



**《集成电电路课程设计》**

**（2021/2022学年第2学期）**

**指导教师：戴燕云**

**班级：23通信1班**

**学号：2023329600055**

**姓名：王宗斐**

**目 录**

1. **设计任务和要求**
2. **设计思路和方案**
3. **网表文件和说明**
4. **仿真与结果分析**

**4.1 功能仿真结果与分析**

**4.2 负载驱动能力的仿真与分析**

**4.3 功耗的仿真与分析**

**4.4 延时的仿真与分析**

**4.5 改变沟道W时的仿真与分析**

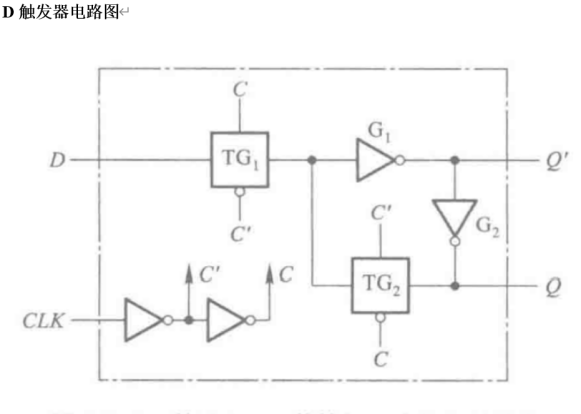
1. **总结**

**题目**

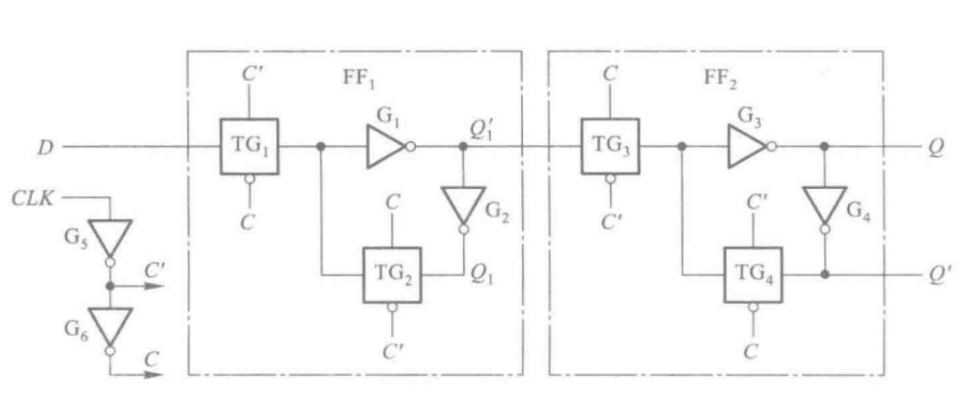
1. **设计任务和要求**

根据半导体集成电路、利用Hspice软件以及数字电路等课程的知识，使用集成电路CMOS工艺完成触发器的设计，熟悉和掌握集成电路芯片电路设计及模拟方法和技巧。

1、设计如图1所示用传输门构成的电平触发D触发器，和图2所示的边沿触发器



**图1 D触发器**



**图2 边沿触发器**

2、写出详细的电路原理分析；

3、编写Hspice网表文件，采用32nm的工艺；

4、进行电路瞬态波形仿真分析，进行功能验证；

5、改变负载，进行瞬态波形模拟，进行性能分析；

6、测量电路的功耗和延时，进行性能分析；

7、改变管子的尺寸，W或者L，再次进行瞬态波形，负载能力和功耗延时的测量和分析；

1. **设计思路和方案**

**2.1传输门构成的D触发器**

传输门（TG）就是一种传输模拟信号的模拟开关。CMOS传输门由一个P沟道和一个N沟道增强型MOSFET并联而成。TG的左边是输入端，右边是输出端。上边是控制信号C’输入端，下边是控制信号C输入端。

当C’=0、C=1时，TG导通，输出端的信号等于输入端信号。

当C=0、C’=1时，俩个MOS管栅极与衬底之间的压差为0V压降，因而没有导电沟道产生，NMOS管和PMOS管此时都处于截止状态。

传输门构成的D触发器，当CLK = 1 时， 传输门TG1,导通、TG2 截止， Q= D 。而且，在CLK= 1 的全部时间里Q 端的状态始终跟随D 端的状态而改变。在CLK 回到0 以后， TG2 导通、TG1 截止。由于反相器G1输人电容的存储效应， 短时间内G1输入端仍然保持为TG1截止以前瞬间的状态、而且这时反相器G1 、G2 和传输门TG2 形成了状态自锁的闭合回路， 所以Q和Q ’ 的状态被保存下来。

在clk上升沿到来之前，D输入端无论输入任何值触发器状态不会改变，次态等于现态。当时钟上升沿到来时，与时钟信号连接的非门产生的短暂延迟，使得触发器状态置成D输入端的状态。

