

# 自动行驶小车

## 摘 要

自动行驶小车以 MSPM0G3507 处理器为控制核心,灰度传感器结合陀螺仪实现小车惯性导航循迹功能,将识别结果发送给 MSPM0G3507 控制核心,运用卡尔曼滤波对信号进行滤波处理。在自动控制程序中,采用增量式 PID 算法对坐标信息进行处理,减少目标位置与实际位置的误差,以此对小车进行控制,使得运动目标控制更加稳定。

**关键词:** 自动行驶小车; MSPM0G3507; 卡尔曼滤波; PID 算法

# 目录

<b>1 系统方案设计与论证</b>	<b>2</b>
1.1 系统总体方案设计	2
1.2 主要模块方案选择和论证	2
<b>2 理论分析与计算</b>	<b>5</b>
2.1 轨迹控制	5
2.2 误差分析	6
<b>3 硬件电路设计</b>	<b>6</b>
<b>4 软件设计</b>	<b>7</b>
<b>5 测试方案与测试结果</b>	<b>8</b>
5.1 测试方案	8
5.2 测试结果	8
5.3 测试结果分析	9
<b>6 结论</b>	<b>9</b>
<b>参考文献</b>	<b>9</b>

# 1 系统方案设计与论证

## 1.1 系统总体方案设计

将系统分为 6 个基本模块，包括总控制模块、灰度模块、驱动模块、编码电机、陀螺仪和电源管理模块。系统的总体设计框图如图 1 所示。

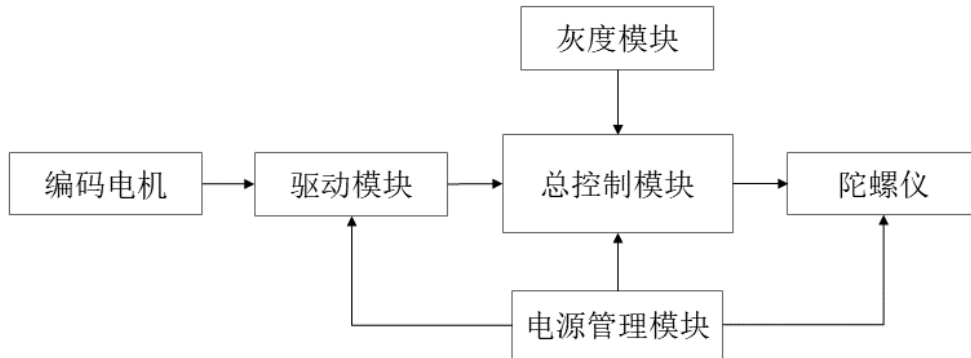


图 1 系统总体设计框图

## 1.2 主要模块方案选择和论证

本系统主要由总控制模块、灰度模块、驱动模块、编码电机、惯性传感器模块和电源管理模块组成，下面分别论证这几个模块的选择。

### (1) 总控制模块分析与选择

方案一：采用 MSPM0Lxxxx 系列处理器作为主控芯片，该芯片具有总计多达 10 个外部通道的 12 位 1.68Msps 模数转换器，两个零漂移、零交叉斩波运算放大器，同时集成温度传感器，能够支持低功耗模式，运行电流低至 71 $\mu$ A/MHz。工作温度范围宽，适应性强。但 MSPM0Lxxxx 系列处理器的主频较低，计算性能上有所限制。Flash 和 RAM 容量相对较小，会限制复杂应用的存储需求。

方案二：采用 MSPM0Gxxxx 系列处理器作为主控芯片，基于 Arm Cortex-M0+ 内核，主频高达 80MHz，提供高性能计算能力。Flash 容量从 32KB 到 128KB 不等，提供多种存储选项以满足不同应用需求。RAM 容量从 4KB 到 32KB，支持更复杂的数据处理和多任务处理，同时具有丰富的外设支持，包括 CAN FD 和加密模块，增强了通信和安全性，但 MSPM0Gxxxx 系列处理器价格较高。

