

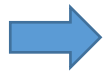
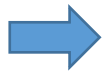
Verilog硬件描述语言

高翠芸

School of Computer Science

gaocuiyun@hit.edu.cn

主要内容

- 数字系统设计
- Verilog HDL基本知识
- Verilog HDL语法
- 方法：
 - 讲义  自学  实践

推荐参考

- 推荐视频

- B站：小明教IC-1天学会Verilog

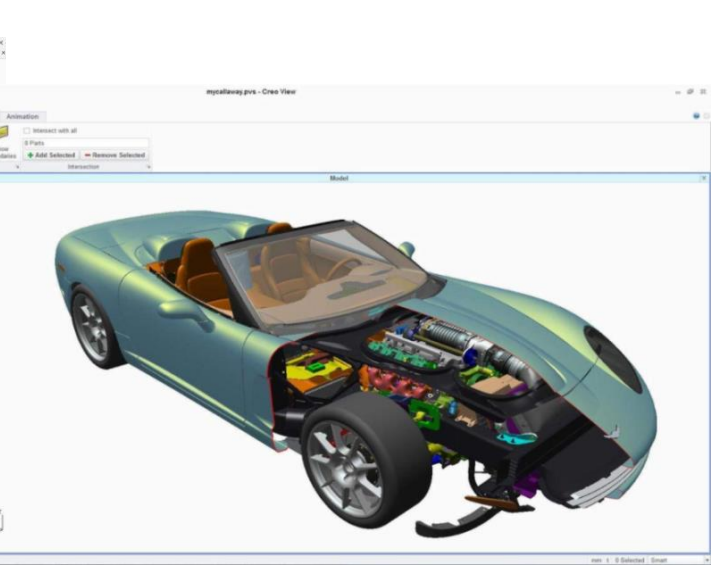
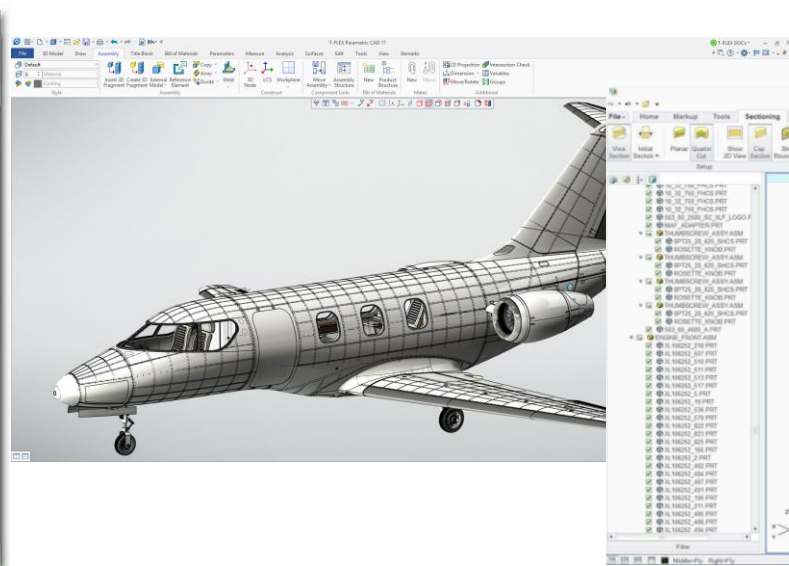
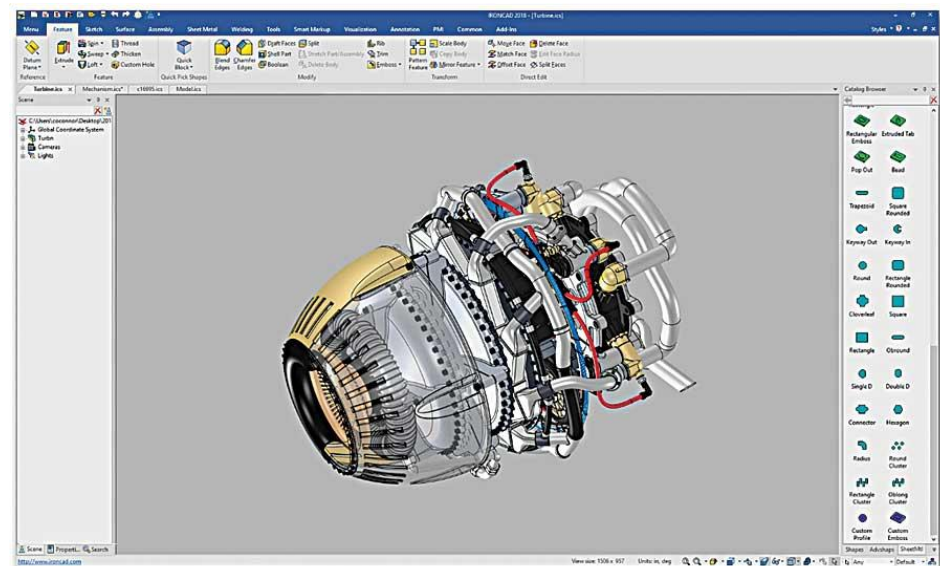
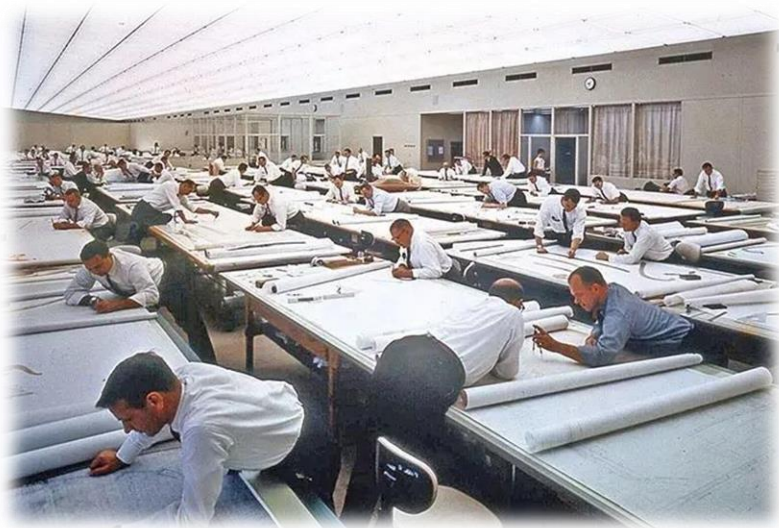
https://www.bilibili.com/video/BV1Dx411e7Af?from=search&seid=4777899360707667982&spm_id_from=333.337.0.0 可以1.5倍速

视频选集 (8/8) 		自动连播 
P1	小明教IC-1天学会verilog(0)	19:44
P2	小明教IC-1天学会verilog(1)	20:10
P3	小明教IC-1天学会verilog(2)	27:03
P4	小明教IC-1天学会verilog(3)	21:52
P5	小明教IC-1天学会verilog(4)	24:44
P6	小明教IC-1天学会verilog(5)	17:35
P7	小明教IC-1天学会verilog(6)	09:08
 P8	小明教IC-1天学会verilog(7)	22:58

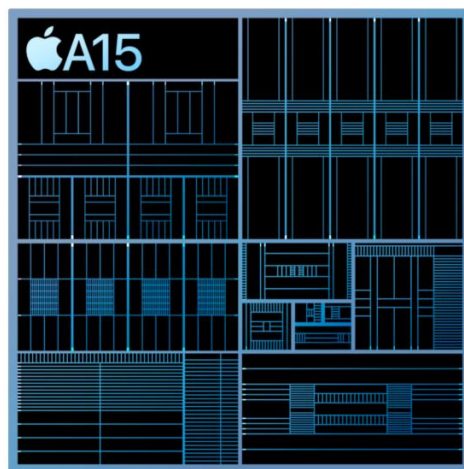
Verilog硬件描述语言

- Verilog HDL概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和条件表达式
- 模块的测试

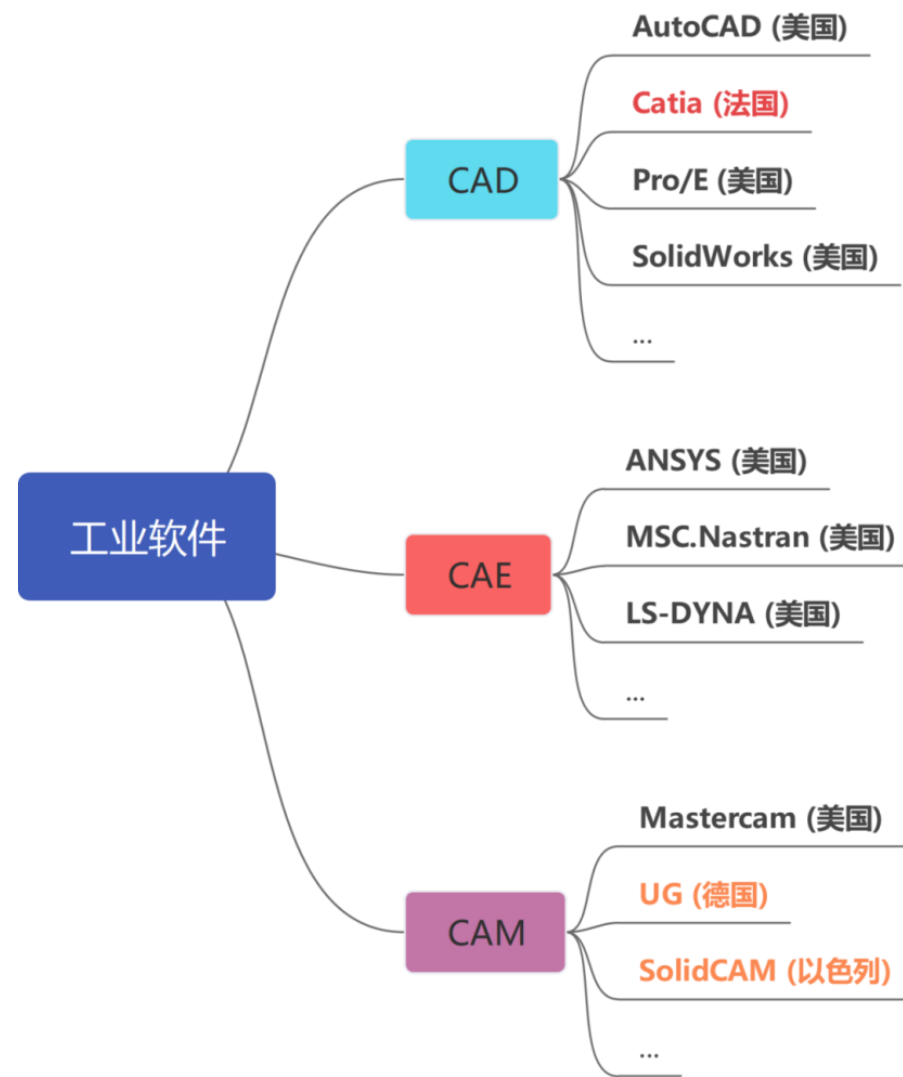
计算机辅助设计（CAD）



计算机辅助设计



- iPhone 13系列采用最新的A15仿生芯片，指甲盖大小的面积上集成了150亿个晶体管！再说一遍，是150亿，这样的数量让设计人员用手工来画是不可能的。



EDA技术

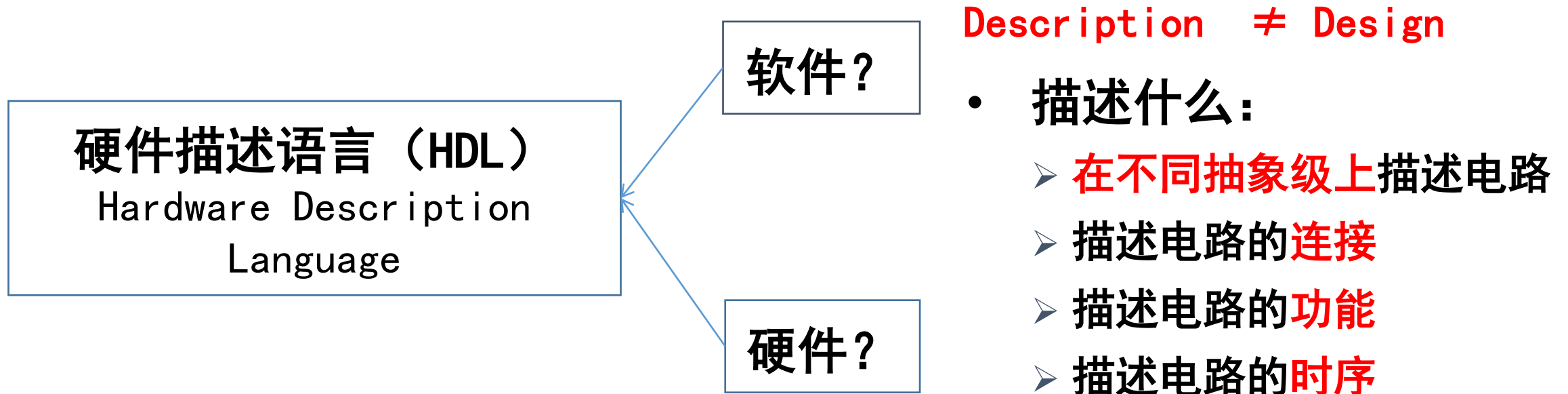
- EDA (Electronic Design Automation) 电子设计自动化
- 以计算机为工具，在EDA软件平台上，用硬件描述语言完成设计文件，然后由计算机自动地完成逻辑编译、化简、分割、综合、优化、布局、布线和仿真，直至对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射和编程下载等工作。
- **设计者**：从概念、算法、协议等设计电子系统
- **计算机**：电路设计、性能分析到设计出IC版图或PCB版图

