

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2018.01.018

基于 MPU6050 的四轴硬件姿态解算研究^{*}

陈国定, 周鹏豪, 胡朕豪, 汤粤生, 秦志飞

(浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对四轴飞行器姿态信息的实时准确获取问题,对四轴飞行器的姿态解算方面进行了研究。在分析姿态表示的四元数法和欧拉角法基础上,以成熟的 Mahony 互补滤波算法为例比较了软件姿态解算和基于 MPU6050 数字运动处理器(DMP)的硬件姿态解算的实现流程,并对两种解算方法的解算时间和对姿态变化的跟踪性能进行了实验测试。研究结果表明:硬件姿态解算能实时准确地获取小型四轴飞行器的各项姿态信息,可以满足小型四轴飞行器的姿态控制要求。

关键词:四元数;姿态解算;互补滤波;MPU6050;DMP

中图分类号:TP274.2;V275⁺.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2018)01-0095-06

Four-axis hardware attitude calculation based on MPU6050

CHEN Guo-ding, ZHOU Peng-hao, HU Zhen-hao, TANG Yue-sheng, QIN Zhi-fei

(College of Information Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at the real-time accurate acquisition of attitude information of four-axis aircraft, experimental study on the attitude calculation was carried out on the four-axis aircraft. On the basis of analyzing the quaternion method and Euler angle method of attitude representation, Mahony complementary filtering algorithm was taken as an example to compare the process of the software attitude calculation and hardware attitude calculation based on MPU6050 digital motion processor(DMP), and the calculation time of the two methods and the tracking performance of the attitude change were experimentally tested. The research indicate that small four-axis aircraft of the attitude information can be obtained in real time and accurately by the hardware attitude calculation, so that the small four-axis aircraft attitude control requirements can be met.

Key words: quaternion; attitude calculation; complementary filtering; MPU6050; DMP

0 引 言

四轴飞行器是多轴飞行器中结构最为简单、控制最为灵活、应用最为广泛的一种飞行器。如何准确实时获取飞行器的姿态信息是四轴飞行器控制的关键。姿态解算的核心在于旋转,对于飞行器来说,一般采用四元数来表示旋转,在获得四元数之后,会将其转化为欧拉角,然后输入到姿态控制算法中。

在四轴飞行器的系统设计里,利用惯性元件(如陀螺仪),进行软件姿态解算是最为普遍的形式,也是四轴控制中最为复杂的部分,常见的一些姿态解算以及误差补偿的算法有互补滤波算法、梯度下降算法和卡尔曼滤波算法,这些算法都有了比较成熟的研究与应用^[1-2]。

然而随着传感技术的发展,MPU6050 出现了硬件 DMP 直接读取四元数的方法,即 MPU6050 内置了一

收稿日期:2017-03-17

基金项目:浙江省大学生科技创新活动计划资助项目(2016R403015)

作者简介:陈国定(1962-),男,浙江宁波人,教授,硕士生导师,主要从事计算机先进控制、网络控制、电力电子与电力传动及其中控制策略方面的研究。E-mail:gdchen@zjut.edu.cn

个功能模块,能够把原始数据进行校正处理后输出。DMP 读取的数据无法跟踪飞行器剧烈的姿态变化,而且有些时候还会出现突变甚至卡死现象。

本研究将搭建基于 MPU6050 的四轴飞行器,并对其进行软件姿态解算和硬件姿态解算,对比分析说明硬件姿态解算的可行性。

1 飞行原理分析与平台搭建

1.1 原理简述

四轴飞行器通常具有两种不同的飞行方式:十字型与 X 型^[3]。对于十字型飞行方式,飞行器姿态改变方向与机身相同,电机分布在机体坐标系的坐标轴上,方便理论分析与控制。而 X 型飞行方式,飞行器姿态改变方向与机身成 45°,控制的灵敏度与稳定性更好,但其物理模型较为复杂。本文以十字型飞行方式为例进行分析,其动力学模型如图 1 所示。

