



模拟电路基础（下）

直流稳压电源



➤ 教学要求

- 1 了解直流稳压源的基本组成与主要技术指标
- 2 了解整流电路的工作原理，熟练掌握桥式整流电路及整流元件的选取
- 3 熟练掌握电容滤波电路的工作原理及滤波元件的选取；
- 4 熟练掌握串联型稳压电路的组成、工作原理及分析设计方法
- 5 掌握三端集成稳压器电路的组成及应用
- 6 了解开关型稳压电路的工作原理

➤ 教学重点

- 1 桥式整流电路工作原理及整流元件的选取
- 2 电容滤波电路的工作原理及滤波元件的选取
- 3 串联型稳压电路的组成、工作原理及分析设计方法

第8章 直流稳压电源

3



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 教学难点

- 1 串联型稳压电路的设计
- 2 三端集成稳压器的扩展应用

➤ 教学学时

- 1 理论学时6学时

8.1 直流稳压源的概念

4



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 概述

在电子仪器和电子设备中，都需要稳定的直流电源供电，虽然可以用各种干电池、蓄电池这类化学电源作直流电源，但它们的成本较高、容量有限、有的需要维护。

直流稳压电源是能为负载提供稳定直流电压的电子设备

分类

线性稳压电源：调整管工作在线性状态。

优点：稳定性好，瞬态响应速度快，可靠性高，输出电压精度高，输出纹波电压小。

缺点：**效率较低**，一般只能达到30%~50%。

开关稳压电源：调整管工作在开关状态。

优点：体积小，重量轻，功耗小，可升、降压，功率大，**效率较高**，可达到80%~90%。

缺点：输出纹波电压较高，噪声较大，电压调整率等性能较差。

8.1 直流稳压源的概念

5



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 主要技术指标

特性指标：反映直流稳压电源的固有特性。如输入电压、输出电压、输出电流及输出电压的调节范围等。

质量指标：衡量输出直流电压的稳定程度。如稳压系数、输出电阻、温度系数、纹波抑制比等。

1、特性指标

(1) 最大输入—输出电压差：直流稳压电源正常工作条件下，所允许的最大输入—输出之间的电压差值，其值主要**取决于直流稳压电源内部调整晶体管的耐压指标**。

(2) 最小输入—输出电压差：直流稳压电源正常工作条件下，所需的最小输入—输出之间的电压差值。

8.1 直流稳压源的概念

6



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 主要技术指标

(3) 输出电压范围：能够正常工作的输出电压范围。其**上限值**是由最大输入电压和最小输入—输出电压差所规定，**下限值**由直流稳压电源内部的基准电压值决定。

(4) 输出电流范围：又称输出负载电流范围，在该范围内，直流稳压电源应能保证符合指标规范所给出的指标。

2、质量指标

$$V_o = f(V_i, I_o, T)$$

$$\Delta V_o = \frac{\partial V_o}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial V_o}{\partial I_o} \Delta I_o + \frac{\partial V_o}{\partial T} \Delta T$$

$$\Delta V_o = K_V \Delta V_i + R_o \Delta I_o + S_T \Delta T$$

输入电压
调整因数

输出电阻

温度系数

8.1 直流稳压源的概念

7



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 主要技术指标

2、质量指标

$$V_o = f(V_i, I_o, T)$$

$$\Delta V_o = \frac{\partial V_o}{\partial V_i} \Delta V_i + \frac{\partial V_o}{\partial I_o} \Delta I_o + \frac{\partial V_o}{\partial T} \Delta T$$

$$\Delta V_o = K_V \Delta V_i + R_o \Delta I_o + S_T \Delta T$$

输入电压
调整因数

输出电阻

温度系数

(4) 稳压系数

$$S_r = \left. \frac{\Delta V_o / V_o}{\Delta V_i / V_i} \right|_{\substack{\Delta I_o = 0 \\ \Delta T = 0}}$$

(5) 纹波抑制比

$$PSRR = 20 \lg \frac{\tilde{V}_{\text{IrP-P}}}{\tilde{V}_{\text{OrP-P}}} \text{ dB}$$

