

一种混合算法下单个磁通门定位运动磁性目标研究

高翔*, 严胜刚, 李斌

(西北工业大学航海学院, 陕西西安 710072)

摘要: 运动磁性目标定位可归结为一类非线性规划问题的求解. 针对其目标函数计算过程极为烦琐, 不利于磁性目标实时定位的特点, 提出了一种混合算法: 首先利用粒子群优化算法获得初略解, 再利用高斯-牛顿算法进行精确求解, 在不知道目标初始位置的情况下, 利用单个磁通门磁传感器采集的磁场数据准确快速地实现了目标的定位. 理论仿真和汽车实验, 验证了算法的合理性和可行性, 为工程中磁性目标的检测与定位提供了新思路.

关键词: 磁性目标定位; 非线性规划问题; 粒子群优化算法; 高斯-牛顿算法

中图分类号: TM937

文献标识码: A

doi: 10.7511/dllgxb201603011

0 引言

磁定位技术由于具有全天候、所需设备简单、信号处理方便等特点, 逐渐受到人们的重视. 特别是随着磁传感器测量精度的不断提高, 探测磁性目标微弱的磁异常信号成为可能^[1]. 根据磁传感器探测到的磁场信号, 反演出目标的运动状态和位置, 可以实现运动磁性目标的定位.

国外的磁定位技术起步较早, 早在 1975 年, 美国的海军近海岸系统实验室就开展了利用超导磁梯度计阵列进行目标定位的研究, 他们利用磁场梯度张量数据提出磁偶极子定位跟踪算法, 根据静态测站上的连续测量结果, 实现了对运动的磁偶极子源的定位追踪^[2]. 20 年之后, 又提出了在磁场梯度张量探测仪以已知速度运动的情况下对偶极子磁源的定位问题, 对在已知磁场的三分量或梯度张量对场源变化率的条件下, 结合磁场梯度张量可以唯一确定磁偶极子源参数进行了总结^[3]. 在国内, 海军工程大学龚沈光的研究团队开展的相关工作较多, 他们^[4-9]对磁性目标建模和基于舰船等磁性物体定位方法及参数估计等定位问题进行了详细研究, 认为用单个运动标量磁强计不能完全确定目标位置参数, 提出了先用改进的进化策略得到初值, 然后用单纯形法获得精确值

的一种通用磁定位方法, 并稍加修改解决了矢量磁强计的磁定位问题. 随后林春生等^[10]使用均匀磁化旋转椭球体模型对水中磁性运动目标进行实时建模, 使用统计检验的方法, 实现了对目标磁场信号的模型化检测, 同时还可以估计出目标运动参数和磁性状态. 李华等^[11]使用单个三轴磁探头的在线测量数据, 利用遗传算法良好的全局搜索能力对磁性目标进行定位计算, 以解的稳定性判断代替定位解正确与否的在线判断, 完整实现了一种在线磁定位算法. 唐莉莉等^[12]提出了一种新的运动磁目标定位算法, 将求解目标方位角的问题转化为求解目标磁场的方向角和两者的偏差角的问题, 利用单个静止的平面四轴磁通门传感器实现目标定位. 何文辉^[13]提出了利用三轴磁阻传感器作为检测元件, 以减少传感器阵列的数量, 并通过改进的牛顿-拉斐森方程组全局求解算法, 实现了对胶囊的位置坐标准确而快速的求解. 本文提出一种混合算法, 在不需要知道目标初始位置的情况下, 利用单探头磁通门, 准确快速地求解磁性目标定位中的非线性规划问题.

1 单个磁通门定位运动磁性目标的基本原理

单个磁通门定位的基本方案: 通过单个磁传

传感器测量运动磁性目标在 n 个不同测点上的磁场强度构建磁场模型,利用定位算法反演出磁性目标在不同测点处相对磁传感器的位置,即利用前 $n-1$ 个测点的磁场数据,定位出第 n 个测点的位置。

1.1 磁偶极子模型

如图 1 所示,将位于空间点 $P_0(x_0, y_0, z_0)$ 的磁性目标等效为磁偶极子模型,磁偶极矩为

$$\mathbf{M}_0 = M_{x0}\mathbf{i} + M_{y0}\mathbf{j} + M_{z0}\mathbf{k} \quad (1)$$

