

浙江大学

本科实验报告

课程名称： 数字系统实验设计

姓 名： 姚桂涛

学 院： 信息与工程学院

专 业： 信息工程

学 号： 3190105597

指导老师： 屈民军、唐奕

2021 年 6 月 23 日

一、 实验目的

- (1) 掌握音符产生的方法, 了解 DDS 技术的应用。
- (2) 了解音频编解码的应用。
- (3) 掌握系统“自顶而下”的数字系统设计方法。

二、 实验任务

设计一个音乐播放器, 要求以下条件。

- (1) 可以播放四首乐曲, 设置 play/pause _ button、next _ button、reset 三个按键。按 play/pause _ button 键, 音乐在播放和暂停之间切换; 按 next _ button 键播放下一首乐曲。
- (2) LED0 指示播放情况 (播放时点亮)、LED2 和 LED 3 指示当前乐曲序号。

三、 实验原理

根据实验任务可将系统划分为时钟管理模块 (DCM)、按键处理、主控制器、乐曲读取、音符播放 (note _ player)、同步化电路、节拍基准产生器和音频编解码接口电路等子模块。

时钟管理模块 (DCM) 产生 100MHz 的系统时钟 sys _ clk 和 12.5MHz 的音频时钟 audio _ clk。

主控制器 (mcu) 模块接收按键信息, 通知 song _ reader 模块是否要播放 (play) 及播放哪首乐曲 (song)。

乐曲读取 (song _ reader) 模块根据 mcu 模块的要求, 逐个取出音符信息 note, duration 送给 note _ player 模块播放, 当一首乐曲播放完毕, 回复 mcu 模块乐曲播放结束信号 (song _ done)。

音符播放接收到需播放的音符, 在音符的持续时间内, 以 48kHz 速率送出该音符的正弦波样品给音频编解码接口模块。当一个音符播放结束, 向 song _ reader 模块发送一个 note _ done 脉冲索取新的音符。

音频编解码接口模块负责将音符的正弦波样品转换为串行输出并发送给音频编解码芯片 ADAU1761。音频编解码芯片 ADAU1761 接收正弦波样品, 再进行 AD 转换并放大, 最后送至扬声器播放。注意, note _ player 模块产生的正弦波样品为 16 位二进制, 需在低位加 8 个 0 后送入音频编解码接口模块。

由于音频编解码模块与系统使用不同时钟, 因此需要同步化电路协调两部分电路。

节拍基准产生器产生 48Hz 的节拍定时基准脉冲信号 (beat), 而 ready 信号频率为 48kHz, 因此, 节拍基准产生器为分频比为 1000 的分频器。而按键处理模块完成输入同步化、防颤动和脉宽变换等功能。

1. 具体设计

1.1 主控制模块 mcu 的设计

主控制模块 mcu 有响应按键信息、控制系统播放两大任务, 表 6.11 为其端口含义。

表 1: 主控制模块 mcu 的端口含义

引脚名称	I/O	引脚说明
clk	Input	100MHz 时钟信号
reset	Input	复位信号, 高电平有效
play_pause	Input	来自按键处理模块的“播放/暂停”控制信号, 一个时钟周期宽度的脉冲
next	Input	来自按键处理模块的“下一曲”控制信号, 一个时钟周期宽度的脉冲
play	Output	输出控制信号, 高电平表示播放, 控制 song_reader 模块是否要播放
reset_play	Output	时钟周期宽度的高电平复位脉冲 reset play, 用于同时复位模块 song_reader 和 note_player
song_done	Input	song_reader 模块的应答信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示一曲播放结束
song[1:0]	Output	当前播放乐曲的序号

