

# 自适应卡尔曼滤波在地磁姿态检测中的应用

龙礼, 张合, 唐玉发, 徐国泰

(南京理工大学 智能弹药技术国防重点学科实验室, 江苏 南京 210094)

**摘要:** 针对多种噪声源作用下地磁姿态检测系统测量精度不足的问题, 利用简化形式的弹丸被动段弹道方程, 建立扩展卡尔曼滤波模型, 通过对系统噪声、测量噪声和舵机噪声的自适应估计, 实现整个滤波过程的自适应化, 最后对自适应滤波方法进行了仿真验证。仿真和实验结果表明, 自适应卡尔曼滤波算法具有较强的可行性, 适用于地磁姿态探测系统。

**关键词:** 兵器科学与技术; 地磁; 姿态探测; 卡尔曼滤波; 自适应滤波

**中图分类号:** TJ430.1      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1000-1093(2013)09-1155-06

**DOI:** 10.3969/j.issn.1000-1093.2013.09.016

## Application of Adaptive Kalman Filter in Geomagnetic Attitude Detection System

LONG Li, ZHANG He, TANG Yu-fa, XU Guo-tai

(Ministerial Key Laboratory of ZNDY, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu, China)

**Abstract:** The measuring precision of geomagnetic attitude detection system is affected by a variety of noise sources. Firstly, an extended Kalman filter model is established by using a simplified ballistic equation of the projectile's passive period, and then the adaptive filtering process is realized through adaptive estimation of the system noise, measurement noise and steering gear noise. Finally, the adaptive filtering method is simulated. The results show that the adaptive Kalman filter algorithm has strong feasibility, and applies to the geomagnetic attitude detection system.

**Key words:** ordnance science and technology; geomagnetism; attitude detection; Kalman filtering; adaptive filtering

### 0 引言

地磁场是地球的固有资源, 连续分布且非常稳定, 利用地磁传感器对地磁场进行测量, 通过相关的算法实现对弹丸飞行姿态角的实时检测, 可以使常规弹药具备制导的能力。基于地磁传感器的简易制导系统具有全天候、全地域、简易高效、性能稳定、抗冲击和过载能力强等特点<sup>[1-4]</sup>, 随着微电子技术的发展和新型地磁传感器的出现, 地磁姿态检测技术得到很大的进步和提高, 其在军事上的发展和应用也备受关注, 逐渐成为导航领域的一个新的研究热点。

利用安装在弹丸上的三轴磁传感器进行地磁场测量时, 测量精度会受到多种噪声源的影响, 如磁测噪声、磁场环境噪声、舵机噪声、磁场信号采集与姿态角解算的时间延迟等。在地磁测量数据处理过程中, 为了降低各种噪声源的影响, 通常采用自适应卡尔曼滤波对系统进行滤波。文献[3]针对地磁航海测量提出一种多模型自适应卡尔曼滤波方法, 滤波模型简单, 计算量小, 但在姿态角变化比较快的情况下效果不理想。文献[4]采用导弹定高飞行时的动力学方程作为卡尔曼滤波模型的状态方程, 利用遗传算法优化变换参数, 滤波效果比较明显, 但状态向

收稿日期: 2012-12-11

作者简介: 龙礼(1987—), 男, 博士研究生。E-mail: longliv5mail@163.com;

张合(1957—), 男, 教授, 博士生导师。E-mail: hezhangz@njust.edu.cn.

量里不包括姿态角,状态方程只针对定高飞行的情况,不能适用全弹道飞行弹丸的姿态角测量。由于自适应卡尔曼滤波能够跟踪磁场的变化情况,不断对系统模型参数进行估计或修正,利用当前观测信息和状态估值补偿状态方程的误差,实现对地磁探测系统的消噪,因此本文针对现有的研究成果,提出一种自适应的扩展卡尔曼滤波算法来解决地磁姿态探测过程中的消噪问题。

## 1 地磁姿态检测系统的滤波模型

### 1.1 状态向量和状态方程

可靠的卡尔曼滤波算法要求有精确的函数模型,然而,飞行弹丸一般难以确保规则运动,因而精确的函数模型的构造十分困难。地磁导航主要工作于弹丸飞行的被动段,可以采用被动段的弹道方程作为卡尔曼滤波的状态方程。但是现在普遍使用的弹道方程比较复杂,不适合直接用于卡尔曼滤波的模型建立,因此必须对弹道方程进行化简。忽略一些对姿态角求解精度影响不大的系数,可以得到简化形式的弹道方程为

