介质的磁导率为真空磁导率 $\mu_0=4\pi \times 10^{-7}$  A/m,介质的介电常数为真空介电常数 $\epsilon_0=8.85 \times 10^{-12}$  F/m,  $\gamma$ 表示导体电导率。

由赫姆霍兹定理可知导电区电场和磁场有唯一 解<sup>[21]</sup>,在涡流场求解控制方程,根据区域结构和边界 条件,需要考虑计算机运行时间和计算精度选择适当 的电磁位对,常见方法有A法和T法。T法引入位函 数*T*和*Q*,*T*为矢量电位,*Q*为标量磁位,求解过程未 知数相比于A法较少,且能达到满意精度。根据麦克 斯韦方程,*J*、*H*与*T、Q*之间的关系是

$$J = \nabla \times T$$
  

$$H = T - \nabla \Omega$$
 (3)  

$$E = \frac{1}{\gamma} \nabla \times T$$

其中, **J**表示涡流场电流源, **H**表示涡流场磁场, **E**表示涡流场电场。

由关系 $\nabla \times \left(\frac{1}{\gamma}J\right) + \partial \frac{\mu H}{\partial t} = 0$ 推导出场在导体涡流

区的 $T-\Omega$ 表达式

$$\nabla^2 \boldsymbol{T} - j\omega\mu\gamma \boldsymbol{T} = j\omega\mu\gamma \left(-\nabla\Omega\right) \tag{4}$$

$$\nabla^2 \Omega = 0 \tag{5}$$

式(4)中" $-\nabla \Omega$ "项为常量,记为 $H_0$ ,表示电流源在导体表面产生 $T_0$ 的等效磁场源。

对于地磁 $H_{0,x}$ 分解到的每一个余弦分量记为  $H_i(\omega_i)$ ,将分解的每个磁场分量作为有限元计算需要的 磁场计算模型的地表面边界条件,对大地求解区进行 四面体网格自适应划分,在满足最大迭代步数和误差 精度的迭代要求下,求解方程得到频域大地电场x方 向和y方向分量。

(3)管道电场IFFT合成

运用傅里叶反变换,将电场分量叠加得到由地磁  $H_{0,x}$ 作用下产生的管道所在地的时序地电场的 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 分量,记为 $E_{x,j}^{X}(t)$ 和 $E_{y,j}^{X}(t)$ ,其中,上标X表示 $\mathbf{x}$ 方向磁场 分量。

$$E_{x,j}^{X}(t) = \sum_{i=1}^{n_{x}} E_{x,i,j} \cos(\omega_{x,i}' t + \varphi_{x,i}')$$

$$E_{y,j}^{X}(t) = \sum_{i=1}^{n_{y}} E_{y,i,j} \cos(\omega_{y,i}' t + \varphi_{y,i}')$$
(6)

式(6)中, $E_{x,i,j}$ 、 $E_{y,i,j}$ 为第i个频率下管道j点处的电场 x、y分量幅值, $\omega'_{xi}$ 、 $\omega'_{xi}$ 为第i个频率下管道j点处的

电场 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 分量的相位,  $\phi'_{x,i}$ 、 $\phi'_{y,i}$ 为第i个频率下管道j点处的电场 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{y}$ 分量的相角。

同样,叠加得到由地磁 $H_{0y}$ 在管道上各处产生的时 序地电场的x、y方向分量 $E_{x_j}^{Y}(t)$ 和 $E_{y_j}^{Y}(t)$ ,其中上标Y表示y方向磁场分量。

在管道*j*点处的x、y电场分量值由磁场x、y分量 产生的电场分量对应相加得到

$$E_{x,j}(t) = E_{x,j}^{X}(t) + E_{x,j}^{Y}(t)$$
  

$$E_{y,j}(t) = E_{y,j}^{X}(t) + E_{y,j}^{Y}(t)$$
(7)

则t时刻,管道j点处的电场幅值为

$$E_{j}(t) = \sqrt{E_{x,j}^{2}(t) + E_{y,j}^{2}(t)}$$
(8)

