

DOI: 10.13382/j.jemi.B2003544

# EWT 算法在姿态解算中的应用\*

刘春 陈豪 戴雷 蒯生宝 何敏

(合肥工业大学 电气与自动化工程学院 合肥 230009)

**摘要:**针对陀螺仪存在低频噪声和漂移误差导致姿态测量精度下降的问题,提出采用经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)算法融合陀螺仪、加速度计解算姿态角。首先运用 EWT 算法对陀螺仪采集的数据进行频谱分割,得到信号的模态分量;其次采用小波自适应软阈值去噪的方法对信号进行降噪处理并重构信号,得到处理后的陀螺仪数据;然后根据 PID 互补滤波方法,利用加速度计的数据实现对陀螺仪数据的修正;最后利用校正后的陀螺仪数据,结合龙格库塔法解算四元数,从而通过四元数获得精确的姿态角。实验结果表明,EWT 算法融合陀螺仪和加速度计,能够将姿态解算精度提高 50%,且降噪效果良好,满足姿态解算准确性的要求。

**关键词:**经验小波变换;小波阈值去噪;PID 互补滤波;姿态解算;四元数法

**中图分类号:** P228.1; TN911.72      **文献标识码:** A      **国家标准学科分类代码:** 420.1010

## Application of EWT algorithm in attitude angle calculation

Liu Chun Chen Hao Dai Lei Xi Shengbao He Min

(School of Electrical and Automation Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of the low-frequency noise and drift error of the gyroscope that causes the accuracy of attitude measurement, this paper proposes to use the empirical wavelet transform (EWT) algorithm to fuse the gyroscope and accelerometer to calculate the attitude angle. First, use the EWT algorithm to divide the spectrum of the data collected by the gyroscope to obtain the modal components of the signal, and then use the wavelet adaptive soft threshold denoising method to denoise the signal and reconstruct the signal to obtain the processed gyroscope data. Then according to the PID complementary filtering method, the data of the accelerometer is used to correct the data of the gyroscope. Finally, use the corrected gyroscope data, combined with Runge-Kuta method to calculate the quaternion, so as to obtain the precise attitude angle by using the quaternion. The experimental results show that the EWT algorithm fused with gyroscope and accelerometer can improve the accuracy of attitude calculation by 50%, and the noise reduction effect is good, which meets the requirements of accuracy of attitude calculation.

**Keywords:** empirical wavelet transform; wavelet threshold denoising; PID complementary filtering; attitude calculation; quaternion method

## 0 引言

20 世纪以来,惯性导航技术飞速发展,逐渐成为热门的研究方向。惯性导航技术是一种通过测量飞行器的角速度、线加速度,利用相关解算方法,来获取物体瞬时速度与位置数据的技术。惯性导航技术在多领域、多学

科应用广泛<sup>[1]</sup>,例如航空、航海的导航定位等<sup>[2]</sup>。姿态解算方法是惯性导航系统以及卫星组合导航系统中重要的组成部分,通常是利用惯性测量元件(加速度计/陀螺仪)测得角速度与加速度,通过积分运算解算得到姿态角<sup>[3]</sup>。姿态角解算时,由于积分的存在势必会导致误差的累积,从而引起姿态角解算值漂移,影响导航系统的精度<sup>[4]</sup>,因此在解算姿态角前,需对陀螺仪的数据进行降噪

处理,同时对陀螺仪的漂移进行修正。

针对如何提高姿态解算的准确性,已有许多学者做出相关研究。马力等<sup>[5]</sup>提出了基于互补滤波的解算方法,该算法的时间复杂度较低,且具备一定的可应用性,但是此方法存在传感器噪声干扰的问题,故算法整体精度较低。姚文凯等<sup>[6]</sup>提出基于径向基(RBF)神经网络的姿态解算算法,该算法利用 RBF 神经网络融合 Kalman 建立滤波模型,一定程度上提高姿态解算精度,但是神经网络存在着训练的不确定性,进而滤波效果也存在着不确定性。张栋等<sup>[7]</sup>提出基于卡尔曼滤波和互补滤波的改进型姿态解算方法,虽然可以提高解算精度,但该方法需要磁力计的辅助。陈光武等<sup>[8]</sup>提出基于改进小波变换的 MEMS 陀螺信号去噪算法,该方法对位置和方位角的随机噪声有良好的降噪效果,但是小波变换的结果依赖于小波函数的选择,而小波函数的选择不具有自适应性。

基于以上研究,本文提出采用经验小波变换(empirical wavelet transform, EWT)算法融合陀螺仪、加速度计对姿态角进行解算,可以有效地降低噪声,提高姿态角的解算精度。首先,运用 EWT 算法对陀螺仪测得的角速度数据,进行频谱的自适应分割,并在分割区间上构建合适的小波滤波器,以此提取出经验模态分量(empirical mode functions EMFs),再采用小波阈值去噪的方法,进行降噪处理并进行信号重构。然后利用加速度计测得数据和重构信号做互补滤波降低漂移误差,并采用 PID 互补滤波实现,最后利用四元数解算的方法解算出更精确的姿态角。

