旋转式光纤陀螺惯导系统随机误差抑制技术

周 斌 王 巍 何小飞

(北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100191) (北京航天控制仪器研究所, 北京 100854)

摘 要: 采用旋转调制技术能够有效降低陀螺常值漂移和加速度计常值零偏对导航系统精度的影响,但其对陀螺随机漂移和噪声几乎没有抑制作用.惯导系统在随机干扰的作用下输出误差将发散,影响系统长时间的导航定位能力.通过对抑制随机干扰误差的阻尼技术进行研究,提出一种具有阻尼特性的旋转式光纤陀螺惯导系统,利用阻尼技术抑制随机干扰对导航系统精度的影响.从仿真结果可以看出,具有阻尼特性的单轴旋转光纤陀螺惯导系统精度提高 1 倍以上.当系统采用更高精度的惯性仪表时,随机误差的阻尼抑制效果将更明显.

关 键 词: 光纤陀螺; 随机误差; 旋转式惯导系统; 阻尼技术; 控制方程

中图分类号: V 19

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2013)09-1203-05

Random error suppression technology of rotating FOG inertial navigation system

Zhou Bin

(School of Instrumentation Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Wang Wei He Xiaofei

(Beijing Aerospace Control Instrument Research Institute, Beijing 100854, China)

Abstract: The impact of the gyro constant drift and accelerometer constant bias to the inertial navigation system (INS) can be reduced by rotation modulation technology, but the gyro random drift and noise can not be inhibited. The errors of INS will divergence under action of random disturbances, which affects the long-term ability to navigate. The damping technology to inhibit random error interference was concerned, and a damping rotating fiber optic gyro (FOG) inertial navigation system was presented. Using the damping technology the affect of random noise to navigation system accuracy was suppressed. Simulation results show that the single axis rotating FOG inertial navigation system precision is improved by more than one times with damping technology. When higher precision instrument is adopted, it will be more obvious for suppress effect of random error.

Key words: fiber optic gyroscope; random error; rotating inertial navigation system; damping technology; control equations

惯性导航系统的主要缺点是导航定位误差随时间增长,对于需要长时间工作的船用惯导系统而言,必须要解决这个问题[1].由导航系统的误差分析可知,惯性仪表的误差是影响惯性导航系统精度的主要因素[2].采用惯性测量单元旋转调制技术可以在很大程度上抵消陀螺常值漂移和加速度计常值零偏对导航精度的影响,从而提高系统长时间的导航能力,但光纤陀螺与传统机电陀螺相比,一个重要特征就是其输出中存在较大噪声,具有较大的随机游走系数,而旋转调制技术对

收稿日期: 2012-11-19; **网络出版时间**: 2013-07-23 03:56

网络出版地址: www.cnki.net/kcms/detail/11.2625.V.20130723.1556.001.html

基金项目: 总装预研资助项目(51309030103)

作者简介: 周 斌(1983-),男,江西贵溪人,博士生,zhou01031189@sohu.com.

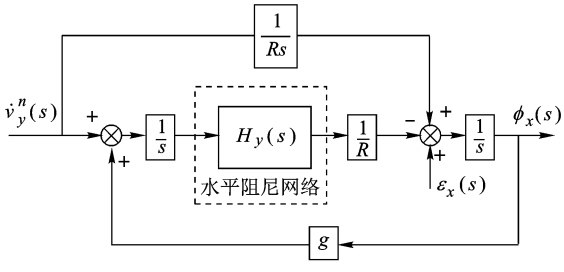
随机漂移和陀螺噪声几乎没有抑制作用[3]. 因此当系统采用旋转调制技术抑制陀螺常值漂移和加速度计常值零偏对导航系统的精度影响之后,陀螺随机漂移和噪声对系统精度的影响将凸显.

由理论分析可知,无阻尼指北方位惯导系统是一临界稳定系统[4-6],其在各种随机性误差源的作用下,会产生缓慢的发散过程,随时间增长,误差振荡的幅度会越来越大. 对于长时间工作的船用惯导系统,误差的发散将使其失去定位能力. 因此研究相应的误差抑制技术具有重要意义[7].

在传统的平台式惯导系统中,阻尼技术应用的十分广泛[8-10]. 而针对旋转式系统应用阻尼技术的相关文献还未见报道. 因此提出将阻尼技术引入到旋转式光纤陀螺惯导系统中,用以抑制误差的发散,并分析其对导航系统精度的影响.

