

## 自动行驶小车

**摘要：**本装置为自动行驶小车，以 MSPM0G3507 为主控芯片。小车使用 MG513X 直流减速电机实现运动，使用 JY901 陀螺仪模块辅助直行和转向，使用八路灰度传感器辅助巡线，使用串口屏作为人机交互器件，使用蜂鸣器和 LED 作为声光提示器件。最终，小车可以根据串口屏设定的指令完成指定路径的行驶，在规定时间内准确地完成自动行驶的任务。

**关键词：**电机控制；PID 算法；嵌入式系统；自动行驶

## 一、 系统方案

### 1. 方案比较与选择

#### 1.1 运动控制方案

**方案一：**使用直流减速电机进行运动控制。优点是启动力矩大、调速性好、负载能力强，且控制简单、使用方便；缺点是稳定性较差，易受外部干扰的影响，且精度不高。

**方案二：**使用步进电机进行运动控制。优点是精度高、转速平稳、重复定位精度高，能够精准控制位置和速度；缺点是扭矩较小，输出功率不高，且控制较为复杂。

**方案比较与选择：**在自动行驶小车中，对速度要求高，也需要更大的扭力，而本装置对精度没有特别高的要求。因此，我们选择方案一，使用直流减速电机进行运动控制。

#### 1.2 巡线行驶方案

**方案一：**用红外传感器辅助小车沿黑色弧线行驶。优点是应用广泛，成本较低；缺点是易受环境影响，精度不高。

**方案二：**用灰度传感器辅助小车沿黑色弧线行驶。优点是可以检测物体表面反射光线的微小变化，具有较高的精度；缺点是受路面颜色影响。

**方案比较与选择：**在自动行驶小车中，地图路面颜色色差大，适合使用灰度传感器，且高精度的传感器更利于巡线。因此，我们选择方案二，用灰度传感器辅助小车沿黑色弧线行驶。

#### 1.3 人机交互方案

**方案一：**通过按钮和 OLED 分别进行输入和输出显示。优点是简洁易用，成本较低；缺点是交互自由度较低，且占用的 GPIO 引脚较多。

**方案二：**通过串口屏进行输入和输出显示。优点是交互可以自由控制，且只占用一个串口；缺点是需要单独编程，配置较复杂。

**方案比较与选择：**在自动行驶小车中，需要较复杂的交互逻辑，且 MSPM0G3507 主控串口资源充足，使用串口屏能省下引脚资源，使其他元件的引脚分配更灵活。因此，我们选择方案二，通过串口屏进行输入和输出显示。

### 2. 方案描述

系统采用 MSPM0G3507 为主控芯片。主控通过 DRV8870 电机驱动电路，驱动直流电机转动，实现小车直行、转向等功能；通过电机编码器实现小车测速；通过八路灰度传感器辅助巡线，实现沿黑色弧线行驶；通过陀螺仪辅助转向，实现准确的直线行驶和转向；通过串口屏设定小车行驶任务和发送小车行驶命令；通过蜂鸣器和 LED 灯实现声光提示。整个自动行驶小车的系统框图如图 1 所示。

