

HBT PA 设计中的偏置点选择

陈高鹏

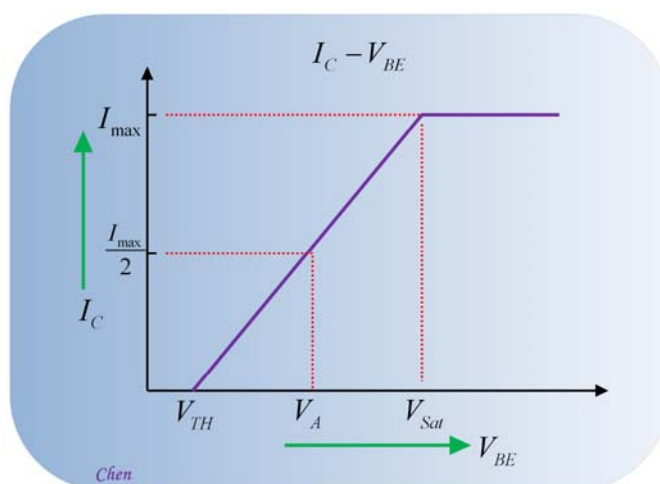
注意：以下分析基于如下三点基本假设：

- HBT 输入-输出转移曲线 ($I_C - V_{BE}$) 为理想线性；
- 忽略膝点电压的影响 (即设 $V_{knee} = 0$)；
- HBT PA 为共发射极形式。

1. 输入端（基极偏置电压）的选择

在 PA 设计中，根据器件输入偏置的不同，器件的导通角不同，从而 PA 的模式也不同¹。换句话说：PA 工作在什么模式（仅限于 Class A/AB/B/C，Class D/E/F 等开关模式不包括在内），唯一决定于器件的导通角大小，而导通角的大小又决定于其偏置点的选择——主要是输入端的偏置点选择。

HBT 理想线性输入-输出转移曲线 ($I_C - V_{BE}$) 如下图所示：



HBT 阈值电压为 V_{TH} ，输出最大饱和电流为 I_{max} ²，此时对应的输入电压 V_{BE} 为 V_{Sat} （饱和）。

图中所示 $V_A = \frac{V_{Sat} + V_{TH}}{2}$ 为 Class A PA 基极偏置电压，在此偏置电压下，对应的输出电流直流分量 I_{DC} 为 $\frac{I_{max}}{2}$ 。当输入正弦射频信号其摆幅不超过 $V_{Sat} - V_A = V_A - V_{TH}$ 时，则输出射频

电流既不发生夹断 (V_{TH}) 也不发生饱和削顶 (V_{Sat})，为完全线性工作。PA 的工作模式与输入端偏置点关系如下表所示：

¹ 参见《功率放大器导通角波形分析—陈高鹏》；

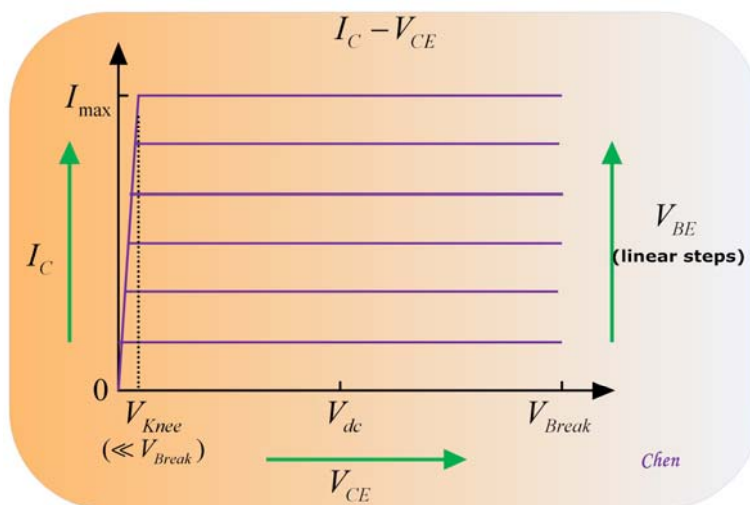
² I_{max} 可定义为 HBT 电流增益开始下降时的集电极电流。

Mode	Bias Point (V_{BE})	Quiescent Current	Conduction Angle
A	V_A	$I_{\max}/2$	2π
AB	$V_{TH} \sim V_A$	$0 \sim I_{\max}/2$	$\pi \sim 2\pi$
B	V_{TH}	0	π
C	$< V_{TH}$	0	$0 \sim \pi$

综上所述，用 ICCAP 测出 HBT 器件的 V_{TH} 、 V_{Sat} 及 I_{\max} 等参数，根据实际设计 PA 的模式选择，来选择 HBT PA 输出端（基极）的合适偏置电压。

