

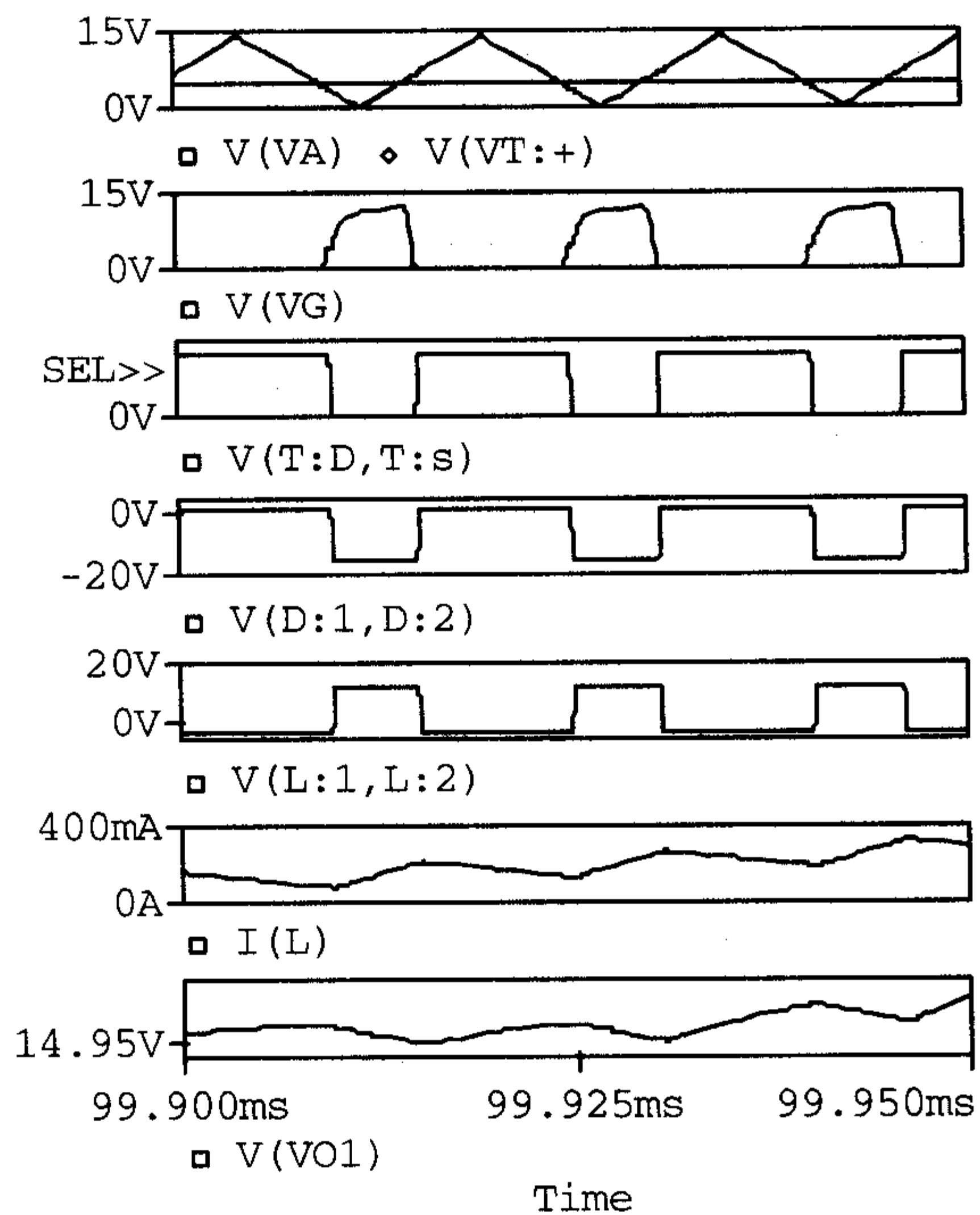
图 10.4.1 例 SPE10.4.1 的仿真结果

(a) v_A 、 v_O 建立过程的波形 (b) v_A 、 v_O 稳态时局部放大的波形

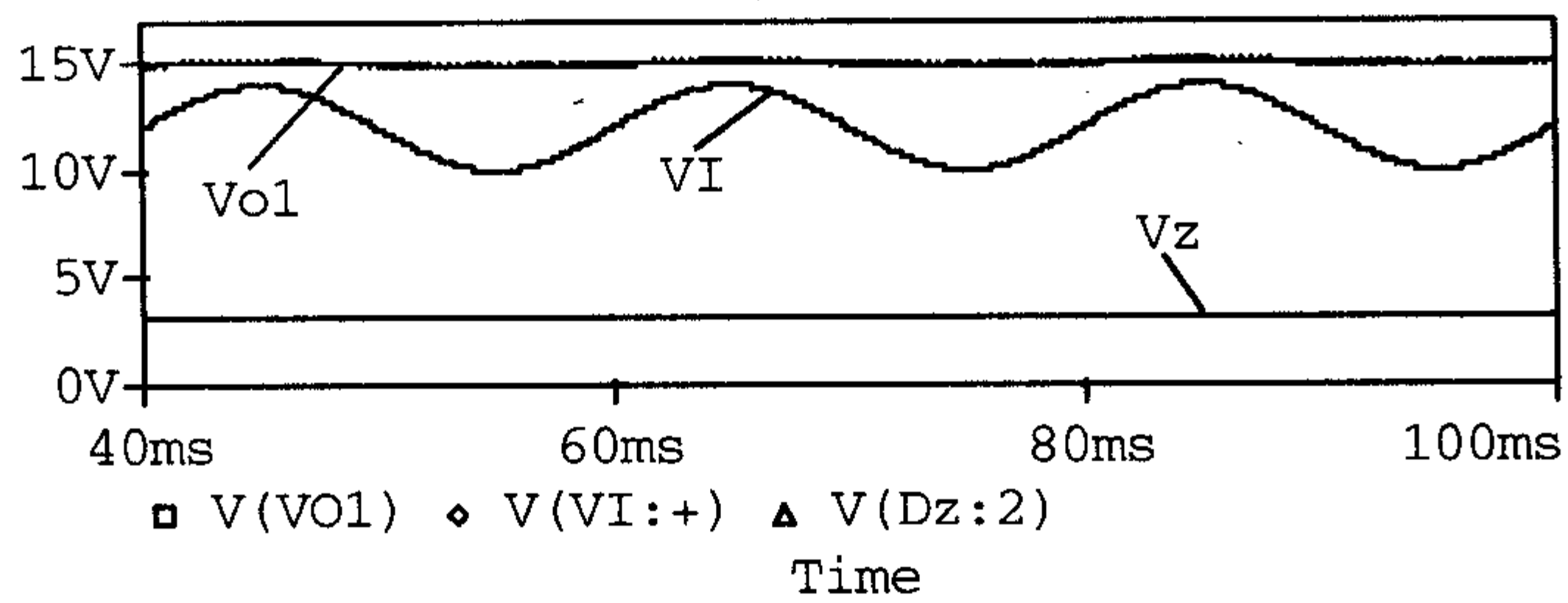
(c) 负载电流变化时 v_O 的波形 (d) 输入电压变化时 v_O 的波形

(e) 温度变化时 v_O 的波形

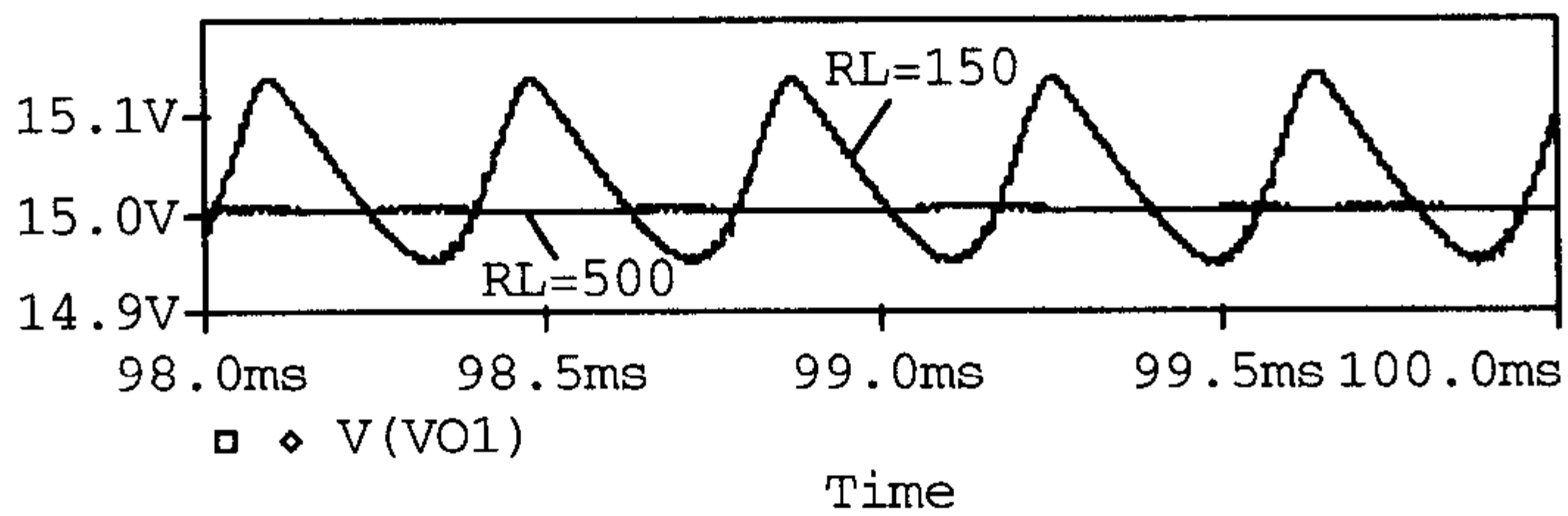
均值约为 23.26 V，其纹波的峰 - 峰值约为 1.4 V； v_O 的直流平均值约为 11.714 V，其纹波的峰 - 峰值约为 55 μ V。



(a)



(b)



(c)

图 10.4.3

(a) 电路中电压、电流波形 (b) 输入电压波动时 v_1 、 v_z 和 v_{o1} 的波形

(c) R_L 分别为 $150\ \Omega$ 和 $500\ \Omega$ 时 v_{o1} 的波形

10.4 SPICE 仿真例题

