

文章编号 1004-924X(2012)04-0772-10

管道机器人无线电磁自适应定位技术

魏明生^{1,2}, 童敏明^{1*}, 訾斌³, 夏静⁴, 陆阳²

(1. 中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏徐州 221008; 2. 江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏徐州 221116;
3. 中国矿业大学机电工程学院, 江苏徐州 221008; 4. 南京理工大学机械工程学院, 江苏南京 210094)

摘要:针对金属管道机器人跟踪定位问题,提出了一种改进的自适应无线电磁定位方法,在未知管道几何尺寸和周围环境电磁参数的情况下实现了管道内机器人的三维定位。首先,通过磁偶极子模型分析了管道外极低频电磁场分布规律。其次,建立了六传感器接收天线的自适应定位模型,设计了电磁发射和接收电路,基于该模型推导出了含有6个未知数的非线性方程组,并分别采用3种算法对其进行了仿真分析。最后,分别对不同壁厚及不同埋藏深度管道进行了试验研究。试验结果表明,在管道壁厚为5.74 mm,埋藏深度为0.8~2 m的情况下,总位置误差的平均值小于18.7 cm,即比原模型减少了3.4 cm,满足机器人实际工作中的定位需要。

关键词:管道机器人;磁偶极子模型;阵列式传感器;跟踪;定位

中图分类号:TP242.3 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122004.0772

Adaptive localization method based on wireless magnet sensors for pipeline robots

WEI Ming-sheng^{1,2}, TONG Min-ming^{1*}, ZI Bin³, XIA Jing⁴, LU Yang²

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. College of Physics & Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China; 3. School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 4. School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

* Corresponding author, E-mail: tmm2013@163.com

Abstract: For tracking and locating robots in the pipeline inspection accurately, a wireless adaptive location model was presented to realize the 3D position of robots without the geometrical sizes of pipelines and electromagnetic parameters of ambient medium. Firstly, extremely low frequency electromagnetic fields of pipelines were described by a magnetic dipole model. Then, an adaptive antenna positioning model based on six sensors was proposed and electromagnetic transmitter and receiver circuits were designed. Based on the model, a linear equation containing six unknown numbers was derived and three kinds of algorithms were used to analyze and simulate the equation. Finally, engineering experiments were performed on the pipes with different thicknesses and burial depths. The experi-

收稿日期:2011-12-25;修订日期:2012-01-31.

基金项目:国家自然科学基金国际合作重大项目(No. 60910005);国家自然科学基金资助项目(No. 50905179)

ment on a pipe wall thickness of 5.74 mm and buried deep from 0.8 to 0.2 m shows that the average position error is 18.7 cm, which has been decreased by 3.4 cm compared with that of the original model. The results can satisfy the requirements of systems for non-contact, real time and adaptive location.

Key words: pipeline robot; magnetic dipole model; sensor array; tracking; localization

1 引言

管道是运输石油、天然气等物质的主要运输设备,在国民经济中发挥着重要的作用。铺设管道时,不可避免地会有泥沙、渣、污水等杂物进入管道中,同样在役的运输管道内部也经常会上积聚一些砂、泥和石蜡等杂物,这都会影响管道的正常工作甚至使管道堵塞,因此,油气管道必须定期进行清理。管道机器人是管道清理的主要设备,为了准确地确定管道堵塞的位置,必须对管道机器人进行精确定位。

由于管道埋在地下以及管道壁的屏蔽作用,使得常规的声、光电等成熟的检测技术在管道定位中很难应用,传统的放射源(如 γ 射线)由于对人体和环境具有放射性危害,也不宜使用。低频电磁波对物质具有一定的穿透能力,是检测定位的一种有效手段。文献[1-3]运用低频电磁波进行了人体消化道胶囊的位置检测,文献[4-5]运用极低频电磁波进行了管道机器人的位置检测。有别于人体消化道胶囊定位,在管道机器人定位系统中,管道的厚度、电导率、磁导率、介电常数以及管道所处环境的一些参数等都会影响到电磁场的衰减,文献[4-5]在定位过程中假定电磁场的衰减为一个固定值,系统工作前需测量出管道的厚度、电导率、磁导率、介电常数以及管道所处环境的一些参数,但严格意义来讲,上述参数会随着测量位置的不同而改变,参数的变化对机器人的定位精度影响较大。针对此问题,本文提出把电磁衰减量作为一个未知数,设计中把电路最终输出电压的放大倍数 b 作为模型的一个未知量,提出基于6传感器的自适应定位模型。按照此模型在未知上述参数或参数变化的情况下,实现了管道机器人的三维定位。通过磁偶极子理论,导出了传感器输出信号表达式,建立了基于6传感器管道机器人的定位模型,分别采用 Levenberg-Marquardt (LM), Quasi-Newton (BFGS), Simplex Method (SM) 算法,对定位系统非线性方程组进

