

## 摘要

本报告介绍了我们队在此次 TI 杯江苏省大学生电子设计竞赛中设计开发的小车跟随行驶系统。该小车系统以 MSP430F5529 单片机为控制核心，以安装在车头的灰度传感器完成循迹功能，OpenMV4H7 辅助识别岔路，以超声波测距模块 HC-SR04 测量两辆车间距，以编码器检测速度信息，并通过 PID 算法实现速度控制。此外，领头小车和跟随小车通过蓝牙模块进行通信，完成同时停止、模式切换等协同功能。

关键词：MSP430F5529 小车跟随 PID 蓝牙通信 灰度检测 OpenMV4H7

# 目录

一、 系统方案 .....	1
1.1 控制系统的选择 .....	1
1.2 电机驱动方案的选择 .....	2
1.3 循线方案的选择 .....	2
1.4 测距方案的选择 .....	3
1.5 通信方案的选择 .....	3
二、 理论分析 .....	4
2.1 小车间通信模式分析 .....	4
2.2 小车运控设计 .....	4
2.3 小车间距离控制 .....	5
三、 电路与程序设计 .....	6
3.1 电路的设计 .....	6
3.1.1 MSP430F5529 电路原理图 .....	6
3.1.2 小车循迹电路 .....	6
3.1.3 小车间通信电路 .....	6
3.1.4 小车防撞设计电路 .....	7
3.2 程序的设计 .....	7
3.2.1 程序功能描述与设计思路 .....	7
3.2.2 程序流程图 .....	7
四、 测试方案与测试结果 .....	8
4.1 测试方法与仪器 .....	8
4.2 测试数据完成性 .....	8
4.3 测试结果分析 .....	8
五、 参考文献 .....	8

## 一、系统方案

小车跟随行驶系统由两辆小车构成，每辆小车都具有循迹、测距、速度可调功能，并通过两车通信实现同时启动、同时停止、间距控制。

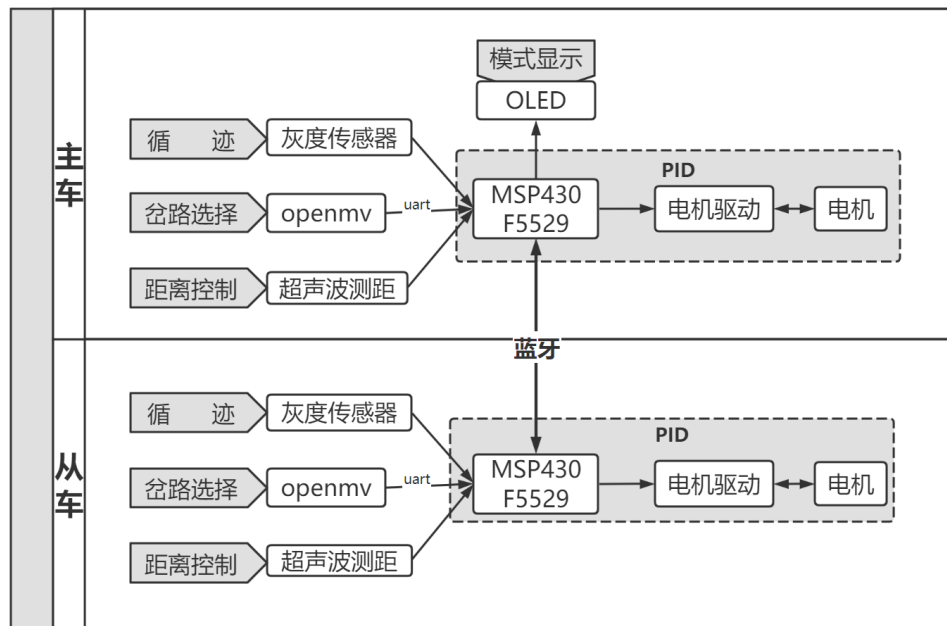


图 1-1 系统组成框图

该系统由主控模块、电机驱动模块、循迹模块、测距模块、通信模块组成，系统框图如图 1-1。下面将介绍各个模块的实现方案的选择。

### 1.1 控制系统的选择

#### 方案一：MSP430F5529

采用 MSP430 系列单片机。该系列单片机内外设丰富，拥有外部中断、定时器、输入捕获等功能，能在 25MHz 晶体的驱动下，实现 40ns 的指令周期。

#### 方案二：STM32 系列单片机

采用 STM32 系列单片机。此单片机处理数据的速度较快，运算能力强，软件编程简单灵活，可控性大，兼容性强，能够对外围电路实现较为理想的智能控制，高效迅速地完成对小车行驶的控制以及接受并实现信号。