1 阻尼技术的误差抑制原理

为分析惯导系统中各误差源对系统精度的影响,现以指北方位惯导东向修正回路为例,分析东向陀螺漂移对水平误差角的影响,如图 1 所示.



g—重力加速度;R—地球半径;$v_y^n(s)$—北向加速度拉氏变换;$H_y(s)$—水平阻尼网络传递函数;$\varepsilon_x(s)$—东向陀螺漂移;$\phi_x(s)$—水平误差角.

图 1 指北方位惯导东向轴修正回路

由图 1 知,从 ε_x 到 ϕ_x 的传递函数为

$$\frac{\phi_x(s)}{\varepsilon_x(s)}=\frac{s}{s^2+H_y(s)\omega_s^2} \tag{1}$$

式中,$\omega_s^2=g/R$,ω_s 为舒拉角频率. 从式(1)可以看出,当 $H_y(s)=1$ 时,系统是一个无阻尼的二阶系统.

当 ε_x 为常值时,$\phi_x=\dfrac{\varepsilon_x}{\omega_s}\sin\omega_s t$ 将以舒拉周期等幅振荡.

当 ε_x 不是常值,而是一零均值白噪声随机过程,则产生的 ϕ_x 也是一个随机过程,并且误差角随机过程的稳态均方根值 $\sigma_\phi(t)$ 随时间的平方根增长. 具体表达式如下:

$$\sigma_\phi(t)\approx\frac{1}{\sqrt{2\omega_s}}\sigma_g\sqrt{\omega_s t} \tag{2}$$

式中,σ_g^2 为陀螺随机噪声的方差强度.

为了使系统误差振荡的幅值随时间增长而衰减,必须引入校正网络,使惯导系统的修正回路变成一个等价的、具有合适阻尼比的二阶系统. 由二阶系统性质知,系统能够对随机干扰进行有效的抑制. 在随机白噪声作用下,输出的稳态均方根值为与阻尼系数 $1/\sqrt{\xi}$ 成比例的常值,是一个有界的量[11]. 所以说阻尼是抑制随机干扰作用下系统误差发散有效措施.

2 系统工作原理框图

与一般的旋转调制式光纤陀螺惯导系统相比,阻尼的引入只是改变了对速度、位置和旋转角速率的导航解算方法,在导航计算机中通过软件来实现,不需要额外增加任何成本. 具有阻尼的旋转调制式光纤陀螺惯导系统原理框图如图 2 所示.

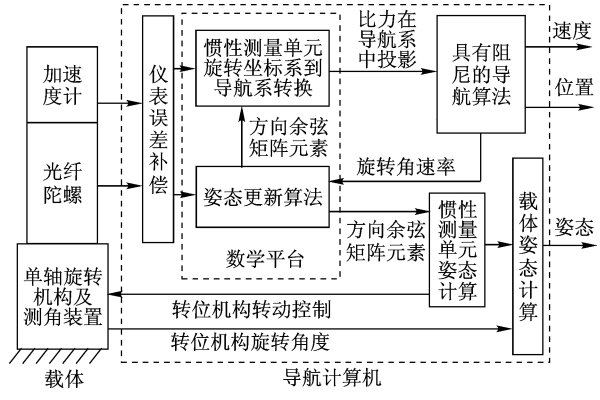


图 2 具有阻尼的旋转调制式光纤陀螺惯导系统原理图

关于旋转调制式光纤陀螺惯导系统的具体相关内容参见文献[3].

3 建立导航解算控制方程

参考平台式系统中的阻尼技术,建立一种同时适用于各种阻尼工作状态的导航解算方程,具体解算框图如图 3 所示.

