

# 电子技术基础模拟部分

- 1 绪论
- 2 运算放大器
- 3 二极管及其基本电路
- 4 场效应三极管及其放大电路
- 5 双极结型三极管及其放大电路
- 6 频率响应
- 7 模拟集成电路
- 8 反馈放大电路
- 9 功率放大电路
- 10 信号处理与信号产生电路
- 11 直流稳压电源

# 11 直流稳压电源

11.1 小功率整流滤波电路

11.2 线性稳压电路

11.3 开关式稳压电路

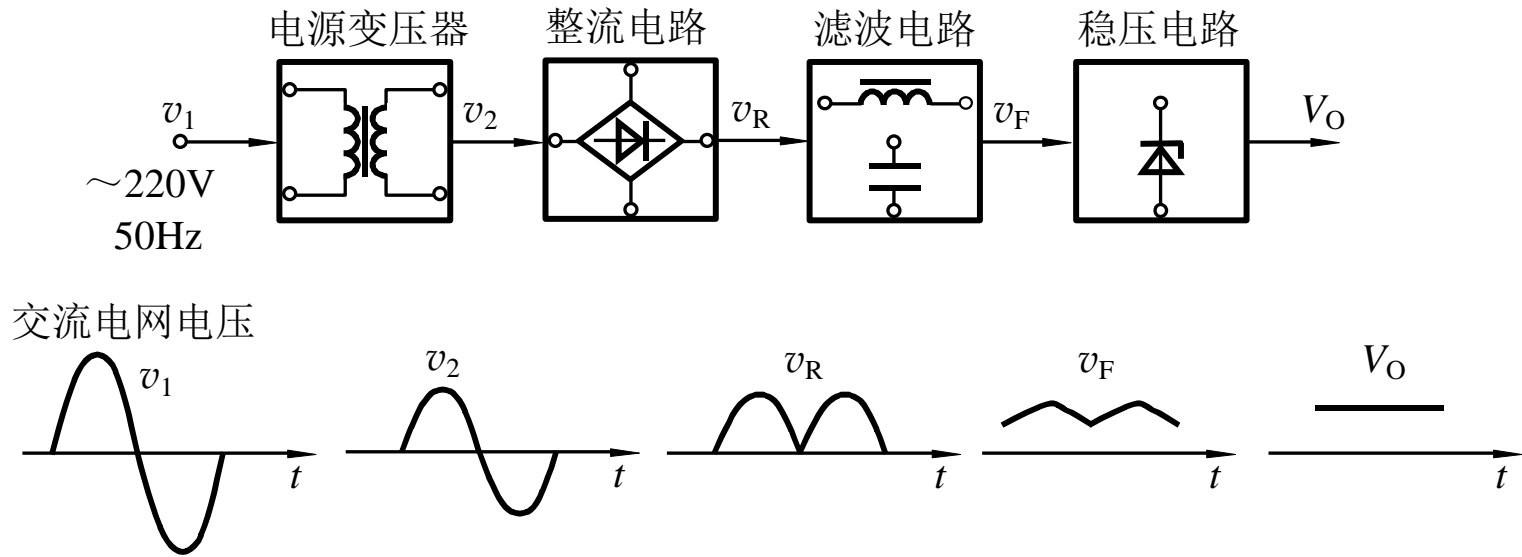
# 11.1 小功率整流滤波电路

## 11.1.1 单相桥式整流电路

## 11.1.2 滤波电路

## \*11.1.3 倍压整流电路

# 交流电网电压转换为直流电压的一般过程



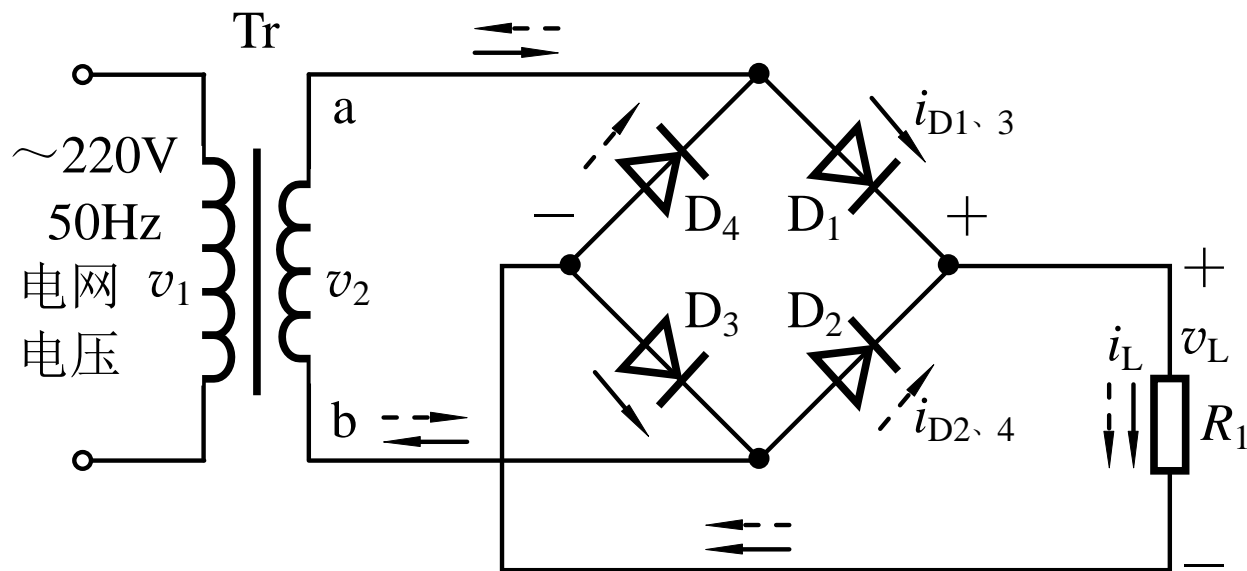
**变压器：**降压    **整流：**交流变脉动直流    **滤波：**滤除脉动

**稳压：**进一步消除纹波，提高电压的稳定性和带载能力

# 11.1.1 单相桥式整流电路

## 1. 工作原理

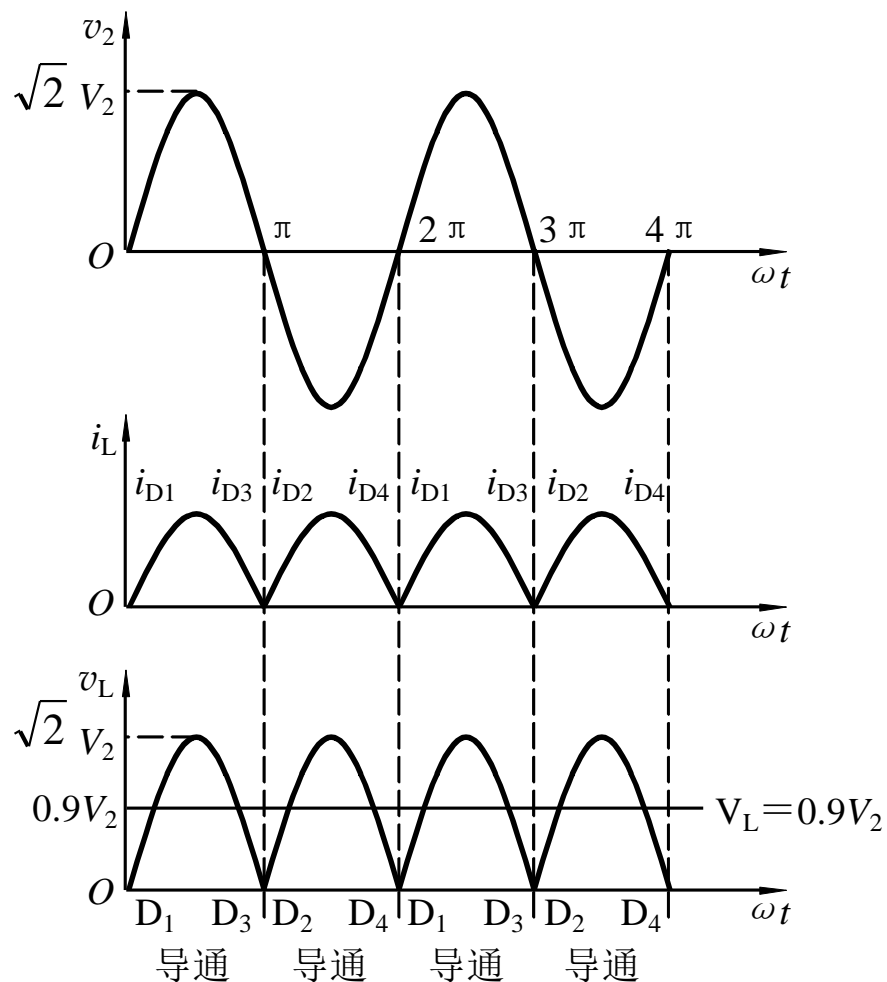
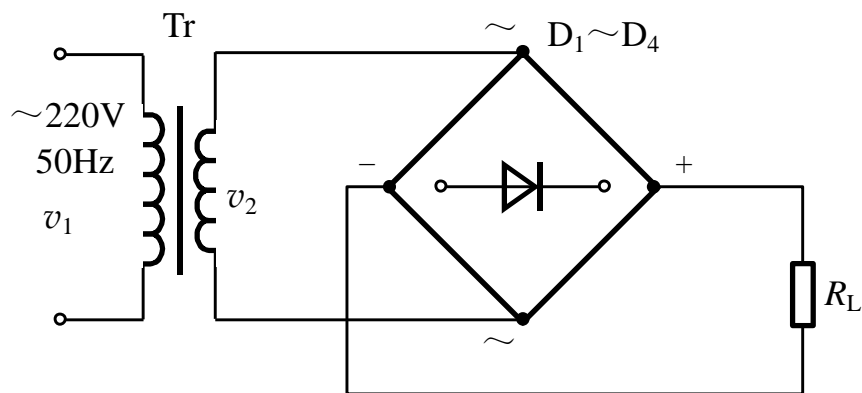
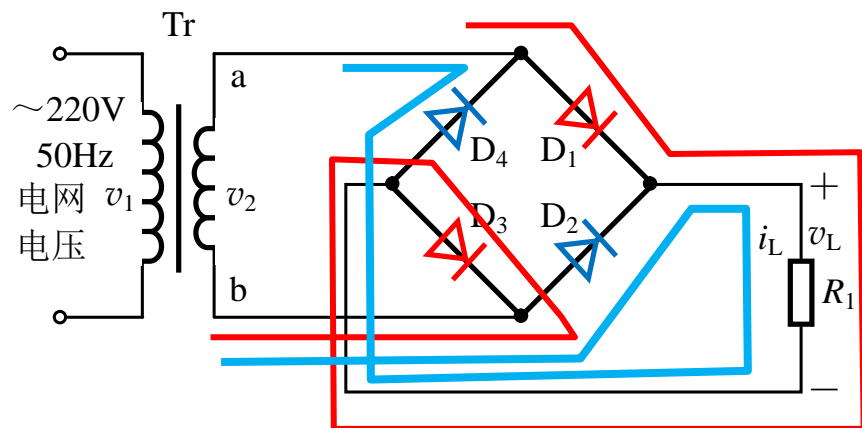
利用二极管的单向导电性



# 11.1.1 单相桥式整流电路

## 1. 工作原理

利用二极管的单向导电性



# 11.1.1 单相桥式整流电路

## 2. $V_L$ 和 $I_L$

$$V_L = \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sqrt{2} \cdot V_2 \sin \omega t \cdot d\omega t = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_2$$

$$I_L = \frac{V_L}{R_L} = \frac{0.9V_2}{R_L}$$

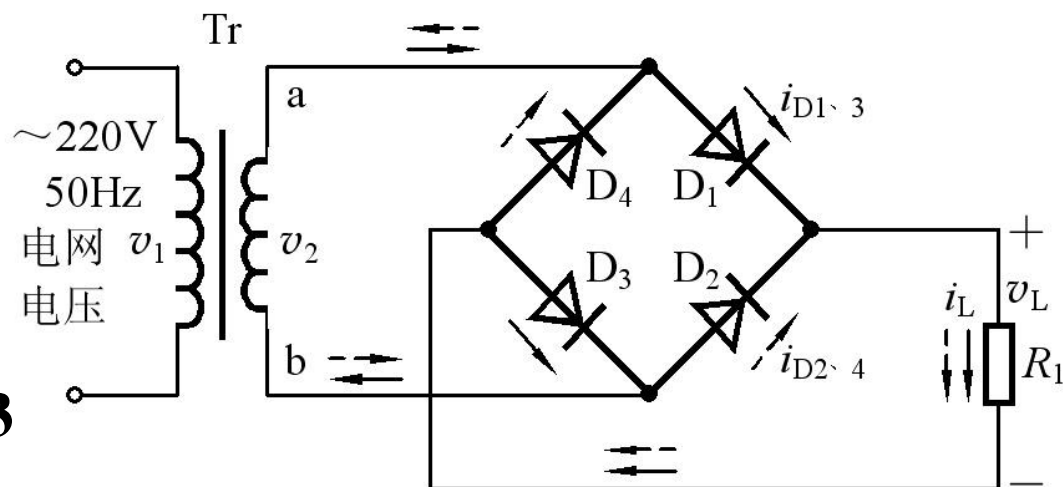
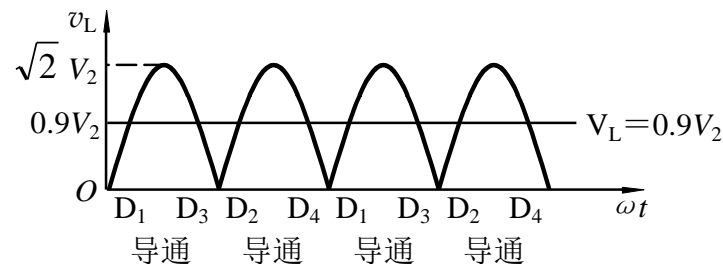
## 3. 纹波系数

$$K_r = \frac{\sqrt{V_2^2 - V_L^2}}{V_L} = 0.483$$

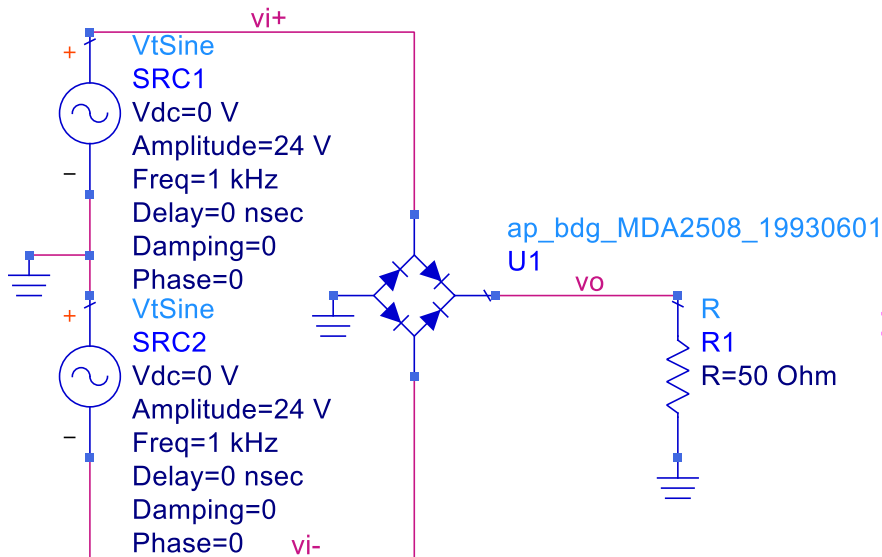
## 4. 平均整流电流

$$I_{D1} = I_{D3} = I_{D2} = I_{D4} = \frac{1}{2} I_L = 0.45 \frac{V_2}{R_L}$$

## 5. 最大反向电压 $V_{RM} = \sqrt{2} V_2$

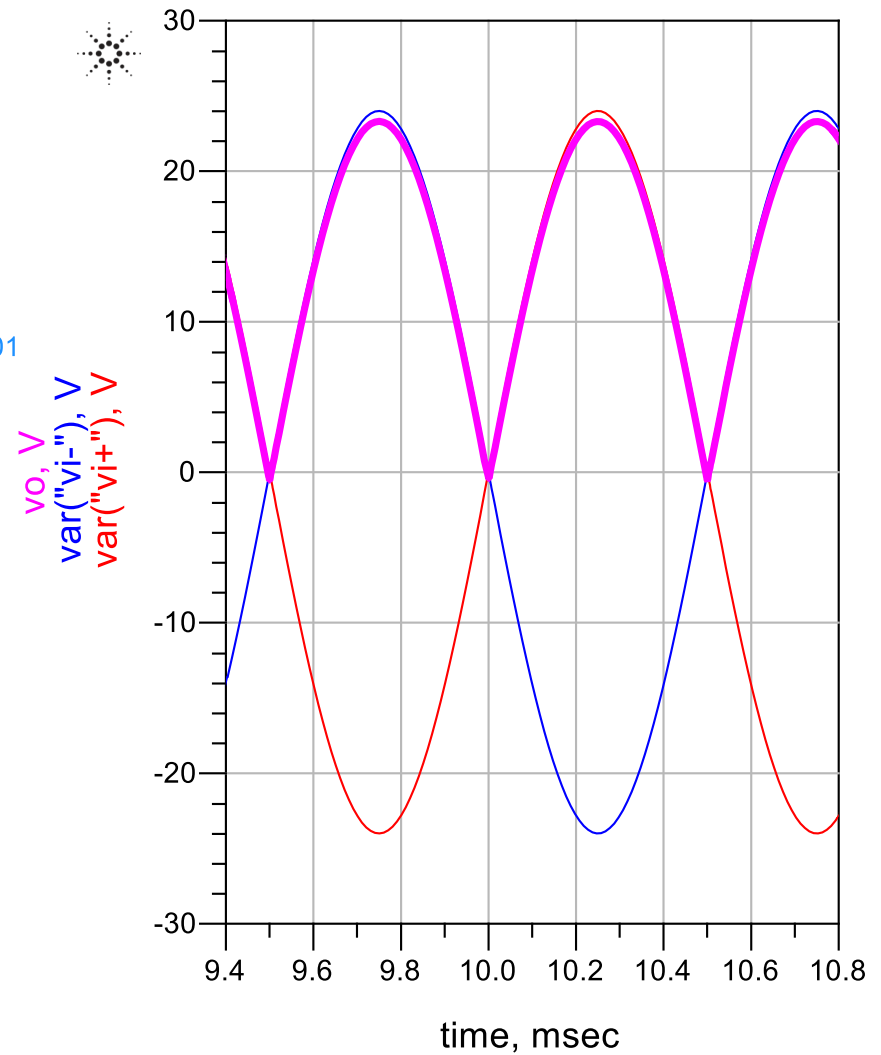


# ADS example



TRANSIENT

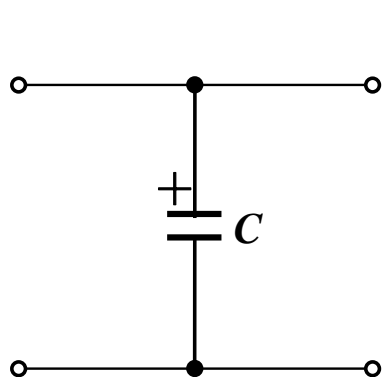
Tran  
Tran1  
StopTime=20 msec  
MaxTimeStep=10 usec



