

管内移动机器人定位技术与定位系统优化研究^①

齐海铭^{②*} 叶金蕊^{**} 张晓华^{*} 陈宏钧^{*}

(* 哈尔滨工业大学电气工程及自动化学院 哈尔滨 150001)

(** 北京航空航天大学材料科学与工程学院 北京 100083)

摘 要 研究了管内移动机器人的管外定位技术,采用甚低频电磁脉冲突破了金属管壁对电磁信号的屏蔽作用,实现了管道内外的信息传达。建立了地下管道环境中甚低频电磁场的分布模型,并分析了环境几何参数、电磁参数及发射频率对管外检测信号强度的影响。将甚低频电磁发射系统简化为磁偶极子模型,基于传感器阵的信号检测及磁场反演计算方法,实现了管道机器人的位置跟踪与准确定位。提出了发射线圈结构的优化设计方法,有效降低了采用磁偶极子磁场替代发射线圈磁场的相对误差。通过现场实验验证了甚低频电磁脉冲的穿透性能和定位技术的有效性。

关键词 管道机器人, 甚低频, 定位, 磁偶极子, 优化设计

0 引 言

我国在役长距离油气管道总长约两万公里,其中相当一部分始建于 20 世纪 60 年代,经过几十年的运行现已进入事故多发阶段,管道工程中腐蚀穿孔、泄漏污染、堵塞爆管等恶性事故时有发生,需要定期对管道进行检测与清理。随着超声技术、漏磁技术和涡流技术等无损检测技术的发展以及各类清管设备的产生^[1-3],管内移动机器人装置开始应用于管道的定期检测与维修工程^[4]。机器人在管道内部运行时,通过自身携带的仪器设备检测管道内壁,当探测到管壁缺陷或机器人运行出现故障时,管外人员需要知道机器人在管道内部的准确位置,以便快速准确地排除故障、恢复生产^[5]。因受现有通讯设备与定位技术的制约,管道状况多数难以确定,往往造成模糊开挖、盲目报废,严重浪费资源。

由于金属管壁对常规无线电信号的强屏蔽作用,使得地下管道内部与外界环境的通讯以及对管内检测设备的实时定位成为管道工程中亟待解决的难题。传统的定位方法多采用穿透性能较好的射线源(如 X 射线^[6])方式,然而其较强的放射性能会严重污染生态环境,尤其不适用于海底管道工程。鉴于甚低频电磁脉冲对金属、土层、海水等介质具有良

好的穿透性能,可被广泛应用于舰艇通讯、地质勘探及目标定位等领域^[7-9]。管道工程中存在泥土、岩石、水、金属管壁、输送原料及空气等多相介质层,对于甚低频电磁场的分布模态可以从理论建模与数值计算两方面进行研究。在磁性目标体的定位及状态测定应用中,磁偶极子模型被广泛应用^[10-12]。当检测距离远远大于目标磁体几何尺寸时,该目标可以看作磁偶极子。然而,在多数实际位置探测应用中,对应理想磁偶极子模型的可行性和相对误差的大小,以及探测距离、目标体几何结构与尺寸对相对误差的影响,并没有进行量化分析,结果导致定位精度较低或定位失效。本文报道了主要针对基于甚低频电磁脉冲与多传感器信号检测的管内移动机器人定位技术和甚低频电磁发射系统结构的优化设计方法的研究,以及通过工业现场试验对定位技术与定位系统进行的验证。

1 管道机器人的定位原理

1.1 定位系统描述

管道机器人定位系统如图 1 所示,在此系统中,甚低频电磁激励源、无损检测装置、中央控制器和电池等设备被连接到管道机器人载体上,随机器人一起在管道内部运行,各设备之间依靠 CAN 总线进行

① 863 计划(2006AA04Z205)资助项目。

② 男,1983 年生,博士生;研究方向:管道机器人运动控制与示踪定位技术;联系人,E-mail: qhm0318@126.com
(收稿日期:2009-08-14)

