

数字电路与逻辑设计

课程设计报告

课程设计实验部分：实验完成情况、时间 (亮点、完成、部分完成)		总分 (实验部分 70% + 报告 30%)
检查结果		
检查名次		
检查老师		

报 告 人： 洪志远

实验指导教师：

报告批阅教师：

计算机科学与技术学院

2018 年 10 月 10 日

华中科技大学课程设计报告

数字逻辑课程设计学生工作表

班 级	姓 名	学 号	验收时间（教师填写）
CS1607	洪志远	U201613570	

（学生填写）	课设进度记录（学生填写）	
<p>（1）主要工作的描述</p> <p>a. 选题和分析题目要求。分析状态机状态，绘制状态图；分析模块划分，绘制模块图（草图）</p> <p>b. 在实现分频模块的编码时，输出三种频率：1Hz、10Hz、1000Hz，分别用于倒计时器、同步时钟、数码管刷新</p> <p>c. 在实现数码管显示模块时，输入为币值，输出为数码管 SEG、AN。使用分频器输出的 1000Hz 的频率，轮流刷新 8 个数码管。8 个数码管都可显示内容。</p> <p>d. 在实现状态机时，将 3 个状态纳入状态机，分别是是否显示 HELLO、退币指示、取饮料指示。后两者同时和定时器相连，亮 20 个时钟周期（约 2s）后熄灭</p> <p>e. 顶层模块调用上述三个底层模块，并用线网类型的变量将其相连。与相应的引脚绑定。</p> <p>（2）难点、亮点</p> <p>a. 由于是转专业学生，之前只用过 ISE，对 Vivado 很不熟练。</p> <p>b. 状态机中修改状态经常遇到 Multi-Driver 的错误；显示模块有字母、数字、带小数点的数字，较为复杂；状态机的设计较难。在设计中考虑了拓展性和亮点。</p>	日期	进度
	10 月 8 日	确定选题为“自动销售机控制器设计”
	10 月 8 日	分析题目要求
	10 月 8 日	绘制状态图、流程图
	10 月 8 日	完成分频器和数码管的 HELLO 及其仿真
	10 月 9 日	上午完成数码管数字、小数的显示及其仿真
	10 月 9 日	下午完成币值加法和减法及其仿真
	10 月 9 日	由于增加亮点，修改状态图的细节
	10 月 9 日	完成状态机及其仿真
	10 月 9 日	模块组装，完成设计
	<p>实验平台故障记录（学生填写，请注明实验平台的编号</p>	

华中科技大学课程设计报告

c. 亮点:

1. 退币独立显示
2. RGB 灯表示可否购买某饮料
3. 可连续购买
4. 关机自动退币
5. 退币时仍可投币，系统继续进入等待购买状态
6. 购物出货时仍可投币

华中科技大学课程设计报告

重要说明

1、时间安排：课内 2 周。

2、验收准备：

- 1) 完成本表学生应该填写部分；
- 2) 每位学生必须都能以**独自完成的方式**应对任何形式的验收；
- 3) 完成课程设计报告书（**格式参见模板**）；
- 4) 将源程序和报告的电子文档交班长。

3、检查过程：

- 1) 提交验收准备材料，请求老师验收，之后按验收老师的要求做；
- 2) 在开发平台上根据验收老师的要求进行演示；
- 3) 检查过程中独立回答老师提出的相关问题；
- 4) 验收老师有权根据具体情况调整验收的内容与方式；
- 5) 验收完成后关闭电源，整理好设备。

4、评分标准：

- 1) 在完成控制器基本要求外，有**亮点**为加分项；
- 2) 在规定时间内完成控制器基本要求；
- 3) 在规定时间内完成控制器**部分**基本要求；
- 4) 检查时间。

5、课程设计判定为不合格的一些情形：（本人已阅读此条款 1-5 项：签名_____）

- 1) 请人代做或冒名顶替者；
- 2) 替人做且不听劝告者；
- 3) 课程设计报告内容抄袭或雷同者；
- 4) 课程设计报告内容与实际实验内容不一致者；
- 5) 课程设计代码抄袭者。

华中科技大学课程设计报告

目 录

1	综合实验设计概述.....	6
1.1	实验目的.....	6
1.2	实验要求.....	6
1.3	实验任务.....	6
1.4	实验环境.....	7
2	自动销售机控制器设计方案.....	8
2.1	内容.....	8
2.2	设计思路.....	8
2.2.1	顶层模块设计.....	11
2.2.2	显示模块设计.....	11
2.2.3	状态机模块设计.....	11
2.2.4	分频器模块设计.....	11
2.3	代码实现.....	12
2.4	仿真过程.....	18
2.5	主要问题及解决方法.....	26
2.6	功能测试.....	27
3	总结与心得.....	35
3.1	课设总结.....	35
3.2	课设心得.....	35
4	参考文献.....	36
	附录 1 课程设计报告的格式要求补充说明.....	错误!未定义书签。

1. 综合实验设计概述

1.1 实验目的

- (1) 掌握 Vivado 软件的使用方法;
- (2) 熟悉 FPGA 器件的使用方法;
- (3) 用 Verilog HDL 进行较复杂逻辑电路的设计和调试;
- (4) 学习数字系统的设计方法;
- (5) 通过规范化的实验报告, 培养学生良好的文档习惯以及撰写规范文档的能力。

1.2 实验要求

- (1) 能够全面地应用课程中所学的基本理论和基本方法, 完成从设计逻辑电路到设计简单数字系统的过渡;
- (2) 能力独立思考、独立查阅资料, 独立设计规定的系统;
- (3) 能够独立地完成实施过程, 包括电路设计、调试、排除故障、仿真和下载验证。

1.3 实验任务

本次课程设计每人要完成一个设计任务, 具体参见数字逻辑课程综合实验设计题目。

- (1) 制定出详细设计方案, 认真记载毕业设计工作日记;
- (2) 通过 Verilog HDL 完成规定的设计任务, 采取模块化、层次化的设计方法设计电路, 然后进行编译和仿真, 认真记录实施过程中遇到的各自故障以及解决方法, 保证设计的正确性;
- (3) 生成 bit 文件, 下载到开发板上, 通过实际线路进行验证设计的正确性;
- (4) 撰写设计报告, 并对存在的问题进行分析、提出改进意见。

华中科技大学课程设计报告

1.4 实验环境

开发环境为 Vivado 2015.2 软件和开发板 NEXYS 4（芯片为 XC7A100TCSG324-1，封装为 CSG3242）。Vivado 2015.2 是使用 Xilinx FPGA 必备的设计工具。它可以完成 FPGA 开发的全部流程，包括设计输入、仿真、综合、布局布线、生成 bit 文件、配置以及在线调试等功能。

Nexys4 开发板简介：参见图 1-1 所示，它是一款简单易用的数字电路开发平台，可以支持在课堂环境中来设计一些行业应用。大规模、高容量的 FPGA，海量的外部存储，各种 USB、以太网、以及其它接口、这些让 Nexys4-DDR 能够满足从入门级组合逻辑电路到强大的嵌入式系统的设计。同时，板上集成的加速度、温度传感器，MEMs 数字麦克风，扬声器放大器以及人量的 I/O 设备，让 Vexys4-DDR 不需要增添额外组件而用于各种各样的设计。

