

全国大学生电子设计竞赛

培训交流资料

# 电源类赛题的分析与应对

王水平 (13991846490、[wsp\\_121@163.com](mailto:wsp_121@163.com))



西安电子科技大学电工电子实验教学中心



陕西省电源学会培训与咨询委员会

西安市电源学会培训与咨询委员会

西安电子科技大学

XIDIAN UNIVERSITY



# 内容提要

- 题型分析
- 训练要紧跟题型发展趋势
- 如何对待大赛
- 初选前的理论和实验 辅导
- 综合训练
- 电源中关键技术归纳
- 经验与教训
- 应用举例



# 第1章 题型分析

## 一、越来越切合工、农、国防生产的需求

1、DC-AC。单相输出、多机并联和三相输出、三相并网，可应用于光伏、风电等新能源发电领域。

2、DC-DC。各种DC-DC变换器（双向DC-DC）、并联扩流（并联均流、各路电流分配）、串联升压、恒功率工作模式。

3、功率因数校正（APFC）。降低无功功率、满足EMC认证，可应用于交流或电网供电的任何电子设备，特别是中大和超大功率的场合。

AC-DC中输入端的APFC， DC-AC中输出端的APFC。

4、无线充电。无线充电技术是目前手机、新能源交通工具、无人机和无人飞行器一直以来正在攻克的关键技术，市场应用前景巨大。

5、超容续航技术。在不间断掉电保护系统和新能源领域超容取代电池均是新能源领域人们一直攻克的技术难题，实际上也就是BMS/CMS系统。



## 二、PWM/SPWM越来越趋于用软件来产生

- 1、AC-DC变换器中的PWM/PFM。同步整流、并联均流和各种驱动、控制、保护以及数显等技术。
- 2、DC-DC变换器中的PWM/PFM。同步整流、并联均流和各种驱动、控制、保护等技术。
- 3、DC-AC变换器中的SPWM。单相输出、多机并联输出和三相输出、三相并网输出，输出端PFC技术，数控及数显技术。
- 4、AC-AC变换器中的PWM。（AC-DC）+（DC-AC）
- 5、双向DC-DC变换器中的PWM/PFM。充电及能量回收技术，应用于新能源交通工具的BMS和下坡或制动时的能量回收。
- 6、电容续航技术中的PWM/PFM。在UPS中，用超级电容取代蓄电池，在新能源供电领域中，用超容取代电池均是新能源领域中人们一直攻克的技术难题，实际上也就是BMS或CMS系统。



### 三、所涉及的技术越来越前沿

在要求数控数显、效率和精度高、纹波低、功率因数大、功能多、重量轻、体积小、价格低和可靠性高的苛刻条件下，迫使参赛学生不得不掌握以下现代电源的前沿技术：

- 1、超低功耗单片机和LCD显示器选型与软件编程技术；
- 2、同步整流技术；
- 3、谐振式软开关技术；
- 4、超高频功率变换技术；
- 5、超高频软磁材料变压器设计与绕制技术；
- 6、各种功率变换器的拓扑结构；
- 7、各种控制和保护的信号采样和混合处理技术；
- 8、弱电控制强电的隔离耦合技术；
- 9、无线能量传输技术；
- 10、数控电子负载技术。



## 四、所涉及的工艺越来越先进

1、PCB板。由于使用了同步整流、谐振式软开关、超高频功率变换、超高频软磁材料变压器设计与绕制技术、各种功率变换器的拓扑结构、各种控制和保护信号处理技术、弱电控制强电的隔离技术和磁共振无线能量传输技术等，因此就使得PCB有更严格的要求，迫使选手只有采用自制PCB板来实现自己设计的电源系统，使学生在动手能力方面充分得到了锻炼和提高。

2、焊接。由于对参赛作品有体积和重量的要求，因此迫使选手不得不放弃插针式元器件，而采用小封装的标贴元器件来实现自己设计的电源系统，使学生在焊接方面充分得到了锻炼和提高。

### 3、功率电感（变压器）加工

由于对参赛作品有体积和重量的要求，因此迫使参赛选手不得不放弃线绕电感，不得不将PWM的频率设计的很高，而采用微带电感来实现自己设计的电源系统，使学生在微带电感设计方面充分得到了锻炼和提高。





## 五、所涉及的学科领域越来越多

- 1、电学。信号处理（数电与模电）、功率变换与驱动、各种保护、电子元器件的选择等。
- 2、磁学。变压器（功率变压器（线性和开关变压器）、耦合变压器和驱动变压器）、储能电感、滤波电感、共模和差模电感、电抗器、互感器等，屏蔽等。
- 3、光学。光电耦合、红外遥控等。
- 4、热学。散热与热结构设计等。
- 5、机械学。PCB、散热器、机壳、屏蔽罩和固定等的机械结构设计。
- 6、材料学。磁性、PCB、绝缘、灌封和粘胶带等材料的选择。
- 7、工艺设计



## 六、对教练的要求越来越高

电源类赛题对教练的要求除了熟知电学（模电、数电……）、磁学（EMC技术，霍尔器件，电抗器、变压器、互感器等电感元器件的设计与加高工艺）、光学（光电耦合、光控……）、热学（能充分散热热结构和热应力设计）、机械学（机械结构布局、各种引线端子、固定件……）、材料学（各种元器件、磁性材料和散热器材料的选型）等自然科学的知识以外，还要懂生理学 and 心理学的一些知识，要不然就不能组好队和把你所带的参赛队员的积极性和热情充分的、最大化的调动起来，也不会将一个组队中三个队员的特点及团队精神全面的调动和发挥出来。





## 第2章 训练要紧跟题型发展趋势

### 1、从大环境和工、农、国防需求方面考虑出训练题

- (1) 互联网，大数据；
- (2) 双创；
- (3) 新能源；
- (4) 军民融合。

### 2、从市场需求考虑出训练题

- (1) 无线充电（手机、新能源交通工具、无人机和水下无人飞行器无线续航充电等）；
- (2) 光伏、风电等发电并网（逆变）；
- (3) BMS、CMS系统。

### 3、从历年来没有出现过的题型考虑出训练题

- (1) 电荷泵式DC-DC变换器；
- (2) E类功率放大器；
- (3) 电磁加热。

### 4、从安全的角度出发不能出的训练题

- (1) 电网供电类训练题；
- (2) 加热类训练题；
- (3) 高压输出类训练题；
- (4) 需要做防护类训练题。



# 第3章 如何对待大赛

## 1、重视大赛

- (1) 宣传参赛的重要性；
- (2) 建立重奖制度；
- (3) 招商引资，让用人单位提供赞助，解决参赛选手所有费用。

## 2、早起步

- (1) 开始起步早（管理层）；
- (2) 挑选选手起步早（教练层）。

## 3、建设长期稳定的教练队伍

- (1) 不选只会纸上谈兵而没有实战经验的老师为教练；
- (2) 把在科研一线的具有各方面特长的老师抽调来成立教练组；
- (3) 各学院之间教练可以共享。

## 4、组队

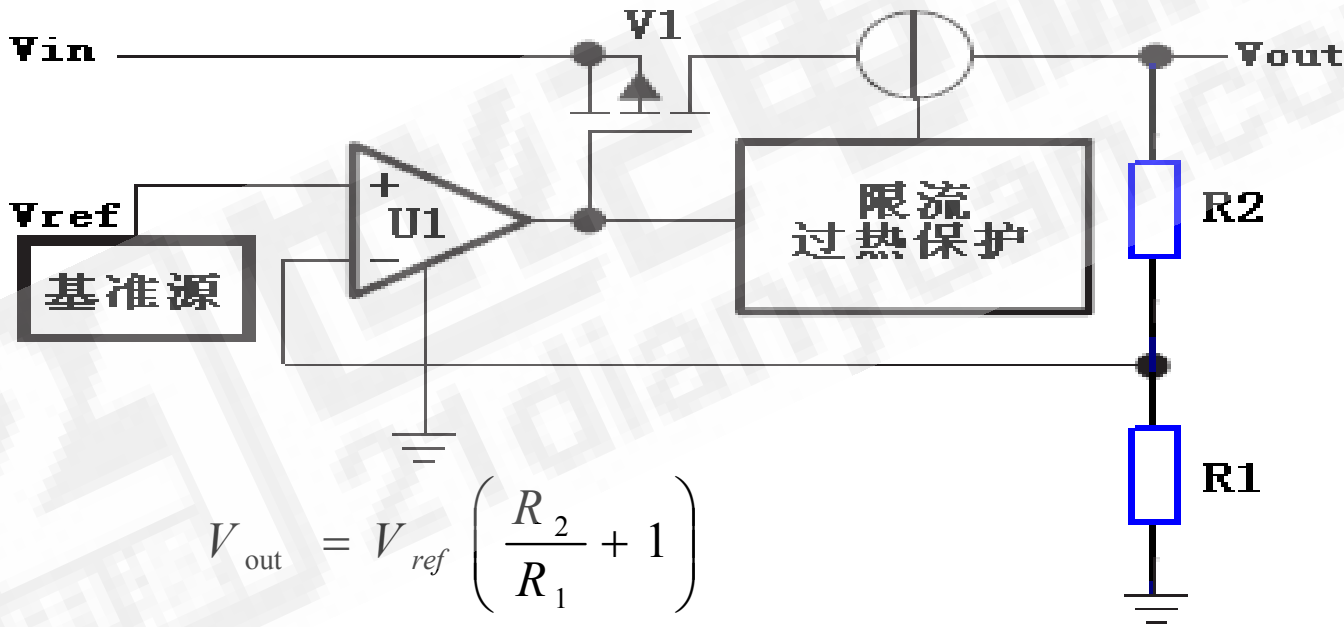
所组的队中首先要保证模电和数电各一个高手，另外一队员可以是二二的新手，为来年大赛作资源储备。队长不一定是该队中技术最强的，但必须是组织能力最强、协调能力最强、吃苦能力最强和奉献精神最强的。



# 第4章 初选前的理论基础和实验

## 1、理论知识

### 1) 低压差线性稳压器 (LDO)





# 几个重要概念

(1) 输入与输出电压之间的关系

$$V_{\text{out}} = V_{\text{ref}} \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right)$$

(2) 输出电压精度

输出电压精度主要取决于基准源的精度，常常选用TL431来充当该基准源。

(3) 输入与输出压差

输入与输出压差主要取决于所选择的功率调整管，要得到较低的压差就要选择饱和导通管压降较低的调整管，常常选用MOSFET功率管来担任。

(4) 动态响应速度

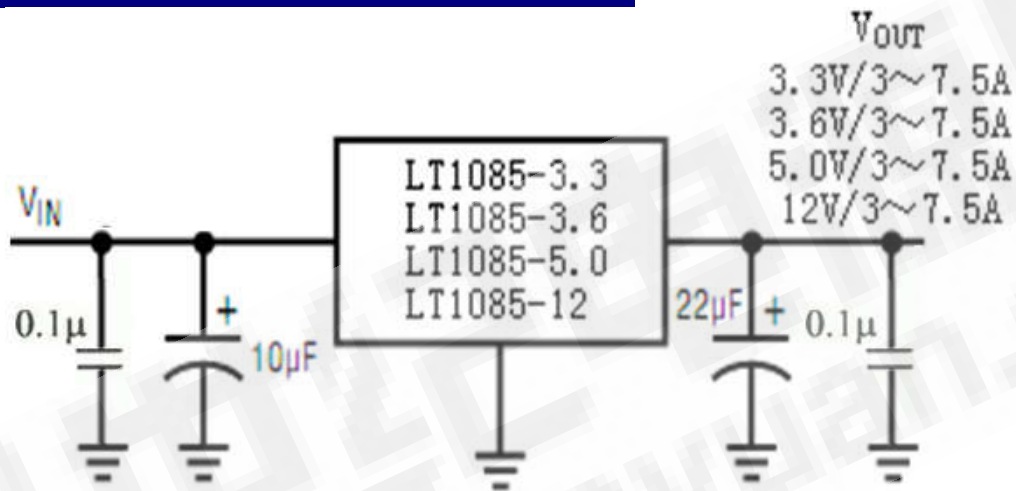
动态响应速度主要取决于比较器的速度，因此要得到较高的动态响应速度就必须选择快速的比较器或运放。

