

课程编号：

课程性质：必修

## 纯惯导解算报告

学院： 测绘学院

专业： 导航工程

班级： 2015 级导航班

教师： 牛小骥

学号： 2015301610103

姓名： 韩新娟

2017-12-8 至 2018-1-4

# 目录

一、实验重述 .....	1
1.1 实验背景 .....	1
1.2 实验信息 .....	1
1.3 实验要求 .....	1
二、惯导机械编排 .....	2
2.1 姿态更新算法 .....	2
2.2 速度更新算法 .....	6
2.3 位置更新算法 .....	8
三、解算结果及结果分析 .....	13
3.1 纯惯导解算结果 .....	13
3.2 与参考结果的差值曲线图及差异最大值 .....	17
3.3 实验结果分析 .....	22

# 一、实验重述

## 1.1 实验背景

一内含 IMU 组件的运动载体运动若干时长，获得了一组 IMU 原始数据，存于二进制文件中，并且已有利用精度较高的算法解算出的相应的纯惯导参考数据，存于二进制文件中，用于纯惯导算法验证。

## 1.2 实验信息

- IMU的b-frame为前右下；
- IMU 原始数据格式：  
GPS 周秒、Gx[rad]、Gy[rad]、Gz[rad]、Ax[m/s]、Ay[m/s]、Az[m/s]  
(G 代表陀螺，A 代表加速度计)；
- 纯惯导参考数据格式：  
GPS 周秒(s)、纬度[deg]、经度[deg]、高度(m)、北向速度[m/s]、东向速度[m/s]、  
垂向速度[m/s]、横滚角[deg]、俯仰角[deg]、航向角[deg]；
- 运动初始时间：91620.0；
- 载体初始位置（纬经高）：23.1373950708[deg] 113.3713651222[deg] 2.175 [m]；
- 载体初始速度：0.0 0.0 0.0 [m/s]；
- 载体初始姿态(roll,pitch,heading)：  
0.0107951084511778 [deg] -2.14251290749072[deg] -75.7498049314083[deg]。

## 1.3 实验要求

- 基于已学的纯惯导算法，在 MATLAB 等编程环境下编写纯惯性导航程序，以实现纯惯导解算；
- 跟参考结果的差异应满足如下指标:经纬度差异在  $1.0 \times 10^{-6}$  deg 左右，高程差异小于 0.2m，速度差异小于 0.0001m/s,姿态角差异在  $1.0 \times 10^{-7}$ deg 左右；

## 二、惯导机械编排

### 2.1 姿态更新算法

#### 2.1.1 预备知识与基础理论

##### 2.1.1.1 姿态四元数预备知识

四元数的表示形式为：

$$q = q_0 + q_1i + q_2j + q_3k$$

一个坐标系到另一个坐标系的变换可以视为绕一个定义在参考坐标系中的等效转轴的  
单次转动。若用 $\mu$ 表示等效转轴方向的单位向量， $\theta$ 表示动坐标系绕等效转轴转动的角度，  
则动坐标系的姿态完全可由 $\mu$ 和 $\theta$ 两个参数确定，即可用 $\mu$ 和 $\theta$ 构造一个四元数（用符号 $q$ 表  
示）来描述动系姿态， $q$ 即为姿态四元数：

$$q_b^R = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \\ d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\mu/2) \\ (\mu_x/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_y/\mu)\sin(\mu/2) \\ (\mu_z/\mu)\sin(\mu/2) \end{bmatrix}, \mu = \begin{bmatrix} \mu_x \\ \mu_y \\ \mu_z \end{bmatrix}, \mu = \|\mu\|$$

##### 2.1.1.2 姿态四元数与方向余弦矩阵的关系

姿态四元数可用于矢量投影变换，假定矢量 $r^b$ 绕定点0和某一轴转动了一个角度 $\theta$ ，  
转动后的矢量用 $r^R$ 表示，则四元数用于矢量投影变换的公式为：

$$\begin{bmatrix} 0 \\ r^R \end{bmatrix} = q_b^R \otimes \begin{bmatrix} 0 \\ r^b \end{bmatrix} \otimes q_b^{R*}$$

化简上式可得：

$$\begin{bmatrix} x^R \\ y^R \\ z^R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{bmatrix}$$

故若已知姿态四元数：

$$\mathbf{q}_b^n = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

即可得方向余弦矩阵：

$$\mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

### 2.1.1.3 姿态四元数与等效旋转矢量的关系

等效旋转矢量法的理论与思想与四元数理论类似：一个坐标系到另一个坐标系的变换可以多次转动来完成，也通过绕一个定义在参考坐标系中的矢量的单次转动来实现。这个旋转矢量是一个三元素的向量，旋转矢量的方向给出了转动轴的方向，旋转矢量的模为转动角度的大小，转动符合右手旋转定则。

设描述转动的旋转矢量为  $\boldsymbol{\phi} = \varphi \vec{\mathbf{n}}$ ，即动坐标系沿  $\vec{\mathbf{n}}$  转过角度  $\varphi$  时，此时对应的姿态四元数为：

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\varphi}{2} \\ \frac{\phi}{\varphi} \sin \frac{\varphi}{2} \end{bmatrix}$$

### 2.1.1.4 等效旋转矢量的求解

常用到的等效旋转矢量的近似微分方程：

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_{Rb}^b \approx \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b + \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_{Rb}^b \times \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b + \frac{1}{12} \boldsymbol{\phi}_{Rb}^b \times (\boldsymbol{\phi}_{Rb}^b \times \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b)$$

忽略高阶项，此微分方程可进一步近似为：

$$\dot{\boldsymbol{\phi}}_{Rb}^b = \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b + \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_{Rb}^b \times \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b$$

解等效旋转矢量微分方程得：

$$\boldsymbol{\phi}_{Rb}^b(t_k) = \boldsymbol{\phi}_{Rb}^b(t_{k-1}) + \int_{t_{k-1}}^{t_k} [\boldsymbol{\omega}_{Rb}^b(\tau) + \frac{1}{2} \boldsymbol{\phi}_{Rb}^b(\tau) \times \boldsymbol{\omega}_{Rb}^b(\tau)] d\tau$$

被积函数难以进一步化简，只能作不同的假设处理。本文采用双子样假设，即假设在相邻

两个积分周期  $[t_{k-2}, t_k]$  内， $b$  系相对于  $R$  系的旋转角速度向量随时间线性变化，即：

$$\omega_{\text{Rb}}^{\text{b}}(t) = \mathbf{a} + \mathbf{b} \cdot (\mathbf{t}_k - \mathbf{t}_{k-1})$$

解算系数 a, b, 代入旋转矢量积分式可得旋转矢量的更新方程为:

$$\phi_{\text{Rb}}^{\text{b}}(\mathbf{t}_k) = \Delta\theta_k + \frac{1}{12} \Delta\theta_{k-1} \times \Delta\theta_k$$

## 2.1.2 姿态更新的等效旋转矢量法

### 1. 已知变量:

$\mathbf{q}_{\text{b}(k-1)}^{\text{n}(k-1)}$ : 上一历元的姿态四元数

$\Delta\theta_{k-1}$ : 上一历元的陀螺角速度增量输出

$\Delta\theta_k$ : 当前历元的陀螺角增量输出

### 2. 更新步骤

- 等效旋转矢量法高频更新 b 系:

$$\phi_k = \Delta\theta_k + \frac{1}{12} \Delta\theta_{k-1} \times \Delta\theta_k$$

$$\mathbf{q}_{\text{b}(k)}^{\text{b}(k-1)} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\|\phi_k\|}{2} \\ \frac{\phi_k}{\|\phi_k\|} \sin \frac{\|\phi_k\|}{2} \end{bmatrix}$$

- 等效旋转矢量法低频更新 n 系:

$$\zeta_k = (\omega_{\text{en},k-1/2}^{\text{n}} + \omega_{\text{ie},k-1/2}^{\text{n}})(\mathbf{t}_k - \mathbf{t}_{k-1})$$

$$\omega_{\text{en}}^{\text{n}} = \begin{bmatrix} \frac{v_E}{R_N + h} & -\frac{v_N}{R_M + h} & -\frac{v_E \tan \varphi}{R_N + h} \end{bmatrix}^T$$

$$\omega_{\text{ie}}^{\text{n}} = [\omega_e \cos \varphi \quad 0 \quad -\omega_e \sin \varphi]^T$$

$$\mathbf{q}_{\text{n}(k-1)}^{\text{n}(k)} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\|\zeta_k\|}{2} \\ -\frac{\zeta_k}{\|\zeta_k\|} \sin \frac{\|\zeta_k\|}{2} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 1 - \frac{1}{8} \|\zeta_k\|^2 \\ -\frac{1}{2} \zeta_k \end{bmatrix}$$

➤ 符号说明

子午圈曲率半径：  $R_M = \frac{a(1-e^2)}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{3/2}}$  ,

卯酉圈曲率半径：  $R_N = \frac{a}{(1-e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$  ,