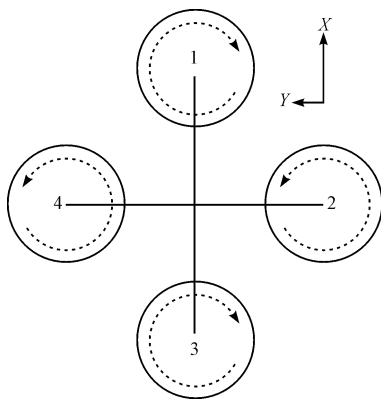


图 1 十字型飞行方式动力学模型

四轴飞行器飞行的姿态控制主要包括俯仰角控制、横滚角控制、偏航角控制、高度控制,通过调整分布于机体的 4 个电机转速(ν_1 、 ν_2 、 ν_3 、 ν_4)来实现姿态变换。

(1) 俯仰控制。飞行器绕着 Y 轴方向旋转时,所进行的控制为俯仰控制, ν_2 减小, ν_4 增加,飞行器左倾,反之右倾;

(2) 横滚控制。飞行器绕着 X 轴方向旋转时,所进行的控制为横滚控制, ν_1 减小, ν_3 增加,飞行器前倾,反之则后倾;

(3) 航向控制。 ν_1 与 ν_2 同时减小, ν_2 与 ν_4 同时增加,飞行器左旋,反之则右旋;

(4) 高度控制。 $\nu_1 = \nu_2 = \nu_3 = \nu_4$, 当其同时加速时,电机升力变大,当升力大于飞行器重力时,飞行器拥有向上运动的加速度;当其同时减速时,电机升力变小,当升力小于飞行器重力时,飞行器拥有向下运动的

加速度。

1.2 平台搭建

本研究采用了自行设计的一款小型四轴飞行器,整体结构如图 2 所示。

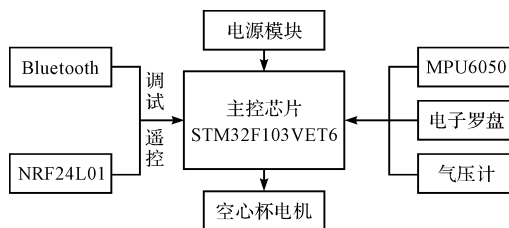


图 2 结构框图

本研究以 STM32f103vet6 为主控芯片,MPU6050、HMC5883 为姿态传感器,气压计 MS5611 用于定高,蓝牙与无线模块分别用于调试与遥控,执行单元采用小而轻便、控制特性良好的空心杯电机,电源模块采用多路独立电源,以上各个模块都集成在不到 10 cm × 10 cm 的飞控 PCB 板上,具体实物如图 3 所示。



图 3 四轴实物图

1.3 MPU6050 简述

MPU6050 是 9 轴运动处理传感器,它集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪,3 轴 MEMS 加速度计,以及一个可扩展的数字运动处理器 DMP。

MPU6050 对陀螺仪和加速度计分别用了 3 个 16 位的 ADC,将其测量的模拟量转化为可输出的数字量。传感器的测量范围都是用户可控的,陀螺仪可测范围为 $\pm 250^\circ/\text{s}$, $\pm 500^\circ/\text{s}$, $\pm 1\,000^\circ/\text{s}$, $\pm 2\,000^\circ/\text{s}$,加速度计可测范围为 $\pm 2\text{ g}$, $\pm 4\text{ g}$, $\pm 8\text{ g}$, $\pm 16\text{ g}$ 。产品输出可通过最高至 400 kHz 的 I²C 接口实现。

数字运动处理器(DMP)可减少复杂的融合演算数据、感测器同步化、姿势感应等的负荷。运动处理数据库支持 Android、Linux 与 Windows 内建之运作时间偏差与磁力感测器校正演算技术,免除了客户另外校

正的需求^[4]。

2 姿态的表示

刚体姿态描述的是刚体坐标系与参考坐标系的角位置关系。姿态解算的核心在于旋转,四轴飞行器中一般采用四元数来保存飞行器的姿态,在需要控制的时候,会将四元数转化为欧拉角,然后输入到姿态控制算法中。

