

文章编号: 1672-6987(2019)06-0085-05; DOI: 10.16351/j.1672-6987.2019.06.012

# 基于卡尔曼滤波和互补滤波的改进型姿态解算方法

李庆党<sup>a</sup>, 张义龙<sup>b</sup>

(青岛科技大学 a.中德科技学院; b.自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 四元数融合互补滤波通常采用三轴陀螺仪的角速度积分来获取角度,进而利用角度求得四元数,再由四元数解算出姿态角。但三轴陀螺仪由角速度积分得到的角度由于温漂、单次迭代等原因,往往偏差较大,难以消除,这就导致求得的四元数精度不够,最终影响互补滤波解算出的姿态角的精度。针对这个问题,提出采用卡尔曼滤波融合陀螺仪、加速度计的数据进行基于误差协方差最小的迭代估计,并通过对过程噪声和观测噪声的滤波,最终得到姿态角的最优估计,再将这个估计值代入互补滤波中求得四元数,利用该四元数进行误差负增益调节。本工作基于 STM32F4 搭建实验平台进行验证,结果表明:该改进型姿态解算方法明显地提高了姿态角的精度,具有良好的动态和静态特性。

**关键词:** 最优估计; 姿态解算; 卡尔曼滤波; 互补滤波

中图分类号: TP 13

文献标志码: A

引用格式: 李庆党, 张义龙. 基于卡尔曼滤波和互补滤波的改进型姿态解算方法[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2019, 40(6): 85-89.

LI Qingdang, ZHANG Yilong. Improved attitude solving method based on Kalman filter and complementary filtering[J]. Journal of Qingdao University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2019, 40(6): 85-89.

## Improved Attitude Solving Method Based on Kalman Filter and Complementary Filtering

LI Qingdang<sup>a</sup>, ZHANG Yilong<sup>b</sup>

(a.Sino-German College of Science and Technology; b.College of Automation and Electronic Engineering, Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** The quaternion fusion complementary filter usually uses the angular velocity integral of the three-axis gyroscope to obtain the angle, and then uses the angle to obtain the quaternion, and then the quaternion solution calculates the attitude angle. However, the angle obtained by the angular velocity integral of the three-axis gyroscope tends to be large and difficult to eliminate due to temperature drift, single iteration, etc., which leads to insufficient accuracy of the obtained quaternion, and finally affects the attitude angle calculated by the complementary filtering solution. Aiming at this problem, it is proposed to use Kalman filter fusion gyroscope and accelerometer data to perform iterative estimation based on minimum error covariance, and filter the process noise and observation noise, and finally obtain the optimal estimation of the attitude angle. The value is substituted into the complementary filter to obtain the quaternion, and the method of calculating the attitude angle is solved.

收稿日期: 2018-10-14

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2017CXGC0607, 2017GGX30145).

作者简介: 李庆党(1974—),男,“泰山学者”特聘教授,博士生导师。

Based on the STM32F4 construction experimental platform, the results show that the improved attitude settlement method significantly improves the accuracy of the attitude angle and has good dynamic and static characteristics.

**Key words:** optimal estimation; attitude solution; Kalman filter; complementary filtering

姿态解算是惯性导航系统及其他姿态监测控制系统的重要组成部分,其解算精度会直接影响惯性导航系统和其他姿态控制系统的控制精度<sup>[1]</sup>。随着微机电技术的发展,三轴 MEMS 陀螺仪、加速度计、磁力计成为最主要的惯性测量器件。但现有的 MEMS 器件存在某些缺陷:MEMS 陀螺仪会随时间积累误差;MEMS 三轴加速度计高频特性差,在运动过程中会受到三轴上附加加速度的影响;MEMS 三轴磁力计易受环境磁场的干扰而失效。

