

6-14-2018

## Design of Mini Folding Electric Scooter Based on Relative Attitude Angle Control

Lijun Jiang

*South China University of Technology, Guangzhou 510000, China;*

Zhanghong Wu

*South China University of Technology, Guangzhou 510000, China;*

Shaohui Pan

*South China University of Technology, Guangzhou 510000, China;*

Zhelin Li

*South China University of Technology, Guangzhou 510000, China;*

*See next page for additional authors*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

---

This Original Article is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Design of Mini Folding Electric Scooter Based on Relative Attitude Angle Control

## Abstract

**Abstract:** To help people move conveniently after getting off the public transport in the city, a new mini electric scooter design is proposed. This new scooter *uses a smart mobile phone to receive driving intention and owns more efficient, convenient and space-saving folding pattern*. A kinematics model of scooter is set up and discussed. *A control strategy based on the relative attitude angle, an attitude sensor data consolidation approach based on the complementary filter, a solution to the Euler angle jumping and an estimate method to the wrong operation are proposed*. The design is made into a prototype based on Arduino and Android platforms. The results of final tests show that the space occupation of this mini folding electric scooter can be reduced obviously through the horizontal and the vertical folding. The control strategy based on the relative attitude angle is proved to be feasible, which can provide new train of thought for control strategy design of mini electric scooter.

## Keywords

mini electric scooter, smart mobile phone, folding, relative attitude angle, Euler angle, complementary filter

## Authors

Lijun Jiang, Zhanghong Wu, Shaohui Pan, Zhelin Li, Zhiyong Xiong, and Yongqing Fu

## Recommended Citation

Jiang Lijun, Wu Zhanghong, Pan Shaohui, Li Zhelin, Xiong Zhiyong, Fu Yongqing. Design of Mini Folding Electric Scooter Based on Relative Attitude Angle Control[J]. Journal of System Simulation, 2018, 30(6): 2295-2305.

# 基于相对姿态角控制的微型折叠电动车设计

姜立军, 吴章鸿, 潘绍辉, 李哲林, 熊志勇, 付永清

(华南理工大学, 广东 广州 510000)

**摘要:** 为解决城市通勤中最后一公里的问题, 提出了一种使用智能手机接收操作意图, 折叠操作更快捷, 折叠后更方便携带、更节省收纳空间的微型电动车设计方案。对电动车进行了运动学建模, 提出了基于相对姿态角的控制策略、基于互补滤波的姿态传感器数据整合方法、欧拉角跳变解决方法、误操作判定方法。最后结合 Arduino 和 Android 平台制作样机并测试。结果表明, 通过横向和纵向的折叠能明显减少空间占用, 基于相对姿态角的控制方法是可行的, 这为微型电动车的控制设计提供了新的思路。

**关键词:** 微型电动车; 智能手机; 折叠; 相对姿态角; 欧拉角; 互补滤波

中图分类号: U489      文献标识码: A      文章编号: 1004-731X (2018) 06-2295-11

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201806037

## Design of Mini Folding Electric Scooter Based on Relative Attitude Angle Control

Jiang Lijun, Wu Zhanghong, Pan Shaohui, Li Zhelin, Xiong Zhiyong, Fu Yongqing

(South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** To help people move conveniently after getting off the public transport in the city, a new mini electric scooter design is proposed. This new scooter uses a smart mobile phone to receive driving intention and owns more efficient, convenient and space-saving folding pattern. A kinematics model of scooter is set up and discussed. A control strategy based on the relative attitude angle, an attitude sensor data consolidation approach based on the complementary filter, a solution to the Euler angle jumping and an estimate method to the wrong operation are proposed. The design is made into a prototype based on Arduino and Android platforms. The results of final tests show that the space occupation of this mini folding electric scooter can be reduced obviously through the horizontal and the vertical folding. The control strategy based on the relative attitude angle is proved to be feasible, which can provide new train of thought for control strategy design of mini electric scooter.

**Keywords:** mini electric scooter; smart mobile phone; folding; relative attitude angle; Euler angle; complementary filter

## 引言

目前, 城市公共交通普遍存在着接驳站点之间

距离远的问题, 乘客不得不徒步换乘。此外, 在大型展馆、景点、户外游乐场等场合, 长距离的步行也会耗费游客大量的时间和精力。

针对这些问题, 近年来市面上出现各种微型电动车, 例如 Segway 公司的两轮自平衡车、IPS 公司的独轮车、LEEV Jack electric scooter 电动折叠滑板车等, 大都具有电能驱动、占地面积小、轻巧



收稿日期: 2016-07-22      修回日期: 2016-10-11;  
基金项目: 国家自然科学基金(51275174), 广州市科技计划项目科学发展专项基金(201607010308);  
作者简介: 姜立军(1968-), 男, 湖南益阳, 博士, 教授, 研究方向为设计学理论与方法、智能化产品与交互设计、增强现实。

<http://www.china-simulation.com>

• 2295 •

灵活等特点，可以在很多特殊的环境中获得应用。根据轮子的个数及控制的方式，可以将微型电动车划分为电动平衡车、无把手电动四轮滑板、带把手电动滑板车、电动自行车和电动摩托车。

电动平衡车无论是独轮还是双轮，由于需要维持自身平衡，其耗电、重量、价格和学习成本高，安全性相对较低；无把手的电动四轮滑板对操控技术要求高，遇到需要步行的场合只能将其抬起而不能直接拖行，不适合在台阶、楼梯出现较多的场合驾驶；带把手的滑板车相对其他类型而言更适合城市中公共交通驳接，但在等红绿灯、急停或较长时间不用等情况下，需要踏出至少一只脚在地面保持平衡，间接地影响使用体验；折叠电动自行车和电动摩托车行驶速度较高、里程长但不便随身携带。

综上所述，目前市面上多数的微型电动车类型在安全、使用体验、折叠性能等功能上难以兼顾，难以满足城市接驳严苛的需求。因此，体型小、有三或四轮支撑、结构简单、带把手、可折叠、折叠后如行李箱般便于拖动的微型电动车，势必符合更多人的操作习惯和使用需求。

## 1 结构设计及运动学分析

现以站立作为驾驶姿势，以智能手机与姿态传感器间的加速度、姿态角的差值作为操控意图的感应来源，以可伸缩的操纵杆作主动件带动车体纵向和横向的折叠为目标，设计了一款微型折叠电动车。主要设计性能指标如表1所示。

表1 微型电动车主要设计性能指标  
Tab. 1 Main performance indexes of mini electric scooter design

参数	量值
展开状态体积(长×宽×高)/mm	600×460×1 100
折叠状态体积(长×宽×高)/mm	256×240×1 088
重量	9.6 kg
最大设计速度	25 km/h
最大设计行驶里程	20 km
设计爬坡能力	≥15°