## 1 姿态角解算方法

姿态是指不同坐标系之间的变换关系,而姿态角主要是用来描述一个载体的姿态。姿态角主流的数学计算方法有 3 种,分别为:四元数计算法、欧拉角计算法、方向余弦计算法<sup>[9-10]</sup>。

### 1.1 欧拉角法

欧拉角是一种载体姿态的数学表示方法,根据参考坐标系的不同,还可以分为静态和动态两种情况,在不同的旋转方式下可以定义出不同的坐标位置,因此欧拉角的约定方式有很多。本文主要描述的是以 Z-Y-X 的旋转顺序,即绕坐标系 Z 轴旋转得到航向角(YAW) $\psi$ ,绕坐标系 X 轴旋转得到横滚角(ROLL) $\gamma$ ,绕坐标系 Y 轴旋转得到俯仰角(PITCH) $\theta$ 。

欧拉角的微分方程如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \dot{\gamma} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \tan\theta\sin\gamma & \cos\gamma\tan\theta \\ 0 & \cos\gamma & -\sin\gamma \\ 0 & \sin\gamma/\cos\theta & \cos\gamma/\cos\theta \end{bmatrix} \mathbf{w}_{nb}^b \quad (1)$$

欧拉角法存在奇异点以及万向节锁死的问题,不能

用于全姿态的姿态确定。

### 1.2 四元数法

四元数法相较于方向余弦法,计算量小,算法简单<sup>[10]</sup>,避免了万向节锁死的问题,是较为实用的工程方法。

四元数法定义四元数如下:

$$\mathbf{q} = [q_0 \ q_1 \ q_2 \ q_3]^T \quad (2)$$

四元数的数学表达式如下:

$$\mathbf{q} = q_0 + q_1\mathbf{i} + q_2\mathbf{j} + q_3\mathbf{k} \quad (3)$$

式中: $q_0, q_1, q_2, q_3$  为常数; $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$  为两两正交的单位向量; $|\mathbf{q}|^2 = 1$ 。

四元数旋转矩阵如下:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_0q_2 + q_1q_3) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_0q_1 + q_2q_3) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

四元数和欧拉角的转换关系如式(5)所示:

$$\begin{aligned} \psi &= \arctan\left(\frac{2q_1q_2 + 2q_0q_3}{1 - 2(q_2^2 + q_3^2)}\right) \\ \theta &= \arcsin(2q_0q_2 - 2q_1q_3) \\ \gamma &= \arctan\left(\frac{2q_1q_0 + 2q_2q_3}{1 - 2(q_1^2 + q_2^2)}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

### 1.3 求解四元数

求解四元数微分方程,常用的方法有欧拉方法、中值法、毕卡算法、龙格库塔法<sup>[12]</sup>。

由于四阶龙格库塔法加入了插值处理,故能获得更优的平均斜率,其精度优于直接积分,随着阶次的增加,截断误差会越小,能够提高计算精度<sup>[13]</sup>。针对四元数微分方程,四阶龙格库塔公式如下:

$$\begin{cases} k_1 = f(t_i, q_i) \\ k_2 = f\left(t_i + \frac{h}{2}, q_i + \frac{1}{2}k_1\right) \\ k_3 = f\left(t_i + \frac{h}{2}, q_i + \frac{1}{2}k_2\right) \\ k_4 = f(t_i + h, q_i + k_3) \\ q_{i+1} = q_i + \frac{h}{6}(k_1 + 2k_2 + 2k_3 + k_4) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $\mathbf{q}$  为四元数向量; $h$  为仿真步长; $f$  为四元数微分方程。由于存在计算误差,所以在多次更新之后,必须对四元数进行归一化处理。

## 2 EWT 算法

为了方便说明,本文规定 $\hat{f}$ 为傅里叶变换, $\check{f}$ 为逆傅

里叶变换。例如下：

$$\hat{f}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (7)$$

式中： $\omega$  代表频率； $t$  代表时间。

### 2.1 待测信号频谱边界划分

根据 Shannon 采样定理，将待测信号的频谱范围规范化到  $[0, \pi]$ ，并把区域分为  $N$  段区间，每个区间为  $\Lambda_n$ ，如下：

$$U_{n=1}^N \Lambda_n = [0, \pi] \quad (8)$$

在信号频谱中有  $N+1$  条分界线，如图 1 所示。设  $\omega_n$  为分界线，则  $\Lambda_n = [\omega_{n-1}, \omega_n]$ ，由式(8)可知， $\omega_n$  的范围在  $[0, \pi]$ 。每一条分界线周围，定义存在一个过渡相位区间，设其宽度为  $T_n = 2\tau_n$ 。

