

# 基于 STM32 的双轮平衡车

张志强

(武汉理工大学 湖北 武汉 430070)

**摘要:** 针对市场上的平衡车售价过高,功能单一,失去平衡后不能自动恢复平衡的问题,提出了基于 STM32 的平衡车,它采用实时操作系统 uCOS-II,借助陀螺仪、加速计、舵机控制器、编码器构成一个自平衡系统。此系统可遥控控制 LCD 显示方向,自动恢复平衡。通过观测陀螺仪数据、功能测试、价格比较,证明此系统运行平稳,功能丰富,成本低廉。

**关键词:** 双轮平衡车;STM32;陀螺仪;加速计;uCOS-II

中图分类号: TP242

文献标识码: A

文章编号: 1674-6236(2011)13-0103-04

## Two-wheeled self-balance vehicle based on STM32

ZHANG Zhi-qiang

(Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The price of self-balance vehicles on the markets are too expensive, simplex function. And it can not automatically restore balance after lost balance. According to those problems, a self-balance vehicle based on STM32 is presented, which uses real-time operating system uCOS-II with gyroscopes, accelerometer, steering gear controller, encoders constituting a self-balancing system. This system has the function of remote controls LCD display and restoration of balance. By observing the gyroscope data, it shows that the system is running smoothly. Also, it is multifunctional, low cost.

**Key words:** two-wheeled self-balance vehicle; STM32; gyroscope; accelerometer; uCOS-II

双轮平衡车突破了传统意义上的车的概念,它的特点是:两个轮子处于共轴的两个平行平面上,差动式运动,零半径转向,依照倒立摆的原理达到动态平衡。最早由美国发明家狄恩·卡门(Dean Kamen)与他的 DEKA 研发公司(DEKA Research and Development Corp.)发明设计,名为 Segway。但是其售价也是令人咋舌:7 万人民币。如何能使其功能更加丰富而又成本低廉,是本文着重解决的问题。

在微处理器的选择上,基于 ARM 内核的 32 位微控制器 STM32, CPU 最高可工作在 72 MHz, 占据了高性价比和低功耗的优势,尤其是丰富的外设,快速的中断,强劲的运算速度完全满足设计平衡车的需求。

## 1 平衡车的力学模型

为了获得平衡车的平衡方程<sup>[1-2]</sup>,需要分析其力学结构,平衡车的主要构成是车身和左右两个车轮,影响平衡的参数有:重心、质量、转动惯量、半径等。为保持动态平衡,车身重心应置于车轴的垂直上方的一定范围内,可建立力学模型,如图 1 所示。

假设平衡机器人为刚体,左右两轮完全对称,并且忽略车轮与地面之间的滑动与侧向滑动,以左轮和车身为研究对

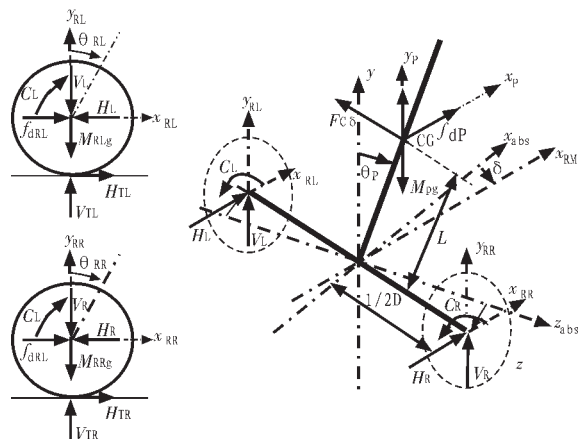


图 1 力学模型

Fig.1 Mechanical model

象得到如下方程:

左轮方程为:

$$\ddot{x}_{RL} M_{RL} = H_{TL} - H_L \quad (1)$$

$$\ddot{\theta}_{RL} J_{RL} = G_L + H_{TL} R \quad (2)$$

其中,  $x_{RL}$ : 水平位移 (m);  $M_{RL}$ : 左车轮质量 (kg);  $H_L$ : 车身施加于车轮的水平作用力 (N);  $H_{TL}$ : 地面对车轮的水平作用力

收稿日期: 2011-04-24

稿件编号: 201104117

基金项目: 武汉理工大学自主创新研究基金(2010-ZY-JS-028)

