

两轮直立代步平衡车的设计与实现

徐光宪 高 念

(辽宁工程技术大学电子与信息工程学院 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要 针对市面上昂贵的两轮平衡车,提出一种廉价的两轮直立代步平衡车的设计方案。通过改进卡尔曼滤波算法对加速度传感器和陀螺仪输出的数据进行融合得到准确姿态,采用功率 NMOS 设计大功率电机驱动电路,设计 PID 控制器实现直立代步平衡车的动态平衡和转向控制。经过实际路况测试,车子运行灵活,能够适应各种路况,最大爬坡角度为 30°,时速最大 15 km/h;行程 60 km。系统成本在 1300 RMB 左右,有很高的性价比。

关键词 两轮平衡车 陀螺仪 加速度计 卡尔曼滤波 PID 控制

中图分类号 TP3 文献标识码 A DOI:10.3969/j.issn.1000-386x.2016.02.014

DESIGN AND IMPLEMENTATION OF TWO-WHEEL BALANCED UPRIGHT SCOOTER

Xu Guangxian Gao Nian

(School of Electronic and Information Engineering, Liaoning Technical University, Huludao 125105, Liaoning, China)

Abstract We put forward a design scheme of the cheap two-wheel balanced upright scooter aimed at the dear balanced scooters in the market. By improving Kalman filter algorithm, we merge the output data of the acceleration sensor and the gyroscope to obtain accurate attitude, use power NMOS to design high-power motor drive circuit, and design PID controller to achieve dynamic balance and steering control of the balanced upright scooter. After testing on actual road, the scooter runs flexibly and is able to adapt to various road conditions, its maximum climbing angle is 30°, the maximum speed is 15 km/h, and the stroke is 60 km. The system costs at about 1300 RMB, and has a very high performance-price ratio.

Keywords Two-wheel scooter Gyroscope Accelerometer Kalman filter PID control

0 引 言

2003年3月,世界上第一款商用的两轮直立平衡车——赛格威在美国正式上市,随即风靡全球。赛格威的姿态检测使用的是一组倾角传感器和航空级陀螺仪,它的平衡直立控制算法采用的是一套复杂的“直觉软件”,并采用两个镍氢电池组供电,其最高时速 15 Km/h,最大行程 26 km,最大爬坡度 15°,赛格威的市场售价在 33 000 RMB 左右。随后国内的一些厂商也相继推出了自己的两轮直立平衡车,比如易步科技推出了易步品牌的两轮直立平衡车,其最高时速 15 Km/h,最大行程 35 km,最大爬坡度 25°,其价格在 18 000 RMB 左右;浙江同硕科技有限公司推出了奥捷骑两轮直立平衡车,其最高时速 20 Km/h,最大行程 35 km,最大爬坡度 22°,其价格在 13 000 RMB 左右;上海新世纪机器人有限公司推出的新世纪两轮直立平衡车,其最高时速 20 Km/h,最大行程 25 km,最大爬坡度 20°,其价格在 11 000 RMB 左右。

本文提出一种低廉的实用的两轮直立代步车的设计方案,本方案采用飞思卡尔的微控制器 MK60DN512 作为主控制器,联合加速度传感器 MMA7361 和陀螺仪 ENC-03MA 作为姿态感知系统,改进卡尔曼滤波算法和 PID 算法控制两轮直立平衡车的动态平衡。系统采用两个 350 W 的直流有刷电机提供强劲

动力,车轮采用的是花键 19 齿的 10 寸的车轮,整个系统由 3 组 24 V 铅蓄电池供电。车载 65 kg 的成年人时,在水泥路上测试得平衡车的最大时速 15 km/h,最大行程 60 km,最大爬坡度 30°,整个系统的成本在 1300 RMB 元左右。

1 工作原理

下面用垂直悬挂的单摆来说明两轮动态直立平衡原理^[1]。当垂直悬挂着的单摆离开垂直的平衡位置后,就会受到重力和悬线的拉力,这两个力的合力会让单摆回复到垂直的平衡位置。这个合力称之为回复力,其大小为:

$$F = -mg\sin\theta \approx -mg\theta \quad (1)$$

离开平衡位置的单摆不仅受到回复力 F 的作用,而且还会受到空气的阻尼力。离开平衡位置的单摆会左右摇摆,但由于受到空气的阻尼力,单摆最终会停止在垂直的平衡位置。存在一个临界阻尼系数,使得单摆最终稳定在平衡位置的时间最短。

