

舰船惯性导航系统自适应阻尼网络设计

姜璐, 于运治, 陈勇
(海军潜艇学院, 山东青岛 266042)

摘要: 舰船惯性导航系统根据运动状态在水平阻尼和无阻尼两种工作状态间转换, 载体运动加速度引起的系统误差和状态转换时产生的超调误差会导致惯导的动态性能变差。针对传统阻尼方法的局限性, 采用自适应控制方法设计了平台式惯导的水平阻尼网络, 根据运动加速度的大小, 适时改变阻尼网络参数, 使舰船机动造成的系统误差最小, 并相应提出了抑制状态转换超调误差的方法。理论分析与仿真结果表明, 该方法能有效改善惯导的动态性能。

关键词: 惯性导航系统; 水平阻尼; 自适应阻尼网络; 动态性能

中图分类号: V271.4; U666.12

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2014)04-0052-04

An Adaptive-Damping Network Designed for Inertial Navigation System of Ships

JIANG Lu, YU Yun-zhi, CHEN Yong
(Navy Submarine Academy, Qingdao 266042, China)

Abstract: The inertial navigation system (INS) of ships switches between two modes of undamped navigation and horizontal-damped navigation according to the state of motion, during which the system error caused by the acceleration of the ship and the overshoot error resulted from the frequent switches between two modes may degrade the dynamic performance of the INS. Considering the limitations of traditional damping method, the adaptive control method was applied to design a level damping network of platform inertial navigation. The damping network parameters were changed adaptively according to the acceleration, thus to make the system error minimum. And a method for restraining the overshoot error caused by mode switching was also proposed. Theoretical analysis and simulation result shows that the method can improve the dynamic performance of the INS effectively.

Key words: inertial navigation system; level damping; adaptive damping network; dynamic performance

0 引言

舰船惯性导航系统有外水平阻尼和无阻尼两种工作方式, 为适应不同的航行状态, 惯导系统需在这两种工作方式下频繁切换, 此时, 由于系统的平衡状态被破坏而出现较大的超调误差, 以致降低了系统的精度^[1-2]。此外, 国内实际应用的舰船惯导系统采用水平阻尼网络参数为固定值, 难以适应不同运动加速度下的阻尼需求。因此, 针对上述问题优化设计阻尼网络对于提高导航系统的精度具有重要的理论和实践意义。

对于惯导阻尼网络的设计, 传统设计方法是根据

经典控制理论, 采用逐步尝试的方法, 如文献[3]给出的一阶阻尼网络; 文献[4-6]所讨论的二阶水平阻尼网络, 其阻尼网络参数都为固定值; 文献[7]利用两台惯导的速度、位置、加速度误差反馈到舒拉回路形成阻尼网络, 但网络实现需要两套惯导; 文献[8]针对纬度和方位的地球周期振荡误差降低惯导定位精度的问题, 引入三阶方位阻尼网络, 采用试凑法, 设计了多阻尼系数的方位阻尼网络。

为达到有效阻尼舒拉振荡, 弥补固定参数阻尼网络的局限性, 惯导系统的阻尼网络最好能够适时改变^[9]。本文提出了一种水平阻尼网络的自适应控制方案, 选取二阶水平阻尼网络, 综合考虑系统动态性能和阻尼效果, 确立了阻尼系数与运动加速度之间的关系, 设计并实现了阻尼系数适时可变的自适应阻尼网络, 以适应不同机动条件下系统的阻尼要求。

1 自适应阻尼网络的设计方法

1.1 自适应阻尼网络控制方案

设计的系统单通道内水平阻尼自适应控制方案如图1所示,在惯导水平网络中加入前馈自校正控制,以加速度为自适应机构的输入量,阻尼网络参数为自适应机构的输出量,自适应阻尼系统通过自适应机构根据运动加速度适时调整阻尼网络参数。