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = (-mg \sin \theta \cos \varphi - F_d)/m, \\ \frac{dx}{dt} = v \cos \varphi \cos \theta, \\ \frac{dy}{dt} = v \cos \varphi \sin \theta, \\ \frac{dz}{dt} = v \sin \varphi, \\ \frac{d\theta}{dt} = (-mg \cos \theta)/mv \cos \varphi, \\ \frac{d\varphi}{dt} = (mg \sin \theta \sin \varphi)/mv, \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_\varepsilon, \\ \frac{d\omega_\varepsilon}{dt} = \left( \frac{1}{2} \rho v^2 S l m_{x\omega} - \frac{1}{2} \rho v S l d m'_{xd} \frac{d\gamma}{dt} \right) / C, \end{cases} \quad (1)$$

式中: $v$ 为弹丸速度; $x$ 、 $y$ 、 $z$ 为弹丸在发射坐标系中的坐标, $x$ 表示射程, $y$ 表示高度, $z$ 表示偏航距离; $F_d$ 为阻力,与弹形系数,弹的高度以及弹的速度有关,可编成表格,在卡尔曼滤波过程中利用高度 $y$ 和速度 $v$ 查表求得; $\theta$ 、 $\varphi$ 和 $\gamma$ 分别为俯仰角、偏航角和滚转角; $\omega_\varepsilon$ 为滚转角速度; $m$ 为弹丸质量; $m_{x\omega}$ 为导转力矩系数; $m_{xd}$ 为极阻尼力矩系数; $\rho$ 为空气密度; $S$ 为弹体横截面积; $l$ 为弹长; $d$ 为弹径; $C$ 为极转动惯量。

根据(1)式,选取 $\mathbf{X} = [v, x, y, z, \theta, \varphi, \gamma, \omega]^\top$ 为状态向量,构建线性离散化状态方程为

$$\mathbf{X}_k = \mathbf{f}(\mathbf{X}_{k-T}) + \mathbf{W}_{k-T}, \quad (2)$$

式中: $\mathbf{f}(\mathbf{X}_k) = \mathbf{X}_k + \Delta \mathbf{X}$ , $\Delta \mathbf{X}$ 为状态向量 $\mathbf{X}$ 在时间 $T$ 内的增量,函数 $\mathbf{f}(\mathbf{X}_k)$ 可由(1)式根据4阶龙格库塔公式求取; $\mathbf{W}_k$ 为系统噪声,即 $\mathbf{W}_k = [W_v, W_x, W_y, W_z, W_\theta, W_\varphi, W_\gamma, W_\omega]^\top$ 。

### 1.2 量测向量和量测方程

由于地磁姿态探测系统的传感器输出的是三轴磁信号,所以通常采用磁传感器的分量输出作为量测向量。为了方便建立量测方程,取 $\mathbf{Z} = [z_x, z_y, z_z]^\top = \mathbf{H}_m - \mathbf{B}$ 为量测向量,其中, $\mathbf{H}_m$ 为磁传感器的分量输出, $\mathbf{B}_{1 \times 3}$ 为输出信号的偏移向量。为了建立状态向量和量测向量之间的联系,需要用到地磁矢量在弹体坐标系下表达式以及磁传感器输出的误差表达式:

$$\mathbf{H}_e = \mathbf{g}(\mathbf{X}) \mathbf{H}_1, \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_m = \mathbf{C} \mathbf{H}_e + \mathbf{B}, \quad (4)$$

$$\text{式中: } \mathbf{g}(\mathbf{X}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \text{为地磁坐}$$

标变换矩阵; $\mathbf{H}_1$ 为发射坐标系下三轴磁场分量; $\mathbf{C}_{3 \times 3}$ 为传感器输出的误差矩阵。通过(3)式和(4)式可以得到相应的量测方程为

$$\mathbf{Z}_k = \mathbf{h}(\mathbf{X}_k) + \mathbf{V}_k, \quad (5)$$

式中: $\mathbf{h}(\mathbf{X}) = \mathbf{C} \mathbf{g}(\mathbf{X}) \mathbf{H}_1$ ; $\mathbf{V}_k$ 为量测噪声。