(5) 在稳压电源中的角色

在稳压电源中常常充当末级稳压的角色，但是常常不能工作于低压差的条件下。



## 一个应用实例

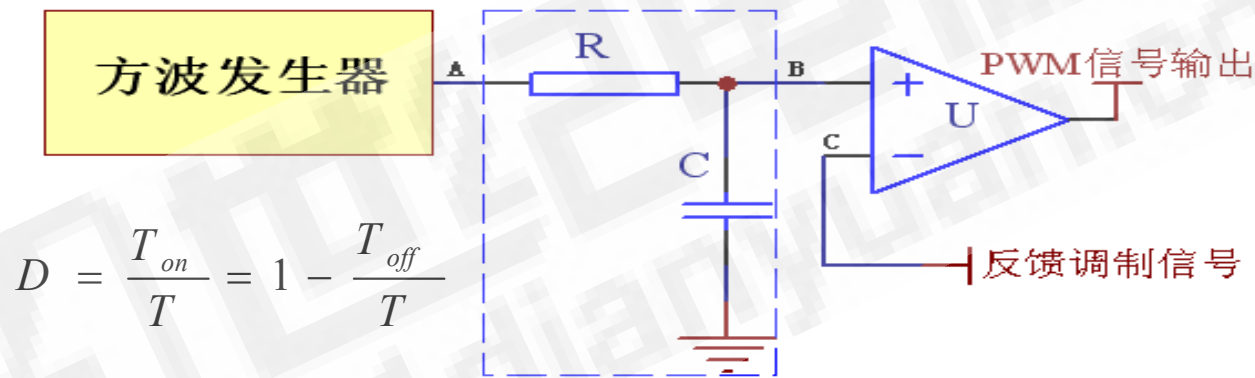


- (1) 输入电压应比输出电压高1V;
- (2) 大电流输出时, LT1085必须外加散热器;
- (3) 输入输出滤波电解电容的容量和耐压应符合要求, 最好选用ESR小的钽电解电容。



## 2) PWM/SPWM发生器

### ● 硬件式PWM发生器



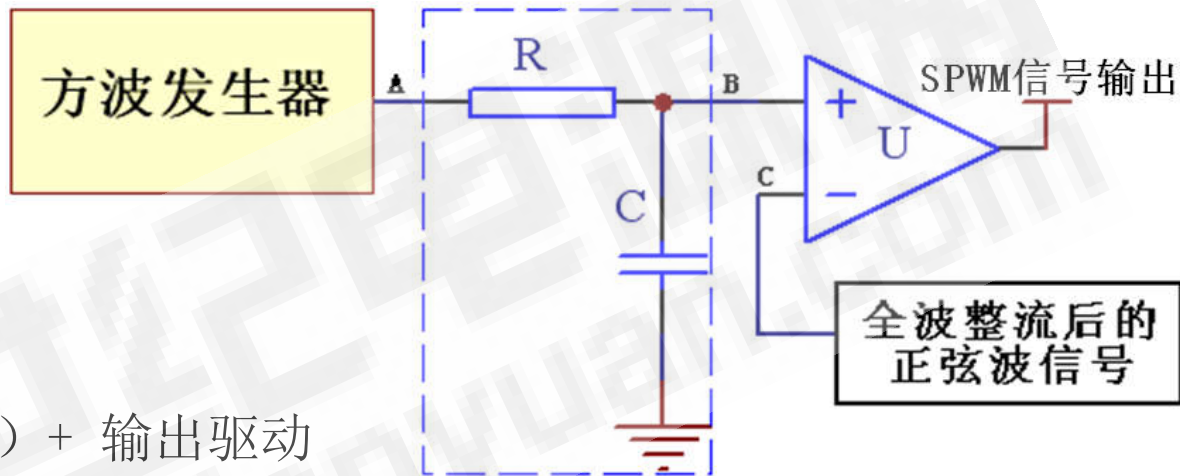
### ● 软件式PWM发生器

单片机 (TI430小系统) + 输出驱动





## ● 硬件式SPWM发生器



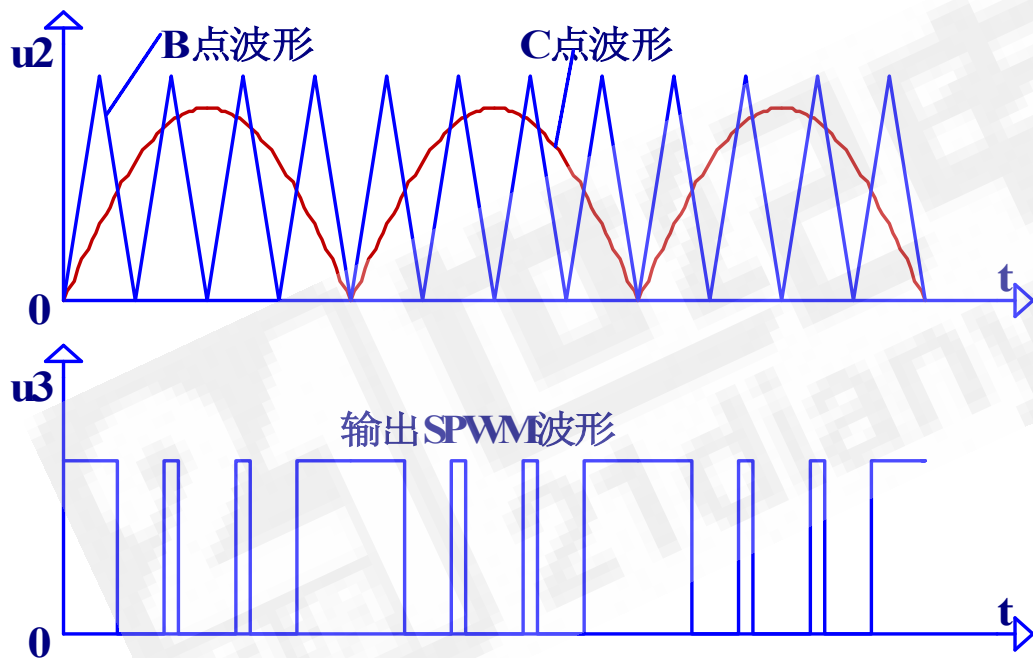
## ● 软件式SPWM发生器

单片机（TI430小系统）+ 输出驱动

在一般的实际应用中，SPWM发生器主要是应用于逆变器电源（UPS）、变频器和D类功放电路中。因此需重点说明，图中的全波整流后的正弦波信号是由与输出要求的正弦波频率相同的标准正弦波信号和来自于输出正弦波的取样反馈信号的合成信号。



## ● SPWM发生器时序波形



若输出为PWM信号时，图中的正弦波就为慢变化的直流信号；若为D类功放电路时，图中的正弦波就为音频信号，所输出的正弦波脉宽调制信号就变成音频信号脉宽调制信号。



# 几个重要概念

(1) 占空比D。PWM信号的占空比D可由下式表示出来:

$$D = \frac{T_{on}}{T} = 1 - \frac{T_{off}}{T}$$

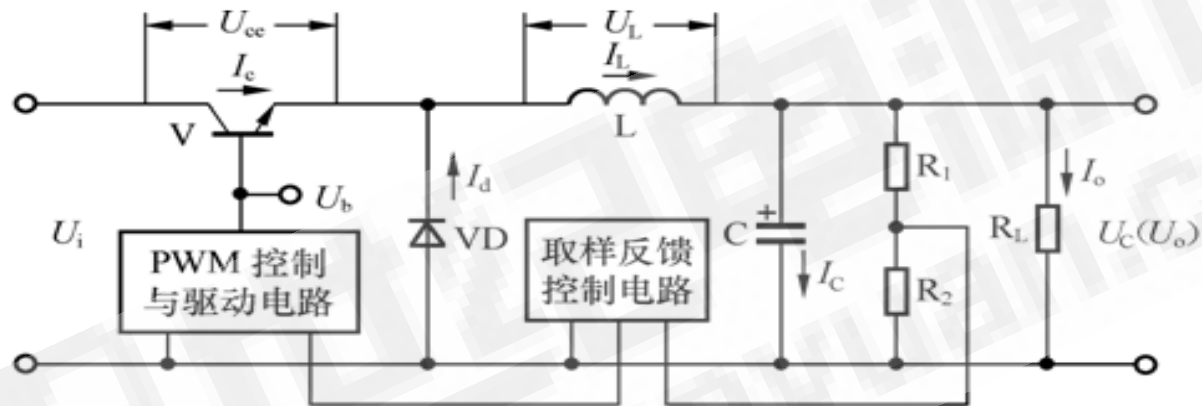
(2) 频率F。PWM信号的频率F取决于方波发生信号的频率。

(3) 调制深度。从图中可看出，调制深度主要取决于三角波的峰值，也就是其峰值越高，反馈调制信号的变化范围就越大。

(4) 作用。PWM (PFM) /SPWM发生器是开关电源的心脏。一般人们均将驱动、控制、保护、软启动和前沿抑制等功能电路都集成于PWM (PFM) /SPWM发生器集成电路中。这种IC具有单路输出式、双路输出式、四路输出式和软开关输出式。可构成单端式DC-DC变换器电路（单端正激式和单端反激式）、双端式DC-DC变换器电路（推挽式和半桥式）、全桥式DC-DC变换器电路和无电压和电流应力的谐振式DC-DC变换器。



### 3) 降压式DC-DC变换器



$$U_o = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot U_i = D \cdot U_i = \frac{t_{ON}}{T} \cdot U_i$$

$$L_c = \frac{U_o}{2 \cdot I_o} \cdot t_{OFF} \quad L = \frac{R_{L \max} \cdot (1 - D)}{1.5 f}$$



# 几个重要概念

(1) 输入与输出电压之间的关系:

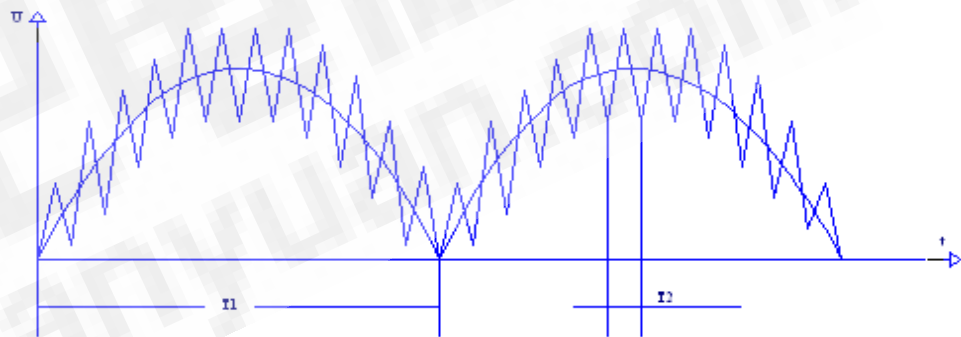
$$U_o = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} \cdot U_i = D \cdot U_i = \frac{t_{ON}}{T} \cdot U_i$$

(2) 占空比D:

$$D = \frac{t_{ON}}{t_{ON} + t_{OFF}} = \frac{t_{ON}}{T} = \frac{U_o}{U_i}$$

(3) 输出纹波电压 $\Delta U_o$ 的计算:

$$\Delta U_o = \Delta U_{o1} + \Delta U_{o2} = \frac{U_o \cdot T^2}{8C \cdot L} \left( 1 - \frac{U_o}{U_i} \right)$$



(4) 功率开关V耗散功率 $P_c$ 的计算:

$$P_c = \frac{1}{T} \left[ I_{CO} \cdot U_C \cdot t_{OFF} + I_C \cdot U_{CES} \cdot t_{ON} + \frac{1}{6} I_C \cdot (U_C + 2U_{CES}) \cdot (t_R + t_F) \right]$$



### (5) 转换效率 $\eta$ :

$$\eta = 1 - \frac{1}{I_i \cdot U_i \cdot T} \left[ I_{CO} \cdot U_C \cdot t_{OFF} + I_C \cdot U_{CES} \cdot t_{ON} + \frac{1}{6} I_C (U_C + 2U_{CES}) \cdot (t_R + t_F) + T \cdot I_o^2 \cdot L \right]$$

