静态时序分析

IC芯片设计中的静态时序分析实践笔记

一、引言

**二、概念**

2.1、时序分析（Timing Analysis）通常指两种分析方法：静态时序分析（Static Timing Analysis）和时序仿真分析（Timing Simulation）。

2.2、CMOS单元建模

标准单元的一个输出引脚可驱动多个后续单元。输出引脚自身电容，连接后续单元的导线电容以及后续单元的输入电容之和构成标准单元的驱动电容。驱动电容的大小将影响标准单元的时序。

标准单元输出电路中的上拉和下拉结构在对驱动电容充放电时，等效为电阻。上拉结构越大，等效上拉电阻越小，驱动能力越强；同理，下拉结构越大，等效下拉电阻越小，驱动能力越强。

2.3、电平翻转波形

设，上拉等效电阻Rdh

下拉等效电阻Rdl

电源电压Vdd

公共端电压Vss

则：

输出由“0”转换为“1”时，输出端电压为：

Vout = Vdd \* [1 - e-t/(Rdh \* Cload)], 电流方向是从电源Vdd经Rdh到Cload。

输出由“1”转换为“0”时，输出端电压为：

Vout = Vdd \* e-t/(Rdl \* Cload), 电流方向是从Cload经Rdh到Vss。

2.4、传播延时（Propagation Delay）

对于标准单元，输入、输出信号翻转并达到电源幅值的同一百分值为参考时间点时，输出信号对于输入信号的延迟时间是传播延时。通常单元內部路劲越短，传播延时越小。如果上、下拉结构不同，信号上升、下降延迟不同。

2.5、转换时间（Translation Time）和波形转换率（Slew Rate）

信号电平上升或下降所需要的时间为转换时间，转换时间的倒数是波形转换率。通常驱动能力越强转换时间越短，转换率越高。

2.6、信号之间的偏移（Skew）以及自身的频率稳定性（Jitter）

多个信号之间的时序差称为偏移，信号可以是数据（Data Skew）也可以是时钟（Clock Skew）。Skew通常由信号路径长短不一致引起。

单一信号的周期或频率不稳定而产生Jitter。

2.7、时序弧（Timing Arc）

某一个单元的输入与输出的时序关系。

2.8、最小和最大时序路径

数据通路上，信号通过逻辑路径的总时间被称为路径延迟。有最大路径延迟的路径叫作最大路径、晚路径；有最小路径延迟的路径叫作最小路径、早路径。

2.9、时钟域

由同一时钟驱动的一组触发器被称为该时钟的时钟域。

2. 10、工作条件

工作条件由工艺（Processs）、电压（Voltage）和温度（Temperature）PVT共同定义。单元延迟和互联延迟是在特定的工作条件下计算的。

**三、标准单元库**

电路单元的输入输出特性通常用Liberty格式文件来描述。其特征包括：1）引脚电容，通常单元引脚电容越大，延迟越大；在大多数情况下，延迟随着输入转换时间的增加而增加，在少数情况下，单元的延迟可能与输入转换时间呈现非单调性，更大的输入转换时间可能产生更小的延迟。