## 1.1 微型折叠电动车的机械结构设计

### 1.1.1 总体结构

图1(a)~(b)分别展示了微型折叠电动车(文中用微型电动车指代)在展开和收纳状态下的整体结构示意图。其车身可分成3个主要功能结构：脚踏纵向折叠结构、脚踏横向折叠结构、操作杆。

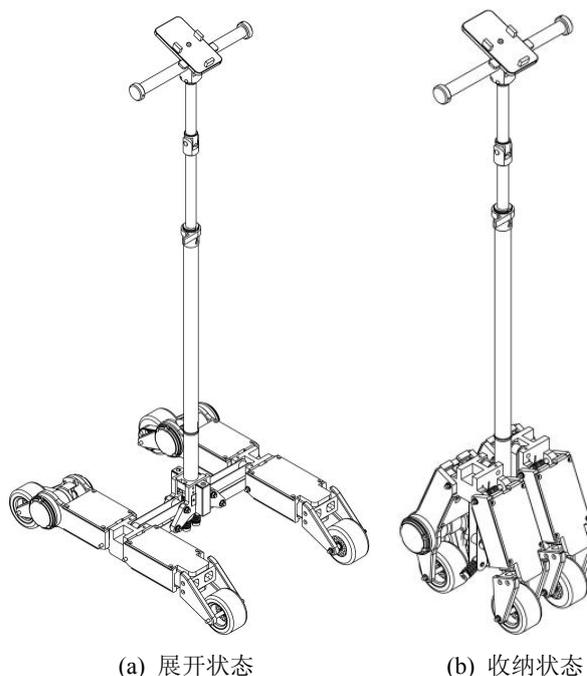


图1 车辆整体结构示意图  
Fig. 1 Diagram of the scooter's integral structure

微型电动车的硬件系统工作原理是：蓝牙模块接收到智能手机内置传感器的姿态角信息后，将数据传输给 Arduino 控制器。控制器将数据进行校验并将手机的姿态角与车身内置传感器的姿态角进行计算得出相对姿态角，最后通过蓝牙将角度和转速信息返回给客户端。同时，控制器根据相对姿态角，将设定转速值和霍尔传感器的测得的左右两个电机的当前转速值进行数字 PID 运算，最后得出 PWM 脉宽调制信号发送给左右 2 个电机驱动器。PWM 脉宽信号经过电机驱动器放大后控制无刷直流电机的转速和输出扭矩，驱动微型电动车的行驶。

### 1.1.2 脚踏纵向折叠结构

脚踏纵向折叠结构如图 2 所示, 车体大部分配件包括同步轮、电调、电机、电池等均在脚踏折叠结构内部分布放置, 使脚踏纵向折叠结构的重量分布均匀, 同时降低了微型电动车的重心, 使其即使在折叠状态下也能平稳地放置在地面上。脚踏结构的板件包裹着这些电子零部件对其进行保护。

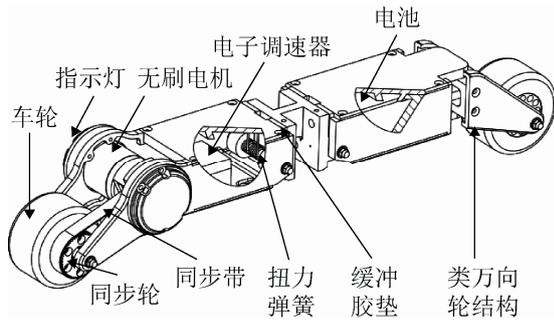


图 2 脚踏纵向折叠态结构展开状图  
Fig. 2 Unfolding state of longitudinal folding structure

扭力弹簧使脚踏纵向折叠结构在没有被用户的脚掌踩踏时能够自动地进行折叠收缩; 缓冲胶垫能在微型电动车展开折叠以及行驶时提供一定的缓冲; 指示灯能在行驶转向时警示闪烁; 类万向轮结构利用万向轮的原理进行再设计, 在微型电动车两个前驱动轮发起差速转向的时候能够随向转动。类万向轮的转动范围被限定在 $\pm 30^\circ$ 以内, 避免转向过度, 并保证折叠状态下轮子依然能保持着地。

### 1.1.3 横向折叠结构

如图 3 所示, 横向折叠结构主要通过两组四连杆结构实现折叠, 折叠后可使车轮的朝向不变。进行折叠时, 用户需松开压紧推拉杆的快拆夹, 一手握稳主杆, 另一手将套在主杆内的推拉杆向下推, 压下两个四连杆结构的靠内侧端, 从而使靠外侧端上抬实现折叠。始终保持压缩状态的操纵杆弹簧两端分别固定于主杆和推拉杆上, 能提供部分下压推拉杆的弹力, 使折叠更轻松。

摆杆上弹簧和摆杆下弹簧是两个处于压紧状态的弹簧, 其作用是实现避震。它们夹紧下连杆在摆杆上的滑动端, 使其在摆杆上有一定滑动空间的

同时能自动恢复至原位。由于这个结构, 两侧连杆及其所连接的纵向折叠结构可以独立地摆动不同的幅度以吸震和实现转向向心侧倾, 使车辆更好的迎合复杂的路面情况, 增强结构行驶时的平顺性。折叠过程中, 当上连杆和下连杆并拢时, 表示横向折叠幅度达到极限, 车辆横向体积降至最低。

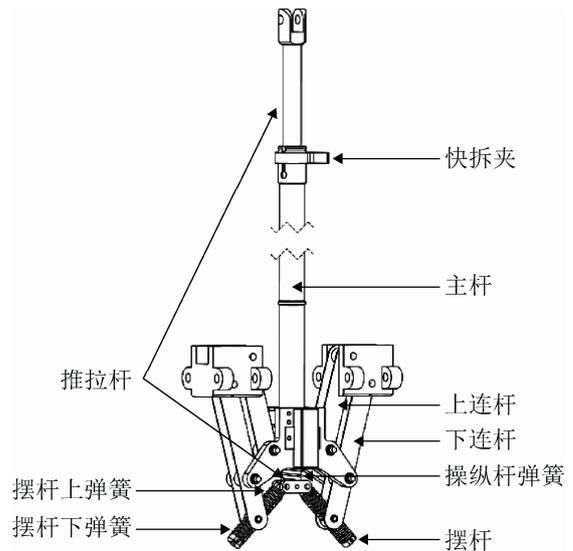


图 3 横向折叠结构折叠至一半状态图  
Fig. 3 Half folding state of horizontal folding structure

## 1.2 差速转向的微型电动车运动学建模

### 1.2.1 折叠微型电动车的坐标系

微型电动车底部的 4 个轮子与车身是通过一定的机械结构连接在一起的, 每个轮子对电动车的运动作贡献, 同时又约束了其运动, 将它们的约束整合起来便构成了对两组脚踏纵向折叠结构所组成的底部结构的运动约束。