$\varphi$ ：当地纬度，

$e$ ：地球椭球第一偏心率，

$h$ ：当地海拔高，

$V_E$ ：载体在东方向的投影速度，

$V_N$ ：载体在北方向的投影速度。

➤ 算法说明

$[t_{k-1}, t_k]$  周期内的中间速度  $v_{(k-1/2)}$ 、中间纬度  $\varphi_{(k-1/2)}$  和中间高程  $h_{(k-1/2)}$  由

$t_{k-2}$  和  $t_{k-1}$  时刻的值线性外推得到。

- 计算当前时刻的姿态四元数：

$$q_{b(k)}^{n(k)} = q_{n(k-1)}^{n(k)} \otimes q_{b(k-1)}^{n(k-1)} \otimes q_{b(k)}^{b(k-1)}$$

- 对更新后的姿态四元数进行归一化处理

$$q_i = \frac{\hat{q}_i}{\sqrt{\hat{q}_0^2 + \hat{q}_1^2 + \hat{q}_2^2 + \hat{q}_3^2}}, i = 0, 1, 2, 3$$

- 姿态四元数转姿态矩阵  $C_b^n$

$$C_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 - q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

- 根据姿态矩阵  $C_b^n$  计算姿态角，完成姿态更新

$$C_b^n = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix}$$

$$\text{航向角 } \psi = \tan^{-1} \frac{C_{21}}{C_{11}} (-\pi \leq \psi \leq \pi)$$

$$\text{横滚角 } \theta = \tan^{-1} \frac{-C_{11}}{\sqrt{C_{32}^2 + C_{33}^2}} \quad (-\pi/2 \leq \theta \leq \pi/2)$$

$$\text{横滚角 } \phi = \tan^{-1} \frac{C_{32}}{C_{33}} \quad (-\pi \leq \phi \leq \pi)$$

## 2.2 速度更新算法

速度更新算法的实质是根据速度微分方程

$$\left. \frac{dv_e}{dt} \right|_n^n = C_b^n f^b - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times v_e^n + g_l^n, \quad ,$$

推导当前时刻速度与前一时刻速度之间的递推关系。

首先对上式进行时间积分，得

$$v_k^n = v_{k-1}^n + \Delta v_{f,k}^n + \Delta v_{g/cor,k}^n,$$

其中：  $v_{k-1}^n$  为上一历元的速度，  $\Delta v_{f,k}^n$  为比力积分项，  $\Delta v_{g/cor,k}^n$  为重力哥氏积分项。

### 2.2.1 比力积分项

$$\Delta v_{f,k}^n = \int_{t_{k-1}}^{t_k} C_b^n f^b dt = \int_{t_{k-1}}^{t_k} C_{n(k-1)}^{n(t)} C_{b(k-1)}^{n(k-1)} C_{b(t)}^{b(k-1)} f^b dt$$

其中  $C_{n(k-1)}^{n(t)}$  为缓变项，  $C_{b(t)}^{b(k-1)}$  为快速变化项。

#### 1. n 系比力积分项

对于 n 系变换矩阵  $C_{n(k-1)}^{n(t)}$ ，首先近似处理为

$$C_{n(k-1)}^{n(t)} = \frac{1}{2} (C_{n(k-1)}^{n(k)} + C_{n(k-1)}^{n(k-1)}) = \frac{1}{2} (C_{n(k-1)}^{n(k)} + I)$$

因为  $C_{n(k-1)}^{n(t)}$  为缓变项，n 系的姿态变化非常缓慢和微小，故  $C_{n(k-1)}^{n(k)}$  近似为：

$$C_{n(k-1)}^{n(k)} \approx I - (\zeta_{k-1,k} \times)$$

$$\zeta_{k-1,k} = \int_{t_{k-1}}^{t_k} (\omega_{en}^n + \omega_{ie}^n) dt \approx (\omega_{en,k-1/2}^n + \omega_{ie,k-1/2}^n)(t_k - t_{k-1})$$

综上，比力积分项可整理为：



$$\Delta \mathbf{v}_{f,k}^n = \left[ \mathbf{I} - (0.5\zeta_{k-1,k} \times) \right] \mathbf{C}_{b(k-1)}^{n(k-1)} \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathbf{C}_{b(t)}^{b(k-1)} \mathbf{f}^b dt$$

## 2. b 系比力积分项

$$b \text{ 系比力积分项即为上式中的 } \int_{t_{k-1}}^{t_k} \mathbf{C}_{b(t)}^{b(k-1)} \mathbf{f}^b dt$$

假设在  $[t_{k-1}, t_k]$  时段内角速度观测量和比力观测值均随时间线性变化，采用速度更新的双子样算法，得到 b 系比力积分项：

$$\mathbf{v}_{f,k}^{b(k-1)} = \Delta \mathbf{v}_k + \frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\theta}_k \times \Delta \mathbf{v}_k + \frac{1}{12} (\Delta \boldsymbol{\theta}_{k-1} \times \Delta \mathbf{v}_k + \Delta \mathbf{v}_{k-1} \times \Delta \boldsymbol{\theta}_k)$$

其中  $\Delta \mathbf{v}_{k-1}$ 、 $\Delta \mathbf{v}_k$  分别为加速度计输出的第  $k-1$  历元和第  $k$  历元的速度增量； $\Delta \boldsymbol{\theta}_{k-1}$ 、 $\Delta \boldsymbol{\theta}_k$  分别为陀螺仪输出的第  $k-1$  历元和第  $k$  历元的角度增量

## 3. 比力积分项的最终化简形式

综上所述，比例积分项整理为

$$\Delta \mathbf{v}_{f,k}^n = \left[ \mathbf{I} - (0.5\zeta_{k-1,k} \times) \right] \mathbf{C}_{b(k-1)}^{n(k-1)} \mathbf{v}_{f,k}^{b(k-1)}$$

其中

$$\zeta_{k-1,k} = (\omega_{en,k-1/2}^n + \omega_{ie,k-1/2}^n)(t_k - t_{k-1})$$

$$\mathbf{v}_{f,k}^{b(k-1)} = \Delta \mathbf{v}_k + \frac{1}{2} \Delta \boldsymbol{\theta}_k \times \Delta \mathbf{v}_k + \frac{1}{12} (\Delta \boldsymbol{\theta}_{k-1} \times \Delta \mathbf{v}_k + \Delta \mathbf{v}_{k-1} \times \Delta \boldsymbol{\theta}_k)$$

## 2.2.2 重力/哥氏积分项

$$\Delta \mathbf{v}_{g/cor,k}^n = \int_{t_{k-1}}^{t_k} [\mathbf{g}_l^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \mathbf{v}_e^n] dt$$

易知在积分周期内被积函数数值随时间变化缓慢，故积分近似为：

$$\Delta \mathbf{v}_{g/cor,k}^n = \left\{ \left[ \mathbf{g}_l^n - (2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times \mathbf{v}_e^n \right]_{t_{k-1/2}} \right\} \cdot (t_k - t_{k-1}),$$

其中  $[t_{k-1}, t_k]$  周期内的中间速度  $\mathbf{v}_{(k-1/2)}$ 、中间纬度  $\varphi_{(k-1/2)}$  和中间高程  $\mathbf{h}_{(k-1/2)}$  由  $t_{k-2}$  和  $t_{k-1}$  时刻的值线性外推得到。

➤ 符号说明

$$\mathbf{g}_l^n = \mathbf{g}^n - \omega_{ie}^n \times (\omega_{ie}^n \times \mathbf{r}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & g_l \end{bmatrix}^T,$$

$$\omega_{ie}^n \Big|_{t_{k-1/2}} = \begin{bmatrix} \omega_e \cos \varphi_{t_{k-1/2}} & 0 & -\omega_e \sin \varphi_{t_{k-1/2}} \end{bmatrix}^T,$$

$$\omega_{en}^n \Big|_{t_{k-1/2}} = \begin{bmatrix} \frac{v_E}{R_N + h} & \frac{-v_N}{R_M + h} & \frac{-v_E \tan \varphi}{R_N + h} \end{bmatrix}^T$$

➤ 补充地球椭球附近一点的正常重力计算算法：

$$g_1 = 9.7803267715 \times (1.0 + 0.0052790414 \times \sin^2 \varphi_{k-1} + 0.0000232718 \times \sin^4 \varphi_{k-1})$$

$$g_2 = (-0.000003087691089 + 0.00000004397731 \times \sin^2 \varphi_{k-1}) \times h_{k-1}$$

$$g_3 = 0.000000000000721 \times h_{k-1}^2$$

$$g_{k-1} = g_1 + g_2 + g_3$$

## 2.3 位置更新算法

### 2.3.1 高程更新算法

位置更新算法首先更新高程。

易知

$$h(t_k) = h(t_{k-1}) - \int_{t_{k-1}}^{t_k} v_D(t) dt$$

假设积分周期内  $v_D$  随时间线性变化，则有：

$$h(t_k) = h(t_{k-1}) - \frac{1}{2} (v_D(t_k) + v_D(t_{k-1})) (t_k - t_{k-1})$$

### 2.3.2 纬度更新算法

位置更新算法其次更新纬度。

积分周期内忽略  $R_M$  随纬度和时间的变化，认为是常值，用上一时刻纬度值计算。高程

$h$  在积分周期内简化为常值， $h$  取积分周期内的平均高程。

$$\varphi(t_k) = \varphi(t_{k-1}) + \frac{1}{2} \frac{v_N(t_k) + v_N(t_{k-1})}{R_M(\varphi(t_{k-1})) + h} (t_k - t_{k-1})$$

