



西北工业大学
NORTHWESTERN POLYTECHNICAL UNIVERSITY



捷联惯导与组合导航原理

Principles of Strapdown Inertial Navigation
and Multi-Sensor Integrated Navigation Systems

主讲：陈凯、张通

电话：15309218366

E-Mail: chenkai@nwpu.edu.cn

飞行控制研究所



7 捷联惯导初始对准

7.1 惯导系统初始对准概述

7.2 惯导系统的静基座初始对准

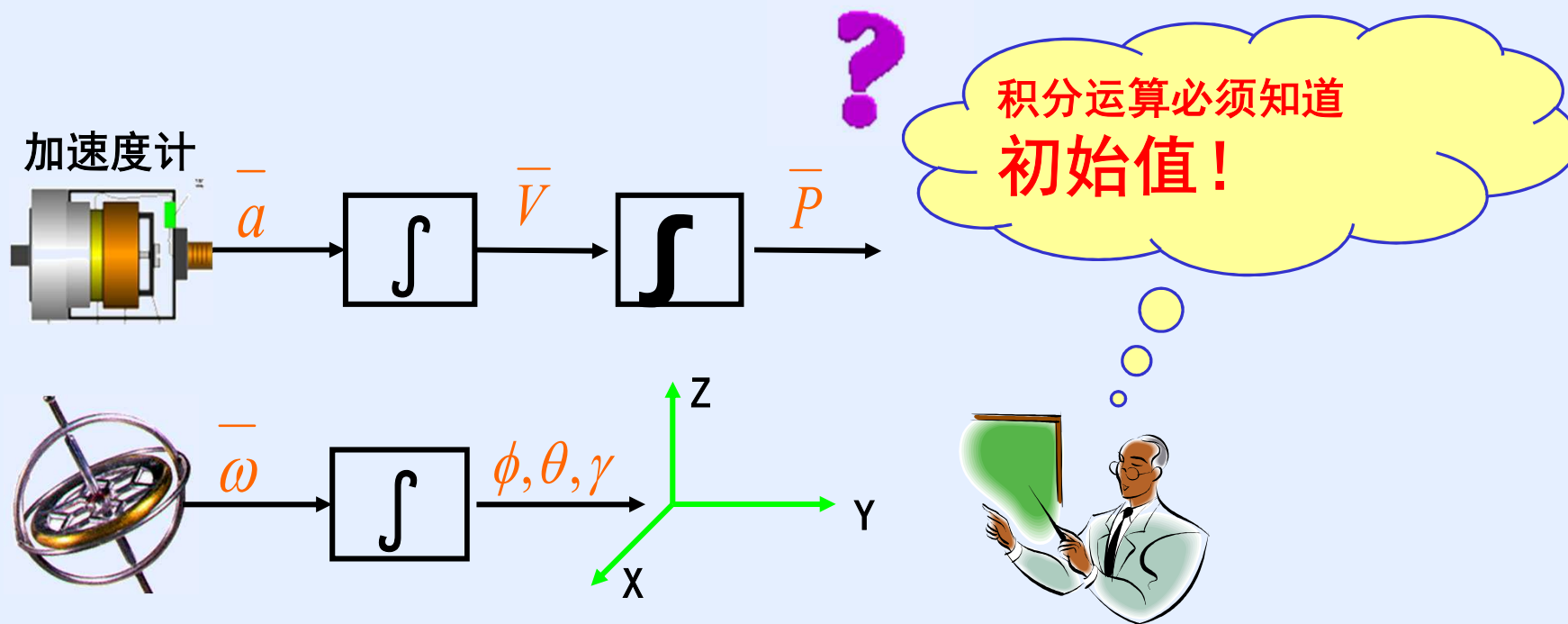
7.3 惯导系统的动基座对准

7.4 惯导系统的传递对准



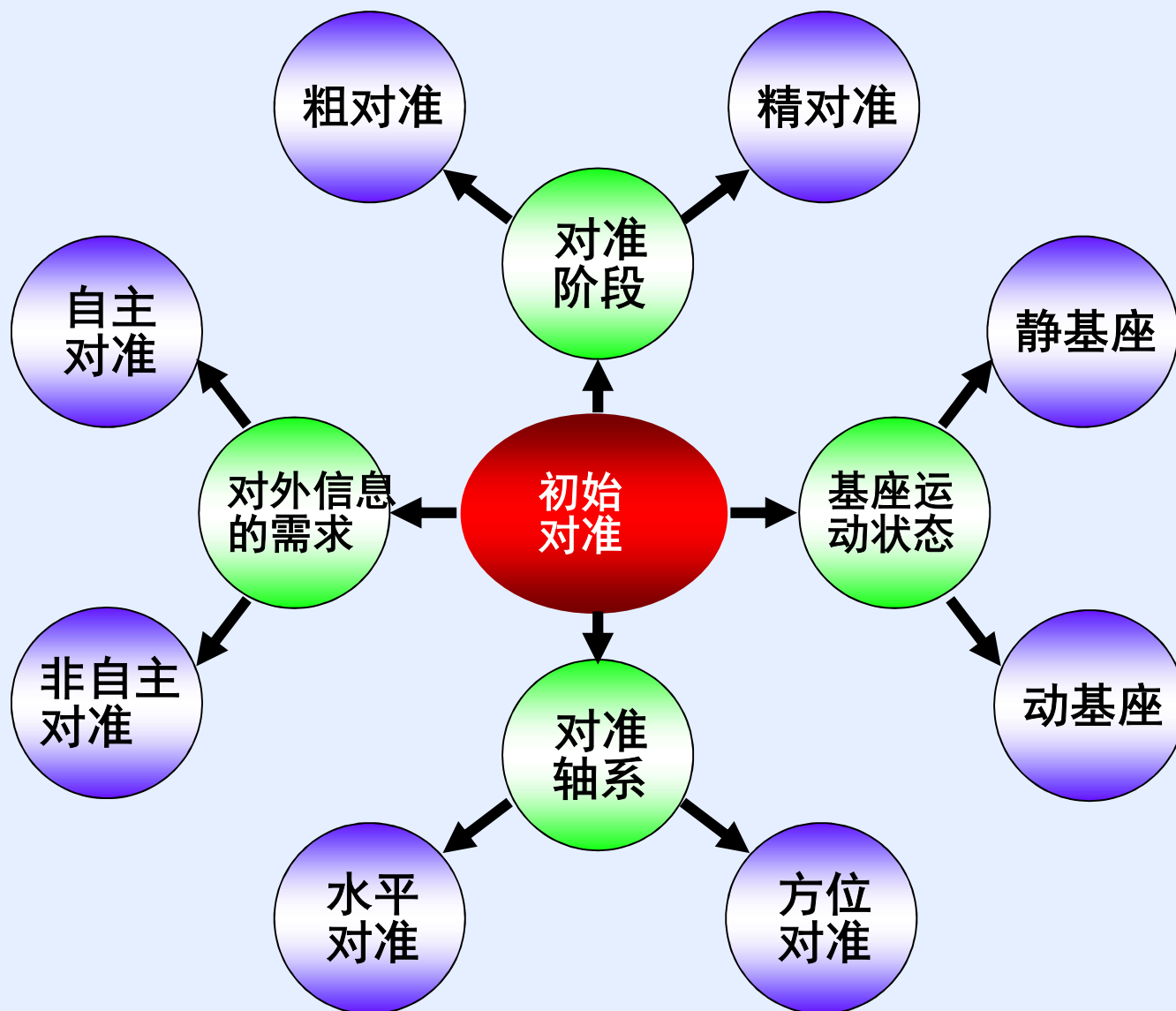
7.1 惯导系统初始对准概述

(1) 为什么需要进行初始对准