**2.2边沿触发器**

当CLK=0时，TG1导通、TG3截止，此时FF1正常工作，FF2处于锁存状态若输入D=0，则Q1’=1，Q=0；当CLK跳变到1时，FF1锁存，FF2正常工作，此时Q跳变为0；因为FF1处于状态，所以Q1’的值保持不变，即Q的值也不变；当下降沿到来时，FF1工作、FF2锁存Q依旧不变，所以呈现出了边沿触发的特性，而且是上升沿触发。

1. **网表文件和说明**

**3.1传输门构成的D触发器**

title inv4

.lib 'D:\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models

V1 1 0 dc=1

**非门模块**

.SUBCKT feimen 1 0 in out

Mp0 out in 1 1 pmos W=0.2u L=32n

Mn0 out in 0 0 nmos W=0.4u L=32n

.ENDS

**传输门模块**

.SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1

mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm

mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n

.ENDS

**互连电路**

X1 1 0 D A C C1 chuanshumen

X2 1 0 A Q1 feimen

X3 1 0 Q1 Q feimen

X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen

X5 1 0 CLK C1 feimen

X6 1 0 C1 C feimen

V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)

V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)

.probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)

**负载驱动**

C1 Q 0 cc

.param cc=0.005p

.data ccdata

cc 0.005p 0.05p 0.5p 5p

.enddata

在输出端装载不同的电容负载值的同时观测瞬态波形来测试电路的驱动能力。

**功耗**

.measure tran average\_vdd\_power

+AVG P(v1) from=0ns to=5u

**延时**

.measure D\_Q\_delay

+trig v(D) val=500mv fall=1

+targ v(Q) val=500mv fall=1

.tran 0.1n 5u sweep data=ccdata.

end

使用.measure语句来进行电路延时和功耗的测试。

分析：该代码是一个基本的D触发器电路，其中包含四个反相器（fei）和两个个传输门（tg）构成的D触发器。V1定义了一个高电平的输入信号。V2和V3分别定义了时钟信号和D输入信号的脉冲信号。在.tran语句中，定义了仿真的时间范围和时间步长。在.probe语句中，定义了需要监测的信号，包括时钟信号、D输入信号、输出信号和反相输出信号。

**3.2边沿触发器**

.title inv4

.lib'D:\PTM 32nm.lib'32nmcmos\_models

.global VDD GND

**负载驱动**

.data cv

cload

0.0005p

0.005p

0.05p

0.5p

5p

.enddata

**非门模块**

.subckt feimen in out GND VDD

mn1 out in GND GND nmos w=0.2u l=32nm

mp1 out in VDD VDD pmos w=0.4u l=32nm

.ends

**传输门模块**

.subckt chuanshumen in out C1 C2 GND VDD

mn1 in C2 out GND nmos w=0.2u l=32nm

mp1 in C1 out VDD pmos w=0.4u l=32nm

.ends

**互连电路**

VDD VDD 0 1

x1 clk e1 GND VDD feimen

x2 e1 e2 GND VDD feimen

x3 D b e2 e1 GND VDD chuanshumen

x4 b g1 GND VDD feimen

x5 g1 g GND VDD feimen

x6 b g e1 e2 GND VDD chuanshumen

x7 g1 f e1 e2 GND VDD chuanshumen

x8 f q1 e2 e1 GND VDD chuanshumen

x9 f q GND VDD feimen

x10 q q1 GND VDD feimen

C q GND cload

VIN1 D 0 PULSE(0 1 2n 0.0001n 0.0001n 8n 16n)

VIN2 CLK 0 PULSE(0 1 1n 0.0001n 0.0001n 4n 8n)

**延时和功耗**

.measure T\_delay

+trig v(CLK) val=0.5 rise=1

+targ v(q) val=0.5 rise=1

.measure tran average\_VDD\_power

AVG P(X1) from=0ns to=32ns

.tran 1ns 32ns sweep data=cv

.END

两个D触发器的级联。第一个传输门和第一个反相器构成一个D触发器，其中D输入通过传输门输入，输出通过反相器输出。第二个传输门和第二个反相器构成另一个D触发器，其中D输入通过反相器输入，输出通过传输门输出。两个D触发器的时钟信号共用，但是D输入信号分别通过不同的反相器输入。

