

阻尼比连续可调的捷联惯性姿态测量系统内阻尼技术

顾鹏飞, 王省书, 郑佳兴, 赵英伟

(国防科学技术大学 光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 在自主导航状态下, 捷联姿态测量系统存在的舒拉调谐等周期性误差可以通过内阻尼技术进行有效抑制。但是阻尼的加入破坏了系统的舒拉调谐条件, 系统会受载体加速度的影响, 产生新的姿态角误差。针对传统阻尼网络阻尼比固定的缺点, 设计了一种阻尼比可连续调节的阻尼网络, 推导了载体加速度、阻尼比和姿态角误差三者之间的关系。为抑制系统在载体机动状态下产生的姿态角误差, 提出了一种根据载体加速度大小实时调整系统阻尼比的自适应阻尼方案。仿真与实验结果均表明: 设计的阻尼网络可有效抑制系统姿态角误差; 自适应阻尼方案可有效降低载体在机动状态下阻尼对系统的不利影响, 提高系统精度。

关键词: 捷联姿态测量系统; 水平阻尼; 可调阻尼比; 自适应阻尼

中图分类号: TU666.12 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0517004

Internal horizontal damping network of SAMS by applying adaptively adjustable damping ratio

Gu Pengfei, Wang Xingshu, Zheng Jiaying, Zhao Yingwei

(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: In the autonomous navigation state, the periodic errors, such as the Schuler oscillation amplitude error, in the strap-down attitude measurement system (SAMS) can be restrained through the internal horizontal damping method. However, the schuler tuning condition of the SAMS will be destroyed when the damping network was introduced, and new attitude errors will be generated if the motion of the carrier changes quickly. In order to overcome the shortcomings of the conventional damping network with fixed damping ratio, a novel damping network with continuously adjustable damping ratio was designed to suppress the attitude error. The relationship between the acceleration of the carrier, the damping ratio and the attitude error was also derived. An adaptive-damping method was proposed to adjust the damping ratio of the system according to the carrier's acceleration. The simulation results and experiment results indicate that the novel damping network can suppress the Schuler oscillation amplitude error, and the adaptive-damping method can reduce the ill effect of the damping network to the attitude estimation, and improve the performance of the SAMS.

Key words: SAMS; horizontal damping; adjustable damping ratio; adaptive-damping

收稿日期: 2016-09-05; 修订日期: 2016-10-03

作者简介: 顾鹏飞(1992-), 男, 硕士生, 主要从事光电仪器与测控技术方面研究。Email: gpfahlq@163.com

导师简介: 王省书(1963-), 女, 教授, 博士, 主要从事光电仪器与测控技术方面的研究。Email: gfkdwxs@aliyun.com

0 引言

捷联姿态测量系统 (Strap-down Attitude Measurement System, SAMS) 通过直接固联在载体上的陀螺仪和加速度计分别测量载体坐标系相对于惯性坐标系的角速度和加速度信息, 然后通过导航解算得到载体的实时运动姿态信息^[1]。在自主导航状态下, 由于系统本身处于临界稳定状态, 捷联姿态测量系统存在舒拉周期、傅科周期和地球周期等振荡性误差^[2]。在惯性传感器随机误差的激励下, 舒拉振荡的幅度会随时间逐渐发散^[3]。船用捷联姿态测量系统需要长时间为舰船提供精确的姿态信息, 过度发散的误差会导致系统失去姿态测量能力。水平阻尼技术可以把系统从临界稳定状态转化为渐进稳定状态^[4], 周期性振荡误差可以通过该技术得到抑制, 显著提高系统的姿态测量精度^[2]。水平阻尼技术根据是否需要外部测量信息可以分为: 外阻尼和内阻尼。由于内阻尼技术不依赖外界信息, 具有很高的自主性与隐蔽性。