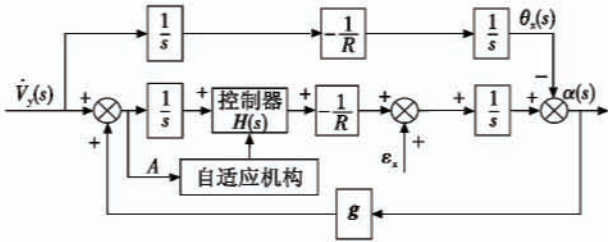


图1 单通道内水平阻尼自适应控制图

Fig.1 The adaptive control diagram of the single channel with inner level damp

1.2 阻尼系数与运动加速度关系的确立

选取系统位置误差的振荡峰值作为自适应控制的目标函数

$$J = \sqrt{(\delta\varphi_{\max}^2 + \delta\lambda_{\max}^2)} \quad (1)$$

式中, $\delta\varphi_{\max}$ 、 $\delta\lambda_{\max}$ 分别为系统的纬度误差和经度误差的振荡峰值。

由于阻尼网络参数与目标函数之间并不是解析关系,无法通过最小化目标函数直接求取阻尼系数。为兼顾系统动态性能和阻尼效果两者要求,通过误差仿真分析,确定与运动加速度相对应的最优阻尼系数。具体方法是:首先根据定位需求选取目标函数的条件阈值,这里选取 0.2', 然后根据目标函数 $J < 0.2'$, 以初值 0 和步长 0.1 kn/min 依次递增加速度的大小,求得加速度与最优阻尼系数的对应关系(如表1所示),最后根据表1数据采用三次样条插值函数拟合阻尼系数与加速度的关系,得到分段函数 $\xi = K(A)$ 。

表1 阻尼系数与运动加速度的对应关系

Table 1 The relation between the damp coefficient and the acceleration

加速度 $A/(\text{kn}\cdot\text{min}^{-1})$	0.0	0.5	1.0	1.5	1.8	2.0	2.5	3.0	5.0	5.5
阻尼系数 ξ	0.50	0.50	0.40	0.12	0.07	0.06	0.04	0.03	0.03	0.00

1.3 阻尼网络参数的自适应设计方法

舒拉振荡周期为 $\omega_s = \sqrt{g/R}$, 由图1可得平台的

北向水平误差角为

$$\alpha(s) = \frac{g/Rs^2}{1+H(s)g/Rs^2} [1-H(s)] \frac{\dot{V}_y(s)}{g} + \frac{g/Rs^2}{1+H(s)g/Rs^2} \frac{se_z}{g/R} \quad (2)$$

式(2)中存在一个传递函数

$$F = \frac{g/Rs^2}{1+H(s)g/Rs^2} = \frac{1}{H} \frac{HG}{1+HG} = \frac{G}{1+HG} \quad (3)$$

式中, $G = g/Rs^2$ 。水平阻尼网络采用二阶系统

$$H(s) = \frac{s^2 + \omega_0 s/p + \omega_0^2}{s^2 + \omega_1 s/q + \omega_1^2} = \frac{(s+a)(s+b)}{(s+c)(s+d)} \quad (4)$$

根据拉普拉斯终值定理^[10], $\lim_{s \rightarrow 0} H(s) = 1$, 得 $\omega_1 = \omega_0$, 即 $ab = cd$ 。将式(4)代入式(3), 函数 $F(s)$ 变为

$$F(s) = \frac{\omega_0^2 s^2 + \omega_0^2 \omega_0 s/p + \omega_0^2 \omega_0^2}{s^4 + \omega_0 s^3/q + (\omega_0^2 + \omega_0^2) s^2 + \omega_0^2 \omega_0 s/p + \omega_0^2 \omega_0^2} \quad (5)$$

二阶系统相对谐振峰与阻尼系数 ξ 的关系为

$$M_r = \frac{1}{2\xi\sqrt{1-\xi^2}}, \quad \xi = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{1 - 1/M_r^2}}{2}} \quad (6)$$

式(6)的幅值和相位为

$$M(H) = |H(s)| = \sqrt{\frac{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2 / p^2}{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + \omega^2 \omega_0^2 / q^2}} \quad (7)$$

$$\varphi(H) = \arctan \frac{\omega_0 \omega / p}{\omega_0^2 - \omega^2} + \arctan \frac{\omega_0 \omega / q}{\omega_0^2 - \omega^2} \quad (8)$$