在整个运动学分析过程中, 把微型电动车假设成在一个平面上运行的刚体, 并且忽略微型电动车附加的自由度。而在工作平面上, 微型电动车的底部结构有 3 个自由度: 两个是该平面上的平移运动, 另一个为旋转运动, 且旋转运动的旋转轴与该平面垂直。为了确定微型电动车在平面中的位置, 取大地坐标系为工作平面, 定义大地坐标系为  $xOy$ , 同时定义微型电动车的局部坐标系为  $x_R C y_R$ 。在大地坐标系上, 通过  $x$  和  $y$  可以确定局部坐标系原点  $C$

的位置,  $\theta$  则给定了两个参考坐标系之间的角度差, 因此, 可以将微型电动车的姿态用包含这 3 个元素的矢量表达。

$$\xi_I = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

把微型电动车在大地坐标系  $xOy$  中上的运动映射到微型电动车的局部坐标系  $x_RCy_R$  当中, 则该映射通过如式(2)所示的正交旋转矩阵实现此坐标系的转换。

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

假设  $\xi_I$  和  $\xi_R$  分别表示为大地坐标系和局部坐标系下的微型电动车的运动状态矢量, 则通过旋转矩阵  $R(\theta)$  实现坐标系的转换的方式为:

$$\xi_R = R(\theta)\xi_I \quad (3)$$

### 1.2.2 差速转向的微型电动车的运动学模型

由微型电动车的结构设计方案可知, 其运动状态主要受两驱动轮控制, 而两个类万向轮只起支撑的作用, 对微型电动车的运动影响不大, 因此忽略两个类万向轮的影响, 仅用两个驱动轮代表整个微型电动车进行研究。

假设在微型电动车的局部坐标系  $x_R$  轴与大地坐标系的  $x$  轴形成的夹角为  $\theta$ ,  $y_R$  轴与微型电动车的两轮轴线垂直且平行于车体正前方, 原点  $C$  位于微型电动车的平面重心位置。微型电动车的两个主动轮间的距离为  $l$ , 每个轮的直径为  $r$ 。

假设在运动过程中微型电动车在大地坐标系中质心的线速度为  $v(t)$ , 角速度  $\omega(t)$ , 微型电动车左轮转速为  $\dot{\phi}_L$ , 线速度为  $V_L$ , 右轮转速为  $\dot{\phi}_R$ , 线速度为  $V_R$ , 则根据已知的  $r$ ,  $l$ ,  $\theta$ , 可以给出如式(4)所示的运动学方程。

$$\begin{aligned} V_L &= \dot{\phi}_L \frac{r}{2}, \quad V_R = \dot{\phi}_R \frac{r}{2} \\ \omega(t) &= \frac{V_L - V_R}{l}, \quad v(t) = \frac{V_L + V_R}{2} \end{aligned} \quad (4)$$

定义广义位姿矢量为  $q = (x, y, \theta, \phi_L, \phi_R)^T$ , 速度矢量为  $v = (\dot{\phi}_L, \dot{\phi}_R)^T$ , 则微型电动车的运动学模型用下式描述为:

$$\dot{q} = S(q)v \quad (5)$$

式中:

$$S(q) = \begin{bmatrix} \frac{r \cos\theta}{2} & \frac{r \sin\theta}{2} & -\frac{r}{2l} & 1 & 0 \\ \frac{r \cos\theta}{2} & \frac{r \sin\theta}{2} & \frac{r}{2l} & 0 & 1 \end{bmatrix}^T$$

从式(5)可以看出, 当  $\dot{\phi}_L = \dot{\phi}_R$  时,  $\dot{\theta} = 0$ ,  $\theta$  为定值, 即  $\dot{x}$  和  $\dot{y}$  也为定值, 此时微型电动车作直线运动。当  $\dot{\phi}_L \neq \dot{\phi}_R$  时,  $\dot{\theta} \neq 0$ ,  $\theta$  为线性函数, 因此根据  $\dot{x}$  和  $\dot{y}$  的表达式可知, 此时微型电动车绕某一点作圆周运动。设所作圆周运动的半径为  $B$ , 定义转弯半径系数  $k$ , 设  $\dot{\phi}_L = \dot{\phi} + k\dot{\phi}$ ,  $\dot{\phi}_R = \dot{\phi} - k\dot{\phi}$ , 其中  $\dot{\phi}$  为两轮平均转速, 则可推出:

$$B = \frac{l(\dot{\phi}_L + \dot{\phi}_R)}{2(\dot{\phi}_L - \dot{\phi}_R)} = \frac{l}{2} \cdot \frac{1}{k} \quad (6)$$

由式(6)可知, 轮子的转速  $\dot{\phi}_L$  与  $\dot{\phi}_R$  决定了转弯半径的大小, 也可以用两轮平均转速值  $\dot{\phi}$  与转弯半径系数  $k$  来描述转弯半径  $B$ 。当  $k$  越大,  $B$  越小, 反之  $k$  越小,  $B$  越大。

## 2 相对姿态的运动控制算法设计

### 2.1 利用相对姿态角实现的运动控制策略

用户的智能手机被充分利用为操作意图的识别工具安置在微型电动车的操纵手把上。但若只依赖手机的姿态角进行操作意图的识别, 则容易发生误判。如当车辆在行驶过程中遇到颠簸、上下坡等路况发生侧倾时, 手机也会跟着侧倾, 车辆或因手机的倾斜而做出非用户想要的转弯或加速行驶。因此, 为使车辆处理器能够识别用户真正的意图, 需要额外的姿态传感器刚性连接到车辆的车体上, 并以从它读取到的姿态数据作为基准, 求解出手机即操纵手把姿态数据与其的差值, 最终以这个差值作为控制意图的判断依据。因此, 首先应获取姿态偏差值:

$$\Delta O = O_{\text{phone}} - O_{\text{arduino}} \quad (7)$$

即:

$$\begin{bmatrix} \Delta Yaw \\ \Delta Pitch \\ \Delta Roll \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{\text{phone}} - Y_{\text{arduino}} \\ P_{\text{phone}} - P_{\text{arduino}} \\ R_{\text{phone}} - R_{\text{arduino}} \end{bmatrix}$$

式中:  $O_{\text{phone}}$  为从手机自带传感器得到的包含 Yaw、Pitch、Roll 3 个角的矢量值;  $O_{\text{arduino}}$  为控制器利用一块 MPU9150 传感器得到的 DMP 数据, 也是包含 Yaw、Pitch、Roll 3 个角的矢量值。两个矢量相减得到他们的偏差矢量值  $\Delta O$ 。