① 与功率开关V的功率损耗成反比。提高开关稳压电源的转换效率，关键在于降低功率开关V本身的功率损耗。

② 与储能电感L上的功率损耗也有反比的关系，所以在提高降压式DC-DC变换器转换效率的过程中，如何选择合适的储能电感L也是一个非常重要的环节。

③ 由于输入电流和输入电压与降压式DC-DC变换器的转换效率成正比，因此在设计降压式DC-DC变换器时，为了得到有效的输入电流和输入电压，一定要选择富裕量大、正向管压降低的一次整流二极管和容量大、SER小、SEL也小的一次滤波电容。





# 降压式DC-DC变换器的设计

## (1) 功率开关V的选择

首先应根据输入条件和输出电压、电流、工作环境、负载特性等要求来确定是使用IGBT，还是MOSFET，或者是GTR。一般确定的原则是，输出功率在数十千瓦以上就选IGBT、在数千瓦与数十千瓦之间时就选MOSFET、在数千瓦以下时就应选GTR。但这个原则不是一成不变的，设计者可根据自己的偏爱和对这些器件的熟悉程度，在权衡性能、价格等各种因素后自己选定。一旦类型选定后，具体型号的选定就应按以下原则了：

导通饱和压降越小越好、截止反向漏电流越小越好、高频特性要好、开关时间短转换时间快、基极驱动功率要小。反向击穿电压 $U_C$ 应满足下式：

$$U_C = 2 \times 1.3 \times U_i = 2.6 \times U_i$$



## (2) 续流二极管VD的选择

当功率开关V截止时，储能电感L中所存储的磁能量是通过续流二极管VD传输给负载电阻的。当功率开关V导通时，集—射极之间的压降几乎等于零，这时的输入电压就全部加到续流二极管VD的两端。因此续流二极管VD的选择一定要符合下列条件：

- ① 续流二极管VD的正向额定电流必须等于或大于功率开关V的最大集电极电流，即应该大于负载电阻上的电流。
- ② 续流二极管VD的反向耐压值必须大于输入电压值。
- ③ 为了减小由于开关转换所引起的输出纹波电压，续流二极管VD应选择反向恢复速度和导通速度都非常快的肖特基二极管或快恢复二极管。
- ④ 为了提高整机的转换效率，减小内部损耗，一定要选择正向导通压降低的肖特基二极管。



### (3) 储能电感L的选择

#### ● 临界电感量 $L_c$ 的计算

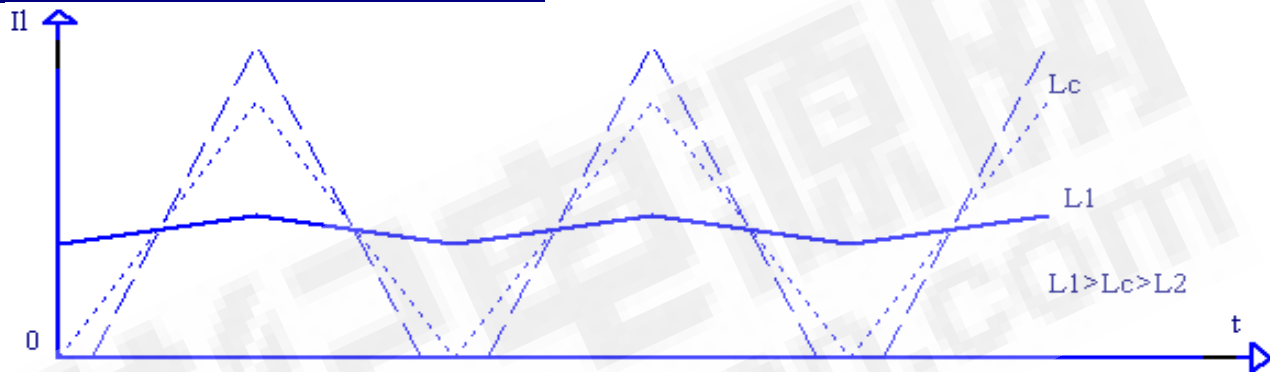
在V截止瞬间，L中在V导通期间所存储的能量也刚好释放完毕而使得电感电流为零，此时储能电感L的电感量就称为临界电感量，用符号 $L_c$ 表示。流过储能电感L的电流不能突变，这是稳压电源必须满足的最基本条件。该电流只能近似地线性上升和线性下降，而电感量越大则电流的变化起伏越平滑；电感量越小则电流变化起伏越陡峭。图中的波形就是不同的电感量所对应的电感电流的曲线。设计功率变换器时，是不允许出现在下一个导通周期还没到来之前就将电感中储存的能量释放完，也就是储能电感的电感量必须大于临界电感量 $L_c$ ，可由下式计算出来：

$$L_c = \frac{R_L \cdot (1 - D)}{2f}$$



### (3) 储能电感 L的选择 (续)

#### ● 储能电感 L的计算



了解了临界电感值的物理含义，再通过对其的计算，设计功率变换器时，是不允许出现在下一个导通周期还没到来之前就将电感中储存的能量释放完而导致电源为负载供电出现断续状态。因此储能电感的电感量必须大于临界电感量 $L_c$ ，可由下式计算出来：

$$L = \frac{U_o}{1.5f \cdot I_{oMIN}} (1 - D) = \frac{R_{LMAX}}{1.5f} (1 - D)$$



#### (4) 输出滤波电容C的选择

● 输出滤波电容计算公式: 
$$C = \frac{U_o}{8 \cdot L \cdot f^2 \cdot \Delta U_o} \left( 1 - \frac{U_o}{U_o} \right)$$

● 输出滤波电容的选择原则: 为了消除输出电压中的低频纹波和高频纹波电压, 除了给电源的输出端并接一个符合上式计算出来的滤波电解电容C以外, 还应在其两端再并接一个无极性的容量范围在0.01~0.47μF的瓷片或独石电容, 用以滤除高频纹波电压。不过, 根据上面的公式选择出来的LC数值中的储能电感L必须满足大于临界电感值。如果储能电感L小于临界电感值时, 储能电感L中所通过的电流波动将会急剧增大(因为这时储能电感中的电流小于零), 流过功率开关V的电流增至最大, 使其工作状态急剧恶化。因此, 储能电感L除了起储能和滤波的作用以外, 还有限制功率开关V最大电流的作用。



## (5) 输出端LC的兼容原则

最后我们再对储能电感L和输出滤波电容C的选择原则强调一下，虽然它们两个的乘积满足上式，但是在选择时是不能采用利用电容来补偿电感的方法的，必须在满足电感选择原则的基础上，再来利用电容补偿电感或者电感补偿电容的方法进行兼顾，最后达到满足下式的目的。

$$L \cdot C = \frac{T \cdot t_{OFF}}{8 \frac{\Delta U_o}{U_o}}$$





# 训练题应用举例

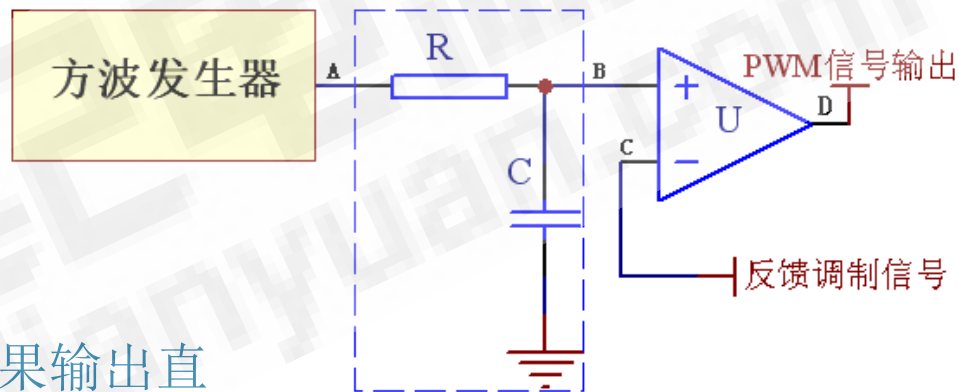
PWM发生器的原理框图如图所示，请采用CMOS电平制作该电路（频率自定，禁用IC），并用其再制作一款非隔离的输出12Vdc、输出电流500mA的DC-DC变换器，供电电压36Vdc。

评分标准（70分）：

- （1）报告部分（10分）；
- （2）电路设计部分（20分）；
- （3）实物制作部分（50分）。

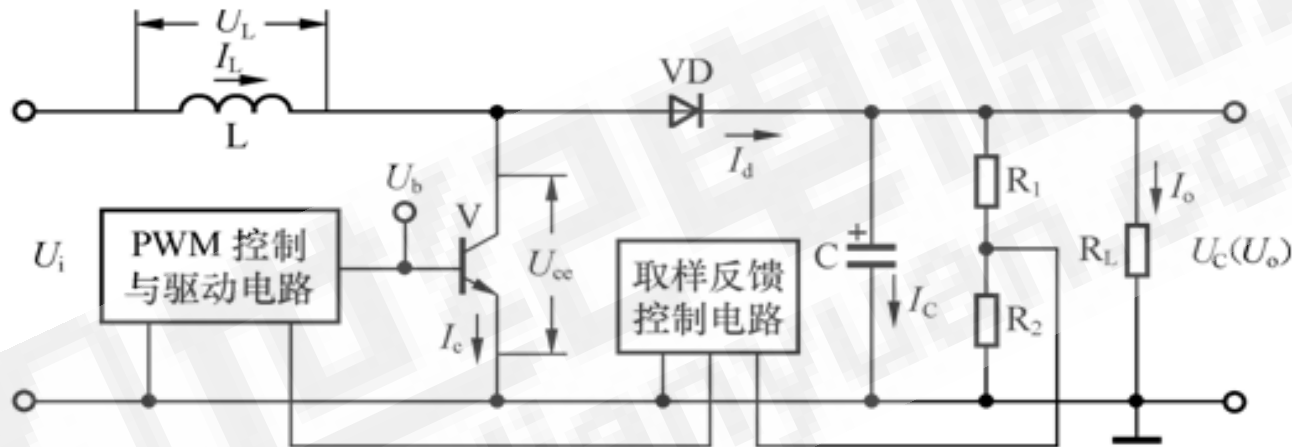
发挥部分（30分）：

- （1）纹波电压的处理。测试结果输出直流电压中纹波电压的峰峰值在输出电压的（10~1）% 之间得5分， $\leq 1\%$  得10分。
- （2）转换效率的提高。测试结果转换效率在（85~90）%之间得5分， $\geq 90\%$  得10分。





#### 4) 升压式DC-DC变换器/APFC技术



$$U_o = \frac{t_{ON}}{t_{OFF}} \cdot U_i = U_i \cdot \frac{1}{1 - D}$$

$$L = \frac{10\eta D U_i^2}{7I_o U_o f} = \frac{10\eta D U_o (1 - D)^2}{7I_o f}$$



# 设计时几个重要器件的选定

## (1) 功率开关V的选择

集电极电压 $U_{CEO}$ 的计算和选择:  $U_{CEO} = \frac{1.32}{0.8} \cdot U_i = 1.65U_i = 1.65(1-D) \cdot U_o$

集电极电流 $I_C$ 的计算:  $I_C = 1.25I_o \cdot \frac{U_o}{U_i} = 1.25I_o \cdot \frac{1}{1-D}$

## (2) 续流二极管VD的选择

反向耐压 $U_D$ 的计算:  $U_D = \frac{1}{1-0.2} U_o = 1.25U_o$

正向导通电流的计算:  $I_D = \frac{I_o U_o}{2U_i} = \frac{I_o}{2(1-D)}$

## (3) 输出滤波电容C的选择

电容容量C的计算:  $C = \frac{I_o(U_o - U_i)}{\Delta U_o f U_o}$

耐压值 $U_C$ 的计算:  $U_C = 2U_o$



### (3) 输出滤波电容C的选择（续）

**电容温度范围的选择：**电源的可靠性和无故障工作时间也是一个非常重要的指标，而唯有电解电容是影响其可靠性和无故障工作时间的元件。另外，影响电解电容寿命的关键因素就是温度。当其工作环境温度升高时，其寿命时间与温升成指数关系下降。因此，为了增加电源的可靠性和提高无故障工作时间，在成本和造价允许的条件下，就应选用高温电解电容（高温电解电容的温度标称值为125℃，一般电解电容的温度标称值为85℃）。