1. **仿真与结果分析**

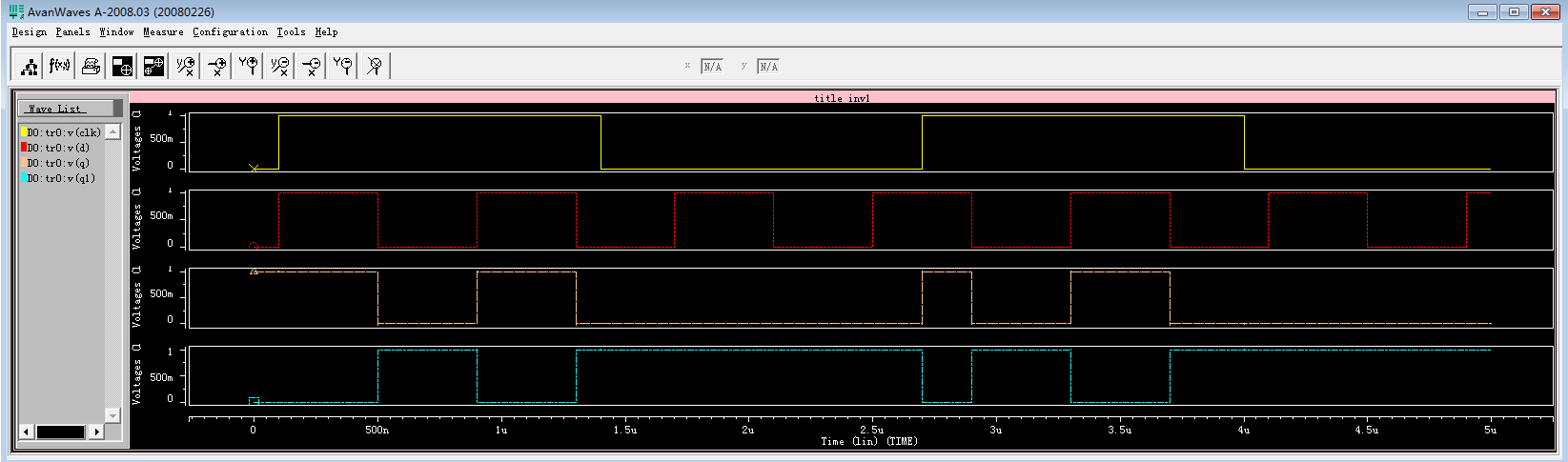
**4.1 功能仿真结果与分析**

**4.1.1**

**4.1.1 传输门构成的D触发器波形图**

如图所示，在CLK=1时，D=Q，当CLK=0时，Q保持不变，满足电平D触发器的特性。

**4.1.2**

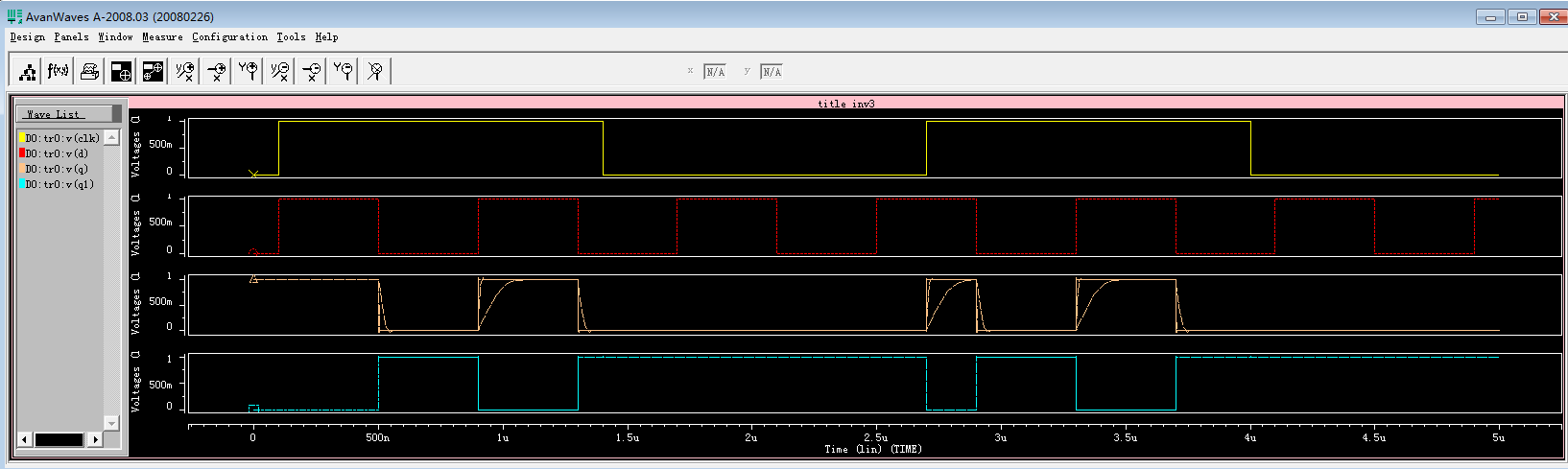


**4.1.2 边沿触发器波形图**

波形为上升沿触发，而且呈现D触发器特性，所以是一个上升沿触发的边沿D触发器。

**4.2 负载驱动能力的仿真与分析**

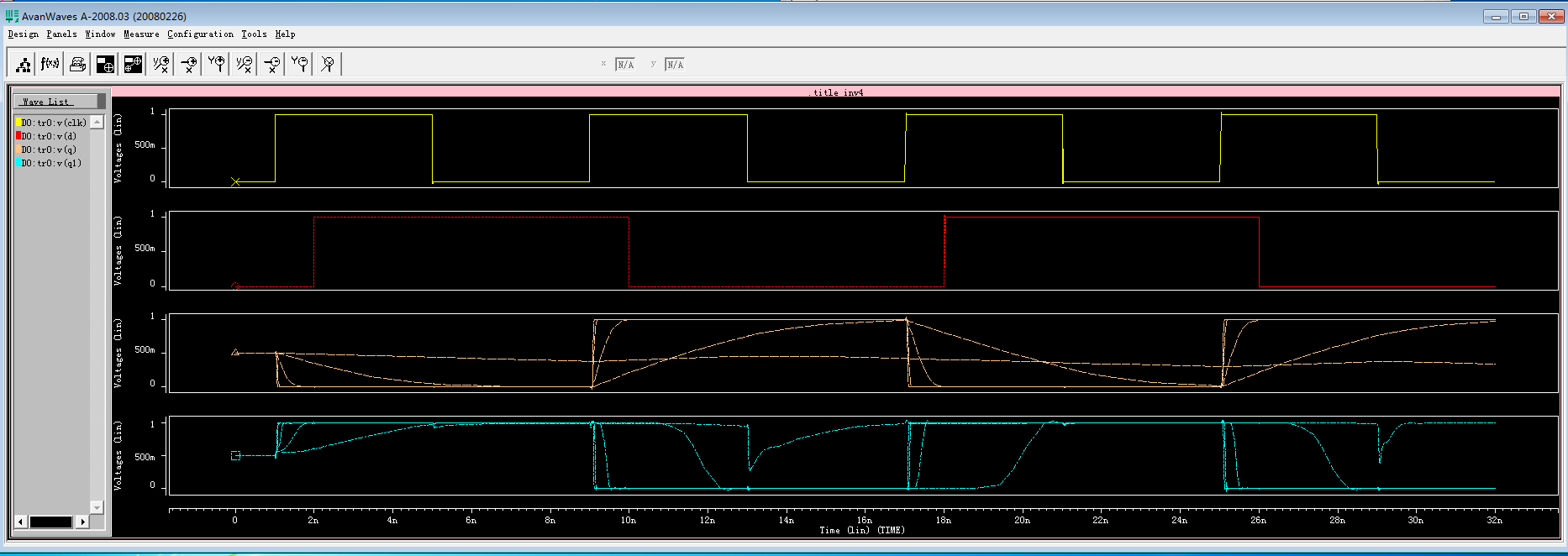
**4.2.1**



**4.2.1 传输门构成的D触发器负载驱动能力波形图**

随着加入负载的增加，功耗和延时不断加大，同时继续加大负载波形会产生失真。

**4.2.2**

****

**4.2.2 边沿触发器负载驱动能力波形图**

随着加入负载的增加，功耗和延时不断加大，同时继续加大负载波形会产生失真

**4.3 功耗的仿真与分析**

**4.3.1**

**表4.3.1电平触发器功耗仿真表**

|  |  |
| --- | --- |
| 负载 | 功耗 |
| 0.005p | -6.1539E-09 |
| 0.05p | -3.3520E-08 |
| 0.5p | -2.8803E-07 |
| 5p | -3.0133E-06 |

