

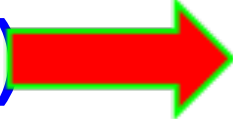
# 第5章 直流直流变流电路

# 5 直流直流变流电路 -引言

---

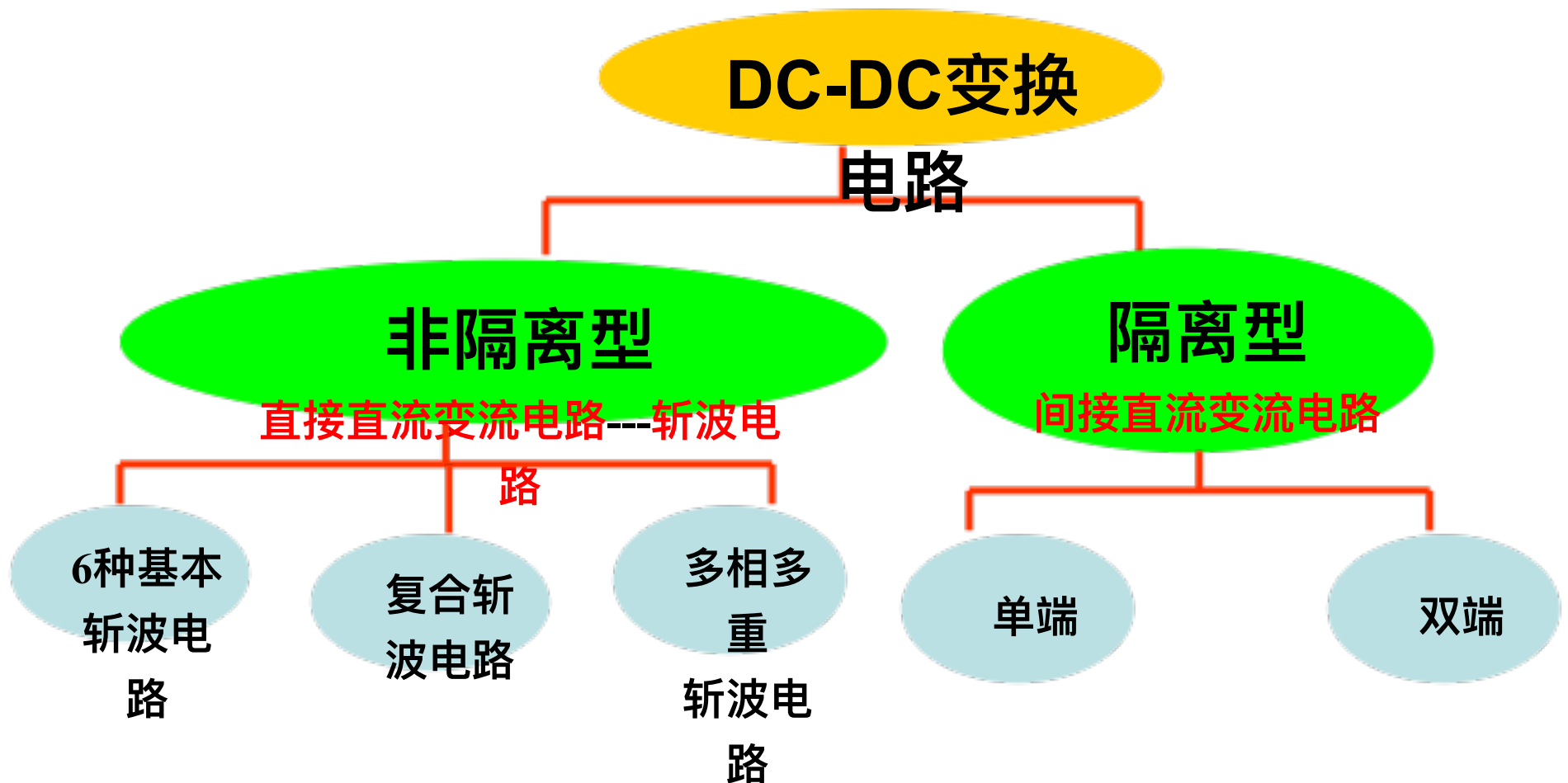
- 本章内容
- 5.1 基本斩波电路
- 5.2 复合和多相多重斩波电路
- 
- 本章小结

# 5 直流直流变流电路 -引言

- **直流-直流变流电路 (DC/DC Converter)**   
功能是将电压恒定的直流电变为另一固定电压或可调电压的直流电。包括:
- **直接直流变流电路---斩波电路 (DC Chopper)**
  - ◆ 输入与输出之间**不隔离**。*将直流电变为另一直流电*
- **间接直流变流电路**
  - ◆ 在交流环节中通常采用变压器实现输入输出间的**隔离**，因此也称为直—交—直电路。