为达到小车行驶时高性能计算，选择方案二。采用 MSPM0Gxxxx 系列的 MSPM0G3507 处理器作为主控芯片。

## （2）灰度模块模块的论证与选择

方案一：采用模拟量五路灰度传感器进行路径跟随。提供 5 个独立的检测通道，提供适中的分辨率，能够处理基本的灰度信息，配置和调试过程较为简单。但是提供的灰度信息较少，且输出量为模拟量不稳定，无法满足较高精度检测需求或处理复杂环境中的细节，在检测精度和能力上相对有限。

方案二：采用感为八路灰度传感器进行路径跟随。提供 8 个独立的检测通道，较四路传感器分辨率更高。该传感器的输出量为数字量，输出稳定，受光照影响比较小，由于具备提供 MCU 还提供自动校准功能。

方案三：采用十二路灰度传感器进行路径跟随。该传感器不具备 MCU，输出量为数字量，输出稳定，提供 12 个独立的检测通道、更高的分辨率、更详细的灰度信息和最详细的检测数据，适合复杂的检测任务，但成本相对较高。

综上所述，结合赛题不能采用除 TI MSPM0 系列其他型号的 MCU 的要求，选择方案三实现小车的路径跟随。

## （3）惯性传感器模块的论证与选择

方案一：采用 MPU-6050 模块提供姿态和运动数据。MPU-6050 是 InvenSense（现为 TDK）推出的一款流行的 IMU，集成了三轴加速度计和三轴陀螺仪，用于测量加速度和角速度，功能相对简化，通常更易于使用和集成。但在高动态环境中该模块精度、数据更新率和稳定性较低。

方案二：采用 GY901S 模块提供姿态和运动数据。该模块集成了三轴加速度计、三轴陀螺仪和三轴磁力计，提供了更全面的传感器数据。磁力计可以用于检测地球磁场，帮助提供更准确的方向和定位信息。在小车自动行驶中，这可以增强小车的导航能力，帮助它更好地适应赛道的转弯和路径调整。此外，该模块提供串口发送数据，可以自行解算角度，并且提供上位机，利于调试。但该模块具备 MCU，因此不选用。

方案三：采用 IMU660RA 模块提供姿态和运动数据。IMU660RA 是 TDK（原 InvenSense）推出的一款不具备 MCU 的六轴陀螺仪模块。该模块提供了较高的精度和较低的噪声水平，提供更高的数据更新率以及抗震性能，更低的零偏和温漂，支持 IIC 和硬件 SPI，这对于需要高精度姿态估计和稳定控制的小车尤为重要。

综上所述，结合赛题不能采用除 TI MSPM0 系列其他型号的 MCU 的要求，选择方案三测量和监测小车的姿态、运动状态和方向。

#### （4）编码电机模块的论证与选择

方案一：采用 JGA25-370 进行位置和速度的控制。在额定电压下，JGA25-370 电机通常工作电压为 6V 或 12V，具有较高的扭矩，配有内置的齿轮箱，提供多档减速比，使电机能够在不同的应用场景中提供合适的速度和扭矩。但其转速通常较高，适用于需要较高转速的应用。

方案二：采用 MG310 直流减速电机进行位置和速度的控制。MG310 配有内置齿轮箱，能够提供不同的减速比，增加电机的扭矩并降低转速，即使在较低电压下，也能提供较高的扭矩。MG310 电机设计小巧，相较于 JGA25-370 和 TT 马达，MG310 电机体积通常更小，更适合空间极为受限的设计，并且可以提供更高的精度、更好的耐用性和稳定性。

综上所述，为满足高精度要求以及小车的精巧设计，选择方案二。

#### （5）驱动模块的论证与选择

方案一：采用 L298N 模块驱动电机。L298N 模块内置两个 H 桥，可以同时驱动两个直流电机或一个步进电机，每个 H 桥支持的最大持续电流为 2A（峰值可达 3A），支持的电机工作电压范围一般为 5V 至 35V，适合需要较高电压的应用。但 L298N 模块使用的是双极性功率晶体管（BJT），相对于使用 MOSFET 的电机驱动模块，其效率较低，可能导致更高的功耗和发热。