因此往往采用互补滤波的方法,结合几种 MEMS 惯性器件的特点,在短时间内采用陀螺仪得到的角度做为最优值,定时对加速度采样来的加速度值进行取平均值来校正陀螺仪的得到的角度。但这种方法解算出的姿态角往往存在精度不够、动态效果差的问题。本工作提出的改进型互补滤波方法采用卡尔曼滤波融合三轴陀螺仪和三轴加速度计的数据,得到真实角度的最优估计,然后与磁力计的数据一起并入互补滤波算法,最终得到姿态角<sup>[2]</sup>。因为卡尔曼滤波估计出的角度经过了过程噪声和观测噪声的补偿,并由卡尔曼增益的加权优化,精度优于单靠角速度积分得到的角度。因此提高了解算精度。

## 1 常规互补滤波法

鉴于加速度计低频特性比较好,因为加速度的

$$C_n^b = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \psi & \sin \psi \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos \psi \sin \theta \sin \varphi - \sin \psi \cos \varphi & \sin \psi \sin \theta \sin \varphi + \cos \psi \cos \varphi & \cos \theta \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \theta \cos \varphi + \sin \psi \sin \varphi & \sin \psi \sin \theta \cos \varphi - \cos \psi \sin \varphi & \cos \theta \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (1)$$

通过该转换矩阵可以将欧拉角转换为四元数,

$$\text{设四元数 } Q = \begin{bmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{bmatrix}, \text{ 则}$$

$$C_n^b = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1 q_2 - q_0 q_3) & 2(q_1 q_3 + q_0 q_2) \\ 2(q_1 q_2 + q_0 q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) & 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可实现四元数与欧拉角之间的转换,这是互补滤波姿态解算的重要公式<sup>[5]</sup>。

角度可以直接算出来,没有累积误差,所以长时间后也比较准。而陀螺仪长时间后由于积分误差的累加,会造成输出误差比较大,甚至无法使用。所以用互补滤波法根据他们的特性取长补短进行姿态解算,每过一段时间就让加速度计去校准一下陀螺仪。互补滤波就是在短时间内采用陀螺仪得到的角度做为最优值,定时对加速度采样来的加速度值进行取平均值来校正陀螺仪的得到的角度<sup>[3]</sup>。短时间内用陀螺仪比较准确,以它为主;长时间用加速度计比较准确,这时候加大它的比重。

### 1.1 欧拉角的描述

在惯性导航系统中往往采用两个坐标系来描述姿态角。一个是与载体固连的坐标系,即  $b$  系,其三轴  $x, y, z$  分别按载体前、右、下的方向选取。一个是地理坐标系<sup>[4]</sup>,即  $n$  系,它是固定不变的,其三轴  $x, y, z$  分别按正北、正东、正上方向选取。欧拉角即载体绕固定轴旋转之后, $n$  系各轴与  $b$  系各轴之间的夹角。分别为偏航角  $\psi$ 、俯仰角  $\theta$ 、横滚角  $\varphi$ 。

### 1.2 四元数与欧拉角的转换

根据四元数与欧拉角之间的关系,通过欧拉角可以得到地理坐标系到载体坐标系之间的转换矩阵

$C_n^b$  为

### 1.3 由陀螺仪、加速度计、磁力计互补求得欧拉角

姿态计算初始,需将载体初始姿态角带入式(1)、(2),求得初始时刻的四元数。然后获取陀螺仪三轴角速度、加速度计三轴加速度、磁力计三轴磁力值,并做归一化处理<sup>[6]</sup>。从四元数中获取重力向量和磁力向量。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = C_n^b \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} w_x \\ w_y \\ w_z \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} 1-2(q_2^2+q_3^2) & 2(q_1q_2-q_0q_3) & 2(q_1q_3+q_0q_2) \\ 2(q_1q_2+q_0q_3) & 1-2(q_1^2+q_3^2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) \\ 2(q_1q_3-q_0q_2) & 2(q_2q_3+q_0q_1) & 1-2(q_1^2+q_2^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_x \\ 0 \\ b_z \end{bmatrix} \quad (4)$$

式(3)中 $v_x$ 、 $v_y$ 、 $v_z$ 分别三轴上的重力向量,(4)式中 $w_x$ 、 $w_y$ 、 $w_z$ 分别为三轴上的磁场向量。利用(3)、(4)两式得到的向量计算出误差 $[e_x \ e_y \ e_z]$ 用于修正陀螺仪。再利用修正后的陀螺仪角度更新