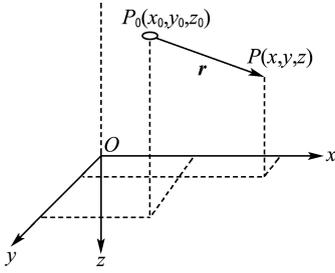


图 1 磁偶极子示意图

Fig. 1 The schematic diagram of a magnetic dipole

空间任意一点 $P(x, y, z)$ 所产生的磁位与磁场分别为

$$\mu(x, y, z) = \mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{r} / 4\pi r^3 \quad (2)$$

$$\mathbf{H} = -\text{grad}(\mu) = \frac{1}{4\pi r^3} \left[\frac{3}{r^2} (\mathbf{M}_0 \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} - \mathbf{M}_0 \right] \quad (3)$$

式中: $\mathbf{r} = (x - x_0)\mathbf{i} + (y - y_0)\mathbf{j} + (z - z_0)\mathbf{k}$, $r = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 + (z - z_0)^2}$.

若令

$$\begin{aligned} fai_{xx} &= \frac{3}{r^5} \left[(x - x_0)^2 - \frac{r^2}{3} \right] \\ fai_{xy} &= \frac{3}{r^5} (x - x_0)(y - y_0) \\ fai_{xz} &= \frac{3}{r^5} (x - x_0)(z - z_0) \\ fai_{yx} &= fai_{xy} \\ fai_{yy} &= \frac{3}{r^5} \left[(y - y_0)^2 - \frac{r^2}{3} \right] \\ fai_{yz} &= \frac{3}{r^5} (y - y_0)(z - z_0) \\ fai_{zx} &= fai_{xz} \\ fai_{zy} &= fai_{yz} \\ fai_{zz} &= \frac{3}{r^5} \left[(z - z_0)^2 - \frac{r^2}{3} \right] \end{aligned} \quad (4)$$

则磁偶极矩 \mathbf{M}_0 产生的磁场强度可以表示为矩阵形式:

$$\begin{pmatrix} H_{x0} \\ H_{y0} \\ H_{z0} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} fai_{xx} & fai_{xy} & fai_{xz} \\ fai_{yx} & fai_{yy} & fai_{yz} \\ fai_{zx} & fai_{zy} & fai_{zz} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{pmatrix} \quad (5)$$

简记为

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{F}_0 \cdot \mathbf{M}_0 \quad (6)$$

$$\text{式中: } \mathbf{H}_0 = \begin{pmatrix} H_{x0} \\ H_{y0} \\ H_{z0} \end{pmatrix}, \mathbf{F}_0 = \begin{pmatrix} fai_{xx} & fai_{xy} & fai_{xz} \\ fai_{yx} & fai_{yy} & fai_{yz} \\ fai_{zx} & fai_{zy} & fai_{zz} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{M}_0 = \begin{pmatrix} M_{x0} \\ M_{y0} \\ M_{z0} \end{pmatrix}.$$

对于空间中某固定磁偶极子模型(磁矩 \mathbf{M}_0 不变),如果知道测点相对磁偶极子的位置(即 \mathbf{F}_0 已知),则该测点处的磁场强度 \mathbf{H}_0 就可以由式(6)求出;反之,如果知道了某一测点处的磁场强度,也可以根据上式反演出测点相对磁偶极子的位置,从而实现磁性目标的定位。

1.2 测点间的坐标关系

将目标从坐标系的第 m 点平移到第 $m+1$ 点处,则两者之间的相对位置关系如图 2 所示。其中 φ 为向量 \mathbf{r} 和 Z 轴正方向的夹角; θ 为向量 \mathbf{r} 在 XOY 面上的投影与 X 轴正方向的夹角。

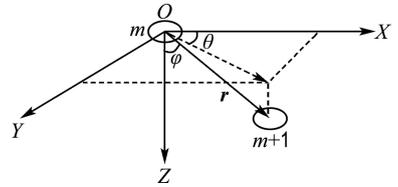


图 2 相邻测点在三维坐标系下的位置图

Fig. 2 The positional diagram of the adjacent points in the three-dimensional coordinates

