

# 埋地油气管道地磁感应电流(GIC)的混沌特性研究\*

梁志珊 王鹏<sup>†</sup> 胡黎花 张举丘

(中国石油大学(北京), 地球物理与信息工程学院, 北京 102249)

(2014年2月21日收到; 2014年5月14日收到修改稿)

空间天气影响下的钢制油气管道会产生地磁感应电流, 地磁感应电流能够加速管道腐蚀, 干扰管道监测装置, 危及人身安全. 为了研究管道地磁感应电流的非线性动力学特性, 首先基于线传输理论, 建立了管道地磁感应电流模型, 并应用 Melnikov 方法对模型进行分析, 揭示了地磁场与管道系统相互作用而产生混沌的机理, 指出管道地磁感应电流具有出现混沌的可能性. 其次, 以中国西气东输一线管道中卫处6次磁暴事件数据为例, 依据功率谱分析法、主分量法、关联维数法、Lyapunov 指数法等多种混沌判别方法, 对计算得到的地磁感应电流时间序列作了定量和定性的分析, 进一步验证理论分析的结果. 数学模型和实际数据两方面都表明: 在空间天气影响下, 埋地钢制管道系统内的地磁感应电流具有混沌特性, 为空间天气影响下的钢制油气管道保护提供了理论依据.

**关键词:** 管道, 磁暴, 地磁感应电流, Melnikov

**PACS:** 05.45.-a, 91.25.Wb, 93.85.Tf

**DOI:** 10.7498/aps.63.170505

## 1 引言

太阳能风暴和地球内部磁场的相互作用使得磁层和电离层产生变化的空间电流, 这个电流源会扰动地面磁场, 这种现象称为地磁暴<sup>[1]</sup>. 根据法拉第电磁感应定律, 剧烈变化的地磁场可以在埋地油气管道等长导体里产生地磁感应电流<sup>[2]</sup>(geomagnetically induced current, GIC). 早在19世纪, 人们就开始注意到电报线中的GIC现象. 随着输油、输气管道的快速延长, 有关管道GIC的报道也逐渐增多.

GIC对管道影响很大, 如导致腐蚀电流密度增大、管道腐蚀率增加等<sup>[3]</sup>. 而腐蚀带来的损坏是日积月累的, 所以GIC最终会诱发管道整体故障, 导致管内燃料泄漏, 危及人民生命财产安全, 带来不可估量的损失<sup>[4]</sup>. GIC还会影响管道流量计的读数、干扰阴极保护系统的正常运行等<sup>[5]</sup>, 这些都会

直接或间接地影响管道系统的安全. 近年来, 油气管道设计寿命内事故频发已引起国内外学者对于管道GIC的高度重视.

高纬度地区的国家因受GIC的影响较大, 所以开始关注管道GIC较早<sup>[6]</sup>. 1952年, Allison等在加拿大管道中发现了GIC<sup>[7]</sup>. 之后, 美国阿拉斯加管道和芬兰管道也分别被监测到100A和50A的GIC<sup>[8]</sup>. 1986年, Boteler等提出了一种管道GIC的计算方法<sup>[9]</sup>, Pulkkinen等对这种方法做了进一步完善和推广<sup>[10]</sup>. Campbell等总结了几种管道GIC测量的方法<sup>[11]</sup>, Heriksen等提出GIC会干扰管道测量, 加速管道腐蚀<sup>[12]</sup>. 大量文献指出GIC会导致管地间的电位差处于安全范围以外, 使得阴极保护系统失效<sup>[13-15]</sup>. 可以看出, 之前的研究主要集中在管道GIC的测量、计算以及GIC对阴极保护系统的干扰作用等方面<sup>[16,17]</sup>. 国内在GIC对电网系统的影响领域研究较成熟<sup>[18]</sup>, 而对于管道GIC的研究工作处于起步阶段. Liang等对西气东

\* 国家自然科学基金(批准号: 51071176)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: wangp1989@163.com

输管道内的GIC做了大量的研究<sup>[19,20]</sup>. 结果表明, 我国西气东输管道长度已成为世界之最, 而且分布跨越在高、中和低纬度三个地区, 经过地区土壤电阻率高, 估测会产生上百甚至上千安培的感应电流, 潜在危害巨大. 实际的管道系统是一个复杂的非线性、非自治动力系统, 关于管地电位和管道压力的动力学特征研究已经展开<sup>[21,22]</sup>, 而对于管道GIC的动态特性和作用机理未见报道.

本文将混沌理论引入管道GIC的研究. 利用线传输线理论, 建立管道GIC非线性电路等效模型, 然后应用Melnikov方法<sup>[23,24]</sup>揭示地磁激励下管道内可能存在的混沌现象. 其次, 利用国家地磁台给出的地磁数据得到GIC时间序列, 并用数值判据对GIC时间序列的混沌特性做了定性和定量分析.

## 2 管道GIC模型与Melnikov混沌机理研究

### 2.1 管道GIC模型

Botler提出的分布源传输线理论(distributed source transmission line, DSTL)在管道上的应用是基于将长管道近似于传输线来描述的. 当管道问题转换为传输线问题之后, 就可以建立管道模型. 而当磁暴发生时, 管道和大地之间会产生低频交流信号, 由于管地间的弱耦合, 就可以将管地体系等效成为一个相对均匀的传输线路, 如图1所示.

