



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112762961 B

(45) 授权公告日 2022. 06. 03

(21) 申请号 202011580961.6

G01C 21/14 (2006.01)

(22) 申请日 2020.12.28

G01C 21/16 (2006.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 112762961 A

(56) 对比文件

CN 111811537 A, 2020.10.23

CN 110440830 A, 2019.11.12

(43) 申请公布日 2021.05.07

CN 107860399 A, 2018.03.30

(73) 专利权人 厦门华源嘉航科技有限公司
地址 361026 福建省厦门市集美区软件园三期诚毅北大街56号17层1701-1单元

审查员 郑心妍

(72) 发明人 杨功碧 张江源 孙艺丁

(74) 专利代理机构 天津诺德知识产权代理事务所(特殊普通合伙) 12213

专利代理师 栾志超

(51) Int. Cl.

G01C 25/00 (2006.01)

G01C 21/18 (2006.01)

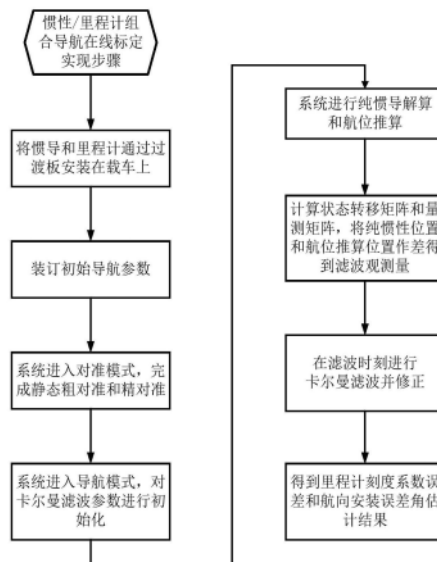
权利要求书3页 说明书9页 附图4页

(54) 发明名称

一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法

(57) 摘要

本发明涉及一种车载惯性/里程计组合导航在线标定方法,利用惯导系统和里程计实现里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定,采集和处理陀螺和加速度计数据,并完成载车怠速状态下初始粗对准和精对准;再进行纯惯导解算和航位推算,计算状态转移矩阵和量测矩阵,将得到的纯惯性位置和航位推算位置作差得到滤波观测量;在滤波时刻进行卡尔曼滤波并实时修正;经过一段时间的机动后可以完成里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定。本发明的方法解决了在复杂环境下,惯性/里程计组合导航系统由于里程刻度系数和航向安装误差的变化造成的定位精度降低的问题,显著提高了惯性/里程计组合导航系统的可靠性。



1. 一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法,其特征在于:利用惯导系统和里程计实现里程刻度系数误差和航向安装偏角误差的在线标定,包括以下步骤:

步骤一装订初始导航参数;

步骤二采集陀螺和加速度计的输出数据,在载车怠速条件下,采用惯性系对准的方法完成系统的粗对准,随后采用卡尔曼滤波技术完成精对准;

步骤三进入导航模式,对卡尔曼滤波器参数进行初始化;

步骤四进行纯惯性解算,将采集里程计脉冲信号转化为位移信息,结合纯惯导解算的姿态信息进行航位推算;里程计的速度输出在m系上表示为:

$$\mathbf{v}_D^m = [0 \quad v_D \quad 0]^T$$

其中, v_D 为里程仪测得的前向速度大小,右向和天向速度均为零;

假设b系与m系的同名坐标轴重合,通过惯性测量装置中的三陀螺组合实时计算载车的姿态矩阵,记为 \mathbf{C}_b^n ,利用 \mathbf{C}_b^n 对 \mathbf{v}_b^m 转换可得在导航坐标系下里程计速度输出 \mathbf{v}_D^n ,即:

$$\mathbf{v}_D^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{v}_b^m$$

航位推算位置更新算法如下:

$$\dot{\mathbf{p}}_D = \mathbf{M}_5 \mathbf{v}_D^n, \quad \mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} 0 & 1/R_{MhD} & 0 \\ \sec L_D / R_{NhD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

其中, $\mathbf{p}_D = [L_D \quad \lambda_D \quad h_D]^T$, L_D 、 λ_D 和 h_D 分别为航位推算的地理纬度、经度和高度; R_{MD} 和 R_{ND} 分别为使用航位推算地理位置计算的子午圈和卯酉圈主曲率半径;定义 $R_{MhD} = R_{MD} + h_D$,定义 $R_{NhD} = R_{ND} + h_D$;

步骤五根据陀螺加表数据和导航信息计算状态转移矩阵和量测矩阵,将计算得到的纯惯性位置和航位推算位置作差得到滤波观测量;

步骤六在滤波时刻进行卡尔曼滤波,以速度误差的状态估计结果实时修正纯惯导的速度信息;

步骤七经过机动后,实现里程刻度系数误差和航向安装偏角误差的在线标定;

坐标系定义如下:

n: 导航坐标系 $ox_n y_n z_n$,东北天地理坐标系,x轴指东,y轴指北,z轴指天;

b: 载体坐标系 $ox_b y_b z_b$,x轴指载体的右方,y轴指载体的前方,z轴指载体的上方;

m: 里程计理想测量坐标系 $ox_m y_m z_m$,x轴指载车的右方,y轴指载车的前方,z轴指载车的上方。

2. 根据权利要求1所述的车载惯性里程计组合导航在线标定方法,其特征在于:所述步骤五中,假设从m系至b系存在小量的安装偏差角,即绕车体横轴 ox_m 、纵轴 oy_m 及竖轴 oz_m 分别存在俯仰偏角 $\delta\alpha_\theta$ 、滚动偏角 $\delta\alpha_\gamma$ 和方位偏角 $\delta\alpha_\psi$,记偏差角矢量 $\mathbf{a} = [\delta\alpha_\theta \quad \delta\alpha_\gamma \quad \delta\alpha_\psi]^T$;其中 $\delta\alpha_\gamma$ 不影响里程计的速度测量值, $\delta\alpha_\theta$ 对里程计的速度测量值影响远远小于 $\delta\alpha_\psi$,里程计刻度系数误差表示为 δK_D ,地球自转角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_e^n$,载体绕地球运动产生的角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_{em}^n$,加速度计测量的比力记为 \mathbf{f}_{sf}^b ,纯惯导的位置误差和航位推算的位置分别记为p和 p_D ,载车真实位置记为 p_{real} ,纯惯导的纬度误差和经度误差分别记为 δL 和 $\delta \lambda$,航位推算的纬度误差和经度