# 5 直流直流变流电路 -引言

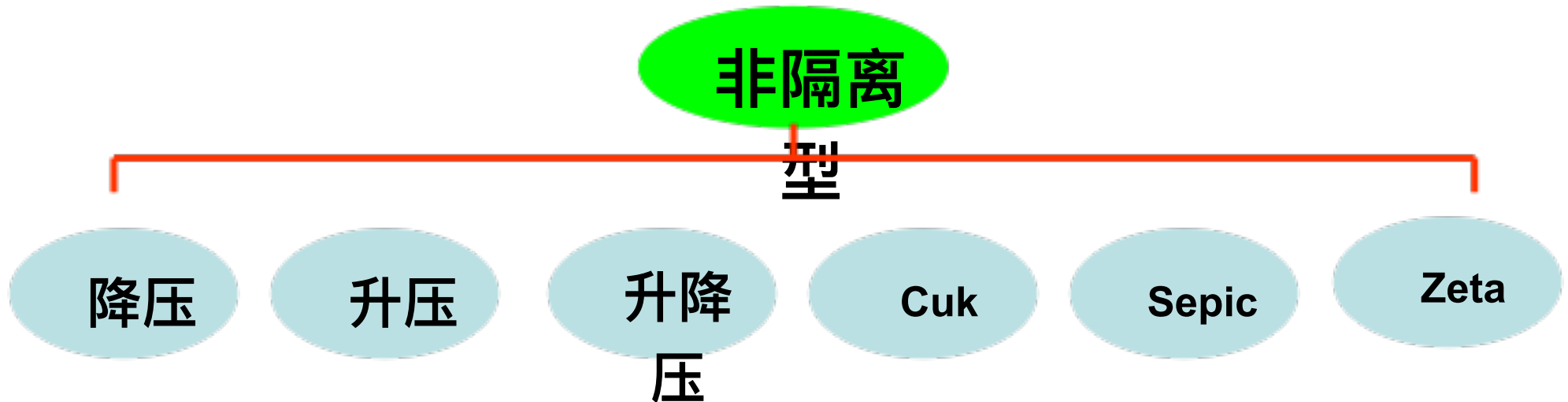
## ● 直流-直流变流电路 DC-DC Converter



# 5 直流直流变流电路 -引言

- 非隔离型DC-DC变换电路

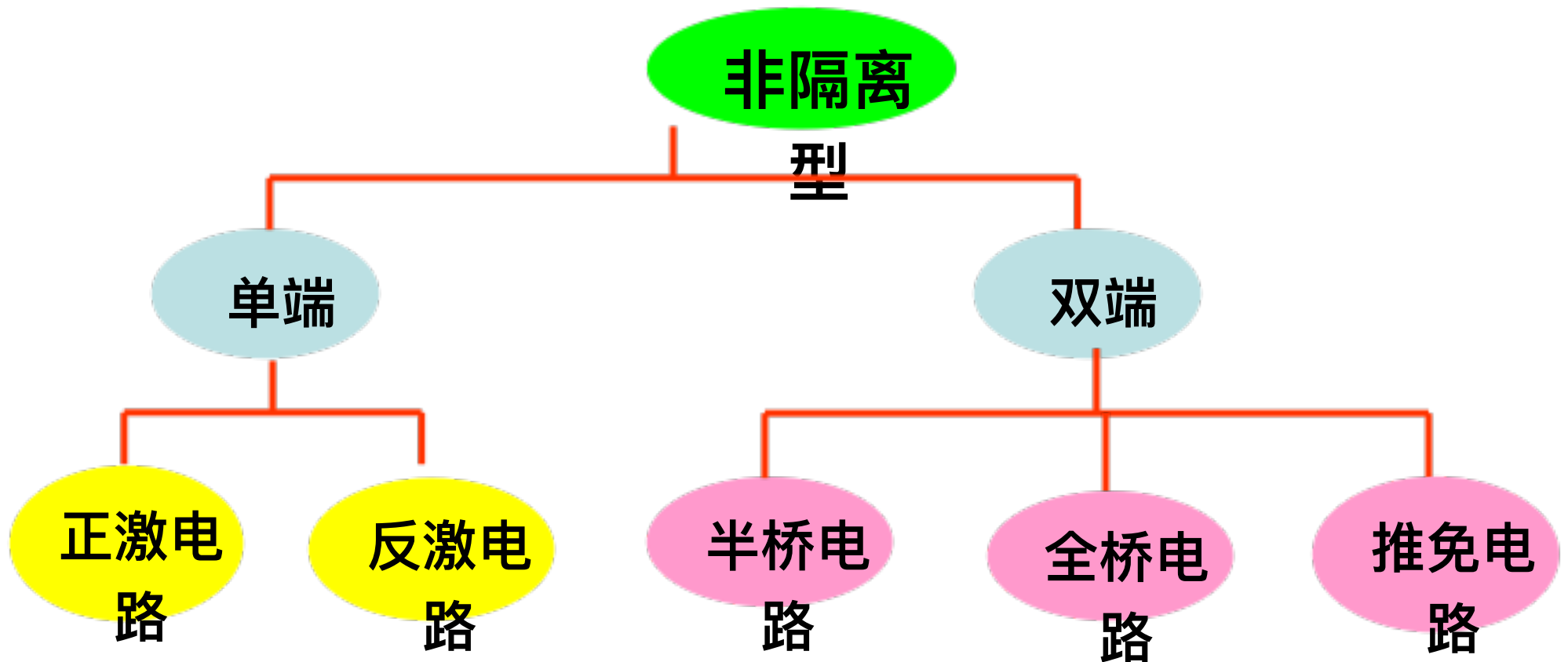
## 六种基本斩波电路



# 5 直流直流变流电路 -引言

## ● 隔离型DC-DC变换电路

### 两类基本电路



# 5.1 基本斩波电路

---

5.1.1 降压斩波电路

5.1.2 升压斩波电路

5.1.3 升降压斩波电路和Cuk斩波电路

5.1.4 Sepic斩波电路和Zeta斩波电路

# 5.1.1 降压斩波电路

---

## 假定

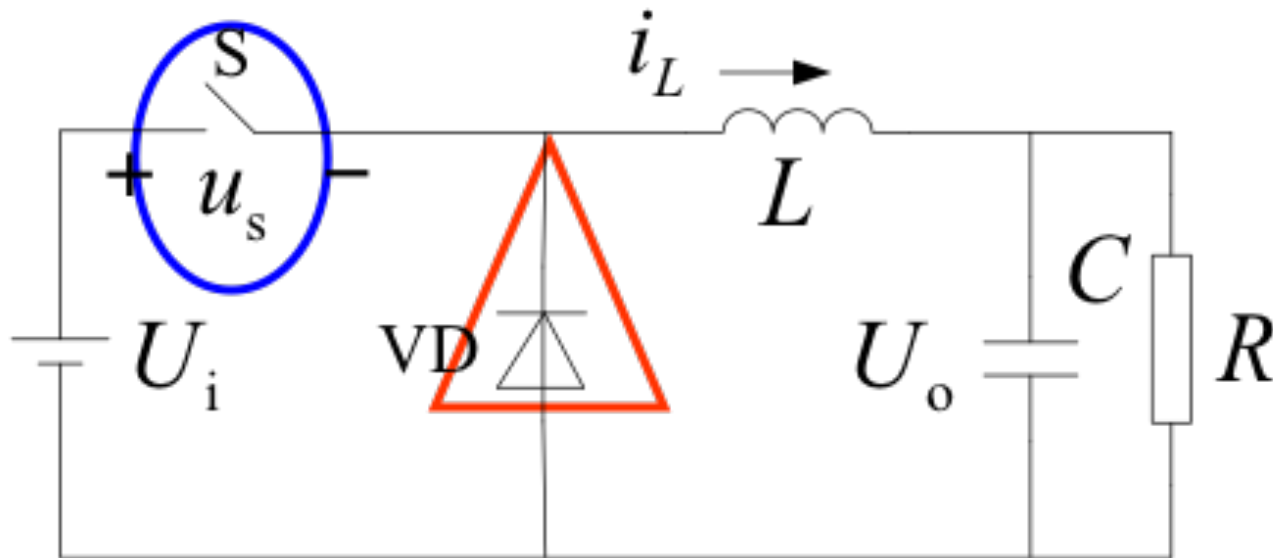
- DC-DC变换电路由理想元件构成
- 输入电源内阻为零
- 输出端接有足够大的滤波电容：当负载或输入电压波动时，使平均输出电压控制在一定偏差范围内
- 稳态条件下电感两端电压在一个开关周期内的平均值为零。
- 电路中的电压、电流等变量都是按开关周期严格重复的，每一开关周期开始时的电感电流值都相等
- 电感电流不会突变，开关周期开始时电感电流值



## 5.1.1 降压斩波电路

### 1. 电路结构

- **降压斩波电路**：平均直流输出电压低于直流输入电压的变换电路。
- **电路组成**：实际应用的降压斩波器由**全控型器件**（如 IGBT）、**二极管**和**LC低通滤波器**构成。
- **电感电流连续和电感电流断续**两种工作模式。



# 5.1.1 降压斩波电路

## 1. 电路结构

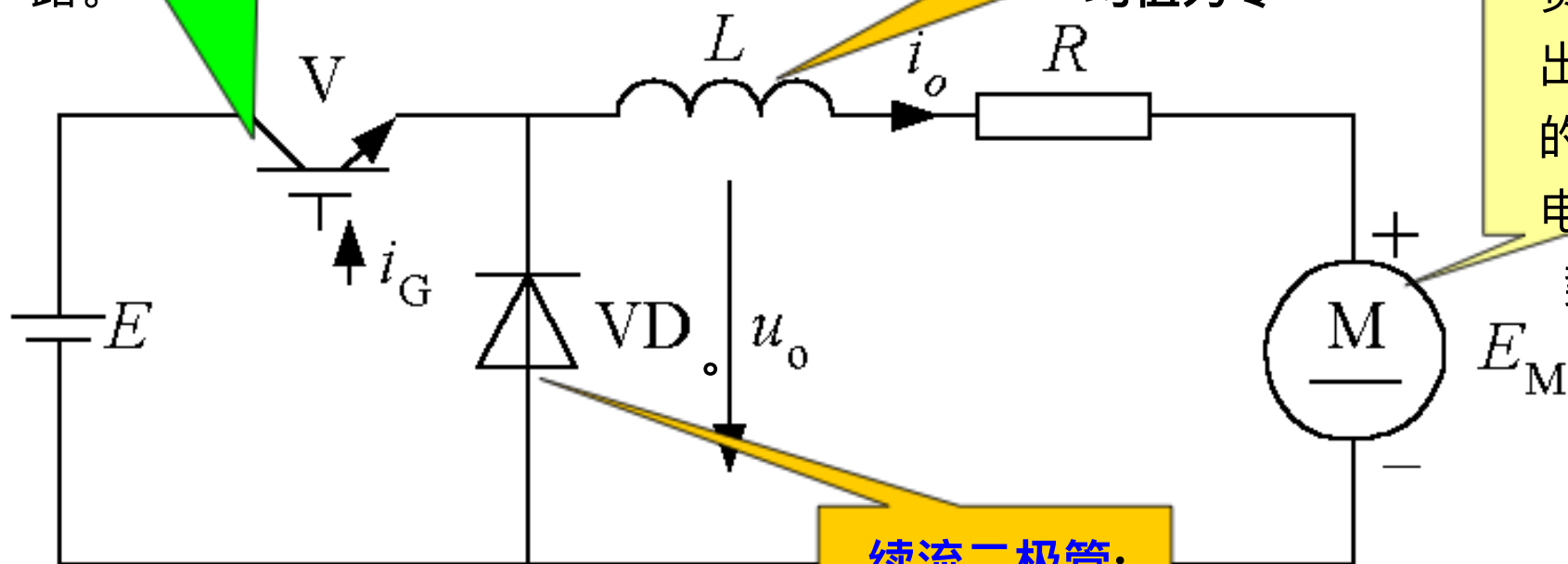
- 典型用途之一是拖动直流电动机，也可带蓄电池负载。

全控型器件V  
若为晶闸管，须  
有辅助关断电

路。

稳态条件下电感  
两端电压在一个  
开关周期内的平  
均值为零

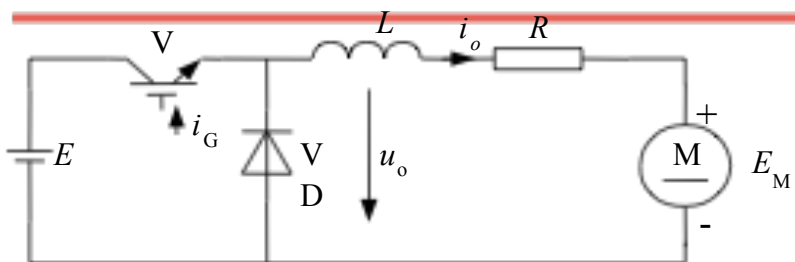
负载  
出现的反电动  
势



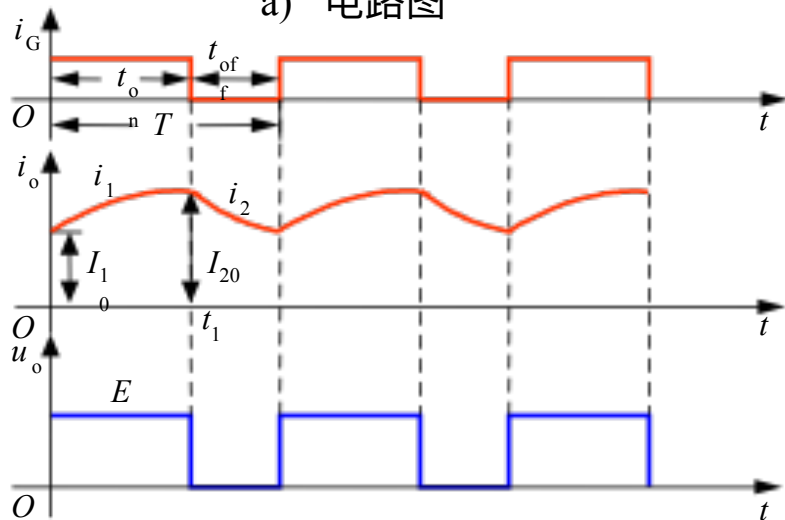
续流二极管：  
在V关断时给  
负载中电感电

## 2.工作原理

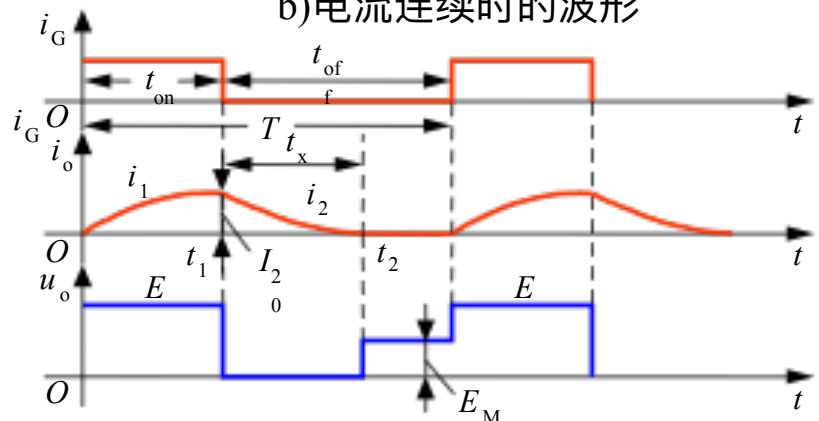
### 5.1.1 降压斩波电路



a) 电路图



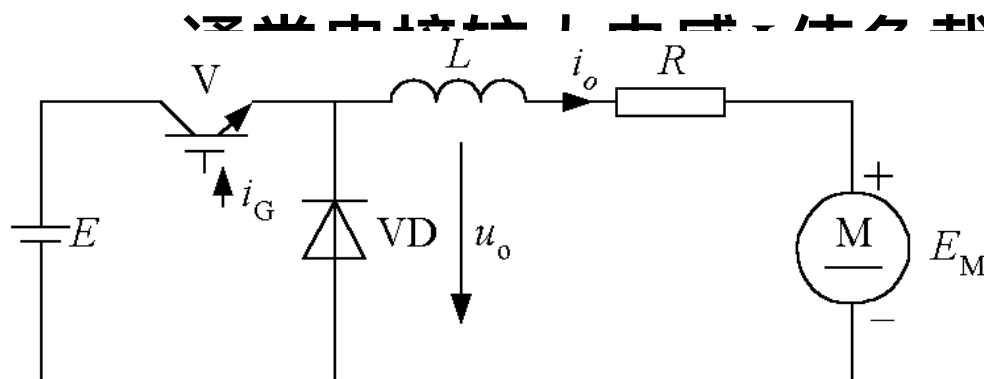
b) 电流连续时的波形



c) 电流断续时的波形

👉  $t=0$ 时刻驱动**V**导通，电源**E**向负载供电，负载电压 **$u_o=E$** ，负载电流 **$i_o$** 按指数曲线上升。

👉  $t=t_1$ 时控制**V**关断，电感反电势（左负右正）使二极管**VD**正偏导通，二极管**VD**续流，负载电压 **$u_o$ 近似为0**，负载电流呈指数曲线下降。