方案二：采用 TB6612FNG 模块驱动电机。TB6612FNG 与 L298N 模块相同，内部集成两个 H 桥电路，允许同时控制两个直流电机或一个步进电机，每个 H 桥最大持续电流为 1.2A（峰值可达 3.2A），支持的电机工作电压范围一般为 4.5V 至 13.5V，适用于低电压应用。使用 MOSFET（场效应管）而非 BJT（双极型晶体管），提供更高的效率和更低的功耗，其较小的封装尺寸更适合紧凑设计和空间有限的应用。

由于 TB6612FNG 模块与 MG310 直流减速电机适配，且小车工作电压要求不高，并被限制大小，因此选择方案二，同时可以达到高效与低功耗的需求。

#### （6）电源管理模块的论证与选择

方案一：采用 LM317 稳压模块，选用电池型号为 1300mAh 3S 锂聚合电池供电。LM317 稳压模块是一款线性稳压器，通过线性调节实现输入电压转换为稳定的输出电压，直接将输入电压减去期望的输出电压的差异，以热量的形式散发。

这样做设计相对简单，易于实现，但由于是线性稳压，电源的效率取决于输入和输出电压之间的差异，能量损失以热量的形式散发出来，效率较低。

方案二：采用 LM2596 稳压模块，选用电池型号为 1300mAh 3S 锂聚合电池供电。LM2596 稳压模块是一款开关稳压器，具有可调电压接口，使用开关电路来将输入电压转换为稳定的输出电压，通过高效的开关调节实现，相比于线性稳压器具有更高的效率。此外，该模块能给外设提供多个电源接口，有利用小车多外设连接。

综合考虑，选择方案二。

## 2 理论分析与计算

### 2.1 轨迹控制

#### （1）卡尔曼滤波算法

本设计采用卡尔曼滤波对动态系统进行状态估计。在卡尔曼滤波中，通过结合传感器测量值和系统动态模型，提供对状态变量的最优估计。时间更新部分利用系统的状态转移方程和误差协方差矩阵来预测下一个时间步的状态估计，可以通过系统的动态模型进行推算，获得先验估计。测量更新部分利用传感器的测量值和先验估计，结合协方差矩阵，得到对状态的后验估计，通过反馈控制将传感器测量信息与先验估计进行融合，从而得到更精确的小车状态估计。

