

外速度参考条件下的惯导系统快速外阻尼算法

查峰¹ 覃方君¹ 李峰¹ 叶斌²

1 海军工程大学电气工程学院,湖北 武汉,430033
2 西安飞行自动控制研究所惯性技术航空科学重点实验室,陕西 西安,100044

摘要:针对外速度参考条件下惯导系统振荡误差的快速抑制需求,提出了一种改变传统阻尼网络结构的系统误差快速阻尼方法。在传统的惯导系统内、外阻尼形式中,内阻尼算法容易受到载体加速度影响,外阻尼算法动态特性差。所提方法增加一条外速度为输入的前向通道,补偿载体加速度对阻尼系统误差的影响,同时改变传统阻尼网络结构形式,提高阻尼网络的动态特性。根据系统阻尼动态过程,进行快速阻尼网络参数设计,同时可以综合考虑动态过程与速度误差抑制两方面的影响,采用变参数实现快速阻尼算法。惯导系统阻尼算法仿真与试验结果表明,传统外阻尼算法的调节时间约为1 h,采用快速外阻尼算法的系统阻尼过程调节时间缩短为10 min。

关键词:惯导系统;阻尼;外速度;振荡误差

中图分类号:P244; U666 **文献标志码:**A

惯性导航系统本质为临界稳定系统,在各种误差源的作用下系统误差呈现出周期性振荡形式^[1]。惯导系统加入阻尼后,由误差源引起的振荡误差得到有效抑制,从而提高了系统精度,但同时也会破坏系统回路的舒拉调谐条件,使得载体加速度对系统精度的影响强烈^[2]。

在无参考速度时,惯导系统采用内阻尼方式。此时,系统振荡误差衰减快速性要求与载体机动对阻尼系统精度的影响成为不可协调的矛盾。因此,在内阻尼算法研究中,阻尼环节参数设计与阻尼状态接入方式成为系统阻尼算法设计的关键。传统阻尼算法广泛采用阻尼比接近于0.5的阻尼网络^[2-4]。文献[5]提出了一种解析式的内阻尼网络设计方法,可以通过期望的时域指标解析式设计阻尼网络参数;在此基础上,文献[6]根据载体机动模糊推理确定系统的阻尼比,在减小载体加速度影响的前提下最大程度提高误差衰减速度;文献[7]针对内阻尼提出了一种变阻尼方法,通过调整回路参数来线性调整阻尼比,克服了阻尼比固定的缺点;文献[8-10]为减小载体加速度对于系统的影响,提出不同的输出信息模糊判断系统是否进入阻尼工作方式;在此基础上,文献[11-12]设计了模糊自适应滤波器,提出利用载体加速度

大小改变量测方差阵以抑制滤波器发散。

内阻尼算法由于无外参考信息,只能通过合理改变网络参数弱化载体机动的影响,系统不可能一直处于高阻尼状态,阻尼参数也不会改变系统的舒拉振荡周期,因此一般需经过1~2个舒拉周期才能有效抑制振荡误差,制约了系统误差衰减速度。

有外参考速度时,系统可以利用外速度作为载体机动的补偿通道进行外阻尼。目前,对外阻尼算法设计研究较少,一般都采用直接将内阻尼网络参数移植到外阻尼网络中^[13-14],未利用外速度参考作为补偿通道的有利条件进行阻尼参数设计。文献[15-16]研究了平台惯导系统阻尼网络的自适应控制,提出利用外速度信息与系统信息误差来改变阻尼系数的自适应算法,但该算法还是基于内阻尼算法框架,未针对外阻尼网络进行设计。

当载体具有外速度参考时,可以通过外速度补偿载体加速度对于系统误差的影响,因此可对阻尼参数进行优化设计,尽量增大系统阻尼比,最大程度提高系统误差衰减速度。针对传统阻尼算法^[2]的局限,本文从惯导系统的误差方程出发,基于控制理论分析了系统误差的舒拉回路的特点,

提出在有外速度参考时,通过合理优化设计系统的阻尼环节和算法实现,提高系统的阻尼比和误差衰减速度,同时通过外速度补偿载体加速度对系统误差的影响。本文算法引入外部参考速度为补偿通道,通过阻尼网络的参数设计加速系统舒拉振荡误差衰减,减小载体加速度对系统的影响,提高系统误差校正速度。