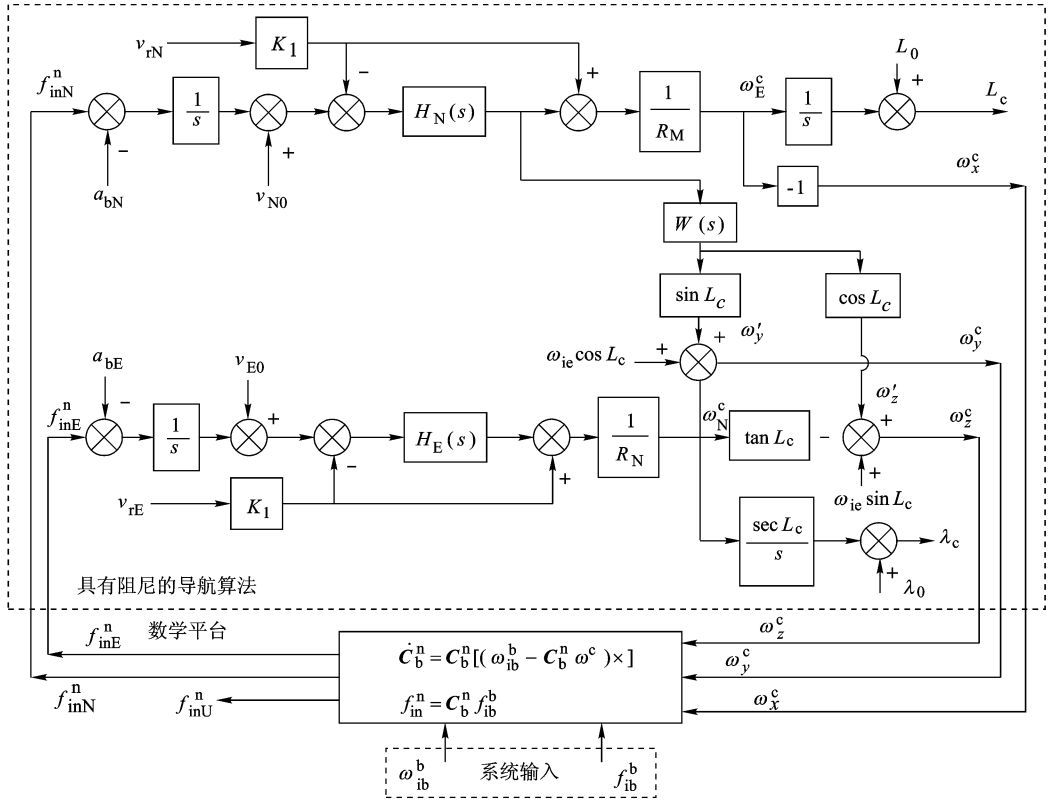
假定图 3 中水平阻尼网络 H_E,H_N 表示为

$$\left.\begin{aligned}H_E(s)&=\frac{A(s+\omega_1)(s+\omega_4)}{(s+\omega_2)(s+\omega_3)}\\H_N(s)&=\frac{B(s+\omega_5)(s+\omega_8)}{(s+\omega_6)(s+\omega_7)}\end{aligned}\right\} \tag{3}$$

方位阻尼网络表示为

$$W(s)=\frac{Cs}{(s+\omega_9)(s+\omega_{10})} \tag{4}$$

式中,A,B,C 为阻尼网络系数;$\omega_1\sim\omega_{10}$ 为阻尼网络中的参数.



ω_{ib}^{b}—陀螺输入;f_{ib}^{b}—比力输入;f_{inE}^{n},f_{inN}^{n},f_{inU}^{n}—比力在导航坐标系中的投影;a_{bE},a_{bN}—加速度误差干扰项;v_{rE},v_{rN}—外部参考速度;v_{E0},v_{N0}—东向速度和北向速度初值;R_M,R_N—子午圈和卯酉圈地球半径;ω_{ie}—地球旋转速度;ω^c—指令加速度;K_1—是否引入外速度的开关量;L_c,λ_c—纬度和经度值;L_0,λ_0—纬度和经度初值;ω_E^c,ω_N^c,ω_y',ω_z'—计算中间变量;ω_x^c,ω_y^c,ω_z^c—指令角速度的 3 个分量;$\boldsymbol{C}_b^n$—姿态矩阵;$H_E(s)$,$H_N(s)$—水平阻尼网络;$W(s)$—方位阻尼网络.