### 2.3.3 经度更新算法

位置更新算法最后更新经度。

$$\lambda(t_k) = \lambda(t_{k-1}) + \frac{1}{2} \frac{v_E(t_k) + v_E(t_{k-1})}{(R_N(\bar{\varphi}) + \bar{h}) \cos(\bar{\varphi})} (t_k - t_{k-1})$$

其中

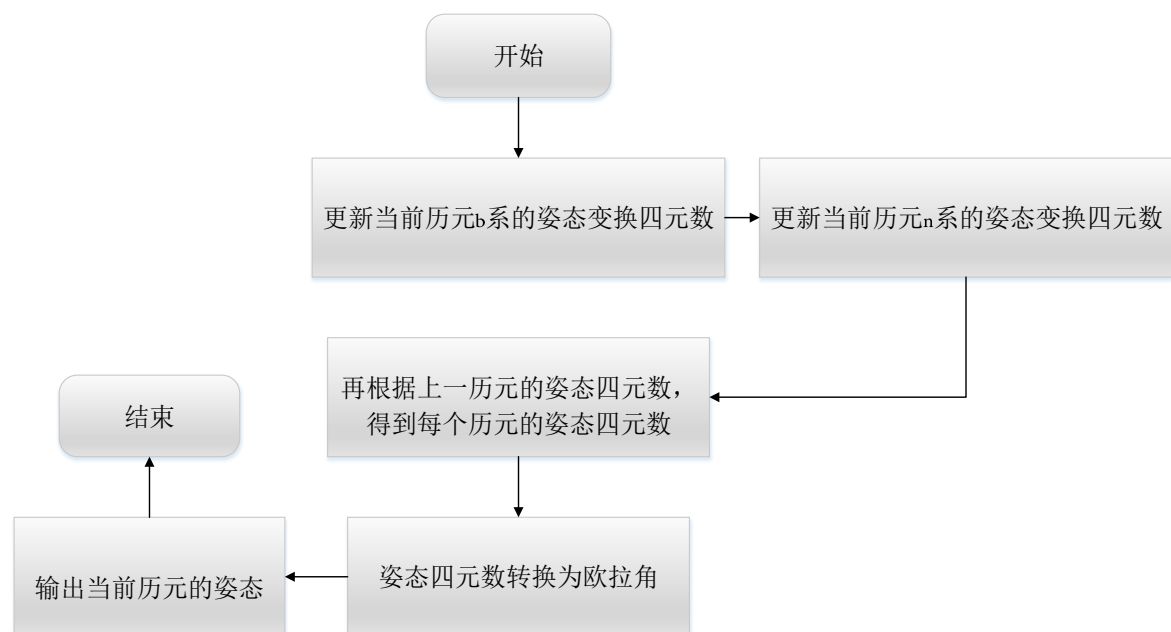
$$\bar{\varphi} = \frac{1}{2} (\varphi(t_k) + \varphi(t_{k-1}))$$

$$\bar{h} = \frac{1}{2} (h(t_k) + h(t_{k-1}))$$

## 三、纯惯导算法实现

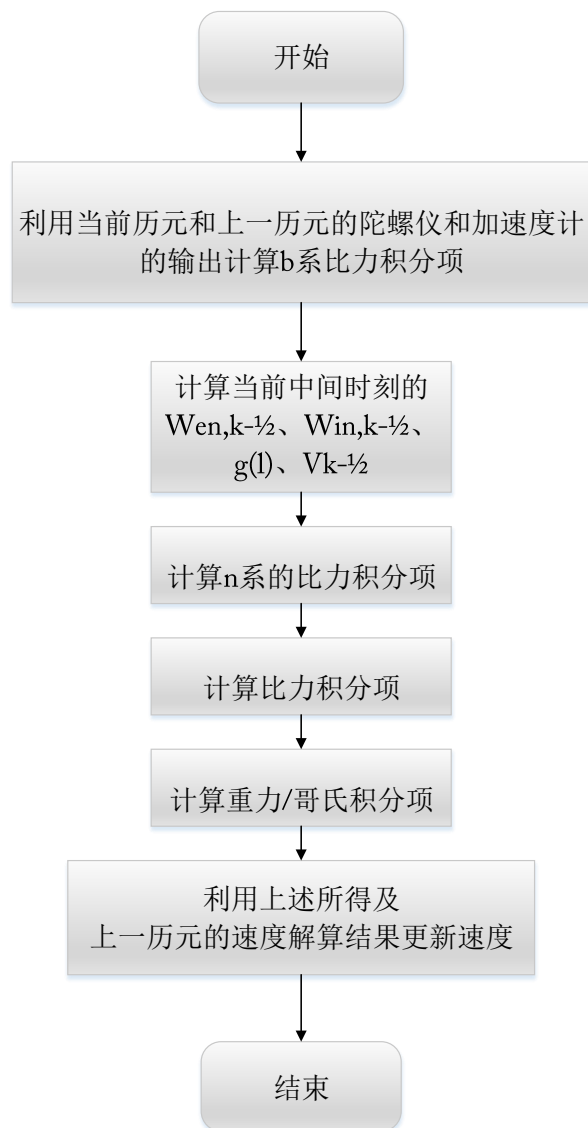
### 3.1 姿态更新算法的求解与实现

在 MATLAB 编程环境下，基于纬度、经度、大地高更新算法，利用上一历元的姿态四元数更新当前历元的姿态数据的具体步骤如下图所示。



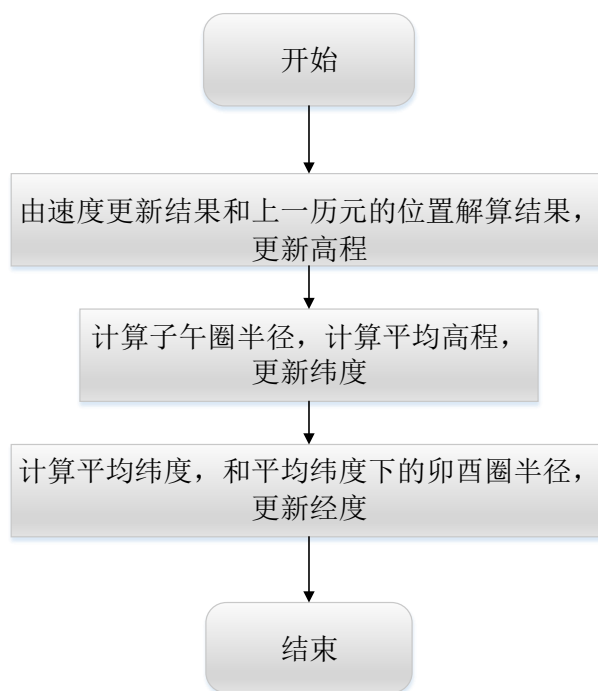
### 3.2 速度更新算法的求解与实现

在 MATLAB 编程环境下，基于北向速度、东向速度、垂向速度的更新算法，利用上一历元的速度解算结果及当前历元和上一历元的陀螺仪和加速度计的输出数据更新当前历元的速度数据的具体步骤如下图所示。



