

# 自适应强跟踪卡尔曼滤波在陀螺稳定平台中的应用

宋康宁<sup>1</sup>, 丛爽<sup>1</sup>, 邓科<sup>1</sup>, 尚伟伟<sup>1</sup>, 孔德杰<sup>2</sup>, 沈宏海<sup>2</sup>

(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:**考虑陀螺稳定平台速度环控制系统含有陀螺测量噪声, 设计了带有系统参数扰动迭代估计的自适应强跟踪卡尔曼滤波器, 并与模型参考控制系统相结合, 然后将其与现有的PI控制系统进行扰动隔离性能的系统仿真对比实验及其结果分析. 实验结果表明, 所提出的自适应强跟踪卡尔曼滤波器可以进一步提高扰动控制系统的隔离度性能, 尤其在把非线性摩擦力补偿一半的情况作为未建模的不确定因素影响情况, 所设计的滤波器不但能够稳定地工作, 而且模型参考自适应控制系统和PI控制系统的隔离度性能都有明显的提高.

**关键词:**自适应强跟踪卡尔曼滤波器; 模型参考自适应控制; 陀螺稳定平台; 速度环

**中图分类号:** TP273      **文献标识码:** A      doi:10.3969/j.issn.0253-2778.2015.01.003

**引用格式:** Song Kangning, Cong Shuang, Deng Ke, et al. Application of adaptive strong tracking Kalman filter to gyro-stabilized platform[J]. Journal of University of Science and Technology of China, 2015, 45(1): 17-22.

宋康宁, 丛爽, 邓科, 等. 自适应强跟踪卡尔曼滤波在陀螺稳定平台中的应用[J]. 中国科学技术大学学报, 2015, 45(1): 17-22.

## Application of adaptive strong tracking Kalman filter to gyro-stabilized platform

SONG Kangning<sup>1</sup>, CONG Shuang<sup>1</sup>, DENG Ke<sup>1</sup>, SHANG Weiwei<sup>1</sup>, KONG Dejie<sup>2</sup>, SHEN Honghai<sup>2</sup>

(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 Science, Changchun 130033, China)

**Abstract:** Considering the effect of gyro output noise in a velocity loop control system on a gyro-stabilized platform, the adaptive strong tracking Kalman filter with iterative estimation of system parameter perturbation was designed. Combined with the model reference adaptive control (MRAC) system, the disturbance isolation performance of the system with the Kalman filter designed was studied by means of comparative simulation experiments with PI control system. The results show that the adaptive strong tracking Kalman filter proposed may further improve the isolation performance of the disturbance control system, and that especially in the case of half compensated non-linear friction as unmodeled uncertainty, not only can the designed filter work stably, but the isolation performance of MRAC system and PI control system can also be improved significantly.

收稿日期: 2014-03-18; 修回日期: 2014-05-31

基金项目: 中国科大-长春光机所超精密控制与系统联合实验室研究项目(ES210010020)资助.

作者简介: 宋康宁, 男, 1989年生, 硕士生. 研究方向: 卡尔曼滤波理论, 运动控制. E-mail: skn89@mail.ustc.edu.cn

通讯作者: 丛爽, 博士/教授. E-mail: scong@ustc.edu.cn

**Key words:** adaptive strong tracking Kalman filter; model reference adaptive control; gyro-stabilized platform; velocity loop

## 0 引言

陀螺稳定平台是一个高精度的速度和位置控制系统,其稳定精度受到系统内部扰动以及外界干扰因素的影响,如干扰力矩、陀螺噪声、机械谐振、安装误差等.其中以摩擦力为主的非线性是影响系统性能的主要内部因素,对摩擦力模型的建立及其前向补偿是高精度控制系统常用的有效控制方法<sup>[1-2]</sup>.外部环境的噪声是影响系统性能的重要外部干扰因素<sup>[3-4]</sup>,对环境噪声进行滤波也是稳定平台高精度控制的要求之一.文献[5]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中,对速度环低速工作情况下存在的非线性摩擦力建立 Stribeck 摩擦力模型;文献[6]在此基础上,设计了对非线性摩擦力进行前馈补偿的比例控制器,文献[7]设计了模型参考自适应控制器,在理论上达到了隔离度低于 2% 的控制目标.当所设计控制器应用到实际系统时,由于没有考虑环境噪声和状态扰动等外界因素的影响,目前所能达到的实际控制系统隔离度的最好值为 9.393%<sup>[8]</sup>.为此,我们希望通过考虑估计系统参数扰动并消除由环境噪声对系统性能的影响,来进一步提高控制系统的隔离度性能.

