

# 开关电源实验

(深圳大学电子科学与技术学院 潘飞蹊)

## 一、概述

电源为各种电子设备提供动力，其质量的好坏直接影响到电子设备的可靠性。电源的功能简单来说就是实现能量的转换——将某种形式的电能转换成另外一种特定形式的电能供所需的用电设备使用——例如个人计算机中的电源可以将电网 220V 的工频交流电转换成 12V, 5V 和 3.3V 几种不同电压的直流电，提供给主板、CPU、显卡等部件使用，又例如 UPS（不间断电源）可以将蓄电池中所储备的能量转换成 220V 的工频交流电提供给其它用电设备使用。因此，各种电源越来越受到人们的重视。

现代电子设备中所使用的电源可以粗略地分为线性稳压电源和开关稳压电源两大类。所谓线性稳压电源，就是电源电路中，处理电能的调整管（通常是大功率的双极晶体管或 MOS 晶体管）工作在线性放大区（对于 MOS 晶体管相应地工作在恒流区），这种稳压电源的主要缺点是转换效率低，通常只有 30%~60%，并且一般只能实现降压转换，即只能将较高的电压转换成较低的电源电压输出。

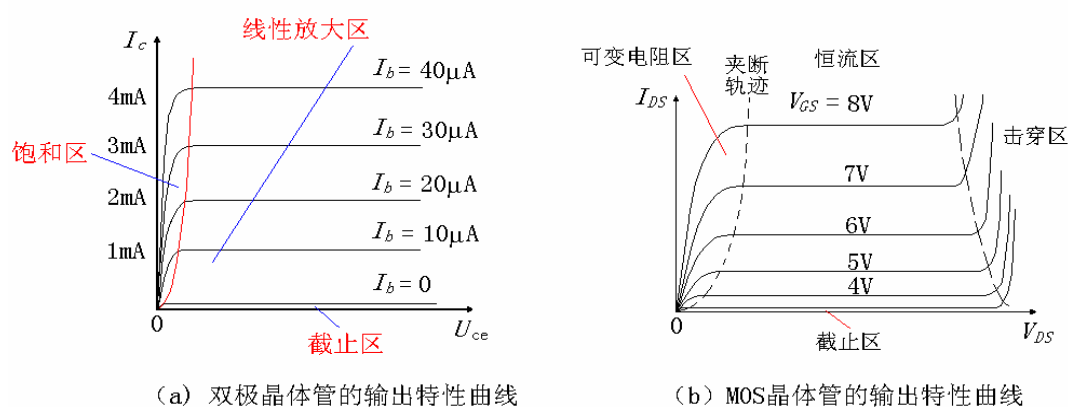


图 1 双极晶体管和 MOS 晶体管的典型输出特性曲线以及各个区域的划分

在开关稳压电源中处理电能的调整管则工作在开关状态（对于 BJT，工作在饱和区和截止区；对于 MOS 晶体管，工作在可变电阻区和截止区），调整管的功能可以直接视为理想开关。在开关电源中，原则上都必须用电感和电容组成一定的 LC 拓扑网络结构，同时通过控制调整管（功率开关管）的开启和关断，使 LC 网络在不同的拓扑结构之间来回变化——即功率开关管在开启时 LC 网络为一种拓扑结

构，而功率开关管在关断时 LC 网络为另外一种拓扑结构。这样，当 LC 网络在不同的拓扑结构之间来回变化时，就可以实现能量的传输和转换。开关电源的主要优点是转换效率高，因为理想开关和 LC 网络都不会有能量的损耗，所以转换效率可以高达 95% 以上，并且可以实现升压或降压转换。因此，目前在计算机、通讯、雷达、电视以及家用电器中开关稳压电源已经得到了广泛的使用。

## 二、实验目的

开关电源的结构多种多样，在电力电子技术中的有六种形式的基本开关变换器——Buck、Boost、Buck-Boost、Zeta、Sepic 和 Ćuk。从拓扑结构基础上来说，Buck、Boost 两种变换器最为基本，而其它的变换器结构都是由这两种基本结构演变而来的。本实验的目的是要了解 and 掌握开关电源的这两种基本拓扑结构即其工作原理，了解并熟悉这两种开关电源的控制原理和电路设计。

## 三、两种开关电源基本拓扑结构和工作原理\*

理解开关电源的拓扑结构和工作原理的要点：1、不用去具体考虑功率管（无论是 BJT 还是 MOS 管）的输入输出特性，只需要将其视为理想的受控开关，即可以用外部的电流或电压（BJT 是电流控制，MOS 管是电压控制）信号来控制它的关和断，当它导通时，电阻为零，而断开时，电阻为无穷大。2、电感 L 和电容 C 组成的拓扑网络通过开关进行连接，当开关处于开和断两种状态时，相应的拓扑网络不同，其中尤其要注意电感的充电和放电过程，需要把握住电感上电流的变化过程。

### 1、 Buck 变换器

Buck 变换器又名降压变换器、串联开关稳压器或三端开关型降压稳压器。

其基本电路拓扑结构如图 2（a）所示，由两只开关  $K_1$ 、 $K_2$ ，变换电感 L 和蓄能电容 C 组成。当两只开关  $K_1$  和  $K_2$  交替地开启和关断时，电路能够完成把直流电压  $V_S$  转换成更低的直流电压  $V_{out}$  的输出的功能。在实际电路实现中，开关  $K_1$  可以由一只功率开关管 Q 实现，而开关  $K_2$  可以由一只二极管 D 来代替，如图 2(b)