假设目标在点 m 处的坐标为 (x_m, y_m, z_m) , 点 $m+1$ 处的坐标为 $(x_{m+1}, y_{m+1}, z_{m+1})$, 两点间距为 D , 则两个测点的坐标值有如下的关系式:

$$\begin{aligned} x_{m+1} &= x_m + D \sin \varphi \cos \theta \\ y_{m+1} &= y_m + D \sin \varphi \sin \theta \\ z_{m+1} &= z_m + D \cos \varphi \end{aligned} \quad (7)$$

其中 $-\pi \leq \theta \leq \pi$, $-\pi \leq \varphi \leq \pi$ 。对于一条固定的航线,参数 θ 和 φ 是固定值。如果得到第 n 个位置点的位置参数 (x, y, z) 、 θ 和 φ , 就可以利用式(7)迭代得到前 $n-1$ 个测点的位置。

1.3 磁性目标的定位问题

磁性目标的定位问题实际上就是求解下面非线性无约束的最优化问题:

$$E_0 = \min\{(\mathbf{F}_0 \mathbf{M}_0 - \mathbf{H}_0)^T (\mathbf{F}_0 \mathbf{M}_0 - \mathbf{H}_0)\} \quad (8)$$

$$\mathbf{M}_0 = (\mathbf{F}_0^T \mathbf{F}_0)^{-1} \mathbf{F}_0^T \mathbf{H}_0$$

式中: \mathbf{F}_0 是关于目标位置的系数矩阵; \mathbf{M}_0 为磁场模型磁矩参数; \mathbf{H}_0 为磁传感器测得的目标磁场; 目标函数 E_0 是定位参数 $(x, y, z, \theta, \varphi)$ 的非线性函数, 对于一般磁性目标, 其航行高度固定, 即 $\varphi = 90^\circ$, 目标函数 E_0 可以简化为定位参数 (x, y, z, θ) 的非线性函数.

2 混合算法下的磁性目标定位仿真算法

如图3所示, 磁性目标沿 X 方向运动范围为 -200 m 到 195 m , Y 方向距离磁场测量点记为 -30 m , Z 方向距离磁场测量点记为 0 m . 磁通门 x 方向与坐标系 X 轴之间的夹角 $\theta = -45^\circ$, 目标在坐标系 XOY 平面内运动, 即 $\varphi = 90^\circ$. 目标运动速度为 10 m/s , 磁场数据采样间隔为 0.5 s , 整个过程磁传感器采集的数据点为 80 个. 假设磁性目标的磁矩 $M_{x_0} = 5.0 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$, $M_{y_0} = 2.0 \times 10^3$

$\text{A} \cdot \text{m}^2$, $M_{z_0} = 1.0 \times 10^4 \text{ A} \cdot \text{m}^2$. 这里之所以构造的坐标系 X 方向与目标运动方向一致, 是为了方便后面定位结果的图形展示.

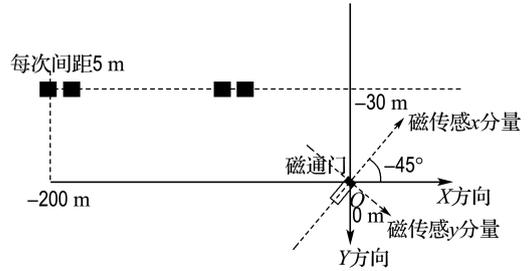


图3 磁传感器和目标位置俯视图

Fig. 3 The positional plan view of the magnetic sensor and the target

高斯-牛顿算法(G-N算法)是一种常见的求解非线性最优化问题的方法, 但是该方法对初值有一定的依赖性, 需要利用函数的导数信息. 当初值取得不合适时仍然会导致算法无法得到最优解. 为了说明这一情况, 分别取不同的初值使用G-N算法进行求解, 随机运行 50 次, 选取位置参数 $(-100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 0 \text{ m}, -45^\circ, 90^\circ)$ 的仿真数据进行比较, 结果如表1所示.