作者简介: 张志强(1978—), 男, 山西五台人, 硕士研究生, 工程师。研究方向: 嵌入式系统设计。

(N);  $\theta_{RL}$ : 左轮相对于垂直分量的倾角(rad);  $J_{RL}$ : 左轮相对于 Z 轴转动惯量(kg·m<sup>2</sup>);  $C_L$ : 左轮电机产生的扭矩(kg·m);  $R$ : 车轮半径(m)。

车身的方程为:

$$\ddot{x}_p M_p = H_L + H_R \quad (3)$$

$$\dot{y}_p M_p = V_L + V_R - M_p g \quad (4)$$

$$\ddot{\theta}_p J_{p\theta} = (V_L + V_R) L \sin \theta_p - (H_L + H_R) L \cos \theta_p - (C_L + C_R) \quad (5)$$

其中,  $x_p$ : 车身水平位移分量 (m);  $y_p$ : 车身垂直位移分量 (m);  $M_p$ : 车身质量(kg);  $V_L, V_R$ : 左右两轮施加于车身的垂直作用力(N);  $H_L, H_R$ : 左右两轮施加于车身的水平作用力(N);  $L$ : 质心距离车轴的距离(m);  $\theta_p$ : 车身对于 y 轴倾斜角(rad);  $J_{p\theta}$ : 车身对于 z 轴的转动惯量(kg·m<sup>2</sup>);  $C_L, C_R$ : 连接左右两轮的电机产生的扭矩(kg·m)。

当平衡车达到平衡状态时,  $\sin \theta_p \approx \theta_p, \cos \theta_p \approx 1$ ; 根据式(1)(2)(3)(4)(5), 得到微分方程:

$$\left( 2M_{RL} + \frac{2J_{RL}}{R} + M_p L + M_p R \right) \ddot{\theta}_{RL} = - \left[ \frac{1}{R} (J_{p\theta} + M_p L^2) + M_p L \right] \ddot{\theta}_p + g M_p L \frac{1}{R} \theta_p \quad (6)$$

## 2 控制系统设计

由微分方程式(6)可知, 如果测得车身的角加速度  $\ddot{\theta}_p$  和车身的垂直倾角  $\theta_p$ , 就可以控制两个车轮的角加速度  $\ddot{\theta}_{RL}$ , 使之达到平衡状态。角加速度和倾角可以借助传感器获得。加速计是用来测量运载体相对惯性空间运动的加速度, 也可用来测得相对于重力的倾角  $\theta_p$ 。而陀螺仪一般是用来测量载体的运动角速度, 经过积分和相关的运算可以得到载体的角度信息, 经微分运算可获得载体角加速度, 因此可以用它测量倾角  $\theta_p$  与角加速度  $\ddot{\theta}_p$ 。同时左右两轮安置编码器得到平衡车车轮的实际运动信息。整体设计结构如图 2 所示。

当平衡车进入平衡状态时, 安装于车身的陀螺仪和加速计实时采集数据, 并传送到主控制器。主控制器将数据进行

经由 PID 算法进行误差调整后再次将控制量发送到舵机控制器, 形成一个闭环反馈。整个系统不断进行调整便可以维持平衡车的平衡。

平衡车行走和转弯是由遥控器的方向消息给出, 当遥控接收器收到消息后, 引起主控制器中断, 通过平衡算法处理以后给出合适的控制量, 控制左右两个轮子行走和转弯, 同时 LCD 要显示方向键的按下状态。

当检测到平衡车失去平衡的时候, 主控制器进入特别处理模式, 将启动舵机 M1 或 M2, 在机械臂的作用下重新归位到平衡状态, 在动作完成后, 机械臂回到初始位置。

## 3 硬件设计

本文主控制器采用意法半导体生产的 STM32F103ZE<sup>[4]</sup> 作为主控制器, 它使用来自于 ARM 公司具有突破性的 Cortex-M3 内核, 该内核集高性能、低功耗、实时应用、竞争性价格于一体。STM32F103ZE 的主要性能参数有: 主频最高 72 MHz, 90 DMips, 1.25 DMips/MHz。512 k 字节闪存程序存储器, 64 k 字节 SRAM。外设有: 定时器、ADC、SPI、I2C、USART 和 USB 等。