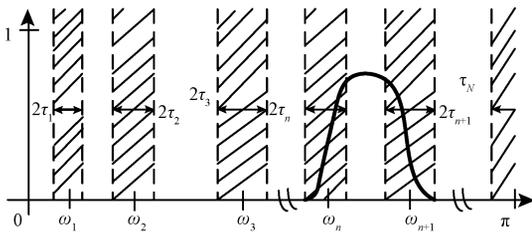


图 1 频谱分割原理

Fig. 1 Schematic diagram of spectrum division

过渡带中的有效信息含量，从一定程度上决定了 EWT 算法效果的好坏<sup>[14]</sup>。

### 2.2 小波滤波器组

EWT 算法是由吉尔斯于 2013 年提出的一种可用于信号提取与分析的方法<sup>[15]</sup>，具有自适应性，同时有严谨的小波分析理论支撑，即在 Littlewood-Paley 和 Meyer 两种小波基函数的基础上构建出了新的小波函数<sup>[16-18]</sup>。

$$\hat{\varphi}(\omega) = \begin{cases} 1, & |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_n \\ \cos\left\{\frac{\pi}{2}\beta\left[\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n)\right]\right\}, & (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\hat{\psi}(\omega) = \begin{cases} 1, & (1 + \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 - \gamma)\omega_{n+1} \\ \cos\left\{\frac{\pi}{2}\beta\left[\frac{1}{2\gamma\omega_{n+1}}(|\omega| - (1 - \gamma)\omega_{n+1})\right]\right\}, & (1 - \gamma)\omega_{n+1} \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_{n+1} \\ \cos\left\{\frac{\pi}{2}\beta\left[\frac{1}{2\gamma\omega_n}(|\omega| - (1 - \gamma)\omega_n)\right]\right\}, & (1 - \gamma)\omega_n \leq |\omega| \leq (1 + \gamma)\omega_n \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (10)$$

$$\beta(x) = x^4(35 - 84x + 70x^2 - 20x^3) \quad (11)$$

$$\gamma < \min\left(\frac{\omega_{n+1} - \omega_n}{\omega_{n+1} + \omega_n}\right), 0 < \gamma < 1 \quad (12)$$

### 2.3 信号重构

EWT 和经典小波变换定义方式相同，可由待测信号与经验小波函数  $\psi_n$  的内积以及待测信号与经验尺度函数  $\varphi_1$  的内积，得到其细节系数  $\omega_f^e(n, t)$  和近似系数  $\omega_f^e(0, t)$ ，表达式如下：

$$\omega_f^e(n, t) = \langle f, \psi_n \rangle = \int f(\tau) \overline{\psi_n(\tau - t)} d\tau = (\widehat{f(\omega)} \overline{\widehat{\psi_n(\omega)}})^\vee \quad (13)$$

$$\omega_f^e(0, t) = \langle f, \varphi_1 \rangle = \int f(\tau) \overline{\varphi_1(\tau - t)} d\tau = (\widehat{f(\omega)} \overline{\widehat{\varphi_1(\omega)}})^\vee \quad (14)$$

由此原信号重构表达式如下：

$$f(t) = \omega_f^e(0, t) * \varphi_1(t) + \sum_{n=1}^N \omega_f^e(n, t) * \psi_n(t) \quad (15)$$

式中： $*$  表示卷积。由式(15)得经验模态函数  $f_k(t)$  表达式如下：

$$f_0(t) = \omega_f^e(0, t) * \varphi_1(t) \quad (16)$$

$$f_k(t) = \omega_f^e(n, t) * \psi_n(t) \quad k = 1, 2, \dots, N - 1 \quad (17)$$

### 2.4 小波阈值去噪

EWT 算法本身采用的小波滤波器组，虽然有一定的滤波效果，但是效果很不理想<sup>[19]</sup>。因此为了更好地消除信号中的噪声，本文将小波阈值去噪与 EWT 算法结合，运用小波软阈值去噪的方法针对分解的 EMFs 进行消噪处理，并进行信号重构，得到消噪后的信号，算法去噪原理如图 2 所示。

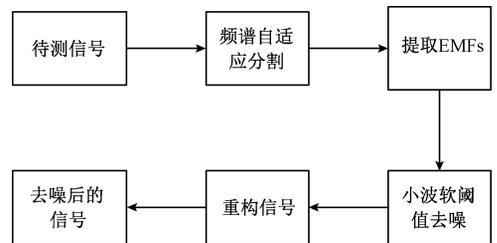


图 2 EWT 算法去噪原理

Fig. 2 Principle of EWT algorithm denoising

## 3 互补滤波

### 3.1 传统互补滤波结构

姿态更新主要是利用陀螺仪的数据进行解算，陀螺仪的动态性能较好，短时间内测得数据准确性高，但是计算姿态时会产生积累误差，数据出现随机漂移<sup>[20]</sup>；加速计测量姿态时，则不存在积累误差的问题，但是短时间内