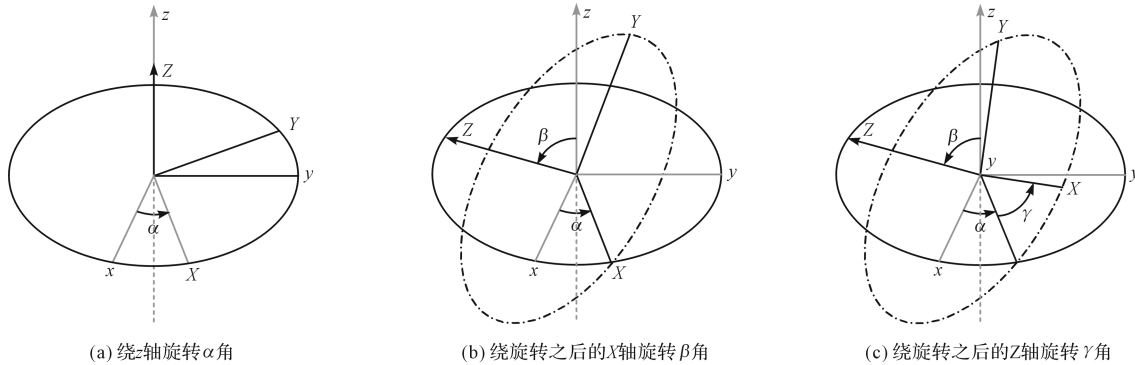


图4 机体坐标系与地理坐标系的转换

坐标系转换过程中按照 Z—Y—X 的旋转顺序得到旋转矩阵如下式所示:

$$R = \begin{bmatrix} \cos\gamma\cos\alpha & \cos\beta\cos\alpha & -\sin\beta \\ A & B & \sin\gamma\cos\beta \\ C & D & \cos\gamma\cos\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:

$$\begin{aligned} A &= \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha - \cos\gamma\sin\alpha, \\ B &= \sin\gamma\sin\beta\cos\alpha + \cos\gamma\cos\alpha, \\ C &= \cos\gamma\sin\beta\cos\alpha + \sin\gamma\sin\alpha, \\ D &= \cos\gamma\sin\beta\sin\alpha - \sin\gamma\cos\alpha. \end{aligned}$$

2.2 四元数法

四元数法是利用一种超复数的乘法来等效反映姿态变换的方法。相比欧拉角法,可以减少大量的计算量,提高姿态解算速度。

(1) 表示旋转的四元数

通过旋转轴和绕该旋转轴旋转的角度可以构造一个四元数^[6-8]。

设旋转轴方向单位向量 $\vec{\tau} = (x, y, z)$, 旋转的角度为 φ , 则构造四元数为:

$$\mathbf{q} = q_w + q_x i + q_y j + q_z k = [q_w, \vec{q}_0]^T \quad (2)$$

且:

$$|\mathbf{q}|^2 = q_w^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2 = 1$$

其中:

$$\begin{aligned} q_w &= \cos(\varphi/2) \\ \vec{q}_0 &= \vec{\tau}\sin(\varphi/2) \end{aligned}$$

(2) 四元数转旋转矩阵

2.1 欧拉角法

根据欧拉转动定理,刚体做定点转动的空间位置需要欧拉角 α, β, γ , 3 个独立的变量来确定,机体坐标系与地理坐标系的转换如图4所示。通过三次旋转即可使机体坐标旋转到与地理坐标系重合,三次坐标变换的旋转矩阵的乘积即为欧拉角姿态矩阵^[5]。

$$R = \begin{bmatrix} q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 & 2(q_x q_y + q_w q_z) & 2(q_x q_z - q_w q_y) \\ 2(q_x q_y - q_w q_z) & q_w^2 - q_x^2 + q_y^2 - q_z^2 & 2(q_y q_z - q_w q_x) \\ 2(q_x q_z + q_w q_y) & 2(q_y q_z - q_w q_x) & q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

从而得到四元数与欧拉角的关系如下式所示:

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \left(\frac{2(q_x q_y + q_w q_z)}{q_w^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2} \right) \\ \beta &= \sin^{-1} (-2(q_x q_z - q_w q_y)) \\ \gamma &= \tan^{-1} \left(\frac{2(q_y q_z - q_w q_x)}{q_w^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