3.1、线性时序模型（Linear Delay Model）

单元延迟D = D0 + D1\*S + D2\*C

式中，D0，D1，D2是常数，S是输入转换时间，C是输出负载电容。

3.2、非线性时序模型（Non-Linear Delay Model）

NLDM模型主要有：Table Model、ECSM（电流源模型）

3.3、组合逻辑时序模型

3.4、时序逻辑时序模型

3.4.1、同步检查：建立时间和保持时间

建立时间是测量最晚的数据信号（Latest Data Signal）应先于有效时钟沿的时间间隔。保持时间是有效时钟沿之后，数据输入必须保持稳定的最小时间。

1. 建立时间和保持时间的测量和计算参考点是有效时钟沿。
2. 建立时间 + 保持时间 > 0。
3. 数据变化时刻，应在建立时间与保持时间窗口之外，否则电路会进入亚稳态。
4. 通常有效时钟沿时刻位于建立时间与保持时间窗口之间，此时建立时间和保持时间的计算值均为正值；如果有效时钟沿时刻位于建立时间与保持时间窗口之外，则计算出的建立时间或保持时间可能为负值。
5. 建立时间或保持时间出现负值的原因是，计算参考位置以及计算参考时刻的选择造成的。通常的计算参考位置是芯片的引脚，参考时刻也是有效时钟沿到达芯片时钟引脚的时刻。但是芯片内部数据路径与时钟路径存在延时，这两个路径的延时差异可能会导致建立时间或保持时间出现负值。如果参考点选在芯片内部锁存点（Latch Point）以及有效时钟沿到达芯片内部时钟输入点的时刻，那么建立时间和保持时间都为正值。
6. 芯片内部数据路径长度小于时钟路径长度时，建立时间可能为非正值。此时，（计算的参考点是芯片引脚以及有效时钟沿到达时钟引脚）数据引脚可以在有效时钟引脚后变化而不会造成建立时间违例。
7. 芯片内部数据路径长度大于时钟路径长度时，保持时间可能为非正值。此时，（计算的参考点是芯片引脚以及有效时钟沿到达时钟引脚）数据引脚可以先于时钟引脚变化而不会造成保持时间违例。
8. 在某些芯片手册中可以看见保持时间为0，即上面g情况。若芯片内部数据路径与时钟路径在设计时保持等长，则仅存在e情况。对于f、g可理解为江湖歪门邪道。

3.4.2、异步检查

a、恢复时间和移除时间检查（Recovery and Remove Check）

异步引脚（如：异步清除Clear，异步置位Set）可以覆盖单元的任何同步行为。当某个异步引脚有效（Active）时，输出由异步引脚控制而非同步时钟控制。当异步引脚无线（Inactive）时，有效时钟沿开始锁存数据输入端数据并经一定的延迟后出现在输出端。

恢复时间是异步引脚被设置为无效（De-asserted）后，在下一个有效时钟沿之前需要保持稳定的最短时间。

移除时间是异步引脚被设置为无效（De-asserted）前，在某一个有效时钟沿之后

需要保持稳定的最短时间。

理解异步恢复时间：有效时钟沿之前，异步引脚持续无效的最短时间。恢复的意思是电路由异步状态恢复到同步工作状态？

理解异步移除时间：？

b、脉冲宽度检查（Pulse Width Check）

确保单元输入引脚的脉冲宽度满足最小要求。比如时钟输入引脚脉冲宽度必须大于指定值，否则不能正确锁存数据。最小脉冲宽度检查可以指定高脉冲或低脉冲。

3.4.3、传播延迟

传播延迟是从时钟有效沿到输出上升或下降沿的时间差。tco

3.5、状态相关的时序模型

状态相关时序模型（Stat-Dependent Model）：输入与输出之间的时序弧取决于该逻辑块的其它引脚。状态相关模型可以用来指定时序库中任何属性（Attribute）。如：timing()、power()、leakage\_power()等。

3.6、黑箱（Black Box）接口时序模型

黑箱模型，描述任意模块的IO接口上的时序弧，可能有以下四个：

1. 对于组合逻辑路径的输入到输出时序弧。
2. 从同步输入到相应的时钟引脚的建立和保持时间时序弧。
3. 从异步输入到相应的时钟引脚的恢复和移除时间时序弧。
4. 从时钟引脚到输出引脚的传播时间延迟。

3.7、先进时序模型

LDM、nLDM模型将单元时序弧延迟看作是输入转换时间和输出负载电容的函数。但是单元的输出负载并不是纯容性的，而是RC串联负载。因此LDM、nLDM模型需要改进。常见的改进方法有：CCSM（Composite Current Source Model）、ECSM（Effective Current Source Model）等。由于互连线RC和输入器件的Miller Effect，等效负载是非线性电容。