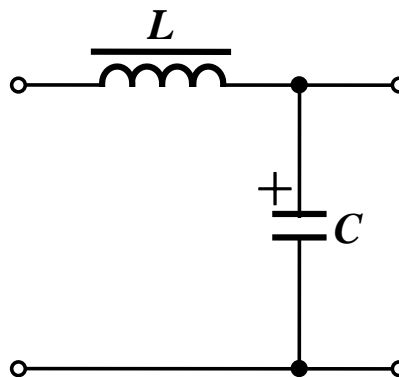


## 11.1.2 滤波电路

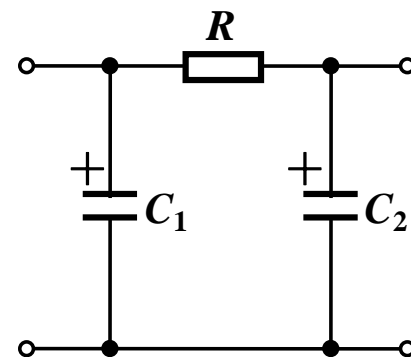
### 几种滤波电路



(a)



(b)



(c)

(a) 电容滤波电路

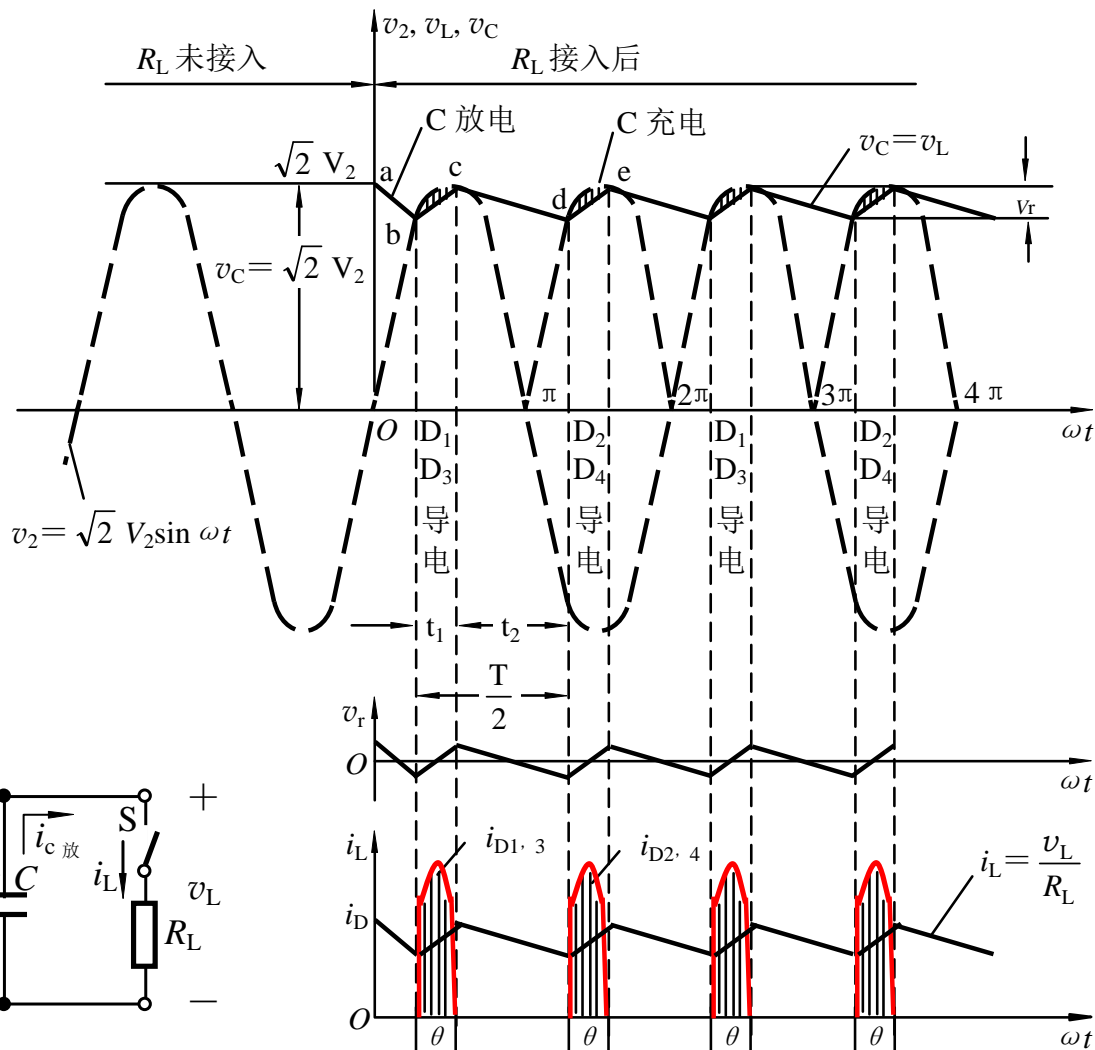
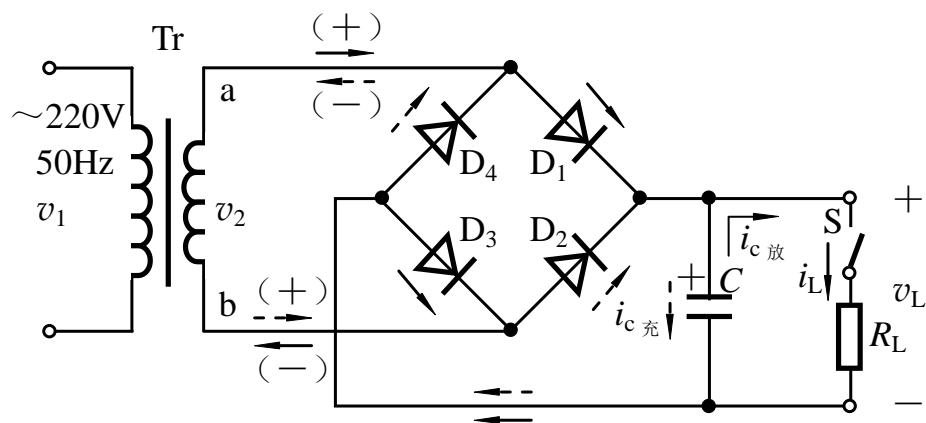
(b) 电感电容滤波电路（倒L型）

(c)  $\Pi$ 型滤波电路

# 为什么不用有源滤波电路？

# 11.1.2 滤波电路

## 电容滤波电路



## 11.1.2 滤波电路

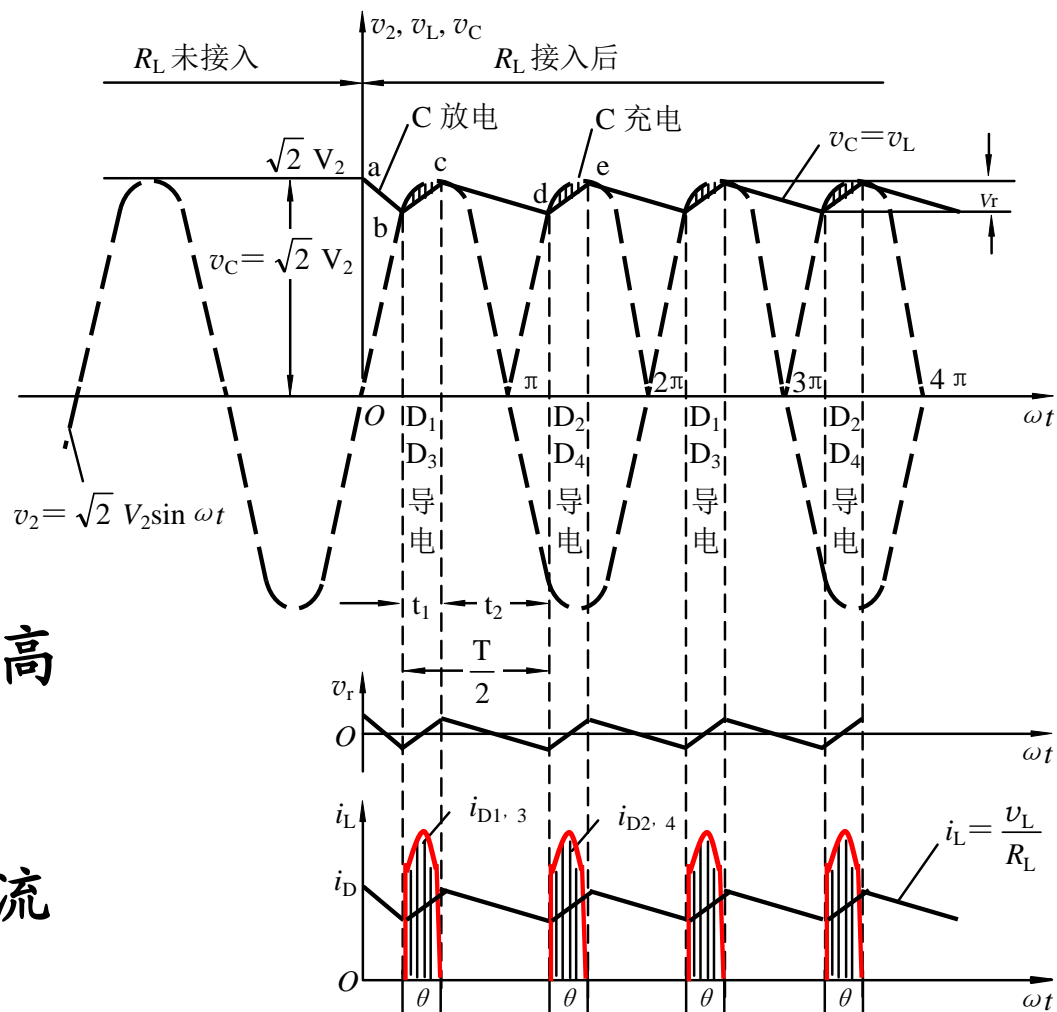
### 电容滤波的特点

A. 二极管的导电角  $\theta < \pi$ ，  
流过二极管的瞬时电流  
很大。

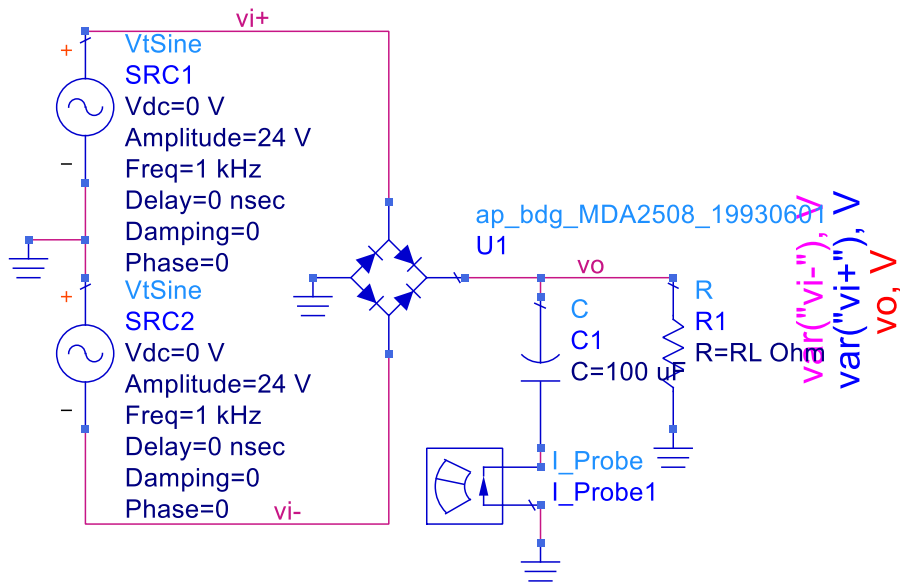
B. 负载直流平均电压  $V_L$  升高  
 $\tau_d = R_L C$  越大， $V_L$  越高

C. 直流电压  $V_L$  随负载电流  
增加而减少

当  $\tau_d \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$  时， $V_L = (1.1 \sim 1.2) V_2$