数字设计的发展



什么是硬件描述语言

- 具有特殊结构能够对**硬件逻辑电路的功能**进行描述的一种高级编程语言



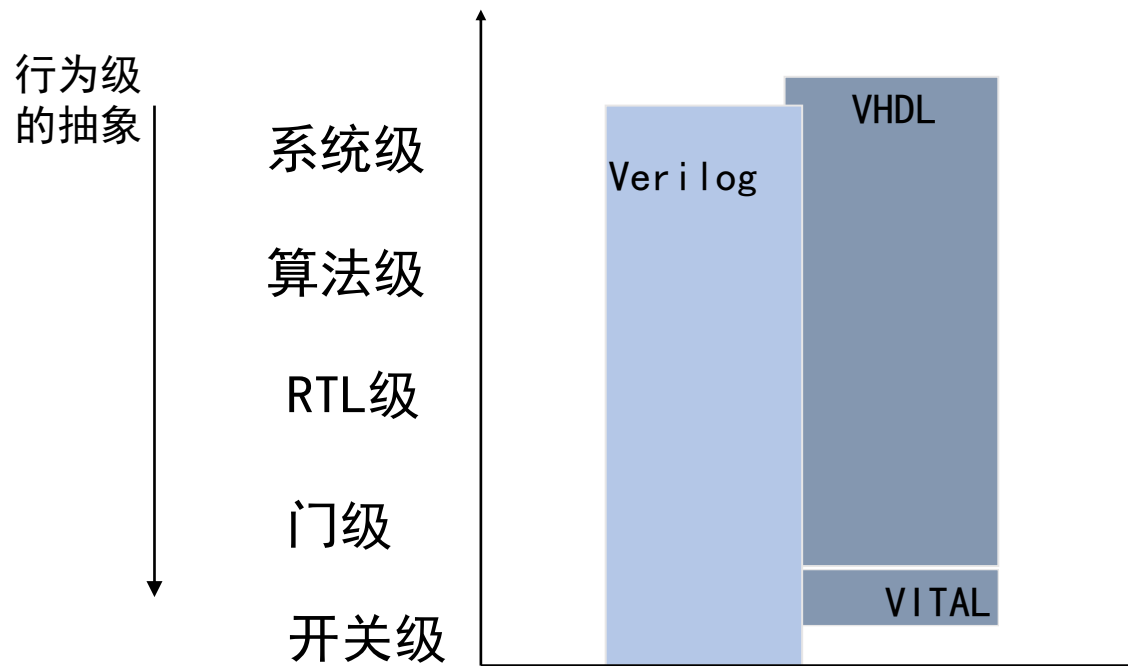
- Verilog HDL: 一种**硬件描述语言**，以文本形式来描述数字系统硬件的结构和行为的语言，可以表示**逻辑电路图**、**逻辑表达式**，也可以表示数字逻辑系统所完成的**逻辑功能**。

为什么要使用硬件描述语言

- 电路的逻辑功能容易理解；
- 便于计算机对逻辑进行分析处理；
- 把逻辑设计与具体电路的实现分成两个独立的阶段来操作；
- 逻辑设计与实现的工艺无关；
- 逻辑设计的资源积累可以重复使用；
- 可以由多人共同更好更快地设计非常复杂的逻辑电路（几十万门以上的逻辑系统。

VHDL vs. Verilog

- VHDL:
 - 起源于ADA语言
 - 侧重于**系统级**描述
 - 含有大量的内置数据类型和用户自定义类型
- Verilog:
 - 起源于C语言
 - 侧重于**电路级**描述
 - 数据类型由语言本身定义，含有专门描述连线等的类型



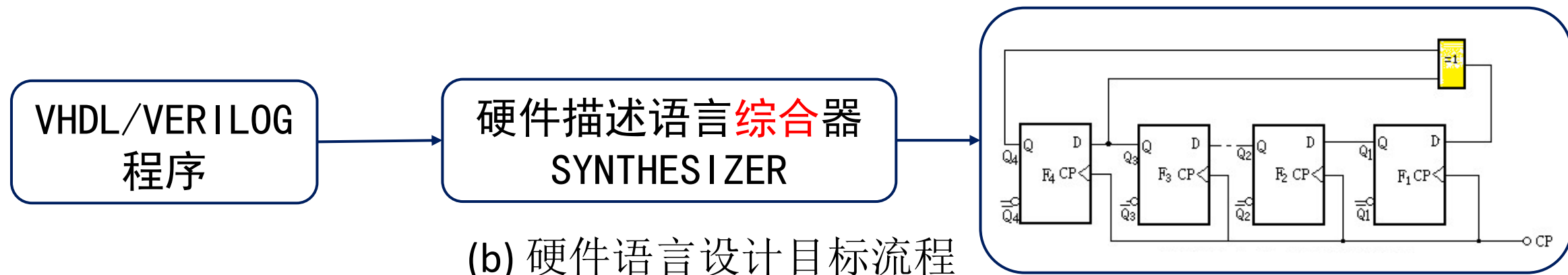
Verilog与VHDL建模能力的比较

Verilog 应用较广泛、起步更容易！

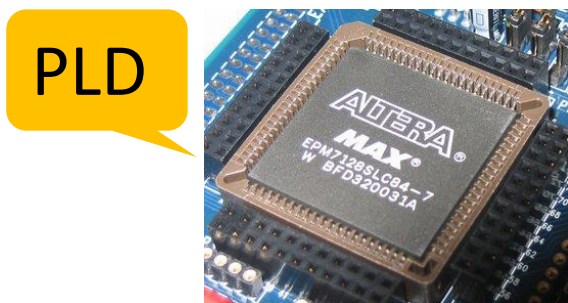
软件描述语言和硬件描述语言的区别



(a) 软件语言设计目标流程



(b) 硬件语言设计目标流程



Verilog语言的层次

• 行为描述语言&结构描述语言

系统级：

用高级语言结构实现设计模块的外部性能模型；

算法级：

用高级语言结构实现设计算法模型；

RTL级（寄存器传输级）：

描述数据在寄存器之间流动和如何处理这些数据的模型；

门级：

描述逻辑门以及逻辑门之间的连接模型；

开关级：

描述器件中三极管和存储节点以及它们之间连接的模型。

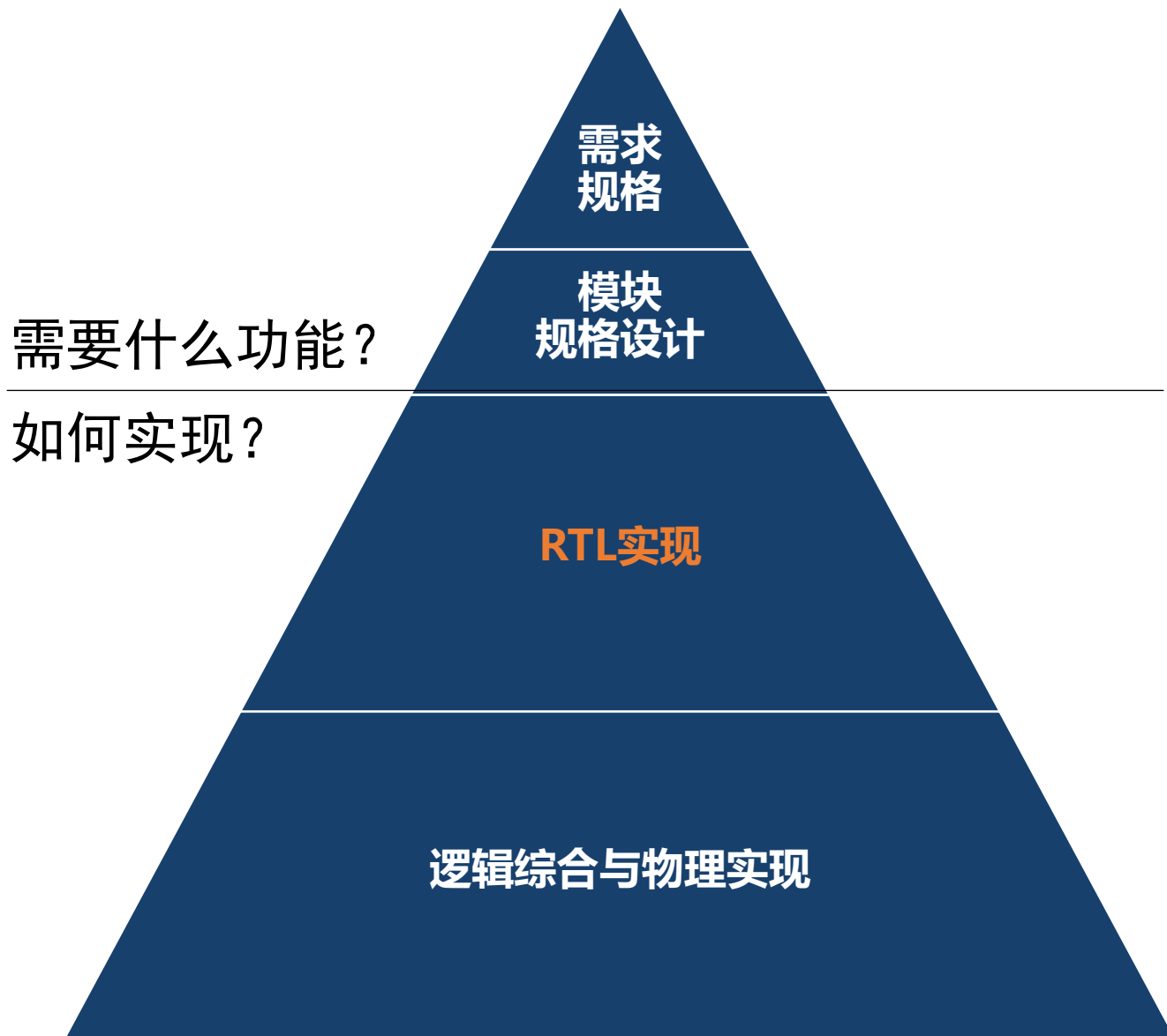
行为级描述

侧重对模块**行为功能**
的抽象描述

结构级描述

侧重对模块**内部结构实现**
的具体描述

设计层次



系统架构师:

系统级或算法级，描述系统的规格。

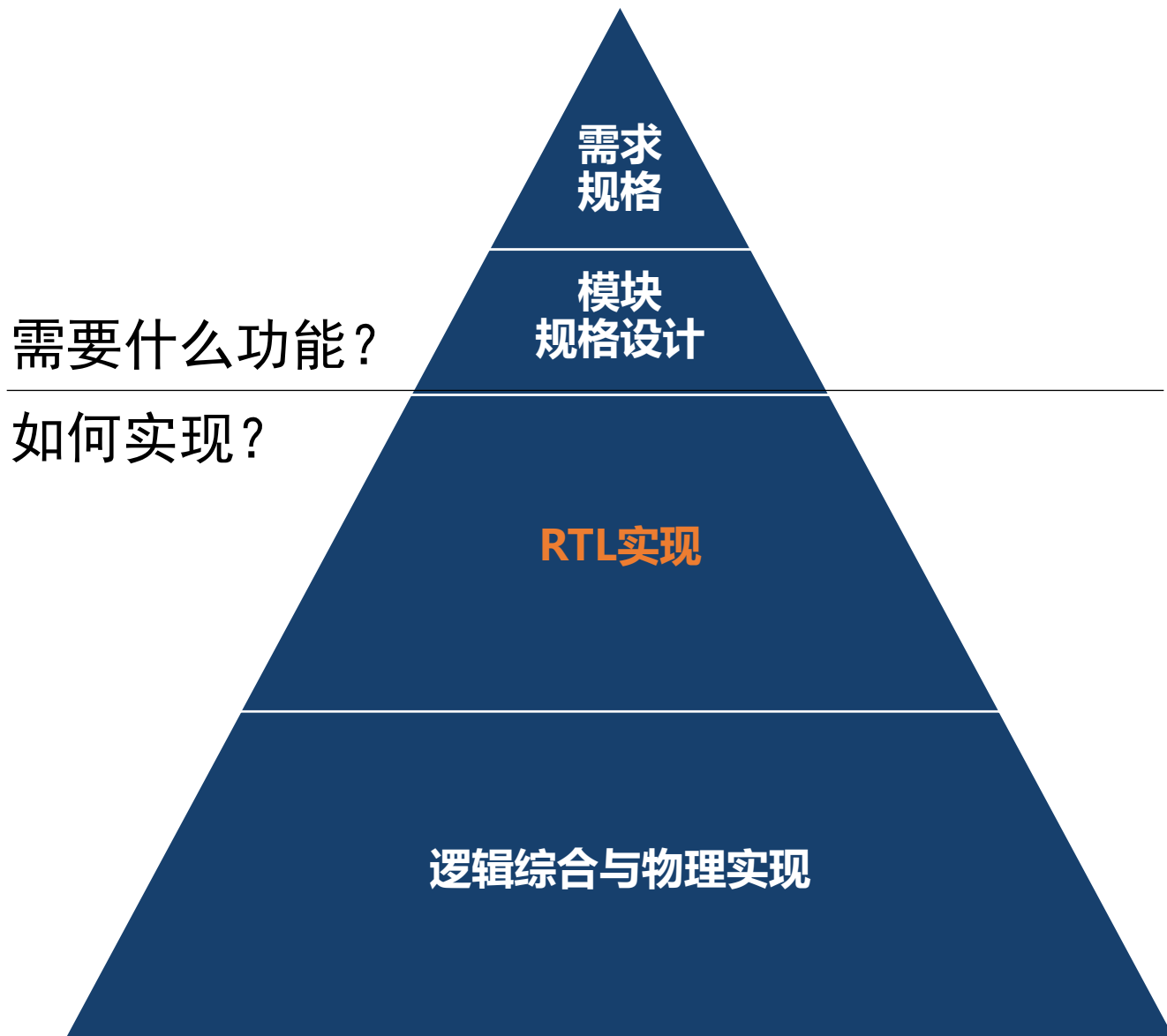
逻辑设计工程师:

使用Verilog RTL级代码，可综合，精确到时钟周期。

物理设计工程师:

对门级网表进行布局布线，将其做成实际的芯片。

设计层次



验证工程师：
对设计好的电路进行验证。

描述方式

```
module decoder_38_struct(  
    input [2:0] data_in,  
    input [2:0] en,  
    output reg[7:0] data_out  
);  
  
// 内部连线定义  
wire en_out, en0_out, en1_not;  
  
// 调用基本库元件  
not not0(en0_out, en[0]);  
not not1(en1_out, en[1]);  
and and0(en_out, en0_out, en1_not, en[2]);  
endmodule
```

结构化描述

```
module decoder_38_dataflow(  
    input [2:0] data_in,  
    input [2:0] en,  
    output [7:0] data_out  
);  
  
assign data_out[5] = data_in[2] && ~data_in[1]  
                    && data_in[0];  
// 或 assign data_out[5] = (data_in == 3'd5);  
  
// 其他赋值语句  
endmodule
```

数据流描述

```
module decoder_38(  
    input [2:0] data_in,  
    input [2:0] en,  
    output reg[7:0] data_out  
);  
  
always @( * ) begin //非完整实现，需要自行补全其他信号处理  
    case( data_in )  
        3'b000: data_out = 8'b0000_0001;  
        3'b001: data_out = 8'b0000_0010;  
        3'b010: data_out = 8'b0000_0100;  
        3'b011: data_out = 8'b0000_1000;  
        3'b100: data_out = 8'b0001_0000;  
        3'b101: data_out = 8'b0010_0000;  
        3'b110: data_out = 8'b0100_0000;  
        3'b111: data_out = 8'b1000_0000;  
    endcase  
endmodule
```

行为描述

结构化描述：通过调用库中的元件或已设计好的模块来完成设计。

数据流描述：主要使用assign连续赋值语句，多用于组合逻辑电路。

行为描述：从电路的功能出发，关注逻辑电路输入、输出的因果关系。

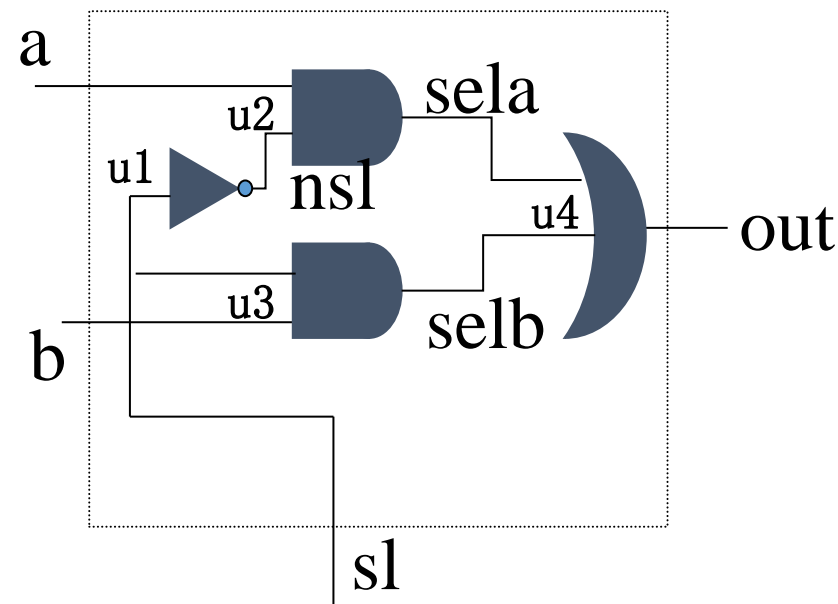
即在何种输入条件下产生何种输出，描述的是一种行为特性。

在较复杂的电路设计中，三种描述方法往往混合使用。

结构级Verilog HDL

- Verilog内部带有描述基本逻辑功能的基本单元(primitive)，如and门。
- 综合产生的结果网表通常是结构级的。
- 结构级Verilog适合开发小规模元件

```
module muxtwo (out, a, b, sl); // 二选一多路选择器
    input a, b, sl;
    output out;
    not u1 (nsl, sl); // nsl = ~sl
    and #1 u2 (sela, a, nsl); // sela = a & nsl
    and #1 u3 (selb, b, sl); // selb = b & sl
    or #2 u4 (out, sela, selb); // out = sela | selb
endmodule
```

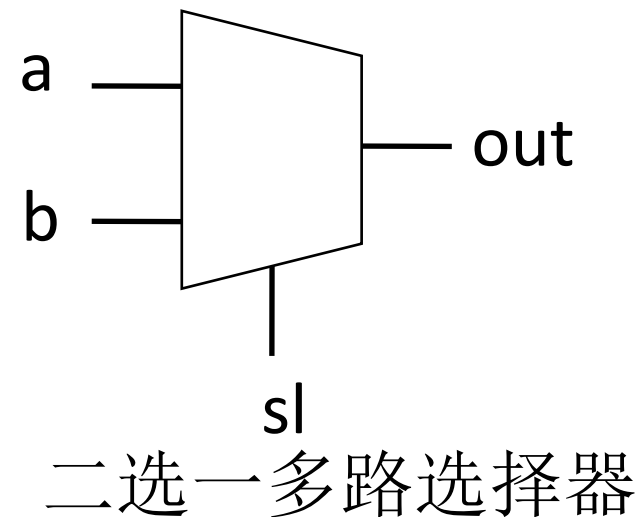


二选一多路选择器

行为级Verilog HDL

- 在行为级模型中，逻辑功能描述采用高级语言结构，如@、while、wait、if、case。
- RTL模块是可综合的，它是行为模块的一个子集合。
- 行为级Verilog

```
module muxtwo (out, a, b, sl); //二选一多路选择器
    input a, b, sl;    //输入信号名
    output out;        //输出信号名
    reg out;
    always @( sl or a or b)
        if (! sl) out = a; //控制信号sl为非，输出与输入信号a一致
        else out = b;      //控制信号sl为非，输出与输入信号b一致
endmodule
```

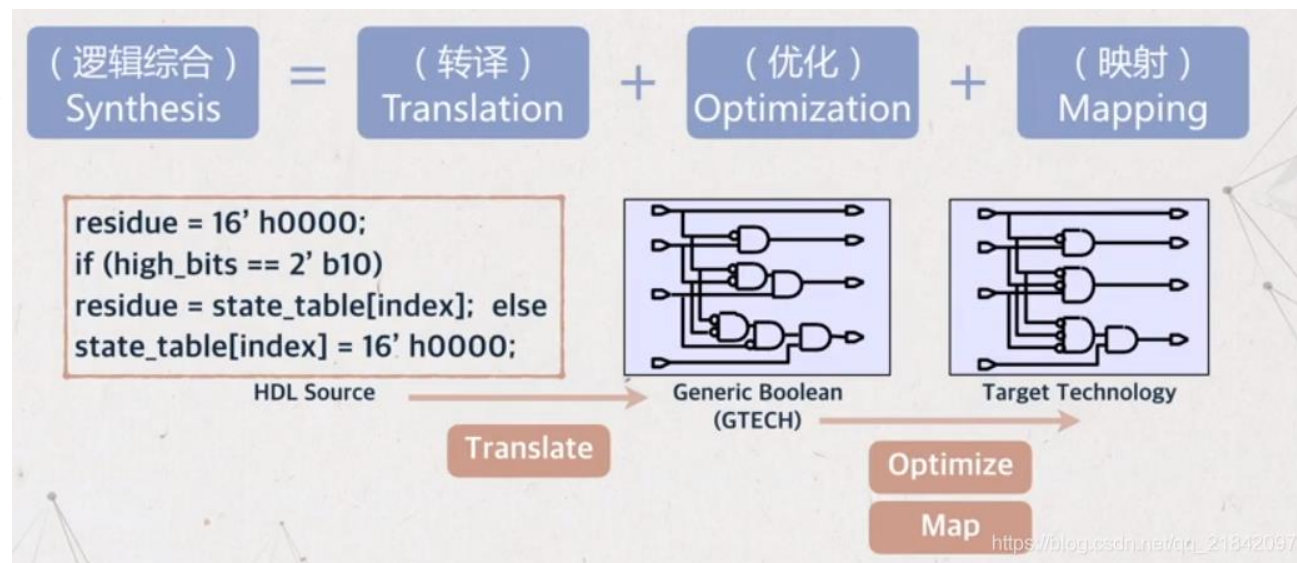


RTL与综合

■ 综合：

将HDL语言、原理图等设计输入翻译成由与、或、非等基本逻辑单元组成的门级连接，并根据设计目标和要求优化所生成的逻辑链接，输出门级网表文件。

■ RTL级语言最重要的特性就是可综合。



■ 典型的RTL级设计包括：

组合逻辑描述、时序逻辑描述、时钟域描述

学生的总结

- **Verilog是硬件描述语言**，用语言描述的方式进行电路设计，最终要实现出硬件电路。verilog只是简化了电路设计的工作量，本质上就是设计数字电路，永远绕不开电路这点！
- 评价一个verilog代码的好坏是看**最终实现的功能和性能**。合理的设计方法是首先理解要设计的电路，也就是把需求转化为数字电路，对此电路的结构和连接十分清晰，然后再用verilog表达出这段电路。
- 要理解硬件的并行性，**搞清楚时序关系**，一定要摒弃顺序执行的思维。
- 建议Verilog语言采用“学、用、查”的方式，**“用”着“用”着就会了**。

初学Verilog的几点提醒

要知道 verilog 是硬件描述语言，它应该是用于描述电路的。但是它的语法较为宽松，以致于将其用于描述算法时也能符合语法规则。但是如果这么做 vivado 会不开心，因为这样做出来的电路往往是不可综合的。综合，简单的说就是按照代码中你对你所设计的电路的描述，生成你所期望的电路。但是如果你一开始脑海里就没有过任何电路，你用 verilog 描述了一个算法，然后扔给 vivado：“给爷综！”那你也太难为人家了。

有的读者可能会疑问：电路是什么呢？怎样才叫设计了一个电路呢？这就回归到数字逻辑设计课程理论课部分的内容了。这么说吧，电路就是由逻辑门，锁存器，触发器，导线等组成的一个。。。呃。。。东西。设计电路，就是画出一张电路图，可以用软件画，也可以在纸上画，或者更随便一点，在脑海里画。在哪里画并不重要，重要的是你设计出来的真的是一个电路，而不是算法。

Verilog语言中只有很少一部分是用于设计电路的。

Verilog HDL与C语言的最大区别

- Verilog HDL语言是**并行的**，即具有在同一时刻执行多任务的能力，因为在实际硬件中许多操作都是在同一时刻发生的。一般来讲，**计算机编程语言是非并行的**。
- Verilog HDL语言**有时序**的概念，因为在硬件电路中从输入到输出**总是有延迟存在**的。
- 阻塞与非阻塞赋值！