的测量精度较差,因此利用两者特性互补,能够提高测量精度和动态性能,流程图如图 3 所示。

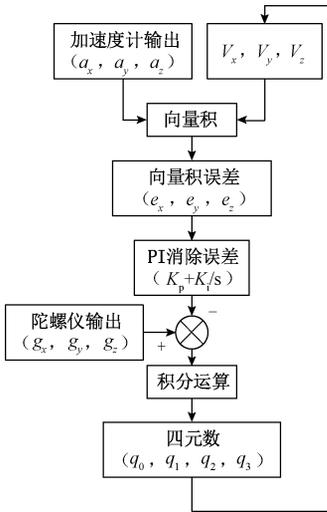


图 3 传统互补滤波结构

Fig. 3 Structure diagram of traditional complementary filtering

### 3.2 改进互补滤波结构

传统的互补滤波选择 PI 消除误差,但是一般解算的姿态角由于积累误差的存在,可能导致数据产生振动。为了解决这个问题,本文采用 PID 控制的方式,利用微分过程对误差的趋势进行判断,从而配合 PI 过程提高姿态角解算的精度。PID 计算公式如下:

$$u(t) = K_p * e + K_i \int e dt + K_d * \frac{de}{dt} \quad (18)$$

### 3.3 基于 EWT 算法的姿态解算

本文首先使用 EWT 对测得的陀螺仪数据进行自适应的频谱分解,分解得到经验模态分量。针对噪声问题,采取小波软阈值去噪法<sup>[21]</sup>,根据不同的分量选择不同的软阈值进行去噪,再重构信号得到去噪后的陀螺仪数据。获取加速度计数据,并进行数据归一化处理,利用初始四元数求得重力在 3 个方向的分量 ( $V_x, V_y, V_z$ ),作向量叉积得到 3 个方向的误差 ( $e_x, e_y, e_z$ ),通过改进的互补滤波结构结合降噪后的陀螺仪数据,获得新的四元数微分方程,最后运用四阶龙格库塔法解算四元数的微分方程获得姿态角。算法流程图如图 4 所示。

## 4 实验分析与研究

### 4.1 仿真条件

本文采用传感器 MPU6050 获得 6 轴的加速度计及陀螺仪数据。采用 PID 控制的互补滤波时,本文的 PID 控制参数设置为  $K_p = 1, K_i = 0.01, K_d = 0.5$ 。滤波结果做定量分析,采用信噪比 (SNR)、均方误差 (RMSE)、自相

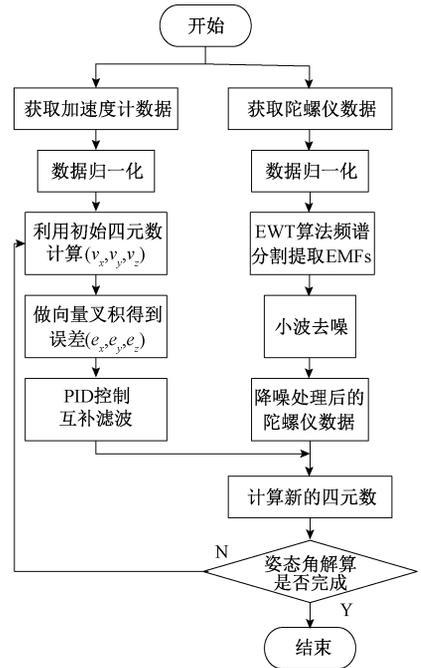


图 4 整体程序流程

Fig. 4 Overall program flow chart

关系数 (AC) 来评定滤波效果。

$$SNR = 10 \lg \frac{\sum_{t=1}^N |x(t)|^2}{\sum_{t=1}^N |x(t) - rec(t)|^2} \quad (19)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N |x(t) - rec(t)|^2} \quad (20)$$

$$AC = \frac{\sum_{t=1}^N [x(t) - \bar{x}(t)][rec(t) - \overline{rec}(t)]}{\sqrt{\sum_{t=1}^N [x(t) - \bar{x}(t)]^2 * \sum_{t=1}^N [rec(t) - \overline{rec}(t)]^2}} \quad (21)$$

式中:  $x(t)$  为原始角速度信号;  $\bar{x}(t)$  为原始信号的平均角速度;  $rec(t)$  为降噪后的重构角速度信号;  $\overline{rec}(t)$  为降噪后的重构信号平均值。SNR 越大, RMSE 越小, AC 越接近 1, 信号重构效果越好。解算所得姿态与实际测得姿态相减得到误差。