由式(4)可导出

$$a = b = -\frac{\omega_0}{2p}(1 \mp \sqrt{1 - 4p^2}), \quad c = d = -\frac{\omega_0}{2q}(1 \mp \sqrt{1 - 4q^2}) \quad (9)$$

引入水平阻尼网络必须保证闭环系统稳定, 因此 $H(s)$ 的舒拉角频率处是正的相位, 这样有 $\omega_0 > \omega_s$, 这就意味着 $p < q$ 。又因为 a, b, c 和 d 是实数, 所以 p 和 q 应小于 0.5。

由式(7)和式(8)可以得出, 在极低频率和极高频率处 $M(H) \approx 1, \varphi(H) \approx 0$, 在频率 ω_0 处 $M(H)$ 达到了最大值 q/p 。如果保持 ω_0, q 不变, 系统的相对谐振峰 M_r 随 q/p 的变化是单调递减的。又由式(6)可得, 当 $0 < \xi < 1$ 时, M_r 是 ξ 的单调递减函数, 所以, q/p 对 ξ 是单调递增的关系, 因此可以通过调整 q/p 值来满足对 ξ 的设计要求。

依据稳定性原理^[10], $\omega_0 > \omega_s$, 可取 $\omega_0 = 6.2 \times 10^{-3}$ 。又 $p < q < 0.5$, 可取 $q = 0.416$ 。表2是由仿真计算获得的系统阻尼系数 ξ 、相对谐振峰 M_r 与 q/p 的对应关系。

表2 阻尼系数与系统参数的对应关系

Table 2 The relation between the damp coefficient and the system parameters

ξ	0.03	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50	0.60
M_r	16.67	10.01	5.025	3.372	2.552	2.066	1.747	1.525	1.364	1.244	1.155	1.042
q/p	1.350	1.760	2.310	2.560	2.710	2.800	2.864	2.905	2.940	2.965	2.985	3.000

根据表2数据,采用三次样条函数拟合 q/p 与 ξ 之间的关系为

$$q/p = Q_p(\xi) = a_i \xi^3 + b_i \xi^2 + c_i \xi + d_i, \xi \in [\xi_i, \xi_{i+1}] \quad (10)$$

式中: $Q_p(\xi)$ 是一个在 $[\xi_i, \xi_{i+1}] (i=1, 2, \dots, 11)$ 上的分段函数; a_i, b_i, c_i, d_i 为插值函数的系数,通过拟合计算即可获得。

为验证用拟合函数 $Q_p(\xi)$ 计算 q/p 的方法设计阻尼网络的正确性,在阻尼系数的自变量范围内,任选非实测数据点,这里选取 $\xi = 0.13$ 和 $\xi = 0.55$,则相应的 $q/p = Q_p(\xi) = 2.478$ 和 $q/p = Q_p(\xi) = 3.0$,此时系统传递函数的Nichols图如图2和图3所示。由Nichols图得到的 M_r 与式(6)计算的设计理论值一致,表明该方法正确。