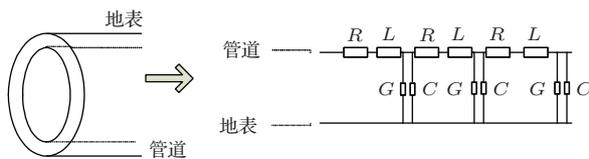


图1 传输线模型

利用频谱分析可以得到地磁干扰信号中的主作用项. 由于任意形式的交流信号可以通过傅里叶变换分解成正(余)弦的叠加, 可以选择管道低频GIC信号等效成一个余弦交流电源. 模型的建立还基于以下的两点假设: 1) 管体的材质是均匀的; 2) 管道涂层完好. 以单位管道为例, 建立等效模型如图2所示. 其中,  $E \cos \omega t$  为地磁变化产生的低频干扰电压 ( $E$  为幅值,  $\omega$  为频率,  $t$  为时间),  $R$  为管道的等效阻抗,  $L$  为管道的等效电感,  $C$  为管道覆盖层的等效电容,  $G$  为因电流泄露而产生的

涂层电导. 由于环境覆盖层的差异性, 此处选管道等效电容呈非线性, 非线性电容电压与电量满足  $u_C = a_1 q + a_2 q^3$ , 其中,  $q$  为电量,  $a_1 = C > 0$  为线性电容项,  $a_2 > 0$  为非线性电容项<sup>[25]</sup>.

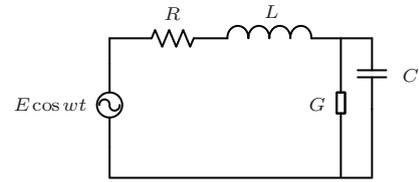


图2 非线性扰动等效模型

利用基尔霍夫定律可得系统的非线性微分方程组如下:

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dt} &= I_L + (-a_1 q - a_2 q^3)G, \\ L \frac{dI_L}{dt} &= -I_L R - a_1 q - a_2 q^3 + E \cos \omega t, \end{aligned} \quad (1)$$

式中令  $x = q$ ,  $y = I_L$ ,  $\varepsilon \cdot \delta = \frac{R}{L}$ ,  $A_1 = \frac{a_1}{L} > 0$ ,  $A_2 = -\frac{a_2}{L} > 0$ ,  $\varepsilon \cdot B = \frac{E}{L}$ , 因假设涂层完好, 所以泄露电流产生的电导的影响很小, 可令  $G = 0$ . 符号替换后可得如下埋地管道等效电路模型的状态方程:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -A_1 x + A_2 x^3 + \varepsilon(-\delta y + B \cos \omega t). \end{aligned} \quad (2)$$

### 2.2 Melnikov法判断混沌特性

令(2)式中  $\varepsilon = 0$ , 则(1)式写为

$$\begin{aligned} \dot{x} &= y, \\ \dot{y} &= -A_1 x + A_2 x^3. \end{aligned} \quad (3)$$

(3)式所示系统为无扰Hamilton系统. 其Hamilton量为

$$H(x, y) = \frac{1}{2}y^2 + \frac{A_1}{2}x^2 - \frac{A_2}{4}x^4.$$

注意到系统有三个平衡点  $O(0, 0)$ ,  $A\left(\sqrt{\frac{A_1}{A_2}}, 0\right)$ ,  $B\left(-\sqrt{\frac{A_1}{A_2}}, 0\right)$ , 易验证原点  $O$  是中心点,  $A$  和  $B$  是鞍点. 于是存在两条连接鞍点  $A, B$  的异宿轨道, 异宿轨道可由下式求解:

$$\begin{aligned} H\left(\sqrt{\frac{A_1}{A_2}}, 0\right) &= \frac{1}{2}y^2 + \frac{A_1}{2}x^2 - \frac{A_2}{4}x^4 = \frac{A_1^2}{4A_2}, \\ \dot{x} &= y. \end{aligned} \quad (4)$$

从而得到两条异宿轨道的参数方程

$$\begin{aligned} x_i(t) &= \pm \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \operatorname{th}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right), \\ y_i(t) &= \pm \frac{A_1}{\sqrt{2A_2}} \operatorname{sech}^2\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right), \\ i &= 1, 2. \end{aligned} \quad (5)$$

根据 Melnikov 函数表达式

$$\begin{aligned} M_i(t_0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} F(q^0(t)) \wedge G(q^0(t), t+t_0) dt, \\ i &= 1, 2, \end{aligned} \quad (6)$$

其中, 由 (2) 式可得,

$$\begin{aligned} F &= \begin{pmatrix} f_1 \\ f_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y \\ -A_1x + A_2x^3 \end{pmatrix}, \\ G &= \begin{pmatrix} g_1 \\ g_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ -\delta y + B \cos wt \end{pmatrix}. \end{aligned}$$

将 (5) 式代入 (6) 式则可得到扰动作用下异宿轨道的 Melnikov 函数

$$\begin{aligned} M_i(t_0) &= \int_{-\infty}^{+\infty} y_i(t) \cdot (-\delta y_i(t) + B \cdot \cos w(t+t_0)) dt \\ &= -\delta \frac{A_1}{A_2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \operatorname{sech}^4\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right) dt \pm B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \\ &\quad \times \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{sech}^2\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right) \cos wt_0 \cos wtdt \\ &= -\delta \frac{A_1}{A_2} I_1 \pm B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot I_2 \cdot \cos wt_0, \end{aligned} \quad (7)$$

其中,

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} \operatorname{sech}^4\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right) dt = \frac{2}{3}\sqrt{2}, \\ I_2 &= \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sqrt{2}}{2} \operatorname{sech}^2\left(\frac{\sqrt{2}}{2}t\right) \cdot \cos wtdt \\ &= \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right). \end{aligned}$$

对 (7) 式进行推导化简可得

$$\begin{aligned} M_i(t_0) &= B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right) \\ &\quad \times \left( \frac{-\delta \frac{A_1^2}{A_2} \cdot \frac{2}{3}\sqrt{2}}{B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right)} + \cos wt_0 \right). \end{aligned} \quad (8)$$

根据 Melnikov 判据 [26], 如果函数  $M$  具有不依赖于  $\varepsilon$  的简单零点, 则对于充分小的  $\varepsilon$ , 系统 Poincare 映射具有 Smale 马蹄变换意义下的混沌, 即如果存在  $t_0$  使得  $M(t_0) = 0$ ,  $dM(t_0)/dt_0 \neq 0$ , 则存在  $\varepsilon$ , 能使稳定流形与不稳定流形横截相交, 从而可以判断是否出现混沌.