---

\* 以下介绍的开关电源工作原理中假设了电感电流是连续的这一条件，开关电源的这种工作模式称为连续导电工作模式。如果电感电流不是连续的，则称为不连续导电工作模式。有关开关电源在不连续导电模式下的分析较为复杂，本文不作介绍，读者可以查看相关书籍。

所示，图中功率管  $Q$  是采用一只 P 沟道的增强型 MOS 管，当栅极上的控制电压为低电平时开启，高电平时关断。当功率开关管  $Q$  交替地开启和关断，就可以实现降压变换的功能。理解这一电路拓扑结构时首先需要把握住以下几点：

1、开关  $K_1$  和  $K_2$  必需是交替导通的，其中  $K_1$ （功率管  $Q$ ）是一只主动开关，可以由外部的控制信号来控制其开还是关，而  $K_2$ （二极管  $D$ ）是一只被动的开关，它处于导通还是截止状态取决于外部电压，主要是电感  $L$  上电流的影响。

2、电容  $C$  必须足够大，它的作用是“储蓄”能量，其两端的电压就是输出电压  $V_{out}$ 。当电路的输出和输入平衡时，电容  $C$  可以直接看成一个直流电压源。

3、实现能量的传输和转换的关键元件是电感  $L$ ，当开关  $K_1$  导通时，它将一部分电源中获取的能量储存起来；当开关  $K_1$  关断，当开关  $K_2$  导通时，它将储存的能量释放到电容  $C$  中去。

下面就对 Buck 电路的工作过程做一个具体的分析和描述，并求解出 Buck 电路在稳定工作时电压变比（输出和输入电压之比）和开关占空比（功率管开启时间和开关周期之比）的关系。

当功率管  $Q$  开启导通时（相当于开关  $K_1$  导通），电源电压  $V_S$  的正极相当于直接接在二极管  $D$  的阴极上，而二极管  $D$  的阳极和  $V_S$  的负极相连，因此二极管  $D$  必然处于反向截止状态（相当于开关  $K_2$  断开），其上的电流为零。此时电路拓

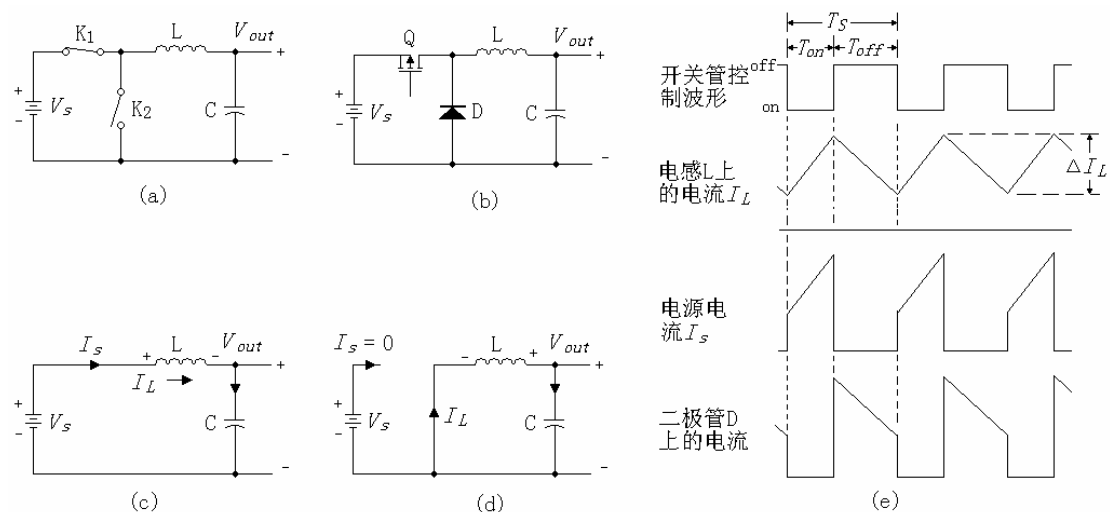


图 2 (a) Buck 变换器的基本结构 (b) Buck 变换器的电路

(c) 功率管开启时的电路拓扑结构 (d) 功率管关断时的电路拓扑结构

(e) 开关控制波形以及各处电流变化波形

扑结构可以简化为图 2 (c) 的连接形式。电源电压  $V_S$  加在电感  $L$  和电容  $C$  上，电感两端的电压差为  $V_S - V_{out}$ ，电源的输入电流  $I_S$  等于电感电流  $I_L$ ，电感和电容同时充电，电流逐渐增大，在整个开启时间  $T_{on}$  内，电感上电流的变化  $\Delta I_L$  为：

$$\Delta I_L = \frac{(V_S - V_{out})}{L} \times T_{on} \quad (1)$$

当功率管 Q 关断时, 由于电感电流必须连续变化, 因此二极管 D 将会导通 (相当于开关  $K_1$  截止,  $K_2$  导通), 为电感电流提供一个放电回路。忽略掉二极管的结电压降, 将其作为理想开关处理时, 电路拓扑结构可以简化为图 2 (d), 电源电流  $I_S$  为零, 电感 L 向蓄能电容 C 放电, 电感两端的电压差为输出电压  $V_{out}$ , 此时电感电流逐渐减小, 当整个电路处于平衡稳定状态时应当有:

$$\Delta I_L = \frac{V_{out}}{L} \times T_{off} \quad (2)$$

(1) 和 (2) 两式的意义还说明在电路工作时, 电感在功率管的开启时间  $T_{on}$  内从电源获得能量, 电流增大, 而所增加的能量, 必须在功率管的关断的放电时间  $T_{off}$  内完全转移到蓄能电容 C 中去, 这样电路才能维持一个平衡稳定的工作状态。联立求解 (1)、(2) 两式, 可以得电压变比:

$$\frac{V_{out}}{V_S} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_S} = D \quad (3)$$

