# 抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法对比分析

**摘要：**在传统MARG姿态估计方法中，磁干扰在影响航向角估计的同时也会影响倾角估计，故应将倾角与航向角估计进行解耦。目前存在多种抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法，但这些算法的效果不尽相同，所以如何根据具体的应用选择合适的算法容易给工程技术人员造成困扰。针对这个问题，本文首先简介了序贯自适应误差状态Kalman滤波、二段式序贯自适应扩展Kalman滤波以及双级自适应互补滤波三种姿态估计解耦算法的原理；其次，分别通过静态测试和动态测试，对比分析了三种算法的姿态估计精度和计算效率，并给出了使用建议。可为设计抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法的工程技术人员提供一些有实用价值的参考。

**关键词：**MARG；抗磁干扰；姿态估计解耦；对比分析

# Comparative analysis of MARG attitude estimation decoupling algorithms for anti-magnetic interference

**~~Abstract:~~** ~~In traditional MARG attitude estimation, the inclination estimation is affected by magnetic interference, and it should be decoupled from the heading angle estimation. For the decoupling problem of MARG attitude estimation for anti magnetic interference, there are currently multiple algorithms, but these algorithms have different computational complexity, accuracy, and anti magnetic interference capabilities. How to classify them in specific applications and how to choose them during program design can easily cause confusion for engineering technicians. In response to this issue, this article summarizes and compares common decoupling algorithms through experiments, analyzes the computational complexity, accuracy, and anti magnetic interference ability of the three algorithms, and provides suggestions for use. This provides some practical reference for engineering and technical personnel designing anti magnetic interference MARG attitude estimation decoupling algorithms.~~

**~~Key words:~~** ~~quaternion; MARG; Anti-magnetic interference; Attitude estimation decoupling;~~

## 引言

导航是一门通过确定载体姿态、速度、位置等信息为载体运动控制提供参考的技术。在捷联惯导系统中姿态算法是算法研究和设计的核心[1]，精确的姿态估计是提高系统整体精度的关键。

微机电系统(Micro-electro-mechanical system, MEMS)惯性传感器具有低成本、低功耗和小尺寸等优点，被广泛运用于姿态测量领域。然而，MEMS陀螺仪存在较大的零点漂移，单独使用时会导致姿态角误差会随时间快速累积。因此通常使用磁传感器、加速度计和陀螺仪(Magnetometer, Accelerometer and Rate Gyro, MARG)传感器组合，分别将由加速度计所得的重力场数据和磁传感器所得的地磁场数据作为倾角估计和航向角估计的参考，提高估计精度。

然而，地磁场易受金属、电子设备等外部干扰因素影响，采用传统MARG姿态估计方法将角速度矢量、加速度矢量和磁场矢量直接融合不仅会引入航向角误差还会降低倾角估计精度。因此，需要将基于MARG的倾角和航向角估计解耦来提高姿态估计的抗磁干扰能力。

至今，已有诸多学者相继研究出不同的抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法，常用的方法有两类，一种是反正切姿态估计解耦算法[2-3]，其基本思想是根据姿态四元数直接计算姿态角与加速度矢量和磁场矢量计算得到的姿态角进行融合，如序贯自适应误差状态Kalman滤波(Sequential adaptive error state Kalman filtering, SAESKF)算法；另一种是分步姿态估计解耦算法 [4-5]，其基本思想是依次通过加速度矢量和磁场矢量对MEMS陀螺仪预测的姿态四元数进行补偿，如二段式序贯自适应扩展Kalman滤波(Two-stage sequential adaptive extended Kalman filtering, TSAEKF)算法和双级自适应互补滤波算法(Two-stage adaptive complementary filtering,TACF)。不同的抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法的效果不同，在具体应用时算法的选择容易给工程技术人员造成困扰。

本文后续首先将简述说明SAESKF、TSAEKF以及TACF三种姿态估计解耦算法，然后将通过动态实验和静态实验，对比分析三种算法姿态估计精度、计算时间，最后给出使用建议。旨在为设计抗磁干扰的MARG姿态估计解耦算法的工程技术人员提供一些有实用价值的参考。

