

# 基于 MEMS 的车辆姿态感知系统<sup>①</sup>

任 亮, 白国柱, 周经美, 程 鑫

(长安大学 信息工程学院, 西安 710064)

**摘 要:** 针对 MEMS 传感器精度低、误差大等缺点, 采用三轴加速度计、三轴磁强计和三轴陀螺仪进行组合姿态测量, 使用卡尔曼滤波进行多传感器数据融合. 将旋转矢量法解算出的陀螺仪的姿态四元数作为卡尔曼滤波的预测矢量, 将高斯牛顿法解算出的加速度计和磁强计的姿态四元数作为卡尔曼滤波的观测矢量, 建立卡尔曼传播方程, 求出更高精度的姿态四元数, 解算出姿态角, 将 AHRS 中的姿态角与车辆的坐标系对应, 实验结果表明车辆在不同状态下的姿态角度变化与车辆的运行状态一致.

**关键词:** MEMS 传感器; 卡尔曼滤波; 旋转矢量法; 高斯牛顿法; 车辆姿态

## Vehicle Attitude Sensing System Based on MEMS

REN Liang, BAI Guo-Zhu, ZHOU Jing-Mei, CHENG Xin

(School of Information Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

**Abstract:** In view of the MEMS sensors' low precision and large errors, three-axis accelerometer, three-axis magnetometer and three-axis gyroscope are combined to measure attitude. And Kalman filter are used for multi-sensor data fusion. The gyroscope's attitude quaternion calculated by rotation vector becomes a predictive vector of Kalman filter. The accelerometer and magnetometer's attitude quaternion calculated by Gauss-Newton method becomes a observation vector of Kalman filter. Kalman propagation equation is established to obtain more accurate attitude quaternion to calculate the attitude angle and correspond the attitude angle in AHRS with the vehicle' attitude angle. Experimental results show that the changed attitude angle of the vehicle coincides with the different states of the vehicle state.

**Key words:** MEMS sensors; Kalman filter; rotation vector; Gauss-Newton; vehicle attitude

## 1 引言

车辆姿态是车辆控制所需的重要参数, 姿态信息的准确获取对车辆的控制有着至关重要的作用<sup>[1]</sup>. 航向姿态参考系统(AHRS)能够提供载体的航向角、俯仰角和横滚角等姿态信息. 在 AHRS 中, 常用的姿态解算方法有: 1) 基于三轴陀螺仪数据, 积分求姿态角<sup>[2]</sup>. 在这类方法中, 使用欧拉角法解姿态微分方程, 当俯仰角接近 90°时, 方程会出现退化现象. 方向余弦法求解姿态矩阵可以避免欧拉角法方程退化的现象, 但要解九个联立微分方程, 计算量大, 实时解算困难, 工程上并不实用. 四元数法只需解算四个联立微分方程, 计算量小, 算法简单, 但四元数法实质上是旋转矢量

法中的单字样算法, 由于四元数法中引入不可交换性误差<sup>[3]</sup>, 所以只适用于低动态载体的姿态解算. 旋转矢量法的多字样算法能弥补四元数法的不足<sup>[4,5]</sup>. 2) 基于三轴加速度计和三轴磁强计<sup>[6]</sup>, 利用地球磁场和重力场在地理坐标系和载体坐标系之间的转换进行姿态解算. 在类方法中, QUEST 算法在计算过程中利用四元数进行计算, 可得单次观测的最优解, 但却无法利用系统动态信息和历史观测信息, 不能通过动态滤波改善测量精度. Gauss-Newton 迭代算法能够用来计算与体坐标系中测量的加速度和地磁场相关的最优四元数.

