文章编号　1004-924X(2016)01-0169-09

陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制

丛　爽[1*]，孙光立[1]，邓　科[1]，尚伟伟[1]，沈宏海[2]
(1. 中国科学技术大学 自动化系，安徽 合肥 230027；
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所，吉林 长春 130033)

摘要：分析了影响陀螺稳定平台隔离控制精度的主要因素，包括被控系统模型中的未建模部分、状态的随机扰动以及输出信号的测量噪声等。研究了综合解决各方面影响因素的控制方案以进一步提高陀螺稳定平台隔离精度。针对上述影响因素，设计一个两步控制策略。第一步，利用自抗扰对系统中未建模部分进行观测及其前向补偿，将自抗扰控制中的反馈控制设计为 PID 控制，以实现抗平台扰动的调节控制；第二步，利用 Kalman 滤波器对系统中的状态扰动及测量噪声进行滤波消除。详细描述了提出的控制策略并对其性能进行了系统仿真实验及参数优化。结果表明，该方案在幅值为 3°、频率为 1/6 Hz 的载体扰动下能达到 4.61%的隔离度，与非线性摩擦力建模辨识及其前向补偿策略控制实际陀螺稳定平台达到的隔离度的最好值 9.39%相比，文中提出的控制隔离性能提高了 50.9%，具有更高的实用价值。

关　键　词：陀螺稳定平台；隔离控制；自抗扰；Kalman 滤波器；PID 控制
中图分类号：TP273.2；V44　　**文献标识码**：A　　**doi**：10.3788/OPE.20162401.0169

Active disturbance rejection and filter control of gyro-stabilized platform

CONG Shuang[1*], SUN Guang-li[1], DENG Ke[1], SHANG Wei-wei[1], SHEN Hong-hai[2]

(1. *Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei* 230027, *China*;
2. *Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: scong@ustc.edu.cn*

Abstract: The main factors effect on isolation control accuracy of a gyro-stabilized platform were analyzed, including the un-modeled unit in a controlled system, the random disturbance of state and the measurement noise of an output signal. The control schemes to overcome these effect factors and improve the isolation accuracy of a gyro-stabilized platform system were explored. In order to improve the control accuracy, an integrated solution for eliminating all effect factors was researched and a two-step control strategy was proposed. The first step is to employ the Active Disturbance Rejection Control (ADRC) to observe and compensate the un-modeled unit and to design the feedback control in ADRC as PID controller to control the compensated system. The second step is to use a Kalman filter to eliminate the random disturbance and measurement noise. The control scheme was described in details and its performance was simulated. The results indicate that the isolation degree reaches

收稿日期：2015-04-17；**修订日期**：2015-06-16.
基金项目：中国科技大学-长春光学精密机械与物理研究所超精密控制与系统联合实验室资助项目(No. ES210010020)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

4.61% by using this control strategy when the disturbance of the platform is 3° and 1/6 Hz, which means the isolation performance has improved by 50.9% as comparing with the performance 9.39% from the control strategy which consists of the parameter identification of nonlinear friction and its forward compensation. The control strategy evidently has a higher practical application value.

Key words: gyro-stabilized platform; isolation control; Active Disturbance Rejection Control(ADRC); Kalman filter; PID control

1 引 言

在机载光电设备中,常常需要将光电传感器的视轴精确指向目标,以完成对目标的捕获、跟踪及测量。陀螺稳定平台是保证视轴稳定的主要装置,激光测距仪等光电设备一般固定安装在陀螺稳定平台上,因此,要求平台隔离载体的振动并克服载体姿态变化对光电跟踪设备的影响,同时要在控制指令的驱动下,完成对目标的捕获和跟踪。影响陀螺稳定平台控制精度的因素有很多,主要有被控稳定平台系统模型中的未建模部分、状态的随机扰动以及输出信号的测量噪声[1]。近年来,高精度稳定平台的控制发展得很快,对平台稳定回路的性能要求也越来越高,学者们提出了大量改进的先进控制策略来提高平台的控制性能。文献[2]和文献[3]提出了基于遗传算法参数优化的模糊控制算法和模糊-PID控制算法,文献[4]利用BP神经网络的自学习、自组织能力,实现了参数的在线自整定和优化的PID控制器,文献[5]提出了基于RBF神经网络辨识的模型参考自适应控制算法,文献[6]基于状态补偿控制理论,设计了稳定平台的状态补偿控制系统,文献[7]将自适应逆控制应用于稳定平台控制系统中,提出了稳定平台的自适应逆控制方案,文献[8]将灰色预测控制与变结构控制相结合,设计了一种灰色滑模变结构控制器。这些方法对提高陀螺稳定平台的控制精度均有一定效果,但由于控制结构复杂,且控制实时性不强,限制了它们在实际系统中的应用。