三轴加速计选用飞思卡尔的 MMA7260QT<sup>[5]</sup>, MMA7260QT 的量程有 1.5 g、2 g、4 g、6 g 4 个, 本文选择 1.5 g 的量程范围, 精度为 800 mV/g, 内部集成了低通滤波器。将 MMA7260QT 的 x 轴 y 轴接入 STM32 的 AD 采样, 其中一个轴作冗余设计, 以增强可靠性, 12 位的 AD 采样精度可达 0.8 mV, 转换时间为 1  $\mu$ s。

陀螺仪采用亚德诺半导体的 ADXRS300<sup>[6]</sup>, 其量程为  $\pm 300^\circ/\text{s}$ , 线性误差小于 0.1%, 使用 FPGA 采样积分后, 以串口方式输出角度信息。经信号处理后的误差小于 0.5°, 温度漂移小于 0.6°。

舵机控制器是用于控制平衡车左右车轮伺服电机, 它可以同时控制 16 路舵机, 通过串口接收命令, 并输出 PWM 波形。舵机选择了比亚迪公司生产的 MG995, 其速度为 0.17 s/60°(4.8 V), 扭矩为 13 kg·cm, 死区设定 4  $\mu$ s。用于车轮的舵机需要去除销钉, 并用两个 2.5 k $\Omega$  电阻取代滑动变阻器。

遥控器部分是采用 PT2262 与 PT2272, 分别用于调制解调, PT2272 解调后的信号引脚分别与 STM32 的 Remote1~Remote4 (PC8~PC11) 连接, 前后左右 4 个按钮对应其中 Remote1~Remote4, 当遥控器有按键按下时 STM32 产生中断并作相应的处理。

编码器由两部分组成, 即: 码盘和信号采样电路。码盘与车轮共轴, 车轮转动带动码盘转动, 采用两个直射式红外光电传感器作采样电路的设计。本文选用南旭科技的光电传感器 ST150, ST150 的响应时间为 5  $\mu$ s, 光缝宽度 0.4 mm, 遮光电流 1  $\mu$ A、通光电流 0.25 mA, 满足设计要求。同时使用两个 ST150 是为了得到相位差调整为 90° 两路波形, 这样就可以检测出车轮的旋转方向。经过施密特触发器 74HC14 整形后输入到 STM32 的 Encode1~Encode4(PC4~PC7)。编码器电路如

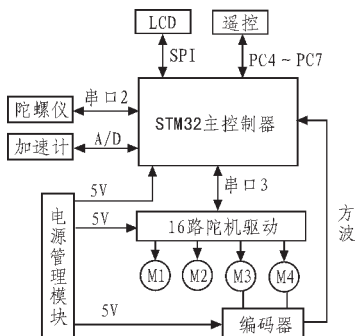


图2 系统组成示意图

Fig.2 Schematic diagram of system components

Kalman 滤波<sup>[3]</sup>和平衡算法处理, 得出姿态调整所需要的车轮加速度值, 换算为电机的控制量, 通过串口 3 发送到舵机驱动器, 控制两路由舵机改装的伺服电机作姿态调整。安装于车轮的编码器得到实际速度和运行距离, 反馈回主控制器,

图 3 所示。

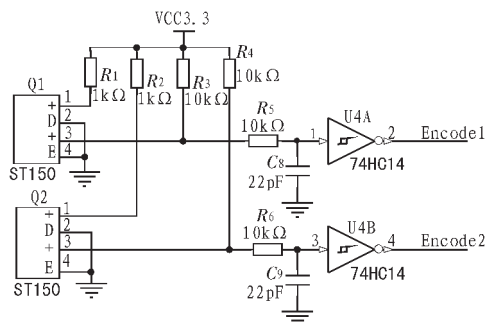


图 3 编码器  
Fig.3 Encoder

LCD 选用奕力科技的 ILI9320，使用 SPI 总线与 STM32 主控制器连接。将以上几个部分构建为一个系统,主控制器 STM32 的电路图如图 4 所示。