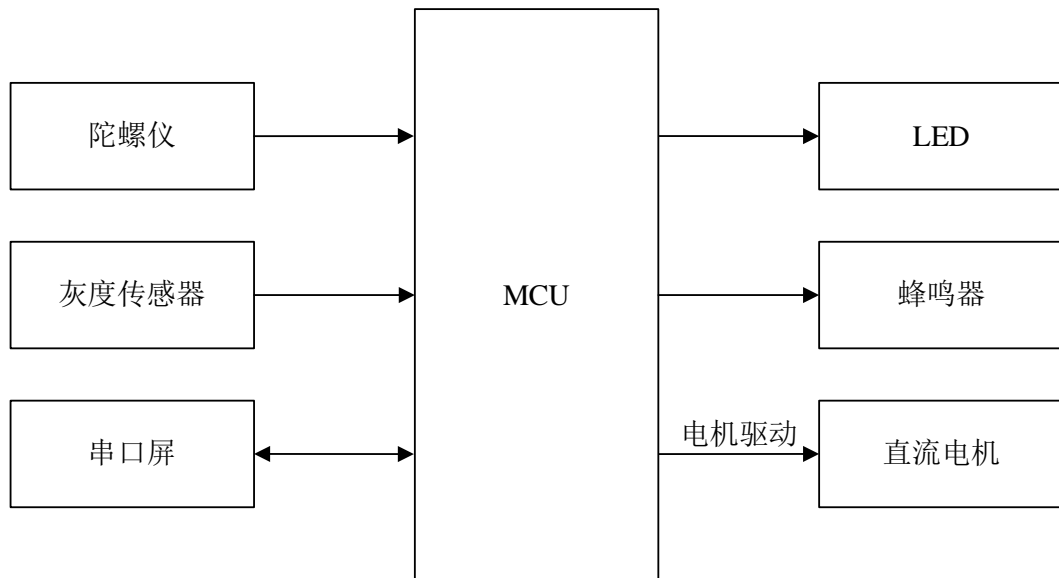


图 1 系统框图

## 二、 理论分析与计算

### 1. 小车自动行驶误差分析

在小车自动行驶系统中，可能存在的误差分为系统误差和随机误差。系统误差包括小车初始摆放位置不准导致的误差、陀螺仪零点漂移导致的误差；随机误差包括场地颠簸等导致的误差、环境光线等导致的误差。具体误差分析如表 1 所示：

表 1 误差分析表

误差类型	误差来源	误差分析	解决方案
系统误差	小车摆放位置不准	可能使小车偏离目标路径，影响后续行动	使用直尺辅助摆放，控制误差在可接受范围内
	陀螺仪零点漂移	长时间使用陀螺仪后可能发生零点漂移，使读取角度值出错，影响小车行驶	在巡线时使用传感器方案，及时纠正直行时陀螺仪导致的误差；零点漂移过于明显时断电重置陀螺仪
随机误差	场地颠簸	可能使运动路径偏移	使用 PID 算法调整
	环境光线	可能使灰度传感器读取出错	采用自带环境光滤波算法的八路灰度传感器，精确度高且便于使用

### 2. 小车轨迹控制

根据自动行驶小车任务要求，小车行为可分为直线行驶和巡线行驶。两种行为的轨迹控

制方法如下所示：

## 2.1 直线行驶轨迹控制

当小车直行或转向时，使用陀螺仪辅助小车行驶，小车的控制由角度环、速度环双环控制，使小车能实现直线行驶和固定角度的转向。其中，角度环为外环，速度环为内环。

角度环中， $A_T$  为设定的目标角度， $A_N$  为通过陀螺仪读取到的实时角度，通过式(1)计算得当前角度偏差值  $A_e$ ：

$$A_e = A_T - A_N \quad (1)$$

根据 PID 算法公式，可根据角度偏差值得到输出，如式(2)所示：

$$f_{PID_A}(A_e) = k_{P_A} \cdot A_e + k_{I_A} \cdot \int A_e dt + k_{D_A} \cdot \frac{dA_e}{dt} \quad (2)$$

其中， $k_{P_A}$ 、 $k_{I_A}$ 、 $k_{D_A}$  分别为角度环的比例项、积分项和微分项的系数，通过这三项的累加作用，使小车能快速、稳定、无抖动地到达目标角度。累加计算的结果为目标速度修正值  $\Delta v_T$ ，若小车左偏，该修正值加在左轮原目标速度上，若小车右偏，该修正值加在右轮原目标速度上。角度环将该目标速度传递给速度环。

速度环中， $\Delta v_T$  为目标速度修正值， $v_{T_0}$  为初始目标速度，目标速度  $v_T$  由式(3)计算：

$$v_T = v_{T_0} + \Delta v_T \quad (3)$$

$\vec{v}_N$  为通过电机编码器测量、计算得到的实时速度，通过式(4)计算得当前速度偏差值  $\vec{v}_e$ ：

$$v_e = v_T - v_N \quad (4)$$

根据 PID 算法公式，可根据速度偏差值得到输出，如式(5)所示：

$$f_{PID_v}(v_e) = k_{P_v} \cdot v_e + k_{I_v} \cdot \int v_e dt + k_{D_v} \cdot \frac{dv_e}{dt} \quad (5)$$

其中， $k_{P_v}$ 、 $k_{I_v}$ 、 $k_{D_v}$  分别为速度环的比例项、积分项和微分项的系数，通过这三项的累加作用，使小车能快速、稳定、无抖动地到达目标速度。累加计算的结果即为给电机的两路 PWM 信号的占空比差值  $\Delta PWM$ 。最终，主控根据计算得到的 PWM 信号占空比差值设置输出给电机驱动电路的 PWM 信号，驱动电机转动。