本文在所建立起的陀螺稳定平台的非线性摩擦力模型加一阶线性模型基础上<sup>[5]</sup>,设计了含有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统.在滤波器的设计中,系统的输出噪声是已知可测的,但参数扰动是未知的,我们通过所获得的系统输出信号,对未知的参数扰动进行自适应迭代估计,然后再对输出信号进行状态重构和滤波,设计出自适应强跟踪卡尔曼滤波器.为了检验设计的滤波器抗参数扰动的能力,我们在系统模型非线性摩擦力分别为完全补偿和补偿一半的情况下,分别在模型参考自适应控制以及 PI 控制系统中进行了带有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的抗扰动性能的对比仿真实验.

## 1 被控系统描述及控制任务

研究的被控系统是视轴稳定控制系统中的陀螺稳定平台,视轴稳定系统控制精度的关键是陀螺稳

定平台速度环扰动隔离性能,隔离度  $J$  的定义为:

$$J = \frac{|\omega_1|_{\max}}{|\omega|_{\max}} \times 100\% \quad (1)$$

式中,  $\omega$  为载体扰动角速度,  $\omega_1$  为平台相对于惯性空间的角速度.

实际系统中,目前常采用的是 PI 闭环反馈控制,我们研究小组设计了模型参考自适应控制系统<sup>[7]</sup>,其原理是:将隔离度调节控制系统等效变换成为一个扰动跟踪系统,使之成为一个参考模型传递函数为 1 的模型参考跟踪控制系统,从而在理论上达到了隔离度低于 2% 的控制目标.实际系统的实验中,由于没有考虑环境噪声等其他干扰因素的影响,所能达到的隔离度性能只有 9.393%,所以本文的控制任务是:考虑含有陀螺测量噪声的更加接近实际的情况,设计了一个在未知参数扰动情况下能够稳定工作的自适应强跟踪卡尔曼滤波器,并与模型参考跟踪控制系统相结合,来进一步提高控制系统的隔离控制性能.

## 2 含有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统设计

我们已经在速度稳定平台上通过将隔离度性能的调节控制转化为状态跟踪控制,设计出模型参考自适应控制系统<sup>[7]</sup>;根据获取的系统输出信号,通过对系统中未知状态扰动进行迭代估计设计出自适应强跟踪卡尔曼滤波器<sup>[9]</sup>,再将两者结合,得到含有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统,结构如图 1 所示.其中,  $\omega(k)$  为载体扰动角速度;  $u(k)$  为控制器输出;  $e(k)$  为跟踪误差;被控对象

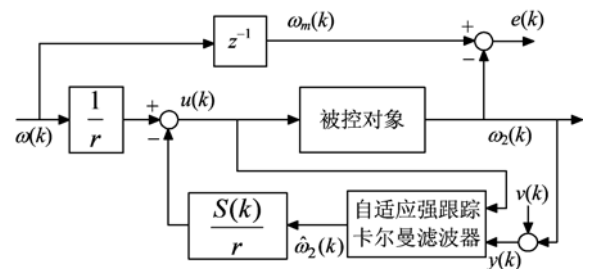


图 1 含有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统结构图

Fig. 1 The structure scheme of model reference tracking control system with adaptive strong tracking kalman filter

为伺服电机驱动的平台； $\omega_2(k)$  为平台输出角速度，这里的隔离度计算公式为  $J = |e(k)|_{\max} / |\omega(k)|_{\max} \times 100\%$ <sup>[7]</sup>； $v(k)$  为陀螺测量噪声； $\hat{\omega}_2(k)$  为滤波器输出角速度。

