

一种新的船用捷联惯导系统数字仿真器的设计

罗恬颖¹, 徐景硕¹, 汤文超², 王晓飞³

(1 海军航空工程学院, 青岛 266041; 2. 海军航空工程学院, 山东 烟台 264001; 3. 南昌航空大学, 南昌 330063)

摘要:以舰船的运动特性为依据,设计了一种新的船用捷联惯导系统数字仿真器;用VC++编程语言设计舰船运动轨迹;建立陀螺仪、加速度计的误差模型;用惯导系统姿态更新、位置更新、速度更新解算的结果与航迹点参数(真值)比较,得到惯导系统误差;应用表明,该仿真器能够灵活地模拟出舰船在不同的运动状态下船用捷联惯导系统的各种导航参数,为研究舰载条件下的捷联惯导系统传递对准技术提供了可靠的试验数据。

关键词:捷联惯导;仿真器;舰船轨迹

Design of New Marine SINS Digital Simulator

Luo Tianying¹, Xu Jingshuo¹, Tang Wenchao², Wang Xiaofei³

(1. Naval Aeronautical and Astronautical University, Qingdao 266041, China; 2. Naval Aeronautical and Astronautical University, Yantai 264001, China; 3. Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

Abstract: Based on the characteristic of ship's trajectory, the article designed a new ship SINS' digital simulator. Used VC++ programming language to design the trajectory of ship, then compared the results of renewing INS' attitude, position and velocity, with the track points (the truth-value). And we can have the error of the inertial navigation system. The results show that this method can simulate a SINS, which can reach average accuracy requirements. This digital simulator can provide credible data for research of aircraft carrier SINS' transfer alignment technology on ship-board.

Keywords: SINS; simulator; trajectory of ship

0 引言

捷联惯导技术日渐成熟,已成为世界各类飞机和舰船的主要的导航设备之一。在研究捷联惯导系统的过程中,惯性元件的输出数据是不可或缺的重要信息。由于真实的IMU实时输出信息很难获得,且灵活性不够^[1],采用仿真技术成为惯导领域研究得重要组成部分^[2-5]。文献[6]用软件设计了飞机的轨迹发生器,模拟飞机的爬升、直线飞行、转弯、摇摆的飞行模式,输出飞机在飞行过程中的位置、姿态等导航参数,同时模拟惯性元件所测得的比力与角速度输出。因海况条件与地球上空环境略有不同,舰船的运行轨迹更加复杂。文献[1]将舰船假设为一个刚体,在不考虑舰船纵倾与升沉运动的情况下,设计了舰船在水平面直线航行与定常回路的运行轨迹。但这种方法只能模拟出理想状态下的舰船运动状态。而且在验证惯导传递对准的算法时,需要在不同的运动状态下进行分析^[7],这就需要有一个可以灵活设定舰船运行轨迹的仿真器。

本文提出了在典型海况条件下,舰船处于系泊或航行状态且作大幅度摆动时的轨迹参数计算方法,并综合考虑舰船的摇摆、移动,以及陀螺仪漂移误差和加速度计偏置误差对舰船主惯导敏感数据的叠加影响,用VC++可视化编程软件设计了一种新的船用捷联惯导系统数字仿真器,其可由用户灵活设定舰船运动轨迹和惯性器件精度值,并将惯导系统解算结果与轨

迹真实数据对比,验证仿真算法的可行性。

1 仿真系统设计思路

1.1 仿真系统功能需求

在计算机实现的基于舰船空间运动的捷联惯导数字仿真器需要具备以下功能:

- (1) 能够便捷地设置舰船的运动状态;
- (2) 能由用户自主地配置惯导系统相关参数;
- (3) 具有友好的人机交互界面,能实时提供舰船运动参数和惯导输出信息。