1 惯导系统的内外阻尼方式及局限

无阻尼惯导系统中,忽略东向回路和北向回路之间的相互耦合,从系统特征方程可以看出系统为临界稳定系统。在陀螺漂移、加速度计误差以及初始姿态误差作用下,系统误差呈现出舒拉周期性振荡特性。

1.1 惯导系统内阻尼

为有效抑制系统的舒拉振荡误差,一般在系统回路中加入阻尼网络 $H(s)$,惯导系统的这种阻尼方式成为内阻尼。加入阻尼网络后,可以得到载体加速度 $\dot{v}_y(s)$ 与姿态角 $\varphi_x(s)$ 的频域关系为:

$$\varphi_x(s) = \frac{1 - H(s)}{R[s^2 + H(s)\omega_s^2]} \dot{v}_y(s) \quad (1)$$

式中, s 为拉普拉斯变换算子; ω_s 为舒拉频率; R 为地球半径。由此可见,在对惯导系统进行内阻尼时,系统姿态误差受载体加速度 \dot{v} 影响。

为减小载体加速度的影响,一般在阻尼网络设计过程中尽量减小阻尼网络阻尼比,使 $H(s)$ 接近于 1。但阻尼比减小会使得振荡性误差衰减速度变慢。因此综合考虑误差衰减速度和阻尼网络对系统的影响,一般选择阻尼网络阻尼比为 0.5。目前惯导系统通常采用的阻尼网络为^[2]:

$$H(s) = \frac{(s + 8.5 \times 10^{-4})(s + 9.412 \times 10^{-2})}{(s + 8.0 \times 10^{-3})(s + 1.0 \times 10^{-2})} \quad (2)$$

从式(1)可以看出,当 $H(s)$ 接近于 1 时,可减小载体加速度对系统误差的影响,但并不能从根本上消除这种影响。

1.2 惯导系统外阻尼

在系统有外速度参考信息时,将外速度引入惯导系统回路中,这种阻尼方式称为外阻尼。

外阻尼的实质是给惯导系统水平回路增加了一条前向通道,由此补偿由于加入阻尼网络改变了舒拉条件的影响。此时,系统的姿态误差角为:

$$\varphi_x(s) = \frac{[1 - H_y(s)]s}{R[s^2 + H_y(s)\omega_s^2]} \cdot \delta V_{ry}(s) \quad (3)$$

可见,系统的姿态误差与载体的加速度无关,仅与外速度误差 δV_{ry} 有关。因此,设外速度误差

δV_{ry} 的变化率为 $\dot{\delta v}_{ry}$,初始误差为 $\delta V_{ry}(0)$,由此可得:

$$\dot{\delta v}_{ry}(s) = s \cdot \delta V_{ry}(s) - \delta V_{ry}(0) \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)得:

$$\varphi_x(s) = \frac{1 - H_y(s)}{R[s^2 + H_y(s)\omega_s^2]} \cdot \dot{\delta v}_{ry}(s) + \frac{1 - H_y(s)}{R[s^2 + H_y(s)\omega_s^2]} \cdot \delta V_{ry}(0) \quad (5)$$

可见,利用外速度进行惯导系统外阻尼时,系统误差不受载体加速度影响,只与外速度的初始速度误差和误差变化率有关。在传统的外阻尼方式中,其阻尼网络采用与内阻尼相同的形式(如式(2)所示)。该阻尼网络是在考虑载体加速度的系统误差影响的基础上设计的,并未改变系统的振荡频率,系统振荡误差需在 1~2 个舒拉周期内得到有效抑制。因此,目前对系统进行外阻尼时,系统误差阻尼的动态特性差。

外阻尼通过外速度补偿了载体加速度对系统误差的影响,因此在能够获得稳定可靠的外速度的条件下,可以通过改变阻尼网络形式,合理设计阻尼网络参数及实现算法,可以提高系统阻尼动态特性,加快惯导系统误差衰减速度。

2 快速外阻尼算法设计

系统加入阻尼环节后,误差衰减速度取决于阻尼环节阻尼比及阻尼振荡频率。因此,快速外阻尼算法可借鉴惯导系统静态精对准的设计思路^[2],通过调整系统回路特征根实现振荡误差快速衰减。