表1 取不同初值时G-N算法求解效果

Tab. 1 The results of the G-N algorithm at different initial values

初值	x/m	y/m	z/m	$\theta/(\circ)$	$\varphi/(\circ)$
$(-100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 0 \text{ m}, -45^\circ)$	-100.00	-30.00	0	-45.00	90.00
$(100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 0 \text{ m}, -45^\circ)$	-118.20	-21.42	-1.134	-39.30	97.33
$(-100 \text{ m}, 100 \text{ m}, 0 \text{ m}, -45^\circ)$	-99.99	-30.00	0	-44.96	95.65
$(100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 10 \text{ m}, -45^\circ)$	-116.50	-24.51	-2.058	-40.29	88.07
$(100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 0 \text{ m}, 0^\circ)$	-99.37	-22.04	-1.267	-18.80	88.63
$(100 \text{ m}, 30 \text{ m}, 30 \text{ m}, 30^\circ)$	-258.50	27.45	91.960	41.58	87.38

从表1可以看出, 初值距离真值一定范围内, G-N算法能够找到很好的最优解; 但是当初值选取不合适时, 该算法得不到最优解. 大多数情况下, 并不清楚目标的初始状态. 针对这个问题, 考虑使用粒子群优化算法(PSO算法). 鉴于PSO算法耗时较长^[14-15], 本文提出了一种混合算法: 先使用PSO算法得到一个粗略解, 为了节约计算量, PSO算法的进化代数可以适当减少, 再以粗略解作为初值使用G-N算法进行精确求解, 这样将PSO算法和G-N算法混合使用, 充分利用各

自的优势, 在保证算法精度的前提下, 尽量减小算法耗时. 为了验证该混合算法, 同样选取位置点 $(-100 \text{ m}, -30 \text{ m}, 0 \text{ m}, -45^\circ, 90^\circ)$ 的数据进行比较得到的仿真数据分别为 $x = -99.99 \text{ m}$, $y = -30.00 \text{ m}$, $z = -0.001 \text{ m}$, $\theta = -44.96^\circ$, $\varphi = 89.5^\circ$, 定位效果较好.

3 实验验证

为了方便模拟目标的运动状态, 磁性目标选择的是一辆汽车. 为了减小周围环境的干扰, 实验

地点选择在西安市郊区的一段很少有车辆通过的宽阔马路. 第一次汽车通过的情况如图 4(a) 所示, X 方向指向汽车行驶的方向, Z 方向垂直地面向下, Y 方向与 X 方向和 Z 方向符合右手坐标系. 汽车长为 4.55 m、宽为 1.80 m、高为 1.88 m, 保持约为 30 km/h 的行驶速度正好通过磁传感器时横向距离约为 3.8 m, 汽车中心距离地面的高度约为 0.8 m, 磁通门 x 方向与坐标系 X 轴重合, 即 $\theta=0^\circ, \varphi=90^\circ$. 汽车第二次通过时的情况如图 4(b) 所示, 汽车仍以第一次的速度行驶, 正好通过磁传感器时的横向距离约为 4.2 m, 汽车中心距离地面的高度约为 0.8 m, 磁通门 x 方向与坐标系 X 轴之间的夹角 $\theta=-30^\circ$, 且 $\varphi=90^\circ$.

汽车两次通过磁通门传感器, 每次截取刚好通过前后共 4 s 的数据, 数据采样率为 20 Hz. 由于存在背景磁场的干扰, 使用巴特沃斯低通滤波器对数据进行了低通滤波处理, 滤波器的通带截止频率为 1 Hz, 通带衰减为 1 dB, 阻带截止频率为 10 Hz, 阻带衰减为 60 dB, 处理后的数据如图 5 和 6 所示.

使用 PSO 和 G-N 的混合算法进行定位计

算, 目标磁场数据总长度为 80, 定位效果如图 7 和 8 所示.