但是阻尼网络的加入破坏了系统的舒拉调谐条件从而会产生新的误差, 例如, 当载体运动加速度较大时, 阻尼的存在会降低系统的姿态测量精度^[4]。程建华^[5]等人提出根据载体的运动状态, 系统在高阻尼、低阻尼和无阻尼状态之间切换。但是, 当系统从无阻尼状态切换到阻尼状态时, 由于系统结构突然发生了变化, 系统会产生超调误差, 影响系统的测量精度^[4]。覃方君^[6]等人提出在惯性系统中配置反馈回路, 通过调节反馈回路参数, 实现系统阻尼比的线性修正。当载体机动时, 为了减小阻尼对系统的影响, 要求阻尼环节尽可能接近于 1^[3], 但是反馈回路法的等效阻尼网络形式在高频上(相对于舒拉角频率)不接近 1, 因此其高频性能并不理想。文中根据控制理论超前-滞后校正原理设计了一种阻尼比可以连续调节的阻尼网络, 该网络的幅度在高频和低频范围均接近于 1, 具有较好的高频和低频特性; 根据载体的加速度实时调整系统的阻尼比, 实现了系统的线性修正, 避免了阻尼网络的切换产生的超调量, 有效抑制系统姿态角误差。

1 水平阻尼网络设计

舒拉振荡主要存在于捷联姿态测量系统的水平回路中^[3], 同时舒拉振荡周期受傅科周期的调制, 在衰减

掉舒拉误差的同时傅科误差也会得到抑制。因此, 忽略傅科周期回路以及各回路之间的交叉耦合项, 水平回路东向通道与北向通道类似, 单独分析水平回路的北向通道。捷联姿态测量系统北向回路如图 1 所示^[3]。

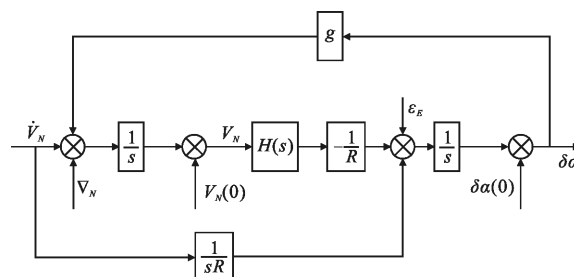


图 1 北向水平回路系统框图

Fig.1 System diagram of north horizontal channel

图 1 中 \dot{V}_N 是载体的北向加速度, ∇_N 是捷联姿态测量系统的等效北向加速度计误差, V_N 是北向速度, $V_N(0)$ 是北向速度的初始值, $H(s)$ 是阻尼网络, R 是地球半径, ε_E 是东向陀螺的误差, $\delta\alpha(0)$ 是初始姿态角误差, $\delta\alpha$ 是姿态角误差, g 是地球表面的重力加速度, $1/s$ 表示积分环节。

由北向水平回路的系统框图可以得到, 陀螺器件误差 ε_E 到姿态角误差 $\delta\alpha$ 的传递函数为:

$$\frac{\delta\alpha(s)}{\varepsilon_E(s)} = \frac{s}{s^2 + H(s)g/R} = \frac{s}{s + H(s)\omega_s^2} \quad (1)$$

式中: $\omega_s = \sqrt{g/R}$ 表示舒拉振荡角频率。

当系统处于无阻尼状态时, 即 $H(s)=1$, 系统的特征方程为 $s^2 + \omega_s^2 = 0$, 系统特征根为 $s = \pm j\omega_s$, 所以捷联姿态测量系统的北向水平回路是临界稳定的。系统波特图如图 2 所示。

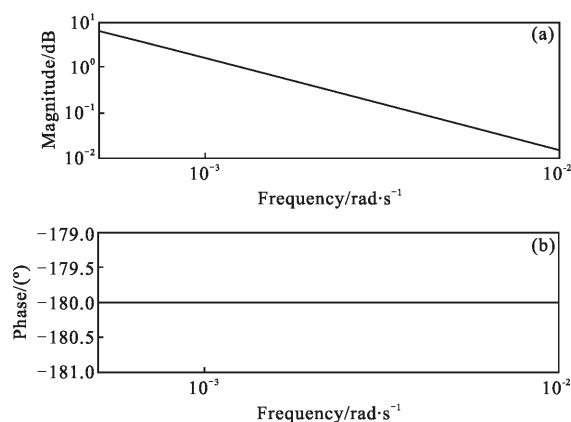


图 2 系统波特图

Fig.2 Bode diagram of the system

根据自动控制原理, 可以通过加入串联校正环节来改善系统稳定性^[7]。为了改善捷联姿态测量系统的稳定性, 可以加入的校正环节包括超前环节、超前-滞后环节, 使得系统具有阻尼特性, 可以从临界稳定状态转化到渐进稳定状态。

