



# 惯性导航系统仿真分析

Simulation and Analyse of INS

## 第08讲 平台惯导系统初始对准



哈尔滨工程大学

HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

主讲人: 程建华 教授

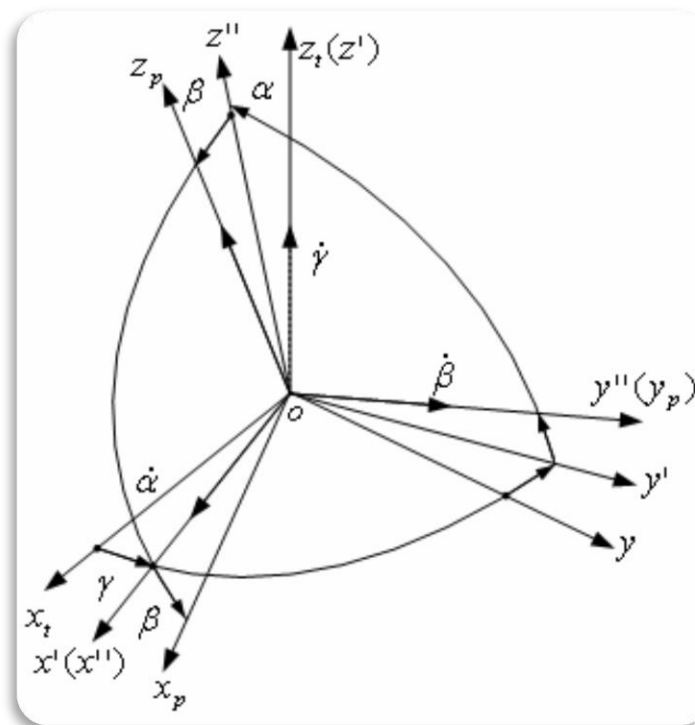
2022.03

# 惯性导航系统初始化

$$\begin{aligned}\dot{V}_{cx} &= A_x + (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_{cx}}{R}tg\varphi_c)V_{cy} + \Delta A_x & V_{cx}(0) &= V_{x0} \\ \dot{V}_{cy} &= A_y - (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_{cx}}{R}tg\varphi_c)V_{cx} + \Delta A_y & V_{cy}(0) &= V_{y0} \\ \dot{\varphi}_c &= \frac{V_{cy}}{R} & \varphi_c(0) &= \varphi_0 \\ \dot{\lambda}_c &= \frac{V_{cx}}{R \cos\varphi_c} & \lambda_c(0) &= \lambda_0 \\ \omega_{cx} &= -V_{cy}/R + U_x \\ \omega_{cy} &= \omega_{ie}\cos\varphi_c + V_{cx}/R + U_y \\ \omega_{cz} &= \omega_{ie}\sin\varphi_c + V_{cx}tg\varphi_c/R + U_z\end{aligned}$$

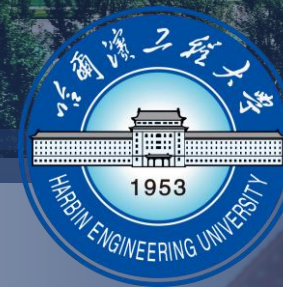
惯导系统导航解算方程

1. 初始速度
2. 初始位置
3. 陀螺测漂



**4. 平台的初始取向  
(姿态初始对准)**

# 目录



一 惯导系统姿态对准概况

二 惯导系统姿态粗对准

三 惯导系统姿态精对准



# 1. 惯导系统姿态对准概况

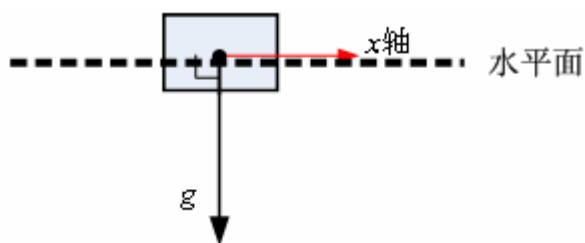


## 1

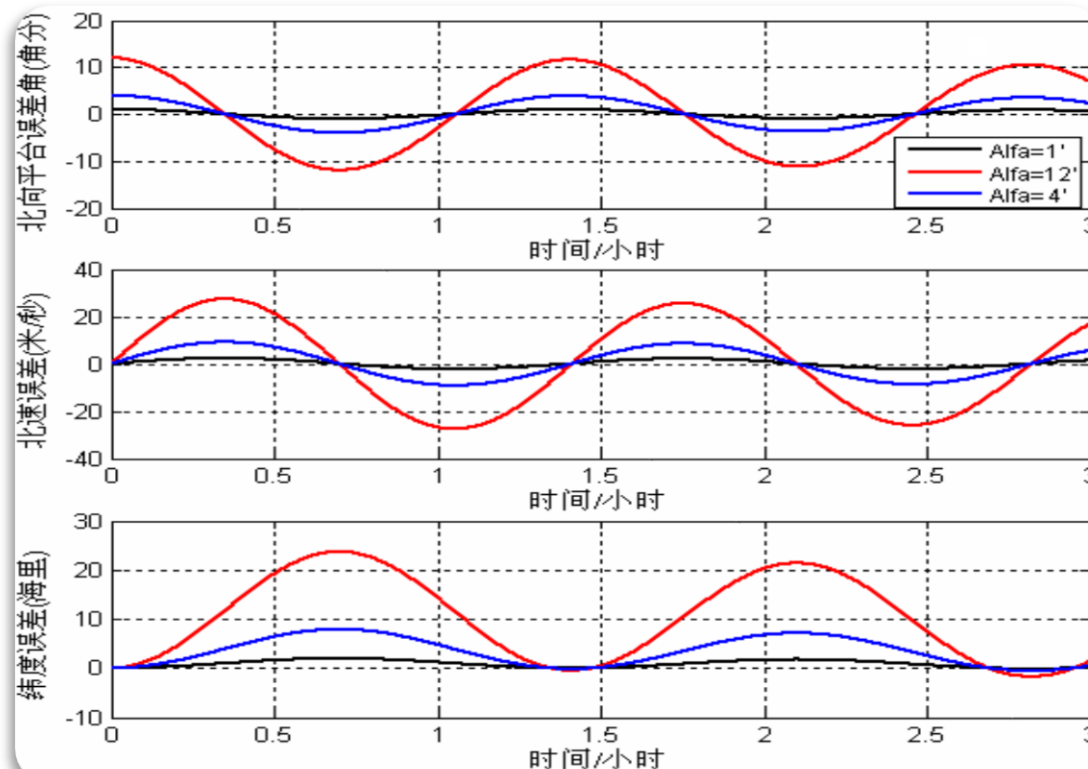
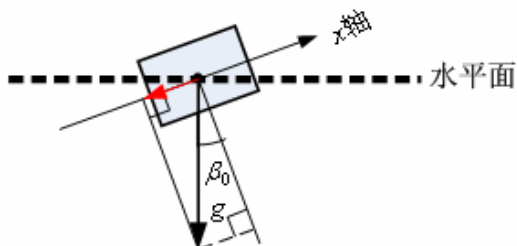
## 姿态对准定义

在惯导系统尚未正式进入导航工作状态之前，建立导航状态所必需的初始条件，即建立平台的初始误差角 $\alpha_0$ 、 $\beta_0$ 、 $\gamma_0$ 。