### 4.2 仿真研究

首先对陀螺仪数据频谱自适应分割, X 轴角速度频谱分割图如图 5 所示。Y、Z 两轴信号均可采用同样的频谱分割方法。

根据图中显示,角速度信号共被分割为 14 个 EMFs, 如图 6 所示。

采用小波阈值去噪,对每个模态分量取自适应的软阈值去噪并进行信号重构。X 轴的角速度的原信号与重

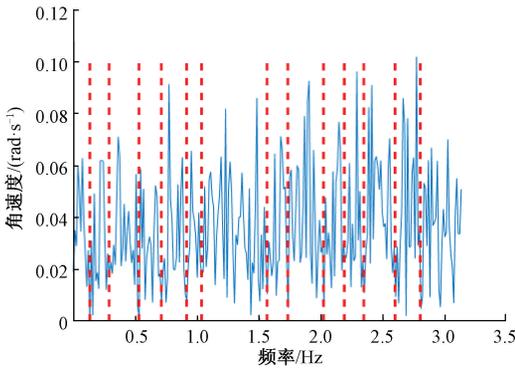


图 5 X 轴角速度频谱分割

Fig. 5 X-axis angular velocity spectrum division

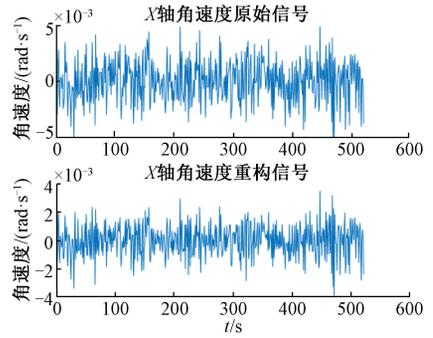


图 7 X 轴信号滤波效果

Fig. 7 X-axis signal filtering effect

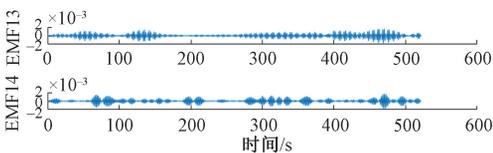
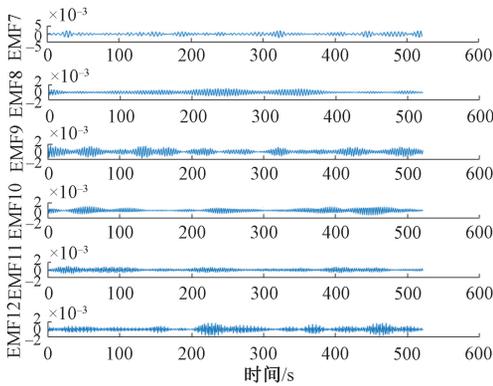
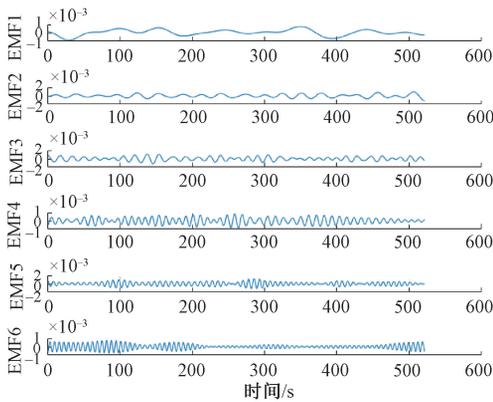


图 6 经验模式分量

Fig. 6 Empirical mode component

构信号对比如图 7 所示。

由图 7 可以看出, X 轴的信号波动明显降低, 波动范围从  $\pm 5 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$  降低到  $\pm 4 \times 10^{-3} \text{ rad/s}$ , 说明 EWT 算法结合小波阈值去噪明显减小了误差。Y 轴及 Z 轴也可采用此方法进行降噪处理。重构效果如表 1 所示, 信噪比

越大, 均方误差越小, 自相关系数越接近 1, 信号重构效果越好。

表 1 重构信号分析

Table 1 Reconstructs signal analysis

信号	信噪比/ dB	均方误差/ ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	自相关系 数/%
X 轴角速度	7.310 3	0.000 788	0.966 8
Y 轴角速度	7.274 2	0.000 811	0.966 3
Z 轴角速度	8.092 2	0.000 724	0.972 7

针对滤波算法的效率问题, 将 EWT 算法与常用的 EMD 和 EEMD 以及 CEEMD 算法作对比, 滤波对象为 X 轴的角速度信号, 其中 EEMD 算法噪声标准偏差比  $NSTD=0.2$ , 执行内核 EMD 算法次数  $NE=500$ ; CEEMD 算法的噪声标准偏差比  $NSTD=0.2$ , 实现次数  $NR=100$ , 最大迭代次数  $MaxIter=500$ 。

表 2 滤波算法对比

Table 2 Filter algorithm comparison

方法	信噪比/dB	均方误差/( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ )	运行时间/s
EMD	1.394 8	0.001 557	0.760 9
EEMD	5.688 4	0.001 505	14.382 6
CEEMD	5.636 9	0.001 510	8.879 1
EWT	7.310 3	0.000 788	0.753 2