从北向水平回路的系统框图可以得到, 载体加速度到姿态角误差 \dot{V}_N 的传递函数为:

$$\frac{\delta\alpha(s)}{\dot{V}_N(s)} = \frac{[1-H(s)]}{s^2+H(s)\omega_s^2} \frac{1}{R} \quad (2)$$

捷联姿态测量系统加入水平阻尼网络(即 $H(s) \neq 1$), 破坏了系统的舒拉调谐条件, 当载体有加速度时, 系统会产生新的姿态角误差, 进而影响系统的测量精度。为了减小载体阻尼网络的加入带来的不利影响, 要求 $H(s)$ 尽可能接近于 1^[8], 即 $\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = 1, \lim_{s \rightarrow \infty} H(s) = 1$ 。

根据上述要求, 结合控制理论中超前-滞后校正环节的特点, 文中设计了一种新型阻尼网络形式, 如下所示:

$$H(s) = \frac{(qTs+1)(Ts/q+1)}{(Ts+1)^2} \quad (3)$$

式中: q 为阻尼网络的校正系数。

加入阻尼网络后系统的波特图示意图如图 3 所示。

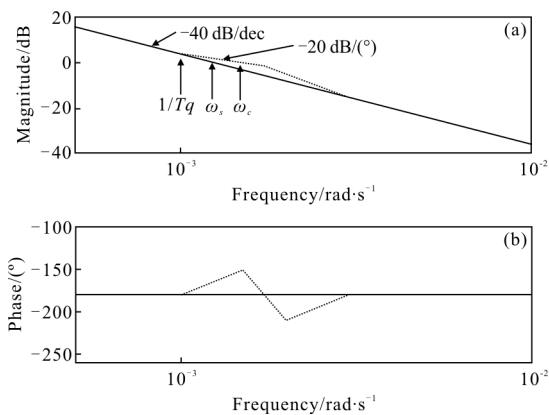


图 3 加入阻尼网络后系统波特图

Fig.3 Bode diagram of the system with damping network

图中 ω_s 是舒拉角频率, ω_c 是系统的截止频率, 从图 3 中的幅频特性曲线中可以看出, 无阻尼系统幅频特性曲线斜率为 $-40 \text{ dB}/(\circ)$, 加入阻尼网络后, 在中频段(ω_c 附近)系统的幅频特性曲线斜率为 $-20 \text{ dB}/(\circ)$, 可以求出 $\omega_c = \frac{\omega_s^2}{1/qT} = qT\omega_s^2$ 。

根据公式(3), 可以求出阻尼网络 $H(s)$ 的相频函数:

$$\varphi(\omega) = \arctan\left(\frac{qT\omega + T\omega/q}{1 - T^2\omega^2}\right) \quad (4)$$

根据图 3 和公式(4), 可以求出系统的相位稳定裕度 γ 为:

$$\gamma = \pi + (\varphi(\omega_c) - \pi) = \varphi(\omega_c) = \arctan\left(\frac{qT\omega_c + T\omega_c/q}{1 - T^2\omega_c^2}\right) - \arctan\left(\frac{2T\omega_c}{1 - T^2\omega_c^2}\right) \quad (5)$$

控制理论中系统的相位稳定裕度越大, 系统的稳定程度越高^[7]。所以, 要求在 ω_c 处阻尼网络的相频函数 $\varphi(\omega)$ 取得最大值, 即 $\varphi'(\omega_c) = 0$ 。可以解出当 $\varphi(\omega)$ 取得最大值时, $\omega_c = \sqrt{(q+1)(q - \sqrt{q^2+1})} + 1 / (T\sqrt{q})$ 。

阻尼网络中参数 T 为:

$$T = \frac{((q+1)(q - \sqrt{q^2+1}) + 1)^{0.25}}{\omega_c q^{0.75}}$$

由控制理论可知, 系统闭环增益 M_r 与系统阻尼比 ξ 的关系为^[7]: $M_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}$, 可以通过系统闭环增益 M_r 计算出系统阻尼比 ξ 。阻尼比 ξ 与校正系数 q 关系如图 4 所示。