## 2.2 姿态角的获取以及数据处理方法

### 2.2.1 姿态传感器数据获取及互补滤波的整合方法

通过对比不同的 MEMS 惯性传感器发现, 加速度传感器直接测量姿态角容易受到外部加速度的影响<sup>[1]</sup>, 地磁传感器容易受到其他磁场的干扰, 若直接利用加速度传感器与地磁传感器的测量值计算姿态角, 则精度不高, 且包含噪声, 动态响应慢。而陀螺传感器精度高、动态响应快, 但是存在漂移现象和积累误差等<sup>[2]</sup>。

为了得到较为准确的姿态信息用于对微型电动车的控制, 可以对三个传感器的获得的数据进行整合。同时考虑到实际姿态变化率并不大和运算速度要求不高, 选用互补滤波器对传感器数据进行处理, 以取得更好的效果<sup>[3]</sup>。该方法如下:

利用高通滤波器结合陀螺仪读数计算姿态角矢量  $O_{\text{gyr}}(n)$ , 和利用低通滤波器结合加速度传感器和地磁传感器的读数计算姿态角矢量  $O_{\text{accmag}}(n)$  的公式如下:

$$O_{\text{gyr}}(n) = O_{\text{gyr}}(n-1) + \Delta t \cdot R_{\text{gyr}} \quad (8)$$

$$O_{\text{accmag}}(n) = \alpha \cdot O_{\text{accmag}}(n-1) + (1-\alpha)a_{\text{new}} \quad (9)$$

式中:  $O_{\text{gyr}}(n-1)$  和  $O_{\text{accmag}}(n-1)$  为各传感器上一次计算得到的姿态角;  $\Delta t$  为陀螺传感器的采样周期;

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta\sin\gamma & \sin\gamma\cos\alpha & \cos\gamma\sin\beta + \sin\gamma\sin\alpha\cos\beta \\ -\cos\beta\sin\gamma - \sin\alpha\sin\beta\cos\gamma & -\cos\gamma\sin\alpha & \cos\gamma\sin\alpha\cos\beta - \sin\gamma\sin\beta \\ -\cos\alpha\sin\beta & -\sin\alpha & \cos\alpha\cos\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

$R_{\text{gyr}}$  为从陀螺仪读取到角速度矢量;  $\alpha$  为滤波器系数;  $a_{\text{new}}$  为从加速度传感器和地磁传感器读取到的姿态数据。

为了提高姿态数据的可靠度, 保留低通滤波器的低通部分  $(1-\alpha)a_{\text{new}}$ , 将高通滤波器计算得到的  $O_{\text{gyr}}(n)$  替代低通滤波器的高通部分中的  $O_{\text{accmag}}(n-1)$ 。高通滤波并加权整合后的  $\alpha \cdot O_{\text{gyr}}(n)$  能消除陀螺仪的漂移误差, 整合后的姿态角矢量  $O(n)$ :

$$O(n) = \alpha \cdot O_{\text{gyr}}(n) + (1-\alpha)a_{\text{new}} \quad (10)$$

这样的数据补偿计算结构被称为互补滤波器。根据 Shane Colton 提出的方法<sup>[4]</sup>, 当  $\alpha=0.98$  时, 能取得较好的效果。

### 2.2.2 手机自带传感器的姿态获取方法

根据 Android API 定义, 在 Android 设备中的局部坐标系是相对手机固定不变的, 全局坐标系中定义 X 轴指向东方与大地平行, Y 轴指向地磁场北极与大地平行, Z 轴垂直于地面与重力加速度矢量方向相反。全局坐标系是不会随着手机的姿态改变的, 表示的是设备相对于地球的姿态。

由于传感器获得的数据是基于局部坐标系  $O'$  的, 所以需要将局部坐标系  $O'$  的传感器数据转换到全局坐标系  $O$  中, 再进行姿态的解算。 $O'$  分别绕  $O$  中的轴 x、y 或 z 作转角分别为  $\alpha$ 、 $\beta$  或  $\gamma$  的旋转变换, 采用 YPR 形式的欧拉角表示方法: Y 角为绕全局坐标系的 z 轴旋转的角度, 为偏航角 Yaw; P 角为绕全局坐标系 x 轴旋转的角度, 为俯仰角 Pitch; R 角为绕全局坐标系的 y 轴旋转的角度, 为滚动角 Roll<sup>[5-6]</sup>。规定其旋转次序是: 首先绕 y 轴旋转  $\beta$  角, 再绕 x 轴旋转  $\alpha$  角, 最后 z 轴旋转  $\gamma$  角<sup>[7]</sup>。因此, 此描述设备局部坐标系的旋转矩阵计算如下:

$$R = R_z R_x R_y$$

旋转矩阵的具体形式:

通过陀螺传感器获得的原始数据和传感器更新时间,就可以计算得到绕局部坐标系的3个轴角速度,将角度增量 $R_{gvr}$ 通过(11)中的旋转矩阵 $R$ ,转换成基于全局坐标系的角度增量矩阵的形式 $R_{delta}$ ,并且,将已经获得的YPR角代到式(11)中得到 $R'$ ,然后 $R'$ 再与 $R_{delta}$ 的矩阵相乘后获得更新后的基于全局坐标系的姿态矩阵。在Android API中,还提供了将加速度传感器和地磁传感器得到的数据转换到全局坐标系的姿态矩阵形式的函数,可以直接调用,所以对于这两个传感器的数据无需用到转换矩阵 $R$ 。

这些步骤执行完之后,可以从智能手机读取到两个姿态矩阵:根据陀螺传感器数据计算的姿态矩阵和根据加速度传感器和地磁传感器计算得到的姿态矩阵。接着通过调用Android API里相应的函数,可将旋转矩阵转化成包含偏航角Yaw、俯仰角Pitch和横滚角Roll的矢量,就可以用如前一节描述的互补滤波器进行姿态数据处理。

### 2.3 基于相对姿态角的控制机制

从微型电动车的运动学分析可知,若要控制微型电动车前进或转弯,只需要控制 $\dot{\varphi}_L$ 和 $\dot{\varphi}_R$ ,即两轮平均转速值 $\dot{\varphi}$ 与转弯系数 $k$ 。同时由于电机与轮子是通过皮带传动的,所以电机转速与轮子转速是线性关系。设左电机转速为 $n_L$ ,右电机转速为 $n_R$ ,两电机的平均转速为 $n$ 。则电机转速与轮的转速关系如式(12)所示,式中: $i$ 为减速比。

$$n_L = i\dot{\varphi}_L, n_R = i\dot{\varphi}_R, n = i\dot{\varphi} \quad (12)$$

