

文章编号: 1001-0920(2009)01-0129-04

改进的 UKF 在惯导平台误差模型辨识中的应用

柳 明, 刘 雨, 苏宝库

(哈尔滨工业大学 空间控制与惯性技术研究中心, 哈尔滨 150001)

摘 要: 为减小建模误差,建立了基于直接法进行惯导平台误差模型辨识的非线性模型。Unscented Kalman 滤波(UKF)是一种新的非线性滤波算法,为此将其引入惯导平台的误差模型辨识中。针对系统模型的特点,对标准 UKF 算法进行了简化改进。改进的 UKF 算法计算量小、结构简单,滤波精度与标准 UKF 一致。同时应用扩展 Kalman 滤波(EKF)算法和改进的 UKF 算法进行了惯导平台误差模型辨识仿真研究。仿真结果表明,与 EKF 算法相比,改进的 UKF 算法的滤波精度显著提高。

关键词: 惯导平台;非线性滤波;UKF 算法;模型辨识

中图分类号: TN911.72 **文献标识码:** A

Application of improved UKF in error model identification of inertial navigation platform

LIU Ming, LIU Yu, SU Bao-ku

(Space Control and Inertial Technology Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China.

Correspondent: LIU Ming, E-mail: hitswordben@126.com)

Abstract: To reduce the modeling error, the nonlinear model of direct method based error model identification of inertial navigation platform is given. The Unscented Kalman filter(UKF) is a new nonlinear filtering algorithm. The UKF algorithm is introduced to the error model identification of inertial navigation platform. According to the peculiarity of the system model, the UKF algorithm is improved. The improved algorithm has the merits of higher calculation speed and simpler configuration, and its precision is identical to the UKF algorithm. The improved UKF algorithm and the extended Kalman filter (EKF) are used to the error model identification of the inertial navigation platform. The simulation results show that, compared with the EKF algorithm, the improved UKF algorithm can enhance the filtering precision.

Key words: Inertial navigation platform; Nonlinear filtering; UKF algorithm; Model identification

1 引 言

惯导平台是惯性导航系统的核心部件,其精度主要取决于惯性测量器件的精度^[1]。提高惯导平台精度的方法一般有 2 种:一是提高惯性器件的精度,从而减小平台误差;二是建立平台的误差模型,利用各种测试方法辨识出误差系数,并利用辨识结果对平台误差进行补偿,从而提高平台的精度。研制更高精度的陀螺仪和加速度计代价昂贵,因此第 2 种方法是提高平台精度的经济而有成效的途径。

惯导平台误差模型辨识所建立的系统模型为非线性模型。目前常用的解决非线性估计的方法是 EKF 方法^[2]。EKF 通过对非线性函数的泰勒展开

式进行一阶线性化截断,从而将非线性问题转化为线性。EKF 简单、易实现,但它的模型线性化过程引入了模型误差,降低了估计精度;EKF 在滤波前必须计算非线性模型的 Jacobi 矩阵,对于高维的复杂模型,过程烦琐且易出错;要求系统模型足够准确,对于模型误差大的系统,估计性能严重下降^[3,4]。

针对非线性滤波器 EKF 存在的不足,Julier 等提出的 UKF 法通过设计少量 Sigma 点,用 Sigma 点的分布逼近系统的状态分布,并计算这些 Sigma 点经由状态方程的传播,对状态后验均值和方差的估计采用 UT 变换技术,最后获得滤波值基于状态方程的更新^[5,6]。与 EKF 相比,UKF 将精确到与二

收稿日期: 2007-12-25; 修回日期: 2008-02-15.

基金项目: 国家安全重大基础研究项目(973-61334)。

作者简介: 柳明(1980—),男,山东诸城人,博士生,从事系统辨识的研究;苏宝库(1941—),男,河北河间人,教授,博士生导师,从事惯性测试设备的研究。

阶泰勒展开式相当的均值和方差,对状态后验分布的逼近精度更高,而计算量却与 EKF 同阶^[7].

本文针对对象的实际情况,将 UKF 方法改进后应用到惯导平台的误差模型辨识中.仿真结果表明,与 EKF 方法相比,UKF 方法可提高辨识精度.