上世纪90年代末,韩京清教授提出一种不依赖系统被控对象模型的非线性控制策略——自抗扰控制(Active Disturbance Rejection Control, ADRC)[9]。它把系统中含有的不确定因素归结为系统的总扰动,从而将系统模型扩展为扩张状态,再利用设计的扩张观测器对其进行动态估计,使用估计值对系统进行前馈补偿,实现被控系统动态线性化,并实施反馈的实时控制策略。ADRC具有算法简单,实时性强的特点,近年来ADRC在陀螺稳定平台上的应用和研究得到了许多研究者的重视,取得了一定的成果[10-12],但应用ADRC时,一般不需消除实际系统中的测量噪声,滤波器的设计中也不考虑状态扰动的影响,因而导致实验效果不好。本团队在所进行的两轴四框架结构下的机载光电陀螺稳定平台的速度环稳定系统的隔离控制的研究中,对低速工作情况下速度环存在的非线性摩擦力建立了Stribeck摩擦模型并通过前馈补偿提高了实际系统的控制精度[13];利用强跟踪鲁棒Kalman滤波器对系统输出噪声进行滤波处理[14]。本文在此基础上,设计自抗扰控制,对系统的未建模部分进行实时观测,将观测量引入到控制量中进行补偿,并使用自行设计的Kalman滤波器对状态扰动及输出噪声进行滤波,形成了完整的陀螺稳定平台扰动的自抗扰滤波控制。文中给出了详细的设计过程,并进行了性能对比实验,对实验结果进行了性能分析。

本文安排如下:第2节为陀螺稳定平台速度环系统描述及其控制任务;第3节为陀螺稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制的设计;第4节在SIMULINK环境下建立陀螺稳定平台的仿真实验控制系统,并对性能与实验结果进行分析;第5节为结论。

2 陀螺稳定平台速度环系统描述及其控制任务

2.1 系统描述

实际系统是一个实际的两轴四框架陀螺稳定平台,框架系统包括基座、框架结构和轴承,框架结构由里向外依次是内方位环(负载平台)、内俯

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

仰环、外俯仰环和外方位环。以内方位环为例进行研究，它由一个内回路速度环以及外回路位置环组成，其结构如图 1 所示，其中，速度陀螺、功率放大器、电机、带有光电设备的负载以及速度控制器构成速度环；轴角编码器、跟踪器、位置控制器以及速度环构成位置环。而对平台控制精度起至关重要作用的是由陀螺仪等部件构成的速度环[13]。所以本文所研究的控制系统是陀螺稳定平台的速度环。

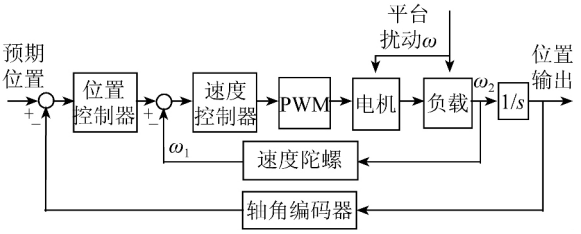


图 1　单轴控制系统的基本框图

Fig. 1　Diagram of single-axis control system

平台速度环的工作原理为：当搭载稳定平台的载体受到外来平台扰动 ω 时，速度陀螺感应扰动为 ω_1，并通过回路产生激励信号使伺服电机驱动平台框架产生用以抵消扰动 ω 的角速度 ω_2，当 $\omega_2=-\omega$ 时 $\omega_1=0$，从而消除了载体扰动，使平台相对惯性空间稳定。因此，速度环中被控对象是由功率放大器、电机、带有光电设备的负载组成的。保证速度稳定环控制精度的关键在于陀螺稳定平台速度环的扰动隔离性能，通常用隔离度 J 来评价，其定义为：

$$J=\frac{|\omega_2-\omega|_{\max}}{|\omega|_{\max}}\times 100\%. \tag{1}$$

在本研究中，通过简化机电关系，速度环被控对象的数学模型可分为线性与非线性两部分[13]，其输入和输出之间的关系式为：

$$\omega_2(k+1)=a\cdot\omega_2(k)+b\cdot Ke\cdot u(k)-b\cdot T_{\mathrm{f}}(k), \tag{2}$$

其中：a、b、Ke 为伺服放大器和电机等效模型的系数，为简化表示令 $b_0=b\cdot Ke$；u 为控制器输出；ω_2 为输出角速度；T_{f} 为被控对象未建模部分。

为了消除非线性摩擦力的影响，本项目组曾经建立了非线性摩擦力 T_{f} 的 Stribeck 摩擦模型[14]：

$$T_{\mathrm{f}}(k)=\mathrm{sgn}(\omega_2(k))\times[T_{\mathrm{c}}+(T_{\mathrm{s}}-T_{\mathrm{c}})\times \exp(-\alpha\cdot|\omega_2(k)|)], \tag{3}$$

其中：T_{s} 为静摩擦力矩，T_{c} 为库仑摩擦力矩，α 为指数时间常数，sgn()为符号函数。

2.2　控制问题及其控制策略

目前实际应用中稳定平台所用的控制器为 PID 控制器，由于实际系统存在着未建模的非线性部分、状态的随机扰动以及测量噪声等干扰因素，仅仅采用 PID 控制器很难达到期望的高性能指标。本文的目的是希望通过解决上述问题来进一步提高隔离精度，其控制思想是：采用自抗扰控制理论设计扩张状态观测器，对未建模的非线性部分进行观测和补偿；同时利用滤波器消除系统中的随机扰动和测量噪声。

