

# MOSFET动态输出电容的作用及测量方法

Alexander J. Young, ON Semiconductor

根据优先级, MOSFET数据表显示的是在单个测量电压时的输出电容。虽然这些参数值足够好, 能跟过去的产品相提并论, 但要在当今器件中使用这些值, 就有些不合适了。因此就需要更好地表征产品的电容。

MOSFET的输出电容跟电压相关; 因此, 单点测量并不能精确地表征元件的电容特性。但能够使用曲线适配方法从此单点找出输出电容方程式。方程式1就是25V电压时的电容示例。

$$C_{oss}(V_{DS}) = C_{oss}(25V) \sqrt{\frac{25V}{V_{DS}}} \quad (1)$$

然后此公式的积分可以用于代替方程式中的单值电容。如图1及图2所示, 方程式1极适用于平面型MOSFET元件, 但像超结(super-junction)等更复杂结构的表征效果极差, 导致在任何计算中的误差都过大。

我们可以使用有效电容测量方法, 而非创建不同方程式来更好适应各类新器件

架构的电容特性。有效电容值代表的是相同充电时间或充电能量(可高至给定电压)条件下的结果。这些值考虑到了电容变化, 而无需使用方程式1时可能要求的复杂公式或积分。

## 使用有效电容

可以使用有效电容来对能量损耗及谐振拓扑结构设计进行建模。当对硬开关(hard switching)拓扑结构进行能量损耗建模时, 输出电容中储存的能量在每个开关周期损失为热量。随着开关频率上升, 开关损耗接近导电损耗, 严重影响能效。输出电容与功率损耗之间的关系如方程式2所示。这只是开关损耗的其中一个组成部分, 但它很重要。当选择MOSFET及为MOSFET设计散热片时, 还需要考虑到开关期间的其它功率耗散。

$$P_{oss} \approx \frac{1}{2} C_{oss\_eff} V_{DS}^2 f \quad (2)$$

我们在谐振拓扑结构中使用有效电

容来确保零电压开关(ZVS)。为了实现ZVS, 磁化电流及死区时间(dead time)必须足够大, 从而对一个MOSFET的输出电容放电, 并对另一个充电。如果磁化能量太小, 电路将采用硬开关模式工作, 损失了转用谐振拓扑结构所获得的一些能效。如果磁化能量太大, 过多的能量会丢失, 同样将让使用谐振拓扑结构获得的能效提升最小化。为了设计可以使磁化能量足够低同时还维持ZVS的电路, 必须使用MOSFET的有效电容, 如方程式3所示。

$$E_{Magnetizing} \geq \frac{1}{2} C_{oss\_eff} V_{out}^2 \quad (3)$$

计算死区时间 $\Delta t$ 也需要有效电容:

$$\Delta t \geq \frac{2C_{oss\_eff} V_{in}}{I_{magnetizing}} \quad (4)$$

## 测量有效电容

有几种不同的方法来测量MOSFET的有效输出电容。可以使用恒定输出电压来给输出电容充电, 提供跟时间相关的有效值。第二种方法是以恒定电流来给输出电容充电。第三种方法, 可以对电容电压比曲线进行积分运算, 产生跟能量及时间相关的有效输出电容。

测量时间相关型有效电容的第一种方法是图腾柱驱动器, 如图3所示。此驱动器透过一颗100k电阻对MOSFET充电至其额定电压, 同时以示波器监测漏极电压。测量了漏极电压上升至额定 $BV_{DSS}$ 之80%时的上升时间 $t_r$ 。此值及电阻值一起可用于透过方程式5来计算有效电容。