基本符合随着负载电容的容值不断增大，电路的总功耗不断增大的规律。电路的响应时间受到负载电容的影响。当电路驱动较大的负载电容时，需要更多的电荷来使电容充电或放电到目标电平，从而导致输出信号的变化速度和稳定性下降。

**4.3.2**

**表4.3.1边沿触发器功耗仿真表**

|  |  |
| --- | --- |
| 负载 | 功耗 |
| 0.0005p | 2.1287E-07 |
| 0.005p | 2.1225E-07 |
| 0.05p | 2.2204E-07 |
| 0.5p | 2.5193E-07 |
| 5p | 2.0925E-07 |

随着负载电容的容值不断增大，电路的总功耗先减小后增大再减小。在逐步增加负载电容时，产生了显著的结果。这可能表明负载电容已经达到了某个关键点，继续增加负载电容可能导致电路响应时间显著延长、输出信号失真或出现稳定性问题。

**4.4 延时的仿真与分析**

**4.4.1**

**表4.4.1电平触发器延时仿真表**

|  |  |
| --- | --- |
| 负载 | 延时 |
| 0.005p | 7.7695E-11 |
| 0.05p | 1.9871E-10 |
| 0.5p | 1.4388E-09 |
| 5p | 1.3643E-08 |

基本符合随着负载电容的容值不断增大，延时不断减小的规律。在仿真过程中，负载电容的增加意味着更多的电荷需要在电路中传输。根据电荷传输的基本原理，电荷通过电路的速度与电容成反比关系。因此，当电容增大时，电荷传输所需的时间会减少，从而导致延时减小。