USART2 和 USTAR3 分别与陀螺仪和舵机控制器通讯，

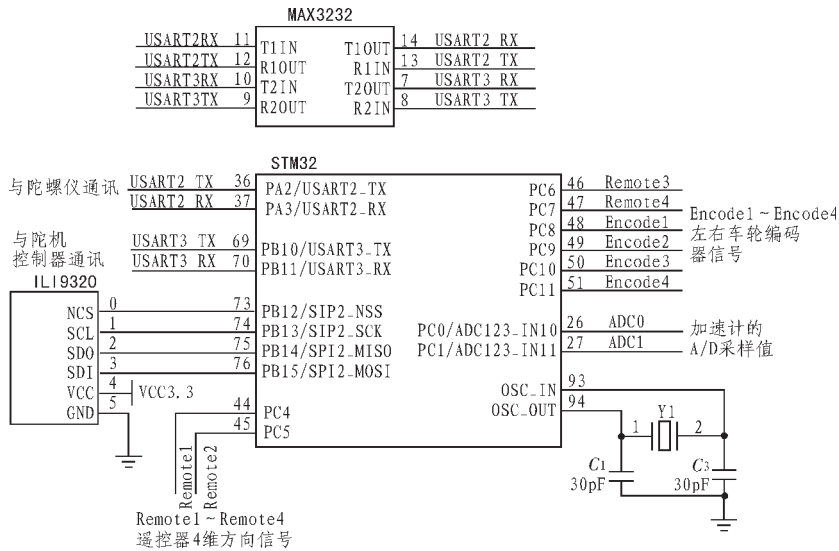


图 4 主控制器设计  
Fig.4 Design of master controller

在 STM32 复位以后,首先执行初始化操作。依次为 PLL、SPI、串口、A/D 采样、I/O、DMA、定时器、操作系统,在完成以上操作以后,启动操作系统并创建任务,开始运行应用程序。

uCOS-II 任务设计为 3 个，根据优先级由高到低得顺序依次是：

1)任务一 处理陀螺仪传输来的数据,并和加速计采样的数据通过 Kalman 算法滤波,滤波完成后发送信息量通知任务二处理。如果检测到状态为失去平衡,则通知任务二进行恢复平衡状态的操作。

2)任务二 在平衡状态下,如果收到信号量(Balace\_sem),

USART2 与 USART3 经 MAX3232 芯片将 TTL 电平转换为 RS232 电平,RS232 的工作范围是-15~+15 V,即使存在电压衰减传输信号也可以被有效识别。

4 软件设计

本文采用实时操作系统 uCOS-II<sup>[7]</sup>作为 STM32 的片上操作系统,根据不同的功能分为 3 个不同的任务。角度和角加速度等重要数据通过中断实现,保证能够快速得到处理。软件的基本结构如图 5 所示。

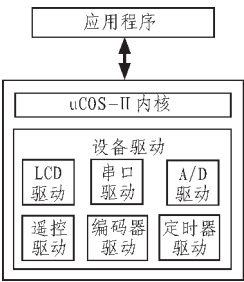


图 5 软件总体框图  
Fig.5 Block diagram of software

PID 算法将编码器得到的加速度值与平衡算法计算的加速度值进行调整,并将调整后的控制量输出到舵机控制器。如果收到信号量(Unbalace\_sem),则启动机械臂使得平衡车恢复平衡状态。

3)任务三 等待遥控器的信号量,如果有信号量便通知任务一进行方向调整,同时通过 SPI 发送到 LCD 显示。

传感器的数据都以中断的方式处理,根据优先级由高到低得顺序依次是：

- 1)用于接收陀螺仪数据的串口 2;
- 2)连接舵机控制器的串口 3;

3)左右两个编码器的 I/O;

4)遥控器 4 个方向按钮的 I/O。

加速计的 AD 采样使用查询的方式。在得到陀螺仪的数据后,立即进行 AD 采样,使得加速计和陀螺仪得到的数据尽量保持在较短的时间内。系统软件流程如图 6 所示。

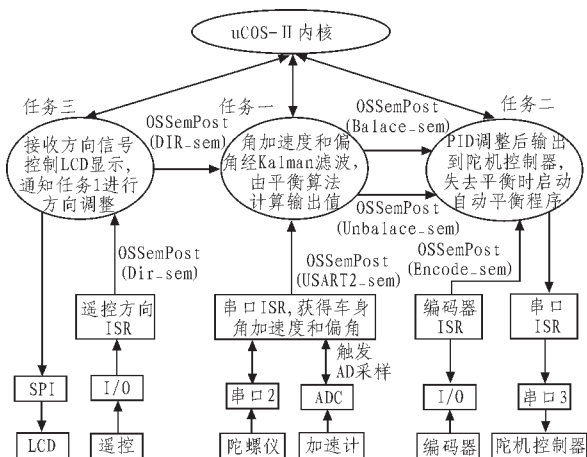


图 6 系统软件流程图

Fig.6 Flow chart of system software

## 5 实验结论

使用 ARM 开发工具 RealView MDK<sup>[8]</sup> 对平衡车进行调试,该开发工具自带的 Logic Analyzer 窗口可实时跟踪变量的变化。因此,在平衡车进入平衡状态时,用 Logic Analyzer 窗口观测到车身的倾角变化,软件中变量 Gyro\_degree 代表陀螺仪得到的车身倾角  $\theta_p$ ,Logic Analyzer 窗口得到的数据如图 7 所示。