## 2 自适应扩展卡尔曼滤波算法

针对不同的工程应用背景,国内外学者已经提出了多种自适应的卡尔曼滤波算法,其中应用比较多的主要有基于信息的开窗法(IAE)和基于多模型自适应滤波法(MMAE)等,2种方法针对不同的系统都能取得不错的滤波效果<sup>[5-7]</sup>。本文根据地磁探测系统的实际情况,在IAE的基础上,结合对传感器误差系数的自适应估计,提出一种适用于地磁姿态探测系统的自适应扩展卡尔曼滤波算法。

### 2.1 扩展卡尔曼滤波

扩展卡尔曼滤波的基本流程可以用图1表示,图中: $\mathbf{Q}_{7 \times 7}$ 为系统噪声协方差阵; $\mathbf{R}_{3 \times 3}$ 为量测噪声协方差阵; $\hat{\mathbf{X}}_k^-$ 为状态估计的一步预测; $\hat{\mathbf{X}}_k$ 为修正

后的状态估计;  $\mathbf{P}_k^-$  为一步预测均方误差阵;  $k_0$  为采样起始时刻;  $\mathbf{P}_k$  为验后均方误差阵;  $\mathbf{K}_k$  为卡尔曼滤波增益矩阵;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵。  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  实际上也是随时间变化的,其取值直接影响卡尔曼滤波的性能,对  $\mathbf{Q}$  和  $\mathbf{R}$  的自适应估计方法可以采用 IAE 法<sup>[7-8]</sup>。

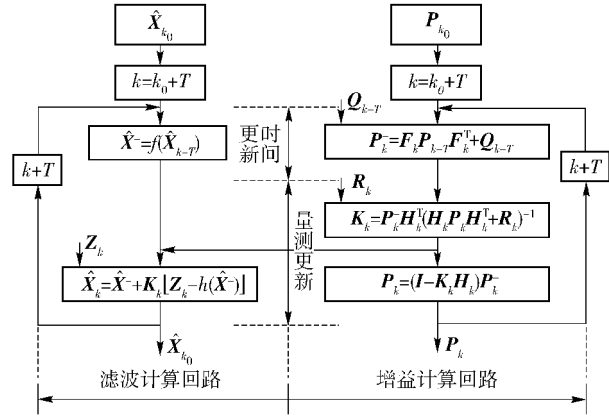


图1 扩展卡尔曼滤波流程图

Fig.1 Flowchart of extended Kalman filter

$\mathbf{F}$  是  $\mathbf{f}$  对  $\mathbf{X}$  的偏导的雅克比矩阵:

$$F(i,j) = \left. \frac{\partial f(i)}{\partial X(j)} \right|_{X(j) = \hat{x}_{k-T}(j)}, \quad i = 1, 2, \dots, 7; j = 1, 2, \dots, 7. \quad (6)$$

$\mathbf{H}$  是  $\mathbf{h}$  对  $\mathbf{X}$  的偏导的雅克比矩阵:

$$H(i,j) = \left. \frac{\partial h(i)}{\partial X(j)} \right|_{X(j) = \hat{x}_{k-T}(j)}, \quad i = 1, 2, 3; j = 1, 2, \dots, 7. \quad (7)$$

扩展卡尔曼滤波能够定量识别状态方程和量测方程中各种信息的质量,自动确定这些信息的利用程度。卡尔曼滤波增益  $\mathbf{K}_k$  实际上决定了对量测值  $Z_k$  上一步估计值  $\hat{x}_{k-T}$  利用的比例程度。若量测精度很差,即  $\mathbf{R}$  很大,则  $\mathbf{K}_k$  很小,预测值对状态方程的利用权重增大,反之则对量测方程的利用权重增大。

### 2.2 传感器误差系数的自适应估计

传感器误差系数包括误差矩阵  $\mathbf{C}$  和偏移矢量  $\mathbf{B}$ ,通常是选取几组具有代表意义的实测数据利用最小二乘法拟合得到<sup>[9]</sup>,然而,在弹丸飞行过程中传感器的误差系数受外界条件的影响也会发生变化,若用固定值代替误差系数,必然会影响量测方程的准确性,进而降低卡尔曼滤波器的性能。在这里,利用最小二乘递推法对传感器误差系数进行自适应估计。