### 3.基本数量关系

## 5.1.1 降压斩波电路

👉 电流连续时

✓ 负载电压的平均值为

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{on} + t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T} E = \alpha E \quad (5-1)$$

●  $t_{on}$  - V通态时间,  $t_{off}$  - V断态时间,  $T$  - 开关周期,  $\alpha$  - 导通占空比。

● 输出到负载的电压平均值  $U_o$  最大为  $E$ , 若减小占空比  $\alpha$ , 则  $U_o$  随之减小。与输入电压极性相同。

● 电流断续时, 负载电压  $u_o$  平均值会被抬高, 不希望出现电流断续

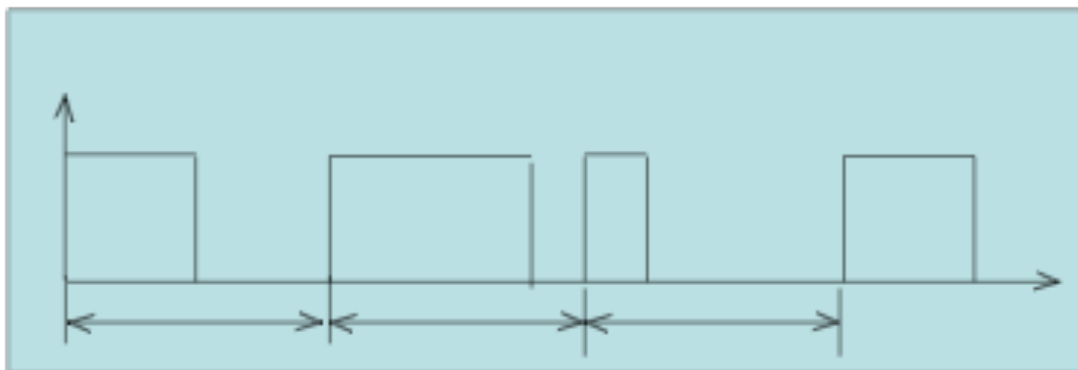
✓ 负载电流平均值为

$$I_o = \frac{U_o - E_m}{R} \quad (5-2)$$

## 4.控制方式改变<sup>uo</sup> 5.1.1 降压斩波电路

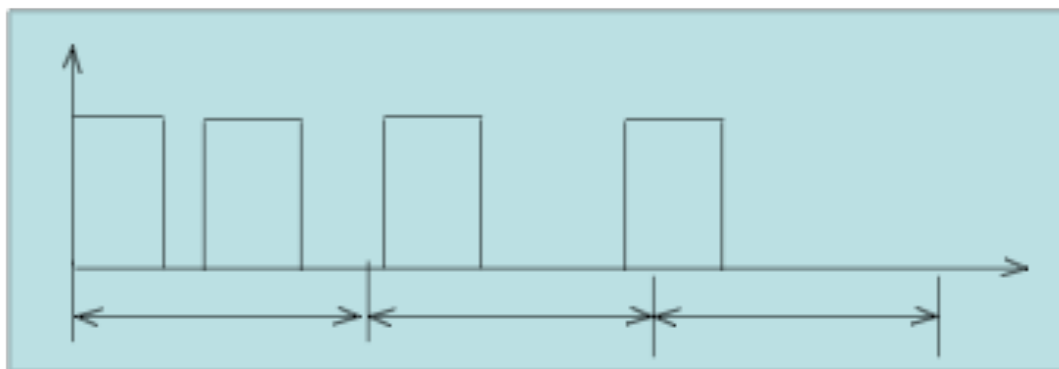
**定频调宽即脉宽调制型（PWM型）：**  $T$ 不变，改变 $t_{on}$

频率不变，即 $T=t_{on}+t_{off}$ 恒  
来改变占空比 $D$ ，从而改



**定宽调频即频率调制型（PFM）：**  $t_{on}$ 不变，改变 $T$ 。

**定宽**指保持开关导通时间 $t_{on}$ 不变，**调频**指调节开关工作周  
出直流电压平均值。



调，改变占空比。是前两种  
开关工作频率 $f$ 均可变，控  
制比较复杂。通常用于需大幅度改变输出电压数值的场合。

# 5.1.1 降压斩波电路

## 5.断续和连续

◆基于分时段线性电路这一思想，对降压斩波电路进行解析，按V处于通态和处于断态两个过程来分析，初始条件分电流连续和断续。

◆电流连续时得出

$$I_{10} = \left( \frac{e^{t_1/\tau} - 1}{e^{T/\tau} - 1} \right) \frac{E}{R} - \frac{E_m}{R} = \left( \frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} - m \right) \frac{E}{R} \quad (5-9)$$

$$I_{20} = \left( \frac{1 - e^{-t_1/\tau}}{1 - e^{-T/\tau}} \right) \frac{E}{R} - \frac{E_m}{R} = \left( \frac{1 - e^{-\alpha\rho}}{1 - e^{-\rho}} - m \right) \frac{E}{R} \quad (5-10)$$

式中,  $\tau = L/R$ ,  $\rho = T/\tau$ ,  $m = E_m/E$ ,  $t_1/\tau = \left(\frac{t_1}{T}\right) \cdot \left(\frac{T}{\tau}\right) = \alpha\rho$ ,  $I_{10}$ 和 $I_{20}$ 分别是负载电流瞬时值的最小值和最大值。

把式 (5-9) 和式 (5-10) 用泰勒级数近似, 可得

$$I_{10} \approx I_{20} \approx \frac{(\alpha - m)E}{R} = I_o \quad (5-11)$$

平波电抗器L为无穷大, 此时负载电流最大值、最小值均等于平均值。

# 5.1.1 降压斩波电路

## 5.断续和连续

◆(3-11)所示的关系还可从能量传递关系简单地推得，一个周期中，忽略电路中的损耗，则电源提供的能量与负载消耗的能量相等，即

$$EI_o t_{on} = RI_o^2 T + E_m I_o T \quad (5-12)$$

则

$$I_o = \frac{\alpha E - E_m}{R} \quad (5-13)$$

假设电源电流平均值为 $I_1$ ，则有

$$I_1 = \frac{t_{on}}{T} I_o = \alpha I_o \quad (5-14)$$

其值小于等于负载电流 $I_o$ ，由上式得

$$EI_1 = \alpha EI_o = U_o I_o \quad (5-15)$$

- 输出功率等于输入功率
- 在连续电流方式下，可把降压换流器看作一直流变压器
- 其等效变比可通过调节占空比在0到1之间连续变化。

# 5.1.1 降压斩波电路

## 5.断续和连续

◆ 电流断续时有  $i_1=0$ ，且  $t=t_{on}+t_x$  时， $i_2=0$ ，可以得出

$$t_x = \tau \ln \left[ \frac{1 - (1 - m)e^{-\alpha\rho}}{m} \right] \quad (5-16)$$

电流断续时， $t_x < t_{off}$ ，由此得出电流断续的条件为

$$m > \frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} \quad \text{或者电流连续的条件为} \quad \frac{L}{RT} \geq \frac{1 - D}{2} \quad (5-17)$$

输出电压平均值为

$$U_o = \frac{t_{on}E + (T - t_{on} - t_x)E_m}{T} = \left[ \alpha + \left( 1 - \frac{t_{on} + t_x}{T} \right) m \right] E \quad (5-18)$$

负载电流平均值为

$$I_o = \frac{1}{T} \left( \int_0^{t_{on}} i_1 dt + \int_{t_{on}}^{t_{on}+t_x} i_2 dt \right) = \left( \alpha - \frac{t_{on} + t_x}{T} m \right) \frac{E}{R} = \frac{U_o - E_m}{R} \quad (5-19)$$



## 6.例题

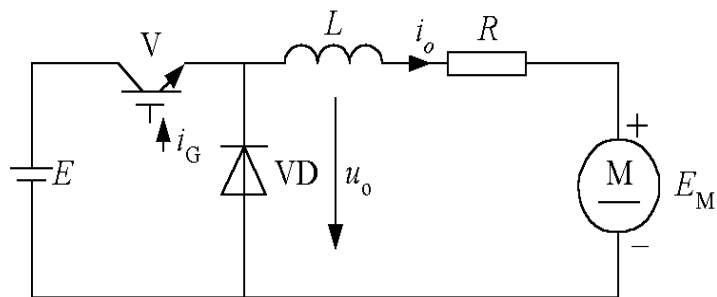
### 5.1.1 降压斩波电路

- 例5-1 在图5-1a所示的降压斩波电路中，已知 $E=200V$ ， $R=10\Omega$ ， $L$ 值极大， $E_m=30V$ ， $T=50\mu s$ ， $t_{on}=20\mu s$ ，计算输出电压平均值 $U_o$ ，输出电流平均值 $I_o$ 。

解：由于 $L$ 值极大，故负载电流连续，于是输出电压平均值为

$$U_o = \frac{t_{on}}{T} E = \frac{20 \times 200}{50} = 80(V)$$

输出电流平均值为 
$$I_o = \frac{U_o - E_m}{R} = \frac{80 - 30}{10} = 5(A)$$



## 6.例题

### 5.1.1 降压斩波电路

■例5-2 在图5-1a所示的降压斩波电路中,  $E=100V$ ,  $L=1mH$ ,  $R=0.5\Omega$ ,  $E_m=10V$ , 采用脉宽调制控制方式,  $T=20\mu s$ , 当 $t_{on}=5\mu s$ 时, 计算输出电压平均值 $U_o$ , 输出电流平均值 $I_o$ , 计算输出电流的最大和最小值瞬时值并判断负载电流是否连续。