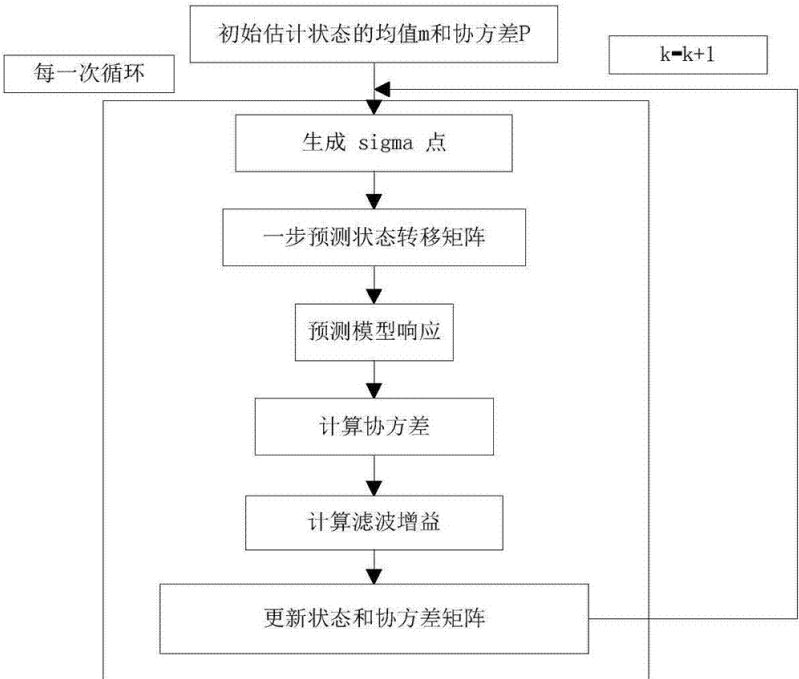


图 2 卡尔曼滤波算法流程图

## (2) 串级 PID 控制算法

本设计的 PID 调节采用串级 PID 控制算法，调节框架如图 3 所示。采用内环调节角速度，外环调节角度，使用双闭环的 PID 算法提高小车姿态的稳定性。

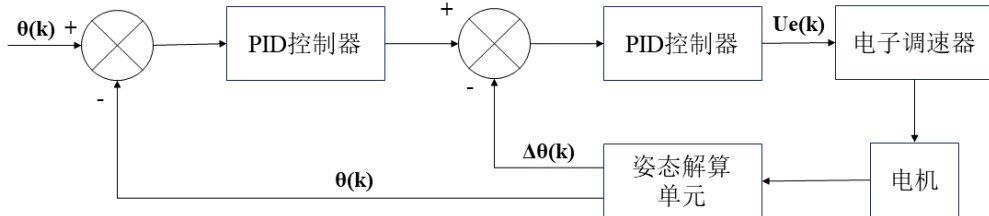


图 3 串级 PID 调节框架图

计算公式如下：

$$r(k) = K_p * e_1(k); e_2(k) = r(k) - r_0(k)$$

$$u(k) = K_p \left[ e_2(k) + T_d \frac{e_2(k) - e_2(k-1)}{T} \right]$$

其中， $K_p$  为比例系数， $T_d$  为积分时间， $T$  为控制周期， $e_2(k-1)$  为上一时刻的角速度误差。

## 2.2 误差分析

(1) **传感器误差：**由于灰度传感器非线性，导致误差计算不准确；陀螺仪精度不足导致的解算角度不准确；

(2) **机械结构：**小车结构不对称导致误差；

(3) **电气特性：**电机和驱动系统进行调校不精确，导致性能不一致。

## 3 硬件电路设计

### (1) 小车硬件结构图

小车以 MSPM0G3507 为核心实现一系列运动，具体模块关系如图 4 所示。

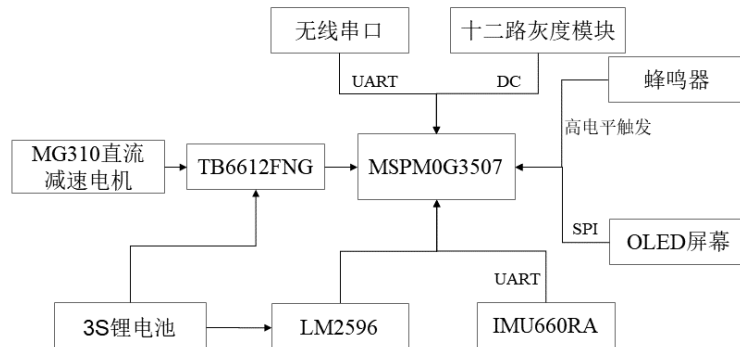


图 4 小车硬件结构图

## 4 软件设计

### (1) 程序功能描述

自动行驶小车具有四种功能模式，由按键控制切换。

模式一：按下按键后，小车自动从 A 点行驶到 B 点，同时到达 B 点时 LED 灯和蜂鸣器同时响应。

模式二：按下按键后，小车自动从 A 点经 B、C、D 点行驶并回到 A 点，每经过一点，LED 灯和蜂鸣器同时响应。

模式三：按下按键后，小车自动从 A 点经 C、B、D 点绕“∞”形行驶并回到 A 点，每经过一点，LED 灯和蜂鸣器同时响应。

模式四：按下按键后，小车自动从 A 点经 C、B、D 点绕“∞”形行驶四圈，并回到 A 点，每经过一点，LED 灯和蜂鸣器同时响应。