目前, 高精度惯性导航传感器价格昂贵, 实际应

<sup>①</sup>基金项目: 国家自然科学基金(51278058)

收稿时间: 2014-01-16; 收到修改稿时间: 2014-03-03

用难以推广。MEMS 传感器体积小、价格便宜，在 AHRS 中得到广泛应用，但是，MEMS 陀螺仪存在零漂和误差，在姿态解算中会产生积分积累误差，精度较低<sup>[7,8]</sup>。而加速度计和磁强计能计算精确的静态角度，但其动态参数性能差，误差大。本文使用卡尔曼滤波算法，融合彼此优点。使用旋转矢量法解算陀螺仪的姿态四元数，并作为卡尔曼滤波的预测矢量，使用 Gauss-Newton 迭代法解算加速度计和磁强计测量的姿态四元数作为卡尔曼滤波的观测矢量，建立卡尔曼滤波传播方程，求出更高精度的姿态四元数，解算出姿态角。将车辆作为载体建立坐标系，使 AHRS 的姿态角与车辆坐标系对应，获得车辆不同状态下的姿态角。

## 2 系统整体架构

基于 MEMS 的车辆姿态感知系统整体架构如图 1 所示，由 AHRS 模块和主控平台 ARM11 组成，AHRS 模块采集车辆当前的三轴加速度计、三轴磁强计和三轴陀螺仪数据，将其传送到主控平台，主控平台对 AHRS 模块采集的数据进行姿态解算，实时显示当前车辆的姿态，并对车辆进行预警。在硬件上，AHRS 模块采用 STM32 系列微处理器 STM32F103RET7 作为数据采集传输单元，控制一轴陀螺仪(航向)LY330ALH、两轴陀螺仪(横滚，俯仰)LPR430AL 和 6 轴地磁模块(三轴加速度计和三轴磁强计)LSM303DLH，由串口将三轴陀螺仪、三轴加速度计和三轴磁力计测量数据发送至主控模块。主控模块采用 ARM11 作为数据处理及控制单元，LED 实时显示解算的车辆姿态，当车辆姿态出现异常时蜂鸣器进行预警。

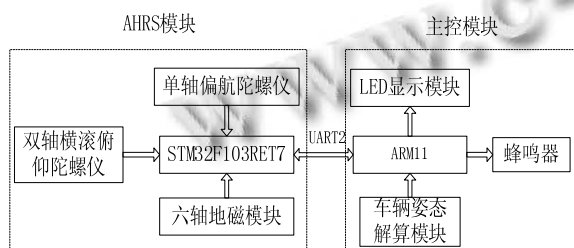


图 1 车辆姿态感知系统架构图

将 AHRS 模块固定在车体上，使 AHRS 坐标系的 X 轴沿车体的纵轴方向，Y 轴指向车体的右侧，Z 轴垂直于 X 轴，且 X 轴 Y 轴 Z 轴构成右手坐标系。航向角( $\psi$ )、俯仰角( $\theta$ )和横滚角( $\gamma$ )的描述如图 2 所示，则航向角对应车辆的水平转弯角度，俯仰角对应车辆的起

伏角度，横滚角对应车辆的倾斜角度。

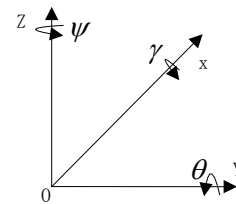


图 2 AHRS 坐标系示意图

## 3 车辆姿态解算

### 3.1 陀螺仪姿态更新算法

本文采用旋转矢量法求陀螺仪的姿态角四元数，与四元数法相比，在姿态更新周期内，四元数法直接计算姿态四元数，而旋转矢量法先计算姿态变化四元数，再计算姿态四元数。根据欧拉定理，载体坐标系相对参考坐标系的姿态，等效于载体坐标系绕某一个等效转轴  $u$  转动一个角度  $\theta$ ，用  $u$  表示等效转轴方向的单位向量，则载体坐标系的姿态可以由  $u$  和  $\theta$  两个参数确定。姿态变化四元数为  $q = \cos \frac{\theta}{2} + u \sin \frac{\theta}{2}$ ，该过程可以构造一个等效旋转矢量  $\Phi = \theta \cdot u$ 。姿态变化四元数和等效旋转矢量之间的关系如下：

$$q = \cos \frac{\|\Phi\|}{2} + \frac{\Phi}{\|\Phi\|} \sin \frac{\|\Phi\|}{2} \quad (1)$$