(4)管道PSP计算

取出管道每千米间隔的地电场值代入中石油日东 线分布源传输线LZS-DSPL模型,将地磁作用等效至 管道电路模型进行计算。把单位长度管道作为一个基 本单元,一条长直管道可看作n段基本单元串联;采 用基尔霍夫定律回路电路法或节点电压法建立GIC和 PSP矩阵方程,得到管道管地电位PSP在磁暴期间的 时空分布。

# 2 海岸—断裂带复合效应

为分析断裂带电导率对海岸—断裂带区域的电场 幅值变化的影响,我们假定海岸—断裂带三维模型为 长方体结构,长1000 km,宽200 km,深500 km。海 岸线位于模型上表面中央,断裂带在距离海岸250 km 处,断裂带区域深度为25 km,宽度为250 km,海水 区域深度为5 km,宽度为500 km,将海水电导率取 为4 S/m,大地连同断裂带底层和海洋底层一体,取 大地电导率为0.0025 S/m,如图2所示。



图 2 海岸一断裂带电导率模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the conductivity model of coastal-fault zone

对模型上表面施加平行于海岸线方向的磁场H, 幅值为0.8 A/m。考虑到断裂带电导率对感应电场的 影响,将断裂带区域电导率参数分别设为0.1 S/m、 0.01 S/m、0.001 S/m和 0.0001 S/m以 及 0.0025 S/m, 分别进行有限元计算后取出以上 5 种参数模型中横跨 断裂带与海岸线的上表面中线处(图 2 中虚线)电场 值。根据断裂带与陆地电导率之间的大小关系,绘制 成 2 种对比图,结果如图 3 所示。

假定无断裂带时,即断裂带与大地电导率都为 0.0025 S/m时,由图 3(a)和图 3(b)可以看出,电场在 陆地侧由海岸线向远处逐渐下降稳定至 0.32 V/km。

当存在断裂带时,有2种情况分别讨论如下:

(1)当断裂带区域电导率高于中间陆地电导率时, 海岸一断裂带之间的陆地均在海岸和断裂带边界处产 生极大值,断裂带对中间区域电场有"提升"作用,





且断裂带电导率越高,海岸一断裂带区域电场"提升"的程度越大,如图 3(a)所示;

(2)当断裂带区域电导率低于中间陆地电导率时, 海岸一断裂带区域电场在海岸处产生极大值,在断裂 带边界处产极小值,断裂带对中间区域电场有"下拉" 作用,且断裂带电导率越低,海岸一断裂带区域电场 "下拉"越明显,如图 3(b)所示。

表1分别列出海陆边界处陆地侧、陆地—断裂带 边界处陆地侧和陆地—断裂带边界处断裂带侧的电场 极值,从表中数据得出,在海岸线处陆地侧电场极值 几乎未受到断裂带电导率影响,而陆地—断裂带边界 处陆地侧电场极值随着断裂带电导率的减小而降低, 陆地—断裂带边界处断裂带侧电场随着断裂带电导率 的减小而升高,该结果表明随着季节因素的变化,各 边界电场会有所不同。

### 3 日东线管道时空特性分析

#### 3.1 数据选择

根据国家地磁台站提供的从 2016-10-12 22:12:00

#### 表 1 边界处电场极值变化

Table 1 Extreme value changes of the electric field at the boundary

开始至 2016-10-15 08:50:00 结束的地磁场数据,检 测到其*K*<sub>p</sub>指数达到 6,选取此段时间近 20 万个磁场水 平分量和垂直分量*H*<sub>x</sub>和*H*<sub>y</sub>每秒采样数据作为我们研究 的磁扰动源(两条虚线时刻之间),如图 4 所示。应用 PFFEM方法,为符合精度要求,将磁场数据分解为 56 个主要幅频分量,分别做有限元计算,取出每次磁场 分量的电场结果叠加得到电场时空分布,输入管道模 型计算此次磁暴期间的管道 PSP的时空分布。