误差分别记为 δL_D 和 $\delta \lambda_D$,设计如下16维惯导/里程计组合导航误差模型:

$$\mathbf{X}_{SINS/DR} = [\phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \delta v_E^n \quad \delta v_N^n \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \varepsilon_x^b \quad \varepsilon_y^b \quad \varepsilon_z^b \quad \nabla_x^b \quad \nabla_y^b \quad \delta L_D \quad \delta \lambda_D \quad \delta \alpha_\psi \quad \delta K_D]^T$$

$$\mathbf{F}_{SINS/DR} = \begin{bmatrix} -(\omega_{ie}^n \times) & \mathbf{M}_1(:,1:2) & \mathbf{M}_2(:,1:2) & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ (\mathcal{J}_f^n \times) & \mathbf{M}_3(1:2,1:2) & \mathbf{M}_4(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{C}_b^n(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{M}_5(1:2,1:2) & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ [\mathbf{M}_3 \mathbf{v}_D^n(\times)](1:2,:) & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \mathbf{M}_5(1:2,:) \mathbf{M}_a & \mathbf{M}_3(1:2,:) \mathbf{v}_D^n \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 1} & \mathbf{0}_{1 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 1} & 0 \end{bmatrix}$$

其中,

$$\boldsymbol{\omega}_{ie}^n = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{v_N^n}{R_M + h} & \frac{v_E^n}{R_N + h} & \frac{v_E^n}{R_N + h} \tan L \end{bmatrix}^T,$$

$$\boldsymbol{\omega}_{in}^n = \boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n,$$

$$\mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{1}{R_N + h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N + h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{v_N^n}{(R_M + h)^2} \\ \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{v_E^n}{(R_N + h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{v_E^n \sec^2 L}{R_N + h} & 0 & -\frac{v_E^n \tan L}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \frac{v_N^n \tan L - v_U^n}{R_N + h} & \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_E^n}{R_N + h} \tan L \right) & -\left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{v_E^n}{R_N + h} \right) \\ -\left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{v_E^n}{R_N + h} \tan L \right) & -\frac{v_U^n}{R_M + h} & -\frac{v_N^n}{R_M + h} \\ 2\left(\omega_{ie} \cos L + \frac{v_E^n}{R_N + h} \right) & \frac{2v_N^n}{R_M + h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_4 = \begin{bmatrix} 2\omega_{ie} \left(v_U^n \sin L + v_N^n \cos L \right) + \frac{v_E^n v_N^n}{R_N + h} \sec^2 L & 0 & \frac{v_E^n v_U^n - v_E^n v_N^n \tan L}{(R_N + h)^2} \\ - \left(2v_E^n \omega_{ie} \cos L + \frac{(v_E^n)^2}{R_N + h} \sec^2 L \right) & 0 & \frac{v_N^n v_U^n}{(R_M + h)^2} + \frac{(v_E^n)^2 \tan L}{(R_N + h)^2} \\ -2v_E^n \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{(v_N^n)^2}{(R_M + h)^2} + \frac{(v_E^n)^2}{(R_N + h)^2} \end{bmatrix},$$

$$M_5 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad M_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{v_N^n}{(R_M + h)^2} \\ \frac{v_E^n \tan L \sec L}{R_N + h} & 0 & -\frac{v_E^n \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$M_\alpha = C_b^n(:, 1) v_D;$$

纯惯导的位置误差和航位推算的位置误差分别记为 δp 和 δp_D , 则:

$$\begin{aligned} z &= p - p_D = (p_{real} + \delta p) - (p_{real} + \delta p_D), \\ &= \delta p - \delta p_D \end{aligned}$$

$$H_{SINS/DR} = [0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 2} \quad I_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 3} \quad -I_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1}].$$

3. 根据权利要求2所述的车载惯性里程计组合导航在线标定方法, 其特征在于: 所述步骤六中, 卡尔曼滤波周期为1s, 运用卡尔曼滤波修正纯惯性计算速度的计算方法如下:

$$(v^n)' = v^n - \delta v^n$$

修正速度后需要将卡尔曼滤波速度误差估计量 δv^n 置零。

4. 根据权利要求3所述的车载惯性里程计组合导航在线标定方法, 其特征在于: 所述步骤七中,

基于组合导航误差模型与量测模型, 建立误差状态方程和量测方程, 运用卡尔曼滤波器进行最优估计计算, 经过机动后得到里程计刻度系数误差 δK_D 和方位偏角 $\delta \alpha_\psi$, 则里程刻度系数 K_D 和航向安装偏角 α_ψ 补偿方法如下:

$$K'_D = K_D - \delta K_D, \quad \alpha'_\psi = \alpha_\psi - \delta \alpha_\psi.$$

一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法

技术领域

[0001] 本发明属于导航技术领域,尤其是涉及一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法。

背景技术

[0002] 惯性导航系统能够提供全方位的导航信息,并且具备完全的自主性,因此得到了广泛的应用,但惯性导航系统误差随时间不断积累。里程计是测量车辆行驶速度和路程的测量装置,具备完全自主,精度高,动态性能好,测量误差不随时间发散的优点,能够与惯性导航系统构成组合导航系统以实现优势互补,达到全自主、高精度定位导航的目的。

[0003] 惯性/里程计组合导航系统在实际使用过程中,需要标定里程刻度系数和里程计安装误差角,现有的标定方法通常为基于轨迹相似原理的标定方法:装订粗略的里程计的标定参数,利用惯性和里程计进行航位推算得到计算导航值,利用轨迹相似原理将该导航值和真实位置直接计算里程计的标定参数变化值,以得到准确的里程计的标定参数。

[0004] 然而里程刻度系数容易受到轮胎温度、充气压力以及表面磨损程度的影响,同时由于初始对准误差和惯性器件误差的存在,若里程计安装误差角为常值,则会使载体坐标系和里程计坐标系存在偏差,同样影响惯性/里程计组合导航的定位精度。

发明内容

[0005] 为解决上述技术问题,本发明提供一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法。

[0006] 本发明采用的技术方案是:一种车载惯性里程计组合导航在线标定方法,利用惯导系统和里程计实现里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定,包括以下步骤:

[0007] 步骤一装订初始导航参数;

[0008] 步骤二采集陀螺和加速度计的输出数据,在载车怠速条件下,采用惯性系对准的方法完成系统的粗对准,随后采用卡尔曼滤波技术完成精对准;

[0009] 步骤三进入导航模式,对卡尔曼滤波器参数进行初始化;

[0010] 步骤四进行纯惯性解算,将采集里程计脉冲信号转化为位移信息,结合纯惯导解算的姿态信息进行航位推算;

[0011] 步骤五根据陀螺加表数据和导航信息计算状态转移矩阵和量测矩阵,将计算得到的纯惯性位置和航位推算位置作差得到滤波观测量;

[0012] 步骤六在滤波时刻进行卡尔曼滤波,以速度误差的状态估计结果实时修正纯惯导的速度信息;

[0013] 步骤七经过机动后,实现里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定

[0014] 优选地,坐标系定义如下:

[0015] n: 导航坐标系 $ox_ny_nz_n$,东北天地理坐标系,x轴指东,y轴指北,z轴指天;

[0016] b: 载体坐标系 $ox_by_bz_b$,x轴指载体的右方,y轴指载体的前方,z轴指载体的上方;

[0017] m: 里程计理想测量坐标系 $ox_my_mz_m$,x轴指载车的右方,y轴指载车的前方,z轴指载

车的上方。

[0018] 优选地,步骤四中,里程计的速度输出在m系上可以表示为:

$$[0019] \quad \mathbf{v}_D^m = [0 \quad v_D \quad 0]^T$$

[0020] 其中, v_D 为里程计测得的前向速度大小,右向和天向速度均为零;