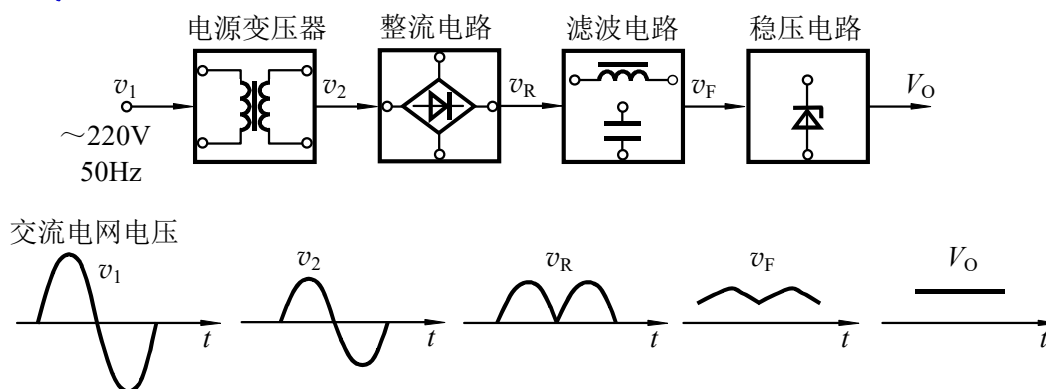
8.1 直流稳压源的概念

8



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 组成



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

8.2 整流电路

9



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 概述

整流电路的任务：把交流电压转变为直流脉动的电压。

整流电路分类：



主要介绍：

单相半波整流，单相全波整流，单相桥式整流

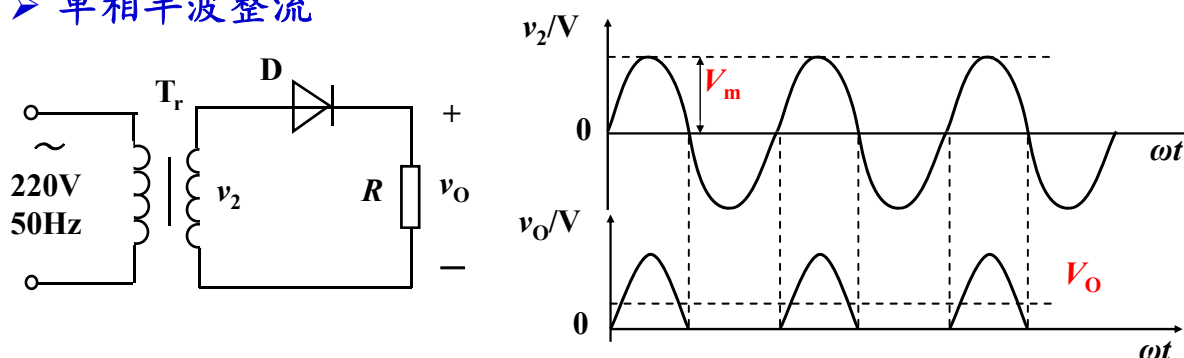
8.2 整流电路

10



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 单相半波整流



$$v_2 > 0, \text{ D } \checkmark, \quad v_O = v_2; \quad v_2 < 0, \text{ D } \times, \quad v_O = 0.$$

优点：结构简单，元件少。缺点：输出波形脉动大，利用率低。

单相半波整流电路仅适用于输出电流较小，对脉动要求不高的场合。

8.2 整流电路

11



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 单相半波整流

技术指标:

有效值

(1) 输出直流电压(平均): $V_L = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \sqrt{2}V_2 \sin \omega t d(\omega t) = \frac{\sqrt{2}V_2}{\pi} \approx 0.45V_2$ 记忆或会推导!!

(2) 负载平均电流: $I_0 = \frac{V_L}{R_L} = 0.45 \frac{V_2}{R_L}$

(3) 二极管所承受的最大反向电压、电流: $V_{RM} = \sqrt{2}V_2$ $I_{\max} = \sqrt{2}V_2 / R_L$

(4) 整流输出电压的脉动系数 $\frac{\text{负载上最低次谐波分量的幅值}}{\text{输出电压的平均值}}$

$$v_o = \sqrt{2}V_2 \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{2}{15\pi} \cos 4\omega t \dots \right)$$

$$S = \frac{V_{01m}}{V_L} = \frac{\pi}{2} = 1.57$$

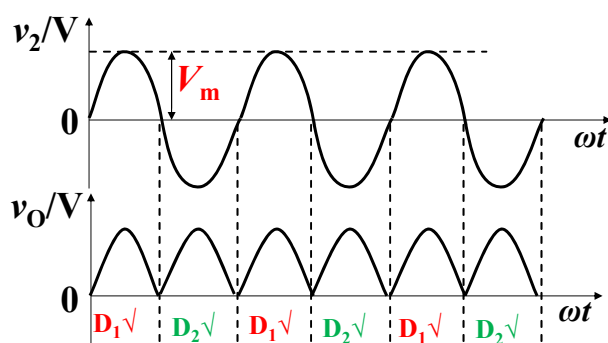
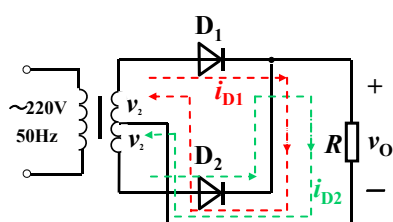
8.2 整流电路

12



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 单相全波整流



$v_2 > 0$, $D_1 \checkmark$, $D_2 \times$, $v_O = v_2$;

$v_2 < 0$, $D_1 \times$, $D_2 \checkmark$, $v_O = -v_2$ 。

单相全波整流电路需要一个中心抽头变压器。

8.2 整流电路

13



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 单相全波整流

技术指标:

(1) 输出直流电压(平均): $V_L = 2 \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_2 = 0.9 V_2$ 记忆或推导!!