通讯。无损检测装置提取管壁的状态数据并进行实时分析,可以快速判断管壁的腐蚀状况;中央控制器协调并监控所有设备的工作状态;甚低频电磁信号穿透金属管壁、土层、海水等介质进入空气层,利用车载或船载传感器阵搜索、接收电磁信号,经过滤波放大后传输到计算机软件系统进行管道机器人的位置计算[5]。

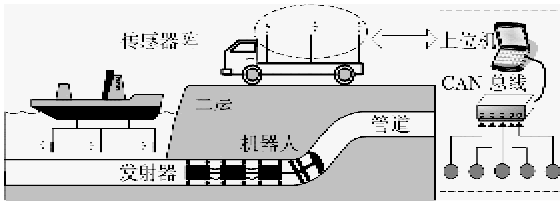


图1 管道机器人定位系统

1.2 磁偶极子定位模型

考虑如图2所示的管道埋藏环境,各层介质的电磁参数分别为 $(\epsilon_i, \mu_i, \sigma_i)(i = 1, 2, 3, 4)$, ϵ_i 为介电常数, μ_i 为磁导率, σ_i 为电导率,各层介质分界面至管道轴线的距离为 $r_j(j = 1, 2, 3)$ 。极坐标系下空气层中的观测点为 $P(r, \phi, z)$,从Maxwell方程出发并考虑各层介质的边界条件限制[9],建立空气层中磁场强度 H_{air} 分布的完整模型为

$$\begin{cases} H_{z,air} = -\frac{M}{2\pi^2} \int_0^\infty b_{air}(m) x_4 K_0(x_4 r) \cos(mz) dm \\ H_{r,air} = -\frac{M}{2\pi^2} \int_0^\infty m b_{air}(m) K_1(x_4 r) \sin(mz) dm \end{cases} \quad (1)$$

其中 $b_{air}(m)$ 可以由初始激励条件和边界条件求出, $K_i(x)(i = 0, 1)$ 为 i 阶第二类修正Bessel函数, $x_4 = (m^2 - \omega^2 \mu_4 \epsilon_4 - j\omega \mu_4 \sigma_4)^{1/2}$, ω 为激励电流角频率, $M = \pi R^2 NI(\omega t)$ 为线圈磁矩, R 为线圈半径, N 为线圈匝数, $I(\omega t)$ 为激励电流。

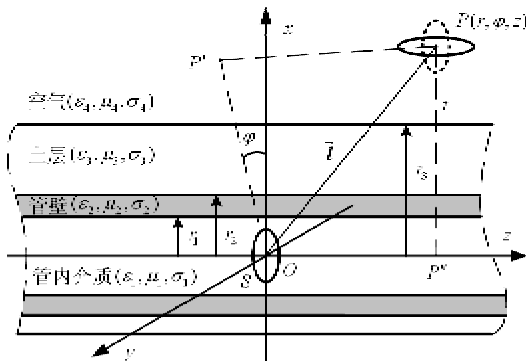


图2 管道埋藏环境示意图

选取管壁厚度为5~20mm,管壁磁导率为 $(10 \sim 300)\mu_0$, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{H/m}$ 为真空磁导率,管壁电导率为 $10^7 \sim 5 \times 10^7 \text{S/m}$,土层厚度为0.5~3m,发射线圈磁矩为28.3A/m,发射频率为10~100Hz,由于频率较低,忽略各介质层介电常数的影响,并且选取 $\mu_1 \approx \mu_3 \approx \mu_4 \approx \mu_0$, $\sigma_1 \approx \sigma_4 = 0$, $\sigma_3 = 10^{-2} \text{S/m}$ 。通过计算机仿真,研究了管壁厚度、管壁电磁参数、土层厚度及激励源频率对管外接收线圈中感应电压信号强度的影响,如图3所示(未考虑信号增益)。可见,磁场强度随管壁厚度、管壁电磁参数及土层厚度的增加以指数规律衰减。此外,选择发射频率为23.4Hz,接收线圈的感应电压信号输出值最大。

