

电子喇叭寿命偏短

电流水平限流技术解决难题

喇叭是汽车中颇易受损的一种装置，其寿命一直远低于汽车本身。关键在于喇叭的机械触点。电子喇叭使用MOSFET来执行触点的开关功能，以延长寿命。其它的一些电路用于控制频率和占空比。

如果温度从室温变至 -40°C ，线圈的电感和电阻会发生一些变化，导致线圈电流增大。高电池电压也会使电流增大。这样就极具危险性，电磁力可能推挤活动条(movable bar)撞击静止条(static bar)。而对电子喇叭而言，高压和低温撞击是一个重大问题。

可以通过将电流限制在某种电平之下来稳妥地解决这项问题，而且操作起来也非常容易。在线性区使用MOSFET来钳位电流，

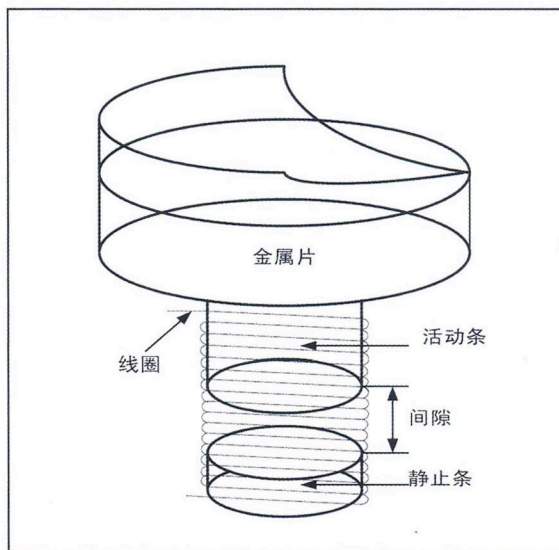


图1：喇叭机械结构

但这种应用的一个主要疑虑是MOSFET的功率耗散。由于MOSFET进入线性区，压降(V_{ds})可能非常大。这样一来，看上去功率耗散就不小了。但事实上，功率耗散并不比未配置限流电路的正常情况高。在限流后MOSFET的“未钳位电感型开关(UIS)”能量会产生少许变化。

本文主要分析MOSFET在不同应用中的功率耗散，最终结果都差不多。如果在正常应用中可行，那么在电流水平限流应用中也就可行。

水平限流功率耗散分析

下图显示了水平限流电路。

图中的T1、T2和R_{shunt}是增加的水平限流元件。线圈电流足够高时，R_{shunt}的压降将达到T1的阈值。然后T1开路，下拉MOSFET的门电压。MOSFET将进入线性区，电流被限制。为了便于计算，我们假定出某些条件，如频率为400 Hz，占空比为70%，二极管压降为1 V，晶体管T1在其集电极电流流动时电压阈值为

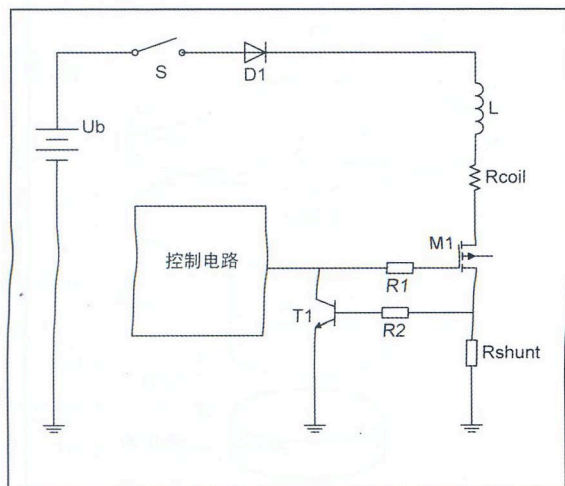


图2：水平限流电路

0.73 V，电池电压的高电平为16 V，采用MOSFET(NTB30N20T4G)。

Ub=16 V, V_{diode}=1 V, V_t=0.73V, T=2.5 mS, D=70%, L=0.8 mH, R_{coil}=0.75 Ω, T_a=25° C, V_{(br)dss}=200V, R_{ds_on}=0.08 Ω, T_j=175° C, E_{as}=450 mJ, t_f<0.1 us