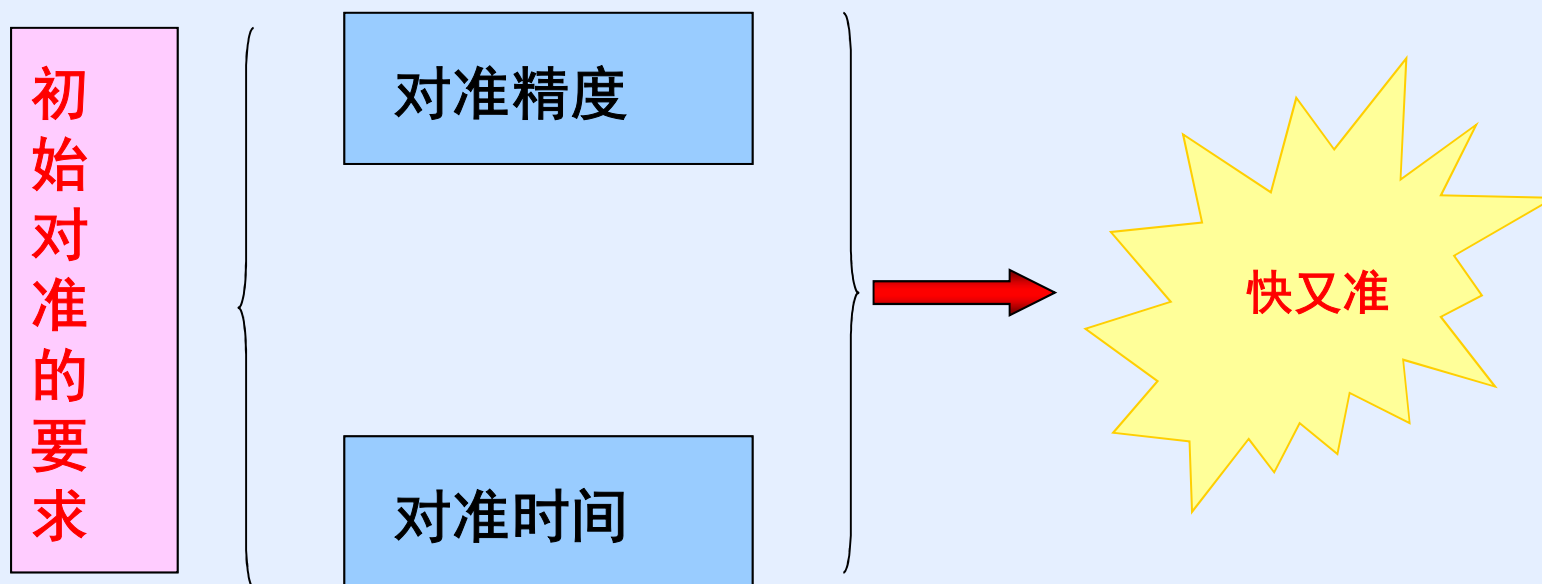


(2) 初始对准的分类





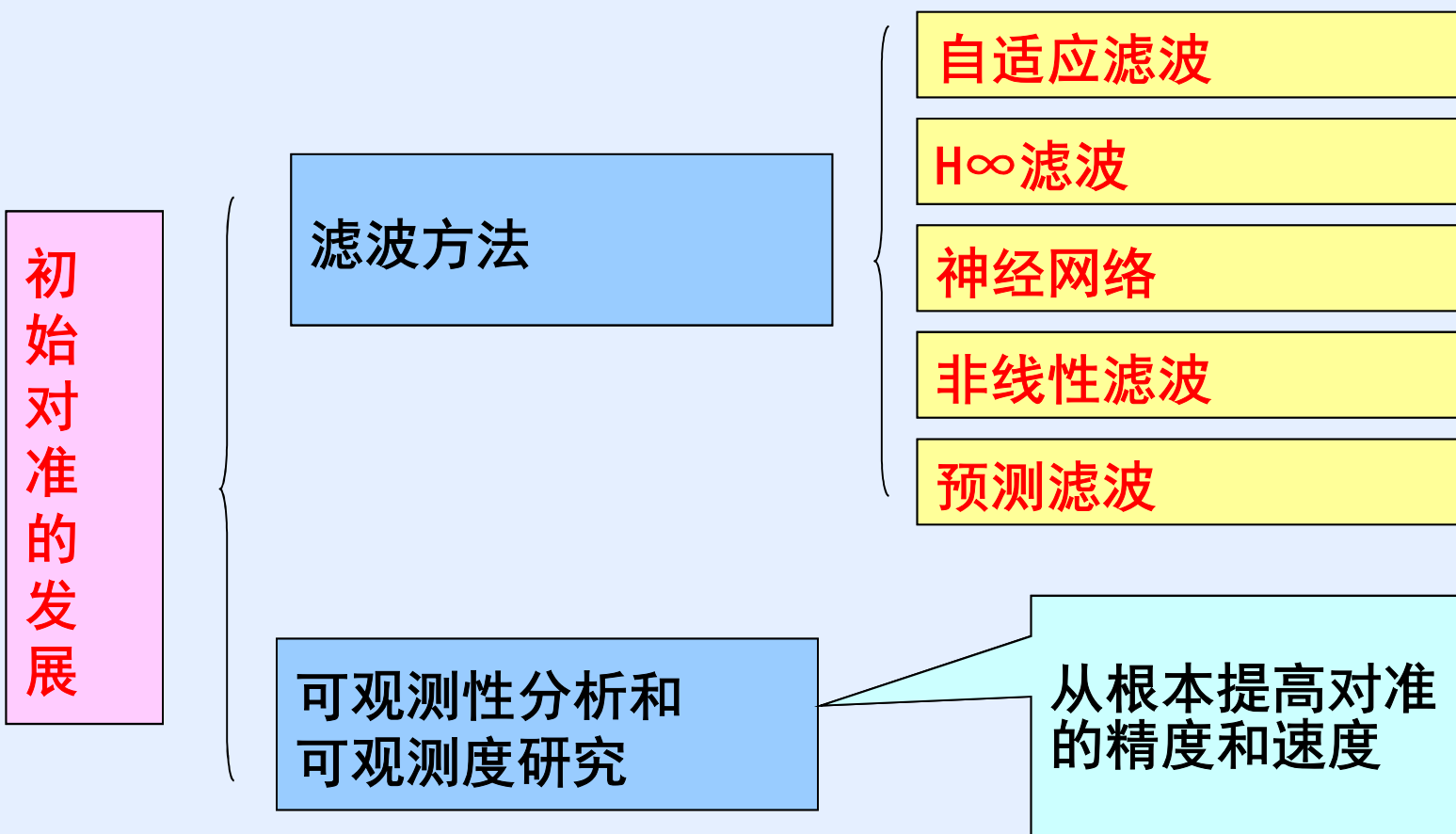
(3) 初始对准的要求



对准精度与对准时间相互制约，不同场合侧重点不同



(4) 初始对准的发展趋势





7.1 惯导系统初始对准概述

7.2 惯导系统的静基座初始对准

7.3 惯导系统的动基座对准

7.4 惯导系统的传递对准

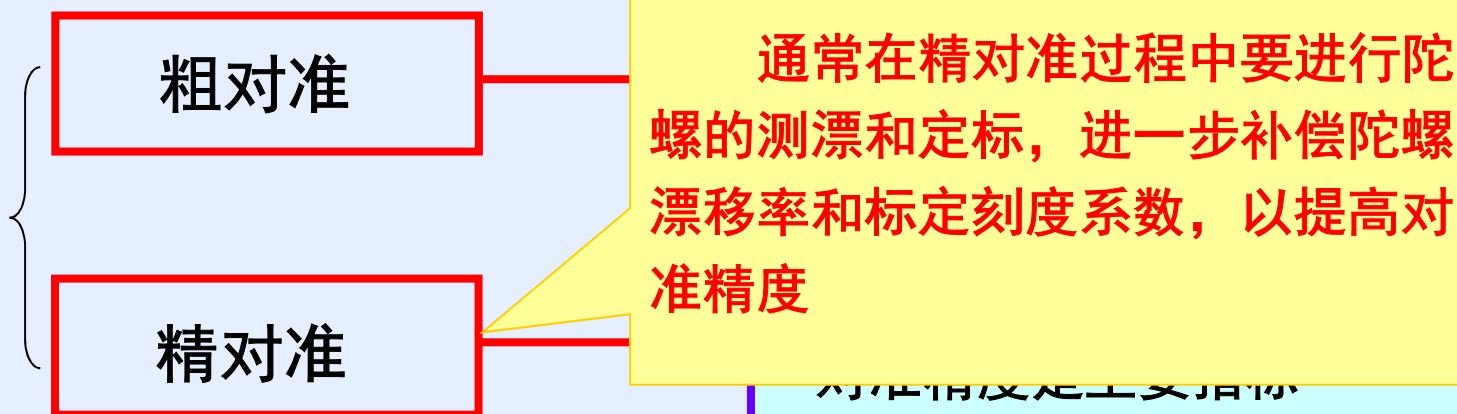


- 1) 粗对准与精对准
- 2) 静基座初始对准方案
- 3) 静基座惯导系统的误差方程
- 4) 卡尔曼滤波
- 5) 计算机仿真研究
- 6) 静基座初始对准的可观测度分析
- 7) 提高静基座初始对准精度与速度的方法



1) 粗对准与精对准

根据对准精度的要求，静基座对准过程分为：