综上，由于我们有 MSP430 系列单片机的开发经验，故采用方案一。

## 1.2 电机驱动方案的选择

确定电机型号：

方案一：有刷电机

有刷电机采用机械换向，磁极不动，线圈旋转。电机工作时，线圈和换向器旋转，磁钢和碳刷不转，线圈电流方向的交替变化是随电机转动的换相器和电刷来完成的。对于有刷电机的驱动方案，采用 H 桥电路完成电压调制，能实现速度控制、转向控制。有刷电机由于控制方案简单、扭矩大、成本低、计算量小而被广泛应用于智能小车控制中。如图 1-2。

方案二：无刷电机

无刷电机采取电子换向，线圈不动，磁极旋转。无刷电机的控制需要感知永磁体磁极的位置，即电角度，使用三相逆变桥臂电路实现电压矢量调制，通过对电流的采样，可以精确地控制电机的力矩及方向，缺点是电路复杂、计算量大且成本高。如图 1-3。



图 1-2 有刷电机



图 1-3 无刷电机

综上，由于成本低和控制方案简单，我们选择方案一的有刷电机。

## 1.3 循线方案的选择

方案一：红外传感器

红外线传感器是利用红外线的物理性质来进行测量的传感器。红外线传感器测量时不与被测物体直接接触，因而不存在摩擦，并且有灵敏度高，响应快等优点。但容易受到日光或者其他相近波长光源的干扰。

方案二：数字型灰度传感器

采用高亮聚光 LED 灯光，接收管对不同反射光的强弱对比处理，只要对光反射强弱不同即可识别。无需 AD 转换并且不用复杂的算法即可实现信号采集和控制。

方案三：OpenMV

OpenMV4H7 该模块采用 ARM Cortex M7 处理器，工作频率 480 MHz，存储空间为 1MB RAM 和 2 MB flash，核心部件为 OV7725 感光元件，接口简单，使用方便。但其帧率不高，在

小车速度过快时容易来不及响应。

综上，由于红外传感器易受外界环境影响，我们将方案二和方案三结合，主要利用灰度传感器进行循迹，用 openmv 来识别岔路。

#### 1.4 测距方案的选择

方案一：openmv 利用 AprilTag 进行测距

AprilTag 是一个视觉基准系统，可用于各种任务，包括 AR，机器人和相机校准。这个 tag 可以直接用打印机打印出来，而 AprilTag 检测程序可以计算相对于相机的精确 3D 位置，方向和 id。

方案二：超声波测距模块 HC-SR04

超声波在空气中传播，在传播的时刻碰到障碍物，就会返回一个信号给超声波接收器，超声波接收器接收到信号后立即停止计时，通过延时和声速计算出距离。超声波测距系统具有测量数据准确，线性度高、重复性好、迟滞小、成本低等优点。

综上，由于 OPENMV 个数有限，故采用方案二。

#### 1.5 通信方案的选择

方案一：HC-05 主从一体蓝牙模块

采用蓝牙模块来进行无线配对通信，将两个配对完成的蓝牙模块分别接在领头小车和跟随小车进行数据配对传输，但是蓝牙模块抗干扰性较差，传输速度略慢，传输信息量大，编辑代码较为复杂，调试麻烦。

方案二：采用数传模块

常见的数传模块往往采用串口通信的方式进行透传，常见的频段为 433Mhz、915Mhz、2.4Ghz。理论上频段频率越高，可发送的数据带宽也越大。数传模块往往 PA+LNA 的方式进行功率前级放大。数传的缺点是价格较高、大功率数传容易互相干扰。



图 1-4 数传模块

综上，由于我们有蓝牙模块使用经验，故采用方案一。

## 二、理论分析

### 2.1 小车间通信模式分析

领头小车和跟随小车通过蓝牙模块 HC-05 进行通信，领头小车向跟随小车发送启动、岔路选择、停止等标志，实现小车跟随。此外在通信建立成功时，跟随小车向领头小车回发应答信号。