串扰噪声分析模型（CCSN）、直流余量模型、抗噪声模型等。

3.8、功耗建模

包括动态功耗（Active Power）、~~待机功耗（Standby Power）、~~漏电功耗（Leakage Power）。

3.8.1、Active Power

单元的动态功耗由输出开关功耗和内部开关功耗组成。输出开关功耗与单元类型无关，只与输出负载、开关频率、单元供电电压相关。内部开关功耗与单元类型、输出负载、开关频率、单元供电电压相关，单元库提供相关描述。

3.8.2、Leakage Power

随着工艺尺寸的缩小，漏电功耗变得显著，和动态功耗相比较无法忽略。漏电功耗主要由亚阈值电流和栅极氧化物隧道电流引起。提高单元阈值电压可降低亚阈值电流，但单元工作频率降低。同时，阈值漏电流随着结温（Junction Temperature）的升高而非线性增大；常温下，栅极隧道电流在65nm或更先进工艺下，与阈值电流相当，并随工艺尺寸减小而增大。

3.9、单元库中的其它属性

3.9.1、面积规范：提供单元或单元组的面积。

3.9.2、功能规范：指定引脚或引脚组的功能。

3.9.3、SDF条件

SDF条件属性支持标准延迟格式（Standard Delay Format）文件的生成，以及反标（Back annotation）时的条件匹配。单元中状态相关时序分析由关键字sdf\_cond指定。

3.10、特征化和工作条件

标称条件（标称工艺、电压、温度）指定了库在特征化时的环境条件。当实际工作条件与标称条件不一致时，通过计算得到的时序值就需要减免（Derate），这通过库文件中的K系数（K-factor）来实现。K系数主要分为：工艺、温度和电压三类减免系数。

四、互连寄生参数

4.1、互连线电阻、电容和电感（就是互连寄生参数）

互联电阻可认为是单元输出引脚与扇出单元输入引脚间的电阻。

互联电容来自于走线，是由接地电容和邻近信号线间的电容。

电感的影响在芯片内可以忽略，仅在封装和板级分析时考虑。

互联走线L任一部分的电阻和电容被理想地表示为一个分布式RC树（Distributed RC Tree）。RC树上的总电阻和总电容分别为Rt和Ct，单位长度电阻和单位长度电容分别是Rp和 Cp，总长度是L。Rt = Rp \* L；Ct = Cp \* L。

T模型：总的电容Ct连接在电阻树（Resistive Tree）的中间。总电阻Rt被均分成两个电阻，Ct连接在两电阻之间，形成T字型。

Pi模型：总电容Ct被均分成两个电容，Rt连接在两电容之间，形成Π字型。

4.2、线负载模型

在布局规划（Floorplan）或布局（Layout）之前，**线负载模型（Wire Load Model）可以用来估算电容、电阻和互连线的面积开销**。

4.2.1、互联树

一但由WLM模型估算出目标区域的电阻、电容和面积后，就可以认为预布局互连线的Rwire 和Cwire就确定了，下一步就是明确换连线的结构。在预布局阶段，互联RC树用三种方式来表示，三种方式的互联长度一致，因而预估互联电阻和电容也一致。

1）最佳情况树：假设终点（负载）引脚与驱动是紧邻的。所以驱动到终点引脚没有线电阻，仅有终点引脚电容与线电容之和作为驱动的负载电容。相当于负载引脚在RC树的近端。

2）平衡树：每个终点（负载）引脚分别与驱动星型等长连接。每条到终点的线路都等分WLM模型估算的Rwire 和Cwire。

3）最差情况树：在此情况下，假设所有终点引脚聚集在线的最远端。

4.2.2、指定线负载模型及模式

模型：set\_wire\_load\_model: light、conservative、typical、aggressive

不同的模型决定于电路块的面积大小，平均线长。

模式：set\_wire\_load\_mode: top、enclosed、segmented。当线穿过层次边界时，使用不同的线负载模式。模式指定模型的优先级。如top模式，指定顶层快的线负载模型具有优先级；segmented模式，指明底层快的线负载模型具有优先级。