# ADS example

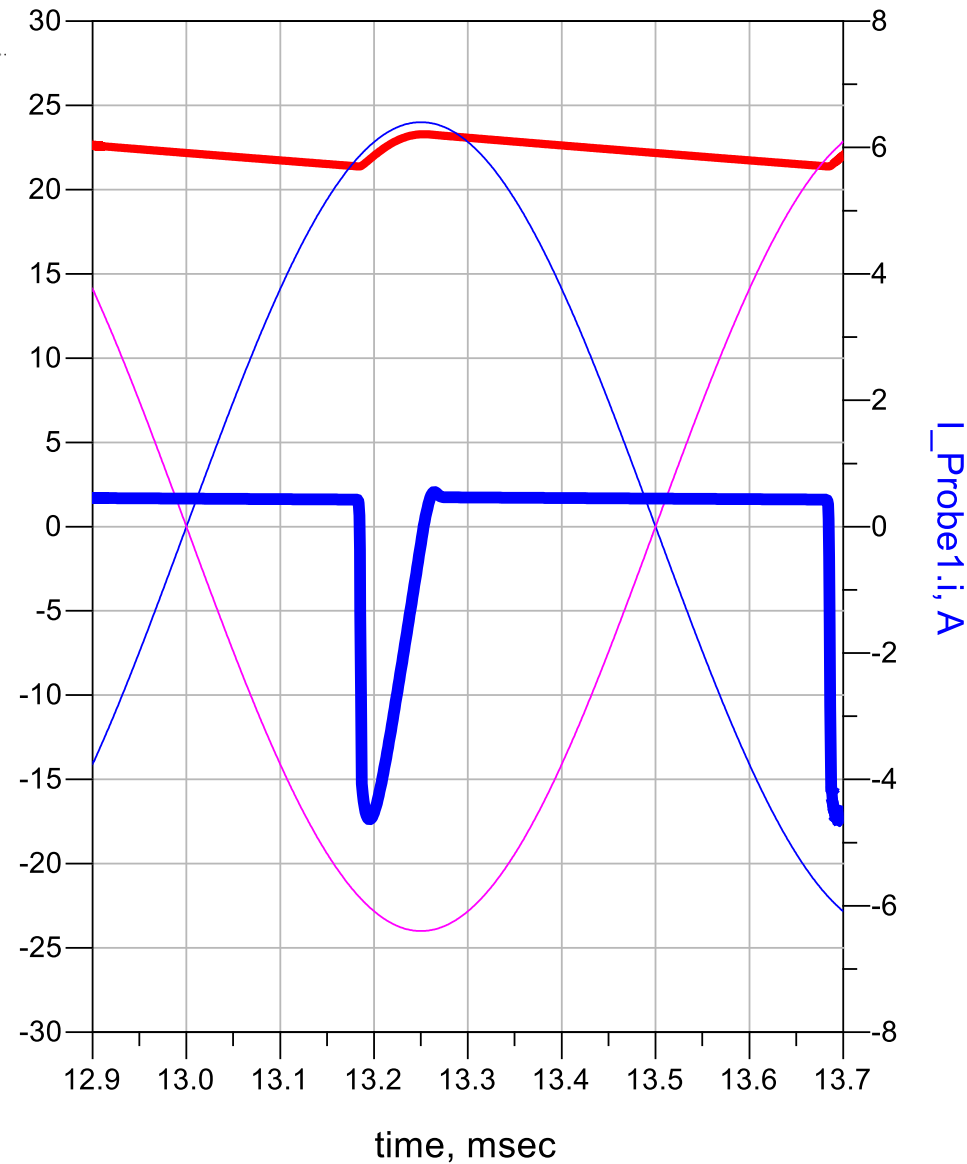


**TRANSIENT**

Tran  
Tran1  
StopTime=20 msec  
MaxTimeStep=1 usec

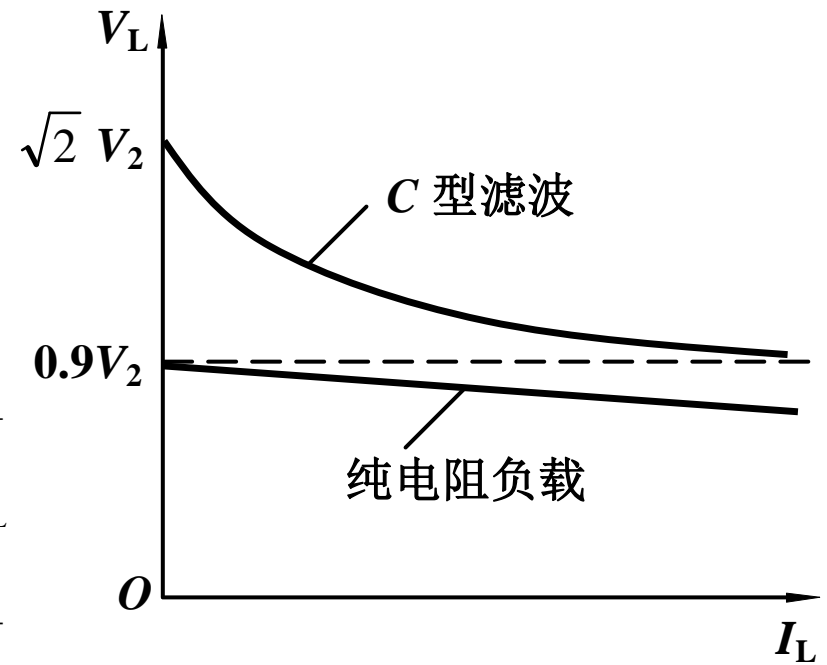
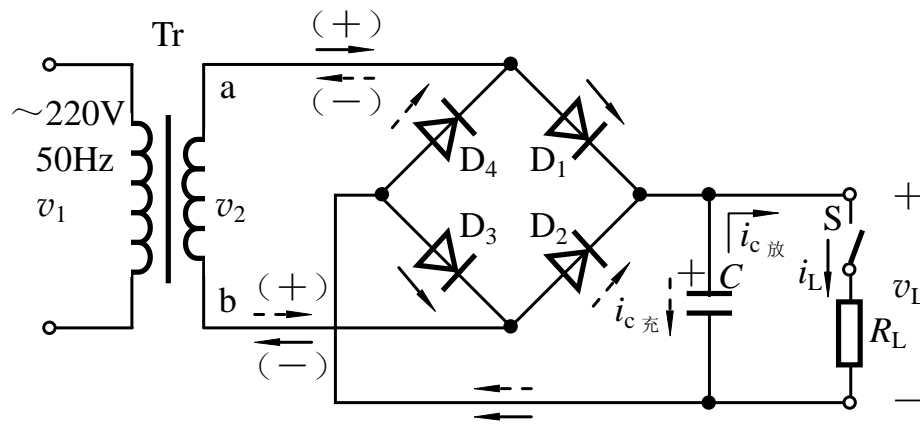
Var  
Eqn  
**VAR**  
**VAR1**  
**RL=50**

**var("vi-"), V**  
**var("vi+"), V**  
**vo, V**



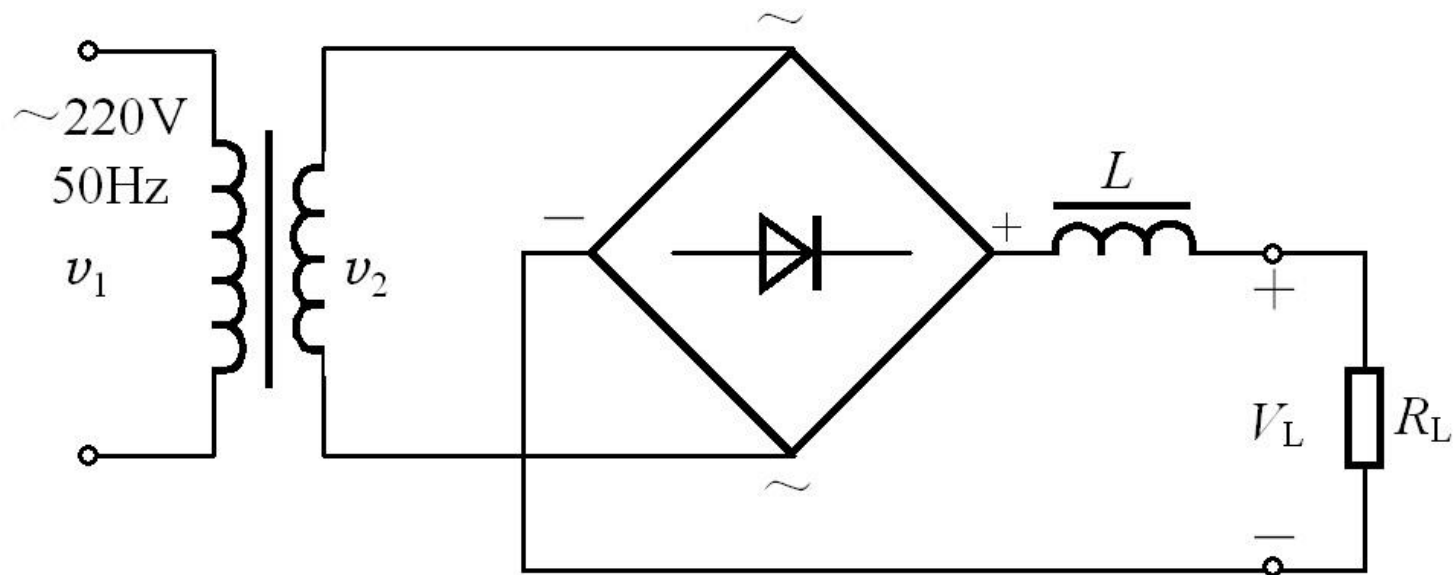
## 11.1.2 滤波电路

$V_L$  随负载电流的变化

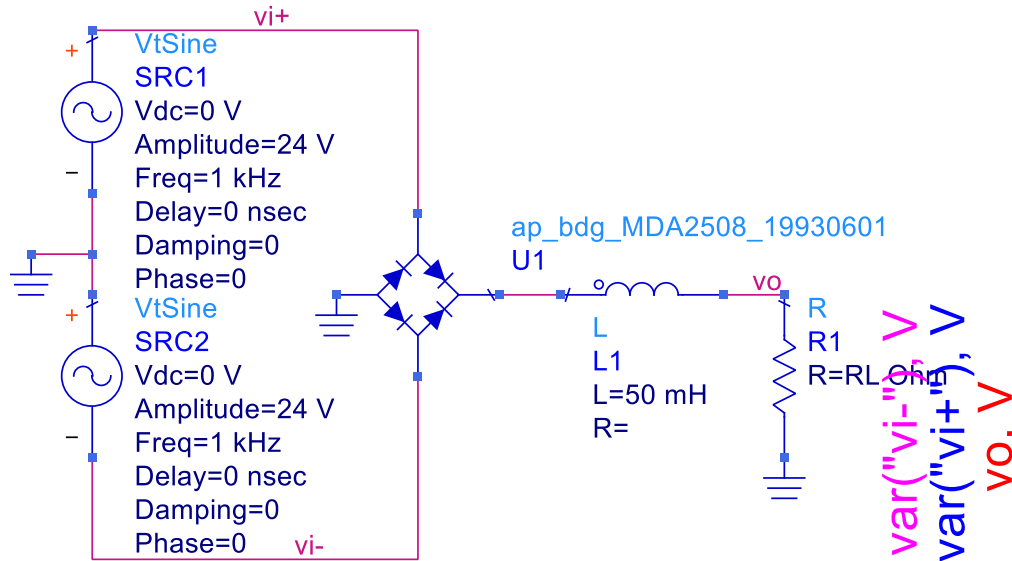


## 11.1.2 滤波电路

### 电感滤波电路



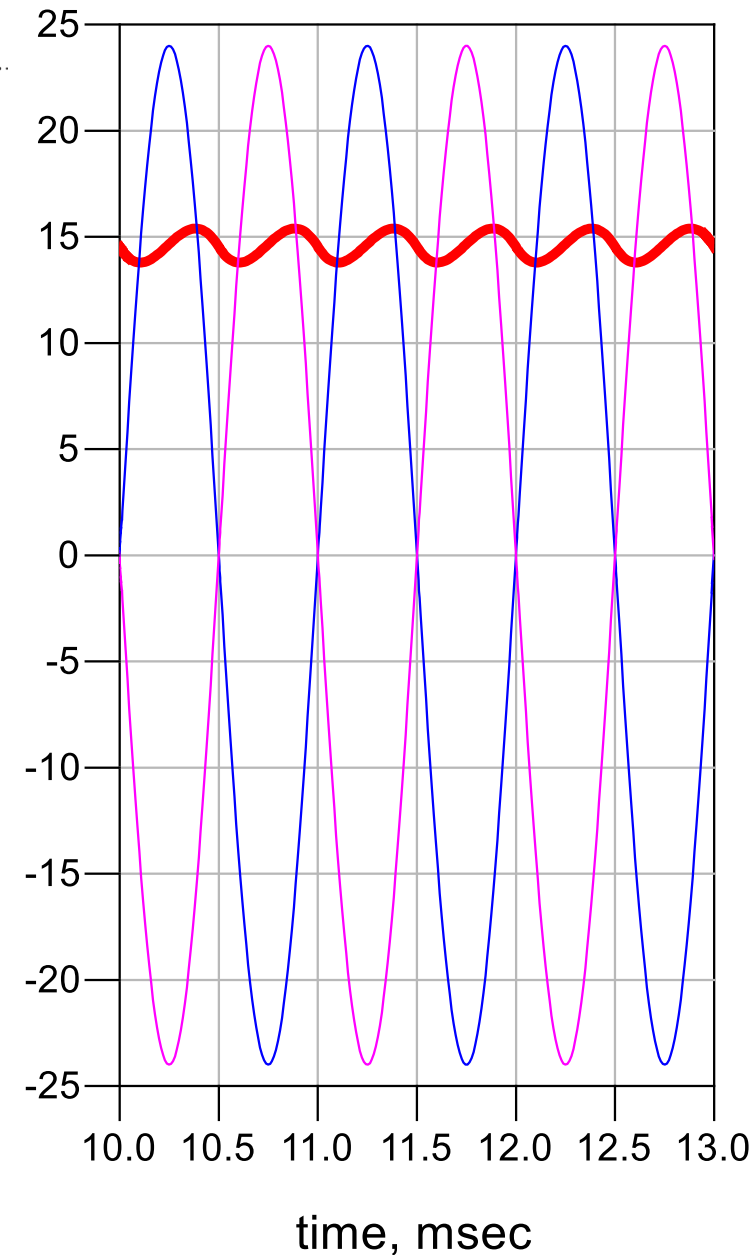
# ADS example



 **TRANSIENT**

Tran  
Tran1  
StopTime=20 msec  
MaxTimeStep=10 usec

Var  
Eqn  
VAR  
VAR1  
RL=50



### \*11.1.3 倍压整流电路

正半周,  $D_1$  导通,  $D_2$  截止,  
 $C_1$  充电达峰值电压

$$V_{C_1} = \sqrt{2} V_2$$

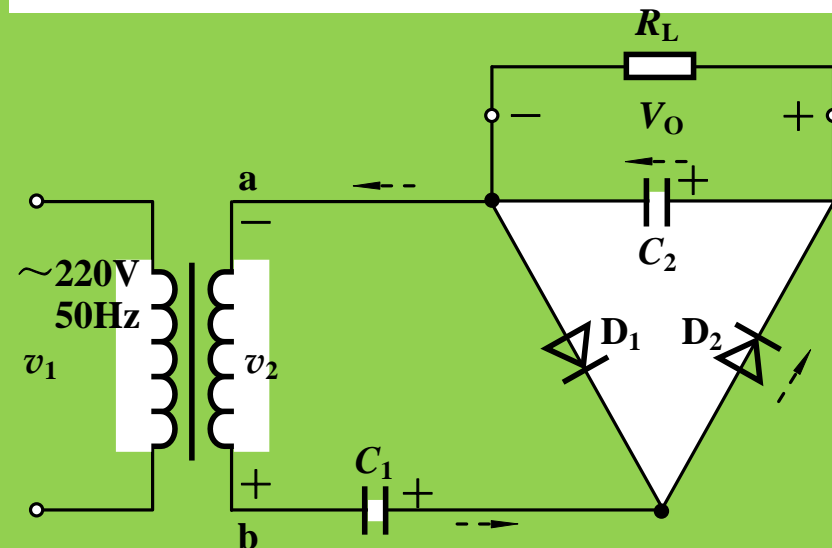
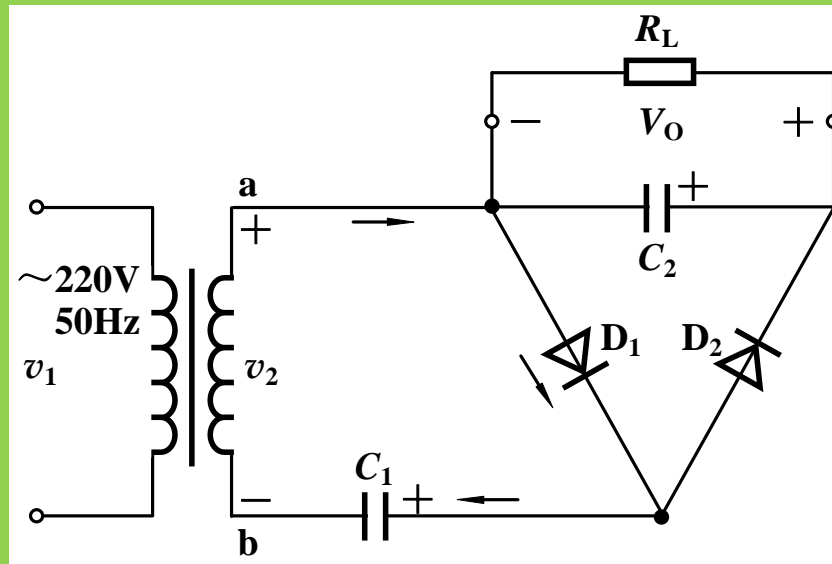
负半周,  $D_1$  截止,  $D_2$  导通,  
 $C_2$  充电的峰值电压