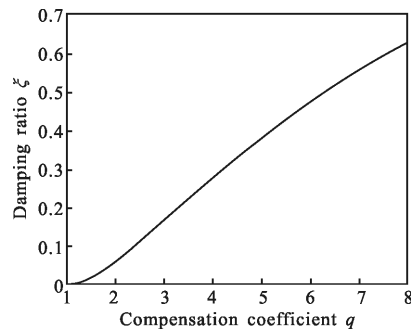


图 4 阻尼比与校正系数关系

Fig.4 Relations of damping ratio and correction coefficient

从图 4 中可以看出, 阻尼比 ξ 与校正系数 q 基本成线性关系, ξ 与 q 的近似关系为:

$$\xi = 0.09(q-1), (1 \leq q \leq 8) \quad (6)$$

此节设计的阻尼比连续可调阻尼网络总结如下:

$$H(s) = \frac{(qTs+1)(Ts/q+1)}{(Ts+1)^2} \quad (7)$$

式中: q 为阻尼网络的校正系数 ($1 \leq q \leq 8$), 参数 $T = \frac{((q+1)(q - \sqrt{q^2+1}) + 1)^{0.25}}{\omega_c q^{0.75}}$ 。

阻尼比 ξ 与校正系数 q 的近似关系为： $\xi=0.09(q-1)$ ，可以通过改变校正系数 q 的值调整阻尼比大小。

2 加速状态下阻尼比与姿态角误差关系

由公式(2)可知，当捷联姿态测量系统加入内阻尼网络后，载体加速度会引起新的姿态角误差。当系统阻尼比为 ξ 时，公式(2)可以简化为如下形式：

$$\delta\alpha(s) = \frac{-2\xi s/\omega_s}{s^2 + 2\omega_s\xi s + \omega_s^2} \frac{\dot{V}_N(s)}{R} \quad (8)$$

当载体加速度为 \dot{V}_N 时，可求得：

$$\delta\alpha(t) = -\frac{2\dot{V}_N(s)\xi e^{-\xi\omega_s t} \sin(t\omega_s\sqrt{1-\xi^2})}{g\sqrt{1-\xi^2}} \quad (9)$$

对公式(9)求导，求出当 $t = \frac{\arctan\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{\xi}\right)}{(\omega_s\sqrt{1-\xi^2})}$ 时，

$|\delta\alpha(t)|$ 取得最大值。

定义加速度引起的姿态角误差 $\delta\alpha = \max(|\delta\alpha(t)|)$ ，

$\delta\alpha$ 与加速度 \dot{V}_N 和阻尼比 ξ 的关系如下：

$$\delta\alpha = -\frac{2\dot{V}_N\xi e^{-\xi\omega_s t}}{g} \quad (10)$$

式中： $t = \arctan(\sqrt{1-\xi^2}/\xi)/(\omega_s\sqrt{1-\xi^2})$

根据公式(10)绘制出载体加速度 \dot{V}_N 、阻尼比 ξ 和姿态角误差 $\delta\alpha$ 三者的关系图，如图 5 所示。

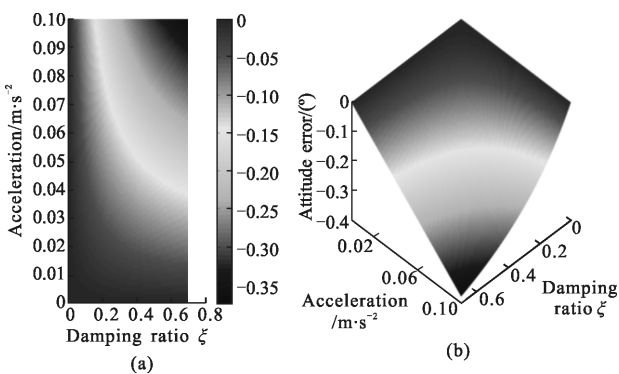


图 5 载体加速度、阻尼比与姿态角误差关系

Fig.5 Relations between carrier acceleration, damping ratio and attitude error

为了更加直观地观察载体加速度、阻尼比与姿态角误差之间的关系，图 5(a)、(b)分别从不同的角度反应三者之间的关系。从图 5 中可以看出，当载体加速度一定时，系统阻尼比越大，系统姿态角误差越