HC-05 蓝牙串口通信模块，是基于 Bluetooth Specification V2.0 带 EDR 蓝牙协议的 数传模块。无线工作频段为 2.4GHz ISM，调制方式是 GFSK。模块最大发射功率为 4dBm，接收灵敏度-85dBm，板载 PCB 天线，可以实现 10 米距离通信。

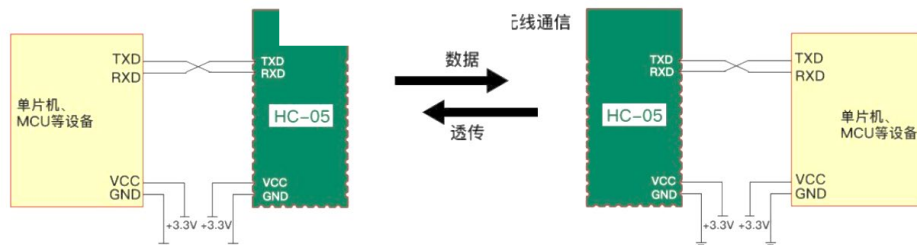


图 2-1 蓝牙通信示意图

### 2.2 小车运控设计

本次比赛的小车采用的底盘模型为四轮差速模型，通过简单数学运算，可以将四轮的轮速旋转到线速度与角速度两个分量上：

$$\begin{bmatrix} v_{cx} \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{c} & \frac{1}{c} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_l \\ v_r \end{bmatrix}$$

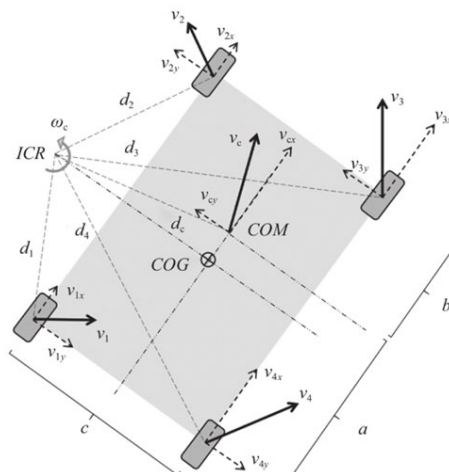


图 2-2 四轮差速模型

整个系统，我们采用的是增量式 PID 算法。对小车的角度误差，线速度误差都分别进行 PID 计算，角速度采用 PD 控制器，线速度采用 PI 控制器，并使用增量式输出，通过串级 PID 进行融合，最终四轮差速的运动学模型，将期望的轮速映射为电机驱动器对应速度的占空比，从而达到速度及角度闭环。

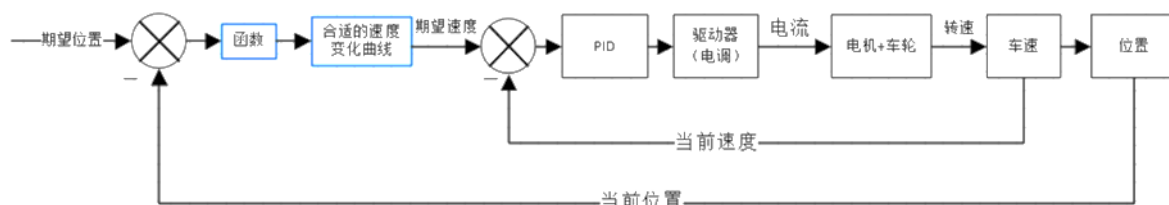


图 2-3 小车运控流程图

PID 是比例、积分、微分的缩写。比例调节是按比例反应系统的偏差，系统一旦出现了偏差,比例调节立即产生调节作用用以减少偏差。比例作用大，可以加快调节，减少误差,但是过大的比例,使系统的稳定性下降，甚至造成系统的不稳定。积分调节是使系统消除稳态误差,提高无差度。因为有误差，积分调节就进行,直至无差,积分调节停止，积分调节输出一常值。积分作用的强弱取决与积分时间常数 $T_i$ ， $T_i$ 越小，积分作用就越强。反之 $T_i$ 大则积分作用弱,加入积分调节可使系统稳定性下降,动态响应变慢。积分作用常与另两种调节规律结合,组成 PI 调节器或 PID 调节器。