行了仿真试验,最后还进行了工程试验,试验结果表明该模型能较好地实现系统的自适应三维定位。

2 管道机器人跟踪定位系统描述

石油、天然气管道一般埋藏在地下,管道发生堵塞时由管道机器人进行查找和清理堵塞。管道机器人前端做成碗状结构,机器人体内嵌有极低频电磁波发生装置,如图1所示。工作中利用管道内高压液体驱动机器人沿着管道方向运动,实现管道清理功能。机器人发出的极低频电磁波能够穿透管道和土层等介质到达地面,地面用由电磁线圈组成的阵列式传感器天线装置接收电磁波信号,多路信号经放大滤波后转化为数字量传输到计算机,由计算机根据模型求出管道机器人所处的位置。

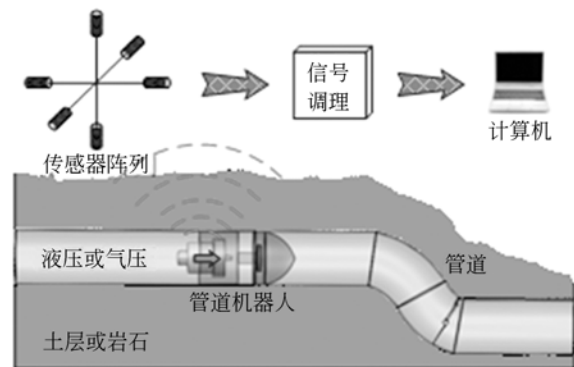


图1 管道机器人定位系统示意图

Fig. 1 Pipeline robot tracking system

3 管外极低频电磁波的磁场分布

3.1 磁偶极子模型

推迟势是求解电磁场分布和传播的一种常用方法。求出推迟势 \mathbf{A} 后,电磁波的磁场分布由 $\mathbf{B}=\nabla\times\mathbf{A}$ 得到。电流密度为 $\mathbf{J}(\mathbf{r}')$ 的电流在空间点 $P(r,\theta,\varphi)$ 产生的推迟势为^[5]

$$\mathbf{A}(\mathbf{r},t) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_V \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|} e^{j(\omega t - k|\mathbf{r}-\mathbf{r}'|)} dV'. \quad (1)$$

式中, $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$, ω 为电磁波的频率, μ 为介质的磁导率, ϵ 为介质的介电常数。

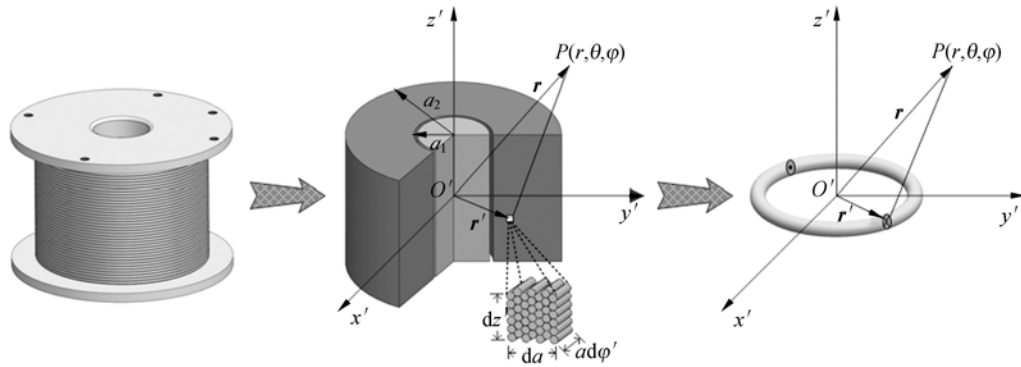


图 2 有限长螺线管及坐标系

Fig. 2 Coordinate system and solenoid coil

受管道内空间的限制,机器人采用通有交变电流的有限长螺线管向管外传感器发射 23.5 Hz 的极低频电磁波。图 2 描述了有限长螺线管和螺线管中通电线圈(简称发射线圈)的示意图及其坐标系 $O'-x'y'z'$ 。由于发射线圈的尺寸(包括线圈的内半径 a_1 , 外半径 a_2 和长度 L)远小于场点到坐标原点的距离 r , 且 $kr \ll 1$, 因此忽略线圈中各点发出的电磁波的相位差。设单位截面积内线

圈匝数为 n , 则

$$\mathbf{J}(\mathbf{r}') d\mathbf{v}' = \hat{e}_\varphi' I_m n a d\varphi' da dz', \quad (2)$$

由于线圈具有相对 z 轴的圆对称性, \mathbf{A} 与 φ 无关, 故不失一般性, 可以取 $\varphi=0$, 所以

$$\mathbf{r} - \mathbf{r}' = (r \sin \theta - a \cos \varphi') \hat{e}_x - a \sin \varphi' \hat{e}_y + (r \cos \theta - z') \hat{e}_z. \quad (3)$$

由以上分析得, 极低频电磁波的推迟势可以表示为:

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu m I_m e^{j\omega t}}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} dz' \int_{a_1}^{a_2} da \int_0^{2\pi} d\varphi' \frac{\cos \varphi' d\varphi'}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos \varphi' + z'^2 - 2z'r \cos \theta}} \hat{e}_\varphi. \quad (4)$$