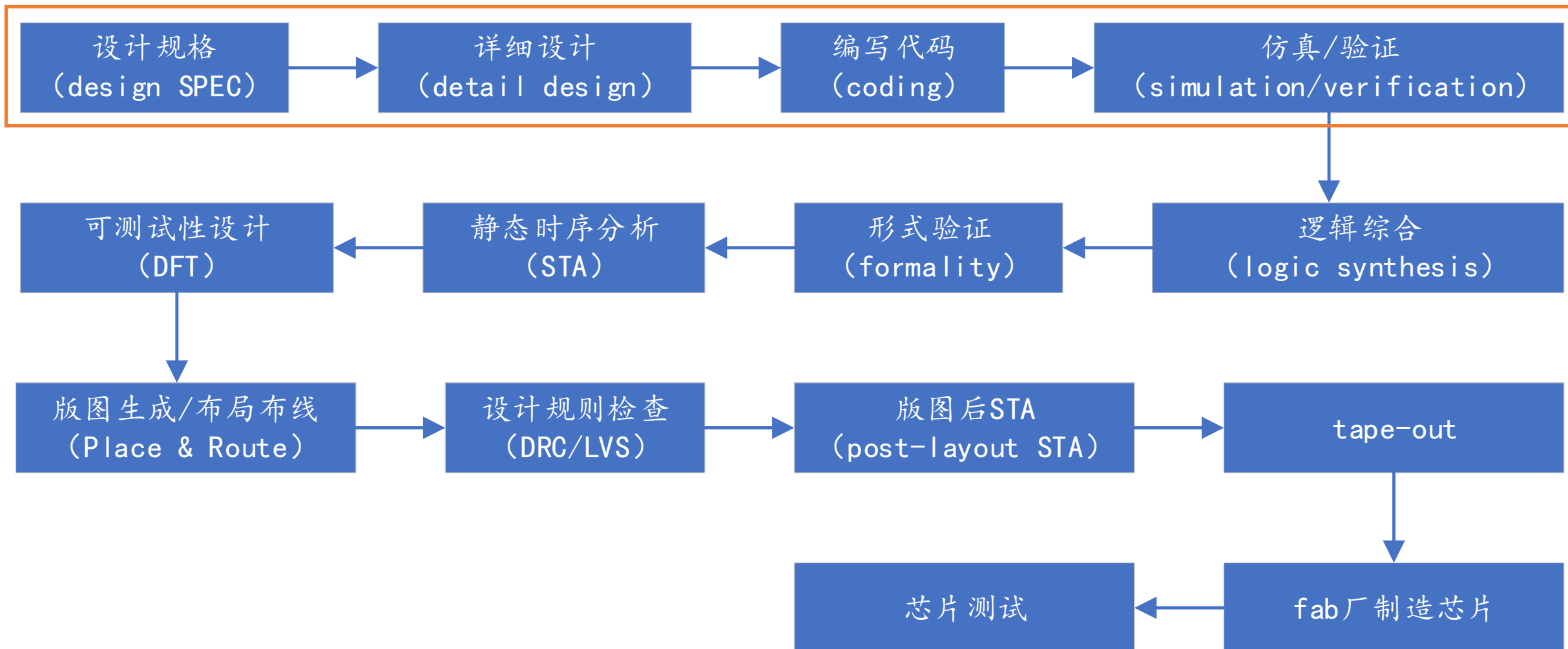


注意

Verilog硬件描述语言

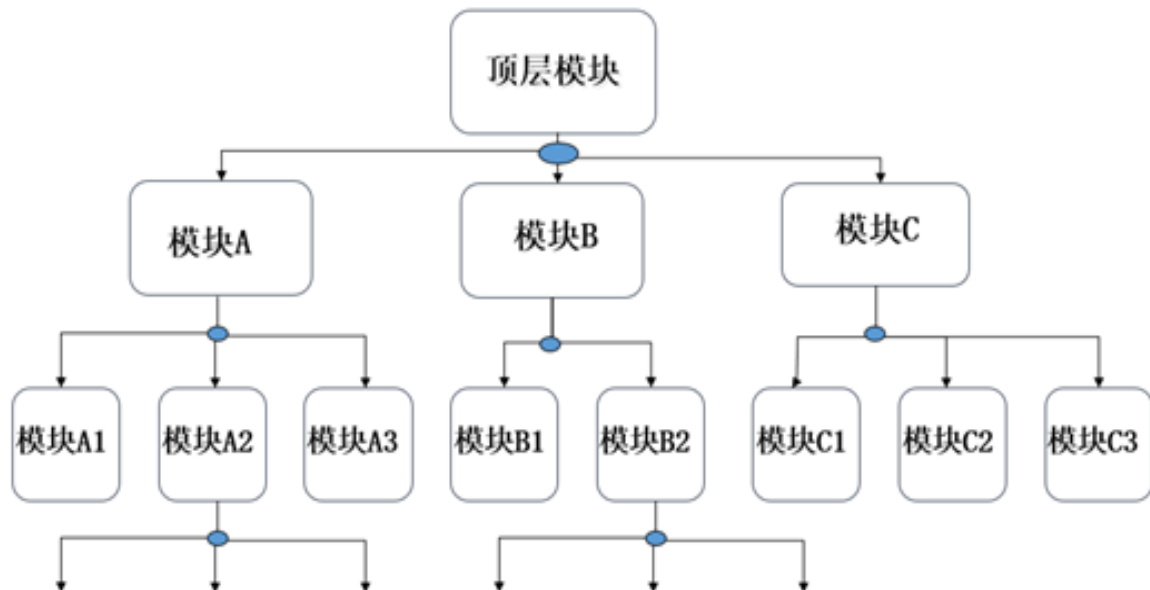
- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和条件表达式
- 模块的测试

数字集成电路开发流程



Verilog的设计方法-自顶向下的结构化设计

- 从顶层模块开始，先确定好顶层模块的输入输出和内部的逻辑功能，然后逐层分解成更小的功能模块，总体的设计步骤就是“**自顶向下、模块划分、逐层细化**”，直到子模块的功能较为纯粹、单一。最终采用Verilog语言直接描述硬件行为，由逻辑综合工具自动完成从HDL到门级电路的转换。



- 模块划分

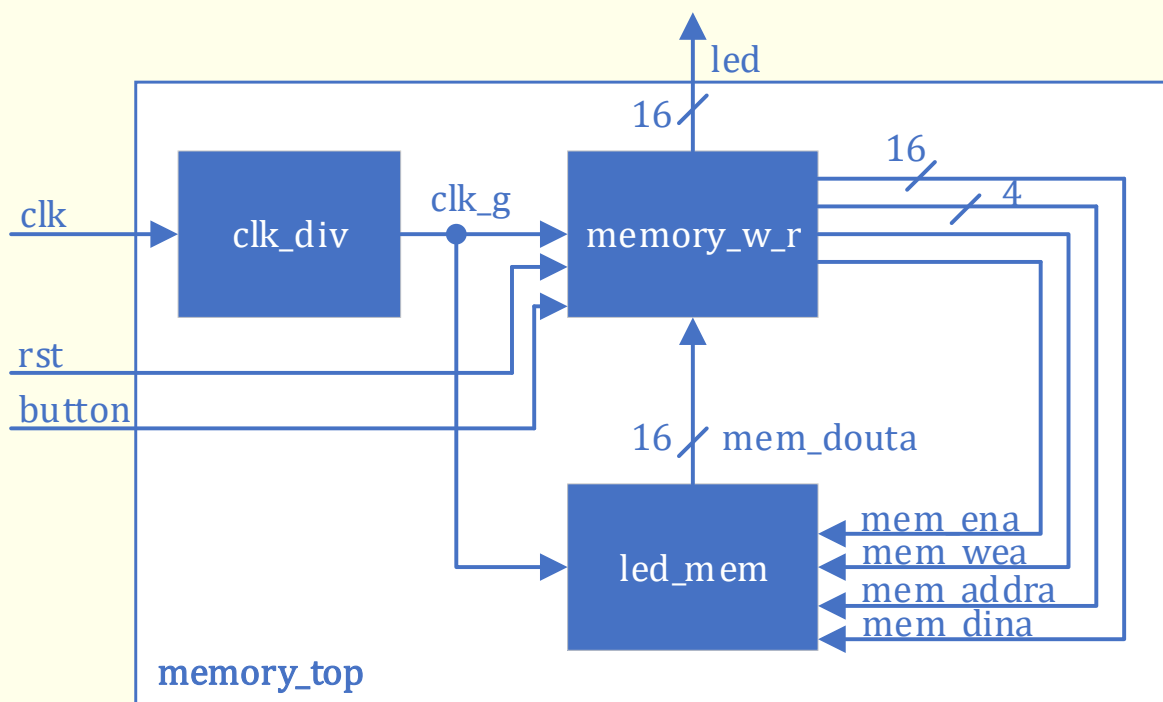
- 功能说明

描述实现的功能，框图展示系统的输入、输出、功能模块、内部数据通路和重要的控制信号（包括必要的说明）。

- 设计代码

设计框图

- 展示系统的**输入、输出、功能模块及说明、内部数据通路及重要的控制信号。**



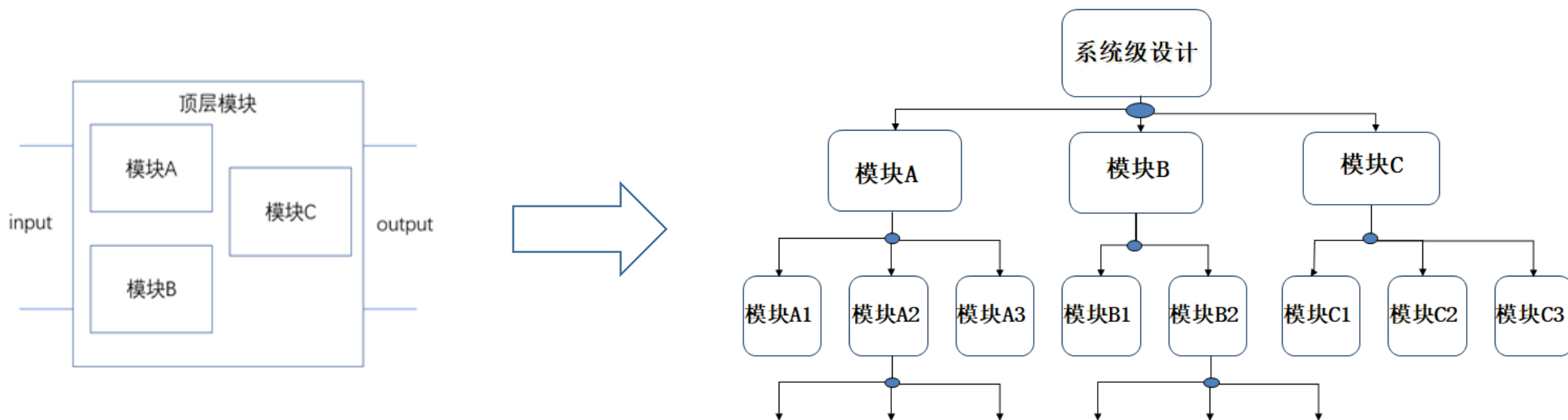
- 系统分为3个模块：
- clk_div：用于时钟分频；
- led_mem：用于存储LED灯依次显示的序列；
- memory_w_r：用于控制存储器的读写，以及将读取回来的序列，显示到LED上；

流水灯框图

从“模块”开始搭电路-模块定义

- Verilog的基本设计单元是模块（module），模块的实例化建立了模块描述的层次，通过模块端口的连接，把下层模块连接到了上层模块中。
- 模块包括接口描述和逻辑功能描述两部分。（电路外特性）
- 模块定义包括4个主要部分：

端口定义、I/O说明、内部信号声明和功能定义，在module和endmodule 之间。



从“模块”开始搭电路-模块定义

- **module module_name**(
 input wire [width-1:0] **port_name1**,
 input wire [width-1:0] **port_name2**,
 output wire/reg [width-1:0] **port_name3**
); //在模块名后面的()中做端口定义和I/O说明

//内部信号声明

wire [width-1:0] **name1**;

reg [width-1:0] **name2**;

//功能定义

//用**assign**语句和**always**块描述

endmodule

```
module some_module (  
    input wire clk ,  
    input wire rst_n,  
    input wire sel ,  
    input wire [3:0] addr ,  
    output reg data  
);  
  
//模块代码  
  
endmodule
```

模块基本结构

模块声明:

module module_name (port_list); //模块名 (端口声明列表)

端口定义:

input[信号位宽]; //输入声明

output [信号位宽]; //输出声明

...

数据类型说明:

reg [信号位宽]; //寄存器类型声明

wire [信号位宽]; //线网类型声明

parameter; //参数声明

...

