



惯性导航系统仿真分析

Simulation and Analyse of INS

第06讲 平台惯导系统仿真



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。

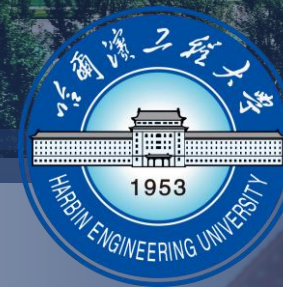
仿真法

- 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 α 、 β 、 γ ，速度误差 δV_x 、 δV_y ，位置误差 $\delta \varphi$ 、 $\delta \lambda$ 。

目录



一 平台式惯导系统仿真方法

二 平台式惯导系统仿真实例

1. 平台式惯导系统仿真方法



1

惯导系统基本方程（仿真依据）

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_x^c &= f_x^t + (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_x^c}{R_N}tg\varphi_c)V_y^c - \beta g + \nabla_x & V_x(0) &= V_{x0} \\ \dot{V}_y^c &= f_y^t - (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_x^c}{R_N}tg\varphi_c)V_x^c + \alpha g + \nabla_y & V_y(0) &= V_{y0} \\ \dot{\varphi}_c &= \frac{V_y^c}{R_M} & \varphi_c(0) &= \varphi_0 \\ \dot{\lambda}_c &= \frac{V_x^c}{R_N\cos\varphi_c} & \lambda_c(0) &= \lambda_0 \\ \omega_{ipx}^p &= -V_y^c/R_M \\ \omega_{ipy}^p &= \omega_{ie}\cos\varphi_c + V_x^c/R_N \\ \omega_{ipz}^p &= \omega_{ie}\sin\varphi_c + V_x^ctg\varphi_c/R_N \\ \dot{\alpha} &= \omega_{ipx}^p - \omega_{itx}^p - \gamma\omega_{ity}^p + \beta\omega_{itz}^p + \varepsilon_x & \alpha(0) &= \alpha_0 \\ \dot{\beta} &= \omega_{ipy}^p - \omega_{ity}^p - \alpha\omega_{itz}^p + \gamma\omega_{itx}^p + \varepsilon_y & \beta(0) &= \beta_0 \\ \dot{\gamma} &= \omega_{ipz}^p - \omega_{itz}^p - \beta\omega_{itx}^p + \alpha\omega_{ity}^p + \varepsilon_z & \gamma(0) &= \gamma_0 \end{aligned} \right\}$$