由于偏差矢量值 $\Delta O$ 具有3个分量,而需要控制的变量只有 $n$ 和 $k$ ,本文基于操纵与显示的相合性原则<sup>[8]</sup>,将偏航角和横滚角的偏差值 $\Delta Yaw$ 和 $\Delta Roll$ 一同控制车身转弯系数 $k$ , $0 \leq k \leq 1$ 。将俯仰角的偏差值 $\Delta Pitch$ 控制平均转速 $n$ 。使 $n_L = n(1+k)$ , $n_R = n(1-k)$ 。控制逻辑示意图如图4所示。

#### 2.3.1 转弯程度的控制

我们确定以偏航角的偏差值 $\Delta Yaw$ 和横滚角的偏差值 $\Delta Roll$ 同时作为转向的控制依据。根据传感器的特性, $\Delta Yaw$ 即使经过滤波器处理后也仍然有

一定的数据抖动,且幅度比 $\Delta Roll$ 和 $\Delta Pitch$ 的要大,这样会造成在控制的时候系统误认为用户频繁地进行转向操作,引起微型电动车转向不流畅。此时加入横滚角的偏差值 $\Delta Roll$ 进行转向参数的计算,将进一步增加转向的精确度和操作性。根据上述讨论,转弯半径系数 $k$ 的计算如式(13)所示:

$$k = p_Y \cdot (\Delta Yaw - Y_0) + p_R \cdot (\Delta Roll - R_0) \quad (13)$$

式中: $p_Y$ 为 $\Delta Yaw$ 的系数值; $p_R$ 为 $\Delta Roll$ 的系数值,这两个系数需要用户进行设定,不同的操作习惯,这两个值也会不同。 $Y_0$ 和 $R_0$ 分别是 $\Delta Yaw$ 和 $\Delta Roll$ 的校正值,这两个值需要根据实际安装情况进行确定。

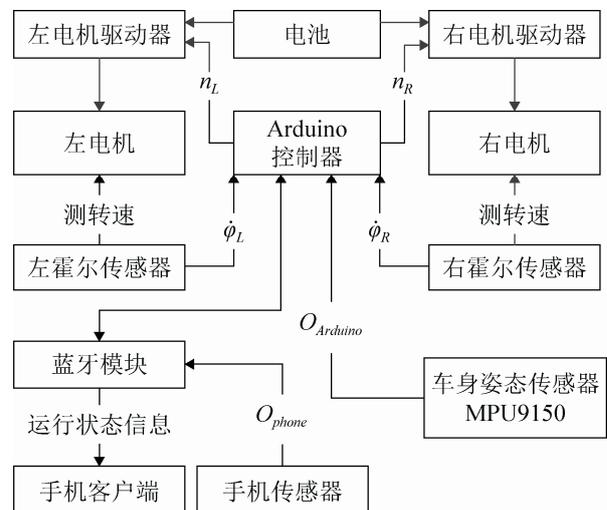


图4 控制逻辑示意图

Fig. 4 Diagram of control logic

#### 2.3.2 速度的控制

微型电动车的速度的控制是利用俯仰角的偏差值 $\Delta Pitch$ 进行的,一般情况下 $\Delta Pitch$ 与电机转速成正比,但考虑到下面的2种情况,需要进行特殊的处理。

1) 当路面出现异常导致电动车车身受阻突然减速时,出于惯性,操作者将前倾推动操作杆,但此时的推杆的操作意图并不是要加速;

2) 当操作杆静置不动时,由于姿态传感器数据会有一些抖动,或者由于一些细微的力使得操作杆有一些轻微的晃动导致系统错误地在零点附近频繁地对电机驱动器进行操作,这样将导致电动车在没有操作的情况下也会出现抖动现象。

为解决上述 2 种情况的问题, 应对输出的转速进行限幅处理, 即是当  $\Delta Pitch$  的值大于下限阈值  $P_L$  时,  $n$  才能开始输出; 当  $\Delta Pitch$  超出上限阈值  $P_H$  的时候, 此时  $n$  不再增大, 即电机转速达到最大值  $n_H$ 。假设  $n_H$  为设定的限制转速,  $P_L$  为设定的作用阈值,  $P_H$  为设定的最大量程, 可以给出  $n$  的计算方法:

$$n = \begin{cases} 0 & \Delta Pitch - P_0 < P_L \\ \frac{n_H}{P_H - P_L} (\Delta Pitch - P_0 - P_L) & P_L \leq \Delta Pitch - P_0 \leq P_H \\ n_H & \Delta Pitch - P_0 \geq P_H \end{cases} \quad (14)$$

$n_H, P_L, P_H$  这 3 个参数是用户给定的,  $P_0$  是  $\Delta Pitch$  的校正值, 需要根据实际安装情况在驾驶前进行设定, 参数  $n_H$  是电机输出转速的最高限定值。

### 2.4 欧拉角的跳变现象解决方法

由于欧拉角存在特定的定义域, 所以对于在空间上相邻的姿态  $O_1$  与  $O_2$  在靠近定义域的边界附近位置的时候, 使用欧拉角对这两个姿态进行描述的时候数值上可能存在较大差异, 这种现象叫做欧拉跳变现象<sup>[9]</sup>。所以在使用欧拉角计算两个姿态的偏差时, 由于传感器存在一定的误差会使得即使两个姿态虽然在空间上是相邻的, 但数值上却出现较大差异, 从而导致控制紊乱。由于手机的安放在微型电动车上,  $Pitch$  角和  $Roll$  角的值一般远离定义域边界, 其可能出现欧拉跳变现象只有  $Yaw$  角。跳变现象解决算法流程如图 5 所示。

### 2.5 误操作检测算法

当行驶中遇到突发情况可能会使得  $\Delta Pitch$  突然增大, 为避免由于其突然增大造成的失控, 必须设定最大输出转速  $n_S$ 。  $n_S$  的确定, 一种是通过用户给定初值  $n_H$ , 而这个值是即使是正常行驶也不能超出的; 另一种方法是, 在行驶过程中检测到用户在操作过程中遇到突发情况, 马上锁定此时的转速  $n$  为  $n_S$ 。