**4.4.2**

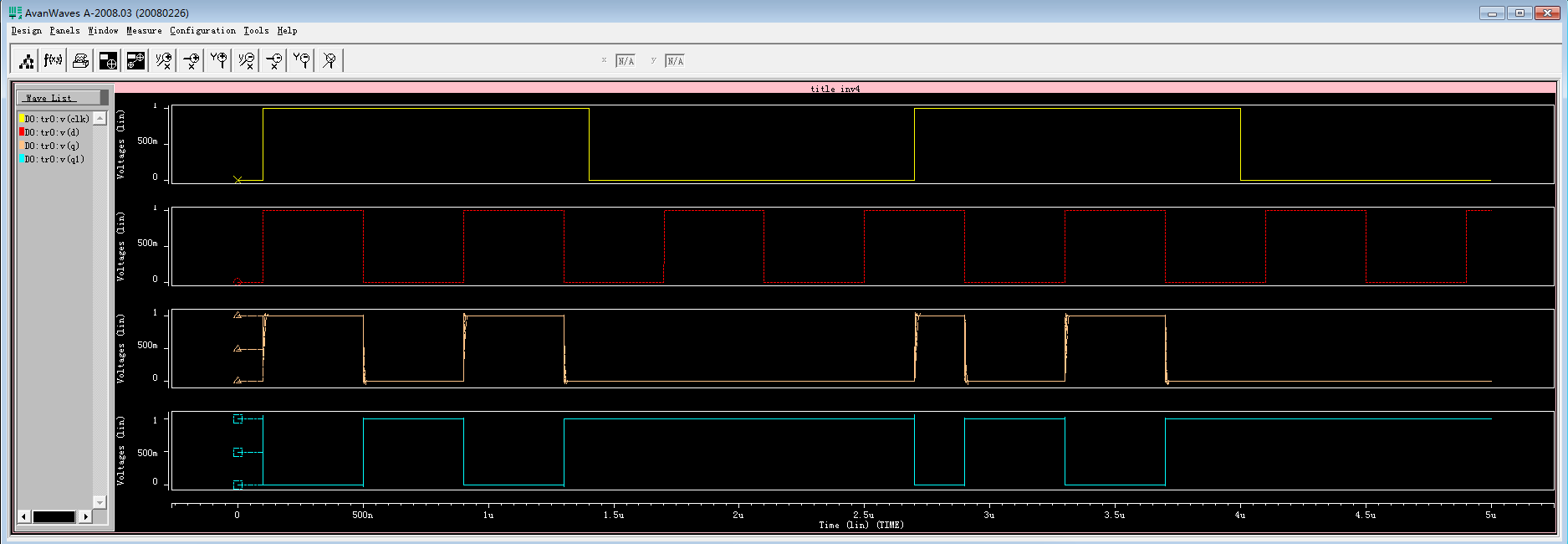
**表4.4.2边沿触发器延时仿真表**

|  |  |
| --- | --- |
| 负载 | 延时 |
| 0.0005p | -1.6990E-08 |
| 0.005p | -8.9105E-09 |
| 0.05p | -8.6784E-09 |
| 0.5p | -6.5594E-09 |
| 5p | failed |