由 Bortz 理论得，等效旋转矢量微分方程(Bortz 方程)为

$$\dot{\Phi} = w + \frac{1}{2} \Phi \times w + \frac{1}{12} \Phi \times (\Phi \times w) \quad (2)$$

其中， $\Phi$  表示载体从  $t$  时刻到  $t + \Delta t$  时刻的等效旋转矢量， $w$  为陀螺仪角速度。在姿态更新周期内，分别用不同阶次的曲线来拟合陀螺仪角速度的输出，以等时间间隔采样陀螺仪角速度，可得到不同子样的递推旋转矢量算法<sup>[9]</sup>。本文采用双子样旋转矢量算法作为式(2)的解，即：

$$\Phi = \theta + \frac{2}{3}(\theta_1 + \theta_2) \quad (3)$$

其中， $\theta = \theta_1 + \theta_2$ ， $\theta_1$ 、 $\theta_2$  为姿态更新周期内陀螺仪两次等间隔采样的角增量。

基于旋转矢量法的四元数更新方程为：

$$Q(t+h) = Q(t) \otimes q(h) \quad (4)$$

其中， $Q(t+h)$ 、 $Q(t)$  分别为载体在  $t+h$  和  $t$  时刻的姿态

四元数,  $q(h)$  为  $t$  时刻到  $t+h$  时刻的姿态变化四元数.

四元数表示的坐标变换矩阵如下:

$$T_b^n = \begin{bmatrix} q_0^2 + q_1^2 - q_2^2 - q_3^2 & 2(q_1q_2 - q_0q_3) & 2(q_1q_3 + q_0q_2) \\ 2(q_1q_2 + q_0q_3) & q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2 & 2(q_2q_3 - q_0q_1) \\ 2(q_1q_3 - q_0q_2) & 2(q_2q_3 + q_0q_1) & q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

则姿态角解算如下:

$$\theta = \arcsin(-T_{31})$$

$$\gamma = \begin{cases} \arctan\left(\frac{T_{32}}{T_{33}}\right) & T_{33} > 0 \\ \pi \cdot \sin(T_{32}) + \arctan\left(\frac{T_{32}}{T_{33}}\right) & T_{33} < 0 \end{cases}$$

$$\psi = \begin{cases} \arctan\left(\frac{T_{21}}{T_{11}}\right) & T_{11} > 0 \\ \pi \cdot \sin(T_{21}) + \arctan\left(\frac{T_{21}}{T_{11}}\right) & T_{11} < 0 \end{cases} \quad (6)$$

当载体在参考坐标系中静止且载体坐标系与参考坐标系重合时, 忽略磁北极和真北极之间的差别, 加速度计和磁强计的输出为:

$$A = [0 \ 0 \ g] \quad M_n = [m_n \ 0 \ m_d] \quad (7)$$

其中,  $g$  为当地的重量加速度,  $m_n$  是磁场在参考坐标系中的北向分量,  $m_d$  是磁场在参考坐标系中的垂直分量. 当载体处于任意姿态时, 其加速度计和磁强计的输出是:

$$A_b = [a_x \ a_y \ a_z] \quad M_b = [m_x \ m_y \ m_z] \quad (8)$$

由参考坐标系和载体坐标系之间的关系  $A_b = T_n^b A_n$ ,  $M_b = T_n^b M_n$  得到如下方程:

$$\begin{cases} a_x = 2g(q_1q_3 - q_0q_2) \\ a_y = 2g(q_2q_3 + q_0q_1) \\ a_z = g(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \\ 2m_x(q_1q_2 + q_0q_3) + m_y(q_0^2 - q_1^2 + q_2^2 - q_3^2) \\ + 2m_z(q_2q_3 - q_0q_1) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

对于式 (9) 的非线性方程组, 记为  $f_i(q_0, q_1, q_2, q_3, a_x, a_y, a_z, m_x, m_y, m_z) = 0$ , 其中,  $a_x$ 、 $a_y$ 、 $a_z$  和  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$  分别为加速度计和磁强计的测量值. 对于此类方程, 可以转化为

