



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103727938 A

(43) 申请公布日 2014. 04. 16

(21) 申请号 201310516139. 7

(22) 申请日 2013. 10. 28

(71) 申请人 北京自动化控制设备研究所
地址 100074 北京市丰台区云岗北区西里 1 号院

(72) 发明人 李海军 徐海刚 姜述明 闫春新
朱红 裴玉锋 李瑞贤 刘冲
郭元江 李昂 王根

(74) 专利代理机构 核工业专利中心 11007
代理人 高尚梅

(51) Int. Cl.
G01C 21/16 (2006. 01)
G01C 25/00 (2006. 01)

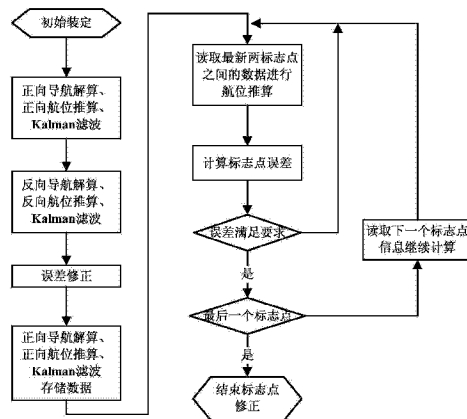
权利要求书5页 说明书11页 附图1页

(54) 发明名称

一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法

(57) 摘要

本发明属于一种导航方法,具体涉及一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,它包括如下步骤,(1)建立计算模型,(2)航位计算,(3)Kalman滤波模型,(4)反向处理,(5)标志点修正。本发明的优点是,提出了一种管道测绘领域用惯导里程计组合导航方法,该方法循环利用全程测试数据,通过正反向联合导航滤波对惯导系统及里程计的各项误差进行估计和补偿,最后结合标志点位置信息对轨迹进行进一步的修正,最终获得高精度的管道轨迹数据。



1. 一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,其特征在于:它包括如下步骤,

- (1) 建立计算模型,
- (2) 航位计算,
- (3) Kalman 滤波模型,
- (4) 反向处理,
- (5) 标志点修正。

2. 如权利要求 1 所述的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,其特征在于:所述的步骤(1)包括,

1) 误差模型

惯导里程计组合导航算法采用“速度+位置”匹配 Kalman 滤波方法,该方案采用 19 阶导航误差模型,选取 19 个误差状态变量为

$$X = [\delta V_n \ \delta V_u \ \delta V_e \ \Phi_n \ \Phi_u \ \Phi_e \ \delta L_D \ \delta h_D \ \delta \lambda_D \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \Theta_Y \ \Theta_Z \ \Delta SF \ \Delta M]$$

状态方程为:

$$\dot{X} = AX$$

其中

$$A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ A_3 & A_4 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_5 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_6 \\ & & \mathbf{0}_{10 \times 19} & & & \end{bmatrix}$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -V_u / R_M & -V_n / R_M & -2(V_e \tan L / R_N + \omega_{ie} \sin L) \\ 2V_n / R_M & 0 & 2(V_e / R_N + \omega_{ie} \cos L) \\ V_e \tan L / R_N + 2\omega_{ie} \sin L & -(V_e / R_N + 2\omega_{ie} \cos L) & V_n \tan L / R_N - V_u / R_N \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -f_e & f_u \\ f_e & 0 & -f_n \\ -f_u & f_n & 0 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/R_N \\ 0 & 0 & \tan L / R_N \\ -1/R_M & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} 0 & -V_n / R_M & -\omega_{ie} \sin L - V_e \tan L / R_N \\ V_n / R_M & 0 & \omega_{ie} \cos L + V_e / R_N \\ \omega_{ie} \sin L + V_e \tan L / R_N & -\omega_{ie} \cos L - V_e / R_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_5 = \begin{bmatrix} 0 & -V_{De} & V_{Du} \\ V_{De} & 0 & -V_{Dn} \\ -V_{Du} & V_{Dn} & 0 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} -C_b^n(1,3)V_D & C_b^n(1,2)V_D & C_b^n(1,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(2,3)V_D & C_b^n(2,2)V_D & C_b^n(2,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(3,3)V_D & C_b^n(3,2)V_D & C_b^n(3,1)V_D & 0 \end{bmatrix}$$

其中, δV_n 、 δV_u 、 δV_e 为惯导北向、垂向、东向速度误差; Φ_n 、 Φ_u 、 Φ_e 为惯导北向、垂向、东向失准角; ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z : 惯导 X、Y、Z 轴加速度计零偏; ε_x 、 ε_y 、 ε_z : 惯导 X、Y、Z 轴

$$\begin{cases} \delta V_n = V_n - V_{Dn} \\ \delta V_u = V_u - V_{Du} \\ \delta V_e = V_e - V_{De} \\ \delta L_D = L_D - L_M \\ \delta h_D = h_D - h_M \\ \delta \lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases}$$

其中, λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度; λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经度、纬度、高度, 里程计的速度由下式得到:

$$\begin{bmatrix} V_{Dn} \\ V_{Du} \\ V_{De} \end{bmatrix} = C_b^n \begin{bmatrix} \Delta S / dT \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

式中, ΔS 为 0.1s 内的位移增量, $dT = 0.1s$ 。

3. 如权利要求 1 所述的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法, 其特征在于: 所述的步骤(2)包括,

进行惯性导航的同时进行航位推算, 计算周期同导航解算周期, $T_n=5(ms)$; 航位推算位置信息初始化同导航解算, 即利用外界装订值获得初始经度、纬度及高度,