四元数<sup>[7]</sup>,最后将四元数转换成欧拉角。

$$\begin{cases} \varphi = \arctan \frac{2(q_1q_2+q_0q_3)}{1-2(q_2^2+q_3^2)}, \\ \theta = -\arcsin 2(q_1q_3-q_0q_2), \\ \psi = \arctan \frac{2(q_2q_3+q_0q_1)}{1-2(q_1^2+q_2^2)}. \end{cases} \quad (5)$$

#### 1.4 常规互补滤波结构框图

常规互补滤波结构框图见图1。

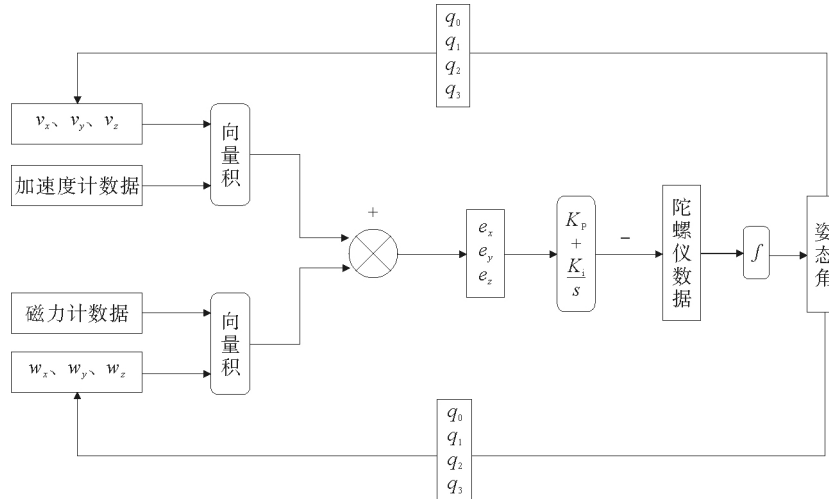


图1 常规互补滤波结构框图

Fig.1 Conventional complementary filter block diagram

#### 1.5 常规互补滤波缺陷

互补滤波中陀螺仪采集到的角速度在进行积分的时候没有过滤掉温度漂移所带来的噪声,使陀螺仪测的角度始终存在误差,在该误差的影响下,通过欧拉角转换成的四元数也存在误差,由此四元数进行单位化、向量积求得的误差向量也会存在精度不够的问题,最终导致补偿效果不佳。

互补滤波中陀螺仪角速度积分的迭代次数不够多,容易导致积分出的角速度存在计算上的偏差;互补滤波中的传递函数所需的参数是经过多次迭代后不断调试得出的,因此不同的实验平台,需重新确定参数,该过程较为繁琐。

## 2 卡尔曼滤波器的设计

卡尔曼滤波的基本思想是以最小均方误差为最佳估计准则,采用信号与噪声的数学模型,利用前一时刻的估计值和当前时刻的观测值来更新对状态变量的估计<sup>[8]</sup>。可利用陀螺仪输出的数据与噪声建立系统状态方程,以加速度计融合得出的角度与误差建立观测方程,进行迭代估计,可以得到精确度较高

的姿态角。

#### 2.1 过程方程和观测方程

在整个卡尔曼滤波器中,过程方程和观测方程的建立尤为重要,关系到整个滤波器的性能。这里以三轴陀螺仪角速度与温漂为状态变量,以角速度、温漂为输入量,建立如下过程方程:

$$\begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} \\ Q_{\text{bias}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} \\ Q_{\text{bias}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} \omega \quad (6)$$

其中: $Q_{\text{angle}}$ 为陀螺仪测得的角度, $Q_{\text{bias}}$ 为温漂, $\omega$ 为陀螺仪输出的角速度。

以加速度计测的角度与测量误差作为参数建立观测方程:

$$Q_{\text{angle}} = [1 \ 0] \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} \\ Q_{\text{bias}} \end{bmatrix} + R \quad (7)$$