$\sum_{i=1}^4 f_i(q_0, q_1, q_2, q_3, a_x, a_y, a_z, m_x, m_y, m_z)^2$  的极小值问题, 记

$$f(x) = [f_1(x) \ f_2(x) \ f_3(x) \ f_4(x)]^T \quad (10)$$

其中,  $x = (q_0, q_1, q_2, q_3)$ , 则该问题可表示为求  $\min(f(x)^T f(x))$ . 本文使用 Gauss-Newton 迭代法<sup>[10]</sup>求解该非线性最小二乘法问题, 具体过程如下:

①选取前一时刻的姿态四元数作为当前的初始点  $x_0$ , 并设置允许误差  $\varepsilon$ ;

②计算  $f(x_i)$  及雅克比矩阵  $\nabla f(x_i)$ , 其中

$$\nabla f(x_i) = [\nabla f_1(x_i), \nabla f_2(x_i), \nabla f_3(x_i), \nabla f_4(x_i)]$$

$$= \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1(x_i)}{\partial q_0} & \dots & \frac{\partial f_1(x_i)}{\partial q_3} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_4(x_i)}{\partial q_0} & \dots & \frac{\partial f_4(x_i)}{\partial q_3} \end{bmatrix} \quad (11)$$

当  $\|\nabla f(x_i)^T \nabla f(x_i)\| < \varepsilon$  时, 迭代终止,  $x_i$  为最优解; 否则按式(12)更新  $x$ , 继续迭代.

$$x_{i+1} = x_i - (\nabla f(x_i)^T \nabla f(x_i))^{-1} \nabla f(x_i)^T f(x_i) \quad (12)$$

当迭代结束时, 得到当前静止时的姿态四元数, 按式(5)和式(6)计算姿态角.

### 3.3 基于卡尔曼滤波的数据融合

在载体运动的短时间内, 陀螺仪测量的精度高, 但长时间工作会产生累积误差, 使精度降低. 加速度计和磁强计能得出更精确的静态角度, 但是动态参数性能差, 误差大. 本文采用三轴加速度计、磁强计和陀螺仪进行组合姿态测量, 用卡尔曼滤波融合的方式<sup>[11-13]</sup>, 将彼此优点进行互补, 整体实现方法如图 3 所示.

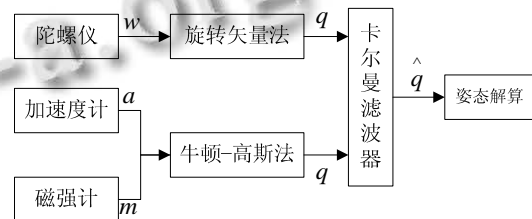


图 3 车辆状态解算原理图

构造本系统的卡尔曼滤波器模型, 将旋转矢量法解算出的陀螺仪姿态四元数作为状态变量  $x = [q_0, q_1, q_2, q_3]^T$ . 由捷联惯导系统的四元数

$$\dot{Q} = \frac{1}{2} Q \otimes w_n^b$$

$$\begin{pmatrix} \dot{q}_0 \\ \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \dot{q}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\Delta w_x}{2} & -\frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_z}{2} \\ \frac{\Delta w_x}{2} & 0 & \frac{\Delta w_z}{2} & -\frac{\Delta w_y}{2} \\ \frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_z}{2} & 0 & \frac{\Delta w_x}{2} \\ \frac{\Delta w_z}{2} & \frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_x}{2} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_0 \\ q_1 \\ q_2 \\ q_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

其中,  $\Delta w = \begin{pmatrix} \Delta w_x \\ \Delta w_y \\ \Delta w_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_x - \delta_x \\ w_y - \delta_y \\ w_z - \delta_z \end{pmatrix}$  为载体真实角速度估计

值,  $\begin{pmatrix} \delta_x \\ \delta_y \\ \delta_z \end{pmatrix}$  为陀螺仪噪声误差.