图 3　具有阻尼的导航解算控制方块图

建立的统一控制方程组如下:

$$\left.\begin{aligned}\dot{v}_E^c &= f_{inE}^n + \left(2\omega_{ie}\sin L_c + \frac{v_E^c}{R_N}\tan L_c\right)v_N^c\\ \dot{v}_N^c &= f_{inN}^n - \left(2\omega_{ie}\sin L_c + \frac{v_E^c}{R_N}\tan L_c\right)v_E^c\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

$$\left.\begin{aligned}\omega_N^c &= \{[v_E^c(s) - K_1 v_{rE}(s)]H_E(s) + K_1 v_{rE}(s)\}\frac{1}{R_N}\\ \omega_E^c &= \{[v_N^c(s) - K_1 v_{rN}(s)]H_N(s) + K_1 v_{rN}(s)\}\frac{1}{R_M}\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

$$\left.\begin{aligned}\omega_x^c &= -\omega_E^c\\ \omega_y^c &= \omega_{ie}\cos L_c + \omega_N^c + \omega_y'\\ \omega_z^c &= \omega_{ie}\sin L_c + \omega_N^c\tan L_c + \omega_z'\end{aligned}\right\} \tag{7}$$

$$\left.\begin{aligned}\omega_y' &= \frac{\sin L_c}{R_M}[v_N^c(s) - K_1 v_{rN}(s)]H_N(s)W(s)\\ \omega_z' &= \frac{\cos L_c}{R_M}[v_N^c(s) - K_1 v_{rN}(s)]H_N(s)W(s)\end{aligned}\right\} \tag{8}$$

$$\left.\begin{aligned}\dot{L}_c &= \omega_E^c\\ \dot{\lambda}_c &= \omega_N^c\sec L_c\end{aligned}\right\} \tag{9}$$

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{C}}_b^n &= \boldsymbol{C}_b^n[(\omega_{ib}^b - \boldsymbol{C}_b^n\omega_{in}^n - \boldsymbol{C}_b^n\omega^c)\times]\\ \omega^c &= \begin{bmatrix}\omega_x^c\\ \omega_y^c\\ \omega_z^c\end{bmatrix}\end{aligned}\right\} \tag{10}$$

$$f_{in}^n = \begin{bmatrix}f_{inE}^n\\ f_{inN}^n\\ f_{inU}^n\end{bmatrix} = \boldsymbol{C}_b^n f_{ib}^b \tag{11}$$

依据以上计算方程式,编制出适合计算机解算的导航控制方程组,即可完成具有阻尼的旋转式光纤陀螺惯导系统导航参数的解算.

4　仿　真

以载体静止时导航误差变化情况为研究对象,设置如下仿真条件:假设当地地理纬度 L 为 40°,陀螺常值漂移 ε_x,ε_y 为 0.01(°)/h,ε_z 为 0.002(°)/h,3 只陀螺的角随机游走大小均为 $0.005(°)/\sqrt{\text{h}}$,标度因数非线性误差为 50×10^{-6},安装误差为 10″;加速度计常值漂移 ∇_x, ∇_y, ∇_z均为 $5\times10^{-5}g$,初始时刻载体坐标与当地地理坐标系重合,水平姿态角和航向角均为零. 暂时忽略其

他误差,仿真时间为 36 h.

图 4、图 5 给出不旋转惯性导航系统和单轴旋转光纤陀螺惯导系统的误差变化曲线.