设里程计在第 i 采样周期输出载体的位移为 ΔS_i , 则其在惯导载体坐标系 b 系中的表示为:

$$\Delta S_i^b = [\Delta S_i \quad 0 \quad 0]^T$$

利用惯导系统的姿态矩阵将其转换到地理坐标系下, 得:

$$\Delta S_i^n = C_b^n \Delta S_i^b$$

为消除里程计量化噪声, 以 0.1s 为周期对速度作平滑处理。

航位推算公式为:

$$\begin{cases} L_D(t) = L_D(t-T_n) + \Delta S_{iN}^n / R_M \\ \lambda_D(t) = \lambda_D(t-T_n) + (\Delta S_{iE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t) = h_D(t-T_n) + \Delta S_{iU}^n \end{cases}$$

ΔS_{iN}^n 、 ΔS_{iU}^n 、 ΔS_{iE}^n 分别表示导航解算周期内里程计地理系的位移增量。

4. 如权利要求 1 所述的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法, 其特征在于: 所述的步骤(3)包括, Kalman 滤波方程的公式如下:

状态一步预测

$$\hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}$$

状态估计

$$\hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}]$$

滤波增益矩阵

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1}$$

一步预测误差方差阵

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T$$

估计误差方差阵

$$P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}$$

其中, $\hat{X}_{k,k-1}$ 为一步状态预测值, \hat{X}_k 为状态估计矩阵, $\Phi_{k,k-1}$ 为状态一步转移矩阵, H_k 为量测矩阵, Z_k 为量测量, K_k 为滤波增益矩阵, R_k 为观测噪声阵, $P_{k,k-1}$ 为一步预测误差方差阵, P_k 为估计误差方差阵, $\Gamma_{k,k-1}$ 为系统噪声驱动阵, Q_{k-1} 为系统噪声阵。

5. 如权利要求 1 所述的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,其特征在於:所述的步骤(4)包括,

在完成正向顺序的导航和滤波之后,导航解算、航位推算及 Kalman 滤波并不停止,而是继续进行反向的导航解算、航位推算以及 Kalman 滤波,主要处理方法包括:

1) 反向导航

导航的计算公式同正向导航,不同之处是在计算过程中需要将一些状态量进行取反,具体处理包括:

- a) 重力加速度反向 : $g = -g$
- b) 过载反向 : $fb = -fb$
- c) 角速度反向 : $wibb = -wibb$
- d) 地球自转角速度反向 : $wien = -wien$
- e) 牵连角速度反向 : $wenn = -wenn$
- f) 位置更新反向 : 速度取反
- g) 时间 : $t = t - T_n$

2) 反向航位推算

反向航位推算的形式同正向的航位推算,与正向航位推算的区别是在位移累加时取负号,即公式变为:

$$\begin{cases} L_D(t-T_n) = L_D(t) - \Delta S_{IN}^n / R_M \\ \lambda_D(t-T_n) = \lambda_D(t) - (\Delta S_{IE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t-T_n) = h_D(t) - \Delta S_{IU}^n \end{cases}$$

3) 反向滤波

反向滤波流程同正向滤波计算,只需将状态矩阵及量测矩阵中所有元素取反即可。

6. 如权利要求 1 所述的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,其特征在於:所述的步骤(5)包括,在利用正反向联合滤波完成对误差项的估计和补偿之后,即可得到相对准确的轨迹信息,但是由于里程计的剩余误差仍然具有累加性,因此通常需要通过标志点对轨迹进行进一步的修正,具体的方法如下:

在标志点处计算里程计航位推算的误差:

$$\begin{cases} dL_D = L_D - L_M \\ dh_D = h_D - h_M \\ d\lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases}$$

其中 λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度； λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经度、纬度、高度。

则可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta\Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{De} & S_{Dn} & \\ & S_{Du} & S_{DL} \\ -S_{Dn} & S_{De} & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dL_D \\ dh_D \\ d\lambda_D \end{bmatrix}$$

其中 $\Delta\Phi_u$ 、 $\Delta\Phi_L$ 、 ΔSF 分别为里程计剩余的航向安装误差角、俯仰安装误差角以及刻度系数误差； S_{Dn} 、 S_{Du} 、 S_{De} 、 S_{DL} 分别为里程计航位推算获得的北向、垂向、东向以及径向位移；估计出的误差参数后，进行如下判断，当径向误差大于 0.01m，即

$dS_D = \sqrt{(dL_D)^2 + (dh_D)^2 + (d\lambda_D)^2} > 0.01\text{m}$ 时，对计算获得的里程计剩余误差进行累加和补偿，并从上一个标志点处重新进行计算，里程计剩余误差的补偿方法如下：

首先对误差进行累加：

$$\begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta\Phi_L \end{bmatrix}$$

然后对误差进行补偿：

$$dC_o^n = \begin{bmatrix} 1 & -d\Phi_L & d\Phi_u \\ d\Phi_L & 1 & 0 \\ -d\Phi_u & 0 & 1 \end{bmatrix} dC_o^n$$

$$\Delta S_i = (1 - dSF) \Delta S_i$$

如此在两个标志点之间进行迭代计算，直到该标志点处的径向位置误差小于 0.01m。然后进行下一个标志点修正。

一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法

技术领域

[0001] 本发明属于一种导航方法,具体涉及一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,它能够应用在石油天然气管道测绘领域,能有效利用检测数据对惯导系统及里程计的误差进行准确估计和补偿,大大提高了管道轨迹的测量精度。