图 1 中含有测量噪声  $v(k)$  和未知状态扰动  $\epsilon(k)$  的被控对象的标称线性模型为：

$$\left. \begin{aligned} \omega_2(k+1) &= a \cdot \omega_2(k) + b \cdot u(k) + \epsilon(k) \\ y(k) &= \omega_2(k) + v(k) \end{aligned} \right\} (2)$$

式中， $y(k)$  为  $k$  时刻的陀螺输出信号； $\epsilon(k)$  为  $k$  时刻的状态扰动； $v(k)$  是  $k$  时刻的测量噪声，假设为高斯白噪声，其均值为： $E[v(k)] = r$ ；方差分别为  $E\{[v(k) - r]^2\} = R$ 。假设状态扰动为非平稳的噪声，均值和方差都未知且时变的，分别为： $E[\epsilon(k)] = q(k)$ ， $E\{[\epsilon(k) - q(k)]^2\} = Q(k)$ 。

由于平台正负运行方向模型参数是不对称的，其正转模型参数为  $a_1, b_1$ ，负转模型参数为  $a_2, b_2$ ，为了设计和实现的方便，同时考虑系统参数的变化可以看成是系统模型中的未知扰动，我们把系统的标称模型参数取为： $a = (a_1 + a_2)/2$ ， $b = (b_1 + b_2)/2$ 。图 1 中，模型参考自适应控制系统中的  $1/r$  和  $S(k)/r$  分别为模型参考自适应控制器的前馈控制器和反馈控制器<sup>[7]</sup>，其中， $S(k)$  为：

$$S(k) = \begin{cases} \frac{\hat{\omega}_2(k) - r \cdot u(k-1)}{\hat{\omega}_2(k-1)}, & |\hat{\omega}_2(k-1)| \leq \alpha \\ S(k-1), & \text{其他} \end{cases} (3)$$

式中， $r = \sqrt{b_1 \cdot b_2}$ ， $S(0) = \sqrt{a_1 \cdot a_2}$ ， $\alpha$  由实验确定。

我们对图 1 中的自适应强跟踪卡尔曼滤波器进行过专门的设计与研究<sup>[9]</sup>，其算法的实现过程可以总结为：

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_2(k) &= \omega_2^*(k) + K_f(k) \cdot \tilde{y}(k); \\ \omega_2^*(k) &= a \cdot \hat{\omega}_2(k-1) + b \cdot \\ & \quad u(k-1) + \hat{q}(k-1); \\ \tilde{y}(k) &= y(k) - \omega_2^*(k) - r; \\ K_f(k) &= P^*(k) \cdot [P^*(k) + R]^{-1}; \\ \hat{P}(k) &= [1 - K_f(k)] \cdot P^*(k); \\ \hat{\epsilon}(k-1) &= \hat{\omega}_2(k) - a \cdot \hat{\omega}_2(k-1) - b \cdot u(k-1); \\ \hat{q}(k) &= \hat{q}(k-1) + \gamma(k-1) \cdot \\ & \quad [\hat{\epsilon}(k-1) - \hat{q}(k-1)]; \\ \hat{Q}(k) &= \hat{Q}(k-1) + \gamma(k-1) \cdot \\ & \quad K_f^2(k) \cdot [\tilde{y}^2(k) - P^*(k) - R]; \end{aligned}$$

$$\gamma(k-1) = (1 - c)/(1 - c^k);$$

$$P^*(k) = \lambda(k) \cdot a^2 \cdot \hat{P}(k-1) + \hat{Q}(k-1);$$

$$\lambda(k) = \begin{cases} \lambda_0(k), & \lambda_0(k) \geq 1 \\ 1, & \lambda_0(k) < 1 \end{cases}, \text{ 其中 } \lambda_0(k) = \frac{N(k)}{M(k)};$$

$$N(k) = V(k) - \hat{Q}(k-1) - l \cdot R;$$

$$V(k) = \begin{cases} \tilde{y}^2(1), & k = 1 \\ \frac{\rho \cdot V(k) + \tilde{y}^2(k)}{1 + \rho}, & k \geq 2; \end{cases}$$