仿真软件启动后,首先配置系统各项参数:仿真步长,仿真时间,主惯导参数,舰船运动状态。点击开始按钮进入仿真,并在人机交互界面对解算数据进行文字和曲线图的显示。

1.2 仿真算法设计

根据系统的设计需求,在设计过程中采用模块化的方法,将系统拆分为几个模块:舰船轨迹发生器、陀螺仪仿真器、加速度计仿真器和捷联惯导解算。先由轨迹发生器设计出舰船的运行轨迹,轨迹参数经导航解算后,迭加上惯性器件随机误差,生成陀螺仪与加速度计的实际输出(比力和角速度)。比力与角速度作为惯导输入信息,经解算的结果与舰船航迹点参数对比得到误差值。

各模块独立运行,仅公开模块间的通信接口,提高系统运行的安全性与效率。

2 轨迹发生器的设计

2.1 常用坐标系的建立

在计算舰船捷联惯导系统的输入信息和舰船的位置、姿态等信息时,都需要建立舰船空间常用坐标系与惯导系统常用坐标系之间的转换关系。现对坐标系作如下定义:

运动坐标系:舰船质心为原点,用 $o_b - x_b y_b z_b$ 表示坐标

收稿日期:2014-03-13; 修回日期:2014-04-15。

基金项目:2110实验室惯导仿真建设项目。

作者简介:罗恬颖(1992-),女,硕士生,主要从事惯性导航方面的研究。

徐景硕(1965-),男,博导,主要从事惯性测试技术与仪器方向的研究。

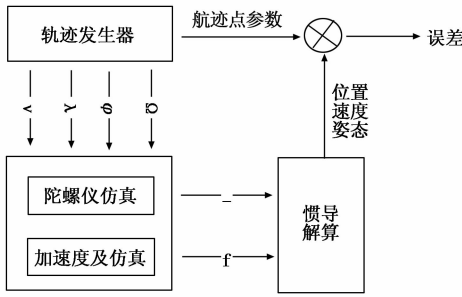


图 1 总体设计流程

系, x_b 轴指向舰艏, y_b 指向右舷, z_b 指向船底。

固定坐标系: 固定坐标系的坐标原点 E 选在舰船的初始位置, η 轴指向北, ξ 轴指向东, ζ 轴指向地心, 用 $E-\xi\eta\zeta$ 表示。固定坐标系坐标原点与方位确定之后, 它与地球固定, 不随舰船的运动而改变。

导航坐标系: 以舰船质心为原点, 用 $o_i-x_iy_iz_i$ 表示, x_i 轴指向正东, y_i 轴指向正北, z_i 与 x_i, y_i 成右手定则。

在初始时刻, 固定坐标系与地理坐标系(导航坐标系)重合。随着舰船的运动和地球的旋转, 地理坐标系在不断的改变。设 ψ, θ, φ 分别是舰船的艏向角, 纵倾角, 横倾角, S 为运动坐标系到固定坐标系的转换矩阵, C_i^E 是导航坐标系到固定坐标系的转换矩阵, λ, φ 分别是舰船所在位置的经纬度。

可以得到运动坐标系与导航坐标系的转换关系为:

$$\begin{bmatrix} x_b \\ y_b \\ z_b \end{bmatrix} = s^T \cdot c_i^E \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\psi\cos\theta & \sin\psi\cos\theta & -\sin\theta \\ \cos\psi\sin\theta\sin\varphi - \sin\psi\cos\varphi & \sin\psi\sin\theta\sin\varphi + \cos\psi\cos\varphi & \cos\theta\sin\varphi \\ \cos\psi\sin\theta\cos\varphi + \sin\psi\sin\varphi & \sin\psi\sin\theta\cos\varphi - \cos\psi\sin\varphi & \cos\theta\cos\varphi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} \quad (1)$$

2.2 航行轨迹方程

假设舰船处于典型海况条件下, 舰船的摇摆模型是 3 个随时间变化的三角函数^[7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi = 10^\circ \cos\left(\frac{\pi}{3}t + \frac{\pi}{4}\right) \\ \theta = 15^\circ \cos\left(\frac{\pi}{6}t + \frac{\pi}{7}\right) \\ \varphi = 30^\circ + 5^\circ \cos\left(\frac{\pi}{4}t + \frac{\pi}{3}\right) \end{array} \right. \quad (2)$$