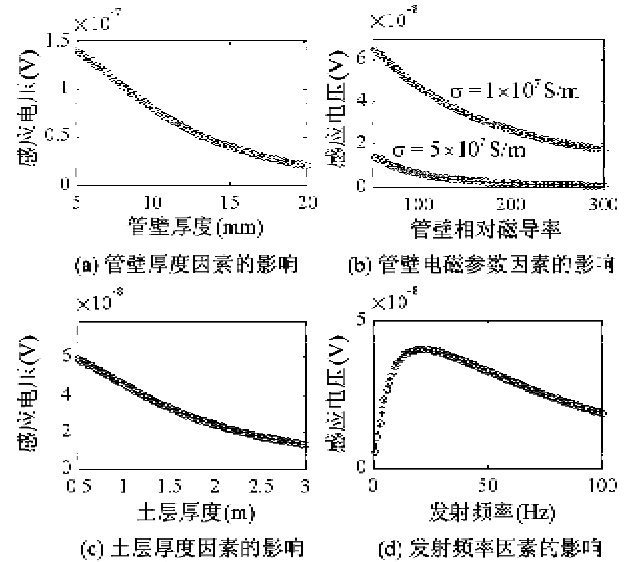


图3 仿真结果

定位过程是在空间磁传感器阵位置已知的情况下,利用磁场强度的测量值求解发射源位置的反演问题。式(1)所示反演问题的计算过于复杂,需要对模型进行简化。磁偶极子模型被广泛应用于目标体的定位及状态测定[7,8],当激励源的几何尺寸远小于检测距离,激励磁场为似稳场(甚低频)时,该激励源可以看作磁偶极子。通过以上分析,为了简化定位过程,将式(1)近似为磁偶极子模型的指数衰减形式[9]。

$$H_{air} = \frac{1}{4\pi} \left(\frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{l})}{l^5} - \frac{\mathbf{M}}{l^3} \right) \exp \left(-d \sqrt{\frac{\omega \mu_2 \sigma_2}{2}} - h \sqrt{\frac{\omega \mu_3 \sigma_3}{2}} \right) \quad (2)$$

其中 M 为等效磁偶极矩, d 为管壁厚度, h 为土层厚度, l 为发射线圈中心至观测点的空间向量。

1.3 定位算法分析

定位过程中采用单轴传感器,仅测量 x 方向的磁场强度。根据电磁感应定律,传感器输出电压信号的表达式为

$$\begin{cases} u_{out} = -G \frac{\partial \Phi_x}{\partial t} = C_{out} \left(\frac{3(\mathbf{M} \cdot \mathbf{l})(x - x_0)}{l^5} - \frac{M_x}{l^3} \right) \\ l = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2} \\ C_{out} = -\frac{\mu_0 G S_r \omega}{4\pi} \exp \left(-d \sqrt{\frac{\omega \mu_2 \sigma_2}{2}} - h \sqrt{\frac{\omega \mu_3 \sigma_3}{2}} \right) \end{cases} \quad (3)$$

其中 S_r 为传感器线圈横截面积, G 为信号增益, (x, y, z) 为已知的传感器坐标, (x_0, y_0, z_0) 为待求激励源坐标。由于 M 值约束已知,仅需求解 5 个传感器方程即可确定全部未知量:

$$\begin{cases} e(p) = \sum_{i=1}^5 \|u_{outi} - u_{mi}\|^2 \rightarrow \text{Min} \\ p = (x_0, y_0, z_0, M_x, M_y, M_z) \\ M = \sqrt{M_x^2 + M_y^2 + M_z^2} \end{cases} \quad (4)$$

其中 u_{outi} 和 u_{mi} 分别为各传感器的计算输出与测量输出,求解上述非线性方程,可以采用 Gauss-Newton 法、Levenberg-Marquardt 法、Powell 优化方法等^[13]。