由于倒立着的单摆在偏离平衡位置后,其所受到的回复力

收稿日期:2014-07-22。辽宁省高等学校杰出青年学者成长计划项目(LJQ2012029)。徐光宪,教授,主研领域:信号处理与编码。高念,硕士生。

与偏移的方向相同,所以倒立摆不能像单摆一样能够最终稳定在平衡位置。在倒立摆偏离平衡位置后,需要给倒立摆施加额外的力,才能使回复力与位移方向相反,从而使倒立摆能够稳定在平衡位置。

可以把直立着的两轮车看作是放在能够左右移动平台上的倒立着的单摆^[2]。可以通过控制倒立摆底部车轮,使它在倒立摆倒下的相同方向上作加速运动。这样两轮车就会受到与倒立摆倒下的方向相反的力(惯性力),该力的大小与加速度成正比。这样倒立摆所受到的回复力为:

$$F = mgsin\theta - ma \approx mg\theta - mk_1\theta \quad (2)$$

要使式(2)中的回复力 F 的方向与倒立摆倒下的方向相反,就得使 $k_1 > g$ (g 是重力加速度)。

为了使倒立摆能够尽快稳定在平衡位置,还需要给倒立摆施加额外的阻尼力,其大小应该与倒立摆倾斜的速度成正比,方向相反。因此式(2)可变为:

$$F = mg\theta - mk_1\theta - mk_2\theta' \quad (3)$$

采用上面的控制方法,就能够让倒立摆像单摆一样,虽然倾斜了,但最终会稳定在平衡位置。从而可以得出控制加速度的控制算法:

$$a = k_1\theta + k_2\theta' \quad (4)$$

式中, θ 为两轮平衡车的倾角; θ' 为角速度; k_1 、 k_2 均为比例系数;只要 $k_1 > g$ 、 $k_2 > 0$,就可以维持车体直立的平衡状态。其中, k_1 决定了平衡车最终是否可以稳定在平衡位置; k_2 决定了平衡车回到平衡位置的阻尼系数^[3]。

2 硬件电路设计

两轮直立平衡车的硬件框图如图1所示。整个硬件电路由电源电路、主控电路、电机驱动电路、姿态传感器电路、人机接口电路、过流欠压检测电路组成。

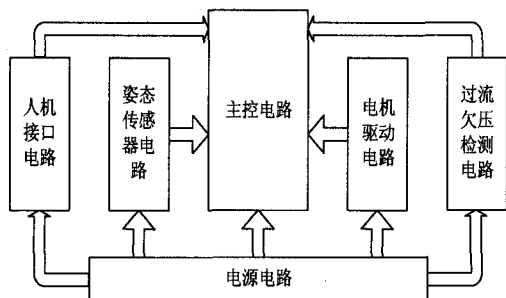


图1 硬件电路框图

2.1 电源电路设计

本系统采用的是24V的铅蓄充电电池供电。电源芯片采用了LM2596-12V和LM2596-5V。24V的电瓶电压先由LM2596-12V降压输出12V,一部分用来给MOS电机驱动供电;另一部分经过LM2596-5V降压输出5V,一部分用来给部分传感器供电,另一部分经过LM1117-3.3V稳压输出3.3V给单片机供电。本系统中使用了PMOS对电源端进行防反接保护,选用了功率MOS IRF4905作为防反接器件,电路如图2所示。

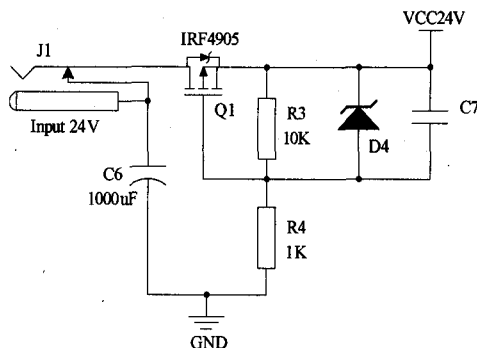


图2 电源防反接电路

在设计电子模块电源输入端的调理电路时,为了避免干扰脉冲传导至其他电路,进而影响系统正常工作,需要把这些脉冲信号给滤除掉,在本设计中采用TVS设计了防浪涌电路^[4],由于电源线上抑制静电的需要,选择了两个电容串联在电源线上,防止单个电容短路引起供电线短路,电路图如图3所示。