自抗扰控制理论主要由扩张状态观测器(Extended State Observer，ESO)与反馈结构(State Effect Feedback，SEF)组成，其中 ESO 用来对系统不确定因素进行实时观测估计，并利用扩张状态对被控系统进行前向补偿，将非线性系统线性化；SEF 是自抗扰控制的负反馈控制部分，形成闭环自动控制[15]。实际系统中总是存在着非平稳的过程扰动以及有色测量噪声，对它们进行滤波和消除可以进一步提高系统的性能。虽然测量噪声可以直接测量，但过程扰动却是未知的。这给滤波器的设计与实际应用带来了挑战。为此本文根据 Sage-Husa 的自适应 Kalman 滤波思想，提出了自适应强跟踪 Kalman 滤波器的设计方案：在进行状态估计的同时，利用实际获得的观测值对系统状态的未知扰动进行在线估计，并同时引入强跟踪滤波算法对自适应 Kalman 滤波算法中的状态预测方差进行实时修正，来提高在有不确定性情况下状态估计的精度[14]。

本文结合速度环控制系统设计的陀螺稳定平台自抗扰及其滤波控制系统结构图如图 2 所示，其中，虚框 1 为 ADRC 部分；虚框 2 为自适应强跟踪 Kalman 滤波器；ω 是等效为跟踪问题后的输入激励信号，其与原平台扰动的值大小相同、正负相反；ω_2 为被控对象输出信号；$\omega_1=\omega-\omega_2$ 为跟踪误差；$e=\omega-y_0$ 为滤波输出与输入的误差；u_0 为反馈结构的输出控制信号；u 为被控对象的输入信号；$\hat{x}_1$ 为 ESO 对被控输出的观测，$\hat{x}_2$ 为对扩张状态的观测，b_0 为补偿因子即扩张状态对被控对象的补偿增益；v 为速度陀螺等传感器的测量噪声；y 为陀螺感应的输出信号；y_0 为滤波后的输出信号。下一节将给出整个控制策略的具体设

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

计过程。

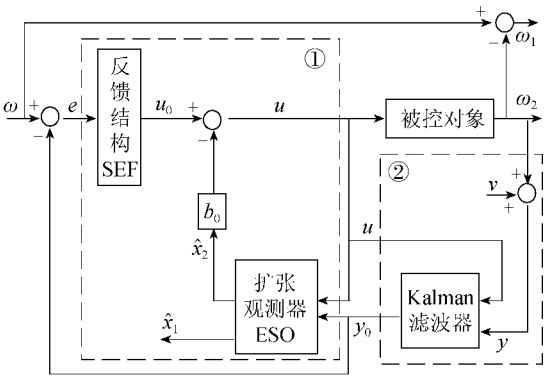


图2 陀螺稳定平台的自抗扰及其滤波控制结构图

Fig. 2 Diagrams of active disturbance rejection and filter control for gyro-stabilized platform

3 陀螺稳定平台的自抗扰控制及其滤波器的设计

所提出的陀螺稳定平台的自抗扰控制系统由自抗扰控制和滤波器两部分构成，两部分的设计参数没有耦合的情况，因此可以独立设计，下面将分别对两部分进行设计。

3.1 自抗扰控制设计

本节在不考虑随机扰动及测量噪声的情况下进行自抗扰控制的设计[16-17]。

式(2)中，令 $x_1=\omega_2$，则式(2)变为：

$$x_1(k+1)=a\cdot x_1(k)+b_0\cdot u(k)-b\cdot T_f(k),$$

其中：$x_1(k+1)$、$x_1(k)$分别表示在 $k+1$ 与 k 时刻系统的状态，即在该时段被控对象的输出 ω_2。令非线性摩擦力与系统输出状态部分为扩张状态 $x_2(k)$：

$$x_2(k)=(a-1)\cdot x_1(k)-b\cdot T_f(k). \tag{4}$$

式(2)转化为：

$$\begin{cases}x_1(k+1)=x_1(k)+x_2(k)+b_0\cdot u(k)\\ x_2(k+1)=f(x_1,k+1)\end{cases}. \tag{5}$$

由被扩张的系统(5)可知：观测出 $x_2(k)$就可实现系统的线性化。建立扩张状态观测器 ESO[9,16]：

$$\begin{cases}\hat{x}_1(k+1)=\hat{x}_1(k)+\hat{x}_2(k)-\beta_1\cdot e_1+b_0\cdot u(k)\\ \hat{x}_2(k+1)=\hat{x}_2(k)-\beta_2 e_1\\ e_1=\hat{x}_1(k)-y_0(k)\end{cases}, \tag{6}$$

其中：$\hat{x}_1(k)$为对 $x_1(k)$的观测，$\hat{x}_2(k)$为对扩张状态 $x_2(k)$的观测，e_1 为观测输出与系统滤波后输出的差值；β_1、β_2 是线性扩张状态观测器的参数。