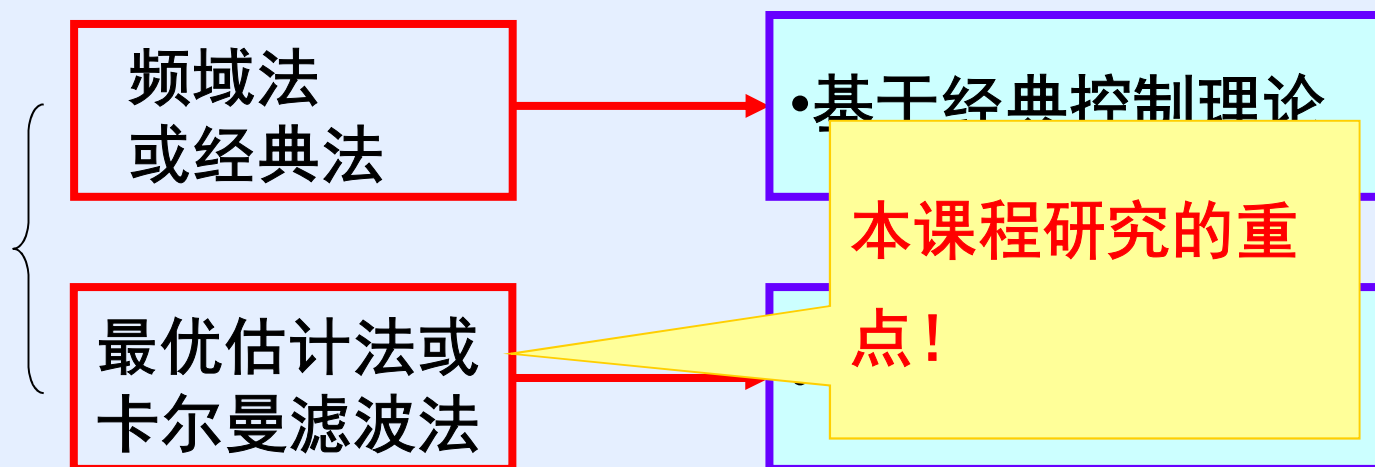


- 平台，先水平（调平），后方位，使系统有较好的动态性能
- 捷联：精确建立姿态矩阵 — 水平和方位对准同时（现代）
— 先水平后方位（经典）



2) 静基座初始对准方案

静基座初始对准分为两大类：





2) 静基座初始对准方案——粗对准

利用重力矢量和地球自转角速率的测量值，直接估算载体坐标系到地理坐标系的变换矩阵。

$$\mathbf{g}^b = \mathbf{C}_n^b \mathbf{g}^n, \omega_{ie}^b = \mathbf{C}_n^b \omega_{ie}^n$$

$$(\mathbf{g}^b)^T = (\mathbf{g}^n)^T \mathbf{C}_b^n, (\omega_{ie}^b)^T = (\omega_{ie}^n)^T \mathbf{C}_b^n$$