$$M(k) = a^2 \cdot \hat{P}(k-1).$$

其中， $\hat{\omega}_2(0), \hat{P}(0), \hat{q}(0), \hat{Q}(0), c, \rho, l$  及  $R$  需要在初始时刻给定。变量  $\lambda(k), N(k), M(k), V(k)$  的计算是按照强跟踪滤波算法的原理得到的，而  $\hat{q}(k) = \hat{q}(k-1) + \gamma(k-1) \cdot [\hat{\epsilon}(k-1) - \hat{q}(k-1)]$  和  $\hat{Q}(k) = \hat{Q}(k-1) + \gamma(k-1) \cdot K_f^2(k) \cdot [\tilde{y}^2(k) - P^*(k) - R]$  的形式和 Sage-Husa 算法中给出的略有差别，其本质是等价的，其推导过程以及初始时刻参数取值的确定过程可以参考文献[9]。

### 3 系统仿真实验及其结果分析

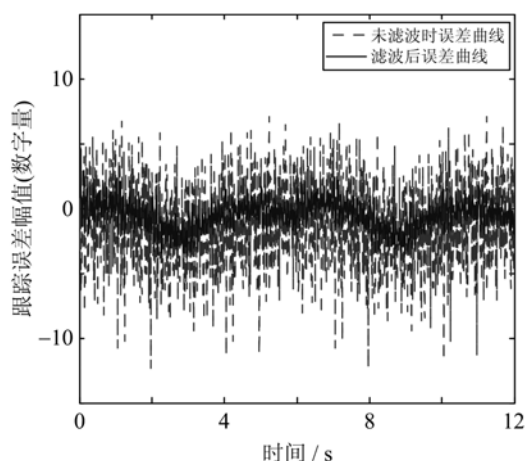
为了考察所设计出的自适应强跟踪卡尔曼滤波器对控制系统在具有未知参数扰动的影响下，对输出状态的稳定滤波能力以及对控制系统隔离性能的提升，我们在 SimuLink 环境下，分别在被控对象非线性摩擦力被完全补偿以及补偿一半的情况下，在所设计的自适应强跟踪卡尔曼滤波器使用前和后，分别对 PI 控制系统和模型参考自适应控制系统进行了抗扰动性能的系统仿真实验及其结果的对比分析。

仿真实验中，速度环被控对象正转时模型参数为  $a_1 = 0.999\ 542$ ， $b_1 = 0.018\ 093\ 8$ ；反转时模型参数为  $a_2 = 0.999\ 807$ ， $b_2 = 0.016\ 64$ ；载体扰动为  $\omega(k) = 818 \cdot \sin(\pi/3 \cdot k)$  (数字量)；陀螺测量噪声  $v$  是通过实际实验获得的，为 0 均值，最大幅值为 11.921 1 (数字量) 的近似平稳的噪声序列。

#### 3.1 非线性摩擦力完全补偿情况下滤波前后控制系统性能的对比实验

我们分别做了在非线性摩擦力完全补偿情况下，考虑陀螺测量噪声存在情况下，PI 和模型参考自适应两种控制系统加入自适应强跟踪卡尔曼滤波前后的系统仿真实验。未加入自适应强跟踪卡尔曼滤波时，模型参考自适应控制系统中的参数分别为：