由式(13)建立卡尔曼滤波状态方程

$$\dot{X}(t) = F(t)X(t) + G(t)W(t) \quad (14)$$

其中,

$$F(t) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{\Delta w_x}{2} & -\frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_z}{2} \\ \frac{\Delta w_x}{2} & 0 & \frac{\Delta w_z}{2} & -\frac{\Delta w_y}{2} \\ \frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_z}{2} & 0 & \frac{\Delta w_x}{2} \\ \frac{\Delta w_z}{2} & \frac{\Delta w_y}{2} & -\frac{\Delta w_x}{2} & 0 \end{pmatrix} \quad G(t) = \begin{pmatrix} -q_1 & -q_2 & -q_3 \\ q_0 & -q_3 & q_2 \\ q_3 & q_0 & -q_1 \\ -q_2 & q_1 & q_0 \end{pmatrix}$$

将式(14)线性近似离散化后得:

$$X_k = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} + \Gamma_{k-1} W_{k-1} \quad (15)$$

其中,  $X_k$  为 4 维状态序列,  $\Phi_{k,k-1}$  是  $4 \times 4$  维误差状态

转移矩阵, 当采用间隔较小时,  $\Phi_{k,k-1} \approx I_{4 \times 4} +$

$F(t_{k-1}) \cdot T$ ,  $\Gamma_{k-1}$  是  $4 \times 3$  维系数矩阵, 当  $W_{k-1}$  方差不变

时,  $\Gamma_{k-1} \approx T \cdot [I + \frac{1}{2!} F(t_{k-1}) \cdot T] G(t)$ ,  $W_{k-1}$  为  $[\delta_x \quad \delta_y \quad \delta_z]^T$

是系统过程噪声序列, 服从零均值正态分布, 其协方差矩阵为  $Q(t)$ .

建立观测方程, 取观测量  $Z = [a_x a_y a_z \theta]^T$ , 由式(6)和(9)得到卡尔曼滤波观测方程为:

$$Z = \begin{pmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \\ \theta \end{pmatrix} = H(X) + V = \begin{pmatrix} 2g(q_1 q_3 - q_0 q_2) \\ 2g(q_2 q_3 + q_0 q_1) \\ g(q_0^2 - q_1^2 - q_2^2 + q_3^2) \\ -\arcsin(2(q_1 q_3 - q_0 q_2)) \end{pmatrix} + V \quad (16)$$

将式(16)线性近似离散化后得:

$$Z(k) = H(k)X(k) + V(k) \quad (17)$$

其中,  $V$  为测量噪声, 近似为均值高斯白噪声过程, 其协方差矩阵为  $R(t)$ .  $H(k)$  为  $Z(k)$  对  $X(k)$  偏导的雅克比矩阵:

$$H(k) = \nabla Z(X(k)) = \begin{pmatrix} -2gq_2 & 2gq_3 & -2gq_0 & 2gq_1 \\ 2gq_1 & 2gq_0 & 2gq_3 & 2gq_2 \\ 2gq_0 & -2gq_1 & -2gq_2 & 2gq_3 \\ \frac{2q_2}{Q} & \frac{-2q_3}{Q} & \frac{2q_0}{Q} & \frac{-2q_1}{Q} \end{pmatrix}$$

其中,  $Q = \sqrt{1 - 4(q_1 q_3 - q_0 q_2)^2}$ ,  $q_0 \quad q_1 \quad q_2 \quad q_3$  为: auss-Newton 迭代的结果.

根据已建立的卡尔曼滤波状态方程和观测方程, 建立卡尔曼滤波的时间传播方程. 状态的一步预测方程:

$$X_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} X_{k-1} \quad (18)$$

一步预测均方误差矩阵:

$$P_{k,k-1} = \Phi_{k,k-1} P_{k-1} \Phi_{k,k-1}^T + \Gamma_{k-1} Q_{k-1} \Gamma_{k-1}^T \quad (19)$$

滤波增益矩阵:

$$K_k = P_{k,k-1} H_k^T (H_k P_{k,k-1} H_k^T + R_k)^{-1} \quad (20)$$

状态估计计算方程:

$$X_k = X_{k,k-1} + K_k (Z_k - H_k X_{k,k-1}) \quad (21)$$

估计均方误差矩阵:

$$P_k = (I - X_k H_k) P_{k,k-1} \quad (22)$$

对估计出的状态, 即姿态四元数, 按式(5)和式(6)计算车辆的姿态.

