第七课：反相器

Tuesday, September 24, 2019 5:30 AM

1. 静态CMOS反相器：
2. 一阶直流分析：
   a. 晶体管可以看作是一个具有无限关断电阻和有限导通电阻的开关；
   b. 假定：$V_{OL}=0, V_{OH}=V_{DD}, V_{SW}=V_{DD}, V_M=f(R_n,R_p)$；
   c. 无比逻辑：逻辑电平与期间的相对尺寸无关，晶体管可以采用最小尺寸；
      i. 有比逻辑：电平取决于相对尺寸；
   d. 稳态时在输出和V_{DD}或GND之间总存在一条具有有限电阻的通路，可以拥有较低的输出阻抗，对噪声和干扰不敏感($Low\ R_o(k\Omega)$)；
   e. 由于反相器输入节点只连接到晶体管栅极上，输入电阻极高，稳态输入电流几乎为0；
3. 电压传输特性：
   a. CMOS负载曲线：$I_{DSp}=-I_{DSn}, V_{GSn}=V_{in}, V_{GSp}=V_{in}-V_{DD}, V_{DSn}=V_{out}, V_{DSp}=V_{out}-V_{DD}$；
   b. CMOS反相器的静态负载特点：
      i. 同一工作点，NMOS电流等于PMOS电流；
      ii. 整个反相器工作点完全相同，不是高电平就是低电平；
      iii. 反相器工作在速度饱和状态；
      iv. CMOS反相器的瞬态响应主要有门的输出电容C_L决定：NMOS和PMOS的漏扩散电容、连线电容以及扇出门的输入电容；
   c. CMOS反相器瞬态响应：简化开关模型；
      i. 一个快速门的设计是通过减小输出电容或者减小晶体管导通电阻(增加宽长)来实现；
   d. $V_{IH}, V_{IL}, V_{SW}, V_M$；
      i. 开关阈值V_M：开关阈值定义在$V_{in}=V_{out}$点上，在这一区域，由于$V_{DS}=V_{GS}$，PMOS和NMOS总是饱和的，使通过两个晶体管的电流相等，就可以得到V_M的解析式。如果电源电压足够高，就可以假设两个晶体管均处于速度饱和状态($V_{DSAT}<V_M-V_T$)，同时忽略沟长调制效应；
         1) $k_nV_{DSTAn}\left(V_M-V_{Tn}-\frac{V_{DSATn}}{2}\right)+k_pV_{DSATp}\left(V_M-V_{DD}-V_{Tp}-\frac{V_{DSATp}}{2}\right)=0$;
         2) Solving for $V_M\ yields$;
         3) $V_M=\frac{\left(V_{Tn}+\frac{V_{DSATn}}{2}\right)+r\left(V_{DD}+V_{Tp}+\frac{V_{DSATp}}{2}\right)}{1+r}$;
         4) 假设NMOS与PMOS的栅氧厚度相同：$r=\frac{k_pV_{DSATp}}{k_nV_{DSAT}}=\frac{v_{SATp}W_p}{v_{SATn}W_n}$;
      ii. PMOS宽度可以小于完全对称所要求尺寸，改变PMOS与NMOS宽长比之比($\frac{\left(\frac{W}{L}\right)_p}{\left(\frac{W}{L}\right)_n}$)会使VTC的过渡区平移，增加PMOS或NMOS的宽度会使分别移向V_{DD}或GND。因此，要较大程度地改变开关阈值并不容易，特别是电源电压与晶体管阈值的比相对较小时；
      iii. 噪声容限：$V_{IH}-V_{IL}=-\frac{V_{OH}-V_{OL}}{a}=-\frac{V_{DD}}{a}\Rightarrow V_{IH}=V_M-\frac{V_M}{a}, V_{IL}=V_M+$

$\frac{V_{DD}-V_M}{g}$, $\mathrm{NM_H} = \mathrm{V_{DD}} - \mathrm{V_{IH}}$, $\mathrm{NM_L} = \mathrm{V_{IL}}$;

1) 假设PMOS和NMOS均处在速度饱和状态，由于在过渡区增益与电流的斜率关系很大，因此不能忽略沟长调制系数，通过电流方程可以推导出静态反相器的中点增益：
   a) $g = -\frac{1}{I_D(V_M)} \cdot \frac{k_n V_{DSATn} + k_p V_{DSATp}}{\lambda_n - \lambda_p} \approx \frac{1+r}{\frac{V_M - V_{Tn} - V_{DSATn}}{2} \cdot (\lambda_n - \lambda_p)}$;
   b) 这一增益几乎完全取决于工艺参数，特别是沟长调制系数，设计者通过选择电源电压及晶体管尺寸只能对它产生很小的影响；

e. 稳定性：
   i. 器件参数变化：
      1) 工作温度变化和制造中产生的工艺参数偏离会影响反相器的特性；
      2) 静态CMOS反相器的DC特性对上述变化不敏感；
   ii. 电源电压变化：
      1) 由于对固定的晶体管尺寸比r，$\mathrm{V_M}$近似的正比于$\mathrm{V_{DD}}$，所以反相器在过渡区增益随电源电压降低而增大;
      2) 反相器在电源电压接近晶体管$\mathrm{V_T}$时仍能较好工作；
      3) 虽然降低电源电压可以降低功耗，但会增加门延迟；
      4) 当电源电压接近$\mathrm{V_T}$时，DC特性会对器件参数的变化更加敏感；
      5) 减小信号摆幅，虽然可以减少内部噪声，但会对外部噪声更加敏感；
      6) 电源电压降低的实际限制：$V_{DDmin} > (2\sim4) \cdot \frac{kT}{q}$， 即电源电压不小于热电势$\phi_T$的两倍；

4. 作业题：PPT中Q5.3和Q5.5(作业待办)；