

# 基于互补滤波算法的姿态解算研究

夏明明 柴新宇 杨金广

(河北水利电力学院电力工程系 河北沧州 061000)

**【摘要】** 随着 MPU6050 运动处理传感器在各领域得到广泛的应用, 针对该传感器自带的数字运动处理器 (DMP) 在姿态角解算过程中存在累积误差造成姿态解算角度误差的问题, 采用互补滤波算法通过 STM32F103ZET6 对 MPU6050 采集数据进行实施校准处理并实现数据实时采集、校正, 并通过显示上报证明其能有效消除噪声谐波等的干扰, 使数据精确度得到提高, 便于在一些要求高的设备中使用。

**【关键词】** MPU6050 运动处理传感器; 互补滤波; STM32F103

**DOI:** 10.18686/jyfyj.v3i12.68251

由于 MPU6050 具有体积小、重量轻、数据采集范围大、灵敏度高等优点, 其在生活、生产、军事、医疗、科研等方面有着广泛的应用和巨大的发展空间。但是由于其采集得到的数据存在多种谐波噪声, 虽然配置有硬件滤波模块, 使得对其采集得到的数据谐波噪声有所降低, 但是在一些精度要求更加高的场合, 往往不能符合要求。而有些场合由于种种原因不便对 MPU6050 运动处理传感器进行外扩或者外扩对其没有很好的经济效益, 因此一些滤波算法在实践探索中都拥有不错的效果并得到了广泛的应用。通过大量调查发现互补滤波算法在降噪和提高传感器采集数据准确度方面有很好的效果, 并且被大多数人所接受采纳, 所以最终选择采用这种算法来进行数据处理提高采集数据的精确度。

## 1、系统整体设计

通过 MPU6050 运动处理传感器对数据进行采集, 传感器输出的数字量通过 I2C 通信传输给 STM32 单片机。通过 MPU6050 自带的数字运动处理器和互补滤波算法两种方式分别对传感器原始数据进行滤波处理, 最后通过串口助手 XCOM 和 Matlab 实现数据的采集与对比分析。由于 DMP 算法并未完全开源, 本设计主要侧重于一阶互补滤波的调试, DMP 则直接利用了官方提供的源程序进行数据的输出, 与一阶互补滤波方式进行对比。

## 2、互补滤波算法原理

MPU6050 传感器可以测量出三轴的加速度、角速度, 理想状态下, 利用角速度积分和加速度正交分解均可求得三轴角度。但实际状态下, 角速度积分如果存在误差, 则误差会随时间逐渐累加。求得的角度值偏差会越来越大, 称为积分漂移现象。积分漂移属于低频误差, 虽然增长缓慢, 但会随着时间一直累加。而加速度传感器对于微小振动极其敏感, 易造成振动误差, 这种误差属于高频误差, 会严重影响传感器测量的实时准确度。由于两种传感器数据都有误差且两种误差具有互补性, 因此考虑将两种数据进行融合互补, 以求得真实准确的数据。

在求解姿态角度时, 使用了描述刚体运动的方向余弦矩阵, 即将刚体从空间一个角度旋转至另一个角度看作是坐标系的旋转。将开始时的坐标系定义为 n 系, 旋转结束时坐标系定义为 b 系, 则方向余弦矩阵为, 根据这个矩阵可以反解出三轴角度。但是, 由于公示中包含了大量三角函数运算, 求解过程复杂, 因此考虑使用四元数的形式进行表达。然后利用一阶龙格库塔法求解微分方程解出四元数, 进而求得角度即可。在求解微分方程过程中引入了三轴角速度作为新的变量, 因此需要获取角速度传感器测得的角速度数据求解四元数。但是, 由于角速度数据存在积分漂移, 需要融合加速度数据进行校正。

引入重力加速度作为参考, 假设在标准坐标系下重力加速度为  $g$ , 乘以旋转矩阵后可得到在新的 b 坐标系下的重力加速度, 且  $g_b = g$ 。等式中已知, 可通过三轴角速度数据求取的四元数求得, 因此可以求解出理论状态下的 b 系重力加速度。将该重力加速度与加速度传感器测得的重力加速度数据做向量外积得到误差值, 利用比例 - 积分 (PI) 控制将此误差补偿到原始角速度数据中, 得到相对准确的角速度数据。即 GYRO 再重新利用这个数据进行新一轮的四元数计算。整体框图如图 1 所示。