4.3、提取的寄生参数的表示方法

在预布局阶段，通过线性负载模型预估电路的寄生参数。在布局（Layout）后提取详细寄生参数，可以用以下3种格式来描述

1. 详细标注寄生参数格式（Detailed Standard Parasitic Format，DSPF）
2. 精简标准寄生参数格式（Reduced Standard Parasitic Format，RSPF）
3. 标准寄生参数交换格式（Standard Parasitic Exchange Format，SPEF）
4. 新思二进制寄生参数格式（Synopsis Binary Parasitic Format，SBPF）

4.4、耦合电容的表示方法

4.5、层次化设计方法

4.6、减少关键线的寄生参数

4.6.1、减小互连电阻

4.6.2、增加走线间距

4.6.3、关联走线的寄生参数（相似功能线要有相同的寄生参数）

五、延迟计算

5.1、概述

5.1.1、延迟计算的基础

依据第二章中NLDM模型，单元延迟和输出转换时间是该单元输入转换时间和总输出电容的函数，因此单元延迟可以基于输入转换时间和输出电容用查表法得出。

5.1.2、带有互连线的延迟计算

1）预布局时序

在预布局阶段时序验证时，互连寄生参数是用线负载模型预估。

2）布局后时序

布局后，金属走线的寄生参数将映射为驱动和终点单元间的RC网络。

5.2、使用有效电容的（驱动）单元延迟

NLDM不能适用于RC树的情况，需要使用“等效”电容来处理线电阻寄生参数的影响。依据PI模型，Ceff = C1 + k \* C2, 0<= k <=1。如果互连电阻忽略为0，则k=1，Ceff = C1 + C2；如果互连电阻为无穷大，则k=0，Ceff = C1。

有效电容的影响因素：

1. 驱动单元特性
2. 负载的特性

有效电容法能近似计算单元延迟，但不能近似单元输出波形，因为有效电容负载与真实RC负载的差别较大，导致有效电容作为负载时的单元输出波形与真实波形必然存在较大差异，输出转换时间差别也较大。为了得到近似的输出转换时间，需另找办法。但是对于目标单元来说，已知输入转换时间和计算得出的近似的有效电容负载，便可通过NLDM模型查表得出目标单元的延迟。

5.3、互连线延迟

单元间的互连线电路模型是RC树。使用Elmore方法可以近似计算RC树的延迟。

使用Elmore方法计算RC树延迟，需要满足三个条件：

1）树有唯一的输入（源）节点；

2）没有电阻回路（Resistive Loop）

3）所有电容都位于节点和电源地之间

设有N级RC树，Elmore延迟模型表示如下：

Td1 = C1 \* R1

Td2 = Td1 + C2 \* (R1 + R2)

Td3 = Td1+ Td2 + C3 \* (R1 + R2 + R3) = C1 \* R1 + C2 \* (R1 + R2) + C3 \* (R1 + R2 + R3)

Tdn =

设一条具有Rwire和Cwire寄生参数线，下游扇出单元的输入电容为Cload，根据：

T模型：Td = Rwire\*Cwire + Cload\*(Rwire + Rwire)

PI模型：Td = 0\*Cwire + Rwire\*(Cwire + Cload)