航行过程中, 舰船运动信息在导航坐标系的投影也随时间呈现出类似三角函数的波动性。以下是模拟舰船轨迹得到的姿态角, 速度与位置的方程, 这些数据可作为真实数据, 用来验证惯导的精度。

姿态角方程:

$$\Omega(t) = (C_i^E)^T [\psi \ \theta \ \varphi]^T \quad (3)$$

速度方程:

$$V^n = [V_x \ V_y \ V_z] = C_b^n V^b \quad (4)$$

位置方程:

$$[\varphi \ \lambda \ h]^T =$$

$$\left[\varphi_0 + \int \frac{V_y}{R+h} dt \ \lambda_0 + \int \frac{V_x}{(R+h)\cos\varphi} dt \ h_0 + V_z t \right]^T \quad (5)$$

式中, R 是地球半径, h 是舰船所在位置距地球表面高度, C_b^n 是运动坐标系到导航坐标系的转换矩阵。

2.3 舰船轨迹解算模块设计

舰船空间运动模型用 Container 类来实现, Container 内部提供一个供用户调用的成员函数 control_ship, 其形参包括舰船运动控制方程的初始状态量与控制输入量。Control_ship 完成舰船运动坐标系到导航坐标系的信息转换。

3 惯性器件仿真

3.1 陀螺仪输出仿真

艏向角 ψ , 纵倾角 θ , 横倾角 φ 分别是绕 $E\xi, Ey_1, Ex_b$ 的转角, 所以 $\dot{\psi}, \dot{\theta}, \dot{\varphi}$ 是舰船旋转变角速度 Ω 在坐标系 $E-x_b y_1 \zeta$ 下 3 个轴的投影分量, 舰船绕运动坐标系三轴的角速度 p, q, r 为:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \\ r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\sin\theta \\ 0 & \cos\varphi & \sin\varphi\cos\theta \\ 0 & -\sin\varphi & \cos\varphi\cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\varphi} \end{bmatrix} \quad (6)$$

由于陀螺仪敏感信息的过程中受到地球自转和载体运动的影响, 所以捷联惯导的输入信息 $\Delta\theta$ 可以表示为:

$$\Delta\theta = \omega_b^b = \omega_b^b + s^T c_i^E (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) = [p \ q \ r]^T + s^T c_i^E (\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \quad (7)$$

考虑到陀螺仪的随机漂移 ϵ^b 与刻度系数误差 δK_G (用随机常数表示), 陀螺仪的敏感输出为:

$$\tilde{\omega}_b^b = (I + \delta K_G) (\omega_b^b + \epsilon^b) \quad (8)$$

陀螺仪的随机漂移由随机常值漂移、相关漂移和白噪声构成。由于捷联惯导的激光陀螺仪相关时间大概 300 s, 随机游走系数较大, 相关漂移可近似为随机常数, 所以在本文中, 陀螺仪的随机漂移计算公式简化为:

$$\epsilon = \epsilon_b + \epsilon_w \quad (9)$$

式中, ϵ_b 为随机常值漂移, ϵ_w 为快变漂移, 即白噪声过程。

3.2 加速度计输出仿真

当舰船在运动坐标系的速度为 (u, v, w) 时, 由哥式定理可知, 舰船相对惯性空间的加速度等于运动坐标系中的加速度加上运动坐标系相对惯性空间的旋转角速度与运动坐标系中的线速度的叉乘, 即:

$$a_b = \begin{bmatrix} du \\ dv \\ dw \end{bmatrix} + \Omega \times \begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} \quad (10)$$

所以加速度计输出比力增量 $\Delta\bar{V}$ 为:

$$\Delta\bar{V} = f_b^b = a_b + s^T c_i^E ((2\omega_{ie}^n + \omega_{en}^n) \times V^n + g^n) \quad (11)$$

