



# 惯性导航系统仿真分析

Simulation and Analyse of INS

## 第07讲 捷联惯导系统仿真



哈尔滨工程大学

HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

主讲人: 程建华 教授

2022.03

# 误差分析方法

## 解析法

- 1.推导导航系统误差与误差源的关系式（方程或方程组）；
- 2.设定误差源的表达式；
- 3.带入方程（或方程组）中求解导航误差的解析表达式。

优点：从数学角度描述，更易理解。

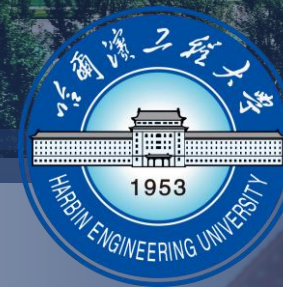
## 仿真法

- 1.编制理想情况下的惯导系统导航定位算法；
- 2.编制带误差源情况下的系统导航定位算法；
- 3.给定误差源，运行程序，保存导航误差数据，图形显示。

优点：直观，且不受误差源规律及载体运动特征影响。

**导航系统误差：** 姿态误差 $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ ，速度误差 $\delta V_x$ 、 $\delta V_y$ ，位置误差 $\delta \varphi$ 、 $\delta \lambda$ 。

# 目录



## 一 捷联式惯导系统仿真方法

## 二 捷联式惯导系统仿真实例

# 1. 捷联式惯导系统仿真方法



## 1 算法解算流程

1) 姿态速率计算:  $\omega_{pb}^b = \omega_{ib}^b - \omega_{ip}^b = \omega_{ib}^b - T_p^b \omega_{ip}^p = \omega_{ib}^b - T_p^b (\omega_{ie}^p + \omega_{ep}^p) = \omega_{ib}^b - (T_b^p)^{-1} (\omega_{ie}^p + \omega_{ep}^p)$

2) 姿态速率计算:

$$\begin{bmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{pbx}^b & -\omega_{pby}^b & -\omega_{pbz}^b \\ \omega_{pbx}^b & 0 & \omega_{pbz}^b & -\omega_{pby}^b \\ \omega_{pby}^b & -\omega_{pbz}^b & 0 & \omega_{pbx}^b \\ \omega_{pbz}^b & \omega_{pby}^b & -\omega_{pbx}^b & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}$$

$$Q = q_0 + q_1 i_b + q_2 j_b + q_3 k_b$$

3) 四元数最佳归一化:

$$\dot{Q} = \dot{q}_0 + \dot{q}_1 i_b + \dot{q}_2 j_b + \dot{q}_3 k_b = \frac{1}{\sqrt{\hat{q}_0^2 + \hat{q}_1^2 + \hat{q}_2^2 + \hat{q}_3^2}} \hat{Q}$$

$$\hat{Q} = \hat{q}_0 + \hat{q}_1 i_b + \hat{q}_2 j_b + \hat{q}_3 k_b$$



# 1. 捷联式惯导系统仿真方法



## 1 算法解算流程

### 4) 捷联矩阵T的计算:

$$T = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}$$

### 5) 姿态速率计算:

$$T_b^p = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos H - \sin\theta\sin\varphi\sin H & -\cos\varphi\sin H & \sin\theta\cos H + \cos\theta\sin\varphi\sin H \\ \cos\theta\sin H + \sin\theta\sin\varphi\cos H & \cos\varphi\cos H & \sin\theta\sin H - \cos\theta\sin\varphi\cos H \\ -\sin\theta\cos\varphi & \sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix}$$

$$\varphi_{\text{主}} = \sin^{-1} T_{32}$$

$$\varphi = \varphi_{\text{主}}$$

$$\theta_{\text{主}} = \text{tg}^{-1}(-T_{31}/T_{33})$$

$$\theta = \theta_{\text{主}}$$

$$H_{\text{主}} = \text{tg}^{-1}(-T_{12}/T_{22})$$

$$H = \begin{cases} H_{\text{主}} & T_{22} > 0 \\ H_{\text{主}} + 360^\circ & T_{22} < 0 \end{cases}$$

# 1. 捷联式惯导系统仿真方法



## 1 算法解算流程

6) 比力的坐标变换:

$$\begin{bmatrix} f_x^p \\ f_y^p \\ f_z^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix}$$