背景技术

[0002] 为了确保石油天然气管道安全,需要定期对油气管道进行检测,以获得管道轨迹等数据。由于油气管道一般铺设在地表以下,很难通过有效的高精度定位装置对其具体位置以及管道轨迹进行测量。而惯导系统是一种相对有效的测量装置,具有全自主性,不受外界条件制约等特点,但惯导系统定位精度随时间发散,因此利用里程计辅助惯导进行组合导航是一种有效的提高组合导航精度的方法,而管道检测通常是在获得全程数据之后进行事后处理,因此怎样利用全程测量数据以获得高精度的测量轨迹是管道检测的重点研究内容。

[0003] 《组合导航技术在油气管道测绘系统中的应用》(岳步江等,中国惯性技术学报,第16卷第6期,2008年12月)提出了一种用于油气管道测绘中的组合导航技术,应用正向滤波完成误差估计,并利用平滑技术对初始时刻的误差进行修正,该方法相当于利用了一次全程数据完成每个时刻的误差估计,该方法提高了单向滤波开始时刻的滤波精度。为了更为充分利用全程的测试数据,本发明提出一种利用正反向联合导航和滤波的方法完成惯导系统及里程计各误差量的估计和补偿的方法,该方法相当于利用了两次全程数据来完成各项误差的估计,相对于文献中的方法具有更高的误差估计精度,最后再结合标志点的位置信息对所得轨迹进行修正,以进一步提高轨迹信息。

发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种能对惯导系统及里程计误差进行有效估计和补偿的方法,该方法可对管道的全程检测数据进行正反向联合导航和滤波,完成对各误差项的估计和补偿,以获得高精度的管道轨迹信息。

[0005] 本发明是这样实现的,一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,它包括如下步骤,

[0006] (1) 建立计算模型,

[0007] (2) 航位计算,

[0008] (3) Kalman 滤波模型,

[0009] (4) 反向处理,

[0010] (5) 标志点修正。

[0011] 所述的步骤(1)包括,

[0012] 1) 误差模型

[0013] 惯导里程计组合导航算法采用“速度+位置”匹配 Kalman 滤波方法,该方案采用

19 阶导航误差模型, 选取 19 个误差状态变量为

$$[0014] \quad X = [\delta V_n \ \delta V_u \ \delta V_e \ \Phi_n \ \Phi_u \ \Phi_e \ \delta L_D \ \delta h_D \ \delta \lambda_D \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \Theta_Y \ \Theta_Z \ \Delta SF \ \Delta t]$$

[0015] 状态方程为:

$$[0016] \quad \dot{X} = AX$$

[0017] 其中

$$[0018] \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & 0_{3 \times 3} & C_b^n & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 4} \\ A_3 & A_4 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & -C_b^n & 0_{3 \times 4} \\ 0_{3 \times 3} & A_5 & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & 0_{3 \times 3} & A_6 \\ & & & 0_{10 \times 19} & & \end{bmatrix}$$

$$[0019] \quad A_1 = \begin{bmatrix} -V_u/R_M & -V_n/R_M & -2(V_e \tan L/R_N + \omega_{ie} \sin L) \\ 2V_n/R_M & 0 & 2(V_e/R_N + \omega_{ie} \cos L) \\ V_e \tan L/R_N + 2\omega_{ie} \sin L & -(V_e/R_N + 2\omega_{ie} \cos L) & V_n \tan L/R_N - V_u/R_N \end{bmatrix}$$

$$[0020] \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -f_e & f_u \\ f_e & 0 & -f_n \\ -f_u & f_n & 0 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/R_N \\ 0 & 0 & \tan L/R_N \\ -1/R_M & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0021] \quad A_4 = \begin{bmatrix} 0 & -V_n/R_M & -\omega_{ie} \sin L - V_e \tan L/R_N \\ V_n/R_M & 0 & \omega_{ie} \cos L + V_e/R_N \\ \omega_{ie} \sin L + V_e \tan L/R_N & -\omega_{ie} \cos L - V_e/R_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0022] \quad A_5 = \begin{bmatrix} 0 & -V_{De} & V_{Du} \\ V_{De} & 0 & -V_{Dn} \\ -V_{Du} & V_{Dn} & 0 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} -C_b^n(1,3)V_D & C_b^n(1,2)V_D & C_b^n(1,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(2,3)V_D & C_b^n(2,2)V_D & C_b^n(2,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(3,3)V_D & C_b^n(3,2)V_D & C_b^n(3,1)V_D & 0 \end{bmatrix}$$

[0023] 其中, δV_n 、 δV_u 、 δV_e 为惯导北向、垂向、东向速度误差; Φ_n 、 Φ_u 、 Φ_e 为惯导北向、垂向、东向失准角; ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z : 惯导 X、Y、Z 轴加速度计零偏; ε_x 、 ε_y 、 ε_z : 惯导 X、Y、Z 轴陀螺漂移; δL_D 、 δh_D 、 $\delta \lambda_D$ 为里程计航位推算的纬度、高度、经度误差; Θ_Y 、 Θ_Z 为惯导与里程计间沿惯导 Y 和 Z 轴的安装误差角; ΔSF : 里程计刻度系数误差; Δt : 为时间延迟; f_n 、 f_u 、 f_e 为惯导系统测量的北天东三方向上的比力; V_n 、 V_u 、 V_e 分别为惯导系统北向、垂向和东向速度; ω_{ie} 为地球自转角速率; L 表示惯导系统所处位置的纬度; R_N 、 R_M 分别为卯酉圈曲率半径、子午面内曲率半径, V_D 为里程计的前向速度; V_{Dn} 、 V_{Du} 、 V_{De} 分别表示里程计航位推算的北向、垂向、东向速度; $C_b^n(1,1)$ 表示矩阵 C_b^n 第 1 行第 1 列对应的元素, 其余相同形式变量的含义与此相同;