注意：开发板提供的时钟信号频率为 100Mhz，对应的引脚封装编号为“E3”。

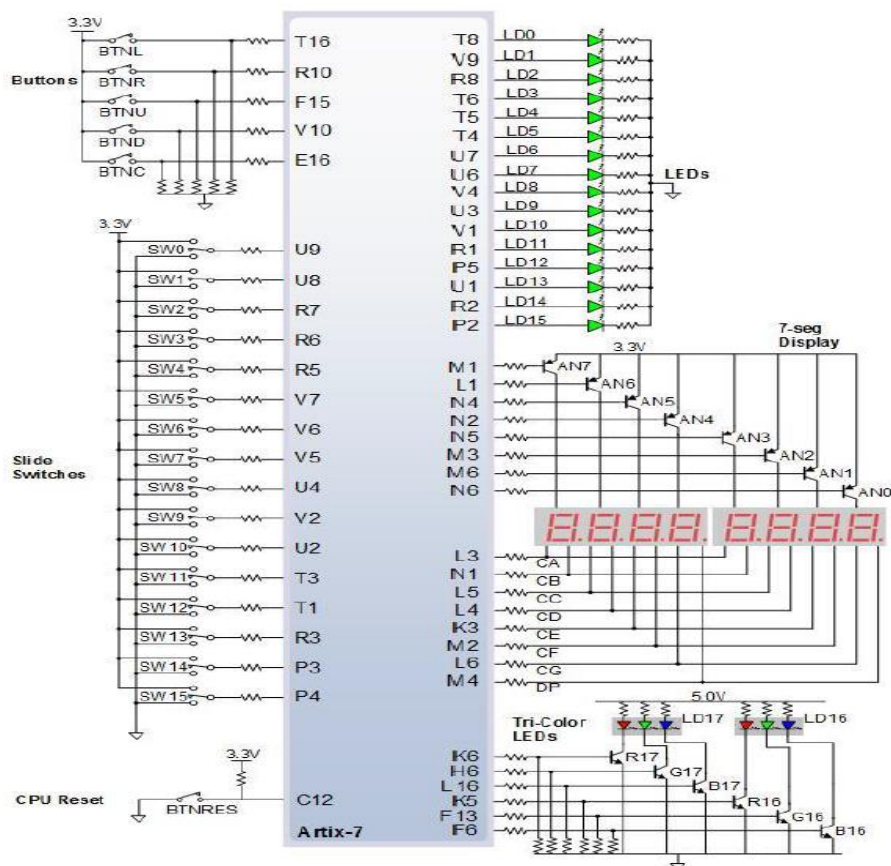


图 1-1 Nexys4 通用 I / O 设备

2. 自动销售机控制器设计方案

2.1 内容

2.1.1 基本内容

(1) 采用 FSM 设计并利用 Nexys4 开发板实现一个饮料自动售货机，它具有下述功能：

- a. 自动销售机销售两类商品，一类售价 2.5 元，另一类售价 5 元，该贩卖机只能辨识 1 元，10 元两种人民币；最多投入 99 元人民币，售货机最多显示 99.5 元人民币。
- b. 销售机处于售卖状态时显示“Hello”状态，当投入 1 元时，机器会进入余额不足的状态，相应的饮料指示灯为红色，直到投入的金额大于 2.5 元为止，此时相应的饮料指示灯为绿色。如果一次投入 10 元，则可以选择所有的产品，所有的饮料指示灯都为绿色，否则就只能选择 2.5 元的产品；
- c. 完成选择后，将会卖出商品并且找回剩余的零钱，随后（约），机器又将返回售卖状态。

(2) 根据功能描述画出系统结构框图如下：

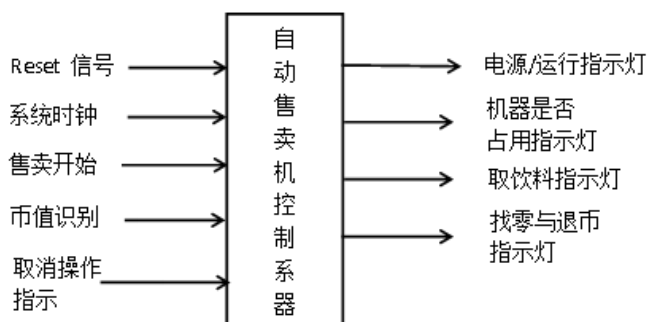


图 2-1 系统结构图

2.1.2 拓展功能

- (1) **可以连续购买：**用户在投币数量到达某饮料的价格时即可购买，用户需要主动点击退币或者取消按钮才能退币
- (2) **关机自动退币：**点击关机时，会自动退出已经投入的钱币
- (3) **退币金额独立显示：**退币金额显示在左边 4 个数码管上，同时剩余金额置零

华中科技大学课程设计报告

2.2 设计思路

本设计要求顶层采用原理图设计，各底层均采用 Verilog HDL 设计，其模块图参见图 2-1 所示。自动售货机的电源开关 Power 作为总开关，当按下 Power 时，切换开关机状态。当重新开机时，会 Reset 整个系统的所有状态，进入 hello 界面。

(1) 顶层模块的输入：

- a. clk 为硬件时钟，Nexys4 开发板上是 100Mhz。
- b. coin_type 为 switch 控制的比值识别输入，当该值为 0 时为 1 元，当该值为 1 时为 10 元。
- c. drink_1、drink_2 分别为 2.5 元饮料和 5 元饮料的购买按钮。在金额足够的情况下按下该按钮即立刻购买相应的饮料。
- d. insert_coin 为投币脉冲，每投一次币，便会有一个上升沿。
- e. power 为电源键，电源键可以开关整个设备。当存在余额时投币，即会自动退出金额。
- f. cancel 取消操作，当用户投币后不再希望继续购物，按此按钮可以退出余额。退币时左边四个数码管显示退币金额（例如：15.50），右边显示当前余额，固定为 0.00。

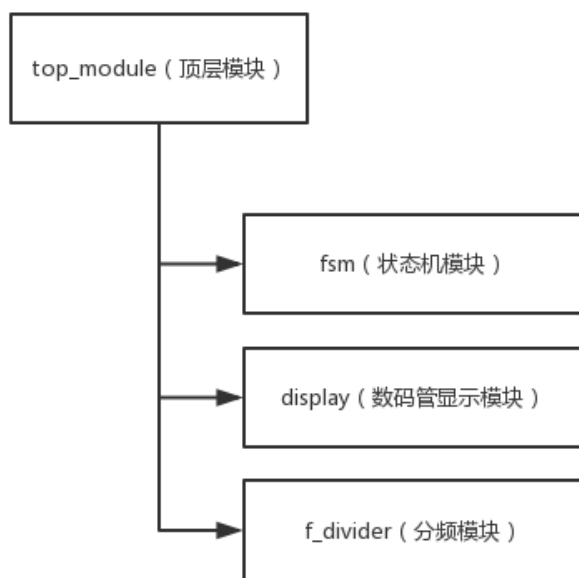


图 2-1 自动销售机控制器的模块图

(2) 顶层输出：

华中科技大学课程设计报告

- a. drink_1_red、drink_2_red、drink_1_green、drink_2_green 分别驱动 RGB1、RGB2 用于显示是否可以购买相应的饮料：红色代表不能购买，绿色代表可以购买。
- b. error 为错误指示灯，当余额不足而尝试购买时，此输出驱动的 LED 灯会亮起。
- c. power_led 为电源指示灯，当系统处于开机状态时，此灯亮起。
- d. in_use 为占用指示灯，此灯亮起时机器被占用。
- e. take_drink、take_momey 为取饮料和取币指示灯，当饮料或余额被退出，此灯亮 3s 左右，之后熄灭。用于提示用户及时取走饮料和钱币。
- f. AN 和 SEG 控制数码管的显示。

(3) FSM 的状态图：

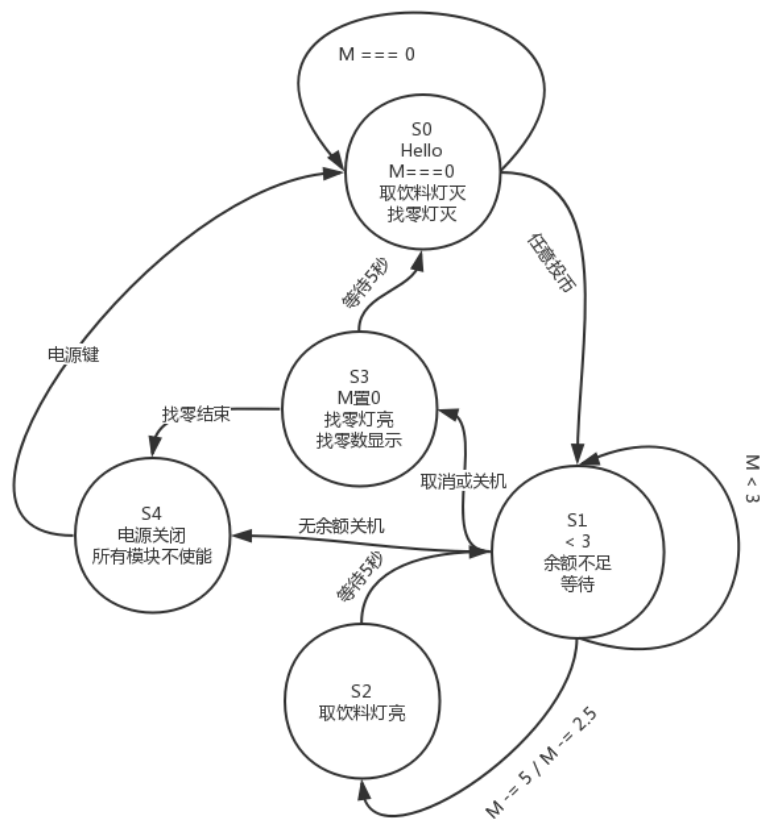


图 2-2 FSM 状态机状态转移图

华中科技大学课程设计报告

在上述状态图中，存在 5 种状态：S0 待机状态，S1 等待操作状态，S2 取饮料状态，S3 找零状态，S4 关机状态。

状态的流转由按钮控制和余额的数量控制。

2.2.1 顶层模块设计

顶层模块使用线网类型的变量用于连接各个底层模块。同时将底层模块的输出进行逻辑运算得到控制各个引脚的输出。

具体地，顶层模块（top_module）实例化底层模块 f_divider、display、FSM，并将 f_divider 的三个时钟分别用线网型变量连接到 display、FSM。

2.2.2 分频模块设计

分频模块的作用是将系统硬件时钟分频得到频率较低的三种频率：1. 倒计时 1Hz 的频率。2. 用于同步按钮监测和防抖的时钟 100Hz。3. 用于驱动数码管显示的时钟 1000Hz。