2 系统数学模型

本文利用车载试验进行惯导平台误差模型的辨识.系统模型的建立与采用直接法滤波还是采用间接法滤波有关.在间接法滤波中,以平台系统输出参数的误差量作为状态变量,所建立的是有近似误差的线性化模型^[8];而直接法滤波中,以平台系统输出参数作为状态变量,所建立的是非线性模型,从而避免了线性化误差.因此,惯导平台车载试验误差模型辨识采用直接法建模.量测信号包括 GPS 的位置信息以及由高精度里程仪提供的速度信息.

2.1 惯导平台误差模型

惯导平台误差主要包括陀螺仪漂移误差、平台系统静态误差、加速度计测量误差等.从车载试验的精度以及降低状态方程的维数考虑,忽略平台系统静态误差及惯性器件的高次项误差,并认为天向速度为零,即

$$\dot{g}_x = K_{g0x} + K_{g11x}\dot{W}_x + K_{g12x}\dot{W}_y, \quad (1)$$

$$\dot{g}_y = K_{g0y} + K_{g11y}\dot{W}_x + K_{g12y}\dot{W}_y, \quad (2)$$

$$\dot{g}_z = K_{g0z} + K_{g11z}\dot{W}_x + K_{g12z}\dot{W}_y, \quad (3)$$

$$\nabla_{ax} = K_{a0x} + K_{a1x}\dot{W}_x, \quad (4)$$

$$\nabla_{ay} = K_{a0y} + K_{a1y}\dot{W}_y. \quad (5)$$

其中: g 为陀螺仪测量误差, K_{g0} 为陀螺常值误差, K_{g11} 和 K_{g12} 为陀螺仪一次项误差系数, ∇_a 为加速度计测量误差, K_{a0} 为加速度计常值误差, K_{a1} 为加速度计一次项误差系数, \dot{f}_x 和 \dot{f}_y 为视加速度.

2.2 状态方程

考虑到平台存在的倾角会产生其他轴向的比力分量,惯导平台系统的姿态误差方程和速度以及位置方程分别为

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_x = & -\frac{v_x}{R_M} + \left(i_e \sin L + \frac{v_x}{R_N} \operatorname{tg} L \right) \phi_y - \\ & \left(i_e \cos L + \frac{v_x}{R_N} \right) \phi_z + g_x, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_y = & -\frac{v_x}{R_N} - i_e \sin L L - \frac{v_x}{R_M} \phi_z - \\ & \left(i_e \sin L + \frac{v_x}{R_N} \operatorname{tg} L \right) \phi_x + g_y, \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \dot{\phi}_z = & \frac{v_x}{R_N} \operatorname{tg} L + \left(i_e \cos L + \frac{v_x}{R_N} \sec^2 L \right) L + \\ & \left(i_e \cos L + \frac{v_x}{R_N} \right) \phi_x + \frac{v_x}{R_M} \phi_y + g_z, \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_x = & \left(2 i_e \sin L + \frac{v_x}{R_N} \operatorname{tg} L \right) v_y + \nabla_{ax} + \\ & f_x + f_y \phi_z - f_z \phi_y, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \dot{v}_y = & -\left(2 i_e \sin L + \frac{v_x}{R_N} \operatorname{tg} L \right) v_x + \nabla_{ay} + \\ & f_y + f_z \phi_x - f_x \phi_z, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\dot{L} = v_y / R_M, \quad (11)$$

$$\dot{\lambda} = (v_x / R_N) \sec L. \quad (12)$$

基于东北天导航坐标系,建立动力学方程的基准坐标系.其中: ϕ_x, ϕ_y, ϕ_z 为平台误差角; v_x, v_y 为沿东、北方向的速度; L, λ 为纬度和经度; R_M 为地球参考椭球子午圈上各点的曲率半径, $R_M = R_e(1 - 2f + 3f \sin^2 L)$; R_N 为地球参考椭球卯酉圈上各点的曲率半径, $R_N = R_e(1 + f \sin^2 L)$; $R_e = 6378137 \text{ m}$, $f = 1/298.257$.

取惯导平台车载试验系统的状态变量为

$$\begin{aligned} X = [& \phi_x, \phi_y, \phi_z, v_x, v_y, L, \lambda, K_{g0x}, K_{g11x}, \\ & K_{g12x}, K_{g0y}, K_{g11y}, K_{g12y}, K_{g0z}, K_{g11z}, \\ & K_{g12z}, K_{a0x}, K_{a1x}, K_{a0y}, K_{a1y}]^T, \end{aligned}$$

则惯导平台车载试验系统的状态方程为

$$\dot{X}(t) = F(X(t)) + G(t)W(t). \quad (13)$$

其中: $F(X(t))$ 为 $X(t)$ 的非线性函数,而

$$W = [g_x, g_y, g_z, a_x, a_y]^T,$$

$$G = [I_{5 \times 5} \quad 0_{5 \times 5}]^T.$$

其中: g_x, g_y, g_z 为陀螺仪测量误差模型在导航坐标系 3 个轴向的白噪声; a_x, a_y 为加速度计测量误差模型的白噪声.