#### 3.2 电性结构建模

山东位于中国东部沿海,油气管网密集,日东线 原油管道于 2013 年 1 月开始投入运行,其东始于山 东日照的岚山港,向西止于山东菏泽的东明县,全长 426 km,目前有日照、兖州、平邑 3 个阴极保护站。 日东线所经大地岩石圈范围内包含郯庐断裂带,断裂 带中段呈现低阻特性,研究区域见图 5。

为构造较为真实的地质三维电导率模型,根据华 北地区的岩石圈结构及电磁测深数据资料<sup>[22-24]</sup>,将电 性结构划分为华北板块、苏鲁造山带、苏北盆地、济 阳垇陷、胶北隆起、断裂带、胶莱盆地和黄海 8 个区

断裂带电导率/(S/m)	海陆边界处	陆地-断裂带边界处陆地	陆地-断裂带边界处断裂带	
	陆地侧电场极值/(V/km)	侧电场极值/(V/km)	侧电场极值/(V/km)	
0.1	1.60	0.95	0.02	
0.01	1.55	0.51	0.15	
0.0025 (无断裂)	1.53	0.32	0.32	
0.001	1.55	0.22	0.45	
0.0001	1.61	0.10	0.60	



图 4 2016-10-11 至 16 日磁场分量

Fig. 4 Component of the magnetic field from 2016–10–11 to 16th (a)Data of H<sub>x</sub>(b) Data of H<sub>y</sub>

域。模型表面分块如图 6 所示,黑色粗折线为日东线 管道。设定x方向为向南,y正方向向东,z方向为向 上,选取东西范围 880 km,南北范围 450 km,地质 层厚度为 500 km。模型各区域分层分块电导率参数见 表 2。

#### 3.3 电场分布特征

为模拟山东沿海范围内的在地磁暴时的电磁感 应环境,对模型上表面施加频率为0.003 Hz、幅值为 1000 nT的磁场,三维电导率模型及网格划分如图7所 示,经过地磁有限元计算后可得到电场分布。

大地表面的地电场如图 8 所示,电场幅值在海岸 处产生突变,位于海岸和断裂带之间的苏鲁造山带电 场较强,在海岸拐角处幅值 E 最大可达 6 V/km。图 9(a)为模型上表面横跨海陆的中线处(图 7 中黑色虚 线)电场分布曲线,由于华北板块与苏鲁造山带之间 的郯庐断裂带区域电阻率较低,显示该区域电场减弱;



图 5 华东沿海地质及管道俯瞰图 Fig. 5 Geological and pipeline survey of east China coast

#### 3.4 管道 PSP 时空特性

考虑管道沿线大地电导率和管道走向两大重要因 素建立扩展传输线LZS-DSPL管道模型,将经过傅里 叶逆变换合成后的管道电场时空分布输入管道网络, 对 2016 年 10 月 12-15 日磁扰动期间日东线管道 PSP 进行计算,分别对时间分布和空间分布特征研究如下。 3.4.1 管道 PSP 空间分布特征

选取从 2016-10-12 22:12:00 开始至 2016-10-15 08:50:00 结束的地磁场数据可得到这段时间内的电场 E 分布和管道 PSP 分布,经观察不同时刻的 PSP 空间分布,发现存在两种相反的变化趋势。因此,选取计算



图 6 三维模型地表面分块示意图

Fig. 6 Blocks diagram of 3D model surface

#### 表 2 3D 电导率模型结构参数

 Table 2
 Structural parameters of 3D conductivity model

华北板块		苏鲁造山带		苏北盆地		黄海	
Deep/km	γ/(S/m)	Deep/km	γ/(S/m)	Deep/km	$\Gamma(S/m)$	Deep/km	γ/(S/m)
0~5	0.003	0~15	0.000 05	0~3	0.05	0~2	4
5~50	0.000 33	15~25	0.004	3~20	0.2	2~15	1
50~80	0.002	25~50	0.00033	20~50	0.001	20~50	0.01
济阳垇陷		胶北隆起		断裂带		胶莱盆地	
Deep/km	γ/(S/m)	Deep/km	γ/(S/m)	Deep/km	γ/(S/m)	Deep/km	γ/(S/m)
0~15	0.5	0~3	0.025	0~3	0.04	0~3	0.05
15~25	0.04	3~50	0.000 33	3~15	0.002	3~18	1
25~40	0.025	50~160	0.002	15~35	0.05	18~50	0.2
40~50	0.003	160~180	0.01	35~50	0.025	50~160	0.002