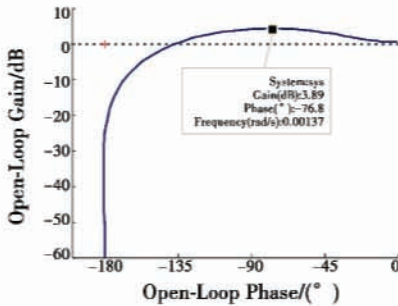


图2 $\xi = 0.13$ 时水平通道 Nichols 图

Fig. 2 The Nichols chart of lever channel when $\xi = 0.13$

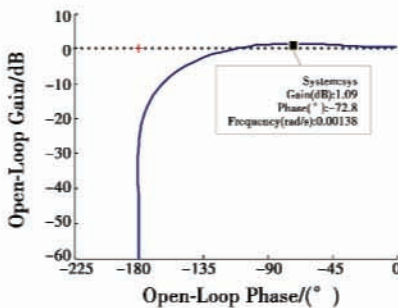


图3 $\xi = 0.55$ 时水平通道 Nichols 图

Fig. 3 The Nichols chart of lever channel when $\xi = 0.55$

2 抑制超调误差的方法

为适应机动条件下不断变化的运动加速度,系统需要频繁地变阻尼,若阻尼系数跳变较大,同样会引入误差超调这一问题。为此,在自适应阻尼网络计算中设计抑制超调模块,如图4所示,将阻尼系数的跳变转化为阻尼系数渐变,尽量使系统状态平滑切换。其设计思想是:当运动加速度由 A_1 变化到 A_2 ,为减小阻尼系数跳变引起的超调,此时不直接调整到 A_2 值对应的阻尼系数,而是每间隔2 min,阻尼系数调整到 $(A_1 \pm 0.1)$ 对应的阻尼系数,依次循环渐变调整到 A_2 所对应的阻尼系数结束。

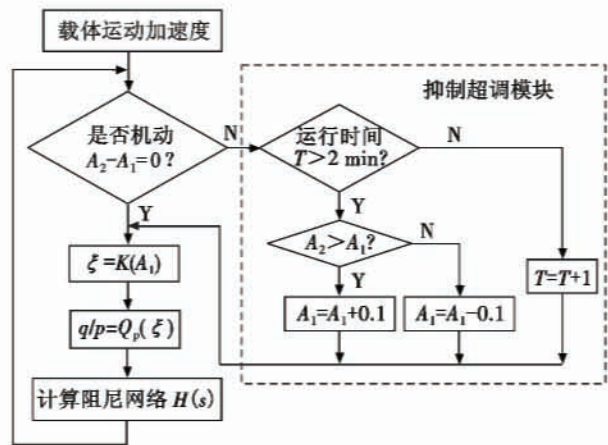


图4 自适应阻尼网络计算流程图

Fig. 4 The adaptive damping network calculation process

下面仿真验证抑制超调方法的有效性。设在 $(35^\circ 50'N, 120^\circ 30'E)$ 处,给定陀螺仪漂移率为 $\varepsilon_x = \varepsilon_y = \varepsilon_z = 0.001 (^\circ)/h$,加速度计零位误差 $\Delta A_x = \Delta A_y = 10^{-5} g$,初始位置误差 $\delta\varphi_0 = 0.2'$, $\delta\lambda_0 = -0.1'$,初始速度误差 $\delta V_{x0} = \delta V_{y0} = -0.1 \text{ kn}$,平台初始误差角 $\alpha_0 = \beta_0 = 3'$, $\gamma_0 = 5'$ 。舰船运动状态设为:在 $0 \leq t < 10 \text{ h}$ 时,以速度 $V = 2 \text{ kn}$,航向 $H = 45^\circ$ 匀速直航,在 $10 \text{ h} \sim 10 \text{ h } 2 \text{ min}$ 以加速度 4 kn/min 做加速运动, $t = 10 \text{ h } 2 \text{ min}$ 时,停止加速做匀速运动。