需要确定式(6)中线性扩张状态观测器的参数 β_1、β_2，其对应的连续扩张观测器形式为 $\dot{\hat{x}}_1=\hat{x}_2-\beta_1\cdot e_1+b\cdot u$，$\dot{\hat{x}}_2=-\beta_2 e_1$，$e_1=\hat{x}_1-y_0$，特征方程为：$\lambda(s)=s^2+\beta_1 s+\beta_2$，为保证扩张状态观测器能稳定估计扩张状态，必须选择使特征方程稳定的参数，能确保稳定的特征方程的形式为 $(s+\omega_f)^2=0$，把参数配置成 $\beta_1=2\omega_f$，$\beta_2=\omega_f^2$ 的形式[18]，本文 ESO 中选择 $\beta_1=2$，$\beta_2=1$。

被控对象为开环系统，其抗干扰能力较差，需设计误差反馈结构 SEF。令误差 $e(k)=\omega(k)-y_0(k)$，PI 反馈控制律为：

$$\begin{cases}\dfrac{u_0(k)}{e(k)}=K_p+K_i\cdot T\cdot\dfrac{1}{z-1}\\ e(k)=\omega(k)-y_0(k)=\omega(k)-y(k)\end{cases}, \tag{7}$$

其中：u_0 为 PI 控制器输出的控制量，K_p，K_i 是 PI 控制器的比例与积分项系数。

为保证 PI 反馈控制的跟踪精度，以及被控对象通过扩张状态前馈补偿后的动态线性化，完整的控制信号 $u(k)$应当为反馈控制与前向补偿之和：

$$u(k)=u_0(k)-\frac{\hat{x}_2(k)}{b_0}, \tag{8}$$

其中：b_0 为补偿因子，即为式(2)中 $b_0=b*Ke$。

将式(8)代入(5)，由于 $\hat{x}_2(k)\approx x_2(k)$，补偿后的系统为 $x_1(k+1)=x_1(k)+b_0\cdot u_0(k)$，这样就消除了自抗扰控制中的不确定因素，达到了使系统动态线性化的目的，并通过 PI 控制实现对系统的鲁棒控制。

3.2 自适应强跟踪 Kalman 滤波器设计

自适应强跟踪 Kalman 滤波器方框图如图3所示[14]，其中：$\omega_2^*(k+1)$、$\omega_2^*(k)$为 $k+1$ 与 k 时刻被控输出的状态预测值；$K_f(k)$为 Kalman 滤波增益；$y(k)$为 k 时刻输出信号，$\hat{\omega}(k)$为系统状态 $\omega(k)$的估计值；$\hat{q}(k)$为过程扰动的均值估计；$y^*(k)$为构造系统的输出；r 为测量噪声的均值，R 为测量噪声的方差；$\tilde{y}(k)=y(k)-\omega^*(k)-r$ 为原被控对象系统与所构造预测系统之间的输出误差。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

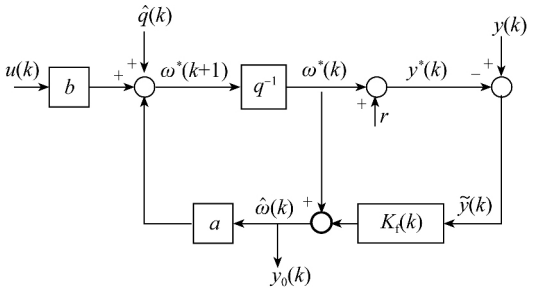


图 3　自适应强跟踪 Kalman 滤波器框图

Fig. 3　Diagram of adaptive strong tracking Kalman filter

自适应强跟踪 Kalman 滤波器的设计思路是：通过对未知的过程随机扰动 $\varepsilon(k)$ 的均值 $q(k)$ 和方差 $Q(k)$ 进行自适应在线迭代估计，得到 $\hat{q}(k)$、$\hat{Q}(k)$，并结合状态预测方差 $P^*(k)$ 设计出 Kalman 滤波增益为：

$$K_f(k)=P^*(k)\cdot[P^*(k)+R]^{-1}. \tag{9}$$

对被控输出状态的预测值 $\omega_2^*(k)$ 进行修正，获得系统真实状态的估计值 $\hat{\omega}(k)$，以实现对输出信号的滤波。本文所用的滤波算法是在自适应 Kalman 滤波算法的基础上，在计算状态预测方差时引入一个渐消因子 $\lambda(k)$，然后结合估计方差 $\hat{P}(k)$ 实时调整状态的预测方差，有 $P^*(k)=\lambda(k)\cdot a^2\cdot\hat{P}(k-1)+\hat{Q}(k-1)$，使得输出误差序列的自相关函数尽可能取极小值，从而提高滤波器对状态的估计精度。详细的设计过程及其性能对比实验可参考文献[14]。

陀螺稳定平台扰动的自抗扰控制和滤波器控制是分别设计的。本文第 4 节中将通过实验对自抗扰控制与 Kalman 滤波器结合前后的系统性能进行对比分析。

4　性能对比实验及其结果分析

本文在 SIMULINK 环境下，进行两组实验：(1)未考虑测量环境噪声下的自抗扰控制的隔离性能实验；(2)考虑测量环境噪声后的稳定平台扰动的自抗扰及其滤波控制系统的隔离性能实验。

