



山东科技大学

《集成电路工程实训》

报告

题目： 基于 FPGA 的智能小车
学院： 电子信息工程学院
专业： 集成电路设计与集成系统
年级： 2023 级 1 班
姓名： 张*
学号： 2023111111**
指导教师： 陈宽

2025 年 7 月 11 日

目录

1. 绪论	错误! 未定义书签。
2. 需求分析	3
3. 概要设计	6
4. 详细设计	9
5. 总结	12
参考文献	14

《集成电路工程实训报告》

——项目名称：基于 FPGA 的智能小车设计与实现（循迹、避障、蓝牙遥控功能分模块实现）

1. 绪论

集成电路技术的发展推动了嵌入式系统向高实时性、高集成度方向演进，FPGA 作为可编程逻辑器件，凭借并行处理能力和硬件可重构特性，成为智能小车等实时控制系统的理想核心。本次实训基于 ZYNQ ECO 开发板，分别实现循迹、避障、蓝牙遥控三大功能，通过模块化设计与独立调试，掌握 FPGA 与传感器、电机驱动、无线通信模块的接口开发逻辑，理解集成电路应用系统的分层实现思想。

三大功能的独立实现具有明确的技术逻辑：循迹依赖红外传感器识别地面轨迹，避障通过测距传感器保障行驶安全，蓝牙遥控实现人机交互，三者共同构建智能小车的基础能力，为后续系统集成奠定基础。

2. 需求分析

2.1 功能需求（分模块定义）

（1）循迹功能

核心指标：采用红外循迹模块（TCRT5000），检测反射距离 $1\text{mm}\sim 25\text{mm}$ ，可识别地面宽度 $\geq 10\text{mm}$ 的黑色轨迹（背景为白色）；

控制要求：沿轨迹行驶时偏离修正响应时间 $\leq 100\text{ms}$ 。

（2）避障功能

探测范围：覆盖前方 $0.2\sim 2\text{m}$ 障碍物，检测精度 $\leq 5\text{cm}$ ；

响应机制：距离 $\leq 30\text{cm}$ 时触发停车，障碍物移除后自动恢复行驶。

（3）蓝牙遥控功能

通信参数：采用 JDY-31 蓝牙模块，工作频段 2.4GHz ，传输距离 ≤ 30 米，波特率默认 9600bps ；

指令集：支持前进、后退、左转、右转、停止 5 类基础指令，指令响应延迟 $\leq 100\text{ms}$ ；

配置要求：可通过 AT 指令修改设备名（默认“JDY-31-SPP”，为区别其他设备，重命名为 UNEASY）、配对密码（默认 1234，为避免他人错连，将密码修改为 1314）。

2.2 性能需求

硬件稳定性：各功能模块正常运行、无故障，FPGA 工作温度范围 $-40^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ ；

电源适配：红外模块与蓝牙模块工作电压 3.3V ，电机驱动模块支持 5V 供电。

2.3 约束条件

开发平台：ZYNQ ECO 开发板，PL 部分 BANK13、34、35 供电电压 3.3V，PS 部分 BANK500 供电 3.3V；

开发工具：Vivado，硬件描述语言 Verilog HDL；

3. 概要设计

3.1 系统架构（分功能模块）

(1) 循迹模块架构

[红外传感器阵列] → [FPGA 信号处理模块] → [电机驱动子模块]
(轨迹识别/偏差判断) (PWM 调速/方向修正)

(2) 避障模块架构

[超声波传感器] → [FPGA 测距模块] → [执行控制模块]
(HC-SR04) (时间测量/距离计算) (停车/报警逻辑)

(3) 蓝牙遥控模块架构

[上位机] → [JDY-31 蓝牙模块] → [FPGA 串口解析模块] → [电机驱动子模块]

(手机) (无线数据透传) (指令识别/映射) (动作执行)

3.2 模块接口定义

(1) 循迹模块

红外传感器引脚：VCC (3.3V)、GND、DO (数字输出)，DO 引脚连接 FPGA BANK34 的 GPIO $\diamond 1-5$ $\diamond 1-6$ $\diamond 1-7$ ；

FPGA 输出：控制电机转向的 PWM 信号，连接至电机驱动模块 ENA/ENB。

(2) 避障模块

超声波传感器引脚：VCC (5V)、GND、Trig (触发)、Echo (回波)，Trig/Echo 连接 FPGA BANK35 的 GPIO $\diamond 5-104$ ；

报警输出：蜂鸣器控制信号 (连接 FPGA BANK34 的 GPIO)。

(3) 蓝牙遥控模块

蓝牙模块引脚：VCC (3.3V)、GND、TXD (串口输出)、RXD (串口输入)，TXD/RXD 交叉连接至 FPGA PS 部分 UART 引脚 (BANK501) $\diamond 2-5$ $\diamond 3-7$ $\diamond 3-8$ $\diamond 5-68$ ；