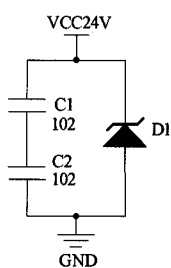


图3 电源防浪涌和静电电路

2.2 主控电路设计

本系统的微处理器采用的是飞思卡尔公司的MK60DN512,主控电路主要包括,复位电路、Debug调试接口、数字地与模拟地的隔离电路以及一些接口电路。

2.3 电机驱动电路设计

本系统中的电机驱动电路如图4所示,驱动电机的H桥由4个N沟道功率MOS管AUIRFB4410组成^[5]。采用IR公司的IR2184作为MOS的栅极驱动器,IR2184是一种双通道、高速高压型功率开关器件,具有自举浮动电源。在自举工作模式下,对自举电容和自举二极管的要求都较高。自举电容的耐压值仅为VCC的电压,但其容量由下列因素决定:驱动器电路的静态电流、电平转换器电流、MOSFET的栅源正向漏电流、MOSFET的栅极电容的大小、自举电容的漏电流的大小、以及工作的频率。为了减少自举电容的漏电流,应尽量采用非电解电容,本系统中采用陶瓷电容。自举二极管必须能够承受干线上电压的反压,当开关频率较低时,要求电容保持电荷较长时间,二极管的高温反向漏电流尽量小。同样为了减少自举电容反馈进电源的电荷数量,二极管应选用超快恢复二极管。在本系统中自举二极管采用了快恢复二极管FR307,自举电容采用1μF的陶瓷电容,完全满足本系统的需要。驱动电路中在栅极也串联了一个10Ω的小电阻,虽然这个电阻会影响一定的MOS开启速度,但可以减少栅极出现的振铃现象,减少EMI;为了加快MOS管的关断速度,在设计电机驱动电路时在栅极电阻上反向并联了一个二极管;另外在栅极对地接了一个10K的下拉电阻,这个电阻可以防止MOSFET被击穿;最后在电机的输出端对电源和地接了4个TVS管,一方面可以续流,另外还可以抑制大的尖峰脉冲。

在本系统中微处理器MK60DN512输出两路PWM信号,为了防止电机的电磁干扰,PWM信号经过光耦隔离、再经过驱动

电路驱动两个直流电机,通过控制 PWM 的占空比来实现直流电机的调速。由于上桥臂采用的是自举电容浮地的方式进行驱动,在下桥臂管子导通时给予自举电容充电,在下桥臂管子截止时即上桥臂管子导通时进行放电,因此 PWM 信号的占空比不能达到 100%,要留一定的时间给自举电容充电。在本设计的电路中, PWM 信号的占空比可以达到 98%,对于直流电机来说,98%的导通和全速导通几乎是一样的,因此,本电机驱动的设计完全能满足系统的所需性能。