解: 由题目已知条件可得:

$$m = \frac{E_M}{E} = \frac{10}{100} = 0.1$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.001}{0.5} = 0.002$$

当 $t_{on}=5\mu s$ 时, 有

$$\rho = \frac{T}{\tau} = 0.01$$
$$\alpha\rho = 0.0025$$

由于

$$\frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} = \frac{e^{0.0025} - 1}{e^{0.01} - 1} = 0.249 > m$$

所以输出电流连续。

## 6.例题

### 5.1.1 降压斩波电路

此时输出平均电压为

$$U_o = \frac{t_{\text{on}}}{T} E = \frac{100 \times 5}{20} = 25(V)$$

输出平均电流为

$$I_o = \frac{U_o - E_M}{R} = \frac{25 - 10}{0.5} = 30(A)$$

输出电流的最大和最小值瞬时值分别为

$$I_{\max} = \left( \frac{1 - e^{-\alpha\rho}}{1 - e^{-\rho}} - m \right) \frac{E}{R} = \left( \frac{1 - e^{-0.0025}}{1 - e^{-0.01}} - 0.1 \right) \frac{100}{0.5} = 30.19(A)$$

$$I_{\min} = \left( \frac{e^{\alpha\rho} - 1}{e^{\rho} - 1} - m \right) \frac{E}{R} = \left( \frac{e^{0.0025} - 1}{e^{0.01} - 1} - 0.1 \right) \frac{100}{0.5} = 29.81(A)$$

## 5.1.2 升压斩波电路

---

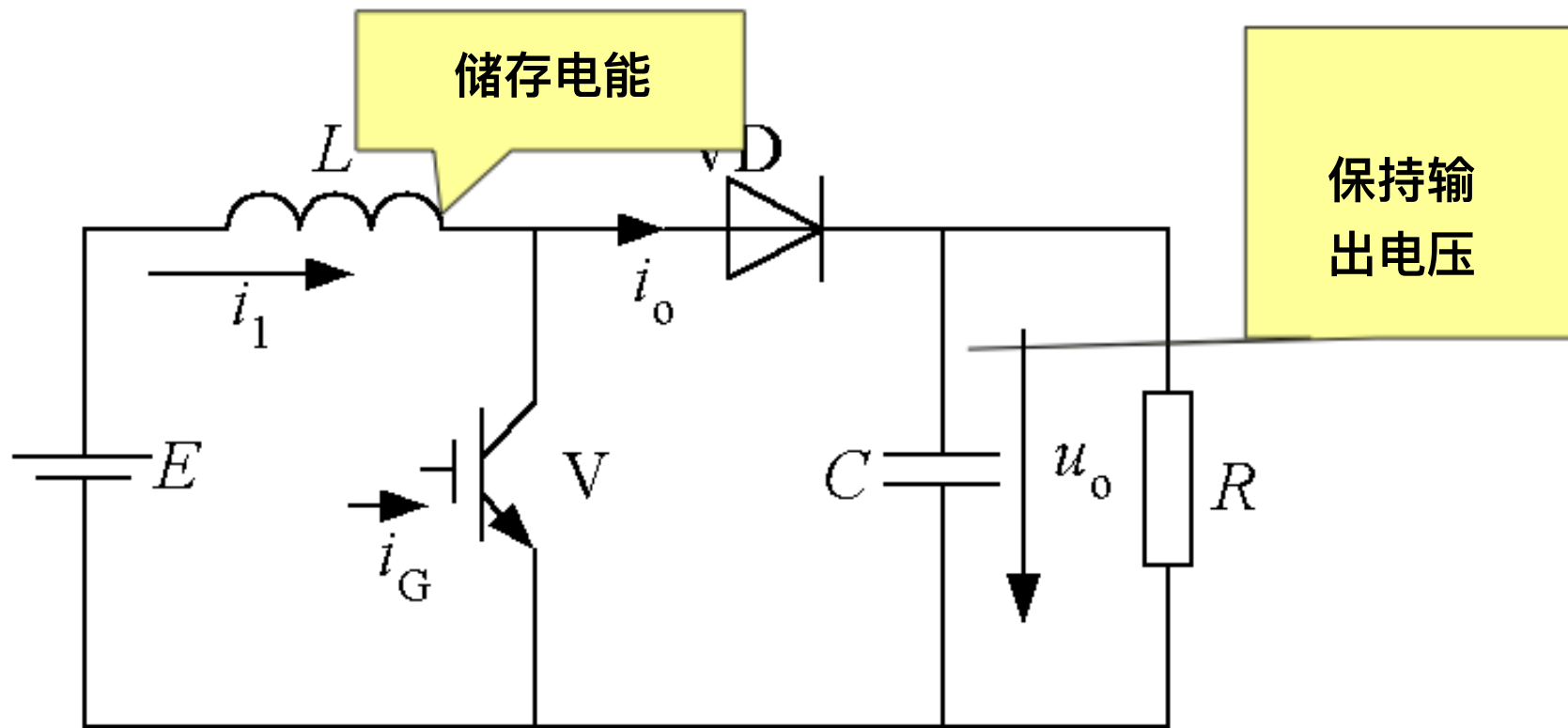
### 假定

- **DC-DC变换电路由理想元件构成**
- **输入电源内阻为零**
- **输出端接有足够大的滤波电容：**当负载或输入电压波动时，使平均输出电压控制在一定偏差范围内
- **稳态条件下电容电流在一个开关周期内的平均值为零**

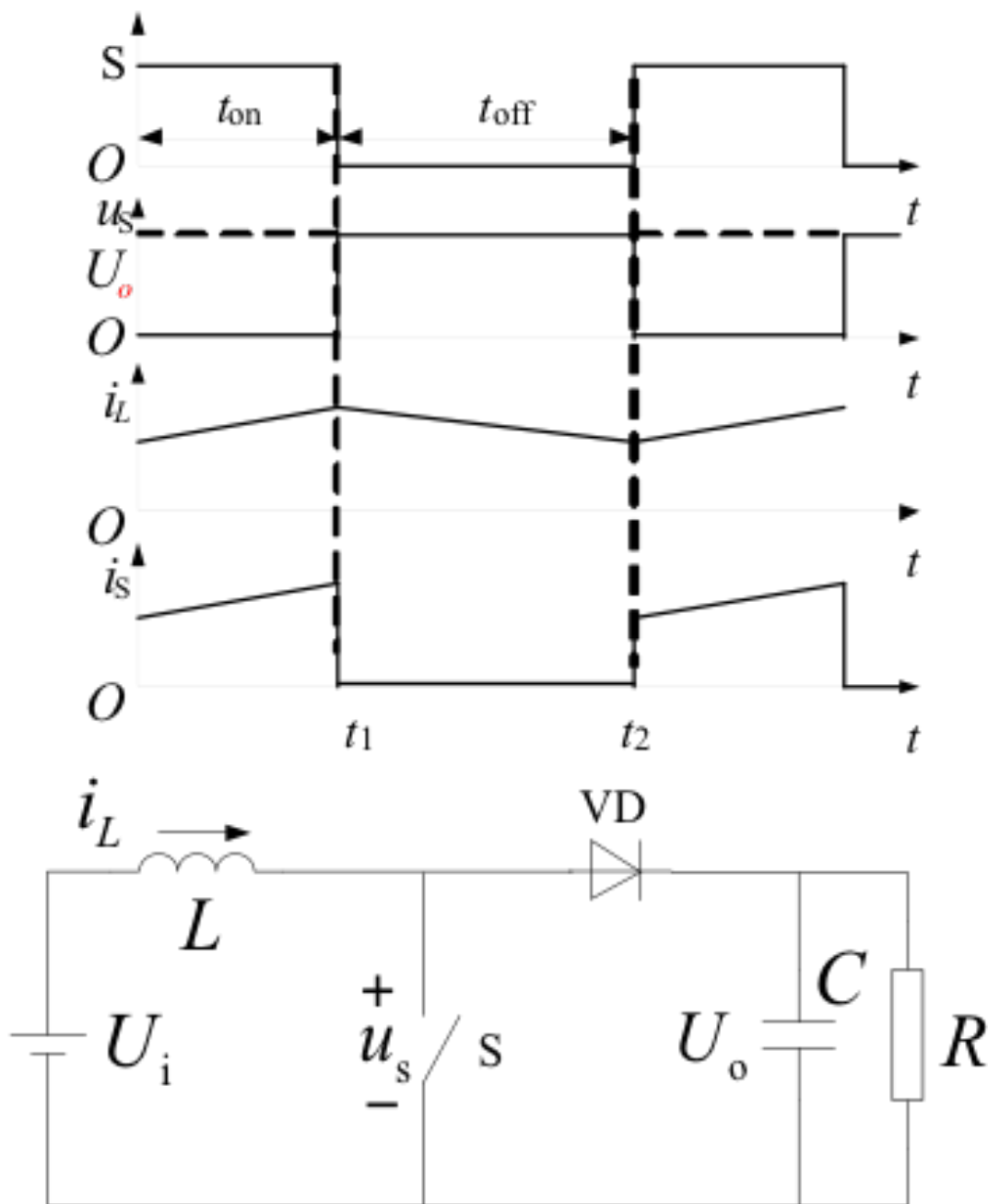
## 5.1.2 升压斩波电路

### 1. 电路结构

- 升压斩波电路 (Boost Chopper)：平均直流输出电压高于直流输入电压的变换电路。
- 电感电流连续和电感电流断续两种工作模式



## 2.工作原理 5.1.2 升压斩波电路



●  $t=0$ 时，驱动开关导通，二极管 $VD$ 反偏截止使输入输出隔离，输入的能量储存在电感中不能输出，电感电流上升。两端呈现正向电压 $U_i$ 。

●  $t=t_1$ 时，开关关断，输入的能量 $E$ 与电感储存的能量同时向电容 $C$ 充电，并向负载提供能量。电感两端电压 $U_i-U_o$ ，电感释放能量，电感电流衰

