

从 USB 获得高效的双轨电源

设计 5V 以外电源的小功率 USB 电路时，您必须确定是使用独立电池，还是使用来自主机的小型电源。如果电路需要大于 5V 的双轨电源(如采用了基于运放的仪表放大器)，或必须用于便携计算机如笔记本电脑上，则问题就更复杂了。

USB2.0 标准规定了对连接设备的功率要求，即耗电最大 100mA，视为小功率；耗电最大 500mA，则视为大功率。本文所述电路原用于一个热致发光(TL)仪器设计，设计中的微控制器、USB 接口控制器，以及 10 个运放均作为小功率器件，从一个 USB 端口获得全部电源。

设备的运行需要有高性能、低噪声拾取，使系统射频辐射尽可能低。在搭建电路以前，做过仿真与验证，然后用于 TL 系统。本设计的吸引力在于，由于它采用的是常见元器件，提高了可重复性，同时降低了成本。

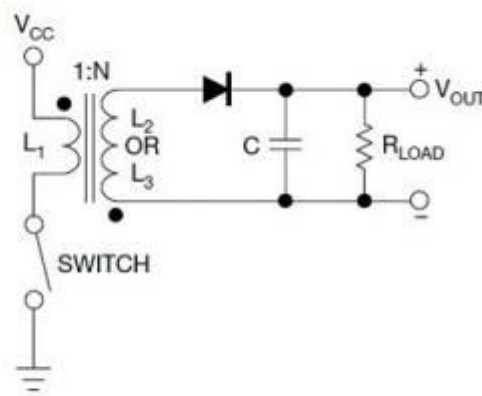


图1: 当开关打开时，这个基本的反激式转换器泵将电荷存储进滤波电容器C。

电路运行原理基于反激概念(图 1)，运行期间，一只小型变压器受一只脉冲调制 555 非稳电路的驱动，工作频率在 115kHz~300kHz。高工作频率可以使电路的整体尺寸较小，同时提供相对较高的功率输出以及良好的调节性，使输出滤波更容易做到低纹波。

实际电路中用一只 MOSFET 来实现开关。图 1 中，二极管对正的 VOUT 表现为正偏。将二极管和一个变压器绕组极性反向，就获得一个负的 VOUT。电路工作在三个不同的相位。在相位一，开关闭合，因电流流过变压器初级，能量以磁场形式存储起来。二极管反偏，次级没有电流流过。

在相位二，开关打开，二极管变成正偏，能量从磁场传送给电容 C。在相位三，能量的转储完成，在开关漏源电容中存储的任何剩余电荷都被完全释放。然后重复这个循环。

为更好地解释电路的工作原理，比较简单的办法是假定恰在时间 $t=0$ 以前，滤波器电容已经放电到标称输出电压，而通过变压器初级线圈的电流为零。 $t=0$ 时，开关闭合，电流开始流经初级线圈。这样就会在次级线圈上产生一个电压，极性如图 1 所示。由于二极管是反偏，因此没有次级电流流过，次级线圈相当于开路。变压器初级端的作用就好比一个简易装的电感器。初级电流呈线性增加，公式如下：

$$I = \frac{V_{CC}}{L_1} t$$

在开关闭合期间，次级线圈上的感应电压为 nV_{CC} 。因此，二极管必须承受的最小反偏电压为 $(nV_{CC}+V_{OUT})$ 。过了既定时间后，开关打开。在实际电路中，这相当于 MOSFET 被关闭。假设初级线圈中的电流在该时刻为 I_{PK} ，则电感器中存储的磁场能量就等于：

$$E = \frac{1}{2} I_{PK}^2 L_1$$

由于初级线圈与次级线圈之间的磁通量，当初级电路开路时，电感器中存储的但正在崩溃的磁场在次级端中感应出了足够高的电压 ($>V_{OUT}$)，使二极管正偏。电流的初始值为 $I_2 = I_{PK}/n$ 。在二极管正偏期间，次级线圈上的电压将为 $(V_{OUT}+0.7)$ 。这也可以看作初级端电压向下变换为 V_{OUT}/n 。因此，当开关打开时，它必须承受的实际电压是：