大。当载体加速度较大时，可以通过减小系统阻尼比以抑制系统姿态角误差。因此，为了使系统姿态角误差处于一个可以接受的范围内，可以根据载体加速度实时调整系统阻尼比。

3 自适应阻尼方案

由第 2 节的分析可知：当载体处于变速运动状态时，为了把系统姿态角误差控制在一定范围内，可以根据载体加速度调整系统阻尼比。根据公式(6)和公式(10)并结合实际仿真结果，把系统姿态误差角控制在 0.03° 以下，得到载体加速度 \dot{V} 与阻尼网络校正系数 q 的关系如图 6 所示。

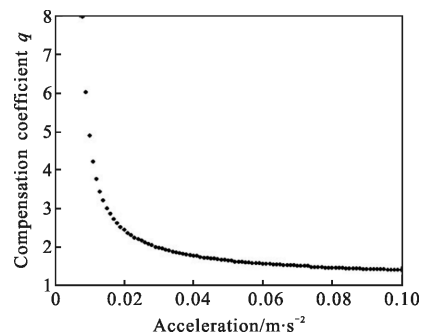


图 6 载体加速度与阻尼网络校正系数关系

Fig.6 Relations between carrier acceleration and compensation coefficient of damping network

由图 6 可以看出，载体加速度与阻尼网络校正系数之间具有很强的非线性关系。径向基函数(RBF)神经网络结构简单，训练简洁且学习收敛速度快，能够逼近任意非线性函数^[8]。RBF 神经网络结构如图 7 所示。

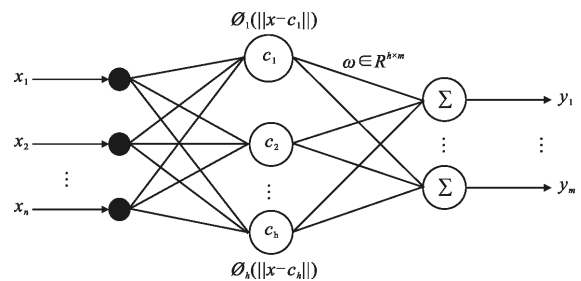


图 7 RBF 神经网络结构图

Fig.7 RBF neural network architecture diagram

使用常用的高斯函数作为隐节点的激活函数

$\phi(\cdot)$, 那么 RBF 神经网络的第 i 个输出可以表示为:

$$y_j = \sum_{i=1}^h \omega_{ij} \exp\left(-\frac{1}{2\sigma^2} \|x - c_j\|^2\right), j=1, 2, \dots, m \quad (11)$$

根据图 6 中的数据训练 RBF 神经网络, RBF 神经网络训练后结果对样本的均方误差为 0.001。训练后得到载体加速度与阻尼网络校正系数关系如图 8 所示。

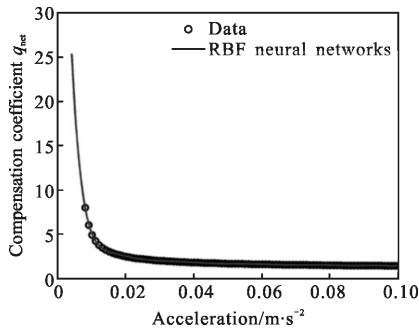


图 8 训练后的 RBF 神经网络输入输出关系

Fig.8 Input-output relation of RBF neural network after training

由于系统的阻尼比一般最大为 0.5 左右, 而且校正系数 $q \geq 1$ 。因此, 需要对 RBF 神经网络输出的校正系数 q_{net} 进行限制, 具体关系如下:

$$q = \begin{cases} 7 & q_{net} \geq 7 \\ q_{net} & 1 < q_{net} < 7 \\ 1 & q_{net} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

4 仿真与实验验证

4.1 仿真验证

为了验证所设计阻尼网络的有效性及其自适应阻尼方案的可行性, 设计如下仿真实验。

仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Tab.1 Simulation conditions

Inertial equipment error			
Gyros constant drift	0.01 (°)/h	Accelerometer constant bias	50 μ g
Gyros random walk	0.05 (°)/ \sqrt{h}	Accelerometer random error	50 μ g \sqrt{s}
Initial attitude error and initial position			
Pitch	3'	Longitude	241°
Roll	3'	Latitude	35°
Yaw	5'	Altitude	0 m