仿真结果如图5所示。

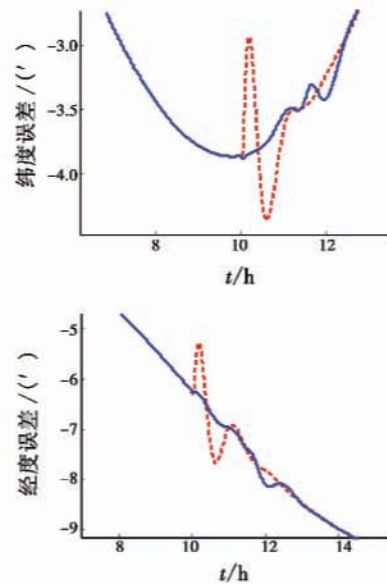


图5 抑制超调误差效果仿真图

Fig. 5 The effect of restraining switching overshoot

图中:虚线为未抑制超调时的系统误差曲线;实线为引入抑制超调时的系统误差曲线。可以看出,采用抑制超调的方法后,系统因调整阻尼状态引起的超调误差明显减小。

3 仿真结果分析

仿真计算给定的系统初始误差同前文所述。设舰船在 $0 \leq t < 10$ h时,以速度 $V=2$ kn,航向 $H=45^\circ$ 做匀速直航,在10 h~10 h 2 min做变加速运动,加速度 A 由0 kn/min增至4 kn/min,在10 h 2 min~10 h 4 min,加速度由4 kn/min减小到0 kn/min, $t=10$ h 4 min时,停止加速做匀速运动。舰船做变加速度机动时的惯导误差如图6所示。

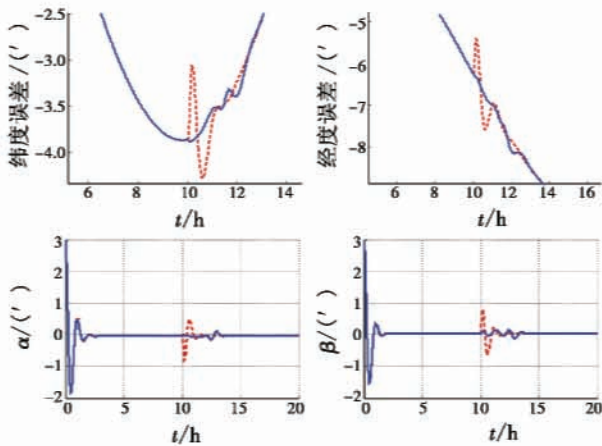


图6 舰船变加速机动时的惯导误差曲线图

Fig.6 The INS error curve in variable accelerated motion

图中:虚线为采用传统阻尼方法的固定参数阻尼网络的误差曲线,此时惯导进行状态切换产生超调,系统误差较大;实线为采用自适应阻尼网络的误差曲线,相对于固定参数阻尼网络,其阻尼系数能够随着加速度的变化而适时调整,从图6可以看出,此时舰船机动引起的经纬度定位误差和平台水平误差角振荡幅值较小,系统的动态性能得到明显改善,当运动加速度减小时,系统由弱阻尼逐渐转为强阻尼时,由于采用了本文设计的阻尼系数递变的方式,超调误差也很小。

4 结论

为弥补固定阻尼参数的缺陷,设计并实现了惯导系统水平阻尼网络的自适应控制方案。以定位误差的振荡峰值为自适应控制的目标函数,确立了阻尼网络的阻尼系数关于加速度变化量的最优化函数。依据二阶阻尼网络设计原则,利用三次样条插值拟合,得到了阻尼系数适时可变的自适应阻尼网络。针对状态切换产生的超调误差问题,将阻尼系数的跳变转化为递变,有效抑制了阻尼网络参数变化引起的超调误差。通过仿真验证了方案的有效性,惯导的动态性能得到明显改善。

参考文献

[1] 程建华,赵琳,宋君才,等.自动补偿技术在平台式惯

导系统状态切换中的应用研究[J].哈尔滨工程大学学报,2005,26(6):744-748.

CHENG J H, ZHAO L, SONG J C, et al. Application of auto-compensation technology to the switches of INS states [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2005, 26 (6):744-748.

[2] 关劲,程建华,吴磊,等.船用平台式惯导系统状态转换技术的应用[J].中国造船,2008,49(2):75-80.

GUAN J, CHENG J H, WU L, et al. The state switch technology of gimballed INS [J]. Shipbuilding of China, 2008, 49(2):75-80.

[3] LI K, LIU F, XU Y. Research on internal damping algorithm of marine inertial navigation system [J]. Intelligent Computing and Information Science, Pt II, 2011, 135:256-261.

[4] CHENG J, ZOU J, WU L, et al. The design of an effective marine inertial navigation system scheme [C]//First International Workshop on Knowledge Discovery and Data Mining, IEEE Computer Society, Adelaide, Australia, 2008: 671-676.