由表 2 可得, EWT 算法无论从滤波效果, 还是运行时间上都表现较好。

本文采用 4 种方法进行姿态角解算, 图 8 所示为采用传统互补滤波但不采用 EWT 算法解算姿态角称为方法 1, 图 9 所示为使用 EWT 算法和传统互补滤波解算姿态角称为方法 2, 图 10 所示为采用 PID 控制互补滤波但不采用 EWT 算法解算姿态角称为方法 3, 图 11 所示为采用 EWT 算法和 PID 控制互补滤波解算姿态角称为方法 4。

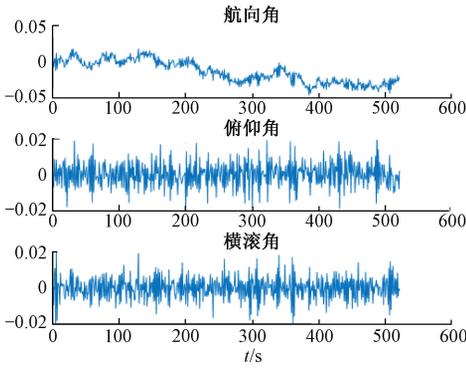


图 8 方法 1 解算姿态角

Fig. 8 Method 1 solve the attitude angle

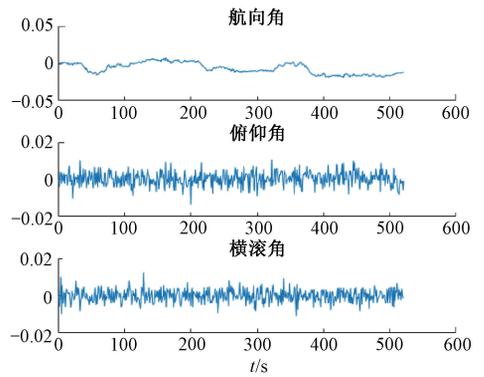


图 11 方法 4 解算姿态角

Fig. 11 Method 4 solve the attitude angle

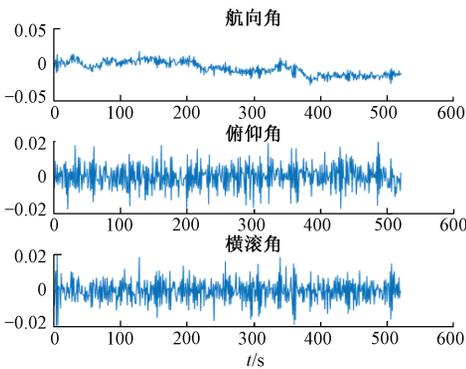


图 9 方法 2 解算姿态角

Fig. 9 Method 2 solve the attitude angle

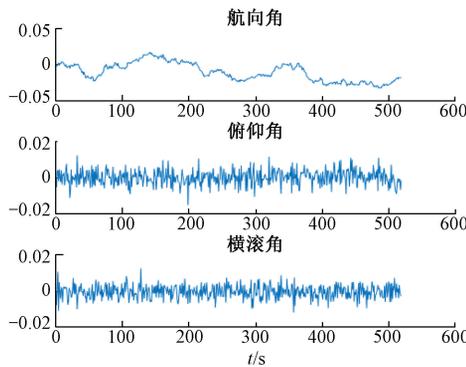


图 10 方法 3 解算姿态角

Fig. 10 Method 3 solve the attitude angle

最好,误差范围可以降到 $-0.02^{\circ} \sim 0.02^{\circ}$ ,最大误差角度下降了 60%,标准差下降了 50%。仿真结果表明,航向角的解算精度提高 50%。

表 3 航向角对比

Table 3 Heading angle comparison ( $^{\circ}$ )

方法	波动范围	最大误差角	误差角度标准差
方法 1	-0.05~0.05	0.045 79	0.001 5
方法 2	-0.05~0.05	0.027 90	0.000 9
方法 3	-0.05~0.05	0.032 79	0.001 2
方法 4	-0.02~0.02	0.019 03	0.000 7

表 4 俯仰角对比

Table 4 Pitch angle comparison ( $^{\circ}$ )

方法	波动范围	最大误差角	误差角度标准差
方法 1	-0.05~0.05	0.027 21	0.000 70
方法 2	-0.05~0.05	0.025 03	0.000 66
方法 3	-0.02~0.02	0.014 82	0.000 41
方法 4	-0.02~0.02	0.011 11	0.000 36

由表 4 及图 8~11 可知,对于俯仰角,只采用传统互补滤波时,误差范围在 $-0.05^{\circ} \sim 0.05^{\circ}$ ,从波形上看波形振动较大,最大误差角度最大;若只采用 EWT 算法对俯仰的误差修正效果不大;若将改进互补滤波与 EWT 算法结合,对于俯仰角误差的修正效果较好,误差范围为 $-0.02^{\circ} \sim 0.02^{\circ}$ ,同样最大误差角相对于传统互补滤波下降 60%,标准差下降 50%。仿真结果表明,俯仰角的解算精度提高 50%。

表 5 横滚角对比

Table 5 Roll angle comparison ( $^{\circ}$ )