## 序贯自适应误差状态Kalman滤波­­

在SAESKF姿态解耦估计算法中，输入和估计的对象为姿态角误差，利用姿态角误差估计修正姿态角预测，得到姿态角估计，然后姿态角误差状态被重置为零。

由于误差状态值一般为小量，所以在计算过程中可直接忽略大量的高阶导数，造成的精度损失极小，甚至可认为在一定时间段内为常量，这使非线性系统线性化，大大减少计算量。

### 2.1 误差状态Kalman滤波算法设计

(1) 计算标称状态

定义载体在时刻的载体坐标系角速率为，则姿态四元数更新方程可表示为：

其中为四阶单位矩阵，为陀螺仪采样间隔，可表示如下：

通过四元数-姿态角转换公式[10]可将转换为时刻姿态角预测。

(2)估计误差状态

ESKF具体过程如下：

其中为姿态角误差；量测向量为，其中为时刻加速度解算的倾角量测以及结合时刻倾角预测值和磁场数据解算的航向角量测；和分别为状态一步转移矩阵、量测矩阵，均恒等于单位矩阵；为时刻均方误差阵； 为时刻状态噪声协方差阵、为时刻量测噪声协方差阵。

(3)全状态估计

将误差状态估计加入到标称状态预测中，得到全状态估计值，同时将误差状态置零。

通过姿态角-四元数转换公式可将转换为时刻姿态四元数估计。

### 2.2 序贯自适应算法设计

在SAESKF中，量测预测误差可表示如下：

量测噪声估计可表示如下：

其中，常取。

为了保证正定性，通过序贯处理对对角线大小进行限定。具体如下：

通过上述处理，便可将量测噪声始终限制在之内，从而具有较好的自适应能力及滤波可靠性。

## 3 二段式序贯自适应扩展Kalman滤波

TSAEKF算法首先融合加速度矢量和角速度矢量估计姿态，其次从中剔除融合加速度矢量带来的水平增量四元数，然后提取角速度垂直分量和磁场水平分量进行融合得到水平增量四元数，最后利用水平增量四元数修正航向角。TSAEKF自适应原理与上述SAESKF一致。

在TSAEKF姿态估计算法中以四元数作为姿态估计的状态向量，建立加速度和磁场的量测方程，则系统状态空间模型如下：

其中为时刻融合加速度矢量和角速度矢量的载体姿态四元数；为时刻水平增量四元数；为载体坐标系下加速度矢量；为中间坐标系下磁场矢量。

上式中与可表示为：

其中为四元数对应的旋转矩阵。

### 3.1 第一段EKF设计

(1)融合角速度矢量和加速度矢量估计载体姿态

其中由时刻载体坐标系角速度解得；；为时刻状态噪声方差，为时刻加速度量测噪声方差。

(2)解析增量四元数并提取水平矢量在水平方向上的姿态变化

(3)解析水平增量四元数并从中剔除

### 3.2 第二段EKF算法设计

(1)从磁场矢量中提取水平分量并求解中间坐标系中的角速度

(2)融合磁场矢量和角速度矢量估计载体姿态

其中由中间坐标系角速度解得；；为时刻磁场量测噪声方差。

(3)融合非航向姿态与航向姿态

## 4 双级自适应互补滤波姿态估计

TACF算法利用加速度计和磁力计的测量值分步对MEMS陀螺仪估计的四元数进行补偿，避免了磁场干扰情况下航向角误差对水平角测量的影响。

### 4.1 一级互补滤波设计

第一级互补滤波利用加速度计的测量数据对陀螺仪估计的四元数进行补偿修正，输出准确的水平姿态。通过将绕向量旋转角度来补偿水平角误差。因此，相应的误差四元数和修正四元数可以由下式获得：

其中，，为归一化的载体坐标系下加速度预测值，为归一化的载体坐标系下加速度量测值。

### 4.2 二级互补滤波设计

第二级互补滤波利用磁力计的测量数据对上一级获得的四元数进行补偿，来修正航向角。通过将绕旋转小角来补偿偏航角误差，因此，相应的误差四元数和补偿四元数可以由下式获得：

其中，，为归一化的导航坐标系下磁场预测值，为归一化的导航坐标系下磁场量测值。

### 4.3 自适应算法设计

当误差不大于事先设定的阈值，滤波增益系数随着误差的增加而线性减小。如果误差大于阈值，那么滤波增益系数等于零。误差阈值的大小可通过衡量惯性器件各自的精度、载体的动态强度等条件，由试验获得最优值。

(1)第一级自适应方案

定义载体非重力加速度误差

其中为加速度计测得的加速度矢量模值，为当地重力加速度。滤波增益系数为与载体非重力加速度误差之间的关系由下式表示：

滤波增益系数随着非重力加速度误差的增加而线性减小。

(2)第二级自适应方案

定义载体磁场误差

其中为磁传感器测得的磁场矢量模值，为磁场矢量预测模值。滤波增益系数为与载体磁场误差之间的关系由下式表示：

滤波增益系数随着磁场误差的增加而线性减小。

## 实验分析

### 5.1 实验平台

为了对比验证上述三种算法的效果，本文采用XV7001BB型号陀螺仪、LIS3LV02DL型号加速度计和RM3100型号磁传感器集成的MARG模块（见图1），MARG传感器采样率为100Hz。此外，搭建了基于三轴无磁转台的实验平台（见图2），将MARG模块固定在三轴无磁转台上结合上位机程序进行测试。