根据设计要求, 模块 mcu 的原理框图如图所示。图中的 2 位二进制数用来计算乐曲序号 (song)。

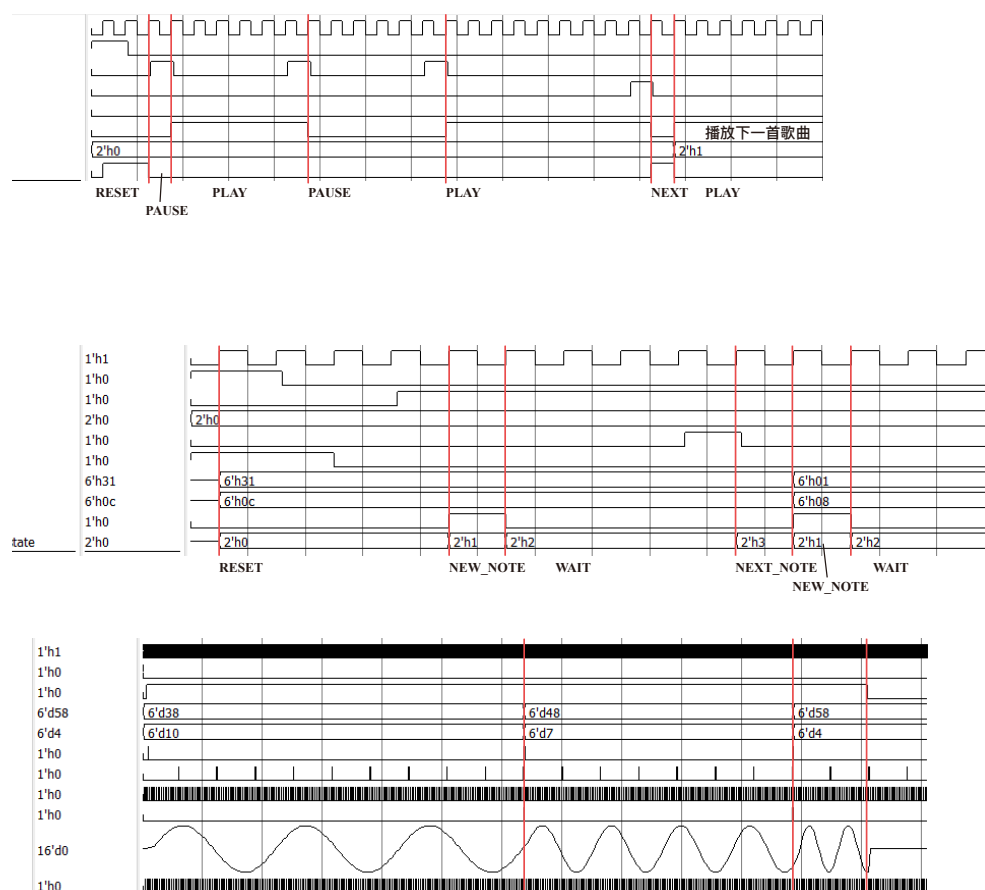


图 1: mcu 的结构框图

根据原理框图设计出 mcu 顶层代码如下:

```

1  module mcu (
2      clk,           //100MHz 时钟信号
3      reset,         //复位信号, 高电平有效
4      play_pause,    //来自按键处理模块的“播放/暂停”控制信号, 一个时钟周期宽度的脉冲

```

```

5      next,          //来自按键处理模块的“下一曲”控制信号, 一个时钟周期宽度的脉冲
6      play,          //输出控制信号, 高电平表示播放, 控制 song _ reader 模块是否要播放
7      reset_play,    //时钟周期宽度的高电平复位脉冲 reset play, 用于同时复位模块 song _
reader 和 note _ player
8      song_done,     //song _ reader 模块的应答信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示一
曲播放结束
9      song           //当前播放乐曲的序号
10 );
11     input clk, reset, play_pause, next, song_done;
12     output play, reset_play;
13     output [1:0] song;
14     wire NextSong;
15
16     //mcu 控制器
17     mcu_controller m_ctrl1 (
18         .clk(clk),
19         .reset(reset),
20         .play_pause(play_pause),
21         .next(next),
22         .song_done(song_done),
23         .play(play),
24         .reset_play(reset_play),
25         .NextSong(NextSong)
26     );
27
28     //2 位二进制计数器
29     counter_n #(.n(4), .counter_bits(2)) m_counter(
30         .clk(clk),
31         .en(NextSong),
32         .r(reset),
33         .q(song),
34         .co()
35     );
36 endmodule
37

```

mcu 顶层代码

控制器的工作流程图如图 6.46 所示, 控制器设置初始复位 (RESET)、播放 (PLAY)、暂停 (PAUSE) 和下一首 (NEXT) 四种状态。系统复位后, 经 RESET 状态初始化后进入 PAUSE 状态, 等待各种命令输入; play _ pause 脉冲信号使系统在 PLAY、PAUSE 两状态之间互转; 在 PLAY 或 PAUSE 状态下, 若按下 next _ button 按钮, 则使系统在进入 NEXT 状态, 输出 reset _ play 脉冲复位 song _ reader 和 note _ player 两个模块, 同时输出脉冲 NextSong 乐曲序号计数器加 1, 进入下一曲播放; 另外, 在 PLAY 状态时, 若乐曲播放结束 (song _ done 有效) 则结束播放, 经 RESET 状态复位 song _ reader 和 note _ player 两个模块, 并进入 PAUSE 状态, 再次等待各种命令输入。