(4) 储能电感L的选择与计算：
$$L = \frac{10\eta D U_I^2}{7I_o U_o f} = \frac{10\eta D U_o (1-D)^2}{7I_o f}$$

这里虽然给出了升压型DC-DC变换器中储能电感L的计算公式，但是和降压型DC-DC变换器一样，也存在着储能电感L的电感量应大于临界电感量的问题。



# 训练题应用举例

软件式PWM发生器的原理框图如图所示，请采用TI430小系统制作该电路（频率自定），并用其再制作一款非隔离的输出12Vdc、输出电流500mA的DC-DC变换器，供电电压5Vdc。并要求数显输入输出电压和电流及频率。

评分标准（70分）：

- （1）报告部分（10分）；
- （2）电路设计部分（20分）；
- （3）实物制作部分（50分）。

● 软件式SPWM发生器

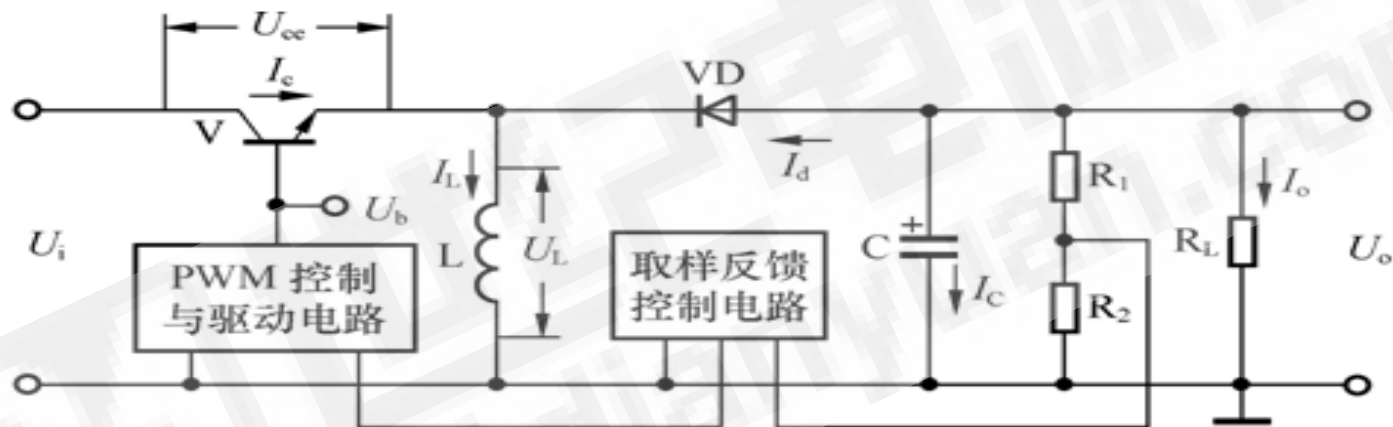
单片机（TI430小系统）+ 输出驱动

发挥部分（30分）：

- （1）输出直流电压中纹波电压的峰峰值在输出电压的（10~1）% 之间得5分， $\leq 1\%$  得10分。
- （2）测试结果转换效率在（85~90）% 之间得5分， $\geq 90\%$  得10分。



## 5) 反向式DC-DC变换器



$$U_o = -U_i \frac{D}{1-D}$$



## 问题讨论

输入与输出电压之间的关系：
$$U_o = -U_i \frac{D}{1-D}$$

从这个关系式中我们就可以得出如下的结论：

- ① 输出电压与输入电压的极性相反。
- ② 控制V栅极的PWM驱动信号的占空比D，就可以克服由于输入电网电压，或输入直流电压，或其它参数的变化而引起的对变换器输出电压的影响，能够起到降低输出电压的波动、稳定输出电压的作用。它们都是采用取样、放大、比较、反馈耦合等环节构成闭环控制自动实现对占空比D的控制，这就是脉宽调制原理。
- ③ 当 $D \geq 1-D$ 或者 $D \geq 0.5$ 时，输出电压反向以外，输出电压 $\geq$ 输入电压，即为反向式升压DC-DC变换器；当 $D \leq 1-D$ 或者 $D \leq 0.5$ 时，反向以外，输出电压 $\leq$ 输入电压，即为反向式降压DC-DC变换器电路。





# 反向式DC-DC变换器的设计

把升压式DC-DC变换器的基本电路拓扑图与反向式DC-DC变换器比较，就不难可以看出升压式DC-DC变换器实际上就是发射极输出式并联型DC-DC变换器电路，而反向式DC-DC变换器实际上就是集电极输出式并联型DC-DC变换器电路。从形式上看，它们的差别只是把功率开关 $V$ 与储能电感 $L$ 的位置进行了调换；从输出特性上看，它们的差别是输出电压刚好相反；从工作状态上看，它们又有相同之处那就是负载需要能量的时间内功率开关 $V$ 都处于截止状态。反向式DC-DC变换器的设计，也就是电路中各重要元器件参数的计算和选择与上一节中所介绍的升压式DC-DC变换器设计和电路中各重要元器件参数的计算和选择基本相同。因此，有关反向式DC-DC变换器的设计，请同学们参见这一节的相关内容，这里就不再重述。



# 训练题应用举例

请分别采用TI430小系统和纯硬件制作PWM发生器（频率自定），并用其（软硬件PWM发生器可转换）再制作一款非隔离的输出-12Vdc、输出电流100mA的反向式DC-DC变换器，供电电压 $5V_{DC}$ 。并要求数显输入输出电压和电流及频率。

评分标准（70分）：

- （1）报告部分（10分）；
- （2）电路设计部分（20分）；
- （3）实物制作部分（50分）。

发挥部分（30分）：

- （1）输出直流电压中纹波电压的峰峰值在输出电压的（10~1）% 之间得5分， $\leq 1\%$  得10分。
- （2）测试结果转换效率在（85~90）% 之间得5分， $\geq 90\%$  得10分。



## 6) 功率因数校正 (PFC)

### (1) 功率因数的定义 $PF = r \cdot \cos\phi$

$r$ 为基波因数,有时也称其为输入电流的基波有效值,被定义为:  
 $r = \text{电流基波有效值} / \text{总电流有效值}$ ,实际上也就是电流波形的畸变;  
 $\cos\phi$ 为相移功率因数,  $\phi$ 为电流与电压的相位差。

### (2) 功率因数校正的目的

功率因数校正就是将畸变的输入电流校正为正弦电流,并使之与输入电压同相位,从而使功率因数接近于1。也就是将无功功率将为零的技术。

### (3) 功率因数校正的基本方法

功率因数校正的基本方法有无源式功率因数校正和有源式功率因数校正两种,应用最多、效果最好的是后者。

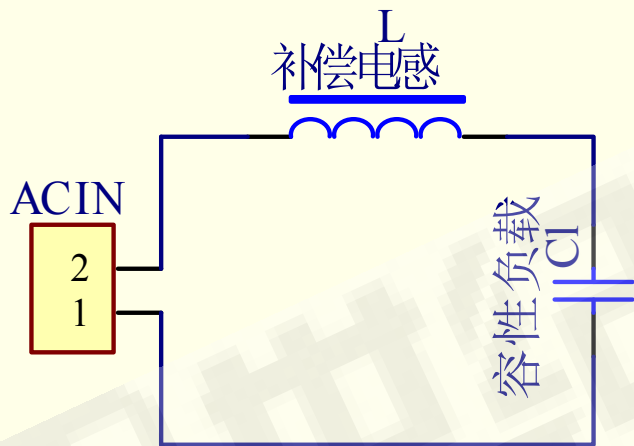


### (3) 功率因数校正的基本方法（续）

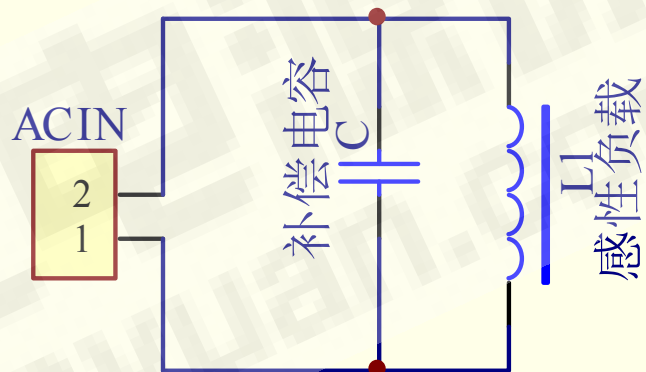
●无源PFC技术。无源PFC技术一般是采用电感或电容补偿的方法使交流输入的基波电流与电压之间相位差减小来提高功率因数的。它是利用电感上的电流不能突变和电容上的电压不能突变的原理来调节电压及电流的相位差，从而实现提高功率因数的目的。当负载为容性时就采用串联电感的方法进行补偿，使其满足串联谐振法则；当负载为感性时就采用并联电容的方法进行补偿，使其满足并联谐振法则。串联补偿电感和并联补偿电容的大小可由LC谐振公式确定：

$$2\omega\pi L = \frac{1}{2\pi\omega C_L}$$

这种无源PFC技术只能校正由于电流与电压之间存在的相位差对功率因数的影响，而不能校正由于电流波形的畸变对功率因数的影响，因此其校正值得 $\leq 0.8$ ，但由于其电路结构简单、价格低而被广泛的应用。



(a) 容性负载串联补偿电感



(a) 感性负载并联补偿电容

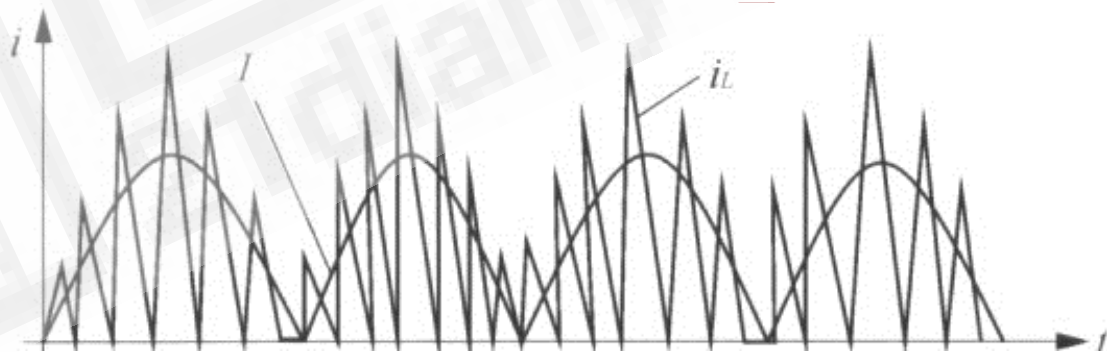
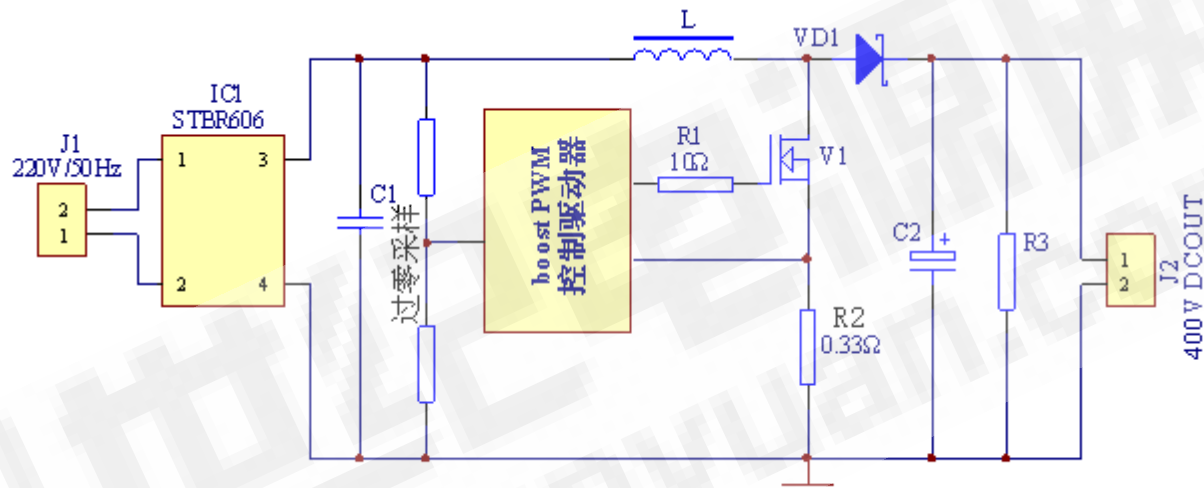
$$2\omega\pi L = \frac{1}{2\pi\omega C_L} \text{ 或 } 2\pi\omega L_L = \frac{1}{2\pi\omega C}$$