功能描述: //主程序代码

assign $a=b+c$

always@(posedge clk or negedge reset)

function

task

...

endmodule

模块声明

module module_name (port_list); //模块名（端口声明列表）

- “模块名”是模块唯一的标识符，区分大小写。
- “端口列表”是由模块各个输入、输出和双向端口组成的列表。
(input,output,inout)
- 端口用来与其它模块进行连接，括号中的列表以“,”来区分，列表的顺序没有规定，先后自由。

```
module muxtwo (out, a, b, sl);
```

```
module muxtwo (out, a, b, sl); //二选一多路选择器
    input a, b, sl;
    output out;
    reg out;
    always @( sl or a or b)
        if (! sl) out = a;
        else out = b;
endmodule
```

端口定义

input[信号位宽]; //输入声明

output [信号位宽]; //输出声明

inout[信号位宽]; //输入/输出端口

input a, b, sl; //输入信号名

output out; //输出信号名

```
module muxtwo (out, a, b, sl); //二选一多路选择器
```

```
    input a, b, sl;    //输入信号名
```

```
    output out;    //输出信号名
```

```
    reg out;
```

```
    always @( sl or a or b)
```

```
        if (! sl) out = a;
```

```
            //控制信号sl为非, 输出与输入信号a一致
```

```
        else out = b;
```

```
            //控制信号sl为非, 输出与输入信号b一致
```

```
endmodule
```

- 输入端口： 模块从外界读取数据的接口，是连线类型
- 输出端口： 模块向外界传输数据的接口，是连线或寄存器型
- 输入输出端口： 可读取数据也可接收数据的端口，数据是双向的，是连线型
- 端口定义也可以写在端口声明的位置：

```
module module_name(input port1,input port2,...output port1,...);
```

数据类型说明

```
reg [信号位宽]; //寄存器类型声明
wire [信号位宽]; //线网类型声明
parameter; //参数声明
```

```
reg out; //输出信号reg类型
```

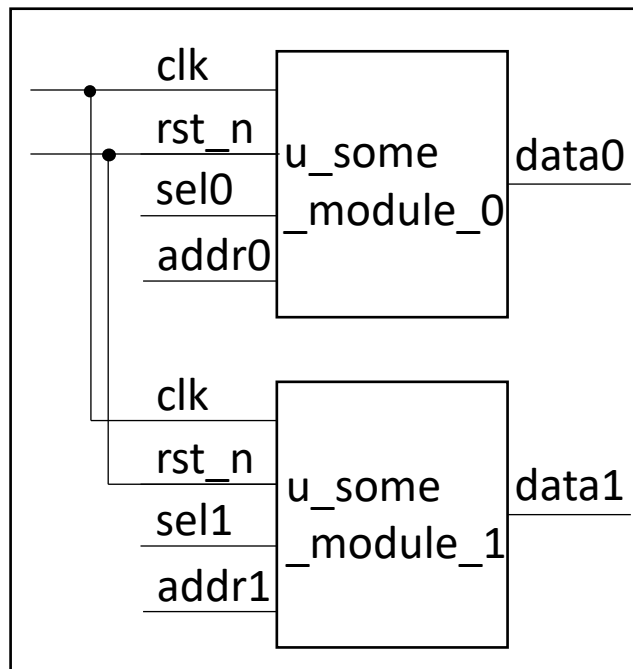
```
module muxtwo (out, a, b, sl); //二选一多路选择器
    input a, b, sl; //输入信号名
    output out; //输出信号名
    reg out;
    always @( sl or a or b)
        if (! sl) out = a;
            //控制信号sl为非, 输出与输入信号a一致
        else out = b;
            //控制信号sl为非, 输出与输入信号b一致
endmodule
```

- 模块中用到的所有信号都必须进行数据类型的定义。
- 声明变量的数据类型后, 不能再进行更改
- 在VerilogHDL中只要在使用前声明即可
- 声明后的变量、参数不能再次重新声明
- 声明后的数据使用时的配对数据必须和声明的数据类型一致

从“模块”开始搭电路-模块实例化

- 一个模块在另外一个模块中实例化，等效于实际电路中加入了被实例化的电路。
- 模块实例应用u_x_x表示（多次例化用序号0、1、2等表示）；

```
module_name instance_name (  
    .port_name1(data_name1),  
    .port_name2(data_name2),  
    .....);
```



```
wire      sel0 ;  
wire      sel1 ;  
wire [3:0] addr ;  
wire      data0;  
wire      data1;  
  
some_module u_some_module_0 (  
    .clk      (clk  ),  
    .rst_n    (rst_n),  
    .sel      (sel0 ),  
    .addr     (addr ),  
    .data     (data0)  
);  
  
some_module u_some_module_1 (  
    .clk      (clk  ),  
    .rst_n    (rst_n),  
    .sel      (sel1 ),  
    .addr     (addr ),  
    .data     (data1)  
);
```

Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和条件表达式
- 模块的测试

标识符

- 赋给对象的唯一名称，可以是字母、数字、下划线和符号“\$”的组合，且首字符只能是字母或者下划线。
- 大小写敏感。
- 注释有两种：
 - 以“/*”开头，以“*/”结束。 /*这是注释*/
 - 以“//”开头到本行结束。 //这也是注释

数据类型

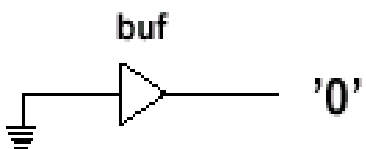
- 共有19种数据类型，分为物理数据类型和抽象数据类型
- 物理数据类型：与实际硬件电路有明显的映射关系
 - `wire` (连线型)、`reg` (寄存器型)、`memory` (存储器型) 等
- 抽象数据类型：用于进行辅助设计和验证的数据类型
 - 整型`integer`、时间型`time`、实型`real`、参数型`parameter` 等
- 数据类型还可分为常量和变量
 - 常量：数字、参数型`parameter`
 - 变量：`wire` (连线型)、`reg` (寄存器型)、`(memory)` 存储器型等

常量—数字

- 整数：
 - 二进制 (b或B)、十进制 (d或D)、十六进制 (h或H)、八进制 (o或O)
 - 表达方式：
 - $\langle \text{位宽} \rangle \langle \text{进制} \rangle \langle \text{数字} \rangle$
 - $8'b10101100$ // 位宽为8的数的二进制表示, 'b表示二进制
 - $8'ha2$ // 位宽为8的数的十六进制表示, 'h表示十六进制
 - 没有数字位宽采用默认位宽 (这由具体的机器系统决定, 但至少32位)
 - 在 $\langle \text{数字} \rangle$ 这种描述方式中, 采用默认进制 (十进制)

四种逻辑值

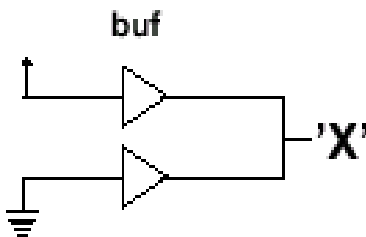
- Verilog语言规定了4种基本的逻辑值



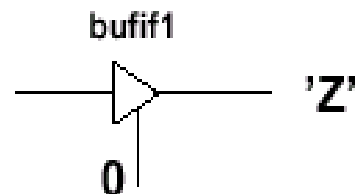
低电平、逻辑0、“假”、接地



高电平、逻辑1、“真”



不确定或未知的逻辑状态

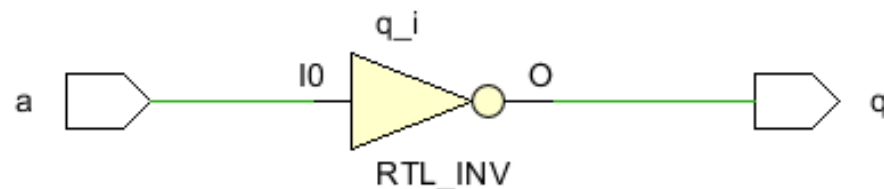


高阻态（一般情况，电路分析时可做开路理解。）

wire型

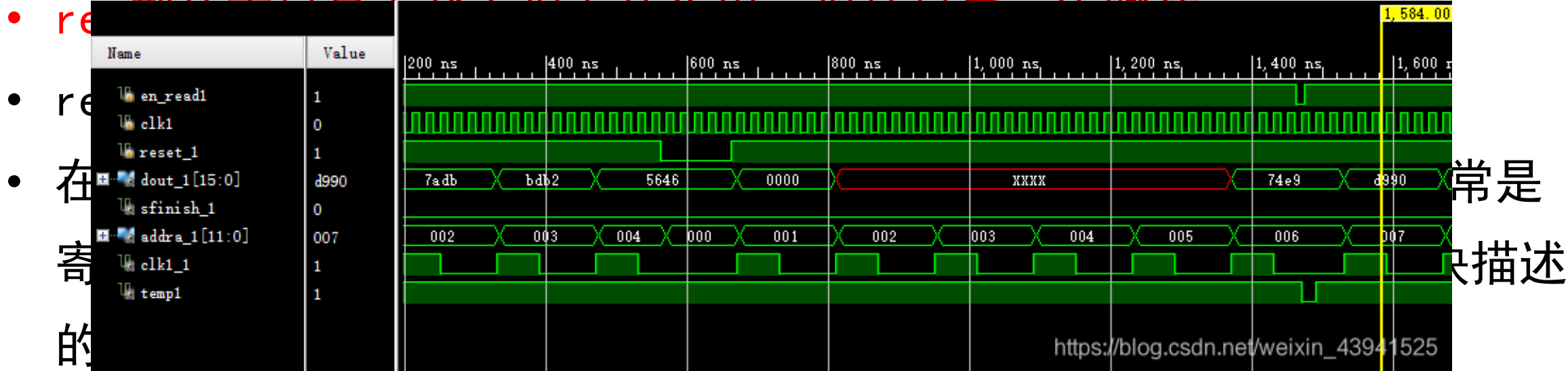
- 硬件电路中元件之间实际连线的抽象
 - 如：器件的管脚，内部器件如与非门的输出等。
- 不存储逻辑值，必须由器件驱动。
- 通常由assign进行赋值。

如 `assign q = ~ a;`



- 当一个wire 类型的信号没有被驱动时，缺省值为Z(高阻)。
- 信号没有定义数据类型时，缺省为 wire 类型。

reg型



- reg类型要在reset的时候赋初值，没有赋值情况下默认为不定态“X”。
- reg型和wire型的区别：
 - reg型保持最后一次赋值
 - wire型需要持续的驱动

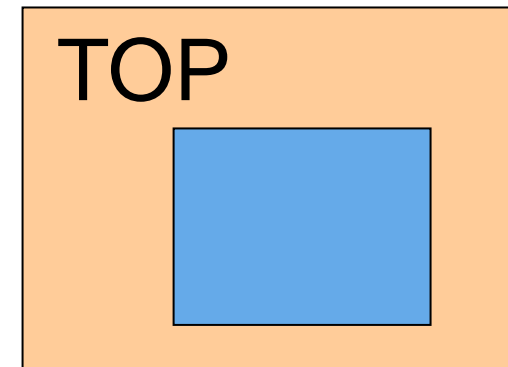
参数型 (parameter)

- 定义格式：
 - `parameter 参数名1=表达式1, ..., 参数名n=表达式n;`
 - `parameter length=32, weight=16;` // 定义了两个参数
 - 其中: 表达式既可以是常数, 也可以是表达式。
 - 参数定义完后, 程序中所有的参数名将被替换为相应的表达式。
- 属于常量, 常用来定义延迟时间和变量的位宽。
- 在模块或实例引用时, 可通过参数传递改变在被引用模块或实例中已定义的参数。

参数型 (parameter)

```
module TOP (NewA, NewB, NewS, NewC);  
input  NewA, NewB;  
output NewS, NewC;  
defparam Ha1.OR_DELAY=5, //实例Ha1中的参数OR_DELAY。  
        Ha1.AND_DELAY=2; //实例Ha1中参数的AND_DELAY。  
HA Ha1(NewA, NewB, NewS, NewC);  
endmodule
```

```
module HA(A,B,S,C);  
input  A,B;  
output S,C;  
parameter AND_DELAY=1,  
        OR_DELAY=2;  
assign #OR_DELAY  S=A+B;  
assign #AND_DELAY C=A&B;  
endmodule
```



参数型 (parameter)

```
module TOP3(NewA,NewB,NewS,NewC);  
input NewA, NewB;  
output NewS,NewC;  
HA #(5,2) Ha1 (NewA, NewB, NewS, NewC);  
//第1个值5赋给参数AND_DELAY, 该参数在模块HA中说明。  
//第2个值2赋给参数OR_DELAY, 该参数在模块HA中说明。  
endmodule
```

数据类型声明

reg [width-1:0] 变量名1, 变量名2; //reg型声明

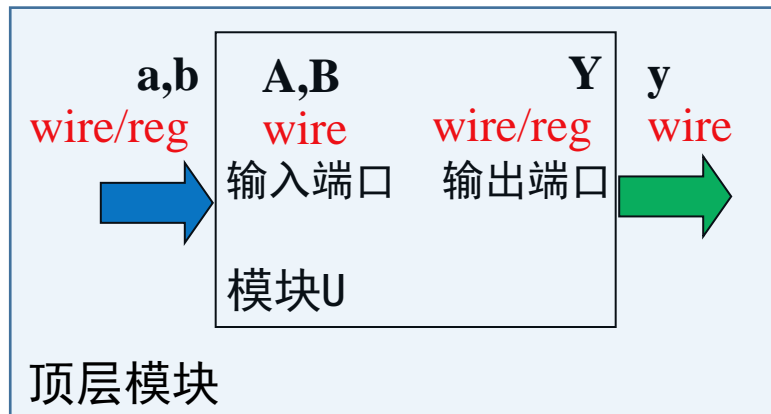
wire [width-1:0] 变量名1, 变量名2; //wire型声明

parameter 参数名1=表达式1, 参数名2=表达式2 ; //参数声明

- 模块中用到的所有信号都必须进行数据类型的声明。
- 在Verilog HDL中变量和参数只要在使用前声明即可。
- 声明变量的数据类型后，不能再更改（不能再次重新声明）。
- 声明后的数据使用时的配对数据必须和声明的类型一致。