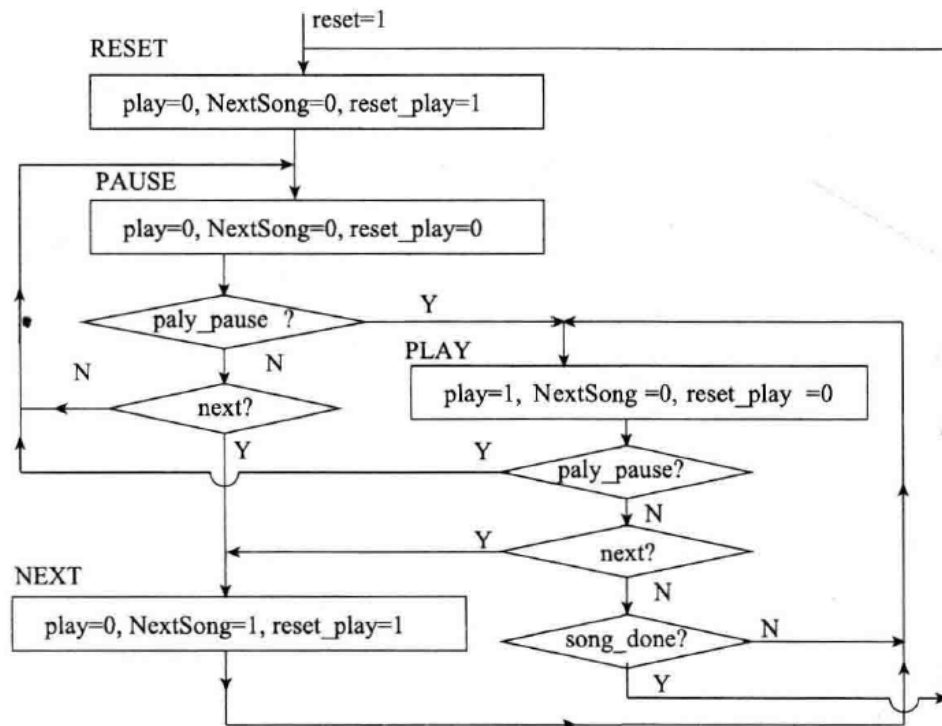


图 2: mcu 控制器的算法流程

根据原理框图设计出 mcu 控制器代码如下:

```

1  module mcu_controller (
2      clk,
3      reset,
4      play_pause,
5      next,
6      song_done,
7      play,
8      reset_play,
9      NextSong
10 );
11  input clk, reset, play_pause, next, song_done;
12  output reg play, reset_play, NextSong;
13  parameter RESET = 0, PAUSE = 1, PLAY = 2, NEXT = 3;
14
15  reg [1:0] state;          //状态信号
16  reg [1:0] nextstate;      //驱动信号
17
18  //状态寄存器
19  always @(posedge clk) begin
20      if(reset) state = RESET;
21      else state = nextstate;
22  end
23

```

```
24 //下一状态和输出
25 always @(*) begin
26     play = 0;NextSong = 0;reset_play = 0;
27     case(state)
28     RESET:
29         begin
30             play = 0;
31             NextSong = 0;
32             reset_play = 1;
33             nextstate = PAUSE;
34         end
35     PAUSE:
36         begin
37             play = 0;
38             NextSong = 0;
39             reset_play = 0;
40             if(play_pause) nextstate = PLAY;
41             else
42                 begin
43                     if(next) nextstate = NEXT;
44                     else nextstate = PAUSE;
45                 end
46             end
47     PLAY:
48         begin
49             play = 1;
50             NextSong = 0;
51             reset_play = 0;
52             if(play_pause) nextstate = PAUSE;
53             else
54                 begin
55                     if(next) nextstate = NEXT;
56                     else
57                         begin
58                             if(song_done) nextstate = RESET;
59                             else nextstate = PLAY;
60                         end
61                     end
62                 end
63     NEXT:
64         begin
65             play = 0;
66             NextSong = 1;
67             reset_play = 1;
68             nextstate = PLAY;
69         end
70     default: nextstate = RESET;
71 endcase
72 end
73 endmodule
```

mcu 控制器代码

1.2 乐曲读取模块 song _ reader 的设计

乐曲读取模块 song _ reader 的任务有 (1) 根据 mcu 模块的要求, 选择播放乐曲。(2) 响应 note _ player 模块请求, 从 song _ rom 中逐个取出音符 note, duration 送给 note _ player 模块播放。(3) 判断乐曲是否播放完毕, 若播放完毕, 则回复 mcu 模块应答信号。根据 song _ reader 模块的任务要求, song _ reader 模块需包含表 6.12 所示的输入、输出端口。

表 2: 乐曲读取模块 song _ reader 的端口含义

引脚名称	I/O	引脚说明
clk	Input	100MHz 时钟信号
reset	Input	复位信号, 高电平有效
play	Input	来自 mcu 的控制信号, 高电平要求播放
song[1:0]	Input	来自 mcu 的控制信号, 当前播放乐曲的序号
note_done	Input	即模块 note player 的应答信号, 一个时钟周期宽度的脉冲, 表示一个音符播放结束并索取新音符
song_done	Output	给 mcu 的应答信号, 当乐曲播放结束, 输出一个时钟周期宽度的脉冲, 表示乐曲播放结束
note[5:0]	Output	音符标记
duration[5:0]	Output	音符的持续时间
new_note	Output	给模块 note_playe 的控制信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示新的音符需播放

song _ rom 是一个只读存储器, 用来存放乐曲, 容量为 $2^7 \times 12\text{bits}$ 。共存放四首乐曲, 每首乐曲占用 $25 \times 12\text{bits}$ 空间, 即每首乐曲最长由 32 个音符组成。因此, song _ rom 高 2 位地址决定哪首乐曲, 而低 5 位地址决定这首乐曲的哪个音符。song _ rom 每个地址存放一个音符信息, 音符信息由 12 位二进制组成, 高 6 位表示音符标记 note, 低 6 位表示音长 duration。

song _ rom 模块已由作者提供, 前三首乐曲已填写, 第 4 首乐曲空白, 由读者自己填写, 这里说明一下, 若乐曲不足 32 个音符, 多余的空间用数字 0 填补。

根据 song _ reader 模块的功能及 song _ rom 结构, 可画出图 6.47 所示的结构框图, 控制器主要负责接收 mcu 模块与 note _ player 模块的控制信号, 并做出响应。算法流程图如图 6.48 所示。