### 2.3 小车间距离控制

通过超声波测距模块 HC-SR04 测定两车间距，改变后车速度，从而保持两车间距固定。

超声波测距原理是在超声波发射装置发出超声波，在发射超声波的同时开始计时，超声波在空气中传播，在传播的时刻碰到障碍物，就会返回一个信号给超声波接收器，超声波接收器接收到信号后立即停止计时，这时候会有一个时间 $t$ ，而超声波在空气中传播的速度为 340m/s，通过公式 $s = 340 \times t / 200$ ，即可计算出待测距离是多少。

### 三、电路与程序设计

### 3.1 电路的设计

### 3.1.1 MSP430F5529 电路原理图

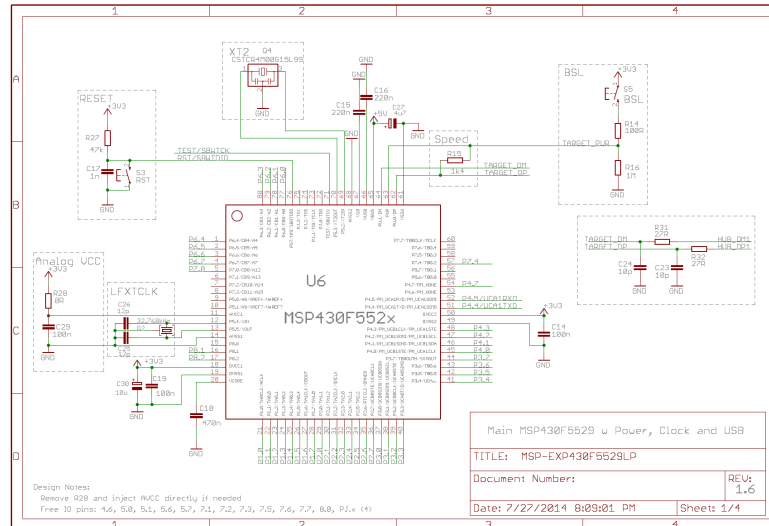


图 3-1 MSP430F5529 电路原理图

### 3.1.2 小车循迹电路

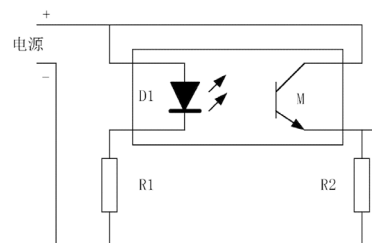


图 3-2 灰度传感器电路原理图

### 3.1.3 小车间通信电路

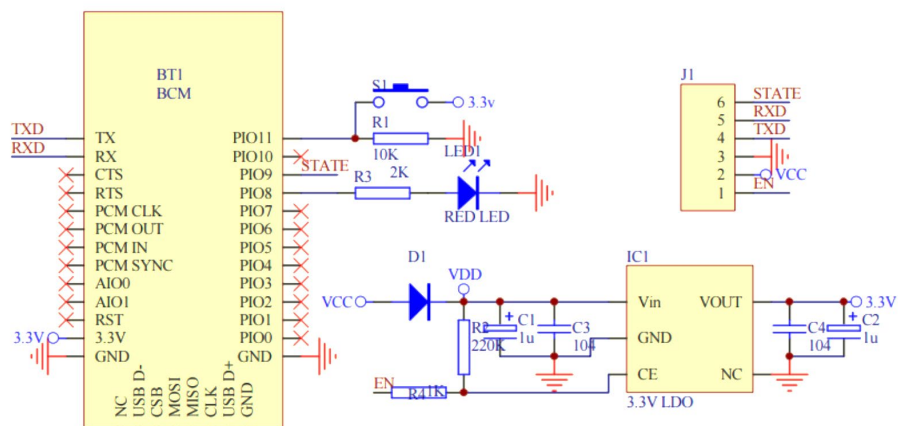


图 3-3 HC-05 蓝牙模块电路图



3.1.4 小车防撞设计电路

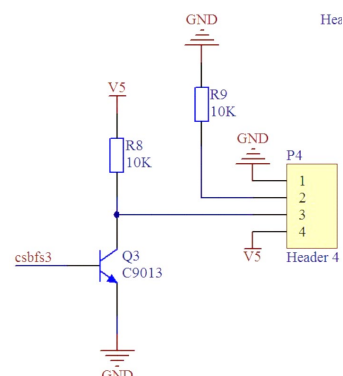


图 3-4 超声波测距模块 HC-SR04 电路图

3.2 程序的设计

3.2.1 程序功能描述与设计思路

由于本次比赛涉及到双车之间的协同，因此程序主要分为通信部分及控制部分。

其中通信部分主要涉及到双车之间的信息共享以及视觉模块与 MSP430 的信息传输，此外，还有涉及到人机交互的按键外部中断处理及 OLED 的刷新显示。

控制部分主要涉及到四轮差速的模型建立、电机驱动器的控制及串级 PID 算法。