$$V_C = BV_{DSS} (1 - e^{-t_r / RC_{oss\_eff(n)}}) \\ = 0.8BV_{DSS} \quad (5)$$

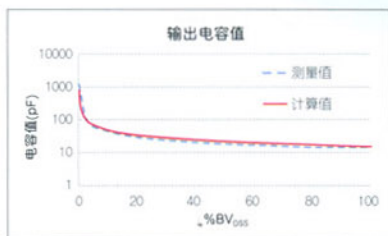


图1: 根据方程式1计算的平面型MOSFET输出电容

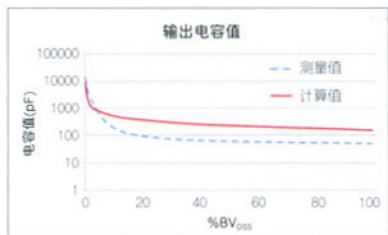


图2: 根据方程式2计算的超结输出电容

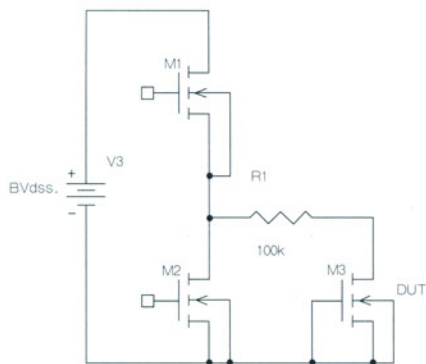


图3: 使用图腾柱配置的有效电容测试电路

求解 $C_{oss\_eff}(tr)$ ，即得：

$$C_{oss\_eff}(tr) = 6.2 \times 10^{-6} t_r \quad (6)$$

为了测量跟能量相关的有效输出电容，必须使用如图4电路之恒定电流来给MOSFET充电。当继电器导通时，测试开始。应当测量给MOSFET输出电容充电所要求的时间，并运用到下述方程式中：

$$I = C_{oss\_eff}(tr) \frac{dV}{dt} \quad (7)$$

其中 $dV$ 为 $BV_{DSS}$ 的80%， $I$ 是用于给MOSFET充电的电流， $dt$ 是测试电路所测量的时间。当求解 $C_{oss\_eff}(tr)$ 时，即得

$$C_{oss\_eff}(tr) = \frac{I dt}{dV} \quad (8)$$

另一种可用于测量同时跟时间及能量相关的电容的方法，是透过MOSFET数据表中通常会给出的电容与电压比较曲线。此方法极有优势，因为它仅要求常备的电感电容电阻(LCR)仪表，无须开发专用装置。需要创建跟电压相关的电容函数来匹配测量的电容曲线。

一旦知悉电容与电压之比的函数，

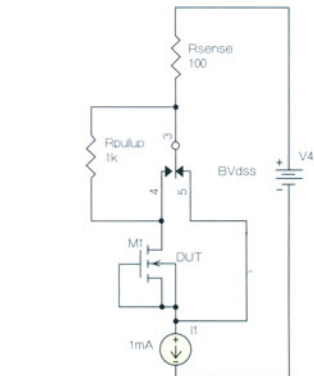


图4: 以有效输出电容电流为基础的测试器

就可以使用方程式10得出跟时间相关的有效电容，其中 $C(V)$ 是跟电压相关的电容函数。

$$Q_{0 \text{ to } 80\%} = \int_0^{0.8BV_{DSS}} C(V) dV \quad (9)$$

$$C_{oss\_eff}(tr) = \frac{Q_{0 \text{ to } 80\%}}{0.8BV_{DSS}} \quad (10)$$

为了获得跟能量相关的有效电容值，在方程式11中使用相同的电压相关型电容函数。

$$C_{oss\_eff}(tr) = \frac{2}{0.8BV_{DSS}^2} \cdot \int_0^{0.8BV_{DSS}} V \cdot C(V) dV \quad (11)$$

## 精度

使用数据表上的单点输出电容测量值，可能是估计输出电容的一种极不精确的方法。不同数据表中选定的电压点各不相同，无法精确表征电容曲线的整体性。透过使用跟能量及时间相关的有效输出电

容值，计算的精度会更高。而即使有效电容值是估计值，对于大多数计算而言它们也足够精确，如图5及图6所示。在 $BV_{DSS}$  80%这个点的实际及估计的 $Q_{OSS}$ 及 $E_{OSS}$ 值差不多。 $Q_{OSS}$ 值可以用于根据方程式12计算功率损耗，其中 $P_{oc}$ 表示的是由存储在输出电容中的电荷导致的功率损耗。此方程式便于用户理解及运用。它还凑巧采用了跟计算MOSFET驱动功率损耗最常用方式相同的形式。当然，仍需要顾及开关期间的导电损耗，以此得出总开关功率损耗。

$$P_{oc} = Q_{OSS} V_{DS} f \quad (12)$$

## 结论

随着开关频率上升及谐振拓扑结构变得更加盛行，MOSFET的输出电容开始在电路性能方面发挥更大作用。由于MOSFET输出电容跟电压呈现非线性关系，其计算就有点麻烦而且耗时。有效电容是可以轻易获得的值，此值可以大幅简化计算，同时维持可接受的精确度。 [ET]

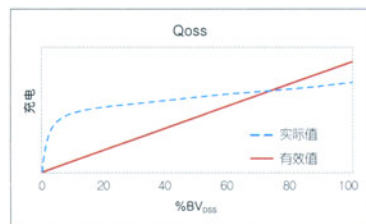


图5: 输出电容中储存的实际及有效电荷

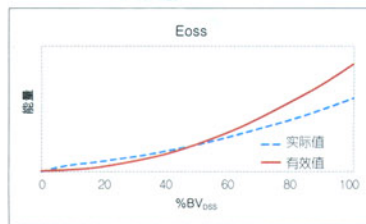


图6: 输出电容的实际及有效能量