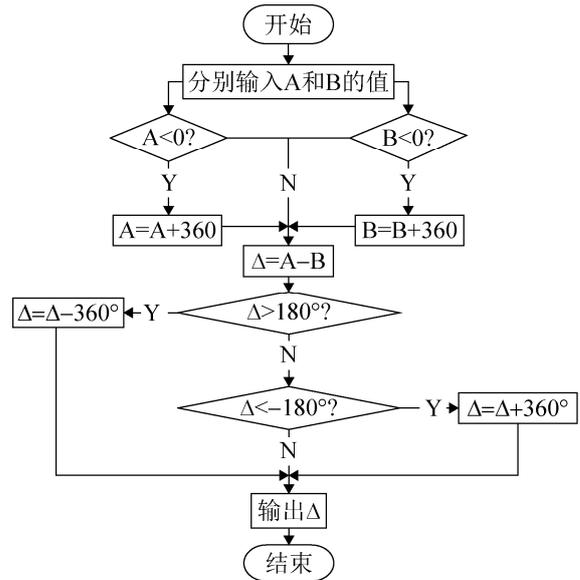


图 5 跳变现象解决算法流程图  
Fig. 5 Flow diagram of solution for the Euler angle jumping

误操作检测方法是基于智能手机内置的加速度传感器和加速度传感器陀螺仪设计的, 当用户的操作动作瞬时过大时, 和陀螺仪返回的数据在波形上也会出现尖峰, 可根据此尖峰来进行判别<sup>[10-13]</sup>。由于传感器所采集到的数据是 3 个正交方向的加速度和角速度, 所以在单一方向的检测难以做出判断, 因此用式(15)和(16)求加速度和角速度的变化幅值。

$$Acc = \sqrt{Acc_x^2 + Acc_y^2 + Acc_z^2} \quad (15)$$

$$Gyr = \sqrt{Gyr_x^2 + Gyr_y^2 + Gyr_z^2} \quad (16)$$

式中:  $Acc_x, Acc_y, Acc_z$  分别表示 3 个正交方向的加速度值;  $Gyr_x, Gyr_y, Gyr_z$  是陀螺仪正交角速度值。给定  $Acc, Gyr$  的阈值  $Acc_0, Gyr_0$ , 通过检测它是否大于阈值, 就可以判断是否发生误操作。一旦发生误操作, 将当前转速设定为当安全转速阈值, 即此时电机转速不能再增大。

设定  $n_{now}$  为电机当前实际转速, 由于左右电机都要进行独立的限制, 所以这个  $n_{now}$  实际是一个电机转速的矢量, 包含左电机转速和右电机转速。同时, 所限定的最大转速  $n_S$  实际也是一个矢量, 因为对左右电机的限速是不一样的。  $n_H$  如为用户设定的安全限制转速, 在正常情况下,  $n_S = \begin{bmatrix} n_H \\ n_H \end{bmatrix}$ ,

当发生误操作时,  $n_S = n_{now}$ , 将最大速度锁定为当前速度。只有在  $Acc$  和  $Gyr$  均不超过阈值且  $n_{now} < n_S$  时,  $n_S$  才会解除锁定, 并还原  $n_S = \begin{bmatrix} n_H \\ n_H \end{bmatrix}$ 。

### 3 系统测试及结果分析

#### 3.1 PI 参数的 $K_P$ 、 $K_I$ 的整定

对无刷直流电机一般采用 PI 控制<sup>[14-15]</sup>, 因此本课题也采用 PI 控制来对电机转速进行控制。其中霍尔传感器和电机驱动器与 Arduino 相连, Arduino 与电脑连接。PI 控制器的采样频率设置为 20 Hz。

首先将积分增益设为零, 将 PI 控制变为纯 P 调节器, 通过观察在不同增益系数下得到的设定转速与实际转速的稳态误差发现, 随着  $K_P$  值的不断增大, 电机稳态转速输出误差在不断地减小, 系统的响应速度也在不断地变快。但是当  $K_P > 0.25$  后, 误差不会继续减少。综上, 整定  $K_P = 0.25$ 。

在确定比例系数  $K_P$  的基础上, 观察了  $K_I$  值分别为 0.04、0.06、0.08、0.1 时设定转速与实际转速的输出比较。随着  $K_I$  从 0.02 增大到 0.04, 系统的响应速度变快。当  $K_I$  为 0.06 与 0.08 时, 响应速度的提高不明显。当  $K_I > 0.08$  时, 系统震荡会随着  $K_I$  的增大而加剧。结合用户体验和响应速度的考虑, 整定  $K_I = 0.06$ 。

#### 3.2 传感器数据整合效果测试

##### 3.2.1 测试方法

通过蓝牙向电脑实时发送两组调用 Android API 读取到的手机姿态角数据。

第一组是将陀螺仪、加速度和地磁三个传感器的姿态角矢量加以互补滤波计算后得到的数据。首先调用 Android API 里的相应函数, 计算得到手机陀螺仪的姿态矢量值  $gyroOrientation$ 、手机加速度和地磁传感器的姿态矢量值  $accMagOrientation$ 。将以上两组数据通过式(10)的互补滤波计算, 最后得到姿态角数据  $Acc/Mag/Gyr$ 。

第二组数据  $Acc/Mag$  则是上述方法中获取

到的手机加速度和地磁传感器的姿态矢量值  $accMagOrientation$ , 不加以任何处理。

将这两组数据保存后导入到 MATLAB 上进行分析。互补滤波器参数为  $\alpha = 0.98$  和  $dt = 0.01$ , 采样频率为 100 Hz, 每次测试时间为 60 s。

测试分两部分进行: 其一是静置状态。将手机静置在桌面不动得到数据; 其二是运动状态。将手机水平放置在自行车上手机支架上, 在稍有颠簸的路段行驶, 期间偶尔做加速与刹车动作, 在这种状况下获取一段时间内的姿态角数据。

##### 3.2.2 静置状态与运动状态下的测试结果

在手机静置和运动状态下得到的数据分别如图 6、图 7 所示。其中,  $Acc/Mag$  曲线与  $Acc/Mag/Gyr$  曲线是利用 3.2.1 小节提出的方法采集到的两组数据所绘制的。表 2 给出了静置状态下两组姿态角数据的统计比较。