对准过程中，飞机停在地面上，忽略飞机的晃动影响和陀螺及加速度计的测量误差，并根据地速为零的比力方程式

$$\hat{\omega}_{ib}^b \approx \omega_{ie}^b, \hat{\mathbf{f}}^b \approx -\mathbf{g}^b$$



2) 静基座初始对准方案——粗对准

$$\mathbf{g}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix}, \omega_{ie}^n = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie} \cos L \\ \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} \quad \mathbf{C}_b^n = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}, \hat{\mathbf{f}}^b = \begin{bmatrix} \hat{f}_x^b \\ \hat{f}_y^b \\ \hat{f}_z^b \end{bmatrix}, \hat{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^b = \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{ibx}^b \\ \hat{\omega}_{iby}^b \\ \hat{\omega}_{ibz}^b \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} -\hat{f}_x^b & -\hat{f}_y^b & -\hat{f}_z^b \\ \hat{\omega}_{ibx}^b & \hat{\omega}_{iby}^b & \hat{\omega}_{ibz}^b \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} 0 & 0 & -g \\ 0 & \omega_{ie} \cos L & \omega_{ie} \sin L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}$$



2) 静基座初始对准方案——粗对准

$$T_{31} \approx \frac{\hat{f}_x^b}{g}$$

$$T_{32} \approx \frac{\hat{f}_y^b}{g}$$

$$T_{23} \approx \frac{\hat{f}_z^b}{g}$$

$$T_{21} \approx \frac{1}{\omega_{ie} \cos L} (\hat{\omega}_{ibx}^b - T_{31} \omega_{ie} \sin L)$$

$$T_{22} \approx \frac{1}{\omega_{ie} \cos L} (\hat{\omega}_{iby}^b - T_{32} \omega_{ie} \sin L)$$

$$T_{23} \approx \frac{1}{\omega_{ie} \cos L} (\hat{\omega}_{ibz}^b - T_{33} \omega_{ie} \sin L)$$

$$\begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ T_{31} & T_{32} & T_{33} \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{21} & T_{31} \\ T_{12} & T_{22} & T_{32} \\ T_{13} & T_{23} & T_{33} \end{bmatrix}$$

$$T_{11} = T_{22} T_{33} - T_{23} T_{32}$$

$$T_{12} = T_{23} T_{31} - T_{21} T_{33}$$

$$T_{13} = T_{21} T_{32} - T_{22} T_{31}$$



2) 静基座初始对准方案——粗对准

惯性器件输出的是角增量和速度增量

$$T_m = t_m - t_{m-1}$$

$$\Delta\theta_x(m), \Delta\theta_y(m), \Delta\theta_z(m)$$

$$\Delta v_x(m), \Delta v_y(m), \Delta v_z(m)$$

粗对准的精度并不高，原因是忽略了晃动及惯性器件的测量误差，失准角一般在数角分至数十角分范围内，视晃动剧烈程度。因此进行完粗对准后必须要进行精对准。



2) 静基座初始对准方案——精对准

参数辨识法实现的开环精对准方案和卡尔曼滤波精对准方案

(1)、参数辨识法精对准

$$C_{n'}^n = I + \begin{bmatrix} 0 & -\phi_U & \phi_N \\ \phi_U & 0 & -\phi_E \\ -\phi_N & \phi_E & 0 \end{bmatrix}$$

$$C_b^n = C_{n'}^n C_b^{n'}$$

对准地的纬度准确已知，运载体无移动

$$\omega_{in} = \omega_{ie}, \delta\omega_{in} = 0$$



2) 静基座初始对准方案——精对准

(1)、参数辨识法精对准

$$\dot{\boldsymbol{\phi}} = \delta \boldsymbol{\omega}_{in}^n + \boldsymbol{\phi} \times \boldsymbol{\omega}_{in}^n - \mathbf{C}_b^n \left([\delta K_G] + [\delta G] \right) \boldsymbol{\omega}_{ib}^b - \boldsymbol{\varepsilon}^n$$

$$\delta \tilde{\boldsymbol{\omega}}_{ib}^n = \mathbf{C}_b^n \left([\delta K_G] + [\delta G] \right) \boldsymbol{\omega}_{ib}^b + \boldsymbol{\varepsilon}^n$$

$$[\delta K_G] = \text{diag} \left[\delta K_{Gx} \quad \delta K_{Gy} \quad \delta K_{Gz} \right]$$

$$[\delta G] = \begin{bmatrix} 0 & \delta G_z & -\delta G_y \\ -\delta G_z & 0 & \delta G_x \\ \delta G_y & -\delta G_x & 0 \end{bmatrix}$$

\mathbf{C}_b^n 近似看做常阵

$$\boldsymbol{\varepsilon}^n = \left[\varepsilon_E \quad \varepsilon_N \quad \varepsilon_U \right]^T$$

等效常值漂移



2) 静基座初始对准方案

(1)、参数辨识法精对准

ω_d 远大于地球自转的角速度

$$\omega_{ib} \approx \omega_d$$

$$C_b^n([\delta K_G] + [\delta G])\omega_{ib}^b \approx C_b^n \begin{bmatrix} \delta K_{Gx} & \delta G_z & -\delta G_y \\ -\delta G_z & \delta K_{Gy} & \delta G_x \\ \delta G_y & -\delta G_x & \delta K_{Gz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_{11} & \delta_{12} & \delta_{13} \\ \delta_{21} & \delta_{22} & \delta_{23} \\ \delta_{31} & \delta_{32} & \delta_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{dx} \\ \omega_{dy} \\ \omega_{dz} \end{bmatrix}$$

$$\dot{\phi} = -\omega_{ie}^n \times \phi - \varepsilon^n - w^n$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi}_E \\ \dot{\phi}_N \\ \dot{\phi}_U \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{ie} \sin L & -\omega_{ie} \cos L \\ -\omega_{ie} \sin L & 0 & 0 \\ \omega_{ie} \cos L & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_E \\ \phi_N \\ \phi_U \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \varepsilon_E \\ \varepsilon_N \\ \varepsilon_U \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} w_E \\ w_N \\ w_U \end{bmatrix} \quad x = \begin{bmatrix} \phi_E - \phi_{E0} \\ \phi_N - \phi_{N0} \\ \phi_U - \phi_{U0} \end{bmatrix}$$

