

## 正确偏置TL431 可获得更好的输出阻抗

作者：安森美半导体公司 Christophe BASSO

众所周知，TL431 在开关电源(SMPS)反馈环路中是参考电压。该器件结合了参考电压与集电极开路误差放大器，具有操作简单和成本低廉等优点。虽然 TL431 已在业内被长期广泛采用，但一些设计人员仍会忽略它的偏置电流，以致在无意间降低产品的最终性能。

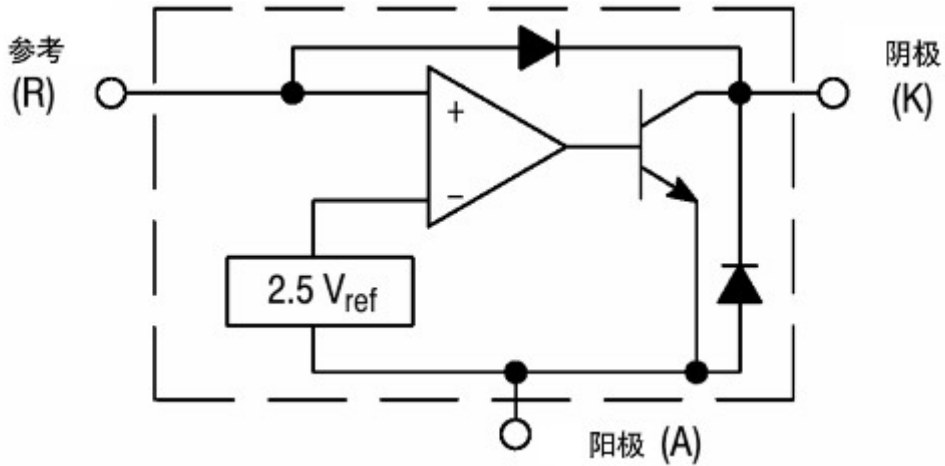


图 1 TL431 等效电路图

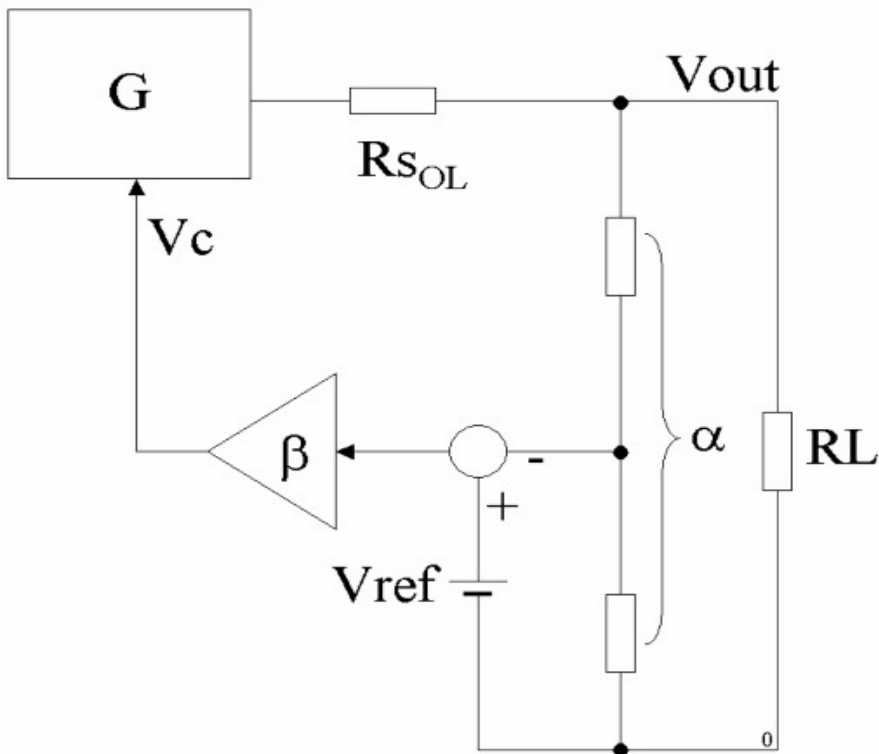


图 2 SMPS 简化直流模型 (不考虑输入波动)