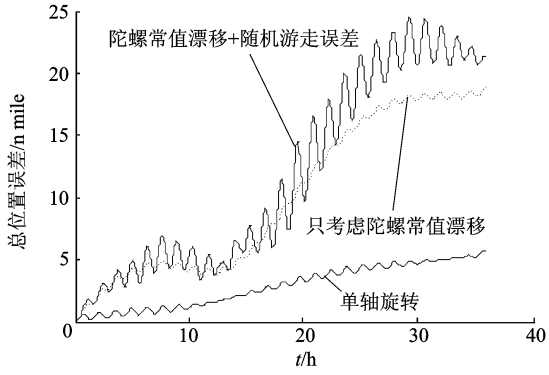


图 4 旋转对导航系统精度提高的影响

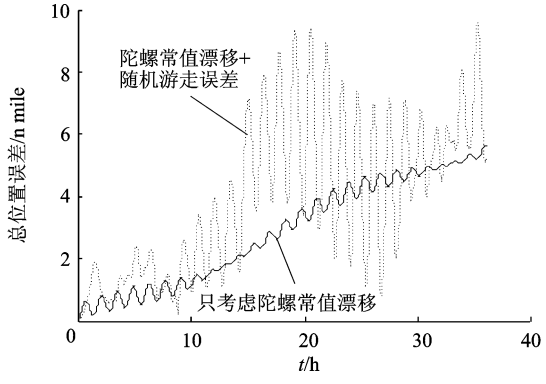


图 5 旋转条件下陀螺随机误差产生的导航误差

从图 4 可以看出,旋转能够有效减少导航系统的最终定位误差,并且当仪表标度因数误差和安装误差更小时,系统的精度能够进一步提高[3]. 从图 5 知,当采用旋转技术抑制陀螺常值漂移和加速度计常值零偏对导航系统的误差影响以后,陀螺随机游走误差对系统精度的影响将凸显,位置误差的振荡幅值增加,振荡幅度与位置误差的积累值相当. 因此,需要对随机误差产生的系统误差进行抑制.

将上述具有阻尼的导航解算控制方程应用到旋转调制式光纤陀螺惯导系统中,分析在无阻尼、内水平阻尼和内全阻尼情况下导航系统的误差变化情况.

从图 6、图 7 可以看出,在水平阻尼的情况下,导航系统由于随机误差引起的发散得到有效抑制,并且去除了水平姿态角误差和速度误差中的舒拉周期振荡.

从图 8 仿真结果来看,具有阻尼特性的单轴旋转光纤陀螺惯导系统能够进一步提高系统的导航定位精度,当导航系统位置误差中随时间积累的误差项大幅减低以后,阻尼效果将更加明显. 给系统加入阻尼以后,位置误差中仍然包括随时间

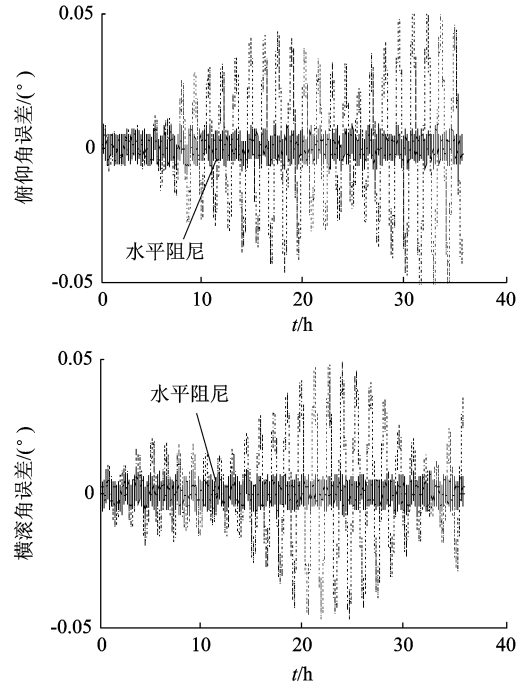


图 6 旋转式惯导系统在阻尼情况下的姿态误差变化

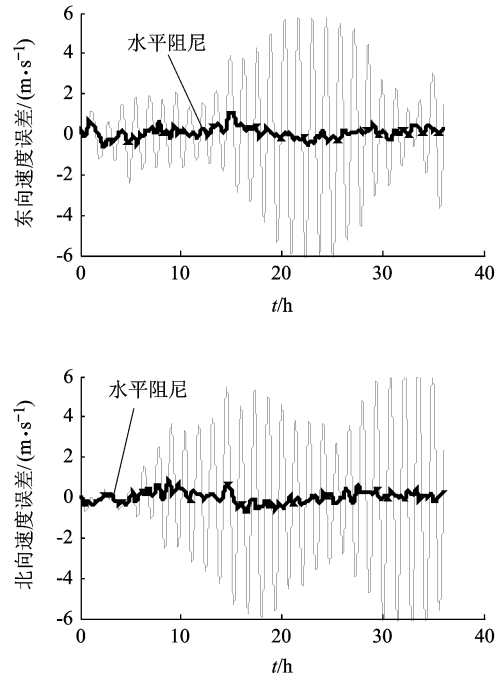


图 7 旋转式惯导系统在阻尼情况下的速度误差变化

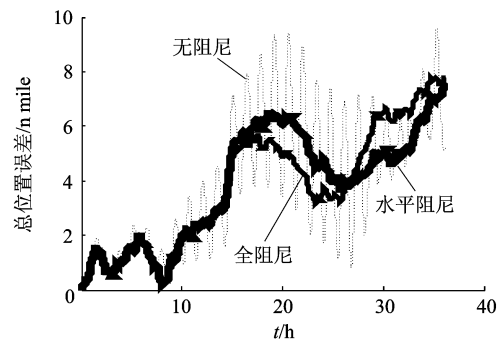


图 8 旋转式惯导系统在各种工作状态下的定位误差

积累的误差和地球周期振荡性误差.