令 (8) 式为 0, 有

$$\begin{aligned} M(t_0) &= B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right) \\ &\quad \times \left( \frac{-\delta \frac{A_1^2}{A_2} \cdot \frac{2}{3}\sqrt{2}}{B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right)} + \cos wt_0 \right) \\ &= 0. \end{aligned} \quad (9)$$

显然,  $|\cos wt_0| \leq 1$ , 进一步考察 Melnikov 函数  $M(t_0)$  对  $t_0$  的导数, 得  $dM(t_0)/dt_0 = -\sin wt_0$ . 若使  $dM(t_0)/dt_0 \neq 0$ , 则必须满足  $|\sin wt_0| \neq 0$ , 即  $|\cos wt_0| \neq 1$ . 于是要使 (9) 式成立, 必有

$$\frac{\delta \frac{A_1^2}{A_2} \cdot \frac{2}{3}\sqrt{2}}{B \frac{A_1}{\sqrt{A_2}} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right)} < 1. \quad (10)$$

原系统的状态方程式 (2) 可化为

$$\ddot{x} + A_1x - A_2x^3 + \delta\dot{x} = B \cos wt. \quad (11)$$

上式即为广义 Duffing 方程, 特点之一是在方程等号右边加了外加干扰强迫项. 正是由于管道非线性系统的本征频率与外加磁暴引发的周期强迫干扰频率的相互作用, 使得动力系统具有极丰富的混沌特性. 为揭示系统的谐振频率和干扰频率之间的关系, 现在对 (10) 式作进一步的变化,

$$\frac{\delta C}{L} \frac{1}{\sqrt{A_2}} \cdot \frac{2}{3}\sqrt{2} < \frac{E}{L} \cdot \sqrt{2}\pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right). \quad (12)$$

令原系统谐振频率为  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , 使用  $L, C$  等符号替换回  $A_1, A_2, B$  可得

$$\omega_0^2 > \frac{\delta \frac{1}{\sqrt{La_2}} \cdot \frac{2}{3}}{E \cdot \pi\omega \operatorname{csch}\left(\frac{\sqrt{2}}{2}\pi\omega\right)}. \quad (13)$$

(13) 式为管道 GIC 出现混沌的条件, 即当  $\omega_0$  的取值满足该条件时, 系统的庞加莱映射存在 Smale 马蹄意义下的混沌. 因此, 埋地管道系统的运行状态可用该方程来表述.

### 3 GIC时间序列混沌特性研究

数据来源于国家地磁台给出的中国西气东输一线管道中卫处6次磁暴事件的地磁参数, 包括:

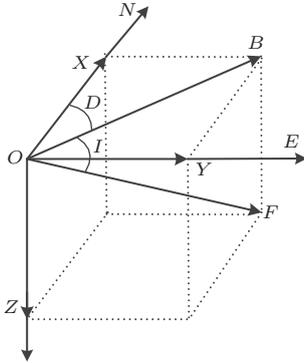


图3 地磁场各要素

地磁场总强度( $F$ )、磁偏角( $D$ )和磁倾角( $I$ )等. 如图3所示( $O$ 为观测点,  $\vec{OX}$ 指向地理北极,  $\vec{OY}$ 指向正东,  $\vec{OZ}$ 为垂直向下),  $I$ 为磁倾角(向量 $F$ 和 $B$ 之间的夹角),  $B$ 为地磁场总强度 $F$ 的水平分量,  $D$ 为磁偏角(向量 $B$ 和 $\vec{OX}$ 之间的夹角), 地磁场北向和东向水平分量分别为 $B_x$ 或 $B_y$ . 以2011年9月26日和2012年3月8日的磁暴事件数据为例进行分析.

#### 3.1 GIC计算

首先基于平面波法计算水平感应电场, 然后利用DSTL理论得到GIC时间序列. 为方便下面进行的数据计算, 首先利用 $F$ 和 $D$ 求出地磁场强水平分量 $B_x$ 与 $B_y$ , 处理方法如下:

$$B_x = F \cos D, \quad B_y = F \sin D. \quad (14)$$

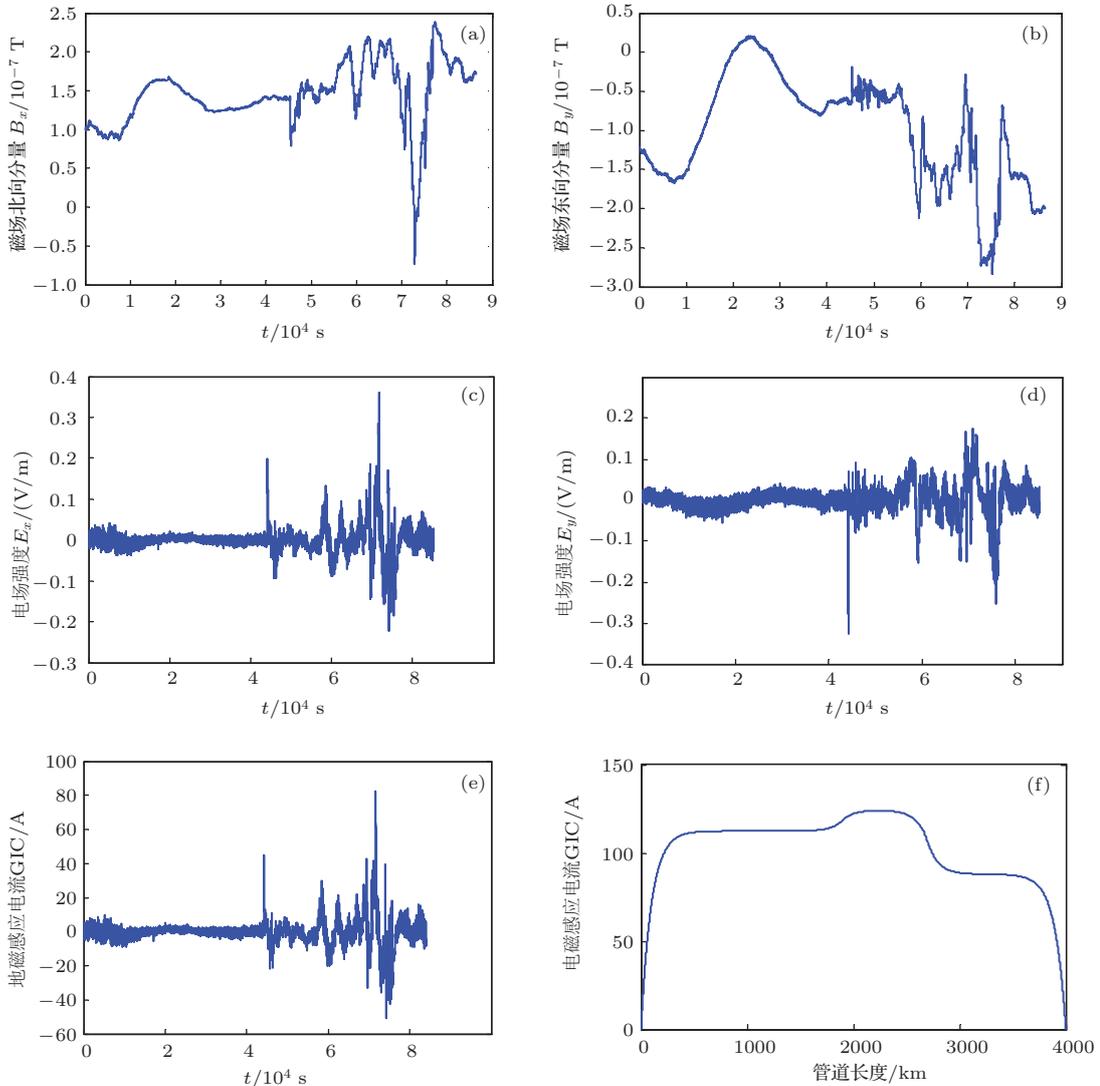


图4 磁暴事件“2011.09.26”计算分析 (a) 磁感应强度 $B_x$ 曲线; (b) 磁感应强度 $B_y$ 曲线; (c) 电场强度 $E_x$ 曲线; (d) 电场强度 $E_y$ 曲线; (e) 电流时间变化曲线; (f) 电流沿管道的空间分布曲线