为改变无阻尼惯导系统的特征根,在系统的速度解算中加入系数为 K_1 的反馈环节。加入 K_1 反馈环节后,系统的特征方程变为:

$$s^2 + K_1 s + \omega_s^2 = 0 \quad (6)$$

通过合理选择参数 K_1 ,可以得到理想阻尼比的阻尼环节。

为加速系统在阻尼环节作用下的衰减速度,在此基础上加入前馈环节 K_2 。加入 K_2 环节后,系统水平回路的特征方程变为:

$$s^2 + K_1 s + (1 + K_2)\omega_s^2 = 0 \quad (7)$$

一方面通过选择 K_1 可以使系统具有负实部的特征根,系统误差在阻尼环节作用下逐渐衰减,另一方面,前馈环节 K_2 使系统振荡频率由改变了系统原有的 ω_s 变为 $\sqrt{1 + K_2}\omega_s$,即改变了阻尼后系统的振荡周期。因此通过增大系数 K_2 可加速系统振荡误差的衰减速度,在较短时间内抑制系

统的振荡性误差。

K_1 和 K_2 两个环节改变了系统在误差源作用下的误差传递形式,可得系统姿态的稳态误差 φ_x 为:

$$\varphi_x = \frac{K_1}{(1+K_2)\omega_s^2}(\epsilon_x - \varphi_z \omega_w \cos\varphi) - \frac{\Delta A_y}{g} \quad (8)$$

式中, ϵ_x 为东向陀螺漂移; φ_z 为航向误差; ω_w 为地球自转角速度; φ 为当地纬度; ΔA_y 为加速度计零偏; g 为重力加速度。

虽然 K_1 和 K_2 两个环节加速了振荡性误差的衰减,但是由常值误差源作用引起的系统误差存在稳态误差,因此加入上述阻尼环节后系统精度受到限制。为有效抑制系统稳态误差,在系统回路中加入积分环节 K_3/s , 改变了系统误差源到系统姿态误差的传递特性。

在陀螺漂移、加速度计零偏和初始姿态误差作用下,得到系统的稳态误差 $\varphi_x(t)$ 为:

$$\varphi_x(t) = -\frac{\Delta A_y}{g} \quad (9)$$

可见,加入积分环节后,陀螺漂移和初始姿态误差引起的系统姿态的稳态误差得到抑制,系统姿态精度取决于加速度计的零偏。

上述的阻尼环节设计提高了系统误差的衰减速度,同时也使得有陀螺漂移和初始姿态误差引起的稳态误差得到有效抑制,提高了系统的阻尼速度和精度。对上述阻尼环节方块图进行等效变换后可以得到等效的阻尼网络的表达式为:

$$H(s) = \frac{(1+K_2)s+K_3}{s+K_1} \quad (10)$$

因此,通过选择合适的系数 K_1 、 K_2 和 K_3 可使系统具有更好的动态特性。但该阻尼网络也进一步改变了系统舒拉条件,使得系统误差受载体加速度影响强烈。因此,在惯导系统无外速度参考条件下进行内阻尼时,并不能采用该阻尼网络形式。

根据 § 1.2 的分析,在系统有外速度参考时,利用外速度对载体加速度的影响进行补偿。在图 1 中的阻尼网络为式 (10) 表达式形式时,参数 K_1 、 K_2 和 K_3 直接决定了系统回路的性能。因此,根据惯导系统的误差抑制需求选择合适的阻尼网络参数是实现快速外阻尼算法的关键。

3 阻尼网络参数设计

根据外速度参考条件下的快速外阻尼算法的结构,可得系统回路的特征方程为:

$$s^3 + K_1s^2 + (1+K_2)\omega_s^2s + K_3\omega_s^2 = 0 \quad (11)$$

加入上述环节后惯导系统变为高阶系统,为

便于分析系统在阻尼环节作用下的动态特性,设系统的 3 个特征根分别为:

$$s_1 = -\sigma, s_2 = s_3 = -\sigma \pm j\omega_d \quad (12)$$

式中, ω_d 为阻尼振荡频率。由此得到系统的特征方程:

$$(s+\sigma)(s^2+2\sigma s+\sigma^2+\omega_d^2)=0 \quad (13)$$

式(13)中的第二个因子为典型的二阶阻尼环节,且可以表示为:

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{\sigma}{\omega_n} \\ \omega_n^2 &= \sigma^2 + \omega_d^2 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

系统的阻尼比 ξ 和超调量 σ 直接表征了系统的动态特性。根据系统的误差抑制需求确定系统的阻尼比 ξ 和超调量 σ , 由此确定阻尼环节参数 K_1 、 K_2 和 K_3 。

加入阻尼环节后,在加速度计误差、陀螺漂移以及姿态初始误差作用下,系统的姿态舒拉振荡误差逐渐衰减。为了加速系统误差抑制速度,应针对系统阻尼的过渡过程误差进行分析。在系统阻尼过程中,根据各误差的量化关系可知,其初始的姿态误差最大,成为影响过渡过程最主要的误差源。