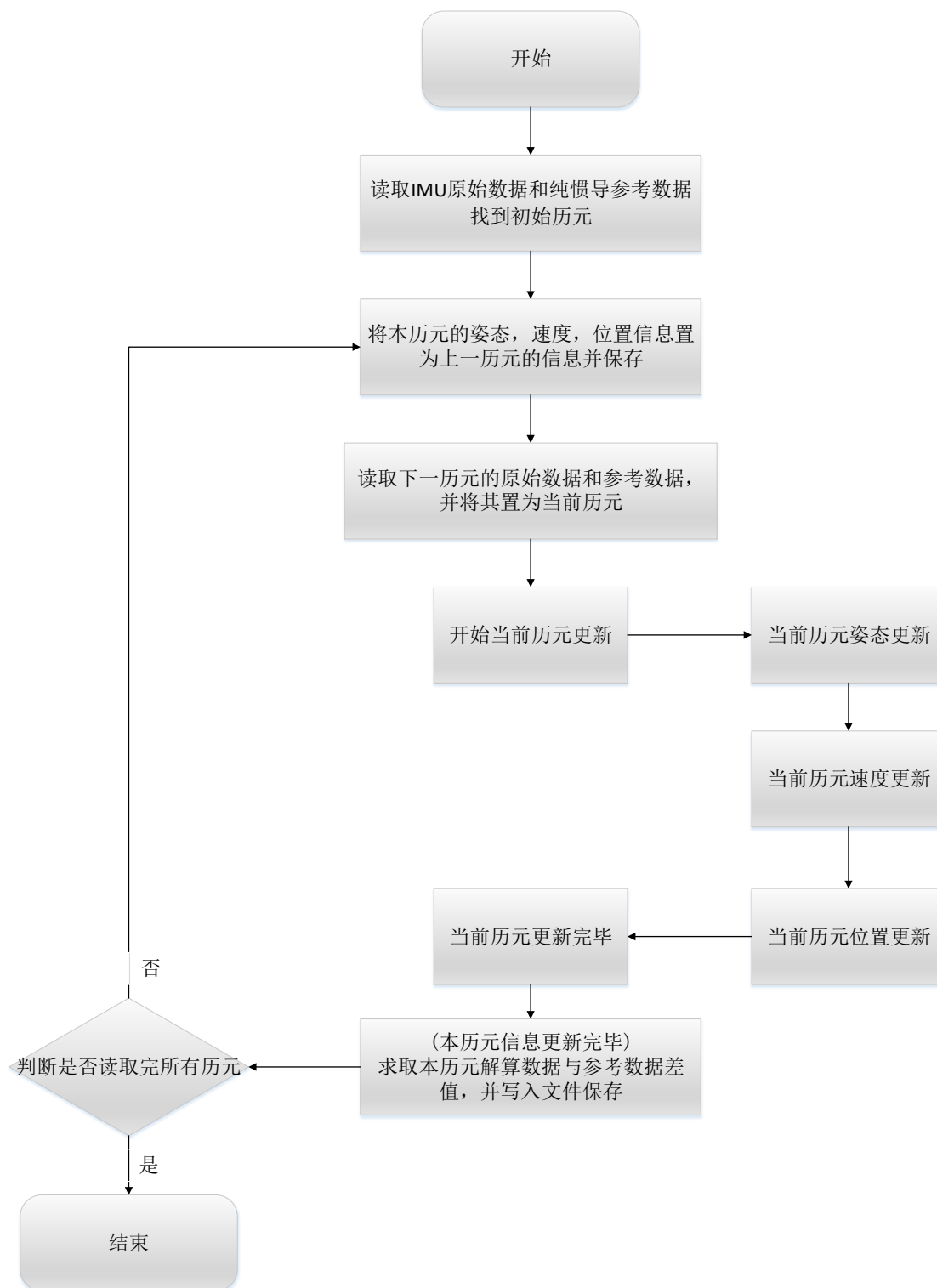
### 3.3 位置更新算法的求解与实现

在 MATLAB 编程环境下，基于横滚角、俯仰角、航向角的更新算法，利用上一历元的速度更新结果和上一历元的位置解算结果更新当前历元的位置数据的具体步骤如下图所示。



### 3.4 整体更新算法的求解与实现

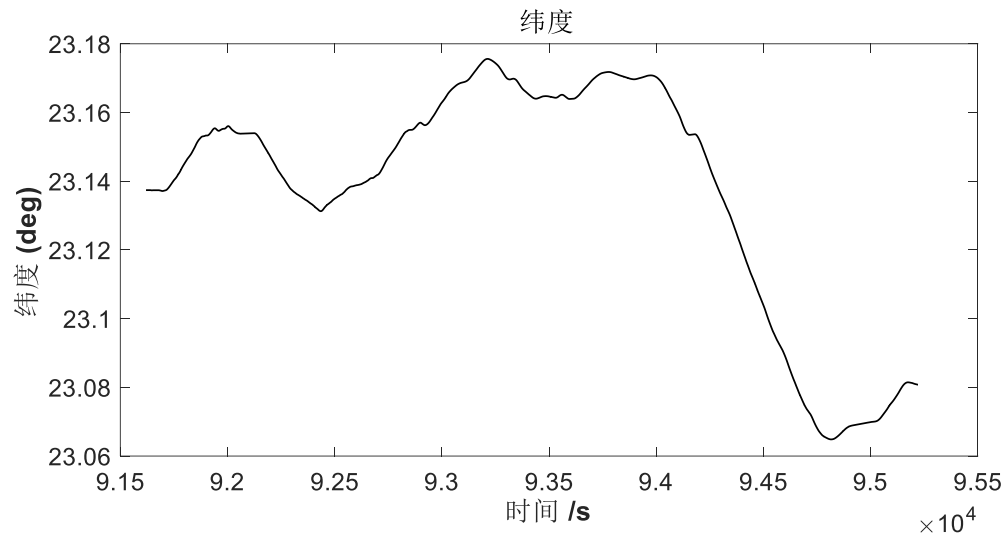
在 MATLAB 编程环境下，基于姿态、速度、位置的更新算法，利用上一历元的解算数据及当前历元和上一历元的陀螺仪和加速度计的输出数据更新当前历元的姿态、速度、位置数据的具体步骤如下图所示。