$r = \sqrt{b_1 \cdot b_2} = 0.0174$ ,  $\alpha = 830$ ,  $S(0) = \sqrt{a_1 \cdot a_2} = 0.9997$ . PI 控制系统中的控制器参数取为: 比例系数  $K_P = 9$ , 积分系数  $K_I = 30$ . 加入自适应强跟踪卡尔曼滤波后, 滤波器参数取为  $\hat{\omega}(0) = 0$ ;  $\hat{P}(0) = 0.5$ ;  $\hat{q}(0) = 0.01$ ;  $\hat{Q}(0) = 0.01$ ;  $\rho = 0.9$ ;  $l = 15$ ;  $c = 0.998$  (模型参考自适应控制),  $c = 0.978$  (PI 控制). 模型参考自适应控制器参数  $\alpha = 5$ , 其他参数与未滤波前的相同. PI 控制器参数取为:  $K_P = 50$ ,  $K_I = 1000$ . 模型参考自适应和 PI 控制系统滤波前后的系统状态跟踪误差曲线分别如图 2(a) 和 (b) 所示. 其中, 滤波前后的误差曲线分别用虚线和实线表示. 从图 2(a) 可以看出: 在模型参考自适应控制下, 滤波前, 系统状态跟踪误差的最大幅值为 12.7695 (数字量), 隔离度为 1.56%. 没有陀螺测量噪声时, 模型参考自适应控制系统所能达到的隔离度为 0.1%. 滤波后, 系统状态跟踪误差的最大幅值为 4.8699 (数字量), 此时的隔离度为 0.5953%, 与未滤波前的隔离度 1.56% 相比降低了 61.8%. 从图 2(b) 中可以看出, 在 PI 控制下, 滤波前系统状态跟踪误差的最大幅值为 7.7998 (数字量), 所对应的隔离度为 0.9535%. 与模型参考自适应控制在滤波前的 12.7695 (数字量) 相比, PI 控制系统在有陀螺测量噪声的影响下所能达到的隔离度较低. 滤波后, PI 控制系统状态跟踪误差的最大幅值为 4.5287, 隔离度为 0.5536%, 与未滤波前的隔离度 0.9535% 相比降低了 41.94%.



(a) MRAC 系统滤波前后系统跟踪误差曲线

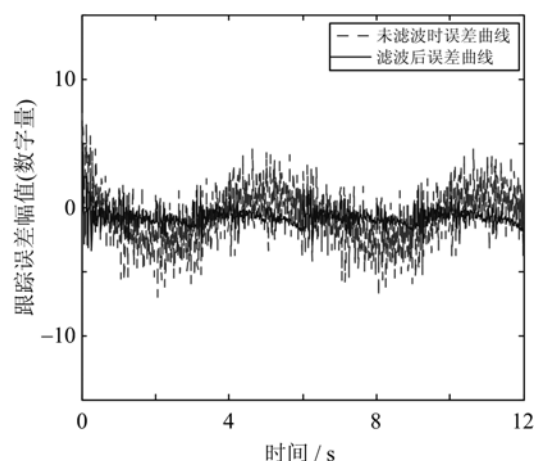
### 3.2 非线性摩擦力补偿一半情况下滤波前后控制系统性能的对比实验

我们还进行了在非线性摩擦力补偿一半、同时考虑陀螺测量噪声存在的情况下, PI 和模型参考自适应两种控制系统加入自适应强跟踪卡尔曼滤波前后系统性能的对比实验.

未加入自适应强跟踪卡尔曼滤波时, 模型参考自适应控制系统控制器参数取:  $\alpha = 4.5$ , 其他参数与 3.1 节的相同. PI 控制系统中的控制器参数取:  $K_P = 10$ ,  $K_I = 5000$ . 加入自适应强跟踪卡尔曼滤波后, 滤波器参数:  $\hat{\omega}(0) = 0$ ,  $\hat{q}(0) = 0.01$ ,  $\hat{Q}(0) = 0.01$ ,  $\rho = 0.9$ ; 在模型参考自适应控制下的参数分别为:  $c = 0.88$ ,  $l = 15$ ,  $\hat{P}(0) = 45$ , 在 PI 控制下相应的参数分别为:  $c = 0.978$ ,  $l = 6$ ,  $\hat{P}(0) = 0.5$ . 模型参考自适应控制器参数  $\alpha = 4.5$ , 其他参数与没有滤波时的情况相同. PI 控制器参数取:  $K_P = 10$ ,  $K_I = 7000$ .

摩擦力补偿一半的情况, 模型参考自适应和 PI 控制系统滤波前后的系统状态跟踪误差曲线如图 3 所示. 其中, 滤波前后的误差曲线分别用虚线和实线表示.