根据初始误差作用下系统姿态误差的传递函数,可得系统的姿态误差传递形式为:

$$\varphi_x = \varphi_{x0}e^{-\sigma t} \left[\frac{1+\xi^2}{1-\xi^2} \cos(\sigma \sqrt{\frac{1-\xi^2}{\xi^2}}t) + \frac{1}{\sqrt{1-\xi^2}} \sin(\sigma \sqrt{\frac{1-\xi^2}{\xi^2}}t) - \frac{2\xi^2}{1-\xi^2} \right] \quad (15)$$

式(15)表示了在不同阻尼比和超调量指标下系统姿态误差的变化形式,可得到在不同阻尼比作用下,初始姿态误差在阻尼环节作用下的过渡过程曲线。基于不同阻尼比条件下的过渡过程曲线,根据误差抑制需求,可以确定系统的动态参数,从而完成阻尼环节参数设计。例如,若希望系统姿态误差在 10 min 内下降 99.995%。取系统阻尼比 ξ 为 0.7, 根据过渡过程曲线可得 $\sigma t = 525$ 。取 $t = 600$, 则 $\sigma = 0.0088$, 从而可得到阻尼环节的参数。因此,根据不同系统的动态需求,可以确定不同的阻尼环节参数 K_1 、 K_2 和 K_3 。

4 外速度阻尼算法仿真与试验

4.1 外阻尼算法数字仿真

为验证阻尼网络对于振荡性误差的抑制效果,本文进行了惯导系统的误差仿真。为简化分

析,仿真惯导系统东向水平回路的误差特性。如期待惯导系统在 10 min 误差有效衰减,根据上述阻尼网络参数设计算法,得 $K_1 = 0.0264, K_2 = 156.063, K_3 = 0.904$ 。仅考虑在东向陀螺存在的常值漂移作用下,仿真无阻尼回路、传统阻尼回路^[2]以及本文设计阻尼回路的姿态误差输出。设东向陀螺漂移为 $0.01^\circ/\text{h}$,仿真 4 h 内陀螺漂移对东向水平姿态角的影响。3 种不同参数阻尼下的姿态误差曲线如图 1 所示。

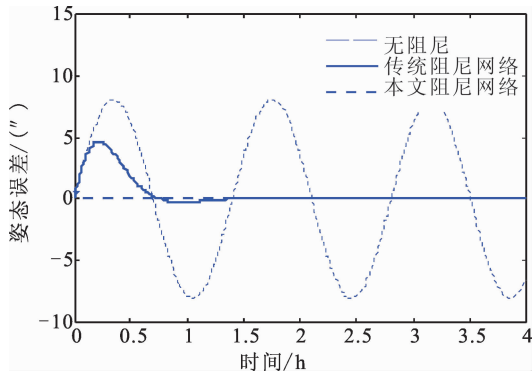


图 1 不同阻尼算法的姿态误差

Fig. 1 Attitude Errors of Different Damping Algorithms

由图 1 可知,采用本文设计快速阻尼网络,系统的振荡误差在 10 min 内快速衰减至理想范围,而传统阻尼网络需经过至少一个舒拉周期后,误差才逐步衰减,因此本文设计的阻尼网络较大地提高了系统的阻尼速度。但阻尼网络也进一步破坏了系统的舒拉调谐条件,因此在无外速度参考时系统阻尼效果受到载体加速度的影响。下文进行载体存在加速度条件下的内阻尼系统仿真,验证载体加速度的影响。

设惯导系统的 3 个陀螺的常值漂移为 $0.01^\circ/\text{h}$,随机游走为 $0.005^\circ/\text{h}$,刻度系数误差为 5×10^{-6} ,安装误差均为 $5''$ 。3 个加速度计的零偏为 $1 \times 10^{-4}g$,随机噪声为 $1 \times 10^{-5}g$,刻度系数误差为 5×10^{-6} ,安装误差均为 $5''$ 。在惯导系统误差曲线中,姿态误差曲线最能体现系统的舒拉周期,因此下文以姿态误差曲线为例,说明阻尼环节对周期误差的抑制作用。阻尼算法的阻尼网络参数同上,仿真载体在机动条件下的无阻尼、传统阻尼^[2]和本文阻尼算法的惯导系统误差。限于篇幅,仅给出其中 1 组仿真试验结果。图 2 为惯导系统不同算法下的横摇误差曲线。