系统仿真实验中，被控对象为式(2)中基于非线性摩擦力矩的平台速度模型。式(2)中速度环被控对象正转时的模型参数[13]为 $a_1=0.999\ 542$，$b_1=0.932\ 6$，$Ke_1=0.019\ 40$，$Tc_1=43.75$，$Ts_1=24.94$，$Ka_1=0.005\ 450$；负转时模型参数为 $a_2=0.999\ 807$，$b_2=0.254\ 5$，$Ke_2=0.065\ 40$，$Tc_2=82.76$，$Ts_2=29.89$，$Ka_2=0.004\ 270$。从中可看到，正负不同向转动时，陀螺平台的模型不同，而自抗扰控制中的参数是依据陀螺稳定平台模型建立的。为保证实际应用时控制的准确性，可以对控制模型依照正负参数分别建模，正负控制的形式上无差别，仿真中通过判断被控对象输入控制信号 u 的正负来确定模型形式，$u\geqslant 0$ 时使用正向参数，$u<0$ 时使用负向参数，在图 2 中 ESO 与 b_0 两个部分需要应用上述原则进行判断。

用来进行隔离度实验的输入扰动是幅值为 3°，频率为 1/6 Hz 的载体扰动，相应的输入激励信号为 $\omega(t)=818.12\cdot\cos(2\cdot\pi\cdot t/6)$（数字量）。实验的采样周期为 1 ms。

4.1　未考虑测量噪声的速度环自抗扰控制仿真实验

不考虑测量噪声的速度环自抗扰控制的 SIMULINK 仿真模型如图 4 所示，其中，ω 为输入激励信号；system 为被控对象即式(2)；ESO 为式(5)所示的扩张状态观测器；PI 为式(7)表示的反馈结构的控制器，确定的比例与积分项系数分别为 $K_p=35$，$K_i=100$；disturb 为式(4)扩张状态在仿真中表示的实际值；由于无测量噪声，$y_0=y=\omega_2$，因此本文直接用被控对象的输出 y 作为 ESO 的输入中的滤波输出。

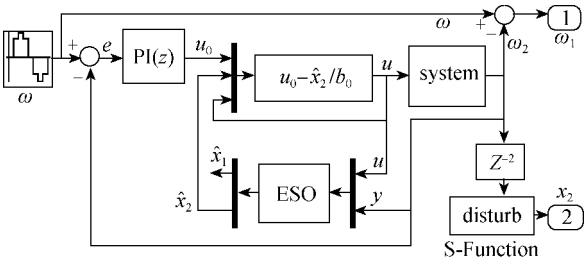
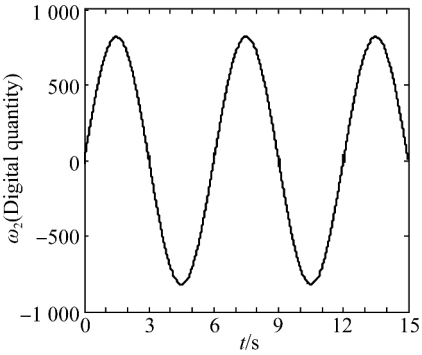


图 4　未考虑测量噪声的速度环自抗扰控制仿真结构图

Fig. 4　Structure diagram of ADRC of velocity loop without considering measurement noise

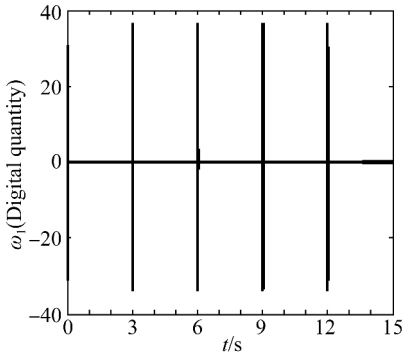
未考虑测量噪声的速度环自抗扰控制系统的实验结果如图 5(a)～(f)所示，它们分别是系统输出 ω_2 的变化曲线、跟踪信号差值 ω_1 的变化曲线、扩张状态观测 $\hat{x}_2$ 的变化曲线、$\hat{x}_2$ 与对应计算值误差 e_1 的变化曲线、非线性摩擦力 T_f 与观测值 $\hat{T}_f$ 间的误差曲线以及非线性摩擦力 T_f 的变化曲线。由图 5(a)结合图 5(b)可以看出：系统跟踪信号在过零点附近出现的最大正负误差值分别为 31.9 和 −33.9，在非过零区域的最大正负误差值只有 0.06 和 −0.055；由式(1)可得平台隔离度为 33.9/818.12=4.14%。