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + A\phi_0 - \varepsilon^n - w^n \quad u = A\phi_0 - \varepsilon^n$$

$$w_E = \delta_{11}\omega_{dx} + \delta_{12}\omega_{dy} + \delta_{13}\omega_{dz}$$

$$w_N = \delta_{21}\omega_{dx} + \delta_{22}\omega_{dy} + \delta_{23}\omega_{dz}$$

$$w_U = \delta_{31}\omega_{dx} + \delta_{32}\omega_{dy} + \delta_{33}\omega_{dz}$$

$$w^n(t) = [w_E \quad w_N \quad w_U]^T$$

等效时变漂移

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + u - w(t)$$



2) 静基座初始对准方案

(1)、参数辨识法精对准

$\dot{x}(t) = Ax(t) + u - w(t)$ 线性定常系统——拉式变换

$$X(s) = (sI - A)^{-1} \left[\frac{U}{s} - W(s) \right]$$

$$\begin{aligned}\phi_E &= \phi_{E0} + u_E t + \frac{t^2}{2} \omega_{ie} (u_N \sin L - u_U \cos L) \\ \phi_N &= \phi_{N0} + u_N t - \frac{t^2}{2} u_E \omega_{ie} \sin L \\ \phi_U &= \phi_{U0} + u_U t + \frac{t^2}{2} u_E \omega_{ie} \cos L\end{aligned}$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准

晃动基座下，加速度计感测两种加速度成分，一种是重力加速度，另一种是晃动引起的干扰加速度。

$$\hat{f}^b = (I + [\delta K_A])(I + [\delta A])(-g^b + f_d^b) + \nabla^b$$

$$\hat{f}^b = -g^b + f_d^b + ([\delta K_A] + [\delta A])(-g^b + f_d^b) + \nabla^b$$

$$\begin{aligned} f^{n'} &= C_b^{n'} \hat{f}^b = C_n^{n'} [-g^n + f_d^n + \nabla^n + C_b^n ([\delta K_A] + [\delta A])(-g^b + f_d^b)] \\ &= \begin{bmatrix} 0 & -\phi_U & \phi_N \\ \phi_U & 0 & -\phi_E \\ -\phi_N & \phi_E & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{dE} + \nabla_E + \delta f_E \\ f_{dN} + \nabla_N + \delta f_N \\ f_{dU} + \nabla_U + \delta f_U + g \end{bmatrix} \end{aligned}$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准

$$\dot{f}_E^n = -g\phi_N + f_{dE} + \nabla_E + \delta f_E$$

$$\dot{f}_N^n = g\phi_E + f_{dN} + \nabla_N + \delta f_N \quad [\delta f_E \quad \delta f_N \quad \delta f_U]^T = C_b^n([\delta K_A] + [\delta A])\mathbf{f}_d^b$$

$$\dot{f}_U^n = g + f_{dU} + \nabla_U + \delta f_U \quad [\nabla_E \quad \nabla_N \quad \nabla_U]^T = C_b^n\{\nabla^b + ([\delta K_A] + [\delta A])(-\mathbf{g}^b)\}$$

$$[f_{DE} \quad f_{DE} \quad f_{DE}]^T = [f_{dE} \quad f_{dE} \quad f_{dE}]^T + [\delta f_E \quad \delta f_N \quad \delta f_U]^T$$

$$\dot{f}_E^n = -g\phi_N + f_{DE} + \nabla_E, \dot{f}_N^n = -g\phi_E + f_{DN} + \nabla_N$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准

$$\Delta V_E(t) = (\nabla_E - g\phi_{N0})t - \frac{t^2}{2}gu_N + \frac{t^3}{6}g\omega_{ie}u_E \sin L + V_{DE}$$

$$\Delta V_N(t) = (\nabla_N + g\phi_{E0})t + \frac{t^2}{2}gu_E + \frac{t^3}{6}g\omega_{ie}(u_N \sin L - u_U \cos L) + V_{DN}$$

$$\Delta V_E(k) = a_{1E}(kT_s) - a_{2E}(kT_s)^2 + a_{3E}(kT_s)^3 + V_{DE}$$

$$\Delta V_N(k) = a_{1N}(kT_s) - a_{2N}(kT_s)^2 + a_{3N}(kT_s)^3 + V_{DN}$$

$$\boldsymbol{\Theta}_E = \begin{bmatrix} a_{1E} \\ a_{2E} \\ a_{3E} \end{bmatrix}, \boldsymbol{\Theta}_N = \begin{bmatrix} a_{1N} \\ a_{2N} \\ a_{3N} \end{bmatrix} \quad \begin{cases} \boldsymbol{\Theta}_E(k+1) = \boldsymbol{\Theta}_E(k) \\ \Delta V_E(k) = \mathbf{H}(k)\boldsymbol{\Theta}_E(k) + V_{DE}(k) \end{cases}$$
$$\begin{cases} \boldsymbol{\Theta}_N(k+1) = \boldsymbol{\Theta}_N(k) \\ \Delta V_N(k) = \mathbf{H}(k)\boldsymbol{\Theta}_N(k) + V_{DN}(k) \end{cases}$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k+1) = \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k) + \Gamma_i(k+1)P_i(k)H^T(k+1) \times [\Delta V_i(K+1) - H(k+1)\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k)] \\ P_i(k+1) = P_i(k) - \Gamma_i(k+1)P_i(k)H^T(k+1)H(k+1)P_i(k) \\ \Gamma_i(k+1) = [1 + H(k+1)P_i(k)H^T(k+1)]^{-1} \\ i = E, N, k = 0, 1, 2, \dots \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k+1) = \hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k) + K_i(k)[\Delta V_i(K+1) - H(k)\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k)] \\ K_i(k) = P_i(k)H^T(k)[H(k)P_i(k)H^T(k) + \hat{\Lambda}_i(k+1)]^{-1} \\ P_i(k+1) = P_i(k) - K_i(k+1)[H(k)P_i(k)H^T(k) + \hat{\Lambda}_i(k+1)]K_i^T(k) \\ \hat{\Lambda}_i(k+1) = \hat{\Lambda}_i(k) + [e_i^2(k) - \hat{\Lambda}_i(k)] / (k+1) \\ e_i(k) = \Delta V_i(k) - H(k)\hat{\boldsymbol{\Theta}}_i(k) \end{array} \right.$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准

$$u_E = \frac{2a_{2N}}{g}$$

$$u_N = -\frac{2a_{2E}}{g}$$

$$u_U = -\frac{6a_{3N}}{g\omega_{ie}\cos L} - \frac{2a_{2E}}{g}\tan L$$

$$\phi_{E0} = \frac{a_{1N}}{g}$$

$$\phi_{N0} = -\frac{a_{1E}}{g}$$

$$\phi_{U0} = \phi_{N0}\tan L - \frac{u_E + \varepsilon_E}{\omega_{ie}\cos L}$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准 卡尔曼滤波法精对准