2.2.3 显示模块设计

显示模块有三种状态：

- (1) “HELLO” 显示模块
- (2) 正常余额显示
- (3) 特殊余额显示，即带有退款金额的显示

这三种状态由模块的 input 控制。

除此之外，display 模块接受来自分频模块的 clk_display 时钟信号，同时维护 [3:0]scan_count 变量作为当前显示位，译码为 AN 的值，以低电平有效的方式，控制当前需要显示的数码管灯。

2.2.4 状态机模块设计

由图 2-3 可知，该系统有 5 种状态。使用一个 [2:0]state 变量作为状态标志。

该模块可接受各个按键的值，在同步时钟的上升沿，判断哪个键被按下（带有按键防抖）。根据按下的按键，修改 state 的值，以此控制状态流转。余额、退款金额的计算在该同步时钟驱动的 always@ 块内。

同时，该模块内部集成了倒计时控制器，同样为同步时钟控制。维护一个计数器，当该计数

华中科技大学课程设计报告

器的值达到某值时（即计时结束），进行状态流转。

2.3 代码实现

顶层模块首先要设计系统的原理图，然后用 Verilog HDL 实现它，底层各模块均采用 Verilog HDL 语言设计。

自动售货机控制器顶层原理图，参见图 2-4 所示。

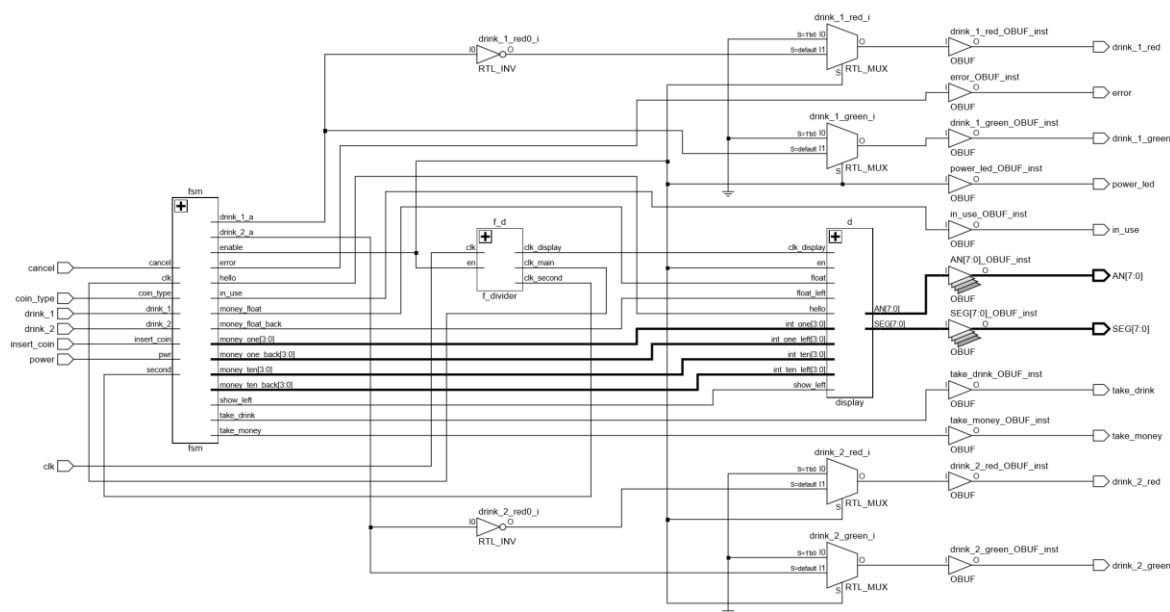


图 2-3 自动售货机控制器顶层原理图

(1) 自动售货机控制器顶层模块（例如：main 用于整合整个系统）

程序 2-1：自动售货机控制器顶层模块 Verilog 代码

```
`timescale 1ns / 1ps
module top_module(
    input power,
    input coin_type,
    input insert_coin,
    input drink_1,
    input drink_2,
    input cancel,
    input clk,
    output reg power_led,
    output error,
    output take_drink,
```

华中科技大学课程设计报告

```
output take_money,
output in_use,
output reg drink_2_green, // drink 2 可购买
output reg drink_2_red, // drink 2 不可购买
output reg drink_1_green, // drink 1 可购买
output reg drink_1_red, // drink 1 不可购买
output [7:0] AN,
output [7:0] SEG
);
wire second_clk;
wire display_clk;
wire main_clk;
wire hello;
wire [3:0] money_ten;
wire [3:0] money_one;
wire money_float;
wire show_left;
wire [3:0] money_ten_back;
wire [3:0] money_one_back;
wire money_float_back;
wire drink_2_a;
wire drink_1_a;
wire enable;
fsm fsm(
    power,
    main_clk,
    second_clk,
    coin_type,
    insert_coin,
    drink_1,
    drink_2,
    cancel,
    enable,
    take_drink,
    take_money,
    in_use,
    error,
    drink_2_a,
    drink_1_a,
    hello,
    money_ten,
    money_one,
    money_float,
    show_left,
    money_ten_back,
    money_one_back,
    money_float_back
);
f_divider f_d(
    enable,
    clk,
    display_clk,
    second_clk,
    main_clk
);
display d(
    enable,
    hello,
    money_ten,
```

华中科技大学课程设计报告

```
        money_one,
        money_float,
        show_left,
        money_ten_back,
        money_one_back,
        money_float_back,
        display_clk,
        AN,
        SEG
    );
    always @(drink_1_a) begin
        drink_1_green = drink_1_a;
        drink_1_red = ~drink_1_a;
        if (!enable) begin
            drink_1_green = 0;
            drink_1_red = 0;
        end
    end
    always @(drink_2_a) begin
        drink_2_green = drink_2_a;
        drink_2_red = ~drink_2_a;
        if (!enable) begin
            drink_2_green = 0;
            drink_2_red = 0;
        end
    end
    always @(enable)
        power_led = enable;
endmodule
```

(2) 自动售货机控制器底层模块 Verilog 代码

程序 2-2: 自动售货机控制器底层模块 Verilog 代码

```
`timescale 1ns / 1ps
module fsm(
    input pwr,
    input clk,
    input second,
    input coin_type,
    input insert_coin,
    input drink_1,
    input drink_2,
    input cancel,
    output reg enable = 1,
    output reg take_drink = 0,
    output reg take_money = 0,
    output reg in_use = 0,
    output reg error = 0,
    output reg drink_2_a = 0,
    output reg drink_1_a = 0,
    output reg hello = 1,
    output reg [3:0]money_ten = 0,
    output reg [3:0]money_one = 0,
    output reg money_float = 0,
    output reg show_left = 0,
```

华中科技大学课程设计报告

```
output reg [3:0]money_ten_back = 0,
output reg [3:0]money_one_back = 0,
output reg money_float_back = 0
);
reg [2:0]state = 4;
reg [5:0]time_to_show_money = 6'b111111;
reg [5:0]time_to_show_drink = 6'b111111;
reg power_on = 0;
reg [3:0]throttle_reg = 12;
always @(state) begin
    case (state)
        0: begin
            hello = 1;
            enable = 1;
            show_left = 0;
            take_drink = 0;
            take_money = 0;
        end
        1: begin
            hello = 0;
            enable = 1;
            show_left = 0;
            take_drink = 0;
            take_money = 0;
        end
        2: begin
            hello = 0;
            enable = 1;
            take_drink = 1;
            show_left = 0;
            take_money = 0;
        end
        3: begin
            hello = 0;
            enable = 1;
            show_left = 1;
            take_money = 1;
            take_drink = 0;
        end
        4: begin
            enable = 0;
            hello = 0;
            show_left = 0;
            take_money = 0;
            take_drink = 0;
        end
    endcase
end
always @(posedge clk) begin
    error = 0;
    if (state == 3) begin
        time_to_show_money = time_to_show_money - 1;
```

华中科技大学课程设计报告

```
if (time_to_show_money == 0) begin
    if (money_ten != 0 || money_one != 0 || money_float != 0)
        state = 1;
    else begin
        if (power_on)
            state = 0;
        else
            state = 4;
        end
    end
    time_to_show_money = 63;
end
end
if (state == 2) begin
    time_to_show_drink = time_to_show_drink - 1;
    if (time_to_show_drink == 0) begin
        if (money_ten != 0 || money_one != 0 || money_float != 0)
            state = 1;
        else
            state = 0;
        end
    end
    time_to_show_drink = 63;
end
end
if (insert_coin && power_on && throttle_reg == 0) begin
    if (state != 3 && state != 2)
        state = 1;
    if (money_ten == 9 && money_one == 9) begin
        // retrun;
    end else begin
        if (coin_type == 0) begin
            if (money_one == 9) begin
                money_one = 0;
                money_ten = money_ten + 1;
            end else begin
                money_one = money_one + 1;
            end
        end else begin
            if (money_ten != 9)
                money_ten = money_ten + 1;
        end
    end
end
throttle_reg = 12;
end else if (cancel && power_on && throttle_reg == 0) begin
    if (state == 1) begin
        state = 3;
        money_ten_back = money_ten;
        money_one_back = money_one;
        money_float_back = money_float;
        money_ten = 0;
        money_one = 0;
        money_float = 0;
    end
    throttle_reg = 12;
end
```