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



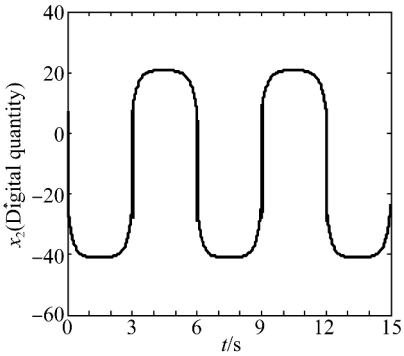
(a)系统输出 ω_2 变化曲线

(a) Variation trend of system output ω_2



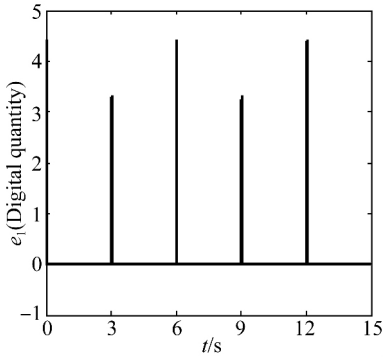
(b)ω_1 变化曲线

(b) Variation trend of ω_1



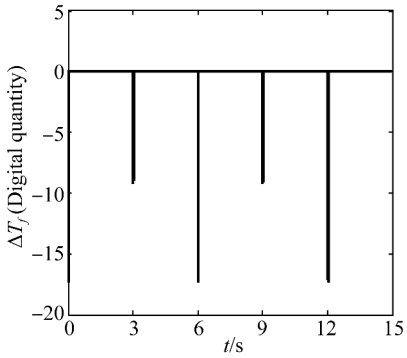
(c)扩张状态观测 $\hat{x}_2$ 变化曲线

(c) Variation trend of extended state observation $\hat{x}_2$



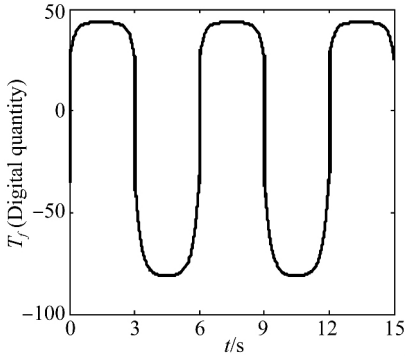
(d)$\hat{x}_2$ 与(4)中 x_2 之间误差的变化曲线

(d) Variation trend of error between $\hat{x}_2$ and x_2 in (4)



(e)非线性摩擦力 T_f 与观测值 $\hat{T}_f$ 之间的误差 ΔT_f 曲线

(e) Variation trend of observation error ΔT_f between nonlinear friction T_f and its observation $\hat{T}_f$



(f)非线性摩擦力 T_f 变化曲线

(f) Variation trend of nonlinear friction T_f

图5 未考虑测量噪声的速度环自抗扰控制仿真结果

Fig. 5 Results of velocity loop ADRC without considering measurement noise

图5(c)为扩张状态观测值 $\hat{x}_2$ 的变化情况，结合图5(a)可看到，扩张状态的取值与系统输出正负相反，结合被控对象的工作情况可知，被视为扩张状态的被控对象的扩张状态部分在陀螺正向工作时起反向阻碍作用，这与非线性摩擦力原理相符。由图5(d)可以看出：扩张状态的最大观测误差值为4.5，结合扩张状态的表达式(4)可知，扩张状态观测器的观测误差满足：$\Delta x_2(k)=(a-1)\cdot\Delta x_1(k)-b\cdot\Delta T_f(k)$。由于 $a\approx1$，故 $\hat{x}_2$ 的大小仅与 $-b\cdot T_f$ 的大小有关。结合图5(e)可以知道，T_f 的观测误差始终为负值，因此扩张状态的观测误差始终为正。图5(f)的变化曲线显示了可以通过扩张观测器观测出非线性摩擦力在整个陀螺工作阶段的变化过程。

4.2 带测量噪声滤波的控制系统仿真实验

考虑系统输出测量噪声 v 情况下的陀螺稳定平台自抗扰及其滤波控制系统结构图如图6所示。与图4中不同的是多出了一个自适应强跟踪

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Kalman 滤波器，以及一个近似平稳的陀螺测量噪声序列 v。v 是通过实验获取的均值为零，最大幅值为 11.921 1 数字量。带测量噪声滤波的自抗扰控制系统的实验结果如图 7(a)～(d)所示，它们分别为测量噪声 v 的变化曲线、滤波器去噪后剩余噪声的变化曲线、跟踪信号差值 ω_1 的变化曲线、$\hat{x}_2$ 与其计算值误差 e_1 的变化曲线。

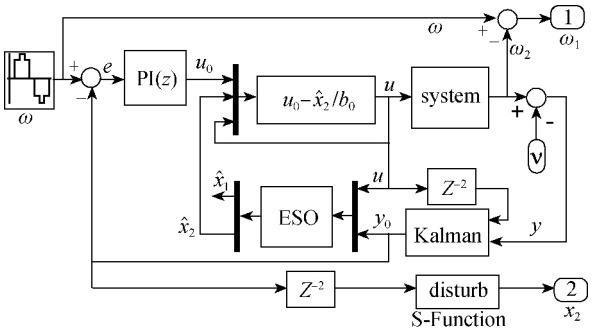
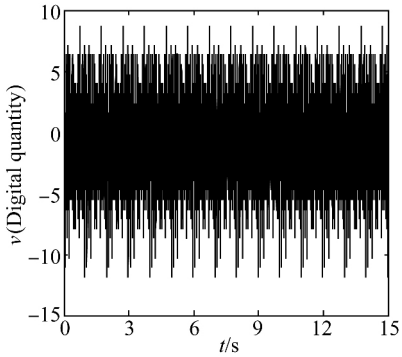