[0021] 假设b系与m系的同名坐标轴重合,通过惯性测量装置中的三陀螺组合可以实时计算载车的姿态矩阵,记为 \mathbf{C}_b^m ,利用 \mathbf{C}_b^m 对 \mathbf{v}_b^m 转换可得在导航坐标系下里程计速度输出,即:

$$[0022] \quad \mathbf{v}_D^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{v}_D^m$$

[0023] 航位推算位置更新算法如下:

$$[0024] \quad \dot{\mathbf{p}}_D = \mathbf{M}_5 \mathbf{v}_D^n = \begin{bmatrix} 0 & 1/R_{MhD} & 0 \\ \sec L/R_{NhD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{DE} \\ v_{DN} \\ v_{DU} \end{bmatrix}$$

[0025] 其中, $\mathbf{p}_D = [L_D \quad \lambda_D \quad h_D]^T$, L_D 、 λ_D 和 h_D 分别为航位推算的地理纬度、经度和高度; $R_{MhD} = R_{MD} + h_D$, $R_{NhD} = R_{ND} + h_D$, R_{MD} 和 R_{ND} 分别为使用航位推算地理位置计算的子午圈和卯酉圈主曲率半径。

[0026] 优选地,步骤五中,假设从m系至b系存在小量的安装偏差角,即绕车体横轴 $o x_m$ 、纵轴 $o y_m$ 及竖轴 $o z_m$ 分别存在俯仰 $\delta\alpha_0$ 、滚动 $\delta\alpha_\gamma$ 和方位 $\delta\alpha_\psi$ 偏角,记偏差角矢量 $\alpha = [\delta\alpha_0 \quad \delta\alpha_\gamma \quad \delta\alpha_\psi]^T$ 。其中 $\delta\alpha_\gamma$ 不影响里程计的速度测量值, $\delta\alpha_0$ 对里程计的速度测量值影响远远小于 $\delta\alpha_\psi$,里程计刻度系数误差可表示为 δK_D ,地球自转角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$,载体绕地球运动产生的角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$,加速度计测量的比力记为 \mathbf{f}_{sf}^b ,方向余弦姿态阵记为 \mathbf{C}_b^m ,纯惯导的位置误差和航位推算的位置分别记为 \mathbf{p} 和 \mathbf{p}_D ,载车真实位置记为 \mathbf{p}_{real} ,纯惯导的姿态误差记为 Φ ,纯惯导的速度误差记为 $\delta \mathbf{v}^n$,纯惯导的纬度误差和经度误差分别记为 δL 和 $\delta \lambda$,航位推算的纬度误差和经度误差分别记为 δL_D 和 $\delta \lambda_D$,设计如下16维惯导/里程计组合导航误差模型:

$$[0027] \quad \mathbf{X}_{SINS/DR} = [\phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \delta v_E^n \quad \delta v_N^n \quad \delta L \quad \delta \lambda \quad \varepsilon_E^b \quad \varepsilon_N^b \quad \varepsilon_U^b \quad \nabla_E^b \quad \nabla_N^b \quad \delta L_D \quad \delta \lambda_D \quad \delta \alpha_\psi \quad \delta K_D]^T$$

$$[0028] \quad \mathbf{F}_{SINS/DR} = \begin{bmatrix} -(\boldsymbol{\omega}_m^n \times) & \mathbf{M}_1(:,1:2) & \mathbf{M}_2(:,1:2) & -\mathbf{C}_b^n & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ (\mathbf{f}_m^n \times) & \mathbf{M}_3(1:2,1:2) & \mathbf{M}_4(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{C}_b^n(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{M}_5(1:2,1:2) & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 3} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 2} & \mathbf{0}_{3 \times 1} & \mathbf{0}_{3 \times 1} \\ \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 1} & \mathbf{0}_{2 \times 1} \\ [\mathbf{M}_5 \mathbf{v}_D^n(\times)](1:2,:) & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{0}_{2 \times 3} & \mathbf{0}_{2 \times 2} & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \mathbf{M}_5(1:2,:) \mathbf{M}_u & \mathbf{M}_5(1:2,:) \mathbf{v}_D^n \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 1} \\ \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 3} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 2} & \mathbf{0}_{1 \times 1} & 0 \end{bmatrix}$$

[0029] 其中,

$$[0030] \quad \boldsymbol{\omega}_{ie}^n = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T, \quad \boldsymbol{\omega}_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{v_N^n}{R_M + h} & \frac{v_E^n}{R_N + h} & \frac{v_E^n}{R_N + h} \tan L \end{bmatrix}^T,$$

$$[0031] \quad \boldsymbol{\omega}_{in}^n = \boldsymbol{\omega}_{ie}^n + \boldsymbol{\omega}_{en}^n,$$

$$[0032] \quad \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{1}{R_N+h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N+h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M+h)^2} \\ \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N+h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N+h} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N+h)^2} \end{bmatrix},$$

$$[0033] \quad \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N+h} & \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N+h} \tan L\right) & -\left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N+h}\right) \\ -\left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N+h} \tan L\right) & -\frac{V_U}{R_M+h} & -\frac{V_N}{R_M+h} \\ 2\left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N+h}\right) & \frac{2V_N}{R_M+h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0034] \quad \mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 2\omega_{ie}(V_U \sin L + V_N \cos L) + \frac{V_E V_N}{R_N+h} \sec^2 L & 0 & \frac{V_E V_U - V_E V_N \tan L}{(R_N+h)^2} \\ -\left(2V_E \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E^2}{R_N+h} \sec^2 L\right) & 0 & \frac{V_N V_U}{(R_M+h)^2} + \frac{V_E^2 \tan L}{(R_N+h)^2} \\ -2V_E \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_N^2}{(R_M+h)^2} + \frac{V_E^2}{(R_N+h)^2} \end{bmatrix},$$

$$[0035] \quad \mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_M+h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M+h)^2} \\ \frac{V_E \tan L \sec L}{R_N+h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N+h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0036] \quad \mathbf{M}_\alpha = \mathbf{C}_b^n(:, 1) \mathbf{v}_D;$$

[0037] 纯惯导的位置误差和航位推算的位置误差分别记为 δp 和 δp_D ,设计量测方程矩阵为:

$$[0038] \quad z = p - p_D = (p_{\text{real}} + \delta p) - (p_{\text{real}} + \delta p_D)$$

$$[0039] \quad = \delta p - \delta p_D,$$

$$[0040] \quad \mathbf{H}_{\text{SINS/DR}} = [0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 2} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 3} \quad -\mathbf{I}_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1}].$$