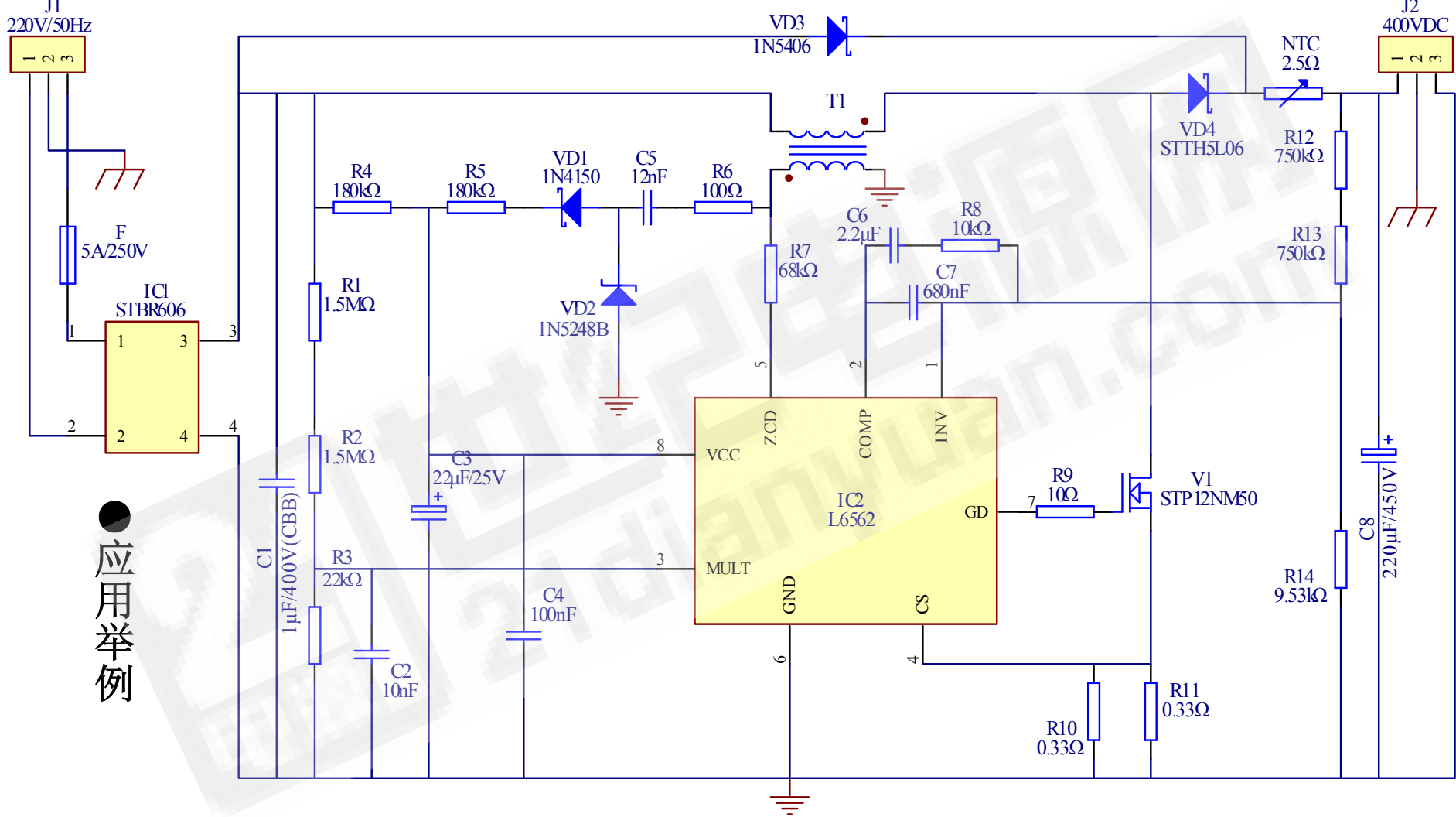
●有源PFC技术—峰值电流型。峰值电流型PFC的特点为工作频率变化，电流不连续(DCM)。它采用跟随器具有电路简单、易于实现的优点。其缺点为：功率因数和输入电压 $V_{in}$ 与输出电压 $V_0$ 的比值有关，即当 $V_{in}$ 变化时，它也随之变化，同时输入电流波形随 $V_{in}/V_0$ 值的加大而使THD变大；开关管的峰值电流大，导致其损耗增加。有源PFC电路也就是在升压式DC-DC变换器电路的基础上再增加了一路输入电网电压正弦波包络的过零采样，然后将其变换为 $400V_{DC}$ 为后级负载供电。它既能校正相位差带来的影响，又能校正波形畸变带来的影响。此外，它输出的直流电压纹波很小，不必采用大容量的滤波电解电容。与无源PFC电路类似，有源PFC电路工作时也会产生震动噪音，只不过是高频噪音。这种有源PFC技术主要应用于中高端开关电源产品中。



● 有源PFC技术—峰值电流型 (续)