控制信号：电机方向控制信号 (IN1~IN4) 连接 FPGA BANK35 的 GPIO $\diamond 4-3$ 。

4. 详细设计

4.1 硬件设计（分功能实现）

（1）电机驱动模块

我们组采用 L298N 电机驱动模块，将左侧两个电机绑定在一起，右边两个电机绑定在一起，然后用 IN1, IN2, IN3, IN4 控制轮子的正转反转和停止，ENA, ENB 来通过调整 PWM 的占空比来调整电机驱动的速度。

（2）循迹模块硬件

传感器布局：4 路 TCRT5000 平行安装于车底，间距 1cm，距离地面高度 $\leq 5\text{mm}$ （避免误判）；

电路连接：D0 引脚通过 $10\text{k}\Omega$ 上拉电阻接 3.3V，输出信号接入 FPGA BANK34 的 PL_I03~PL_I06 $\diamond 1-15$ 。

（3）避障模块硬件

传感器安装：HC-SR04 固定于车头中央，Trig 引脚接 FPGA BANK35 的 IO_L16P_T2_35 (G17)，Echo 引脚接 IO_L16N_T2_35 (G18) $\diamond 5-104 \diamond 6-25 \diamond$ ；

测距逻辑：Trig 输出 $10\mu\text{s}$ 高电平触发测距，Echo 高电平持续时间对应往返距离。

（4）蓝牙遥控模块硬件

模块配置：通过 AT 指令设置 JDY-31 为从机模式，广播名 “UNEASY”，波特率 9600bps（参数 4） $\diamond 2-7 \diamond 2-8 \diamond$ ；

接口电平：蓝牙模块 TXD/RXD（3.3V TTL）直接连接 FPGA UART_RX/TX（BANK501，1.8V 供电，通过电平转换芯片匹配） $\diamond 3-7 \diamond 5-66 \diamond 5-67 \diamond$ 。

4.2 逻辑设计（分功能代码要点）

（1）循迹功能循迹（xunji 模块）

该模块通过两个红外传感器（ddoo[1:0]）实现黑线循迹功能，根据传感器检测结果输出对应的运动模式：

```
case (ddoo)
2'b00: mode <= 5'd1; // 左右均未检测到黑线 → 直行
2'b10: mode <= 5'd3; // 左侧检测到黑线 → 左转
2'b01: mode <= 5'd4; // 右侧检测到黑线 → 右转
2'b11: mode <= 5'd0; // 左右均检测到黑线 → 停止
default: mode <= 5'd0; // 默认停止
endcase
```

（2）电机控制逻辑（Four_Wheel_Control 模块）

该模块根据运动模式（mode）和 PWM 占空比（pwm）控制四个电机的转速和方向：

```
case (mode)
5'd0: {left_dir, right_dir} <= 2'b00; // 停止
5'd1: {left_dir, right_dir} <= 2'b10; // 右转（左正转，右反转）
```

```

5'd2: {left_dir, right_dir} <= 2'b01; // 左转（左反转，右正转）
5'd3: {left_dir, right_dir} <= 2'b00; // 后退（左右均反转）
5'd4: {left_dir, right_dir} <= 2'b11; // 前进（左右均正转）
default: {left_dir, right_dir} <= 2'b00;
endcase

```

（3）超声波测距逻辑（ultrasonic 模块）

该模块通过超声波传感器测量前方障碍物距离，采用四状态机实现：

```

localparam IDLE = 0; // 空闲状态
localparam TRIGGER = 1; // 发送触发脉冲
localparam WAIT_ECHO = 2; // 等待回波信号
localparam MEASURE = 3; // 测量回波时间

```

（4）避障功能逻辑（obstacle_avoidance 模块）

该模块根据超声波测量的距离（distance）输出避障决策：

```

if (distance < WARNING_DISTANCE) begin
mode <= 5'd0; // 紧急停止
pwm <= 8'd0;
end
else if (distance < SAFE_DISTANCE) begin
mode <= 5'd4; // 右转避障
pwm <= TURN_SPEED;
end
else begin
mode <= 5'd1; // 正常前进
pwm <= FULL_SPEED;
end

```

（5）蜂鸣器播放指定乐曲功能

三个模块均实现“蜂鸣器播放指定乐曲”的功能，输入系统时钟（50MHz）、复位信号和播放使能信号，输出蜂鸣器驱动信号。整体逻辑围绕“如何让蜂鸣器按正确的音高和节奏发声”展开，具体通过以下机制实现：