如何选择正确的数据类型？

- 端口：(input、output)
- 可以由reg或wire连接驱动，但它本身只能驱动wire连接。



- 变量：
- assign赋值语句左侧数据类型，必须是wire类型；
- 过程块（always块 或 initial块）中被赋值的左侧数据类型，必须把它声明为reg类型变量。

如何选择正确的数据类型？

模块U:

```
module U(  
  output wire Y,  
  input wire A, B);
```

//功能描述

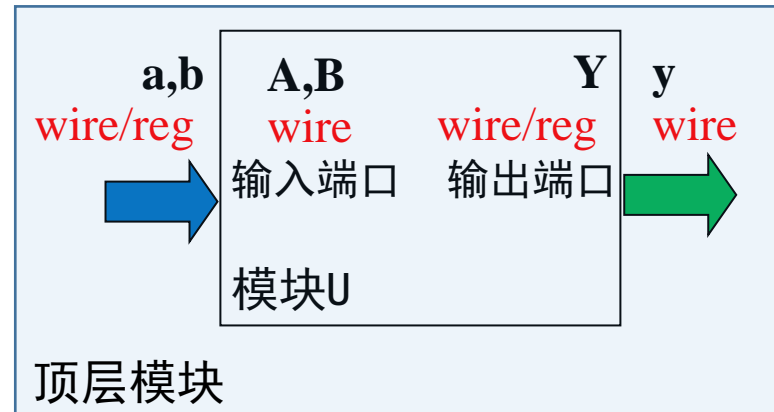
```
endmodule
```

顶层模块: module top(
 端口定义
);

```
wire y;  
reg a, b;
```

```
U u1(  
  .Y(y),  
  .A(a),  
  .B(b)  
);
```




```
//其他逻辑  
endmodule
```



模块实例化不是参数传递

模块端口与外部信号按照其名字进行连接

如何选择正确的数据类型？

- 在过程块（always initial）中对变量赋值时，忘了把它定义为寄存器类型（reg）或已把它定义为连接类型了（wire）
 - 把实例的输出连接出去时，把它定义为寄存器类型
 - 把模块的输入信号定义为寄存器类型。
- 这是经常犯的三个错误！！

Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和循环语句
- 模块的测试

运算符

- 按功能分为以下几类：

① 算术运算符 +, -, *, /, %

② 逻辑运算符: && , || , !

③ 位运算符: ~, | , ^ , & , ^~

④ 赋值运算符: =, <=

⑤ 关系运算符: > , < , >= , <=

⑥ 条件运算符: ? :

⑦ 移位运算符: << , >>

⑧ 拼接运算符: { }

⑨ 等式运算符: ==, !=, ===, !==

运算符—续

- **算术运算符：** +, -, *, /, %
 - 在进行整数的除法运算时，结果要略去小数部分，只取整数部分；
 - 进行取模运算时（%，亦称求余运算符），结果的符号位采用模运算符中第一个操作数的符号。
 - 在进行算术运算时，如**有一个操作数为不确定值x**，则结果也为不确定值x。
- **逻辑运算符：** && , || , !
 - &&和||是双目运算符，**优先级别低于关系运算符**，而 ! 高于算术运算符。
- **位运算符：** ~, |, ^, &, ^^
 - 在不同长度的数据进行位运算时，系统会自动的将两个数右端对齐，位数少的操作数会在相应的高位补0，**两个操作数按位进行操作**。

运算符—续

- **关系运算符：** $>$, $<$, $>=$, $<=$
 - 如果关系运算是假的，则返回值是0，如果关系是真的，则返回值是1。
 - 关系运算符的优先级别低于算数运算符。如： $a < \text{size} - 1$ 等同于 $a < (\text{size} - 1)$
 - 如果**某个操作数值不定**，则关系是模糊的，返回值是不定值。
- **移位运算符：** $<<$, $>>$
 - $a >> n$ 其中 a 代表要进行移位的操作数， n 代表要移几位。这两种移位运算都用0来填补移出的空位。如果操作数已经定义了位宽，则进行移位后操作数改变，但是其**位宽不变**。
- **拼接运算符：** $\{ \}$
 - $\{\text{信号1的某几位}, \text{信号2的某几位}, \dots, \text{信号n的某几位}\}$ 将某些信号的某些为列出来，**中间用逗号分开**，最后用大括号括起来表示一个整体的信号。在位拼接的表达式中**不允许存在没有指明位数的信号**。
 - $\{a, b[3:0], w\}$ // 等同于 $\{a, b[3], b[2], b[1], b[0], w\}$

运算符—续

- 等式运算符：==, !=, ===, !==
 - ==, !=: X和Z进行比较时为X
 - ===, !==: 操作数相同结果为1，常用于case表达式的判别。

===	0	1	x	z		==	0	1	x	z
0	1	0	0	0		0	1	0	x	x
1	0	1	0	0		1	0	1	x	x
x	0	0	1	0		x	x	x	x	x
z	0	0	0	1		z	x	x	x	x

运算符优先级

!	~		
*	/	%	
+	-		
<<	>>		
<	<=	>	>=
==	!=	===	!==
&			
^	^~		
&&			
?:			

高 优 先 级 别



低 优 先 级 别

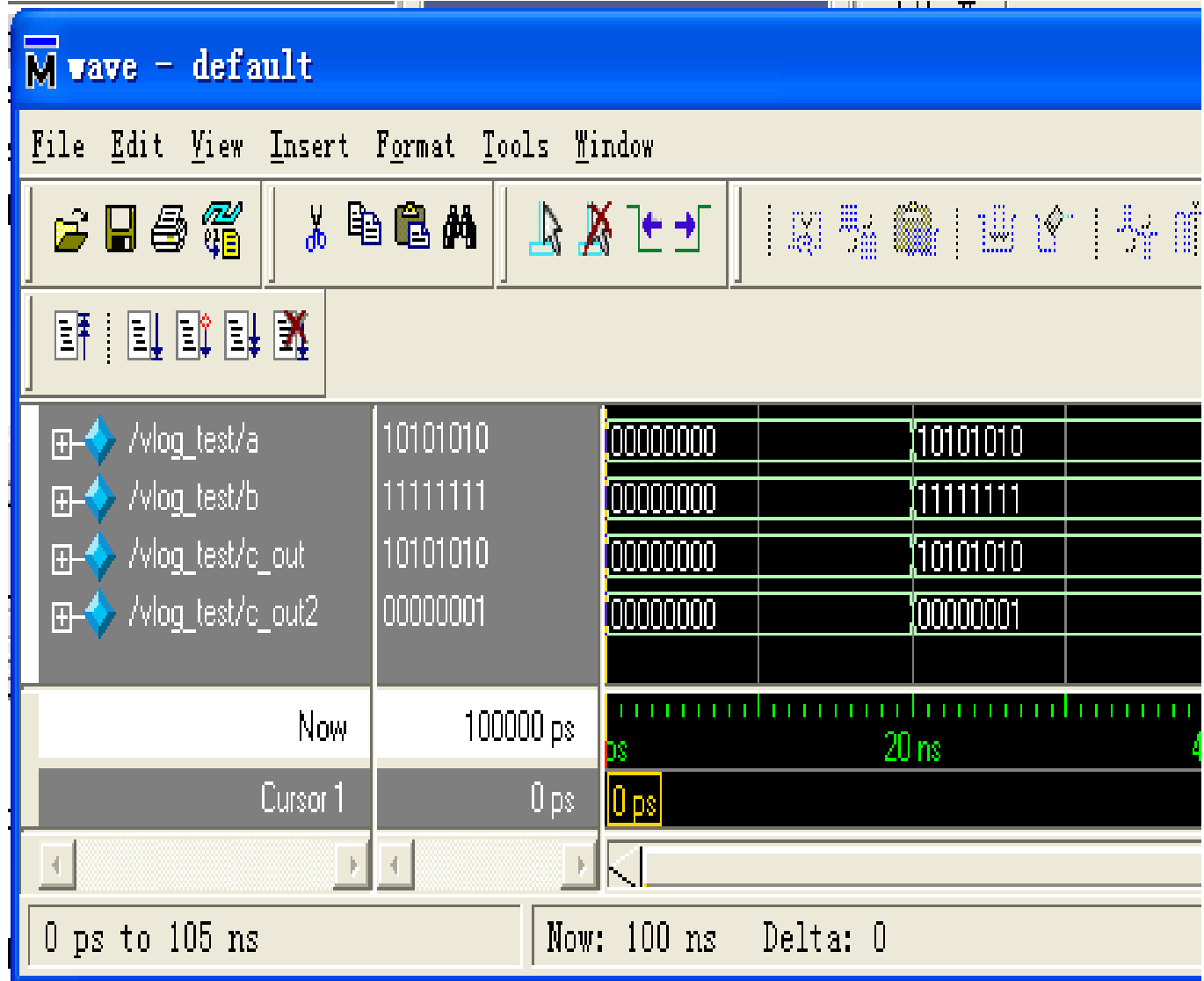
逻辑门的描述

	Verilog描述	逻辑表达式
与门	$F = A \& B ;$	$F=AB$
或门	$F = A \mid B ;$	$F=A+B$
非门	$F = \sim A ;$	$F=A'$
与非门	$F = \sim (A \& B);$	$F=(AB)'$
或非门	$F = \sim (A \mid B);$	$F=(A+B)'$
与或非门	$F = \sim((A \& B) \mid (C \& D));$	$F=(AB+CD)'$
异或门	$F = (A \wedge B);$ $F = (\sim A \& B) \mid (A \& \sim B);$	$F=A \oplus B$ $F=A'B+AB'$
同或门	$F = (A \sim \wedge B);$ $F = \sim (A \wedge B);$ $F = (\sim A \& \sim B) \mid (A \& B);$	$F=(A \oplus B)'$ $F=A'B'+AB$

逻辑门的描述

```
assign a=8'haa;  
assign b=8'hff;  
assign  
c_out=a&b;
```

```
assign  
c_out2=a&&b;
```



Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和循环语句
- 模块的测试

赋值语句

- 在Verilog中，变量是不能随意赋值的，需要使用**连续赋值语句**或**过程赋值语句**。
- assign称为**连续赋值**；
- 过程块initial或always中的赋值称为**过程赋值**。

连续赋值语句

- 语法格式： `assign 变量名 (wire类型) =赋值表达式;`

例：

```
wire [7:0] a , b , c, d;  
assign a = 8' b00001111;  
assign b = a;  
assign c[3:0] = d[3:0];  
assign d = ~a&b;
```

- 对应到电路中 —> 导线;
- 左侧数据类型必须是`wire`型数据;
- 描述组合电路，每条`assign`赋值语句相当于一个逻辑单元;
- 右侧任何信号的变化都会激活该语句，使其被立即执行一次，所有右值都是敏感信号;
- 各个`assign`赋值语句之间是并发的关系;
- 在过程块 (`initial/always`) 外面。

连续赋值语句

● 变量（标量）

```
wire a , b ;  
assign a = b ;
```

● 向量中某一位

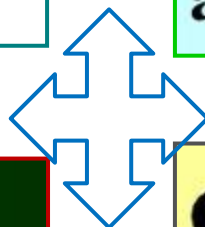
```
wire [7:0] a , b ;  
assign a[3] = b[3] ;
```

● 向量

```
wire [7:0] a , b ;  
assign a = b ;
```

● 向量中某几位

```
wire [7:0] a , b ;  
assign a[3:2] = b[3:2] ;
```



连续赋值语句举例

```
module FA_Df (A, B, Cin, Sum, Cout) ;  
input  A, B, Cin;  
output Sum, Cout ;  
  
assign Sum = A ^ B ^ Cin;  
assign Cout = (A & Cin) | (B & Cin) | (A & B) ;  
endmodule
```

在本例中，有两个连续赋值语句。这些赋值语句是**并发的**，与其书写的顺序无关

连续赋值语句

```
wire [7:0] wire_a;  
wire [7:0] wire_b;  
reg [7:0] reg_a;  
wire [7:0] wire_y1;  
wire [7:0] wire_y2;  
wire [7:0] wire_y3;  
wire [7:0] wire_y4;  
wire [7:0] wire_y5;  
wire [7:0] wire_y6;
```

一些常用的基础逻辑门

```
assign wire_b = wire_a;  
assign wire_a = reg_a;  
assign wire_y1 = ~wire_a; //取反  
assign wire_y2 = wire_a & wire_b; //与  
assign wire_y3 = wire_a | wire_b; //或  
assign wire_y4 = wire_a ^ wire_b; //异或  
assign wire_y5 = ~(wire_a & wire_b); //与非  
assign wire_y6 = ~(wire_a | wire_b); //或非
```

过程赋值语句

- 只能出现在过程块中（initial/always）；
- 过程赋值语句中：没有关键词“assign”；
- 左侧数据类型必须是reg类型的变量；
- 每条过程赋值语句之间是顺序执行的关系。
- 包括阻塞赋值（运算符=）和非阻塞赋值（运算符<=）