#### 4 实验结果及分析

为验证本系统检测的准确性, 搭建硬件平台, AHRS 模块作为系统的数据获取模块, 水平安装在车辆上, 其参数性能如表 1 所示.

用 Gauss-Newton 迭代法解算出加速度计和磁强计测量的姿态角与卡尔曼滤波的解算结果进行比较, 如

图 4 所示.

表 1 AHRs 模块参数性能指标

	6 轴地磁模块 LSM303DLH		1 轴陀螺仪	2 轴陀螺仪
	三轴加速度计	三轴磁力计	Y330ALH	LPR430AL
测量范围	$\pm 2/\pm 4/\pm 8g$	$\pm 1.3-8.1$ Gauss	$\pm 300dps$	$\pm 1200dps$
灵敏度	1.1-4.3Mg	20mGauss	3.75mv/dps	670 $\mu V/dps$
工作温度	-30°C-85°C	-30°C-85°C	-40°C-85°C	-40°C-85°C

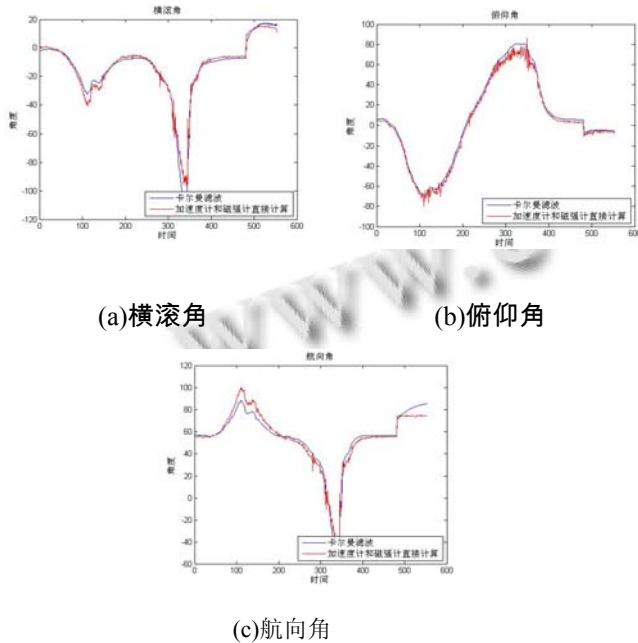


图 4 高斯牛顿法与卡尔曼滤波算法姿态解算对比图

由式(9)知基于加速度计和磁强计的姿四元素解算只依赖于当前时刻的加速度和磁场,与前一时刻的加速度和磁场无关,因此解算过程不产生累计误差,解算结果整体上符合姿态角度的变化.由于加速度计和磁强计的动态参数性能差,易受磁场波动和载体运动的影响,因此解算结果会出现局部噪声大、精度低等问题.在载体运动的短时间内,陀螺仪测量的精度高,但会产生累积误差.卡尔曼滤波算法融合两者的优点,解算的姿态结果更加准确,数据更加平滑.

获取车辆不同状态下的数据,并解算出车辆姿态角,结果如图 5 所示.从图 2 可以看出当车辆过坡时航向角和横滚角基本不变,而俯仰角则会经历先变小再变大最后趋于平稳的过程;当车辆转弯时,俯仰角和横滚角基本不变,由航向角定义,车辆右转弯航向角变大,左转则变小.当车辆发生倾斜时,由车载坐标系

知横滚角将发生变化,由横滚角定义,车辆左倾横滚角变小,右倾则变大.从图 5 可以看出车辆在不同状态下姿态角的变化与车辆运行状态一致.