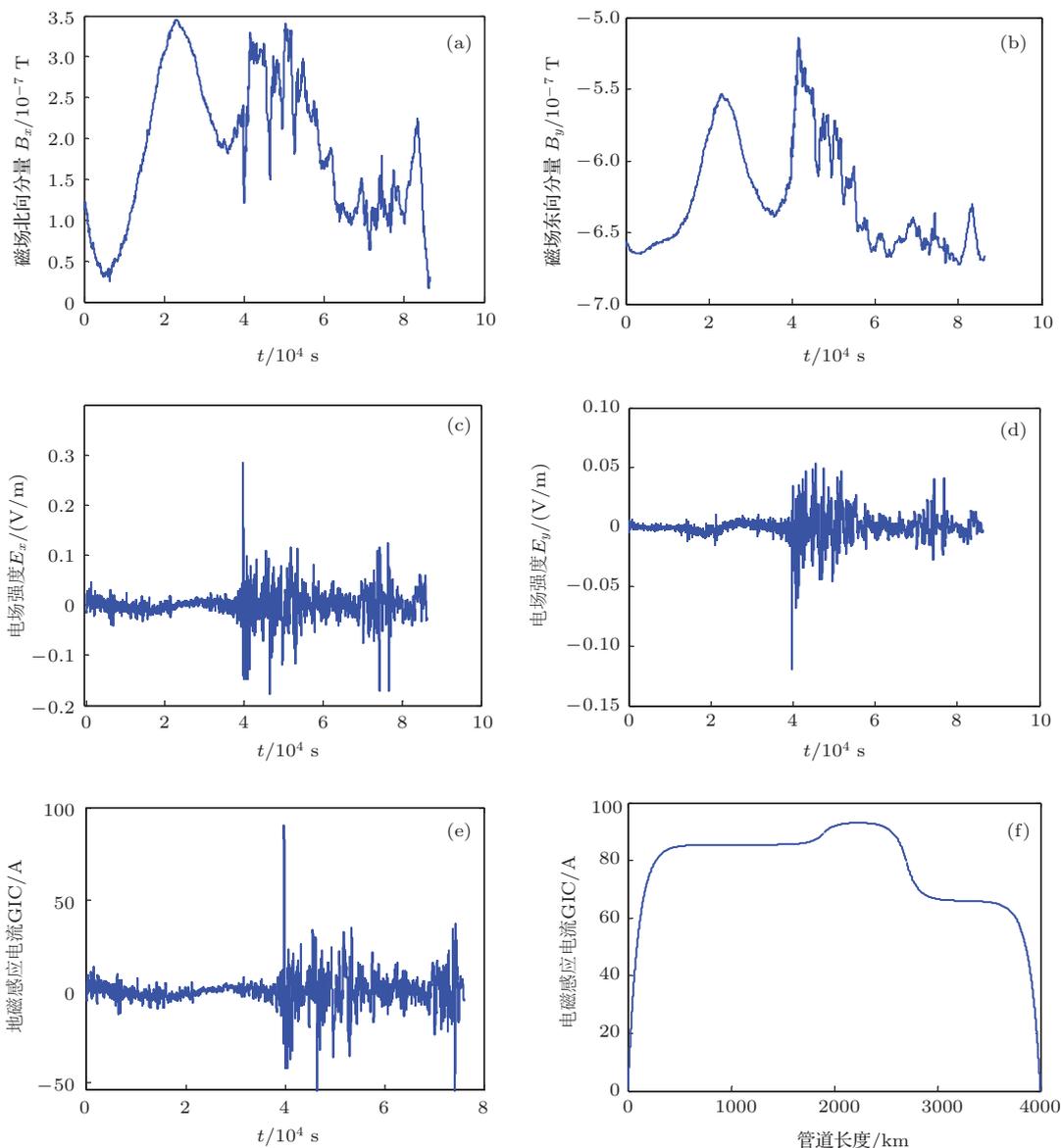


图5 磁暴事件“2012.03.08”计算分析 (a) 磁感应强度  $B_x$  曲线; (b) 磁感应强度  $B_y$  曲线; (c) 电场强度  $E_x$  曲线; (d) 电场强度  $E_y$  曲线; (e) 电流时间变化曲线; (f) 电流沿管道的空间分布曲线

图4、图5为两次磁暴事件的数据  $B_x$ ,  $B_y$ , 以及计算得到的  $E_x$ ,  $E_y$  和 GIC.

### 3.2 “2011.09.26” GIC 混沌特性分析

时间序列的混沌判据主要有功率谱分析法、主分量法、关联维数法、Lyapunov 指数法等 [27]. 以下将采用各个判据逐一分析 GIC 时间序列的混沌特性.

#### 3.2.1 功率谱分析

图6(a)为所得功率谱图, 可以看出, GIC 的功率谱图都是连续的, 无明显的周期性, 无明显的峰值出现. 根据功率谱判据 [28], 该数据序列具有混沌

特征, 定性表明 GIC 为混沌序列.

#### 3.2.2 主分量分析

图6(b)GIC 序列的主分量谱图. 可以看出, 主分量谱图存在斜率为负的直线部分, 符合主分量法的混沌判据, 表明磁暴事件 GIC 有明显的混沌特性.

#### 3.2.3 关联维数分析

采用 GP 算法进行关联维数分析 [29,30]. 图6(c)为 GIC 序列的  $\ln C - \ln r$  关系曲线. 其中  $m$  为嵌入维数, 取值从 1 到 30 变化,  $r$  是参考半径,  $C$  是关联积分. 采用自相关函数计算得出序列时间延迟  $\tau = 5$ , 在实际数值计算中, 通常给定一些具

体的  $r$  值, 让  $r$  从小到大变化, 选择适当的  $r$  值, 当  $d = \ln C_m(r) / \ln r$  趋于稳定时, 即双对数关系曲线中的直线段, 除去斜率为 0 或  $\infty$  的直线外, 考察其中的最佳拟合直线, 那么该直线的斜率就是关联维数  $d$ , 关联维数是一个十分重要的特征量, 反映了系统的复杂程度. 如果嵌入维数取得足够大, 系统原动力学形态就可以被恢复出来. 如果系统是混沌的, 关联维数会随着嵌入维数增加而收敛于一个稳定值, 并且此值是一个分数值. 如果系统是随机的, 关联维数会随着嵌入维数增大而不断增大, 并不收敛于一个稳定的值.

通过计算, 当  $m > 24$  时,  $d$  趋于稳定, 表 1 为得到的嵌入维数  $m$  与关联维数  $d$  关系表, 从表 1 可以看出,  $d = 1.23$ ,  $m = 24$ , 满足 Takes 定理:  $m > 2d + 1$ , 表明可以在拓扑等价的意义下恢复原系统动力学性态,  $d$  为分数维, 说明动态系统有复杂吸

引子, 存在混沌分形现象.

表 1 “2011.09.26” 嵌入维数表

嵌入维数 $m$	关联维数 $d$	嵌入维数 $m$	关联维数 $d$
10	0.53	24	1.18
15	0.76	26	1.23
20	1.01	28	1.23

### 3.2.4 Lyapunov 指数分析 [31,32]

本文选择小数据法计算最大 Lyapunov 指数 [33]. 通过选择不同步长计算分析 Lyapunov 指数. 表 2 和图 6 (d) 为计算得到的最大 Lyapunov 指数表和变化图. 计算结果表明不同长度的数据计算均得到正的 Lyapunov 指数, 计算得出最大 Lyapunov 指数为  $L_1 = 0.0083 > 0$ , 从理论上说明此次磁暴事件的 GIC 存在严格的混沌特性.