2. 输出端（集电极偏置电压）的选择

一般来说，输出偏置点 V_{CE} 的选择不影响 PA 的工作模式。从 PA 输出功率的角度， V_{CE} 的选择既要足够大，以使 PA 有足够大的输出功率能力；又要足够小，使输出射频电压的峰值不超过 HBT 器件的击穿电压 V_{Break} 。HBT 器件的理想输出特性曲线 ($I_C - V_{CE}$) 如下图所示：



膝点电压 V_{Knee} ³ 满足： $V_{Knee} \ll V_{Break}$ ，所以可以近似忽略 V_{Knee} 的影响： $V_{Knee} = 0$ 。图中所示 V_{dc} 为 PA 输出端（集电极）偏置电压。假设 PA 输出射频电压为正弦波，则为了获得最大的摆幅，从而获得最大的输出功率， V_{dc} 应满足： $V_{dc} = \frac{V_{Break}}{2}$ 。一般情况下，PA 输出端偏置点都选择为

$$V_{dc} = \frac{V_{Break}}{2}。$$

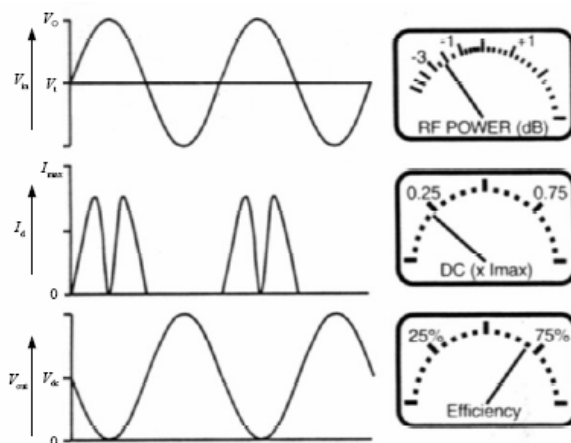
膝点电压 V_{Knee} 的影响：

³ V_{Knee} 一般定义为当输入电压一定时，输出电流达到最大电流值的 95% 时输出电压的值。

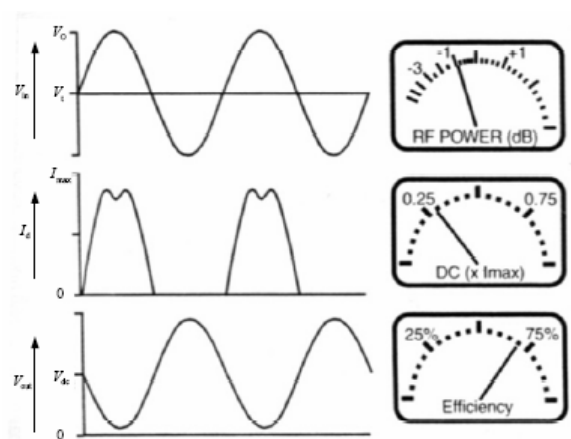
根据负载线理论，当 PA 的负载电阻为 $R_{opt} = V_{dc} / (I_{max} / 2) = 2 \cdot V_{dc} / I_{max}$ 时，PA 将获得最大输出功率。如果计入非零膝点电压 V_{Knee} 的影响，那么最佳负载将变为：

$$R_{opt} = (V_{dc} - V_{Knee}) / (I_{max} / 2)。$$

由于非零膝点电压的影响，PA 输出电流波形中将出现一个双峰，下图所示为 Class B PA 的输出电压和输出电流波形。



当输入正弦信号幅度增加时，输出正弦信号电流幅度也增加（线性跨导），输出正弦信号电压幅度则减小；当输出电压幅度减小到 V_{Knee} 时，HBT 进入到线性区工作，输出电流幅度急剧减小，所以输出功率也大幅减小。仅当输出电压幅度恢复到 V_{Knee} 之上时，输出电流幅度才恢复到原来大小，所以导致输出电流波形出现一个双峰。为了减小 V_{Knee} 的影响，可以通过适当减小负载阻抗 R_L 来减小输出电压的摆幅，如下图所示。



减小输出电压摆幅可以提高输出电压的最小值，减小晶体管进入线性区工作的时间，可以部分恢复 PA 的输出功率。当输出电压幅度减小到一定程度，使得输出电压最小值大于 V_{Knee} 时，输出电流波形将是理想正弦波，不再受到 V_{Knee} 的影响。但这时效率将有所降低。考虑到 V_{Knee} 的

影响, HBT PA 负载阻抗的选择, 应该综合考虑输出功率、效率等因素等进行优化。