工程应用中对式(4)求解非常困难, 为了简化, 建立了有限长螺线管的磁偶极子模型, 即忽略螺线管的长度和内外半径差, 将有限长螺线管近似成位于 $x'-O'-y'$ 平面内的电流环, 设电流环的半径为 a , 电流为 $NI_m e^{j\omega t}$, N 是螺线管的线圈匝数, 如图 2 所示。式(4)中被积函数内的 $z'=0$, 并且考虑到 $a \ll r$, 可以取

$$\frac{1}{\sqrt{r^2 + a^2 - 2ar \sin \theta \cos \varphi'}} \approx \frac{1}{r} \left(1 + \frac{a}{r} \sin \theta \cos \varphi' \right), \quad (5)$$

从而得到有限长螺线管磁偶极子模型的推迟势

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t) = \frac{\mu N I_m a^2 e^{j\omega t} \sin \theta}{4r^2} \hat{e}_\varphi. \quad (6)$$

由 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 求得磁偶极子的磁场分布为

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}, \theta, t) = \frac{\mu N I_m a^2}{4r^3} (2 \cos \theta \hat{e}_r + \sin \theta \hat{e}_\theta) e^{j\omega t}. \quad (7)$$

3.2 管外电磁波磁场分布

在实际工程应用中电磁波穿过管道和环境介

质后强度会发生衰减。介质对电磁的衰减常数可表示为^[6]

$$\alpha = \omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon} \right)^2} - 1 \right]}, \quad (8)$$

其中, μ 为介质的磁导率, ϵ 为介质的介电常数, σ 为介质的电导率。对于极低频电磁波而言, 铁、泥土和水总满足 $\sigma \gg \omega \epsilon$, 则 $\alpha \approx \sqrt{\pi f \mu \sigma}$, 对于空气 $\alpha=0$, 前式同样成立。电磁波穿过衰减常数是 α 、厚度是 h 的介质后电磁波的透射率可表示为 $\xi = e^{-\alpha h}$, 则管道外的磁场分布为

$$\mathbf{B}'(\mathbf{r}, \theta, t) = \xi \mathbf{B}(\mathbf{r}, \theta, t), \quad (9)$$

其中 $\xi = \exp(-d\sqrt{\pi f \mu_1 \sigma_1} - h\sqrt{\pi f \mu_2 \sigma_2})$, d 是管壁的厚度, μ_1 和 σ_1 分别是管材的磁导率和电导率, h 是电磁波在环境介质中的穿行距离, μ_2 和 σ_2 分别是环境介质的磁导率和电导率。

4 6 传感器对称分布定位模型

为实现管道机器人的定位功能,需要用电磁传感器将空间中的极低频电磁波信号转化成电信号,通过滤波和放大电路将其转化为定位需要的电压信号,本文应用的传感器为电磁感应线圈。文献[5]采用排在一个平面内竖直放置的 5 个传感器来实现三维定位,定位系统在工作前需要测量出管壁的厚度 d 、电导率 σ_1 、磁导率 μ_1 以及环境介质的电磁参数(磁导率 μ_2 、电导率 σ_2)等,但实际工作中环境介质的电磁参数会随着管道位置的改变而改变,准确测量这些参数比较困难,如式(9)所示,在机器人定位中会不断引进系统误差。基于此,本文把电磁衰减看作一变化的未知量,提出基于6传感器的自适应定位模型。同时

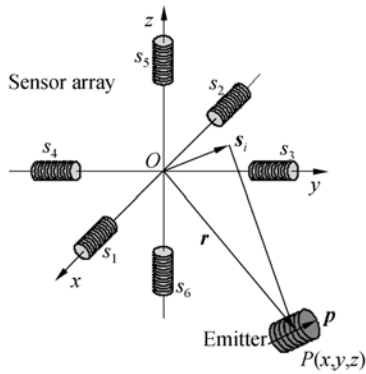


图 3 阵列式传感器定位系统示意图
Fig. 3 Array sensor positioning system

为了使 3 个坐标方向上的定位误差分布均匀,采用对称结构的传感器布置方式,传感器布置方式如图 3 所示。

在传感器坐标系 $o-xyz$ 中,发射线圈的位置是 r ,方向与线圈的运动方向 p 相同,则此处的磁场强度为

$$\mathbf{B}(s_i, t) = \xi B_r(r_i, \theta_i, t) \hat{r}_i + \xi B_\theta(r_i, \theta_i, t) \hat{l}_i, \quad (10)$$

其中, $\hat{r}_i = r_i / r_i, \hat{l}_i = l_i / l_i, \theta_i = \arccos[(r_i \cdot p) / (r_i \cdot p)], r_i = s_i - r, l_i = r_i \times (r_i \times p)$ 。

设第 i 个传感器感应线圈的位置是 s_i ,方向平行于坐标轴,则分别沿 \hat{e}_x, \hat{e}_y 和 \hat{e}_z 3 个方向的传感器输出电压 U_{ix}, U_{iy} 和 U_{iz} 可以统一表示成一个矢量 U_i 。由法拉第电磁感应定律 $\epsilon = -d\Phi/dt$, 得第 i 个传感器输出电压信号

$$U_i = b[B_r(r_i, \theta_i) \hat{r}_i + B_\theta(r_i, \theta_i) \hat{l}_i], \quad (11)$$