[0041] 优选地,步骤六中,卡尔曼滤波周期为1s,运用卡尔曼滤波修正纯惯性计算速度的计算方法如下:

$$[0042] \quad \mathbf{v}^n = \mathbf{v}^n - \delta \mathbf{v}^n$$

[0043] 修正速度后需要将卡尔曼滤波速度误差估计量 $\delta \mathbf{v}^n$ 置零。

[0044] 优选地,步骤七中,

[0045] 基于组合导航误差模型与量测模型,建立误差状态方程和量测方程,运用卡尔曼

滤波器进行最优估计计算,经过机动后得到里程刻度系数误差 δK_D 和航向安装误差 $\delta\alpha_\psi$,则里程刻度系数和航向安装误差补偿方法如下:

$$[0046] \quad K_D = K_{D_0} - \delta K_D, \alpha_\psi = \alpha_{\psi_0} - \delta\alpha_\psi。$$

[0047] 本发明具有的优点和积极效果是:相比于传统的基于轨迹相似原理的标定方法,除载车起始点外该方法不需要其他外部的标定点位置信息,提高了标定效率;该标定方法不需要停车,只需要进行适当的机动便可进行实时标定;相比于现有的基于卡尔曼滤波的的标定方法,该方法针对惯性/里程计组合导航系统的主要误差源,建立了16维滤波模型,更加稳定可靠,并且大大降低了导航计算机的运算负荷。

附图说明

- [0048] 图1是本发明一个实施例惯性/里程计组合导航在线标定的原理框图;
- [0049] 图2是本发明一个实施例惯性/里程计组合导航在线标定的总体流程图;
- [0050] 图3是本发明一个实施例载体运动轨迹仿真图;
- [0051] 图4是本发明一个实施例里程系数误差估计曲线;
- [0052] 图5是本发明一个实施例航向安装误差估计曲线;
- [0053] 图6是本发明一个实施例航位推算水平定位误差曲线;
- [0054] 图7是本发明一个实施例在线自标定水平定位误差曲线。

具体实施方式

[0055] 下面结合附图对本发明的一个实施例做出说明。

[0056] 本发明提出一种工程适用的车载惯性/里程计组合导航在线标定方法,实现里程刻度系数和里程计安装误差的在线标定;解决目前在使用过程中里程刻度系数和里程计安装误差发生变化而影响定位精度的问题。

[0057] 如图1图2所示,本发明是一种车载惯性/里程计组合导航在线标定方法,利用惯导系统和里程计实现里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定,该在线标定方法包括以下步骤:

[0058] 步骤0:将惯组和里程计通过过渡板安装到载车上,系统上电启动;

[0059] 步骤1:装订初始参数,包括初始的经度、纬度、高度、里程计刻度系数、里程计安装误差角初值至导航计算机;

[0060] 步骤2:采集陀螺和加速度计的输出数据,对采集到的陀螺和加速度计数据进行处理,在载车怠速条件下,采用惯性系对准的方法完成系统的粗对准,以确定载体的姿态角的粗略值,粗对准时间为2分钟,随后采用卡尔曼滤波技术完成精对准,精对准时间为3分钟;

[0061] 步骤3:对准模式完成后进入惯性/里程组合导航模式,对卡尔曼滤波器参数进行初始化;

[0062] 步骤4:进行纯惯性解算,将采集里程计脉冲信号转化为位移信息,结合纯惯导解算的姿态信息进行航位推算;

[0063] 步骤5:根据陀螺加表数据和导航信息计算状态转移矩阵和量测矩阵,将计算得到的纯惯性位置和航位推算位置作差得到滤波观测量;

[0064] 步骤6:在滤波时刻进行卡尔曼滤波,将速度误差的状态估计结果实时修正 纯惯导的速度信息;

[0065] 步骤7:经过一段时间的机动后,可以实现里程刻度系数误差和航向安装误差的在线标定。

[0066] 其中,坐标系定义如下:

[0067] n:导航坐标系 $ox_ny_nz_n$,东北天地理坐标系,x轴指东,y轴指北,z轴指天;b:载体坐标系 $ox_by_bz_b$,x轴指载体的右方,y轴指载体的前方,z轴指载体的上方;m:里程计理想测量坐标系 $ox_my_mz_m$,x轴指载车的右方,y轴指载车的前方,z轴指载车的上方;

[0068] 所述步骤4中,航位推算具体实现方法如下:

[0069] 里程计的速度输出在m系上可以表示为:

$$[0070] \quad \mathbf{v}_D^m = [0 \quad v_D \quad 0]^T$$

[0071] 其中, v_D 为里程仪测得的前向速度大小,右向和天向速度均为零,可视为 载车正常行驶时的速度约束条件。

[0072] 假设b系与m系的同名坐标轴重合,通过惯性测量装置中的陀螺组合可以实时计算载车的姿态矩阵 \mathbf{C}_b^n ,利用 \mathbf{C}_b^n 对 \mathbf{v}_D^m 转换可得在导航坐标系下里程仪速度输出,即:

$$[0073] \quad \mathbf{v}_D^n = \mathbf{C}_b^n \mathbf{v}_D^m$$

[0074] 航位推算位置更新算法如下:

$$[0075] \quad \dot{\mathbf{p}}_D = \mathbf{M}_5 \mathbf{v}_D^n = \begin{bmatrix} 0 & 1/R_{MhD} & 0 \\ \sec L/R_{NhD} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{DE} \\ v_{DN} \\ v_{DU} \end{bmatrix}$$

[0076] 其中, $\mathbf{p}_D = [L_D \quad \lambda_D \quad h_D]^T$, L_D 、 λ_D 和 h_D 分别为航位推算的地理纬度、经度和 高度; $R_{MhD} = R_{MD} + h_D$, $R_{NhD} = R_{ND} + h_D$, R_{MD} 和 R_{ND} 分别为使用航位推算地理位置 计算的子午圈和卯酉圈主曲率半径;

[0077] 在航位推算姿态更新算法与捷联惯导更新算法一致,只需将里程计计算速度 代替捷联惯导速度,并以航位推算纬度代替捷联惯导解算纬度。

[0078] 所述步骤5中,根据陀螺加表数据和导航信息计算状态转移矩阵和量测矩阵 的具体实现方法如下:

[0079] 假设从m系至b系存在小量的安装偏差角,即绕车体横轴 ox_m 、纵轴 oy_m 及 竖轴 oz_m 分别存在俯仰 $\delta\alpha_\theta$ 、滚动 $\delta\alpha_\gamma$ 和方位 $\delta\alpha_\psi$ 偏角,记偏差角矢量 $\alpha = [\delta\alpha_\theta \quad \delta\alpha_\gamma \quad \delta\alpha_\psi]^T$ 。其中 $\delta\alpha_\gamma$ 不影响里程计的速度测量值, $\delta\alpha_\theta$ 对里程计的速度测量值影响远远小于 $\delta\alpha_\psi$,里程计刻度系数误差可表示为 δK_D ,地球自转 角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_{ie}^n$,载体绕地球运动产生的角速率记为 $\boldsymbol{\omega}_{en}^n$,加速度计测量的比力记 为 \mathbf{f}_{sf}^b ,方向余弦姿态阵记为 \mathbf{C}_b^n ,纯惯导的位置误差和航位推算的位置分别 记为 \mathbf{p} 和 \mathbf{p}_D ,载车真实位置记为 \mathbf{p}_{real} ,纯惯导的姿态误差记为 $\boldsymbol{\phi}$,纯惯导的速度误差记为 $\delta \mathbf{v}^n$,纯惯导的纬度误差和经度误差分别记为 δL 和 $\delta \lambda$,航位推算的纬度 误差和经度误差分别 记为 δL_D 和 $\delta \lambda_D$ 。为了减小系统内导航计算机的计算负担,忽略天向相关的状态量,设计如下 16维惯导/里程计组合导航误差模型:

$$[0080] \quad \mathbf{X}_{SINS/DR} = [\phi_E \quad \phi_N \quad \phi_U \quad \delta v_E^n \quad \delta v_N^n \quad \delta L_E \quad \delta \lambda_N \quad \varepsilon_E^b \quad \varepsilon_N^b \quad \varepsilon_U^b \quad \nabla_E^b \quad \nabla_N^b \quad \delta L_D \quad \delta \lambda_D \quad \delta \alpha_\psi \quad \delta K_D]^T$$

$$[0081] \quad \mathbf{F}_{SINS/DR} = \begin{bmatrix} -(\omega_m^n \times) & \mathbf{M}_1(:,1:2) & \mathbf{M}_2(:,1:2) & -\mathbf{C}_b^n & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a1} & \theta_{3a1} \\ (\mathbf{f}_y^n \times) & \mathbf{M}_3(1:2,1:2) & \mathbf{M}_4(1:2,1:2) & \theta_{2a3} & \mathbf{C}_b^n(1:2,1:2) & \theta_{2a2} & \theta_{2a1} & \theta_{2a1} \\ \theta_{2a3} & \mathbf{M}_5(1:2,1:2) & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \theta_{2a3} & \theta_{2a2} & \theta_{2a2} & \theta_{2a1} & \theta_{2a1} \\ \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a1} & \theta_{3a1} \\ \theta_{2a3} & \theta_{2a2} & \theta_{2a2} & \theta_{2a3} & \theta_{2a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a1} & \theta_{3a1} \\ [\mathbf{M}_5 \mathbf{v}_D^n(\times)](1:2,:) & \theta_{2a2} & \theta_{2a2} & \theta_{2a3} & \theta_{2a2} & \mathbf{M}_6(1:2,1:2) & \mathbf{M}_5(1:2,:) \mathbf{M}_u & \mathbf{M}_5(1:2,:) \mathbf{v}_D^n \\ \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a1} & \theta_{3a1} \\ \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a3} & \theta_{3a2} & \theta_{3a2} & \theta_{3a1} & 0 \end{bmatrix}$$

[0082] 其中

$$[0083] \quad \omega_{ie}^n = [0 \quad \omega_{ie} \cos L \quad \omega_{ie} \sin L]^T,$$

$$[0084] \quad \omega_{en}^n = \begin{bmatrix} -\frac{v_N^n}{R_M+h} & \frac{v_E^n}{R_N+h} & \frac{v_E^n}{R_N+h} \tan L \end{bmatrix}^T,$$

$$[0085] \quad \omega_{in}^n = \omega_{ie}^n + \omega_{en}^n,$$

$$[0086] \quad \mathbf{M}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{R_M+h} & 0 \\ \frac{1}{R_N+h} & 0 & 0 \\ \frac{\tan L}{R_N+h} & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{V_N}{(R_M+h)^2} \\ \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_E}{(R_N+h)^2} \\ \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E \sec^2 L}{R_N+h} & 0 & -\frac{V_E \tan L}{(R_N+h)^2} \end{bmatrix},$$

$$[0087] \quad \mathbf{M}_3 = \begin{bmatrix} \frac{V_N \tan L - V_U}{R_N+h} & \left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N+h} \tan L\right) & -\left(2\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N+h}\right) \\ -\left(2\omega_{ie} \sin L + \frac{V_E}{R_N+h} \tan L\right) & -\frac{V_U}{R_M+h} & -\frac{V_N}{R_M+h} \\ 2\left(\omega_{ie} \cos L + \frac{V_E}{R_N+h}\right) & \frac{2V_N}{R_M+h} & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0088] \quad \mathbf{M}_4 = \begin{bmatrix} 2\omega_{ie}(V_U \sin L + V_N \cos L) + \frac{V_E V_N}{R_N+h} \sec^2 L & 0 & \frac{V_E V_U - V_E V_N \tan L}{(R_N+h)^2} \\ -\left(2V_E \omega_{ie} \cos L + \frac{V_E^2}{R_N+h} \sec^2 L\right) & 0 & \frac{V_N V_U}{(R_M+h)^2} + \frac{V_E^2 \tan L}{(R_N+h)^2} \\ -2V_E \omega_{ie} \sin L & 0 & -\frac{V_N^2}{(R_M+h)^2} + \frac{V_E^2}{(R_N+h)^2} \end{bmatrix},$$

$$[0089] \quad \mathbf{M}_5 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{1}{R_M + h} & 0 \\ \frac{\sec L}{R_M + h} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{V_N}{(R_M + h)^2} \\ \frac{V_E \tan L \sec L}{R_N + h} & 0 & -\frac{V_E \sec L}{(R_N + h)^2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[0090] \quad \mathbf{M}_\alpha = \mathbf{C}_b^n(:, 1) \mathbf{v}_D$$

[0091] 纯惯导的位置误差和航位推算的位置误差分别记为 δp 和 δp_D ,设计量测方程矩阵为:

$$[0092] \quad z = p - p_D = (p_{\text{real}} + \delta p) - (p_{\text{real}} + \delta p_D)$$

$$[0093] \quad = \delta p - \delta p_D$$

$$[0094] \quad \mathbf{H}_{\text{SINS/DR}} = [0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 2} \quad \mathbf{I}_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 3} \quad 0_{2 \times 3} \quad -\mathbf{I}_{2 \times 2} \quad 0_{2 \times 1} \quad 0_{2 \times 1}]$$

[0095] 所述步骤6中,运用卡尔曼滤波修正纯惯性计算速度的具体实现方法如下:

$$[0096] \quad \mathbf{v}^n = \mathbf{v}^n - \delta \mathbf{v}^n$$

[0097] 修正速度后需要将卡尔曼滤波速度误差估计量 $\delta \mathbf{v}^n$ 置零。

[0098] 所述步骤7中,里程刻度系数和航向安装误差的具体补偿方法如下:

[0099] 基于上述建立的组合导航误差模型与量测模型,建立误差状态方程和量测方程,运用卡尔曼滤波器进行最优估计计算,经过一段时间机动后得到里程刻度系数误差 δK_D 和航向安装误差 $\delta \alpha_\psi$,则里程刻度系数和航向安装误差补偿方法为:

$$[0100] \quad K_D = K_D - \delta K_D, \alpha_\psi = \alpha_\psi - \delta \alpha_\psi。$$

[0101] 相比于传统的基于轨迹相似原理的标定方法,除载车起始点外该方法不需要其他外部的标定点位置信息,提高了标定效率;