其中  $T_S$  是开关周期,  $D$  称为占空比, 开关管的控制波形和电路中各处的电流波形示于图 2 (e) 中。

上式是一个重要的结论, 可以得到了 Buck 变换器的重要特点:

- 1、该电路只能实现降压功能, 因为占空比一定小于 1。
- 2、在实际电路中可以通过调节开关管的占空比来控制电路的输出电压。

当功率开关管 Q 交替地开启和关断时, 电路在上述两种状态中交替转换, 可以实现降压变换的功能。其中二极管 D 的主要作用是电感 L 续流, 因此也叫续流二极管, 它也可以用其它的开关元件来代替。

## 2、Boost 变换器

Boost 变换器又名升压变换器, 并联开关电路或三端开关型升压稳压器。其基本电路拓扑结构如图 3 (a) 所示, 也是由两只开关  $K_1$ 、 $K_2$ , 变换电感 L 和蓄能电容 C 组成。当两只开关  $K_1$  和  $K_2$  交替地开启和关断时, 整体电路能够完成把直流电压  $V_S$  转换成更高的直流电压  $V_{out}$  的功能。在实际电路中, 开关  $K_1$  可以由一只功率开关管 Q 实现, 而开关  $K_2$  也可以由一只二极管 D 来代替, 如图 3 (b) 所示, 图中功率管 Q 是采用一只 N 沟道的增强型 MOS 管, 当栅极上的控制电压为高电平时开启, 低电平时关断。当电路工作时, 控制信号使功率开关管 Q 交替地开启和关断, 就可以实现升压变换的功能。这一电路的理解要点和 Buck 电路相似, 其中除了要注意 N 沟 MOS 管和 P 沟 MOS 管的栅极控制信号的差别外, 在分析中更

重要的是要注意区分两种电路中各个元件上电流变化的不同点：

首先当功率管 Q 开启时（相当于开关  $K_1$  导通），输出电压  $V_{out}$ （即电容 C 上的电压）的正极直接接在二极管 D 的阴极上，而二极管 D 的阳极和  $V_{out}$  的负极相连，因此二极管 D 必然处于反向截止状态（相当于开关  $K_2$  断开），其上的电流为零。此时将功率管 Q 视为理想开关，电路拓扑结构可以简化为如图 3 (c) 所示，电源电压  $V_S$  全部加在电感 L 上，电感充电，电流逐渐增大，电源的输入电流  $I_S$  等于电感电流  $I_L$ 。在整个开启时间  $T_{on}$  内，电感上电流的变化  $\Delta I_L$  为：

$$\Delta I_L = \frac{V_S}{L} \times T_{on} \quad (4)$$

当功率管 Q 关断时，同样，由于电感电流必须连续变化，二极管 D 将会导通（相当于开关  $K_1$  截止， $K_2$  导通），为电感电流提供一个放电回路。忽略掉二极管的结压降，将其作为理想开关处理时，电路拓扑结构可以简化为图 3 (d)，电感两端的电压差为  $V_{out} - V_S$ ，并且电源电流  $I_S$  仍然等于电感电流  $I_L$ 。此时电感放电，电流逐渐减小，同样，当整个电路处于平衡稳定状态时应当有：

$$\Delta I_L = \frac{(V_{out} - V_S)}{L} \times T_{off} \quad (5)$$

联立求解 (4)、(5) 两式，可以得电压变比：

$$\frac{V_{out}}{V_S} = \frac{T_{on} + T_{off}}{T_{off}} = \frac{T_S}{T_S - T_{on}} = \frac{1}{1 - D} \quad (6)$$

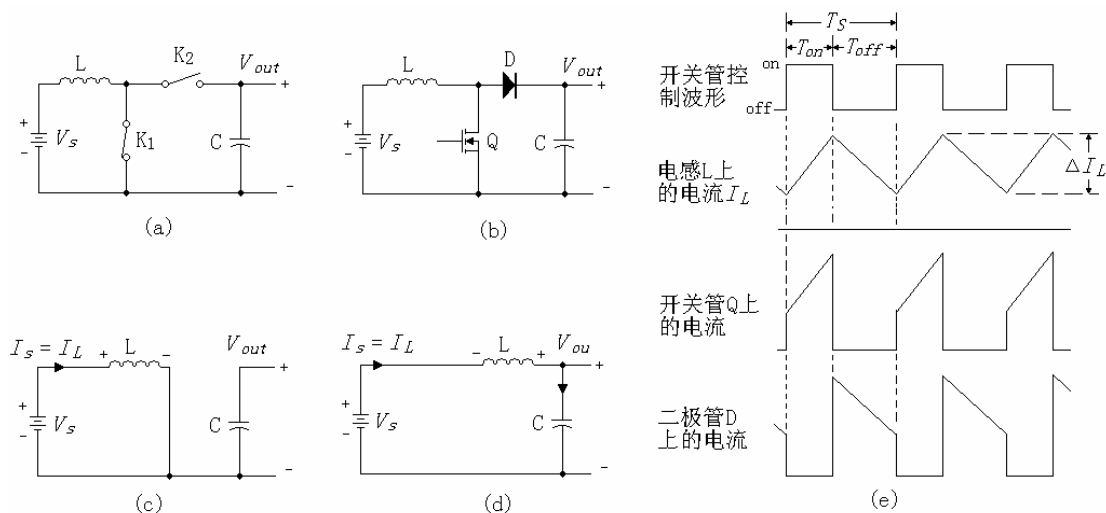


图 3 (a) Boost 变换器的基本结构 (b) Boost 变换器的电路

(c) 功率管开启时的电路拓扑结构 (d) 功率管关断时的电路拓扑结构

(e) 开关控制波形以及各处电流变化波形

上式是关于 Boost 电路的一个重要结论，可以得到以下特点：

1、Boost 电路只能实现升压功能，因为占空比一定小于 1。

2、在实际电路中也可以通过调节开关管的占空比来控制电路的输出电压。

当功率开关管  $Q$  交替地开启和关断时，电路在两种状态中交替转换，可以实现升压变换的功能。同样，续流二极管  $D$  也可以用其它的开关元件来代替。开关管的控制波形和电路中各处的电流波形示于图 3 (e) 中，注意和图 2 (e) 相互比较。