华中科技大学课程设计报告

```
end else if (drink_1 && power_on && throttle_reg == 0) begin
    if (money_one >= 3) begin
        if (money_float) begin
            money_float = 0;
            money_one = money_one - 2;
        end else begin
            money_float = 1;
            money_one = money_one - 3;
        end
        state = 2;
    end else if (money_one == 2 && money_float == 1) begin
        money_one = 0;
        money_float = 0;
        state = 2;
    end else if (money_ten >= 1) begin
        money_ten = money_ten - 1;
        if (money_float) begin
            money_one = money_one + 10 - 2;
            money_float = 0;
        end else begin
            money_one = money_one + 10 - 3;
            money_float = 1;
        end
        state = 2;
    end else
        error = 1;
        throttle_reg = 12;
    end else if (drink_2 && power_on && throttle_reg == 0) begin
        if (money_one >= 5) begin
            money_one = money_one - 5;
            state = 2;
        end else if (money_ten >= 1) begin
            money_ten = money_ten - 1;
            money_one = money_one + 10 - 5;
            state = 2;
        end else
            error = 1;
            throttle_reg = 12;
    end else if (pwr && throttle_reg == 0) begin
        power_on = ~power_on;
        if (power_on) begin
            if (state == 4)
                state = 0;
        end else begin
            if (money_ten != 0 || money_one != 0 || money_float != 0) begin
                state = 3;
                money_ten_back = money_ten;
                money_one_back = money_one;
                money_float_back = money_float;
                money_ten = 0;
                money_one = 0;
                money_float = 0;
            end
        end
    end
```

华中科技大学课程设计报告

```
        end else begin
            state = 4;
            money_ten = 0;
            money_one = 0;
            money_float = 0;
        end
    end

    throttle_reg = 12;
end
if (throttle_reg > 0) begin
    throttle_reg = throttle_reg - 1;
end
end

always @(money_ten or money_one or money_float) begin
    if (money_ten != 0 || money_one != 0 || money_float != 0)
        if (money_ten > 0 || money_one >= 5) begin
            drink_2_a = 1;
            drink_1_a = 1;
        end else if (money_one >= 3 || (money_one == 2 && money_float == 1)) begin
            drink_1_a = 1;
            drink_2_a = 0;
        end else begin
            drink_2_a = 0;
            drink_1_a = 0;
        end
    end
    else begin
        drink_2_a = 0;
        drink_1_a = 0;
    end
end
always @(hello) begin
    in_use = ~hello;
    if (!enable)
        in_use = 0;
end
endmodule
```

2.4 仿真过程

为了验证设计的正确性，对顶层模块、状态机模块等模块进行了仿真，具体过程如下：

(1) 顶层模块仿真

目的：验证系统的基本功能，例如是否能够正确的将状态机模块的输出值运算并输出、主要逻辑是否正确、LED 灯的显示是否正确等

输入：共 7 个，分别为：power（电源按钮），coin_type（比值类型），insert_coin（投币脉冲），

华中科技大学课程设计报告

drink_1 (买饮料一脉冲), drink_2 (买饮料二脉冲), clk (系统基础时钟);

输出: 共 11 个, 分别为: power_led (电源灯), error (错误), take_drink (取饮料指示灯), take_money (取币指示灯), in_use (占用指示灯), drink_1_green (饮料一可以购买指示灯 green 部分), drink_2_green (饮料二可以购买指示灯 green 部分), drink_1_red (饮料一可以购买指示灯 red 部分), drink_2_red (饮料二可以购买指示灯 red 部分), AN、SEG (数码管输出)

程序 2-3: 顶层模块仿真文件

```
`timescale 1ns / 1ps
module top_module_sim();
    reg clk = 0;
    reg coin_type = 0;
    reg insert_coin = 0;
    reg power = 0;
    reg drink_1 = 0;
    reg drink_2 = 0;
    reg cancel = 0;

    initial begin

        #100 power = 1;
        #100 power = 0; // push power button.

        #2000; // wait, for checking HELLO

        #100 insert_coin = 1;
        #100 insert_coin = 0; // push insert_coin button

        #100 drink_1 = 1;
        #100 drink_1 = 0; // buy drink_1

        #100 drink_2 = 1;
        #100 drink_2 = 0; // by drink_2

        #2000;

        coin_type = 1; // change the coin_type to "10 yuan"

        #100 insert_coin = 1;
        #100 insert_coin = 0; // push insert_coin button

        #100 drink_1 = 1;
        #100 drink_1 = 0; // buy drink_1

        #100 drink_2 = 1;
        #100 drink_2 = 0; // by drink_2
    end
end
```

华中科技大学课程设计报告

```
always #2 clk=~clk;
wire power_led;
wire error_led;
wire take_drink_led;
wire take_money_led;
wire in_use_led;
wire drink_2_green;
wire drink_2_red;
wire drink_1_green;
wire drink_1_red;
wire [7:0]AN;
wire [7:0]SEG;
top_module t_m(
    power,
    coin_type,
    insert_coin,
    drink_1,
    drink_2,
    cancel,
    clk,
    power_led,
    error_led,
    take_drink_led,
    take_money_led,
    in_use_led,
    drink_2_green, // drink 2
    drink_2_red, // drink 2
    drink_1_green, // drink 1
    drink_1_red, // drink 1
    AN,
    SEG
);
endmodule
```

主模块仿真图如图 2-5 所示。

华中科技大学课程设计报告

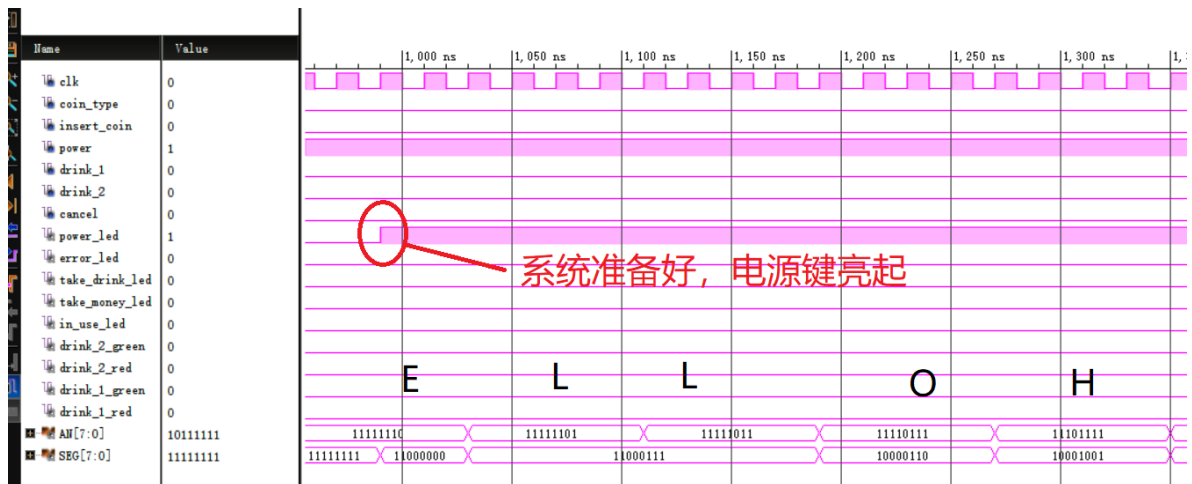


图 2-4 (a) 自动售货机控制器主模块仿真测试图

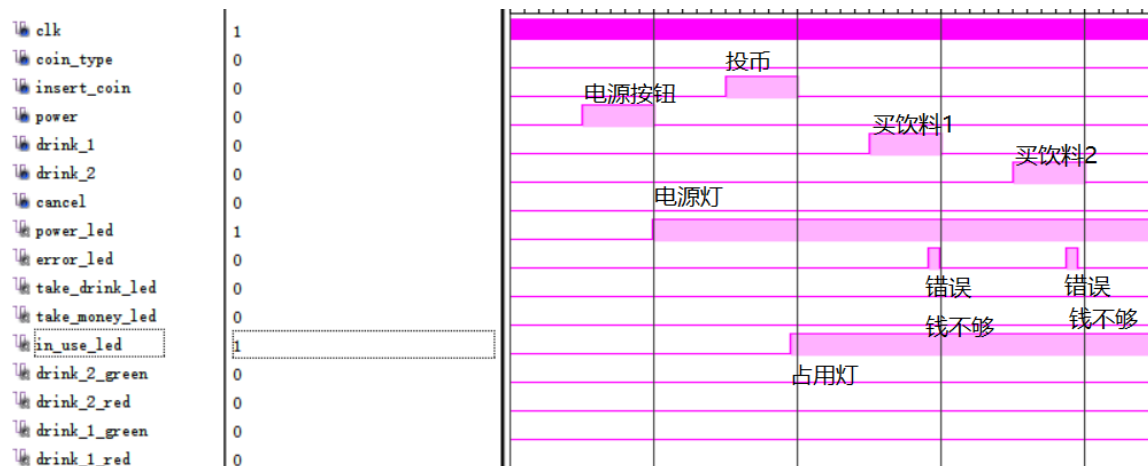


图 2-4 (b) 自动销售机控制器主模块仿真测试图



图 2-4 (c) 自动销售机控制器主模块仿真测试图

华中科技大学课程设计报告

仿真结果说明:

- A. 电源键可以正常工作; HELLO 正常显示
- B. 投币正常; 购买饮料时的错误判断正常; 电源等显示正常; 能否购买某饮料显示正常
- C. 取饮料灯可以显示; 能否购买某饮料显示正常

(2) 自动销售机控制器底层模块仿真

目的: 验证 FSM 状态机的状态流转是否正常; 验证状态机是否正确计算金额; 验证电源键、退币键的功能。

输入: pwr (电源按钮), clk (主同步时钟), second (秒时钟), coin_type (币值类型), insert_coin (投币脉冲), drink_1、drink_2 (购买饮料一、二按钮), cancel (取消按钮)

输出: enable (全局使能), take_drink、take_money (取饮料、取币), in_use (在占用), error (错误), drink_1_a、drink_2_a (drink 1、2 可购买), hello (显示 HELLO), money_ten、money_one、money_float (余额显示: 十位、个位、是否有 0.5), show_left (是否显示退币金额), money_ten_back、money_one_back、money_float_back (退币显示: 十位、个位、是否有 0.5)

程序 2-4: 自动销售机控制器底层模块仿真文件

```
`timescale 1ns / 1ps
module fsm_sim();
    reg pwr = 0;           // power btn
    reg clk = 0;           // system clk
    reg second = 0;        // second clk
    reg coin_type = 0;     // coin_type switch
    reg insert_coin = 0;   // insert_coin btn
    reg drink_1 = 0;       // drink_1 btn
    reg drink_2 = 0;       // drink_2 btn
    reg cancel = 0;        // cancel btn
    wire enable;           // enable all other module: f_divider, display
    wire take_drink;       // drink is ok to take
    wire take_money;       // money is ok to take
    wire in_use;           // this machine is in use
    wire error;            // operation is ERROR
    wire drink_2_a;        // can buy drink 2
    wire drink_1_a;        // can buy drink 1
    wire hello;            // display in hello mode
```

华中科技大学课程设计报告

```
wire [3:0]money_ten;
wire [3:0]money_one;
wire money_float;
wire show_left;
wire [3:0]money_ten_back;
wire [3:0]money_one_back;
wire money_float_back;

initial begin
    #100 pwr = 1;
    #10 pwr = 0;      // push power button.

    #200;

    #100 insert_coin = 1;
    #10 insert_coin = 0; // push insert_coin button, 1 yuan now
    #100 insert_coin = 1;
    #10 insert_coin = 0; // push insert_coin button, 2 yuan now
    #100 insert_coin = 1;
    #10 insert_coin = 0; // push insert_coin button, 3 yuan now

    #100 drink_1 = 1;
    #10 drink_1 = 0;    // buy drink_1, 0.5 yuan now

    coin_type = 1;      // change the coin_type to "10 yuan"

    #100 insert_coin = 1;
    #10 insert_coin = 0; // 10.5 yuan now

    #100 drink_2 = 1;
    #10 drink_2 = 0;    // by drink_2, 5.5 yuan now

    #300;

    #100 cancel = 1;
    #10 cancel = 0;    // push cancel button

    #300;
    #100 insert_coin = 1;
    #10 insert_coin = 0; // 10 yuan now

    #100 pwr = 1;
    #10 pwr = 0;
end
always #1 clk = ~clk;

fsm fsm(
    pwr,      // power btn
    clk,      // system clk
    second,   // second clk
    coin_type, // coin_type switch
    insert_coin, // insert_coin btn
```

华中科技大学课程设计报告

```
drink_1,    // drink_1 btn
drink_2,    // drink_2 btn
cancel,     // cancel btn
enable,     // enable all other module: f_divider, display
take_drink, // drink is ok to take
take_money, // money is ok to take
in_use,     // this machine is in use
error,      // operation is ERROR
drink_2_a,  // can buy drink 2
drink_1_a,  // can buy drink 1
hello,      // display in hello mode
money_ten,
money_one,
money_float,
show_left,
money_ten_back,
money_one_back,
money_float_back
);
endmodule
```