传感器的误差模型可以用(4)式表示,如果变换误差矩阵  $\mathbf{C}$  可逆,那么可以把误差模型转换成

$$\mathbf{H}_e = \mathbf{C}^{-1}(\mathbf{H}_m - \mathbf{B}). \quad (8)$$

令  $\mathbf{C}^{-1} = [a, b, c; d, e, f; g, h, l], \mathbf{B} = [b_1, b_2, b_3]^T, \mathbf{H}_e = [H_e^x, H_e^y, H_e^z]^T, \mathbf{H}_m = [H_m^x, H_m^y, H_m^z]^T$ , 则(8)式可以化为

$$H_e^x = [H_m^x, H_m^y, H_m^z, -1][a, b, c, s_1]^T, \quad (9)$$

$$H_e^y = [H_m^x, H_m^y, H_m^z, -1][d, e, f, s_2]^T, \quad (10)$$

$$H_e^z = [H_m^x, H_m^y, H_m^z, -1][g, h, l, s_3]^T, \quad (11)$$

式中:  $s_1 = ab_1 + bb_2 + cb_3; s_2 = db_1 + eb_2 + fb_3; s_3 = gb_1 + hb_2 + lb_3$ .

令  $y^1 = H_e^x, y^2 = H_e^y, y^3 = H_e^z, \mathbf{o}^1 = [a, b, c, s_1]^T, \mathbf{o}^2 = [d, e, f, s_2]^T, \mathbf{o}^3 = [g, h, l, s_3]^T, \mathbf{G} = [H_m^x, H_m^y, H_m^z, -1]$ , 则  $y^i (i = 1, 2, 3, k = 1, 2, \dots, n)$  表示  $y^1, y^2$  和  $y^3$  的  $n$  组采样值,  $\mathbf{o}^i (i = 1, 2, 3, k = 1, 2, \dots, n)$  表示与采样值对应的误差系数,通过(9)式~(11)式可建立共同的量测方程

$$y_k^i = \mathbf{G}\mathbf{o}_k + n_k^i. \quad (12)$$

递推最小二乘估计的步骤:

- 1) 取最小二乘拟合法求得的误差系数为初值  $\hat{x}_0, \mathbf{q}_0 = \alpha \mathbf{I}$  ( $\alpha$  为充分大的实数);
- 2) 计算  $\mathbf{q}_k = \mathbf{q}_{k-1} \mathbf{G}_k^T [\mathbf{G}_k^T \mathbf{q}_{k-1} \mathbf{G}_k]^{-1} \mathbf{G}_k \mathbf{q}_{k-1}$ ;
- 3) 计算  $\hat{o}_k^i = \hat{o}_{k-1}^i + \mathbf{q}_k \mathbf{G}_k^T (y_k^i - \mathbf{G}_k \hat{x}_{k-1})$ .

式中:  $\mathbf{q}$  为误差系数矩阵的极大验后估计,  $\mathbf{q}_0$  为  $\mathbf{q}$  的初值;  $\hat{x}_k$  表示误差系数估计值。利用递推最小二乘估计法,可以实时地对误差矩阵  $\mathbf{C}$  和偏移矢量  $\mathbf{B}$  中的 12 个误差系数进行自适应估计。

### 3 系统仿真

为了对设计的卡尔曼滤波系统进行仿真,建立的弹体结构参数如表1所示,建立的仿真参数如表2所示,由于地磁姿态探测系统需要外部提供偏航角,为了方便计算,假设偏航角始终为  $0^\circ$ ,即弹丸在  $xOy$  的二维平面内飞行。总飞行时间 60 s,采样间隔为 0.01 s,为了模拟舵机打舵时对磁场测量的影响,飞行过程中加入一次周期为 0.5 s 的磁场突变,突变时的磁场测量噪声加大 10 倍。运用自适应的扩展卡尔曼滤波算法进行导航计算,由于整个弹道过程采样点太多,为了更清楚地表示滤波效果,选取舵机打舵前后的一段采样点进行数据分析,画出滚转角和俯仰角的滤波效果图分别为图1和图2所示,从图中可以看出,滤波效果可以分为3个阶段:第1阶段为采样点 250~300,系统在没有磁场突变时,能够比较明显地实现消噪处理,滚转角和俯仰角呈平滑的曲线;第2阶段为采样点 300~350,在舵机打舵期间,磁场变化比较剧烈,系统不能完全实现