## 2.工作原理

### 5.1.2 升压斩波电路

👉 假设 $L$ 和 $C$ 值很大。

👉  $V$ 处于**通态**时，电源 $E$ 向电感 $L$ 充电，电流恒定 $I_1$ ，电容 $C$ 向负载 $R$ 供电，输出电压 $U_o$ 恒定。

👉  $V$ 处于**断态**时，电源 $E$ 和电感 $L$ 同时向电容 $C$ 充电，并向负载提供能量。

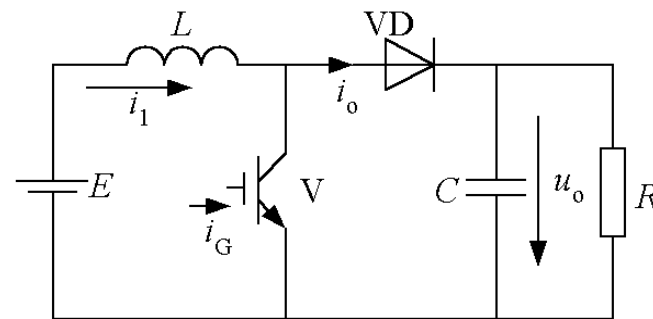
#### ◆ 基本的数量关系

👉 当电路工作于稳态时，一个周期 $T$ 中电感 $L$ 积蓄的能量与释放的能量相等，即

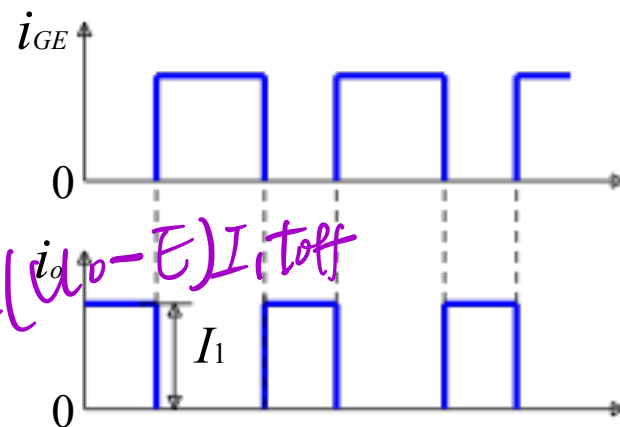
$$U_o = \frac{t_{on} + t_{off}}{t_{off}} E = \frac{T}{t_{off}} E$$

上式中的  $T / t_{off} \geq 1$ ，输出电压高于电源电压，且

与输入电压极性相同  
故为**升压斩波电路**。



a)



b)

图5-2 升压斩波电路及其工作波形

a) 电路图      b) 波形

## 3.基本数量关系

### 5.1.2 升压斩波电路

将升压比的倒数记作 $\beta$ ，即  $\beta = \frac{t_{off}}{T}$ ，则 $\alpha$ 和导通占空比 $\alpha$ 有如下关系

$$\alpha + \beta = 1$$

$$\alpha = \frac{t_{on}}{T}$$

(5-22)

式 (5-21) 可表示为

$$U_o = \frac{1}{\beta} E = \frac{1}{1-\alpha} E$$

(5-23)

输出电压高于电源电压，关键有两个原因：一是 $L$ 储能之后具有使电压泵升的作用，二是电容 $C$ 可将输出电压保持住。

如果忽略电路中的损耗，则由电源提供的能量仅由负载 $R$ 消耗，即

$$EI_1 = U_o I_o$$

(5-24)

输出电流的平均值 $I_o$ 为

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{1}{\beta} \frac{E}{R}$$

(5-25)

电源电流 $I_1$ 为

$$I_1 = \frac{U_o}{E} I_o = \frac{1}{\beta^2} \frac{E}{R}$$

$$I_1 = \frac{1}{1-\alpha} I_o$$

(5-26)



## 4.断续和连续 5.1.2 升压斩波电路

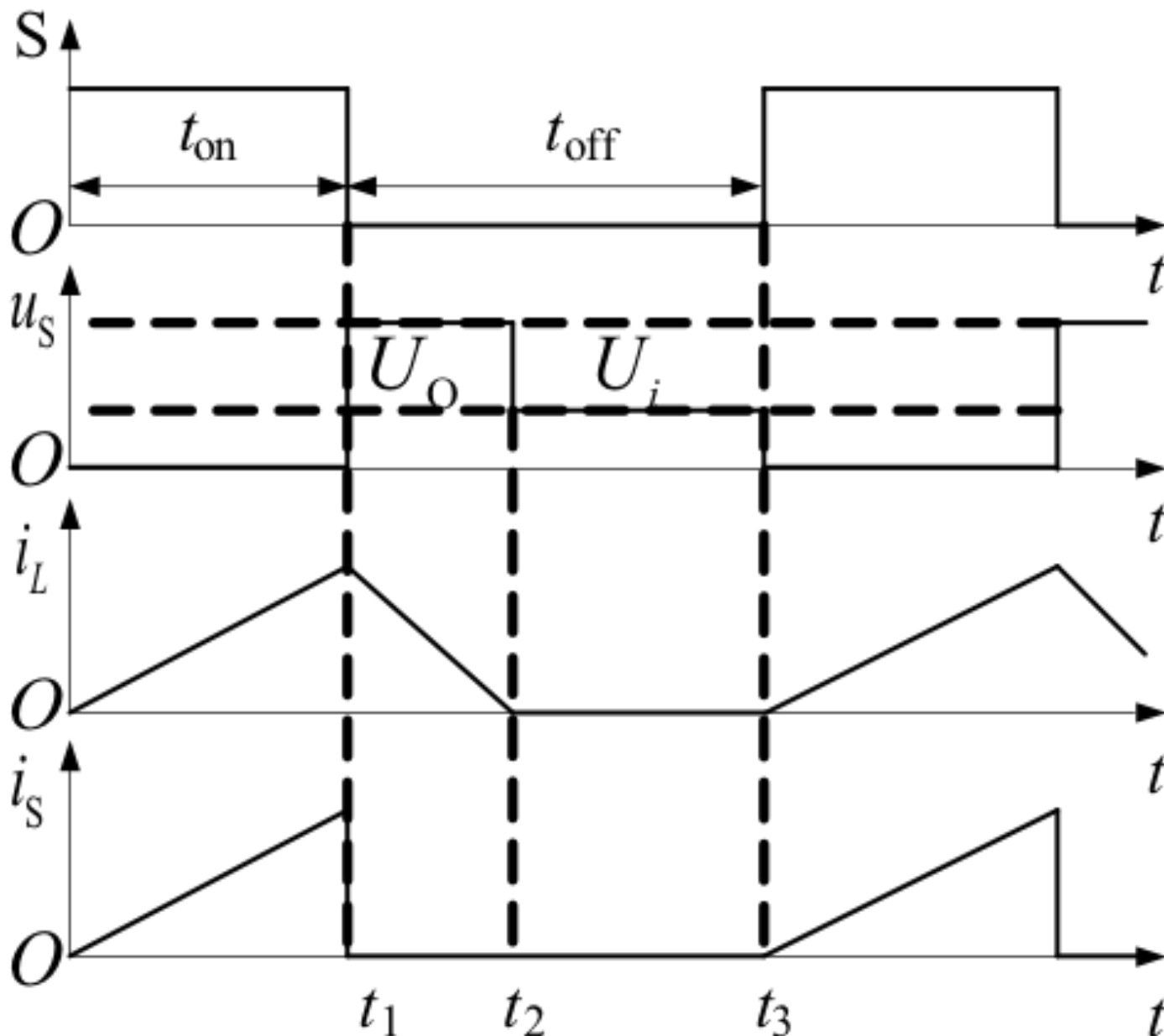
忽略损耗

$$P_i = P_o \quad U_i I_i = U_o I_o$$

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

在连续电流方式下，升压换流器也等效于直流变压器，只是等效电压比始终大于1，且可通过控制开关的占空比来连续控制。

## 4.断续和连续 5.1.2 升压斩波电路



- 负载中  $L$  值较小，则在  $S$  关断后，到了  $t_2$  时刻，负载电流已衰减为零，会出现负载电流断续。
- 一般不希望出现电流断续的情况。
- 电感电流断续，在工程实际中避免

## 4.断续和连续 5.1.2 升压斩波电路

---

- 电感电流断续时，总是有  $U_o > U_i / (1-D)$ ，且负载电流越小， $U_o$  越高。
- 输出空载时， $U_o \rightarrow \infty$ ，故升压电路不应空载，否则会产生很高的电压而造成电路中元器件的损坏。

$$\frac{L}{RT} \geq \frac{D(1-D)^2}{2}$$

## 5.例题

### 5.1.2 升压斩波电路

- 例5-3 在图5-2a所示的升压斩波电路中，已知 $E=50V$ ， $L$ 值和 $C$ 值极大， $R=20\Omega$ ，采用脉宽调制控制方式，当 $T=40\mu s$ ， $t_{on}=25\mu s$ 时，计算输出电压平均值 $U_o$ ，输出电流平均值 $I_o$ 。

解：输出电压平均值为：

$$U_o = \frac{E}{1-\alpha} \quad \alpha = \frac{t_{on}}{T}$$

$$U_o = \frac{T}{t_{off}} E = \frac{40}{40 - 25} \times 50 = 133.3(V)$$

输出电流平均值为：

$$I_o = \frac{U_o}{R} = \frac{133.3}{20} = 6.667(A)$$

# 5.典型应用

## 5.1.2 升压斩波电路

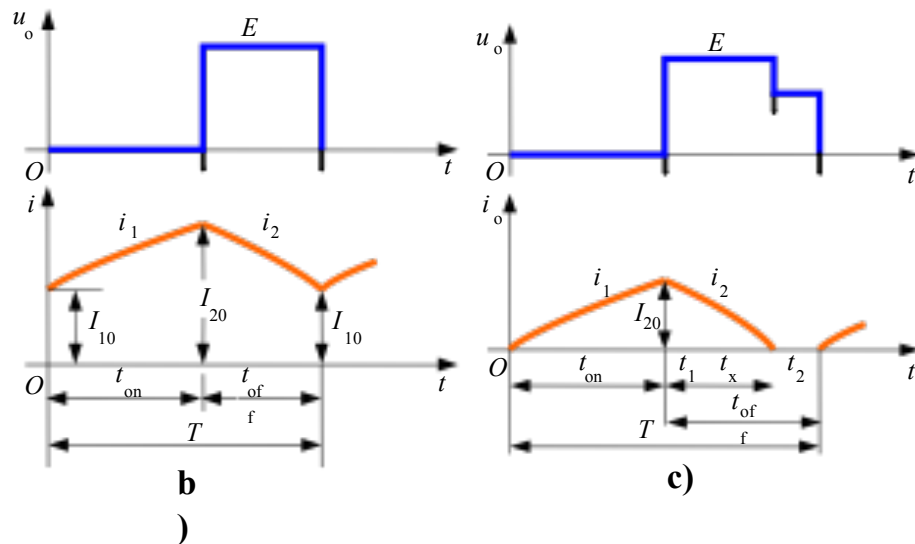
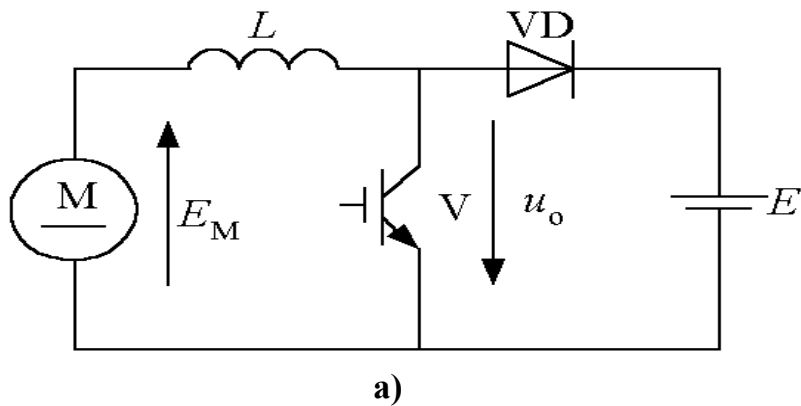