方法	波动范围	最大误差角度	误差角度标准差
方法 1	-0.05~0.05	0.020 88	0.000 64
方法 2	-0.05~0.05	0.020 66	0.000 62
方法 3	-0.02~0.02	0.012 90	0.000 37
方法 4	-0.02~0.02	0.010 91	0.000 34

### 4.3 结果分析

由表 3 以及图 8~11 可知,当只使用传统互补滤波时,误差波动较大,最大误差角度也较大,航向角解算效果不佳;采用 EWT 算法虽然可以大幅度降低最大误差角度,且标准差较小,但是波形振动较大;单独采用 PID 互补滤波虽然波形较为平滑,但是最大误差角度依然很大,故在此采用 EWT 算法加 PID 控制的互补滤波,波形效果

由表 5 可以看出,传统互补滤波与融合 EWT 的 PID 互补滤波对横滚角的提升效果没有俯仰角和航向角明显,最大误差角度以及误差角度的标准差下降 50%左右,横滚角的解算精度提高 50%左右。

## 5 结 论

本文针对姿态解算精度不高的问题,采用 EWT 算法处理陀螺仪数据,利用四元数法求出重力向量,并结合加速度计数据与重力向量做向量叉积获得误差,通过 PID 控制互补滤波对陀螺仪数据进行了修正,用龙格库塔法解算四元数,进而得到姿态角。EWT 算法融合陀螺仪和加速度计,能够提高姿态角解算精度,加入 PID 控制互补滤波,能够实现更高精度的解算。实验仿真结果表明,改进的姿态解算方法对于姿态解算精度提高 50%。

## 参考文献

- [ 1 ] 陈国定,周鹏豪,胡朕豪,等. 基于 MPU6050 的四轴硬件姿态解算研究[J]. 机电工程,2018,35(1):95-100.  
CHEN G D, ZHOU P H, HU ZH H, et al. Research on four-axis hardware attitude calculation based on MPU6050[J]. Mechanical and Electrical Engineering, 2018,35(1):95-100.
- [ 2 ] 靳宇航,王腾飞. 一种适用于无人飞行器的 MEMS 导航计算机[J]. 电子测试,2018(1):44-48.  
JIN Y H, WANG T F. A MEMS navigation computer suitable for unmanned aerial vehicles [J]. Electronic Test, 2018(1):44-48.
- [ 3 ] 陈武. 弹载捷联惯性导航算法与装置的研究[D]. 西安:西安工业大学,2012.  
CHEN W. Research on missile-borne strapdown inertial navigation algorithm and device [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2012.
- [ 4 ] 周海玲,李霆. 基于三次样条和改进 QKF 的 AHRS 姿态解算设计[J]. 机电技术,2015(3):24-27.  
ZHOU H L, LI T. AHRS attitude calculation design based on cubic spline and improved QKF [J]. Electromechanical Technology, 2015(3):24-27.
- [ 5 ] 马力,李天松,阳荣凯,等. 基于增强型显式互补滤波的无人机姿态算法[J]. 桂林电子科技大学学报,2019,39(5):396-401.  
MA L, LI T S, YANG R K, et al. UAV attitude algorithm based on enhanced explicit complementary filtering[J]. Journal of Guilin University of Electronic Technology, 2019,39(5):396-401.
- [ 6 ] 姚文凯,邢砾文. 基于 RBF 神经网络的 MIMU 姿态解算算法研究[J]. 数码世界,2019(12):41-42.  
YAO W K, XING L W. Research on MIMU attitude calculation algorithm based on RBF neural network[J]. Digital World,2019(12):41-42.
- [ 7 ] 张栋,焦嵩鸣,刘延泉. 互补滤波和卡尔曼滤波的融合姿态解算方法[J]. 传感器与微系统,2017,36(3):62-65,69.  
ZHANG D, JIAO S M, LIU Y Q. A fusion attitude calculation method based on complementary filtering and Kalman filtering [J]. Sensors and Microsystems, 2017, 36(3):62-65,69.
- [ 8 ] 陈光武,刘孝博,王迪,等. 基于改进小波变换的 MEMS 陀螺信号去噪算法[J]. 电子与信息学报,2019,41(5):1025-1031.  
CHEN G W, LIU X B, WANG D, et al. MEMS gyroscope signal denoising algorithm based on improved wavelet transform [J]. Journal of Electronics & Information Technology, 2019,41(5):1025-1031.
- [ 9 ] 张泽,段广仁. 捷联惯导四子样旋转矢量姿态更新算法[J]. 控制工程,2010,17(3):272-274,278.  
ZHANG Z, DUAN G R. Four-sample rotation vector attitude update algorithm for strapdown inertial navigation[J]. Control Engineering, 2010,17(3):272-274,278.
- [ 10 ] 刘真谛. 基于复合传感器的航向姿态测量技术研究[D]. 沈阳:沈阳理工大学,2015.  
LIU ZH D. Research on heading and attitude measurement technology based on composite sensors[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2015.
- [ 11 ] 徐志浩,周召发,徐梓皓,等. 高精度捷联惯导姿态算法的性能分析[J]. 电光与控制,2019,26(7):25-28.  
XU ZH H, ZHOU ZH F, XU Z H, et al. Performance analysis of high-precision strapdown inertial navigation attitude algorithm[J]. Electro-Optics and Control, 2019, 26(7):25-28.
- [ 12 ] 黄盛,姜紫惠,李佳辉,等. 常微分方程常用的数值算法及其应用[J]. 应用数学进展,2019,8(12):2045-2049.  
HUANG SH, JIANG Z H, LI J H, et al. Commonly used numerical algorithms for ordinary differential equations and their applications [J]. Progress in Applied Mathematics, 2019,8(12):2045-2049.
- [ 13 ] 史凯,刘马宝. 捷联惯导四元数的四阶龙格库塔姿态算法[J]. 探测与控制学报,2019,41(3):61-65.  
SHI K, LIU M B. Strapdown inertial navigation quaternion fourth-order Runge-Kuta attitude algorithm[J]. Journal of Detection and Control, 2019,41(3):61-65.
- [ 14 ] 彭荣辉,赵治栋,张烨菲. EWT 算法在单导联心电图信号去噪中的研究[J]. 杭州电子科技大学学报,2019,39(5):13-18.