由于加速度计的测量误差与刻度系数误差的存在, 加速度计的实际输出应为:

$$\tilde{f}_b^b = (I + \delta K_A) (f_b^b + \nabla^b) \quad (12)$$

因为加速度计相关误差相对较小, 为方便分析, 加速度计的测量误差仅考虑随机常值误差与量测白噪声。

3.3 惯性元件输入信息模块设计

在惯性元件输入信息模块中采用 Sense 类来完成, 分别通过 DlgToSense 和 ConToSense 函数来接收用户设置的主惯导参数信息和舰船轨迹解算结果, 然后在 cal_sins 函数中解算主惯导在陀螺仪和加速度计误差下的惯性敏感元件输入信息。

4 惯导解算仿真

现将由舰船的航行轨迹模拟出的 IMU 输出(角速度增量

与比力增量) 作为捷联惯导解算的输入。惯导的姿态矩阵可由陀螺仪的实时输出进行解算, 本文采用双子样的等效旋转矢量法来实现姿态更新, 提高姿态计算精度。设与 C_b^v 相对应的姿态变换四元数为 Q , 在 $[t_{k-1}, t_k]$ 时间段内的姿态变换四元数递推方程:

$$Q_{(t_k)} = Q_{(t_{k-1})} \otimes Q_{b(t_{k-1})}^{b(t_k)} \quad (13)$$

式中, $Q_{b(t_{k-1})}^{b(t_k)}$ 是这段时间内的更新四元数。并且:

$$Q_{b(t_{k-1})}^{b(t_k)} = \cos \frac{\Phi_k}{2} + \frac{\Phi_k}{|\Phi_k|} \sin \frac{|\Phi_k|}{2} \quad (14)$$

等效旋转矢量用双子样算法得到:

$$\Phi_k = \Delta\theta_1 + \Delta\theta_2 + \frac{2}{3} \Delta\theta_1 \times \Delta\theta_2 - C_{b_{k-1}}^v \omega_{in}'' T \quad (15)$$

综上所述, 由陀螺仪的输出就可以推算出姿态变换四元数, 进而可以解算出确定时刻的姿态矩阵 C_b^v 。在速度更新时, 加入旋转效应补偿与基于双子样的划船效应补偿:

$$V_k = V_{k-1} + \Delta V_k + \Delta V_{rotk} + \Delta V_{sculk} + \Delta V_g \quad (16)$$

4.1 惯导解算功能模块设计

惯导系统的解算由类 Mins 完成, 通过成员函数 navigation_mins 的形参传递惯性敏感元件的输入信息进行导航解算。由于惯导解算过程较为复杂, 在设计过程中创建一个动态链接库项目, 并添加类 NavFuncs 来完成导航解算的功能。仿真系统各类之间的协作关系可以用图 2 表示。

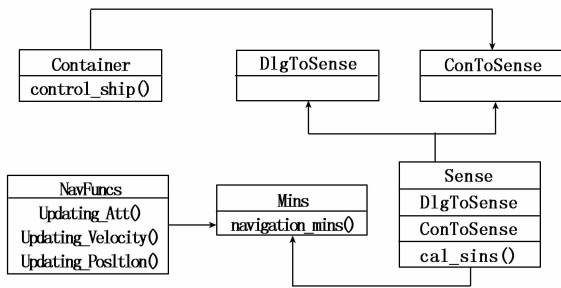


图 2 仿真系统类图

5 仿真实例

5.1 轨迹与 IMU 输出

在仿真时, 应首先对舰船运动轨迹和主惯导参数进行设置, 仿真系统依据以上算法可以由设计的舰船运行轨迹得到舰船捷联惯导的输入值, 如图 3 所示。



图 3 运行轨迹与主惯导参数设置

设置陀螺仪的随机常值漂移为 $0.01^\circ/h$, 随机游走系数为 $0.001^\circ/\sqrt{h}$, 加速度计常值偏置误差 $1 \times 10^{-4} g$, 加速度计量测白噪声标准差 $1 \times 10^{-5} g \cdot \sqrt{s}$, 舰船处于典型海况下, 初始位置为北纬 36° , 东经 120° , 舰船沿正东向做直线匀加速运动, 初始速度 $v = 10 m/s$, 加速度 $a = 1.5 m/s^2$ 。仿真时间