其中, $b = \pi f k N' S e^{-d\sqrt{\pi f \mu_1 \sigma_1} - h\sqrt{\pi f \mu_2 \sigma_2}}$, N' 和 S 分别为传感器感应线圈的匝数和横截面积, k 是信号放大电路的放大率,由于磁场是交变的,这里要求 b 使 U_i 的各个分量为正值。

在传感器输出电压信号表达式中,每个电压 U_i 的分量里都含有机器人的位置坐标 $r = (x, y, z)$ 和运行方向 $p = (u, v, w)$ 等未知数,运行方向 p 可以取某个确定值,为了方便起见,取 $p = 1$,这样测量中一共含有 5 个未知数。由上文知,准确测量 b 已不现实,因此把 b 当作未知量,传感器电路输出电压为 $u_i = f(x, y, z, u, v, b)$ 。把未知量带入矢量方程,该模型转化为由 6 个传感器的输出电压 $(u_{x1}, u_{x2}, u_{x3}, u_{y4}, u_{y5}, u_{y6})$ 组成的六元非线性方程组

$$\begin{cases} u_{xi} = b[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]^{-\frac{5}{2}} \times \\ \quad \{2(x-x_i)^2 u + (x-x_i)[3(y-y_i)v + 3(z-z_i)w] - (y-y_i)^2 u - (z-z_i)^2 u\} \\ u_{yi} = b[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]^{-\frac{5}{2}} \times \\ \quad \{2(y-y_i)^2 v + (y-y_i)[3(x-x_i)u + 3(z-z_i)w] - (x-x_i)^2 v - (z-z_i)^2 v\} \\ u_{zi} = b[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2]^{-\frac{5}{2}} \times \\ \quad \{2(z-z_i)^2 w + (z-z_i)[3(y-y_i)v + 3(x-x_i)u] - (x-x_i)^2 w - (y-y_i)^2 w\} \end{cases} \quad (12)$$

由图 3 的传感器布置方式和式(11)可推导出传感器在三维方向上的电压输出方程,如式(12)所示。在测量中,根据 6 个传感器接收到的电压值,求出非线性方程组中的坐标未知量,就实现了机器人的自适应三维定位。在实际应用中,根据

管道测量的范围,给出 b 的一个区间取值范围。因为该测试模型为一非线性方程组,实际位置坐标和理论计算值之间会存在差异,因此需要寻求一种科学的处理数据算法,通过采用不同算法求解非线性方程组的容错能力、定位精度和计算效率。

5 仿真结果与分析

考虑到本文定位模型的特殊性,采用数值仿真方法找出一种收敛速度快、误差小的最佳跟踪和定位算法。实际测量中,由阵列传感器输出的 6 路传感器电压值根据方程(12)求出目标点的位置坐标。该方程为六元非线性方程组,将方程组的求逆问题转为目标函数的寻优问题。仿真中分别采用了 Quasi-Newton (BFGS)、Levenberg-

Marquardt(LM), Simplex Method (SM), Differential Evolution (DE), Max Inherit Optimization (MIO) 等几种算法^[7-10]。此外,随机器人位置的变化,管道及环境介质的电磁参数也有适度的变化,选取 30 个样本点,采用上述 5 种算法对机器人定位系统进行数值仿真,根据仿真效果,列出了仿真效果较好的 3 种算法的仿真效果图,结果如图 4 所示,图中未画出坐标分量误差超过 25 cm 的定位失败点。

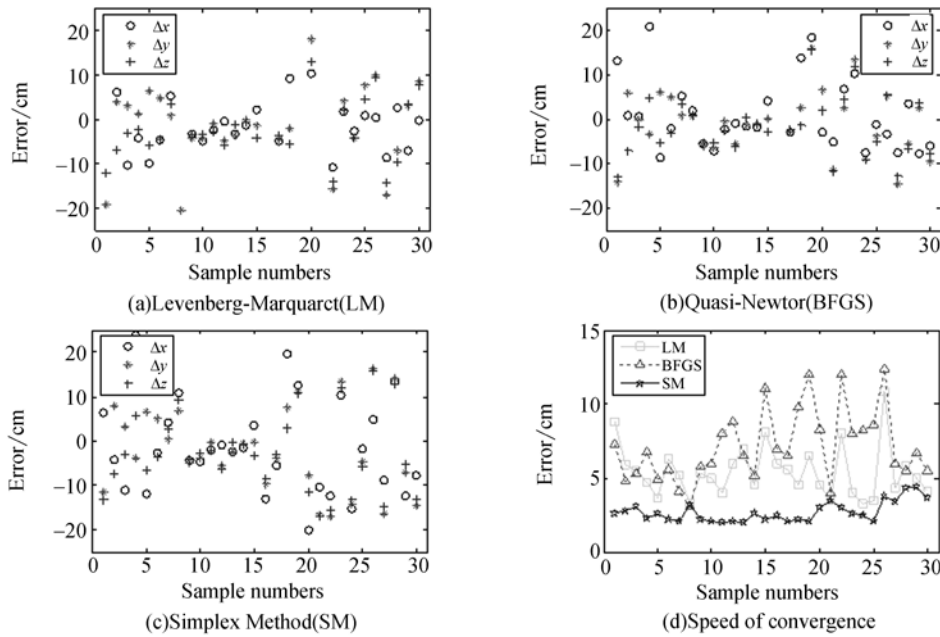


图 4 3 种算法的定位精度和收敛速度比较图

Fig. 4 Comparison of localization accuracy and convergence rate for three algorithms