图 6　陀螺稳定平台自抗扰及其滤波控制系统结构图

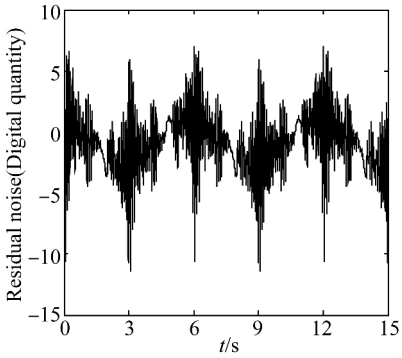
Fig. 6　Structure diagram of active disturbance rejection and filter control of gyro-stabilized platform

通过对比图 7(a)与图 7(b)可以看出：在自适应强跟踪 Kalman 滤波器的作用下，滤波后的残留噪声的最大正负值分别为 6.0 与－11.5。观察图 7(c)可知，系统跟踪误差的最大正负值分别为－37.7 与 37.0，对应的隔离度为 37.7/818.12＝4.61%。这表明带噪声滤波后的控制系统同样能够实现速度环对激励信号的跟踪。理论上分析可以得出：选取有效的滤波器可以消除四分之三的噪声对系统带来的影响。结合图 7(d)与未考虑噪声情况下的图 5(d)的结果可以看出：本文设计的滤波器可以很好地抑制和消除环境噪声，使得只剩滤波后残留的四分之一的噪声对扩张状态的观测误差值所带来的影响。



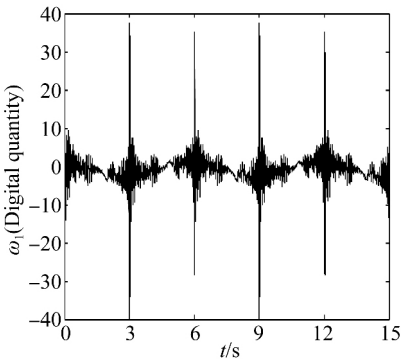
(a)测量噪声 v 变化曲线

(a)Curves of measurement noise v



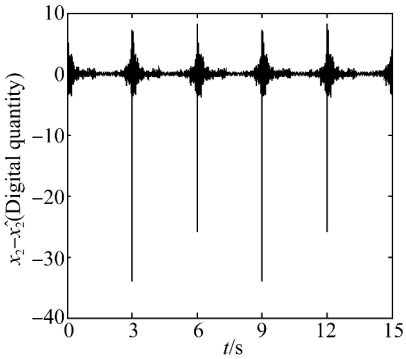
(b)滤波后剩余噪声变化曲线

(b)Curves of residual noise after filtering



(c)ω_1 的变化曲线

(c)Variation trend of ω_1



(d)$\hat{x}_2$ 与(4)中 x_2 之间误差的变化曲线

(d)Variation trend of error between $\hat{x}_2$ and x_2 in formula (4)

图 7　带测量噪声滤波的控制系统仿真结果

Fig. 7　Results of control strategy in ADRC by considering measurement noise

5　结　论

本文针对系统未建模部分的不确定性、系统的随机扰动以及信号输出的测量噪声对陀螺稳定平台控制误差的影响，利用线性自抗扰控制理论，通过对平台正负向工作情况分别建模，将系统的未建模部分扩展为扩张状态，利用扩张状态观测器对其进行观测补偿，并将专门设计出的自适应

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

强跟踪 Kalman 滤波器对输出信号进行噪声滤波，建立了陀螺稳定平台的自抗扰及其滤波控制系统。

本文对该控制策略设计进行了详细的描述，并对其性能进行了系统仿真实验及参数优化。实验结果表明，该方案在幅值为 3°，频率为1/6 Hz 的载体扰动下，能达到 4.61%的隔离度，而利用非线性摩擦力辨识模型进行前向补偿控制在实际控制系统达到的隔离度的最好值为 9.39%[13]，与之相比，本文所提方法的隔离性能提高了 50.9%，而且这是在考虑测量噪声情况下的结果，具有更高的实用价值。

参考文献：

[1] 丛爽，邓科，尚伟伟，等. 陀螺稳定平台的建模分析[J]. 科技导报，2011，29(9)：42-47.
CONG SH，DENG K，SHANG W W，*et al*.. Modeling analysis on the gyro stabilized platform [J]. *Science and Technology Review*，2011，29(9)：42-47.(in Chinese)

[2] 卢广山，姜长生，张宏. 机载光电跟踪系统模糊控制的优化设计与仿真[J]. 航空学报，2002，23(1)：85-87.
LU G SH，JIANG CH SH，ZHANG H. Optimization design and simulation of fuzzy controller in airborne electro-optical pointing and tracking systems [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*，2002，23(1)：85-87.(in Chinese)

[3] 李向旭，张曾科，姜敏. 两轴稳定平台的模糊——PID 复合控制器设计与仿真[J]. 电光与控制，2010，17(1)：69-72.
LI X X，ZHANG Z K，JIANG M. Design and simulation of a fuzzy-PID composite controller for dual DOF stabilized platform[J]. *Electronics Optics & Control*，2010，17(1)：69-72.(in Chinese)