自动销售机控制器底层模块仿真图如图 2-6 所示。

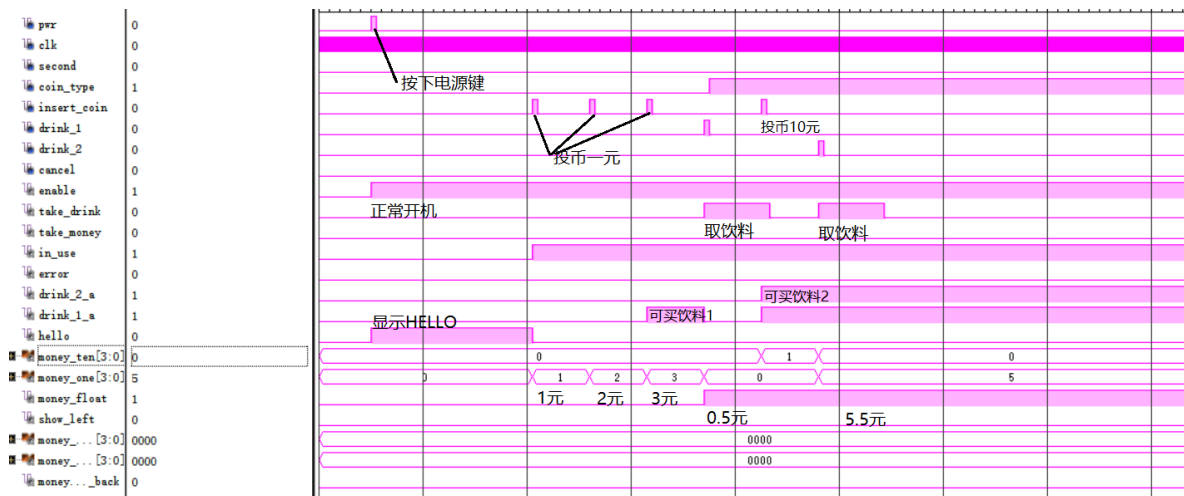


图 2-5 (a) 自动售货机控制器底层模块仿真图

华中科技大学课程设计报告

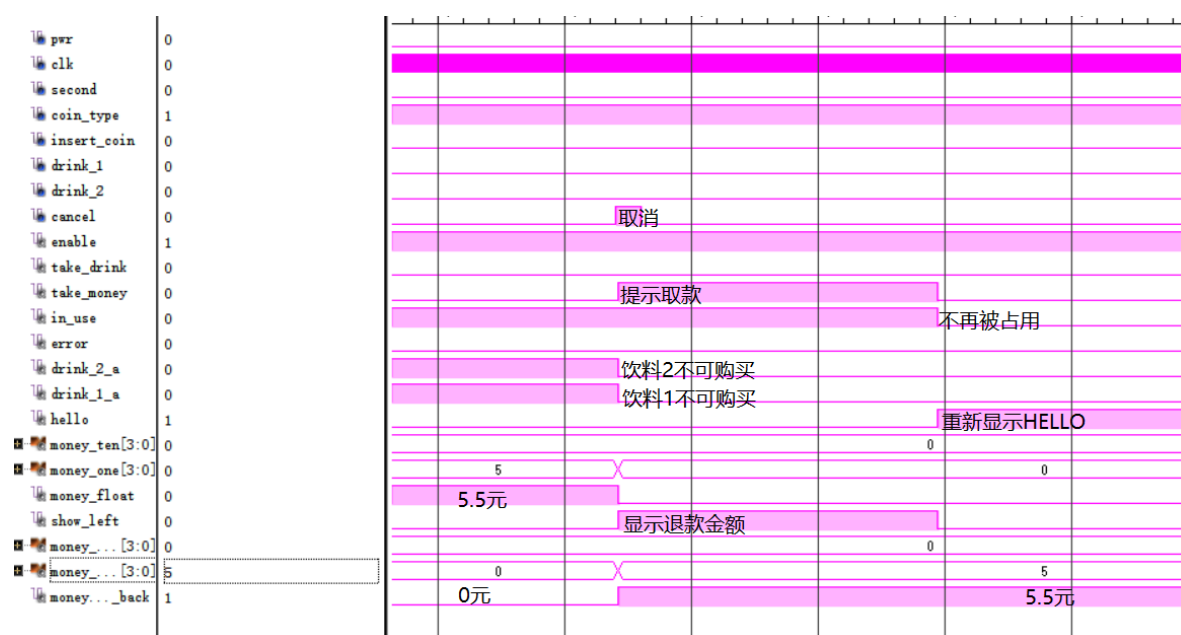


图 2-5 (b) 自动售货机控制器底层模块仿真图

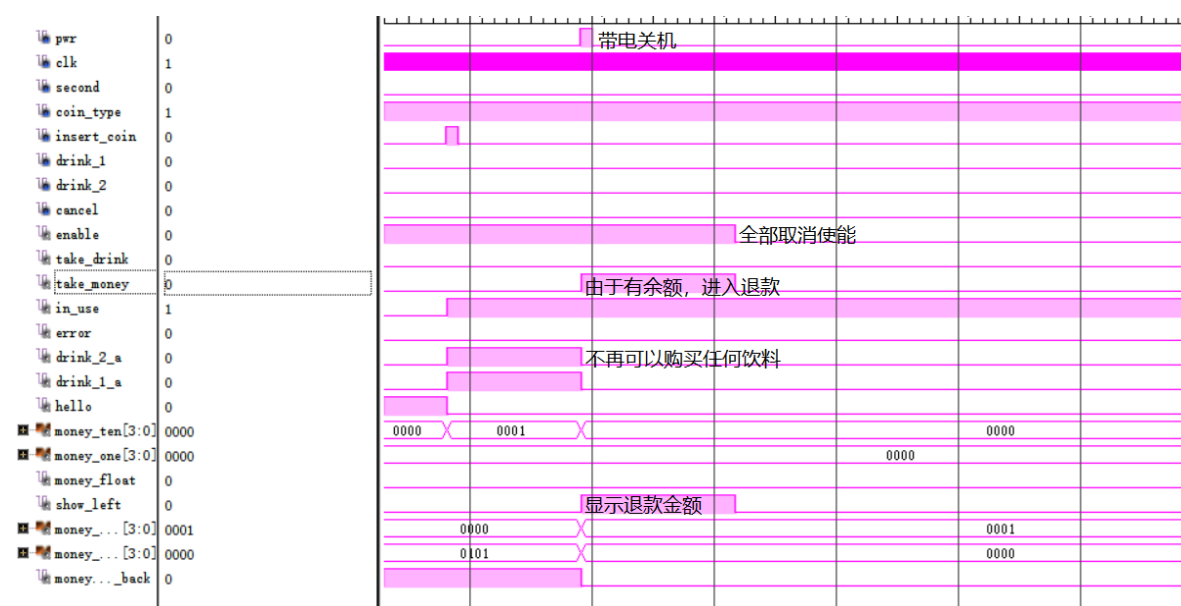


图 2-5 (c) 自动售货机控制器底层模块仿真图

仿真结果说明:

- A. 状态机正常处理开机、投币、币值切换等输入; 可以正确地输出能否取饮料、能否取币、可否买饮料; 可以正确计算币值。
- B. 状态机可以处理取消购买的输入; 可以正确的倒计时, 并及时流转到下一状态。

华中科技大学课程设计报告

C. 状态机对于带电关机可以正常处理。

2.5 主要问题及解决方法

(1) 故障 1

```
always @(posedge clk or posedge insert_coin) begin
    time_to_show_error = time_to_show_error - 1;
    if (time_to_show_error == 0) begin
        error = 0;
    end
end
```

图 2-6 故障 1 源代码

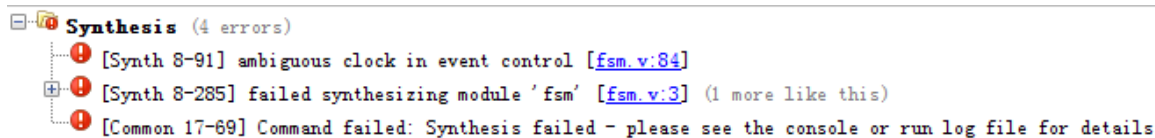


图 2-7 故障 1 提示

问题描述：由于 always@() 敏感变量出错导致不能综合

问题分析：always@()块内没有用于区分哪个变量触发的逻辑语句

解决方法：考虑到不需要异步设计，移除 posedge insert_coin 是最佳的解决方案。但是解决此问题也可以通过在 always 块内增加 if ... else...来解决。

给出修改后的实例

```
always @(posedge clk) begin
    time_to_show_error = time_to_show_error - 1;
    if (time_to_show_error == 0) begin
        error = 0;
    end
end
```

图 2-8 故障 1 解决代码

(2) 故障 2

华中科技大学课程设计报告

```
// Main part of state machine, this FSM maintains 5 vars
always @(posedge insert_coin) begin
    case (state)
        0: begin
            hello = 1;
            enable = 1;
```

图 2-9 故障 2 源代码

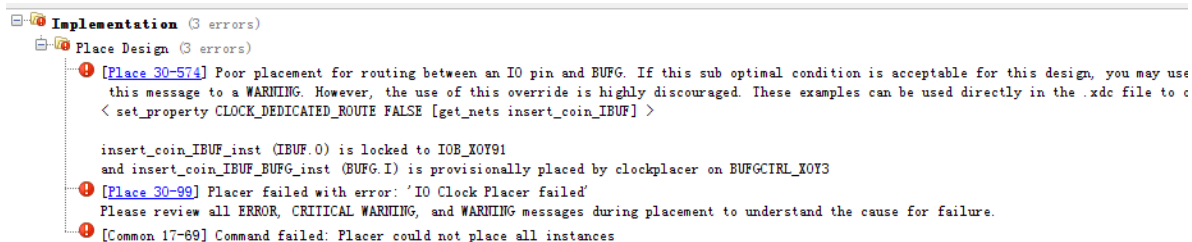


图 2-10 故障 2 错误提示

问题描述：由于缺少 xdc 约束导致问题

问题分析：由于非时钟变量在敏感列表内，会导致实现时的警告

解决方法：添加如图 2-7 所示的一条约束

给出修改后的实例

```
89
90
91 set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets insert_coin_IBUF];
92 set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets drink_1_IBUF];
93 set_property CLOCK_DEDICATED_ROUTE FALSE [get_nets drink_2_IBUF];
```