从0.0005p到0.005p，不难发现，延时差距过大，说明负载不能过小。

**4.5 改变沟道W时的仿真与分析**

**4.5.1**

****

**4.5.1 传输门构成的D触发器波形图**

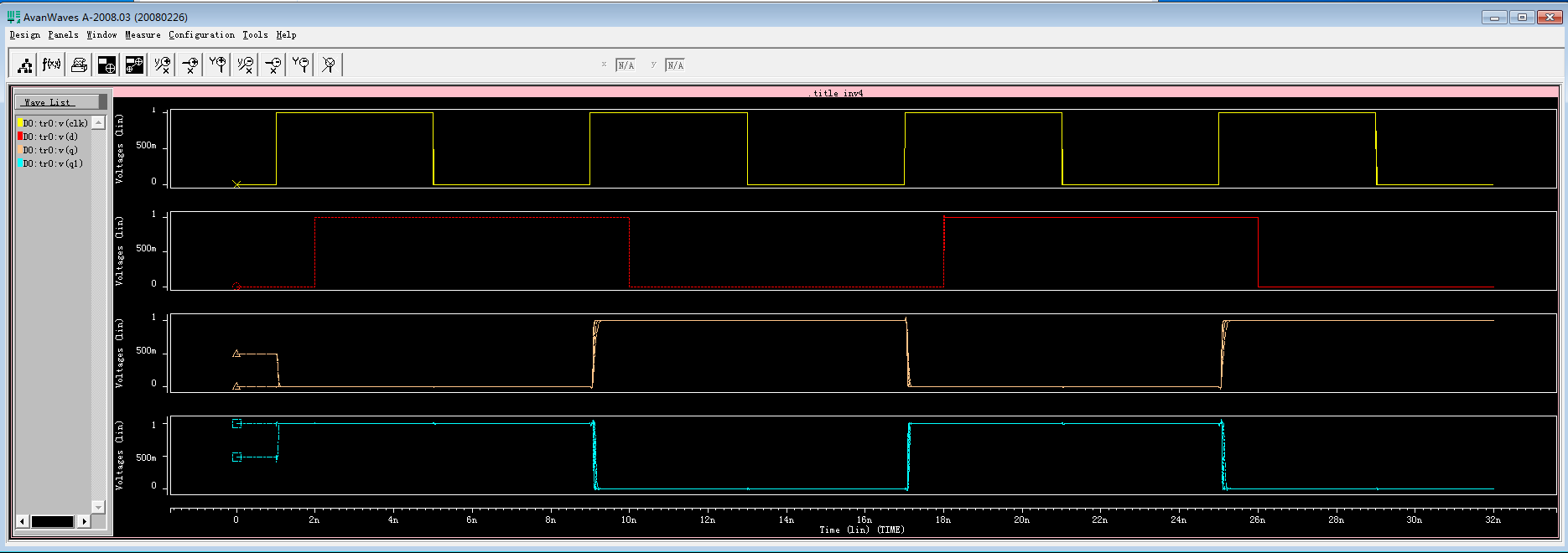
沟道发生改变后，波形未出现明显的失真。

**表4.5.1电平触发器改变W仿真表**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 负载 | 功耗 | 延时 |
| 0.2u | -3.9726E-07 | 2.8269E-09 |
| 0.4u | -4.0205E-07 | 1.4116E-09 |
| 1.2u | -4.4520E-07 | 5.1470E-10 |
| 2.4u | -4.0729E-07 | 3.2023E-10 |
| 3u | -3.1943E-07 | 2.8938E-10 |

随着沟道的增加，功耗先增加后减小，延时不断减小。

**4.5.2**

****

**4.5.1 传输门构成的D触发器波形图**

沟道发生改变后，波形未出现明显的失真。

表4.5.2边沿触发器改变W仿真表

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 负载 | 功耗 | 延时 |
| 0.2u | 1.4412E-07 | 8.1184E-09 |
| 0.4u | 3.0733E-07 | 8.0934E-09 |
| 1.2u | 9.7321E-07 | 8.0770E-09 |
| 2.4u | 1.9584E-06 | 8.0729E-09 |
| 3u | 2.2854E-06 | 8.0721E-09 |

随着沟道的增加，功耗不断变化，延时不断减小。

1. **总结**

以上代码实现了一个基本的数字电路设计，其中包括传输门（Transmission Gate）、反相器（Inverter）。代码中使用了PTM 32nm的模型库，该模型库提供了对32纳米工艺的模拟支持。

在这个课程设计中遇到的问题，对我个人而言最困难的地方是熟练掌握HSPICE的用法，这个软件里是英文的，里面包含了许多功能，但是对初步接触的我来说显得很陌生。我在这里卡住了很久。当然起初琢磨虚拟机时也废了一些心思，因为没有系统的完整学习，所以只能边做边改，边做边学习。

先是环境配置中出了问题，我在网上查询资料，但是发现对这方面的介绍似乎不是很多，在此过程中也了解到市面上常用的几种EDA仿真软件。然后是代码撰写方面，开始并没意识到需要包含工艺库文件，以至于运行报错，不过后来想起来在虚拟机D盘中找到了32nm工艺库文件，并修正了代码路径。接着到了仿真阶段，查看波形，发现几个波形都挤在一张图标上，很不美观，试着在网上找到解决办法，未果，发现连关于HSPICE的使用方法介绍的都不是很多，或者说很直观。只能试着把软件中的每个窗口按钮功能试一遍，找到了window中的stack mode，成功把多个波形隔开查看。到此，发现背景中还有虚线，也是人海搜索，多次尝试后发现，右键后点击grid off即可消除背景虚线，到这里，我才终于把波形调整好，变得美观。

在心得体会方面，对HSPICE的用法有了大致的了解和学习，这是我收益最多的部分。经过这次实验仿真，我也从零基础变成了对该软件的用法有一定了解的学习者了。在整个学习过程中，了解到，随着现代科技的迅猛发展，对集成电路（IC）的需求日益增加，尤其是在人工智能、物联网、5G通讯等领域。全球范围内的技术竞争促使各国加大对半导体产业的投入，推动了集成电路设计的急需。在地缘政治紧张局势下，拥有独立的集成电路设计能力被视为国家安全的重要组成部分。

总而言之，在实践中学习了如何使用HSPICE进行建模和仿真。通过理解和掌握这样的设计方法和仿真工具，我们可以更好地理解和分析数字电路的工作原理和性能特点。同时也意识到集成电路设计的急迫性和重要性，同时，绿色设计在集成电路设计中愈发重要，不仅有助于保护环境，也符合未来科技发展的趋势。

**工程文档**

**1）电平D触发器**

|  |
| --- |
| title inv1  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  V1 1 0 dc=1  .SUBCKT feimen 1 0 in out  Mp0 out in 1 1 pmos W=0.2u L=32n  Mn0 out in 0 0 nmos W=0.4u L=32n  .ENDS  .SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1  mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n  .ENDS  X1 1 0 D A C C1 chuanshumen  X2 1 0 A Q1 feimen  X3 1 0 Q1 Q feimen  X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen  X5 1 0 CLK C1 feimen  X6 1 0 C1 C feimen  V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)  V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)  .tran 0.1n 5u  .probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)  .end |