[4] 黎志强，许兆林，宋超，等. BP 神经网络 PID 控制器在机载光电平台中的应用[J]. 电子测量与仪器学报，2008，(z2)：687-691.
LI ZH Q，XU ZH L，SONG CH，*et al*.. Application of neural network PID controller in airborne electro-optical tracking systems[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*，2008，(z2)：687-691.(in Chinese)

[5] 沈晓洋，陈洪亮，刘昇. 机载陀螺稳定平台控制算法[J]. 电光与控制，2011，18(4)：46-50.
SHEN X Y，CHEN H L，LIU SH. A control algorithm for airborne gyro stabilized platform [J]. *Electronics Optics & Control*，2011，18(4)：46-50.(in Chinese)

[6] 左哲，李东海，戴亚平，等. 陀螺稳定平台状态补偿控制[J]. 航空学报，2008，29(1)：141-147.
ZUO ZH，LI D H，DAI Y P，*et al*.. State compensating control for gyro-stabilized platform [J]. *Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica*，2008，29(1)：141-147.(in Chinese)

[7] 李英，葛文奇，王绍彬，等. 稳定平台的自适应逆控制[J]. 光学 精密工程，2009，17(11)：2744-2749.
LI Y，GE W Q，WANG SH B，*et al*.. Adaptive inverse control of stable platform[J]. *Opt. Precision Eng.*，2009，17(11)：2744-2749.(in Chinese)

[8] 杨蒲，李奇. 陀螺稳定平台非线性摩擦的灰色滑模控制[J]. 系统工程与电子技术，2008，30(7)：1328-1332.
YANG P，LI Q. Nonlinear friction grey sliding mode control for gyro stabilized platform [J]. *Systems Engineering and Electronics*，2008，30(7)：1328-1332.(in Chinese)

[9] 韩京清. 自抗扰控制技术——估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京：国防工业出版社，2008：183-287.
HAN J Q. *Active Disturbance Rejection Control Technology—the Technology for Estimating and Compensating the Uncertainties* [M]. Beijing：National Defense Industry Press，2008：183-287.(in Chinese)

[10] 李贤涛，张葆，沈宏海. 基于自抗扰控制技术提高航空光电稳定平台的扰动隔离度[J]. 光学 精密工程 2014，22(8)：2223-2231.
LI X T，ZHANG B，SHEN H H. Improvement of isolation degree of aerial photoelectrical stabilized platform based on ADRC [J]. *Opt. Precision Eng.*，2014，22(8)：2223-2231.(in Chinese)

[11] 孙明玮，邱德敏，王永坤，等. 大口径深空探测天线抗风干扰伺服系统设计[J]. 光学 精密工程，2013，21(6)：1568-1575.
SUN M W，QIU D M，WANG Y K，*et al*.. Wind disturbance rejection servo system design for large deep space observatory antenna [J]. *Opt. Precision Eng.*，2013，21(6)：1568-1575.(in Chinese)

[12] 陈茂胜，金光，张涛，等. 积分反馈自抗扰控制力矩陀螺框架伺服系统设计[J]. 光学 精密工程，2012，20(11)：2424-2432.

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

CHEN M SH, JIN G, ZHANG T, *et al*.. Design of gimbal servo system of CMG using active disturbance rejection control with integral feedback [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(11): 2424-2432. (in Chinese)

[13] 邓科，丛爽，孔德杰，等. 陀螺稳定平台中速度环的非线性实验建模[J]. 系统工程与电子技术，2013，35(4)：807-811.
DENG K, CONG SH, KONG D J, *et al*.. Experimental nonlinear modeling of velocity loop in gyro stabilized platform [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2013, 35(4): 807-811. (in Chinese)

[14] 宋康宁，丛爽，邓科，等. 自适应强跟踪鲁棒卡尔曼滤波器的设计[C]. 第 33 届中国控制会议，南京，2014：6626-6631.
SONG K N, CONG SH, DENG K, *et al*.. Design of adaptive strong tracking and robust kalman Filter [C]. *Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference*, *Nanjing*, 2014: 6626-6631. (in Chinese)

[15] 陈增强，孙明玮，杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报，2013，39(5)：574-580.
CHEN Z Q, SUN M W, YANG R G. Research on the stability of linear active disturbance rejection control [J]. *Acta Automatica Sinica*, 2013, 39(5): 574-580. (in Chinese)

[16] GAO Z Q. Active disturbance rejection control: a paradigm shift in feedback control system design [C]. *Proceedings of the 2006 American Control Conference*, Minneapolis, Minnesota, IEEE, 2006: 2399-2405.

[17] YANG R G, SUN M W, CHEN Z Q. Active disturbance rejection control on first-order plan [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2011, 22(1): 95-102.

[18] GAO Z Q. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning [C]. *Proceedings of the 2003 American Control Conference*, *Denver*, *Colorado*, IEEE, 2003: 4989-4996.

作者简介：

丛　爽(1961－)，**女，山东文登人，博士，教授，博士生导师，主要从事运动控制、先进控制策略和量子系统控制方面的研究。** E-mail: scong @ mail. ustc. edu. cn

孙光立(1991－)，**男，湖北仙桃人，硕士研究生，主要从事运动控制方面的研究。** E-mail: ustcsgl@mail. ustc. edu. cn

(版权所有　未经许可　不得转载)

?1994-2016 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net