其中: $Q_{\text{angle}}$ 为加速度计利用加速度与反三角函数测得的角度,作为系统观测量, $R$ 为观测误差。

#### 2.2 先验估计

由(6)式代入 $x(k|k-1) = Ax(k-1|k-1) + Bu(k)$ 可得

$$Q_{\text{angle}} = Q_{\text{angle}} + (\omega - Q_{\text{bias}}) \times dt \quad (8)$$

用积分累积的方法得到角度,并滤除温漂。

### 2.3 误差协方差

卡尔曼滤波误差协方差公式为  $P(k|k-1) = AP(k-1|k-1)A^T + Q$ , 设  $P = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix}$ , 过程噪声协方差  $Q$  由陀螺仪角度噪声和角速度噪声组成<sup>[9]</sup>, 因为二者相互独立<sup>[10]</sup>, 因此  $Q = \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} & 0 \\ 0 & Q_{\text{gyro}} \end{bmatrix}$ , 带入协方差公式可得

$$\begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -dt & 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} Q_{\text{angle}} & 0 \\ 0 & Q_{\text{gyro}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 2.4 卡尔曼增益

设卡尔曼增益  $K_g = \begin{bmatrix} k_1 \\ k_1 \end{bmatrix}$ , 由卡尔曼公式得

$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_1 \end{bmatrix} = \frac{P(k|k-1)H^T}{HP(k|k-1)H^T + R}$ , 由式(7)可得  $H = [1 \ 0]$ , 代入卡尔曼增益公式可得

$$\begin{bmatrix} k_1 \\ k_1 \end{bmatrix} = \frac{P(k|k-1) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}{[1 \ 0]P(k|k-1) \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + R} \quad (10)$$

### 2.5 后验估计

卡尔曼滤波后验估计公式为  $x(k|k) = x(k|k-1) + K_g(k)(z(k) - Hx(k|k-1))$ <sup>[11]</sup>, 将  $K_g$  带入可得角度的最优估计值。

### 2.6 误差协方差矩阵更新

$$P(k|k) = (1 - \begin{bmatrix} k & 1 \\ k & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix}) P(k|k-1) \quad (11)$$

## 3 卡尔曼滤波器嵌入互补滤波

卡尔曼滤波器的优点在于对陀螺仪积分所得角度进行温漂噪声过滤, 对加速度计经三角函数所得角度进行观测噪声过滤, 并进行基于误差协方差最小的卡尔曼增益求解<sup>[11]</sup>。针对加速度计低频特性好、陀螺仪高频特性好的特点, 进行卡尔曼增益的加权融合, 得到最接近真实值的最优估计值<sup>[12]</sup>。

将卡尔曼滤波器嵌入常规互补滤波即用卡尔曼滤波器估计出的姿态角代替常规互补滤波中单由陀螺仪角速度积分得到的姿态角, 再利用该姿态角代入四元数微分方程, 得到更加精确的四元数, 再由四元数进行误差反馈调节<sup>[13]</sup>, 从而得到更加精确的姿态角。

卡尔曼滤波器嵌入互补滤波的结构框图如图 2。

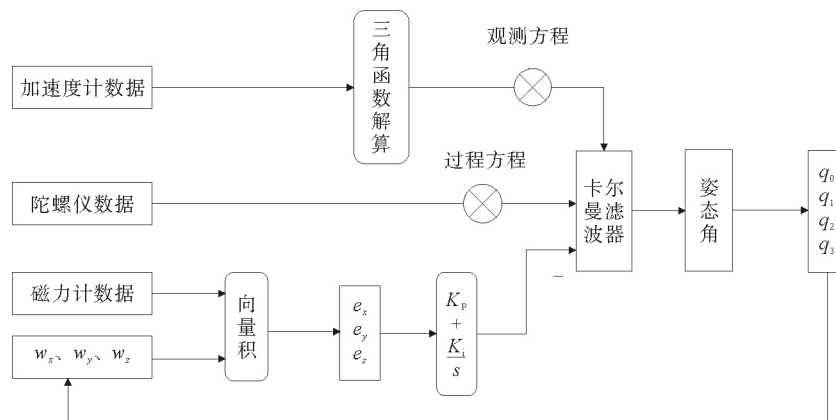


图 2 改进型互补滤波结构框图

Fig.2 Improved complementary filter block diagram

## 4 基于 STM32F4 平台的实验验证

本工作自主搭建了基于 STM32F4 系列芯片的实验平台, 使用 MPU9250 九轴姿态传感器, 进行该改进型滤波算法的验证。MPU9250 融合了三轴陀螺仪、三轴加速度计、三轴磁力计, 使用 IIC 进行驱