### (2) 程序设计思路

先设计出每种功能中相同的程序部分方便在各个步骤中调用，再设计出各个步骤中特有的部分加上之前的公共部分进而完成整个步骤。程序流程图如下图：

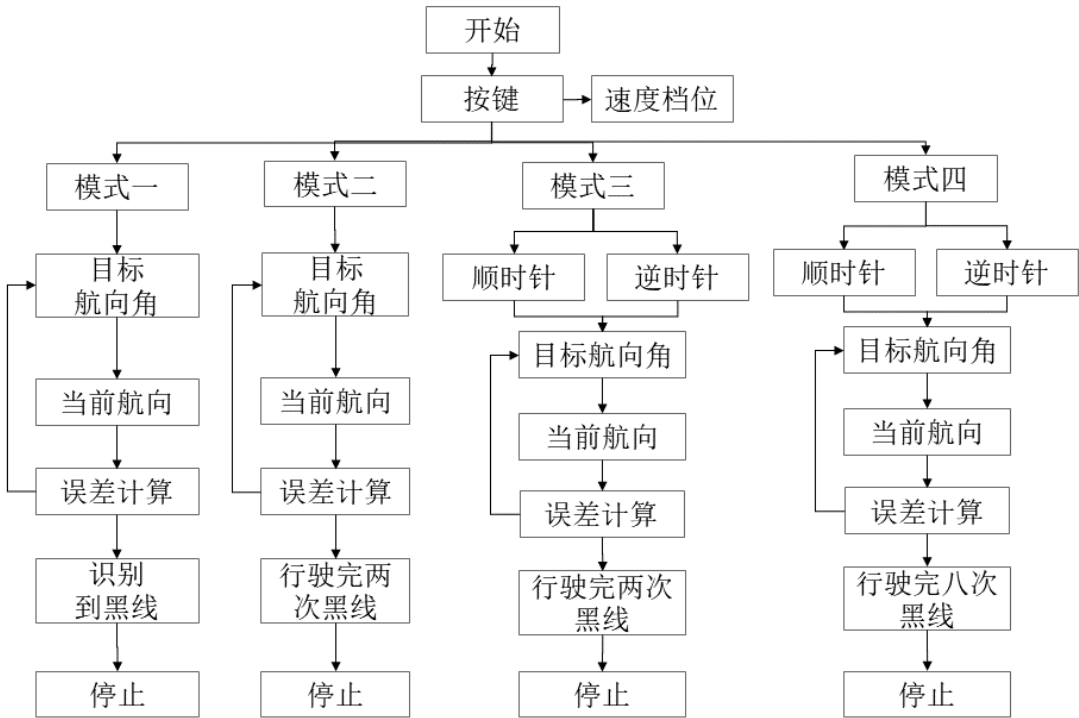


图 5 程序流程图



## 5 测试方案与测试结果

### 5.1 测试方案

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。分模块测试完毕后搭建小车，然后将小车在实验室自主搭建按照题目所给出的赛道对每次按键功能分别进行测试，验证小车是否实现赛题要求。

### 5.2 测试结果

（1）模式一下，小车自动行驶时的性能指标如表 1 所示（1 表示每经过一个点，LED 灯和蜂鸣器响应；反之不响应）。

表 1 模式一测试指标

测试次数	测试时间(s)	LED 灯状态	蜂鸣器状态
1	2.76	1	1
2	2.58	1	1
3	2.60	1	1

（2）模式二下，小车自动行驶时的性能指标如表 2 所示（1 表示每经过一个点，LED 灯和蜂鸣器响应；反之不响应）。

表 2 模式二测试指标

测试次数	测试时间(s)	LED 灯状态	蜂鸣器状态
1	13.56	1111	1111
2	13.95	1111	1111
3	14.25	1111	1111

（3）模式三下，小车自动行驶时的性能指标如表 3 所示（1 表示每经过一个点，LED 灯和蜂鸣器响应；反之不响应）。

表 3 模式三测试指标

测试次数	测试时间(s)	LED 灯状态	蜂鸣器状态
1	13.56	1111	1111
2	13.95	1111	1111
3	14.25	1111	1111

（4）模式四下，小车自动行驶时的性能指标如表 4 所示（1 表示每经过一个点，LED 灯和蜂鸣器响应；反之不响应）。

表 4 模式四测试指标

测试次数	测试时间(s)	LED 灯状态	蜂鸣器状态
1	46.33	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111
2	34.52	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111
3	32.10	1111 1111 1111 1111	1111 1111 1111 1111