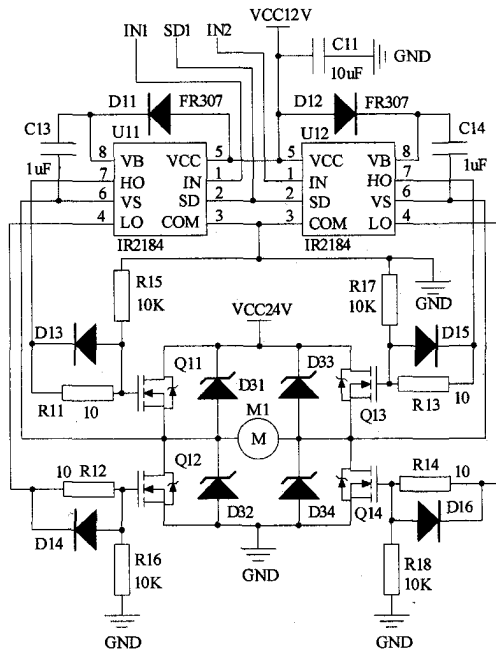


图4 电机驱动电路图

2.4 姿态检测电路设计

两轮直立平衡车需要通过测量车体的倾角和倾角角速度来控制车轮的加速度进而消除车体的倾斜,对于倾角和角速度的获取可以只采用加速度传感器获取,但是由于平衡车在运行的过程中会受到动态加速度的影响,再加上加速度传感器的动态性能不是很好,因此只使用加速度传感器是不能满足设计的需要的。同样理论上也可以只通过陀螺仪传感器获得倾角和角速度数据,虽然陀螺仪的动态性能好,但是由于存在温漂现象,如果让陀螺仪长时间积分,温漂现象会导致获得的倾角不准确,所以单独采用陀螺仪传感器也不能满足系统的需要。因此本系统采用了加速度传感器和陀螺仪传感器相结合的方式^[6],通过卡尔曼滤波器进行软件滤波融合,以获得一个可靠的倾角信息。

采用的三轴加速度传感器的型号是MMA7361。在本系统中只使用了Z轴方向的加速度。当车体直立时,固定加速度传感器在Z轴水平方向,此时输出信号为零偏电压信号。车体一旦发生倾斜,Z轴方向上就会有重力加速度g的分量,从而引起Z轴输出电压的变化,变化规律为:

$$\Delta u = k g \sin \theta \quad (5)$$

式中, k 是比例系数, g 是重力加速度, θ 为平衡车体的倾角。

本系统采用的陀螺仪是村田公司生产的ENC-03MA。由于ENC-03MA输出的信号比较微弱,因此需要增加放大电路将信号进一步放大,以方便单片机的采集。放大电路如图5所示^[7],

由LM358构成,放大倍数为10倍,电位器R4用来调节陀螺仪零速率输出电压的基准,在本系统中把基准电压调节到1.65V,正好是AD参考电压的一半。

2.5 人机接口电路设计

人机接口电路部分主要是电池电量指示灯、平衡车运行状态、故障状态显示电路;语音提示电路;脚踏开关电路。

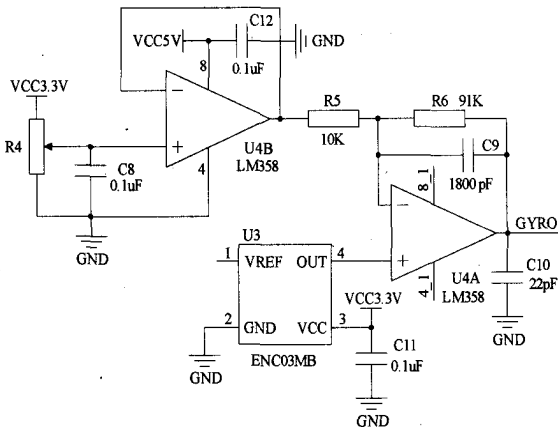


图5 陀螺仪放大电路

3 软件设计

系统软件的主要功能有:

- 1) 车模运行状态监测;
- 2) 电机PWM输出;
- 3) 车模运行控制:平衡直立控制、转向控制;
- 4) 车模运行流程控制:程序初始化、平衡车启动与结束;
- 5) 遥控切换控制:读取遥控信息。

前3个功能的执行时间周期需要很精确,可以在一个周期定时器中断里采取任务轮询的方式进行调度。对于平衡车直立控制的周期采用的是5ms,由于转向控制是通过采集扶杆带动的电位器的旋转进行方向的调节,因此转向控制也需要很快,系统中转向控制采用50ms控制一次,另外进行了平滑输出,这样也能减少对直立调节的耦合。第四和第五两个功能,由于执行时间周期不需要很精确,所以可以直接放在主程序中完成。

主程序流程如图6所示,程序上电运行后,首先进行初始化工作。初始化的工作包括两部分,第一部分是对单片机应用到的各个内部资源进行初始化;第二部分是对平衡车控制程序中的变量进行初始化。

初始化完成后,首先进入的就是平衡点零点的设置,该程序通过读取加速度计的数值判断车体所处的倾斜状态,等设置完后,一旦脚踏开关被压下,就启动平衡车直立控制、方向控制。

程序在主循环中不停地发送读取的传感器数据。同时通过检测平衡车的倾角是否超过一定的范围来判断平衡车是否跌倒,一旦检测到平衡车跌倒则停止平衡车的运行。以及判断脚踏开关没被压下超过20s,同样停止平衡车运行。