①音高控制：通过 PWM 信号生成不同频率的方波，驱动蜂鸣器发出对应音符（如 C4、D4 等）。

②节奏控制：按预设的节拍时长切换音符，保证乐曲的节奏正确性。

③播放控制：通过 play_en 信号控制播放 / 暂停 / 静音，支持乐曲循环播放。

（6）蓝牙控制

①UART 接收模块（uart_rx）：该模块实现了 UART 异步串行数据的接收功能

```

// 数据位计数
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
if(!rst_n)
cnt1 <= 0;
else if(add_cnt1) begin
if(end_cnt1)
cnt1 <= 0;

```

```

else
cnt1 <= cnt1 + 1'b1;
end
end
assign add_cnt1 = end_cnt0;
// 接收完成标志（停止位周期结束时）
assign end_cnt1 = (cnt1 == (10-1)) && (cnt0 == (BPS_CNT-1));
// 数据采样（位周期中间）
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
if(!rst_n)
data <= 8'd0;
else if((cnt1>=1)&&(cnt1<=8)&&(cnt0==BPS_CNT/2-1))
data[cnt1-1] <= rx2;
end
// 输出数据
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
if(!rst_n)
dout <= 0;
else if(end_cnt1)
dout <= data;
end

```

② UART 发送模块 (uart_tx): 该模块实现了 UART 异步串行数据的发送功能

```

// 数据位计数（10 位：1 起始+8 数据+1 停止）
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
if(!rst_n)
cnt1 <= 0;
else if(add_cnt1) begin
if(end_cnt1)
cnt1 <= 0;
else
cnt1 <= cnt1 + 1'b1;
end
end
// 发送数据帧：1 位停止位 + 8 位数据 + 1 位起始位
assign data = {1'b1, din_tmp, 1'b0};
// 串行数据输出
always @(posedge clk or negedge rst_n) begin
if(!rst_n)
dout <= 1'b1; // 空闲状态为高电平
else if(flag)
dout <= data[cnt1]; // 按位发送数据
else
dout <= 1'b1; // 非发送状态保持高电平

```

end

③顶层模块 (uart_top): 该模块将接收和发送模块集成, 实现基本的 UART 通信功能

```
// 实例化接收模块
uart_rx u1(
    .clk(clk),
    .rst_n(rst_n),
    .din(uart_rx),
    .dout(rx_data),
    .dout_vld(rx_vld)
);
uart_tx u2(
    .clk(clk),
    .rst_n(rst_n),
    .din(tx_data),
    .din_vld(tx_vld),
    .dout(uart_tx)
);
```

5. 总结

5.1 功能实现成果

循迹模块: 成功识别 10mm 黑线, 偏离修正响应时间 $\leq 80\text{ms}$, 满足 1mm~25mm 检测距离要求;

避障模块: 实现 0.2~2m 测距, 距离 $\leq 30\text{cm}$ 时稳定停车, 响应延迟 $\leq 50\text{ms}$;

蓝牙遥控模块: 完成 JDY-31 模块配置, 10 类指令传输成功率 100%, 通信距离达 30 米。可以随意发送输出指令, 在循迹模式下可选择蓝牙控制是否打开避障功能, 并调高了避障功能的 pwm; 在蓝牙控制自由前进过程中蓝牙优先级最高, 重新手动选择循迹时才可以按照原计划循迹 (优先级设置分明); 此外可通过蓝牙选择蜂鸣器播放不同的音乐。

5.2 问题与优化

循迹误判: 强光环境下传感器易受干扰, 通过增加遮光罩和软件滤波解决(参考模块 “调节灵敏度” 特性) $\diamond 1-12$;

蓝牙断连: 通过 AT+DISC 指令强制重连, 优化电源稳定性;

电机抖动: 调整 PWM 频率至 10kHz (电机驱动模块适配频率), 提升转速平稳性。

速度调控: 循迹过程中要求速度不能过快, 否则红外传感器不能很好地识别, 且左右电机转速有差别, 要格外调试分配电压。

5.3 实践收获

掌握 FPGA 与红外、蓝牙、电机驱动模块的接口设计，理解模块化开发思想，为多功能集成积累调试经验。蓝牙模块通过 Uart 通信传输数据，通过发送 HEX 数据轻易遥控小车，同时接收到小车发回的数据。

6. 参考文献

- [1] 3.2 模块_红外循迹. pdf
- [2] jdy-31 蓝牙 spp 串口透传模块. docx
- [3] 3.1 模块_蓝牙操控. pdf
- [4] 3.2 模块_电机驱动. pdf
- [5] 01ZYNQ_ECO 开发板硬件规格说明书. pdf
- [6] ZYNQ_ECO_R5 原理图. pdf