动<sup>[14]</sup>, 采集三轴陀螺仪数据和三轴加速度计数据传递给卡尔曼滤波器, 并将卡尔曼滤波器的输出与三轴磁力计的数据代入互补滤波器进行互补融合<sup>[15]</sup>。最终得到经过卡尔曼滤波最优估计和互补滤波传递函数消除误差后的偏航角、俯仰角、横滚角。以偏航角为例, 常规互补滤波效果与改进型互补滤波效果

对比见图3和图4。

由图3、图4可以看出,常规互补滤波角度曲线不够平滑,角度数值不够稳定;而改进型互补滤波的姿态角波形曲线比较平滑,说明改进型互补滤波的姿态角输出较稳定。

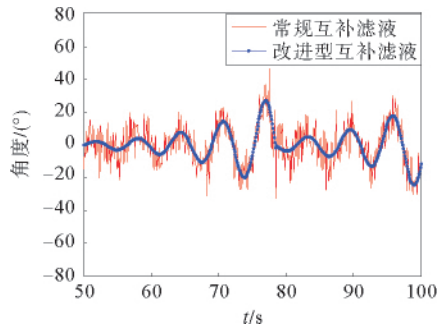


图3 动态过程偏航角曲线图

Fig.3 Dynamic process yaw angle graph

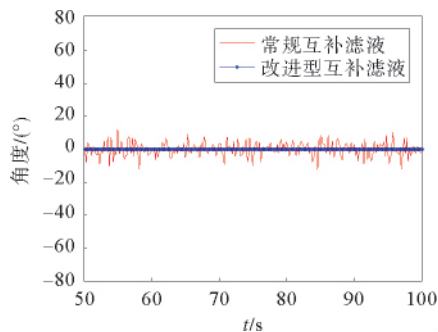


图4 静态过程偏航角曲线图

Fig.4 Static process yaw angle graph

动态时,由图3可以看出,常规互补滤波角度曲线波动较大,收敛速度较慢;而改进型互补滤波曲线依然平滑,收敛速度较快,因此相比于常规互补滤波,改进型互补滤波算法的动态特性有明显改善。

静态时,由图4可以看出,常规互补滤波的角度曲线有上下波动情况,说明常规互补滤波算法没能解决温漂问题;而改进型互补滤波角度曲线是一条直线,说明改进型互补滤波算法消除温漂效果较好。因此相比于常规互补滤波,改进型互补滤波算法的静态特性也有明显提高。

## 5 结 语

针对互补滤波的缺陷,提出采用卡尔曼滤波来弥补互补滤波缺陷的思想,设计了融合陀螺仪、加速度计两种传感器的卡尔曼滤波器。将卡尔曼滤波器嵌入互补滤波中,对互补滤波的缺陷进行补偿。通

过自主搭建的实验平台对改进前和改进后的姿态解算算法进行验证,并将验证结果导入 MATLAB 中进行绘图分析。改进后的姿态解算算法相比于常规互补滤波姿态角输出稳态,静态与动态性能结构有明显提高。

