

## 自动行驶小车

**摘要：**该装置是一台直流电机驱动的自动行驶小车。该装置以 TI 公司微控制器 MSPM0G3507 为控制核心，通过 PID 算法控制小车运动。采用八路灰度传感器实现小车巡迹功能，采用陀螺仪 JY901S 实现小车偏转角度的追踪功能，选用有源蜂鸣器和板载 RGB 作为小车行驶状态的声光提示器件。最终，小车能够完成地图上的环形跑圈和 8 字形绕圈，在指定的行驶状态中准确地发出蜂鸣器提示和 LED 亮灯提示。

**关键词：**直流电机；光电对管；PID 算法；自动行驶

## 一、系统方案

### 1. 方案比较与选择

#### 1.1 巡迹控制方案

**方案一：光电对管。**光电对管方案利用光电传感器检测路径上的反射或遮挡，通过反馈调节小车的运动方向。优点是响应速度快，检测精度较高。缺点是受外界光线影响较大，需要良好的环境光线条件。

**方案二：惯性导航系统。**惯性导航系统利用陀螺仪和加速度计等传感器检测小车的运动状态，通过计算得到小车的当前位置和方向，实现路径跟踪。优点是无需外部标识或传感器，适用于任意路径。缺点是精度受传感器漂移影响较大，需要定期校准。

**方案比较与选择：**本题要求小车能够稳定、准确地沿着指定路径行驶，对路径跟踪的精度要求较高，同时需要快速响应和较高的环境适应能力。光电对管方案在保证精度的前提下，响应速度快，结构简单，易于实现和维护，是满足本题要求的最佳选择。因此，选择光电对管方案。

#### 1.2 PID 控制方案

**方案一：单级 PID。**单级 PID 直接通过小车当前位置与目标路径之间的偏差作为 PID 输入，调节控制电机的 PWM 占空比。优点是参数较少，调试相对简单。缺点是没有考虑小车的实际运动状态，无法对小车的速度进行精确控制，难以使小车稳定地沿着路径行驶。

**方案二：串级 PID。**串级 PID 通过位置环将当前位置与目标路径之间的偏差转换为小车的目标速度，然后通过速度环将目标速度与实际速度之间的差值转换为控制电机的角度。优点是控制精度较高，能够更精细地调节小车的速度和方向。缺点是参数较多，调试较为复杂。

**方案比较与选择：**本题要求小车能够稳定、准确地沿着指定路径行驶，对 PID 控制的精度要求较高，因此选择串级 PID。串级 PID 可以通过精确控制速度和方向，提高小车的巡线精度和稳定性。

#### 1.3 电机选择方案

**方案一：直流减速电机。**直流减速电机通过齿轮减速来提高输出扭矩和控制精度。优点是能提供稳定的转速和较高的扭矩，易于控制，且可以通过编码器实现闭环控制，精度较高。缺点是整体结构较复杂，体积较大，可能增加系统的重量和体积。

**方案二：步进电机。**步进电机具有步距角固定、转矩大、无回程差和精度高的优点。适用于需要高精度控制的位置应用，但在高负荷情况下可能出现“丢步”现象，且开环控制难以进行误差补偿，且步进电机在高速运行时功率较大。

**方案比较与选择：**本题要求小车能够精准、稳定地沿指定路径运动。直流减速电机能够提供稳定的转速和较高的扭矩，结合编码器实现闭环控制，可以满足小车精准、稳定巡线的要求。因此，选择直流减速电机。

## 2. 方案描述

系统以 TI 公司的 MSPM0G3507 为主控芯片，控制直流减速电机 MG301X 进行小车运动姿态控制，通过自锁开关发送任务，小车控制过程中运动到目标位置等功能都可按要求自动完成。

运动过程中，通过光电对管巡行驶迹，通过陀螺仪完成指定方向的直线行驶。单片机通过位置-速度串级 PID 计算出各电机的目标速度，并通过调节 PWM 波的占空比来控制电机，进而实现题目要求的各种要求。自动行驶小车的系统框图如图 1 所示。