## 四、控制电路原理

从以上的分析中可以得到，要控制开关电源的输出电压，无论 Buck 还是 Boost 拓扑结构，都可以通过控制开关的占空比  $D$  来实现。在实际控制电路的设计中，应用最为广泛的占空比控制方案是脉冲宽度调制（Pulse Width Modification，简称 PWM）技术。下面以 Boost 电路为例来详细说明采用 PWM 控制电路的原理。

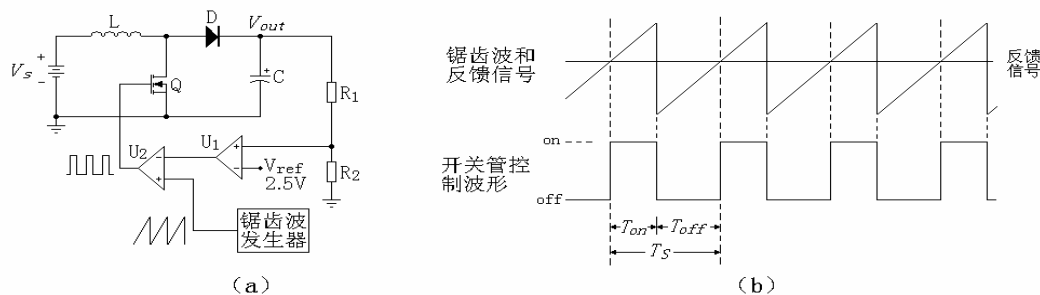


图 4 (a) Boost 型开关电源的控制原理

(b) 脉冲宽度调制 (PWM) 的波形示意图

图 4 (a) 是 Boost 型开关电源电路和控制电路的基本原理图，其中电感  $L$ ，功率 MOS 管  $Q$ ，续流二极管  $D$  和蓄能电容  $C$  组成 Boost 电路的基本拓扑结构。其余控制电路可以分为三个部分：

1、电阻  $R_1$ 、 $R_2$  和运算放大器  $U_1$  组成的反馈放大电路。电阻  $R_1$  和  $R_2$  对输出的电压  $V_{out}$  进行分压采样后，输入运算放大器  $U_1$  并和一个基准电压  $V_{ref}$ （通常采用 2.5V 的基准电压）进行比较，产生输出电压  $V_{out}$  的反馈信号。运算放大器  $U_1$  又叫做误差放大器。

2、锯齿波（或三角波）发生器。

3、 $U_1$  输出的反馈信号和锯齿波信号共同输入比较器  $U_2$ ，产生功率开关管  $Q$  的控制信号，波形如图 4 (b) 所示：当锯齿波信号大于  $U_1$  输出的反馈信号时， $U_2$  输出为高电平，控制功率管  $Q$  导通；当锯齿波信号小于  $U_1$  输出的反馈信号时， $U_2$  输出为低电平，功率管  $Q$  关断。这一过程就是脉冲宽度调制。

控制电路的整体工作原理含有一个负反馈过程，可以按照以下步骤进行理解：

如果输出电压  $V_{out}$  经过  $R_1$  和  $R_2$  后的分压值 ( $V_{out} \times R_2 / (R_1 + R_2)$ ) 小于基准电压  $V_{ref}$ , 则  $U_1$  输出的反馈电压将会下降, 从图 4 (b) 中可以很容易理解, 这会使得开关管控制波形的占空比增加, 即开启时间  $T_{on}$  增加, 这会反过来使输出电压  $V_{out}$  上升; 反之, 如果  $R_1$  和  $R_2$  后的分压值大于基准电压  $V_{ref}$ , 则  $U_1$  输出的反馈电压将会上升, 使得开关管控制波形的占空比减小, 相应使输出电压  $V_{out}$  降低。

在上述负反馈的作用下, 电路的输出电压  $V_{out}$  最终会达到一个平衡点, 即输出电压  $V_{out}$  经过  $R_1$  和  $R_2$  后的分压值 ( $V_{out} \times R_2 / (R_1 + R_2)$ ) 正好等于基准电压  $V_{ref}$ , 因此可以求得电路的输出电压有:

$$V_{out} \times R_2 / (R_1 + R_2) = V_{ref} \quad (7)$$

$$V_{out} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \times V_{ref} \quad (8)$$

上式和运算放大器的同相比例放大公式相同。整个控制电路其实本质上完全可以理解成一个含有深度负反馈的同相比例放大器, 只是电路比单个运放构成的同相比例放大器更为复杂, 但同样可以用深度负反馈的理论进行计算。