$$V_{REVERSE} = \left(V_{CC} + \frac{V_{CC}}{n} \right)$$

这个公式强调了反激转换器相对于有相当输入输出电压的升压转换器的优势，即当开关打开时，降低了它必须承受的电压。事实上，“关断”周期的电压降低到一个值，该值由变压器线圈匝数比确定。这样就可以使用较低击穿电压的 MOSFET。另外，在升压转换器拓扑中，二极管必须同时承受“开启”时的高电流，以及“关断”时的高反向电压。而在反激转换器中，次级端的二极管在电流较低时 (I_{PK}/n)，需要承受高电压。这样就允许使用较小电容的二极管，从而获得较快的开关速度，因而减少了能耗，提高了效率。

虽然这超出了我们的电流范围，您仍可以计算输出电压，方法是让 L1 中的能量输入量等于传送给负载 RLOAD 的能量。稳态时，输出与开关的占空比 D 以及开关工作的频率有关，即开路输出电压公式为：

$$V_{OUT} = V_{CC} \left(\sqrt{\frac{R_{LOAD} T}{2L_1}} \right) D$$

在图 2 的实际电路中，可以找到图 1 基础反激电路的所有元件。不过，这里做了一些微调，以实现更好的运行稳定性。例如，配置两只输出二极管，这样就可以获得双轨输出。另外，正电压轨反馈由 R4 和 R5 构成的分压器采样，其电平由电容 C2 做平顺。普通的 555 非稳态工作时也可能产生输出波形，这是由于时序电容(C1)通过 R1 和 R2 的和，从 VCC 充电，并通过 R2 放电。在所使用的电阻值(即 $R_2 \gg R_1$)下，占空比接近 50%。充电/放电电压被内部设定为 $V_{CC}/3$ 和 $2V_{CC}/3$ (即，如果在 5V 下运行，则分别为 1.67V 和 3.33V)。没有反馈时，图 2 中给出的开环输出电压约为 20V。

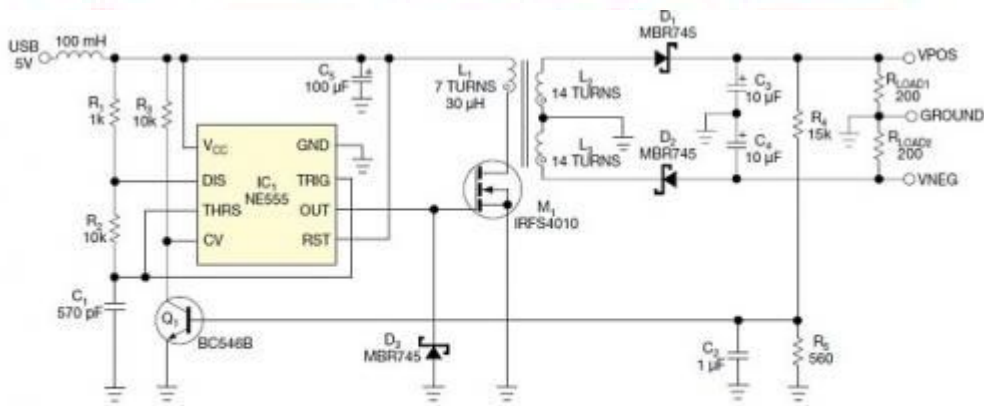


图2: 这个完整电路中，M₁、Q₁以及肖特基二极管都可以使用很多替代品。

反馈工作原理如下：晶体管 Q1 关断，直到其基极电压 (VBE) 约为 0.55V。这样，输出电压可依照以下公式计算：

$$V_{OUT} = \left(1 + \frac{R_4}{R_5} \right) V_{BE}$$

由于反激的作用，输出电压持续升高，Q1 被驱动得更厉害，使其集电极电压下降。由于集电极连接到 555 定时器的控制输入端，其标称的上限约为 $(2V_{CC}/3)$ ，于是使电容以相同的速率充放电，但处于一个狭窄的电压区间。其效果是，同时减小了用于驱动 MOSFET 开关的输出脉冲的开关次数。频率与占空比 (D) 上的净变动使 V_{OUT} 下降，最终降低了反馈电压，也减少了 Q1 的“导通”时间。