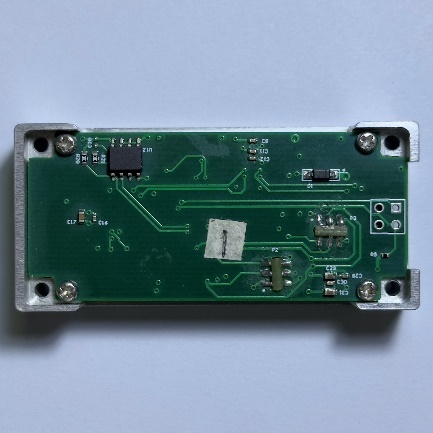
~~~~

图1 MARG模块

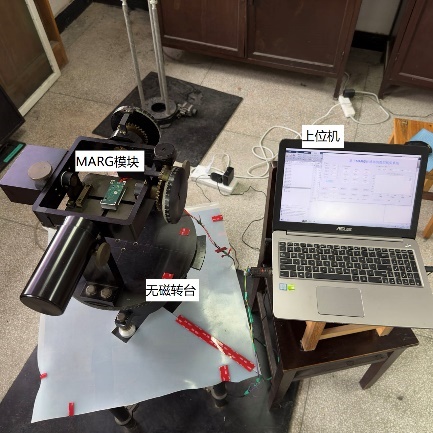
~~~~

图2 实验平台

MARG姿态估计精度的量化指标是欧拉角均方根误差，其中表示俯仰角，表示横滚角，表示航向角。欧拉角误差通过参考姿态和各算法的估计姿态之间的差值获得。~~（姿态误差量化指标）~~

~~Marg模块开机后静置3秒，本文将前3秒由加速度和磁传感器解算得到的欧拉角量测均值作为姿态参考值。（姿态参考指标）~~

实验结果中，Measured代表量测值，~~TACF代表双级自适应互补滤波姿态估计算法，TSAEKF代表自适应序贯二段序贯自适应扩展Kalman滤波姿态估计算法，SAESKF代表序贯自适应误差状态Kalman滤波姿态估计算法，~~Reference代表姿态参考值。

### 5.2 静态测试与分析

在静态测试中，首先将用用0.02mm/m精度水平仪将三轴无磁转台调至水平，以其编码器倾角示数进行校零。将MARG模块固定于转台平面静置110s，中间人为添加近60S磁干扰。

静态测试航向角量测变化如下图所示。



图3 静态测试航向角变化

静态测试三种算法航向角变化如下图4所示。



图4 静态测试航向角变化

静态测试三种算法航向角均方根误差及计算时间如表1所示。

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 算法 | RMSE[] | 计算时间 |
| SAESKF | 0.0851° | 0.492584s |
| TSAEKF | 0.1066° | 0.580665s |
| TACF | 0.0274° | 0.452799s |

表1 静态测试结果

由图4可知，在静态测试中SAESKF、TSAEKF 和TACF三种姿态解耦估计算法在抗磁干扰上均有很好的表现，航向角最大误差不超过0.2°，分别较量测均方根误差3.2121°降低了97.4%、96.7%、99.1%，其中TACF计算速度最快，TSAEKF计算速度最慢。

### 5.3 动态测试与分析

同样基于三轴无磁转台设计动态测试，测试方法为将MARG模块固定在三轴无磁转台上，手动旋转转台某个轴（即系统某个姿态角处于动态变化中，其余两个姿态角的实际值保持不变），采集记录另外两个姿态角输出值。

动态测试分为俯仰和横滚两次动态测试，分别手动旋转转台中框（改变俯仰角）、内框（改变横滚角），利用这两组不同的动态测试评估系统动态精度，并对比三种算法的精度、收敛性及计算时间等优缺点。

（1）俯仰动态测试

在俯仰动态测试中，首先静置MARG模块近25s，然后手动旋转转台中框近25s，使其俯仰角处于持续变化中，期间人为添加磁干扰近15s，这个过程中横滚角和航向角不变，作为参考值。记录三种算法的横滚角、航向角变化结果。