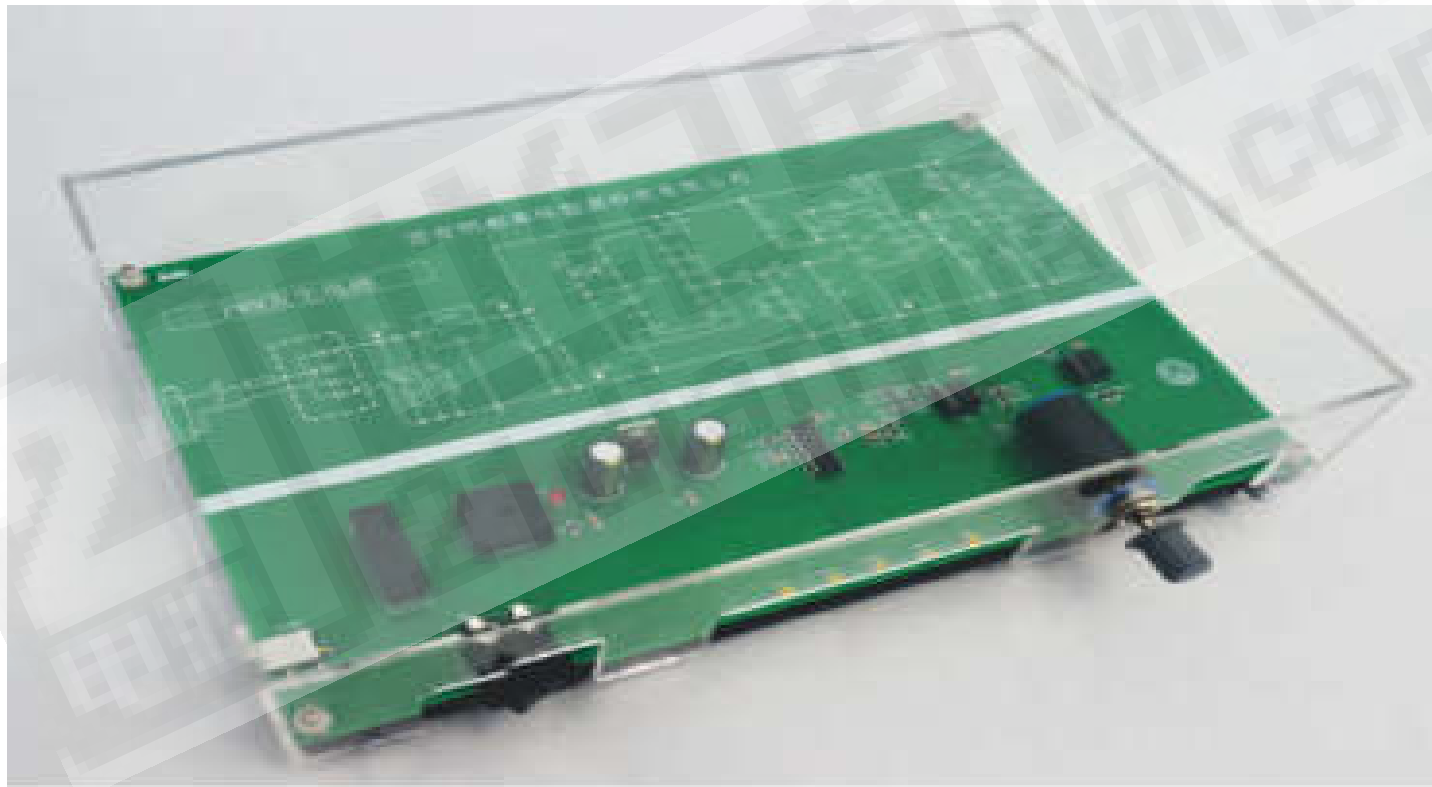
● 应用举例



# 第4章 初选前的理论和实验（续1）

## 2、8个必做实验（在E楼二区323实验室）

### (1) PWM发生器



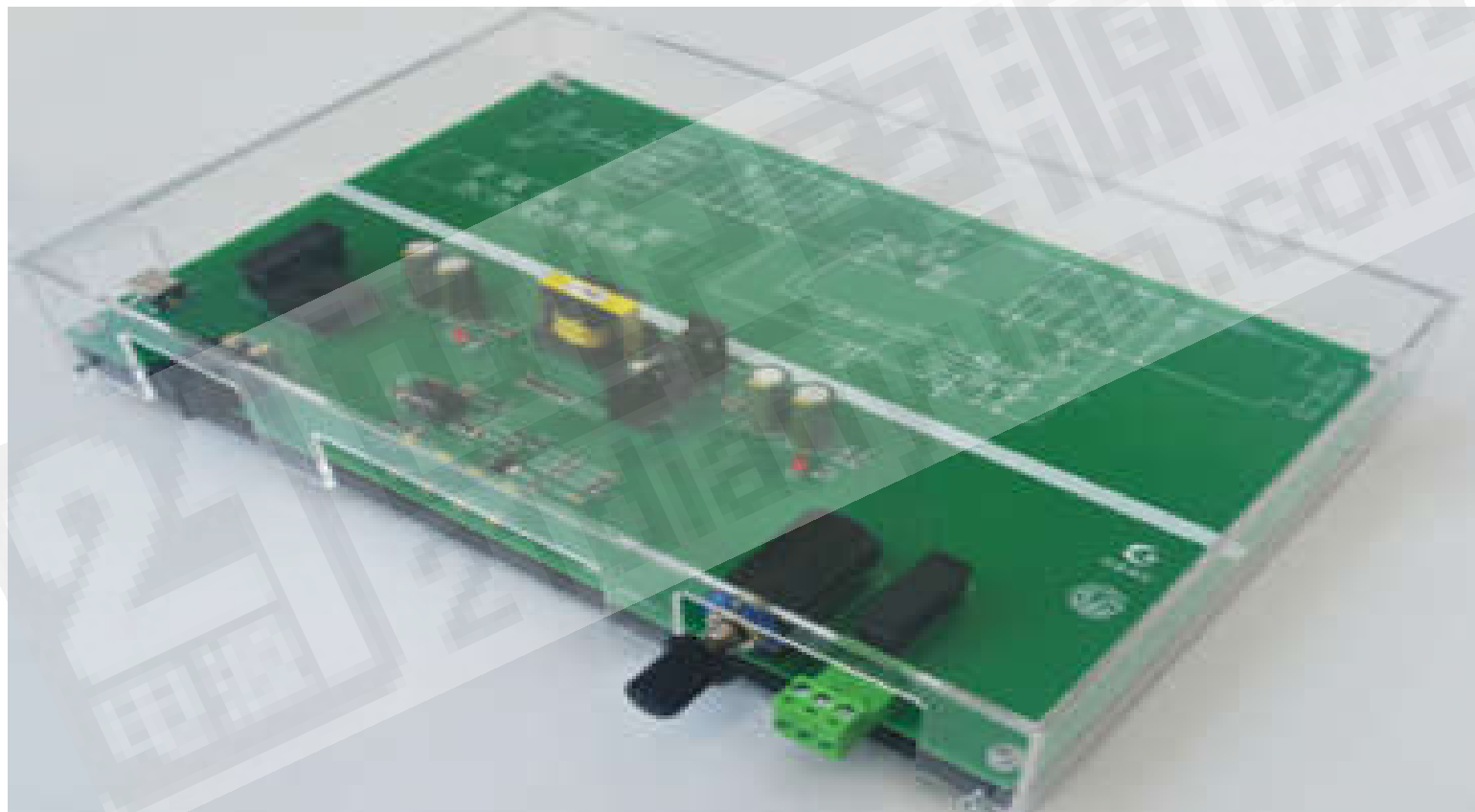


## (2) 降压式DC-DC变换器





### (3) 升压式DC-DC变换器





## (4) 反向式DC-DC变换器



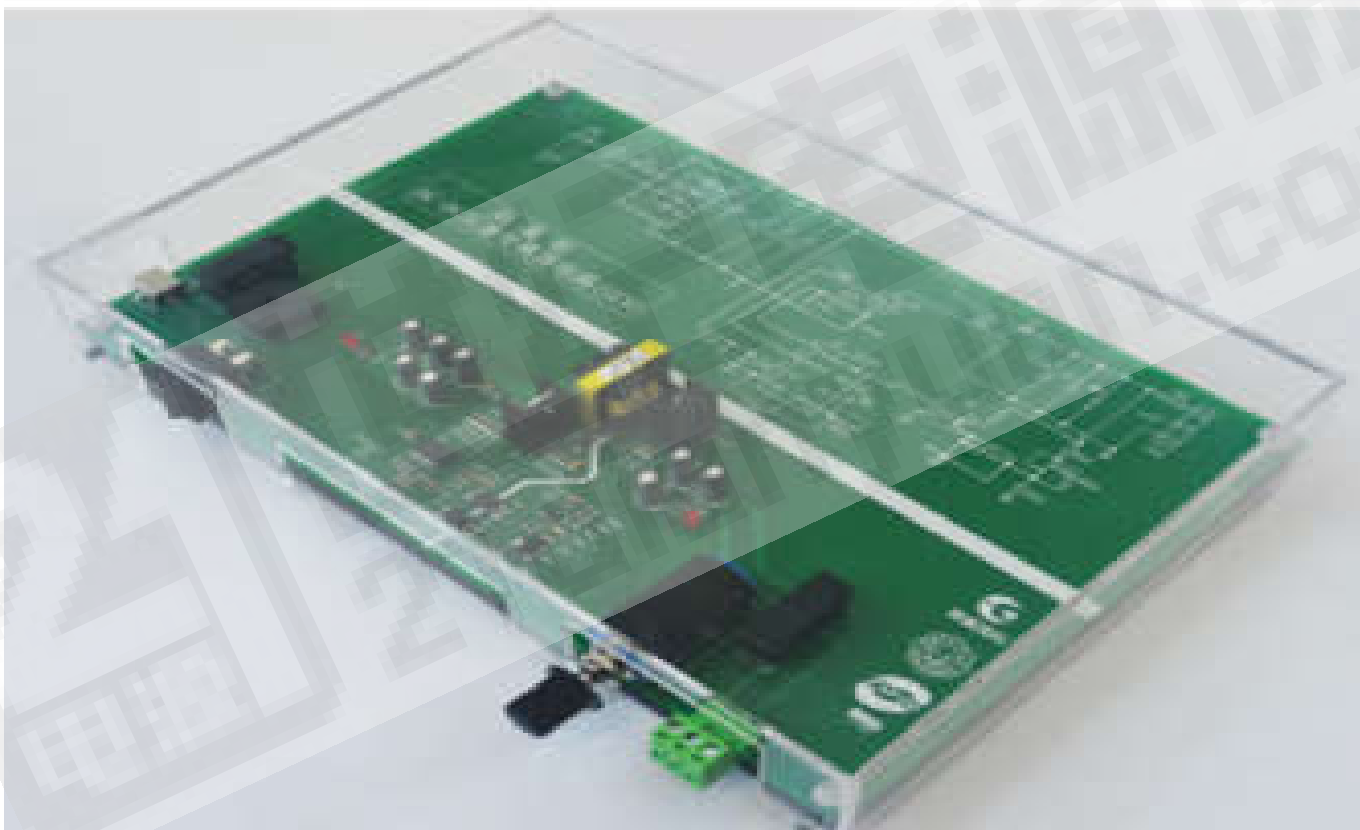


## (5) 单端正激式DC-DC变换器





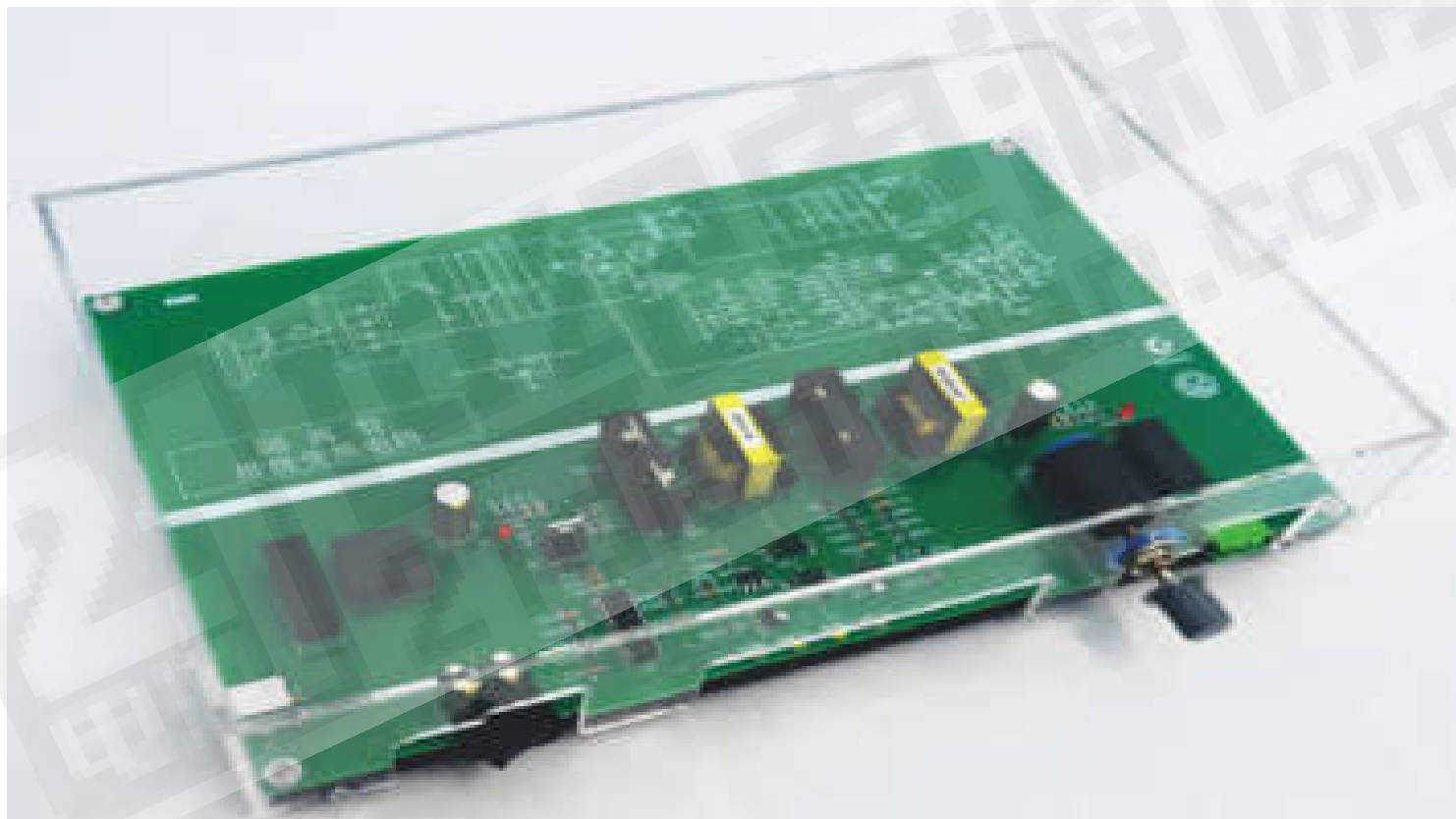
## (6) 单端反激式DC-DC变换器







## (7) 推挽式DC-DC变换器





## (8) 桥式DC-DC变换器





# 第5章 综合训练

## 1、训练题

- (1) AC-DC变换器方面的训练题（并联均流、输入端APFC、电子负载）
- (2) DC-AC逆变器方面的训练题（逆变并网控制、输出端APFC技术）

## 2、训练题的辅导

- (1) 先让学生给出自己的设计方案
- (2) 修正学生的方案（性价比等因素）
- (3) 最后把正确的方案让学生在限定的时间内动手制作出来

## 3、验收

- (1) 及时、按时，不能拖延
- (2) 严格，细小部分也不能漏掉，一分也要争取
- (3) 不合格的一定要重新再做，再验收，特别是报告的撰写
- (4) 不行就淘汰

## 4、训练题举例

这里仅给出初选时的笔试题，其他操作训练题就不一一列举了。



## 笔试题1

将频率为10kHz、占空比为40%的矩形波输入到截止频率为45kHz的低通滤波器进行处理（通频带内不考虑低通的衰减），试回答以下两个问题：

- (1) 输入和输出信号的频谱函数是什么？（输入和输出各占10分）
- (2) 输入和输出信号的频谱图是什么（定性给出即可）？（输入和输出各占10分）

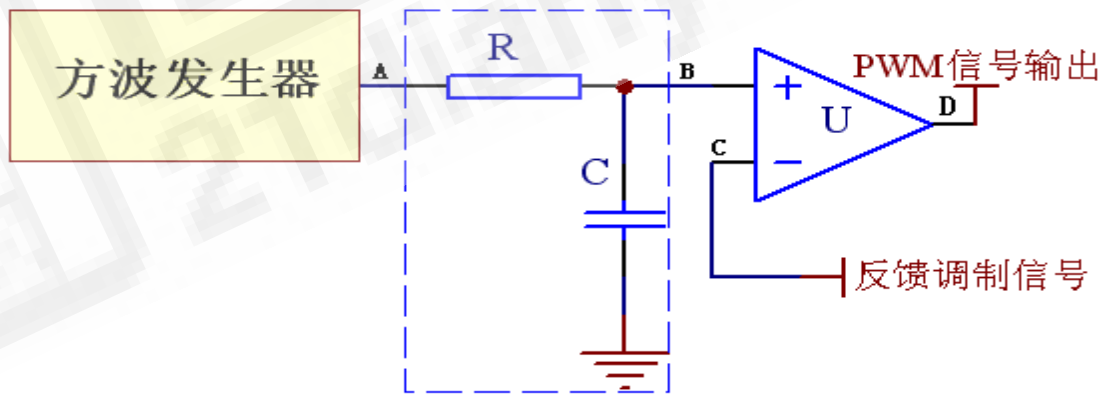


## 笔试题2

PWM发生器的原理框图如下图所示。它是由一个方波发生器、RC积分器和比较器组成的。请同学们完成以下作业：

(1) 绘制出电路中A、B、C、D四点的时序波形（每点5分，总共20分）。

(2) 若将电路中的反馈调制信号改换成全波整流后的正弦波信号以后，输出信号又会发生什么变换？用A、B、C、D四点的时序波形加以说明（每点5分，总共20分）。





# 第6章 电源中关键技术

## 开关电源 中关键技术归纳框图

**EMC**  
Electro  
Magnetic  
Compatibility  
电磁兼容防  
护电路

**AC/DC**  
整流电路

**APFC**  
Active Power  
Factor  
Correction  
有源功率因数  
校正

**非隔离式DC/DC**  
降压型 (BUCK)  
升压型 (BOOST)  
反极型 (BUCK-BOOST)

电荷泵型  
**隔离式DC/DC**  
反激拓扑  
正激拓扑  
推挽拓扑  
半桥拓扑  
全桥拓扑  
谐振拓扑

## 线性电源

**LDO**  
Low Dropout  
Regulator  
低压差线性  
稳压器

**LDO**  
Low Dropout  
Regulator  
低压差线性  
稳压器

选用教材: 《开关电源原理与应用设计》电子工业出版社  
参考文献: 《RLC电子元器件应用基础》电子工业出版社  
《开关电源原理与应用设计实验教程》电子工业出版社