1. 平台式惯导系统仿真方法



2

惯导系统实用仿真模型

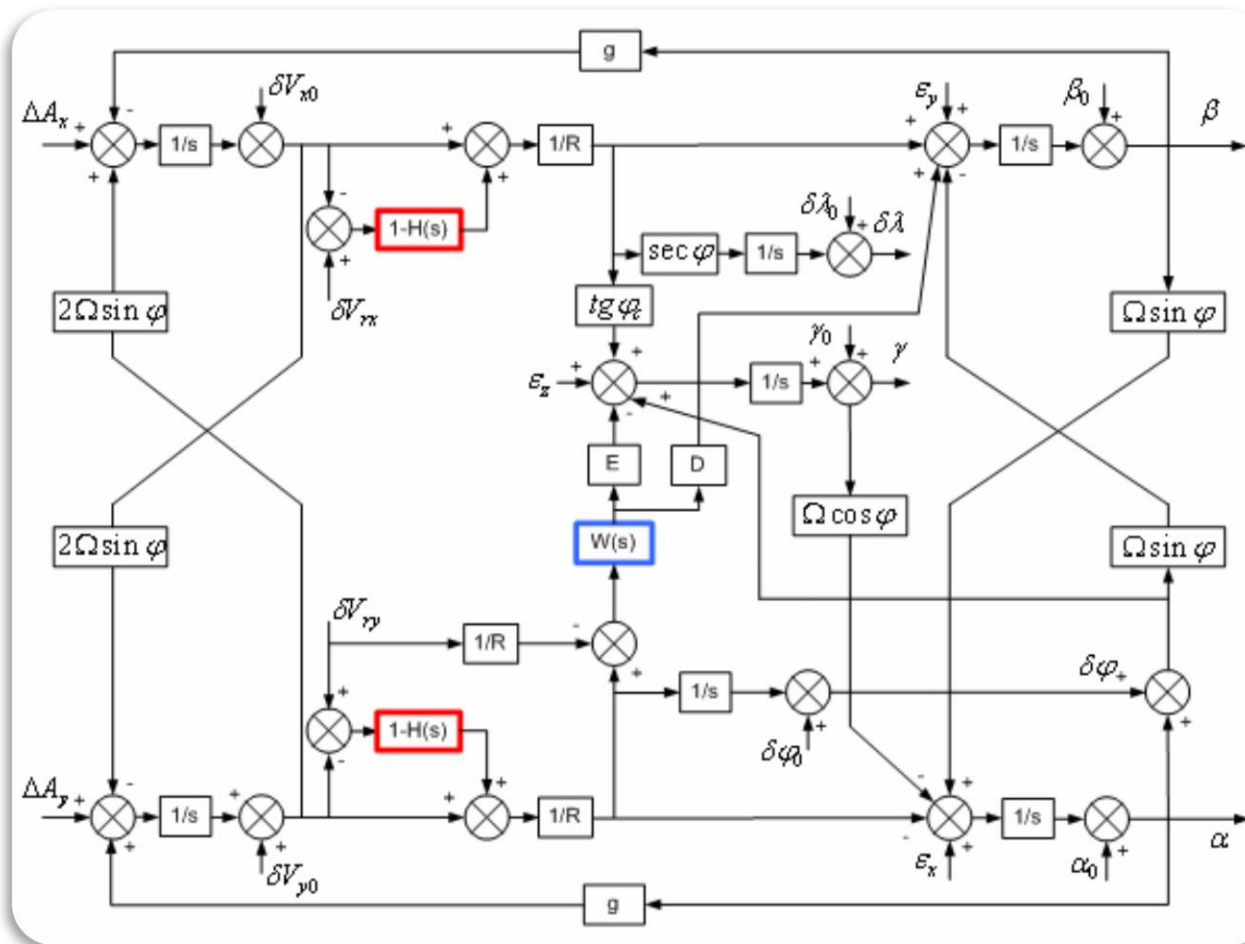
引入水平阻尼网络

$$\left. \begin{aligned} H_x(s) &= \frac{A(s + \omega_1)(s + \omega_4)}{(s + \omega_2)(s + \omega_3)} \\ H_y(s) &= \frac{B(s + \omega_5)(s + \omega_8)}{(s + \omega_6)(s + \omega_7)} \end{aligned} \right\}$$

引入方位阻尼网络

$$W(s) = \frac{\Omega}{s} (1 - Y) = \frac{C_s}{(s + \omega_9)(s + \omega_{10})}$$

$$D = \sin \varphi \quad E = \cos \varphi$$



1. 平台式惯导系统仿真方法



2

惯导系统实用仿真模型

速度方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{cx} &= A_x + (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_{cx}}{R_N}tg\varphi_c)V_{cy} - \beta g + \Delta A_x & V_{cx}(0) &= V_{x0} \\ \dot{V}_{cy} &= A_y - (2\omega_{ie}\sin\varphi_c + \frac{V_{cx}}{R_N}tg\varphi_c)V_{cx} + \alpha g + \Delta A_y & V_{cy}(0) &= V_{y0} \end{aligned} \right\}$$

位置方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{\varphi}_c &= \frac{1}{R_M} [(V_{cy} - K_1V_{ry})\mathbf{H}_y + K_1V_{ry}] & \varphi_c(0) &= \varphi_0 \\ \dot{\lambda}_c &= \frac{1}{R_N} [(V_{cx} - K_1V_{rx})\mathbf{H}_x + K_1V_{rx}]\sec\varphi_c & \lambda_c(0) &= \lambda_0 \end{aligned} \right\}$$