2.3 量测方程

取 GPS 接收机输出的载车位置信息 L, λ , 以及由高精度里程仪得到的速度信息 v_x, v_y 作为量测量,即

$$Z = [v_x, v_y, L, \lambda]^T. \quad (14)$$

GPS 定位精度可达到米级,因此可将 GPS 的误差考虑为零均值的白噪声.于是,根据前面所选取的系统状态向量 X 和量测 Z ,可获得惯导平台车载试验系统的量测方程为

$$Z(t) = HX(t) + V(t). \quad (15)$$

其中: $H = [0_{4 \times 4} \quad I_{4 \times 4} \quad 0_{4 \times 2}]$, $V(t)$ 为量测噪声.

以上得到的是连续系统的状态方程和量测方程,在实际应用中需将其离散化.

3 改进的 UKF 方法及滤波器设计

3.1 标准 UKF 方法

给定非线性离散系统

$$X_k = F(X_{k-1}, W_{k-1}, k-1),$$

$$Z_k = H(X_k, V_k, k). \quad (16)$$

UKF 滤波方法具体步骤如下:

Step1: 设定初始估计值 $X_0 = E[X_0]$ 和初始误差方差 $P_0 = E[(X_0 - X_0)(X_0 - X_0)^T]$.

将过程噪声和量测噪声增广为状态向量:

$$X^a = [X^T \quad W^T \quad V^T]^T,$$

$$X_0^a = E[X_0^a] = [X_0^T \quad 0 \quad 0]^T,$$

$$P_0^a = E[(X_0^a - X_0^a)(X_0^a - X_0^a)^T] =$$

$$\begin{bmatrix} P_0 & 0 & 0 \\ 0 & Q_0 & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix}.$$

Step2: 计算 Sigma 点 X_{k-1}^a 和相应的加权因子:

$$X_{k-1}^a = [X_{k-1}^a \quad X_{k-1}^a + \sqrt{(n+1)P_{k-1}^a} X_{k-1}^a - \sqrt{(n+1)P_{k-1}^a}],$$

$$W_0^m = 1/(n+1),$$

$$W_0^c = 1/(n+1) + (1-\alpha^2 + \beta),$$

$$W_i^m = W_i^c = 1/[2(n+1)], \quad i = 1, \dots, 2n.$$

Step3: 时间更新.

$$X_{k/k-1}^a = F[X_{k-1}^a], \tag{17}$$

$$X_k^a = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m X_{i,k/k-1}^a, \tag{18}$$

$$P_k^a = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [X_{i,k/k-1}^a - X_k^a][X_{i,k/k-1}^a - X_k^a]^T + Q_k, \tag{19}$$

$$Z_{k/k-1} = H[X_{k/k-1}^a], \tag{20}$$

$$Z_k = \sum_{i=0}^{2L} W_i^m Z_{i,k/k-1}. \tag{21}$$

Step4: 量测更新.

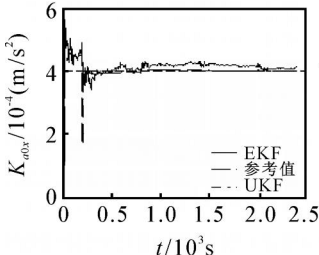
$$P_{z_k z_k}^a = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [Z_{i,k/k-1} - \bar{Z}_k][Z_{i,k/k-1} - \bar{Z}_k]^T + R_k, \tag{22}$$

$$P_{x_k z_k}^a = \sum_{i=0}^{2L} W_i^c [X_{i,k/k-1}^a - X_k^a][Z_{i,k/k-1} - \bar{Z}_k]^T, \tag{23}$$