电提供, 输出电压 v_{o1} 呈下降趋势。而当 $v_A < v_T$ 时, v_C 为低电压, T 截止, 二极管 D 正向导通, 其正向压降很小, 此时电感放电, 向负载供电, 同时也向电容充电, v_{o1} 呈上升趋势, 电感电流逐渐减小。 v_{o1} 的幅值约为 15 V。

(2) 设置 v_1 在 12 V 的直流电压上叠加一个振幅为 2 V、频率为 50 Hz 的正弦波, 其属性设置为: $V_{\text{OFF}} = 12 \text{ V}$, $V_{\text{AMPL}} = 2 \text{ V}$, $f_{\text{REQ}} = 50 \text{ Hz}$ 。同样进行时域分析, 得到输入电压 v_1 、基准电压 v_z 和输出电压 v_{o1} 如图 b 所示。可以看出, v_1 在 10 ~ 14 V 之间变化时(波动 33.3%), v_{o1} 保持 15 V 基本不变(将波形放大后可测得约有 0.4 V 的波动, 即波动 2.7%), 稳压系数 $\gamma \approx 0.081$, 稳压效果明显。

将负载电阻作为参数, 在时域分析时同时进行参数扫描, 当 R_L 分别为 150 Ω 和 500 Ω 时, 得输出波形如图 c 所示。由图看出, 输出电压稳定在 15 V 基本不变, 但负载愈重(电阻愈小), 输出电压的纹波愈大。



小 结

□ 在电子系统中, 经常需要将交流电网电压转换为稳定的直流电压, 为此要用整流、滤波和稳压等环节来实现。

□ 在整流电路中, 是利用二极管的单向导电性将交流电转变为脉动的直流电。为抑制输出直流电压中的纹波, 通常在整流电路后接有滤波环节。滤波电路一般可分为电容输入式和电感输入式两大类。在直流输出电流较小且负载几乎不变的场合, 宜采用电容输入式滤波电路, 而负载电流大的功率场合, 采用电感输入式滤波电路。

□ 为了保证输出电压不受电网电压、负载和温度的变化而产生波动, 可再接入稳压电路。在小功率供电系统中, 多采用串联反馈式稳压电路, 在移动式电子设备中或要求节能的场合, 多采用由集成开关稳压器组成的 DC/DC 变换器供电; 而中、大功率稳压电源一般采用 PWM(或 PFM)集成的控制电路再外接大功率开关调整管的开关稳压电路。