[0102] 相比于传统的基于轨迹相似原理的标定方法,该标定方法不需要停车,只需要进行适当的机动便可进行实时标定;

[0103] 相比于现有的基于卡尔曼滤波的的标定方法,该方法针对惯性/里程计组合导航系统的主要误差源,建立了16维滤波模型,更加稳定可靠,并且大大降低了导航计算机的运算负荷。

[0104] 本发明的方法解决了在复杂环境下,惯性/里程计组合导航系统由于里程刻度系数和航向安装误差的变化造成的定位精度降低的问题,显著提高了惯性/里程计组合导航系统的可靠性。

[0105] 下面通过实施例对本发明进一步说明。

[0106] 实施例:

[0107] 按照上述步骤进行仿真,仿真条件设置如下:

[0108] (1) 传感器相关参数设置如表1所示;

[0109] (2) 载体运动轨迹参数设置如表2所示

[0110] (3) 载体运动轨迹三维图如图3所示;

[0111] 表1传感器相关参数设置

| 传感器 | 内容 | 指标 |
|------|------------|-----------|
| 陀螺仪 | 陀螺常值漂移 | 0.01°/h |
| | 陀螺随机游走系数 | 0.002°/√h |
| 加速度计 | 加速度计常值零偏 | 50 ug |
| | 加速度计随机游走系数 | 5 ug/√hz |
| 里程计 | 里程刻度系数误差 | 0.01 |
| | 航向安装误差 | 5min |

[0113] 表2仿真轨迹参数设置

| 轨迹设置时段 | 运动状态 | 轨迹设置时段 | 运动状态 |
|-----------|-----------|-------------|----------|
| 0 | 初始化 | 600s~625s | 爬坡 |
| 0~100s | 静止 | 625s~650s | 恢复到水平位置 |
| 100s~120s | 加速到 20m/s | 650s~840s | 匀速行驶 |
| 120s~200s | 匀速行驶 | 840s~865s | 下坡 |
| 200s~210s | 右转 90° | 865s~890s | 恢复到水平位置 |
| 210s~300s | 匀速行驶 | 890s~980s | 匀速行驶 |
| 300s~310s | 左转 90° | 980s~990s | 右转 |
| 310s~340s | 匀速行驶 | 990s~1020s | 匀速行驶 |
| 340s~355s | 下坡 | 1020s~1035s | 下坡 |
| 355s~370s | 恢复到水平位置 | 1035s~1050s | 恢复到水平位置 |
| 370s~440s | 匀速行驶 | 1050s~1120s | 匀速行驶 |
| 440s~455s | 爬坡 | 1120s~1135s | 爬坡 |
| 455s~470s | 恢复到水平位置 | 1135s~1150s | 恢复到水平位置 |
| 470s~500s | 匀速行驶 | 1150s~1180s | 匀速行驶 |
| 500s~510s | 右转 | 1180s~1190s | 减速到 0m/s |
| 510s~600s | 匀速行驶 | 1190s~1280s | 静止 |

[0116] 里程刻度系数和航向安装误差估计曲线分别如图4和图5所示,估计精度如 表3所示。可以看出本专利提出的在线自标定方案能准确估计出里程计的相关误差系数;航位推算定位结果和在线自标定定位误差曲线如图6图7所示,其中 δX 和 δY 分别表示2000坐标系下X坐标和Y坐标的误差,由表4所示,可以看出相比航位推算而言,在线自标定方案能有效地抑制由于里程计相关误差所引起的定位误差。

[0117] 表3里程计误差参数估计结果

| 里程计误差量 | 设置值 | 估计值 | 估计精度 |
|-----------------|------|-----------|---|
| | | | $(\frac{ \text{估计值}-\text{设置值} }{\text{设置值}} \times 100\%)$ |
| δK_D | 0.01 | 0.0100036 | 99.964% |
| δa_ψ | 5min | 4.928 | 98.564% |

[0119] 表4水平定位结果

| 定位方法 | δX | δY | 终点定位误差 (m) |
|-------|------------|------------|------------|
| 航位推算 | 36.7 | 114.3 | 151 |
| 在线自标定 | -1.2 | -0.8 | 2 |

[0121] 以上对本发明的实施例进行了详细说明,但所述内容仅为本发明的较佳实施例,不能被认为用于限定本发明的实施范围。凡依本发明申请范围所作的均等变化与改进等,均应仍归属于本发明的专利涵盖范围之内。