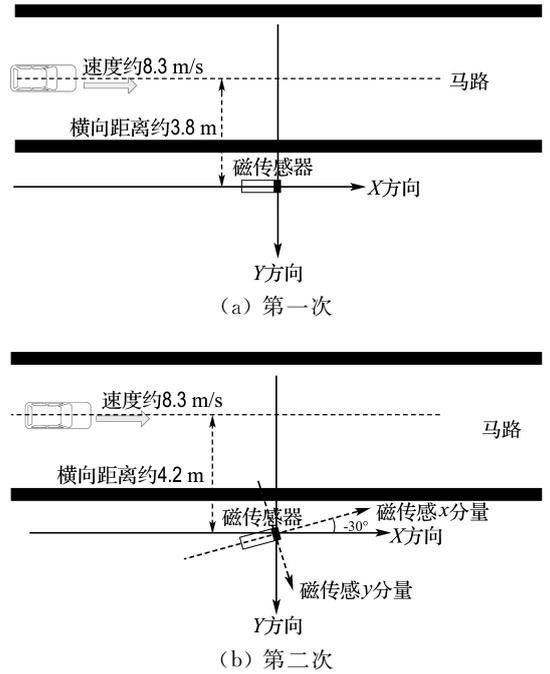


图 4 运动磁性目标定位模拟实验示意图

Fig. 4 The schematic diagram for localization of mobile magnetic target

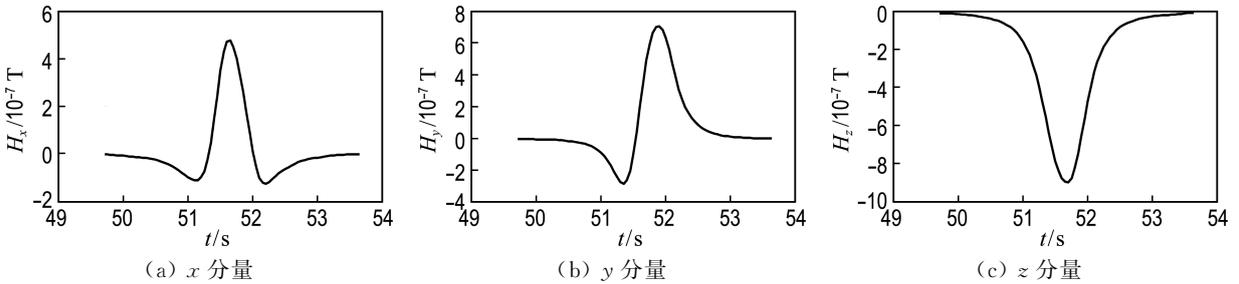


图 5 汽车第一次通过时的磁场数据

Fig. 5 The magnetic field data of the car passing by at the first time

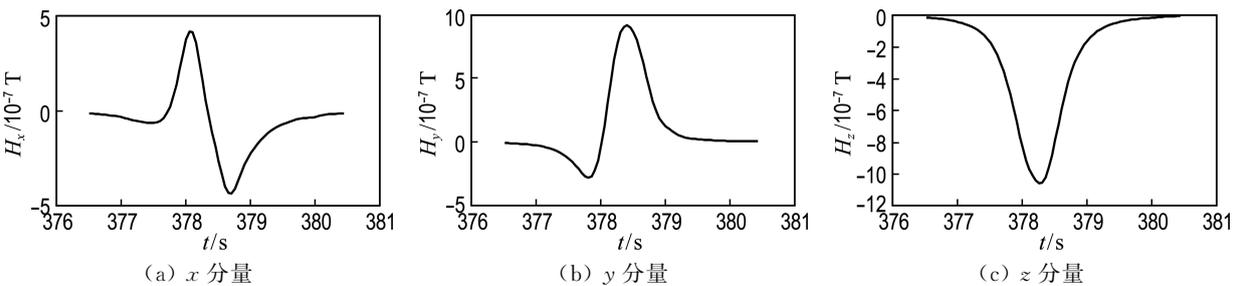


图 6 汽车第二次通过时的磁场数据

Fig. 6 The magnetic field data of the car passing by at the second time

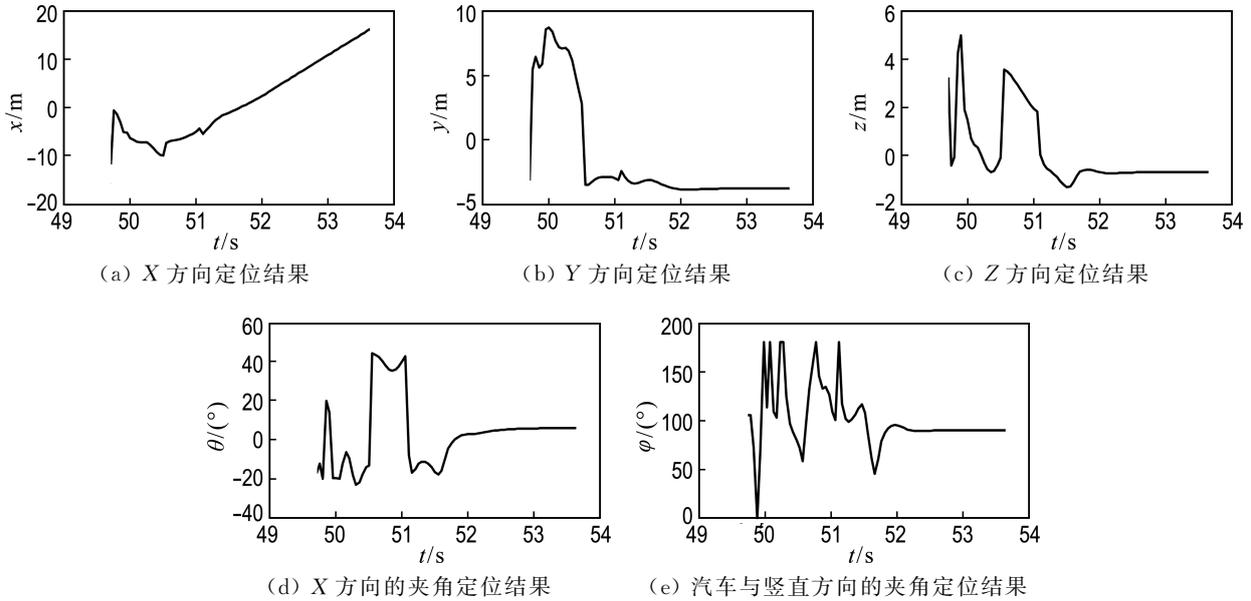


图7 汽车第一次通过时的定位结果

Fig. 7 The locating results of the car passing by at the first time

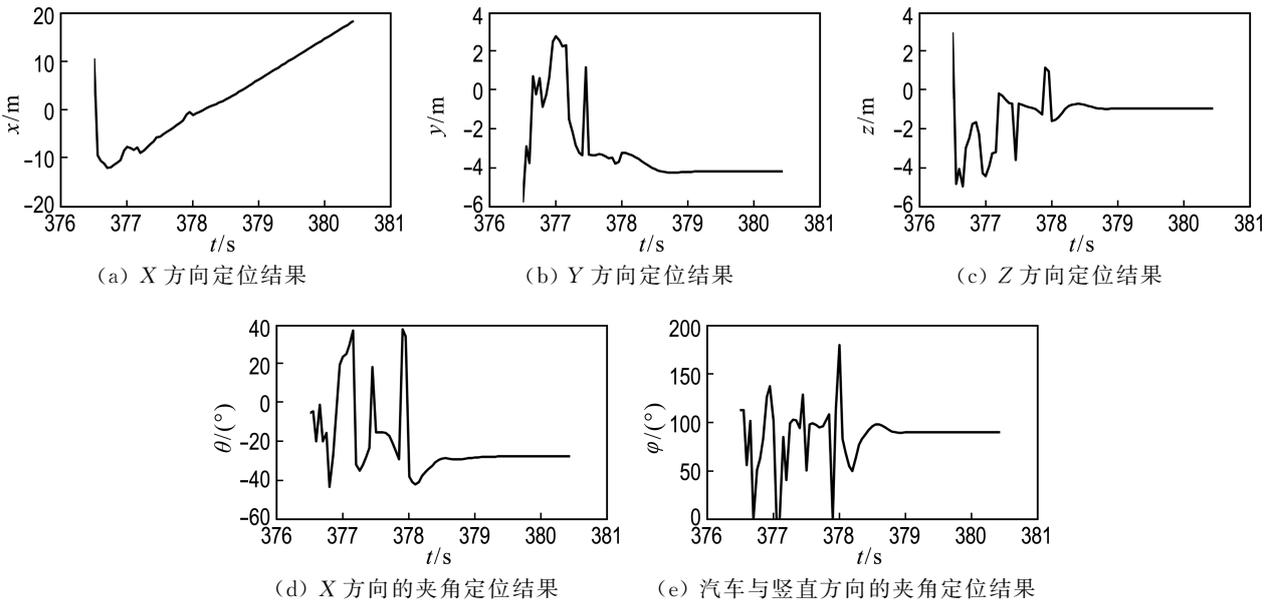


图8 汽车第二次通过时的定位结果

Fig. 8 The locating results of the car passing by at the second time

由图7可见,汽车距离磁传感器较远时,磁场信号弱,此时定位结果较差.随着汽车距离磁传感器越来越近,磁场信号逐渐增强,有效的磁场数据越来越多,定位结果越来越好.定位结果明显改善的时间点出现在汽车正横通过磁传感器,此时磁场信号最强.可以看出:X方向在时间轴52~53 s上大致是一条斜线,斜率约为8.385 m/s,Y方向在时间轴53 s的距离约为-3.774 m,Z方向在

时间轴53 s的距离约为-0.673 m,与X方向的夹角在时间轴53 s时约为5.651°,与垂直方向的夹角在时间轴53 s时约为89.89°.实测数据定位效果与图4(a)所示的汽车实际行驶状态吻合较好,表明了混合算法下的磁性目标定位方法的可行性.