2 定位系统的优化设计

实际位置探测中,如果探测距离与目标体的几何尺寸相当,或者激励源的线圈几何结构设计不合理,采用磁偶极子定位模型会带来较大的误差^[10]。为了提高磁偶极子定位模型的精度,本文研究了激励源线圈几何尺寸的优化设计。

考虑一个单层 N 匝、长度为 L 、直径为 D 的圆柱线圈,均匀缠绕且轴对称。不失一般性可以只考虑 x - z 平面,如图 1 所示。自由空间磁场由各线圈产生的磁场叠加而成:

$$\begin{cases} H_{xcoil} = \frac{I(\omega t)}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{z_i/x}{\sqrt{(R+x)^2 + z_i^2}} \\ \quad \left(E(k_i) \frac{z_i^2 + R^2 + x^2}{(R-x)^2 + z_i^2} - K(k_i) \right) \\ H_{zcoil} = \frac{I(\omega t)}{2\pi} \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sqrt{(R+x)^2 + z_i^2}} \\ \quad \left(K(k_i) - E(k_i) \frac{z_i^2 - R^2 + x^2}{(R-x)^2 + z_i^2} \right) \end{cases} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} K(k_i) = \int_0^{\pi/2} \frac{d\theta}{\sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \theta}} \\ E(k_i) = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k_i^2 \sin^2 \theta} d\theta \\ k_i = \sqrt{\frac{4Rx}{(R+x)^2 + z_i^2}} \\ z_i = -\frac{L(i-1)}{N-1} + z + \frac{L}{2} \end{cases}$$

将线圈近似为磁偶极子,其磁场表示为

$$\begin{cases} H_{xdipole} = \frac{M}{4\pi} \frac{3\cos\phi \sin\phi}{l^3} \\ H_{zdipole} = \frac{M}{4\pi} \frac{3\cos^2\phi - 1}{l^3} \end{cases} \quad (6)$$

其中 ϕ 为观测点 $P(z, x)$ 与 z 轴的偏离角。

定义线圈与磁偶极子相互模拟的误差为

$$\epsilon\left(\phi, \frac{L}{D}\right) = \frac{|H_{coil} - H_{dipole}|}{H_{coil}} \times 100\% \quad (7)$$

考虑观测距离 l 对模拟误差的影响,图 4 所示为不同观测距离时线圈与磁偶极子的磁场相对误差,可见随着 l 的增大相对模拟误差逐渐减少,实际定位过程中 $l \geq 10D$, 其相对误差 $\leq 0.1\%$ 。图 5 所示为 ϵ 与长径比 L/D 和观测点偏离 z 轴夹角的关系,随着 L/D 的增大 ϵ 逐渐减小,且当 $(L/D)_{opt} = 0.86$ 时, $\epsilon_{max} < 0.01\%$ 达到最小值(观测距离取 $l = 10D$)。