$$V_E = V_N = V_U = 0, f_E = f_N = 0, f_U = g$$

略去惯性器件的刻度误差和安装误差，则捷联惯导系统的速度误差方程和姿态误差方程

$$\delta \dot{V}_E = -g\phi_N + T_{11}\nabla_x^b + T_{12}\nabla_y^b + T_{13}\nabla_z^b + \delta V_N 2\omega_{ie} \sin L - \delta V_U (2\omega_{ie} \cos L)$$

$$\delta \dot{V}_N = -g\phi_E + T_{21}\nabla_x^b + T_{22}\nabla_y^b + T_{23}\nabla_z^b + \delta V_E 2\omega_{ie} \sin L$$

$$\delta \dot{V}_U = T_{31}\nabla_x^b + T_{32}\nabla_y^b + T_{33}\nabla_z^b + \delta V_E 2\omega_{ie} \cos L$$

$$\dot{\phi}_E = \phi_N (\omega_{ie} \sin L) - \phi_U (\omega_{ie} \cos L) - T_{11}\epsilon_{Bx}^b - T_{12}\epsilon_{By}^b - T_{13}\epsilon_{Bz}^b$$

$$\dot{\phi}_N = -\phi_E (\omega_{ie} \sin L) - T_{21}\epsilon_{Bx}^b - T_{22}\epsilon_{By}^b - T_{23}\epsilon_{Bz}^b$$

$$\dot{\phi}_U = \phi_E (\omega_{ie} \cos L) - T_{31}\epsilon_{Bx}^b - T_{32}\epsilon_{By}^b - T_{33}\epsilon_{Bz}^b$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准 卡尔曼滤波法精对准

$$\dot{\varepsilon}_{Bi}^b = 0, (i = x, y, z)$$

$$\dot{\nabla}_i^b = 0, (i = x, y, z)$$

$$X = \begin{bmatrix} \delta V_E & \delta V_N & \delta V_U & \phi_E & \phi_N & \phi_U & \varepsilon_{Bx}^b & \varepsilon_{By}^b & \varepsilon_{Bz}^b & \nabla_x^b & \nabla_y^b & \nabla_z^b \end{bmatrix}^T$$

$$\dot{X}(t) = FX(t) + w(t)$$

系统的速度输出作为量测量，而非移动基座条件下的速度输出即为速度误差，所以量测方程

$$Z(1) = \delta V_E + V(1), Z(2) = \delta V_N + V(2), Z(3) = \delta V_U + V(3)$$

$$Z_k = HX_k + V_k$$

$$X_k = \Phi X_{k-1} + W_{k-1}$$

$$\Phi = I + TF + \frac{T^2}{2!}F^2 + \frac{T^3}{3!}F^3 + \dots$$



2) 静基座初始对准方案

(2)、参数辨识法精对准 卡尔曼滤波法精对准

$$Q_k = TM_1 + \frac{T^2}{2!} M_2 + \frac{T^3}{3!} M_3 + \dots$$

$$M_{i+1} = FM_i + (FM_i)^T, i = 1, 2, 3, \dots$$

$$M_1 = q$$

$$\hat{X}_k = \Phi \hat{X}_{k-1} + K_k (Z_k - H\Phi \hat{X}_{k-1})$$

$$K_k = P_{k/k-1} H^T (H P_{k/k-1} H^T + R_k)^{-1}$$

$$P_{k/k-1} = \Phi P_{k-1} \Phi^T + Q_{k-1}$$

$$P_k = (I - K_k H) P_{k/k-1} (I - K_k H)^T + K_k R_k K_k^T, k = 1, 2, 3, \dots$$



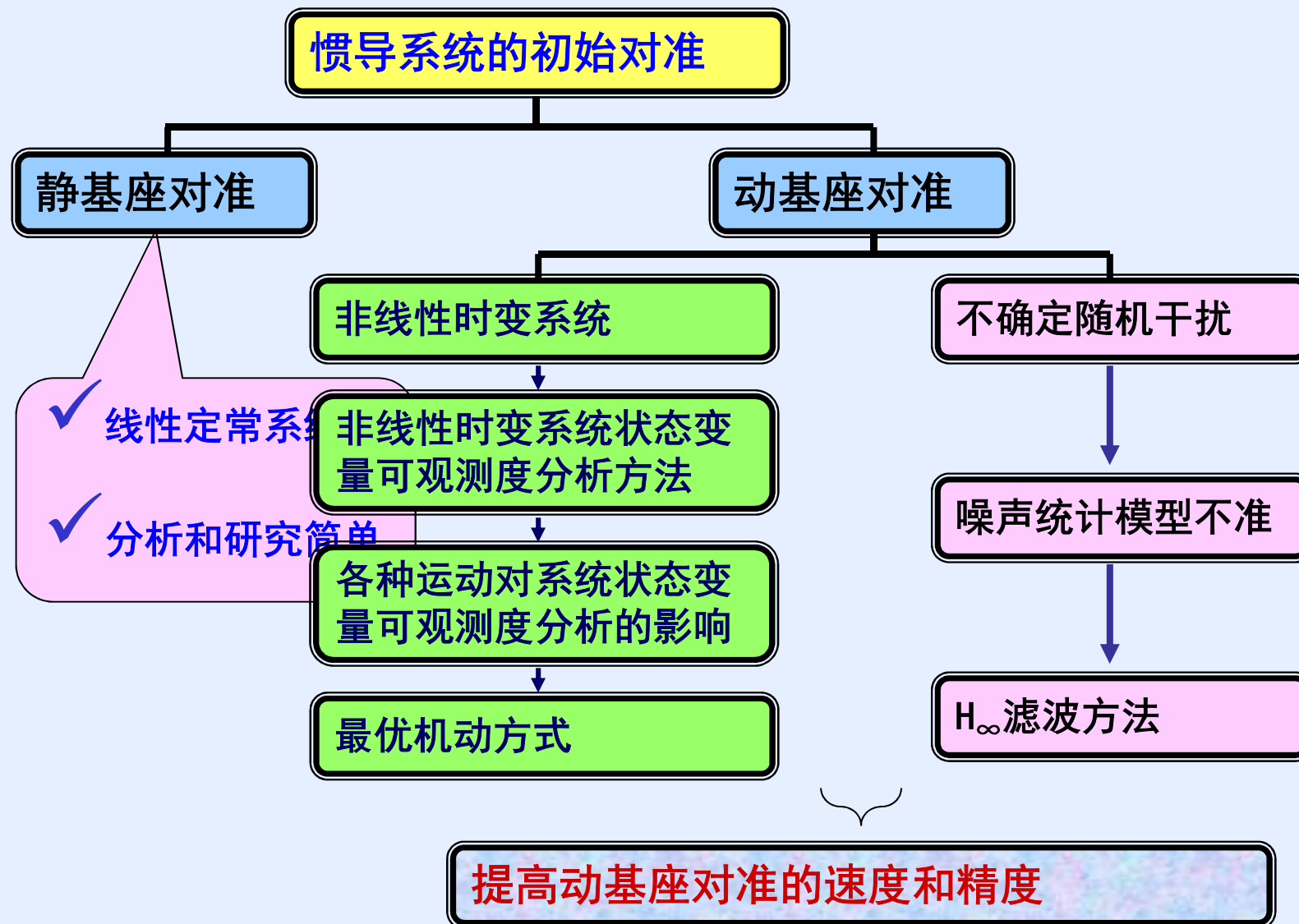
低精度惯导，航向不能自对准，需外部参考源

1、外部光瞄

2、传递对准



惯导系统动基座对准概述





4 惯导系统的传递对准

- 1) 传递对准技术概述
- 2) 不同匹配方案研究
- 3) 运动方式对传递对准的影响
- 4) 机翼弹性振动对传递对准的影响
- 5) 滤波周期对传递对准的影响
- 6) 载体弹性变形对传递对准的影响