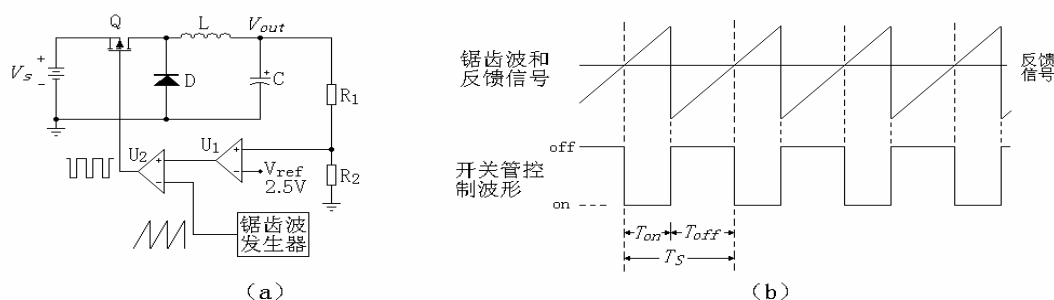


图 5 (a) Buck 型开关电源的控制原理

(b) 脉冲宽度调制 (PWM) 的波形示意图

Buck 型开关电源电路的占空比控制原理和上述 Boost 型的控制基本相同, 如图 5 所示, 注意图 4 和图 5 中比较器  $U_2$  的同相和反相端的连接是相反的。前面已经提过, 由于 Buck 电路所采用的功率管  $Q$  是 P 沟增强型, 因此所需的开关控制信号和图 4 中的正好相反, 即高电平时功率管关断, 低电平时功率管开启。电路中通过改变比较器  $U_2$  的同相端和反相端的连接实现。

同样, Buck 电路本质上可以理解为一个含有深度负反馈的同相比例放大器, 输出电压为:

$$V_{out} = (1 + \frac{R_1}{R_2}) \times V_{ref} \quad (9)$$

在两种电路中, 都可以通过调节电阻  $R_1$  和  $R_2$  的阻值来改变输出电压的大小。

## 五、电路设计

在了解了两种开关电源的基本工作原理和控制原理后，就可以进行电路设计。在图 4 和图 5 中都需要一个锯齿波（或三角波）发生器，这一部分电路较为复杂，下面先对其进行一个简单说明。

实现锯齿波（或三角波）的电路有很多种，实验中采用如图 6（a）所示的电路。该电路分为两个部分，首先由比较器  $U_3$  和外围电路构成一个脉冲发生器，再用脉冲去控制电容  $C_3$  的充放电，形成锯齿波输出。

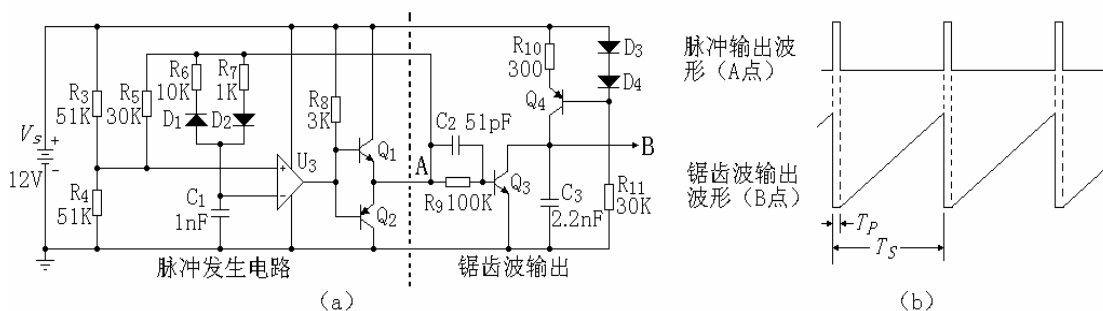


图 6（a）锯齿波发生电路

（b）脉冲输出波形和锯齿波输出波形

实际电路中，比较器  $U_3$  采用 LM393，该比较器输出端为集电极开路（Open Collector）结构，必须外接一只上拉电阻（ $R_8$ ），直接采用这种方式时输出电流能力不强，因此电路中再增加了  $Q_1$  和  $Q_2$  两只晶体管组成的推挽电路，增强比较器电流输出能力，即电路中  $U_3$ 、 $R_8$ 、 $Q_1$  和  $Q_2$  可以整体视为一个具有大电流输出能力的比较器。外围电路的工作原理可以查看模拟电路书籍中非正弦波发生器的相关内容，这里不再多做介绍。根据图中元件的取值，可以计算出在理想情况下脉冲波形的周期  $T_S = 11\mu\text{s}$ ，脉冲宽度  $T_P = 1\mu\text{s}$ 。<sup>\*</sup>

在锯齿波输出部分电路中，电阻  $R_{10}$ 、 $R_{11}$ ，二极管  $D_3$ 、 $D_4$  以及 PNP 晶体管  $Q_4$  构成的是一个恒流源电路，对电容  $C_3$  充电。NPN 晶体管  $Q_3$  实际上起一只开关作用，在脉冲的作用下，控制对电容  $C_3$  的放电。当脉冲输出波形为低电平时， $Q_3$  相当于关断，不起任何作用， $Q_4$  输出的恒定电流对  $C_3$  充电， $C_3$  上的电压随时间线性上升；当脉冲到来时， $Q_3$  饱和导通，给  $C_3$  提供一个快速的放电通道，使  $C_3$  上的电压回到零。在脉冲输出波形的周期性作用下，电容  $C_3$  上的电压形成如图 6（b）

<sup>\*</sup> 在实际电路中，由于所有元件并非理想，因此实际的脉冲波形和理论计算值有一定差异。对于图 6（a）的电路，在电源电压 12V 时，实际测量的脉冲波形周期  $T_S = 13.5\mu\text{s}$ ，脉冲宽度  $T_P = 2\mu\text{s}$ 。