$$V_{C_2} = \sqrt{2} V_2 + V_{C_1} = 2\sqrt{2} V_2$$

$$V_L = V_{C_2} = 2\sqrt{2} V_2$$

是变压器副边电压的2倍

当  $C_2$  的放电时间常数  $R_L C_2$  远大于电源电压周期时, 正半周,  $C_2$  放电很少, 负载电压可以基本保持不变。

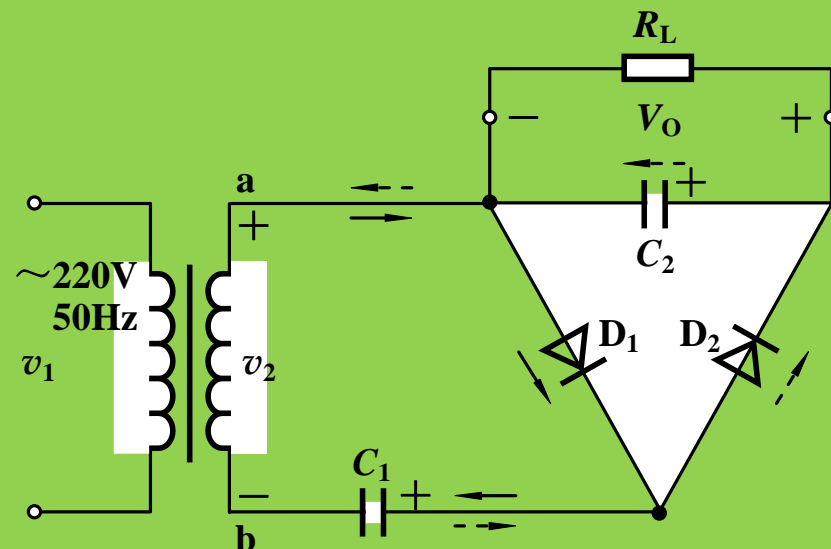




### \*11.1.3 倍压整流电路

电路中元器件要求有较高的耐压值，  
并能承受更大的冲击电流

增加连接的级数，可得到更高倍数的输出电压



倍压整流电路一般用于高电压、小电流（几毫安以下）和  
负载变化不大的直流电源中。

## 10.2 线性稳压电路

10.2.1 稳压电源质量指标

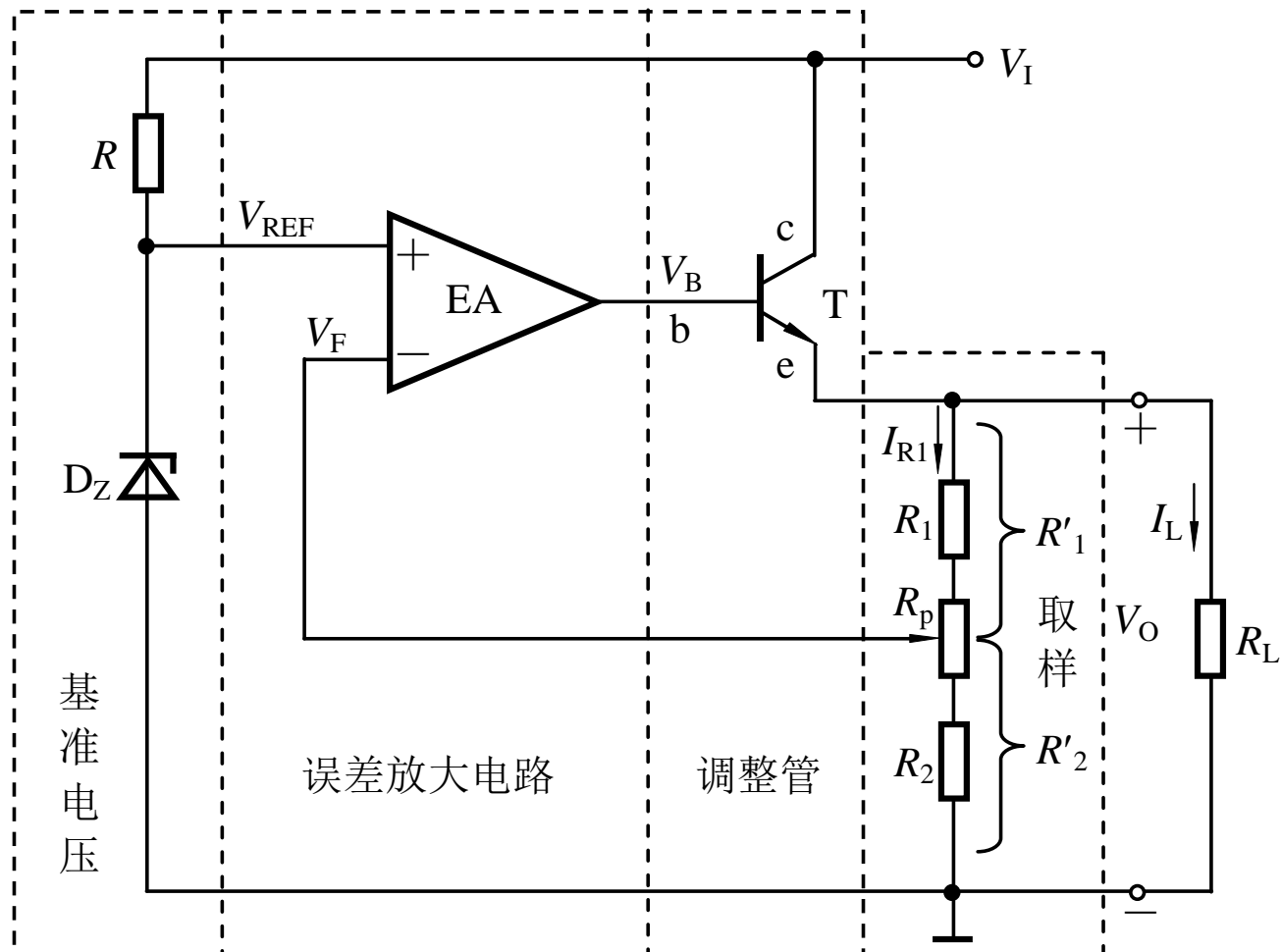
10.2.2 串联反馈式稳压电路工作原理

10.2.3 三端集成稳压器

10.2.4 三端集成稳压器的应用

## 11.2.2 串联反馈式稳压电路的工作原理

### 1. 结构



# 11.2.2 串联反馈式稳压电路的工作原理

## 2. 工作原理

将 $V_{REF}$ 看作电路的输入

电压串联负反馈

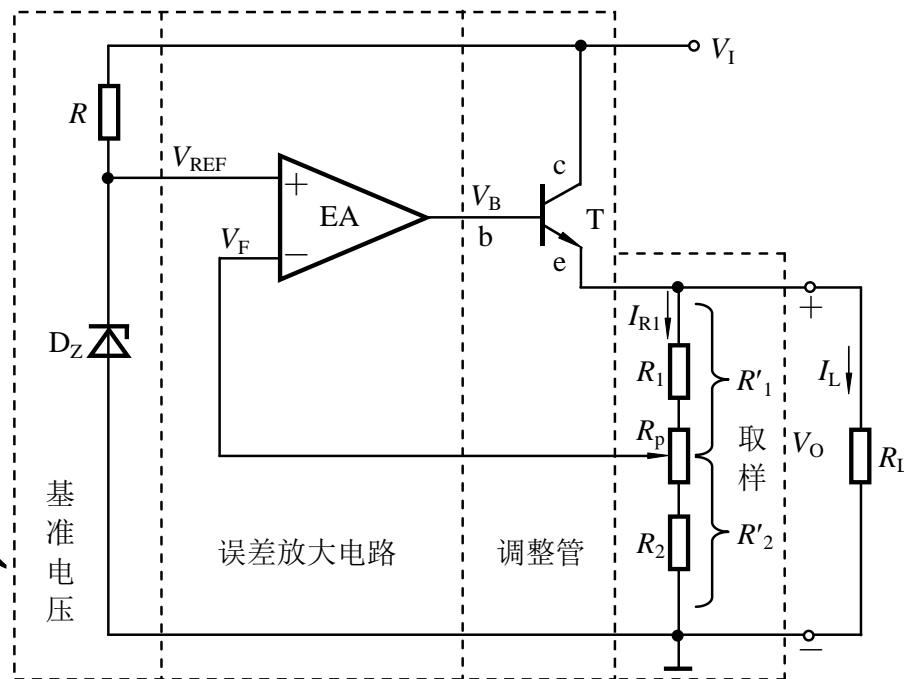
输入电压波动  
负载电流变化 } → 输出电压变化

$V_O \downarrow \rightarrow V_F \downarrow (V_{REF} \text{ 不变}) \rightarrow V_B \uparrow$   
 $V_O \uparrow \leftarrow$

满足深度负反馈，根据虚短和虚断有

所以输出电压

$$\begin{cases} V_F = V_{REF} \\ \frac{V_F}{V_O} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \end{cases} \quad V_O = V_{REF} \left( 1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$$



# 除了稳压原理来自负反馈，此电路设计还需要考虑哪些问题？

## 11.2.1 稳压电源质量指标

输出电压  $V_O = f(V_I, I_O, T)$

输出电压变化量  $\Delta V_O = K_V \Delta V_I + R_o \Delta I_O + S_T \Delta T$

输入调整因数  $K_V = \left. \frac{\Delta V_O}{\Delta V_I} \right|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}}$

电压调整率  $S_V = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I} \times 100\% \left|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}} \right.$

稳压系数  $\gamma = \frac{\Delta V_O / V_O}{\Delta V_I / V_I} \left|_{\substack{\Delta I_O = 0 \\ \Delta T = 0}} \right.$

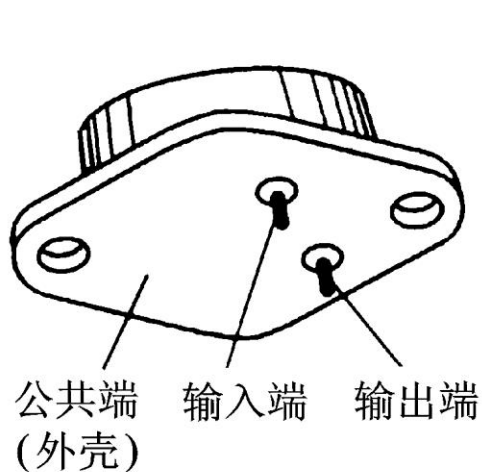
输出电阻  $R_o = \left. \frac{\Delta V_O}{\Delta I_O} \right|_{\substack{\Delta V_I = 0 \\ \Delta T = 0}}$

温度系数  $S_T = \left. \frac{\Delta V_O}{\Delta T} \right|_{\substack{\Delta V_I = 0 \\ \Delta T = 0}}$

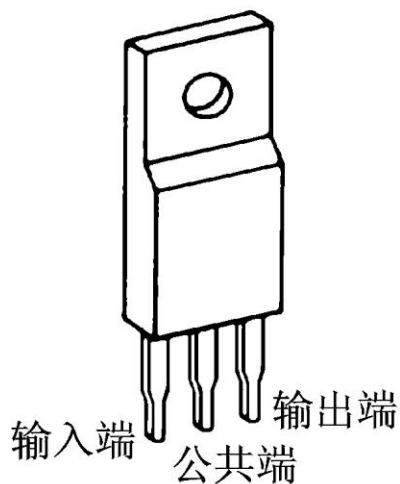
## 11.2.3 三端集成稳压器

78 XX: 正电压

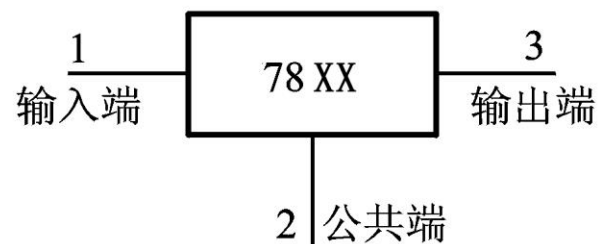
79 XX: 负电压



(b)



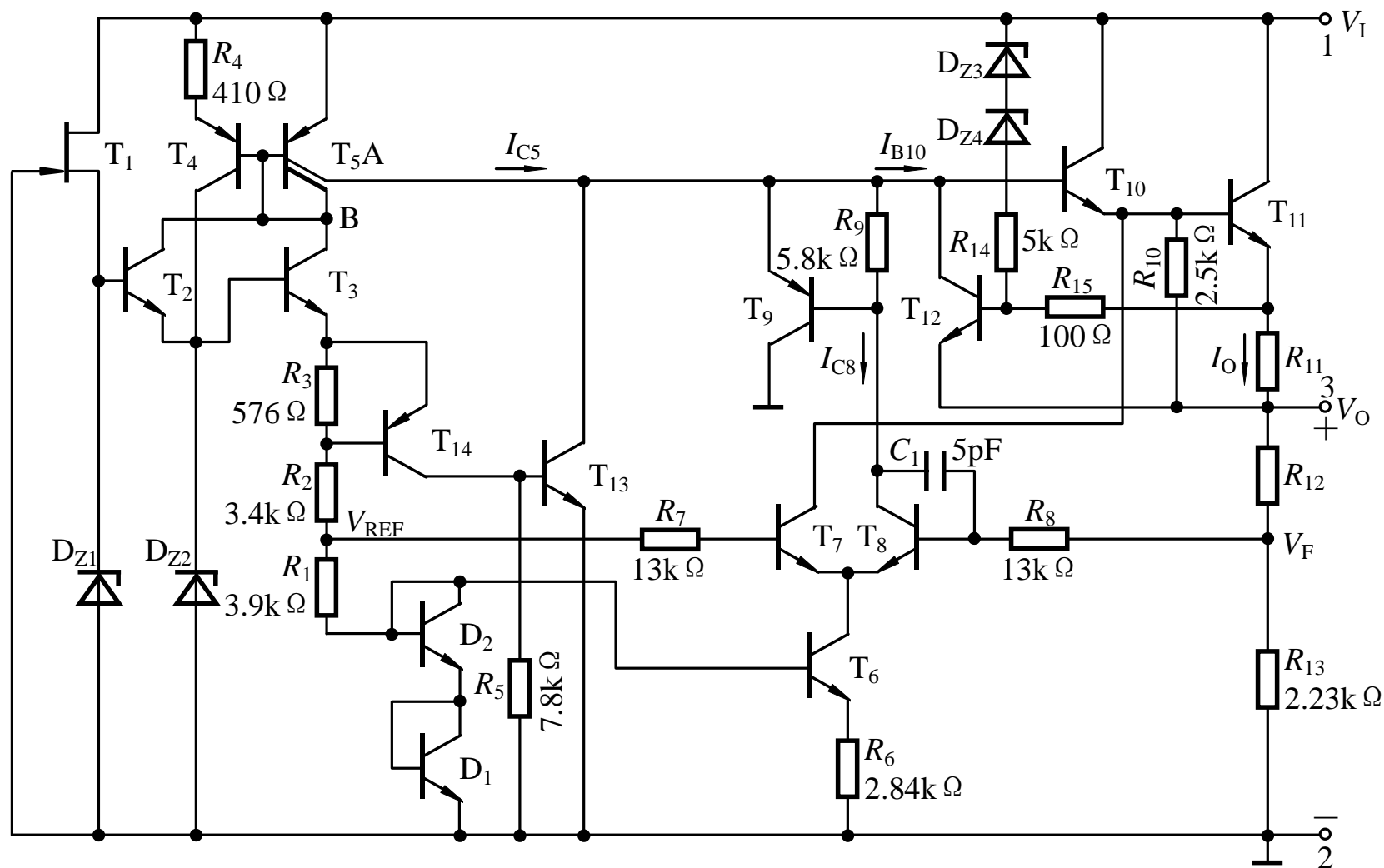
(c)



(d)

## 11.2.3 三端集成稳压器

### 1. 输出电压固定的三端集成稳压器



## 11.2.3 三端集成稳压器

### 2. 可调式三端集成稳压器（正电压LM317、负电压LM337）

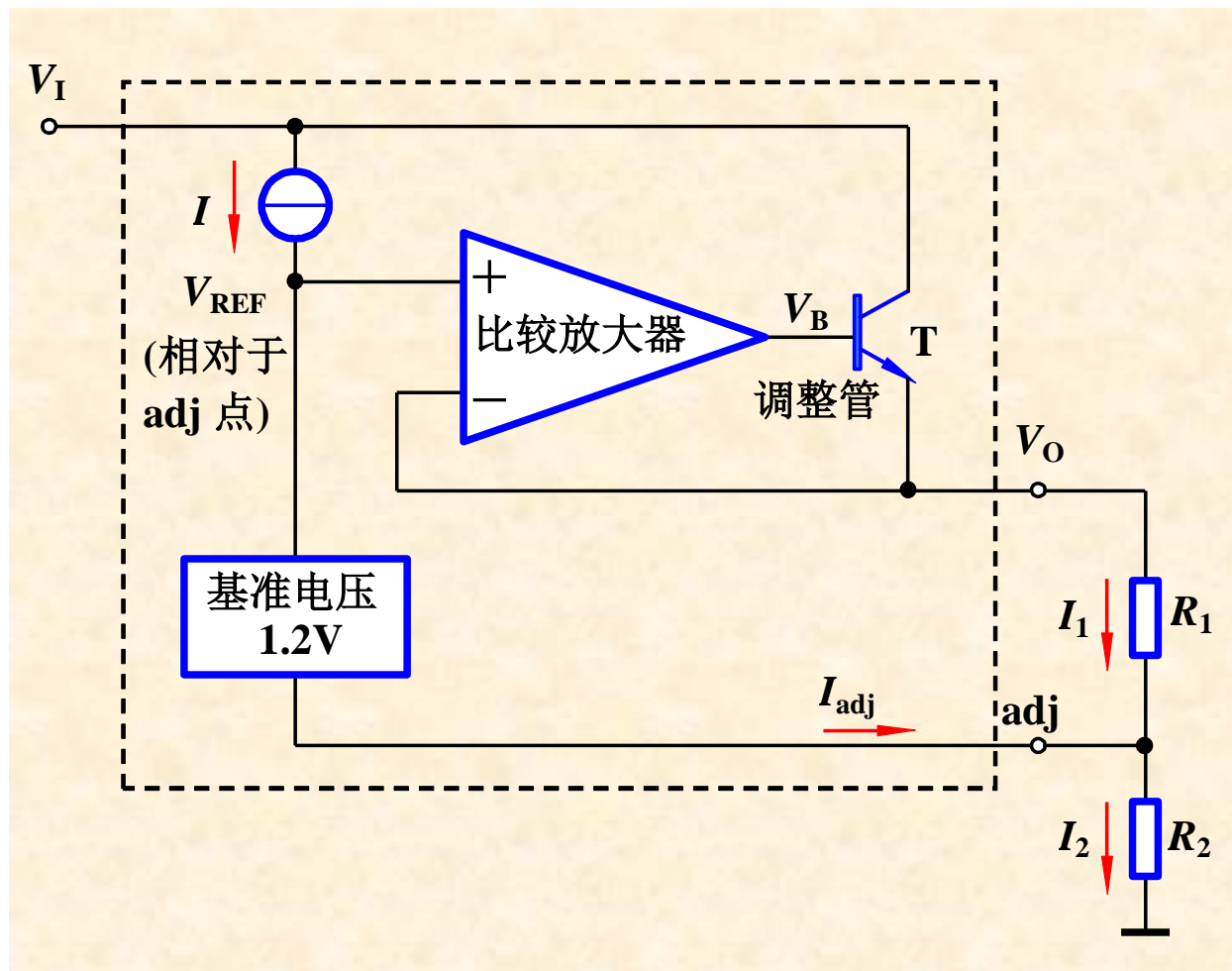
输出电压

$$\begin{aligned} V_O &= V_{\text{REF}} + I_2 R_2 \\ &= V_{\text{REF}} + (I_1 + I_{\text{adj}}) R_2 \end{aligned}$$