- PENG R H, ZHAO ZH D, ZHANG Y F. Research on EWT algorithm in single-lead ECG signal denoising[J]. Journal of Hangzhou Dianzi University, 2019, 39(5): 13-18.
- [15] GILLES J. Empirical wavelet transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2013, 61(16): 3999-4010.
- [16] 朱明. 新颖的自适应时频分布方法及在故障诊断中应用研究[D]. 南昌:南昌航空大学, 2015.  
ZHU M. Novel adaptive time-frequency distribution method and its application in fault diagnosis [D]. Nanchang: Nanchang Hangkong University 2015.
- [17] 李志农, 朱明, 褚福磊, 等. 基于经验小波变换的机械故障诊断方法研究 [J]. 仪器仪表学报, 2014, 35(11): 2423-2432.  
LI ZH N, ZHU M, CHU F L, et al. Research on mechanical fault diagnosis method based on empirical wavelet transform [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2014, 35(11): 2423-2432.
- [18] 刘春, 谢皓, 肖奕霖, 等. EWT算法在ECG信号滤波中的研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2017, 31(11): 1835-1842.  
LIU CH, XIE H, XIAO Y L, et al. Research on EWT algorithm in ECG signal filtering [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(11): 1835-1842.
- [19] 李国权, 李必禄, 林金朝, 等. 基于改进EWT的心电信号基线矫正算法[J]. 仪器仪表学报, 2020, 41(4): 156-166.  
LI G Q, LI B L, LIN J CH, et al. ECG signal baseline correction algorithm based on improved EWT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2020, 41(4): 156-166.
- [20] 王新龙, 李娜. MEMS陀螺随机误差的建模与分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2012, 38(2): 170-174.  
WANG X L, LI N. Modeling and analysis of random errors in MEMS gyroscopes [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2012, 38(2): 170-174.
- [21] 周金, 高云鹏, 吴聪, 等. 基于改进小波阈值函数和

CEEMD电能质量扰动检测[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, 33(1): 141-148.

ZHOU J, GAO Y P, WU C, et al. Power quality disturbance detection based on improved wavelet threshold function and CEEMD[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2019, 33(1): 141-148.

## 作者简介



**刘春**, 1988年于哈尔滨理工大学获得学士学位, 1996年于浙江大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学副教授, 主要研究方向为检测技术与自动化装置、电工理论与新技术。

E-mail: hfluchun@126.com.

**Liu Chun** received B. Sc. degree from Harbin University of Science and Technology in 1988 and M. Sc. degree from Zhejiang University in 1996. She is currently an associate professor at Hefei University of Technology. Her main research interests include testing technology and automation equipment, electrical theory and new technology.



**陈豪**, 2015年于安徽理工大学获得学士学位, 现为合肥工业大学硕士研究生, 主要研究方向为检测技术与自动化装置。

E-mail: 786917904@qq.com

**Chen Hao** received his B. Sc. degree from Anhui University of Science and Technology in 2015. He is currently a M. Sc. candidate at Hefei University of Technology. His main research interests include detection technology and automation equipment.



**戴雷**(通信作者), 1994年于安徽工学院获得学士学位, 2004年于合肥工业大学获得硕士学位, 现为合肥工业大学高级实验师, 主要研究方向为电工理论与新技术。

E-mail: dailei.cn@hfut.edu.cn

**Dai Lei** (Corresponding author) received B. Sc. degree from Anhui Institute of Technology in 1994 and M. Sc. degree from Hefei University of Technology in 2004. He is currently a senior experimenter at Hefei University of Technology. His main research interests include electrical theory and new technology.