从图 2 中可以看出,在没有外速度补偿时,载体在机动条件下其运动加速度影响了阻尼算法的误差抑制效果。传统阻尼算法对阻尼比和载体运动影响进行了折衷考虑,因此其误差与无阻尼算

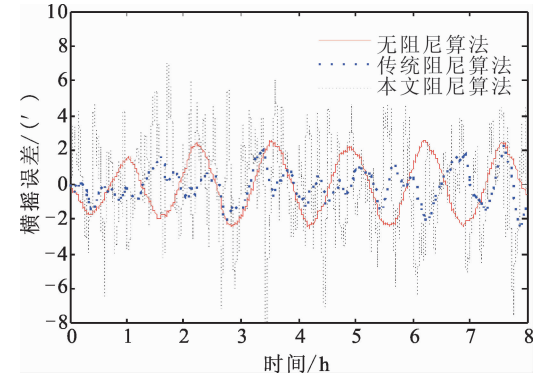


图 2 不同算法的横摇误差

Fig. 2 Roll Errors of Different Algorithms

法相当。而本文算法进一步破坏了系统水平回路的舒拉调谐条件,相对于无阻尼算法,其姿态误差反而增大。因此,进行本文快速阻尼算法时,需要借助外部速度信息作为参考。

以外速度作为参考进行载体在机动条件下的阻尼误差仿真。设外速度测量误差为 0.5 m/s ,噪声为 0.2 m/s ,分别进行无阻尼、传统阻尼算法和本文阻尼算法的误差仿真。不同算法的横摇误差如图 3 所示,本文算法的标准差相对于无阻尼和传统阻尼算法减小了 86% 和 48.9%。

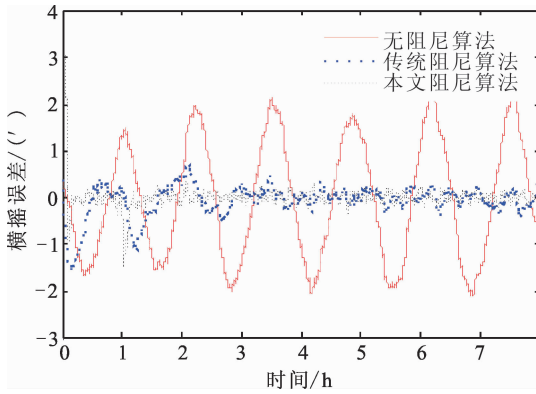


图 3 外速度参考条件下不同算法的横摇误差(仿真试验)

Fig. 3 Roll Errors of Different Algorithms with External Velocity Reference(Simulated Experiment)

图 3 的局部放大见图 4,由此可见,对于传统阻尼算法,本文的快速外阻尼算法在极短时间内抑制了系统的振荡误差,提高了系统误差的阻尼速度。

需要指出的是,在实际应用中可根据系统特点进行阻尼参数的变参数设计,以减小阻尼状态切换过程的超调误差。

4.2 静态和车载试验

1)实验室静态试验。本文利用实验室的光纤惯导系统进行静态条件下的快速阻尼算法试验。实验室中,调平光纤惯导系统基座,采集惯导系统

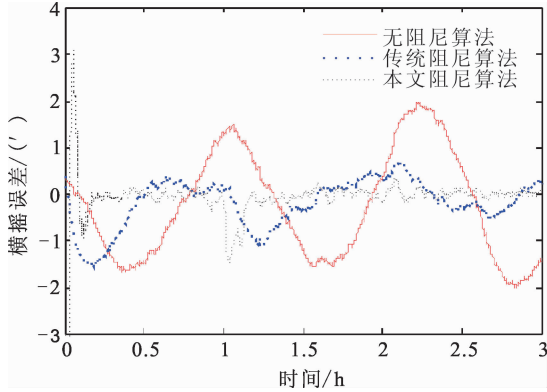


图4 横摇误差(图3)的局部放大

Fig. 4 Enlarged View of Roll Errors(Fig. 3)

原始数据,分别进行无阻尼、传统阻尼和本文阻尼算法的系统解算。实验室条件下采集了6组惯导系统原始数据,数据长度4 h。以1组数据为例,给出了不同算法条件下的系统横摇角误差,如图5所示,图6为前30 min的误差放大图。图5中无阻尼算法、传统阻尼算法和本文阻尼算法条件下横摇角的标准差分别为1.849 0′、0.425 1′和0.207 7′。本文算法的标准差相对于无阻尼和传统阻尼算法减小了88.7%和51.1%。由此可见,采用本文的快速阻尼算法,系统姿态的振荡误差在10 min之内得到有效阻尼。