由于  $I_{\text{adj}} \ll I_1$

所以

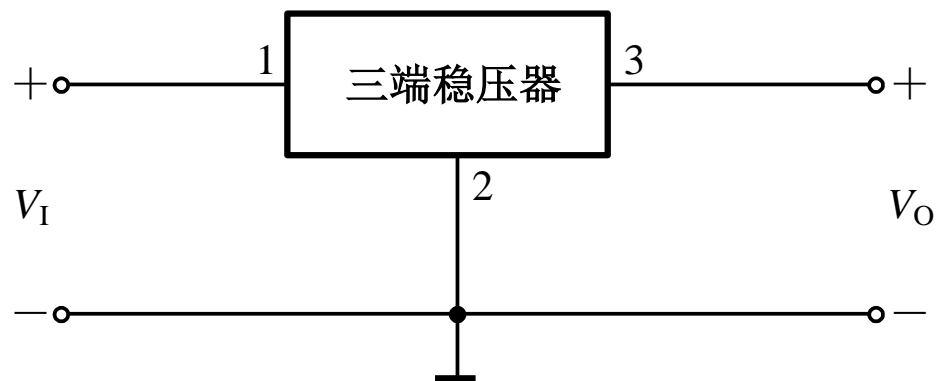
$$\begin{aligned} V_O &\approx V_{\text{REF}} + I_1 R_2 \\ &= V_{\text{REF}} + \frac{V_{\text{REF}}}{R_1} \cdot R_2 \\ &= V_{\text{REF}} \left( 1 + \frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned}$$





## 11.2.3 三端集成稳压器

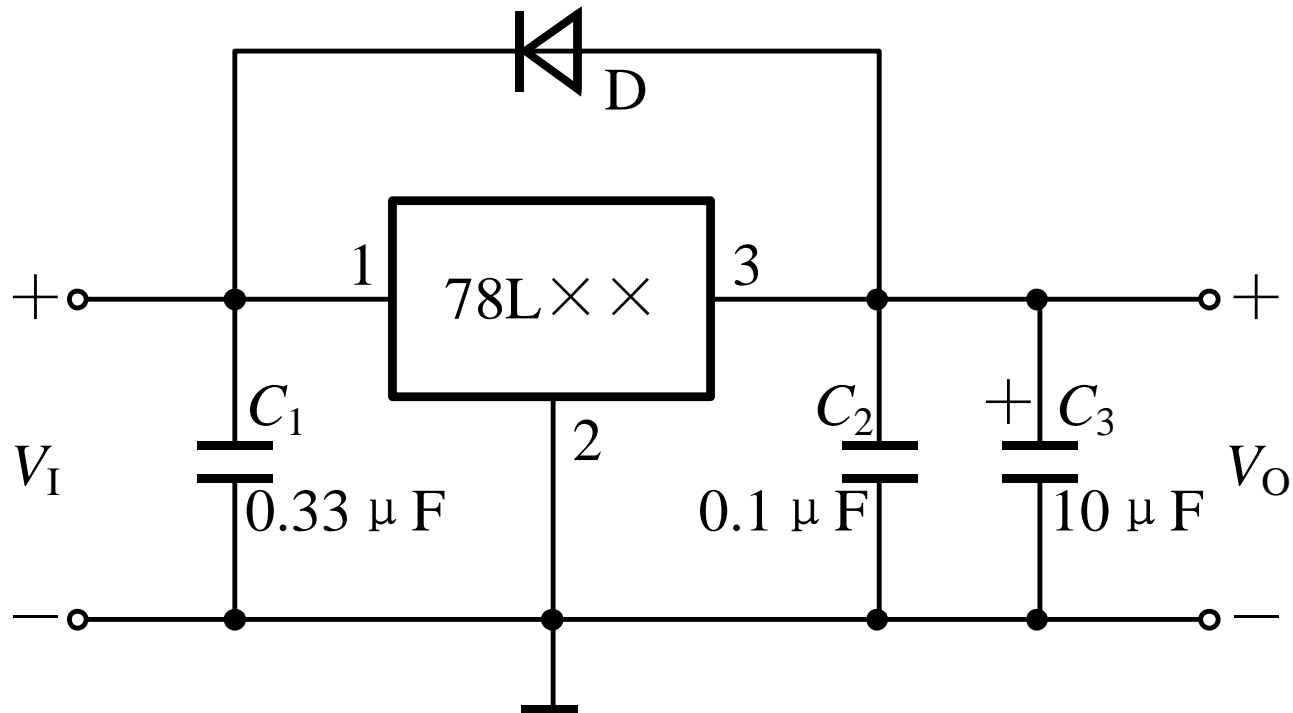
### 3. 最小输入-输出电压差



类 型			三端固定	三端可调
参 数	符号	单 位	正压78 × × 负压79 × ×	正压LM317 负压LM337
输入电压	$V_I$	V	$\pm(8 \sim 40)$	$\pm(3 \sim 40)$
输出电压	$V_O$	V	$\pm(5 \sim 24)$	$\pm(1.2 \sim 37)$
最小 (输入-输出) 电压差	$(V_I - V_O) \min$	V	$\pm(2.0 \sim 2.5)$	1.2 ~ 22

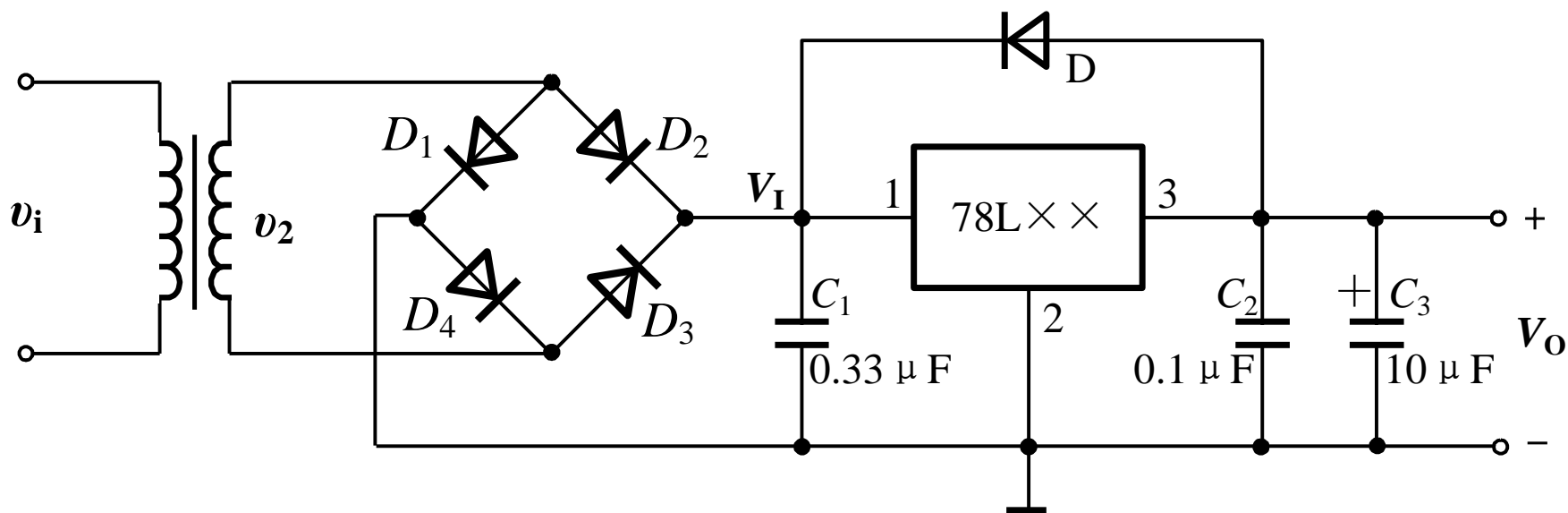
## 11.2.4 三端集成稳压器的应用

### 1. 固定式应用举例



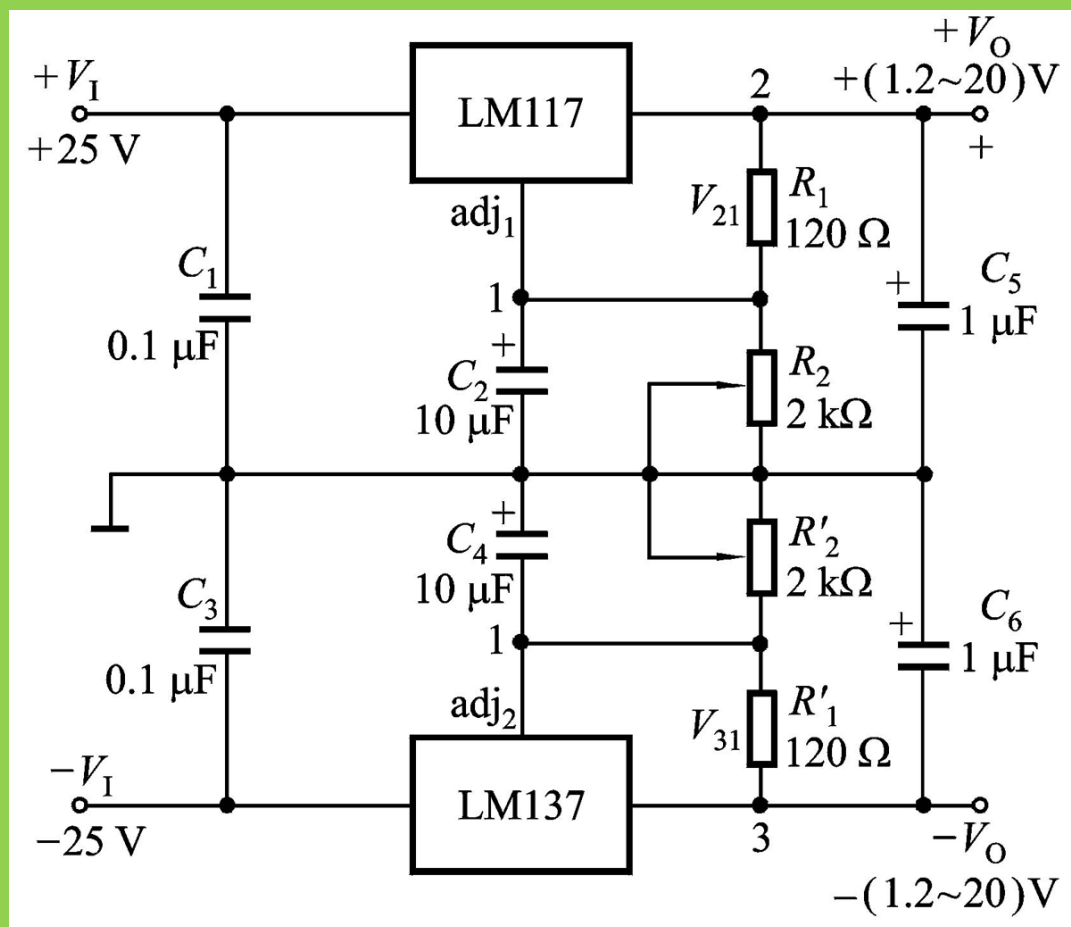
## 11.2.4 三端集成稳压器的应用

### 1. 固定式应用举例



## 11.2.4 三端集成稳压器的应用

### 2. 可调式应用举例



## 11.3 开关式稳压电路

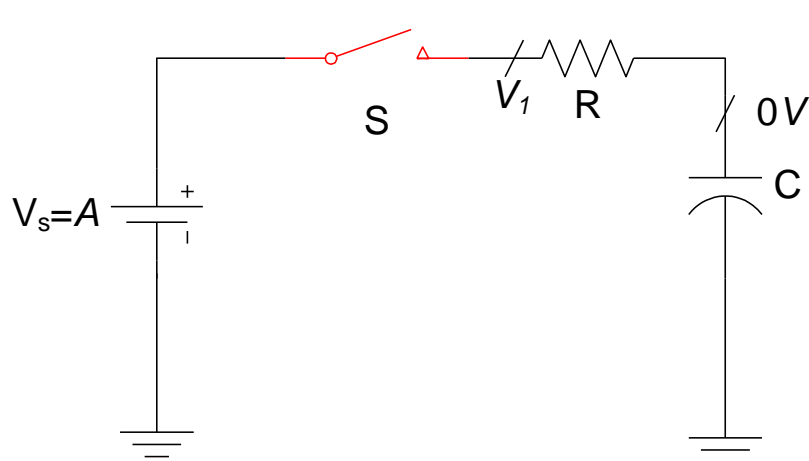
11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

\*11.3.2 带隔离变压器的直流变换型电源

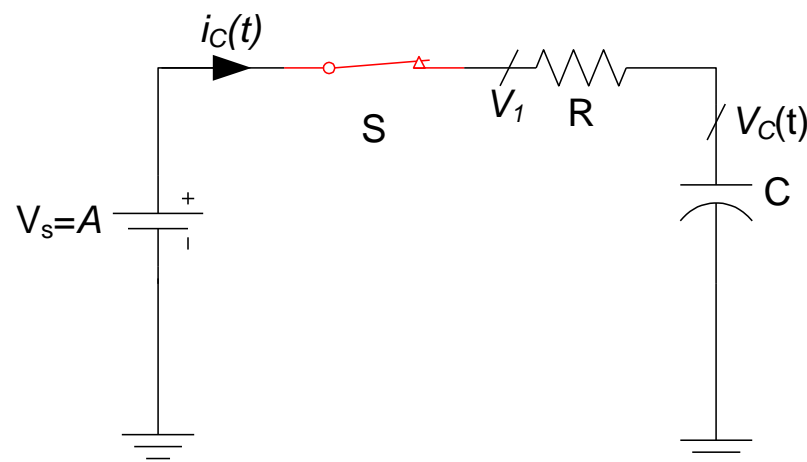
11.3.3 开关稳压电源的应用举例

# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 初始时开关是断开的，当开关闭合时电源会通过电阻为 $R$ 的导线向理想电容充电。
- 请问当电容充满时，其充电效率 $E_C/E_S$ 是多少？与电阻什么关系？



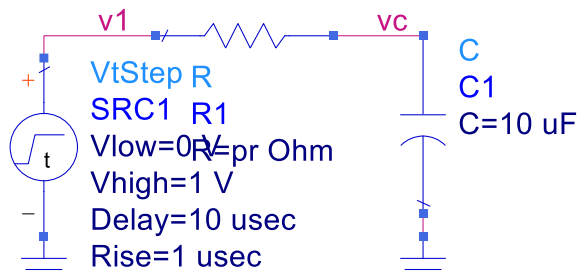
OFF



ON

# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 计算机仿真（现代复杂电路都是借助计算机仿真辅助分析，但手工理论计算是设计人员真正理解电路的核心）



TRANSIENT

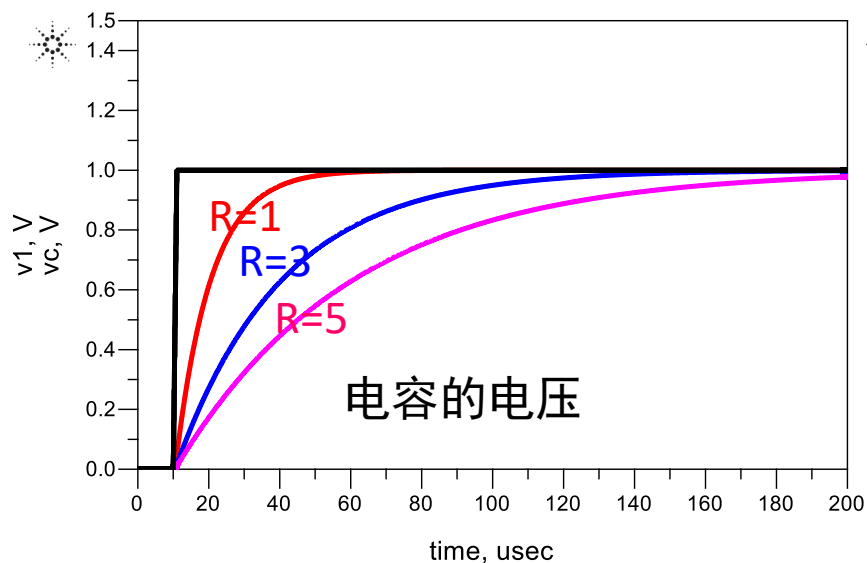
Tran  
Tran1  
StopTime=200.0 usec  
MaxTimeStep=10 nsec