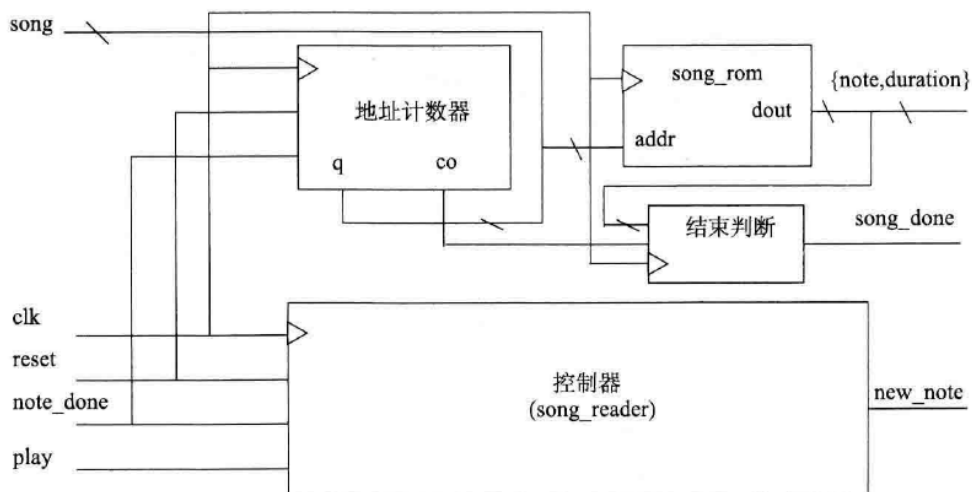


图 3: song _ reader 的结构框图

根据原理框图设计出 song _ reader 顶层代码如下:

```

1  module song_reader (
2      song,           //来自 mcu 的控制信号, 当前播放乐曲的序号
3      clk,            //100MHz 时钟信号
4      reset,          //复位信号, 高电平有效
5      note_done,      //即模块 note player 的应答信号, 一个时钟周期宽度的脉冲, 表示一个音符
                        播放结束并索取新音符
6      play,           //来自 mcu 的控制信号, 高电平要求播放
7      song_done,      //给 mcu 的应答信号, 当乐曲播放结束, 输出一个时钟周期宽度的脉冲, 表示
                        乐曲播放结束
8      new_note,       //给模块 note _ playe 的控制信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示
                        新的音符需播放
9      note,           //音符标记
10     duration        //音符的持续时间
11 );
12 input clk, reset, play, note_done;
13 input [1:0] song;
14 output song_done, new_note;
15 output [5:0] note, duration;
16 wire [4:0] q;       //song _ rom 的低 5 位地址
17 wire co;           //地址计数器进位
18
19 //地址计数器
20 counter_n #(.n(32), .counter_bits(5)) song_counter(
21     .clk(clk),
22     .en(note_done),
23     .r(reset),
24     .q(q),
25     .co(co)
26 );
27

```

```

28      //控制器
29      song_reader_controller s_ctrl1(
30          .clk(clk),
31          .reset(reset),
32          .play(play),
33          .note_done(note_done),
34          .new_note(new_note)
35      );
36
37      //结束判断
38      over over1(
39          .clk(clk),
40          .duration(duration),
41          .co(co),
42          .out(song_done),
43          .reset(reset)
44      );
45
46      //song _ rom
47      song_rom songs(
48          .clk(clk),
49          .dout({note,duration}),
50          .addr({song,q})
51      );
52  endmodule
53

```

song _reader 顶层代码

系统复位后一直在 RESET 状态等待 mcu 模块控制信号输入,当 mcu 模块发出播放命令 (play 为高电平) 时,进入 NEW _ NOTE 状态输出 new _ note 脉冲要求 note _ player 模块播放音符;然后进入 WAIT 状态等待,当 note _ player 模块播放完音符时,会发出 note _ done 脉冲信号索取下一音符,note _ done 脉冲信号一方面让地址计数器递增,并从 song _ rom 取出一个新的音符,另一方面让控制器进入 NEW _ NOTE 状态,输出 new _ note 脉冲通知 note _ player 模块有新的音符需要播放。当 note _ done 有效,需要两个时钟周期才能从 song _ rom 中读取下一个音符信息。因此新音符有效标记信号 new _ note 也应在新音符数据输出后有效,其时序关系如图 6.49 所示。所以在流程图中插入 NEXT _ NOTE 状态,目的是延迟一个时钟周期输出信号,以配合 song _ rom 的读取要求。

地址计数器为 5 位二进制计数器,其中 note _ done 为计数使能输入,当 note _ done 为高电平时,允许计数。计数器状态 q 为 song _ rom 的低 5 位地址,song[1:0] 为 song _ rom 高两位地址。