静基座条件:  $A_x = -g \sin \beta = 0$



静基座条件:  $A_x = -g \sin \beta = -g \sin \beta_0$



# 1. 惯导系统姿态对准概况



## 2

## 姿态对准方法

### (1) 光学或机电的方法

**描述：**将外部参考坐标系引入平台，使平台对准在外部提供的姿态基准方向。

**特点：**对外部参考基准要求精度很高，一般不容易满足条件。

### (2) 自对准法

**描述：**利用惯导本身的惯性器件敏感失调角信号结合系统作用原理进行自动对准。

**特点：**对准方法实用、较为成熟，自主性强。能满足导航系统对初始对准精度的要求。

但对器件精度和载体运动的要求较高。

### (3) 传递对准

**描述：**利用来自主惯导系统（精度较高）的测量（加速度、角速度）或计算信息（速度、姿态、位置）信息，确定运载体自身惯导系统平台的初始取向（或姿态矩阵的初始值）。

**特点：**对准速度快，精度受器件精度影响小。但不完全成熟。

# 1. 惯导系统姿态对准概况



## 3

## 姿态对准流程

自对准分为粗对准和精对准两部分。

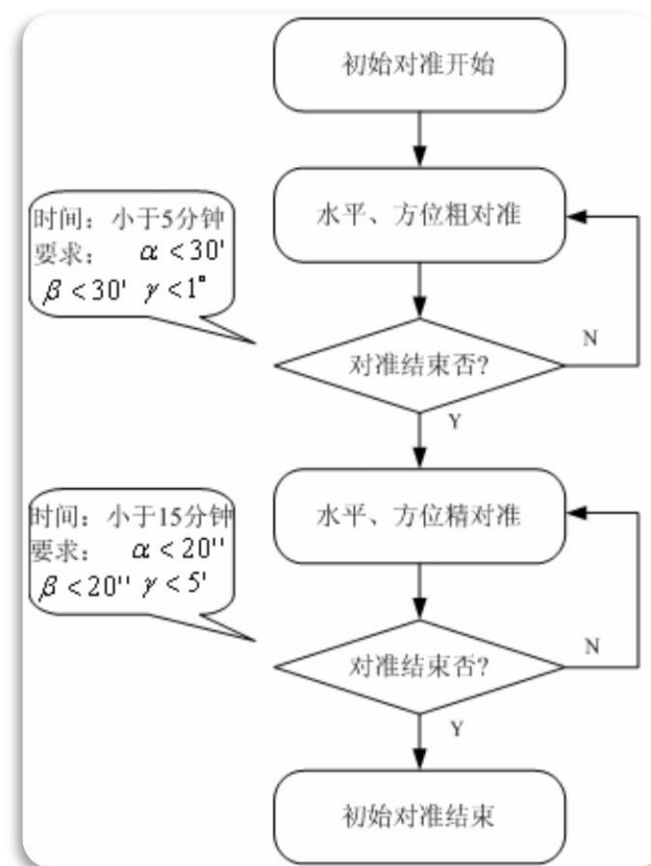
### (1) 粗对准

将惯性平台在较短的时间里校准在一定的精度范围内，而对精度没有严格的要求，即粗对准只实现平台水平和方位的粗调。

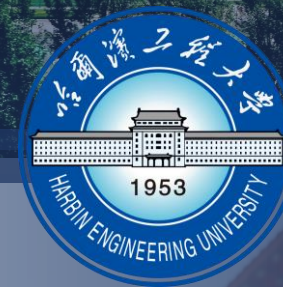
### (2) 精对准

结合系统作用原理（水平以重力矢量确定水平，方位采用罗经效应完成）。精对准是在粗对准的基础上进行，主要要求是对准的精度。也就是说，精对准结束后，平台的水平和方位精度要达到惯导工作状态对初始条件的精度要求，同时对时间也有一定的要求。

对准流程及要求如右图所示：



# 目录



一 惯导系统姿态对准概况

二 惯导系统姿态粗对准

三 惯导系统姿态精对准

## 2. 惯导系统姿态粗对准



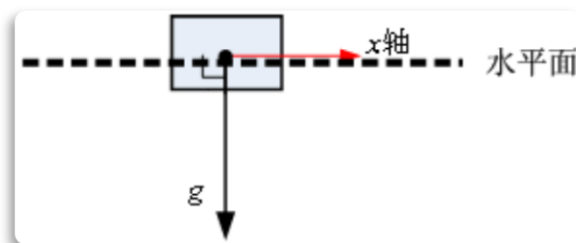
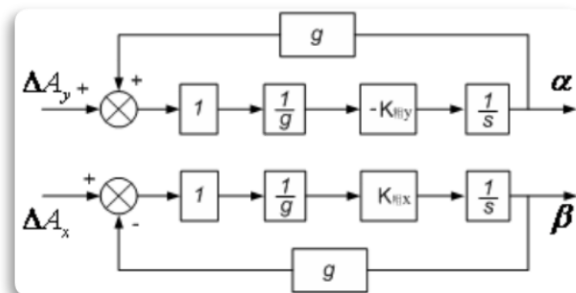
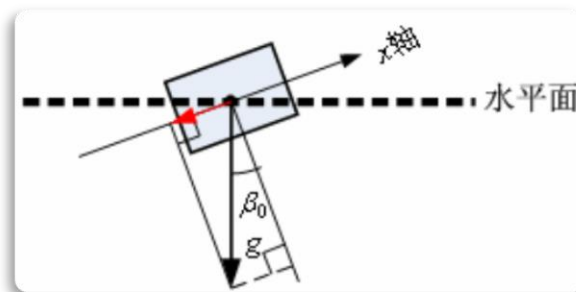
### 1 水平粗对准

**原理：**通过安装在惯性平台上的两个互相垂直的加速度计敏感重力矢量实现。即当平台不平时，加速度计敏感重力矢量输出，通过放大环节加给陀螺仪力矩器，使陀螺仪产生进动，通过平台稳定回路带动平台转动，直到平台水平，此时加速度计输出讯号为零，水平误差角接近于零，完成水平精对准。

**流程：**（静基座条件）

$$\left. \begin{aligned} A_{px} &= -g \sin \beta + \Delta A_x \\ A_{py} &= g \sin \alpha + \Delta A_y \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \omega_{cx} &= -K_{\text{粗}y} \cdot A_{py} / g + U_x \\ \omega_{cy} &= -K_{\text{粗}x} \cdot A_{px} / g + \omega_{ie} \cos \varphi + U_y \\ \omega_{cz} &= \omega_{ie} \sin \varphi + U_z \end{aligned} \right\}$$

**输出：**  $\alpha(s) = \frac{1}{\frac{g}{K_{\text{粗}y}} s + 1} \Delta A_y(s)$        $\beta(s) = \frac{1}{\frac{g}{K_{\text{粗}x}} s + 1} \Delta A_x(s)$





## 2. 惯导系统姿态粗对准



### 1 水平粗对准

**参数设计：** 由于粗对准以实现系统快速收敛为目标，因此选取水平回路参数时，选取的比例环节的放大系数较大，目的是实现水平回路的快速收敛。 给定一组实用的参数，仿真结果如图1、图2 所示。

$$K_{\text{粗}x} = K_{\text{粗}y} = 0.03333 \quad \Delta A_x = \Delta A_y = 0 \quad \alpha_0 = 5^\circ \quad \beta_0 = 3^\circ$$