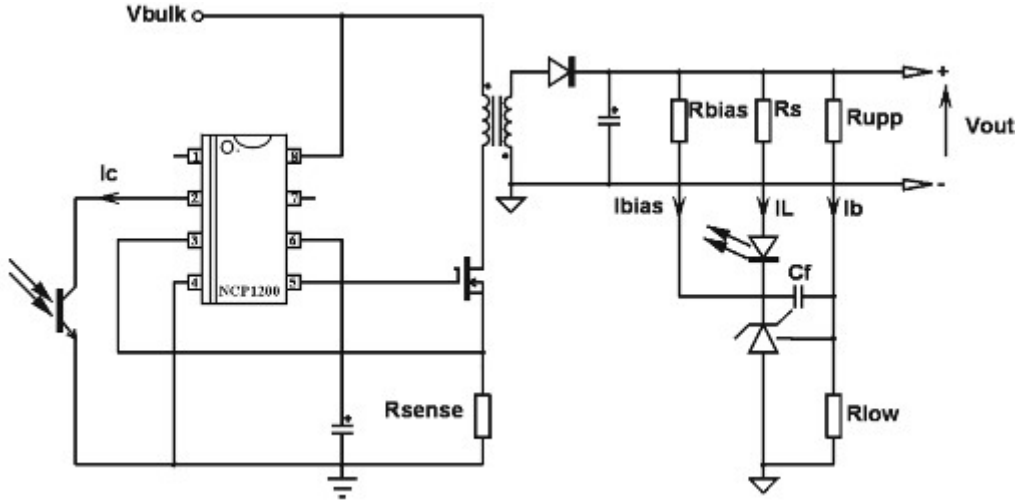


图 3 使用传统的分流稳压器配置连接 TL431

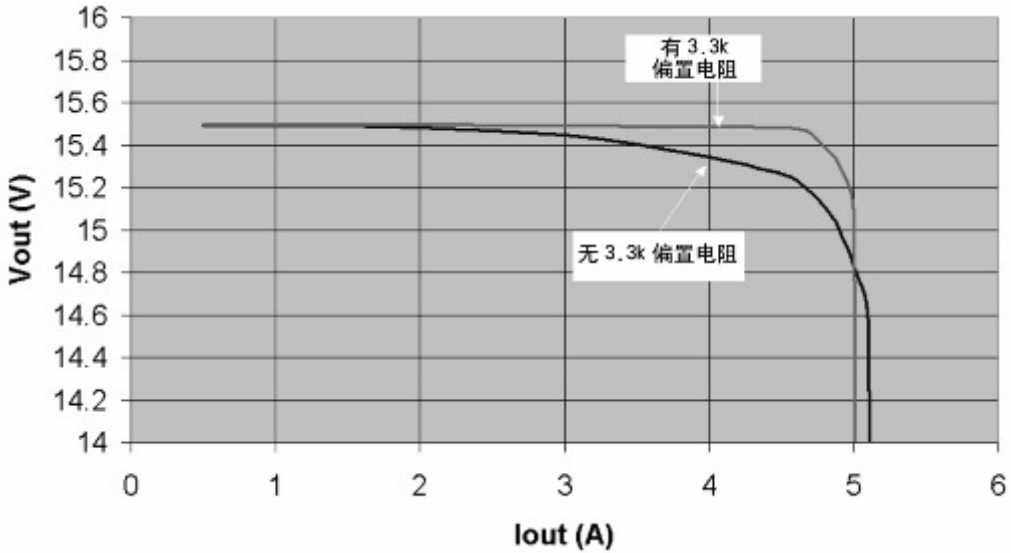


图 4 TL431 偏置电流过低时性能将明显下降

TL431 的简化电路图如图 1 所示,图中包括了驱动 NPN 晶体管的参考电压和误差放大器,在该封闭的电源系统中,一部分输出电压一直与 TL431 的  $V_{ref}$  (参考电压) 进行比较。转换器简化直流模型如图 2 所示,  $V_{out}$  与  $V_{ref}$  通过受传输率影响的电阻分压器进行比较,可得到输出电压的理论值为  $V_{ref}/\alpha$ 。然而,整个增益链路和各种阻抗均会影响输出电压,如下式所示,其中每个希腊字母均表示一个增益,  $R_{SOL}$  表示开环输出阻抗。