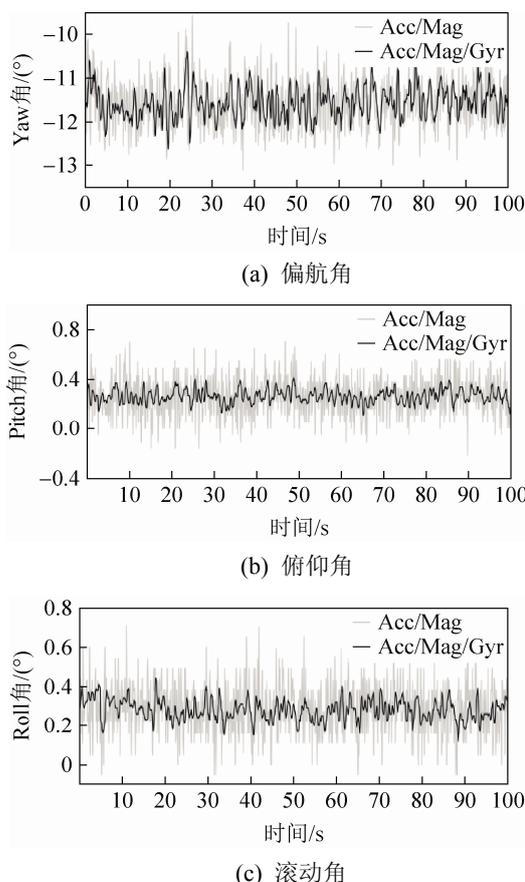


图 6 静置时直接读取与互补滤波整合后的姿态角数据比较

Fig.6 Comparisons of native data and integrated data from

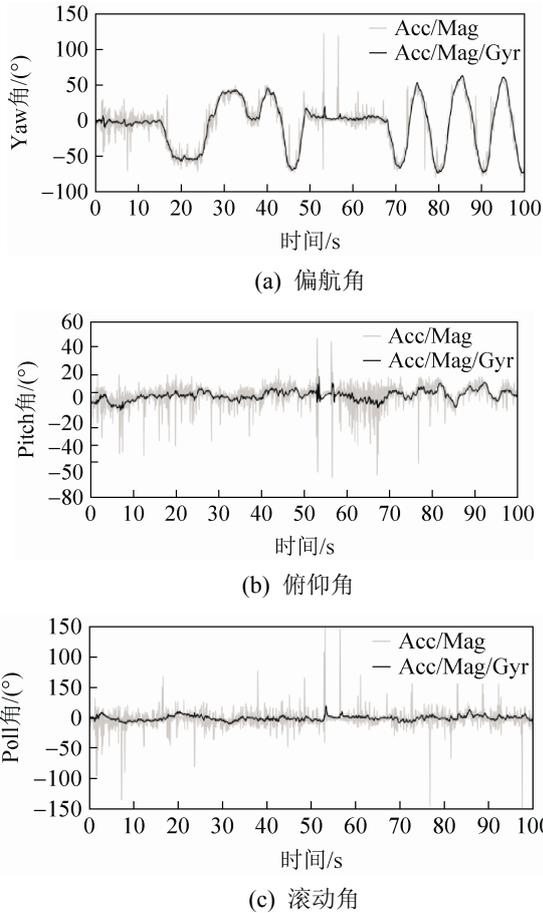


图 7 运动时直接读取与互补滤波整合后的姿态角数据比较  
Fig. 7 Comparisons of native data and integrated data from complementary filter in dynamic state

3.2.3 测试结果分析

从以上测试的对比图表中可以看出, 经过互补滤波整合数据的方法能够提高测量精度, 主要体现在以下 3 个方面: (1) 在静置状态时, 理想的姿态角曲线是一条水平直线, 互补滤波后的姿态角数据的极差和标准方差更小, 离散程度更小, 与直接读取的数据相比, 更接近直线形态; (2) 在运动状态下能有效地对非人为的极端跳动数据进行滤除;

complementary filter in static state

(3) 无论在静置还是运动状态下, 互补滤波后的整体曲线更加平滑, 即能对传感器自身产生的噪声进行有效地过滤。

虽然实际骑行时的主观舒适度评价也验证了互补滤波的方法可有效抑制路面造成的异常跳动和操控导致的车辆失控, 但综合考虑极差、标准方差及角加速度的变化, 为实现更精确地调控, 更好的改善骑行平稳性, 该方法值得进一步深入研究。

3.3 误操作检测模块测试

误操作检测模块测试时, 将手机放置在微型电动车的手机支架上, 然后分别以正常操作、快速转动操作杆、快速推动操作杆和复合混乱操作四种情况来模拟正常操作及误操作, 并通过蓝牙进行实时数据采集, 并手工记录所对应操作情况的时间点。

图 8 是加速度、角速度的阈值分别设为  $Acc_0=11$ ,  $Gyr_0=4$  时的测试结果, 其中蓝色的是  $Acc$  的数据曲线, 绿色的是  $Gyr$  的数据曲线, 其变化幅值分别由式(15)、式(16)根据空间 3 方向加速度、角速度计算所得。红色是误操作判定曲线, 其所占的时间段表示转速锁定时段。

由图 8 可看出, 在 20 s 前后由于快速转动操作杆, 相对于各自阈值,  $Acc$  的值不大, 但  $Gyr$  的值较大, 检测模块能识别出属于误操作情况。在 40 s 和 52 s 两个时段, 进行的混乱操作, 包括摇晃操作杆与随机大幅转向, 此时  $Acc$  和  $Gyr$  的值均较大, 检测模块也能正常识别。在 80 s 前后, 极速推动操作杆, 相对于各自阈值, 此时  $Gyr$  的值不大, 但  $Acc$  的值较大, 检测模块也能正常识别。由于能够胜任各情况下的误操作识别, 选定  $Acc$ 、 $Gyr$  的阈值分别为  $Acc_0=11$ 、 $Gyr_0=4$ 。

表 2 静置状态下的数据整合效果  
Tab. 2 Effects of data integrating in static state

	Yaw		Pitch		Roll	
	Acc/Mag	Acc/Mag/Gyr	Acc/Mag	Acc/Mag/Gyr	Acc/Mag	Acc/Mag/Gyr
最小值	-13.11	-12.63	-0.22	0.11	-0.05	0.12
最大值	-9.57	-10.39	0.71	0.41	0.71	0.44
极差	3.54	2.24	0.93	0.30	0.76	0.32

平均值	-11.56	-11.56	0.26	0.26	0.29	0.28
标准方差	0.565	0.353	0.150	0.054	0.124	0.053

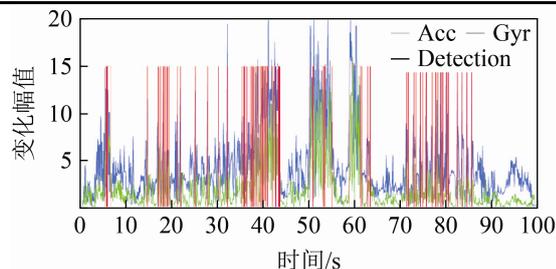


图8 误操作检测模块测试结果

Fig. 8 Test results of error operation preventing module

### 3.4 整体运行测试

整体运行测试主要测试整车的可用性与稳定性,测试的方法是从折叠开始,展开车辆并进行自由驾驶,通过转动,推拉、测摆操作杆进行加速、减速、转向和误操作等动作。

在平地、坡道行驶时,车辆能够像设计目标一样依靠手机与微型电动车之间的相对姿态角执行相应的加减速、转向等动作,且保持灵敏没有延时现象。在转向时,通过控制转弯半径系数  $k$  来分配左右驱动轮各自转速的策略,也能很好的与万向轮配合,使轮胎无打滑的现象。误操作进入与退出过程无卡顿现象,但需在较为熟悉的情况下才能更快速完成解锁操作。