如图7所示,在中断程序里采用任务轮询的方式进行控制,把采集的陀螺仪和加速度计数据进行的中位值+均值滤波处理,以及进行的卡尔曼滤波数据融合;平衡直立控制,电机PWM

输出;采集转向电位器的 AD 值,并进行的中位值+均值滤波,平衡车方向控制调节;平衡车速度的模拟,以及进行超速抬头提示;安全策略控制代码等任务分别分配到每个 1 ms 的中断任务中进行轮询调度。中断任务轮询的框架如图 6 所示。

如图 7 所示,系统软件使用 MK60DN512 的一个定时器产生 1 ms 的周期中断。中断服务程序被均匀分配在 1~5 的中断片段任务中。因此每个片段任务执行的频率为 200 Hz。在实际控制中,平衡调节的周期是 5 ms,方向调节的周期是 50 ms。程序中在方向控制的片段中再进行分片,另外进行平滑输出,即把 50 ms 控制的一次输出分为 10 份进行输出,这样就减小了对平衡控制的耦合系数。

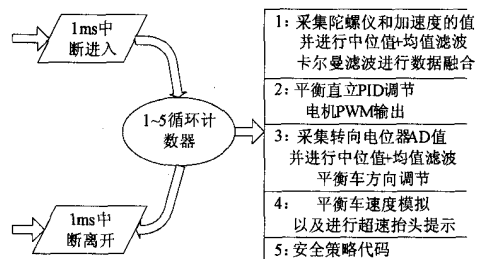


图7 中断轮序示意图

3.1 改进卡尔曼滤波算法进行姿态检测

陀螺仪输出的是角速度信号,通过积分可以得出平衡车倾斜的角度,但是由于积分有偏差,再加上陀螺仪有温度漂移,积分的时间越长,偏差就会越大,此时陀螺仪输出的信号就不能够真实地表示平衡车的倾角,但是陀螺仪的动态性能好,在短时间积分出的倾斜角度的信息是可靠的。加速度传感器输出的是加速度信号,加速度传感器可以用来采集静态的加速度(重力加速度),再通过反正弦即可得出平衡车倾斜的角度信息,但是在运行中,还会有运动加速度的干扰信号输出,即加速度的动态性能不好,但是从长时间来看,其输出的信号又是可靠的,其静态性能好。因此本系统利用陀螺仪和加速计的各自优势,在短时间内认为陀螺仪的信号可靠,在长时间内认为加速计的信号可靠。采用卡尔曼滤波器用加速计的值去校正陀螺仪的值^[8],即用加速计去估计陀螺仪,这样的话,就可以把陀螺仪的长时间积分产生的偏差给予滤除掉,通过卡尔曼滤波就可以得到一个相对可靠的平衡车角度信息了。

由于卡尔曼滤波器的五个基本公式的运算都是矩阵运算,如果直接给单片机运行,效率也会很低,因此本系统对卡尔曼滤波器的五个基本公式进行了改进,方便在单片机上运行。

因为本系统采用的是加速度的值去校正陀螺仪的值,由于陀螺仪输出的是角速度信号,因此需要对角速度进行积分,积分采用的是角速度与时间的乘积的累加^[9],由于本系统的平衡直立控制周期是 5 ms,因此积分时间采用的是 5 ms。

$$NowData = RealData + Gyro_get_rate \cdot dt \quad (6)$$

式中, $Gyro_get_rate$ 为陀螺仪输出的角速度信号, dt 为积分时间 5 ms, $RealData$ 为上次滤波输出的最优角度信息, $NowData$ 为陀螺仪得出的预测值。

式(6)中已经得出了陀螺仪角度输出的预测值,下面还应把陀螺仪输出的协方差的预测值给表达出来:

$$NowData_P = \sqrt{RealData_P^2 + Q^2} \quad (7)$$

式中, $NowData_P$ 为定义的预测值的协方差, $RealData_P$ 为最优值的协方差, Q 为过程的协方差。

现在有了当前状态的预测值(陀螺仪的输出),然后再收集当前状态的测量值(加速计的输出),结合当前状态的预测值和当前状态的测量值,就可以得出当前状态的角度信息的最优估计值。