(2) 负载平均电流: $I_0 = 0.9 \frac{V_2}{R_L}$

(3) 二极管所承受的最大反向电压、电流: $V_{RM} = 2\sqrt{2}V_2$ $I_{\max} = \sqrt{2}V_2 / R_L$

(4) 整流输出电压的脉动系数

$$v_o = \sqrt{2}V_2 \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t \dots \right) \quad S = \frac{4/3\pi}{2/\pi} = \frac{2}{3} = 0.67$$

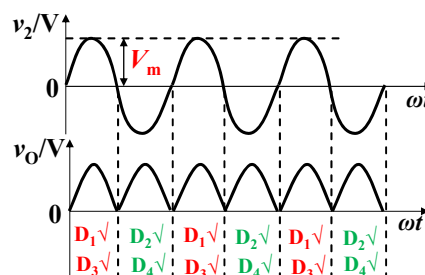
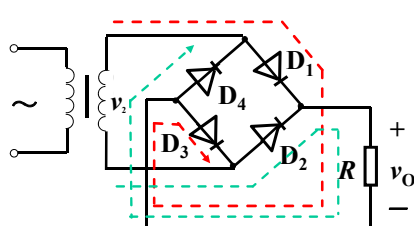
8.2 整流电路

14



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 单相桥式整流电路



电路形态特点: 负载两端“同极性”、变压器两端“异极性”

$v_2 > 0$, $D_1 \checkmark$, $D_3 \checkmark$, $D_2 \times$, $D_4 \times$, $v_o = v_2$;

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

$v_2 < 0$, $D_1 \times$, $D_3 \times$, $D_2 \checkmark$, $D_4 \checkmark$, $v_o = -v_2$ 。