**抗干扰特性分析：** 粗对准回路是一阶系统，抗干扰能力较差，易受到摇摆加速度的影响。

**给定：**

$$A_y = 1.08 * \sin(2\pi t/6) \quad \Delta A_x = \Delta A_y = 0 \quad \alpha_0 = 5^\circ \quad \beta_0 = 3^\circ$$

仿真结果如图3所示。

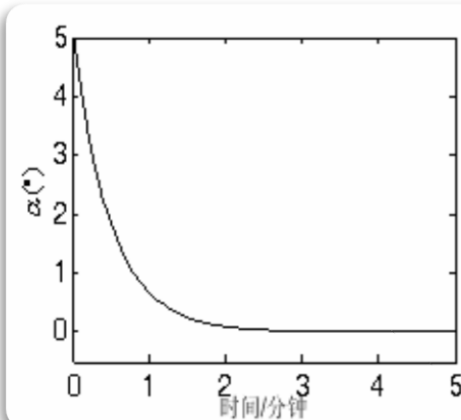


图1 北向平台误差角

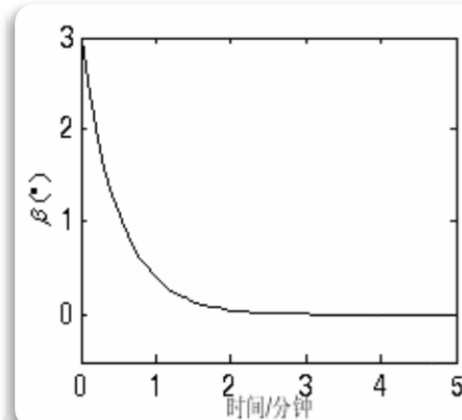


图2 东向平台误差角

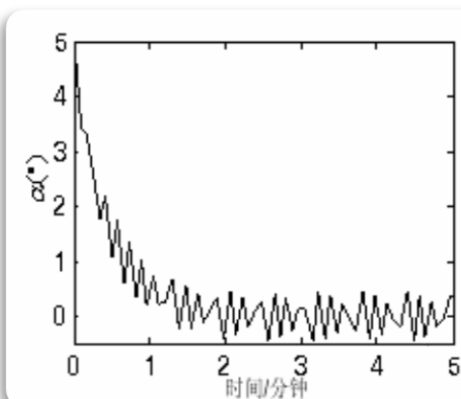


图3 北向平台误差角

## 2. 惯导系统姿态粗对准



### 2

### 方位粗对准

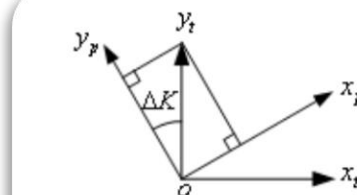
在水平粗对准进入稳定状态后，通过连续记录陀螺水平轴的控制信息，求其平均值，可计算出惯性平台北与真北的差值，通过对陀螺施加固定修正力矩，可实现方位粗对准。

$$\Delta K = \arctan \frac{\bar{\omega}_{cx}}{\bar{\omega}_{cy}} \quad \bar{\omega}_{cy} > \bar{\omega}_{cx}$$

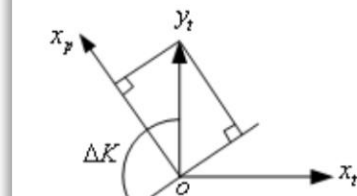
$$\Delta K = \arctan \frac{\bar{\omega}_{cy}}{\bar{\omega}_{cx}} \quad \bar{\omega}_{cx} > \bar{\omega}_{cy}$$

$$\text{其中: } \bar{\omega}_{cx} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega_{cx} dt \quad \bar{\omega}_{cy} = \frac{1}{T} \int_0^T \omega_{cy} dt$$

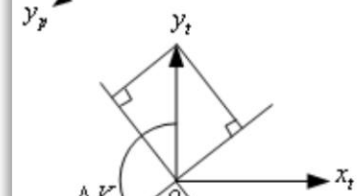
也可以通过引入外部航向基准的情况下完成方位粗对准。



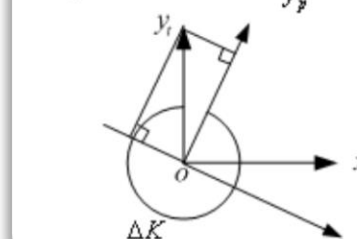
$$\begin{cases} \omega_{xp} = \Omega \cos \varphi \sin \Delta K & \omega_{xp} > 0 \\ \omega_{yp} = \Omega \cos \varphi \cos \Delta K & \omega_{yp} > 0 \end{cases} \quad 0^\circ < \Delta K < 90^\circ$$



$$\begin{cases} \omega_{xp} = \Omega \cos \varphi \sin \Delta K & \omega_{xp} > 0 \\ \omega_{yp} = \Omega \cos \varphi \cos \Delta K & \omega_{yp} < 0 \end{cases} \quad 90^\circ < \Delta K < 180^\circ$$



$$\begin{cases} \omega_{xp} = \Omega \cos \varphi \sin \Delta K & \omega_{xp} < 0 \\ \omega_{yp} = \Omega \cos \varphi \cos \Delta K & \omega_{yp} < 0 \end{cases} \quad 180^\circ < \Delta K < 270^\circ$$



$$\begin{cases} \omega_{xp} = \Omega \cos \varphi \sin \Delta K & \omega_{xp} < 0 \\ \omega_{yp} = \Omega \cos \varphi \cos \Delta K & \omega_{yp} > 0 \end{cases} \quad 270^\circ < \Delta K < 360^\circ$$

# 目录



一 惯导系统姿态对准概况

二 惯导系统姿态粗对准

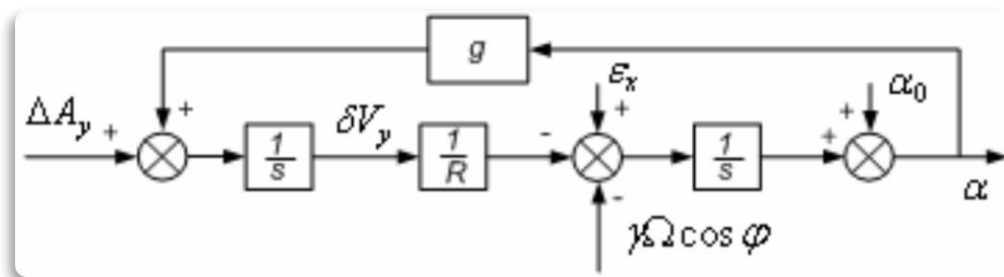
三 惯导系统姿态精对准

### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

**基本原理：** 采用安装在惯性平台上的两个互相垂直的加速度计敏感重力矢量，通过合理的设计水平精对准控制网络，达到导航系统对水平误差角的要求。



由简化单通道北向水平回路误差方块图，可推导出北向平台误差角输出：

$$\alpha(s) = \frac{[\varepsilon_x(s) - \gamma_0(s)\omega_{ie}\cos\varphi]s}{s^2 + \omega_s^2} - \frac{\Delta A_y(s)}{R(s^2 + \omega_s^2)} + \frac{\alpha_0(s)s^2}{s^2 + \omega_s^2}$$

$$\text{其中: } \omega_s = \sqrt{\frac{g}{R}} = 1.239 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$$