由图 4 可以看出, Δx 、 Δy 和 Δz 和常出现“扎堆”现象,表明坐标轴 3 个方向上的定位误差相差无几,解决了水平方向和垂直方向上定位精度不同的问题,3 种算法的定位误差参数统计如表 1 所示。表 1 中 $\Delta r = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2}$ 为总位置误差,由表 1 分析可得出 BFGS 算法的平均误差最小,定位精度最高,定位失败点个数少,适用于定

位系统的精确定位。SM 算法具有容错能力强、收敛速度最快和对初值依赖性最弱等优点,因此在定位系统的跟踪功能中最适用;而 LM 算法定位失败点个数较多,定位误差较大,不适合定位;MIO 和 DE 等算法对初值依赖比较严重,都不适合上述定位模型的求解。

表 1 3 种算法下的定位误差及收敛时间等属性比较

Tab. 1 Comparison of properties for three algorithms

算法	失败 点数	Δx 平均 /cm	Δy 平均 /cm	Δz 平均 /cm	Δr 平均 /cm	平均收敛时间 /s	初值依 赖性	备注
LM	5	10.5	6.3	1.1	33.7	5.43	一般	不采用
BFGS	1	3.5	2.7	5.2	6.9	7.13	一般	适合定位
SM	0	9.1	12.5	16.9	22.9	2.7	最弱	适合跟踪

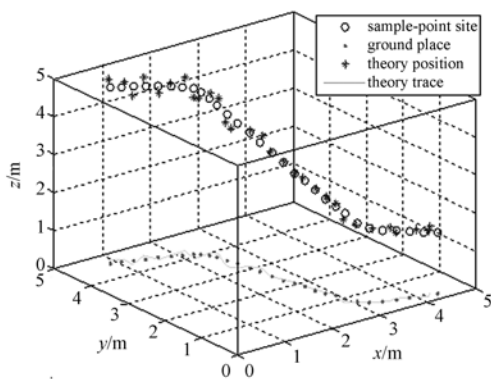


图 5 跟踪效果和定位精度分析

Fig. 5 Tracking effect and positioning accuracy

为了提高定位系统的跟踪和定位性能,将样本点坐标、BFGS 算法的定位结果和 SM 算法的跟踪结果在传感器坐标系中表示出来,如图 5 所示,圆圈表示管道机器人的实际空间位置,星形表示由 BFGS 算法仿真计算得到的管道机器人的空间位置,而在 $x-O-y$ 平面内的点和折线分别表示地面上管道机器人的实际运动和由 SM 算法仿真得到的跟踪运动轨迹,传感器阵列处在坐标原点。

从图 5 可以看出,管道机器人的定位误差随机器人与传感器阵列距离的增大而呈现逐渐增大的趋势。结合图 4,序号为 9~15 样本点的定位精度较高,处在这些点的管道机器人的运行方向与 3 个坐标轴均存在一定大小的夹角,而其他的样本点的定位误差较大,这些对应点的管道机器人的运行方向几乎与轴平行。仿真结果表明,实际定位过程中要控制传感器阵列的方位,尽量避免传感器坐标系的 3 个坐标轴与管道机器人的运行方向平行。

6 试验结果与讨论

6.1 机器人定位系统设计

设计的管道机器人电磁定位系统组成如图 6 所示,包括管道内电磁脉冲发射和管道外传感器接收装置 2 部分,具体发射天线和接收天线装置如图 7 所示。发射天线安装在管道机器人内部,主要是向管道外发射交变的 23.5 Hz 的低频电磁脉冲,它主要由单片机、数模转换器、功率放大器和励磁线圈组成,单片机产生的交变数字信号经数模转换器转换为模拟信号,经放大电路放大后由励磁线圈以交变电磁波的形式向外发出。为了节省电能,发射的低频电磁信号采用间断的发射方式,连续发射 16 个正弦脉冲后停止发射,隔 1.2 s 再进行发射,根据不同的应用场合和节能要求,发射脉冲间隔时间可调。设计的发射天线封装在铝制外壳内,其外线尺寸为 92 mm×89 mm,发射线圈、电源及放大控制电路等都被封装在铝合金材料做成的空壳内,内部发射线圈由 0.2 mm 的漆包线缠绕 2 600 匝形成,内部发射装置由 2 节锂电池供电。

管道外接收装置主要有接收天线,电压放大器、高通、低通及带通滤波电路和模数转换器等组成,主要作用是由接收天线接收电磁感应信号,放大滤波后由模数转换器转换为数字量传入到计算机中,由计算机根据建立的模型并采用一定的算法计算出机器人的位置。接收线圈缠绕在以塑料做成的骨架上,由 0.1 mm 的漆包线缠绕 9 800 匝而成,线圈缠绕固定后由尼龙做成的圆筒封装

