全日制学位研究生专业必修课《导航系统设计》

第5章 惯性导航系统初始对准

主讲教师：赵龙
办公地点：新主楼E402
网　站：dnc.buaa.edu.cn
Email：flylong@buaa.edu.cn

本章的学习目的

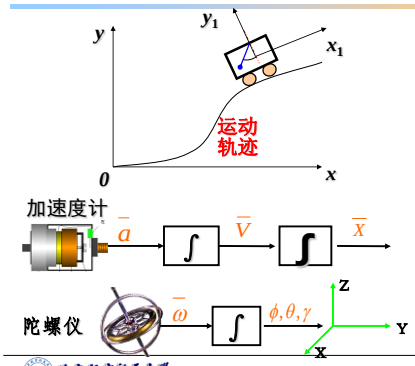
1、掌握初始对准的目的、意义和分类。

2、理解并掌握平台惯导系统的对准过程。

3、理解并掌握捷联惯性导航静基座初始对准过程和方法。

4、了解惯导精对准、动基座对准和传递对准过程和方法。

7.1 概述

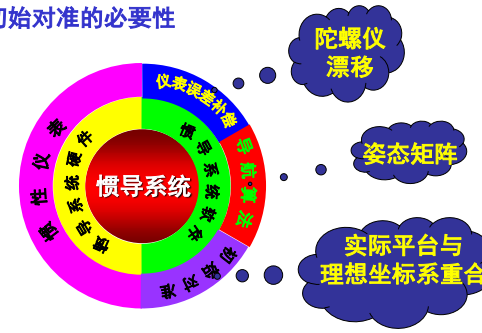


$$v = v_0 + \int_0^t a(t)dt$$

$$X = X_0 + \int_0^t v(t)dt$$

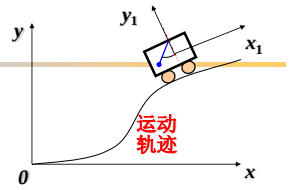
1 概述

➢ 初始对准的必要性



1 概述

➢ 初始对准的必要性



$$v = v_0 + \int_0^t a(t)dt$$

$$X = X_0 + \int_0^t v(t)dt$$

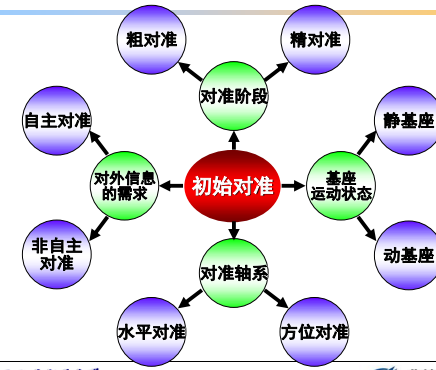
积分运算必须知道初始值！

加速度计

陀螺仪

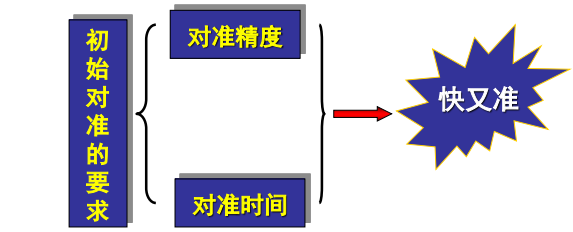
1 概述

初始对准的分类



1 概述

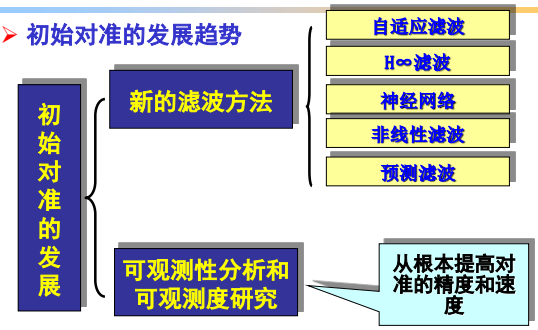
➢ 初始对准的要求



对准精度与对准时间相互制约，不同场合侧重点不同

1 概述

➢ 初始对准的发展趋势



2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

在惯导系统放置点，以下量是已知的

重力加速度	g
地球自传角速度	ω_{ie}
经度	λ
纬度	L
陀螺仪的输出值	ω_{ib}^{b}
加速度计的输出值	f^{b}

λ → $\psi、\vartheta、\gamma$？

$\psi、\vartheta、\gamma$？ → T_b^n？

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$\hat{V}^b = T_n^b \hat{V}^n$$