图 2-11 故障 2 添加一条约束

2.6 功能测试

共进行了 4 项功能测试，它们分别为：开机和初始状态测试，投币功能测试，购买功能测试功能测试，退币、关机功能测试。

下图是设计的管脚分配图：

华中科技大学课程设计报告

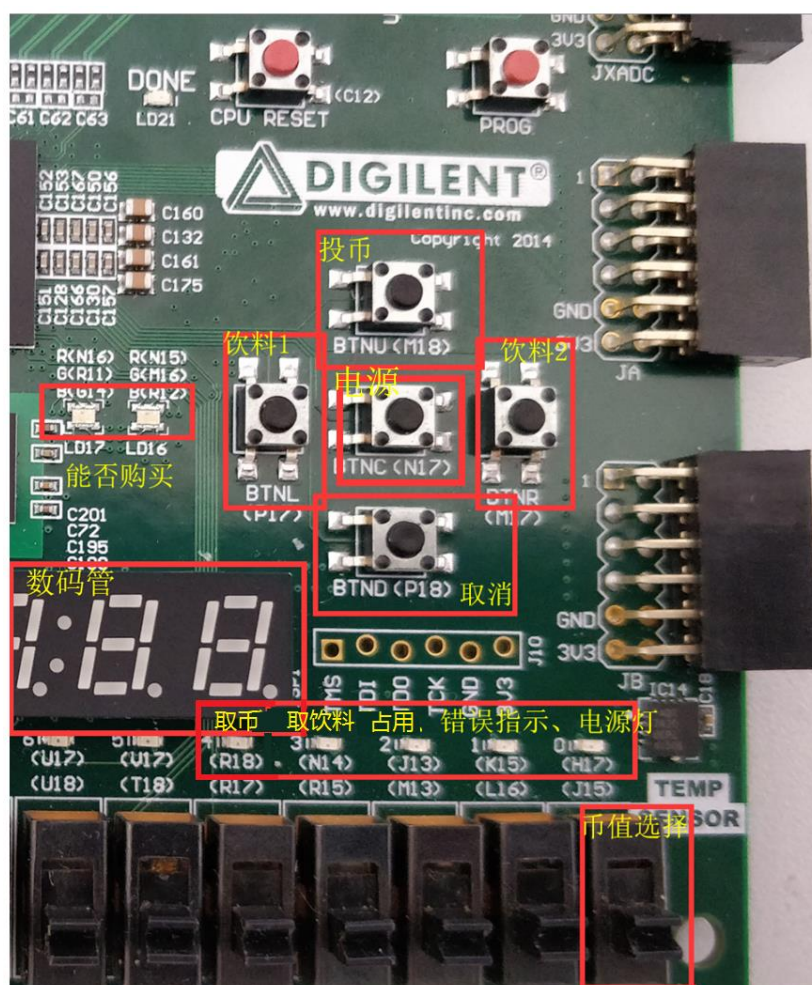


图 2-12 引脚分配

(1) 开机和初始状态测试

预期结果为开机正常，可以显示 HELLO，测试结果如图 2-13 (a)。

华中科技大学课程设计报告

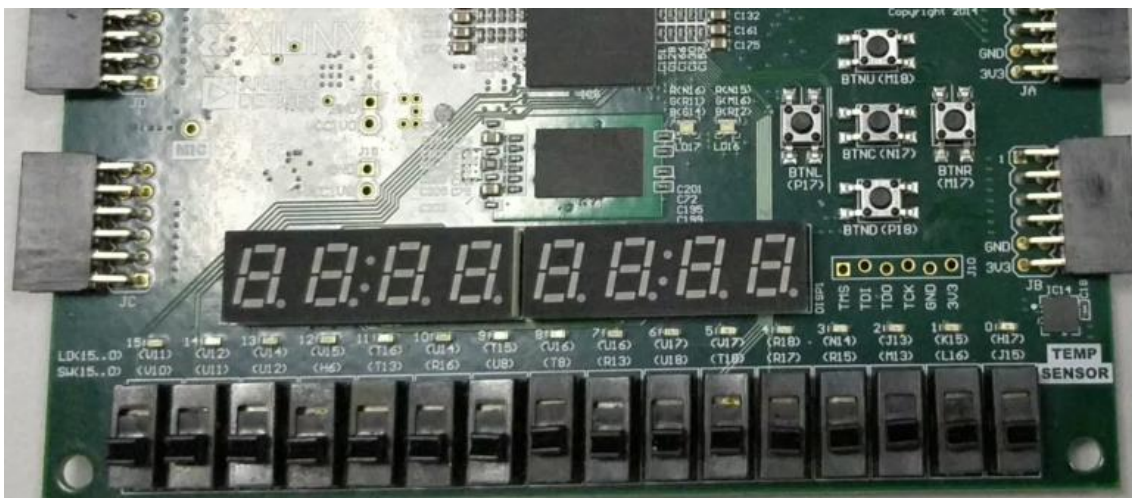


图 2-13 (a) 开机和初始状态测试

当按下电源键时，可以正常显示 HELLO，同时，由于当前余额为 0，两种饮料都不能购买。如图 2-13 (b) 所示

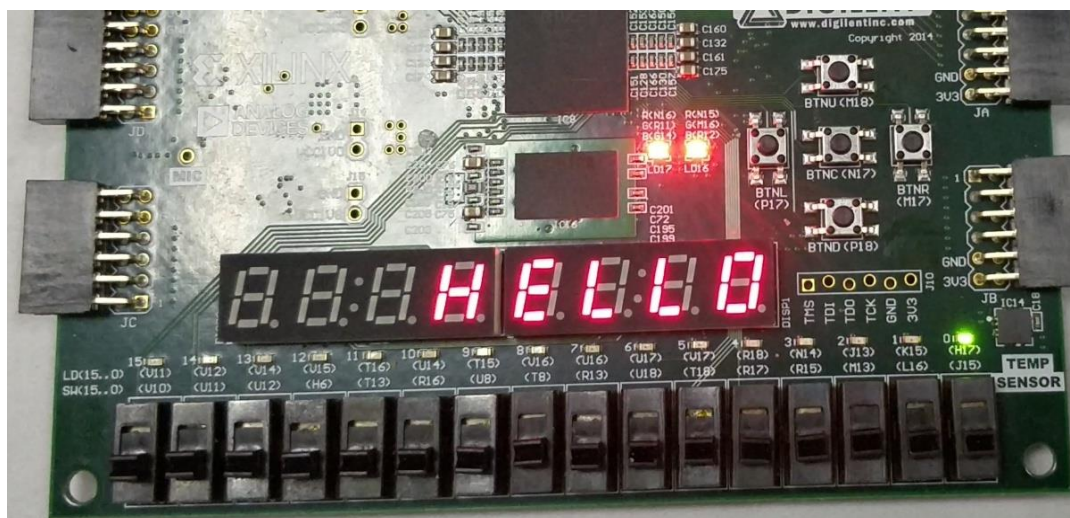


图 2-13 (b) 开机和初始状态测试

(2) 投币功能测试

按下投币键若干次，币值显示正常。预期结果为每按一次增加 1，当右下角的 Switch 调为上时，每按一次加 10。当有币值时，不再显示 HELLO，而是显示币值，同时占用状态启用。测试结果如图 2-9 (a)。

华中科技大学课程设计报告

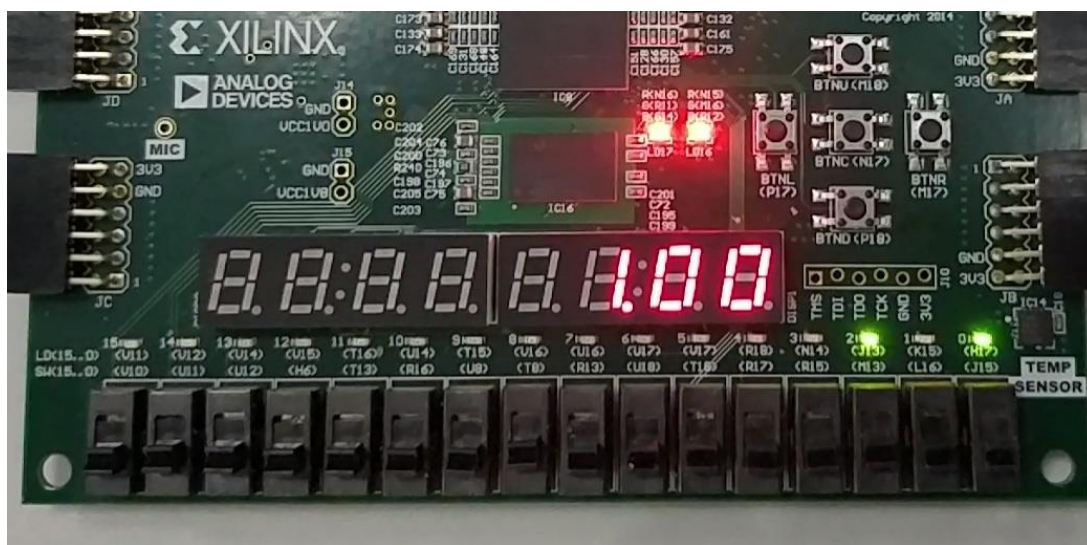


图 2-14 (a) 投币功能测试

再按四次调节 Switch 至“上”，再次按投币键，预期结果为显示 15.00，所有饮料都可购买同时占用仍亮，测试结果如图 2-9 (b) 所示。



图 2-14 (b) 投币功能测试

(3) 购买功能测试

当币值为 20.00 时按购买 2.5 元饮料按键，此时余额减少 2.5 元，取饮料灯亮起 5 秒。如图 2-10 (a) 所示。

华中科技大学课程设计报告



图 2-15 (a) 购买功能测试

连续购买 5 元饮料至 2.5 元，再次尝试购买，会显示错误灯，同时只能购买 2.5 元饮料，不能买 5 元饮料。如图 2-10 (b) 所示。（图中 2.5 未显示 0 不是 BUG，而是实际拍摄效果导致）

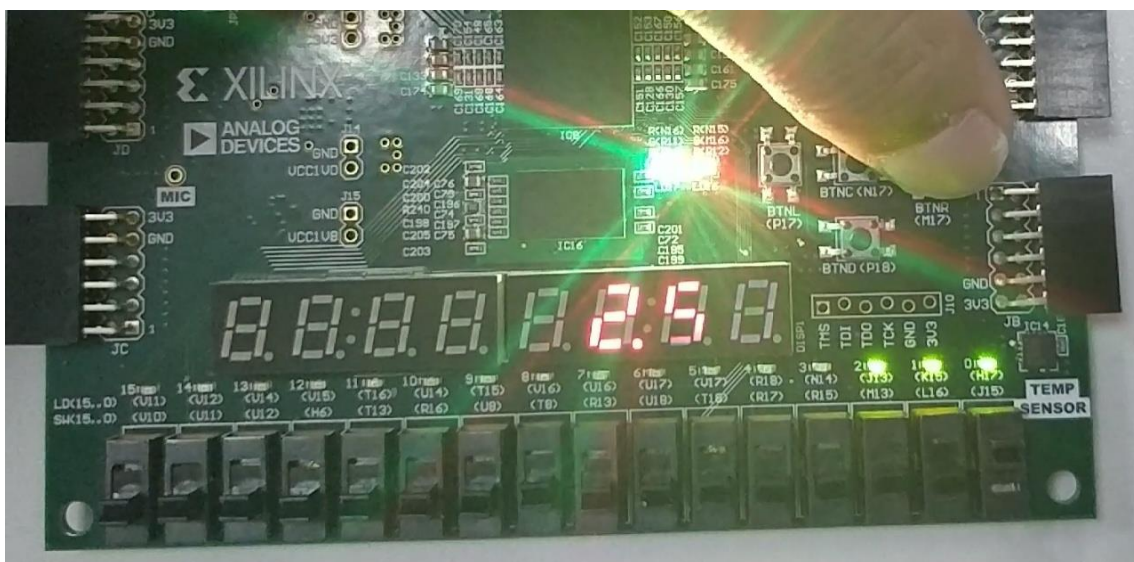


图 2-15 (b) 购买功能测试

当余额恰好为 5 元时，购买 5 元饮料会使余额为 0.00。此时，取饮料灯亮起 5 秒后熄灭。等待过程中如果继续投币，则会增加余额。如果没有余额，之后进入 HELLO 状态。如下图所示。