仿真时长 20 h, 仿真步长 1 s。仿真实验模拟海上运动, 载体姿态角变化为: 俯仰角 $\text{pitch}=1.2^\circ \sin(2\pi t/7)$, 横滚角 $\text{roll}=1.2^\circ \sin(2\pi t/8)$, 方位角 $\text{yaw}=0.8^\circ \sin(2\pi t/11)$ 。为验证不同加速度条件下, 阻尼网络对姿态误差角的抑制能力, 设计了如下三个仿真实验。

仿真一: 载体初始速度为 0, 静止 12 h 后, 以 0.005 m/s² 东向加速度, 加速到 20 m/s 后匀速向东行驶。仿真结果如图 9 所示。

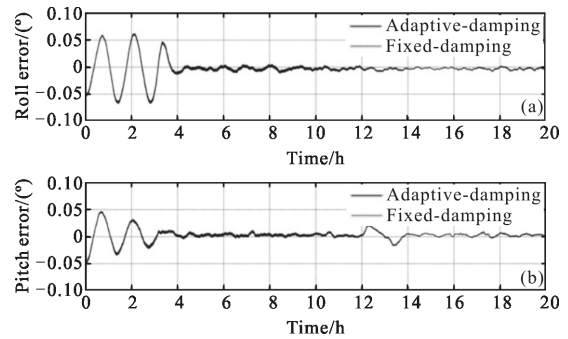


图 9 仿真一姿态角误差仿真结果

Fig.9 Attitude errors of the first simulation

仿真二: 载体初始速度为 0, 静止 12 h 后, 以 0.02 m/s² 东向加速度, 加速到 20 m/s 后匀速向东行驶。仿真结果如图 10 所示。

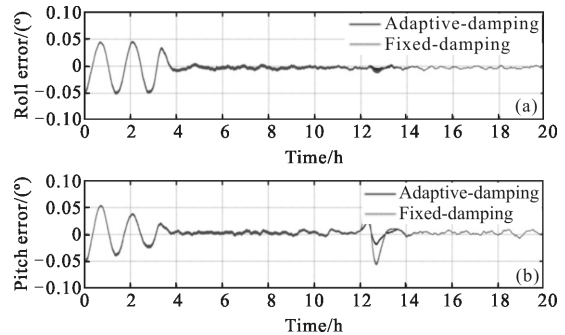


图 10 仿真二姿态角误差仿真结果

Fig.10 Attitude errors of the second simulation

仿真三: 载体初始速度为 0, 静止 12 h 后, 以 0.05 m/s² 东向加速度, 加速到后 20 m/s, 匀速向东行驶。仿真结果如图 11 所示。

仿真中, 前 3 个小时捷联姿态测量系统自主导航处于无阻尼状态, 3 h 后捷联姿态测量系统接入阻尼网络。固定阻尼表示接入的阻尼网络阻尼比固定为 0.5, 整个阻尼解算过程中不会改变; 自适应阻尼表示根据载体加速度自动调整系统阻尼比。

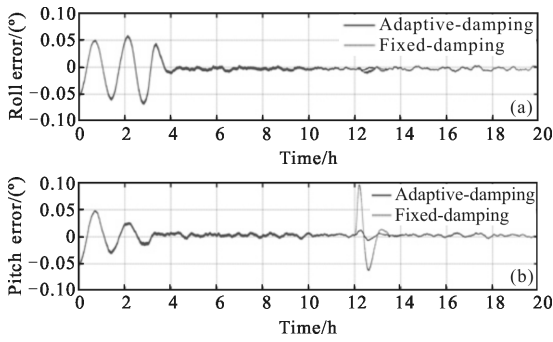


图 11 仿真三姿态角误差仿真结果
Fig.11 Attitude errors of the third simulation

从图 9 中可以看出,前 3 h 捷联姿态测量系统处于无阻尼自主导航状态,系统存在舒拉周期振荡误差;3 h 后加入阻尼网络,舒拉周期振荡误差显著减小,文中设计的阻尼网络有效抑制了舒拉周期振荡误差。图 9 中自适应阻尼方案与传统的固定阻尼方案效果一致,这是因为载体加速度较小,系统阻尼比一直为 0.5。比较图 9、图 10 和图 11 仿真结果可以看出,加入阻尼网络后,载体加速度越大,系统姿态角误差越大。从图 10 和图 11 的仿真结果可以看出,相对接入传统阻尼比固定的阻尼网络,自适应阻尼方案根据载体运动加速度大小调节系统阻尼比,可以有效减小系统姿态角误差。