$$V_{out} = (V_{ref} - \alpha \times V_{out}) \times \beta \times G - R_{SOL} \times V_{out} / R_L \quad (1)$$

$$V_{out} = V_{ref} \times \beta \times G / (1 + \alpha \times \beta \times G + R_{SOL} / R_L) \quad (2)$$

$$\text{静态误差} = V_{ref} / \alpha - V_{out} = V_{ref} \times (R_{SOL} + R_L) / [\alpha \times (R_{SOL} + \alpha \times \beta \times G \times R_L + R_L)] \quad (3)$$

从式(3)中可看出,增大增益的值有助减小静态误差,提高输出电压精度。受增益环路影响的另一个重要参数是输出阻抗,系统的输出阻抗可用不同的计算方法得出。任何发生器均可简化为它的 Thevenin 等效,即一个电压电源  $V_{th}$  (空载时测得的  $V_{out}$ , 即令式 2 中的  $R_{SOL} / R_L = 0$ ) 与一个输出阻抗  $R_{th}$  的串联电路。设当负载电阻  $R_L$  为闭环输出阻抗  $R_{th}$  时,输出电压  $V_{out}$  可减小至  $V_{th}/2$ , 以此来计算输出阻抗  $R_{th}$ , 也可将其表示为  $R_{SCL}$ 。令  $V_{th}/2 = V_{out}$  求  $R_{SCL}$ , 由式(2)可得:

$$V_{ref} \times \beta \times G / (1 + \alpha \times \beta \times G) / 2 = V_{ref} \times \beta \times G / (1 + \alpha \times \beta \times G + R_{SOL} / R_{th}) \quad (4)$$

$$R_{SCL} = R_{SOL} / (1 + \alpha \times \beta \times G) \quad (5)$$

由式(5)可得出如下结论:

1. 如果直流误差放大器的增益较大,且  $DC$  较高,则  $R_{SCL}$  接近于零;
2. 由于对反馈返回路径进行了补偿,所以,当增益随频率增大而减小时,  $R_{SCL}$  开始增大。阻抗模块随频率增大而增大,说明该阻抗类似于电感;
3. 当增益降至零时,系统输出阻抗与无反馈时的阻抗相同,均为  $R_{SOL}$ 。此时,系统开环工作。

因此,为了减小静态误差,并降低转换器的动态输出阻抗,大多数 SMPS 设计人员会在设计中保持较大的直流增益值。这里的直流增益由 TL431 提供,可以采用如图 3 所示的纯积分器配置进行连接。

假设图 3 中的  $R_{bias}$  不存在。首先计算分压器网络  $R_{upp}$  和  $R_{low}$ , 桥接电流  $I_b$  应大于 TL431 参考引脚的偏置电流 6.5uA(最大值),以减小因偏置而引起的  $R_{upp}$  误差。对于 12V 输出电压,假设  $I_b=1mA$ 。由于 TL431 通过  $R_{low}$  施加的电压为 2.5V,而  $R_{upp}$  施加的电流为 1mA,因此可以计算出  $R_{low}$  为  $2.5 / 1m = 2.5k$ , 而  $R_{upp}$  则等于  $(12-2.5) / 1m=9.5k$ 。可进一步选择更小的偏置电流,以减小空载条件下的待机能耗。桥接电流值确定后,即可计算  $R_S$ 。 $R_S$  必须能提供足够的电流,使光耦合器集电极(或反馈引脚)小于 1.2V,以启动空载工作状态下的跳周期。在 NCP1200 中,引脚 2 和内部 5V 参考电压间有一个 8k 的上拉电阻。如果反馈电流为 475uA,可将引脚 2 拉至 1.2V ( $V_{pin2}=5-475 \times 8k$ )。考虑到光耦合器在较差情况下有 50%的电流转换比例(CTR),则  $R_S$  必须小于  $(V_{out}-2.5-1V) / 950 < 8.94k$ , 假设为 8.2k。