## 参 考 文 献

- [1] MOHAMMED M A S, BELLAR A, BENTOUTOU Y, et al. A comparative study of nadir attitude pointing satellite solutions [C]// IEEE International Conference on Electronics, Circuits, and Systems. IEEE, 2015:191-196.
- [2] MA G, LIU G, HUANG J, et al. Time efficient controller design for spacecraft attitude maneuver based on gauss pseudospectral method[C]// Control Conference. IEEE, 2011.
- [3] POWELL T D. Automated tuning of an extended Kalman filter using the downhill simplex algorithm[J]. Journal of Guidance Control and Dynamics, 1971, 25(5): 901-908.
- [4] 徐梓皓,周召发,孙立江.基于卡尔曼滤波器的姿态角测量系统设计[J].电子测量技术,2014,37(1):1-4.  
XU Zihao, ZHOU Zhaofa, SUN Lijiang. Design of attitude angle measurement system based on Kalman filter [J]. Electronic Measurement Technology, 2014, 37(1): 1-4.
- [5] 万晓凤,康利平,余运俊,等.基于多传感器数据融合的四旋翼飞行器的姿态解算[J].科技导报,2014,32(19):31-35.  
WAN Xiaofeng, KANG Liping, YU Yunjun, et al. Attitude calculation of quadrotor based on multi-sensor data fusion[J]. Science and Technology Review, 2014, 32(19): 31-35.
- [6] 周树道,金永奇,卫克晶,等.采用卡尔曼滤波算法的 MEMS 器件姿态测量[J].实验室研究与探索,2015,34(2):38-42.  
ZHOU Shudao, JIN Yongqi, WEI Kejing, et al. Attitude measurement of MEMS devices using Kalman filter algorithm[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015, 34(2): 38-42.
- [7] 李杰,杨雁宇,冯凯强,等.一种融合互补滤波和卡尔曼滤波高精度姿态测量算法[J].中国惯性技术学报,2018,26(1):51-55.  
LI Jie, YANG Yanyu, FENG Kaiqiang, et al. A high-precision attitude measurement algorithm based on fusion complementary filter and Kalman filter[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2018, 26(1): 51-55.
- [8] 龙云霄,陈洋,滕雄.四旋翼飞行器姿态解算与滤波[J].计算机测量与控制,2016,24(10):194-197.  
LONG Yunlu, CHEN Yang, TENG Xiong. Attitude calculation and filtering of quadrotor aircraft [J]. Computer Measurement and Control, 2016, 24(10): 194-197.
- [9] 古训,陈红.不同姿态解算在平衡车中的实现与应用[J].电子世界,2018(21):120-122.  
GU Xun, CHEN Hong. The realization and application of different attitude solutions in balanced vehicles [J]. Electronic World, 2018 (21): 120-122.

(下转第 98 页)