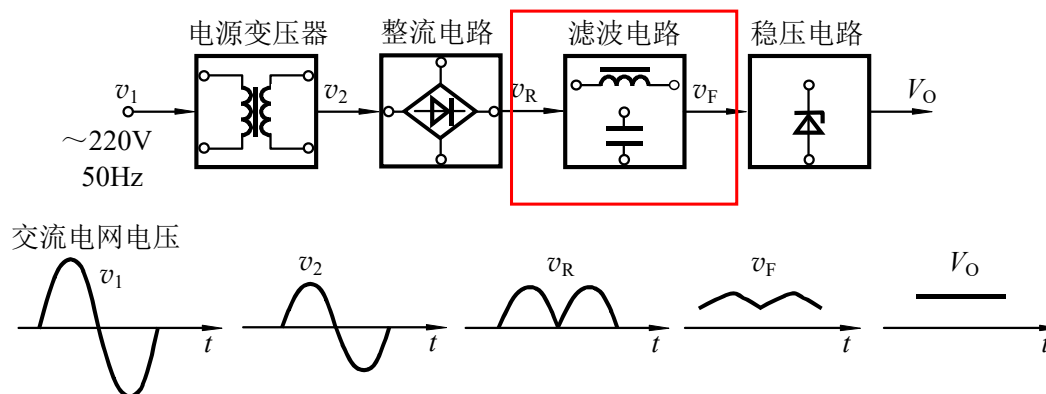
8.3 滤波电路

15



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 概述



8.3 滤波电路

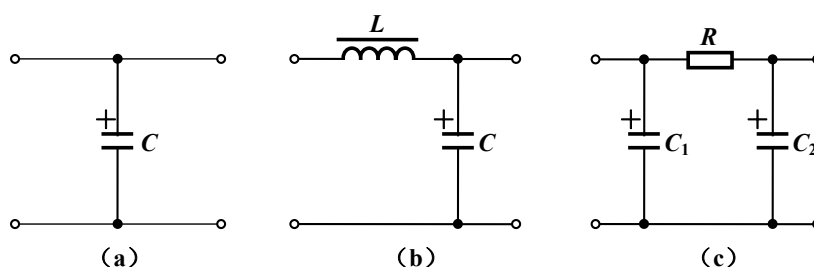
16



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 概述

为了进一步降低输出电压的脉动需要滤波电路滤除脉动



(a) 电容滤波电路 (b) 电感电容滤波电路 (倒L型) (c) Π 型滤波电路

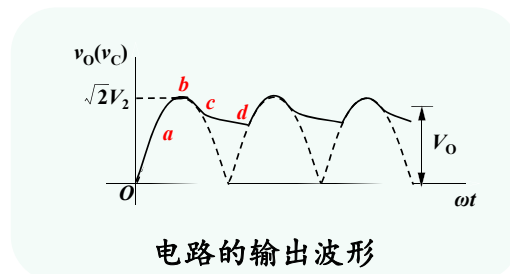
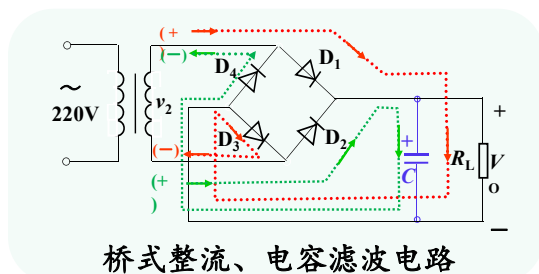
8.3 滤波电路

17



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电容滤波



1、空载时的情况

输出电压为 $\sqrt{2} V_2$

2、接负载的情况

因为放电回路的存在，电容两端电压会发生变化

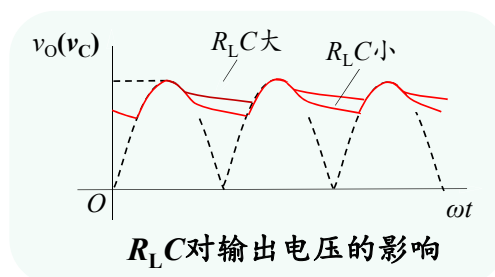
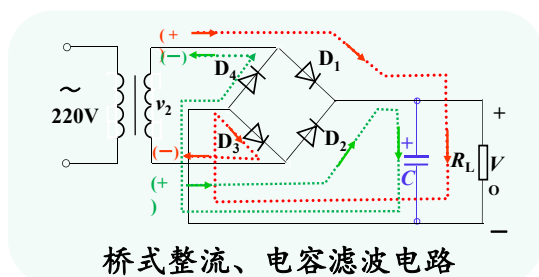
8.3 滤波电路

18



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电容滤波



$$\tau_c = (R_{int} // R_L) C \approx R_{int} C$$

$$\tau_d = R_L C$$

$$\tau_d \gg \tau_c$$

$$R_L C \geq (3 \sim 5) \frac{T}{2}$$

C的耐压值大于 $\sqrt{2} V_2$

8.3 滤波电路

19



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电容滤波

技术指标:

(1) 输出直流电压(平均): $V_L = \sqrt{2}V_2(1 - \frac{T}{4R_L C}) = (1.18 \sim 1.27)V_2$

通常取 $V_L = 1.2V_2$ 来估算。 **1.2需要记忆!! (最关键)**

(2) 负载平均电流: $I_0 = 1.2 \frac{V_2}{R_L}$

(3) 二极管所承受的最大反向电压和平均电流: $V_{RM} = \sqrt{2}V_2 \quad I_D = I_0 / 2$

(4) 整流输出电压的脉动系数: 10%~20%

8.3 滤波电路

20



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电容滤波

例1、某电子设备需要直流电压 $v_0=30V$, $I_0=400mA$ 的直流电流, 若采用桥式整流, 电容滤波电路, 试选择直流元件和滤波电容。

(1) 选择二极管

$$I_D = I_0 / 2 = 200mA \quad V_{DRM} = \sqrt{2}V_2 = \sqrt{2} \frac{V_0}{1.2} = 35V$$

考虑到充电电流的冲击, 选用最大直流电流为400mA以上、耐压为50V的整流二极管。

(2) 选电容

$$C = \frac{4T}{2R_L} = \frac{2 \times 1/f}{V_0/I_0} = 0.00053 \quad \text{选} 560\mu F, \text{耐压} 50V \text{的电解电容。}$$

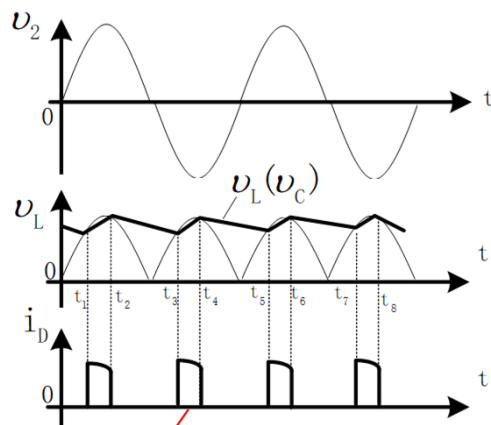
8.3 滤波电路

21



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电容滤波



无滤波电容时 $\theta = \pi$ 。

有滤波电容时 $\theta < \pi$ ，且二极管平均电流增大，故其峰值很大！

$$\begin{cases} C \uparrow \\ R_L \uparrow \end{cases} \rightarrow \tau_{\text{放电}} \uparrow \rightarrow \begin{cases} \text{脉动} \downarrow \\ V_L \uparrow \\ \theta \downarrow \rightarrow i_D \text{的峰值} \uparrow \end{cases}$$