## 1 开关电源中的几个重要电路

### (1) 控制电路

#### ● 电流控制模式

① 初级电流控制环路。构成过流和输出端短路保护，主要保护电源本身。

② 次级电流控制环路。构成恒流源或恒功率电路。

#### ● 电压控制模式

① 初级电压控制环路。软启动控制技术；输入欠压、过压保护控制技术。

② 次级电压控制环路。构成各种稳压电源电路，主要保护负载电路系统。

● 恒功率控制模式。次级电压/电流双控制环路，如LED驱动器和锂电池充电器等电路。





# 控制电路应用举例

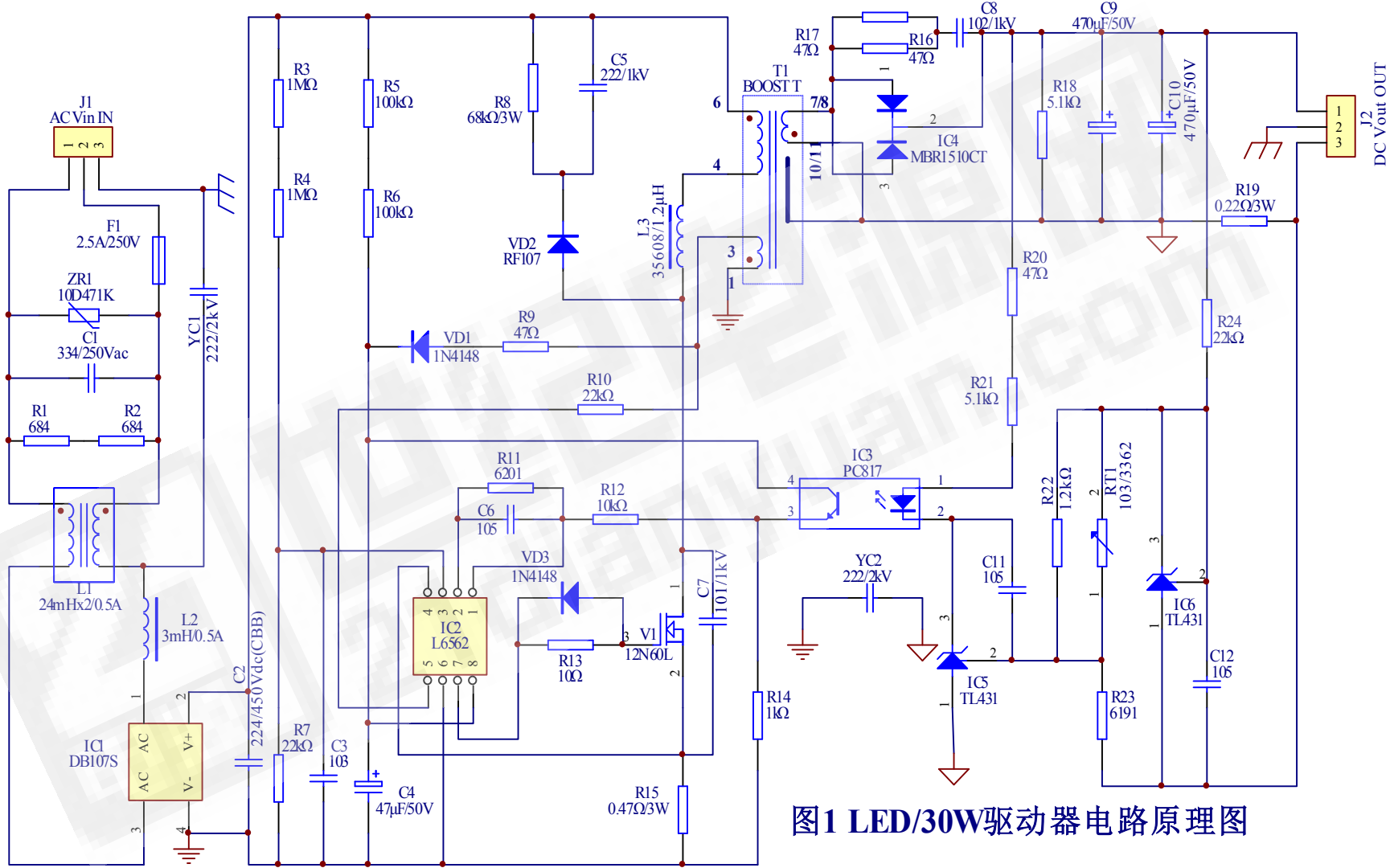


图1 LED/30W驱动器电路原理图



## (2) 驱动电路

### ● 对驱动信号的要求

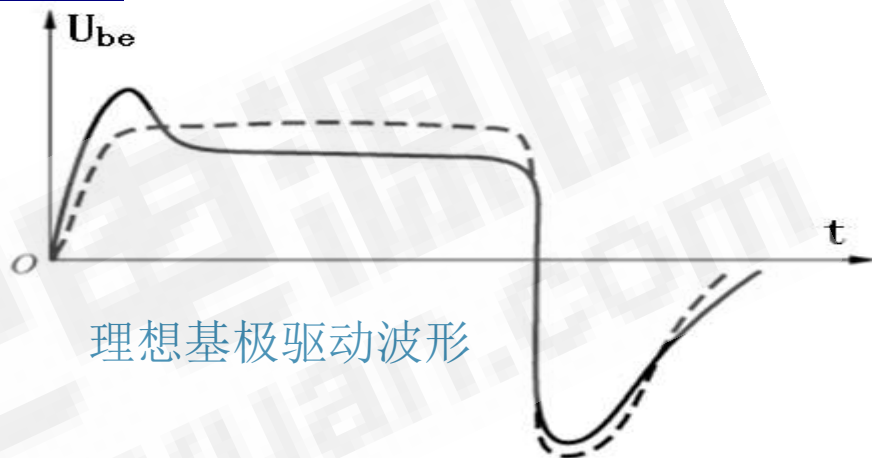
① 驱动信号的上升沿一定要陡，尽量过驱动，以便减小开关功率管趋于导通的上升时间。

② 驱动信号要具有一定的驱动功率。在维持导通期间内，要能够保证开关功率管处于饱和导通状态，以减小开关功率管的正向导通管压降，从而降低导通期间开关功率管的集电极功率损耗。

③ 正向驱动结束时，驱动信号幅度的减小一定要快，以便使开关功率管能够很快脱离饱和区，以减小关闭存储时间。

④ 驱动信号波形的下降沿一定要陡，幅度要大，尽量过驱动，以便减小开关功率管趋于截止时的下降时间。

⑤ 最为理想的基极驱动信号波形如图所示。



理想基极驱动波形



## ● 栅极驱动器电路

MOSFET和IGBT是一种常见的电压型功率开关器件，具有开关速度快、高频性能好、输入阻抗高、噪声小、驱动功率小、动态范围大、安全工作区域(SOA)宽等一系列的优点，因此被广泛的应用于开关电源和电机控制等各行各业。栅极作为MOSFET和IGBT本身较薄弱的环节，如果其驱动电路设计不当，就容易造成这些器件被击穿。因此对栅极驱动电路就有下列的要求：

- ① 去除电路耦合噪音，提高系统的可靠性。
- ② 加速功率器件的导通和关断，降低导通和关断损耗。
- ③ 降低功率器件的电压和电流应力，在保护的同时抑制EMI干扰。
- ④ 保护栅极，防止异常高压条件下栅极击穿。
- ⑤ 增加驱动能力，在较小的信号下，可以驱动MOSFET。
- ⑥ 对于具有悬浮栅结构的电源电路必须采用悬浮栅驱动器。



## ●磁隔离式（变压器）悬浮栅驱动器

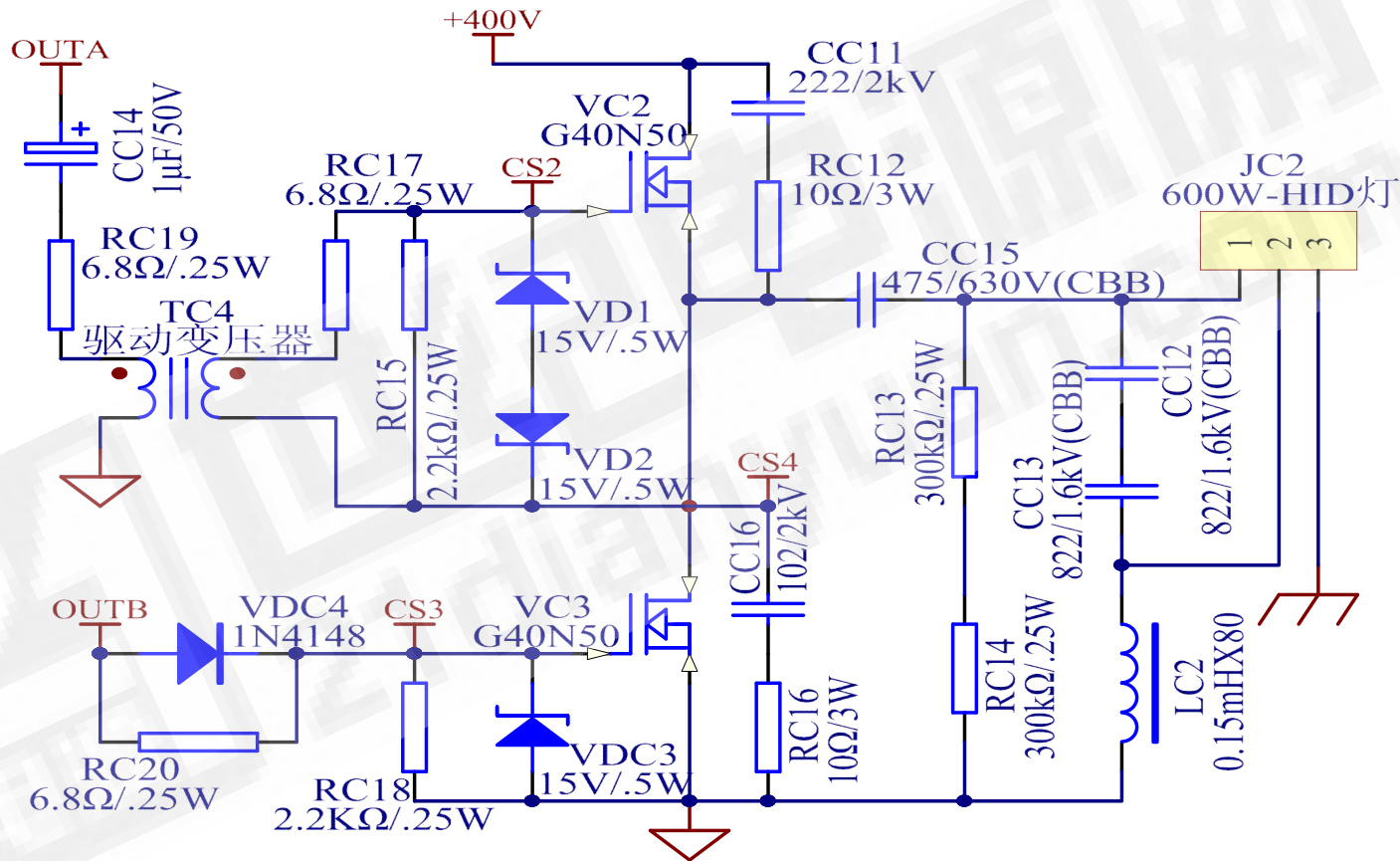
用脉冲变压器作为磁隔离元件而构成浮栅驱动器，具有响应速度快、初次级绝缘强度高、 $dv/dt$ 共模干扰抑制能力强的特点。但信号的最大传输宽度受磁饱和特性的限制，因而信号的顶部不易传输。而且最大占空比被限制在50%，而且信号的最小宽度又受磁化电流所限。脉冲变压器体积大，笨重，加工复杂。采用变压器构成的浮栅驱动器电路如下图所示。该电路通过一个高频脉冲变压器把PWM驱动信号耦合给次级，实现了将PWM驱动信号悬浮到功率器件的栅极与源极之间。该驱动器具有如下的特点：