### 5.3 测试结果分析

通过多次测试，设计满足题目的要求：

- （1）在 15 秒内，小车可以自动行驶直线段 A→B；
- （2）在 30 秒内，小车可以自动行驶路线 A→B→C→D→A；
- （3）在 40 秒内，小车可以自动行驶路线 A→C→B→D→A，行驶路线呈“∞”形；
- （4）小车可自动行驶（3）题中“∞”形路线四圈。

## 6 结论

在十二路灰度传感器、陀螺仪 IMU660RA 等模块的联合作用下，最终自动行驶小车完全达到了题目要求的全部各项性能指标，性能稳定、动作流畅，未来我们将继续深入探索小车领域以加强对此的了解。

## 参考文献

[1] 全国大学生电子设计竞赛组委会.2011 年全国大学生电子设计竞赛获奖作品选编[M].北京：北京理工大学出版社，2012

[2] 刘彩虹.智能小车跟踪技术的研究。浙江大学硕士论文，2007.6

[3] 碰新荣.基于智能小车多平台的多车协作研究.上海交通大学硕士论文，2010.2

[4] 胡寿松.自动控制原理[M].6 版.北京：科学出版社，2013

[5] 张友德，赵志英，涂时亮.单片机微型机原理，应用与实践[M].5 版.上海:复旦大学出版社，2009

## 附录1 MSPM0G3507 核心板原理图

附录2 LM2596 原理图

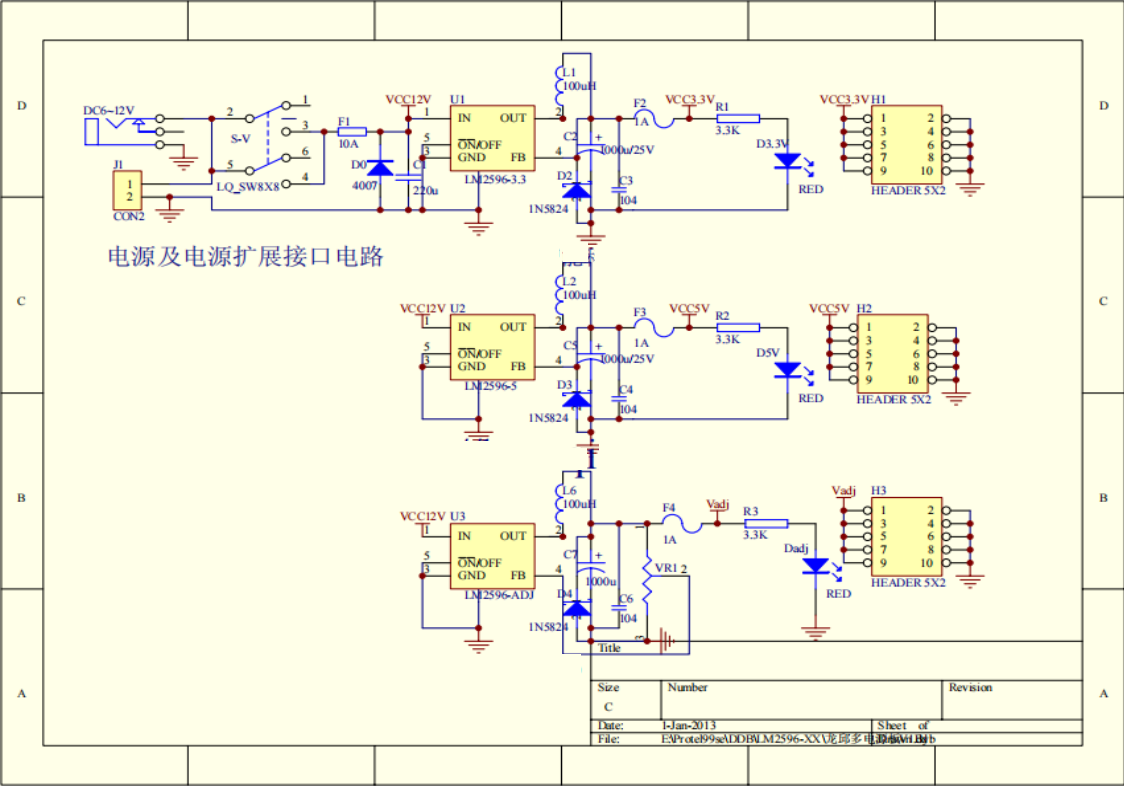


图 7 稳压模块原理图

附录3 TB6612FNG 原理图

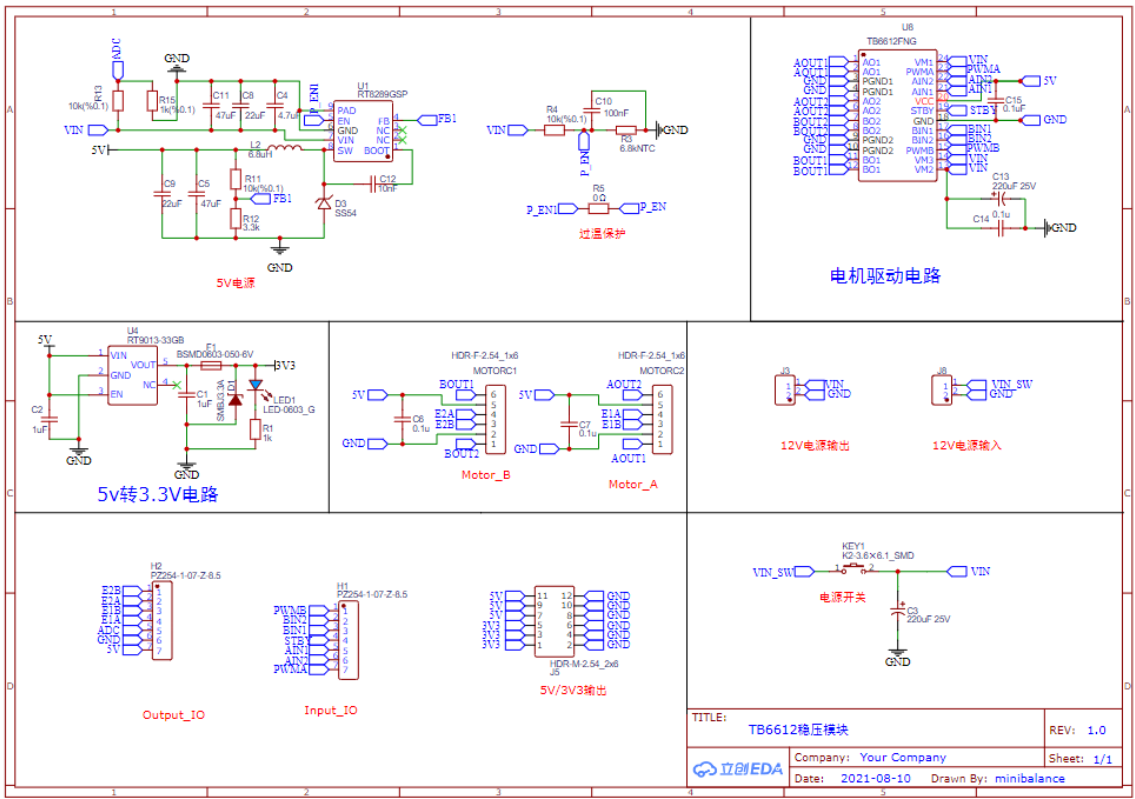


图 8 驱动模块原理图