当地址计数器出现进位或 duration 为 0 时,表示乐曲结束,应输出一个时钟周期宽度的高电平脉冲信号 song _ done。

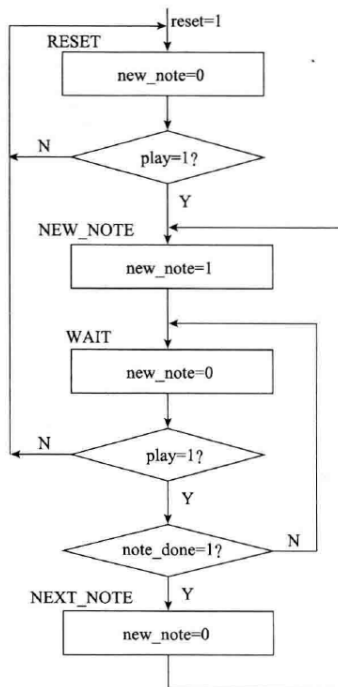


图 4: song _ reader 控制器的算法流程

根据原理框图设计出 song _ reader 控制器代码如下:

```

1  module song_reader_controller (
2      clk,
3      reset,
4      play,
5      note_done,
6      new_note
7  );
8      input clk, reset, play, note_done;
9      output reg new_note;
10     parameter RESET = 0, NEW_NOTE = 1, WAIT = 2, NEXT_NOTE = 3;
11     reg [1:0] state, nextstate;
12
13     //状态寄存器
14     always @(posedge clk) begin
15         if(reset) state = RESET;
16         else state = nextstate;
17     end
18
19     //下一状态和输出
20     always @(*) begin
21         new_note = 0;
22         case(state)
23             RESET:
24                 begin
25                     if(play) nextstate = NEW_NOTE;

```

```
26         else nextstate = RESET;
27     end
28     NEW_NOTE:
29     begin
30         new_note = 1;
31         nextstate = WAIT;
32     end
33     WAIT:
34     begin
35         if(play)
36             begin
37                 if(note_done) nextstate = NEXT_NOTE;
38                 else nextstate = WAIT;
39             end
40         else nextstate = RESET;
41     end
42     NEXT_NOTE:
43     begin
44         nextstate = NEW_NOTE;
45     end
46     default: nextstate = RESET;
47 endcase
48 end
49 endmodule
50
```

1.3 音符播放模块 note __ player 的设计

音符播放模块 note __ player 是本实验的核心模块, 它主要任务包括以下几方面。(1) 从 song __ reader 模块接收需播放的音符 note, duration。(2) 根据 note 值找出 DDS 的相位增量 k。(3) 以 48kHz 速率从 Sine ROM 取出正弦样品送给音频编解码器接口模块。(4) 当一个音符播放完毕, 向 song __ reader 模块索取新的音符。

根据 note __ player 模块的任务, 进一步划分功能单元, 如图 6.50 所示, 图中 FreqROM 为只读存储器, 完成音符标记 note 与 DDS 模块的相位增量 k 查找表关系。表 6.13 所示为 note __ player 模块的端口含义。

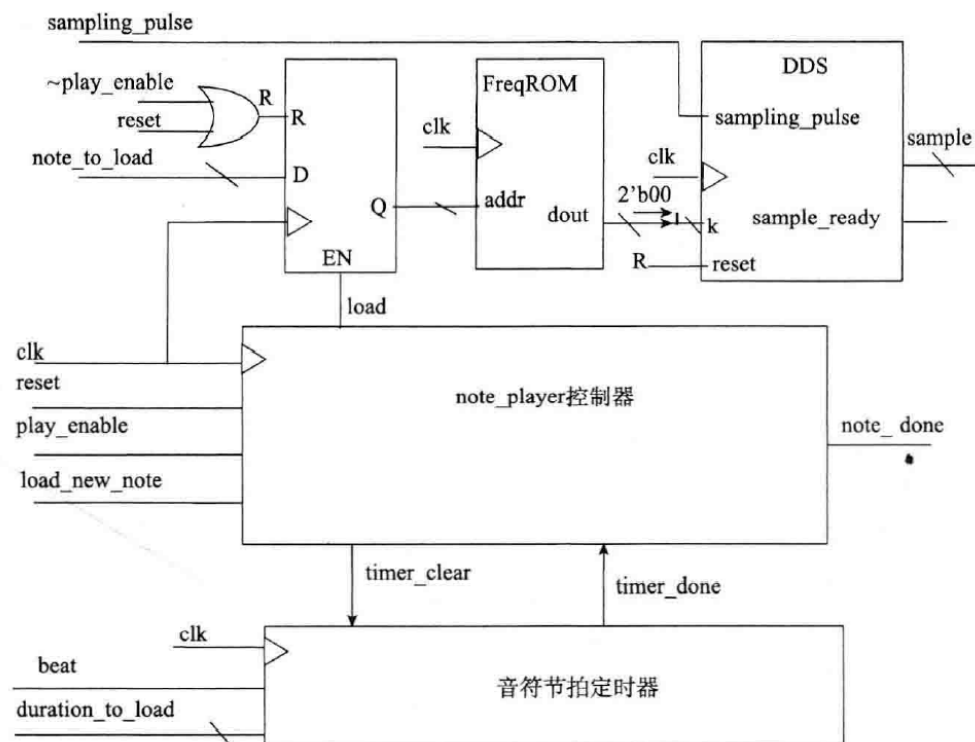


图 5: note _ player 的结构框图

表 3: note _ player 模块的端口含义

引脚名称	I/O	引脚说明
clk	Input	系统时钟信号, 外接 sys_clk
reset	Input	复位信号, 高电平有效, 外接 mcu 模块的 reset_play
play_enable	Input	来自 mcu 模块的 play 信号, 高电平表示播放
note_to_load[5:0]	Input	来自 song_reader 模块的音符标记 note, 表示需播放的音符
duration_to_load[5:0]	Input	来自 song_reader 模块的音符持续时间 duration, 表示需播放音符的音长
load_new_note	Input	来自 song_reader 模块的 new_note 信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示新的音符需播放
note_done	Output	给 song_reader 模块的应答信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示音符播放完毕
sampling_pulse	Input	来自同步化电路模块的 ready 信号, 频率 48kHz, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲, 表示索取新的正弦样品
beat	Input	定时基准信号, 频率为 48Hz 脉冲, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲
sample[15:0]	Output	正弦样品输出