消噪处理,但是仍能够大幅度减小噪声影响;第3阶段为350~450,打舵结束后,系统经过一段时间的自适应调整,仍能实现消噪。

表 1 弹体结构参数

Tab. 1 Structural parameters of missile body

参数	数值
质量 $m/\text{kg}$	40
弹长 $l/\text{m}$	0.96
弹径 $d/\text{m}$	0.12
弹体横截面积 $S/\text{m}^2$	0.011
空气密度 $\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	1.206
导转力矩系数 $m_{xw}$	0.03
极阻尼力矩系数 $m_{xd}$	0.015
极转动惯量 $C$	0.0289 1

表 2 仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值
初始俯仰角误差/ $^\circ$	2
初始滚转角误差/ $^\circ$	3
初始速度误差/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	40
$x$ 轴地磁测量噪声/ $\text{nT}$	25
$y, z$ 轴地磁测量噪声/ $\text{nT}$	250

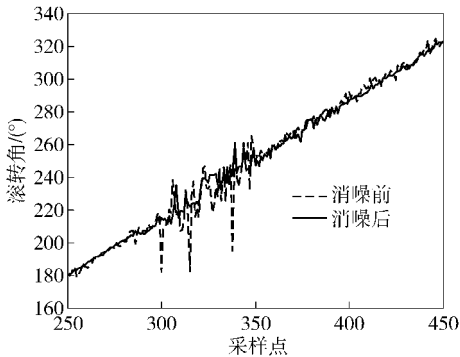


图 2 滚转角滤波效果图

Fig. 2 Filtering effect diagram of roll angle

## 4 实验验证

为了验证所设计的卡尔曼滤波算法的可行性,本文采用伸缩式电磁舵机和三轴无磁转台建立实验系统对算法进行验证。由于伸缩式电磁舵机在打舵时对磁场的影响很大,所以先采用屏蔽材料对伸缩舵机的电机部分进行包裹,屏蔽部分磁场,降低打舵时的瞬间干扰磁场峰值。然而,由于磁屏蔽材料的引入,会产生附加的干扰磁场,但这一磁场对姿态检测结果的影响是稳定的,即这一磁场只改变误差矩阵  $C$  和误差偏移矢量  $B$ ,而矩阵  $C$  和  $B$  是可以利用

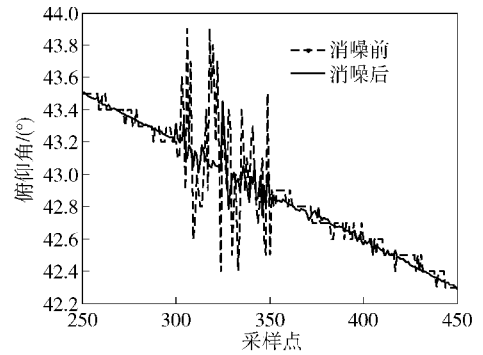


图 3 俯仰角滤波效果图

Fig. 3 The filtering effect diagram of pitch angle

2.2 节提到的方法得到。

### 4.1 舵机屏蔽实验

磁屏蔽是以某种导电材料或者导磁材料制成的屏蔽体将被防护区域封闭起来,形成磁隔离,以达到阻隔或减少磁场传播的一种技术,是抑制磁场干扰的有效措施。伸缩式电磁舵机的磁环境为 10 Hz 的低频磁场,经分析,坡莫合金(80% 镍)能够同时满足饱和度以及高磁导率的要求,因此选用坡莫合金(80% 镍)作为屏蔽材料。屏蔽罩结构选用盒状结构,屏蔽罩实物如图 4 所示。建立如图 4 所示的实验系统对屏蔽罩的屏蔽效果进行验证,将舵机放在距离磁探测模块 15 cm 的距离,分别对加屏蔽罩和不加屏蔽罩 2 种情况进行打舵实验。图 5 为不加屏蔽罩的情况下磁探测模块的三轴输出分量,由图中可以看出,舵机打舵和收舵 2 个过程对三轴地磁分量输出的影响为类似正反脉冲形式的磁场突变,瞬间干扰磁场峰值且瞬间干扰磁场峰值比较大。图 6 为加了屏蔽罩后磁探测模块的三轴输出分量,从图中可以看出,瞬间干扰磁场峰值明显降低,分析实验数据可以发现,敏感轴与舵机方向一致的  $x$  轴的瞬间干扰磁场峰值降低到原来的 45%,敏感轴与舵机方向垂直的  $y$  轴和  $z$  轴的瞬间干扰磁场峰值降低到原来