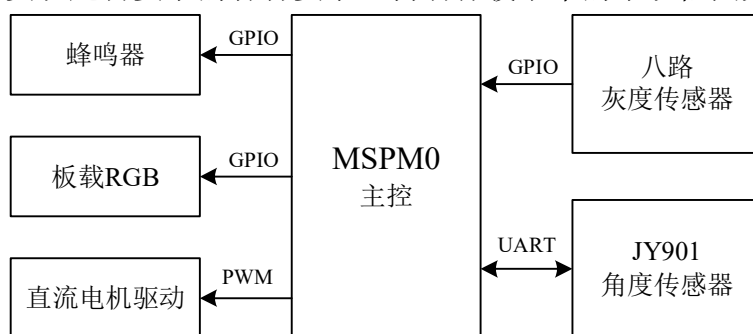


图 1 系统框图

该小车机械结构采用加工环氧板为主要结构材料，直流电机提供动力，通过铜柱进行支撑和连接。自动行驶小车的机械结构如图 2 所示：

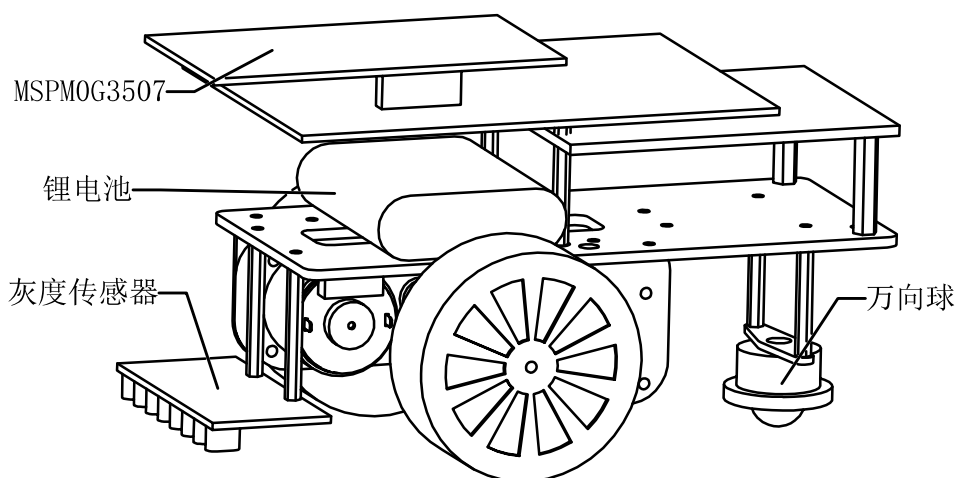


图 2 小车机械结构外观图

## 二、理论分析与计算

### 1. 小车自动行驶误差分析

小车在行驶过程中，由于轮胎表面灰尘的积累，使橡胶轮胎抓地力下降。同时，行驶赛道表面比普通地面更光滑，摩擦力更小，更易引发小车平移滑动。此外，小车整体重量较大，惯性较强，当速度较快时，惯性效应使小车在行驶时难以精确控制，进而产生较大误差。这些因素综合作用，增加了 PID 算法的控制难度和要求。

小车机械部件的磨损和机械结构的精度不足会导致小车的实际行驶过程与理论分析不完全一致，比如小车在高速运动过程后可能存在螺丝松动的情况，存在相对误差。陀螺仪在长时间距离运行状态下，会出现一定的漂移现象，即定位与方向控制出现偏差，导致测量数据逐渐偏离实际值，随着时间的累积，这种漂移可能会变得更加明显，导致误差不断积累，影响系统的整体性能。

PID 算法在设计目标速度时，与小车的实际速度之间存在一定的差异，这种差值会导致小车在巡迹过程中出现偏差。特别在拐弯过程中，这种速度差异会影响小车的转弯精度，导致拐弯角度与预期值不一致，从而引发轨迹上的误差。这个误差可能会使小车偏离预定路径，影响整体的行驶准确性，这就需要其它传感器的反馈控制。

总体而言，硬件因素导致的误差更多，软件引起的误差影响较小。通过提前进行人为数值调整，可以尽量减少这些误差，实现更精确的控制。

### 2. 小车轨迹控制分析

小车结构为三轮小车，一轮为万向轮，左右两轮为驱动轮。万向轮的引入使得小车在平面上的移动更加灵活，而驱动轮则提供了主要的动力输出和方向控制。小车的运动（瞬时速度）根据编码器反馈值可以分解为两种基本运动模式：前后和顺逆旋转两种运动，其速度如下式表示：

$$V_F = V_{ENC1} + V_{ENC2} \quad (1)$$

$$V_R = V_{ENC1} - V_{ENC2} \quad (2)$$

其中  $V_F$  和  $V_R$ （设定值）分别为小车前后运动和顺逆旋转的速度，这两个参数用于控制小车在不同方向上的运动。另一方面， $V_{ENC1}$  和  $V_{ENC2}$ （设定值）是驱动轮的速度，这两个参数直接影响小车的实际移动速度和方向。