图5-3 用于直流电动机回馈能量的升压斩波电路及其波形  
a) 电路图 b) 电流连续时 c) 电流断续时

### ■典型应用

◆一是用于直流电动机传动，二是用作单相功率因数校正（Power Factor Correction—PFC）电路，三是用于其他交直流电源中。

◆以用于直流电动机传动为例

👉在直流电动机**再生制动**时把电能回馈给直流电源。

👉电动机电枢**电流连续**和**断续**两种工作状态。

👉直流电源的电压基本是恒定的，不必并联电容器。

👉基于**分段线性电路思想**，电流连续时得 
$$\bar{I} = \frac{(1-\beta)E - E_m}{R} = \frac{\beta E}{R} \quad (5.36)$$
  $L$  为无穷大时电枢电流的平均值  $I_o$  为

# 5.1.2 升压斩波电路

## 断续和连续条件

👉 当电枢电流断续时，可求得 $i_2$ 持续的时间 $t_x$ ，即

$$t_x = \tau \ln \frac{1 - me^{-\frac{t_{off}}{\tau}}}{1 - m}$$

当 $t_x < t_{off}$ 时，电路为电流断续工作状态， $t_x < t_{off}$ 是电流断续的条件，即

$$m < \frac{1 - e^{-\beta\rho}}{1 - e^{-\rho}}$$

(5-37)

(5-38)

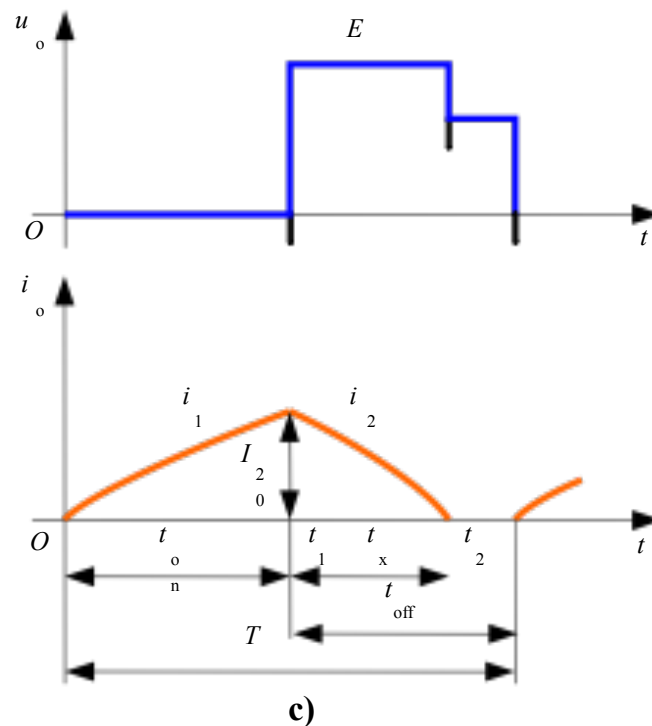
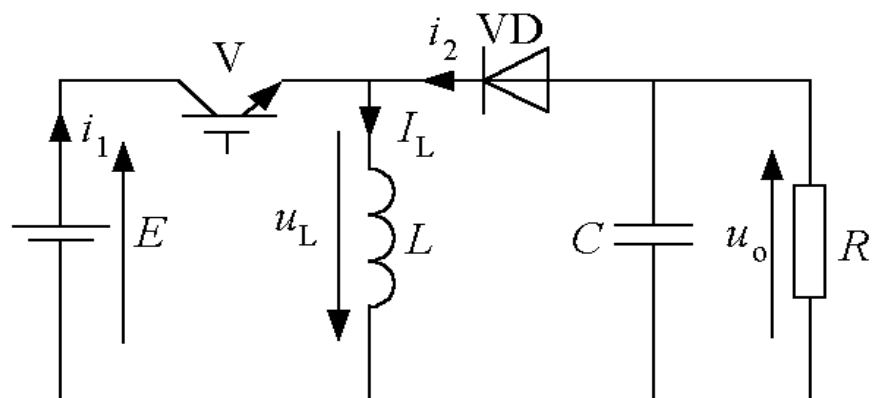


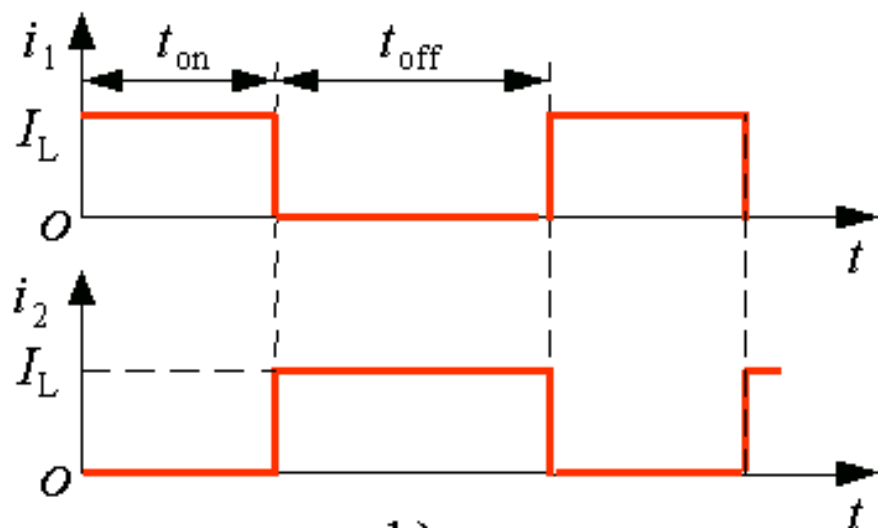
图5-3 用于直流电动机回馈能量的升压斩波电路及其波形  
c) 电流断续时

# 5.1.3 升降压斩波电路和Cuk斩波电路

## 1. 升降压斩波电路



a)



b)

图5-4 升降压斩波电路及其波形

a) 电路图

b) 波形

### ◆ 工作原理

👉 **V导通**时，电源 $E$ 经 $V$ 向 $L$ 供电使其储能，此时电流为 $i_1$ ，同时 $C$ 维持输出电压恒定并向负载 $R$ 供电。

👉 **V关断**时， $L$ 的能量向负载释放，电流为 $i_2$ ，负载电压极性为上负下正，与电源电压极性相反，该电路也称作反极性斩波电路。

### ◆ 基本的数量关系

👉 稳态时，一个周期 $T$ 内电感 $L$ 两端电压 $u_L$ 对时间的积分为零，即

$$\int_0^T u_L dt = 0 \quad (5-39)$$

当 $V$ 处于通态期间， $u_L = E$ ；而当 $V$ 处于断态期间， $u_L = -u_o$ 。于是：

$$E \cdot t_{on} = U_o \cdot t_{off} \quad (5-40)$$

# 5.1.3 升降压斩波电路和Cuk斩波电路

## 1. 升降压斩波电路

所以输出电压为：

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (5-41)$$

改变导通比 $\alpha$ ，输出电压既可以比电源电压高，也可以比电源电压低。

当 $0 < \alpha < 1/2$ 时为**降压**，当 $1/2 < \alpha < 1$ 时为**升压**，因此称作升降压斩波电路。

👉 电源电流 $i_1$ 和负载电流 $i_2$ 的平均值分别为 $I_1$ 和 $I_2$ ，当电流脉动足够小时，有

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{t_{on}}{t_{off}} \quad (5-42)$$

由上式可得

$$I_2 = \frac{t_{off}}{t_{on}} I_1 = \frac{1 - \alpha}{\alpha} I_1 \quad (5-43)$$

如果V、VD为没有损耗的理想开关时，则输出功率和输入功率相等，即

$$EI_1 = U_o I_2 \quad (5-44)$$



## 5.1.3 升降压斩波电路和Cuk斩波电路

### 2. Cuk斩波电路

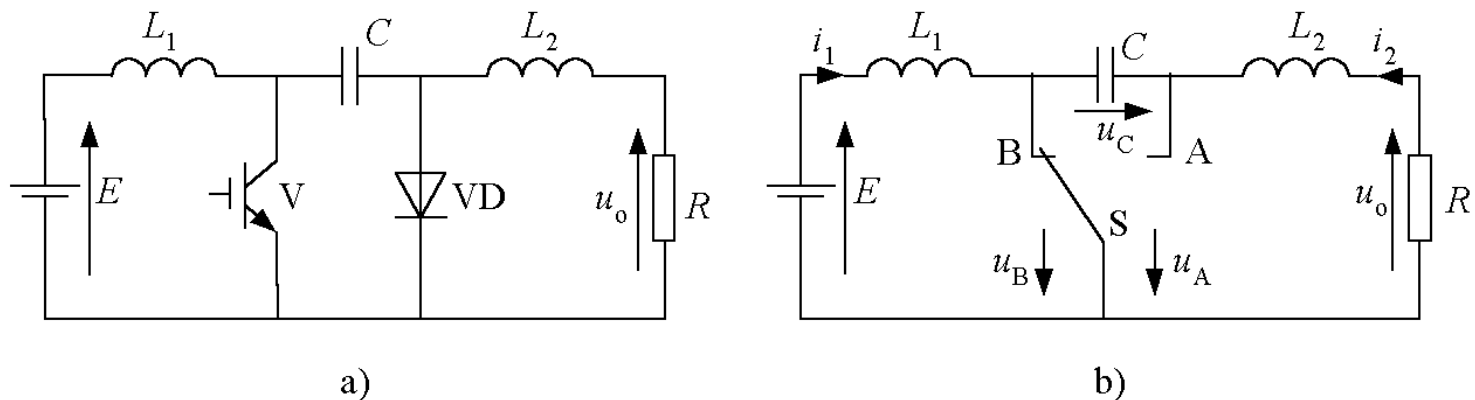


图5-5 Cuk斩波电路及其等效电路

a) 电路图      b) 等效电路

#### ◆工作原理

- 👉 **V导通**时， $E—L1—V$ 回路和 $R—L2—C—V$ 回路分别流过电流。
- 👉 **V关断**时， $E—L1—C—VD$ 回路和 $R—L2—VD$ 回路分别流过电流。
- 👉 输出电压的极性与电源电压**极性相反**。