转置

$$\left(\hat{V}^b\right)^{\mathrm{T}} = \left(\hat{V}^n\right)^{\mathrm{T}} T_b^n$$

$$T_b^n = \left[\left(\hat{V}^n\right)^{\mathrm{T}}\right]^{-1}\left(\hat{V}^b\right)^{\mathrm{T}}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$T_b^n = \left[\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}\right]^{-1}\left(V^b\right)^{\mathrm{T}}$$

？ ？

$$g^n = \begin{bmatrix}0 & 0 & -g\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\omega_{ie}^n = \begin{bmatrix}0 & \omega_{ie}\cos L & \omega_{ie}\sin L\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\Rightarrow \left(V^n\right)^{\mathrm{T}}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$g^n = \begin{bmatrix}0 & 0 & -g\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\omega_{ie}^n = \begin{bmatrix}0 & \omega_{ie}\cos L & \omega_{ie}\sin L\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

$$\Rightarrow \left(V^n\right)^{\mathrm{T}}$$

$$\left(V^n\right)^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}\left(g^n\right)^{\mathrm{T}} \\ \left(\omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}} \\ \left(g^n \times \omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

$$\left(V^b\right)^{\mathrm{T}} = \begin{bmatrix}\left(g^b\right)^{\mathrm{T}} \\ \left(\omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}} \\ \left(g^b \times \omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\left(g^n\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(\omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(g^n\times\omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}\qquad \left(V^b\right)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\left(g^b\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(\omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(g^b\times\omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

$g^b \leftrightarrow$ 加速度计的输出f^b

$\omega_{ie}^b \leftrightarrow$ 加速度计的输出ω_{ib}^b

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\left(g^n\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(\omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(g^n\times\omega_{ie}^n\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0 & 0 & -g\\ 0 & \omega_{ie}\cos L & \omega_{ie}\sin L\\ g\omega_{ie}\cos L & 0 & 0\end{bmatrix}$$

$$\left[\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}\right]^{-1}=\begin{bmatrix}0 & 0 & \dfrac{1}{g\omega_{ie}\cos L}\\ \dfrac{\tan L}{g} & \dfrac{1}{\omega_{ie}\cos L} & 0\\ -\dfrac{1}{g} & 0 & 0\end{bmatrix}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$\left(V^b\right)^{\mathrm{T}}=\begin{bmatrix}\left(g^b\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(\omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}}\\ \left(g^b\times\omega_{ie}^b\right)^{\mathrm{T}}\end{bmatrix}$$

$$=\begin{bmatrix}f_x^b & f_y^b & f_z^b\\ \omega_{ibx}^b & \omega_{iby}^b & \omega_{ibz}^b\\ f_y^b\omega_{ibz}^b-f_z^b\omega_{iby}^b & f_z^b\omega_{ibx}^b-f_x^b\omega_{ibz}^b & f_x^b\omega_{iby}^b-f_y^b\omega_{ibx}^b\end{bmatrix}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始粗对准的原理

$$T_b^n=\left[\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}\right]^{-1}\left(V^b\right)^{\mathrm{T}}$$

$$\hat{T}_b^p=\left[\left(V^n\right)^{\mathrm{T}}\right]^{-1}\left(V^b\right)^{\mathrm{T}}$$

ψ、ϑ、γ

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 一次修正粗对准

$$X_nY_nZ_n \xrightarrow[\text{绕 x,y,z}]{\delta\theta_x,\delta\theta_y,\delta\theta_z} X_cY_cZ_c \xrightarrow[\text{绕 x,y,z}]{\varphi_x,\varphi_y,\varphi_z} X_pY_pZ_p$$

$$\phi_x,\phi_y,\phi_z$$

绕x, y, z

$$X_nY_nZ_n \xrightarrow[\text{绕 x,y,z}]{\phi_x,\phi_y,\phi_z} X_pY_pZ_p$$

$$\delta\theta_x=-\delta L \qquad \delta\theta_y=\delta\lambda\cos L \qquad \delta\theta_z=\delta\lambda\sin L$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 一次修正粗对准

$$X_nY_nZ_n \xrightarrow[\text{绕 x,y,z}]{\phi_x,\phi_y,\phi_z} X_pY_pZ_p$$

$$T_n^p=\begin{bmatrix}\cos\phi_z & \sin\phi_z & 0\\ -\sin\phi_z & \cos\phi_z & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\phi_y & 0 & -\sin\phi_y\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\phi_y & 0 & \cos\phi_y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\phi_x & \sin\phi_x\\ 0 & -\sin\phi_x & \cos\phi_x\end{bmatrix}$$