上述两个计算结果一致。

算例：

对一条线使用线负载模型和平衡RC树以及最差情况RC树，扇出是N，分别计算Elmore延迟：

平衡树：Td = (Rwire/N) \* (Cwire + Cpin), Cpin为某一个分支的输入电容。

最差树：Td = Rwire \* (Cwire + Cpins), Cpins为所有分支的输入电容。

其它互连线计算模型：AWE（Asymptotic Waveform Evaluation，渐近波形估算）、Arnoldi算法等。

通过等效电容模型估算单元延迟，通过Elmore模型计算互连线延迟，如此重复可计算芯片任意路径延迟。但书中的说明还存在遗漏，等效电容法仅能近似估算单元延迟，不能估算单元输出转换时间，单元输出信号经过互连线其波形发送变化，对于下一级的来说，输入波形或转换时间就未能确定，因而下一级的单元延迟也就无法估算。书中74页末尾处提到“有很多种办法来计算延迟和互连线终点处的波形”，但没有阐述具体内容。

5.4、转换率融合

对于多输入单元或多驱动线（单元），需要确定某个输入转换时间作为标准，这样的输入点称为转换率融合点。输入转换时间的选择取决于时序分析要求。

在进行**最大时序路径**分析时有两种选择可能性：

1. 最差转换率传播（Worst Slew Propagation）：选择融合点处**最慢**转换率的输入
2. 最差到达时间传播（Worst Arrival Propagation）：选择融合点处**最晚**到达的输入。

在进行最小时序路径分析时也有两种选择可能性：

1. 最佳转换率传播（Best Slew Propagation）：选择融合点处**最快**转换率的输入。
2. 最佳到达时间传播（Best Arrival Propagation）：选择融合点处**最早**到达的输入。

大部分静态时序分析工具会使用**最差和最佳转换率传播**，因为是保守的分析方式。但是，当分析一条路径时，可以使用准确的转换率传播方式，明白什么情况下是过于悲观的。

5.5、不同的转换率阈值

用于确定前后级连接时，不同转换阈值的折算。相关前述的转换率减免系数（Slew Derate）。目的是确定准确的转换时间（率）。

5.6、不同的电压域

延迟是通过电压50%的阈值点来计算。对于不同电压域的引脚，其阈值点电压也不同。

5.7、路径延迟计算

5.7.1、组合逻辑路径计算

通常，通过互连线上升和下降的延迟不一样，因为驱动单元输出的戴维南模型（Thevenin Source Model）不一样。

Tdrise = ……

Tdfall = ……

5.7.2、到触发器路径

1）输入到触发器路径（输入数据和输入时钟）

输入数据到触发器数据输入端的路径：通常上升和下降的延迟不一样，原因同上。

输入时钟到触发器时钟输入端的路径：通常计算上升延迟。

1. 触发器到触发器路径（前级触发器到后级触发器）

数据通路：Tco + Tdata

发射时钟：Tlaunch

捕获时钟：Tcapture

5.7.3、多路径

在任意两个点之间，可能有多条路径。最长路径就是用时最长的路径，也称最差路径（Worst Path）、晚路径（Late Path）、最大路径（Max Path）；最短路径就是用时最短的路径，也称最佳路径（Best Path）、早路径（Early Path）、最小路径（Min Path）。

5.8、裕量计算

裕量（Slack）是信号的需要到达时间（Require Time）减去实际到达时间（Arrival Time）之差。

1. 串扰与噪声

6.1、概述

串扰噪声是两个以上信号之间活动的非故意耦合。深亚微米工艺中容易产生串扰噪声的原因：

1. 越来越多的金属层：0.3至0.25um工艺有4或5层金属，而65nm至45nm有10层以上金属。
2. 金属连线高且细：相邻连线的侧壁间存在耦合电容。
3. 更小的尺寸导致更高的连线密度。
4. 器件密度大：相互影响大。
5. 更高的频率导致更大的信号边缘斜率。
6. 更低的供电电压。