测试中也发现了因考虑不周造成的运行缺陷。在电机出现急加速或急减速的时候,MPU9150 的输出值会有较大的抖动,分析各传感器读数后确认其成因是电机驱动器与姿态传感器共用了电源线,电机速度急变导致电流发生较大变化,影响到姿态传感器中的地磁传感器读数。另外,车身中电气零部件预留安装空间不足也导致电线走线较乱,在折叠的时候偶尔出现夹线现象,这些缺陷将在后续的样机制作中加以改进。

## 4 结论

本文在分析现有微型电动车的基础上,设计了一种新型可折叠的微型电动车,同时还提出一种利用姿态数据进行运动控制的方法,旨在通过简化微

型电动车的结构及改进控制方法,减轻其重量并能够折叠收纳,以达到提高便携性的目的,为微型电动车的深入发展提供了新的结构形式和新的控制方法。本论文所研究的内容及相关结论具体如下:

(1) 根据现有微型电动车的不足,设计出一种可横向的折叠和纵向的折叠的机构,使其收纳后所占的空间得以大幅度的减小。并在此基础上,分析了其运动学模型,为该微型电动车的运动控制算法设计提供理论基础;

(2) 本文在 Android 平台上实现了基于互补滤波器的传感器数据整合方法,以此获得较为准确的姿态角用于运动控制。提出了针对欧拉角在定义域边界附近时姿态解算引起的跳变现象的解决方法。同时还利用加速度传感器获取的加速度矢量幅值,判断是否出现误操作的情况,并根据此对电机最大设定速度进行控制,为微型电动车的行驶安全提供保障;

(3) 对所设计的微型电动车进行实际加工及运行测试,包括微型电动车的机械结构、硬件系统及软件系统。机械结构方面测试结果表明所设计的机械结构能够实现折叠功能,并且能够将其重量控制在 10 kg 以内,携带较为方便,达到了设计目的。在硬件系统方面对微型电动车的 PI 控制器的参数进行了参数调节。软件方面测试了传感器数据整合方法、误操作判断等多个功能模块的具体实现效果。最后测试了整体运行效果,结果表明,利用姿态角度控制此微型电动车是一种可行的方法。

### 参考文献:

- [1] Xu R, hou S, i W. Mems Accelerometer Based Nonspecific-user Hand Gesture Recognition[J]. Sensors Journal, Ieee (S1530-437X), 2012, 12(5): 1166-1173.
- [2] D R, L W, M Y, et al. Design and Analyses of a Mems Based Resonant Magnetometer[J]. Sensors (S1424-8220), 2009, 9(9): 6951-6966.
- [3] 丁君, 赵忠华. AHRS 航姿解算中的两种滤波方法的比较研究[J]. 计算机仿真, 2013, 30(9): 60-65.  
Ding J, Zhao Z H. Comparison and Study on

- Complementary Filter and Kalman Filter in AHRS Attitude Calculation[J]. *Computer Simulation*, 2013, 30(9): 60-65.
- [4] Colton S. The Balance Filter - a Simple Solution for Integrating Accelerometer and Gyroscope Measurements for a Balancing Platform[EB/OL]. <http://web.mit.edu/scolton/www/filter.pdf>. 2011-12-12.
- [5] 李忠磊. 飞行器姿轨数据可视化仿真的相关研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2005.  
Li Zhonglei. Research on Visual Simulation of Aircraft Attitude and Orbit Data[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005.
- [6] 黄真, 李艳文, 高峰. 空间运动构件姿态的欧拉角表示[J]. *燕山大学学报*, 2002, 26(3): 189-192.  
Huang Zhen, Li Yanwen, Gao Feng. The Expression of the Orientation of a Spatial Moving Unit by Euler Angle[J]. *Journal of Yanshan University*, 2002, 26(3): 189-192.
- [7] 刘玉军. 机器人多自由度关节的研究[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2002.  
Lin Yujun. Study on Robot Joint with More Degrees of Freedom[D]. Zhejiang: Zhejiang University of Technology, 2002.
- [8] 丁玉兰. 人机工程学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2011: 116-117.  
Ding Yulan. Ergonomics[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2011: 116-117.
- [9] 阎野, 赵汉元, 何力. 利用转移矩阵进行姿态控制[J]. *飞行力学*, 1999, 17(4): 85-90.  
Yan Y, Zhao H Y, He L. The Utilization of Transition Matrix in Attitude Control[J]. *Flight Dynamics*, 1999, 17(4): 85-90.
- [10] 王亚青, 张文涛, 赵国如. 基于九轴惯性传感器的跌倒监测系统的研究[J]. *微型机与应用*, 2014, 33(14): 67-70.
- Wang Y Q, Zhang W T, Zhao G R. A research which uses a fall-detection system based on nine inertial sensors[J]. *Microcomputer & Its Applications*, 2014, 33(14): 67-70.
- [11] 赵祥欣. 基于三维加速度传感器的跌倒监测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.  
Zhao Xiangxin. The Research of Fall Detection Based on Tri-axial Accelerometer[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2008.
- [12] 孙新香. 基于三轴加速度传感器的跌倒检测技术的研究与应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2008.  
Xinxiang Sun. Research of Fall Detection Technology Based on 3-Axis Accelerometer[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2008.
- [13] 曹玉珍, 蔡伟超, 程旸. 基于 MEMS 加速度传感器的人体姿态检测技术[J]. *纳米技术与精密工程*, 2010, 8(1): 37-41.  
Cao Y Z, Cai W Ch, Cheng Y. Body posture detection technique based on MEMS acceleration sensor[J]. *Nanotechnology & Precision Engineering*, 2010, 8(1): 37-41.
- [14] 沙琳, 车延博. 无刷直线电动机变参数智能 PI 调速系统[J]. *机床与液压*, 2008, 36(2): 140-142, 145.  
Sha L, Che Y B. Variable Parameter Intelligent BLDCM Drive System[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2008, 36(2): 140-142, 145.
- [15] 纪志成, 沈艳霞, 姜建国. 一种新型的无刷直流电机调速系统的模糊 PI 智能控制[J]. *电机与控制学报*, 2003, 7(3): 248-254.  
Ji Zhi-Cheng, Shen Y X, Jiang J G. A novel fuzzy PI intelligent control method of BLDCM speed servo system[J]. *Electric Machines & Control*, 2003, 7(3): 248-254.