电路需谨慎设置的其中一项是反激变压器。经过测试，多款自制变压器的工作性能良好。最终确定的方案是重新使用一个 RFI 抑制电感的磁芯，它主要出现在电视机开关电源的电源输入端。变压器初级采用多股绕线，以减少串联电阻。例如，使用四股 0.3mm 绝缘铜线，紧密缠绕七匝，所得初级电感为 $30\ \mu\text{H}$ ，测得电阻为 $0.03\ \Omega$ 。较低的线圈电阻减少了电感器在开关时产生的焦耳热，从而达到更高的效率。RS-Electronics (RS 库存号 647-9446，由 Epcos 生产) 现有一款适用的、市场上可以买到的铁氧体磁芯和绕线骨架套件。

进一步的优化做法是，D1 和 D2 采用大电流、高速、低正向压降的肖特基二极管。在 MOSFET 的栅极另加一只反偏二极管，以减少 RFI。5VUSB 线上加一个 100mH 扼流圈，也进一步降低了开关噪声。

鉴于我们设计的目的，USB 端口被作为一个 5V 电源，串接了一个 $10\ \Omega$ 电阻，以防最差情况下的 500mA 电流。 $100\ \mu\text{F}$ 的去耦电容 C5 用于防止在电源轨中产生开关噪声。在负载为 $50\ \Omega$ 时，测得的输出效率大约为 72%，输出电压跌至 $\pm 7.6\text{V}$ 。输出也成功地连接到 78L05 等线性稳压器以获得其它电压。在设计方面，可以进一步优化之处是用软件控制输出的切换。这里我们不做细述，但用一个独立的有源晶体管调节 555 的开或关的方法可以实现待机或激活操作。

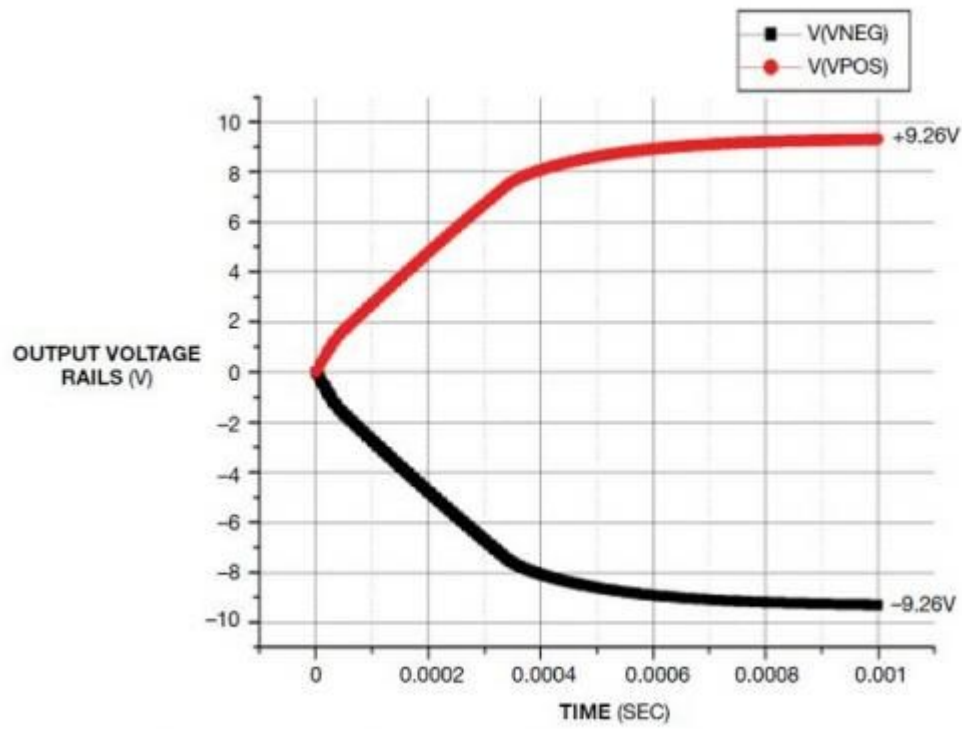


图3: 上电时, 输出稳定在0.8ms内, 两个负载均为200Ω。

OFweek 电子工程网