7) 速度V的及时修正:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_x^p \\ \dot{V}_y^p \\ \dot{V}_z^p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x^p \\ f_y^p \\ f_z^p \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 0 & -(2\omega_{iez}^p + \omega_{epz}^p) & 2\omega_{iey}^p + \omega_{epy}^p \\ 2\omega_{iez}^p + \omega_{epz}^p & 0 & -(2\omega_{iex}^p + \omega_{epx}^p) \\ -(2\omega_{iey}^p + \omega_{epy}^p) & 2\omega_{iex}^p + \omega_{epx}^p & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_x^p \\ V_y^p \\ V_z^p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}$$

8) 位置修正:

$$\dot{\varphi} = \frac{V_y^p}{R_M} \quad \dot{\lambda} = \frac{V_x^p}{R_M} \sec \varphi$$

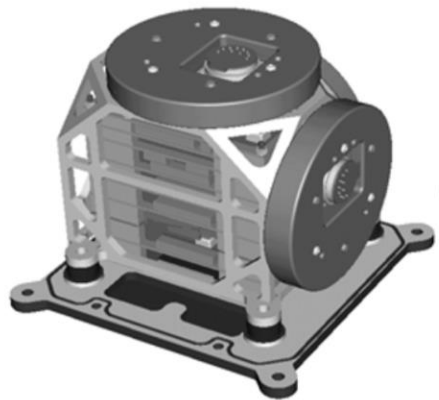
9) 计算重力加速度:  $g = g_0(1 + 0.0052884\sin^2\varphi - 0.0000059\sin\sin^2 2\varphi) - 0.0000003086h$

# 1. 捷联式惯导系统仿真方法



## 2

## 导航算法分析结论



### 由SINS解算流程可以得到的分析结论：

1. SINS输入信息是相对惯性系的角速率信息 $\omega_{ibx}^b, \omega_{iby}^b, \omega_{ibz}^b$ 和相对惯性系的比力信息 $f_{ibx}^b, f_{iby}^b, f_{ibz}^b$ 。
2. SINS输出信息相对地球的位置、速度和相对地理系的姿态。

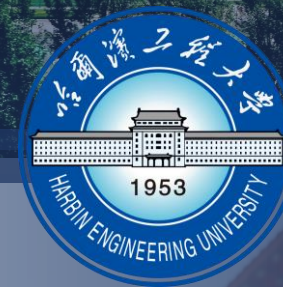
### SINS如何完成导航功能的？

1. 由速率陀螺仪敏感角速率，由加速度计敏感比力信息，提供SINS输入信号；
2. 由流程1) -流程9) 完成导航定位信息解算。

### SINS仿真怎么办？

1. 需要通过模拟器来模拟角速率信息和比力信息（由modle.cpp模拟产生）；
2. 通过流程1-流程8完成导航定位功能解算。

# 目录



一 捷联式惯导系统仿真方法

二 捷联式惯导系统仿真实例



## 2. 捷联式惯导系统仿真实例



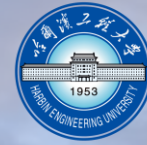
### 1 仿真条件设置

1. 设定仿真步长: modle.hn=0.02; cyzq=0.02;
2. 设定初始位置状态: modle.Lat=45.7796\*PI/180.0; modle.Lon=126.6705\*PI/180.0;  
sins.phi=45.7796\*PI/180.0; sins.lamda=126.6705\*PI/180.0;
3. 设定初始速度: ins.Vcx=0.0; ins.Vcy=0.0;  
ins.Vx=0.0; ins.Vy=0.0;
4. 设定陀螺漂移: modle.G\_drift=0.01\*D2R/3600.0;
5. 设定加速度计零偏: modle.A\_bias=1.0\*1e-5\*g0;
6. 设定仿真时间: for(jj=0;jj<12000000;jj++)

### 2

### 课堂仿真作业

- 1.仿真惯导系统的三种周期振荡：  
(陀螺漂移激励、加速度计零偏激励)
- 2.仿真不同陀螺漂移对惯导系统的影响：  
(三轴漂移均小于0.01度/小时)
- 3.仿真不同加速度计零偏对惯导系统的影响：  
(两轴零偏均小于 $1.0 \times 10^{-4}g$ )
- 4.结合仿真结果进行定量描述：
- 5.不同工作状态下的误差仿真：
- 6.通过对仿真软件的理解，仿真出不含傅科振荡的误差曲线。



哈爾濱工程大學  
HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

谢谢大家！