1 传递对准技术概述

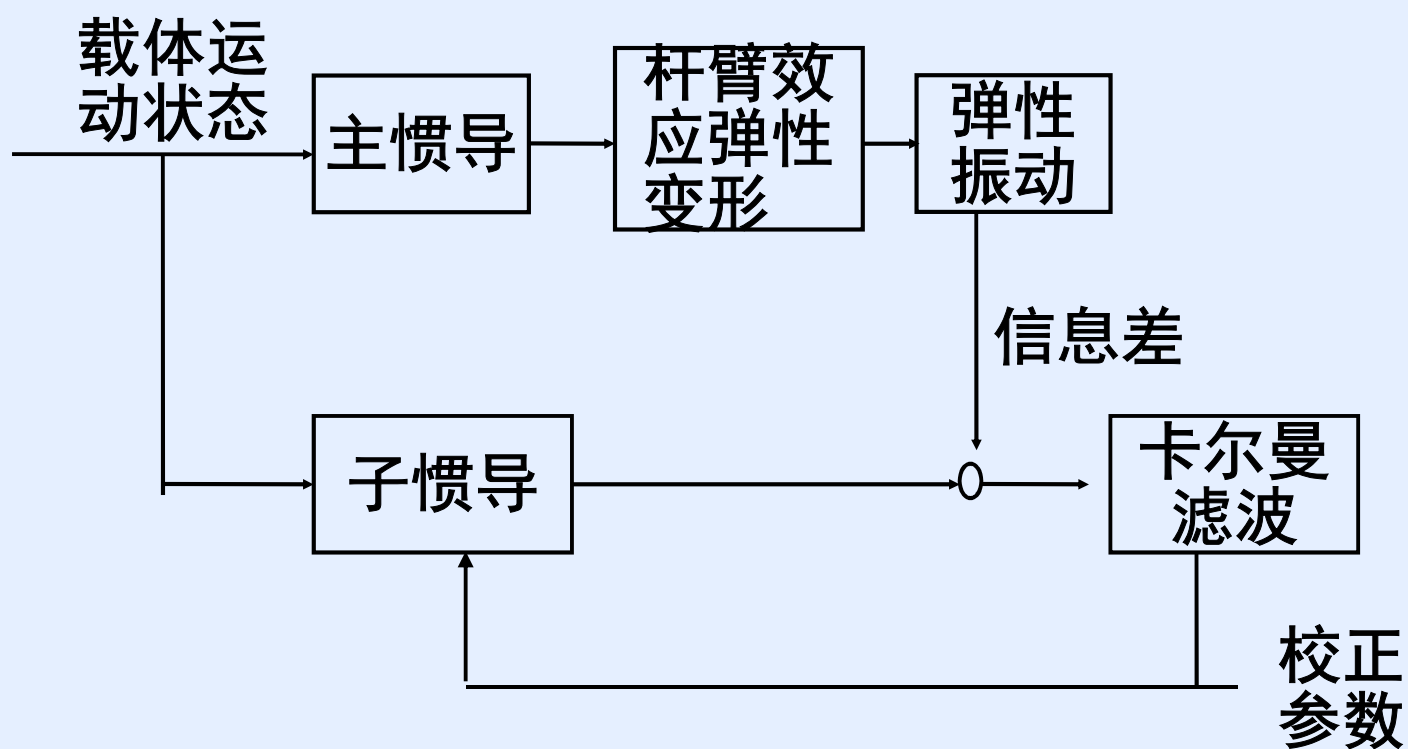
传递对准的意义

什么是传递对准 (Transfer alignment) ?

- 传递对准是指载体航行时，载体上需要对准的子惯导利用已对准好的主惯导的信息进行初始对准的一种方法。
- 传递对准是一种动基座对准方法，它除了具有动机座对准的一般规律外，还具有其固有的特点及性质



传递对准原理框图



传递对准的基本原理图



传递对准的特点

- 可利用主惯导多种信息实现各种传递对准方法
- 需要考虑子惯导杆臂效应的影响
- 需要考虑载体弹性变形的影响
- 需要考虑载体弹性振动的影响
- INS与SINS对准方法有较大差别，要解决的问题也不一样

