六：CMOS反相器的动态功耗

Monday, October 21, 2019 7:10 AM

1. VLSI选择CMOS作为主要工艺的原因在于其基本可忽略的静态功耗，但CMOS反相器的动态功耗之前已经给出：
   $P_D = fCV_{DD}^2$
   其中，f是门的开关速率。因此减少电容C是减少动态功耗的一个有效方法；
   更有效的策略是降低电源电压；
2. 示例：考虑$0.25\mu m$工艺制造的CMOS反相器，$C_{ox} = 6\frac{fF}{\mu m^2}$，$\mu_n C_{ox} = 115\frac{\mu A}{V^2}$，$\mu_p C_{ox} = 30\frac{\mu A}{V^2}$，$V_{tn} = -V_{tp} = 0.4\,V$，$V_{DD} = 2.5\,V$。$Q_N$的$\frac{W}{L}$比值是$\frac{0.375\mu m}{0.25\mu m}$，$Q_P$的$\frac{W}{L}$比值是$\frac{1.125\mu m}{0.25\mu m}$。栅源和栅漏重叠电容是每单位栅极宽度$0.3\frac{fF}{\mu m}$。此外漏-衬底电容$C_{dbn} = 1\,fF$和$C_{dbp} = 1\,fF$，导线电容$C_w = 0.2\,fF$。求$t_{PHL}$，$t_{PLH}$和$t_p$。
   解：
   确定等效电容C的值：
   $C = 2C_{gd1} + 2C_{gd2} + C_{db1} + C_{db2} + C_{g3} + C_{g4} + C_w$
   其中，
   栅漏电容：
   $C_{gd1} = 0.3\frac{fF}{\mu m} \times W_n = 0.3\frac{fF}{\mu m} \times 0.375\mu m = 0.1125\,fF$
   $C_{gd2} = 0.3\frac{fF}{\mu m} \times 1.125\mu m = 0.3375fF$
   漏-衬底电容(体电容)：
   $C_{db1} = 1fF$
   $C_{db2} = 1fF$
   次级CMOS的栅电容：$C_g = WLC_{ox} + C_{gsov} + C_{gdov}$
   $C_{g3} = W_n L_n C_{ox} + 2\times 0.3\frac{fF}{\mu m} W_n = 0.375\mu m \times 0.25\mu m \times 6\frac{fF}{\mu m^2} + 2\times 0.3\frac{fF}{\mu m} \times 0.375\mu m = 0.7875fF$
   $C_{g4} = 1.125\mu m \times 0.25\mu m \times 6\frac{fF}{\mu m^2} + 2\times 0.3\frac{fF}{\mu m^2} \times 1.125\mu m = 2.3625fF$
   导线电容：
   $C_w = 0.2fF$
   总等效电容：
   $C = 0.1125fF + 0.3375fF + 1fF + 1fF + 0.7875fF + 2.3625fF + 0.2fF = 6.25fF$
   考虑电容C通过Q_N放电，确定平均放电电流，以确定t_{PLH}：$k' = \mu C_{ox}$
   $$\begin{aligned} i_{DN}(0) &= \frac{1}{2}k_n'\left(\frac{W}{L}\right)_n (V_{DD} - V_t)^2 \\ &= \frac{1}{2}\times 115\frac{\mu A}{V^2} \times \left(\frac{0.375\mu m}{0.25\mu m}\right) \times (2.5V - 0.4V)^2 \\ &= 380\mu A \end{aligned}$$
   $$\begin{aligned} i_{DN}(t_{PHL}) &= k_n'\left(\frac{W}{L}\right)_n \left[(V_{DD} - V_t)\frac{V_{DD}}{2} - \frac{1}{2}\left(\frac{V_{DD}}{2}\right)^2\right] \\ &= 115\frac{\mu A}{V^2} \times \left(\frac{0.375\mu m}{0.25\mu m}\right) \times \left[(2.5V - 0.4V) \times \frac{2.5V}{2} - \frac{1}{2} \times \left(\frac{2.5V}{2}\right)^2\right] \\ &= 318\mu A \end{aligned}$$
   平均放电电流：
   $$\mathrm{i_{DN}}\Big|_{平均} = \frac{i_{DN}(0) + i_{DN}(t_{PHL})}{2} = \frac{380\mu A + 318\mu A}{2} = 349\mu A$$
   则：
   $$t_{PHL} = \frac{C\left(\frac{V_{DD}}{2}\right)}{i_{DN}|_{平均}} = \frac{6.25fF \times \left(\frac{2.5V}{2}\right)}{349\mu A} = 23.3\,ps$$
   由于$\frac{W_p}{W_n} = 3$而$\frac{\mu_n}{\mu_p} = 3.83$，因此本反相器没有完全匹配，因此$\frac{t_{PLH}}{t_{PHL}} = \frac{\frac{\mu_n}{\mu_p}}{\frac{W_p}{W_n}} = \frac{3.83}{3} = 1.3$，所以：
   $t_{PLH} = 1.3 \times t_{PHL} = 1.3 \times 23.3\,ps = 30\,ps$
   可求得t_p为：
   $t_p = \frac{1}{2}(t_{PHL} + t_{PLH}) = \frac{1}{2}(23.3\,ps + 30ps) = 26.5\,ps$
3.