陀螺控制
方程

$$\left. \begin{aligned} \omega_{cx} &= -[(V_{cy} - K_1V_{ry})\mathbf{H}_y + K_1V_{ry}]/R_M + U_x \\ \omega_{cy} &= \omega_{ie}\cos\varphi_c + [(V_{cx} - K_1V_{rx})H_x + K_1V_{rx}]/R_N + DW(V_{cy} - K_1V_{ry})\mathbf{H}_y/R_M + U_y \\ \omega_{cz} &= \omega_{ie}\sin\varphi_c + [(V_{cx} - K_1V_{rx})H_x + K_1V_{rx}]tg\varphi_c/R_N - EW(V_{cy} - K_1V_{ry})\mathbf{H}_y/R_M + U_z \end{aligned} \right\}$$

陀螺控制
方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{\alpha} &= \omega_{ipx}^p - \omega_{itx}^p - \gamma\omega_{ity}^p + \beta\omega_{itz}^p + \varepsilon_x & \alpha(0) &= \alpha_0 \\ \dot{\beta} &= \omega_{ipy}^p - \omega_{ity}^p - \alpha\omega_{itz}^p + \gamma\omega_{itx}^p + \varepsilon_y & \beta(0) &= \beta_0 \\ \dot{\gamma} &= \omega_{ipz}^p - \omega_{itz}^p - \beta\omega_{itx}^p + \alpha_x\omega_{ity}^p + \varepsilon_z & \gamma(0) &= \gamma_0 \end{aligned} \right\}$$

1. 平台式惯导系统仿真方法



2

惯导系统实用仿真方程

解决思路

由于数学模型中含有高阶因子项，不适合计算机运算，因此引入中间 u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_d 、 u_e 、 u_f 基本方程变为：

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{cx} &= A_{px} + (2\Omega \sin \varphi_c + \frac{V_{cx}}{R_N} \operatorname{tg} \varphi_c) V_{cy} - \beta g + \Delta A_x & V_{cx}(0) &= V_{x0} \\ \dot{V}_{cy} &= A_{py} - (2\Omega \sin \varphi_c + \frac{V_{cx}}{R_N} \operatorname{tg} \varphi_c) V_{cx} + \alpha g + \Delta A_y & V_{cy}(0) &= V_{y0} \\ \dot{u}_a &= (\omega_8 - \omega_7)(V_{cy} - K_1 V_{ry}) - \omega_7 u_a & u_a(0) &= 0 \\ \dot{u}_b &= (\omega_5 - \omega_6)(V_{cy} - K_1 V_{ry} + u_a) - \omega_6 u_b & u_b(0) &= 0 \\ \dot{u}_c &= (\omega_4 - \omega_3)(V_{cx} - K_1 V_{rx}) - \omega_3 u_c & u_c(0) &= 0 \\ \dot{u}_d &= (\omega_1 - \omega_2)(V_{cx} - K_1 V_{rx}) - \omega_2 u_d & u_d(0) &= 0 \\ \dot{u}_e &= \omega_{10}(V_{cy} - K_1 V_{ry} + u_a + u_b) - \omega_{10} u_e & u_e(0) &= 0 \\ \dot{u}_f &= -\omega_9 u_f + (V_{cy} - K_1 V_{ry} + u_a + u_b - u_e) & u_f(0) &= 0 \\ \dot{\varphi}_c &= [B(V_{cy} - K_1 V_{ry} + u_a + u_b) + K_1 V_{ry}] / R_M & \varphi_c(0) &= 0 \\ \dot{\lambda}_c &= [A(V_{cx} - K_1 V_{rx} + u_c + u_d) + K_1 V_{rx}] \sec \varphi_c / R_N & \lambda_c(0) &= 0 \\ \omega_{cx} &= -[B(V_{cy} - K_1 V_{ry} + u_a + u_b) + K_1 V_{ry}] / R_M + u_x \\ \omega_{cy} &= \omega_{ie} \cos \varphi_c + [A(V_{cx} - K_1 V_{rx} + u_c + u_d) + K_1 V_{rx}] / R_N + DBC u_f / R_M + u_y \\ \omega_{cz} &= \Omega \sin \varphi_c + [A(V_{cx} - K_1 V_{rx} + u_c + u_d) + K_1 V_{rx}] \operatorname{tg} \varphi_c / R_N - EBC u_f / R_N + u_z \end{aligned} \right\}$$