## 2.2 弧线行驶轨迹控制

当小车沿黑色半圆弧线行驶时，使用八路灰度传感器巡线。小车的控制由巡线环、速度环双环控制，使小车能精确实现沿黑色弧线行驶。其中，巡线环为外环，速度环为内环。

通过读取八路灰度传感器的输出电平，可以计算出与黑线的位置偏差值  $y_e$ 。根据 PID

算法公式，可根据位置偏差值得到输出，如式（6）所示：

$$f_{PID_y}(y_e) = k_{P_y} \cdot y_e + k_{I_y} \cdot \int y_e dt + k_{D_y} \cdot \frac{dy_e}{dt} \quad (6)$$

其中， $k_{P_y}$ 、 $k_{I_y}$ 、 $k_{D_y}$  分别为巡线环的比例项、积分项和微分项的系数，通过这三项的累加作用，使小车能快速、稳定、无抖动地到达目标位置，即黑线中心。累加计算的结果为目标速度修正值  $\Delta v_T$ ，若小车左偏，该修正值加在左轮原目标速度上，若小车右偏，该修正值加在右轮原目标速度上。巡线环将该目标速度传递给速度环。

速度内环的 PID 计算、输出与 2.1 中速度内环分析计算相同，最终主控根据计算得到的 PWM 信号占空比差值设置输出给电机驱动电路的 PWM 信号，驱动电机转动。

### 三、 电路、程序与机械设计

#### 1. 小车电路设计

小车电路由电源控制板和逻辑控制板两层构成，两板间使用多个排针和排母连接，以保证连接的稳定性和可靠性。

电源控制板主要包含 5V 降压输出电路，输出处采用 SMAJ5.0 瞬态电压抑制管，防止可能存在的浪涌损坏元件。逻辑控制板主要包含 MSPM0G3507、电机驱动电路和其他元件，以实现自动行驶小车各个功能。主要部分电路图如图 2 所示：

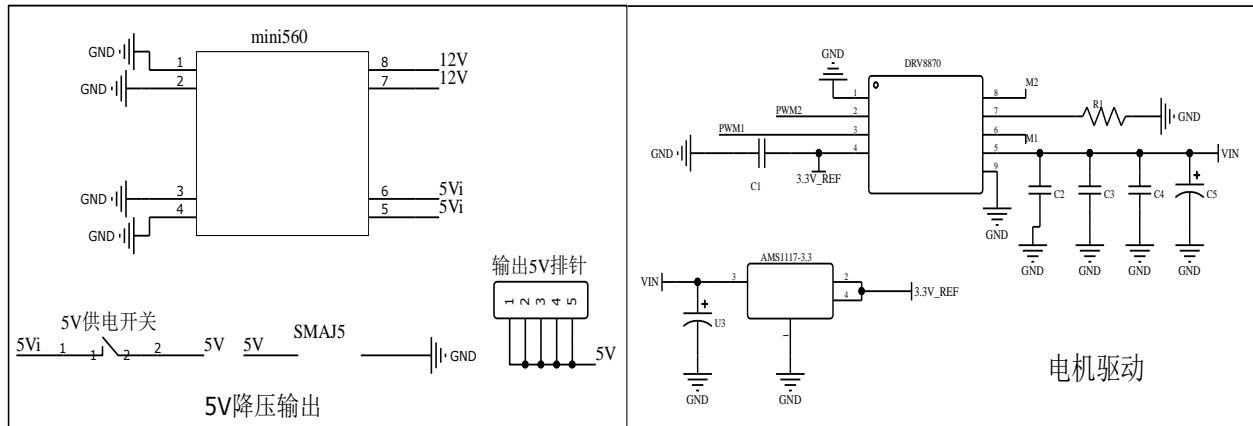


图 2 自动行驶小车主要电路图

#### 2. 主控程序设计

自动行驶小车使用 MSPM0G3507 作主控芯片。在主程序中，通过循环读取灰度传感器的数值，判断小车是否行驶到黑色弧线区域，记录下小车此时状态；再根据小车状态，得到小车的状态机，在后续程序中根据该状态机判断小车行为顺序。主控从串口屏读取到任