阻塞赋值与非阻塞赋值

- **阻塞（Blocking）赋值方式**

- 符号 “=” ， 如 $b = a$ ；
- 在同一个always 中，一条阻塞赋值语句如果没有执行结束，那么该语句后面的语句就不能被执行，即被“阻塞”。
- 使用在触发事件为电平敏感信号的always块中，描述组合逻辑电路

- **非阻塞赋值（Non-Blocking）赋值方式**

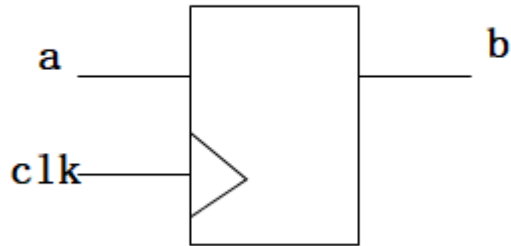
- 符号 “<=” ， 如 $b <= a$ ；
- 使用在触发事件为时钟边沿的always块中，描述时序逻辑电路

阻塞赋值与非阻塞赋值

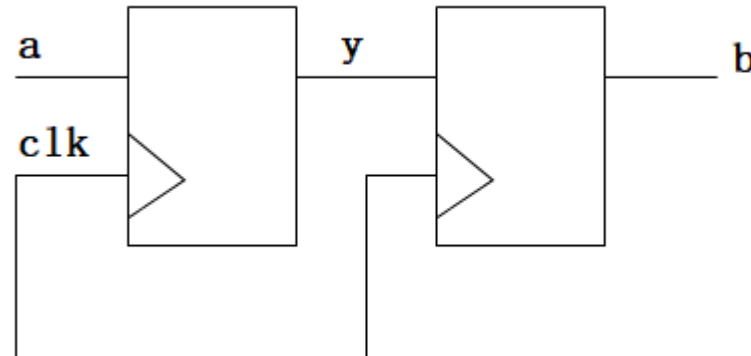
- 阻塞（Blocking）赋值方式（如 $b = a$; ）
 - 赋值语句执行完后，块才结束；
 - b 的值在赋值语句执行完后**立刻就改变**；
 - 可能产生意想不到的结果。
- 非阻塞（Non_Blocking）赋值方式（如 $b \leq a$; ）
 - 块结束后才完成赋值操作；
 - b 的值**并不是立刻就改变**；
 - 这是一种**比较常用的赋值方法**。（特别在**编写可综合模块**）

阻塞赋值与非阻塞赋值

```
module bloc(clk, a, b);  
  input clk, a;  
  output b; reg b;  
  reg y;  
  always @(posedge clk)  
  begin  
    y=a;  
    b=y;  
  end  
endmodule
```

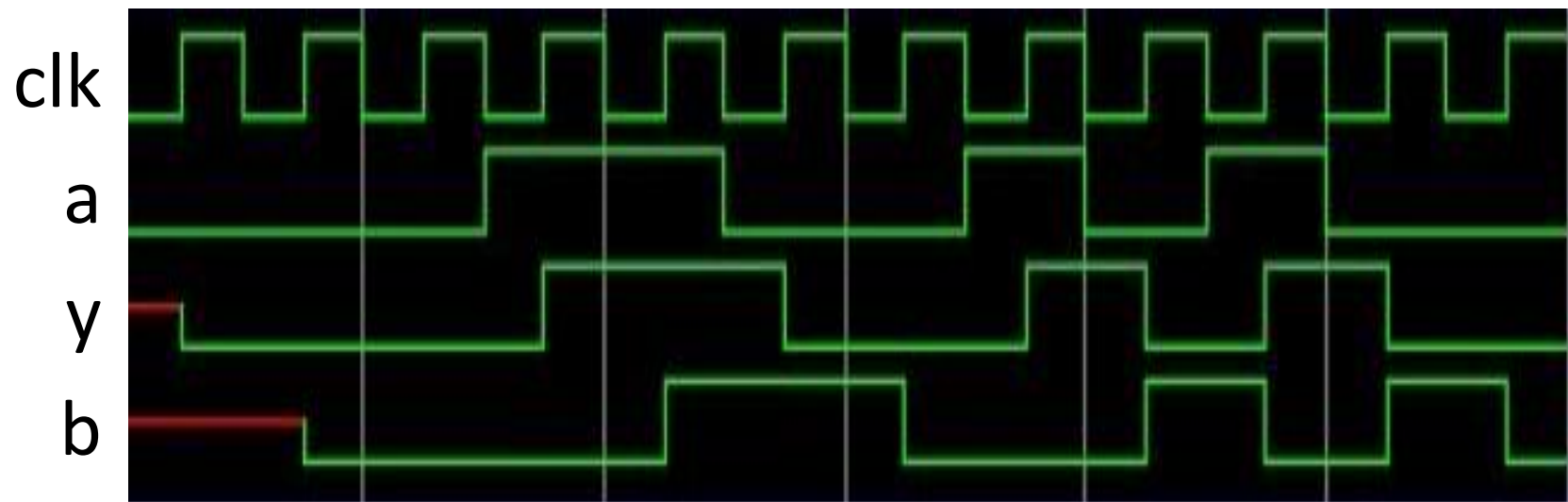
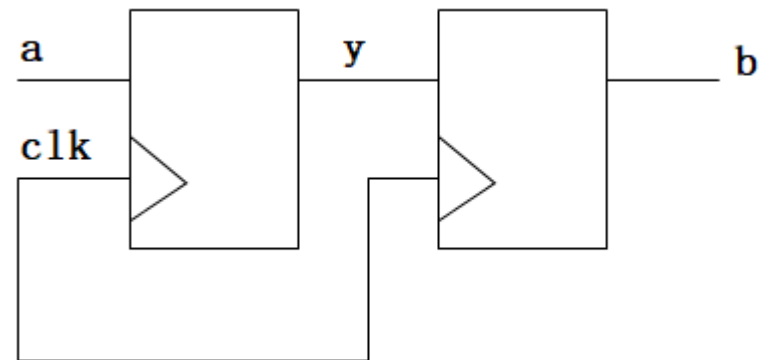


```
module nonbloc(clk, a, b);  
  input clk, a;  
  output b; reg b;  
  reg y;  
  always @(posedge clk)  
  begin  
    y<=a;  
    b<=y;  
  end  
endmodule
```



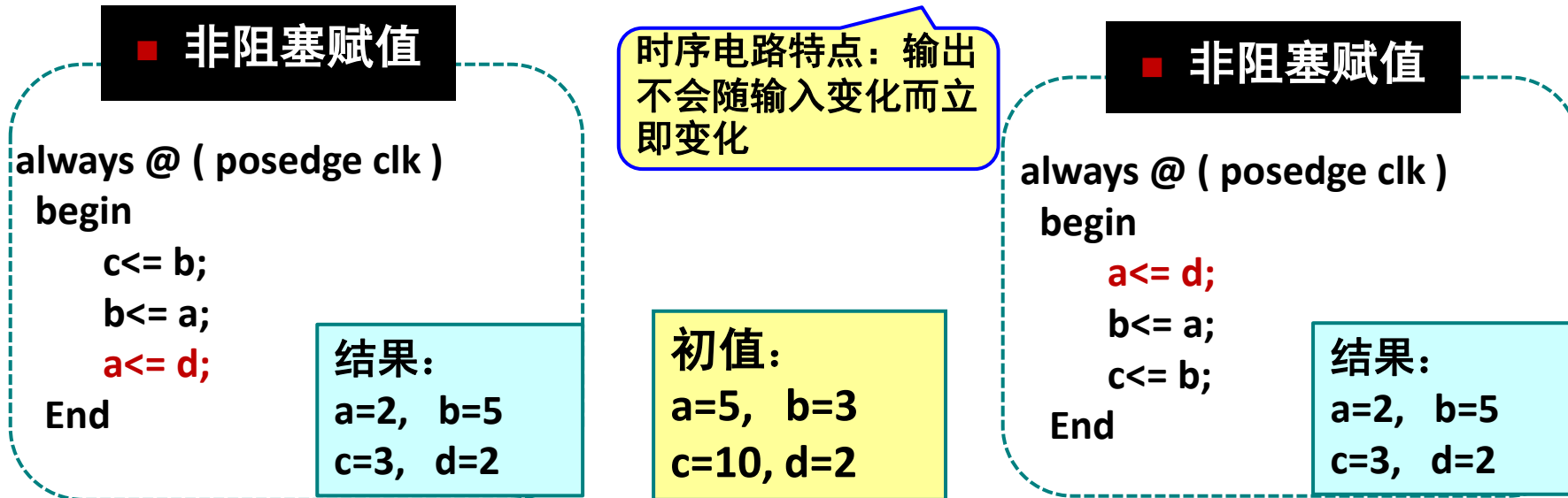
非阻塞赋值示例

```
module nonbloc (clk, a, b);  
  input clk, a;  
  output b; reg b;  
  reg y;  
  always @(posedge clk)  
  begin  
    y<=a;  
    b<=y;  
  end  
endmodule
```



非阻塞赋值

块内的赋值语句**同时进行**：先同时采样，最后一起更新



结果与书写的顺序无关（原因：同步更新）

本质上，在一个时钟沿触发里，a得到d的值，但b得到的永远是a的旧值，c得到的永远是b的旧值（原因：同步更新）。

如何区分阻塞赋值与非阻塞赋值？

- 时序逻辑
 - 一定用非阻塞赋值 “<=”, 只要看到敏感列表有posedge就用 “<=”。
- 组合逻辑
 - 一定用 “=”, 只要敏感列表没有posedge就用 “=”。
- 时序逻辑和组合逻辑分成不同的模块
 - 即一个always模块里面只能出现非阻塞赋值 “<=”或者 “=”。

连续赋值与过程赋值的比较

	过程赋值	连续赋值
assign	无assign (过程性连续赋值除外)	有assign
符号	使用 “=”， “<=”	只使用 “=”
位置	在always语句或initial语句中 均可出现	不可出现于always语句和initial语句
执行条件	与周围其他语句有关	等号右端操作数的值发生变化时
用途	驱动寄存器	驱动线网

Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和循环语句
- 模块的测试

过程块

- 过程块有两种：

- always块

- 循环执行。
 - 满足触发条件则执行。
 - 一个模块中有多个always块时，可以并行进行。

```
always @(*)begin
    sum = a + b;
    //其他代码
end
```

- initial块

- 只能执行一次。
 - 不带触发条件。
 - 通常用于仿真模块。

```
initial begin
    c=1' b0;
    //其他代码
end
```

always块

- 格式如下：

```
always @ (<敏感信号列表>)
```

```
begin
```

```
    //过程赋值
```

```
    //if-else、case选择语句
```

```
    //for、while等循环块
```

```
end
```

```
module reg_adder (
```

```
    input wire [2: 0] a, b,
```

```
    output wire [3: 0] out
```

```
);
```

```
always @(a or b) //a或b发生变化，执行
```

```
    sum = a + b;
```

```
endmodule
```

- always语句通常带触发条件，触发条件被写在敏感信号列表中，只有当触发条件满足条件或发生变化时，其后的”begin-end”块语句才能执行。
- 敏感信号可分为两种：电平敏感、边沿敏感，敏感信号列表中可以有多个信号，用关键字or连接；
- 既可以描述组合逻辑电路也可以描述时序逻辑电路。

组合逻辑的Verilog描述-always块

- 使用触发事件为**电平敏感信号**的always块
- 使用always块描述组合逻辑电路时，需用**阻塞赋值**
- 将always模块中使用到的**所有**输入信号和条件判断信号都列在敏感信号列表中（建议使用*）

//3-8译码器

```
always @ [*] begin
    if (enable) begin
        case (switch)
            3'h0 : decoder_38 = 8'hfe;
            3'h1 : decoder_38 = 8'hfd;
            3'h2 : decoder_38 = 8'hfb;
            3'h3 : decoder_38 = 8'hf7;
            3'h4 : decoder_38 = 8'hef;
            3'h5 : decoder_38 = 8'hdf;
            3'h6 : decoder_38 = 8'hbf;
            3'h7 : decoder_38 = 8'h7f;
            default : decoder_38 = 8'hff;
        endcase
    end
else decoder_38 = 8'hff;
end
```

组合逻辑的Verilog描述

- 组合逻辑电路是任意时刻的输出仅仅取决于该时刻的输入，与电路原来的状态无关，电路中不包含记忆元件。
- 组合逻辑的电路行为，通常采用两种常用的RTL 级描述方式。

使用**assign**关键字描述的赋值语句

使用触发事件为电平敏感信号的**always**块

initial块

- 格式如下：

```
Initial
begin
    语句1;
    语句2;
    .....
    语句n;
end
```

```
initial
begin
    #20 begin a = 0;b = 0; cin= 1;end
    #20 begin a = 0;b = 1; cin= 0;end
    #20 begin a = 0;b = 1; cin= 1;end
    #20 begin a = 1;b = 0; cin= 0;end
    #20 begin a = 1;b = 0; cin= 1;end
    #20 begin a = 1;b = 1; cin= 0;end
end
```