5　结　论

通过对抑制随机干扰误差的阻尼技术进行研究,推导出捷联系统实现各种阻尼工作状态切换的统一控制方程,并给出相应的具体工程实现方法. 将阻尼技术引入到旋转式光纤陀螺惯导系统中用于提高系统的精度. 仿真结果表明:采用具有阻尼特性的单轴旋转光纤陀螺惯导系统能够使系统精度提高 1 倍以上,适用于需要长时间工作的船用惯导系统.

参考文献(References)

[1] Cheng Jianhua, Zou Jibin, Wu Lei, et al. The design of an effective marine inertial navigation system scheme[C]//Luo Qi, Gong Mingmin, Xiong Feng, et al. International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining. Adelaide, Australia: IEEE Computer Society, 2008: 671-676

[2] 王巍. 光纤陀螺惯性系统[M]. 北京:中国宇航出版社, 2010: 305-318
Wang Wei. Fiber optical gyro inertial navigation system[M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2010: 305-318 (in Chinese)

[3] 周斌,王巍,蔡春龙. 单轴旋转式光纤陀螺惯导系统误差特性研究[J]. 导航与控制, 2012, 11(2): 1-8
Zhou Bin, Wang Wei, Cai Chunlong. Research on error characteristics of FOG inertial navigation system based on single-axis rotation[J]. Navigation and Control, 2012, 11(2): 1-8 (in Chinese)

[4] 陈永冰,钟斌. 惯性导航原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007: 206-213
Chen Yongbing, Zhong Bin. Inertial navigation principle[M]. Beijing: The Publishment of National Industry, 2007: 206-213 (in Chinese)

[5] Zhao Lin, Rong Wenting, Cheng Xuhong. Network parameter design of PINS azimuth fine alignment[C]//Zhang Chengjin. 2010 8th World Congress on Intelligent Control and Automation. Jinan, China: IEEE, 2010: 3769-3772

[6] 查峰,许江宁,覃方君,等. 捷联惯导系统内水平阻尼网络设计[J]. 兵工学报, 2011, 32(8): 996-1001
Zha Feng, Xu Jiangning, Qin Fangjun, et al. Damp network design of horizontal loop in strapdown inertial navigation system[J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(8): 996-1001 (in Chinese)

[7] 张仲毅,徐烨峰,李魁,等. 长航时惯导系统的随机游走误差传播规律及抑制方法[J]. 系统工程与电子技术, 2011, 33(9): 2050-2054
Zhang Zhongyi, Xu Yefeng, Li Kui, et al. Angle random walk error propagation and suppression methods in long-term inertial navigation system[J]. Systems Engineering and Electronics, 2011, 33(9): 2050-2054 (in Chinese)

[8] 黄一河,于运治,单福林,等. 周期性阻尼信号对外全阻尼惯导系统位置误差影响研究(海流修正)[J]. 中国惯性技术学报, 1999, 7(2): 6-10
Huang Yihe, Yu Yunzhi, Shan Fulin, et al. Research on the positioning error of the external absolute damped INS under the influence of the periodic damping signal (tidal stream correction)[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 1999, 7(2): 6-10 (in Chinese)

[9] Vanderwerf K. Schuler pumping of inertial velocity errors due to gravity anomalies along a popular north pacific airway[C]// IEEE. Position Location and Navigation Symposium. Atlanta, USA: IEEE, 1996: 642-948

[10] Chernodarov A V. Adaptive robust damping of divergent oscillations in updatable inertial systems[C]//Chernousko F L, Fradkov A L. International Conference on Control of Oscillations and Chaos. Saint-Petersburg, Russia: IEEE, 2000: 133-134

[11] Gao Wei, Zhang Yi, Xu Bo, et al. Aanlyse of damping network effect on SINS[C]//IEEE. International Conference on Mechatronics and Automation. Changchun, China: IEEE, 2009: 2530-2536

(编　辑:刘登敏)