从图 3(a) 可以看出, 在模型参考自适应控制下, 滤波前获得系统状态跟踪误差的最大幅值为 17.2630 (数字量), 隔离度为 2.11%; 滤波后, 获得系统状态跟踪误差的最大幅值为 11.6552, 隔离度为 1.42%, 与未滤波前的隔离度 2.11% 相比降低了



(b) PI 控制系统滤波前后系统跟踪误差曲线

图 2 非线性摩擦力完全补偿情况下两种控制系统滤波前后的仿真结果

Fig. 2 Simulation results of two control systems in the case of full feed-forward compensation of non-linear friction before and after the filtering

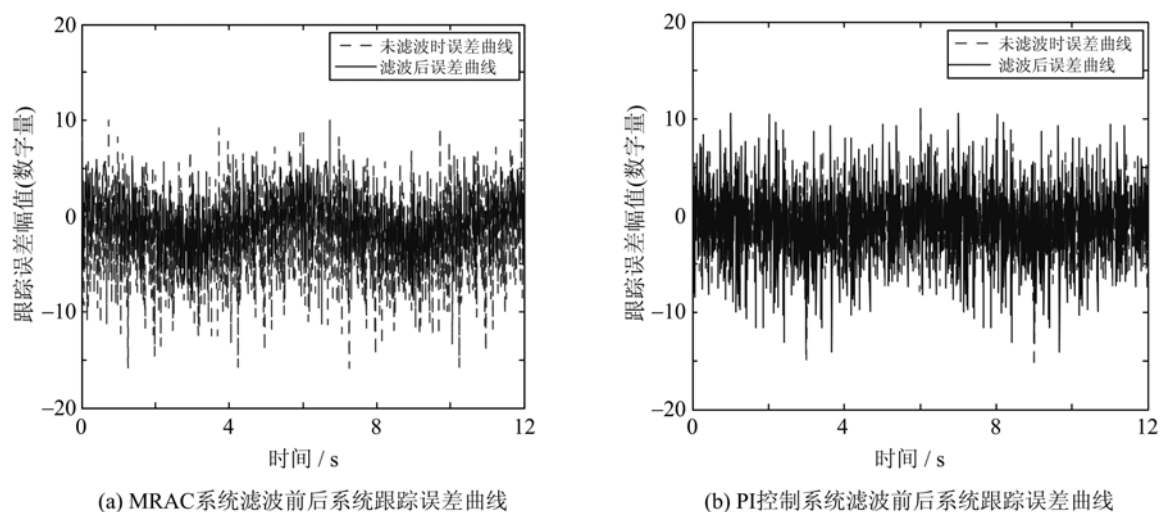


图 3 非线性摩擦力补偿一半情况下两种控制系统滤波前后的仿真结果

Fig. 3 The simulation results of two control systems in the case of half feed-forward compensation of non-linear friction

表 1 非线性完全和一半补偿情况下两种控制系统滤波前后仿真实验隔离度

Tab. 1 Isolation results of two control systems in the full and half feed-forward compensation of non-linear friction before and after the filtering

类型	非线性摩擦力完全补偿			非线性摩擦力补偿一半		
	滤波前	滤波后	降低百分比	滤波前	滤波后	降低百分比
模型参考自适应控制	1.56%	0.5953%	61.8%	2.11%	1.42%	32.7%
PI控制	0.95%	0.5536%	41.94%	2%	1.723%	13.85%

32.7%。这说明所设计的自适应强跟踪卡尔曼滤波器在被控系统参数存在较大偏差的情况下,依然能够稳定高精度地进行滤波。从图 3(b)可以看出,在 PI 控制下,滤波前获得系统状态跟踪误差的最大幅值为 16.391 3(数字量),所对应的隔离度为 2%;滤波后,系统状态跟踪误差的最大幅值为 14.095 6,隔离度为 1.723%。