4.2 实验验证

实验使用某型激光陀螺捷联姿态测量系统的海事实验数据,进一步验证所设计阻尼网络的性能。GPS 与激光陀螺捷联姿态测量系统进行组合导航得到的姿态解作为参考姿态。海事实验船的运动速度如图 12 所示。图 12 中东向加速度的最大值为 0.013 m/s^2 ,北向加速度的最大值为 0.006 m/s^2 。前 3 h 激光陀螺捷联姿态测量系统进行自主导航解算,3 h 后,加入阻尼网络分别进行自适应阻尼解算和固定阻尼解算。得到的结果如图 13 所示。

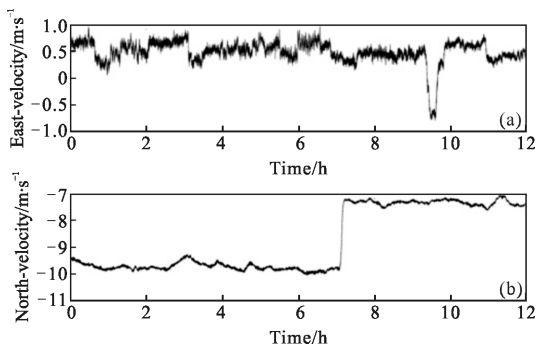


图 12 海事实验舰船运动速度
Fig.12 Ship's velocity of experiment on the sea

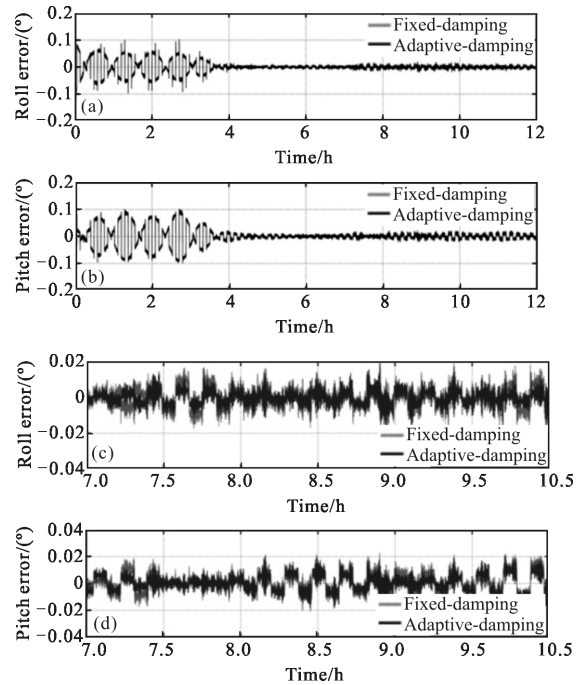


图 13 海事实验姿态角误差
Fig.13 Attitude errors of experiment on the sea

图 13(a)、(b)所示为 0~12 h 自适应阻尼方案和固定阻尼方案系统姿态角误差解算结果,图 (c)、(d)所示为 7~10 h 两种方案系统姿态角误差解算结果。

舰船机动时的载体加速度会引起姿态角误差;当舰船机动结束后,机动引起的姿态角误差会被阻尼网络所抑制,经过大约一个舒拉周期,姿态误差角会衰减到较低水平^[9]。因此,比较固定阻尼方案与自适应阻尼方案的优劣,可以比较载体机动后一个舒拉周期内两者的姿态角的均方根误差(RMSE)。

均方根误差(RMSE)的计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \varepsilon_i^2}{n}} \quad (13)$$

式中: ε_i 表示第 i 个测量误差。

载体处于机动状态,自适应阻尼方案比固定阻尼方案的姿态角均方根误差减小的百分比为 $\sigma\%$, $\sigma\%$ 的计算方法为:

$$\sigma\% = \frac{RMSE_{Fixed} - RMSE_{Adaptive}}{RMSE_{Fixed}} \times 100\% \quad (14)$$