表 2 “2011.09.26” Lyapunov 指数表

$N_1$	1000	2000	3000	4000	5000	5400	5800	6000
$L_1$	0.0043	0.0076	0.0083	0.0081	0.080	0.0083	0.0083	0.0083

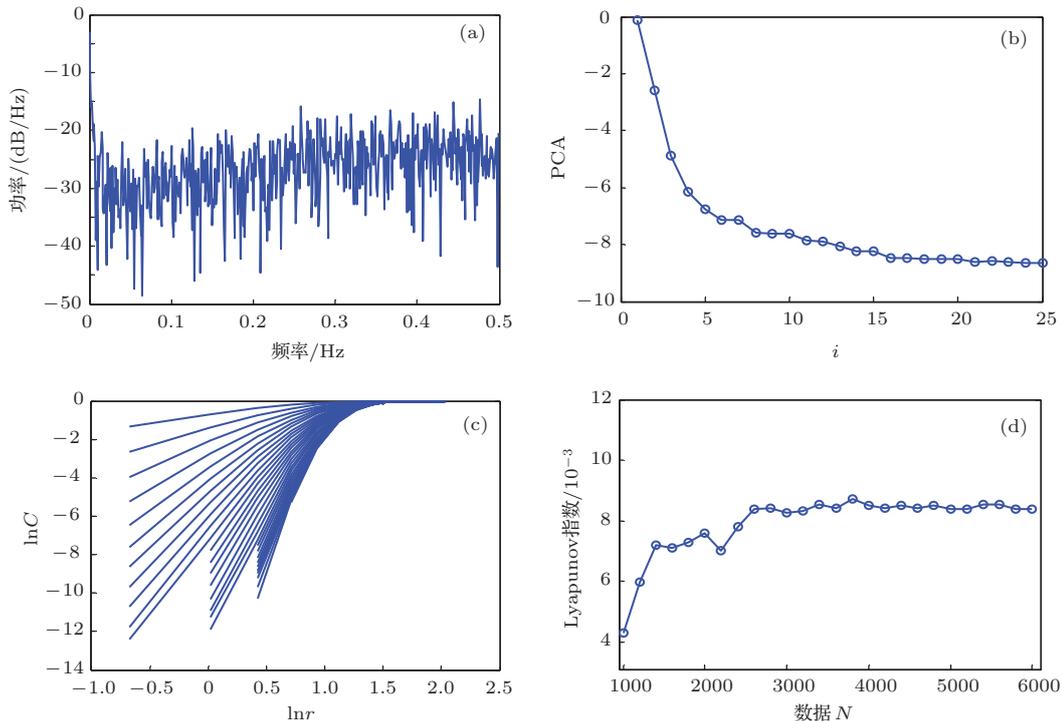


图 6 磁暴事件“2011.09.26”的 GIC 混沌特性分析 (a) 功率谱图; (b) 主分量谱图; (c)  $\ln C - \ln r$  关系图; (d) 最大 Lyapunov 指数图

## 3.3 “2012.03.08” GIC 混沌特性分析

### 3.3.1 功率谱与主分量分析

图 7 (a) 为“2012.03.08”磁暴事件的功率谱图,

可以看出, GIC 的功率谱图是连续的, 且无明显的周期性和峰值出现. 图 7 (b) 为 GIC 序列的主分量谱图. 根据功率谱判据和主分量法的混沌判据, 该数据序列具有混沌特征.

### 3.3.2 关联维数与Lyapunov指数分析

计算出磁暴事件“2012.03.08”GIC数据的时间延迟  $\tau = 28$ . 图7(c)为  $\ln C - \ln r$  关系曲线, 嵌入维数  $m$  与关联维数  $d$  关系如表3所示,  $m$  取值从1到30变化, 可见当  $m$  达到一定程度后, 即  $m$  大于25时,  $d$  的值逐渐趋于稳定, 此时  $d = 1.91$ . 可见, 由电流值计算出的关联维数都为分数维, 表明系统的存在混沌特性. 当选择的数据点数  $N$  不同时, 最大Lyapunov指数  $L$  的值如表4所示. 选择不同长度的数据计算均得到正的Lyapunov指数, 当数据长度大于4000时, 最大Lyapunov基本稳定,

图7(d)为不同数据量时Lyapunov指数图, 得出最大Lyapunov指数为  $L = 0.0032 > 0$ , 表明磁暴事件“2012.03.08”的GIC序列也存在混沌特性.

表3 “2012.03.08”嵌入维数表

嵌入维数 $m$	关联维数 $d$	嵌入维数 $m$	关联维数 $d$
5	1.51	22	1.93
10	1.88	24	1.93
15	1.93	26	1.92
17	1.93	28	1.91
20	1.94	30	1.91