**2）电平D触发器驱动能力检验**

|  |
| --- |
| title inv3  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  V1 1 0 dc=1  .SUBCKT feimen 1 0 in out  Mp0 out in 1 1 pmos W=0.2u L=32n  Mn0 out in 0 0 nmos W=0.4u L=32n  .ENDS  .SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1  mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n  .ENDS  X1 1 0 D A C C1 chuanshumen  X2 1 0 A Q1 feimen  X3 1 0 Q1 Q feimen  X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen  X5 1 0 CLK C1 feimen  X6 1 0 C1 C feimen  V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)  V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)  .probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)  C1 Q 0 cc  .param cc=0.005p  .data ccdata  cc 0.005p 0.05p 0.5p 5p  .enddata  .tran 0.1n 5u sweep data=ccdata  .end |

**3）电平D触发器功耗仿真**

|  |
| --- |
| title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  V1 1 0 dc=1  .SUBCKT feimen 1 0 in out  Mp0 out in 1 1 pmos W=0.2u L=32n  Mn0 out in 0 0 nmos W=0.4u L=32n  .ENDS  .SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1  mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n  .ENDS  X1 1 0 D A C C1 chuanshumen  X2 1 0 A Q1 feimen  X3 1 0 Q1 Q feimen  X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen  X5 1 0 CLK C1 feimen  X6 1 0 C1 C feimen  V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)  V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)  .probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)  C1 Q 0 cc  .param cc=0.005p  .data ccdata  cc 0.005p 0.05p 0.5p 5p  .enddata  .measure tran average\_vdd\_power  +AVG P(v1) from=0ns to=5u  .tran 0.1n 5u sweep data=ccdata  .end |

**4）电平D触发器功耗延时仿真**

|  |
| --- |
| title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  V1 1 0 dc=1  .SUBCKT feimen 1 0 in out  Mp0 out in 1 1 pmos W=0.2u L=32n  Mn0 out in 0 0 nmos W=0.4u L=32n  .ENDS  .SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1  mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n  .ENDS  X1 1 0 D A C C1 chuanshumen  X2 1 0 A Q1 feimen  X3 1 0 Q1 Q feimen  X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen  X5 1 0 CLK C1 feimen  X6 1 0 C1 C feimen  V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)  V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)  .probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)  C1 Q 0 cc  .param cc=0.005p  .data ccdata  cc 0.005p 0.05p 0.5p 5p  .enddata  .measure tran average\_vdd\_power  +AVG P(v1) from=0ns to=5u  .measure D\_Q\_delay  +trig v(D) val=500mv fall=1  +targ v(Q) val=500mv fall=1  .tran 0.1n 5u sweep data=ccdata  .end |

**5）电平D触发器改变沟道W时的仿真**

|  |
| --- |
| title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  V1 1 0 dc=1  .SUBCKT feimen 1 0 in out  Mp0 out in 1 1 pmos W=wu L=32n  Mn0 out in 0 0 nmos W=wu L=32n  .ENDS  .SUBCKT chuanshumen 1 0 in out clk clk1  mn1 in clk out 0 nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in clk1 out 1 pmos w=0.2u l =32n  .ENDS  X1 1 0 D A C C1 chuanshumen  X2 1 0 A Q1 feimen  X3 1 0 Q1 Q feimen  X4 1 0 A Q C1 C chuanshumen  X5 1 0 CLK C1 feimen  X6 1 0 C1 C feimen  V2 CLK 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 1.3u 2.6u)  V3 D 0 pulse(0 1 0.1u 0.1n 0.1n 0.4u 0.8u)  .probe v(CLK) v(D) v(Q) v(QF)  C1 Q 0 cc  .param cc=0.5p  .data cv  wu  0.2u 0.4u 1.2u 2.4u 3u  .enddata  .measure tran average\_vdd\_power  +AVG P(v1) from=0ns to=5u  .measure D\_Q\_delay  +trig v(D) val=500mv fall=1  +targ v(Q) val=500mv fall=1  .tran 0.1n 5u sweep data=cv  .end |

**6）边沿触发器**

|  |
| --- |
| .title inv2  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  .global VDD GND  .subckt feimen IN OUT VDD GND  mn1 OUT IN GND GND nmos w=0.2u l=32n  mp1 OUT IN VDD VDD pmos w=0.4u l=32n  .ends  .subckt chuanshumen IN OUT cl cl1 VDD GND  mn1 IN cl OUT GND nmos w=0.2u l=32n  mp1 IN cl1 OUT VDD pmos w=0.4u l=32n  .ends  X1 CLK C1 VDD GND feimen  X2 C1 C VDD GND feimen  X3 D B C1 C VDD GND chuanshumen  X4 B Q21 VDD GND feimen  X5 Q21 Q2 VDD GND feimen  X6 B Q2 C C1 VDD GND chuanshumen  X7 Q21 K C C1 VDD GND chuanshumen  X8 K Q VDD GND feimen  X9 Q Q1 VDD GND feimen  X10 K Q1 C1 C VDD GND chuanshumen  c1 Q 0 0.0001p  VDD VDD 0 1  VIN1 D 0 PULSE(0 1 2n 0.0001n 0.0001n 8n 16n)  VIN2 CLK 0 PULSE(0 1 1n 0.0001n 0.0001n 4n 8n)  .tran 1n 32n  .end |