导通角 θ

θ 小到一定程度，难于选择二极管！

8.3 滤波电路

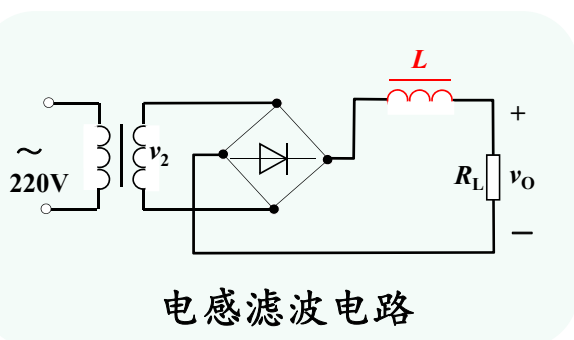
22



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 电感滤波

在大电流负载的情况下，若采用电容滤波，使得整流二极管及滤波电容的选择都很困难，甚至不太可能。这时可采用电感滤波。



电感滤波电路一般只适用于低电压、大电流的场合。 L 愈大， R_L 愈小，滤波效果愈好。

优点：整流二极管的导电角较大，冲击电流很小，输出特性比较平坦。

缺点：体积大、笨重，易引起电磁干扰。

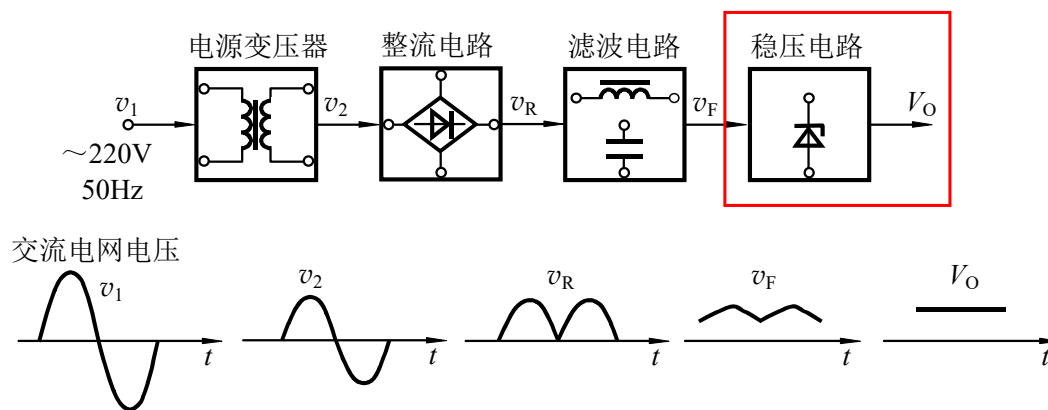
8.4 串联型直流稳压电源

23



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 概述



8.4 串联型直流稳压电源

24

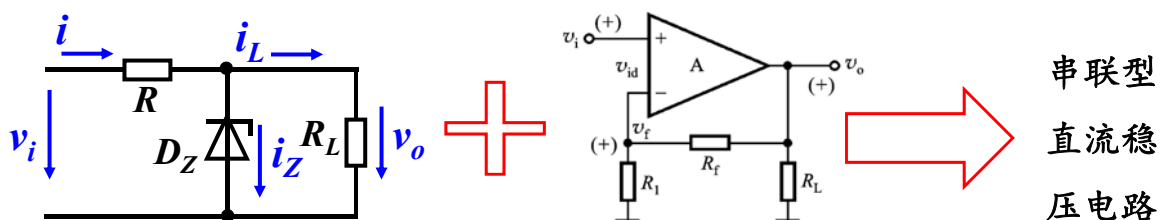


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 概述

整流滤波电路存在的问题：

- 1、当电网电压波动时（一般允许 $\pm 10\%$ ），整流滤波电路输出的直流电压不稳定。
- 2、当负载变化时，由于整流滤波电路存在内阻，输出电压将要变化。