[5] 陈永冰,钟斌.惯性导航原理[M].北京:国防工业出版社,2007.

CHEN Y B, ZHONG B. Inertial navigation principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007.

[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 F, XU J N, QIN F J, et al. Damp network design of horizontal loop in strapdown inertial navigation system [J]. Acta Armamentarii, 2011, 32(8):996-1001.

[7] 赵汪洋,杨功流,庄良杰.双惯导系统水平阻尼技术研究[J].系统仿真学报,2007,19(5):1109-1111.

ZHAO W Y, YANG G L, ZHUANG L J. Study on level damp of double inertial navigation system [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(5):1109-1111.

[8] 程建华,时俊宇,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.

CHENG J H, SHI J Y, RONG W T, 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.

[9] 覃方君,李安,许江宁,等.阻尼参数连续可调的惯导水平内阻尼方法[J].惯性技术学报,2011,11(6):290-292.

(下转第96页)

- 1974, 22(1):12-16.
- [2] SHESTAG L N. A cylindrical array for the TACAN system [J]. IEEE Transactions on Antennas Propagation, 1974, 22(1):17-25.
- [3] 龚成, 郭英, 齐子森. 塔康导航系统机载中频信号数字化技术[J]. 空军工程大学学报: 自然科学版, 2008, 19(5):29-32.
GONG C, GUO Y, QI Z S. Digital implement technology of TACAN IF signal [J]. Journal of Air Force Engineering University: Natural Science Edition, 2008, 19(5):29-32.
- [4] 王树彬, 周正, 邹卫霞, 等. 超宽带对塔康系统的干扰分析[J]. 高技术通讯, 2009, 19(7):680-685.
WANG S B, ZHOU Z, ZOU W X, et al. Analysis of the interference caused by UWB with TACAN [J]. High Technology Letters, 2009, 19(7):680-685.
- [5] 张浩杰, 李晓明, 裴文林. 基于中频数字化技术的塔康测角方法研究[J]. 现代防御技术, 2012, 40(3):67-71.
ZHANG H J, LI X M, PEI W L. Angle measuring of TACAN based on IF digital technique [J]. Modern Defence Technology, 2012, 40(3):67-71.
- [6] 张忠心, 李晓明, 张景伟, 等. 无线电导航理论与系统 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1998:220-270.
ZHANG Z X, LI X M, ZHANG J W, et al. Radio navigation theory and system [M]. Xi'an: Shaanxi Science and Technology Press, 1998:220-270.
- [7] 王维康, 张斌, 李睿, 等. 塔康系统输出参数的精确测量方法研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(7):78-82, 91.
WANG W K, ZHANG B, LI R, et al. Accurate measurement of TACAN output parameters [J]. Electronics Optics & Control, 2010, 17(7):78-82, 91.
- [8] 田孝华, 李睿, 王维康. 有效估计塔康测距信号多径时延的方法[J]. 电子与信息学报, 2010, 32(9):2273-2276.
TIAN X H, LI R, WANG W K. An efficient time delay estimation algorithm for multipath signal of distance signal in TACAN system [J]. Electronics & Information Technology, 2010, 32(9):2273-2276.
- [9] LEE J Y, KIM J K, YOON G. A digital envelope detection for blood pressure measure [C]//Proceeding of the 23rd Annual EMBS International Conference, October 25-28, Istanbul, Turkey, 2001:226-228.
- [10] WANG P, SAHINOGLU Z, PUN M O, et al. Persymmetric parametric adaptive matched filter for multichannel adaptive signal detection [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(6):3322-3328.
- [11] JIANG C S, LI H B, RANGASWAMY M. On the conjugate gradient matched filter [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2012, 60(5):2660-2666.
- (上接第 55 页)
- QIN F J, LI A, XU J N, et al. Horizontal inner damping method with continuously adjustable parameter for inertial navigation system [J]. Journal of Chinese Technology, 2011, 11(6):290-292.
- [10] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2006.
HU S S. Principle of automatic control [M]. Beijing: Science Press, 2006.

欢 迎 投 稿 欢 迎 刊 登 广 告