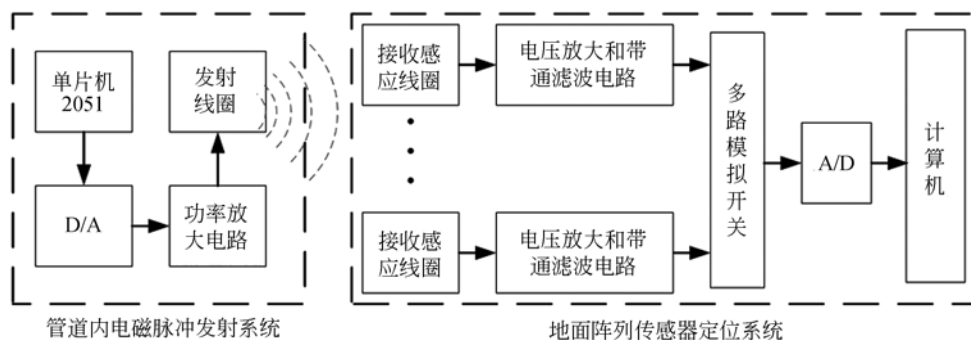


图 6 电磁定位系统组成框图

Fig. 6 Structure of electro magnetic positioning system

而成,其外形尺寸为 28 mm×490 mm。后续调理电路由多级放大滤波电路组成,滤波电路主要有巴特沃斯低通滤波器,双 T 带通滤波器和切比雪夫高通滤波器。阵列式传感器对称分布,每个传感器到中心坐标的距离为 0.5 m。



图 7 发射线圈和接收线圈实物图

Fig. 7 Photograph of receiving and emitting system

6.2 试验验证与分析

根据定位模型进行了试验研究,试验分为地表和地下管道定位试验 2 部分。实验中分别比较了 3 个方向上的绝对误差和总位置误差。

6.2.1 地表不同壁厚管道的定位试验研究

为了验证不同壁厚管道的定位效果,分别对

壁厚为 4.83, 7.82, 12.65 mm 的 3 种管道进行了定位试验。试验管道均在地上,管道材质均为合金钢,管道内径为 150 mm,实验中按图 3 的方式布局阵列式传感器,测量过程中传感器阵中心点距地面垂直距离为 2 m,距离管道轴心距离保持 5 m 不变,每个传感器与坐标原点的距离为 0.5 m,用钢丝绳拉动管道内机器人来改变机器人的位置,每隔 40 cm 测量一次数据,机器人在管道内来回拉走 2 次,测量中通过钢丝绳的长度确定机器人的位置。根据阵列传感器的输出电压运用 BFGS 算法,每种壁厚的管道求得了 24 个点的定位,测量数据中剔除了含粗大误差的测量数据,各方向的最大定位误差和平均定位误差如表 2 所示。从表中数据看出,管壁为 4.83, 7.82 mm 的 2 种管材,3 个方向绝对误差的最大值和平均值相差不大,验证了该自适应定位模型的正确性,但 12.65 mm 壁厚管道 3 个方向的绝对误差明显偏大,造成偏大的主要原因可能是管壁过厚,管道内产生的磁脉冲大部分被屏蔽,传感器接收信号的信噪比过小,造成了误差偏大。24 个试验点的总位置误差的分布如图 8 所示。

表 2 3 种壁厚管道的定位误差试验统计

Tab. 2 Statistic results of positioning errors for three kinds of pipes with different thicknesses

管壁厚度/mm	$\Delta x/cm$		$\Delta y/cm$		$\Delta z/cm$		$\Delta r/cm$
	最大值	平均值	最大值	平均值	最大值	平均值	平均
4.83	23.4	18.4	24.6	16.8	31.2	19.7	31.5
7.82	22.8	19.1	25.1	17.2	28.7	19.6	32.6
2.65	58.4	35.2	49.3	34.8	54.7	35.3	60.1

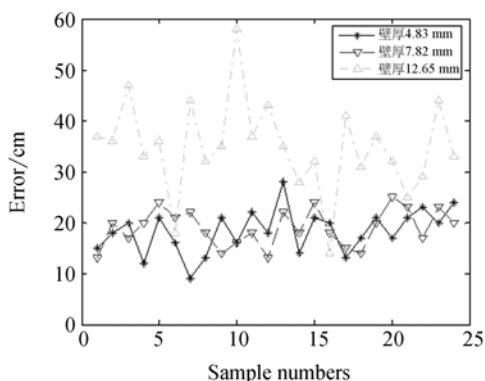


图 8 3 种壁厚管道总位置误差比较图

Fig. 8 Three curves of position errors with different pipelines

由总位置误差曲线也可看出上述结论,在实际试验中可以根据趋肤效应,由管道的材质和信号的频率计算出管道壁厚的上限。该试验表明,在管道壁厚一定的条件下,该模型能较好地实现自适应定位,随着管道的厚度增大定位误差增长缓慢,但达到一定的极限厚度后,误差明显增大。