表4 “2012.03.08” Lyapunov指数表

$N_2$	1000	2000	3000	4000	5000	5400	5800	6000
$L_2$	0.0031	0.0028	0.0026	0.0035	0.0025	0.0030	0.0032	0.0032

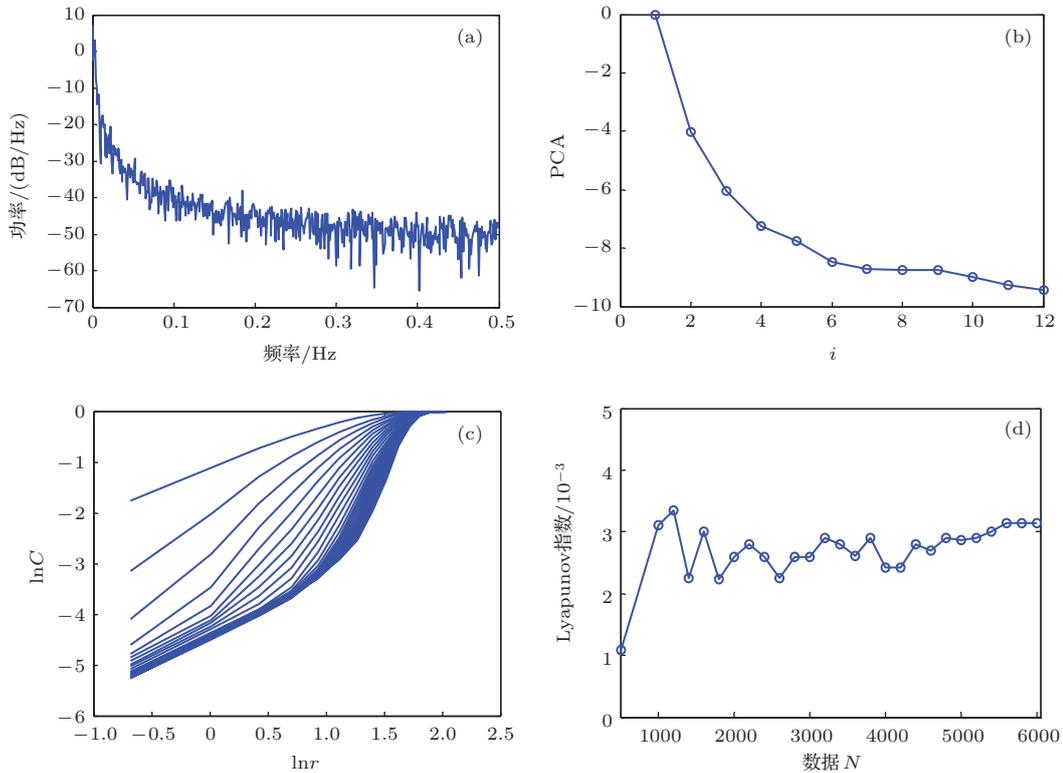


图7 磁暴事件“2012.03.08”GIC的混沌特性分析 (a)功率谱图; (b)主分量谱图; (c)  $\ln C - \ln r$  关系图; (d)最大Lyapunov指数图

### 3.4 其他磁暴事件分析

以下是对嘉峪关地磁台2010年7月14日, 2011年3月10日, 2010年4月5日和2011年10月24日磁暴事件的GIC数据定量计算结果, 如表5所示(含磁暴事件“2011.09.26”和事件“2012.03.08”). 表中还列出当日的地磁指数  $K_p$ , 可以更直观表示

磁暴强度与GIC混沌特性的关系.

由表5可知, 关联维数  $d$  计算结果最大为2.5, 计算Lyapunov指数均大于零, 共同表明GIC的混沌特征. 还可以看出Lyapunov指数的大小随磁暴强度的变化而变化, 表明地磁场的变化的剧烈程度影响系统的混沌程度.

表5 其他磁暴事件分析表

发生磁暴	$K_p$	$\tau$	$m$	$d$	$L$
2011.09.26	7	5	24	1.23	0.0083
2012.03.08	6	28	26	1.91	0.0032
2010.04.05	6	18	25	2.5	0.0022
2011.10.24	6	10	22	2.3	0.0028
2011.03.10	5	12	21	1.6	0.0013
2010.07.14	5	6	26	2.1	0.0010

## 4 结 论

本文对管道GIC进行了混沌动力学特性分析, 首先, 利用线传输理论, 建立管道模型, 应用Melnikov方法判定GIC具有出现混沌的可能性. 其次, 利用中国西气东输一线管道中卫处6次磁暴事件数据计算GIC, 又用多种混沌判据对GIC时间序列做了定量和定性分析. 从数学模型和实际数据两方面揭示了: 空间天气影响的埋地钢制管道系统内的GIC具有混沌特性. 具体研究成果如下:

1) 得到了管道GIC出现混沌的阈值条件, 揭示了地磁场与管道系统相互作用而产生混沌的机理, 表明了管道地磁感应电流(GIC)具有出现混沌的可能性.

2) 对现场GIC时间序列分别使用功率谱、主分量、关联维数以及Lyapunov指数4种混沌判据进行了分析, 结果表明管道GIC确实具有混沌特性.

3) 通过对不同磁暴事件GIC的分析结果比较, 发现Lyapunov指数随磁暴强度变化, 表明GIC混沌程度与磁暴程度有关系.

可以推测, 混沌地磁感应电流对管道的腐蚀影响将比传统的直/交流杂散电流对管道的作用机理更加复杂. 已有的阴极保护装置只对直流杂散电流起到保护作用, 因此, 埋地钢制管道动力系统内部运动中的混沌特性对于管网设计及检修维护、管道腐蚀、燃料泄漏的影响应予以充分重视. 对于管道混沌GIC特性的抑制方法、腐蚀试验与风险评估还有待于进一步研究.

作者特别感谢地球物理研究所杨冬梅教授, 提供了宝贵的地磁台观测数据资料.