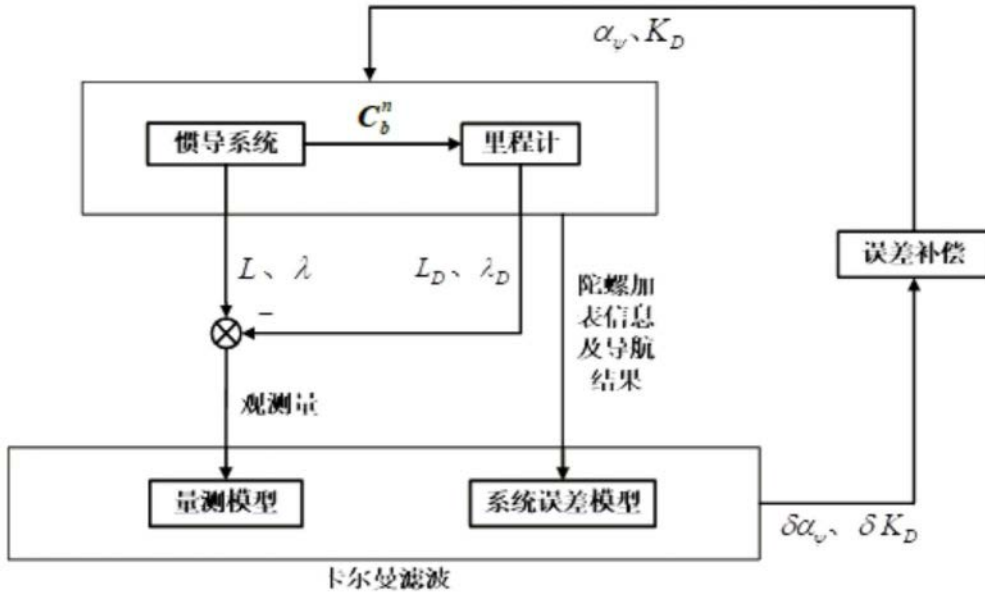


图1

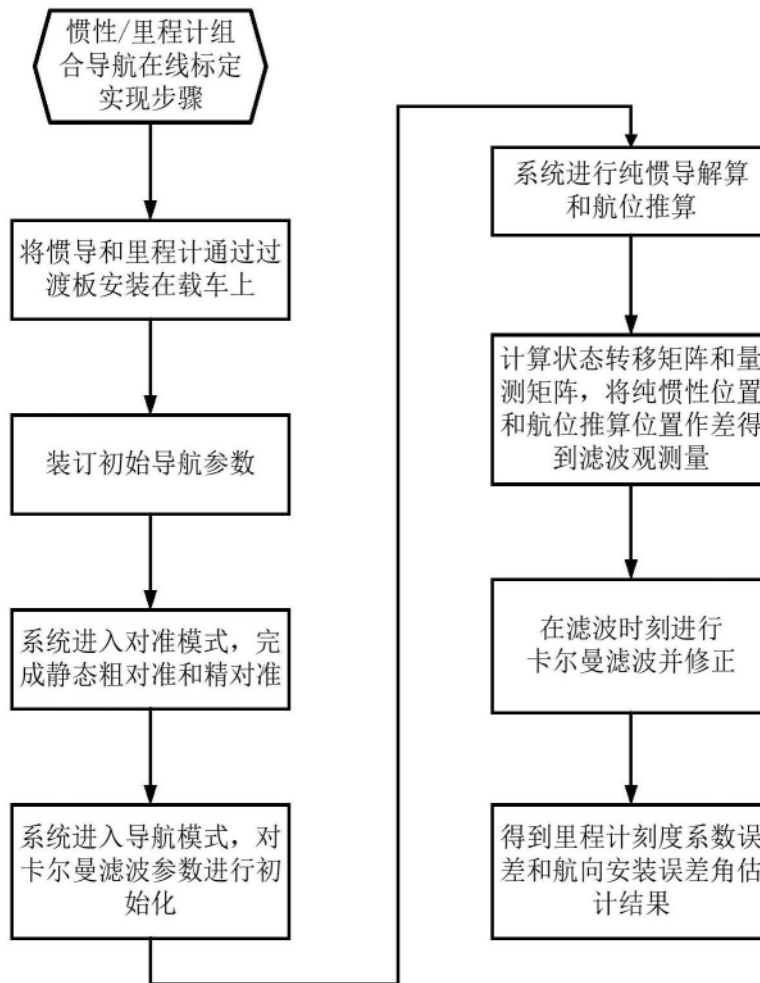


图2

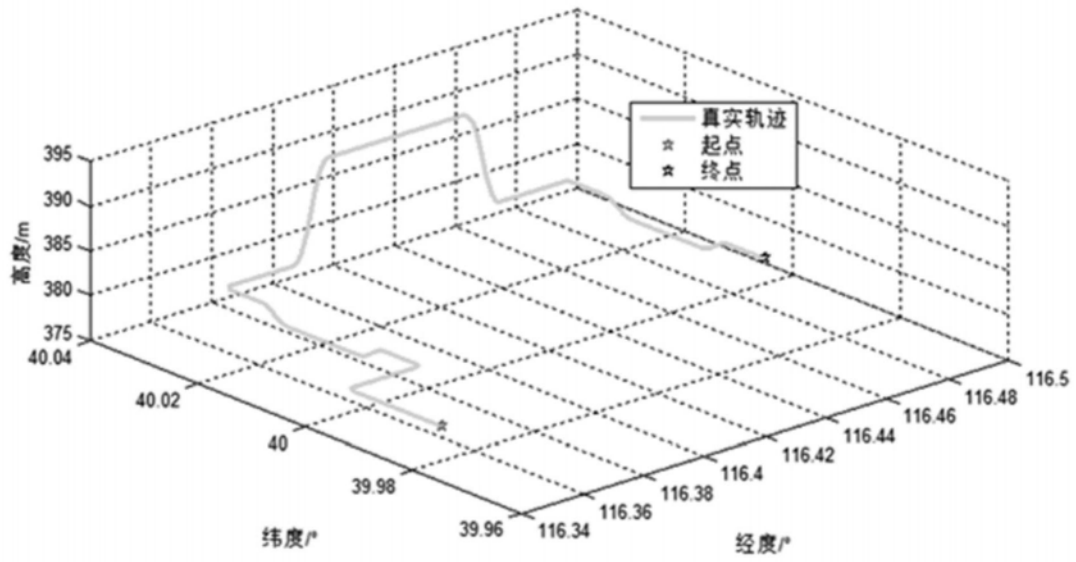


图3

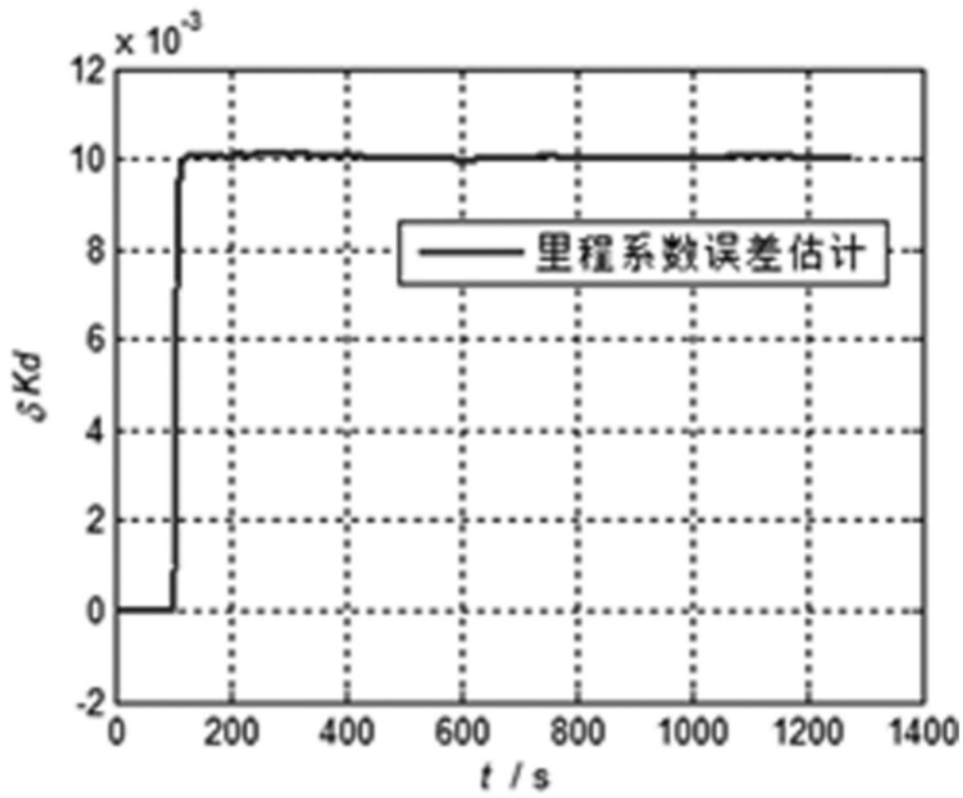