假定误差源均为常值，可得： $\alpha(t) = \frac{1}{\omega_s}(\varepsilon_x - \gamma_0\omega_{ie}\cos\varphi)\sin\omega_s t - \frac{\Delta A_y}{g}(1 - \cos\omega_s t) + \alpha_0\cos\omega_s t$

1. 系统虽然为负反馈系统，但系统为无阻尼自由振荡，即无法实现误差收敛。
2. 无阻尼自由振荡周期长，无法满足水平精对准的时间要求。



### 3. 惯导系统姿态精对准



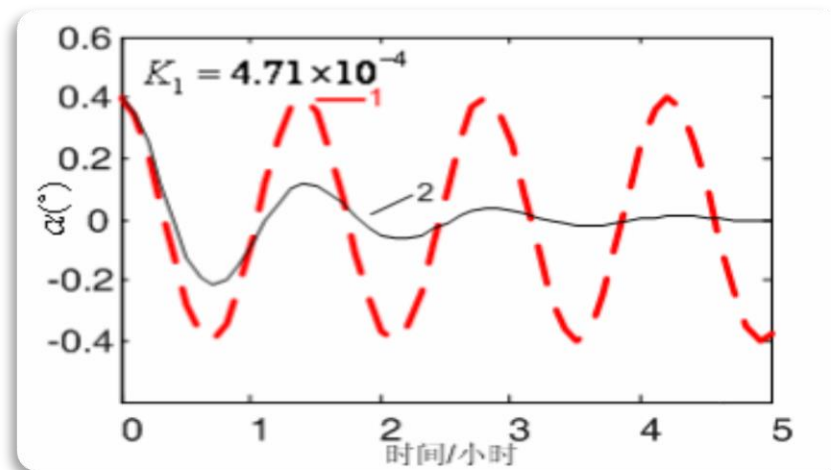
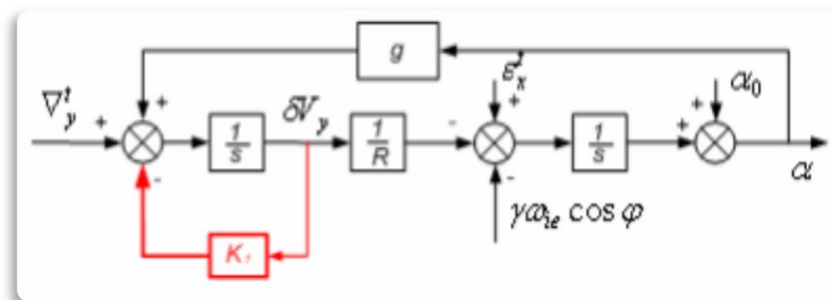
#### 1 水平精对准

##### 回路设计:

1. 在回路中增加比例环节 $K_1$ , 对积分环节构成负反馈。加入阻尼环节后, 回路特征方程式变为:

$$\Delta(s) = s^2 + K_1 s + \omega_s^2$$

增加了阻尼项 $K_1 s$ 后, 可以使平台误差角稳定至平衡位置。



### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

##### 回路设计:

1. 在回路中增加比例环节 $K_1$ , 对积分环节构成负反馈。加入阻尼环节后, 回路特征方程式变为:

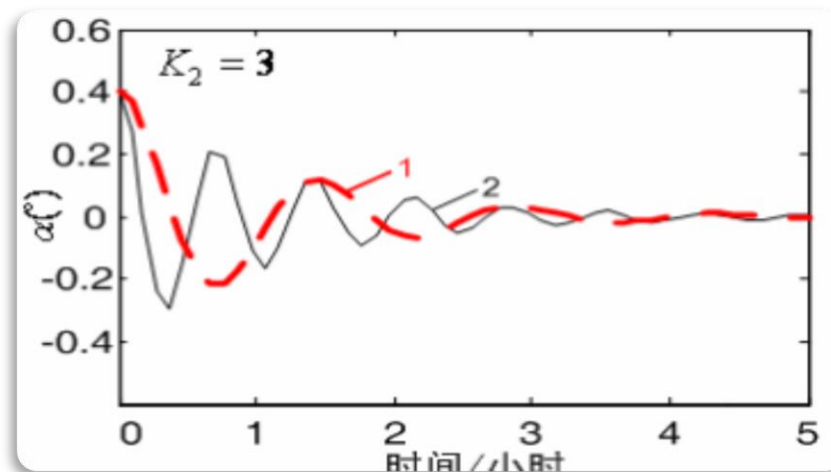
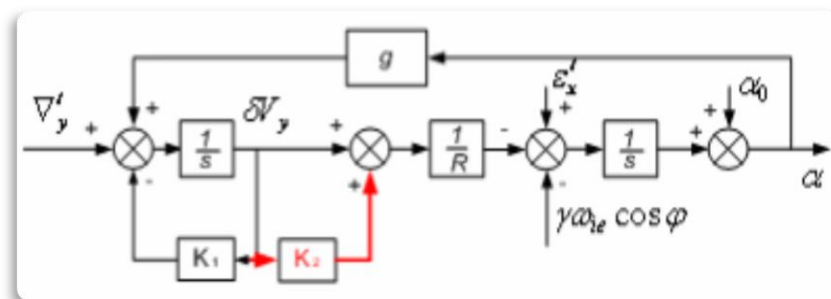
$$\Delta(s) = s^2 + K_1 s + \omega_s^2$$

增加了阻尼项 $K_1 s$ 后, 可以使平台误差角稳定至平衡位置。

2. 为满足快速性的要求, 须提高系统的固有振荡频率。解决的方法是在水平回路中增加顺馈并联环节。回路特征方程式变为:

$$\Delta(s) = s^2 + K_1 s + (1 + K_2)\omega_s^2$$

增加 $K_2$ 后, 固有振荡频率变为原来的 $\sqrt{1 + K_2}$ 倍。



### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

##### 回路设计:

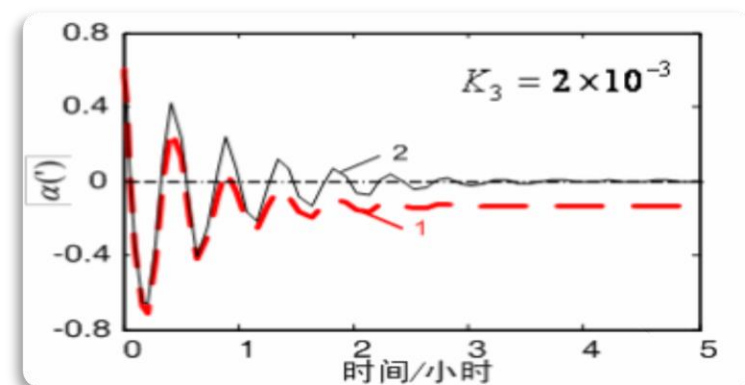
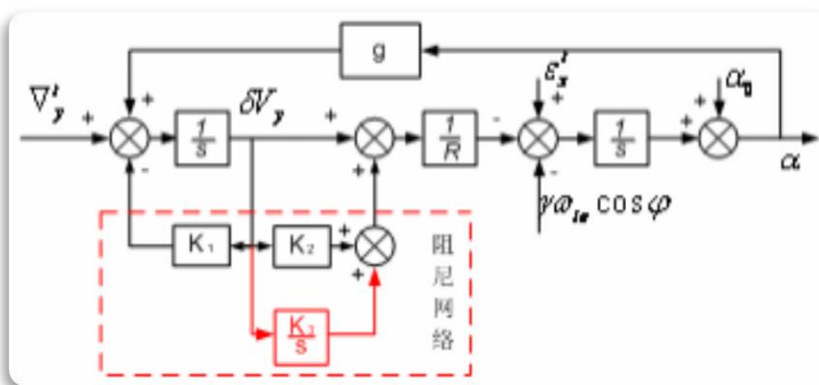
引入 $K_1$ 和 $K_2$ 后, 水平误差角输出为: 
$$\alpha(s) = \frac{R(s + K_1)[\varepsilon_x^t(s) - \gamma(s)\omega_{ie}\cos\varphi] - \nabla_y^t(s)(1 + K_2) + \alpha_0(s)Rs(s + K_1)}{Rs^2 + RK_1s + g(1 + K_2)}$$