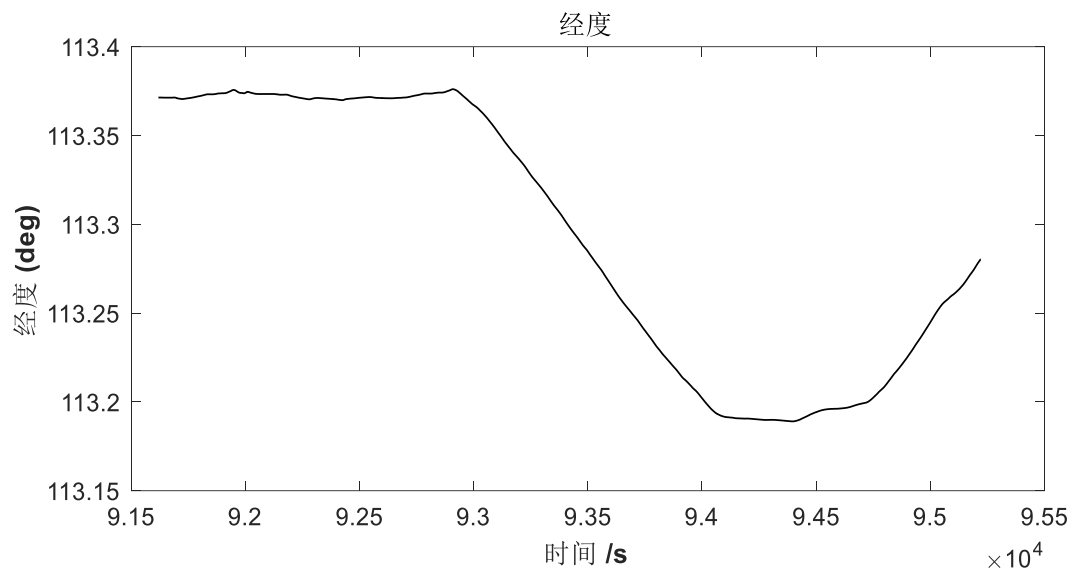
### 三、解算结果及结果分析

#### 3.1 纯惯导解算结果

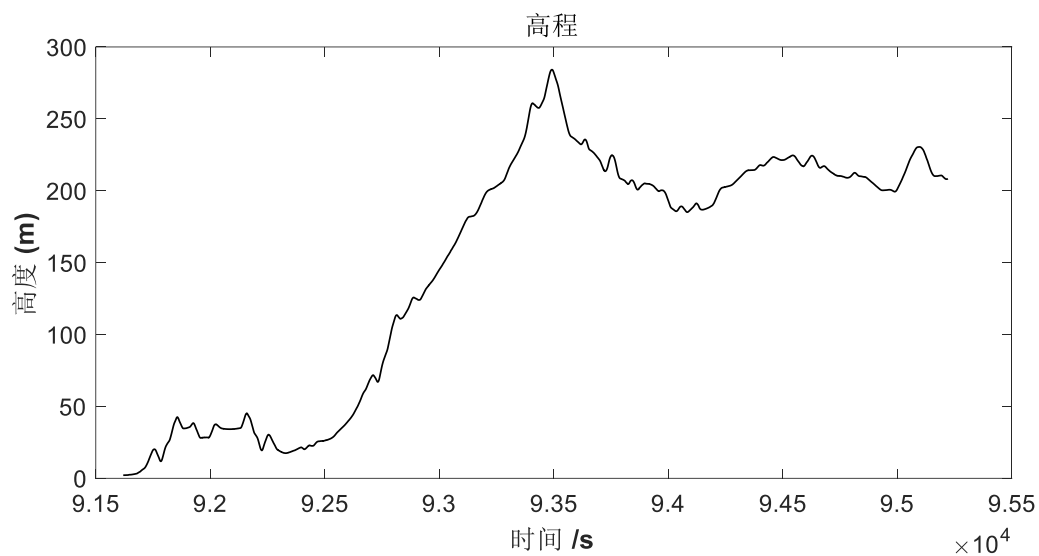
- 大地纬度-时间曲线图



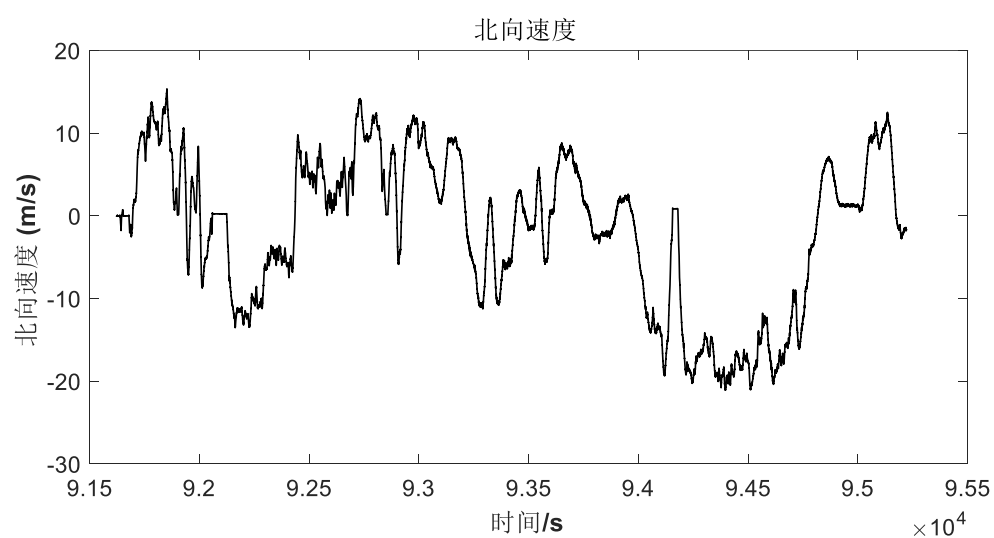
- 大地经度-时间曲线图



- 高程-时间曲线图

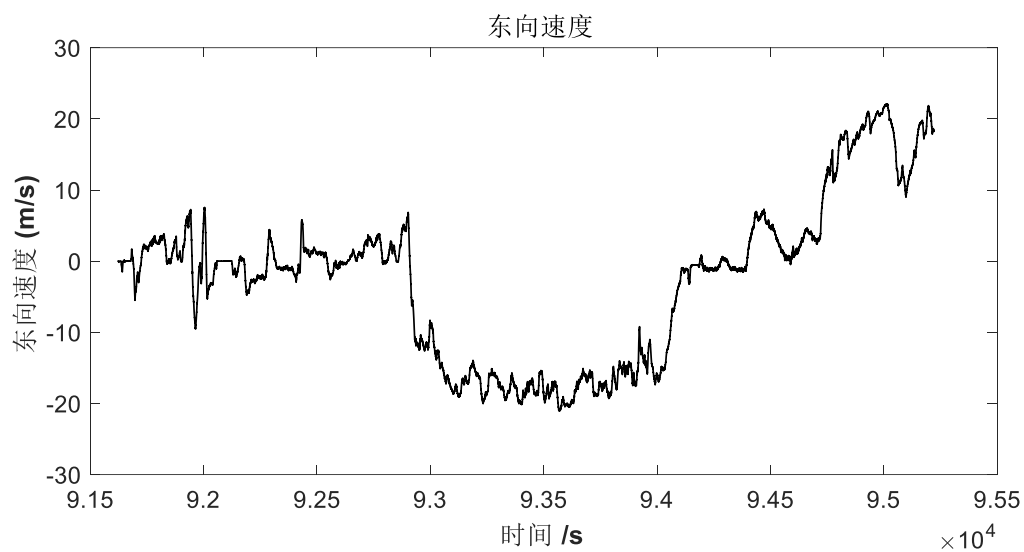


● 北向速度-时间曲线图

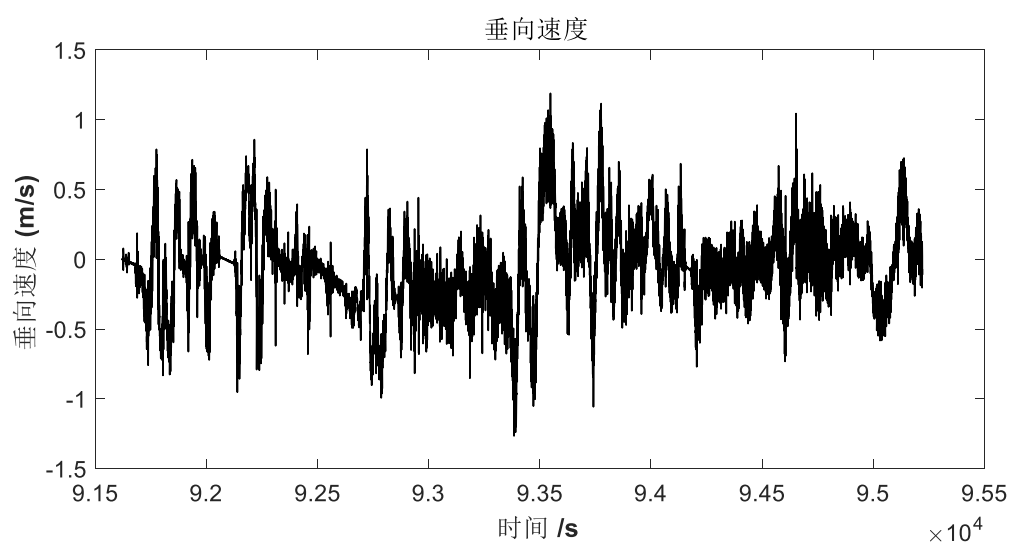


● 东向速度-时间曲线图