图 7 三维模型分层分块及网格划分 Fig. 7 3D conductivity model hierarchical block and grid generation





Fig. 9 Electric field distribution

时间区间中 800 min(10-13 11:32:00)和 1500 min(10-13 23:12:00)2个时刻管道电场 *E*和*PSP*的计算值,进行对照研究,如图 10 所示。

图 10(a)和(b)表示在本文所选数据计算下的两时 刻的管地电位*PSP*的空间分布,图 10(c)和(d)表示 两时刻的管道电场E的空间分布。日照站距离海岸仅 5 km左右,处于海岸一断裂带之间区域,而兖州站在 管道 165 km处,特将这两处阴保站位置在图 10 中标 示,并在图中用竖虚线表示断裂带所在位置,横虚线 表示*PSP*零点。

*T*=800 min 和*T*=1500 min 管 道 PSP 的 空 间 分 布 代表了 2 种计算结果显示分布趋势,图 10(a)中, *T*=800 min 的管道 PSP 在管道始端数值大,管道尾端降 低至零值以下;图 10(b)中,*T*=1500 min 的管道 PSP 分



图 8 三维模型地表面电场幅值分布

Fig. 8 Electric field distribution on 3D model surface



布在管道始端数值小,管道尾端上升至零值以上。这 两种相反的PSP分布趋势分别对应着不断变换的负值 管道电场和正值管道电场。

另外,在图 10(a)和图 10(b)中,管道在A点 (33 km),B点(157 km),C点(205 km),D点(239 km) 和F点(355 km)处转折,而E点(328 km)和G点 (359 km)分别是管道经过断裂带的两侧临界点。图 10(a)和图 10(b)显示管道PSP在A,B,C,D点处出现"拐 点",而在图 10(c)和图 10(d)中由于A,B,C,D点处于电 导率较为均匀的区域,管道电场分布较为一致,由此 可见管道PSP转折程度与管道铺设角度有关。同理, 分布在断裂带之间的F点附近电场均匀,而PSP在F点 处发生突变说明受到管道角度因素的影响。在E点和 G点处管道角度不变,但在这两点处管道PSP的变化



图 10 管道沿线 PSP 和电场空间分布



显然与断裂带电场的突变有关。

3.4.2 管道PSP时间分布特征

日东线兖州站和日照站安装有PSP监测装置,分 别将这 2 处阴保站的管地电位 PSP 计算值与监测值对 比如图 11 所示。

在图 11(a)中,将兖州站PSP计算值与监测值对 比,发现变化基本一致,都在-1.3 V上下浮动,管 地电位的最小值出现第 1500 min左右,PSP计算值最 小-1.68 V,测量值最小-1.65 V,PSP计算值最大出 现在 790 min达到-1.05 V,测量值最大为-1.03 V; 在图 11(b)中,将日照站PSP计算值与监测值对比, PSP实际值波动较大,与计算值相比有偏差,但出现 突变的时间和趋势基本相符,且计算值和测量值整体 都在-1 V上下浮动。这在一定意义上验证了此模型 的正确性。图 11(c)为日照、兖州两站管道PSP的计 算值和测量值对比均显示:日照处的PSP幅值高于兖 州站PSP,日照站PSP幅值在-1 V上下波动,兖州站 在-1.4 V上下波动;两站波动趋势一致,但是日照 站PSP振幅更大,在此次磁暴最剧烈时日照PSP的波





图 11 日照与兖州的 PSP 计算值和测量值对比

Fig. 11 Comparison of the monitoring PSP in Rizhao with Yanzhou

动幅度是兖州站的10倍左右,极值接近(-3,+1)V。 山东地区对管地电位PSP的管理要求是稳定在-1.4 至-0.85V之间,可以看出日照站PSP超出控制范围的 218%。