Var Egn  
VAR1  
pr=1.0

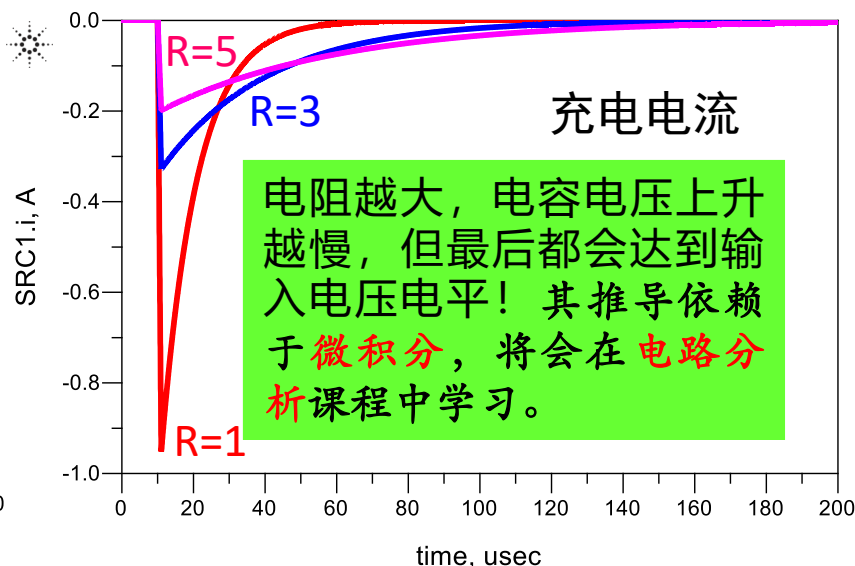
PARAMETER SWEEP

ParamSweep  
Sweep1  
SweepVar="pr"  
SimInstanceName[1]="Tran1"  
SimInstanceName[2]=  
SimInstanceName[3]=  
SimInstanceName[4]=  
SimInstanceName[5]=  
SimInstanceName[6]=  
Start=1  
Stop=5  
Step=

仿真的电路



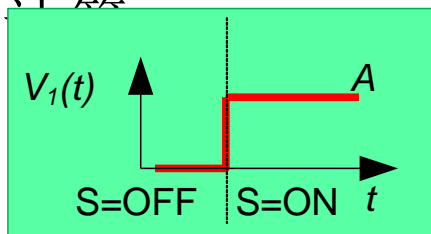
仿真的配置



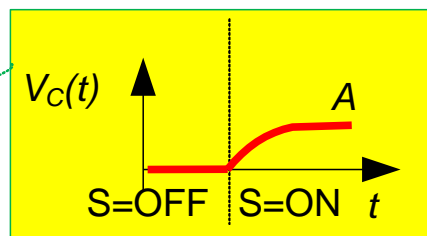
再通过计算机积分计算是可以得到效率的，但是这里我们展示手工计算的魅力！

# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 数学计算



正如仿真所见，充电电流  $i_c(t)$  和  $v_c(t)$  是随时间变化的变量！



$$Q_C = V_s C$$

$$Q_C = \int i_c(t) dt$$

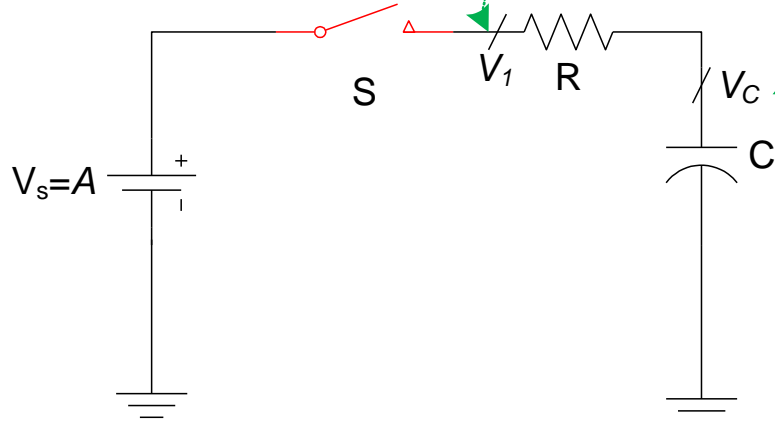
$$E_C = \frac{1}{2} V_s^2 C$$

只要电阻不为0，  
充电效率与电阻  
大小无关！

$$\frac{E_C}{E_s} = 50\%$$

$$P_s(t) = V_s i_c(t)$$

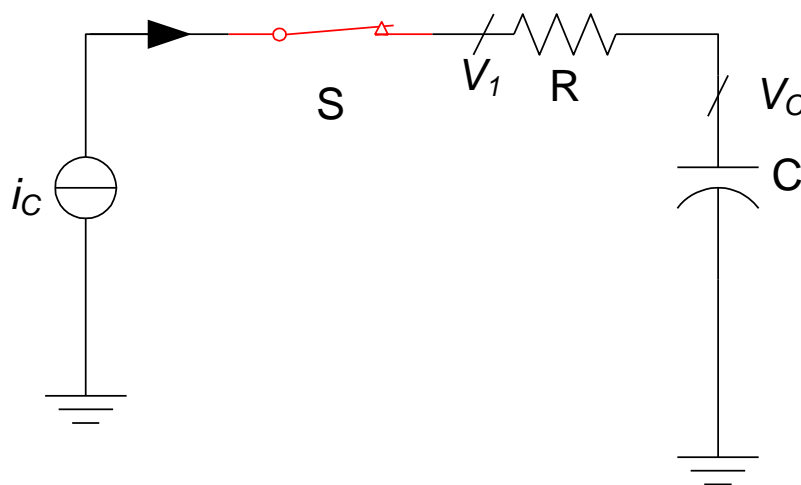
$$E_s = \int P_s(t) dt = \int V_s i_c(t) dt = V_s \int i_c(t) dt = V_s Q_C = V_s^2 C$$





# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 以恒流源来驱动



$$P_R = i_c^2 R$$

只要电阻足够小，则其损耗就会很小，则其充电效率可以很高！

如何实现一个理想恒流源？

# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

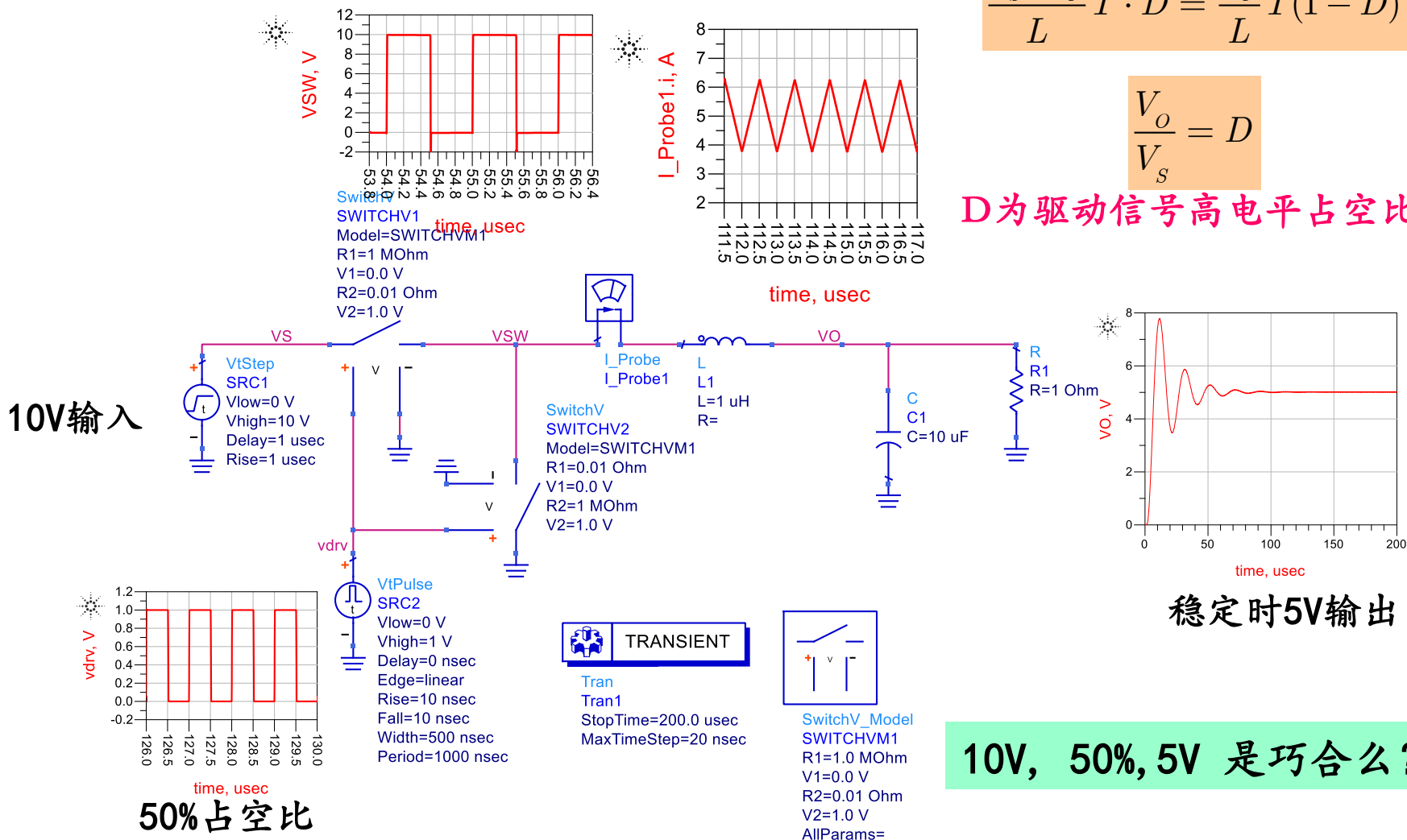
稳态时电流上升和下降幅度相同:

- 用开关变换器来驱动

$$\frac{V_s - V_o}{L} T \cdot D = \frac{V_o}{L} T(1 - D)$$

$$\frac{V_o}{V_s} = D$$

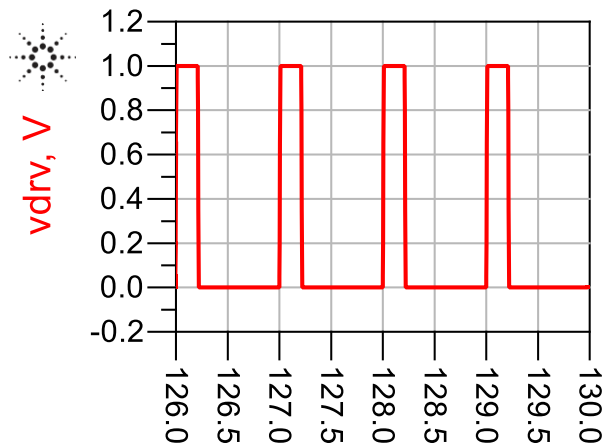
D为驱动信号高电平占空比



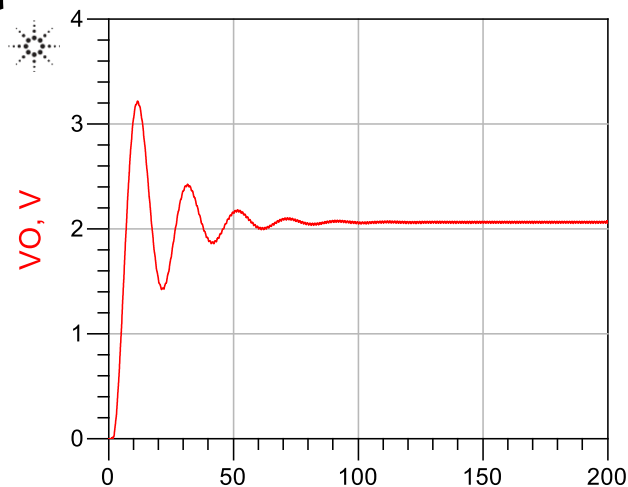
# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 不同占空比下的输出

20%

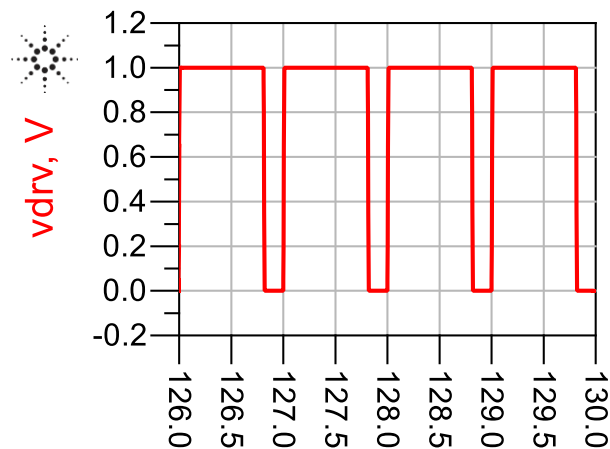


time, usec

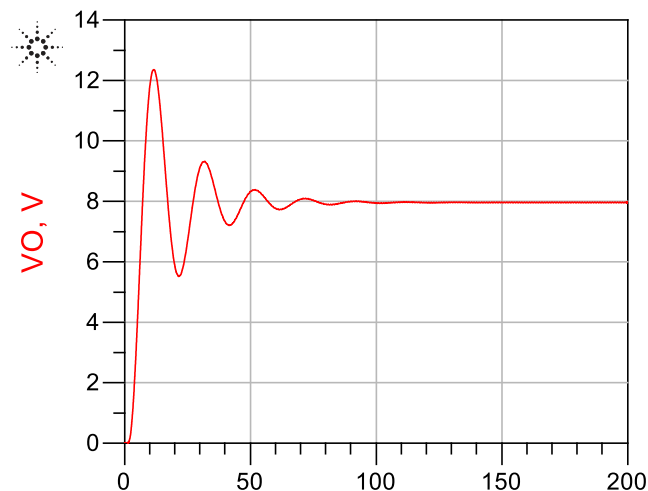


time, usec

80%



time, usec



time, usec

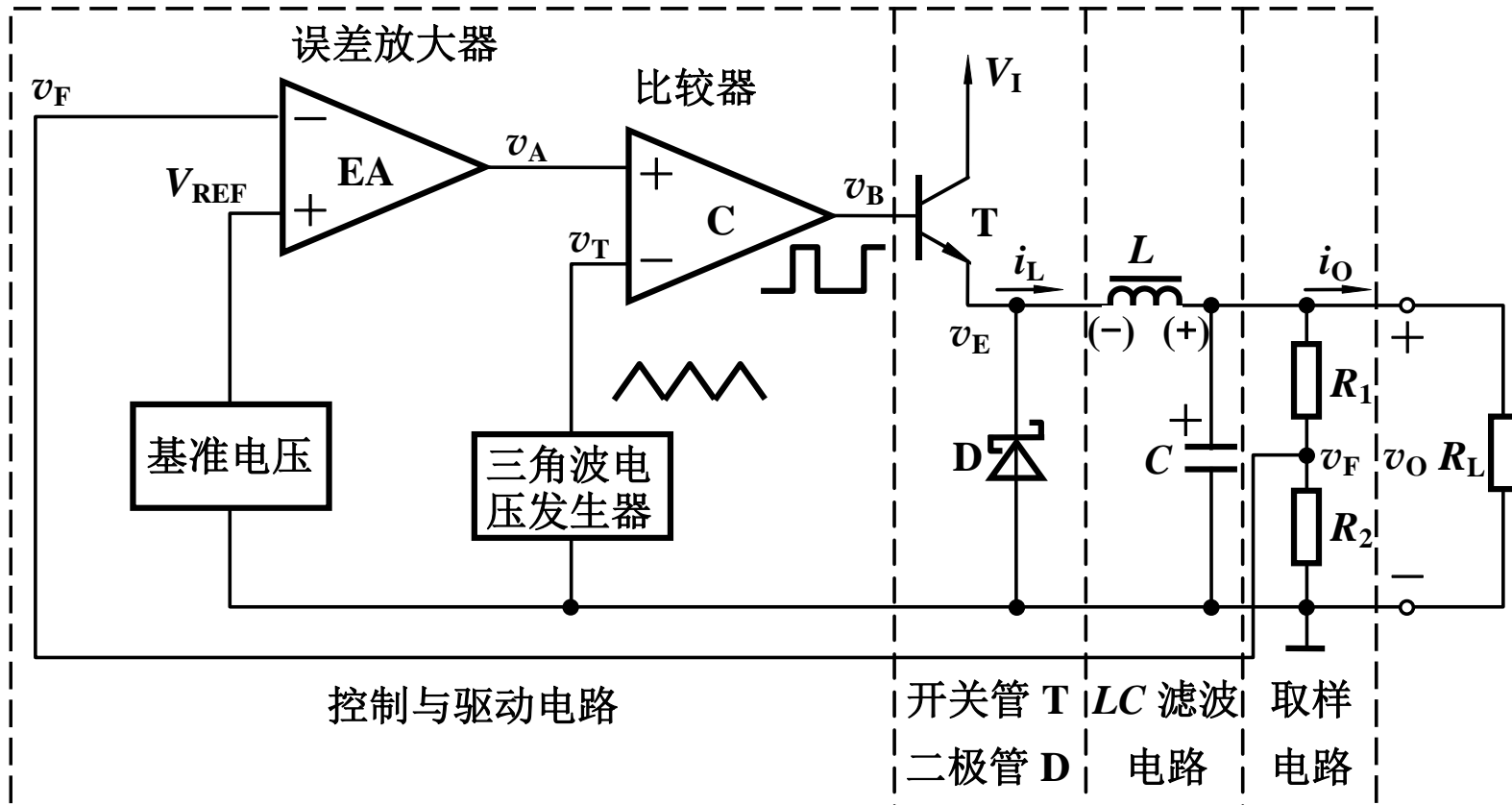
# 有趣的电路1: 功率/电力电子电路

- 通过开关变换器可以高效实现能量转换，并通过控制信号的占空比来实现输入输出电压的变换。
- 开关变换器还有很多种，是当前高效电能变换最总要的技术之一（电力电子/功率电子学）。广泛应用于：
  - 大功率的：列车电力变换、电动汽车驱动、航空器电力驱动等；
  - 小功率的：计算机电源、通信电源、主板电源等；
  - 微电子主要参与设计相应的驱动控制芯片和半导体功率开关器件，是目前非常大的一个工业就业领域。