**7）边沿触发器驱动能力检验**

|  |
| --- |
| .title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  .global VDD GND  .data cv  cload  0.0005p  0.005p  0.05p  0.5p  5p  .enddata  .subckt feimen in out GND VDD  mn1 out in GND GND nmos w=0.2u l=32nm  mp1 out in VDD VDD pmos w=0.4u l=32nm  .ends  .subckt chuanshumen in out C1 C2 GND VDD  mn1 in C2 out GND nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in C1 out VDD pmos w=0.4u l=32nm  .ends  VDD VDD 0 1  x1 clk e1 GND VDD feimen  x2 e1 e2 GND VDD feimen  x3 D b e2 e1 GND VDD chuanshumen  x4 b g1 GND VDD feimen  x5 g1 g GND VDD feimen  x6 b g e1 e2 GND VDD chuanshumen  x7 g1 f e1 e2 GND VDD chuanshumen  x8 f q1 e2 e1 GND VDD chuanshumen  x9 f q GND VDD feimen  x10 q q1 GND VDD feimen  C q GND cload  VIN1 D 0 PULSE(0 1 2n 0.0001n 0.0001n 8n 16n)  VIN2 CLK 0 PULSE(0 1 1n 0.0001n 0.0001n 4n 8n)  .tran 1ns 32ns sweep data=cv  .END |

**8）边沿触发器功耗和延时检验**

|  |
| --- |
| .title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  .global VDD GND  .data cv  cload  0.0005p  0.005p  0.05p  0.5p  5p  .enddata  .subckt feimen in out GND VDD  mn1 out in GND GND nmos w=0.2u l=32nm  mp1 out in VDD VDD pmos w=0.4u l=32nm  .ends  .subckt chuanshumen in out C1 C2 GND VDD  mn1 in C2 out GND nmos w=0.2u l=32nm  mp1 in C1 out VDD pmos w=0.4u l=32nm  .ends  VDD VDD 0 1  x1 clk e1 GND VDD feimen  x2 e1 e2 GND VDD feimen  x3 D b e2 e1 GND VDD chuanshumen  x4 b g1 GND VDD feimen  x5 g1 g GND VDD feimen  x6 b g e1 e2 GND VDD chuanshumen  x7 g1 f e1 e2 GND VDD chuanshumen  x8 f q1 e2 e1 GND VDD chuanshumen  x9 f q GND VDD feimen  x10 q q1 GND VDD feimen  C q GND cload  VIN1 D 0 PULSE(0 1 2n 0.0001n 0.0001n 8n 16n)  VIN2 CLK 0 PULSE(0 1 1n 0.0001n 0.0001n 4n 8n)  .measure T\_delay  +trig v(D) val=0.5 rise=1  +targ v(q) val=0.5 rise=1  .measure tran average\_VDD\_power AVG P(X1) from=0ns to=32ns  .tran 1ns 32ns sweep data=cv  .END |

**9）边沿触发器改变沟道**

|  |
| --- |
| .title inv4  .lib 'D:\model\models\PTM 32nm.lib' 32nmcmos\_models  .global VDD GND  .data cv  wu  0.2u  0.4u  1.2u  2.4u  3u  .enddata  .subckt feimen in out GND VDD  mn1 out in GND GND nmos w=wu l=32nm  mp1 out in VDD VDD pmos w=wu l=32nm  .ends  .subckt chuanshumen in out C1 C2 GND VDD  mn1 in C2 out GND nmos w=wu l=32nm  mp1 in C1 out VDD pmos w=wu l=32nm  .ends  VDD VDD 0 1  x1 clk e1 GND VDD feimen  x2 e1 e2 GND VDD feimen  x3 D b e2 e1 GND VDD chuanshumen  x4 b g1 GND VDD feimen  x5 g1 g GND VDD feimen  x6 b g e1 e2 GND VDD chuanshumen  x7 g1 f e1 e2 GND VDD chuanshumen  x8 f q1 e2 e1 GND VDD chuanshumen  x9 f q GND VDD feimen  x10 q q1 GND VDD feimen  C q GND 0.005p  VIN1 D 0 PULSE(0 1 2n 0.0001n 0.0001n 8n 16n)  VIN2 CLK 0 PULSE(0 1 1n 0.0001n 0.0001n 4n 8n)  .measure T\_delay  +trig v(D) val=0.5 rise=1  +targ v(q) val=0.5 rise=1  .measure tran average\_VDD\_power AVG P(X1) from=0ns to=32ns  .tran 1ns 32ns sweep data=cv  .END |