ϕ_x、ϕ_y、ϕ_z是小角度 ⇒ $\cos\phi_x=1,\sin\phi_x=\phi_x$；$\cos\phi_y=1,\sin\phi_y=\phi_y$；$\cos\phi_z=1,\sin\phi_z=\phi_z$

$$T_n^p=\begin{bmatrix}1 & \phi_z & 0\\ -\phi_z & 1 & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & -\phi_y\\ 0 & 1 & 0\\ \phi_y & 0 & 1\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & 1 & \phi_x\\ 0 & -\phi_x & 1\end{bmatrix}\Rightarrow T_n^p=\begin{bmatrix}1 & \phi_z & -\phi_y\\ -\phi_z & 1 & \phi_x\\ \phi_y & -\phi_x & 1\end{bmatrix}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 一次修正粗对准

$$T_b^n = T_p^n \hat{T}_b^p$$

$$T_n^p = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{f}^p = \boldsymbol{T}_n^p \boldsymbol{g}^n = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} + \nabla^p$$

$$\phi_y = \frac{f_x^p - \nabla_x^p}{g} \qquad \phi_x = -\frac{f_y^p - \nabla_y^p}{g}$$

$$\hat{\phi}_x = -\frac{f_y^p}{g} \qquad \hat{\phi}_y = \frac{f_x^p}{g} \qquad \hat{\phi}_z = ?$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 一次修正粗对准

ψ、ϑ、γ

$$T_b^n = T_p^n \hat{T}_b^p$$

$$T_n^p = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\omega}_{ib}^p = \boldsymbol{T}_n^p \boldsymbol{\omega}_{ie}^n = \begin{bmatrix} 1 & \phi_z & -\phi_y \\ -\phi_z & 1 & \phi_x \\ \phi_y & -\phi_x & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_{ie}\cos L \\ \omega_{ie}\sin L \end{bmatrix} + \varepsilon^p$$

$$\phi_z = \frac{\omega_{ibx}^p + \phi_y \omega_{ie}\sin L - \varepsilon_x^p}{\omega_{ie}\cos L}$$

$$\hat{\phi}_z = \frac{\omega_{ibx}^p + \hat{\phi}_y \omega_{ie}\sin L}{\omega_{ie}\cos L} \qquad \hat{\phi}_y = \frac{f_x^p}{g} \qquad \hat{\phi}_x = -\frac{f_y^p}{g}$$

7.3 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始精对准的原理

$$T_b^n = T_p^n \hat{T}_b^p$$

$$\delta\dot{V}_x = -g\phi_y + 2\omega_{ie}\sin L\,\delta V_y + \nabla_x$$

$$\delta\dot{V}_y = g\phi_x - 2\omega_{ie}\sin L\,\delta V_x + \nabla_y$$

$$\dot{\phi}_x = -\frac{\delta V_y}{R_M} + \omega_{ie}\sin L\,\phi_y - \omega_{ie}\cos L\,\phi_z + \varepsilon_x^p$$

$$\dot{\phi}_y = \frac{\delta V_x}{R_N} - \omega_{ie}\sin L\,\phi_x + \varepsilon_y^p$$

$$\dot{\phi}_z = \frac{\delta V_x}{R_N}\tan L + \omega_{ie}\cos L\,\phi_x + \varepsilon_z^p$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始精对准的原理

$$\boldsymbol{X} = [\delta V_x \quad \delta V_y \quad \phi_x \quad \phi_y \quad \phi_z \quad \nabla_x \quad \nabla_y \quad \varepsilon_x \quad \varepsilon_y \quad \varepsilon_z]^{\mathrm{T}}$$

$$\dot{\boldsymbol{X}} = \boldsymbol{F}\boldsymbol{X} + \boldsymbol{W} \qquad \boldsymbol{Z} = [\delta V_x \quad \delta V_y]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{F} = \begin{bmatrix} 0 & 2\omega\sin L & 0 & -g & 0 & T_{11} & T_{12} & 0 & 0 & 0 \\ -2\omega\sin L & 0 & g & 0 & 0 & T_{21} & T_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1/R_M & 0 & \omega\sin L & -\omega\cos L & 0 & 0 & T_{11} & T_{12} & T_{13} \\ 1/R_N & 0 & -\omega\sin L & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{21} & T_{22} & T_{23} \\ tgL/R_N & 0 & \omega\cos L & 0 & 0 & 0 & 0 & T_{31} & T_{32} & T_{33} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \boldsymbol{H} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始精对准的原理