从图8中同样可看出:X方向在时间轴379~380 s上约是一条斜线,斜率约为8.349 m/s,Y

方向在时间轴 380 s 的距离约为 -4.181 m, Z 方向在时间轴 380 s 的距离约为 -0.9494 m, 与 X 方向的夹角在时间轴 380 s 时约为 -27.43° , 与竖直方向的夹角在时间轴 380 s 时约为 90° . 实测数据定位效果与图 4(b) 所示的汽车实际行驶状态也吻合较好, 验证了混合算法下的磁性目标定位方法的实用性.

4 结 语

本文针对运动的磁性目标初始位置未知的情况, 提出了一种先使用 PSO 算法进行粗略求解, 再利用 G-N 算法精细求解的混合算法. 理论分析和汽车实验验证了该算法定位结果准确可靠, 既摆脱了 G-N 算法在磁性目标定位求解中对初始值的依赖, 也克服了 PSO 算法求解进化迭代耗时过长的问题. 同时单个磁通门磁传感器价格低廉、易于安装的特点, 使其在工程实际中有着很好的应用前景.

参考文献:

[1] Merlat L, Naz P. Magnetic localization and identification of vehicles [J]. *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, 2003, **5090**:174-185.

[2] Wynn W M, Frahm C P, Carroll P J, *et al.* Advanced superconducting gradiometer/magnetometer arrays and a novel signal processing technique [J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 1975, **MAG-11**(2):701-707.

[3] Wynn W M. Magnetic dipole localization using the gradient rate tensor measured by a five-axis gradiometer with known velocity [J]. *Proceedings of SPIE*, 1995, **2496**:357-367.

[4] 王金根, 龚沈光, 刘胜道. 磁性目标的高精度建模方法[J]. 海军工程大学学报, 2001, **13**(3):49-52.
WANG Jin-gen, GONG Shen-guang, LIU Sheng-dao. High accuracy method for modelling magnetic objects [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2001, **13**(3):49-52. (in Chinese)

[5] 胡海滨, 龚沈光, 林春生. 基于静止标量磁强计的运动舰船定位问题的研究[J]. 海军工程大学学报, 2004, **16**(2):56-60.
HU Hai-bin, GONG Shen-guang, LIN Chun-

sheng. Location of mobile ship based on stillness scalar magnetometer [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2004, **16**(2):56-60. (in Chinese)

[6] 唐劲飞, 龚沈光, 王金根. 磁偶极子信号检测和参数估计[J]. 海军工程大学报, 2001, **13**(2):54-58.
TANG Jin-fei, GONG Shen-guang, WANG Jin-gen. Signal detecting and parameter estimate of a magnetic dipole [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2001, **13**(2):54-58. (in Chinese)