务题号后，根据任务要求和小车状态机，发出具体控制指令。这两个过程的流程图如图 3 所示：

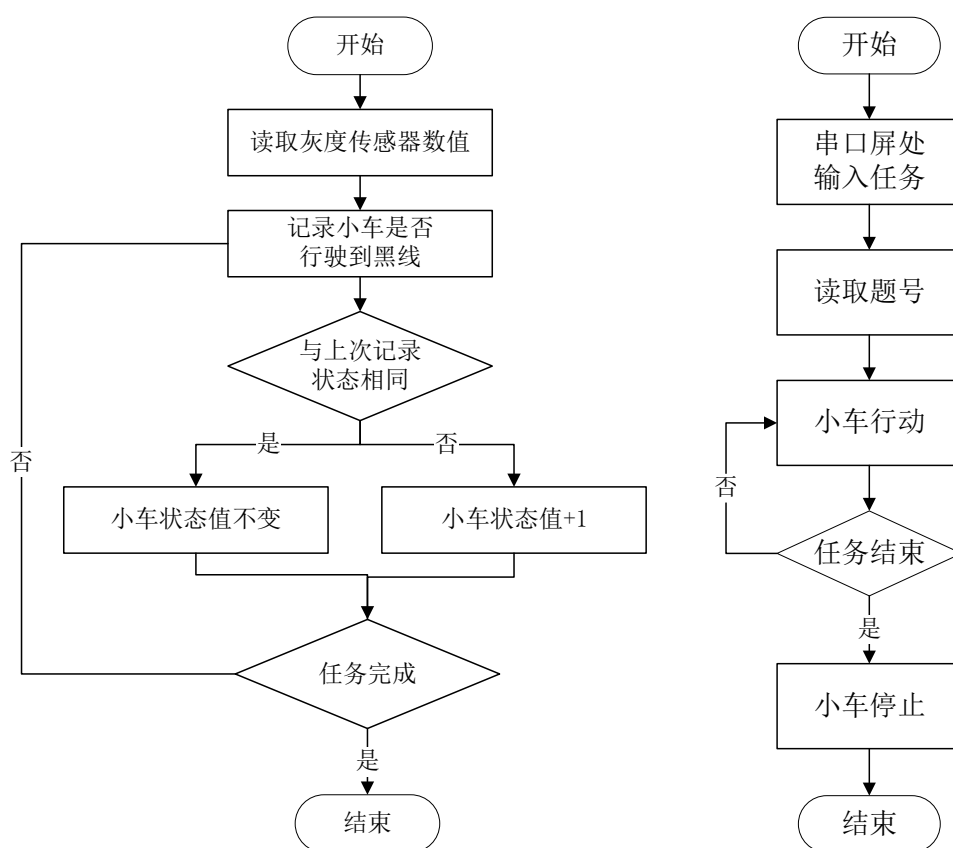


图 3 自动行驶小车状态机和主程序流程图

### 3. 小车机械结构设计

自动行驶小车采用轮式小车，其整体机械结构如图 4 所示。小车使用两个直流电机实现行驶，双轮安装在小车中部两侧，使小车能绕中心稳定转向；使用两个牛眼轮作为辅助从动轮，安装在小车前后两端，为小车提供支撑，使小车行驶过程稳定；灰度传感器安装在小车最前端，使小车能及时巡线；串口屏安装在小车后侧，方便用户完成设定任务等操作。小车采用双电机结构，各个零部件在保证小车正常运作的前提下紧密排列，使小车体积小且精致，符合题目小车尺寸要求。本小车机械设计满足以下应用支撑需求：