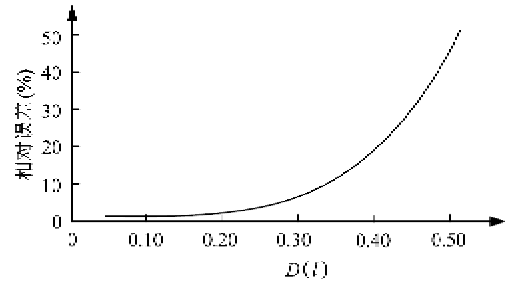


图 4 相对误差与观测距离的关系

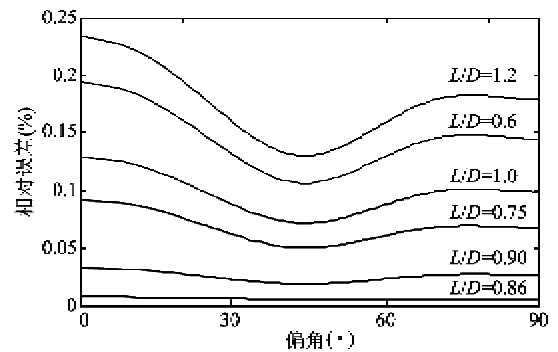


图 5 相对误差与线圈 L/D 和观测偏角的关系

为进一步降低相对模拟误差,尝试选择与最优单层线圈具有相同外径的多层线圈,由于内层各线圈具有相对较小的半径和相对较大的检测距离,因而其相对误差从理论上分析相比单层线圈会更小。对于多层线圈的优化设计,简单的方法可以选取每层线圈的长径比 $L_j/D_j = (L/D)_{opt}$, 满足此条件的线圈具有梯形横截面,如图 6(a)所示, $\epsilon_{max} < 0.006\%$ (观测距离取 $l = 10D$)。

定义误差分量表示为

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{H_{xcoil} - H_{xdipole}}{H_{xdipole\ max}} \times 100\% \\ \epsilon_z = \frac{H_{zcoil} - H_{zdipole}}{H_{zdipole\ max}} \times 100\% \end{cases} \quad (8)$$

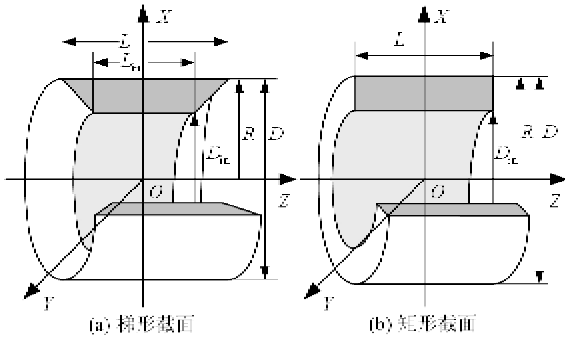


图 6 多层线圈结构

图 7 为模拟误差分量随偏离角和线圈长径比 L/D 的变化关系,由图可见,在最优长径比 $(L/D)_{opt}$ 周围稍微改变可以较好地保持最优性能,同时模拟误差分量会改变符号。多层线圈设计的第二种方案,从外层到内层, L/D 逐渐增大,若使其范围在 $(L/D)_{opt}$ 上下变化,利用变号特性可以使多

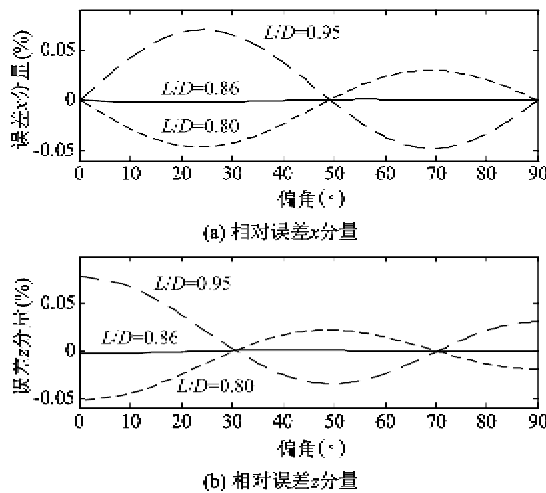


图 7 误差分量与线圈 L/D 及观测偏角的关系

层线圈之间的模拟误差相互补偿,使得整体线圈用于模拟磁偶极子的误差最小。线圈结构如图 6(b)所示。

通过仿真计算给出了部分线圈结构的 $(L/D)_{opt}$, 如表 1 所示,选取 $l = 10D$ 。由以上分析可见,多层线圈与具有相同外径的单层线圈相比,多层线圈用于模拟磁偶极子的效果更佳。采用图 6(b)所示的多层线圈结构优于图 6(a)所示的多层线圈结构。同时由表 1 可知,随着线圈层数的增多,相对误差逐渐降低。