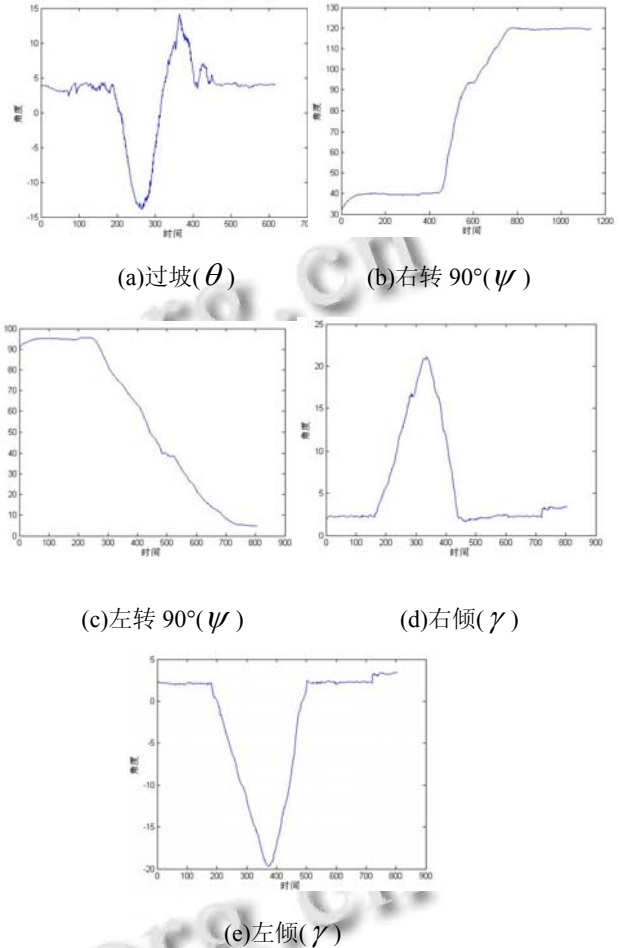


图 5 车辆不同状态下姿态变化图

### 5 总结

本文采用三轴加速度计、磁强计和陀螺仪进行组合姿态测量,采用卡尔曼滤波进行多传感器信息融合.实验结果表明基于多传感器的卡尔曼滤波算法解算的姿态角比常规方法解算的姿态角更准确、数据更稳定.将系统用于车辆姿态检测,车辆在不同状态下的姿态角度变化与车辆的运行状态一致.

### 参考文献

- 葛如海,管军,虞小波,石存杰.车辆姿态感知与运动状态预测技术.计算机与现代化,2013,216(8):38-42.
- 孙丽,秦永元.捷联惯导系统姿态算法比较.中国惯性技术学报,2006,14(3):6-10.
- 屈熠,赵忠.增强型等效旋转矢量算法在圆锥运动下的仿真.计算机仿真,2010,27(11):25-28.

- 4 李海涛,曹咏弘,祖静.等效旋转矢量法在旋转弹姿态解算中的应用.测试技术学报,2011,25(4):287-291.
- 5 吴军,鲍其莲.高精度捷联惯导姿态更新优化算法研究.电子测量技术,2010,33(2):49-52.
- 6 李磊,鲍其莲.基于 MARG 的两种实时姿态测量算法的分析与比较,2009,32(2):79-82.
- 7 梁建宏,田伟程,王田苗.基于 ARM 与低成本 MEMS 器件的 AHRS 设计.单片机与嵌入式系统应用,2012,12(5):1-4.
- 8 郭剑东,宋彦国,夏品奇.基于 MEMS 的分散式低阶 AHPRS 系统设计.纳米技术与精密工程,2011,9(1):26-32.
- 9 张春慧,吴简形,谢林.捷联姿态解算的旋转矢量法.2004 年船舶仪器仪表学术年会论文集.2004.89-92.
- 10 Madgwick SOH, Harrison AJL, Vaidyanathan R. Estimation of IMU and MARG orientation using a gradient descent algorithm.Rehabilitation Robotics (ICORR). 2011 IEEE International Conference on. IEEE. 2011. 1-7.
- 11 杨淑洁,曾庆双,伊国兴.低成本无人机姿态测量系统研究.传感器与微系统,2012,31(2):15-18,22.
- 12 高宗余,李德胜.多 MEMS 传感器姿态测量系统的研究.电光与控制,2010,17(3):68-71.
- 13 黄卫权,董冀.基于 MTi 微惯性航姿系统的卡尔曼滤波器设计.自动化技术与应用,2009,28(1):54-57.