- (1) 小车支撑稳定，不会因加减速倾倒。
- (2) 可实现绕中心转向，在弧线行驶时能更好控制方向。
- (3) 小车体积小，使其行驶更灵活。

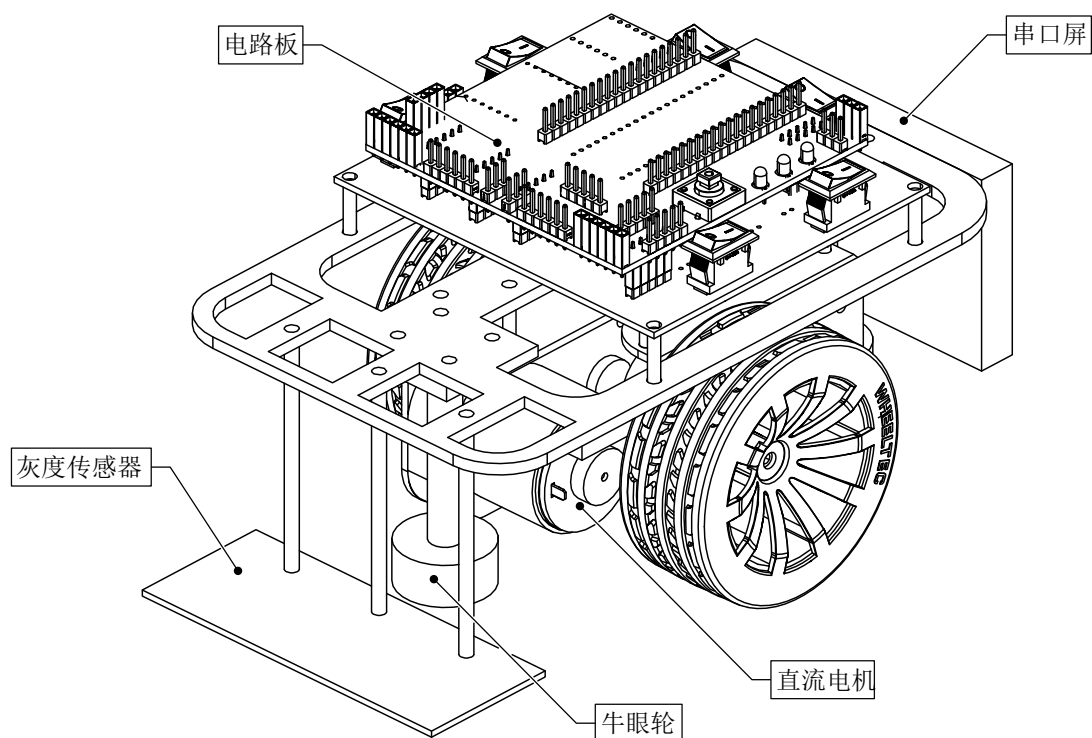


图 4 塔台引导小车机械结构外观图

## 四、 测试方案与测试结果

### 1. 测试器件

测试器件为电源和秒表，如表 2 所示。

表 2 测试器件表

测试器件名称	测试器件种类	测试器件说明
电源	12V 可充电锂电池组	用于自动行驶小车供电
秒表	SVAJ103 电子秒表	用于测量总运动时间

### 2. 测试方案

- (1)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 B 点停车，停车时有声光提示。
- (2)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 B 点后，沿半弧线行驶到 C 点，再由 C 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车，每经过一个点，声光提示一次。
- (3)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 C 点后，沿半弧线行驶到 B 点，再由 B

点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车。每经过一个点，声光提示一次。

(4)按测试方案 3 的路径自动行驶 4 圈停车。

### 3. 测试结果与数据

(1)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 B 点停车，停车时有声光提示。测得总运动时间数据如表 3 所示。

**表 3 小车跟随行驶系统任务 1 运动测试表**

测试序号	行驶路径	总运动时间
1	A-B	3.21s
2	A-B	3.76s

(2)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 B 点后，沿半弧线行驶到 C 点，再由 C 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车，每经过一个点，声光提示一次。测得总运动时间数据如表 4 所示。

**表 4 小车跟随行驶系统任务 2 运动测试**

测试序号	行驶路径	总运动时间
1	A-B-C-D-A	13.51s
2	A-B-C-D-A	13.19s

(3)将小车放在位置 A 点，设定小车自动行驶到 C 点后，沿半弧线行驶到 B 点，再由 B 点自动行驶到 D 点，最后沿半弧线行驶到 A 点停车。每经过一个点，声光提示一次。测得总运动时间数据如表 5 所示。

**表 5 小车跟随行驶系统任务 3 运动测试表**

测试序号	行驶路径	总运动时间
1	A-C-B-D-A	17.24s
2	A-C-B-D-A	17.84s

(4)按测试方案 3 的路径自动行驶 4 圈停车。测得总运动时间数据如表 6 所示。



表 6 小车跟随行驶系统任务 4 运动测试表

测试序号	行驶路径	总运动时间
1	A-C-B-D-A（4 圈）	71.64s
2	A-C-B-D-A（4 圈）	72.11s

#### 4. 测试结果分析

由数据结果可知，自动行驶小车可以根据设定的路径，在指定的时间内完成各项任务。在各项任务中，小车能平稳、连贯运动；小车行驶过程中无遥控等人为干涉，小车自动沿目标路径行驶；在停车及行驶经过 A、B、C、D 点时，蜂鸣器会发出短暂提示音，小车电路板上 LED 发出提示；小车在圆弧上行驶时，其地面投影能保持覆盖黑色弧线，在指定的目标点能稳定停止运动；小车采用车载电池供电，完成测试过程中未更换电池。所有测试项目均在规定时间内完成，满足题目要求。