表 1 多层线圈的最优设计

D_{in}/D	$(L/D)_{opt}$	$\epsilon_{max}(\%)$
0.50	0.72	0.0043
0.60	0.74	0.0047
0.70	0.76	0.0054
0.80	0.79	0.0066
0.90	0.82	0.0078

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

管道机器人定位系统实物样机如图 8 所示。发射器线圈采用多匝多层设计, $D_{in}/D = 0.5$, $L/D = 0.72$, $D = 4\text{cm}$, 供电电压为 14.4V, 线圈工作电流为 350mA。接收传感器阵列对称星形分布, 信号处理器为带通滤波器 (通带为 $23.4\text{Hz} \pm 0.7\text{Hz}$, 增益为 4800) 与信号模数转换器。将此套定位系统与管道无损检测机器人系统联合工作, 分别对 150m 长、壁厚 12mm 的地面管道和野外长 3km、壁厚 12mm、覆盖土层 2~3m 的输油管道进行缺陷检测。机器人系统检测到缺陷时, 将停止于缺陷处 5min, 然后继续前行。机器人的运行速度设定为 $v_0 = 10\text{cm/s}$, 机器人位移通过计程轮记录。采用此套系统一方面对管道机器人进行在线跟踪, 另一方面通过检测管内发

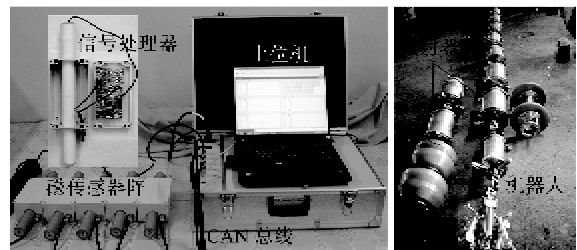


图 8 管道机器人定位系统

射器的信号判断机器人的运动状态,从而判断管壁是否存在缺陷并对缺陷进行准确定位。

3.2 实验结果与分析

表2所示为地面直管道环境中对机器人进行位置跟踪的实验结果,机器人实际位移由计程轮和计时器计算得到 $(v_0 t_0 + s_0)/2$,其中 t_0 为计时时间, s_0 为计程轮输出位移。表3所示为野外地下输油管道环境中对机器人进行位置跟踪和缺陷定位的多组实验统计结果,包括测量的甚低频电磁脉冲信号的空间分布距离。

表2 实验结果

采样时间(s)	实际位移(m)	计算位移(m)	误差(cm)
16.5	1.64	1.72	8
34.7	3.45	3.57	12
63.3	6.30	6.23	-7
81.8	8.20	8.28	8
131.2	13.13	13.04	-9
160.2	16.00	16.13	13
188.5	18.83	18.71	-12
218.5	21.88	21.80	-8
241.5	24.11	24.04	-7
272.6	27.23	27.30	7
294.6	29.40	29.51	11
316.2	31.66	31.58	-8
354.6	35.43	35.50	7
414.1	41.37	41.45	8
452.4	45.20	45.14	-6
487.1	48.74	48.83	9

表3 实验统计结果

测试项目	最大值	平均值
运行跟踪误差(cm)	21.4	14.5
静止定位误差(cm)	14.6	9.8
平行管道分布距离 z (m)	10.55	10.17
垂直管道分布距离 x (m)	4.64	4.41

由表2和表3可知,甚低频电磁脉冲信号可以有效穿透金属管道环境,对于12mm壁厚的管道水平方向 $\pm 10\text{m}$ 、垂直管道半径4.5m圆周范围内可以有效接收到信号;对于地面管道和地下管道环境,管道机器人运行过程中的位置跟踪平均误差小于15cm;机器人检测到缺陷后,静止状态的精确定位平均误差小于10cm。从实验结果可以看出,本文提出的定位方法可以较好地解决工程管道环境中的定位问题。