由此易得：

$$V_{ENC1} = \frac{V_F + V_R}{2} \quad (3)$$

$$V_{ENC2} = \frac{V_F - V_R}{2} \quad (4)$$

$ENC1$  表示左侧编码器,  $ENC2$  表示右侧编码器, 前进和顺时针旋转记为正, 计算距离与计算速度的公式一致。小车的位置环为外环, 是基于  $X_F$  和  $X_R$  进行 PID 控制的, 外环输出结果经过处理之后, 作为  $V_F$  和  $V_R$  (设定值)。由  $V_F$  和  $V_R$  (设定值) 根据上面的式子可以求得  $V_{ENC1}$  和  $V_{ENC2}$  (设定值), 小车的速度环为内环, 是基于  $V_{ENC1}$  和  $V_{ENC2}$  进行 PID 控制的, 内环输出结果经过处理之后, 分别作为小车左右轮 PWM 信号占空比值对小车运动进行控制。

### 三、电路与程序设计

#### 1. 控制电路设计

小车通过自锁开关实现人机交互, 采用船式开关控制电源。通过 MSPM0G3507 板载 RGB 灯来实时观察小车运行的进程状态, 方便调试使用。小车上船式开关分别控制总电源, 直流电机电源和开发板电源, 分离电源提高安全稳定性。其中电机驱动电路图如图 3 所示:

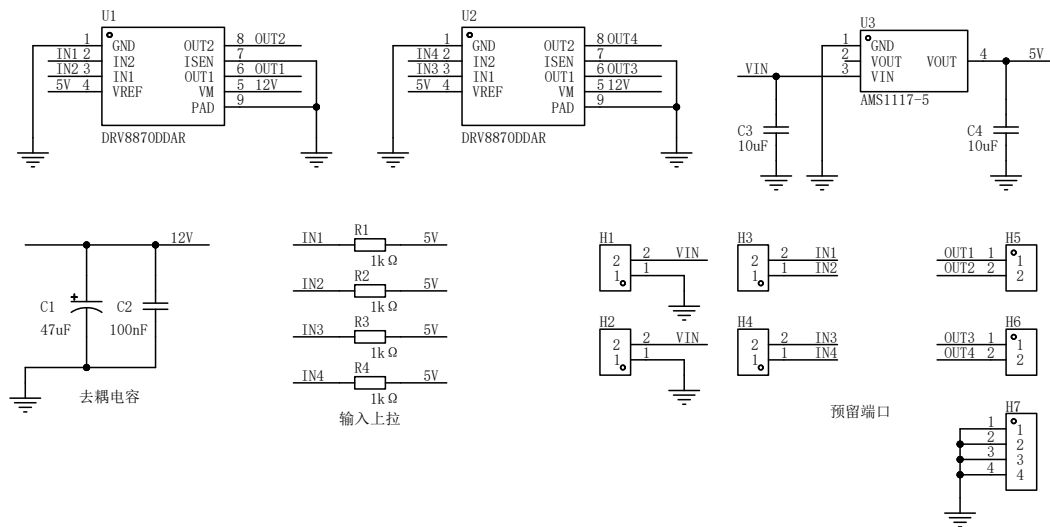


图 3 电机驱动电路图

双路 DRV8870 电路设计利用两个 DRV8870 芯片分别独立控制两个直流电机, 实现高效精确的电机驱动。每个 DRV8870 芯片包含电源输入 (VIN)、接地 (GND)、控制输入 (IN1 和 IN2) 以及电机输出 (OUT1 和 OUT2), 并通过 VREF 引脚设定电流限制以保护电机。此设计支持电机的正反转和制动控制, 适用于如双驱小车等需要独立电机控制的应用场景。

电路中的电源部分通过 Mini560 降压模块从 12V 电压降至 5V, 供应逻辑电路电力。控制信号通过微控制器传至 IN1 和 IN2 引脚, 配合阻抗匹配电阻以减少干扰和保护引

脚。此设计提高了系统的操作灵活性和控制精度，并通过内置的过流和热保护功能增强了系统的安全性和可靠性。

## 2. 程序流程设计

系统启动后，主控程序配置任务，完成准备工作后开始行驶。行驶过程中光电对管识别转弯黑线与小车的相对位置，陀螺仪模块识别当前小车相对角度位置，根据当前姿态和目标位置规划目标速度，在 PID 调节下向电机发送目标速度。在运行过程中有源蜂鸣器与板载 RGB 适时发出声光提示。程序运行结束后，电机进入暂停状态，发出声光提示待机直至停止状态解除。系统的程序流程图如图 4 所示。