#### ◆基本的数量关系

- 👉 **C**的电流在一周期内的平均值应为零，即

$$\int_0^T i_C dt = 0$$

## 5.1.3 升降压斩波电路和Cuk斩波电路

### 2. Cuk斩波电路Cuk斩波电路。美国加州理工学院Slobodan Cuk

👉由(5-45)得

$$I_2 t_{on} = I_1 t_{off} \quad (5-46)$$

从而可得

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{t_{off}}{t_{on}} = \frac{T - t_{on}}{t_{on}} = \frac{1 - \alpha}{\alpha} \quad (5-47)$$

👉由 $L1$ 和 $L2$ 的电压平均值为零，可得出输出电压 $U_o$ 与电源电压 $E$ 的关系

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E \quad (5-48)$$

◆与升降压斩波电路相比，Cuk斩波电路有一个明显的优点，其输入电源电流和输出负载电流都是连续的，且脉动很小，有利于对输入、输出进行滤波。

## 5.1.4 Sepic斩波电路和Zeta斩波电路

### 1. Sepic斩波电路

#### ◆工作原理

👉 V导通时， $E—L1—V$ 回路和 $C1—V—L2$ 回路同时导电， $L1$ 和 $L2$ 贮能。

👉 V关断时， $E—L1—C1—VD—$ 负载回路及 $L2—VD—$ 负载回路同时导电，此阶段 $E$ 和 $L1$ 既向负载供电，同时也向 $C1$ 充电（ $C1$ 贮存的能量在V处于通态时向 $L2$ 转移）

#### ◆输入输出关系

$$U_o = \frac{t_{on}}{t_{off}} E = \frac{t_{on}}{T - t_{on}} E = \frac{\alpha}{1 - \alpha} E$$

(5-49)

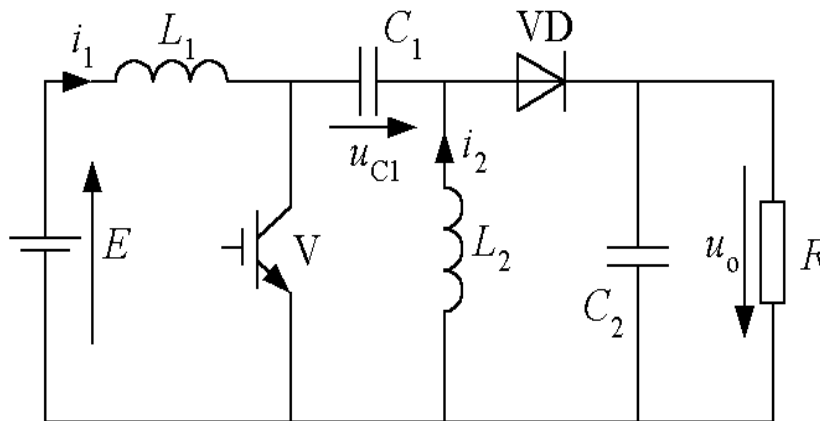


图5-6 a)Sepic斩波电路

## 5.1.4 Sepic斩波电路和Zeta斩波电路

### 2. Zeta斩波电路

#### ◆工作原理

👉 **V导通**时，电源 $E$ 经开关 $V$ 向电感 $L_1$ 贮能。

👉 **V关断**时， **$L_1 - VD - C_1$ 构成振荡回路**， $L_1$ 的能量转移至 $C_1$ ，能量全部转移至 $C_1$ 上之后， $VD$ 关断， $C_1$ 经 $L_2$ 向负载供电。

#### ◆输入输出关系为

$$U_o = \frac{\alpha}{1-\alpha} E$$

#### ◆结论

- Sepic 和 Zeta 两种电路具有相同的输入输出关系
- Sepic 电路中，电源电流连续但负载电流断续，有利于输入滤波
- Zeta 电路的电源电流断续而负载电流连续
- 两种电路输出电压为正极性的。

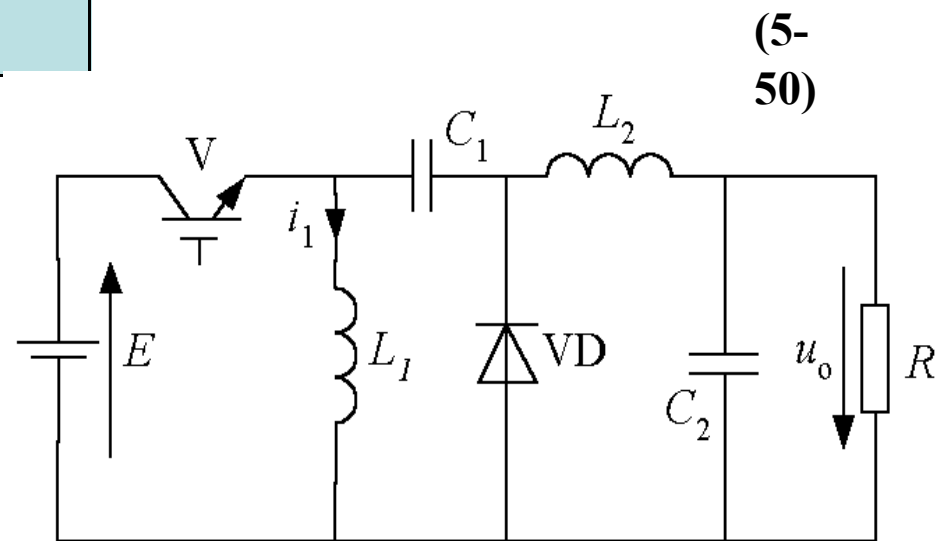


图5-6 b Zeta斩波电路

## 5.2 复合和多相多重斩波电路

---

5.2.1 电流可逆斩波电路

5.2.2 桥式可逆斩波电路

5.2.3 多相多重斩波电路

# 5.2 复合和多相多重斩波电路

## ➤ 基本概念

### ● 复合斩波电路

降压斩波电路和升压  
斩波电路组合构成

### ● 多相多重斩波电路

在电源和负载之间接入多个  
结构相同的基本斩波电路而  
构成

### ● 相数

一个控制周期中电  
源侧的电流脉波数

### ● 重数

负载电流脉  
波数

## 5.2.1 电流可逆斩波电路

### ◆ 电路结构

👉 **V1**和**VD1**构成**降压斩波电路**，电动机为电动运行，工作于第**1**象限。

👉 **V2**和**VD2**构成**升压斩波电路**，电动机作再生制动运行，工作于第**2**象限。

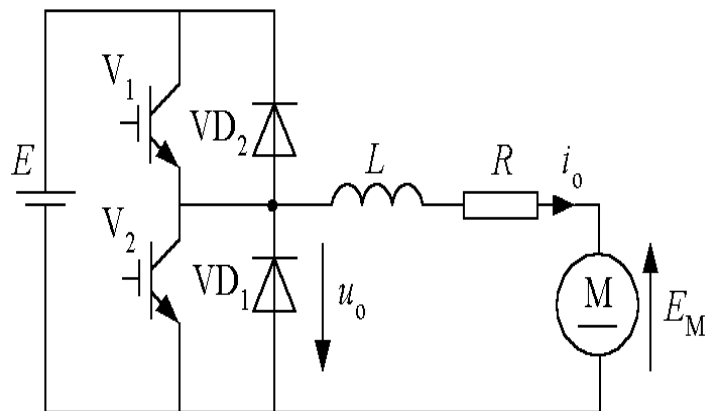
👉 必须防止**V1**和**V2**同时导通而导致电源短路。

### ◆ 工作过程

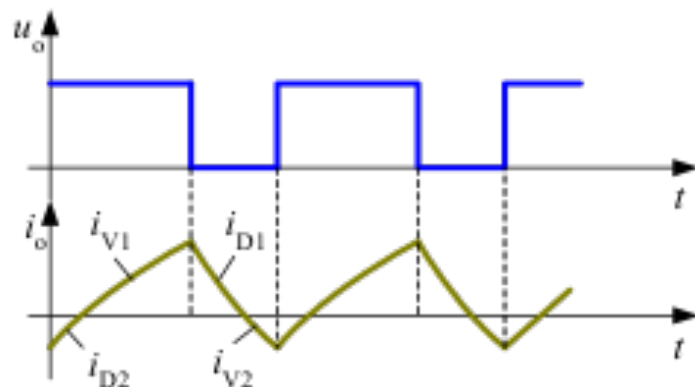
👉 两种工作情况：只作降压斩波器运行和只作升压斩波器运行。

👉 **第3种工作方式**：一个周期内交替地作为降压斩波电路和升压斩波电路工作。

👉 第3种工作方式下，当一种斩波电路电流断续而为零时，使另一个斩波电路工作，让电流反方向流过，这样电动机电枢回路总有电流流过。



a)



b)

图5-7 电流可逆斩波电路及其波形

a) 电路图 b) 波形

## 5.2.1 电流可逆斩波电路

---

### ■ 总结

- ◆ 斩波电路用于拖动直流电动机时，常要使电动机既可**电动运行**，又可**再生制动**，**降压斩波电路**能使电动机工作于第**1**象限，**升压斩波**电路能使电动机工作于第**2**象限。
- ◆ 电流可逆斩波电路：降压斩波电路与升压斩波电路组合，此电路电动机的电枢电流可正可负，但电压只能是一种极性，故其可工作于第**1**象限和第**2**象限。