[0024] 2) 观测方程

[0025] 滤波器观测方程分为两部分, 当有速度观测时, 观测方程如下:

[0026]
$$\begin{bmatrix} \delta V_n \\ \delta V_u \\ \delta V_e \\ \delta L_D \\ \delta h_D \\ \delta \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & V_{De} & -V_{Du} & C_b^n(1,3)V_D & -C_b^n(1,2)V_D & -C_b^n(1,1)V_D & \dot{V}_n \\ 0 & 1 & 0 & -V_{De} & 0 & V_{Du} & C_b^n(2,3)V_D & -C_b^n(2,2)V_D & -C_b^n(2,1)V_D & \dot{V}_u \\ 0 & 0 & 1 & V_{Du} & -V_{De} & 0 & C_b^n(3,3)V_D & -C_b^n(3,2)V_D & -C_b^n(3,1)V_D & \dot{V}_e \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & 0_{3 \times 9} & & & \end{bmatrix} X$$

[0027] 当有参考点信息时,观测方程如下 :

[0028]
$$\begin{bmatrix} \delta V_n \\ \delta V_u \\ \delta V_e \\ \delta L_D \\ \delta h_D \\ \delta \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & 0_{3 \times 9} & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & 0 & 0 & & \\ & & & 0_{3 \times 6} & & 0 & 1 & 0 & 0_{3 \times 10} & \\ & & & & & & & & & \\ & & & & & & & & & 1 \end{bmatrix} X$$

[0029] \dot{V}_n 、 \dot{V}_u 、 \dot{V}_e 分别表示导航解算时用于速度更新的惯导系统地理系的加速度值 ;
其余各变量定义同上节 ;

[0030] 3) 方程离散化

[0031] 状态转移矩阵离散化公式如下

[0032]
$$\phi_{k+1,k} = I + T_n A_{T_n} + T_n A_{2T_n} + \dots + T_n A_{T_e} = I + \sum_{t=T_n}^{T_e} T_n A_t$$

[0033] 其中, T_n 为导航周期, $T_n=0.005s$, T_e 为滤波周期, $T_e=1s$, A_t 为 t 时刻的状态转移矩阵, $\phi_{k+1,k}$ 为离散化之后的转移矩阵, 每个滤波周期开始时 $t=0$;

[0034] 噪声阵离散化公式为 :

[0035] $Q_k = QT_e$

[0036] Q 为噪声阵,

[0037] 观测量求解公式如下 :

[0038]
$$\begin{cases} \delta V_n = V_n - V_{Dn} \\ \delta V_u = V_u - V_{Du} \\ \delta V_e = V_e - V_{De} \\ \delta L_D = L_D - L_M \\ \delta h_D = h_D - h_M \\ \delta \lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases}$$

[0039] 其中, λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度 ; λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经度、纬度、高度, 里程计的速度由下式得到 :

[0040]
$$\begin{bmatrix} V_{Dn} \\ V_{Du} \\ V_{De} \end{bmatrix} = C_b^n \begin{bmatrix} \Delta S / dT \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

[0041] 式中, ΔS 为 0.1s 内的位移增量, $dT = 0.1s$ 。

[0042] 所述的步骤(2)包括,

[0043] 进行惯性导航的同时进行航位推算, 计算周期同导航解算周期, $T_n=5(ms)$; 航位推算位置信息初始化同导航解算, 即利用外界装订值获得初始经度、纬度及高度,

[0044] 设里程计在第 i 采样周期输出载体的位移为 ΔS_i , 则其在惯导载体坐标系 b 系中的表示为:

$$[0045] \quad \Delta S_i^b = [\Delta S_i \quad 0 \quad 0]^T$$

[0046] 利用惯导系统的姿态矩阵将其转换到地理坐标系下, 得:

$$[0047] \quad \Delta S_i^n = C_b^n \Delta S_i^b$$

[0048] 为消除里程计量化噪声, 以 0.1s 为周期对速度作平滑处理。

[0049] 航位推算公式为:

$$[0050] \quad \begin{cases} L_D(t) = L_D(t-T_n) + \Delta S_{iN}^n / R_M \\ \lambda_D(t) = \lambda_D(t-T_n) + (\Delta S_{iE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t) = h_D(t-T_n) + \Delta S_{iU}^n \end{cases}$$

[0051] ΔS_{iN}^n 、 ΔS_{iU}^n 、 ΔS_{iE}^n 分别表示导航解算周期内里程计地理系的位移增量。

[0052] 所述的步骤(3)包括, Kalman 滤波方程的公式如下:

[0053] 状态一步预测

$$[0054] \quad \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1}$$

[0055] 状态估计

$$[0056] \quad \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}]$$

[0057] 滤波增益矩阵

$$[0058] \quad K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1}$$

[0059] 一步预测误差方差阵

$$[0060] \quad P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T$$

[0061] 估计误差方差阵

$$[0062] \quad P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1}$$

[0063] 其中, $\hat{X}_{k,k-1}$ 为一步状态预测值, \hat{X}_k 为状态估计矩阵, $\Phi_{k,k-1}$ 为状态一步转移矩阵, H_k 为量测矩阵, Z_k 为量测量, K_k 为滤波增益矩阵, R_k 为观测噪声阵, $P_{k,k-1}$ 为一步预测误差方差阵, P_k 为估计误差方差阵, $\Gamma_{k,k-1}$ 为系统噪声驱动阵, Q_{k-1} 为系统噪声阵。

[0064] 所述的步骤(4)包括,

[0065] 在完成正向顺序的导航和滤波之后, 导航解算、航位推算及 Kalman 滤波并不停止, 而是继续进行反向的导航解算、航位推算以及 Kalman 滤波, 主要处理方法包括:

[0066] 1) 反向导航

[0067] 导航的计算公式同正向导航, 不同之处是在计算过程中需要将一些状态量进行取

反,具体处理包括:

[0068] a) 重力加速度反向 : $g = -g$

[0069] b) 过载反向 : $fb = -fb$

[0070] c) 角速度反向 : $wibb = -wibb$

[0071] d) 地球自转角速度反向 : $wien = -wien$

[0072] e) 牵连角速度反向 : $wenn = -wenn$

[0073] f) 位置更新反向 :速度取反

[0074] g) 时间 : $t = t - T_n$

[0075] 2) 反向航位推算

[0076] 反向航位推算的形式同正向的航位推算,与正向航位推算的区别是在位移累加时取负号,即公式变为:

$$[0077] \begin{cases} L_D(t-T_n) = L_D(t) - \Delta S_{iN}^n / R_M \\ \lambda_D(t-T_n) = \lambda_D(t) - (\Delta S_{iE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t-T_n) = h_D(t) - \Delta S_{iU}^n \end{cases}$$

[0078] 3) 反向滤波

[0079] 反向滤波流程同正向滤波计算,只需将状态矩阵及量测矩阵中所有元素取反即可。

[0080] 所述的步骤(5)包括,在利用正反向联合滤波完成对误差项的估计和补偿之后,即可得到相对准确的轨迹信息,但是由于里程计的剩余误差仍然具有累加性,因此通常需要通过标志点对轨迹进行进一步的修正,具体的方法如下:

[0081] 在标志点处计算里程计航位推算的误差:

$$\begin{cases} dL_D = L_D - L_M \\ dh_D = h_D - h_M \\ d\lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases}$$

[0082] 其中 λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度; λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经度、纬度、高度。

[0083] 则可得

$$\begin{bmatrix} \Delta \Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta \Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{De} & S_{Dn} & & \\ & S_{Du} & S_{DL} & \\ -S_{Dn} & S_{De} & & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dL_D \\ dh_D \\ d\lambda_D \end{bmatrix}$$

[0084] 其中 $\Delta \Phi_u$ 、 $\Delta \Phi_L$ 、 ΔSF 分别为里程计剩余的航向安装误差角、俯仰安装误差角以及刻度系数误差; S_{Dn} 、 S_{Du} 、 S_{De} 、 S_{DL} 分别为里程计航位推算获得的北向、垂向、东向以及径向位

移；

[0085] 估计出的误差参数后,进行如下判断,当径向误差大于 0.01m,即

[0086] $dS_D = \sqrt{(dL_D * dL_D + dh_D * dh_D + d\lambda_D * d\lambda_D)} > 0.01m$ 时,对计算获得的里程计剩余误差进行累加和补偿,并从上一个标志点处重新进行计算,里程计剩余误差的补偿方法如下:

[0087] 首先对误差进行累加:

$$[0088] \begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta\Phi_L \end{bmatrix}$$

[0089] 然后对误差进行补偿:

$$[0090] dC_o^n = \begin{bmatrix} 1 & -d\Phi_L & d\Phi_u \\ d\Phi_L & 1 & 0 \\ -d\Phi_u & 0 & 1 \end{bmatrix} dC_o^n$$

[0091] $\Delta S_i = (1 - dSF) \Delta S_i$

[0092] 如此在两个标志点之间进行迭代计算,直到该标志点处的径向位置误差小于 0.01m。然后进行下一个标志点修正。

[0093] 本发明的优点是,提出了一种管道测绘领域用惯导里程计组合导航方法,该方法循环利用全程测试数据,通过正反向联合导航滤波对惯导系统及里程计的各项误差进行估计和补偿,最后结合标志点位置信息对轨迹进行进一步的修正,最终获得高精度的管道轨迹数据。

附图说明

[0094] 图 1 为本发明所提供的一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法流程图。

具体实施方式

[0095] 下面结合附图和具体实施例对本发明进行详细介绍:

[0096] 首先利用初始点的位置信息进行初始装定,然后进行正向的导航解算、航位推算以及 Kalman 滤波,在整个滤波过程中对三个速度误差、三个失准角进行闭环修正,当计算至数据结尾处时,继续进行反向的导航解算、航位推算以及 Kalman 滤波,在完成一次完整的正向及反向联合导航和滤波之后,对如下误差进行一次修正,包括:惯导系统的陀螺漂移、加速度计零偏、里程计位置误差、里程计安装误差角以及里程计的刻度系数误差,然后继续进行正向的导航和滤波,并保存惯导系统姿态矩阵、里程计位移增量以及组合导航结果等数据,最后,结合标志点数据对组合导航获得的轨迹进行进一步的修正。

[0097] 首先建立惯导系统与里程计的误差模型,然后利用管道检测的全程数据进行顺序的正向导航和航位推算,同时进行 Kalman 滤波估计各误差项,当计算至数据结尾后,进行反向导航和航位推算, Kalman 滤波器继续误差估计,期间滤波器不重启,直至数据开始位置,然后进行各误差项的补偿和修正,再进行正向的导航和滤波,此时由于各主要误差都进行了补偿,将获得相对较高精度的轨迹数据,最后还可结合标志点信息对所得的轨迹进行进一步的修正。

[0098] 一种管道测绘用惯导里程计组合导航方法,它包括如下步骤:

[0099] 1. 误差模型

[0100] 惯导里程计组合导航算法采用“速度+位置”匹配 Kalman 滤波方案,该方案采用 19 阶导航误差模型,选取 19 个误差状态变量为

$$[0101] \quad X = [\delta V_n \ \delta V_u \ \delta V_e \ \Phi_n \ \Phi_u \ \Phi_e \ \delta L_D \ \delta h_D \ \delta \lambda_D \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z \ \varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \varepsilon_z \ \Theta_Y \ \Theta_Z \ \Delta SF \ \Delta t]$$

[0102] 状态方程为:

$$[0103] \quad \dot{X} = AX$$

[0104] 其中

$$[0105] \quad A = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ A_3 & A_4 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & -C_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 4} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_5 & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & A_6 \\ & & & \mathbf{0}_{10 \times 19} & & \end{bmatrix}$$

$$[0106] \quad A_1 = \begin{bmatrix} -V_u/R_M & -V_n/R_M & -2(V_e \tan L/R_N + \omega_{ie} \sin L) \\ 2V_n/R_M & 0 & 2(V_e/R_N + \omega_{ie} \cos L) \\ V_e \tan L/R_N + 2\omega_{ie} \sin L & -(V_e/R_N + 2\omega_{ie} \cos L) & V_n \tan L/R_N - V_u/R_N \end{bmatrix}$$

$$[0107] \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & -f_e & f_u \\ f_e & 0 & -f_n \\ -f_u & f_n & 0 \end{bmatrix}, \quad A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1/R_N \\ 0 & 0 & \tan L/R_N \\ -1/R_M & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0108] \quad A_4 = \begin{bmatrix} 0 & -V_n/R_M & -\omega_{ie} \sin L - V_e \tan L/R_N \\ V_n/R_M & 0 & \omega_{ie} \cos L + V_e/R_N \\ \omega_{ie} \sin L + V_e \tan L/R_N & -\omega_{ie} \cos L - V_e/R_N & 0 \end{bmatrix}$$

$$[0109] \quad A_5 = \begin{bmatrix} 0 & -V_{De} & V_{Du} \\ V_{De} & 0 & -V_{Dn} \\ -V_{Du} & V_{Dn} & 0 \end{bmatrix}, \quad A_6 = \begin{bmatrix} -C_b^n(1,3)V_D & C_b^n(1,2)V_D & C_b^n(1,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(2,3)V_D & C_b^n(2,2)V_D & C_b^n(2,1)V_D & 0 \\ -C_b^n(3,3)V_D & C_b^n(3,2)V_D & C_b^n(3,1)V_D & 0 \end{bmatrix}$$

[0110] 其中 δV_n 、 δV_u 、 δV_e 为惯导北向、垂向、东向速度误差; Φ_n 、 Φ_u 、 Φ_e 为惯导北向、垂向、东向失准角; ∇_x 、 ∇_y 、 ∇_z : 惯导 X、Y、Z 轴加速度计零偏; ε_x 、 ε_y 、 ε_z : 惯导 X、Y、Z 轴陀螺漂移; δL_D 、 δh_D 、 $\delta \lambda_D$ 为里程计航位推算的纬度、高度、经度误差; Θ_Y 、 Θ_Z 为惯导与里程计间沿惯导 Y 和 Z 轴的安装误差角; ΔSF : 里程计刻度系数误差; Δt : 为时间延迟; f_n 、 f_u 、 f_e 为惯导系统测量的北天东三方向上的比力; V_n 、 V_u 、 V_e 分别为惯导系统北向、垂向和东向速度; ω_{ie} 为地球自转角速率; L 表示惯导系统所处位置的纬度; R_N 、 R_M 分别为卯酉圈曲率半径、子午面内曲率半径, V_D 为里程计的前向速度; V_{Dn} 、 V_{Du} 、 V_{De} 分别表示里程计航位推算的北向、垂向、东向速度; $C_b^n(1,1)$ 表示矩阵 C_b^n 第 1 行第 1 列对应的元素,其余相同形式变量的

含义与此相同。

[0111] 2) 观测方程

[0112] 滤波器观测方程分为两部分, 当有速度观测时, 观测方程如下:

$$[0113] \quad \begin{bmatrix} \delta V_n \\ \delta V_u \\ \delta V_e \\ \delta L_D \\ \delta h_D \\ \delta \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & V_{De} & -V_{Du} & C_b^n(1,3)V_D & -C_b^n(1,2)V_D & -C_b^n(1,1)V_D & \dot{V}_n \\ 0 & 1 & 0 & -V_{De} & 0 & V_{Du} & C_b^n(2,3)V_D & -C_b^n(2,2)V_D & -C_b^n(2,1)V_D & \dot{V}_u \\ 0 & 0 & 1 & V_{De} & -V_{Du} & 0 & C_b^n(3,3)V_D & -C_b^n(3,2)V_D & -C_b^n(3,1)V_D & \dot{V}_e \\ & & & & & & 0_{3 \times 9} & & & \\ & & & & & & & 0_{3 \times 9} & & \end{bmatrix} X \quad \text{当} \quad (1)$$

有参考点信息时, 观测方程如下:

$$[0114] \quad \begin{bmatrix} \delta V_n \\ \delta V_u \\ \delta V_e \\ \delta L_D \\ \delta h_D \\ \delta \lambda_D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} & & & & 0_{3 \times 9} & \\ & & & & & \\ & & & 1 & 0 & 0 & \\ 0_{3 \times 6} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0_{3 \times 10} & \\ & 0 & 0 & 1 & & \end{bmatrix} X \quad (2)$$

[0115] \dot{V}_n 、 \dot{V}_u 、 \dot{V}_e 分别表示导航解算时用于速度更新的惯导系统地理系的加速度值；其余各变量定义同上节。