□ 串联反馈式稳压电路的调整管是工作在线性放大区, 利用控制调整管的管压降来调整输出电压, 它是一个带负反馈的闭环有差调节系统; 开关稳压电源的调整管是工作在开关状态, 利用控制调整管导通与截止时间的比例来稳定输出电压, 它也是一个带负反馈的闭环有差调节系统。它的控制方式有脉宽调制型(PWM)、脉频调制型(PFM)及混合调制(即脉宽-频率调制)型。

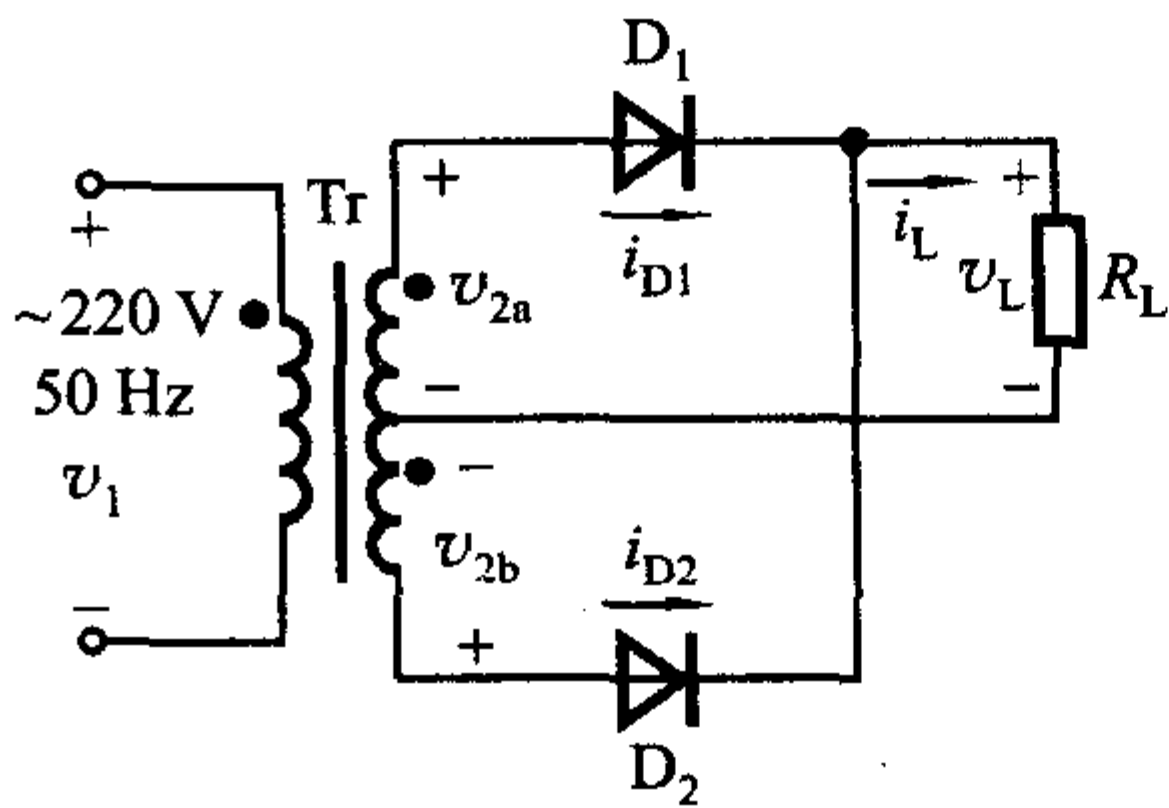


习 题

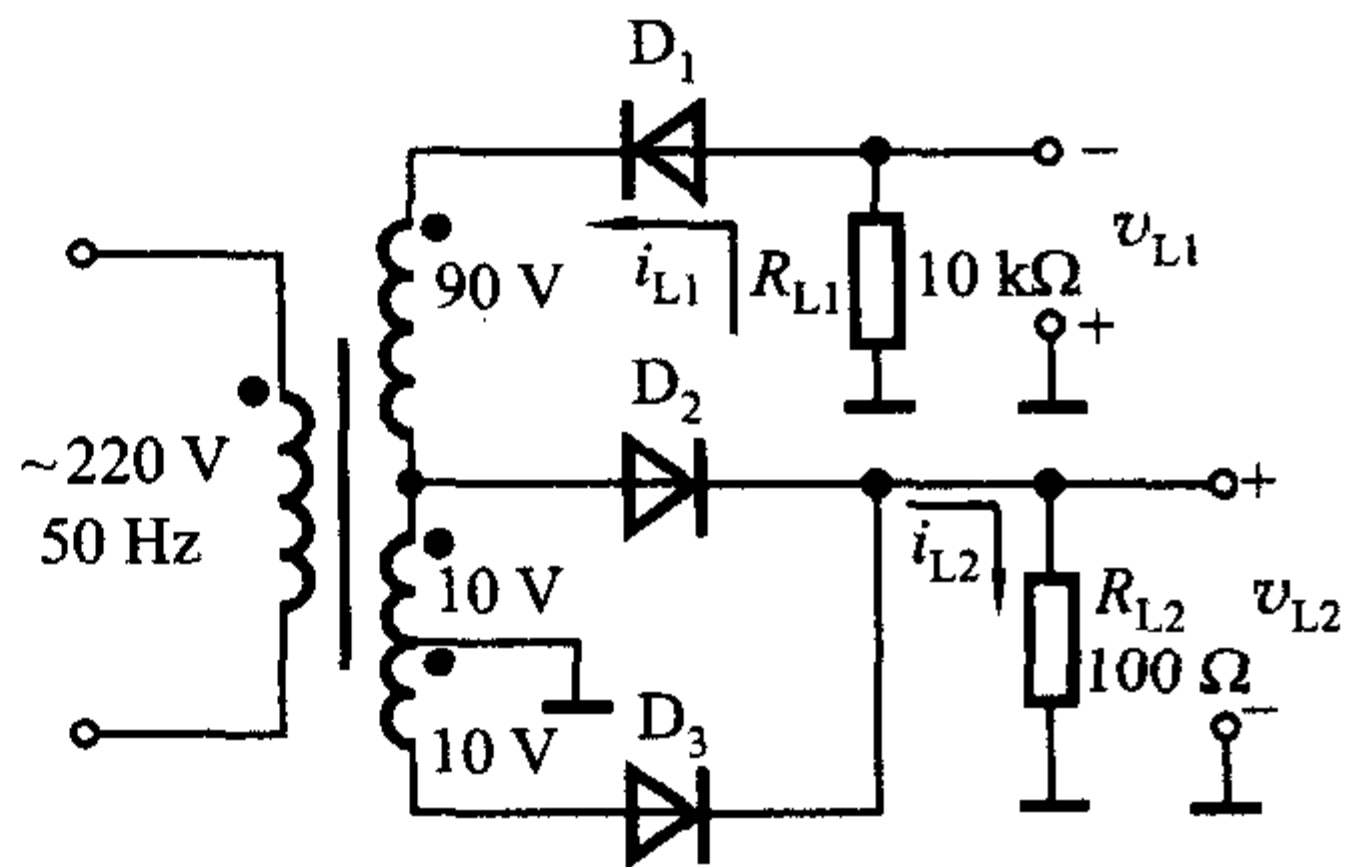
10.1 小功率整流滤波电路

10.1.1 变压器二次侧有中心抽头的全波整流电路如图题 10.1.1 所示，二次侧电源电压为 $v_{2a} = -v_{2b} = \sqrt{2}V_2 \sin \omega t$ ，假定忽略二极管的正向压降和变压器内阻：(1) 试画出 v_{2a} 、 v_{2b} 、 i_{D1} 、 i_{D2} 、 i_L 、 v_L 及二极管承受的反向电压 v_R 的波形；(2) 已知 V_2 (有效值)，求 V_L 、 I_L (均为平均值)；(3) 计算整流二极管的平均电流 I_D 、最大反向电压 V_{RM} ；(4) 若已知 $V_L = 30 \text{ V}$ ， $I_L = 80 \text{ mA}$ ，试计算 V_{2a} 、 V_{2b} 的值，并选择整流二极管。

10.1.2 电路参数如图题 10.1.2 所示，图中标出了变压器二次电压(有效值)和负载电阻值，若忽略二极管的正向压降和变压器内阻，试求：



图题 10.1.1



图题 10.1.2

- (1) R_{L1} 、 R_{L2} 两端的电压 V_{L1} 、 V_{L2} 和电流 I_{L1} 、 I_{L2} (平均值)；
- (2) 通过整流二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 的平均电流和二极管承受的最大反向电压。