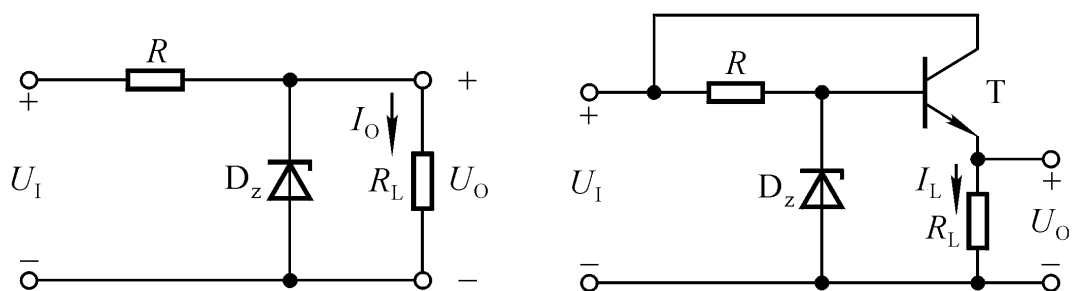
8.4 串联型直流稳压电源

25



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 概述



输出电流不足

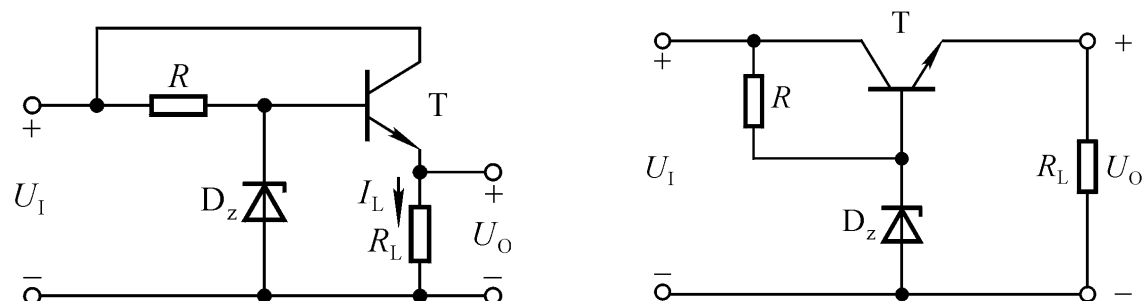
8.4 串联型直流稳压电源

26



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 概述



输出电压取决稳压管电压，灵活性差

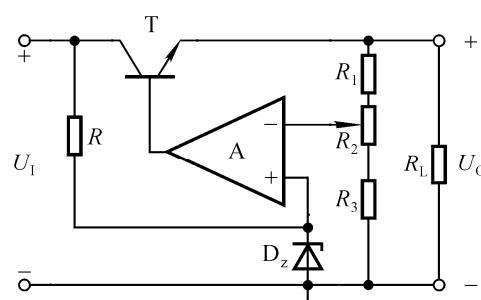
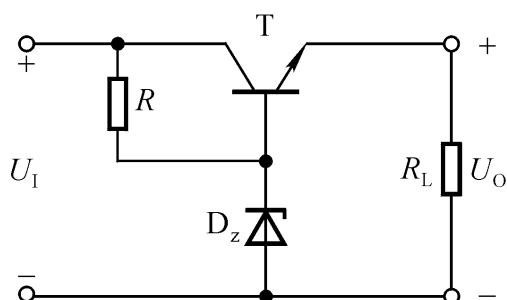
8.4 串联型直流稳压电源

27



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 概述



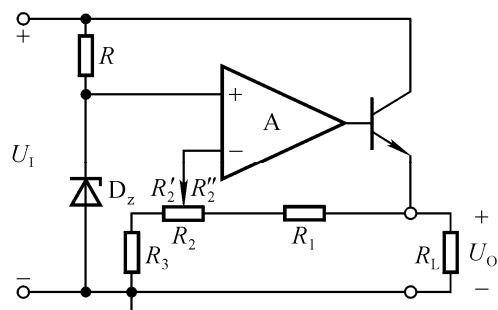
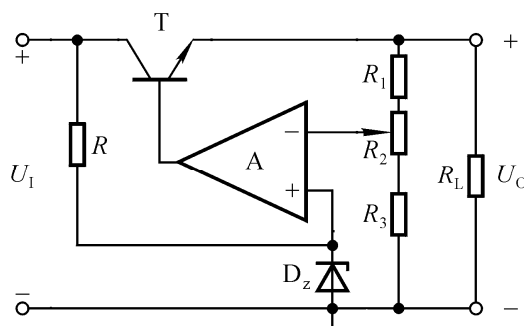
8.4 串联型直流稳压电源