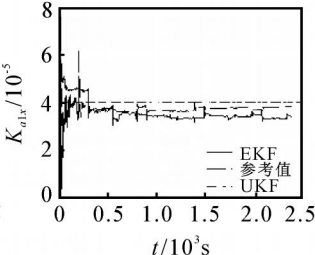
$$K_k = P_{x_k z_k}^a (P_{z_k z_k}^a)^{-1}, \tag{24}$$

$$X_k^a = X_k^a + K_k (Z_k - \bar{Z}_k), \tag{25}$$

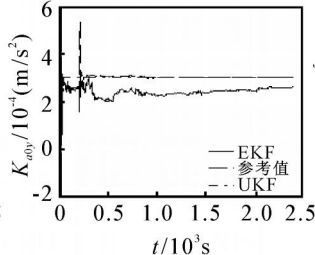
$$P_k^a = P_k^a - K_k P_{z_k z_k}^a K_k^T. \tag{26}$$



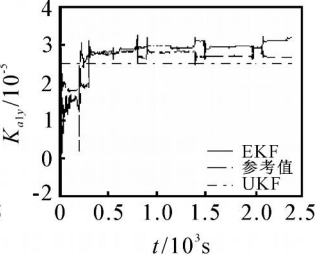
(a) K_{ax} 辨识结果



(b) K_{alx} 辨识结果



(c) K_{ay} 辨识结果



(d) K_{alx} 辨识结果

图 2 加速度计误差模型辨识结果

3.2 改进的 UKF 方法

从以上标准 UKF 算法可以看出,其状态方程和观测方程均为非线性形式,而且将过程噪声和量测噪声也作为状态变量进行扩维.由前面推导的系统数学模型可以看出,系统的状态方程是非线性的,而量测方程是线性的,系统状态个数为 20.若采用标准 UKF 方法,则系统状态个数由 20 增加到 25,算法的复杂度与计算量大大增加.

考虑到本文对象的过程、观测噪声都是加性的,无需对状态量进行增广,而且系统量测方程是线性方程.因此,将标准 UKF 算法加以改进,得到简化的 UKF 算法,以减小计算量.具体方法如下:

- 1) 保持原状态变量个数不变,不将过程噪声和观测噪声扩充到状态变量中.
- 2) 将标准 UKF 算法中式(20) 改为

$$Z_{k/k-1} = H[X_{k/k-1}], \tag{27}$$

并将式(27) 代入(22) 和(23),便得到改进的 UKF 算法.

4 仿真研究

本文将改进的 UKF 应用于惯导平台误差模型辨识,并与 EKF 方法进行对比.仿真时假定载车沿闭合路径运行,包括加速、匀速、减速以及拐弯等运动过程.载车按图 1 所示路径沿 OABCO 方向运行,滤波周期为 1s,仿真时间为 2400s,滤波初值取 0.里程仪精度为 2‰,GPS 的定位精度为 3m.仿真结果如图 2 和图 3 所示.