1. 平台式惯导系统仿真方法



2

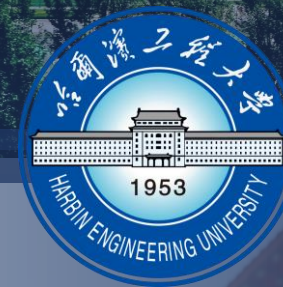
惯导系统实用仿真方程

解决思路

由于数学模型中含有高阶因子项，不适合计算机运算，因此引入中间 u_a 、 u_b 、 u_c 、 u_d 、 u_e 、 u_f 基本方程变为：

	无阻尼状态	内水平阻尼状态	外水平阻尼状态	内全阻尼状态	外全阻尼状态	水平精校准	方位精校准
A	1	1	1	1	1	188.5	188.5
B	1	1	1	1	1	188.5	137.1
C	0	0	0	-4.88×10^{-5}	-4.88×10^{-5}	0	-0.73
D	0	0	0	$\sin \varphi_c$	$\sin \varphi_c$	0	0
E	0	0	0	$\cos \varphi_c$	$\cos \varphi_c$	0	$\sec \varphi_c$
K_1	0	0	0	0	1	0	0
ω_1	0	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	3.96×10^{-3}	3.96×10^{-3}
ω_2	0	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	0.0271	
ω_3	0	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	0	0
ω_4	0	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	0	0
ω_5	0	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	8.5×10^{-4}	3.96×10^{-3}	0
ω_6	0	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	8.0×10^{-3}	0.0271	0.0164
ω_7	0	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	1×10^{-2}	0	0
ω_8	0	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	9.412×10^{-2}	0	0
ω_9	0	0	0	0.06×10^{-3}	0.06×10^{-3}	0	0.0164
ω_{10}	0	0	0	0.06×10^{-3}	0.06×10^{-3}	0	0

目录



一 平台式惯导系统仿真方法

二 平台式惯导系统仿真实例

2. 平台式惯导系统仿真实例



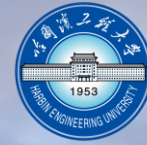
1 仿真条件设置 仿真实例:

1. 设定仿真步长: `ins.step=20;`
2. 设定工作状态: `ins.workmode=1;`
3. 设定初始位置: `ins.phic=45.7796*PI/180.0;` `ins.lamdac=126.6705*PI/180.0;`
`ins.phi=45.7796*PI/180.0;` `ins.lamda=126.6705*PI/180.0;`
4. 设定初始速度: `ins.Vcx=0.0;` `ins.Vcy=0.0;`
`ins.Vx=0.0;` `ins.Vy=0.0;`
5. 设定初始姿态偏差角: `ins.alfa=0.0*P180/60;` `ins.beta=0.0*P180/60;`
`ins.gama=0.0*P180/60;`
6. 设定陀螺漂移: `ins.segmax=0.1*4.848e-8;` `ins.segmaz=0.1*4.848e-8;`
`ins.segmay=0.1*4.848e-8;`
7. 设定加速度计零偏: `ins.DeltaAn=0.0e-5*g0;` `ins.DeltaAe=0.0e-5*g0;`
8. 设定仿真时间: `for(i=0;i<28800;i++)`

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！