# 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

## 1. 串联（降压）型开关稳压电路（Buck）

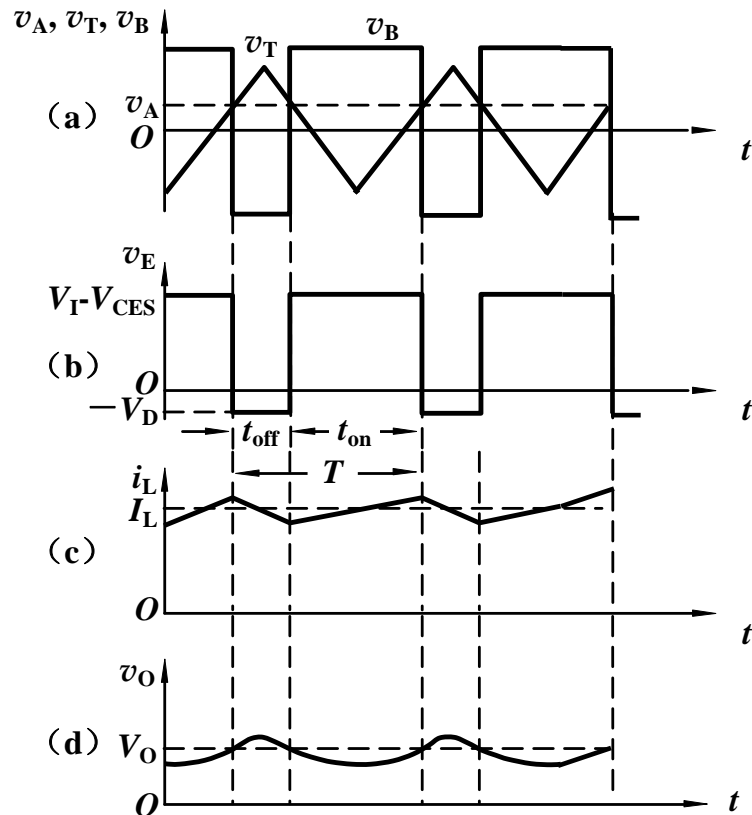
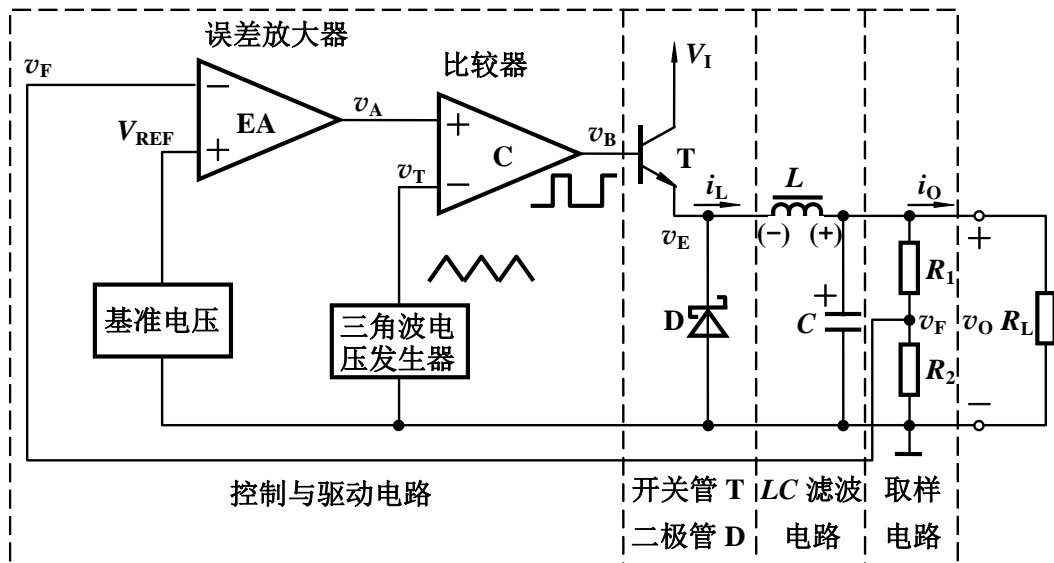
电路组成      开关管T与负载 $R_L$ 串联



# 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

## 1. 串联（降压）型开关稳压电路（Buck）

### 工作原理



### 输出电压的平均值

$$V_O = \frac{t_{on}}{T} (V_I - V_{CES}) + \frac{t_{off}}{T} (-V_D) \approx \frac{t_{on}}{T} \cdot V_I = q V_I$$

式中  $q = t_{on}/T$  称为脉冲波形的占空比

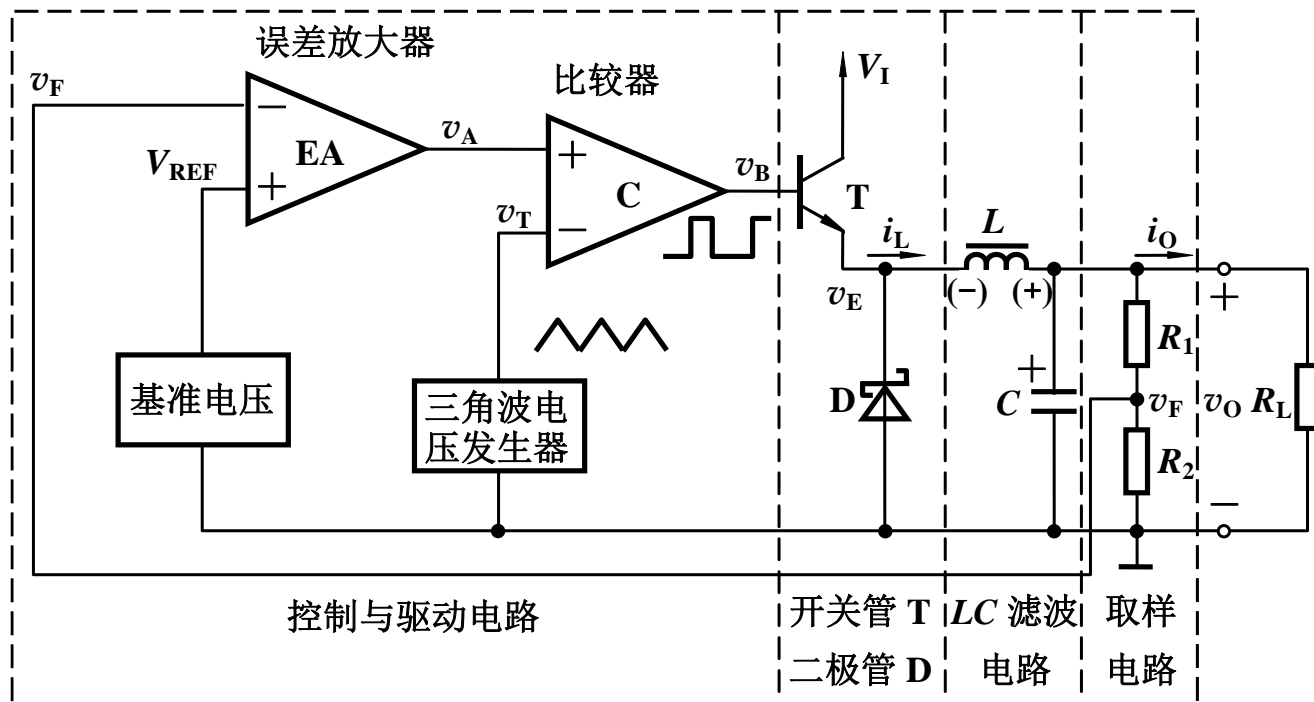
脉宽调制 (PWM) 式  
降压型开关稳压电源

# 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

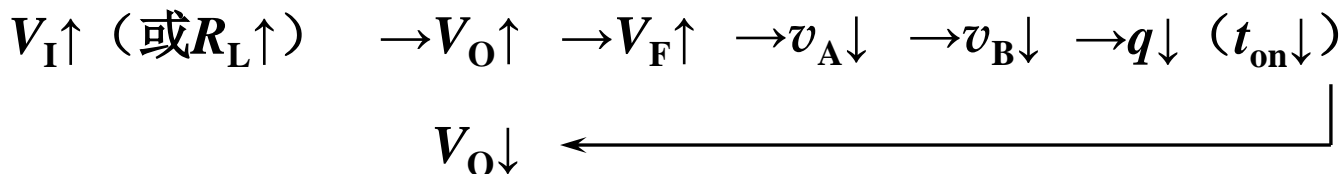
## 1. 串联（降压）型开关稳压电路（Buck）

工作原理

$$V_O = \frac{t_{\text{on}}}{T} \cdot V_I = q V_I$$



稳压原理



## 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

### 1. 串联（降压）型开关稳压电路（Buck）

工作原理

$$V_O = \frac{t_{\text{on}}}{T} \cdot V_I = q V_I$$

当 $t_{\text{on}}$ 不变，改变 $T$ （或 $f_k$ ）同样能调节 $V_O$ 的大小，称为脉冲频率调制PFM控制方式。



# 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

## 2. 并联（升压）型开关稳压电路（Boost）

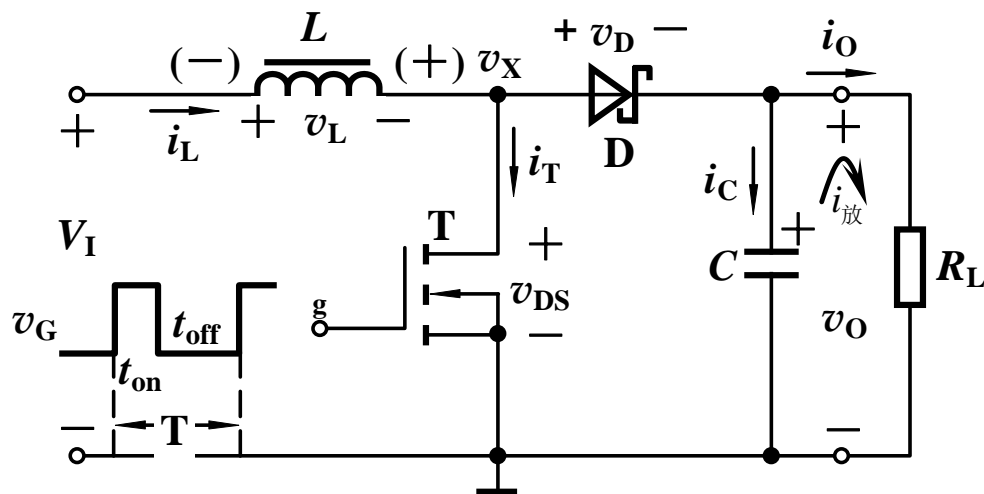
主回路

开关管T与负载 $R_L$ 并联

工作原理

当控制电压 $v_G$ 为高电平（ $t_{on}$ 期间）时，T饱和导通，输入电压 $V_I$ 直接加到 $L$ 两端，电感储存能量。

二极管D截止，电容 $C$ 向负载提供电流 $i_{放}$



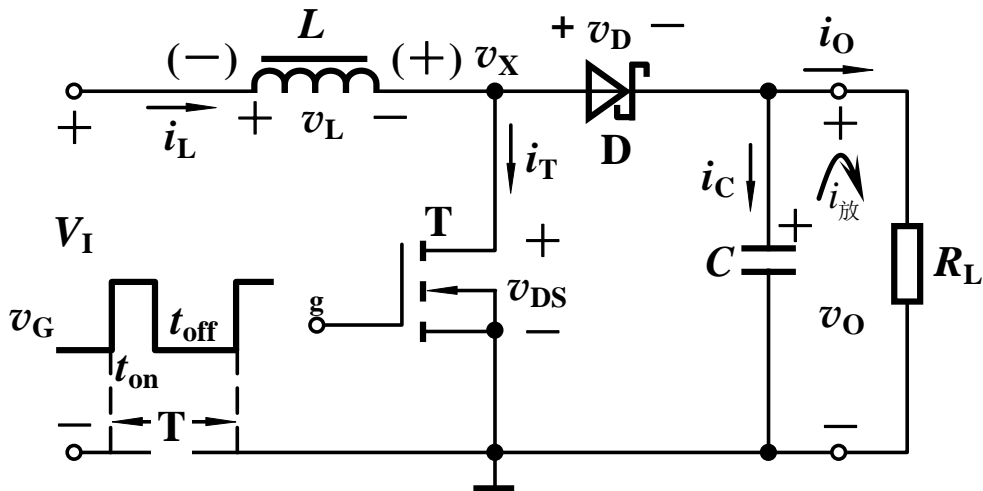
当 $v_G$ 为低电平（ $t_{off}$ 期间）时，T截止， $i_L$ 不能突变。 $L$ 产生反电势 $v_L$ 为左负（-）右正（+）

若 $V_I + v_L > V_O$ ，则D导通， $V_I + v_L$ 给负载提供电流 $i_O$ 。显然 $V_O > V_I$ ，所以电路称为升压型开关稳压电路