这些结果说明,海岸和断裂带复合效应在中石油 日东线管道PSP产生了负面影响,在海岸—断裂带区 域的日照站管道PSP幅值更大,波动更加剧烈,容易 超出控制范围,加速管道腐蚀。

因此,针对中国东部沿海管道的阴极保护工程应 该重点关注近海附近的日照站等,考虑海岸和断裂带 复合效应,建议采用双极性恒电位仪加去耦合器的保 护措施。

-3

500

# 4 结论

本文从数学模型和实际数据两方面验证海岸一断 裂带复合效应对沿海管道的影响,主要结论如下:

1000

1500

时间/min

(d) 兖州站与日照站监测值对比

2000

(1)海岸一断裂带复合效应是使海岸一断裂带区域 电场得到"提升"或"下拉"。

(2) 兖州站的管道时变 PSP 计算结果与实测值在趋势和幅值上基本保持一致,验证了管道 PSP 有限元算法的准确性。

(3)在一次磁扰动期间日东线 PSP 空间分布特点表现为日照站 PSP 波动幅度是兖州站的 10 倍左右,极值接近(-3,+1) V,超出控制范围(-1.4,-0.85) V的218%,说明海岸和断裂带的复合效应对沿海管道产生

的负面影响很严重。建议采用双极性恒电位仪加去耦 合器的保护措施。

进一步的,应监测沿海管道的地磁感应电流,结 合空间天气的预报,提前找出灾变点,排除隐患。

# 参考文献

- OSELLA A, FAVETTO A, LÓPEZ E. Currents induced by geomagnetic storms on buried pipelines as a cause of corrosion[J]. Journal of Applied Geophysics, 1998, 38(3): 219–233.
- [2] 赵耀峰. 埋地油气管道 GIC-PSP 监测原理与装置研制 [D]. 北京: 中国石油大学(北京), 2016: 25. [ZHAO Y F. GIC-PSP monitoring principle and device development of buried oil and gas pipeline [D]. Beijing: China University of Petroleum (Beijing), 2016: 25.]
- [3] 梁志珊, 赵耀峰, 夏鹏程, 等. 埋地油气管道和阴极保护装置的GIC测量方法及装置: 中国, 201510329626.1 [P]. 2015-10-21.
   [LIANG Z S, ZHAO Y W, XIA P C, et al. GIC measurement method and device for buried oil and gas pipeline and cathodic protection device: CN 201510329626.1 [P]. 2015-10-21.]
- [4] 张举丘,梁志珊,谭程. 基于回路电流法的管道GIC和管地电位计算[C]// 2015 中国电磁兼容大会论文集. 2015: 201-205. [ZHANG J Q, LIANG Z S, TAN C. Pipeline GIC and pipe ground potential calculation based on loop current method [C]// Proceedings of 2015 China electromagnetic compatibility conference. 2015: 201-205.]
- [5] 叶高峰,魏文博,金胜,等. 郯庐断裂带中段电性结构及其地学意义研究[J]. 地球物理学报, 2009, 52(011): 2818-2825. [YE G F, WEI W B, JIN S, et al. Electrical structure and its geological significance in the middle segment of the Tan Lu fault zone [J]. Acta geophysics, 2009, 52 (011): 2818-2825.]
- [6] BOTELER D H, PIRJOLA R J, NEVANLINNA H. The effects of geomagnetic disturbances on electrical systems at the Earth's surface[J]. Advances in Space Research, 1998, 22(1): 17–27.
- [7] PULKKINEN A, PIRJOLA R, BOTELER D, et al. Modelling of space weather effects on pipelines[J]. Journal of Applied Geophysics, 2001, 48(4): 233-256.
- [8] PIRJOLA R, VILJANEN A. Complex image method for calculating electric and magnetic fields produced by an auroral electrojet of finite length[J]. Annales Geophysicae, 1998, 16(11): 1434–1444.
- [9] GILBERT J L. Modeling the effect of the ocean-land interface on induced electric fields during geomagnetic storms[J]. Space Weather, 2005, 3(4): S04A03.
- [10] 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.
- [11] KUVSHINOV A, OLSEN N. A global model of mantle conductivity derived from 5 years of CHAMP, rsted, and SAC-C magnetic data[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(18): L18301.
- [12] KUVSHINOV A V. 3-D global induction in the oceans and solid earth: Recent progress in modeling magnetic and electric fields from sources of magnetospheric, ionospheric and oceanic origin[J]. Surveys in Geophysics, 2008, 29(2): 139–186.
- [13] PÜTHE C, KUVSHINOV A. Determination of the 1-D distribution of electrical conductivity in Earth's mantle from Swarm satellite data[J]. Earth Planets & Space, 2013, 65: 1233-1237.
- [14] 梁志珊, 王鹏, 胡黎花, 等. 埋地油气管道地磁感应电流(GIC)的混沌特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 88-96. [LIANG Z S, WANG P, HU L H, et al. Chaotic characteristics of geomagnetic induction current (GIC) in buried oil and gas pipelines [J]. Acta physica Sinica, 2014, 63(17): 88-96.]
- [15] 马晓冰, FERGUSON I J, 孔祥儒, 等. Effects and assessments of geomagnetically induced currents (GIC) 地磁感应电流(GIC)的作用与评估[J]. 地球物理学报, 2005, 48(006): 1282–1287. [MA X B, FERGUSON I J, KONG X R, et al. Effects and assessments of geomagnetically induced currents (GIC) and its evaluation [J]. Acta geophysics Sinica, 2005, 48(006): 1282–1287.]
- [16] 刘连光,张鹏飞,王开让,等. 基于大地电导率分层模型的油气管网地磁暴干扰评估方法[J]. 电网技术, 2015, 039(006): 1556– 1561. [LIU L G, ZHANG P F, WANG K R, et al. Evaluation method of geomagnetic storm interference in oil and gas pipeline network based on layered model of earth conductivity [J]. Power grid technology, 2015, 039 (006): 1556–1561.]
- [17] DONG B, DANSKIN D W, PIRJOLA R J, et al. Evaluating the applicability of the finite element method for modelling of geoelectric fields[J]. Annales Geophysicae, 2013, 31(10): 1689–1698.
- [18] 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:中国, 201510579331.X [P]. 2016-01-20. [LIANG Z S. A calculation method for GIC and PSP of buried oil and gas pipelines affected by geomagnetic storms: CN 201510579331. X [P]. 2016-01-20.]