所示的锯齿波。

电容  $C_2$  称为微分加速电容,其作用是加速晶体管  $Q_3$  在饱和区和截止区之间的转换速度。

将锯齿波发生电路连接到图 4 和图 5 的原理图中,再加上一定的外围电路,就可以设计出所需的开关电源的实验电路,如图 7 所示。在反馈电路中,  $U_4$  采用带隙式基准源 TL431, 提供一个 2.5V 的基准电压,其使用方法类似于稳压二极管。 $U_1$  和  $U_2$  还是采用 LM393,  $R_{13}$  和  $R_{15}$  是连接在 OC 输出端的上拉电阻,  $Q_5$  和  $Q_6$  同样是提高  $U_2$  的电流输出能力。 $R_{14}$  和  $C_4$  构成一阶低通滤波器,作用是降低增个反馈回路的通频带,提高电路的稳定性。同时,这一低通滤波器还有一个作用,即可以使得电路在刚刚上电开始工作时,开关控制波形的占空比不会发生剧烈变化,而是由零逐渐上升到稳定值,这样在电路开始工作时,电路中不会出现剧烈的冲击电流,有利于电路的正常工作和稳定。相应地这一过程称为开关电源电路的软启动过程。

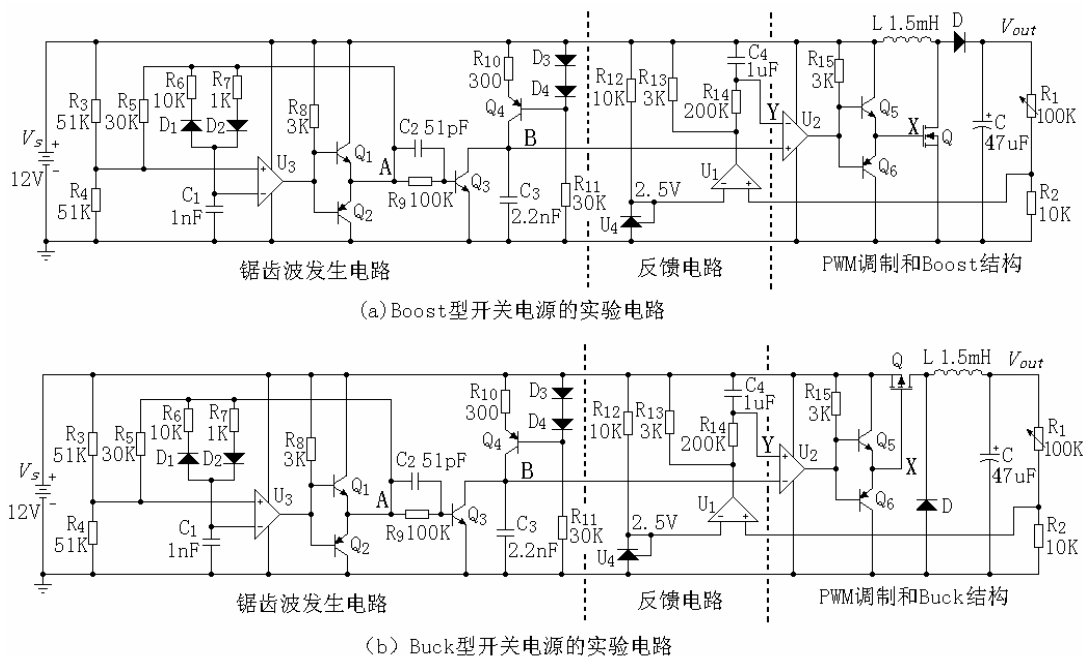


图 7 实验电路

## 六、实验测试步骤

### 1、 Boost 电路的测试

首先将输入电压  $V_S$  调节到 12V, 再调节可变电阻  $R_1$  的阻值, 使电路的输出电

压  $V_{out}$  为 24V。

1)、利用示波器观测脉冲输出波形 (A 点的波形), 记录下脉冲宽度  $T_p$  值, 脉冲波形的周期  $T_S$ 。同时再利用示波器观测锯齿波的输出波形 (B 点的波形), 并和图 6 (b) 的波形进行比较。

2)、利用示波器观测开关管控制波形 (X 点的输出), 记录下控制波形的高电平时间 ( $T_{on}$ ) 和周期  $T_S$ , 计算出占空比。利用已知的输入输出电压, 通过 (6) 式计算出占空比, 和实际测量值进行比较。

3)、利用示波器同时观测开关管控制波形 (X 点的输出) 和锯齿波的输出波形 (B 点的波形), 参照图 4 (b) 计算此时反馈电压 (即  $R_{14}$  和  $C_4$  构成一阶低通滤波器的输出电压, 图中 Y 点) 应该为多少。用万用表测量 Y 点的电压, 并和计算值进行比较。

4)、调节可变电阻  $R_1$  的阻值, 使电路的输出电压  $V_{out}$  为 18V, 重复测量步骤 2 和步骤 3。

### 测试记录表格:

脉冲宽度 $T_p$	脉冲波形的周期 $T_S$

表 1 步骤 1 的记录

	开启时间 $T_{on}$	周期 $T_S$	占空比测量值	占空比计算值
$V_S = 12V$ $V_{out} = 24V$				
$V_S = 12V$ $V_{out} = 18V$				

表 2 步骤 2 的数据记录

	反馈电压的计算值	反馈电压的测量值
$V_S = 12V$ $V_{out} = 24V$		
$V_S = 12V$ $V_{out} = 18V$		

表 3 步骤 3 的数据记录

## 2、 Buck 电路的测试

首先将输入电压  $V_S$  调节到 12V，再调节可变电阻  $R_1$  的阻值，使电路的输出电压  $V_{out}$  为 8V。

1)、利用示波器观测脉冲输出波形（A 点的波形），记录下脉冲宽度  $T_p$  值，脉冲波形的周期  $T_S$ 。同时再利用示波器观测锯齿波的输出波形（B 点的波形），并和图 6（b）的波形进行比较。