28



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 概述



8.4 串联型直流稳压电源

29



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理

将 V_{REF} 看作电路的输入

电压串联负反馈

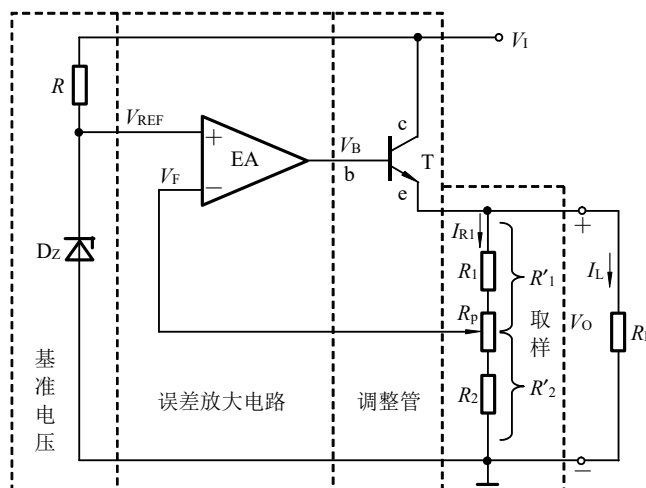
输入电压波动
负载电流变化 } 输出电压变化

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

$V_O \uparrow$

满足深度负反馈，根据虚短和虚断有

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



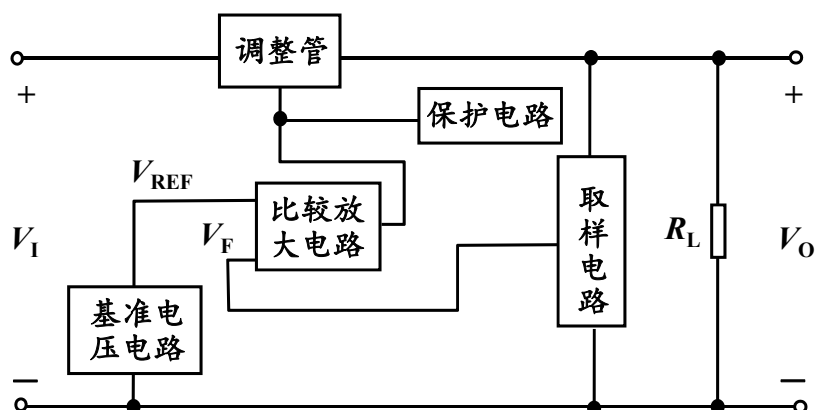
8.4 串联型直流稳压电源

30



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理



串联反馈式稳压电路的组成框图

基准电压电路：

提供基准电压 V_{REF} ；

取样电路：

一般由电阻分压器组成；

比较放大电路：

通常为差分放大电路，其输出电压控制调整管；

调整管：

与负载串联，用于调整输出电压，使其趋于稳定。

8.4 串联型直流稳压电源

31



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理

调整管的选型：

$$I_{E\max} = I_{R1} + I_{L\max} \approx I_{L\max} < I_{CM}$$

$$U_{CE\max} = U_{I\max} - U_{O\min} < U_{(BR)CEO}$$

$$P_{T\max} = I_{E\max} U_{CE\max} < P_{CM}$$

最小输入电压：

$$V_{I\min} = V_{O\max} + (3 \sim 8)V \quad \text{为什么?}$$

调整管工作在放大区， V_{CE}

会带来什么问题？

如用桥式整流电容滤波，有效电压应为？

8.4 串联型直流稳压电源

32



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理

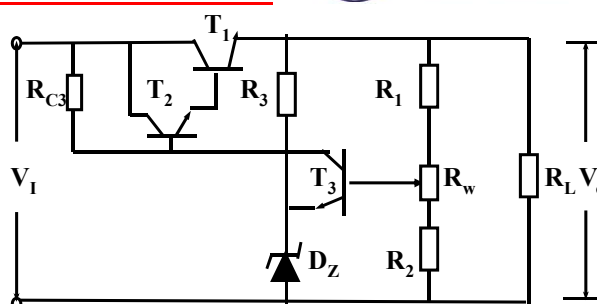
$$V_{BE3}=0.7V, V_Z=5.3V, V_I=20V, \beta_1=20,$$

$$\beta_2=50, R_1=R_2=200\Omega, R_3=1k, R_{C3}=2k$$

(1) 要使 R_w 滑到最下端时， R_w 应为多少才能让 $V_0=15V$ ？

(2) 当 R_w 滑到最上端时，此时的 v_0 为多少？

(3) 当 $V_0=15V$ ， $I_0=500mA$ 时，求通过 R_{C3} 的电流 I_{RC3} 和流过稳压管的电流 I_Z ？



- 分 析
- $T_1 \sim T_3$ 都工作于放大区， $T_1 T_2$ 组成复合管，电流放大系数 $\beta = \beta_1 \beta_2 = 20 \times 50 = 1000$
 - 稳压后， T_3 管的基极电位： $V_{B3} = V_Z + V_{BE3} = 5.3V + 0.7V = 6V$