由于自身硬件的缺陷,搭建的 Hadoop 集群节点少,不能发现大量节点的执行规律,同时,在算法精度方面还需要进一步改进。针对这些问题,将在后面的研究中逐一解决。

### 参 考 文 献

- [1] 段晓华. 数据挖掘技术在电子商务客户关系管理中的应用研究[J]. 湖南文理学院学报(自然科学版), 2010, 22(2):90-94.  
DUAN Xiaohua. Research on application of data mining technologies in electronic commerce environment[J]. Journal of Hunan University of Arts and Science(Natural Science Edition), 2010, 22(2):90-94.
- [2] 肖可砾, 熊辉. 运用数据挖掘技术检测金融欺诈行为[J]. 金融电子化, 2010(8):89-90.  
XIAO Keli, XIONG Hui. Using data mining technology to detect financial fraud[J]. Financial Computerizing, 2010(8):89-90.
- [3] 陈磊, 何国辉. 改进的 C4.5 算法在期货数据挖掘中的研究[J]. 计算机工程与应用, 2017, 53(11): 161-166.  
CHEN Lei, HE Guohui. Research on improved C4.5 algorithm in futures data mining[J]. Computer Engineering and Applications, 2017, 53(11): 161-166.
- [4] XIE X J, LI S Y. Futures trading strategies based on the big data[J]. Agro Food Industry Hi-Tech, 2017, 28(3):2550-2553.
- [5] YAN Q, WU L, ZHENG L. Social network based microblog user behavior analysis[J]. Social Network Based Microblog User Behavior Analysis, 2013, 392(7):1712-1723.
- [6] LI P, ZHANG M, LIANG T, et al. Electronic book recommendation method based on group user behavior analysis[J]. International Journal of u- and e-Service, Science and Technology, 2015, 8(12):187-196.
- [7] ZHANG L, ZHU S. Large-scale user behavior analysis[J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2014, 32(6):7729-7734.
- [8] 杨勇, 王伟. 一种基于 MapReduce 的并行 FP-growth 算法[J]. 重庆邮电大学学报(自然科学版), 2013, 25(5):651-657.  
YANG Yong, WANG Wei. A parallel FP-growth algorithm based on MapReduce[J]. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications(Natural Science Edition), 2013, 25(5):651-657.
- [9] 朱坤, 黄瑞章, 张娜娜. 一种基于 MapReduce 模型的高效频繁项集挖掘算法[J]. 计算机科学, 2017, 44(7):31-37.  
ZHU Kun, HUANG Ruizhang, ZHANG Nana. Efficient frequent patterns mining algorithm based on MapReduce model[J]. Computer Science, 2017, 44(7):31-37.
- [10] MO Y, CHEN J, XIE X, et al. Cloud-based mobile multimedia recommendation system with user behavior information[J]. IEEE Systems Journal, 2014, 8(1):184-193.
- [11] LU G, ZHANG Q, CHEN Z. Telecom data processing and analysis based on hadoop[J]. Computer Modelling and New Technologies, 2014, 18(12):658-664.
- [12] WU D, ZHANG Y, YANG F, et al. Improved  $k$ -means algorithm based on optimizing initial cluster centers[J]. Icic Express Letters, 2013, 7(3):991-996.
- [13] 唐德玉, 曹东, 杨进. 一种改进初始中心点的 FCM 算法[J]. 现代计算机, 2016(11):7-11.  
TANG Deyu, CAO Dong, YANG Jin. A FCM algorithm based on improved initial cluster center[J]. Modern Computer, 2016(11):7-11.
- [14] 袁鸣, 鲍泳林, 武雨霞. 基于 MEMS 的火箭制导平台 INS 与 GPS 组合导航算法[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2018, 16(5):807-812.  
YUAN Ming, BAO Yonglin, WU Yuxia. Integrated navigation algorithms of INS and GPS for rocket guidance platform based on MEMS[J]. Journal of THz Science and Electronic Information, 2018, 16(5):807-812.
- [15] 黄镇, 张浩磊, 刘梅, 等. 一种二阶互补滤波与卡尔曼滤波的姿态解算方法设计[J]. 电子工艺技术, 2018, 39(3):168-170.  
HUANG Zhen, ZHANG Haolei, LIU Mei, et al. Design of a second-order complementary filtering and Kalman filtering attitude resolution method[J]. Electronic Technology, 2018, 39(3):168-170.
- [16] 李鲁明, 赵鲁阳, 唐晓红, 等. 基于改进卡尔曼滤波的陀螺仪误差补偿算法[J]. 传感技术学报, 2018, 31(4):538-544.  
LI Luming, ZHAO Luyang, TANG Xiaohong, et al. Gyroscope error compensation algorithm based on improved Kalman filter[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(4):538-544.
- [17] 张敏, 李凯, 韩焱, 等. 基于卡尔曼滤波的陀螺仪降噪处理[J]. 传感技术学报, 2018, 31(2):223-227.  
ZHANG Min, LI Kai, HAN Yan, et al. The noise reduction of gyroscope based on Kalman filter[J]. Journal of Sensing Technology, 2018, 31(2):223-227.
- [18] 孙蔚蓝, 钱莉. 基于 MEMS 和卡尔曼滤波的姿态解算研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(1):1-3.  
SUN Weilan, QIAN Li. Research on attitude resolution based on MEMS and Kalman filter[J]. Automation and Instrumentation, 2018(1):1-3.
- [19] 许晶晶, 郭培源, 董小栋, 等. 改进互补滤波在六旋翼飞行器中的应用[J]. 传感器与微系统, 2018, 37(1):157-160.  
XU Jingjing, GUO Peiyuan, DONG Xiaodong, et al. Application of improved complementary filtering in six-rotor aircraft[J]. Sensors and Microsystems, 2018, 37(1):157-160.

(责任编辑 姜丰辉)

(责任编辑 姜丰辉)

(上接第 89 页)