## 5.2.2 桥式可逆斩波电路

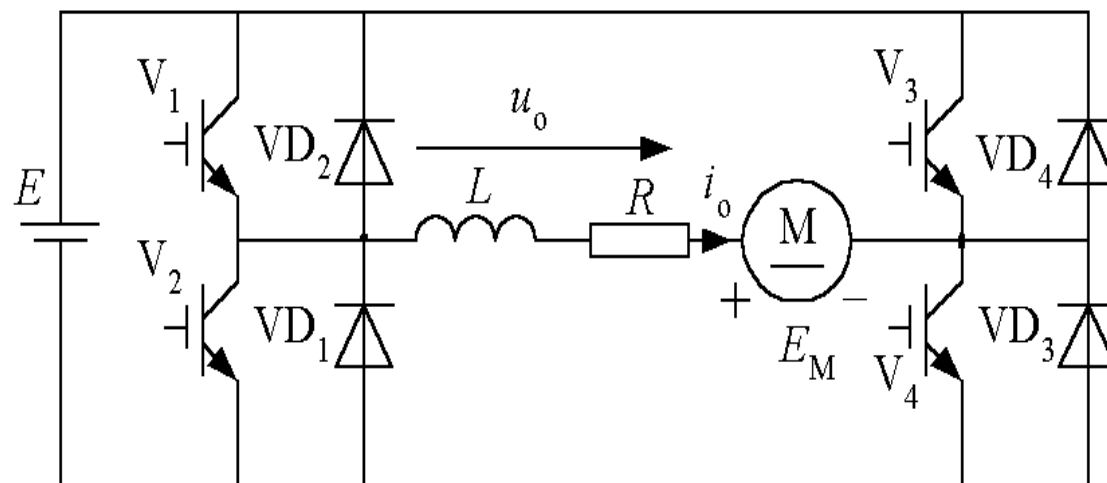


图5-8 桥式可逆斩波电路

### ■桥式可逆斩波电路

◆将两个电流可逆斩波电路组合起来，分别向电动机提供正向和反向电压，使电动机可以**4象限**运行。

#### ◆工作过程

👉**V4**导通时，等效为图5-7a所示的电流可逆斩波电路，提供**正电压**，可使电动机工作于**第1、2象限**。

👉**V2**导通时，**V3**、**VD3**和**V4**、**VD4**等效为又一组电流可逆斩波电路，向电动机提供**负电压**，可使电动机工作于**第3、4象限**。

## 5.2.2 桥式可逆斩波电路

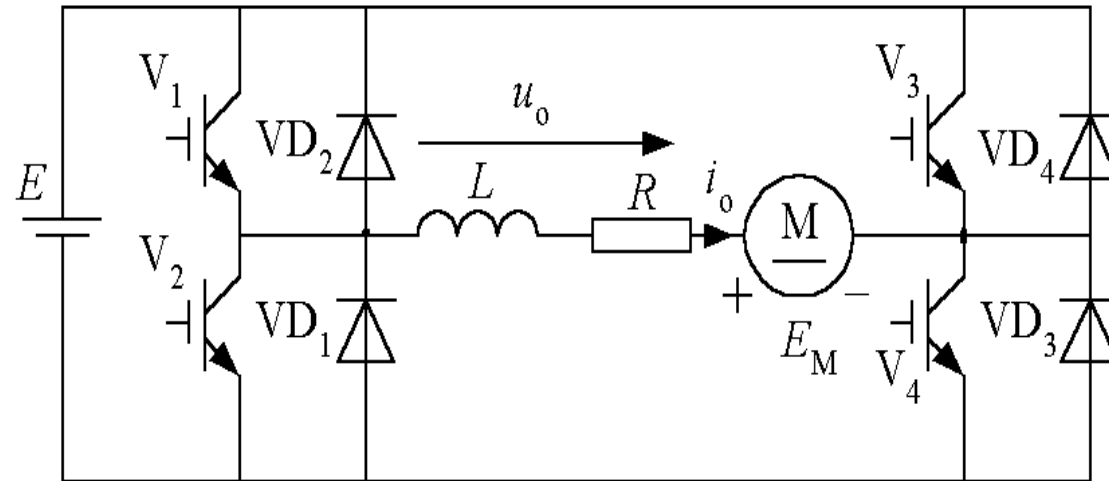
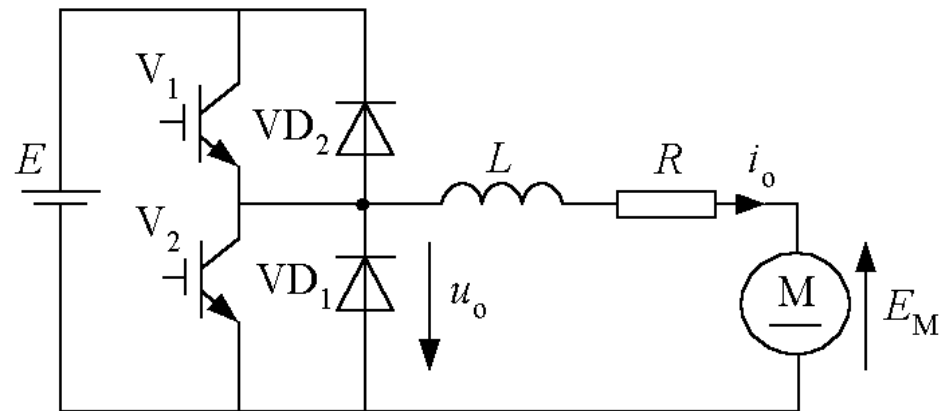


图5-8 桥式可逆斩波电路



## 5.2.3 多相多重斩波电路

### ■ 3相3重降压斩波电路

#### ◆ 电路及波形分析

👉 相当于由**3个降压**斩波电路单元**并联**而成。

👉 总输出电流为 3 个斩波电路单元输出电流之和，其平均值为单元输出电流平均值的 3 倍，脉动频率也为 3 倍。

👉 总输出电流**最大脉动率**  
(电流脉动幅值与电流平均值之比) 与相数的平方成反比，  
其总的输出电流脉动幅值变得

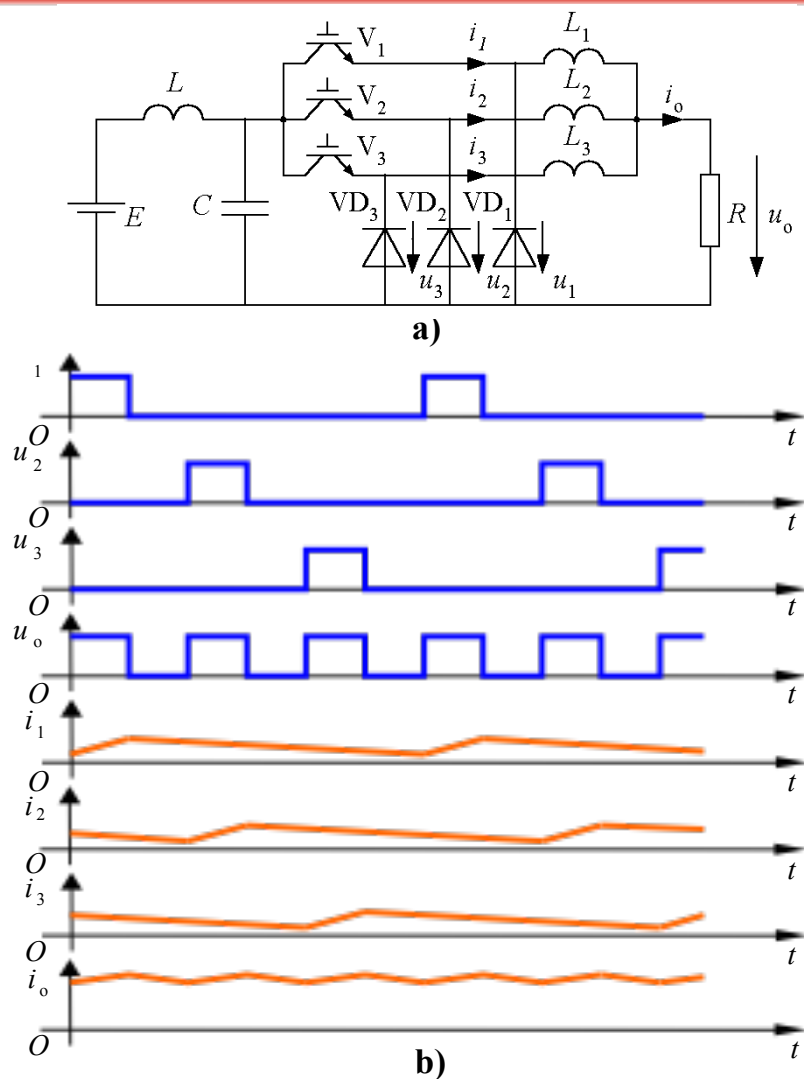


图5-9 多相多重斩波电路及其波形

a) 电路图 b) 波形

## 5.2.3 多相多重斩波电路

---

👉 当上述电路电源公用而负载为3个独立负载时，则为**3相1重斩波电路**，当电源为3个独立电源，向一个负载供电时，则为**1相3重斩波电路**。

👉 电源电流的**谐波分量**比单个斩波电路时显著减小。

- 多相多重斩波电路还具有备用功能，各斩波电路单元可互为备用，万一某一斩波单元发生故障，其余各单元可以继续运行，使得总体的可靠性提高。

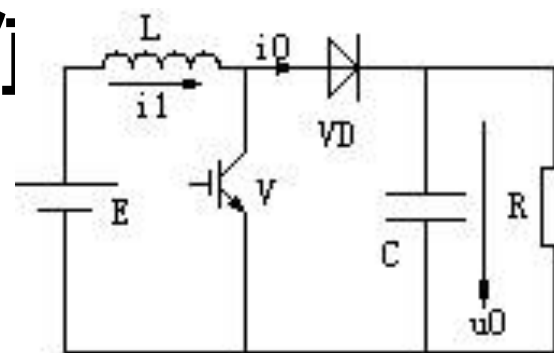
# 本章小结

---

- 直流-直流变流电路（DC/DC Converter）包括**直接直流变流电路**和**间接直流变流电路**。
- 直接直流变流电路包括6种基本斩波电路、2种复合斩波电路及多相多重斩波电路，其中最基本的是**降压斩波电路**和**升压斩波电路**两种。
- 间接直流变换电路可以分为**单端**和**双端**电路两大类，**单端**电路包括**正激**和**反激**两类，**双端**电路包括**全桥**、**半桥**和**推挽**三类，每一类电路都可能有很多种不同的拓扑形式或控制方法。

# 习题

- 1、直流斩波电路按照输入电压与输出电压的高低变化来分类有\_\_\_\_\_斩波电路；\_\_\_\_\_斩波电路；\_\_\_\_\_斩波电路。
- 2、在图示升压斩波电路中，已知 $E=50V$ ，负载电阻 $R=20\Omega$ ， $L$ 值和 $C$ 值极大，采用脉宽调制控制方式，当 $T=40\mu s$ ， $t_{on}=25\mu s$ 时，计算输出电压平均值 $U_0$ 和输出电流平均值 $I_0$ 。



升压斩波电路