根据原理框图设计出 note _ player 控制器代码如下:

```
1 module note_player (
```

```

2      clk,                //系统时钟信号, 外接 sys _ clk
3      reset,              //复位信号, 高电平有效, 外接 mcu 模块的 reset _ play
4      play_enable,        //来自 mcu 模块的 play 信号, 高电平表示播放
5      note_to_load,       //来自 song_ reader 模块的音符标记 note, 表示需播放的音符
6      duration_to_load,   //来自 song _ reader 模块的音符持续时间 duration, 表示需播放
                          //音符的音长
7      load_new_note,      //来自 song_ reader 模块的 new_note 信号, 一个时钟周期宽度的
                          //高电平脉冲, 表示新的音符需播放
8      note_done,          //给 song_ reader 模块的应答信号, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲,
                          //表示音符播放完毕
9      sampling_pulse,     //来自同步化电路模块的 ready 信号, 频率 48kHz, 一个时钟周期宽度
                          //的高电平脉冲, 表示索取新的正弦样品
10     beat,               //定时基准信号, 频率为 48Hz 脉冲, 一个时钟周期宽度的高电平脉冲
11     sample,             //正弦样品输出
12     sample_ready        //正弦成功输出信号
13 );
14 input clk, reset, play_enable, load_new_note, sampling_pulse, beat;
15 input [5:0] note_to_load, duration_to_load;
16 output note_done, sample_ready;
17 output [15:0] sample;
18 wire load;              //读取新的音符
19 wire [5:0] q;           //FreqROM 地址输入
20 wire [19:0] dout;       //FreqROM 读取的相位增量
21 wire timer_clear, timer_done; //清零信号与定时结束标志
22
23 //D 触发器
24 dffre #( .n(6) ) note_dffre(
25     .d(note_to_load),
26     .en(load),
27     .r(~play_enable||reset),
28     .clk(clk),
29     .q(q)
30 );
31
32 //FreqROM
33 frequency_rom FreqROM(
34     .clk(clk),
35     .dout(dout),
36     .addr(q)
37 );
38
39 //DDS
40 dds note_dds(
41     .clk(clk),
42     .reset(~play_enable||reset),
43     .k({2'b00, dout}),
44     .sampling_pulse(sampling_pulse),
45     .new_sample_ready(sample_ready),
46     .sample(sample)
47 );

```

```

48
49     //控制器
50     note_player_controller note_ctrl(
51         .clk(clk),
52         .reset(reset),
53         .play_enable(play_enable),
54         .load_new_note(load_new_note),
55         .load(load),
56         .note_done(note_done),
57         .timer_clear(timer_clear),
58         .timer_done(timer_done)
59     );
60
61     //音符节拍定时器
62     timer note_counter(
63         .clk(clk),
64         .r(timer_clear),
65         .en(beat),
66         .n(duration_to_load),
67         .done(timer_done)
68     );
69     endmodule
70

```

note __player 控制器代码

note __player 控制器负责与 song __reader 模块接口, 读取音符信息, 并根据音符信息从 Frequency ROM 中读取相应相位增量 k 送给 DDS 子模块。另外, note __player 控制器还需要控制音符播放时间。note __player 控制器的算法流程如图 6.51 所示。在复位或未播放时, 控制器处于 RESET 状态或 PLAY 状态, 由于此时高电平 reset 或低电平 play __enable 都使图 6.35 中的 D 型寄存器清 0, 进而使 k 为 0, 不会输出正弦样品。当 play __enable 为高电平, 系统进入音符播放 PLAY 状态, 当一个音符播放结束时, 控制器进入 DONE 状态, 置位 done __with __note, 向 song __reader 模块索取新的音符, 此时 song __reader 模块输出一个 new __note 脉冲信号使控制器进入 LOAD 状态, 读取新的音符, 然后进入 PLAY 状态播放下一个音符。

音符定时器为 6 位二进制计数器, beat、timer __clear 分别为使能、清 0 信号, 均为高电平有效。定时时间由音长信号 duration __to __load 决定, 即 duration __to __load 个 beat 周期, timer __done 为定时结束标志。子模块 DDS 的功能就是利用 DDS 技术产生正弦样品, 其工作原理已在实验 15 中介绍了, 注意: DDS 模块的输入 k 为 22 位二进制, 因此需 FreqROM 输出的 20 位相位增量高位加 2 个 0 后接入 DDS。