[7] 唐劲飞, 龚沈光, 王金根. 磁偶极子模型下目标定位和参数估计的两种新方法[J]. 电子学报, 2003, **31**(1):154-157.
TANG Jin-fei, GONG Shen-guang, WANG Jin-gen. Two new magnetic localization and parameter estimation methods under the dipole model [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2003, **31**(1):154-157. (in Chinese)

[8] 王金根, 林春生, 龚沈光. 一种基于神经网络的磁性目标定位方法[J]. 海军工程大学学报, 2000, **12**(4):27-30.
WANG Jin-gen, LIN Chun-sheng, GONG Shen-guang. Algorithm of locating magnetic objects based on neural networks [J]. *Journal of Naval University of Engineering*, 2000, **12**(4):27-30. (in Chinese)

[9] 王金根, 龚沈光. 基于运动标量磁强计的磁性目标定位问题研究[J]. 电子学报, 2002, **30**(7):1057-1060.
WANG Jin-gen, GONG Shen-guang. Research on the problem of localizing magnetic target based on motion scalar magnetometer [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2002, **30**(7):1057-1060. (in Chinese)

[10] 林春生, 向前, 龚沈光. 水中磁性运动目标信号的模型化检测[J]. 兵工学报, 2005, **26**(2):192-195.
LIN Chun-sheng, XIANG Qian, GONG Shen-guang. A modeling algorithm for detection of moving on-water magnetic objects [J]. *Acta Armamentarii*, 2005, **26**(2):192-195. (in Chinese)

[11] 李 华, 李庆民, 龚沈光, 等. 基于磁性目标磁场模型的在线磁定位研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2009, **33**(1):165-168.
LI Hua, LI Qing-min, GONG Shen-guang, *et al.* Study of online magnetic location methods based on magnetic target's model [J]. *Journal of Wuhan*

- University of Technology (Transportation Science & Engineering)**, 2009, **33**(1):165-168. (in Chinese)
- [12] 唐莉莉, 宋勇, 童官军, 等. 一种新的运动磁目标定位算法[J]. 传感技术学报, 2011, **24**(7):996-1000.
TANG Li-li, SONG Yong, TONG Guan-jun, *et al.* A novel localization algorithm for mobile magnetic targets [J]. **Chinese Journal of Sensors and Actuators**, 2011, **24**(7):996-1000. (in Chinese)
- [13] 何文辉. 人体胃肠道无创诊查系统及生物遥测胶囊磁定位技术与实验[D]. 上海: 上海交通大学, 2007:14-15.
HE Wen-hui. Non-invasive detecting system for gastrointestinal tract and magnetic localization technology & experiment for biotelemetric capsule [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2007:14-15. (in Chinese)
- [14] 魏明生, 童敏明, 訾斌, 等. 基于粒子群-拟牛顿混合算法的管道机器人定位[J]. 仪器仪表学报, 2012, **33**(11):2594-2600.
WEI Ming-sheng, TONG Min-ming, ZI bin, *et al.* Pipeline robot localization system based on PSO-BFGS hybrid algorithm [J]. **Chinese Journal of Scientific Instrument**, 2012, **33**(11):2594-2600. (in Chinese)
- [15] 程军. 基于生物行为机制的粒子群算法改进及应用[D]. 广州: 华南理工大学, 2014:68-88.
CHENG Jun. Modification and application of particle swarm optimization algorithm based on biological behavior mechanism [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014: 68-88. (in Chinese)

Study of a hybrid algorithm for localization of mobile magnetic target by a single fluxgate

GAO Xiang*, YAN Sheng-gang, LI Bin

(School of Marine Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Localization of mobile magnetic target can be attributed to the solution for a class of nonlinear programming problem. Regarding to the complication of the calculation of the objective function and the shortage of the real-time localization of magnetic target, a hybrid algorithm is proposed. Firstly, the particle swarm optimization algorithm is used to get a beginning of the solution; then Gauss-Newton algorithm is utilized to acquire the accurate solution, so the position of the target is located accurately and rapidly by magnetic field data from single fluxgate magnetic sensor without knowing of the initial position. The theoretical simulation and experimental results prove the rationality and feasibility of the algorithm, which provides a new idea for the detection and localization of magnetic target in engineering.

Key words: localization of magnetic target; nonlinear programming problem; particle swarm optimization algorithm; Gauss-Newton algorithm