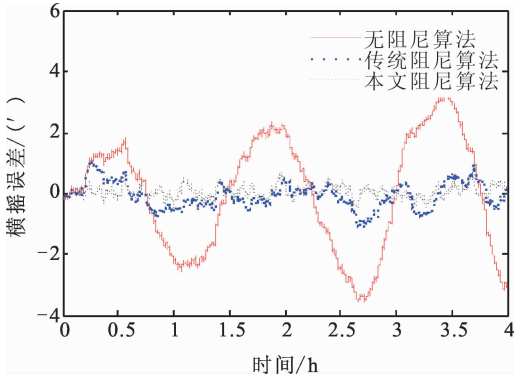


图5 外速度参考条件下不同算法的横摇误差(静态试验)

Fig. 5 Roll Errors of Different Algorithms with External Velocity Reference(Static Experiment)

2)GPS速度参考下车载试验。为进一步验证本文算法在实际系统中的有效性,进行了在GPS参考速度下的外阻尼算法试验,在车载基座上安装光纤惯导和GPS接收机,同步采集惯导原始数据和GPS位置、速度数据。光纤惯导中陀螺漂移为 $0.013^{\circ}/\text{h}$,随机游走为 $0.005^{\circ}/\sqrt{\text{h}}$ 。3个加速度计的零偏为 $5\times 10^{-4}g$,分别进行了持续2~3 h不等的6组跑车试验。

在阻尼算法设计中,为减小速度的振荡误差,利用阻尼参数设计方法实现变参数算法。为加速

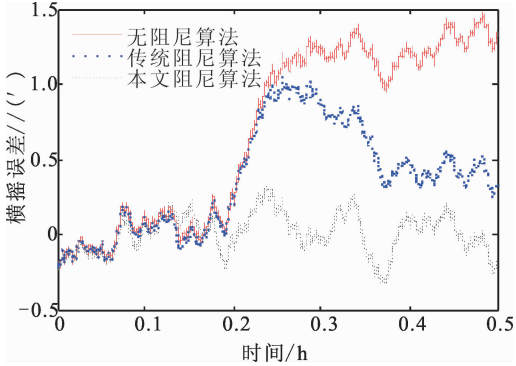


图6 横摇误差(图5)的局部放大

Fig. 6 Enlarged View of Roll Errors(Fig. 5)

误差衰减速度,初始时刻的参数设为 $K_1 = 0.026\ 4, K_2 = 156.063, K_3 = 0.904$ 。同时在1 min内参数线性变化为 $K_1 = 7.68\times 10^{-3}, K_2 = 6.68, K_3 = 7.68\times 10^{-3}$,以减小速度误差。由于车载条件下没有高精度的姿态基准,因此以GPS速度为参考,通过惯导输出的速度误差来验证阻尼算法的有效性。

利用采集后的速度信息作为舰艇惯导系统外速度源,进行外速度参考的快速外阻尼算法解算。6组跑车试验中不同阻尼算法下的东向速度误差和北向速度误差如表1和表2所示。图7为其中1组原始数据进行惯导系统无阻尼、传统外阻尼算法和本文快速外阻尼算法解算时系统的速度误差输出。

表1 车载试验中不同算法的东向速度误差统计

Tab.1 East Velocity Error Statistics of Different Algorithms in Vehicle Test

N次试验	无阻尼	传统阻尼	本文阻尼
1	3.088	1.441	0.105 0
2	2.845	1.542	0.094 5
3	2.954	1.125	0.114 0
4	2.357	1.557	0.087 5
5	3.001	1.014	0.124 0
6	2.987	1.685	0.138 0
均值	2.872	1.394	0.110 5

表2 车载试验中不同算法的北向速度误差统计

Tab.2 North Velocity Error Statistics of Different Algorithms in Vehicle Test

N次试验	无阻尼	传统阻尼	本文阻尼
1	1.630	1.788	0.097 4
2	1.578	1.654	0.114 0
3	1.661	1.258	0.084 1
4	1.324	1.145	0.102 0
5	1.457	1.452	0.114 0
6	1.654	1.641	0.127 0
均值	1.551	1.490	0.106 0