- **begin_end**为顺序块，用来标识顺序执行的语句。

Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和条件运算符
- 模块的测试

条件语句

- 必须在**过程块**中使用
- 条件语句：

if语句：

```
if (条件表达式1)
    语句块1;
else if (条件表达式2)
    语句块2;
.....
else
    语句块n;
```

case语句：

```
case (条件表达式)
    分支1： 语句块1;
    分支2： 语句块2;
    .....
    default： 语句块n;
endcase
```

语句块超过1条语句使用begin...end

条件语句-case语句

- case (条件表达式)

分支1: 语句块1;

分支2: 语句块2;

.....

default: 语句块n;

endcase

例: reg [2:0] cnt;

case(cnt)

3'b000:q=q+1;

3'b001:q=q+2;

default:q=q;

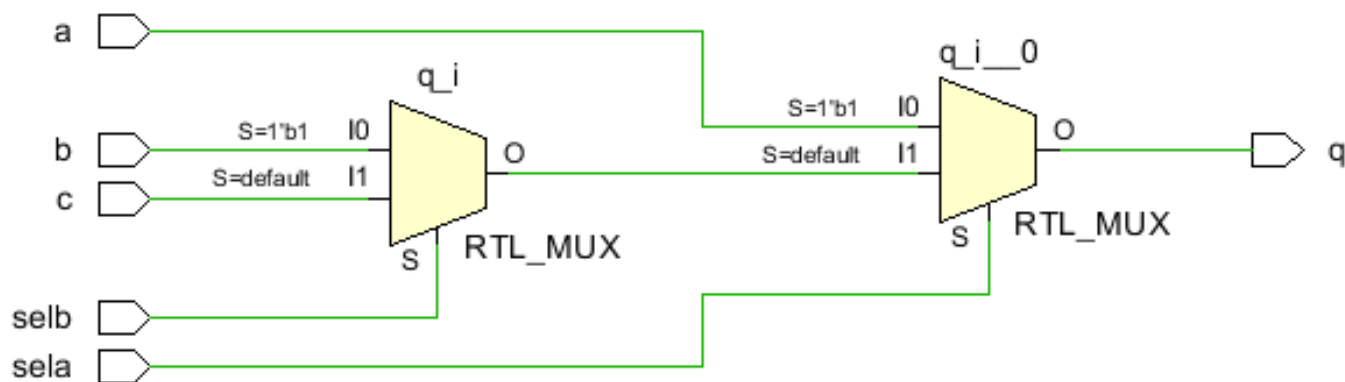
endcase

- case语句的所有表达式值的**位宽必须相等**
- 语句中**default一般不要缺省**。在“always”块内，如果给定条件下变量没有赋值，这个变量将保持原值（生成一个**锁存器**）
- 分支表达式中可以存在**不定值x**和**高阻值z**
 - 如2'b0x，或2'b0z

条件语句if...else与case的区别

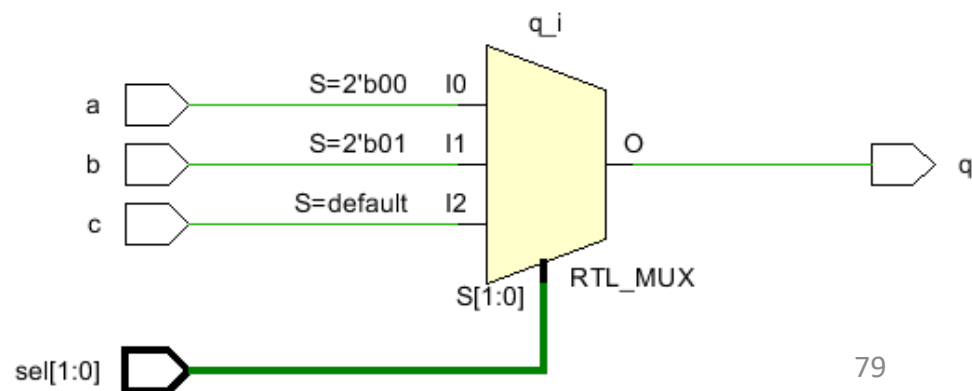
- if生成的电路是串行，是有优先级的编码逻辑；

```
always @ * begin
    if(sela)
        q = a;
    else if(selb)
        q = b;
    else
        q = c;
end
```



- case生成的电路是并行的，各种判定情况的优先级相同。

```
always @ * begin
    case(sel)
        2'b00: q = a;
        2'b01: q = b;
        default: q = c;
    endcase
end
```



条件语句if与case的区别

- if 生成的电路是**串行**的，是有优先级的编码逻辑；
- case生成的电路是**并行**的，各种判定情况的优先级相同。

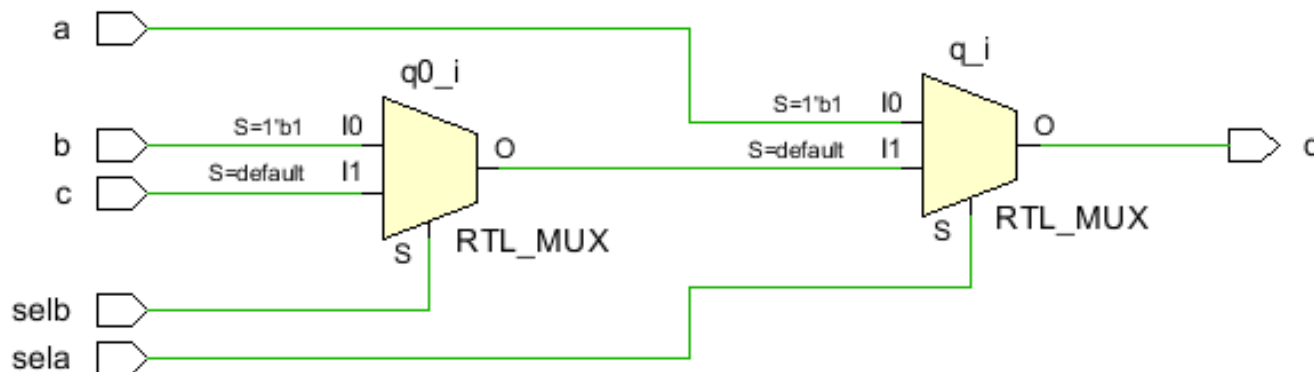
- if 生成的电路**延时较大**，占用硬件资源少；
- case生成的电路**延时较短**，占用硬件资源多。

条件运算符

- $\langle \text{条件表达式} \rangle ? \langle \text{条件为真} \rangle : \langle \text{条件为假} \rangle ;$

```
assign q = (sela==1'b1)?a:((selb==1'b1)?b:c);
```

```
always @ * begin
    if(sela)
        q = a;
    else if(selb)
        q = b;
    else
        q = c;
end
```



什么样的Verilog描述会生成锁存器

- 只发生在组合逻辑电路中

- 1、if...else...语句没有else

```
always @ (*) begin
    if (d_en) q = d;
end
```

- 2、case语句没有default

- 锁存器的危害:

- 使静态时序分析变得非常复杂
 - 对毛刺敏感，不能异步复位，所以上电以后处于不确定的状态;

```
reg q;
always @ (*) begin
    if (d_en) q2 = d;
    else      q2 = 1'h0;
end

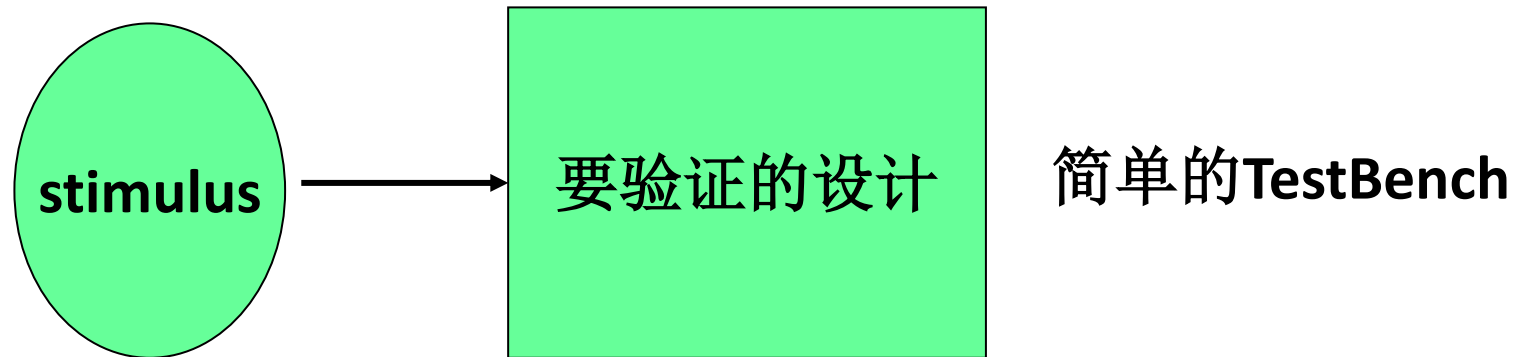
always @ (*) begin
    case (cnt[1:0])
        2'b00 : q = d1;
        2'b01 : q = d2;
        2'b10 : q = d3;
    endcase
end
```

Verilog硬件描述语言

- 概述
- 结构化设计与Verilog模块
- 标识符和数据类型
- 运算符及表达式
- 赋值语句和过程块（组合逻辑电路描述）
- 条件语句和条件运算符
- 模块的测试

Testbench

- 测试平台 (test bench) 是一个无输入，有输出的顶层调用模块。
- 一个简单的测试平台包括：
 - 产生激励信号；
 - 实例化待测模块，并将激励信号加入到待测模块中。



Testbench-组合逻辑

```
`timescale 1ns/1ps //1ns表示延时单位, 1ps表示时间精度
module decoder_38_sim();
    reg [2:0] data_in;    // 3位二进制输入
    reg [2:0] en;        // 3位控制信号输入
    wire [7:0] data_out;  // 8位输出

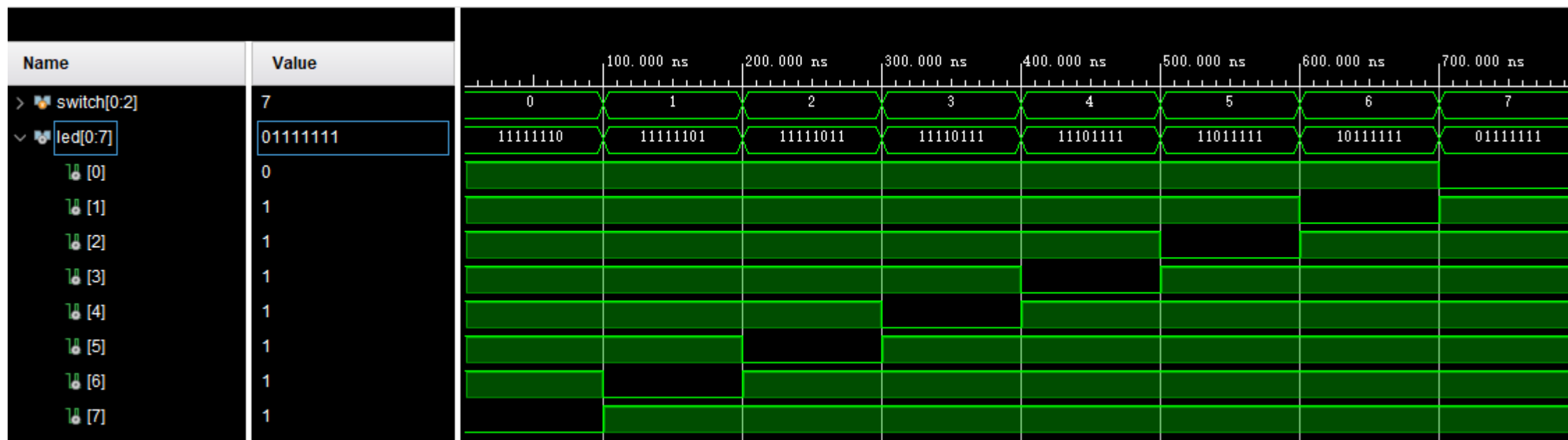
    decoder_38 d_38(
        .data_in(data_in),    // 结合自己的实现完成实例化
        .en(en),
        .data_out(data_out)
    );

    initial
    begin
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b000; end // 构造输入激励信号
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b001; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b010; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b011; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b100; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b101; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b110; end
        #5 begin en = 3'b100; data_in = 3'b111; end
        #5 begin en = 3'b101; data_in = 3'b000; end //使能端无效
        #5 $stop ; // 立即结束仿真
    end
endmodule
```

- 仿真模块没有输入、输出端口
- 激励信号数据类型要求为`reg`，以便保持激励值不变，直至执行到下一跳激励语句为止
- 输出信号数据类型要求为`wire`，以便能随时跟踪激励信号的变化
- `initial`块只能执行一次，不带触发条件，通常用于仿真模块。

仿真分析

■ 3-8译码器仿真波形



- 100ns 时，switch 信号由1' b000变为了 1' b001，led输出为8' b11111110（低电平有效）；
- 200ns 时，switch 信号由1' b001变为了 1' b010，led输出为8' b11111101（低电平有效）；

■

本章要点

- Verilog语言概述：

行为级描述、结构级描述

RTL与可综合

- 模块定义与模块实例化

- 组合逻辑的Verilog描述

- Testbench模块