式中: $RMSE_{Fixed}$ 为载体机动后一个舒拉周期内固定阻尼方案的均方根误差; $RMSE_{Adaptive}$ 为载体机动后一个舒拉周期内自适应阻尼方案均方根误差。

从海事实验结果图 13 中可以看出,由于前 3 h

系统处于无阻尼状态,系统存在较大的舒拉周期振荡误差,3 h后系统接入阻尼网络,系统的舒拉周期误差被显著抑制。在7.0~7.2 h时间内,舰船在北向机动,相对于固定阻尼方案,自适应阻尼方案姿态角误差减小了32.1%;在9.2~9.8 h时间内,舰船在东向机动,相对于固定阻尼方案,自适应阻尼方案姿态角误差减小了17.2%。当舰船处于机动状态,与固定阻尼方案相比,自适应阻尼方案中,根据载体加速度调整系统阻尼比,有效地抑制舰船机动引起的姿态角误差。

5 结 论

文中提出了一种阻尼比连续可调的阻尼网络设计方法。相对于传统的试错法,该方法可以极大地降低阻尼网络设计的复杂性。并且可以通过控制阻尼网络的校正系数 q 对系统阻尼比进行线性调整。论文分析推导了捷联姿态测量系统加入阻尼后,系统处于加速运动状态下的姿态角误差与系统阻尼比之间的关系,进而提出了根据载体加速度大小调节系统阻尼比以抑制姿态角误差的自适应阻尼方案。仿真和海事实验结果表明:提出的阻尼网络设计方法能有效抑制阻尼系统的舒拉周期性振荡误差;当载体处于加速状态下,根据载体加速度实时调节系统阻尼比可有效减小捷联姿态测量系统姿态角误差,提高系统测量精度。

参 考 文 献:

- [1] Wu Saicheng. Research on key technology of high-precision attitude measurement system [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2012. (in Chinese)
吴塞成. 船用高精度激光陀螺姿态测量系统关键技术研究 [D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2012.
- [2] Xu Bo, Sun Feng. An independent damped algorithm based on SINS for ship [C]//International Conference on Computer Engineering and Technology, 2009: 88-92.
- [3] Zha Feng, Xu Jiangning, Li Jingshu, et al. Improvement of a series of fuzzy damp algorithms in SINS [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2013, 38(6): 705-709. (in Chinese)
查峰, 许江宁, 李京书, 等. 一类捷联惯导系统模糊内阻尼算法的改进 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2013, 38(6): 705-709.
- [4] He Hongyang, Xu Jiangning, Qin Fangjun. Research for SINS damping overshoot error suppression algorithm [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2012, 32(11): 39-41. (in Chinese)
何泓洋, 许江宁, 覃方君. 一种捷联惯导阻尼超调误差抑制算法研究 [J]. 舰船电子工程, 2012, 32(11): 39-41.
- [5] Cheng Jianhua, Shi Junyu, Rong Wenting, et al. Research and realization of an azimuth damping inertial navigation system based on multi-damping coefficient [J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2011, 32(6): 786-791. (in Chinese)
程建华, 石俊宇, 荣文婷, 等. 多阻尼系数的全阻尼惯导系统的设计与实现 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2011, 32(6): 786-791.
- [6] Qin Fangjun, Li An, Xu Jiangning. Improved internal damping method for inertial navigation system [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2013, 21(2): 147-154.
- [7] Cheng Peng. Principle of Automatic Control [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 141-214. (in Chinese)
程鹏. 自动控制原理 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 141-214.
- [8] Tian Yubo, Chen Feng, Zhang Zhenkai. Hybrid Neural Network Technique [M]. Beijing: Science Press, 2015: 60-81. (in Chinese)
田雨波, 陈风, 张贞凯. 混合神经网络技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2015: 60-81.
- [9] Liu Jun. Error research and simulation of the inner-level-damping strapdown inertial navigation system [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2013, 33(7): 39-41. (in Chinese)
刘军. 内水平阻尼捷联惯导误差仿真研究 [J]. 舰船电子工程, 2013, 33(7): 39-41.