假定误差源均为常值, 由终值定理可得其稳态值: 
$$\alpha_s = \lim_{s \rightarrow 0} s\alpha(s) = -\frac{\nabla_y^t}{g} + \frac{RK_1}{g(1 + K_2)}(\varepsilon_x^t - \gamma\omega_{ie}\cos\varphi)$$

引入积分环节 $K_3/s$ : 
$$\alpha(s) = \frac{Rs(s + K_1)[\varepsilon_x^t(s) - \gamma(s)\omega_{ie}\cos\varphi] - \nabla_y^t(s)[(1 + K_2)s + K_3] + \alpha_0(s)Rs^2(s + K_1)}{Rs^3 + RK_1s^2 + g(1 + K_2)s + gK_3}$$

由终值定理可得其稳态值为:

$$\alpha_s = \lim_{s \rightarrow 0} s\alpha(s) = -\frac{\nabla_y^t}{g}$$



### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

参数设计:  $\Delta(s) = s^3 + K_1 s^2 + (1 + K_2) \omega_s^2 s + K_3 \omega_s^2 = 0$  (1)

令其特征根为:  $s_1 = -\sigma$   $s_{2,3} = -\sigma \pm j\omega_a$

$$(s + \sigma)(s^2 + 2\sigma s + \sigma^2 + \omega_a^2) = 0 \quad (2)$$

$$\text{由: } \sigma = \xi \omega_c \quad \omega_a = \sigma \sqrt{(1 - \xi^2)/\xi^2}$$

$$(2) \text{ 式变为: } s^3 + 3\sigma s^2 + (2 + \frac{1}{\xi^2})\sigma^2 s + \frac{\sigma^3}{\xi^2} = 0 \quad (3)$$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= 3\sigma \\ K_2 &= (2 + \frac{1}{\xi^2}) \frac{\sigma^2}{\omega_s^2} - 1 \\ K_3 &= \sigma^3 / \xi^2 \omega_s^2 \end{aligned} \right\}$$

对于引入控制网络的北向平台误差角输出, 其解包括:

1. 稳态解:  $\alpha_s = \lim_{s \rightarrow 0} s \alpha(s) = -\frac{\Delta A_y}{g}$

2. 齐次解:  $\alpha(t) = \alpha_0(t) e^{-\sigma t} \left[ -\frac{2\xi^2}{1 - \xi^2} + \frac{1 + \xi^2}{1 - \xi^2} \cos(\sigma \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}} t) + \frac{1}{\sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}} \sin(\sigma \sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}} t) \right]$

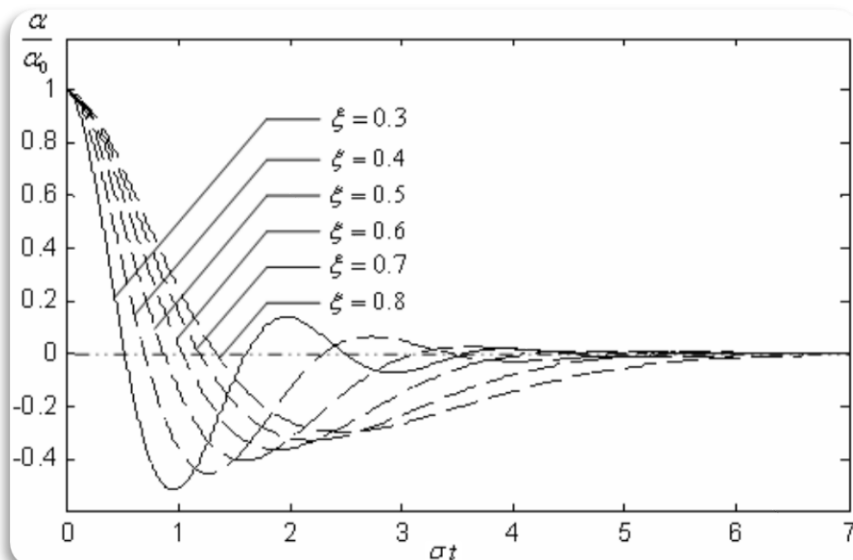


### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

根据 $\alpha(t)$ 输出, 以为 $\sigma t$ 横坐标,  $\alpha/\alpha_0$ 为纵坐标,  $\xi$ 为参变量, 得到三阶系统瞬态标准曲线和表。



#### 设计要求:

1. 阻尼系数0.7;
2. 系统在15分种后姿态误差小于12"。

设计要求:

$$\left. \begin{array}{l} \xi = 0.700 \\ \sigma = 0.006 \end{array} \right\}$$



$$\left. \begin{array}{l} K_1 = 0.0180 \quad 1/s \\ K_2 = 93.762 \\ K_3 = 0.2872 \quad 1/s \end{array} \right\}$$

	$\xi=0.3$	$\xi=0.4$	$\xi=0.5$	$\xi=0.6$	$\xi=0.7$	$\xi=0.8$
0.0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.2	0.7799	0.8602	0.8982	0.9190	0.9317	0.9400
0.4	0.3053	0.5401	0.6599	0.7281	0.7703	0.7981
0.6	-0.1631	0.1735	0.3709	0.4904	0.5668	0.6182
0.8	-0.4542	-0.1426	0.0933	0.2508	0.3567	0.4301
1.0	-0.5175	-0.3547	-0.1341	0.0382	0.1627	0.2526
1.2	-0.4006	-0.4489	-0.2929	-0.1317	-0.0022	0.0966
1.4	-0.1988	-0.4409	-0.3807	-0.2533	-0.1323	-0.0326
1.6	-0.0104	-0.3624	-0.4061	-0.3279	-0.2267	-0.1337
1.8	0.1075	-0.2496	-0.3833	-0.3612	-0.2880	-0.2078
2.0	0.1381	-0.1343	-0.3289	-0.3616	-0.3207	-0.2576
4.0	0.0189	-0.0294	0.0185	-0.0091	-0.0813	-0.1443
4.2	0.0130	-0.0273	0.0109	0.0007	-0.0604	-0.1218
4.4	0.0035	-0.0214	0.0034	0.0063	-0.0433	-0.1015
4.6	-0.0049	-0.0139	-0.0028	0.0087	-0.0297	-0.0834
4.8	-0.0094	-0.0067	-0.0073	0.0088	-0.0193	-0.0677
5.0	-0.0097	-0.0011	-0.0099	0.0076	-0.0116	-0.0543
5.2	-0.0068	0.0025	-0.0108	0.0056	-0.0061	-0.0429
5.4	-0.0029	0.0040	-0.0103	0.0034	-0.0023	-0.0335
5.6	0.0005	0.0039	-0.0090	0.0014	0.0000	-0.0257
5.8	0.0024	0.0029	-0.0071	-0.0004	0.0014	-0.0194
6.0	0.0026	0.0014	-0.0052	-0.0017	0.0020	-0.0144
6.2	0.0017	-0.0001	-0.0033	-0.0026	0.0021	-0.0105
6.4	0.0003	-0.0012	-0.0018	-0.0031	0.0019	-0.0075
6.6	-0.0008	-0.0018	-0.0007	-0.0033	0.0015	-0.0051
6.8	-0.0013	-0.0019	0.0001	-0.0032	0.0011	-0.0034
7.0	-0.0013	-0.0017	0.0005	-0.0029	0.0007	-0.0022

### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 1 水平精对准

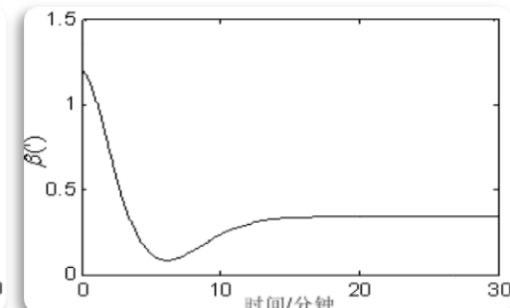
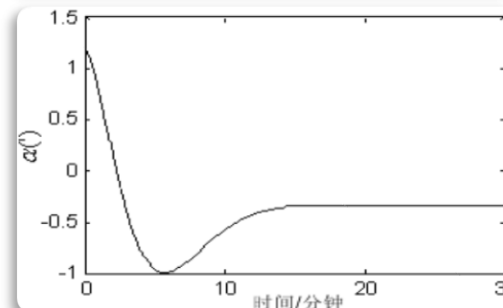
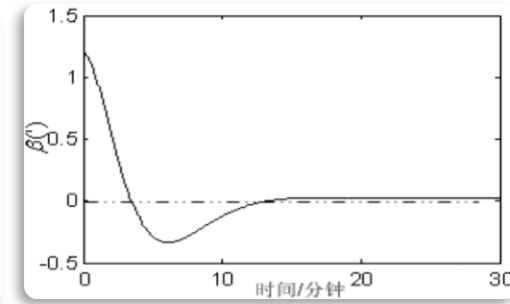
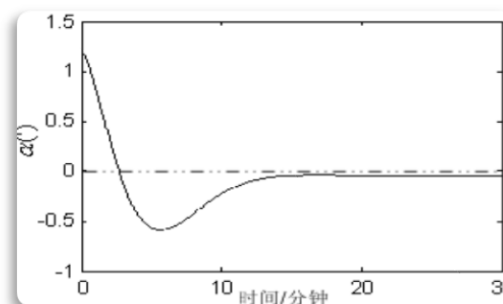
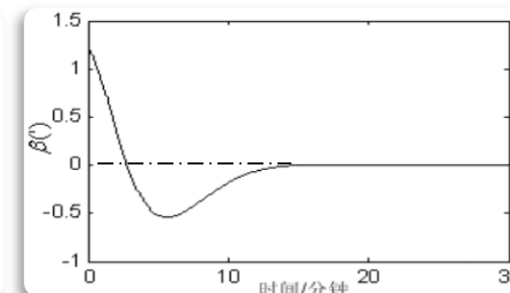
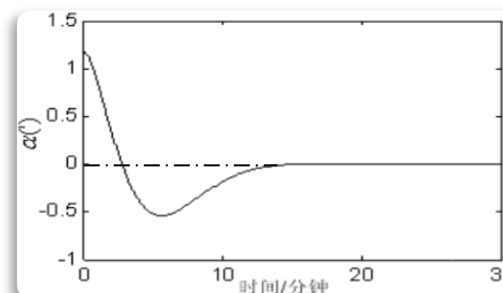
**仿真验证：** 给定不同的初始误差源，对精对准的稳态输出、收敛特性及参数设计的正确性进行验证。

稳态输出：  $\alpha_s = -\Delta A_y/g$   $\beta_s = \Delta A_x/g$

条件：  $\alpha_0 = \beta_0 = 0.02^\circ$   $\gamma_0 = 0.5^\circ$       输出：  $\alpha_s = 0$   
 $\Delta A_x = \Delta A_y = 0$   $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.005^\circ/h$        $\beta_s = 0$

条件：  $\alpha_0 = \beta_0 = 0.02^\circ$   $\gamma_0 = 0.5^\circ$       输出：  $\alpha_s = -0.034'$   
 $\Delta A_x = \Delta A_y = 10^{-5}g$   $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.005^\circ/h$        $\beta_s = 0.034'$

条件：  $\alpha_0 = \beta_0 = 0.02^\circ$   $\gamma_0 = 0.5^\circ$       输出：  $\alpha_s = -0.34'$   
 $\Delta A_x = \Delta A_y = 10^{-4}g$   $\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.005^\circ/h$        $\beta_s = 0.34'$



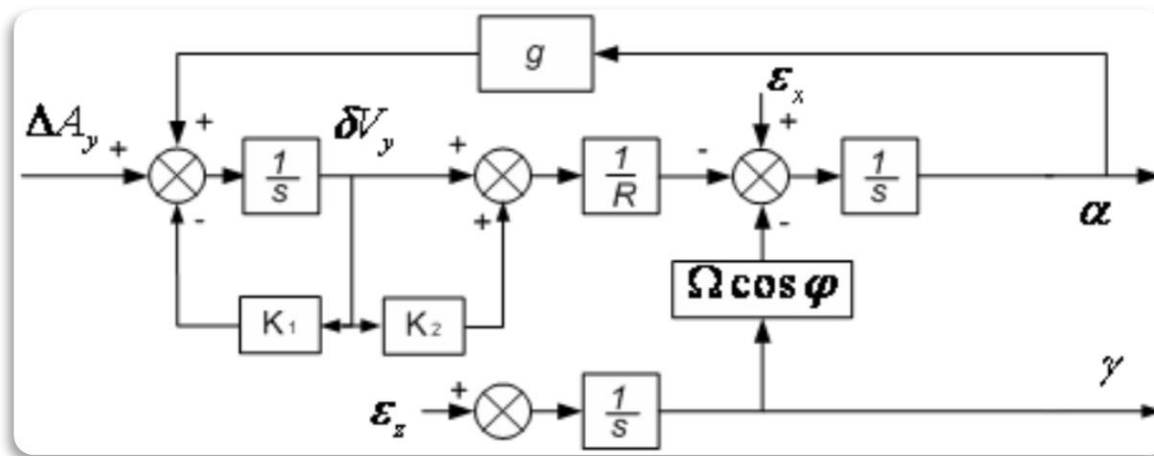
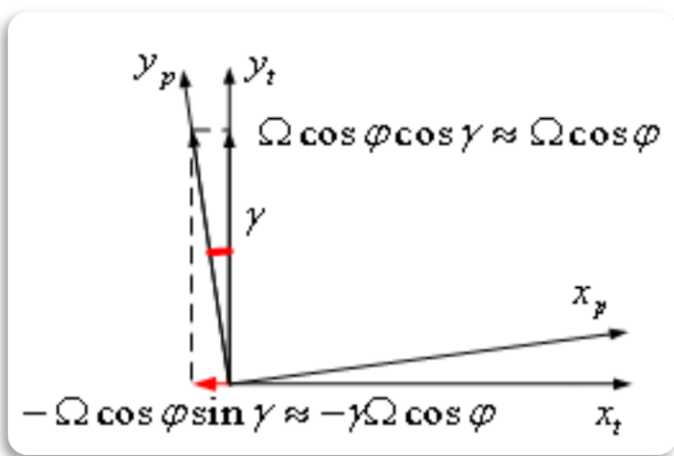
### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2 方位精对准