2)、利用示波器观测开关管控制波形（X 点的输出），记录下控制波形的低电平时间（ $T_{on}$ ）和周期  $T_S$ ，计算出占空比。利用已知的输入输出电压，通过（3）式计算出占空比，和实际测量值进行比较。

3)、利用示波器同时观测开关管控制波形（X 点的输出）和锯齿波的输出波形（Y 点的波形），参照图 5（b）计算此时反馈电压（即  $R_{14}$  和  $C_4$  构成一阶低通滤波器的输出电压，图中 Y 点）应该为多少。用万用表测量 Y 点的电压，并和计算值进行比较。

4)、调节可变电阻  $R_1$  的阻值，使电路的输出电压  $V_{out}$  为 4V，重复测量步骤 2 和步骤 3。

### 测试记录表格：

脉冲宽度 $T_p$	脉冲波形的周期 $T_S$

表 1 步骤 1 的记录

	开启时间 $T_{on}$	周期 $T_S$	占空比测量值	占空比计算值
$V_S = 12V$ $V_{out} = 8V$				
$V_S = 12V$ $V_{out} = 4V$				

表 2 步骤 2 的数据记录

	反馈电压的计算值	反馈电压的测量值
$V_S = 12V$ $V_{out} = 8V$		
$V_S = 12V$ $V_{out} = 4V$		

表 3 步骤 3 的数据记录

## 七、实验报告要求

- 1、阐述自己的收获和体会。
- 2、简要说明电路的原理，分析测试的实验数据，要求对比一些关键参量的理论计算值和实验测量值，例如振荡周期、占空比等。分析误差可能的来源。
- 3、对本实验的建议，包括改进，疑点等。

## 八、复习思考题

- 1、在两种开关电源中，电源电流，电感电流，功率管 Q 流过的电流以及蓄流二极管 D 上的电流波形是什么样，有何相同和不同。
- 2、在图 6 (a) 的电路中，如果想要改变脉冲宽度  $T_P$ ，脉冲周期  $T_S$ ，可以通过改变哪些元件参数来实现。如果想要改变锯齿波的输出峰值，又需要改变哪些元件参数。
- 3、在图 7 的两种开关电源控制电路部分，哪些电路是相同或相似的。又有哪些是不同的。N 沟增强型 MOS 管和 P 沟增强型 MOS 管的控制有何不同。
- 4、在电路稳定工作时，开关控制波形的占空比，锯齿波波形以及反馈电压这几者之间有什么样的联系。
- 5、理解开关电源控制电路中的负反馈机理，考虑调节电阻  $R_1$  为什么能够改变输出电压的大小。对于两种电路，电阻  $R_1$  的取值调节范围有什么样的限制。