3.2.2 程序流程图

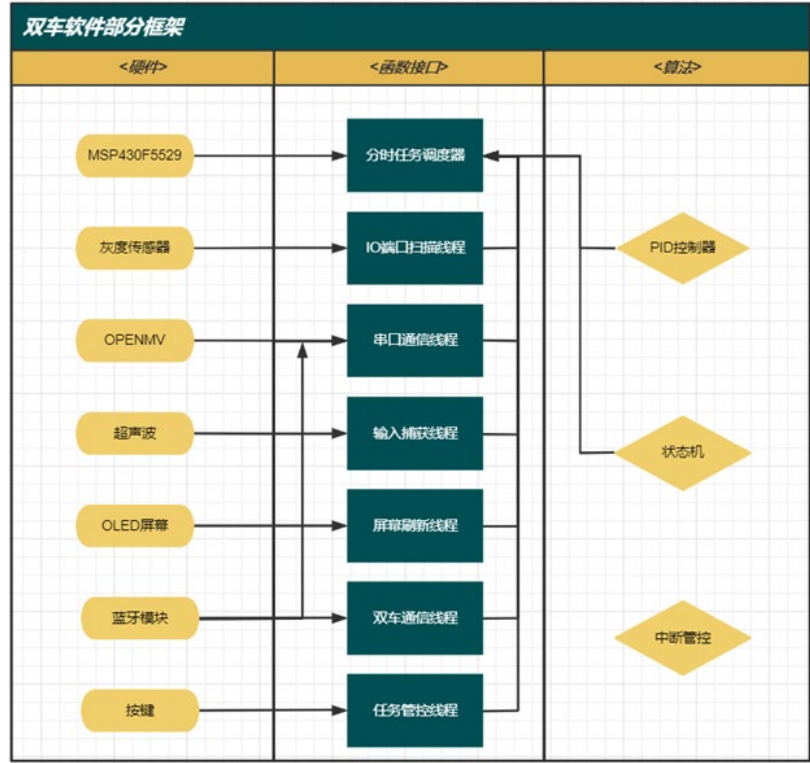


图 3-5 双车软件框架

## 四、测试方案与测试结果

对程序进行分块测试，先公共部分后独立部分，测试均无误后针对要求的需要进行测试。

### 4.1 测试方法与仪器

测试方法：计算完成时间与两车停车距离。

仪器：米尺、秒表、MSP430 单片机小车、循迹赛道。

### 4.2 测试数据完成性

表 3-1 测试数据记录表

次数	功能要求描述	实测时间	计算速度	是否发生碰撞	指定位置停车是否完成	“A”点是否及时停止	停止时两车距离
1	0.3m/s 外圈跟随行驶	19s	0.28m/s	无	完成	停止	21cm
2	追上 0.5m/s 的前车	24s	0.46m/s	无	完成	停止	23cm
3	内外道交替完成两次超车	53s	0.31m/s	无	完成	停止	19cm
4	1m/s 行驶 指定位置停车	12s	0.78m/s	无	未完成	未停止	无

### 4.3 测试结果分析

在较低速度下，小车跟随行驶系统的完成度较好。但在高速情况下运行时，小车容易在赛道两侧晃动甚至跑出赛道，这可能是由于循迹传感器灵敏度不够高或者程序处理不及时造成的。在后续改进过程中需要更换灵敏度更高的传感器，改进循迹算法的数据处理方法。

综上所述，本设计达到比赛要求。

## 五、参考文献

- [1] 周云涛.PID 控制系统工作原理以及参数的调整方法[J].新疆有色金属,2017,40(3).
- [2] 胡仁杰, 堵国樑, 黄慧春.全国大学生电子设计竞赛优秀作品设计报告选编：2017 年江苏赛区[M].东南大学出版社，2017.
- [3] 李宁, 刘启新 电机自动控制系统 北京-机械工业出版社，2003.