在精对准过程中，两个水平误差角ϕ_x和ϕ_y收敛速度较快，但方位误差角ϕ_z收敛很慢，滤波器收敛到稳定值的时间至少需要5～10分钟，甚至更长。为了解决这一矛盾，通常利用水平误差角收敛速度快的特点来估算方位平台误差角，即利用水平误差角ϕ_x和ϕ_y的稳态值来估算方位误差角ϕ_z，其数学模型为

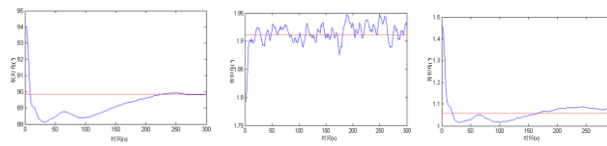
$$\phi_z = \frac{-\dot{\phi}_x + \phi_y \omega_{ie}\sin L - \dfrac{\delta V_y}{R_M}}{\omega_{ie}\cos L}$$

由于式中含有ϕ_x的一阶导数$\dot{\phi}_x$，ϕ_x在收敛过程中叠加了许多较小的扰动噪声，会导致一阶导数$\dot{\phi}_x$的值变得不稳定，影响ϕ_z的收敛。为解决此问题，可采用双线性变换对ϕ_z进行低通滤波来滤除这些高频噪声

2 捷联惯导系统的初始对准

➢ 静基座初始精对准的原理

实的惯性测量组件(Inertial Measurement Unit，IMU)在实验车上在线采集的静态数据，其中陀螺漂移为$0.5^\circ/h$，加速度计零偏为$2\times10^{-5}g$；经度为116.15326°，纬度为39.81333°，高度为70m；速度$V_x^n = V_y^n = V_z^n = 0\ m/s$。



2 捷联惯导系统的初始对准

➢ **静基座初始粗对准的原理**

$$\begin{bmatrix} f_x^b \\ f_y^b \\ f_z^b \end{bmatrix} = T_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g\sin\gamma\cos\vartheta \\ -g\sin\vartheta \\ -g\cos\gamma\cos\vartheta \end{bmatrix}$$

$$\psi = tg^{-1}\frac{Mag_x^n}{Mag_y^n}$$

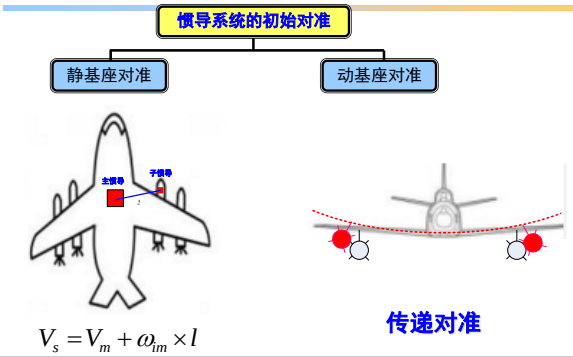
$$\begin{bmatrix} Mag_x^n \\ Mag_y^n \\ Mag_z^n \end{bmatrix} = \hat{T}_b^n \begin{bmatrix} Mag_x^b \\ Mag_y^b \\ Mag_z^b \end{bmatrix}$$

$$\hat{\gamma} = \tan^{-1}\left(\frac{f_x^b}{-f_z^b}\right)$$

$$\hat{\vartheta} = \tan^{-1}\left(\frac{f_y^b}{\sqrt{f_x^{b2}+f_z^{b2}}}\right)$$

$$\hat{T}_n^b = \begin{bmatrix} \cos\hat{\gamma} & \sin\hat{\gamma}\sin\hat{\vartheta} & -\sin\hat{\gamma}\cos\hat{\vartheta} \\ 0 & \cos\hat{\vartheta} & \sin\hat{\vartheta} \\ \sin\hat{\gamma} & -\cos\hat{\gamma}\sin\hat{\vartheta} & \cos\hat{\gamma}\cos\hat{\vartheta} \end{bmatrix}$$