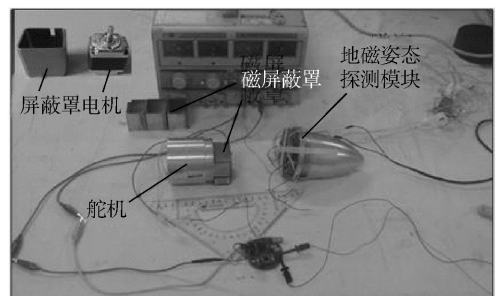


图 4 舵机噪声源滤波实验系统

Fig 4 Filtering experimental system of servos noise source

的7.5%,屏蔽效果比较明显。同时通过实验结果可以看出,三轴的输出分量存在一定量的偏移,由于敏感轴与舵机方向一致,x轴输出分量的偏移最大,这是由于给舵机加上屏蔽罩后产生的干扰,主要为硬磁干扰,可以通过2.2节中提到的方法进行补偿。

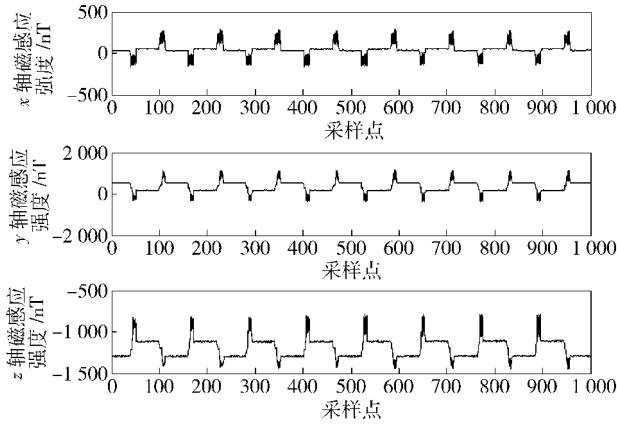


图5 无屏蔽打舵

Fig. 5 Three-axis magnetic field components output

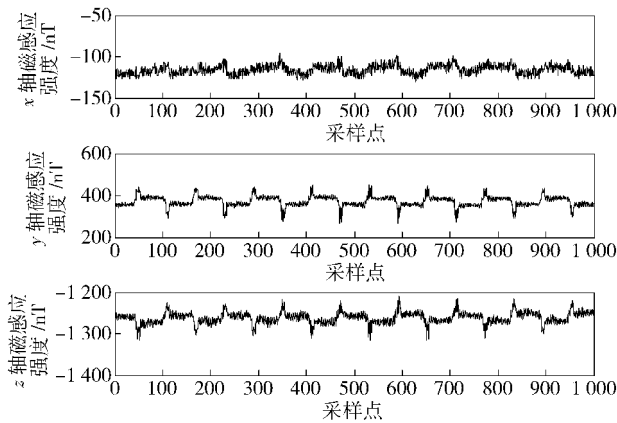


图6 合金屏蔽罩

Fig. 6 Roll angle and pitch angle output

### 4.2 卡尔曼滤波实验

为了验证所设计的卡尔曼滤波算法的可行性,本文利用伸缩式电磁舵机和三轴无磁转台建立实验系统对算法进行验证。建立如图7所示的实验系统。由于三轴无磁转台无法一次完成整个弹道的模拟,故只能分段进行实验验证。将转台的射向设置为 $90^\circ$ ,舵机正常工作,分别测量弹丸姿态角检测系统在俯仰角为 $25^\circ$ 和 $-35^\circ$ 在2个方向进行滚转运动时的三路地磁传感器输出信号,然后利用文中的方法进行消噪处理。由于实验环境与弹丸实际弹道环境不同,状态方程也要做相应的改变。将弹道方程中的俯仰角 $\theta$ 和偏航角 $\varphi$ 的表达式用实验中的固定值代替,利用三轴无磁转台输出的滚转角速度代替 $\omega_z$ 。