图7中无阻尼算法、传统阻尼算法和本文阻尼算法条件下东向速度误差和北向速度误差的标

准差分别为 3.088、1.441、0.105 m/s 和 1.630、1.788、0.097 4 m/s。由此可见,本文阻尼算法对惯导系统误差有抑制效果。

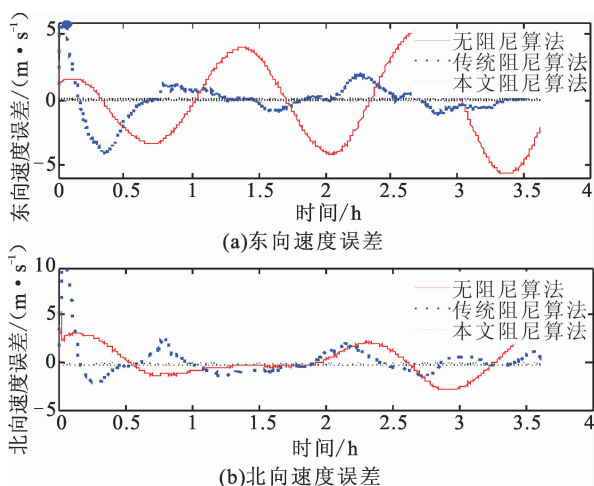


图 7 外速度参考条件下不同算法的速度误差
Fig. 7 Velocity Error of Different Algorithms with External Velocity Reference

由表 1、表 2 和图 7 可知,本文阻尼算法有效抑制了速度的舒拉振荡误差;同时,相对于传统阻尼算法,本文快速阻尼算法加快了系统误差衰减速度。

5 结 语

在惯导系统传统的内阻尼形式中,系统误差容易受到载体加速度影响,因此在阻尼网络设计中综合考虑载体加速度影响,使得系统阻尼算法动态特性差。在有外速度参考时,通过增加一条外速度为输入的前向通道,补偿载体加速度对阻尼系统误差的影响,同时改变传统内阻尼网络结构形式,提高阻尼网络的动态特性。本文提出在有外速度参考时,可以根据阻尼动态过程需求设计有效的阻尼参数,实现动态过程到稳态过程的变参数阻尼网络设计,在提高系统阻尼动态特性的同时,抑制由于改变系统舒拉调谐条件引起的误差。仿真与实际试验结果表明,快速外阻尼算法在阻尼动态过程的调节时间由传统外阻尼算法的 1 h 缩短为 10 min。

参 考 文 献

[1] Qin Fangjun, Li An, Xu Jiangning. Analysis of Errors of Rotating Modulation INS Effected by Angular Motion of Vehicle[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(7): 381-388(覃方君,李安,许江宁.载体角运动对旋转

调制惯导系统误差影响分析[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2012, 37(7): 381-388)

- [2] Chen Yongbing, Zhong Bin. *Inertial Navigation Principle*[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007(陈永冰,钟斌. 惯性导航原理[M]. 北京:国防工业出版社, 2007)
- [3] Liu Can, Long Xingwu, Wei Guo, et al. Inner Damping Network and Algorithm Research of Horizontal Loop in SINS[J]. *Infrared and Gyro Engineering*, 2014, 43(8): 2 637-2 643(刘灿,龙兴武,魏国,等.捷联惯导系统内水平阻尼网络及算法研究[J]. *激光与红外工程*, 2014, 43(8): 2 637-2 643)
- [4] Jiang Lu, Yu Yunzhi, Chen Yong. An Adaptive Damping Network Designed for Inertial Navigation System of Ships[J]. *Electronics Optics and Control*, 2014, 21(4): 52-55(姜璐,于运治,陈勇.舰船惯性导航系统自适应阻尼网络设计[J]. *电光与控制*, 2014, 21(4): 52-55)
- [5] Zha Feng, Xu Jiangning, Qin Fangjun, et al. Damp Network Design for Horizontal Loop in Strapdown Inertial Navigation System[J]. *Acta Armamentarii*, 2011, 2(2): 305-309(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, 2(2): 305-309)
- [6] 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(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)
- [7] Qin Fangjun, Li An, Xu Jiangning, et al. Horizontal Inner Damping Method with Continuously Adjustable Parameter for Inertial Navigation System [J]. *Journal of Chinese Inertial Technology*, 2011, 19(3): 290-292(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]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(3): 290-292)
- [8] Du Yaling, Liu Jianye, Liu Ruihua. Fuzzy Damped Algorithm in Strapdown Attitude Heading Reference System[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2005, 37(3): 274-276(杜亚玲,刘建业,刘瑞华.捷联惯性航姿系统中的模糊内阻尼算法研究[J]. *南京航空航天大学学报*, 2005, 37(3): 274-276)
- [9] Du Yaling, Liu Jianye, Jiang Yong. A Complete Damped Algorithm with Fuzzy Controller Based on Strapdown AHRS [J]. *Journal of Applied Science*, 2006, 24(3): 283-287(杜亚玲,刘建业,姜涌.一种面向捷联航姿系统的模糊全阻尼算法[J]. *应用科学学报*, 2006, 24(3): 283-287)