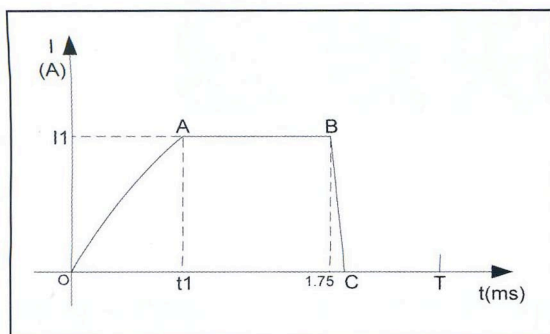


图3：水平限流曲线

1. 开关导通(switch on)期间的功率耗散：
即图3电流曲线中OA段的功率耗散。

$$\tau_1 = \frac{L}{R_{coil} + R_{ds_on} + R_{shunt}} = 0.86ms$$

$$t_{off} = T * D = 1.75ms$$

$$I_1 = \frac{V_t}{R_{shunt}} = 7.3A$$

将限流发生的时间点标定为t1：

$$I_1 = \frac{U_b - V_{diode}}{R_{coil} + R_{shunt} + R_{ds_on}} \cdot (1 - e^{-t_1/\tau_1})$$

$$t_1 = 0.518ms$$

$$W_1 = \int_0^{t_1} \left[\frac{U_b - V_{diode}}{R_{coil} + R_{shunt} + R_{ds_on}} (1 - e^{-t/\tau_1}) \right]^2 \cdot R_{ds_on} \cdot dt$$

$$= 0.85 mJ$$

2. 限流发生时，MOSFET进入线性区。
对应的是图3电流曲线的AB段。

$$V_{ds2} = U_b - V_{diode} - I_1 * R_{coil} - I_1 * R_{shunt} = 8.795V$$

MOSFET的位置接近喇叭壳,而线圈在喇叭内部,并不与MOSFET邻近。如果线圈温度上升,阻抗会增大,线圈阻抗压降也会增大。这有利于(降低)MOSFET的功率耗散。在最坏情况下,线圈的温度上升可忽略不计。

$$W_2 = V_{ds} \cdot I_1 \cdot (t_{off} - t_1) = 79.0987 \text{ mJ}$$

3. 关闭及UIS能量

对应的是图3电流曲线的BC段。根据法拉第电磁感应定律,如果未出现雪崩击穿,MOSFET的漏极点电压将迅速上升:

$$V_d - (U_b - V_{diode}) = L \frac{di}{dt}$$

$$V_d > 58400015V$$

V_d 必须远高于200 V。故必定会出现雪崩击穿。这样电感的压降就是固定值: $BV - (U_b - V_{diode})$ 。根据这种斜坡比,关闭后电流将成正比例下降至0 V:

$$\frac{di}{dt} = \frac{1}{L} \cdot [V_{(br)dss} - (U_b - V_{diode})]$$

将时间间隔标定为 Δt_1 :

电流曲线上的两个点(ms, A)分别是:
(1.75, 7.3), (1.75 + Δt_1 , 0)。

电流表达式为:

$$i = \frac{7.3 - 0}{1.75 - (1.75 + \Delta t_1)} (t - 1.75) + 7.3$$

电磁能量在电感压降作用下释放。

$$\frac{1}{2} \cdot L \cdot (I_1)^2 = \int_{1.75}^{1.75 + \Delta t_1} [V_{(br)dss} - (U_b - V_{diode})] \cdot i \cdot dt$$

$$= [V_{(br)dss} - (U_b - V_{diode})] \cdot \frac{I_1}{2} \cdot \Delta t_1$$

$$\Delta t_1 = \frac{L \cdot I_1}{V_{(br)dss} - (U_b - V_{diode})} = 0.03157 \text{ ms}$$

注: 由于电池持续工作, MOSFET的UIS能量大于电磁能。如果 $V_{(br)dss}$ 接近 U_b , Δt_1 就相当长, 电池受到的影响就相当明显。

$$W_3 = \int_{1.75}^{1.75 + \Delta t_1} V_{(br)dss} \cdot i \cdot dt$$

$$= V_{(br)dss} \cdot \frac{I_1}{2} \cdot \Delta t_1 = 23.046 \text{ mJ}$$

与 E_{as} 相比, 这个值就低得多了。

4. 功率耗散:

单个周期内的总能量:

$$W_{total} = W_1 + W_2 + W_3 = 0.103 \text{ J}$$

功率耗散:

$$P_{total} = W_{total} \cdot f = 41.2 \text{ W}$$

正常情况下的功率耗散分析

正常情况下不配备电流限制电路(T1、T2和Rshunt)。

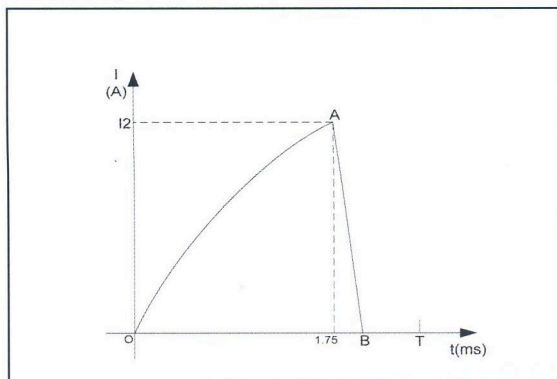


图4: 正常情况下的电流曲线

1. 开关导通期间的功率耗散:

对应的是图4电流曲线上的OA段。

$$\tau_2 = \frac{L}{R_{\text{coil}} + R_{\text{ds_on}}} = 0.964 \text{ms}$$

$$I_2 = \frac{U_b - V_{\text{diode}}}{R_{\text{coil}} + R_{\text{ds_on}}} \cdot (1 - e^{-t_{\text{off}}/\tau_2}) = 15.13 \text{A}$$

$$W1^* = \int_0^{t_{\text{off}}} \left[\frac{U_b - V_{\text{diode}}}{R_{\text{coil}} + R_{\text{ds_on}}} (1 - e^{-t/\tau_2}) \right]^2 \cdot R_{\text{ds_on}} \cdot dt$$

$$= 12.59 \text{mJ}$$

2. 关闭及UIS能量

对应的是图4电流曲线上的AB段。

$$\frac{1}{2} \cdot L \cdot (I_2)^2 = [V_{(\text{br})\text{dss}} - (U_b - V_{\text{diode}})] \cdot \frac{I_2}{2} \cdot \Delta t_2$$

$$\Delta t_2 = \frac{L \cdot I_2}{V_{(\text{br})\text{dss}} - (U_b - V_{\text{diode}})} = 0.065427 \text{ms}$$

$$W2^* = V_{(\text{br})\text{dss}} \cdot \frac{I_2}{2} \cdot \Delta t_2 = 98.991 \text{mJ}$$

3. 功率耗散:

单个周期内的总能量:

$$W_{\text{total}} = W1 + W2 = 0.1116 \text{J}$$

可将这能量与Eas比较。可见水平限流电路保护了MOSFET免受雪崩冲击。

功率耗散:

$$P_{\text{total}} = W_{\text{total}} \cdot f = 44.64 \text{W}$$

热阻抗要求

根据上面的分析, 水平限流应用中的MOSFET功率耗散与正常使用情况下相近, 而且更低。

要求的热阻抗是:

$$T_j = T_A + P \cdot R_{\theta \text{JA} - r}$$

$$R_{\theta \text{JA} - r} = \frac{T_j - T_A}{P} = 3.64 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$$

面积大约 6cm^2 的冷却排管(cooling fin)可将热阻抗降低到低于 $10 \text{ } ^\circ\text{C} / \text{W}$ 。如果喇叭金属壳用于冷却, 它就可以大幅降低热阻抗, 并满足热阻抗要求了。事实上, 如今电子喇叭中已在广泛使用喇叭壳来冷却了。

结论

如果正常应用中未限制电流, UIS能量就会较高, 释放电磁能量的时间间隔也会更长。由于电流更大及时间间隔更长, 电池在UIS能量释放期间的工作负荷更大。

根据功率耗散分析, 水平限流和正常情况这两种应用中的能量相近, 但水平限流应用能量甚至稍低一些, 因此可以使用这种电路。对于电子喇叭高压和低温撞击问题而言, 这就是一种有效的解决方案。

(本文作者为安森美半导体应用工程师)

术语

UIS: 未钳位电感型开关(Unclamped Inductive Switch)

Ub: 电池电压

$V_{(\text{br})\text{dss}}$: 击穿电压

Eas: 单脉冲漏极至源极雪崩能量

Ta: 环境温度

Tj: 工作结温

Tf: 关闭时间