- ① 不需要辅助电源，为无源式悬浮栅驱动器。
- ② 控制（弱电）与变换电路（强电）之间实现了隔离。
- ③ 成本低，电路可靠性高。

缺点为驱动变压器设计复杂，难度增大，不能小型化。



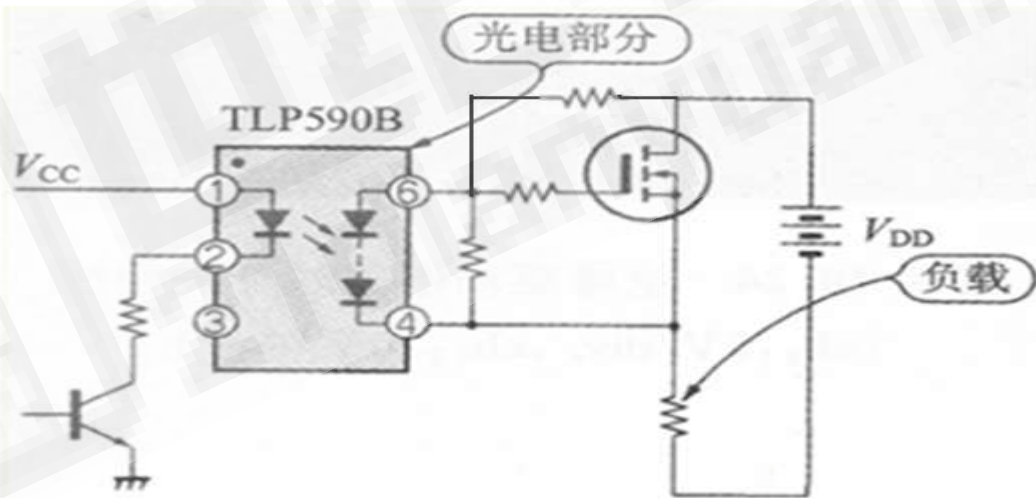
# ● 磁隔离式变压器 悬浮栅驱动器应用举例





## ● 光隔离式悬浮栅驱动器

光隔离式悬浮栅驱动器电路如下图所示。光隔离式悬浮栅驱动器是利用光电耦合器构成的，它具有体积小、结构简单、价格低、便于小型化等优点，但却存在着共模抑制能力差、传输速度慢和外加辅助电源等缺点。快速光耦的速度也仅几十kHz。

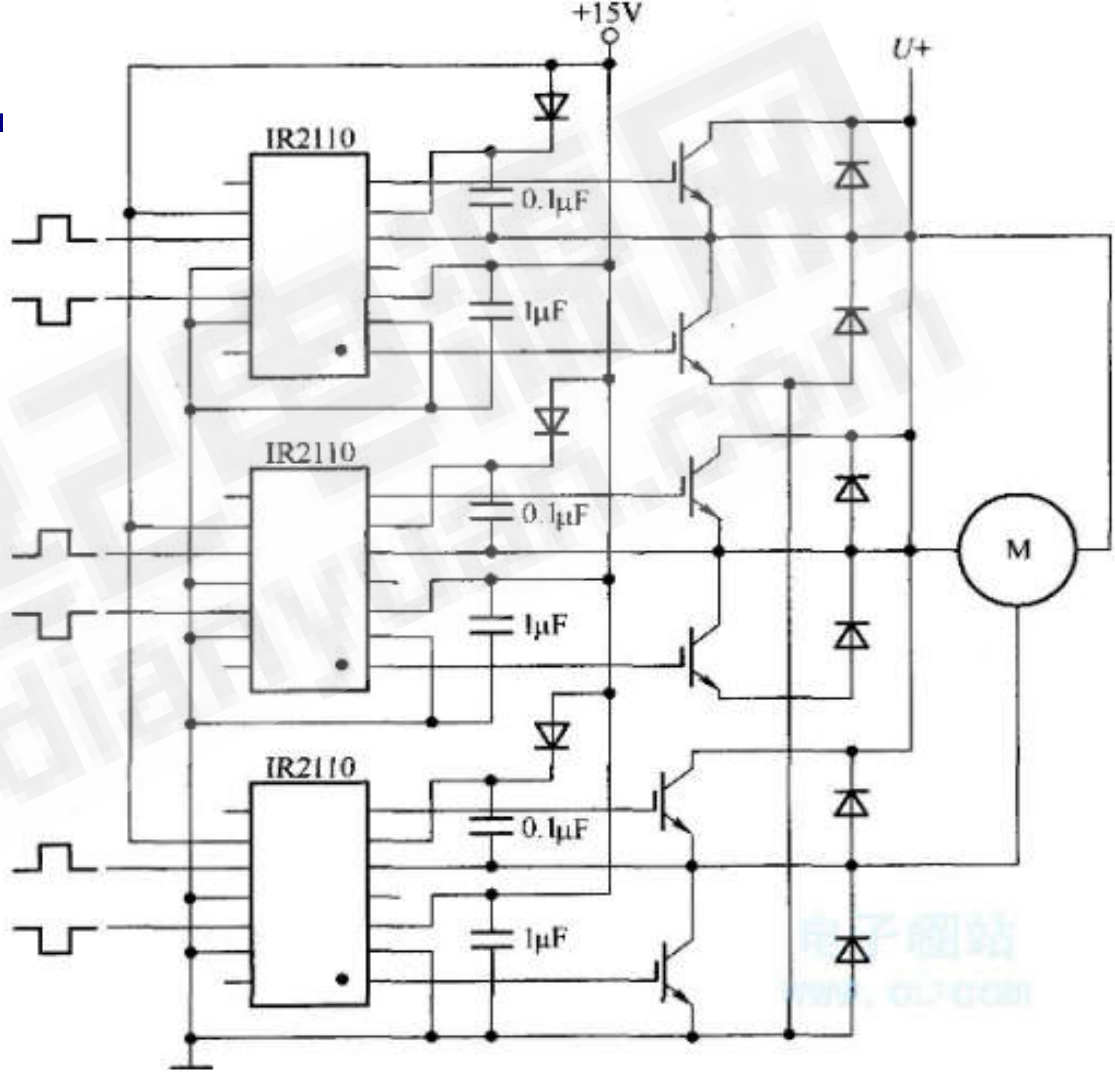






## ● 集成电路（IC）式悬浮栅驱动器

IC式悬浮栅驱动器电路如图所示，它是由一个IC外加自举电容和二极管构成的，它克服了磁隔离式变压器悬浮栅驱动器和光隔离式光电耦合器悬浮栅驱动器的缺点，除了具有体积小、结构简单、价格低、便于小型化和驱动信号传输速度快、范围宽等优点以外，还具有便于小型化的特点，因此是目前使用最多的一种悬浮栅驱动器电路。







## 第7章 经验教训

- (1) 小心最后8小时“噩梦期”；
- (2) 测试过程中的常犯错误；
- (3) 切忌中途换题、中途队员退出或调换；
- (4) 切忌过分追求外观和表面，忽视基础原理和性能指标，特别是效率和性价比；
- (5) 各队员任务之间的衔接问题（组长的作用）：合理规划，制定标准，为并行开展工作打好基础；
- (6) 总体方案制定后，模电和数电工作要同步并行开展，避免串行互相等候而耗时：任务接口的重要性；
- (7) 在测试各种功能和参数时发现问题及时解决和完善。
- (8) 一定要重视“报告”的撰写，力争一分都不能丢。



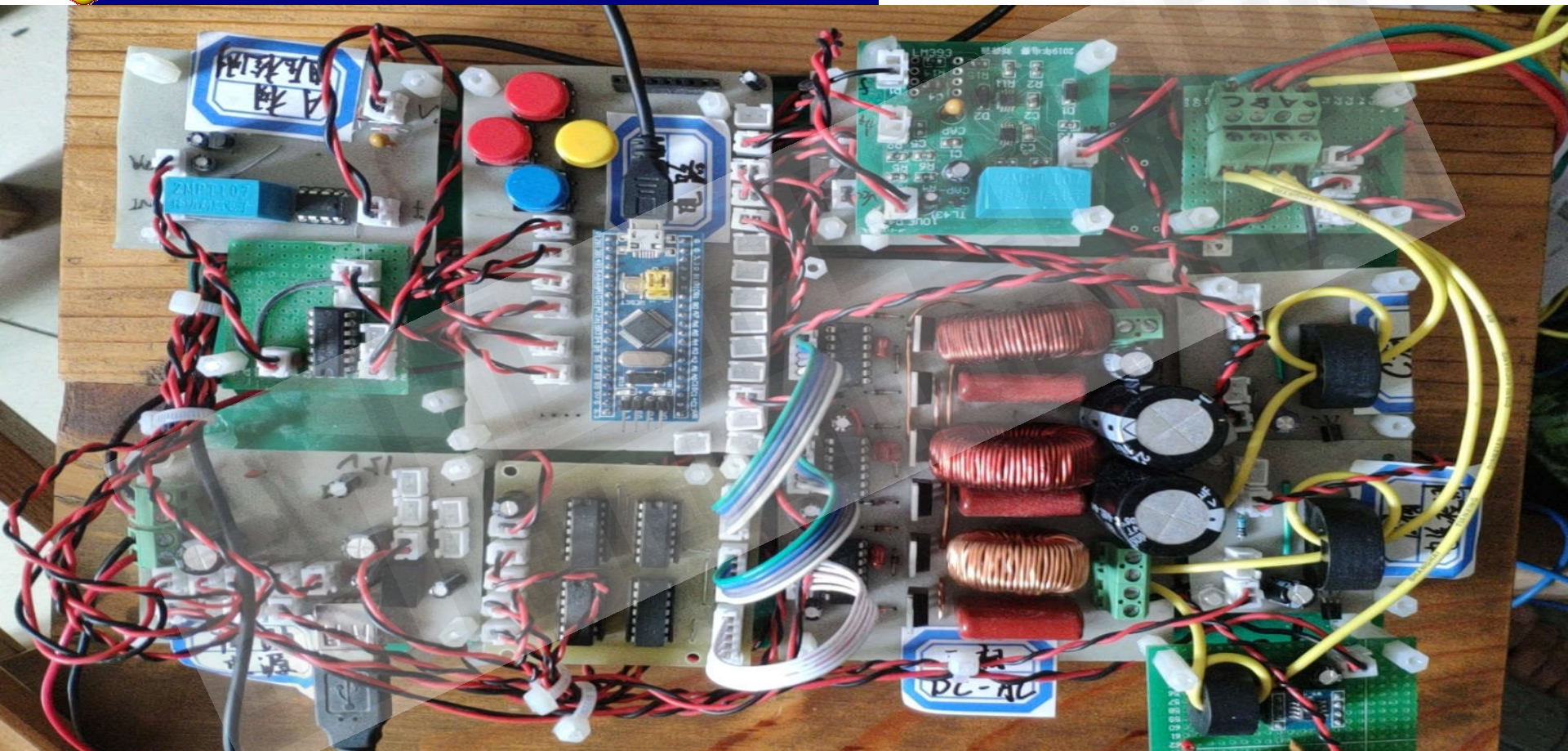
## 第8章 应用举例

2017年电子大赛A题举例

附件1: 微电网报告最终(zuizhong)



# 2017年电子大赛A题作品照片（国一）





世纪电源网  
21dianyuan.com