- [10] Li Kui, Zhang Jingjuan, Liu Fang. A Fuzzy Control Internal Damping Algorithm in Along-Endurance Inertial Navigation System[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2012, 33(4):485-488 (李魁, 张京娟, 刘芳. 长航时惯导系统的模糊控制内阻尼算法[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2012, 33(4):485-488)
- [11] Du Yaling, Liu Jianye, Liu Ruihua, et al. The Fuzzy Kalman Filter of Damp Attitude Algorithm[J]. *Journal of Astronautics*, 2007, 28(2): 305-309 (杜亚玲, 刘建业, 刘瑞华, 等. 基于模糊卡尔曼滤波的内阻尼姿态算法研究[J]. 宇航学报, 2007, 28(2): 305-309)
- [12] Liu Jianye, Du Yaling, Zhu Yanhua, et al. Damp Kalman Filter with Fuzzy Adaptive Algorithm in AHRS[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics and Astronautics*, 2007, 39(2):137-142 (刘建业, 杜亚玲, 祝燕华, 等. 航姿系统内阻尼的模糊自适应滤波算法[J]. 南京航空航天大学学报, 2007, 39(2):137-142)
- [13] Li Kui, Wang Wei, Liu Fang, et al. New Comprehensive Damping and Correction Algorithm for Long-Endurance Inertial Navigation System [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2012, 33(3): 543-548 (李魁, 王玮, 刘芳, 等. 长航时惯导系统全阻尼综合校正算法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(3):543-548)
- [14] Lu Yan. Study of CNS/INS Integrated Navigation System Based on Steep Damping Technology [J]. *Optics and Optoelectronic Technology*, 2012, 10(4): 62-67 (卢雁. 基于速度阻尼的天文/惯性组合导航技术研究[J]. 光学与光电技术, 2012, 10(4):62-67)
- [15] Liu Weiren, Zhuang Liangjie. Adaptive Hybrid Intelligent Control of an INS Level Damp Network [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2005, 37(11):1 586-1 588 (刘为任, 庄良杰. 惯性导航系统水平阻尼网络的自适应式混合智能控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2005, 37(11): 1 586-1 588)
- [16] Liu Weiren, Zhuang Liangjie. Adaptive Control of INS Level Damp Network [J]. *Journal of Tianjin University*, 2005, 38(2):146-149 (刘为任, 庄良杰. 惯性导航系统水平阻尼网络的自适应控制[J]. 天津大学学报, 2005, 38(2): 146-149)

A Fast Damping Algorithm for INS with External Velocity Reference

ZHA Feng¹ QIN Fangjun¹ LI Feng¹ YE Bin²

¹ College of Electricity Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China

² Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Inertia, AVIC Xi'an Flight Automatic Control Research Institute, Xi'an 100044, China

Abstract: With external velocity reference, a fast damping method is proposed for fast suppression of the oscillation error of inertial navigation system (INS) by changing the structure of traditional damping network. In traditional damping network structure, the internal damping method is easy to be influenced by the carrier acceleration without external velocity reference, while the external damping method has poor dynamic characteristic. So the imposed method increases a forward channel from external velocity to the damping network to compensate the damping error caused by the carrier acceleration. According to the dynamic process of system damping, the fast damping network parameters are designed and the adjustable parameters are input to the damping network considering the dynamic characteristic and error suppression in the damping process. The simulation and test results show that the settling time of the conventional damping algorithm is about 1 h, which is shortened to 10 min by using the fast damping algorithm with the external velocity reference.

Key words: inertial navigation system; damping; external velocity; oscillation error

First author: ZHA Feng, PhD, lecturer, specializes in strapdown inertial navigation and integrated navigation. E-mail: zha_feng@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China, Nos. 61503404, 41574069; Hubei Provincial Natural Science Foundation, No. 2015CFB613; Aeronautical Science Foundation of China, No. 20150816002.