7.5 惯导系统的动基座初始对准



$$V_s = V_m + \omega_{im} \times l$$

传递对准

3 惯导系统的传递对准

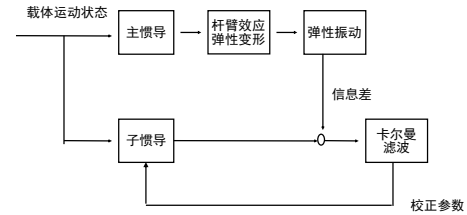
➢ **传递对准的意义**

✓ 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**

3 惯导系统的传递对准

➢ **传递对准原理框图**



传递对准的基本原理图

3 惯导系统的传递对准

➢ **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

3 惯导系统的传递对准

➢ **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。

3 惯导系统的传递对准

➢ 计算参数匹配法

子惯导进入导航状态，更新位置、速度和姿态

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

$$X=\begin{bmatrix}\phi_x & \phi_y & \phi_z & \delta V_x & \delta V_y & \cdots\end{bmatrix}^T$$

$$Z=\begin{bmatrix}V_{sx}-V_{mx}\\ V_{sy}-V_{my}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&0&1&0&\cdots\\0&0&0&0&1&\cdots\end{bmatrix}X+V$$ （直线飞行）

$$Z=\begin{bmatrix}V_{sx}-V_{mx}-\omega^g_{imy}l^g_z+\omega^g_{imz}l^g_y\\ V_{sy}-V_{my}-\omega^g_{imz}l^g_x+\omega^g_{imx}l^g_z\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}0&0&0&1&0&\cdots\\0&0&0&0&1&\cdots\end{bmatrix}X+V$$ （S形机动）

3 惯导系统的传递对准

➢ 测量参数匹配法

读取陀螺仪和加速度计的数据

$$x_my_mz_m \xrightarrow[\phi_x、\phi_y、\phi_z]{绕x、y、z} x_by_bz_b \xrightarrow[\theta_x、\theta_y、\theta_z]{绕x、y、z} x_sy_sz_s$$

T_n^m **准确已知** $T_n^s(0)$ **待求**

$$T_m^s \longrightarrow T_n^s=T_m^sT_n^m$$

$$\omega_{is}^s=\omega_{im}^s+\dot{\theta}^s=T_m^s\omega_{im}^m+\dot{\theta}^s$$

$$\phi_x、\phi_y、\phi_z,\ \theta_x、\theta_y、\theta_z \Rightarrow T_m^s=\begin{bmatrix}1&\phi_z+\theta_z&-\phi_y-\theta_y\\-\phi_z-\theta_z&1&\phi_x+\theta_x\\\phi_y+\theta_y&-\phi_x-\theta_x&1\end{bmatrix}=I-\phi_\times-\theta_\times$$

3 惯导系统的传递对准

➢ 测量参数匹配法

读取陀螺仪和加速度计的数据

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

$$X=\begin{bmatrix}\phi_x&\phi_y&\phi_z&\theta_x&\dot{\theta}_x&\theta_y&\dot{\theta}_y&\theta_z&\dot{\theta}_z&\varepsilon_{cx}&\varepsilon_{cy}&\varepsilon_{cz}\end{bmatrix}^T$$

$$z=\omega_{is}^s-\omega_{im}^m=T_m^s\omega_{im}^m+\dot{\theta}^s+\varepsilon_c+\varepsilon_r-\omega_{im}^m$$

$$=-(\phi+\theta)\times\omega_{im}^m+\dot{\theta}^s+\varepsilon_c+\varepsilon_r$$

$$=\omega_{im}^m\times(\phi+\theta)+\dot{\theta}^s+\varepsilon_c+\varepsilon_r$$

$T_n^s(0)$ ⇑ $T_n^s=T_m^sT_n^m$ ⇑

$$T_m^s=\begin{bmatrix}1&\phi_z+\theta_z&-\phi_y-\theta_y\\-\phi_z-\theta_z&1&\phi_x+\theta_x\\\phi_y+\theta_y&-\phi_x-\theta_x&1\end{bmatrix}$$

3 惯导系统的传递对准

➢ 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

本章小结

1、初始对准的目的、意义和分类。

2、平台惯导系统的对准过程。

3、联惯性导航静基座初始对准过程和方法。

4、惯导精对准、动基座对准和传递对准过程和方法。