从旋转矩阵看出,采用欧拉角描述姿态矩阵,计算过程中三角函数多,造成运算量较大,为降低姿态解算复杂度,达到实时解算飞行姿态,采用四元数表示可以带来极大方便。

3 姿态的解算

在该系统中,本研究根据 MPU6050 提供的数据,分析得到当前姿态四元数表示,进一步转化成欧拉角,输入到姿态控制器。软件姿态解算就是通过 MPU6050 得到的陀螺仪,加速度计和磁力计的原始数据,通过程序得到飞行器当前姿态的四元数;硬件姿态解算就是通过 MPU6050 的 DMP 直接读取飞行器当前姿态的四元数。

3.1 软件姿态解算

MPU6050 集成了 3 轴 MEMS 陀螺仪和 3 轴 MEMS 加速度计,互补滤波算法就是分别利用加速度计和陀

螺仪的频率响应优势^[9-11],对传感器测量的原始数据进行互相弥补,来提高解算的姿态精确度。

对于加速度计来说,它的静态特性好,动态特性较差;而陀螺仪存在温漂和零漂,因此在低频段动态响应特性差而高频动态响应特性好。因此,对陀螺仪测量的数据进行高通滤波,对加速度计测量的数据进行低通滤波,然后通过互补,实现在整个频域上表现良好的动态响应特性。

在四轴飞行器上实现 Mahony 互补滤波算法的程序流程图如图 5 所示。

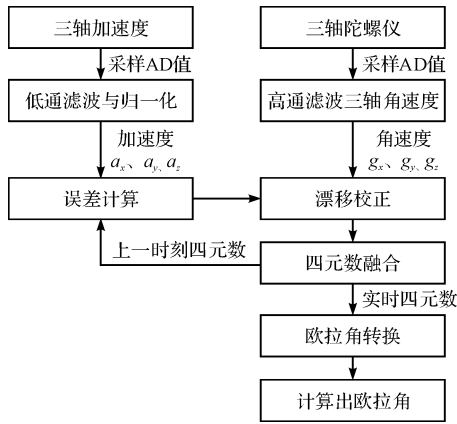


图 5 Mahony 互补滤波算法程序实现流程图

接下来对 Mahony 互补滤波算法的数据互补融合阶段做进一步解释。将飞行器上一次计算得到的姿态四元数转换到机体坐标系,得即当前的机体坐标系上的重力单位向量 $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$,其中:

$$\begin{aligned} v_x &= 2(q_x q_z - q_\omega q_y) \\ v_y &= 2(q_\omega q_x + q_y q_z) \\ v_z &= q_\omega^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2 \end{aligned} \quad (5)$$

由于上一次姿态解算的姿态可以简单认为是陀螺仪积分,推算出来的重力向量 $\vec{v}$ 可以看作陀螺仪积分后的姿态。

令加速度测得的当前机体坐标系上的重力单位向量为 $\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)$ 。于是得到了加速度计测出来的姿态和陀螺仪测出来的姿态之间的误差。

向量之间的误差,可以用向量叉乘来表示,用 $\vec{e} = (e_x, e_y, e_z)$ 表示两个重力向量的叉乘。则:

$$\vec{e} = \vec{a} \times \vec{v} \quad (6)$$

因为上一次姿态解算时,加速度计测出来的姿态和陀螺仪测出来的姿态之间也存在误差,用 $\vec{e}_0 = (e_{0x}, e_{0y}, e_{0z})$ 在程序上处理的同时,做了简单的误差相加作为本次的实际误差 $\vec{e}_1 = (e_{1x}, e_{1y}, e_{1z})$ 。即:

$$\vec{e}_1 = \vec{e}_0 + \vec{e} \quad (7)$$

本次的误差 $\vec{e}_1 = (e_{1x}, e_{1y}, e_{1z})$ 和陀螺仪误差均在

机体坐标系上,并且两者的大小成一定正比,正好可以用来纠正陀螺仪。由于陀螺仪是对机体直接积分的,对陀螺仪的纠正量会直接体现在机体坐标系的纠正。程序上可以对 $\vec{e}_1$ 进行PI控制修正陀螺仪零偏,如下式所示:

$$\begin{aligned} \vec{I}(n) &= \vec{I}(n-1) + K_i \times \vec{e}_1 \\ \vec{g}(n) &= \vec{g}(n-1) + K_p \times \vec{e}_1 + \vec{I}(n) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $\vec{g}$ —陀螺仪数据, $\vec{g} = (g_x, g_y, g_z)$ 。