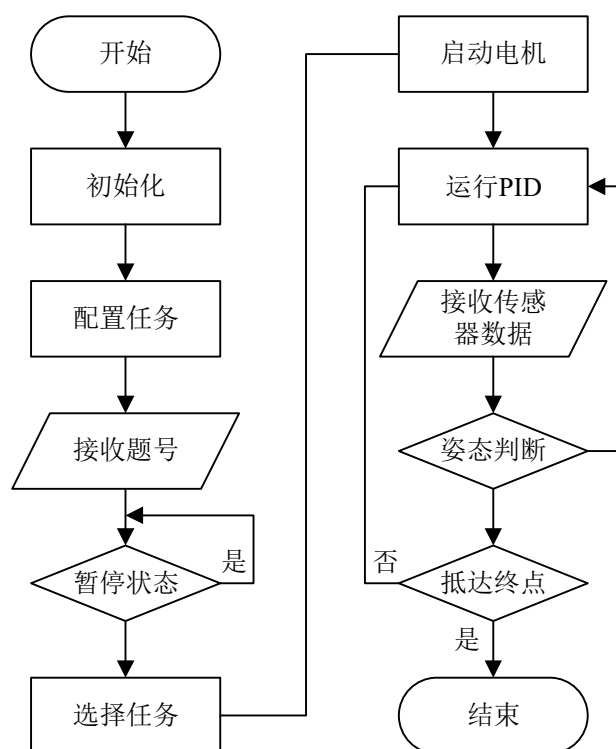


图 4 自动行驶小车程序流程图

在走直线路径时，陀螺仪模块会将小车当前角度实时地发送给 MCU，MCU 计算出与开始执行直线时角度与当前角度的偏差值，使用 PID 算法计算出两个直流电机应该转动的目标速度，并以 PWM 波形式发送给直流电机驱动，在电机转动过程中，电机编码器实时将电机速度传回 MCU，实现速度环。在走弧形路径时基于走直线路径的基础上，接收光电对管识别的黑线位置，计算与小车的相对位置差，如果小车有较大偏移，则立即回调方向。当 PID 输出值较大时，一个计算周期内电机应该移动的脉冲数更多，相当于 PWM 占空比更大，电机转动速度更快。小车通过陀螺仪和光电对管实时调整方向，利用 PID 算法控制电机速度，实现精准的直线和弧形路径行驶。

## 四、测试方案与测试结果

### 1. 测试环境

依照题目要求，安排测试环境如表 1 所示：

表 1 自动行驶小车测试环境器件表

测试器件名称	测试器件种类	测试器件说明
电源	2800mA 锂电池	12V 电源
其他	计时器，直尺	用于计时与测量

### 2. 测试方案

1. 将小车放在测试 A 点，小车能自动行驶到 B 点停车，停车时有声光提示。
2. 将小车放在 A 点，小车能自动行驶到 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 A 点，小车能自动行驶到 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. 将小车放在 A 点，小车能自动行驶到 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，自动行驶 4 圈停车。

### 3. 测试结果与数据

1. 将小车放在测试 A 点，小车能自动行驶到 B 点停车，停车时有声光提示。得到的数据如表 2 所示。

表 2 自动行驶小车任务 1 运动测试表

测试序号	小车运动起始点	总运动时间
1	A-B	10.31s
2	A-B	9.79s
3	A-B	10.63s

2. 将小车放在 A 点，小车能自动行驶到 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。得到的数据如表 3 所示。

表 3 自动行驶小车任务 2 运动测试表

测试序号	小车经过目标	总运动时间
1	A-B-C-D-A	23.75s
2	A-B-C-D-A	23.13s
3	A-B-C-D-A	23.35s

3. 将小车放在 A 点，小车能自动行驶到 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。得到的数据如表 4 所示。

表 4 自动行驶小车任务 3 运动测试表

测试序号	圈数	小车任务设定	总运动时间
1	1	A-C-B-D-A	35.13s
2	1	A-C-B-D-A	35.99s
3	1	A-C-B-D-A	37.11s

4. 按要求 3 的路径自动行驶 4 圈停车，得到的数据如表 5 所示。

表 5 自动行驶小车任务 4 运动测试表

测试序号	圈数	小车任务设定	总运动时间
1	4	A-C-B-D-A	141.36s
2	4	A-C-B-D-A	141.65s
3	4	A-C-B-D-A	141.79s

#### 4. 测试结果分析

由数据结果知，小车可以在指定的时间内，完成各项任务。小车在运行过程中，顺利完成要求的直线行驶，目标停止，环形寻迹行驶，S 形环形绕圈行驶。且在环形绕圈行驶过程中，小车阴影始终使得轨迹处在阴影范围内，符合题目要求。在到达指定位置后，蜂鸣器提示且 LED 灯正常亮起，控制精度都相对较高，满足题目要求。