6.2、**串扰毛刺分析**

6.2.1、基础

产生影响的信号称为侵害者（Aggressor），受影响的信号称为受害者（Victim）。

串扰的本质是信号线间的电磁耦合，如果信号线间介质的介电常数为无穷大，磁感应强度为0，则不存在耦合串扰。

通常，串扰造成的噪声影响有两种：毛刺（Glitch），由侵害者电平翻导致受害者出现耦合噪声；串扰增量延迟，由串扰导致的信号时序变化，侵害者和受害者均能出现。

通常两条线之间的耦合电容被**描述**（不是近似计算用）为一个集总（Lumped）电容Cc，而不是分布（Distribute）电容。

产生毛刺信号（功率？）的大小取决于多种因素：

1. 连线间耦合电容：耦合电容越大，毛刺信号越强。
2. 侵害线的转换率：转换率越高，毛刺越大。
3. 受害线的接地电容：受害线接地电容越小，毛刺越大。
4. 受害线的驱动能力：驱动能力越弱，毛刺越大。

6.2.2、毛刺的类型

1）上升和下降毛刺：受害线低电平稳定时，其上正向（Positive）或上升（Rise）glitch；受害线高电平稳定时，其上负向（Negative）或下降（Fall）glitch。

2）过冲（Overshoot）和下冲（Undershoot）：受害线高电平稳定时，串扰继续推高其电平值，并短暂大于标准高电平；受害线低电平稳定时，串扰继续拉低其电平值，并短暂小于标准低电平。

详细的毛刺计算是基于库模型，所需相关参数属于标准单元库。

6.2.3、毛刺的阈值和传播

毛刺的高度和宽度是导致其在单元电路中传播的关键因素。基于直流或交流噪声分析可得出结论。

1. 直流阈值（DC Threshold）

直流噪声余量（DC Noise Margin）是针对毛刺量级的检查，是检查单元输入上直流噪声大小的极限。只要噪声电平不超越单元VILmax、VIHmin界限，单元不受毛刺干扰。此外，**不是所有**超越VILmax、VIHmin界限的毛刺都能改变单元的状态，这还与毛刺的持续时间（宽度）有关。持续时间越长，改变单元状态的可能性越高。

1. 交流阈值（AC Threshold）

噪声分析的直流余量极限是保守的，通常验证毛刺的影响时还要考虑毛刺的宽度和单元的输出负载，这可称为交流阈值，可以用单元的惯性（Inertia）来解释。通常，单极单元会阻止任何比该单元延迟窄得多的输入毛刺。同时，增大单元的输出负载，也增大了单元延迟，可以进一步降低输入毛刺的影响。

如果输入毛刺高度和宽度超过了交流阈值，那么该毛刺将通过单元传播。输出毛刺的高度和宽度是输入毛刺宽度、高度、和单元负载的函数。

毛刺（Glitch）：上升毛刺（Rise Glitch，由propagated\_noise\_high或noise\_immunity\_high建模）、下降毛刺（Fall Glitch，由propagated\_noise\_low或moise\_immunity\_low建模）、过冲毛刺（Overshoot Glitch，由noise\_immunity\_above\_high建模）、下冲毛刺（Undershoot Glitch，由noise\_immunity\_below\_low建模）。

6.2.4、多侵害者的噪声累积

将各侵害者毛刺耦合累加，计算出受害者的累积效应，此方法可获得受害线上最差毛刺，但结果过于保守。可计算每个侵害者毛刺的方均根RMS（Root Mean Square）值来确定受害线上的毛刺量级。

6.2.5、侵害者的时序相关性

要计算多侵害者引起的串扰噪声，必须分析侵害线的时序相关性。由于所有侵害线不是同时发生电平翻转（同时发生只是概率极低的最差情况），因而在受害线上出现的串扰应尽可能的根据各侵害线电平翻转的时序分时段计算，这可以减少计算的悲观程度。

6.2.6、侵害者的功能相关性

在特定条件下，受害线只可能受到功能相关的侵害线的串扰，而不可能受到不相关的侵害线串扰，因此在计算累积效应时需排除不相关者，避免过于保守。

6.3、**串扰延迟分析**

6.3.1、基础

七、配置STA环境

八、时序验证

九、接口分析

十、健壮性验证