1 450 s, 仿真步长 0.1 s。仿真出舰船运动信息与主惯导 IMU 敏感信息如图 4~5 所示。

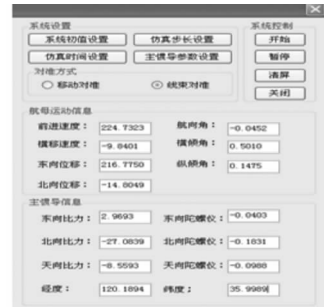


图 4 系统解算信息文字显示

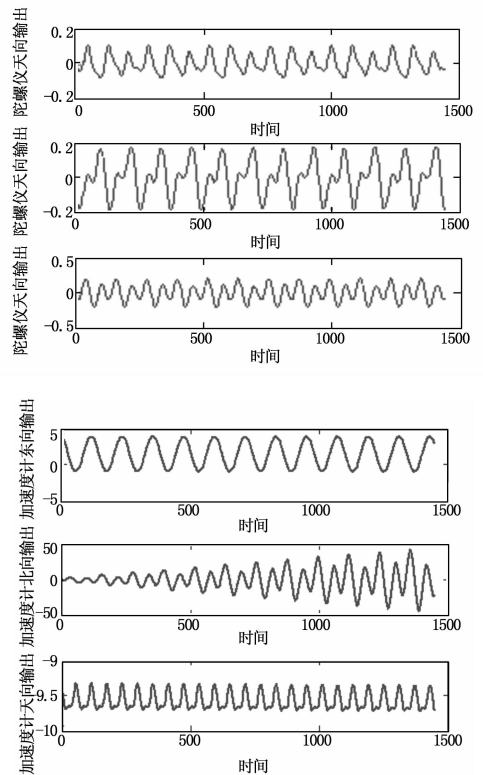


图 5 主惯导 IMU 曲线显示

5.2 惯导解算误差

捷联惯导解算结果减去舰船轨迹参数 (真实值), 得到各参数的误差如图 6~7 所示。各参数的更新周期均为 2 ms。

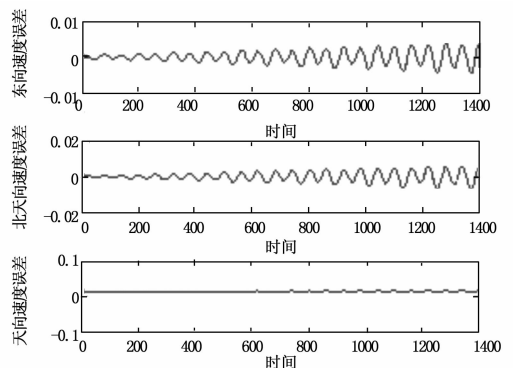


图 6 线运动参数误差

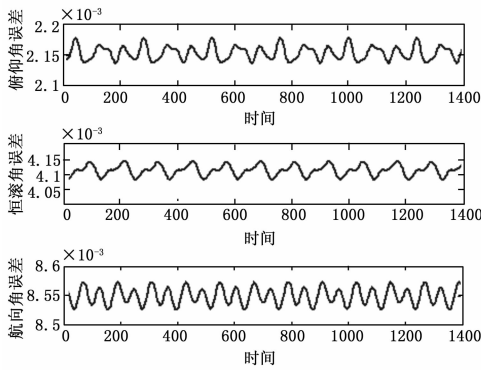


图 7 角运动参数误差

由图 6~7 可以看出,惯导解算的姿态角误差在 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ 角分之间,速度误差在 $0.01 \sim 0.02$ m/s 之间,验证了本软件及算法输出的轨迹数据接近实际值。其误差主要来源于惯性器件本身存在的漂移误差,偏差误差等。

6 结论

在对舰船运动特点充分分析的基础上,用 VC++ 实现了

一种新型船用捷联惯导系统数字仿真器的设计,该系统可以灵活设定舰船的运行轨迹与惯性器件的精度参数,系统解算结果与轨迹真实数据对比所得的误差值,验证了仿真算法的可行性。该系统的设计对捷联惯导系统传递对准技术的研究有重要的工程应用价值。