通过调整 K_p, K_i 两个参数,能有效地通过加速度计数据快速修正陀螺仪数据。

然后通过四元数微分方程,对修正后的陀螺仪数据积分,得到当前的四元数表示。结果如下:

$$\begin{aligned} q_\omega(n) &= q_\omega(n-1) + (-q_x g_x - q_y g_y - q_z g_z)T \\ q_x(n) &= q_x(n-1) + (q_\omega g_x + q_y g_z - q_z g_y)T \\ q_y(n) &= q_y(n-1) + (-q_\omega g_y - q_x g_z + q_z g_x)T \\ q_z(n) &= q_z(n-1) + (q_\omega g_z + q_x g_y - q_y g_x)T \end{aligned} \quad (9)$$

式中: T —控制周期; n —第 n 个控制周期。

最后进行四元数的归一化处理:

$$\begin{aligned} |q| &= \sqrt{q_\omega^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2} \\ q_i &= q_i / |q|, i = \omega, x, y, z \end{aligned} \quad (10)$$

利用式(4)便可得到控制飞行器所需要的当前姿态的欧拉角。

3.2 硬件姿态解算

MPU6050 硬件上集成了一个可扩展的数字运动处理器 DMP,它可以融合来自陀螺仪、加速度计的数据,并通过自身的 IIC 总线向磁力计读取数据,并进行融合,基于硬件电路的处理计算出准确的四元数,处理结果可以从 DMP 寄存器读出。

基于 DMP 实现的硬件姿态解算简化了程序代码设计,单片机只有在 DMP 解算完成的外部中断来临时,才会去读取结果,硬件解算的时间可以用来处理其他任务。

在四轴飞行器上实硬件姿态解算算法的程序流程图如图 6 所示。

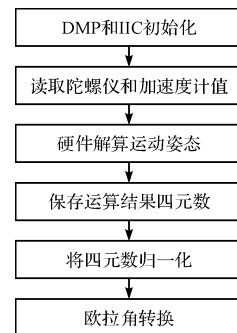


图 6 基于 DMP 的硬件姿态解算算法程序实现流程图

本研究在 STM32 芯片上初始化 IIC 模块,通过 IIC

总线配置 DMP 模块的寄存器,设置好 DMP 的滤波器截止频率和工作频率,并使 DMP 能周期地从 MPU6050 中读取陀螺仪和加速度计的数据,处理运动姿态,将结果保存在 DMP 寄存器中或者 FIFO 中,同时生成外部中断。主程序收到外部中断后,通过 IIC 直接从 DMP 寄存器或者通过 FIFO 缓冲读取飞行器姿态的四元数表示。

本研究对读取得到的四元数进行归一化处理:

$$|q_{\text{dmp}}| = \sqrt{q_{\omega}^2 + q_x^2 + q_y^2 + q_z^2}$$

$$q_i = \frac{q_i}{|q_{\text{dmp}}|}, i = \omega, x, y, z \quad (11)$$

然后通过欧拉角与四元数的关系转化可得到控制飞行器所需要的当前姿态的欧拉角:

$$\alpha_{\text{dmp}} = \tan^{-1} \left(\frac{2(q_x q_y + q_{\omega} q_z)}{q_{\omega}^2 + q_x^2 - q_y^2 - q_z^2} \right)$$

$$\beta_{\text{dmp}} = \sin^{-1} (-2(q_x q_z - q_{\omega} q_y))$$

$$\gamma_{\text{dmp}} = \tan^{-1} \left(\frac{2(q_y q_z + q_{\omega} q_x)}{q_{\omega}^2 - q_x^2 - q_y^2 + q_z^2} \right) \quad (12)$$

4 软硬姿态解算的对比分析

本研究先在飞行器上测试了软件姿态解算算法。

首先比较飞行器的软、硬件姿态解算的实际解算出的飞行器姿态(欧拉角)的情况,实际测试过程通过蓝牙串口,将解算的数据发送到上位机,并通过 Matlab 画出两者的数据曲线,比较结果如图(7~9)所示。