## 参考文献

- [1] Singh A K, Devendraa Siingh, Singh R P 2010 *Surv. Geophys.* **31** 581
- [2] Ma Y J, Wu D F, Zhou X S 2012 *Adv. Mater. Res.* **413** 129
- [3] Osella A, Favetto A, Lopez E 1998 *J. App. Geophys.* **38** 219
- [4] Zhu G Y, Zhang Sh Ch, Liu Q CH, Zhang J Y, Yang J Y, Wu T, Huang Y, Meng Sh C 2010 *Pet. Sci.* **7** 422
- [5] Ma X B, Ian J Ferguson, Kong X R, Xianghong Wu, YAN Y L 2005 *Chinese J. Geophys.* **48** 1282 (in Chinese) [马晓冰, Ian J Ferguson, 孔祥儒, Xianghong Wu, 闫永利 2005 地球物理学报 **48** 1282]
- [6] Louis. J, Lanzerotti 2010 *Space Weather.* **8**
- [7] Allison N J, Huddleston W E 1952 *Corrosion* **8** 1
- [8] Pulkkinen A, Viljanen, Pajunpää K, Pirjola R 2001 *J. App. Geophys.* **48** 219
- [9] Boteler D H, Cookson M J 1986 *Mater. Performance* **1** 27
- [10] Pulkkinen A, Pirjola R, Boteler D H, Ari Vijanen, Igor Yegorov. 2001 *J. App. Geophys.* **48** 233
- [11] Campbell W H, Zimmerman J E 1980 *IEEE T. Geosci. Remote* **18** 244
- [12] Henriksen J F, Elvik R, Granasen L 1978 *Proceedings of the 8th Scandinavian Corrosion Congress Helsinki, Finland, August 28-30, 1978* **1** p167
- [13] Campbell W H 1986 *Surv. Geophys.* **8** 239
- [14] Boteler D H 2000 *Adv. in Space Res.* **26** 15
- [15] Gummow R, Eng P 2002 *J. Atmos. Sol.-Terr. Physics* **64** 1755
- [16] Ngwira C M, Pulkkinen A, Frederick D W, Geoffrey C 2013 *Space Weather* **11** 121
- [17] Pirjola R 2000 *Proceedings of Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetics* Shanghai, China, May 7, 2000 p217
- [18] Liu L G, Liu Ch M, Zhang B, Wang Z Zh, Xiao X N, Han L Zh 2008 *Chinese J. Geophys.* **51** 976 (in Chinese) [刘连光, 刘春明, 张冰, 王泽忠, 肖湘宁, 韩立章 2008 地球物理学报 **51** 976]
- [19] Liang Z S, Li X H 2008 *Proceedings of The 5th International Conference on Impulsive & Hybrid Dynamical Systems and Applications* Beijing, China, May 9-11, 2008 p317
- [20] Liang Z S, Zheng Z, Li X H 2008 *Proceedings of Extended Abstracts on Electromagnetic Induction in the Earth Extended Abstract 19th Workshop* Beijing, China, October 23-29, 2008 p69
- [21] Liang Z S, Hu L H *Journal of China University of Petroleum* (Edition of Natural Science) (in press) (in Chinese) [梁志珊, 胡黎花中国石油大学学报(自然科学版)] (已接受)
- [22] Liu J H, Zhang H G, Feng J 2008 *Acta Phys. Sni.* **57** 6868 (in Chinese) [刘金海, 张化光, 冯健 2008 物理学报 **57** 6868]
- [23] Shi P M, Liu B, Hou D X 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 1321 (in Chinese) [时培明, 刘彬, 侯东晓 2008 物理学报 **57** 1321]

- [24] Niu Y J, Xu W, Rong H W, Wang L, Feng J Q 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 7535 (in Chinese) [牛玉俊, 徐伟, 戎海武, 王亮, 冯进铃 2008 物理学报 **57** 7535]
- [25] Gao J F, Ma X K, Luo Z J 2001 *Transactions of China Electrotechnical Society* **6** 75 (in Chinese) [高金峰, 马西奎, 罗先觉 2001 电工技术学报 **6** 75]
- [26] Yang X L, Xu W, Sun Z K 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1678 (in Chinese) [杨晓丽徐伟孙中奎 2006 物理学报 **55** 1678]
- [27] Tang Y F, Liu Sh L, Lei N, Jiang R H, Liu Y H 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 170504 (in Chinese) [唐友福, 刘树林, 雷娜, 姜锐红, 刘颖慧 2012 物理学报 **61** 170504]
- [28] Zhang Y M, Wu X J, Bai Sh L 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 190509 (in Chinese) [张玉梅, 吴晓军, 白树林 2013 物理学报 **62** 190509]
- [29] Zhang W M, Li X, Liu Sh, Li Y Q, Wang B H 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 329 (in Chinese) [张文明, 李雪, 刘爽, 李雅倩, 王博华 2013 物理学报 **62** 329]
- [30] Hou G Y, Liang R, Sun L, Liu L, Gong Y F 2014 *Acta Phys. Sin.* **63** 090505 (in Chinese) [侯公羽, 梁荣, 孙磊, 刘琳, 龚砚芬 2014 物理学报 **63** 090505]
- [31] Wu H, Hou W, Wang W X 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 129204 (in Chinese) [吴浩, 侯威, 王文祥, 颜鹏程 2013 物理学报 **62** 129204]
- [32] Zhang Y 2013 *Chin. Phys. B* **22** 050502
- [33] Rosenstein M T, Collins J J, De Luca C J 1993 *Phys. D* **65** 117

## Chaotic characteristic study of GIC in buried steel oil pipeline\*

Liang Zhi-Shan Wang Peng<sup>†</sup> Hu Li-Hua Zhang Ju-Qiu

(College of Geophysics and Information Engineering, China University of Petroleum(Beijing), Beijing 102249, China)

( Received 21 February 2014; revised manuscript received 14 May 2014 )

### Abstract

Variations of the geomagnetic field drive geomagnetically induced currents (GIC) in the buried steel pipelines, which may contribute to the pipeline corrosion and the pipeline network interfered by the solar wind and magnetic storm, are actually a complex nonlinear dynamical system. This paper shows that the induced current in the buried steel pipeline system has chaotic characteristics. To prove this, we first establish the lump-constant geomagnetic interference model based on the distributed source transmission line theory. Then we analyze this model by using Melnikov method and find out the condition under which the chaotic phenomenon will occur. In order to get a sufficient proof to validate the existence of chaos in pipelines, we also obtain the actual GIC time series by utilizing the measured data provided by national geomagnetic observatory and analyze its chaotic characteristics using multiple chaotic criteria. Analysis results of both the model and the measured data indicate that the pipeline's GICs have chaotic characteristics. This provides a theoretical basis for protecting pipeline from the effects of space weather.

**Keywords:** pipelines, magnetic storm, geomagnetically induced current (GIC), Melnikov

**PACS:** 05.45.-a, 91.25.Wb, 93.85.Tf

**DOI:** 10.7498/aps.63.170505

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51071176).

† Corresponding author. E-mail: wangp1989@163.com