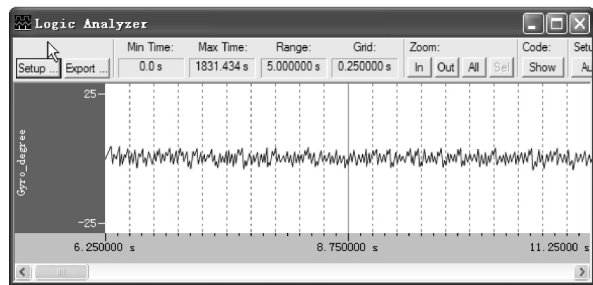


图 7 Logic Analyzer 数据

Fig.7 Data of Logic Analyzer

根据 Gyro\_degree 的数据, $\theta_p$  的数据大部分在范围  $-5^\circ \leq \theta_p \leq 5^\circ$  内振荡,说明系统运行平稳可靠。

在室内无坡度的地面上,使用遥控器做 S 型曲线运动,倾角的范围为:  $-5^\circ \leq \theta_p \leq 5^\circ$ ,并且 LCD 可正确显示出方向信息。当  $\theta_p > 25^\circ$ ,或者  $\theta_p < -25^\circ$  时,平衡车失去平衡。此时舵机 M1 与 M2 启动,将平衡车调整至  $-5^\circ \leq \theta_p \leq 5^\circ$  的范围内,重启动平衡控制。

此样车按照目前市场价格,总价约 1 500 人民币,相对于 Segway 成本大大降低。

## 6 结束语

本文以 STM32 为处理器,从硬件搭建了一个自平衡系统,以实时系统 uCOS-II 为片上系统,进行软件设计,并对平衡系统进行功能扩展。实验证明,本系统功能丰富,成本低廉,其中自动恢复平衡的功能,可用于机器人排爆,野外探测等领域。

参考文献:

- [1] Crasser F, D'Arrigo A, Colombi S, et al. JOE: A mobile, inverted pendulum [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(1):107-114.
- [2] 陈伟,延文杰,周超英,等.两轮自平衡机器人控制系统设计[J].传感器与微控制器,2008,27(4):117-120.
- CHEN Wei, YAN Wen-jie, ZHOU Chao-ying. Control system design of two wheels self-balance robot [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(4):117-120.
- [3] 袁泽睿.两轮自平衡机器人控制算法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2006:22-31.
- [4] STMicroelectronics Integrated Products. STM32 Reference manual[EB/OL].(2011-01-01)[2011-04-01].http://www.stmicroelectronics.com.cn/internet/com/TECHNICAL\_RESOURCES/TECHNICAL\_LITERATURE/REFERENCE\_MANUAL/CD00171190.pdf.
- [5] Freescale Integrated Products. MMA7260QT [EB/OL].(2008-05-03)[2011-04-01].http://cache.freescale.com/files/sensors/doc/data\_sheet/MMA7260QT.pdf?fsrch=1&sr=1.
- [6] Analog Devices Integrated Products. ADXRS300 [EB/OL].(2004-01-01) [2011-04-01].http://www.datasheetarchive.com/pdf/getfile.php?dir=Datasheets-4&file=DSA-67061.pdf&scan=.
- [7] Labrosse J J.嵌入式实时操作系统  $\mu$ COS- II [M].邵贝贝,等译.北京:北京航空航天大学出版社,2003.
- [8] 李宁.ARM 开发工具 RealView MDK 使用入门[M].北京:北京航空航天大学出版社,2008.

**欢迎投稿！ 欢迎订阅！ 欢迎刊登广告！**

国内刊号: CN61-1477/TN

在线投稿系统: <http://mag.ieechina.com>

地址: 西安市劳动南路 210 号 5-1-3 信箱

国际刊号: ISSN 1674-6236

ad@ieechina.com (广告)

邮政编码: 710082