[0116] 3) 方程离散化

[0117] 状态转移矩阵离散化公式如下

$$[0118] \quad \phi_{k+1,k} = I + T_n A_{T_n} + T_n A_{2T_n} + \dots + T_n A_{T_e} = I + \sum_{t=T_n}^{T_e} T_n A_t \quad (3)$$

[0119] 其中, T_n 为导航周期, $T_n=0.005s$, T_e 为滤波周期, $T_e=1s$ 。 A_t 为 t 时刻的状态转移矩阵, $\phi_{k+1,k}$ 为离散化之后的转移矩阵, 每个滤波周期开始时 $t=0$ 。

[0120] 噪声阵离散化公式为:

[0121] $Q_k = QT_e$

[0122] Q 为噪声阵。

[0123] 观测量求解公式如下:

$$[0124] \quad \begin{cases} \delta V_n = V_n - V_{Dn} \\ \delta V_u = V_u - V_{Du} \\ \delta V_e = V_e - V_{De} \\ \delta L_D = L_D - L_M \\ \delta h_D = h_D - h_M \\ \delta \lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases} \quad (4)$$

[0125] 其中, λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度; λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经

度、纬度、高度。里程计的速度由下式得到：

$$[0126] \quad \begin{bmatrix} V_{Dn} \\ V_{Du} \\ V_{De} \end{bmatrix} = C_b^n \begin{bmatrix} \Delta S / dT \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

[0127] 式中， ΔS 为 0.1s 内的位移增量， $dT = 0.1s$ 。

[0128] 2. 航位推算

[0129] 进行惯性导航的同时进行航位推算。计算周期同导航解算周期， $T_n=5(ms)$ ；航位推算位置信息初始化同导航解算，即利用外界装订值获得初始经度、纬度及高度。

[0130] 设里程计在第 i 采样周期输出载体的位移为 ΔS_i ，则其在惯导载体坐标系 b 系中的表示为：

$$[0131] \quad \Delta S_i^b = [\Delta S_i \quad 0 \quad 0]^T \quad (6)$$

[0132] 利用惯导系统的姿态矩阵将其转换到地理坐标系下，得：

$$[0133] \quad \Delta S_i^n = C_b^n \Delta S_i^b \quad (7)$$

[0134] 为消除里程计量化噪声，以 0.1s 为周期对速度作平滑处理。

[0135] 航位推算公式为：

$$[0136] \quad \begin{cases} L_D(t) = L_D(t-T_n) + \Delta S_{iN}^n / R_M \\ \lambda_D(t) = \lambda_D(t-T_n) + (\Delta S_{iE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t) = h_D(t-T_n) + \Delta S_{iU}^n \end{cases} \quad (8)$$

[0137] ΔS_{iN}^n 、 ΔS_{iU}^n 、 ΔS_{iE}^n 分别表示导航解算周期内里程计地理系的位移增量。

[0138] 3. Kalman 滤波模型

[0139] Kalman 滤波方程采用文献《卡尔曼滤波和组合导航原理》(第一版, 秦永元等编著) 中的形式, 具体公式如下：

[0140] 状态一步预测

$$[0141] \quad \hat{X}_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} \hat{X}_{k-1} \quad (9)$$

[0142] 状态估计

$$[0143] \quad \hat{X}_k = \hat{X}_{k,k-1} + K_k [Z_k - H_k \hat{X}_{k,k-1}] \quad (10)$$

[0144] 滤波增益矩阵

$$[0145] \quad K_k = P_{k,k-1} H_k^T [H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k]^{-1} \quad (11)$$

[0146] 一步预测误差方差阵

$$[0147] \quad P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k,k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k,k-1}^T \quad (12)$$

[0148] 估计误差方差阵

$$[0149] \quad P_k = [I - K_k H_k] P_{k,k-1} \quad (13)$$

[0150] 其中, $\hat{X}_{k,k-1}$ 为一步状态预测值, \hat{X}_k 为状态估计矩阵, $\Phi_{k,k-1}$ 为状态一步转移矩阵, H_k 为量测矩阵, Z_k 为量测量, K_k 为滤波增益矩阵, R_k 为观测噪声阵, $P_{k,k-1}$ 为一步预测误差方差阵, P_k 为估计误差方差阵, $\Gamma_{k,k-1}$ 为系统噪声驱动阵, Q_{k-1} 为系统噪声阵。

[0151] 4. 反向处理

[0152] 在完成正向顺序的导航和滤波之后, 导航解算、航位推算及 Kalman 滤波并不停止, 而是继续进行反向的导航解算、航位推算以及 Kalman 滤波, 主要处理方法包括:

[0153] 1) 反向导航

[0154] 导航的计算公式同正向导航, 不同之处是在计算过程中需要将一些状态量进行取反, 具体处理包括:

[0155] h) 重力加速度反向 : $g = -g$

[0156] i) 过载反向 : $fb = -fb$

[0157] j) 角速度反向 : $wibb = -wibb$

[0158] k) 地球自转角速度反向 : $wien = -wien$

[0159] l) 牵连角速度反向 : $wenn = -wenn$

[0160] m) 位置更新反向 : 速度取反

[0161] n) 时间 : $t = t - T_n$

[0162] 2) 反向航位推算

[0163] 反向航位推算的形式同正向的航位推算, 与正向航位推算的区别是在位移累加时取负号, 即公式变为:

$$[0164] \begin{cases} L_D(t-T_n) = L_D(t) - \Delta S_{iN}^n / R_M \\ \lambda_D(t-T_n) = \lambda_D(t) - (\Delta S_{iE}^n \sec L) / R_N \\ h_D(t-T_n) = h_D(t) - \Delta S_{iU}^n \end{cases} \quad (14)$$