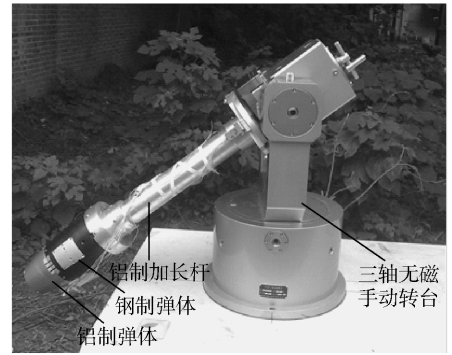


图7 安装加长杆和弹体的三轴转台

Fig. 7 Axis turntable to install extension bar and missile body

图8和图9是俯仰角分别为 $25^\circ$ 和 $-35^\circ$ 时,无屏蔽处理、有屏蔽处理和同时进行屏蔽与消噪处理3种条件下的俯仰角输出值。从图中可以看出,进行磁屏蔽和消噪处理后俯仰角输出值波动明显减小。经过数据分析可以得到3种条件下的俯仰角误差均值如表3所示。进行屏蔽和消噪处理后的俯仰角误差均值满足地磁姿态检测系统的指标要求。

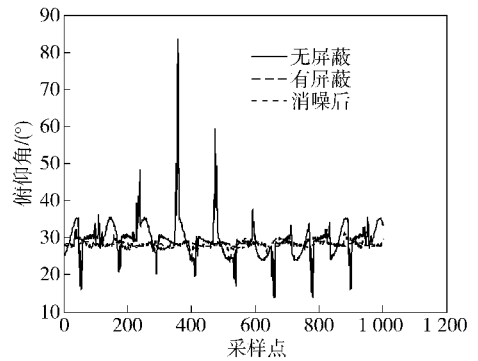


图8 俯仰角为 $25^\circ$ 时的俯仰角输出值

Fig. 8 Pitch angle output values at pitch angle of  $25^\circ$

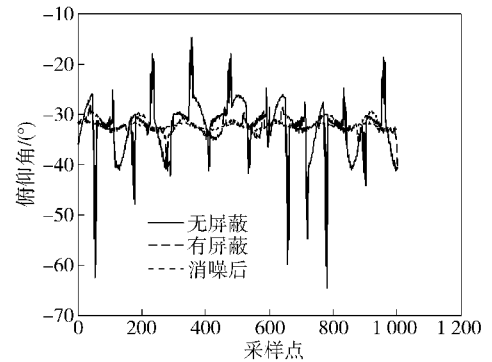


图9 俯仰角为 $-35^\circ$ 时的俯仰角输出值

Fig. 9 Pitch output values at pitch angle of  $-35^\circ$

图10和图11是俯仰角分别为 $25^\circ$ 和 $-35^\circ$ 时,无屏蔽处理、有屏蔽处理和同时进行屏蔽与消噪处

表 3 俯仰角误差均值

Tab.3 Pitch angle error

条件	俯仰角/(°)	
	25	-35
无屏蔽	4.790 06	4.873 83
有屏蔽	3.916 83	2.952 94
屏蔽+消噪	3.618 61	2.584 00

理 3 种条件下的滚转角输出值。为了更清楚地表示滚转角的变化,对采样输出曲线进行了局部放大。经过数据分析可以得到 3 种条件下的滚转角误差均值如表 4 所示。进行屏蔽和消噪处理后的滚转角误差均值满足地磁姿态检测系统的指标要求。