## 附录 实验电路板图

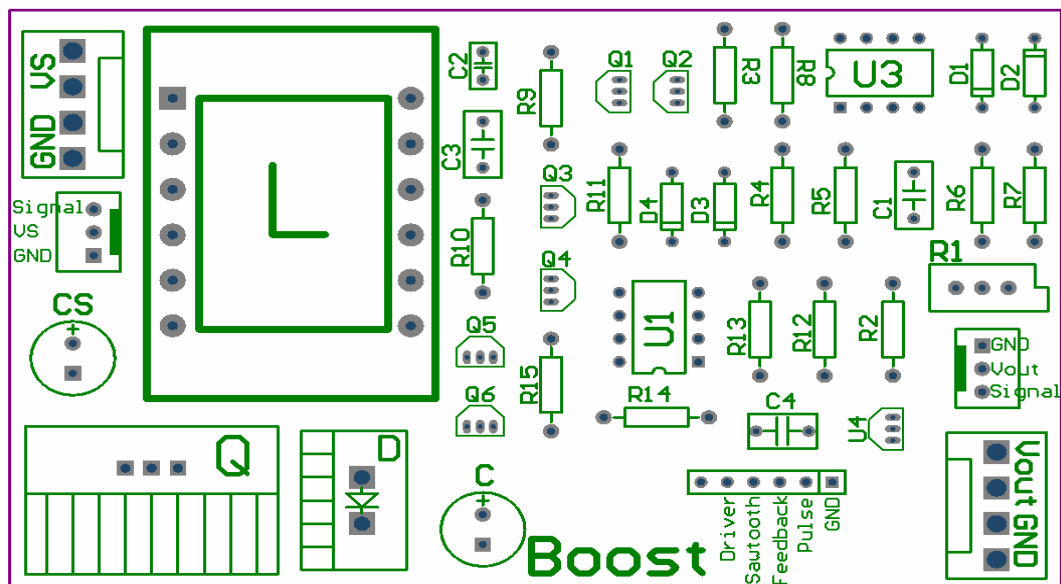


图 8 实验用 Boost 型开关电源表面元件排列版图

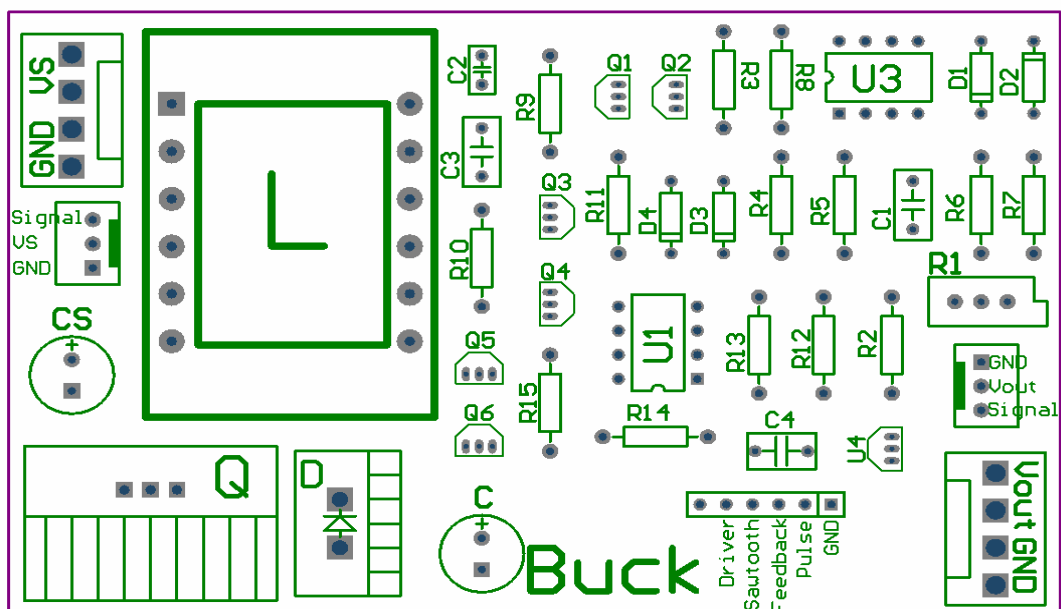


图 9 实验用 Buck 型开关电源表面元件排列版图

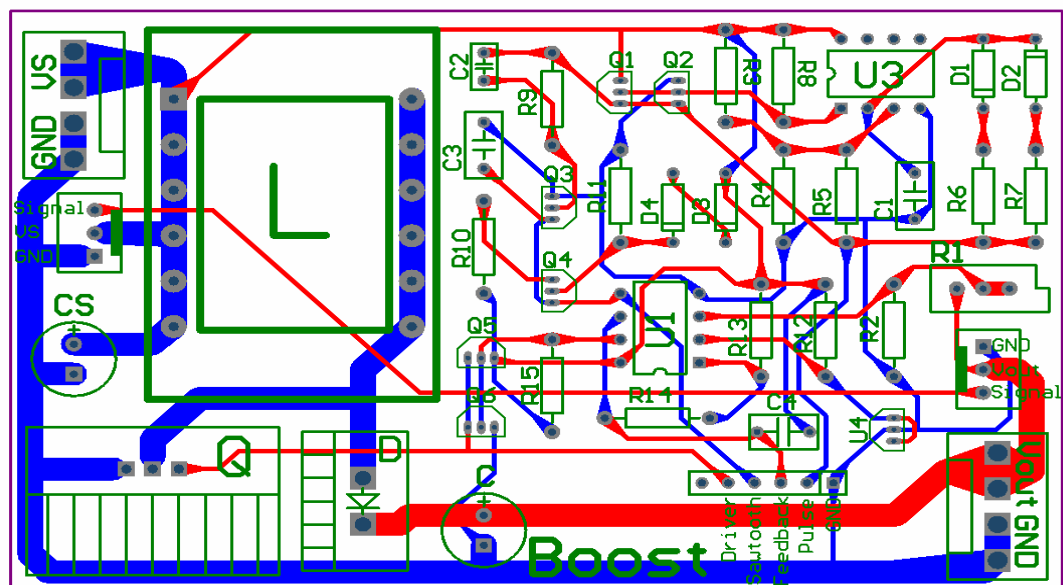


图 10 实验用 Boost 型开关电源印刷电路板版图（底面未含敷铜层）

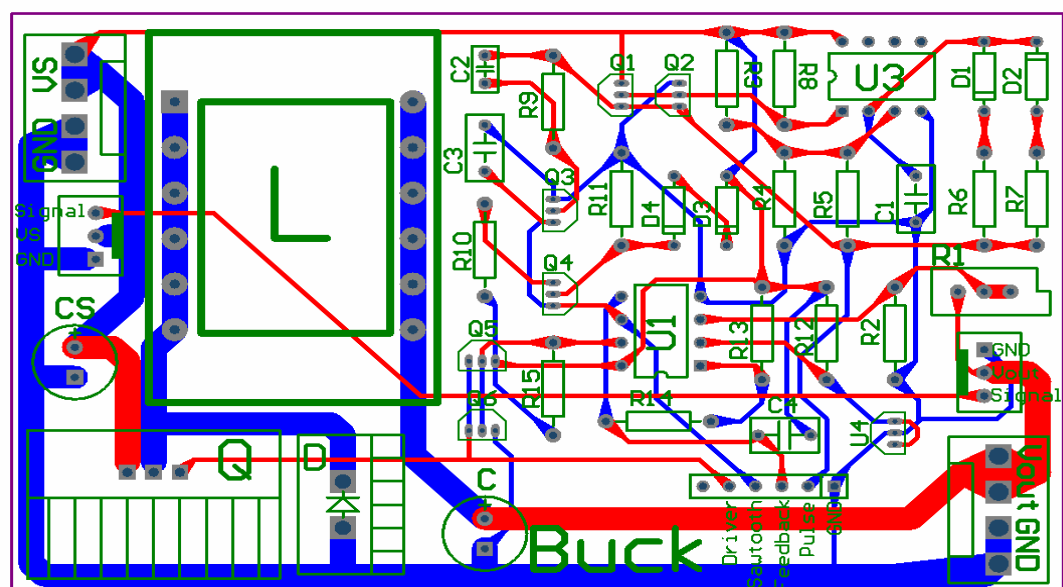


图 11 实验用 Buck 型开关电源印刷电路板版图（底面未含敷铜层）