参考文献:

- [1] 张 斌. 基于捷联惯导的舰船轨迹仿真发生器的设计 [J]. 数字技术与应用, 2009, (11): 11-13.
- [2] 陈 敏, 安艳辉, 李晓华. 捷联惯导系统仿真器的设计与实现 [J]. 现代测绘, 2012, (1): 10-11.
- [3] 解春明, 赵 焱. 高精度传递对准仿真飞行轨迹设计 [J]. 火力指挥与控制, 2010, (9): 88-92.
- [4] 罗 彬. 舰载武器惯导系统传递对准仿真验证系统的设计与实现 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012.
- [5] 赵 琳, 荣文婷. 舰载武器惯导系统传递对准仿真验证的研究 [J]. 传感器与微系统, 2012, (3): 92-95.
- [6] 杨金显. 微惯性测量系统关键技术研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2008.
- [7] 王勇军. 舰载机惯导技术对准研究 [D]. 西安: 西北工业大学, 2007.

(上接第 2972 页)

根据接收到的数据包,ELMC 会解析出 PSP 具体的控制指令,比如查电压,查 SSPC 的工作状态,ELMC 自检等,再把具体的任务发送给模拟量采集模块,二极管、继电器监控模块,最后使用 1553B 总线将监测到的值回复给 PSP。这样,通过 PSP 显示界面,就可以远程监控汇流条和负载的工作状态。

3.7 系统监控界面设计与分析

系统以 PC 机作为 PSP,制作上位机软件,监控负载的状态,上位机界面如图 8 所示。



图 8 上位机界面

系统 115 V 交流电压由航空地面电源提供,在回路中接入额定功率为 900 W 的电气负载,通电测试后在 PC 机上得到电压、电流、功率、因素和电量共 5 个电参数,由图 8 可知,获取参数的采样精度满足系统要求,多参数的测量提高了系统的可靠性。

系统设计必须满足关键飞行负载的不中断供电要求,软件刷新时间间隔设置为 50 ms,这样就能满足飞机大部分负载的要求。当检测到电源脱落后,把负载转换到可供选用的电源

上,达到防止供电中断的目的。

4 结束语

先进飞机电气负载管理中心是当前航空电气工程研究的重点。本文设计的电气负载管理中心采用了以高性能 STM32 作为控制核心,并分别从硬件模块、软件系统结构和嵌入式操作系统 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 使用、应用软件任务优先级的划分等各个方面作出了详细的设计和说明。系统测试表明,该系统能够实现负载的自动管理,提高了配电系统的高效性和可靠性。

参考文献:

- [1] 张秦岭,温菲菲,刘 磊. 基于 DSP 的通航飞机自动配电系统设计 [J]. 测控技术, 2014, 33 (1): 83-85.
- [2] 金 静,李建勋,毕 荣. 基于 DSC 的飞机电气负载管理中心设计 [J]. 电源技术应用, 2012, 15 (8): 53-57.
- [3] 任仁良,赵尊全,冯建朝. 总线在现代飞机配电系统中的应用 [J]. 测控技术, 2013, 32 (12): 114-117.
- [4] 张大为,姜 静,刘 迪. 基于 DSP 的固态功率控制器的设计 [J]. 航空计算技术, 2012, 42 (4): 117-119.
- [5] 谢控勤,杨 阳,李宇翔. 基于 VxWorks 的先进飞机电气负载管理中心软件设计 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17 (11): 2302-2305.
- [6] 谢控勤,宋 岩. 基于 VxWorks 的飞机电气处理机多任务程序设计 [J]. 现代电子技术, 2012, 35 (22): 107-112.
- [7] 邱岗岗,袁朝辉. 飞机电气负载管理系统设计 [J]. 微处理机, 2009, 6 (3): 102-105.
- [8] 马常伟,李玉忍,齐 洁. 飞机自动配电管理系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2007, 15 (1): 1500-1502.