[0165] 3) 反向滤波

[0166] 反向滤波流程同正向滤波计算, 只需将状态矩阵及量测矩阵中所有元素取反即可。

[0167] 5. 标志点修正

[0168] 在利用正反联合滤波完成对误差项的估计和补偿之后, 即可得到相对准确的轨迹信息, 但是由于里程计的剩余误差仍然具有累加性, 因此通常需要通过标志点对轨迹进行进一步的修正, 具体的方法如下。

[0169] 在标志点处计算里程计航位推算的误差:

$$\begin{cases} dL_D = L_D - L_M \\ dh_D = h_D - h_M \\ d\lambda_D = \lambda_D - \lambda_M \end{cases} \quad (15)$$

[0170] 其中 λ_D 、 L_D 、 h_D 为里程计航位推算的经度、纬度、高度; λ_M 、 L_M 、 h_M 为标志点处的经度、纬度、高度。

[0171] 则可得

$$\begin{bmatrix} \Delta\Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta\Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{De} & S_{Dn} & \\ & S_{Du} & S_{DL} \\ -S_{Dn} & S_{De} & \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} dL_D \\ dh_D \\ d\lambda_D \end{bmatrix} \quad (16)$$

[0172] 其中 $\Delta\Phi_u$ 、 $\Delta\Phi_L$ 、 ΔSF 分别为里程计剩余的航向安装误差角、俯仰安装误差角以及刻度系数误差； S_{Dn} 、 S_{Du} 、 S_{De} 、 S_{DL} 分别为里程计航位推算获得的北向、垂向、东向以及径向位移；

[0173] 估计出的误差参数后，进行如下判断，当径向误差大于 0.01m，即

$$[0174] \quad dS_D = \sqrt{(dL_D)^2 + (dh_D)^2 + (d\lambda_D)^2} > 0.01m$$

[0175] 时，对计算获得的里程计剩余误差进行累加和补偿，并从上一个标志点处重新进行计算，里程计剩余误差的补偿方法如下：

[0176] 首先对误差进行累加：

$$[0177] \quad \begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\Phi_u \\ dSF \\ d\Phi_L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta\Phi_u \\ \Delta SF \\ \Delta\Phi_L \end{bmatrix} \quad (17)$$

[0178] 然后对误差进行补偿：

$$[0179] \quad dC_o^n = \begin{bmatrix} 1 & -d\Phi_L & d\Phi_u \\ d\Phi_L & 1 & 0 \\ -d\Phi_u & 0 & 1 \end{bmatrix} dC_o^n$$

$$[0180] \quad \Delta S_i = (1 - dSF) \Delta S_i \quad (18)$$

[0181] 如此在两个标志点之间进行迭代计算，直到该标志点处的径向位置误差小于 0.01m。然后进行下一个标志点修正。

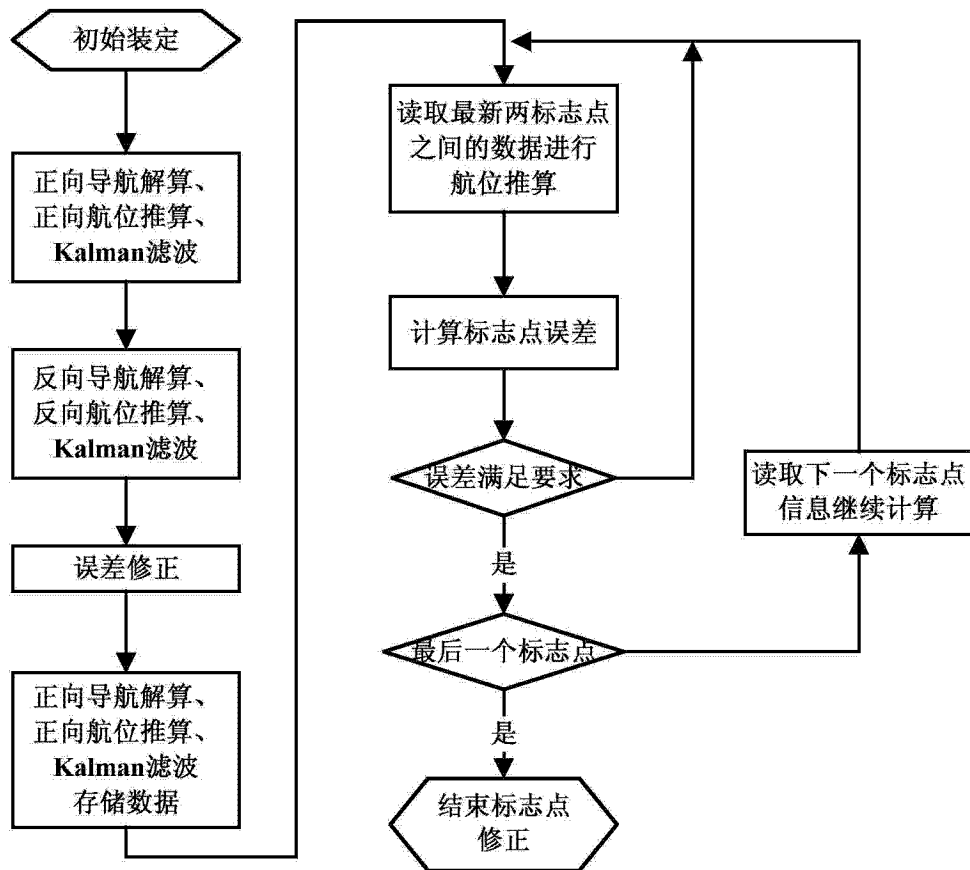


图 1