8.4 串联型直流稳压电源

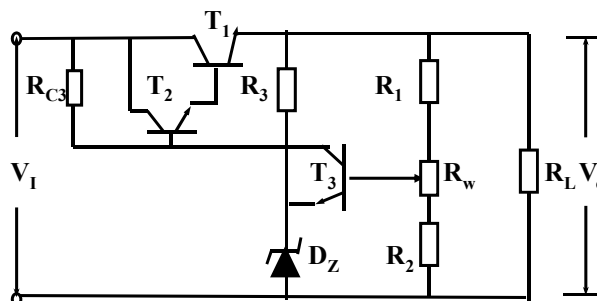
33



武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理

$V_{BE3}=0.7V$, $V_Z=5.3V$, $V_I=20V$, $\beta_1=20$,
 $\beta_2=50$, $R_1=R_2=200\Omega$, $R_3=1k$, $R_{C3}=2k$



解：（1）当 R_w 的滑动端往下调到最下端时，电路满足

$$V_{B3} = \frac{R_2}{R_1 + R_2 + R_w} V_0 \quad \rightarrow \quad R_w = \frac{R_2 V_0}{V_{B3}} - R_1 - R_2 = \frac{200 \times 15}{6} - 200 - 200 = 100\Omega$$

（2）当 R_w 的滑动端往上调到最上端时，电路满足

$$V_{B3} = \frac{R_2 + R_w}{R_1 + R_2 + R_w} V_0 \quad \rightarrow \quad V_0 = \frac{R_1 + R_2 + R_w}{R_2 + R_w} V_{B3} = 10V$$

8.4 串联型直流稳压电源

34

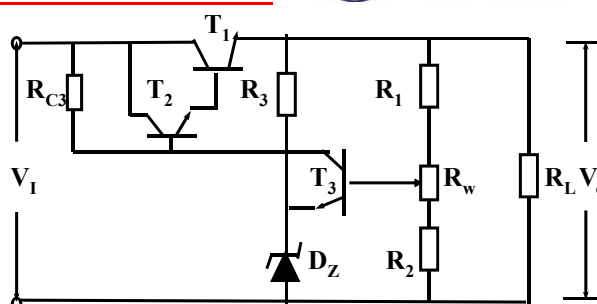


武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

► 结构与工作原理

$V_{BE3}=0.7V$, $V_Z=5.3V$, $V_I=20V$, $\beta_1=20$,
 $\beta_2=50$, $R_1=R_2=200\Omega$, $R_3=1k$, $R_{C3}=2k$

（3）当 $V_0=15V$, $I_0=500mA$ 时，求通过 R_{C3} 的电流 I_{RC3} 和流过稳压管的电流 I_Z ？



解：（3）因 T_1 、 T_2 工作于放大区，其发射结电压均为 $0.7V$ 左右，故通过 R_{C3} 的电流

$$I_{RC3} = \frac{V_I - V_{C3}}{R_{C3}} = \frac{V_I - (V_0 + V_{BE1} + V_{BE2})}{R_{C3}} = 1.8mA$$

流过稳压管的电流 $I_Z = I_{R3} + I_{E3}$ 且 $I_{E3} \approx I_{C3} = I_{RC3} - I_{B2}$ $I_{R3} = \frac{V_0 - V_Z}{R_3} = 9.7mA$

8.4 串联型直流稳压电源

35



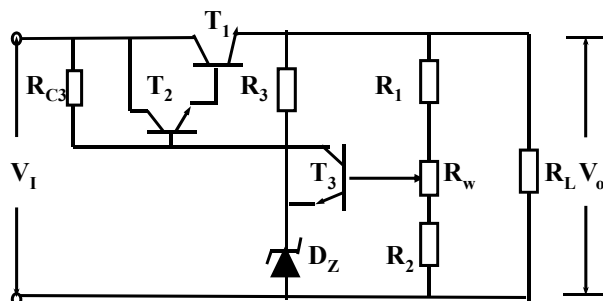
武汉大学
WUHAN UNIVERSITY

➤ 结构与工作原理

$V_{BE3}=0.7V$, $V_Z=5.3V$, $V_I=20V$, $\beta_1=20$,

$\beta_2=50$, $R_1=R_2=200\Omega$, $R_3=1k$, $R_{C3}=2k$

(3) 当 $V_0=15V$, $I_0=500mA$ 时, 求通过 R_{C3} 的电流 I_{RC3} 和流过稳压管的电流 I_Z ?



解: (3)
$$I_{B2} \approx \frac{I_{E1}}{\beta_1 \beta_2} = \frac{I_{R3} + I_{R1} + I_0}{\beta_1 \beta_2}$$

流过取样电阻上的电流近似为 (忽略 I_{B3})
$$I_{R1} = \frac{V_0}{R_1 + R_w + R_2} = 30mA$$

代入数值可得: $I_{B2} \approx 0.54mA$, $I_{E3} = 1.26mA$, $I_Z = 11mA$