- [19] 金建铭, 王建国译. 电磁场有限元方法 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2001: 96. [JIN J M, WANG J G. Finite element method of electromagnetic field [M]. Xi'an: Xi'an University of Electronic Science and Technology Press, 2001: 96.]
- [20] 杨儒贵. 电磁定理和原理及其应用[M]. 西南交通大学出版社, 2002: 42. [YANG R G. Electromagnetic theorem and principle and its application[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2002: 42.]
- [21] JIN J M. The finite element method in electromagnetics. Second edition[M]. New York: Wiley-Interscience [John Wiley & Sons], 2002: 90.
- [22] 魏文博, 金胜, 叶高峰, 等. 华北地区大地电磁测深及岩石圈厚度讨论[J]. 中国地质, 2006, 04: 762-772. [WEI W B, JIN S, YE G F, et al. Magnetotelluric sounding and lithospheric thickness in North China [J]. Geology of China, 2006, 04: 762-772.]
- [23] 柳建新, 童孝忠, 郭荣文. 大地电磁测深法勘探[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 48-50. [LIU J X, TONG X Z, GUO R W. The Magnetotelluric Sounding Method[M]. Beijing: Science Press, 2012: 48-50.]
- [24] 张继红,赵国泽,肖骑彬,等. 郑庐断裂带中段(沂沭断裂带)电性结构研究与孕震环境[J]. 地球物理学报, 2010, 53(3): 605-605.
   [ZHANG J H, ZHAO G Z, XIAO Q B, et al. Study on electrical structure and seismogenic environment in the middle segment of Tan Lu fault zone (Yishu Fault Zone) [J]. Acta geophysics Sinica, 2010, 53 (3): 605-605.]

(责任编辑 王雨墨 编辑 马桂霞)