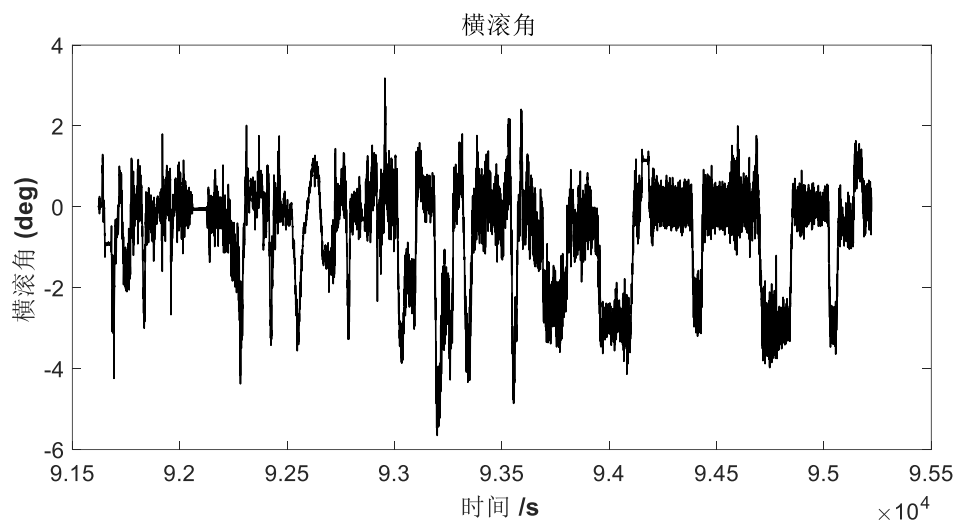




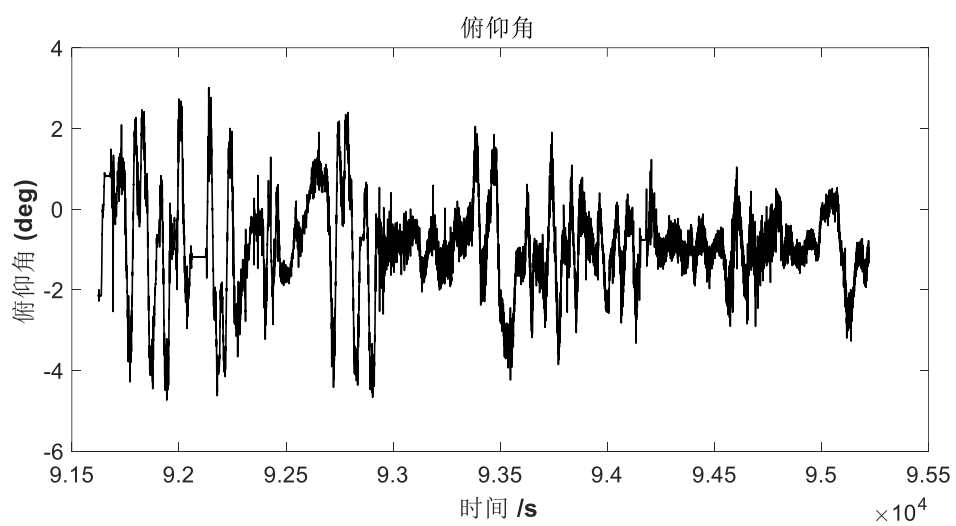
● 垂向速度-时间曲线图



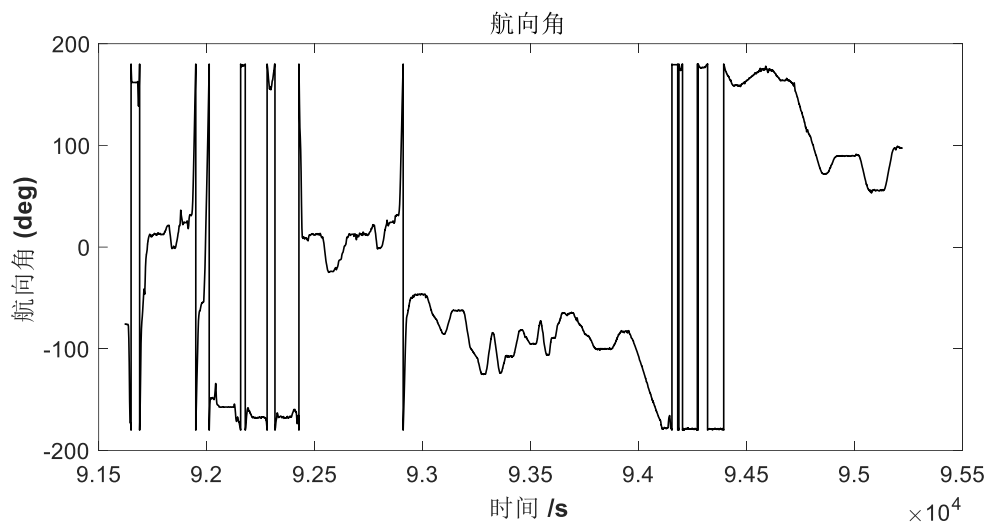
● 横滚角-时间曲线图



● 俯仰角-时间曲线图

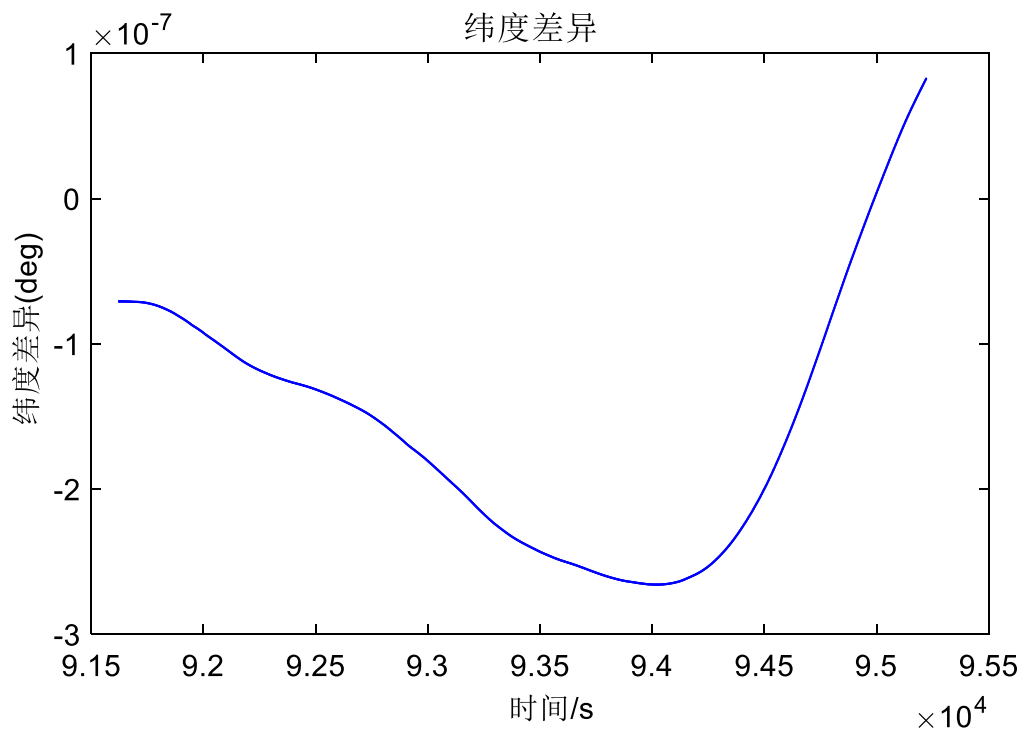


● 航向角-时间曲线图

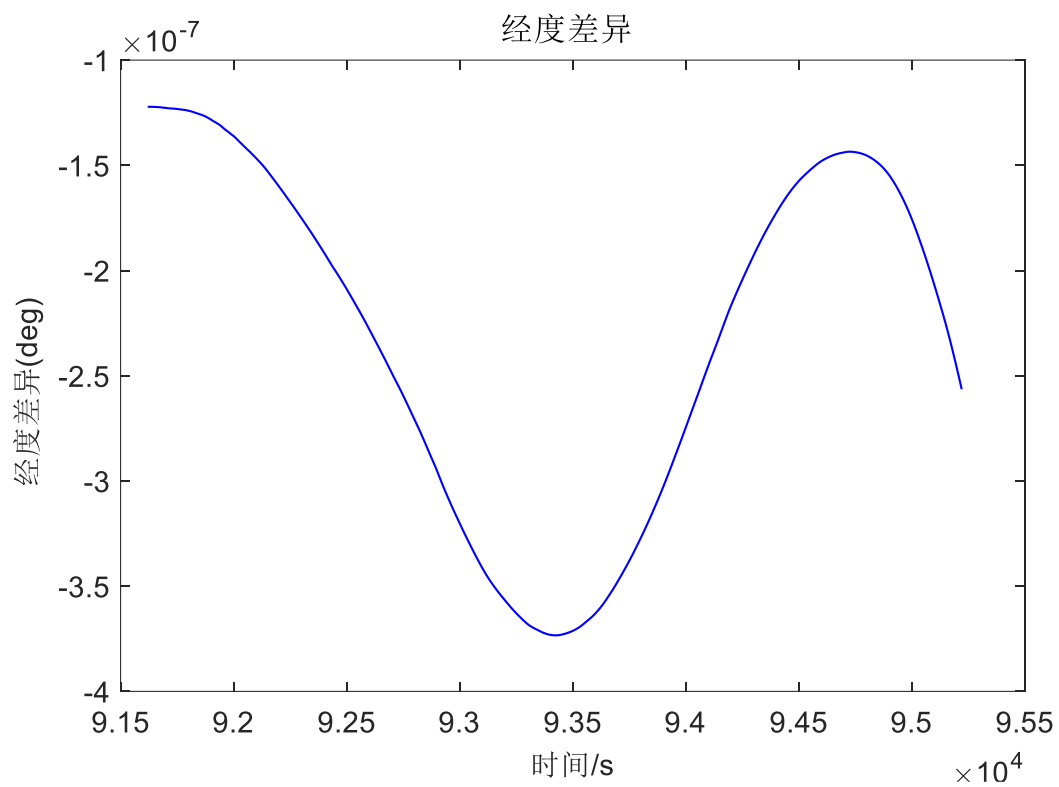


### 3.2 与参考结果的差值曲线图及差异最大值

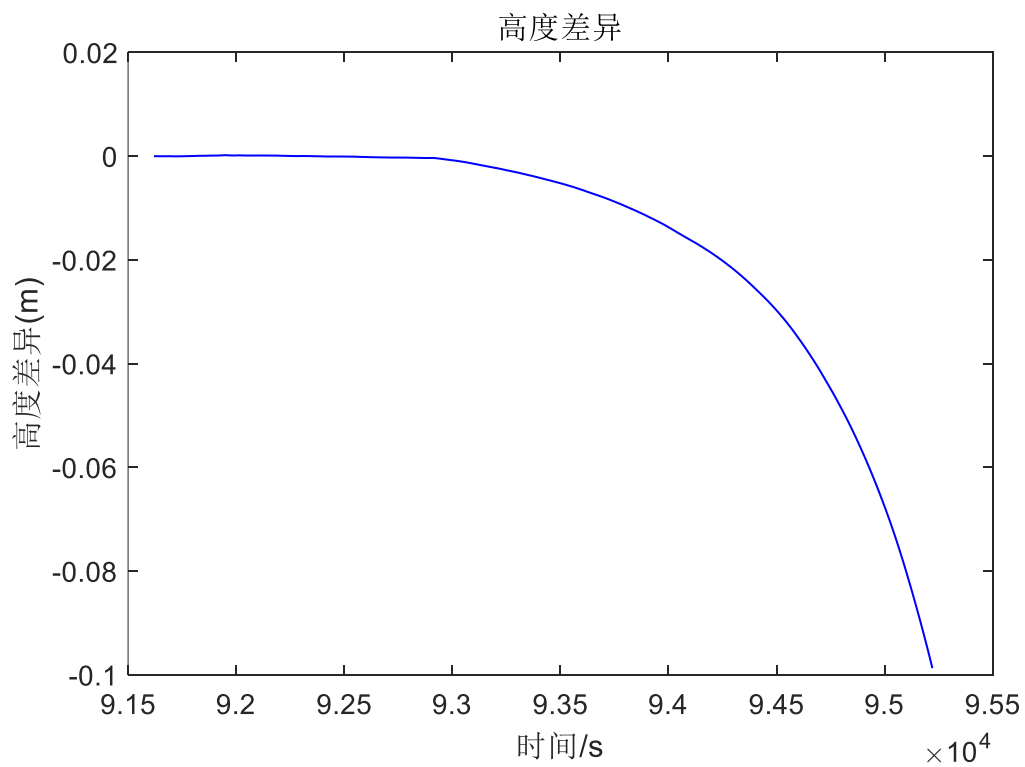
- 纬度差异:



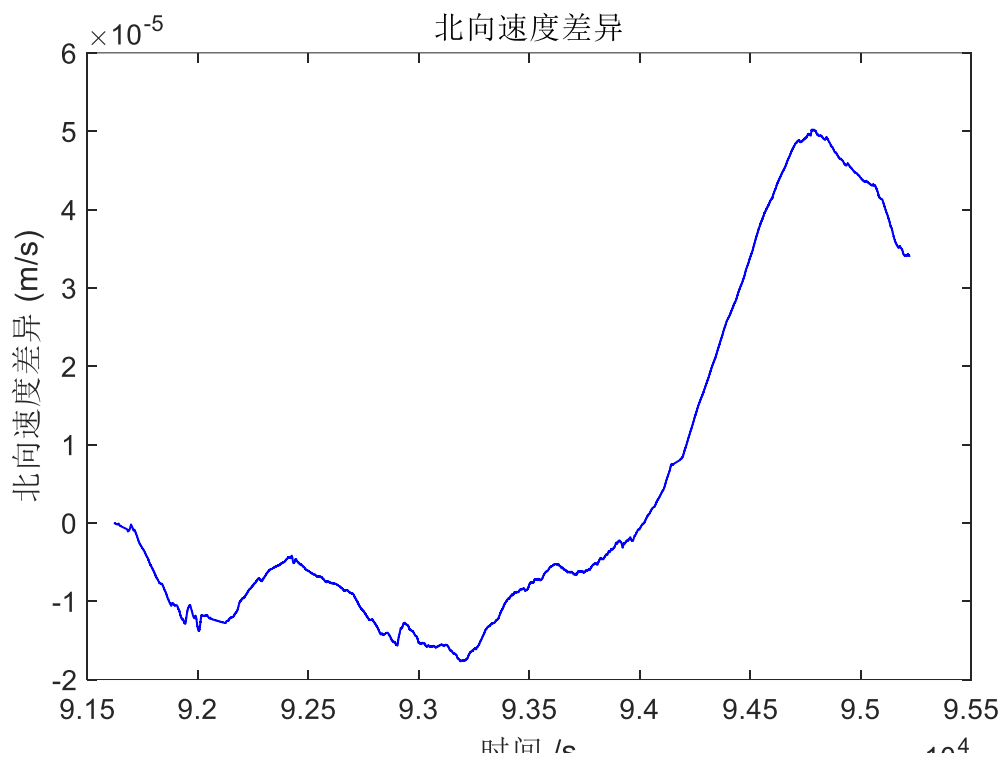
- 经度差异:



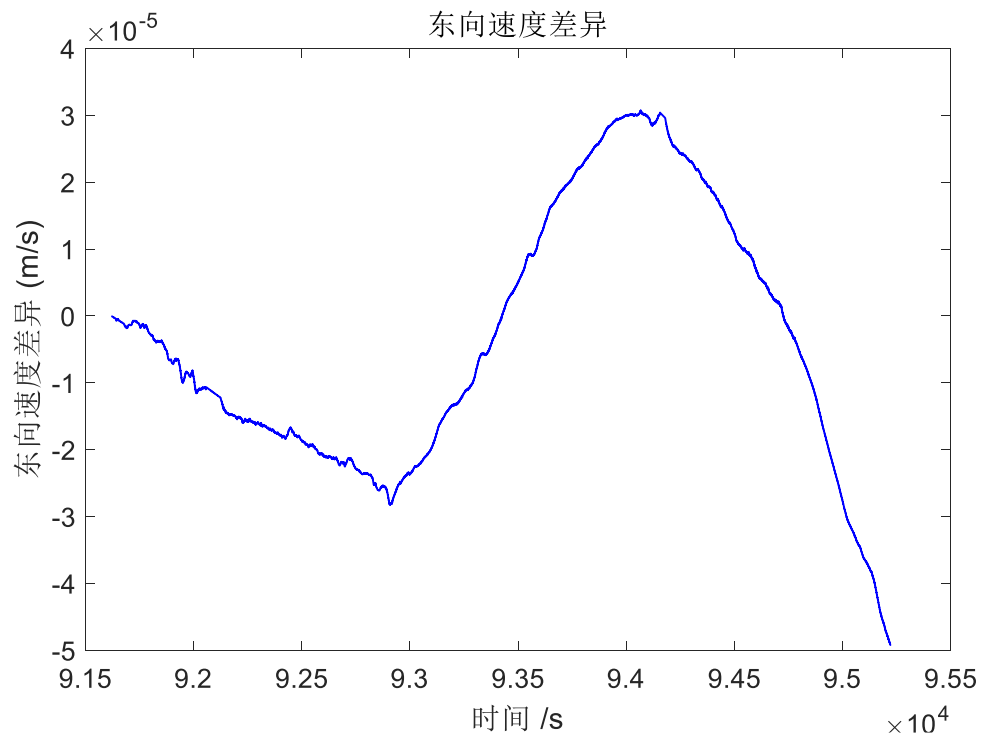
- 高度差异:



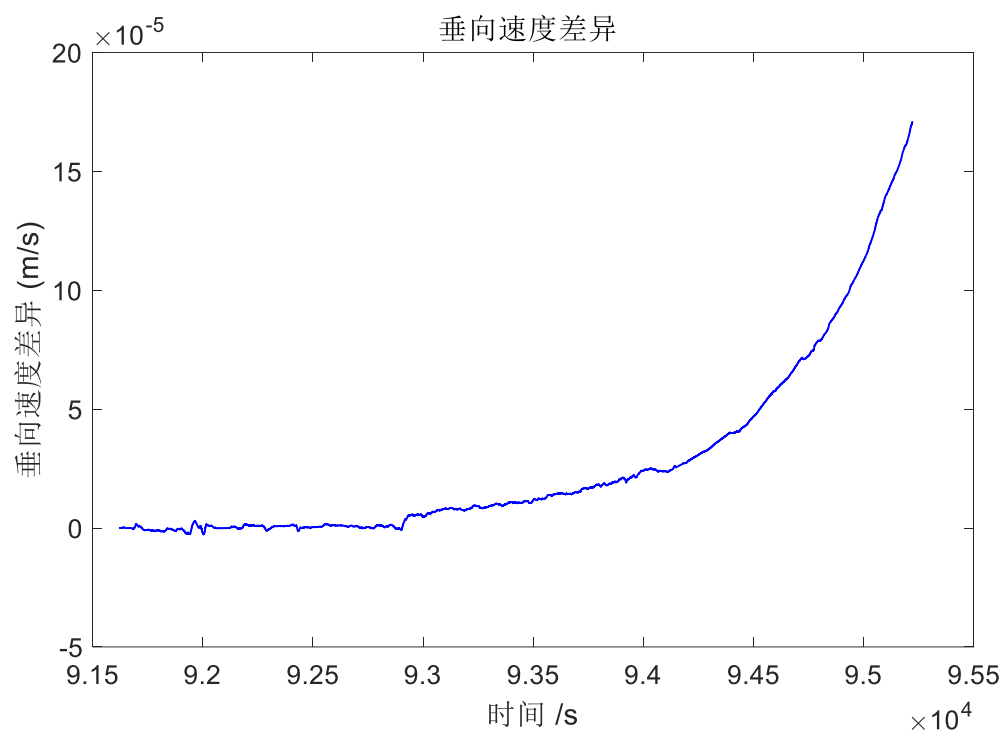
- 北向速度差异:



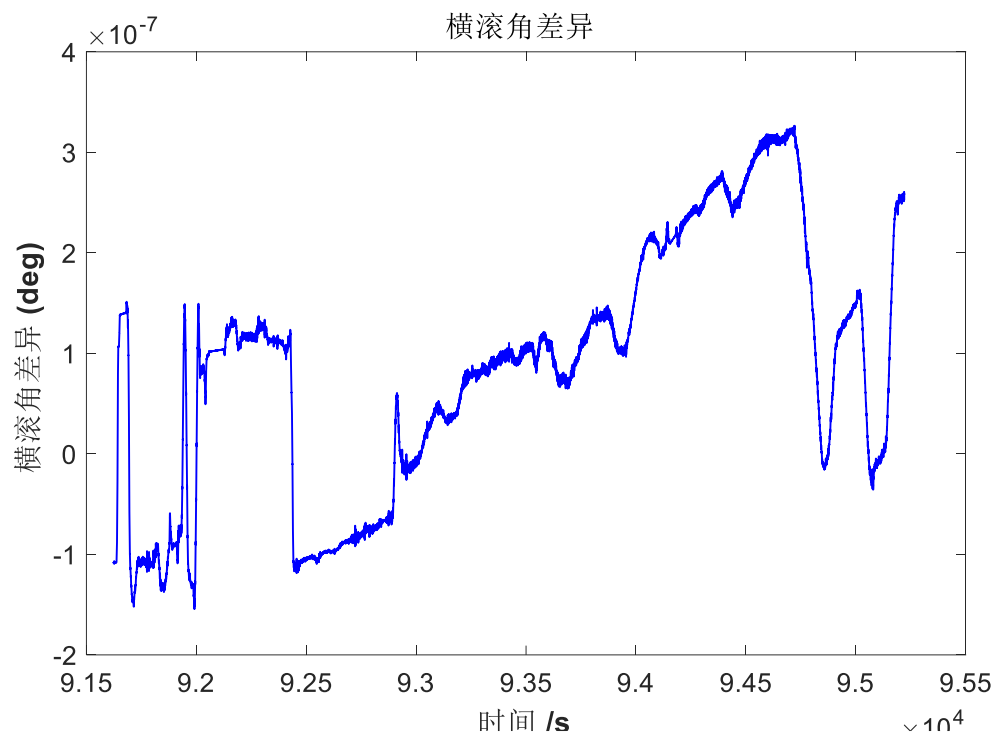
- 东向速度差异:



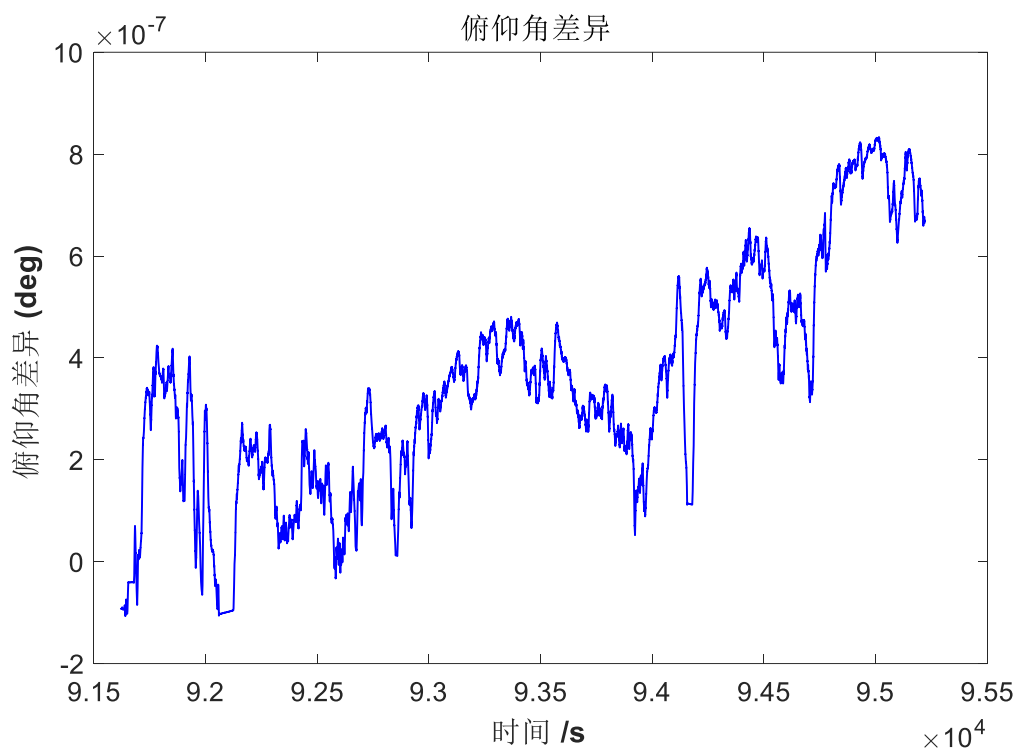
- 垂向速度差异:



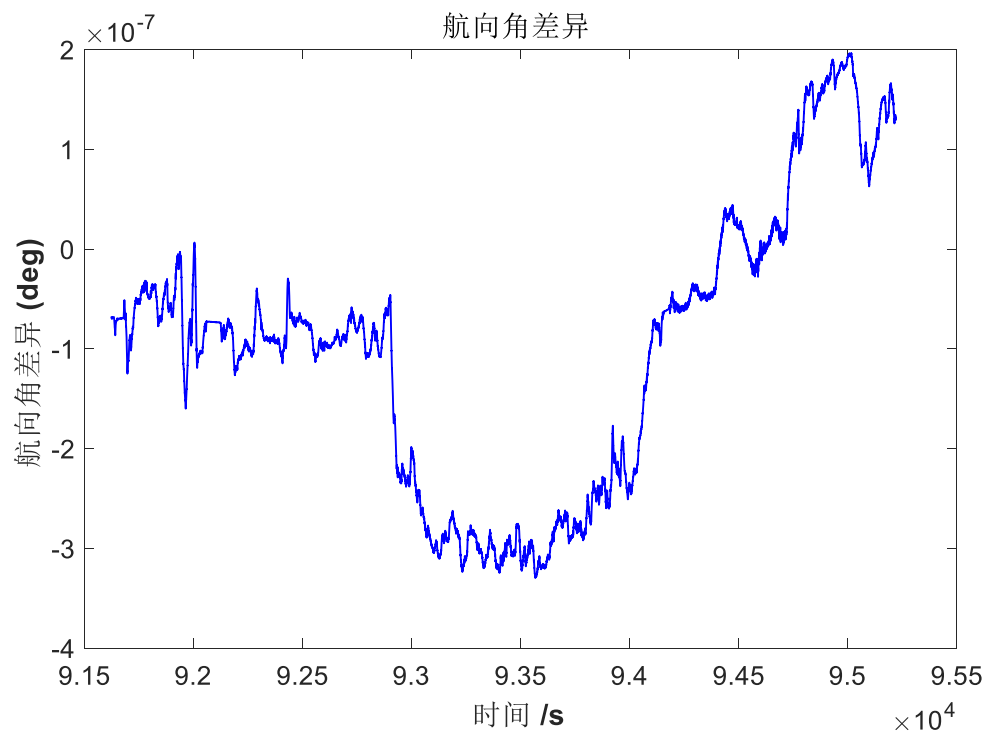
- 横滚角差异:



- 俯仰角差异:



- 航向角差异:



- 计算结果与参考结果差异最大值

大地纬度最大差值/°	大地经度最大差值/°	大地高最大差值/m
2.65864095183588e-07	3.73372913031744e-07	0.098691981006851
北向速度最大差值/m s <sup>-1</sup>	东向速度最大差值/m s <sup>-1</sup>	垂向速度最大差值/m s <sup>-1</sup>
5.0212406732975e-05	4.92077378808631e-05	1.70811716134769e-04
横滚角最大差值/°	俯仰角最大差值/°	航向角最大差值/°
3.26466639499756e-07	8.33662975791016e-07	3.29661446585305e-07

### 3.3 实验结果分析

#### 1. 对解算结果与参考结果差值曲线的分析：

本文规定纯惯导解算的结果跟参考结果的差异应满足如下指标：经纬度差异应在  $1.0e-6\text{deg}$  左右，高程差异应小于  $0.2\text{m}$ ，各项速度差异需小于  $0.0001\text{m/s}$ ，姿态角差异在  $1.0e-7\text{deg}$  左右。

由本文 3.2 节的图表内容可知，本文的解算结果符合本实验要求，经纬度误差（绝对值）： $0\sim 4.0e-7\text{deg}$  内，高程差（绝对值）： $0\sim 0.1\text{m}$  范围内，速度差异（绝对值）： $1.0e-5\sim 2.0e-4\text{ m/s}$ ，姿态差异（绝对值）： $0\sim 7.0e-7\text{deg}$  内。

#### 2. 偏差产生的原因分析：

- 积分环节部分全部默认被积函数为线性变化，全部用线性变化取代，故可能由此产生偏差。
- 需要通过  $t_{k-2}$  和  $t_{k-1}$  时刻的值进行外推得到的数据均使用了  $t_k$  时刻的数据带入，在此可能产生偏差。



## 实习成绩综合评定表

<b>实验目的</b>	实验目的明确，正确理解实验任务的要求	
<b>实验内容</b>	实验步骤清晰、完整	
	程序达到了实验预期要求	
	程序通过了实验的最终考核	
<b>实验总结</b>	报告格式的规范性（封面、排版、图、表标注等）	
	报告内容的完整性（技术和实习总结，成果表格）	
	各项实习任务的成果质量（合格、不合格）	
	报告中技术总结的编写质量	
	报告中实习总结的编写质量	
<b>试验程序</b>	有实验的程序流程图，流程图清晰完整的展示了程序的设计思路	
	有实验程序且对实验程序中的关键步骤进行注释说明	
<b>结果分析</b>	对需要讨论的结果进行分析讨论	
	对实验中出现的問題进行分析总结	
<b>评语</b>		
<b>实习总成绩</b>		
<b>教师签名</b>		
	年 月 日	
<p>相关说明：有以下情况，实习成绩以零分记</p> <p>1、未参与实习，未参加最终考核的。</p> <p>2、实习报告内容有抄袭现象(有一个段落完全相同)，当事双方均判为零分。</p>		