# 11.3.1 开关式稳压电路的工作原理

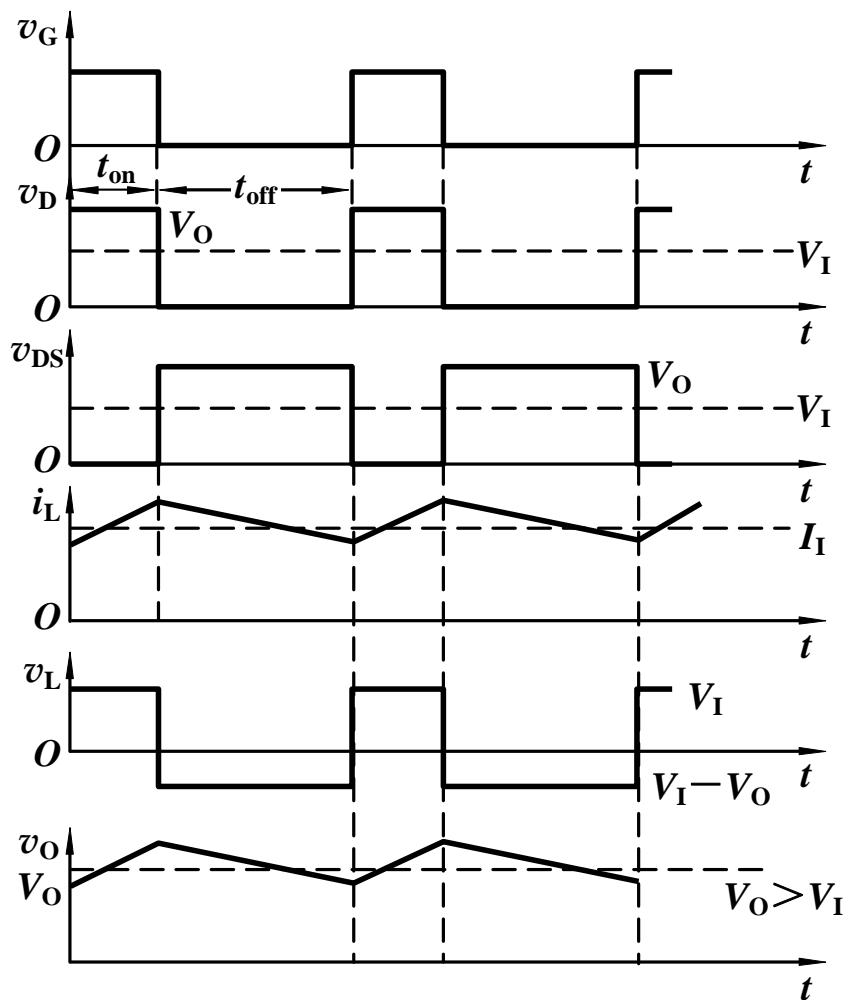
## 2. 并联（升压）型开关稳压电路（Boost）

工作波形



控制与驱动电路可以采用电压-脉冲宽度调制器（PWM）集成电路来实现

也有包括所有单元电路在内的单片集成开关稳压电源共选用

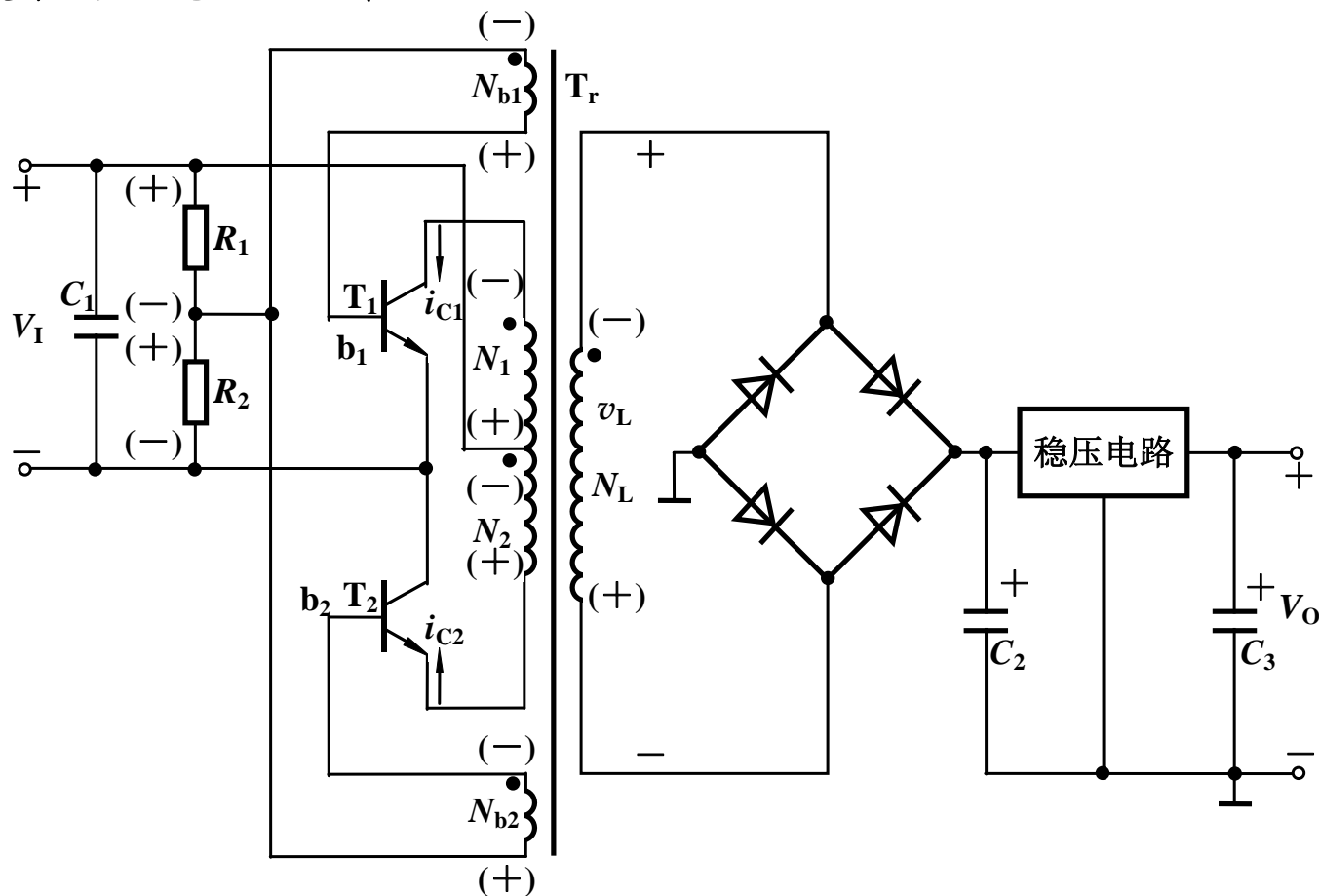


## \*11.3.2 带隔离变压器的直流变换型电源

### 推挽式自激变换型稳压电路

$T_1$ 、 $T_2$ 和 $T_r$

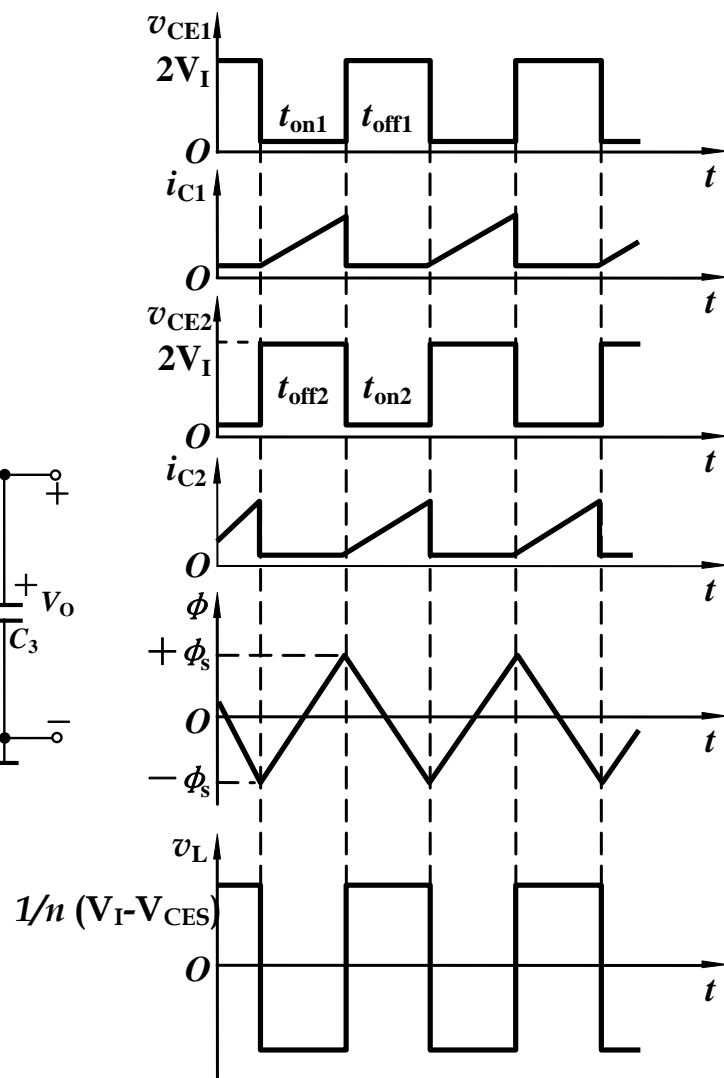
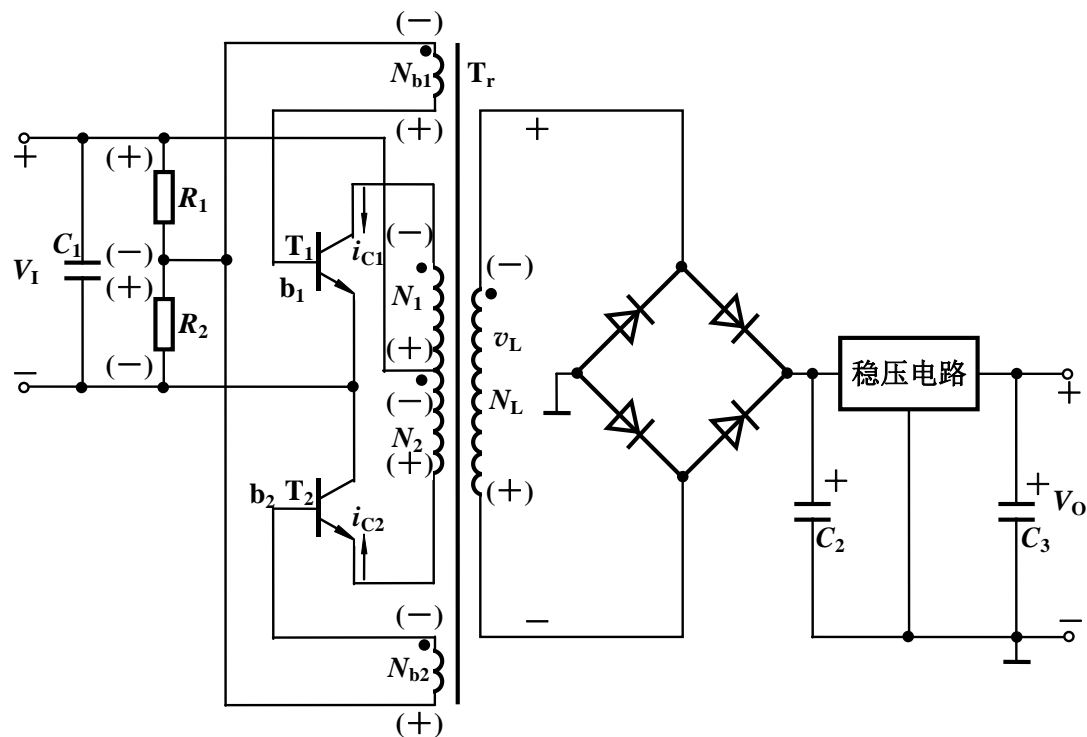
左侧线圈等构成振荡电路，产生上千赫兹的振荡波形，通过变压器耦合到副边，再整流滤波稳压实现DC/DC变换。



在变压器副边增加几组类似的电路，便可获得多个要求不同的直流电压

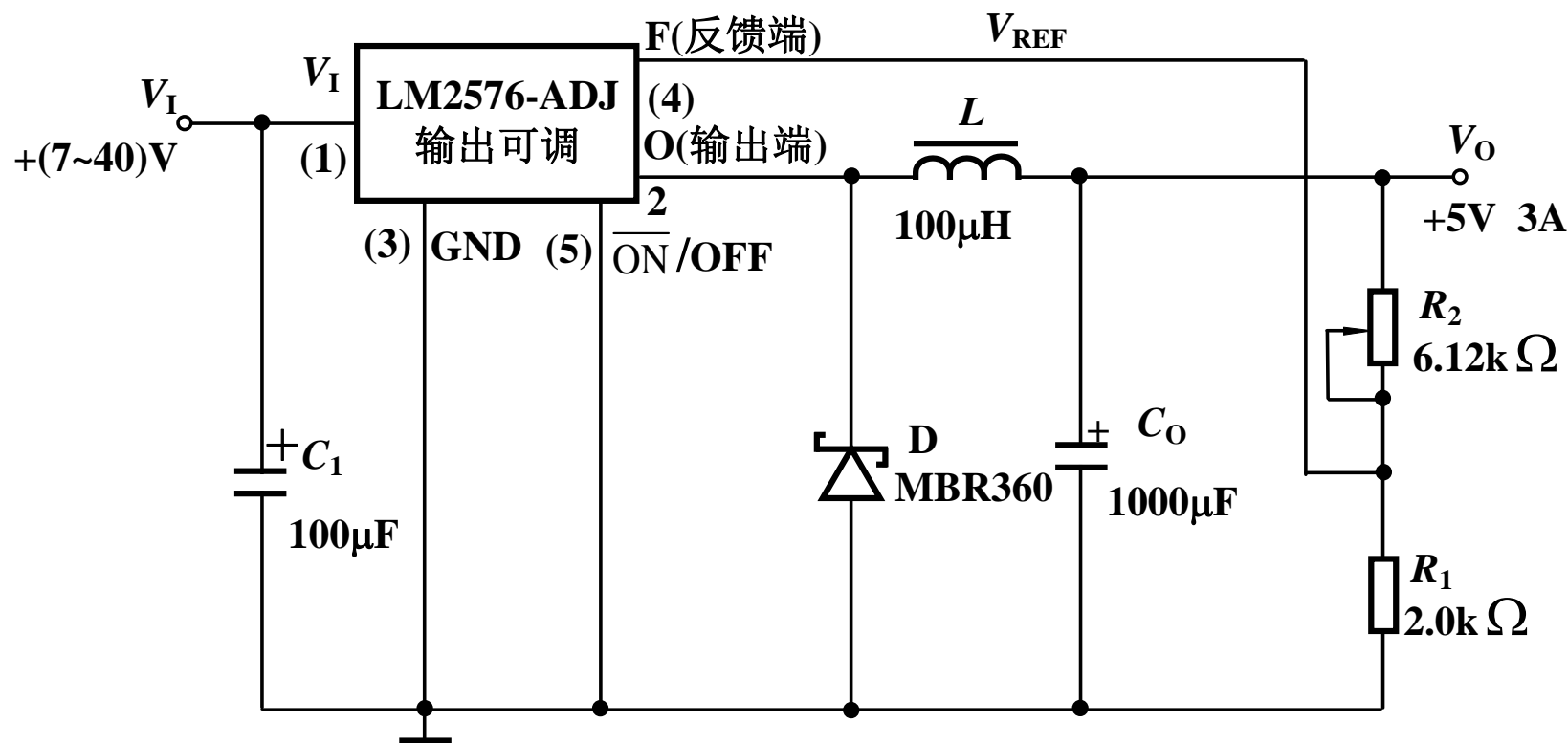
# \*11.3.2 带隔离变压器的直流变换型电源

## 工作波形



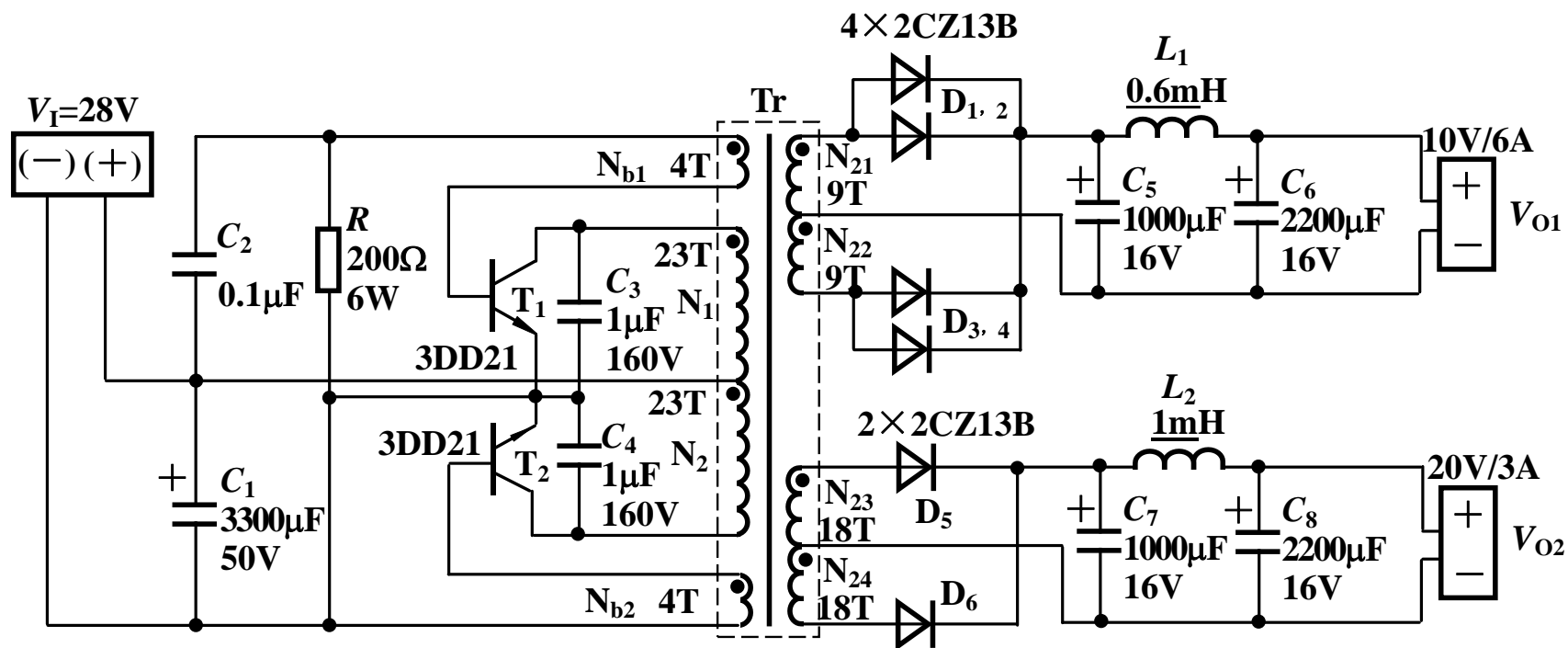
## 11.3.3 开关稳压电源的应用举例

### 1. LM2576系列降压式DC/DC电源变换器的应用



## 11.3.3 开关稳压电源的应用举例

### 2. 自激型推挽式开关稳压电源应用



# 小结

(1) 通过对共源和共射放大电路低频响应的分析看到，影响低频响应的主要因素是旁路电容和耦合电容。若想尽可能降低放大电路的下限截止频率，则尽量选用容量较大的旁路电容和耦合电容，其它组态的放大电路有类似的结论。

(2) 以上分析过程均假设电路满足一定条件，进行了简化处理，实际上通过SPICE仿真可以得到更精确的分析结果。

(3) 通过选用大容量电容降低下限截止频率的效果通常是有限的，因此在信号频率很低の場合，可考虑采用直接耦合的放大电路。