图4

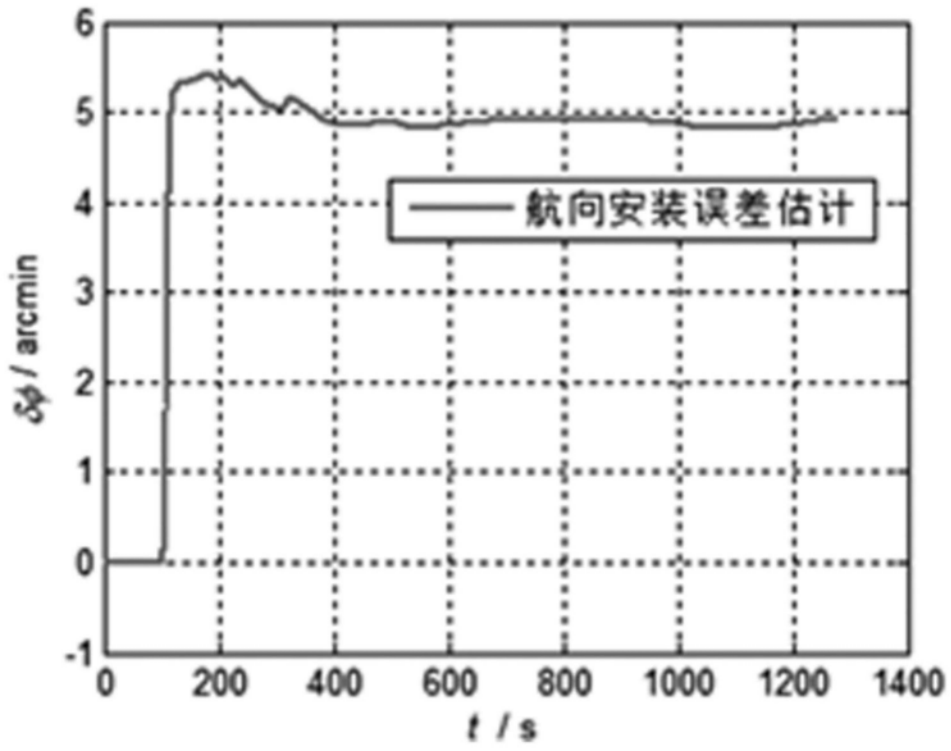


图5

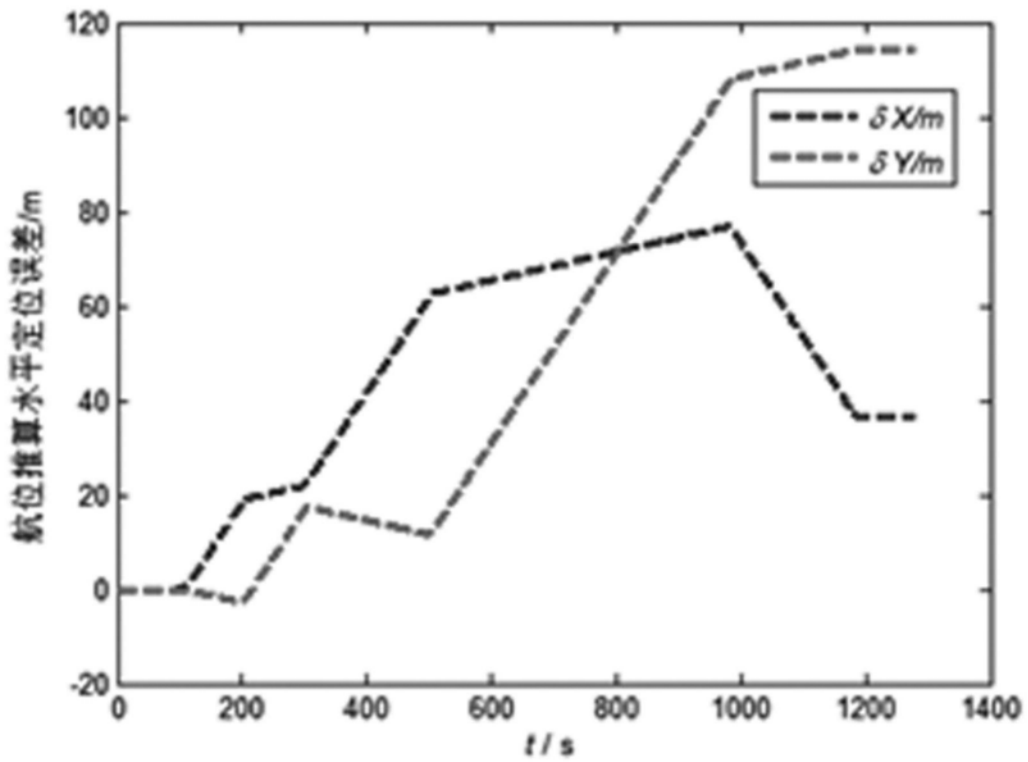


图6

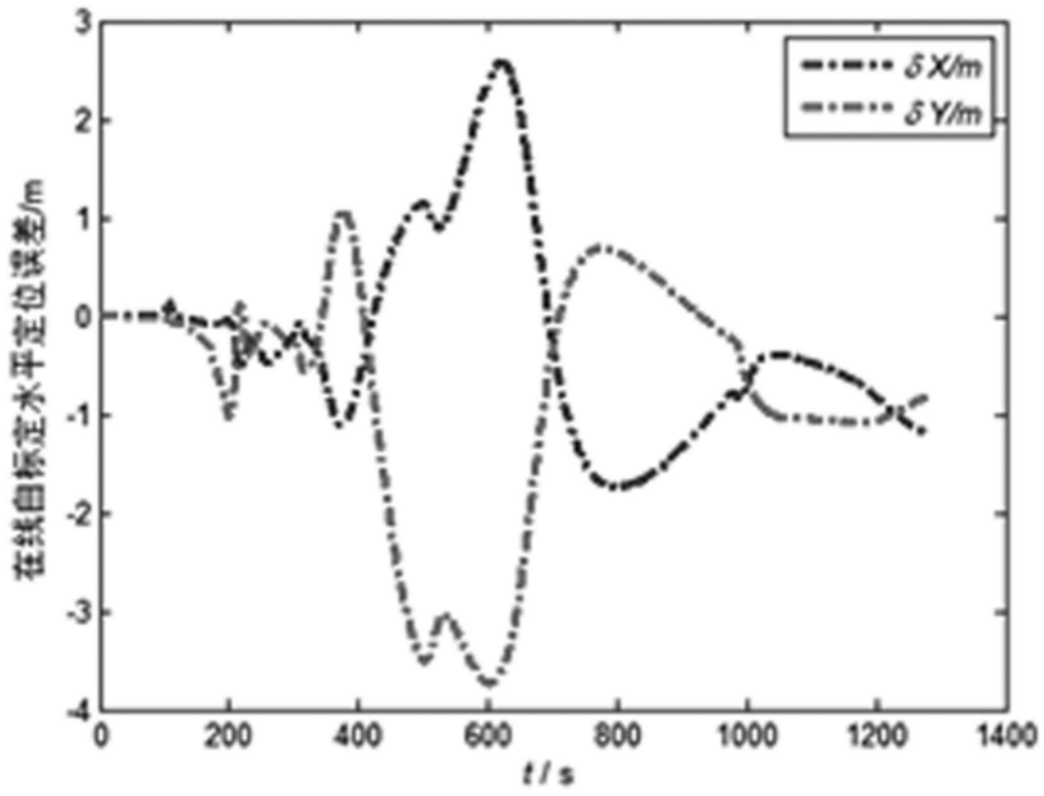


图7