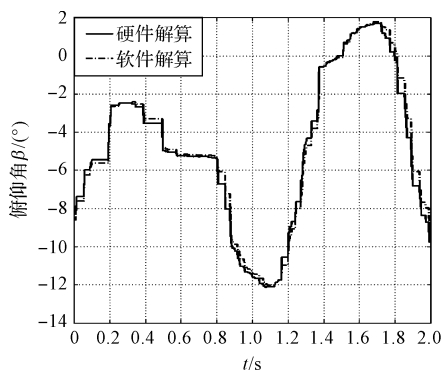


图7 俯仰角测试数据曲线

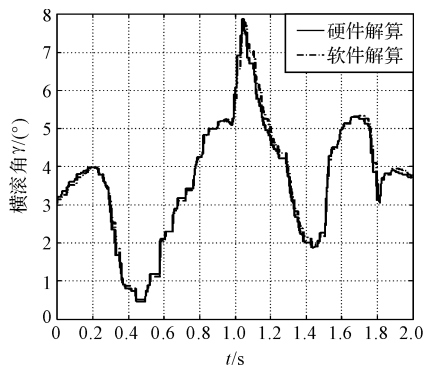


图8 横滚角测试数据曲线

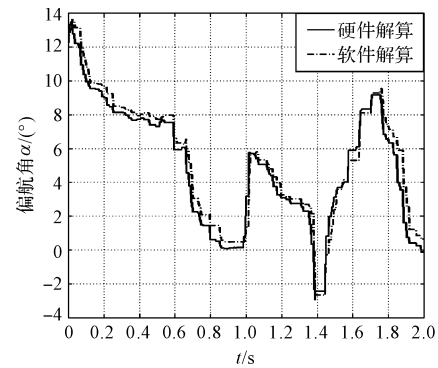


图9 偏航角数据曲线

实验结果发现,硬件姿态解算的俯仰角、横滚角和偏航角与软件解算大致相同,误差很小,在容许误差范围之内。然后对飞行器在不同姿态时,进行读取软、硬件解算的解算时间,如表1所示。

表1 软、硬件解算的不同姿态解算时间

姿态解算方式	水平放置/ μs	机身向前倾/ μs	机身向左倾/ μs
软件解算	1 450	1 432	1 447
硬件解算	1 390	1 385	1 411

实验通过对比分别在水平放置、机身向前倾、机身向左倾3种姿态的软、硬件姿态解算时间,结果表明,两种姿态解算方法都能在极短时间完成解算,且硬件解算所花时间相对更短。

最后本研究对硬件姿态解算进行了飞行测试,采用硬件姿态解算,飞行器机身的反应反而更灵活。

5 结束语

本研究介绍了以 Mahony 互补滤波算法为代表的软件解算算法,并与硬件姿态解算进行了分析和比较。采用 MPU6050 的 DMP 硬件姿态解算方式能很好地融合姿态数据,对加速度计的高频抖动和陀螺仪的低频噪声有一定的滤除效果。实验采用了将软件姿态解算与硬件姿态解算进行对比来分析硬件姿态解算的性能。

结果表明,硬件姿态解算能实时准确解算出四轴飞行器3个轴的姿态变化,并能及时跟踪四轴飞行器的姿态变化,硬件姿态解算能满足小型四轴飞行器的姿态控制要求。

参考文献(References):

- [1] 王晓初,卢琛.四旋翼姿态解算算法的对比与研究[J].制造业自动化,2015,37(1):120-122.
- [2] 王大鹏,王茂森,戴劲松,等.四旋翼飞行器悬停建模及控制[J].兵工自动化,2017,36(5):92-96.
- [3] 张广玉,张洪涛,李隆球,等.四旋翼微型飞行器设计[J].