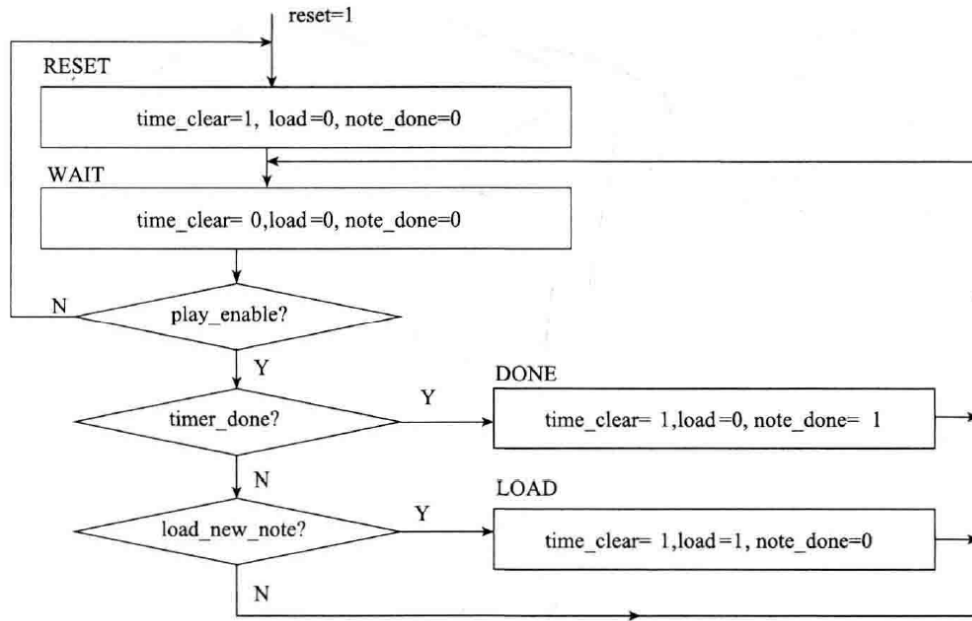


图 6: note __ player 控制器的算法流程

根据原理框图设计出 note __ player 控制器代码如下:

```

1  module note_player_controller (
2      clk,
3      reset,
4      play_enable,
5      load_new_note,
6      load,
7      note_done,
8      timer_clear,
9      timer_done
10 );
11  input clk, reset, play_enable, timer_done, load_new_note;
12  output reg load, timer_clear, note_done;
13  parameter RESET = 0, WAIT = 1, DONE = 2, LOAD = 3;
14  reg [1:0] state, nextstate;
15  //状态
16  always @(posedge clk) begin
17      if(reset) state = RESET;
18      else state = nextstate;
19  end
20
21  //下一状态和输出
22  always @(*) begin
23      load = 0; timer_clear = 0; note_done = 0;
24      case(state)
25          RESET:
26              begin
27                  timer_clear = 1;

```



```

28         load = 0;
29         note_done = 0;
30         nextstate = WAIT;
31     end
32     WAIT:
33     begin
34         timer_clear = 0;
35         load = 0;
36         note_done = 0;
37         if(play_enable)
38             begin
39                 if(timer_done) nextstate = DONE;
40                 else
41                     begin
42                         if(load_new_note) nextstate = LOAD;
43                         else nextstate = WAIT;
44                     end
45                 end
46             else nextstate = RESET;
47         end
48     DONE:
49     begin
50         timer_clear = 1;
51         load = 0;
52         note_done = 1;
53         nextstate = WAIT;
54     end
55     LOAD:
56     begin
57         timer_clear = 1;
58         load = 1;
59         note_done = 0;
60         nextstate = WAIT;
61     end
62     default: nextstate = RESET;
63 endcase
64 end
65 endmodule
66

```

note __player 控制器代码

1.4 同步化电路

由于音频编解码接口模块和其他模块采用不同的时钟，因此两者之间的控制及应答信号须进行同步化处理。本例中音频编解码接口模块的输出信号 NewFrame 的脉冲宽度为一个 audio __ clk 时钟周期，需通过同步化处理，产生与 sys __ clk 同步且脉冲宽度为一个 sys __ clk 时钟周期的信号 ready。电路如图 6.52 所示，由同步器和脉冲宽度变换电路组成。

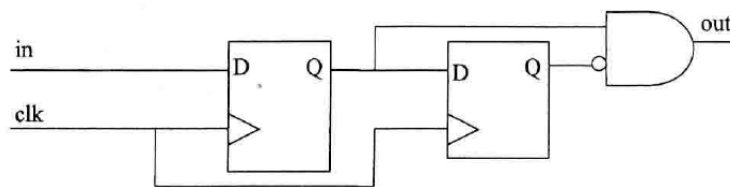


图 7: 同步化电路

同步化电路代码如下:

```

1 module synchro (
2     clk,
3     in,
4     out
5 );
6     input clk, in;
7     output out;
8
9     reg q1,q2;
10
11     //非阻塞赋值
12     always @(posedge clk ) begin
13         q1 <= in;
14         q2 <= q1;
15     end
16
17     assign out = q1 && (~q2);
18 endmodule
19

```

同步化电路代码

1.5 时钟管理模块 (DCM)

IP 内核时钟管理模块的输入时钟 clk 频率为 100MHz, 产生 100MHz 的系统时钟和 12.50MHz 的音频时钟。

另外, 音频编解码接口模块与按键处理模块按实验 18 和实验 11 介绍设计。也可调用作者提供的设计。不过, 作者是以 BlackBox 方式提供, 即音频编解码接口模块提供综合网表文件 AudioInterface.edf 和端口文件 AudioInterface.v; 而按键处理模块提供综合网表文件 button_press_unit.edf 和端口文件 button_press_unit.v。

四、 主要仪器设备

Modelsim SE、Vivado、Nexys Video Artix-7 FPGA 多媒体音视频智能互联开发系统、有源音响或耳机。

五、 实验过程

1. 仿真测试

1.1 主控制器 mcu 模块

仿真图:

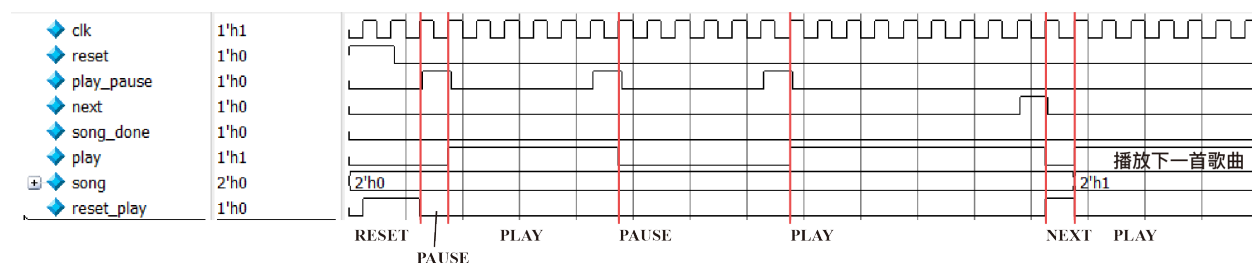


图 8: mcu 仿真图

仿真分析:

- (1) 开始 $\text{reset} = 1$, clk 上沿到来时, 电路处于 RESET 状态, 输出 $\text{play} = 0$, $\text{nextsong} = 0$, $\text{reset_play} = 1$ 。
- (2) 第一条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play_pause} = 0$, 电路进入 PAUSE 状态。
- (3) 第二条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play_pause} = 1$, 相当于按下 play 按钮, 电路进入 PLAY 状态, $\text{play} = 1$ 。
- (4) 第三条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play_pause} = 1$, 电路进入 PAUSE 状态, 输出 $\text{play} = 0$ 。
- (5) 第四条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play_pause} = 0$, $\text{next} = 1$, 相当于按下 next 按钮, 电路进入 NEXT 状态。

1.2 乐曲读取 song_reader 模块

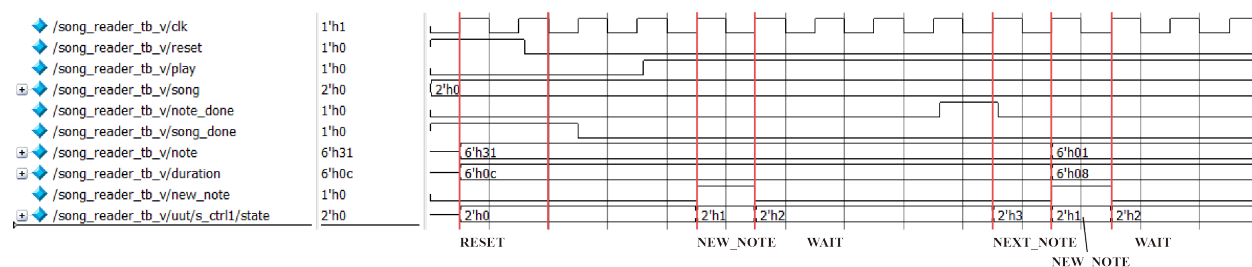


图 9: song_reader 仿真图

仿真分析:

- (1) 第一条红线时, $\text{reset} = 1$, 电路进入 RESET 状态。

- (2) 第二条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play} = 0$, 电路保持 RESET 状态。
- (3) 第三条红线时, $\text{reset} = 0$, $\text{play} = 1$, 电路接收到 mcu 发来的播放命令, 进入 NEW_NOTE 状态, $\text{new_note} = 1$, 要求 note_player 模块播放音符。
- (4) 第四条红线时, 电路进入 WAIT 状态, 等待播放停止或者音符播放完毕。
- (5) 第五条红线时, $\text{note_done} = 1$, 音符播放完毕, 电路进入 NEXT_NOTE 状态, 以延迟一个时钟周期输出信号, 配合 song_rom 的读取要求。
- (6) 第六条红线时, 电路进入 NEW_NOTE 状态, 播放新的音符。

1.3 音符播放 note_player 模块

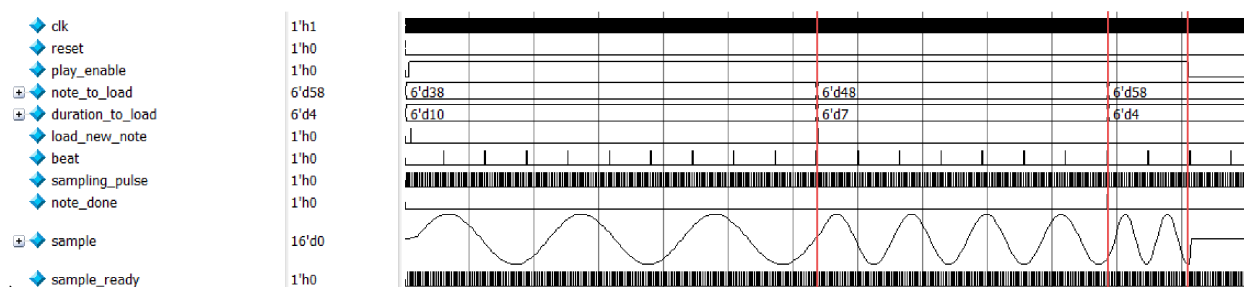


图 10: note_player 仿真图

仿真分析:

1.4 次顶层 music_player