4 结 论

管内移动机器人定位系统利用甚低频电磁脉冲可解决金属管壁对电磁信号的屏蔽问题,通过检测和分析管外电磁场的分布可确定目标的运动状态与位置。本文采用磁偶极子模型来替代发射线圈的磁场模型,提出了电磁场反演计算的定位方法。为了降低磁偶极子与发射线圈相互模拟的误差,对发射线圈结构进行了优化设计,文中给出了线圈结构的优化参数结果。通过多次现场实验并对实测数据进行分析,最终验证了文中所述定位系统和定位方法的有效性。

参考文献

- [1] Li Y, Wilson J, Tian G Y. Experiment and simulation study of 3D magnetic field sensing for magnetic flux leakage defect characterization. *NDT&E International*, 2007, 40(2): 179-184
- [2] Nestleroth J, Davis R. Application of eddy currents induced by permanent magnets for pipeline inspection. *NDT&E International*, 2007, 40(1): 77-84
- [3] Murayama R, Makiyama S, Mitutoshi K, et al. Development of an ultrasonic inspection robot using an electromagnetic acoustic transducer for a lamb wave and an SH-plate wave. *Ultrasonics*, 2004, 42(1): 825-829
- [4] Choi H, Ryew S. Robotic system with active steering capability for internal inspection of urban gas pipelines. *Mechatronics*, 2002, 12(5): 713-736
- [5] Qi H M, Zhang X H, Chen H J, et al. Tracing and localization system for pipeline robot. *Mechatronics*, 2009, 19(1): 76-84
- [6] Chen H J, Li J Y, Zhang X H, et al. Application of visual servoing to an X-ray based welding inspection robot. In: *Proceedings of the 5th IEEE International Conference on Control and Automation*, Budapest, Hungary, 2005. 977-982
- [7] 徐君书, 徐得名, 杨雪霞. 管道内微带天线的FDTD全波分析与设计. *电波科学学报*, 2004, 19(5): 618-621
- [8] 徐涛. 水平定向钻进随钻测量方法及定位技术研究: [博士学位论文]. 长沙: 国防科技大学机电工程与自动化学院, 2006. 71-113
- [9] Yang R G, Wong T. *Electromagnetic Fields and Waves*. Beijing: Higher Education Publication, 2006. 73-89
- [10] 吴旭东, 侯文生, 郑小林等. 磁偶极子的定位模型及实验验证. *仪器仪表学报*, 2008, 29(2): 326-329
- [11] 唐劲飞, 龚沈光, 王金根. 基于磁偶极子模型的目标定位和参数估计. *电子学报*, 2002, 30(4): 614-616

- [12] Wang W X, Yan G Z, Sun F, et al. A non-invasive method for gastrointestinal parameter monitoring. *World Journal of Gastroenterology*, 2005, 11 (4): 521-524
- [13] Herbert S. Mathematics for the Physical Sciences. New York: Dover Publications, 1978. 147-203

Research on locating of an in-pipe robot and optimizing of the locating system design

Qi Haiming^{*}, Ye Jinrui^{**}, Zhang Xiaohua^{*}, Chen Hongjun^{*}

(^{*} School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001)

(^{**} School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100083)

Abstract

This paper presents a method for locating in-pipe robots. Based on the extreme low frequency (ELF) electromagnetic pulse, the method realizes the signal transmitting between the inside and the outside of metallic pipeline. The propagation model of the ELF electromagnetic field in the underground pipeline environment was devised. By simulation, the effects of environmental geometric size, electromagnetic parameters, and emitting frequency on the signal intensity outside the pipeline were studied. The ELF electromagnetic emitting system was simplified into a magnetic dipole model, and the tracking and locating of pipeline robots was accomplished by applying the sensor array system and the inverse calculation of the magnetic field. In order to reduce the imitation error between the magnetic dipole and the emitting coil, an optimum design method for the coil structure was studied. The propagation ability of ELF electromagnetic pulse and the presented locating method were verified by the field tests.

Key words: pipeline robot, extreme low frequency, locating, magnetic dipole, optimum design