**原理：**方位精对准是在水平精对准的基础上进行的，其实现原理是采用罗经效应控制方位轴精确找北。

**罗经效应：**在北向水平精校准回路中，有一等效陀螺漂移项 $\gamma\omega_{ie}\cos\varphi$ 。即当平台坐标系与地理坐标系存在方位误差角时，平台上的陀螺仪将敏感地球速率在平台坐标系 $x_p$ 轴上的分量 $\gamma\omega_{ie}\cos\varphi$ ，此分量相当于陀螺漂移，使平台有倾斜角 $\alpha$ 。平台有倾斜角导致加速度计敏感分量 $\alpha g$ ，经积分后产生速度误差 $\delta V_y$ 。我们把 $\gamma\omega_{ie}\cos\varphi$ 的影响称为罗经效应。



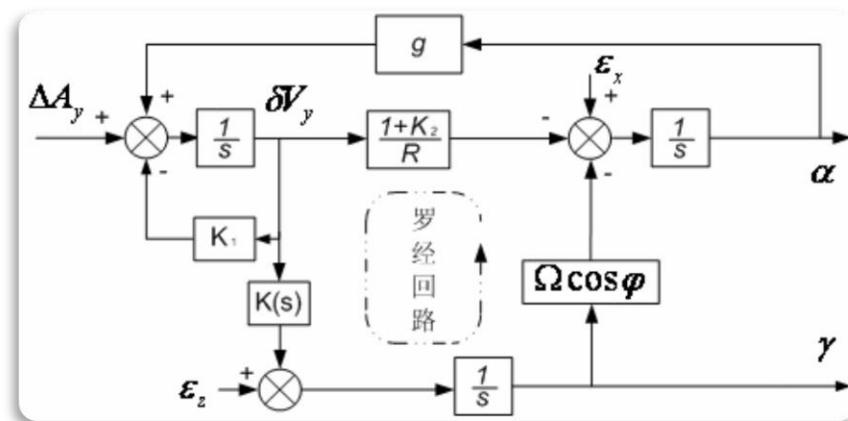
### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2 方位精对准

罗经回路设计：引入反馈网络 $K(s)$ 。

罗经回路闭环输出：



$$\gamma(s) = \frac{[Rs^2 + RK_1s + \omega_s^2(1 + K_2)][s\gamma_0(s) + \varepsilon_z(s)] + \varepsilon_x(s)K(s)g + \Delta A_y(s)K(s)s + \alpha_0(s)gsK(s)}{s^3 + K_1s^2 + (1 + K_2)\omega_s^2s + \omega_{ie}\cos\varphi K(s)g}$$

选取方位控制网络为惯性环节： $K(s) = \frac{K_z}{R\Omega\cos\varphi(s + K_3)}$

罗经回路闭环最终输出：

$$\gamma(s) = \frac{(s + K_3)[Rs^2 + RK_1s + \omega_s^2(1 + K_2)][s\gamma_0(s) + \varepsilon_z(s)] + \frac{\Delta A_y(s)K_zs + \varepsilon_x(s)K_zg + \alpha_0(s)gsK_z}{R\Omega\cos\varphi}}{s^4 + (K_1 + K_3s^2 + [K_1K_3 + (1 + K_2)\omega_s^2])s^2 + (1 + K_2)K_3\omega_s^2s + K_z\omega_s^2}$$



### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2 方位精对准

**参数选择：**方案确定后，需要根据对准指标要求完成控制参数 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_z$ 的设计。

引入控制网络的系统特征式为：

$$\Delta(s) = s^4 + (K_1 + K_3)s^2 + [K_1K_3 + (1 + K_2)\omega_s^2]s^2 + (1 + K_2)K_3\omega_s^2s + K_z\omega_s^2 \quad (1)$$

令特征根为：  $s_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_a$   $s_{3,4} = -\sigma \pm j\omega_a$   $(s^2 + 2\sigma s + \sigma^2 + \omega_a^2)^2 = 0 \quad (2)$

由：  $\sigma = \xi\omega_c$   $\omega_a = \sigma\sqrt{(1 - \xi^2)/\xi^2}$

$$(2) \text{ 式变为: } s^4 + 4\sigma s^3 + 2\sigma^2\left(\frac{1}{\xi^2} + 2\right)s^2 + \frac{4\sigma^3}{\xi^2}s + \frac{\sigma^4}{\xi^4} = 0 \quad (3)$$
$$\left. \begin{array}{l} (1) \\ (2) \\ (3) \end{array} \right\} \begin{array}{l} K_1 = K_3 = 2\sigma \\ K_2 = 2\frac{\sigma^2}{\xi^2}\frac{1}{\omega_s^2} - 1 \\ K_z = \frac{\sigma^4}{\xi^4}\frac{1}{\omega_s^2} \end{array}$$

对于引入控制网络的方位平台误差角输出，其解包括：

1. 稳态解：  $\gamma_s = \lim_{s \rightarrow 0} s\gamma(s) = \frac{(1 + K_2)K_3}{K_z}\varepsilon_z + \frac{1}{\omega_{ie}\cos\varphi}\varepsilon_x$

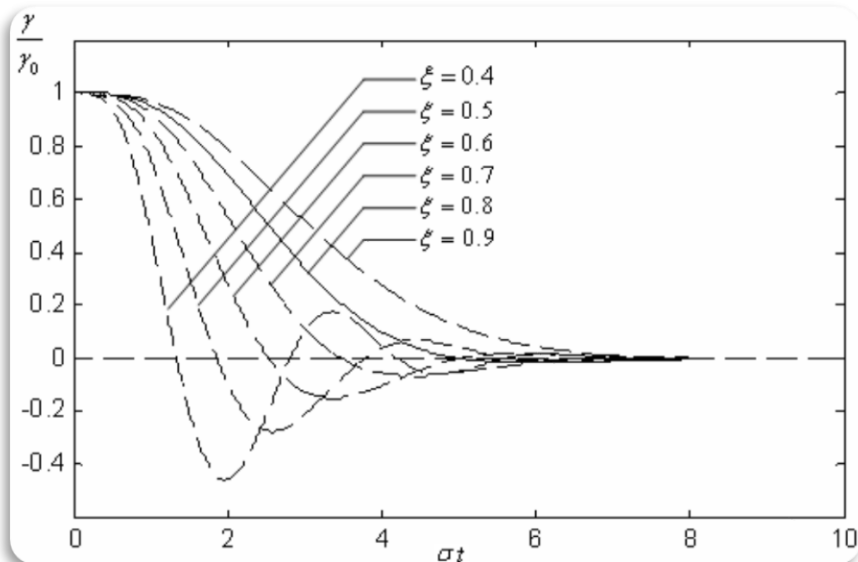
2. 齐次解： 
$$\gamma(t) = \gamma_0 e^{-\sigma t} \left\{ \left[ 1 - \frac{1}{2(1 - \xi^2)}\sigma t \right] \cos\left(\sigma\sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}t\right) + \left[ \frac{3 - 2\xi^2}{2(1 - \xi^2)\sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}} + \frac{1}{2\xi^2\sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}}\sigma t \right] \cdot \sin\left(\sigma\sqrt{\frac{1 - \xi^2}{\xi^2}}t\right) \right\}$$

### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2 方位精对准

根据 $\gamma(t)$ 输出, 以为 $\sigma t$ 横坐标,  $\gamma/\gamma_0$ 为纵坐标,  $\xi$ 为参变量, 得到四阶系统瞬态标准曲线和表。



#### 设计要求:

1. 阻尼系数0.8;
2. 系统在15分种后姿态误差小于2'。

设计结果:  $\xi = 0.800$   
 $\sigma = 0.00861$

$$\left. \begin{aligned} K_1 &= K_3 = 1.722 \times 10^{-2} \text{ 1/s} \\ K_2 &= 149.9 \\ K_z &= 8.739 \times 10^{-3} \text{ 1/s} \end{aligned} \right\}$$

$\sigma t$	$\xi=0.4$	$\xi=0.5$	$\xi=0.6$	$\xi=0.7$	$\xi=0.8$	$\xi=0.9$
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.25	0.9949	0.9979	0.9990	0.9994	0.9997	0.9998
0.50	0.9372	0.9733	0.9869	0.9928	0.9958	0.9973
0.75	0.7647	0.8953	0.9472	0.9707	0.9826	0.9890
1.00	0.4713	0.7490	0.8691	0.9259	0.9553	0.9715
1.25	0.1179	0.5443	0.7517	0.8559	0.9115	0.9430
1.50	-0.2010	0.3109	0.6040	0.7630	0.8516	0.9031
1.75	-0.4042	0.0860	0.4410	0.6533	0.7779	0.8528
2.00	-0.4561	-0.0975	0.2793	0.5345	0.6942	0.7938
2.25	-0.3738	-0.2189	0.1338	0.4150	0.6049	0.7286
2.50	-0.2116	-0.2727	0.0152	0.3021	0.5142	0.6595
2.75	-0.0356	-0.2669	-0.0711	0.2013	0.4260	0.5891
3.00	0.1003	-0.2182	-0.1244	0.1162	0.3435	0.5194
5.00	-0.0513	0.0428	-0.0017	-0.0533	0.0005	0.1232
5.25	-0.0307	0.0244	0.0112	-0.0432	-0.0093	0.0975
5.50	-0.0081	0.0078	0.0183	-0.0330	-0.0153	0.0762
5.75	0.0092	-0.0046	0.0208	-0.0234	-0.0182	0.0586
6.00	0.0179	-0.0119	0.0199	-0.0151	-0.0190	0.0444
6.25	0.0185	-0.0145	0.0169	-0.0084	-0.0183	0.0330
6.50	0.0134	-0.0136	0.0128	-0.0033	-0.0167	0.0241
6.75	0.0062	-0.0105	0.0086	0.0004	-0.0146	0.0171
7.00	-0.0003	-0.0066	0.0048	0.0027	-0.0123	0.0117
7.25	-0.0044	-0.0028	0.0017	0.0039	-0.0100	0.0077
7.50	-0.0058	0.0002	-0.0005	0.0044	-0.0078	0.0047
7.75	-0.0050	0.0021	-0.0019	0.0043	-0.0059	0.0025
8.00	-0.0030	0.0029	-0.0025	0.0039	-0.0043	0.0010

### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2 方位精对准

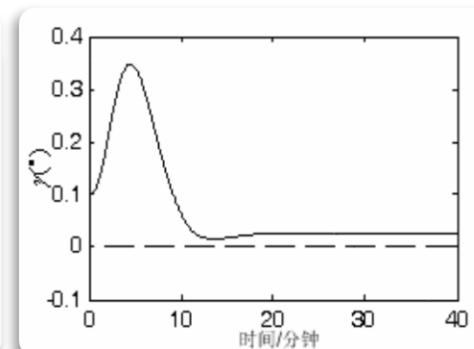
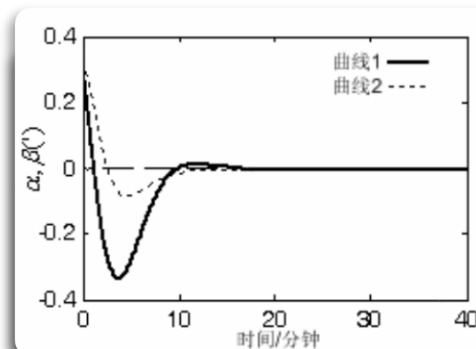
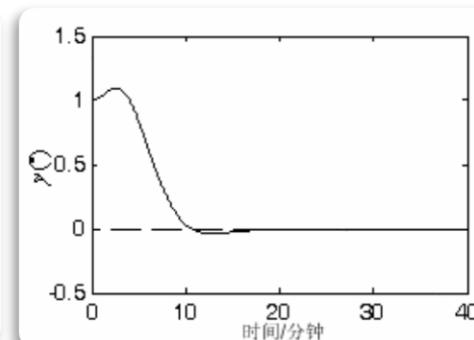
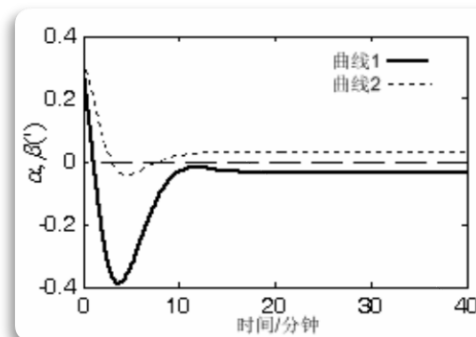
**仿真验证：** 给定不同的初始误差源，对精对准的稳态输出、收敛特性及参数设计的正确性进行验证。

稳态输出：
$$\gamma_s = \frac{(1 + K_2)K_3}{K_z} \varepsilon_z + \frac{1}{\Omega \cos \varphi} \varepsilon_x$$

条件： $\alpha_0 = \beta_0 = 0.005^\circ \quad \gamma_0 = 1.0^\circ$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0 \quad \nabla_x = \nabla_y = 1.0 \times 10^{-4} g$$

输出： $\gamma_s = 0$



条件： $\alpha_0 = \beta_0 = 0.005^\circ \quad \gamma_0 = 1.0^\circ \quad \varepsilon_z = 0$

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = 0.005^\circ/h \quad \nabla_x = \nabla_y = 1.0 \times 10^{-4} g$$

输出： $\gamma_s = 0.0355^\circ$

### 3. 惯导系统姿态精对准



#### 2

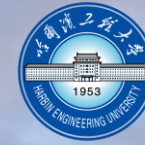
#### 方位精对准

**稳态误差分析：**根据 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_z$ ，可求出方位平台误差角的稳态输出。

$$\gamma_s = 287.22\varepsilon_z + 18541.7\varepsilon_x$$

**分析结论：**可以看出，影响方位精对准的主要误差源是东向陀螺漂移 $\varepsilon_x$ 。因此方位精对准前，导航系统应完成陀螺仪的初始测漂（逐次启动漂移较大的情况），以保证方位精对准的精度不受陀螺漂移的影响，提高初始对准精度。





哈爾濱工程大學  
HARBIN ENGINEERING UNIVERSITY

谢谢大家！