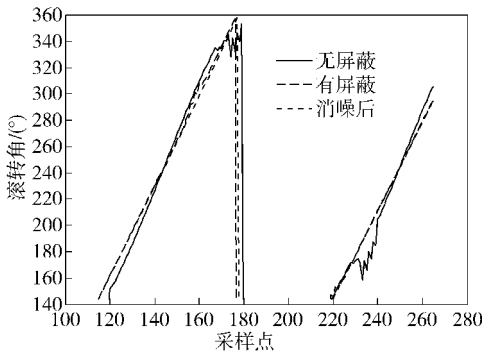


图 10 俯仰角为 25°时的滚转角输出值

Fig.10 Roll angle output values at pitch angle of 25°

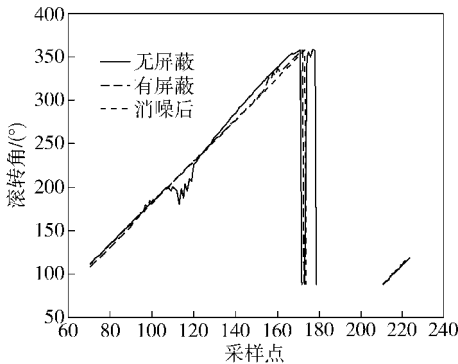


图 11 俯仰角为 -35°时的滚转角输出值

Fig.11 Roll angle output values at pitch angle of -35°

表 4 滚转角误差均值

Tab.4 Roll angle error

条件	俯仰角/(°)	
	25	-35
无屏蔽	12.530 35	14.356 09
有屏蔽	4.044 45	4.116 57
屏蔽+消噪	3.546 96	3.161 37

经过实验验证和数据分析,验证了卡尔曼滤波

算法在实际应用中的可行性。

## 5 结论

本文针对多种噪声源作用下地磁姿态检测系统测量精度不足的问题,利用弹丸被动段的简化弹道方程,建立了扩展卡尔曼滤波模型,通过对系统噪声、测量噪声和舵机噪声的自适应估计,实现整个滤波过程的自适应化,最后对自适应滤波方法进行了仿真验证。仿真和实验结果表明,自适应卡尔曼滤波算法除了能够对已知的稳定噪声源进行消噪,还能大幅度减小未知的突变噪声源的影响,具有较强的可行性,适用于地磁姿态检测系统。

## 参考文献 (References)

- [1] 孙中豪,牛艳艳,王永收. 扩展卡尔曼滤波在地磁导航中的应用分析 [J]. 北京测绘,2011,(1):10~13.  
SUN Zhong-hao, NIU Yan-yan, WANG Yong-shou. The application analysis of EKF in geomagnetic autonomous navigation [J]. Beijing Surveying and Mapping, 2011,(1): 10-13. (in Chinese)
- [2] 徐广晨,翁泽宇,丁红钢,等. 模糊自适应卡尔曼滤波在惯性/地磁导航中的应用 [J]. 舰船科学技术,2010,32(5):68-72.  
XU Guang-chen, WENG Ze-yu, DING Hong-gang, et al. The application of fuzzy adaptive Kalman filter in INS/GNS integrated navigation system [J]. Ship Science and technology, 2010, 32(5): 68-72. (in Chinese)
- [3] 闫辉,肖昌汉,苏广东. 多模型卡尔曼滤波在地磁场航海测量中的应用 [J]. 测绘科学,2010,35(1):41-43.  
YAN Hui, XIAO Chang-han, SU Guang-dong. Application of multi-model Kalman filtering in surveying marine geomagnetic field [J]. Science of Surveying and Mapping, 2010, 35(1): 41-43. (in Chinese)
- [4] 郭才发,胡正东,赵星,等. 自适应滤波在磁暴期间地磁导航中的应用 [J]. 宇航学报,2010,31(8):1927-1932.  
GUO Cai-fa, HU Zheng-dong, ZHAO Xing, et al. Application of adaptive filter in geomagnetic navigation under magnetic storms [J]. Journal of Astronautics, 2010, 31(8): 1927-1932. (in Chinese)
- [5] 杨元喜,何海波,徐天河. 论动态自适应滤波 [J]. 测绘学报,2001,30(4):293-298.  
YANG Yuan-xi, HE Hai-bo, XU Tian-he. Adaptive robust filtering for kinematic GPS positioning [J]. 2001,30(4):293-298. (in Chinese)
- [6] Yang Y X, He H, Xu G. Adaptively robust filtering for kinematic geodetic positioning [J]. Journal of Geodesy, 2001, 75(2-3): 109-116.
- [7] Mohamed A H, Schwarz K P. Adaptive Kalman filtering for INS/GPS [J]. Journal of Geodesy, 1999, 73(4): 193-203.
- [8] Koch K R, Yang Y. Robust Kalman filter for rank deficient observation models [J]. Journal of Geodesy, 1998, 72(7-8): 436-441.
- [9] Alonso R, Shuster M. Complete linear attitude independent magnetometer calibration [J]. Journal of Astronautical Sciences, 2002, 50(4): 477-490.