$$RealData = NowData + Kg \cdot (ACC_get_angle - NowData) \quad (8)$$

式中, $RealData$ 为这次的最优的估计值, $NowData$ 为陀螺仪的预测值, ACC_get_angle 为加速度计输出的角度信息, Kg 为卡尔曼增益。

$$Kg = \frac{\sqrt{NowData_P^2}}{\sqrt{NowData_P^2 + R^2}} \quad (9)$$

式中, Kg 为卡尔曼增益, $NowData_P$ 为陀螺仪输出协方差的预测值, R 为测量噪声。

到现在,系统已经计算出了当前状态的角度信息的最优估计值 $RealData$;但是要在下个状态估计下个状态的角度信息的最优估计值,还需要更新当前状态的 $RealData$ 的协方差 $RealData_P$:

$$RealData_P = \sqrt{(1 - Kg) \cdot NowData_P^2} \quad (10)$$

图 8 是车体原地前后来回摆动时,采用改进卡尔曼滤波算法检测姿态所得到的波形数据,从图 8 中可以看到将陀螺仪输出的数据积分后得到的角度曲线随着时间的推移具有很大的偏差;而加速度计输出的角度曲线基本保持稳定,能准确地反应车体的姿态(图 8 是车体原地前后摆动测量的曲线,当车体运行时,由于地面不平导致的车体抖动干扰信号会叠加到加速度计的角度曲线上,所以当车体运行时,加速度的信号不能准确地反应车体的姿态);从图 8 中可以看到,经过卡尔曼滤波数据融合后的车体姿态曲线稳定后基本上和加速度计的角度曲线重合,由此可见本系统的姿态检测算法的有效性。

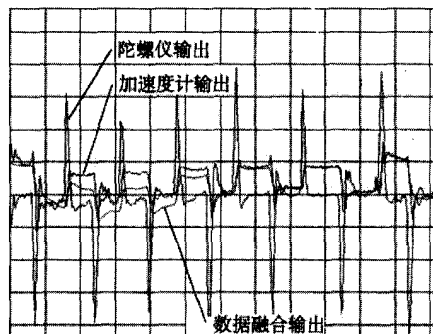


图8 卡尔曼滤波实测波形

3.2 直立平衡控制和方向控制的 PID 设计

在本系统中,直立平衡的控制和方向的控制都采用的是不完全 PID 控制,直立平衡中采用了 PD 控制^[10],这样在控制中达到了很好的效果,直立控制中偏差时倾斜的角度,偏差的变化率就是陀螺仪的输出,这两个信号就是卡尔曼滤波器输出的可靠

信号,所以调用完卡尔曼滤波后,就可以用式(11)进行平衡直立的 PD 控制了。

$$AAdValue = Angle_P \cdot RealAngle + Angle_D \cdot GyroData \quad (11)$$

式中, $AAdValue$ 为直立 PID 调节的输出量, $Angle_P$ 、 $Angle_D$ 为 PID 的比例、微分的参数, $RealAngle$ 为卡尔曼滤波得出的最优值, $GyroData$ 为陀螺仪的输出值。

方向的传感器采用的是电位器,手臂左右摆动扶杆,通过轴承带动电位器旋转,利用 AD 采集电位器信号,就可以知道左右摆动了多少角度,摆动的幅度几乎跟输出的信号成正比,因此只需把扶杆在中间位置时的 AD 值做中值,将采集电位器的值与中值作差,得到的转向信息就有了正负。转向控制的 PID 控制器设计只采用了比例控制,因为转向的过程就是一个积分过程,因此平衡车的转向控制只需进行简单的比例控制就可以完成车体的方向控制,由于采集的转向信息可能有跳变,因此有必要在转向控制中加入一点小的死区,如:

$$DAdjustValue = Direction_P \cdot DiractionError \quad (12)$$

式中, $DAdjustValue$ 为方向 P 调节的输出量, $Direction_P$ 为方向 P 调节的比例系数, $DiractionError$ 为方向的偏差。

对于左右轮的控制输出,只需在直立平衡调节输出量上加上方向的差速调节输出量,左轮的控制输出量为式(13),右轮的控制输出量为式(14):

$$LMotorAdjustValue = AAdValue + DAdjustValue \quad (13)$$

$$RMotorAdjustValue = AAdValue - DAdjustValue \quad (14)$$

4 安全处理策略

由于平衡车的设计作为一种全新的代步工具,因此必须添加一些安全处理策略,去保护人身的安全。安全处理策略主要有以下几个方面:

1) 欠压过流保护:当系统电路发生欠压和过流时,将关断驱动电路保护人体安全;

2) 超速提示:由于平衡车的速度不能达到很快,因此有必要当速度过快时进行抬头提示;

3) 脚离开车体就会关断电路:运行后,当两个脚踏传感器检测到脚离开了 10 s 后,就会关断电路。

经过实际测试,本系统的姿态检测在直立车相对于垂直地面的法线前后倾斜 0° 到 75° 内都能准确地检测姿态;在直立控制方面,本设计的直立平衡车可以保持人体站立静止平衡,在动态平衡方面,本设计的直立平衡车在上下 30° 内的斜坡时能很好地保持平衡,在上下 30° 到 60° 的斜坡时不会失速,在水平道路上,车速在 15 km/h 内,能很好地保持平衡。在方向控制方面,本设计的直立平衡车可以实现人体站立原地左右转向 360° ,车速在 15 km/h 时,转向 180° 的最大半径为 2.3 m。

5 结 语

本文通过改进卡尔曼滤波算法对加速度传感器和陀螺仪的数据进行融合得到当前姿态。该算法简单高效,在降低软件设计复杂度的同时增加了系统的可靠性,缩短了设计周期。通过

该算法,仅仅需要一个普通的加速度传感器和陀螺仪就能准确地检测姿态,这将大大降低系统的硬件成本,这是本方案的一个创新性设计;为了增加系统的可靠性,本方案在硬件上增加了欠压过流保护,并在车体脚踏处增加了两个脚踏传感器来检测人体是否离开车体,在软件上设计了超速提醒。本方案设计的直立平衡车实物如图 9 所示,该直立平衡车实现了市面上的平衡车的功能,各项技术参数也达到了市面上的平衡车的要求。



图 9 两轮直立代步平衡车实物图

适合个人的两轮代步平衡车的未来发展趋势将是更加轻便化、智能化和更长的行程。为了实现轻便化,本设计的车体需要采用更加轻便的材料;本设计需要增加更多传感器来提高车体的智能化,在未来本设计平衡车打算设计一个壁障系统、循迹系统和车载综合信息系统。壁障系统主要实现的功能是能够及时发现前方的危险障碍物,在紧急情况下保护人身的安全;循迹系统主要实现的功能是实现车体自动沿着规定路线航行;车载综合信息系统主要实现采集、记录和显示车辆的相关信息,比如车速、车体的 GPS 坐标、车体当前的负重等信息。

参 考 文 献

- [1] 杨慧. 自平衡两轮移动机器人的设计[D]. 苏州:苏州大学,2012:78-103.
- [2] 程刚,屈胜利,刘学超. 两轮自平衡小车可控角度的推导研究[J]. 机床与液压,2009,37(5):115-117.
- [3] 张吉昌,程凯,郑荣儿. 单轴双轮自平衡车姿态检测方案设计[J]. 中国海洋大学学报,2009,12(7):7-12.
- [4] Mi Ching Tsai, Jia Sheng Hu, Feng Rung Hu. Actuator Fault And Abnormal Operation Diagnoses For Auto-balancing Two-wheeled Cart Control[J]. Mechatronics, 2009, 19(5):647-655.
- [5] 王水平,王亚聪,白丽娜. MOSFET/IGBT 驱动集成电路及应用[M]. 人民邮电出版社,2009:135-167.
- [6] Thomas Braunl, Jie Pan. Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot [D]. The University of Western Australia School of Mechanical Engineering Final Year Thesis, 2003:23-43.
- [7] 童诗白,华成英. 模拟电子技术基础[M]. 4 版. 高等教育出版社,2006:325-330.
- [8] 颜毅. 基于学习控制的两轮自平衡机器人姿态控制系统[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2011:18-23.
- [9] Greg Welch, Gary Bishop. An Introduction to the kalman filter[D]. Department of Computer Science University of North Carolina at Chapel Hill, 2011:11-21.
- [10] 杨建新,杜永贵. 模糊自适应整定 PID 控制及其仿真[J]. 机械工程与自动化,2006,2(5):110-112.