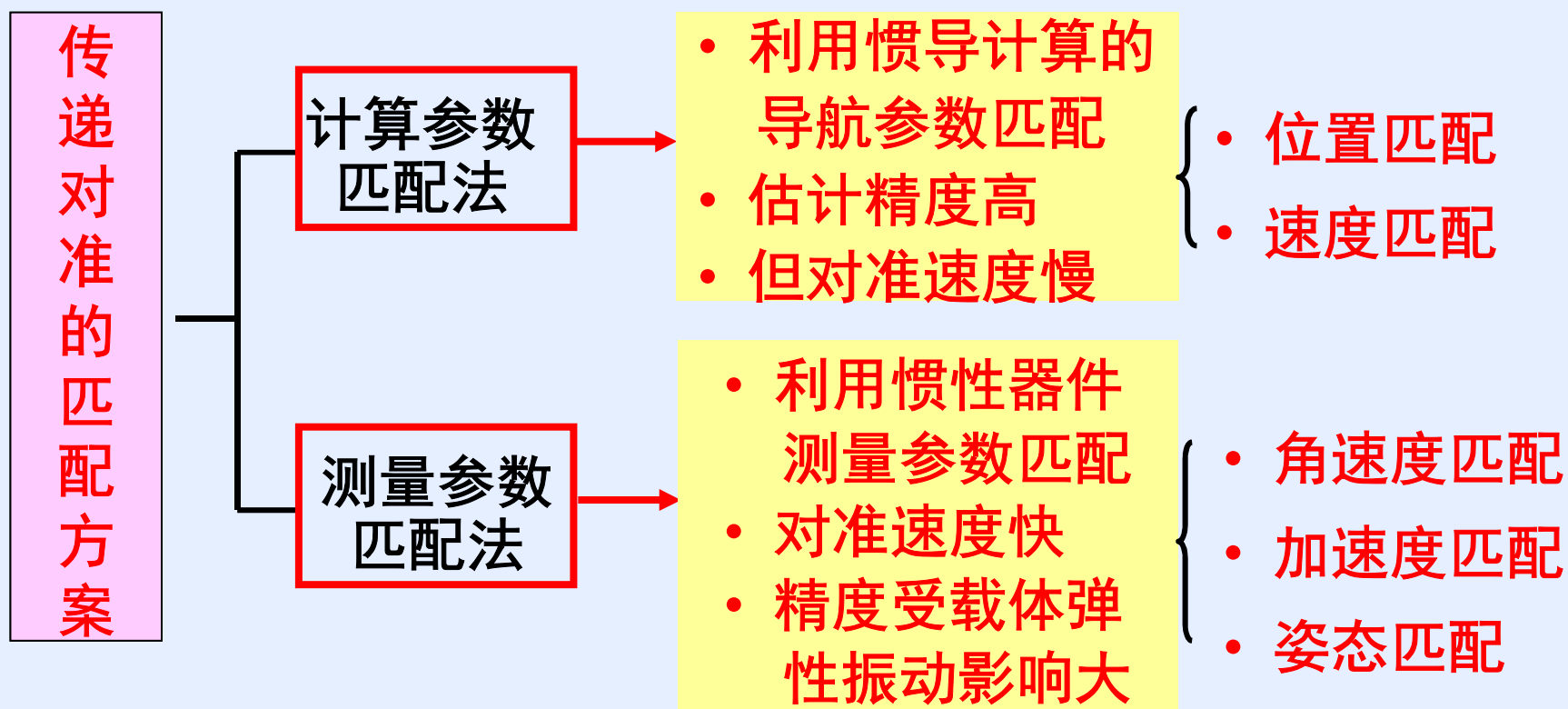


传递对准的发展状况

- ❑ 20世纪80年代前，匹配方案和滤波模型
- ❑ 20世纪80年代后，快速精确传递对准方法
- ❑ 目前技术已经成熟，并获得了成功应用
- ❑ 国内的空中传递对准技术已开展了多年的研究，但在工程实际中尚未得到很好的解决。



不同匹配方案研究 传递对准的匹配方案



其他匹配方案：加速度；姿态阵；速度+姿态；速度+角速度；速度+姿态阵



传递对准数学模型

$$\begin{cases} \dot{X} = FX + Gw \\ Z = HX + v \end{cases}$$

量测方程根据匹配
方案不同而不同

□ 14维状态方程:

$$X = [\varphi_E \ \varphi_N \ \varphi_U \ \delta V_E \ \delta V_N \ \delta V_U \ \delta L \ \delta \lambda \ \varepsilon_{bx} \ \varepsilon_{by} \ \varepsilon_{bz} \ \nabla_x \ \nabla_y \ \nabla_z]$$

$$F = \begin{bmatrix} F_N & F_S \\ 0_{2 \times 6} \end{bmatrix} \quad F_S = \begin{bmatrix} C_{b3 \times 3}^g & 0_{3 \times 3} \\ 0_{3 \times 3} & C_{b3 \times 3}^g \\ 0_{2 \times 6} \end{bmatrix} \quad G = \begin{bmatrix} T_b & 0_{3 \times 13} \\ 0_{13 \times 3} & I_{13 \times 13} \end{bmatrix}$$



速度匹配方案型

□ 量测方程

$$Z = \Delta v = [0_{3 \times 3}, I_{3 \times 3}, 0_{3 \times 8}]X + V$$

主惯导与子惯导
的速度误差

量测噪声

□ 速度匹配的特点

- 方法成熟，精度较高
- 对准时间较长



位置匹配方案

□ 量测方程

$$Z = \Delta p = [0_{2 \times 6}, I_{2 \times 2}, 0_{2 \times 6}]X + V$$

主惯导与子惯导之间的
位置误差

量测噪声

□ 位置匹配特点

- 方法较为成熟，并得到了实际应用
- 但是精度不高，且对准时间较长



角速度匹配方案

□ 量测方程

$$Z = \Delta\omega = [H, 0_{3 \times 11}]X + V$$

量测噪声

主惯导与子惯导
的角速度误差

$$H = \begin{bmatrix} 0 & \omega_z^m & -\omega_y^m \\ -\omega_z^m & 0 & \omega_x^m \\ \omega_y^m & -\omega_x^m & 0 \end{bmatrix}$$

主惯导测
量角速度

□ 角速度匹配的特点

- 速度快
- 受载体振动影响较大
- 只能用于主惯导和子惯导都是捷联惯导的情况



姿态角速度

匹配方案

□ 量测方程

$$Z = \Delta\varphi = [H, 0_{3 \times 11}]X + V$$

主惯导与子惯导
的姿态角误差

量测噪声

INS 姿态矩阵

$$H = \begin{bmatrix} -\frac{T_{12}T_{32}}{T_{12}^2 + T_{22}^2} & \frac{T_{32}T_{22}}{T_{12}^2 + T_{22}^2} & -1 \\ \frac{T_{21}T_{33} - T_{23}T_{31}}{T_{31}^2 + T_{33}^2} & \frac{T_{13}T_{31} - T_{11}T_{33}}{T_{31}^2 + T_{33}^2} & 0 \\ -\frac{T_{22}}{\sqrt{1 - T_{32}^2}} & \frac{T_{12}}{\sqrt{1 - T_{32}^2}} & 0 \end{bmatrix}$$

□ 姿态角匹配特点

- 对准速度较快
- 中等精度



姿态矩阵匹配方案

□ 量测方程

$$Z = [H, 0_{9 \times 5}]X + V$$

量测噪声

$H = \begin{bmatrix} 0 & -T_{13} & T_{12} \\ T_{13} & 0 & -T_{11} \\ -T_{12} & -T_{11} & 0 \\ 0 & -T_{23} & T_{22} \\ T_{23} & 0 & -T_{21} \\ -T_{22} & T_{21} & 0 \\ 0 & -T_{33} & T_{32} \\ T_{33} & 0 & -T_{31} \\ -T_{32} & T_{31} & 0 \end{bmatrix}$

INS 姿态矩阵

□ 特点

- 精度较高，但受载体振动影响
- 适合主惯导和子惯导都是捷联惯导的情况



组合方案

□ 速度+角速度

□ 速度+姿态

□ 速度+姿态矩阵

仍然存在受载体振动
影响较大的问题

综合计算参数匹配
法和测量参数匹配
法的优点

精度高、速度快

速度+姿态、速度+姿态矩阵是主要发展方向