3.1 节和 3.2 节系统仿真隔离度实验结果如表 1 所示。从表 1 可以看出,系统在未建模参数影响的情况下,模型参考自适应控制系统的效果显然优越,这是因为模型参考自适应控制算法本身对模型误差的鲁棒性要比 PI 控制算法强<sup>[10]</sup>,但对所获得的输出信号精度要求较高。通过滤波使模型参考自适应控制器对模型误差的鲁棒性得以体现,获得了比 PI 控制更优越的控制隔离度,体现出所设计的带有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统的抗扰动性能的优越性,对进一步提高实际应用中速度环稳定系统的隔离控制精度,是具有实用意义的方案。

## 4 结论

本文考虑了扰动跟踪控制系统中陀螺测量噪声的影响,设计了含有自适应强跟踪卡尔曼滤波器的模型参考跟踪控制系统,并与 PI 扰动跟踪控制系统进行了扰动隔离性能的对比分析。实验研究表明,本文设计出的自适应强跟踪卡尔曼滤波器可以进一步降低陀螺稳定平台控制系统的隔离度。

### 参考文献 (References)

- [1] Deng K, Cong S, Shen H H. Control strategies and error compensation methods of high precision gyro stabilized platform [C]// Proceedings of the 30th Chinese Control Conference. Hefei, China: IEEE Press, 2011; 3 450-3 455.  
邓科,丛爽,沈宏海. 高精度陀螺稳定平台的控制策略及误差补偿方法[C]// 第 30 届中国控制会议. 合肥: IEEE Press, 2011; 3 450-3 455.
- [2] Cong S, Deng K, Shang W W, et al. Modeling Analysis of Gyro Stabilized Platform[J]. Science & Technology Review, 2011, 29(9):42-47.

- 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.
- [ 3 ] Yang J, Ma J C, Li J J. Research of de-noise algorithms in MEMS gyroscope based on DSP [J]. Electronic Measurement Technology, 2007, 30(5): 8-10, 28.
- 杨娟, 马建仓, 李俊杰. 基于 DSP 的 MEMS 陀螺去噪算法研究[J]. 电子测量技术, 2007, 30(5): 8-10, 28.
- [ 4 ] Huo J, Wang S J, Yang M, et al. Noise processing of FOG signal based on wavelet threshold-value [J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2008, 16(3): 343-347.
- 霍炬, 王石静, 杨明, 等. 基于小波变换阈值法处理光纤陀螺信号噪声[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(3): 343-347.
- [ 5 ] Deng K, Cong S, Kong D J, et al. Experimental nonlinear modeling of velocity loop in gyro stabilized platform[J]. Systems Engineering and Electronics, 2013, 35(4): 807-811.
- 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.
- [ 6 ] Wei X Y, Cong S, Deng K, et al. Isolation control of carrier turbulence for speed system of airborne electro-optical gyro-stabilized platform[C]// Proceedings of 14th Chinese Conference on System Simulation Technology & Application [J]. System Simulation Technology & Application, 2012, 14: 751-757.
- 魏学云, 丛爽, 邓科, 等. 机载光电陀螺稳定平台速度系统载体扰动的隔离控制[C]// 第 14 届中国系统仿真技术及其应用论文集. 中国科学技术大学出版社, 2012, 14: 751-757.
- [ 7 ] Cong S, Wei XY, Deng K, et al. Discrete-time model reference adaptive control of velocity loop in gyro-stabilized platform[J]. Information and Control, 2014, 43(3): 287-292.
- 魏学云, 丛爽, 邓科等. 陀螺稳定平台速度环的离散模型参考自适应控制[J]. 信息与控制, 2014, 43(3): 287-292.
- [ 8 ] 魏学云. 机载光电陀螺稳定平台速度环的高精度控制[D]. 中国科学技术大学, 2013.
- [ 9 ] Song K N, Cong S, Deng K, et al. Design of adaptive strong tracking and robust kalman filter [C]// Proceedings of the 33rd Chinese Control Conference (CCC2014), Nanjing, IEEE Press, 2014: 6 626-6 631.
- 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, IEEE Press, 2014: 6 626-6 631.
- [10] 吴士昌, 吴忠强. 自适应控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.