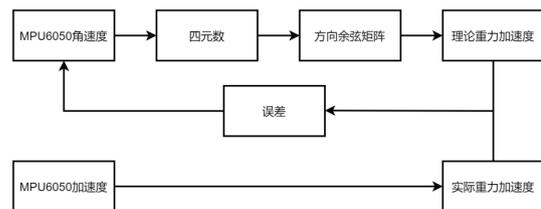


图 1 互补滤波系统框图

## 3、软件设计

### 3.1 I2C 通信程序

I2C 总线由数据线 SDA 和时钟 SCL 构成, 可以在 CPU 与外设 I2C 之间、I2C 与 I2C 之间进行双向传送。在工程中 iic.c 为 I2C 通信的驱动文件, 包含了初始化函数、发送起始信号、发送停止信号、应答信号、发送字节和读取字节等函数。在 MPU6050.c 中, 主要利用 iic.c 中定义的底层函数实现 MPU6050 传感器的数据读取操作。主要包含 MPU6050 初始化; MPU\_Write\_Byte(u8 reg,u8 data), 向 MPU6050 某地址中写入一个字节; MPU\_Read\_Byte(u8 reg), 从 MPU6050 中读取一个字节等函数。通过以上程序可以读取到传感器的原始数据, 然后通过 DMP 和一阶互补滤波两种方式对原始数据进行运算和处理。

### 3.2 互补滤波算法程序

滤波函数 filter(float ax, float ay, float az, float gx, float gy, float gz) 中, 参数分别包含了三轴角速度和加速度原始数据。函数首先计算出第三列的三个数据, 求出 b 坐标系下的理想重力加速度。然后通过  $norm = \sqrt{ax^2 + ay^2 + az^2}$ ;  $ax = ax / norm$  等语句将参数 ax, ay, az 进行单位化处理。最后通过对向量的叉乘求出误差, 通过比例 - 积分控制进行补偿。利用累加求和的方式求得误差积分, 乘以得到最终的积分项。与比例项相加后补偿给原始的角速度数据。求得三轴角速度的补偿后的新值为  $gx = gx + Kp^*ex + exInt$ ;  $gy = gy + Kp^*ey + eyInt$ ;  $gz = gz + Kp^*ez + ezInt$ 。利用更新的角速度值求取四元数, 反解出三轴角度。

#### 4、实验验证

不断调整互补滤波程序中比例项的系数，此系数越大说明补偿后误差所占比重越大，即认为原始的由加速度计得到的数据不够准确，而加速度计的数据更为准确。反之，越小，说明更加信任角速度数据。实测时发现，如果过小，对陀螺仪测量的角速度数据过度相信，则会引入积分误差，数据发生漂移。如果过大，对加速度计的数据过度相信，则会产生高频噪声。

在调整好合适的比例、积分项系数后，对 DMP 和互补滤波所得数据进行 Matlab 分析，得到如图 2 所示的曲线。上图曲线中，下方红色曲线为互补滤波所得偏航角 Yaw，上方蓝色曲线为 DMP 所得偏航角。由曲线可以看出，静止状态下，采用 DMP 算法在 120 分钟内产生了大约 3° 的积分漂移，但放大后观察可发现，DMP 在微小振动下的响应比较快，曲线变化平滑，没有高频噪声。而采用互补滤波后几乎没有漂移现象，但放大后可以观察到曲线具有较大的高频噪声。下图曲线为互补滤波（红色）与实际参考角度（蓝色）的曲线关系，可以看出，两条曲线基本重合，互补滤波所计算的角度变化趋势与实际变化相吻合。

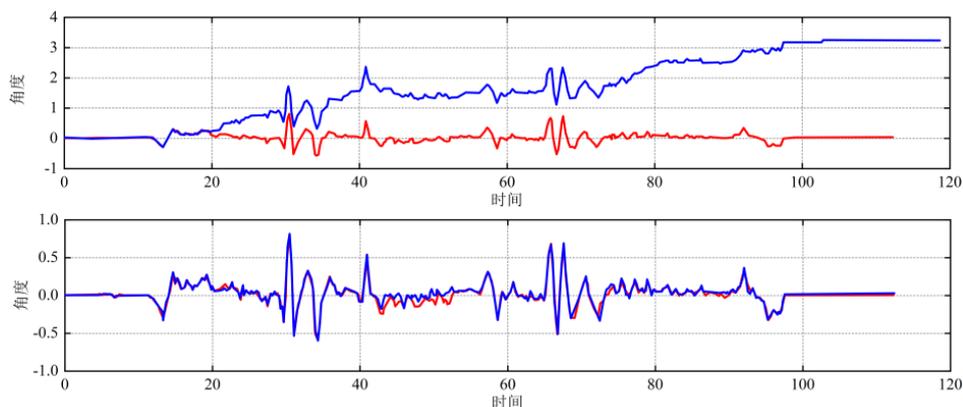


图 2 DMP 与互补滤波测试曲线

由以上实验数据可知，采用互补滤波能够有效去除积分漂移现象，能在静止状态下测得比较准确的角度数据。但是，产生的波形信号具有较严重的高频噪声，需要利用低通滤波器进行滤波。且轻微震动后完全静止时，会出现数据不归零的问题。

#### 课题项目

- [1] 河北省科学技术厅 2021 年大中学生科技创新能力培育专项项目《基于 MEMS 传感器的动态手势识别系统》(2021H090605)。
- [2] 河北省大学生创新创业训练计划项目《基于手势控制的小型四轴飞行器系统设计》(S202110085025)。