试验中还进行了相同壁厚不同材质管道的定位试验,发现同样壁厚的情况下铸铁管道比合金钢管道的定位效果差,说明定位效果主要与材料的磁导率有关,同样管壁厚度下磁导率大的管材透过的磁脉冲强度越弱。

6.2.2 地下管道的定位试验研究

为了验证该系统在具体工程环境下的定位效果,选择了福建永安一段新铺设输油管道进行了试验,管道材料为合金钢,管壁厚度为 5.74 mm,管道上面土层厚度根据地形在 0.8~2 m 变化。传感器阵布置方式同上个试验,传感器 $\sigma\text{-}xyz$ 坐标原点离地面 1 m,每个传感器与 $\sigma\text{-}xyz$ 坐标原点的距离为 0.5 m,测量过程中传感器中心离管道中心的直线距离保持在 2~6 m。试验中,改变管内机器人的位置,每隔 50 cm 测量一次,分别测试了 20 个定位点,根据传感器阵的输出电压,运用 BFGS 算法,分别计算出了 20 个监测点的位置坐标,并根据实际坐标求出了 20 个测量误差,图 9 描述了 20 个位置处 x 、 y 、 z 3 个坐标分量上的绝对误差,3 个方向上的最大绝对误差为 27.5 cm,最小误差为 1.8 cm。

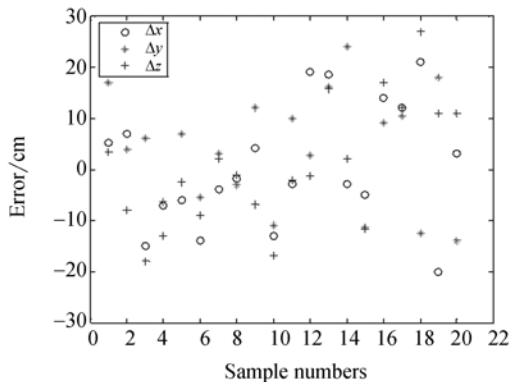


图 9 20 个试验点 3 个方向的绝对误差

Fig. 9 Absolute position errors of three coordinates for twenty test points

图 10 为 20 个试验点处的总位置误差图,其中实线部分为采用本文改进的自适应定位模型计算出的总位置误差分布曲线,虚线部分为按原模型(即把管道材料及周围环境等参数看作一固定值)计算出来的位置误差曲线。

从图 10 可看出,随着测量条件的变化,采用本文改进模型的总体误差要小于原来模型。改进模型的最大总位置误差为 36.4 cm,原模型计算的最大总位置误差为 48.7 cm,平均总位置误差

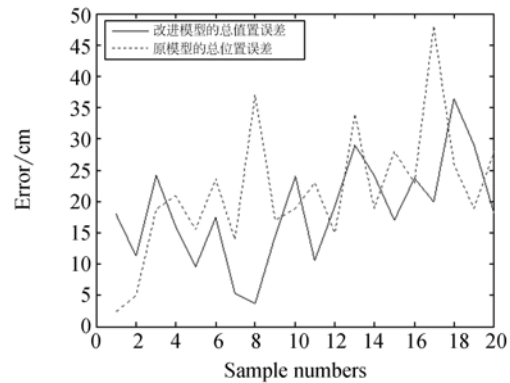


图 10 改进前后模型总位置误差试验比较图

Fig. 10 Absolute position errors of three coordinates before and after improvements

改进模型比原模型减小了 3.4 cm。试验误差产生的主要原因是磁脉冲发射与接收的物理模型与实际情况存在一定的偏差,磁信号衰减造成信噪比的降低,非线性方程组模型采用的牛顿迭代法对初值有一定的依赖性,初值的选取对结果也有较大的影响,因此在以后的研究中将尝试该算法与如粒子群等进化算法相结合求解,进一步减小测量的绝对误差。

7 结 论

针对金属管道内机器人的定位问题,采用极低频磁脉冲穿透金属管道,对机器人进行了跟踪定位。建立了磁偶极子电磁发射模型,依据传感器输出信号与磁场的关系,导出了改进的自适应定位模型的非线性方程组。通过仿真研究,找到了该非线性方程组的最佳算法。针对该模型进行了现场试验,试验结果表明,在一定范围的管壁厚度内,该系统能实现机器人的自适应三维定位。在地下管道实验中,3 个方向上的定位绝对误差最大为 27.5 cm,平均总位置误差比采用原模型的计算值减小了 3.4 cm,定位精度可以满足实际生产的需要。下一步打算分别通过对发射和接收线圈进行模型优化、增加传感器的数量及优化非线性方程组的求解算法等方法来进一步提高系统的定位精度。

参考文献:

[1] YANG W A, HU CH, MAO L, et al.. A new

tracking system for three magnetic objectives[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2010, 46(12): 4023-4029.