华中科技大学课程设计报告

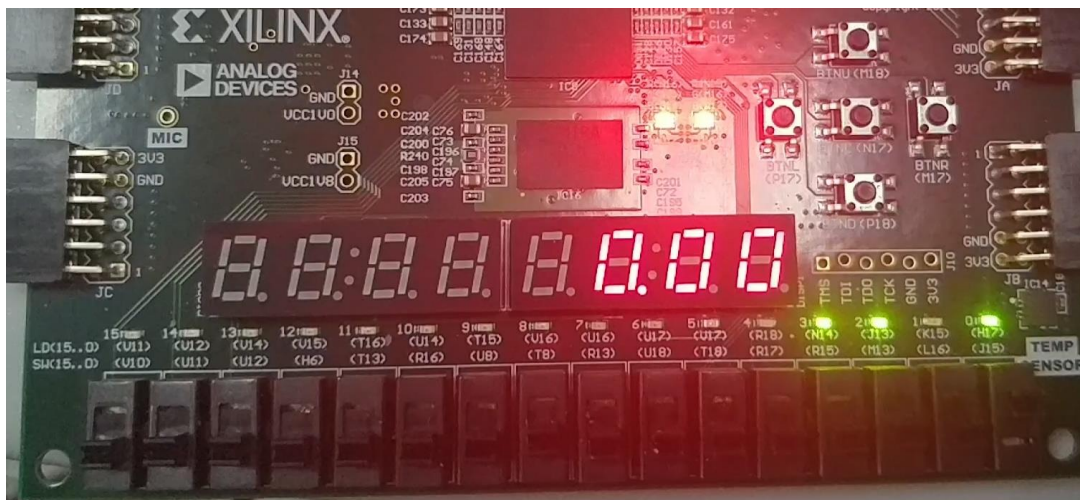


图 2-15 (c) 购买功能测试

(4) 退币、关机功能测试

当余额为 2.5 元时按下取消键，进入退币流程：退币金额显示在左侧，余额显示为 0；退币灯亮起 5 秒左右。然后系统进入待机 HELLO 状态。此时如果按下投币键，仍可投币，结果为退币之后进入等待购物状态。如图 2-11 (a) 所示。（图中最后一个零未显示为数码管扫描频率导致，不是 BUG）



图 2-16 (a) 退币、关机功能测试

华中科技大学课程设计报告

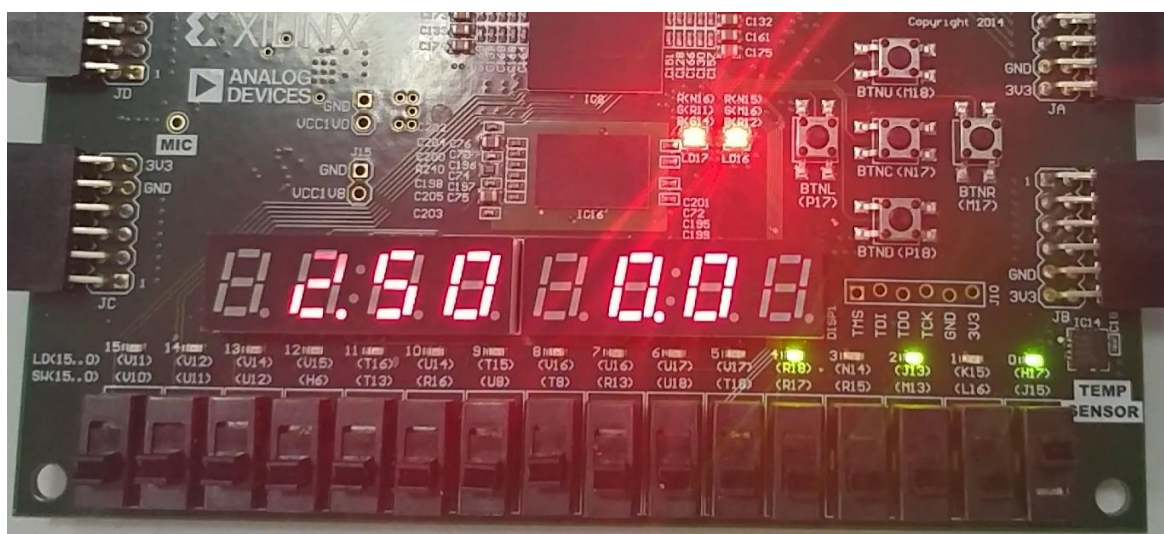


图 2-16 (b) 退币、关机功能测试

当存在余额点击电源键时，会进入退币流程，此时余额为零，所有饮料不能购买。退币灯亮 5 秒左右熄灭，然后完全关机。如图 2-11 (c) 和 2-11 (d) 所示。

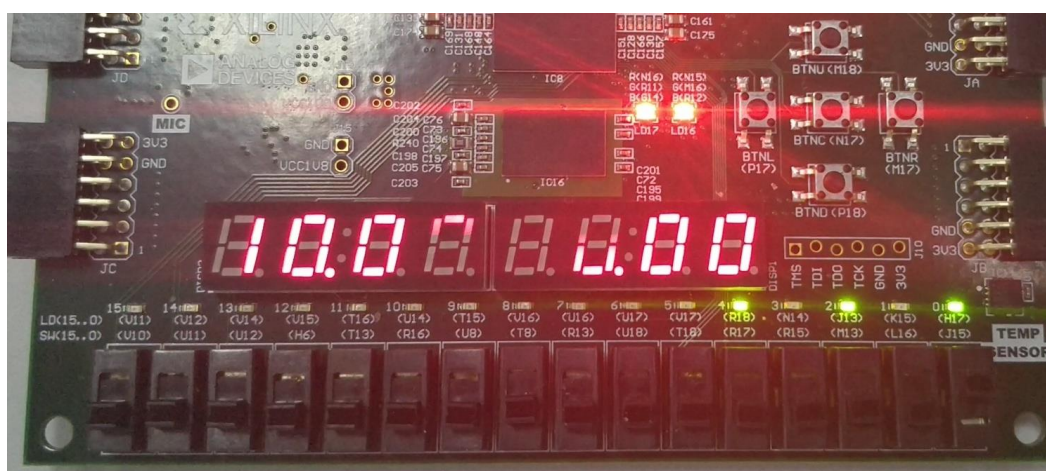


图 2-16 (c) 退币、关机功能测试

3. 总结与心得

3.1 课设总结

为了做好这个实验，我做了如下准备：

- (1) 复习 Verilog HDL
- (2) 对课设要求认真研读，构思如何入手设计
- (3) 一开始先以状态机的思路来实现，我思考了状态机的设计，在网络上参考了其他人关于状态机的理解。
- (4) 在编码期间，我全身心的投入到 Verilog 中。仔细设计每一行代码。对于每一个输入输出，都进行了充足的思考
- (5) 对于模块的拆分和组合，我也花费了很多心思，如何设计结构使他们通信的成本最低，我考虑了很多。

3.2 课设心得

此次课程设计使我更加熟练了 Verilog 和 Vivado，对于硬件设计也更加熟练了。

我认为我在课设中采取的先构思，在下手为我省下了很多时间和成本。这样的流程让我更难犯错。

通过对数码管显示数字和字母的设计，我对此类设计有了举一反三的能力。我明白了 RGB 灯也是通过设置每个颜色亮的时间来改变颜色的。

我也更加熟练了如何复用和解耦模块，这样，修改一个模块而不必要改动其他地方的代码，使得我的开发效率高了很多。

4 参考文献

教学参考书：

- [1]欧阳星明，于俊清. 数字逻辑. 武汉：华中科技大学出版社，2012
- [2]白中英，谢松云. 数字逻辑. 北京：科学出版社，2013
- [3]徐光辉，程东旭，黄如. 基于 FPGA 的嵌入式开发与应用. 北京:电子工业出版社, 2006.
- [4]Guy Even. Digital Logic Design: A Rigorous Approach, Cambridge University Press, 2012
- [5]David Harris. Digital Design and Computer Architecture(Second Edition), Morgan Kaufmann, 2012
- [6]Stephen Brown. 数字逻辑基础与 Verilog 设计, 机械工业出版社, 2009

课外文献阅读：

- [1]Introductory Digital Systems Laboratory
<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-111-introductory-digital-systems-laboratory-fall-2002>
- [2]Digital Design Fabrication
<http://ocw.mit.edu/courses/architecture/4-510-digital-design-fabrication-fall-2008/>
- [3]Analysis and Design of Digital Integrated Circuits
<http://ocw.mit.edu/courses/electrical-engineering-and-computer-science/6-374-analysis-and-design-of-digital-integrated-circuits-fall-2003/>