从仿真结果可以看出,改进的 UKF 方法精度比 EKF 方法有所提高.这是因为, EKF 方法通过

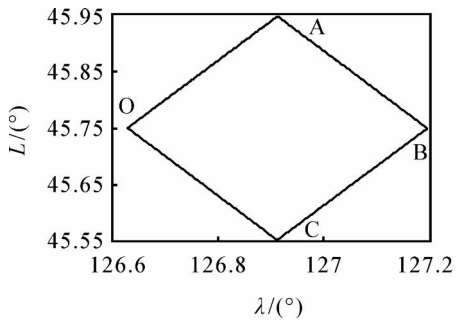


图 1 载车运行路径

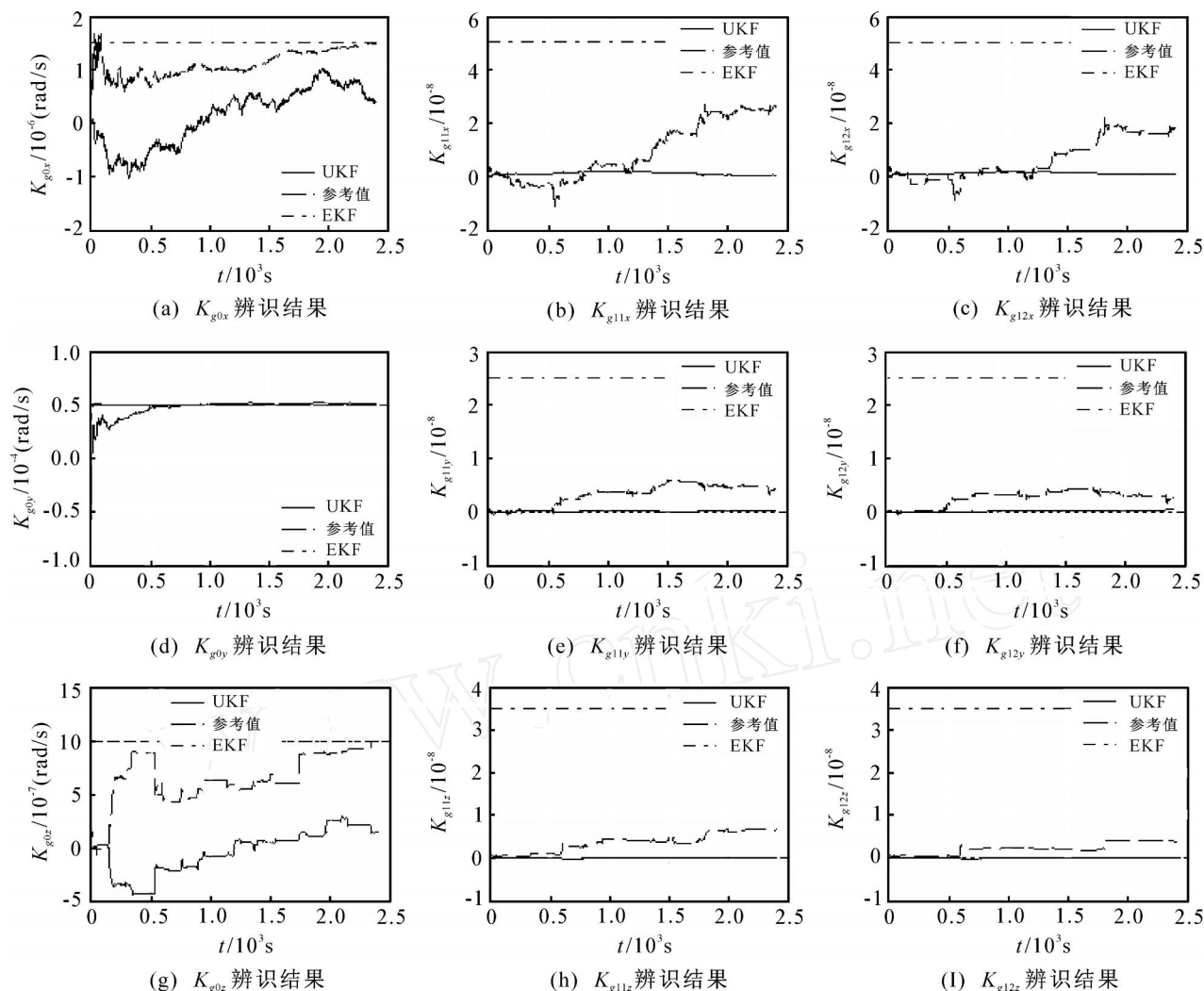


图3 陀螺仪误差模型辨识结果

对非线性函数的 Taylor 展开式进行一阶线性化截断,将非线性问题转化为线性,从而引入了线性化误差,降低了估计精度;而 UKF 方法则通过设计少量的 Sgma 点,用 Sgma 点的分布逼近系统的状态分布,并计算这些 Sgma 点经由状态方程的传播,不会有线性化误差,因此其估计精度比 EKF 方法高.另外,改进的 UKF 方法状态方程维数降低,计算量比 UKF 方法小.

5 结 论

UKF 方法是一种处理线性和非线性滤波问题的有效、简单的方法.本文建立了基于直接法进行惯导平台误差模型辨识的非线性模型,并根据所建立模型的实际情况,对标准 UKF 方法进行了简化改进,使之既适合对象要求,又减小了计算量.与扩展卡尔曼滤波所得结果进行比较,验证了改进的 UKF 方法能很好地改善滤波效果,提高滤波精度.

参考文献 (References)

[1] 邓正隆. 惯性技术[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版

社, 2006: 75-89.

(Deng Z L. Inertial technology[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2006: 75-89.)

[2] 武延鹏, 尤政, 任大海. 采样 Kalman 滤波器在天文卫星定姿滤波中的应用[J]. 清华大学学报, 2003, 43(8): 1013-1016.

(Wu Y P, You Z, Ren D H. Unscented Kalman filter application in astronomical satellite attitude determination[J]. J of Tsinghua University, 2003, 43(8): 1013-1016.)

[3] 管旭军, 芮国胜. 基于 UKF 的单站无源定位算法[J]. 电光与控制, 2004, 11(2): 34-36.

(Guan X J, Rui G S. Algorithm for passive locating by single station with application of UKF[J]. Electronics Optics & Control, 2004, 11(2): 34-36.)