- [2] 郭旭东, 严荣国, 颜国正. 胶囊内窥镜无线遥测定位的校正[J]. 光学精密工程, 2010, 18(12): 2650-2655.
GUO X D, YAN R G, YAN G ZH. Calibration method for wirelessly localizing capsule endoscopy [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(12): 2650-2655. (in Chinese)
- [3] 姜萍萍, 颜国正, 仓振杰, 等. 胃肠道内目标物电磁跟踪定位系统设计及试验研究[J]. 高技术通讯, 2011, 21(5): 523-529.
JIANG P P, YAN G ZH, CANG ZH J, *et al.*. Design and experimental study of an electromagnetic tracking and locating system for argets in GI tract [J]. *Chinese High Technology Letters*, 2011, 21(5): 523-529. (in Chinese)
- [4] QI H M, ZHANG X H, CHEN H J, *et al.*. Tracing and localization system for pipeline robot[J]. *Mechatronics*, 2009, 19(1): 76-84.
- [5] QI H M, YE J R, ZHANG X H, *et al.*. Wireless tracing and locating system for in-pipe robot[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2010, 159(1): 117-125.
- [6] DIPAK L, VALDIS V. *Applied Electromagnetics and Electromagnetic Compatibility* [M]. Beijing: China Machine Press. 2009, 6: 347-351.
- [7] YANG W A, HU C, MENG M Q H, *et al.*. A six-dimensional magnetic localization algorithm for a rectangular magnet objective based on a particle swarm optimizer[J]. *IEEE Trans. Magn.* 2009, 45(8): 3092-3099.
- [8] 臧洁, 唐加福. 能力约束下多产品物流网络系统决策模型及算法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2010, 31(2): 161-164.
ZANG J, TANG J F. Decision model and solution for logistic network system of multi-products with capacity constraints[J]. *Journal of Northeastern University(Natural Science)*. 2010, 31(2): 161-164. (in Chinese)
- [9] 张勇, 巩敦卫, 张婉秋. 一种基于单纯形法的改进微粒群优化算法及其收敛性分析[J]. 自动化学报, 2009, 35(3): 289-298.
ZHANG Y, GONG D W, ZHANG W Q. A simplex method based improved particle swarm optimization and analysis on its global convergence [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2009, 35(3): 289-298. (in Chinese)
- [10] 赵林海, 许俊杰, 刘伟宁, 等. 基于 Levenberg-Marquardt 算法和广义 S - 变换的无绝缘轨道电路补偿电容的故障检测[J]. 控制理论与应用, 2010, 27(12): 1612-1622.
ZHAO L H, XU J J, LIU W N, *et al.*. Compensation capacitor fault detection method in jointless track circuit based on Levenberg-Marquardt algorithm and generalized S-transform [J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(12): 1612-1622. (in Chinese)

作者简介:



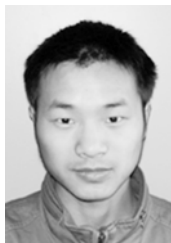
魏明生(1976—),男,山东济宁人,博士研究生,讲师,2004年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事传感器检测技术、精密仪器设计等方面的研究。E-mail: weims516@163.com



瞿斌(1975—),男,江苏徐州人,副教授,2008年于西安电子科技大学获得博士学位,主要从事机械系统动力学控制、机器人自动化技术与机器人机构学研究。E-mail: binzicumt@163.com



夏 静(1961—),男,江苏南京人,高级工程师,1991年于南京理工大学获得硕士学位,主要从事测控技术及仪器设计等方面的研究。E-mail:jingxia958@sina.com



陆 阳(1988—),男,江苏宿迁人,研究生,2011年于江苏师范大学获得学士学位,主要从事电磁波应用、仪器设计以及微/纳米结构材料的研究。E-mail:ylucas@126.com

导师简介:



童敏明(1956—),男,浙江龙游人,教授,博士生导师,2000年于中国矿业大学获得博士学位,主要从事传感器检测技术等方面的研究。E-mail:tmm2013@163.com

●下期预告

输电塔架承载变形三维光学测量方法

刘建伟^{1,2},蒋志强¹,刘元朋¹,文振华¹,梁 晋²

(1. 郑州航空工业管理学院,河南 郑州 450015;

2. 西安交通大学 机械工程学院,陕西 西安 710049)

输电塔架结构复杂,理论分析和数值模拟无法准确估计其整体性能,需要做承载变形真型实验来检测塔架的实际承载能力。针对塔架真型试验中存在的大尺寸、大变形、多测点、三维变形、塔架承载形态保持时间短等测量难题,提出了一种三维全场变形光学测量方法。该方法基于工业近景摄影测量技术重建单个状态下塔架测点的三维结构,利用具有身份信息的人工标志点来实现不同状态测量结果的对齐。通过跟踪固定在塔架上的变形点,计算相应部位的位移,以获取真型塔架在不同负载下的整体变形情况。精度评估实验表明:本文方法测量精度优于 $0.1\text{ mm}/4\text{ m}$,真型实验显示测量结果能够为塔架结构力学性能分析和改进塔架设计提供有价值的参考数据。本文方法具有现场工作量小、不干扰测量对象、测量精度高、响应速度快、量程弹性大等优点,能够满足各型塔架三维变形测量对效率和精度的要求。