- 哈尔滨理工大学学报, 2012, 17(3): 110-114.
- [4] LEEDY Li. MPU-6000. 6050 中文资料[EB/OL]. http://wenku.baidu.com/link?url=ayXQoKndQHWukFbb_sVahdjzu2vuqzjcYZsdPjvTd02OU1Z_Gw0ZVSMfToo6dEs4FOaJyEWnUbo9h3NUH6oW3BPZ29XSz9mui7JgHNRa8Jm.
- [5] 徐云川. 四轴飞行器姿态解算算法设计与仿真[J]. 科技视界, 2016(23): 17-18.
- [6] 王美山, 李文亮, 杨传路, 等. 绕任意轴 μ 旋转 φ 对应的欧拉角的新求解公式[J]. 大学物理, 2006, 25(9): 31-33.
- [7] 冀 亮, 钱正洪, 白茹. 基于四元数的四轴无人机姿态的估计和控制[J]. 现代电子技术, 2015, 38(11): 112-116.
- [8] 杨天标. 刚体运动的四元素表示[J]. 德州学院学报, 2010, 26(2): 5-11.
- [9] 梁延德, 程 敏, 何福本, 等. 基于互补滤波器的四旋翼飞行器姿态解算[J]. 传感器与微系统, 2011, 30(11): 56-58.
- [10] 路 洋. 软件姿态解算[EB/OL]. <http://www.crazepony.com/wiki/software-algorithm.html>.
- [11] 万晓凤, 康利平, 余运俊, 等. 互补滤波算法在四旋翼飞行器姿态解算中的应用[J]. 测控技术, 2015, 34(2): 8-11.

[编辑: 李 辉]

本文引用格式:

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, 2017, 35(1): 95-100.

CHEN Guo-ding, ZHOU Peng-hao, HU Zhen-hao, et al. Four-axis hardware attitude calculation based on MPU6050[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017, 35(1): 95-100.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>

(上接第 72 页)

其中实线曲线代表太阳能汽车进行一次工况行驶中电池荷电状态变化情况, 虚线曲线则代表了配置了相同容量的电动汽车进行一次工况行驶中储能系统的荷电状态变化情况。在 1 180 s 的行驶过程中减少 1.96% 的储能能量消耗。

5 结束语

本研究建立了太阳能汽车源荷容量配置模型, 采用 NSGA-II 多目标优化算法进行求解得到较好的效果, 验证了模型的可靠性, 利用模型对众泰 E200 电动汽车进行光储容量优化配置, 主要研究了续航能力与光储容量的关系, 并给出了在最大续航能力下光储容量的配置方案, 太阳能汽车在进行续航能力检测时, 蓄电池荷电状态的变化。

参考文献 (References):

- [1] 王 旭, 齐向东. 电动汽车智能充电桩的设计与研究[J]. 机电工程, 2014, 31(3): 393-396.
- [2] 张 乔. 充电桩的应用探索[J]. 机电工程技术, 2017, 46(8): 201-202.
- [3] AHMED S, ZENAN A H, RAHMAN M. A two-seater light-weight solar powered clean car: preliminary design and economic analysis [C]. Developments in Renewable Energy Technology, Dhaka: IEEE, 2014.
- [4] WU B, ZHUO F, LONG F, et al. A management strategy for solar panel—battery—super capacitor hybrid energy system in solar car[C]. 2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia, Jeju: IEEE, 2011.
- [5] ALHAMMAD Y A, AL-AZZAWI W F. Exploitation the waste energy in hybrid cars to improve the efficiency of solar cell panel as an auxiliary power supply [C]. Mechatronics 2015 10th International Symposium on and its Applications, Sharjah: IEEE, 2015.
- [6] ELMENSHAWY M, ELMENSHAWY M, MASSOUD A, et al. Solar car efficient power converters' design [C]. 2016 IEEE Symposium on, Computer Applications & Industrial Electronics. Batu Feringghi: IEEE, 2016.
- [7] DIAF S, NOTTON G, BELHAMEL M, et al. Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions[J]. Applied Energy, 2008, 85(10): 968-987.
- [8] 杨 清, 袁 越, 王 敏, 等. 独立型水光储微电网系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 37-44.
- [9] 陈小庆, 侯中喜, 郭良民, 等. 基于 NSGA-II 的改进多目标遗传算法[J]. 计算机应用, 2006, 26(10): 2453-2456.
- [10] 陈 超, 谢 瑞, 何湘宁. 电动汽车车载锂电池分段充电策略研究[J]. 机电工程, 2011, 28(7): 887-890.
- [11] 刘灵芝, 张炳力, 汤仁礼. 某型纯电动汽车动力系统参数匹配研究[J]. 合肥工业大学学报: 自然科学版, 2007, 30(5): 591-593.

[编辑: 周昱晨]