[4] Romanenko R, CasLro J. The unscented filler as an alternative to the EKF for nonlinear state estimation: A simulation case study [J]. Computers and Chemical Engineering, 2004, 28(3): 347-355.

(下转第 136 页)

选取系统参数如下:允许跟踪误差 $\epsilon = 0.1$, 优化时域长度 $P = 10$, 迭代算法常数增益矩阵 $\Gamma = 0.7$, 故障跟踪估计器增益矩阵 $L = [0.2 \ 0.5]^T$. 利用定理 1 所设计的迭代算法估计系统中发生的故障. 假设故障函数分别为

$$f(t) = \begin{cases} 5, & 50 \leq t \leq 250; \\ \sin(0.5t), & 50 \leq t \leq 250; \\ e^{1.2t}, & 100 \leq t \leq 300. \end{cases}$$

仿真结果如图 1 ~ 图 3 所示, 虚线为系统中实际发生的故障, 实线为估计出的故障.

仿真结果表明, 本文设计的故障跟踪估计器不但可以检测出系统中各种不同类型的故障信号, 而且可以对故障信号进行估计. 更重要的是, 本文算法可以对不同类型的故障进行检测和估计, 具有更广泛的适用性和实用性.

5 结 论

本文受预测控制和迭代学习控制原理的启发, 设计了一种故障跟踪估计器, 以检测和估计一类非线性时滞系统的故障. 该方法为解决非线性系统故障诊断问题提供了一种新的思路. 如何将该方法扩展到非线性不确定系统尚待进一步需深入研究.

参考文献 (References)

- [1] Arun T Vemuri, Marios M Polycarpou, Amt R Ciric. Fault diagnosis of differential-algebraic systems [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 2001, 31 (2): 143-152.
- [2] Marios M Polycarpou, Alexander B Trunov. Learning approach to fault diagnosis: Delectability analysis[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45 (4): 806-812.
- [3] Xiaodong Zhang, Marios M Polycarpou, Thomas Parisnin. A robust detection and isolation scheme for abrupt and incipient faults in nonlinear systems [J]. IEEE Trans on System, Man and Cybernetics, 2001, 31 (2): 143-152.
- [4] Arun T Vemuri. Sensor bias fault diagnosis in a class of nonlinear systems [J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2001, 46(6): 949-954.
- [5] 颜秉勇, 田作华, 吕冬梅, 等. 基于 H 滤波器的非线性摄动时滞系统的故障诊断[J]. 控制与决策, 2007, 22 (11): 1274-1279.
(Yan B Y, Tian Z H, Lv D M, et al. Fault diagnosis for time-delay system with nonlinear perturbations based on H filter[J]. Control and Decision, 2007, 22 (11): 1274-1279.)
- [6] Ailun Liu, Yongyun Chen, Jinshou Yu. Sensor fault diagnosis in nonlinear and time-delay systems with uncertainties [C]. Proc of the 5th IFAC World Congress. Hangzhou, 2004: 1703-1706.
- [7] Wen C, Saif M. Fault detection and accommodation in nonlinear time-delay systems [C]. Proc of the ACC Conf. Colorado, 2003: 4255-4260.
- [8] 谢胜利, 田森平, 谢振东. 迭代学习控制的理论与应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2004.
(Xie S L, Tian S P, Xie Z D. The theory of iterative learning control and its application[M]. Beijing: Science Press, 2004.)
- [5] Julier S, Uhlmann J, Durrant-Whyte H F. A new method for the nonlinear transformation of means and covariance in filters and estimators[J]. IEEE Trans on Automatic Control, 2000, 45 (3): 477-482.
- [6] Julier S, Uhlmann J. Unscented filtering and nonlinear estimation [J]. Proc of the IEEE Aerospace and Electronic Systems, 2004, 92(3): 401-422.
- [7] Xiong K, Zhang H Y, Chan C W. Performance evaluation of UKF-based nonlinear filtering [J]. Automatica, 2006, 42(2): 261-270.
- [8] 杨波, 秦永元, 柴艳. UKF 在 INS/ GPS 直接法卡尔曼滤波中的应用[J]. 传感技术学报, 2007, 20 (4): 842-846.
(Yang B, Qin Y Y, Chai Y. Application of UKF in direct method of Kalman filter for INS/ GPS[J]. Chinese J of Sensors and Actuators, 2007, 20(4): 842-846.)

(上接第 132 页)