在 CTR 为 150%的较差情况下,表示 LED 中需要的电流较小,如果将 8.2k 电阻与 TL431

串联，则会发生以下情况：

1. 轻负载情况： $I_{FB} = 475\mu\text{A}$ ，则  $I_L = 475\mu\text{A} / 1.5 = 316\mu\text{A}$
2. 中负载情况： $V_{FB} = 2.3\text{V}$ ， $I_{FB} = 337.5\mu\text{A}$ ，则  $I_L = 337.5 / 1.5 = 225\mu\text{A}$
3. 重负载情况： $V_{FB} = 3\text{V}$ ， $I_{FB} = 250\mu\text{A}$ ，则  $I_L = 250 / 1.5 = 166\mu\text{A}$

在这种情况下，TL431 的偏置电流不仅随着负载电流而变化，而且也随着光耦合器 CTR 的变化而变化。此外，减小  $R_S$  也不起任何作用，应该通过调节 LED 的内部电流，来调整控制器端的正确反馈电压。这种情况的设计问题源自 TL431 的数据表：必须插入大于 1mA 的偏置电流，才能从不同规格的 TL431 增益中获益。如果不能正确偏置 TL431，就会降低开环增益，导致  $\beta$  增大， $R_{SCL}$  也随之增大。

这一问题可通过增加偏置电阻  $R_{bias}$ ，在外部施加一个偏置电流而解决。由于最缺少电流，所以必须计算此电阻在较差情况下，也就是重负载情况和最高 CTR 时的值。这时  $I_L = 166\mu\text{A}$ 。因此， $R_S$  上的电压为  $166\mu\text{A} \times 8.2\text{k} = 1.36\text{V}$ 。假设 LED 的正激压降为 1V，则阴极电压为  $12 - 1.36 - 1 = 9.64\text{V}$ 。已知  $V_{out}$  恒定为 12V，通过  $R_{bias}$  施加 1mA 电流得到， $R_{bias} = (12 - 9.64) / 1\text{mA} = 2.36\text{k}$ ，或用 2.2k 得到归一化值。因此，在 TL431 上施加的最小电流为  $1\text{mA} + 166\mu\text{A} = 1.16\text{mA}$ 。在空载情况下， $I_L = 316\mu\text{A}$ ，阴极电压为  $12 - (8.2\text{k} \times 316\mu\text{A}) - 1 = 8.4\text{V}$ ，因此，流经 TL431 的总偏置电流为  $(12 - 8.4) / 2.2\text{k} = 1.63\text{mA}$ ，加上实际的反馈电流值 316 $\mu\text{A}$ ，总偏置电流为 1.95mA，应处于安全电流范围内。

在 NCP1200 构成的电源上进行了有偏置电阻和无偏置电阻的实验，结果如图 4 所示。没有偏置元件时，输出阻抗测量值为 57m $\Omega$ ；连接偏置电阻(阻值为 3.3k $\Omega$ )后，输出阻抗值降至 4m $\Omega$ 。

总之，通过外部电阻对 TL431 进行正确偏置是非常重要的。如果无法承受额外的 1mA 输出电流的预算(由于要尽量降低空载待机能耗)，就应使用 TLV431 ( $V_{ref} = 1.24\text{V}$ ) 或 NCP100 ( $V_{ref} = 0.7\text{V}$ )，因为它们只需要 100 $\mu\text{A}$  的最小偏置电流，且击穿电压更小。此外，8.2k $\Omega$  的串联电阻  $R_S$  极为罕见，因为该电阻结合光耦合器的集电极上拉电阻可以产生直流增益。如果电阻值约为 1k $\Omega$  或稍大于 1k $\Omega$ ，则更接近标准值。