俯仰动态测试三种算法横滚角变化及航向角变化分别如图4、图5所示。



图5 俯仰动态测试横滚角变化



图6 俯仰动态测试航向角变化

俯仰动态测试航向角量测变化如图6所示。



图7 俯仰动态测试航向角量测变化

俯仰动态测试三种算法横滚角均方根误差、航向角均方根误差以及计算时间如下表2所示。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 算法 | RMSE[] | RMSE[] | 计算时间 |
| SAESKF | 0.0277° | 0.0323° | 0.381359s |
| TSAEKF | 0.0282° | 0.0400° | 0.452244s |
| TACF | 0.0494° | 0.2756° | 0.353586s |

表2 俯仰动态测试结果

由图5、图6和图7可知在俯仰动态测试中，三种算法都能较好地减小横滚角、航向角误差，具有良好的抗磁干扰能力，相对来说TACF精度较差且有一定超调量，SAESKF、TSAEKF精度较高且曲线更加平滑。由表2可得SAESKF、TSAEKF 和TACF三种算法中航向角均方根误差分别较航向角量测均方根误差2.6346°降低了98.8%、98.5%、89.5%，其中TACF计算速度最快，TSAEKF计算速度最慢。

（2）横滚动态测试

横滚动态测试采样同样的方法，首先静置MARG模块近25s，然后手动旋转转台中框近25s，使其横滚角处于持续变化中，期间人为添加磁干扰近15s，这个过程中俯仰角和航向角不变，作为参考值。记录三种算法的俯仰角、航向角变化结果。

横滚动态测试三种算法俯仰角变化及航向角变化分别如图8、图9所示。



图8 横滚动态测试俯仰角变化



图9 横滚动态测试航向角变化

横滚动态测试航向角量测变化如图10所示。



图10 横滚动态测试航向角量测变化

横滚动态测试三种算法俯仰角均方根误差、航向角均方根误差以及计算时间如下表3所示。

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 算法 | RMSE[] | RMSE[] | 计算时间 |
| SAESKF | 0.0247° | 0.1099° | 0.384229s |
| TSAEKF | 0.0209° | 0.1351° | 0.448244s |
| TACF | 0.0399° | 0.1731° | 0.359656s |

表3 横滚动态测试结果

同样，由图8、图9和图10可知在横滚动态测试中，三种算法都能较好地减小俯仰角、航向角误差，具有良好的抗磁干扰能力， TACF精度最差且有一定超调量，SAESKF、TSAEKF精度较高且曲线更加平滑。由表3可得SAESKF、TSAEKF 和TACF三种算法中航向角均方根误差分别较航向角量测均方根误差1.318°降低了91.7%、89.8%、86.9%，其中TACF计算速度最快，TSAEKF计算速度最慢。

## 6 结论

三种算法都具有良好的抗磁干扰能力。在静态环境下，TACF算法精度最高且计算量最小。在动态环境下，相对TACF算法，SAESKF算法和TSAEKF算法精度较好，姿态变化曲线更平滑，其中SAESKF计算量更小。

倘若系统主要运行于稳态环境，推荐使用TACF算法。如果系统主要运行于动态环境，SAESKF算法与TSAEKF算法精度相近，在不涉及万向节死锁的应用环境下推荐使用SAESKF算法，SAESKF计算时间较短，否则推荐TSAEKF算法。

## 7 参考文献

[1]严恭敏，翁浚.捷联惯导算法与组合导航原理[M].西北工业大学,2019.

[2] Shengzhi Z,Shuai Y, Chaojun L,et al.A Dual-Linear Kalman Filter for Real-Time Orientation Determination System Using Low-Cost MEMS Sensors[J]. Sensors, 2016, 16(2):264.

[3]储志伟.基于MARG传感器的微型航姿系统[D].中国科学技术大学,2018.

[4] Kaiqiang F,Jie L,Xiaoming Z,et al.A New Quaternion-Based Kalman Filter for Real-Time Attitude Estimation Using the Two-Step Geometrically-Intuitive Correction Algorithm[J]. Sensors, 2017, 17(9):2146.

[5]徐小龙. 基于惯性-磁传感器的机器人位姿捕捉技术研究[D].山东大学,2020.

[6]高宁,李杰,冯凯强,许廷金,高诗尧,李炳臻.基于双级互补滤波的姿态测量算法设计[J].传感技术学报,2019,32(12):1824-1829.

[7] Valenti R G ,Dryanovski I,Xiao J. A Linear Kalman Filter for MARG Orientation Estimation Using the Algebraic Quaternion Algorithm[J].IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2016, 65(2):467-481.

[9]邓红,刘光斌,陈昊明,刘志国.发射惯性坐标系下误差角与数学平台失准角的推导与仿真[J].宇航学报,2011,32(04):781-786.

[10] 秦永元.惯性导航(第三版)[M].科学出版社,2020.