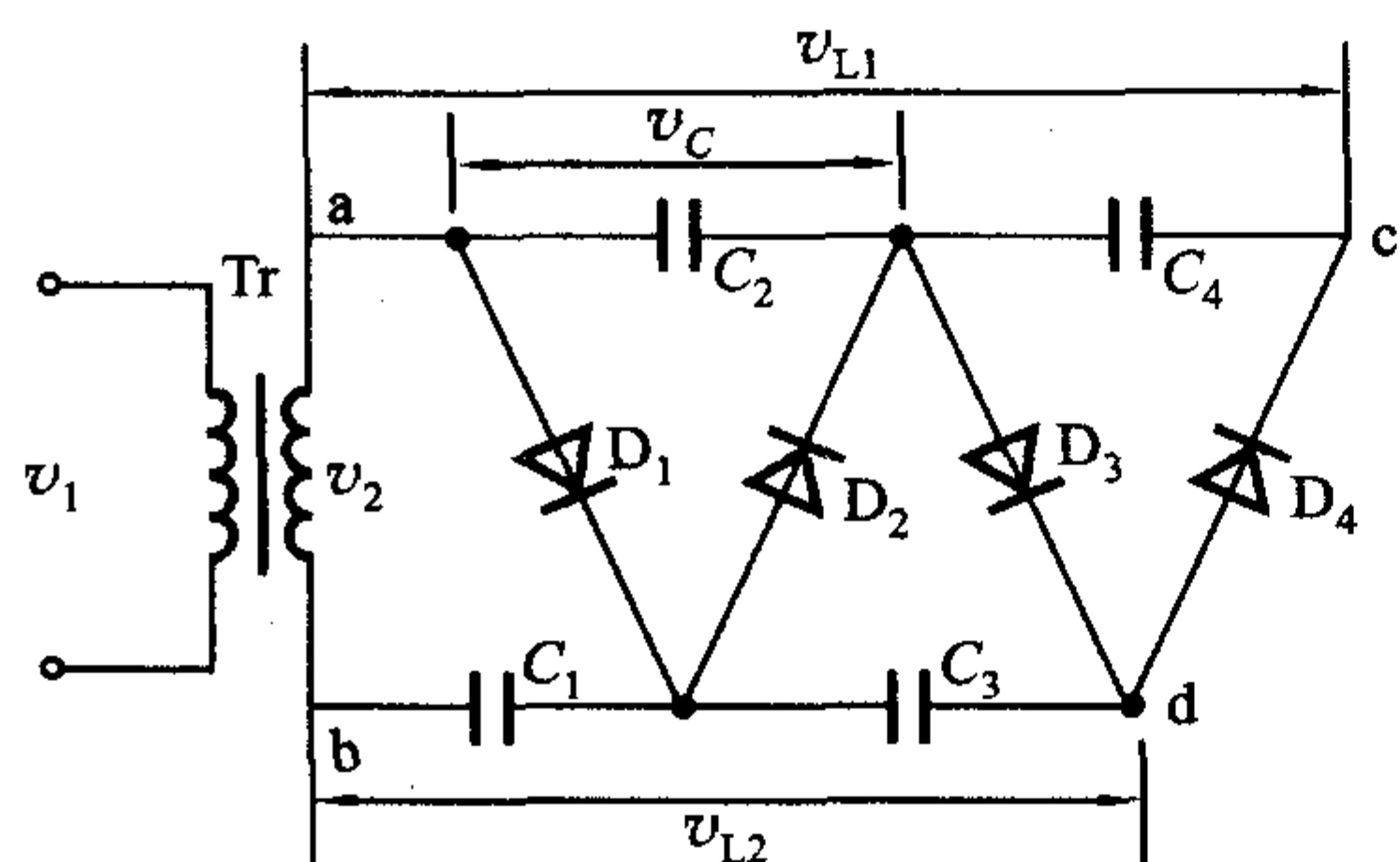
10.1.3 桥式整流、电容滤波电路如图 10.1.4 所示，已知交流电源电压 $V_1 = 220 \text{ V}$ 、 50 Hz ， $R_L = 50 \Omega$ ，要求输出直流电压为 24 V ，纹波较小。(1) 选择整流管的型号；(2) 选择滤波电容器(容量和耐压)；(3) 确定电源变压器的二次电压和电流。

10.1.4 如图题 10.1.4 所示倍压整流电路，要求标出每个电容器上的电压和二极管承受的最大反向电压；求输出电压 V_{L1} 、 V_{L2} 的大小，并标出极性。

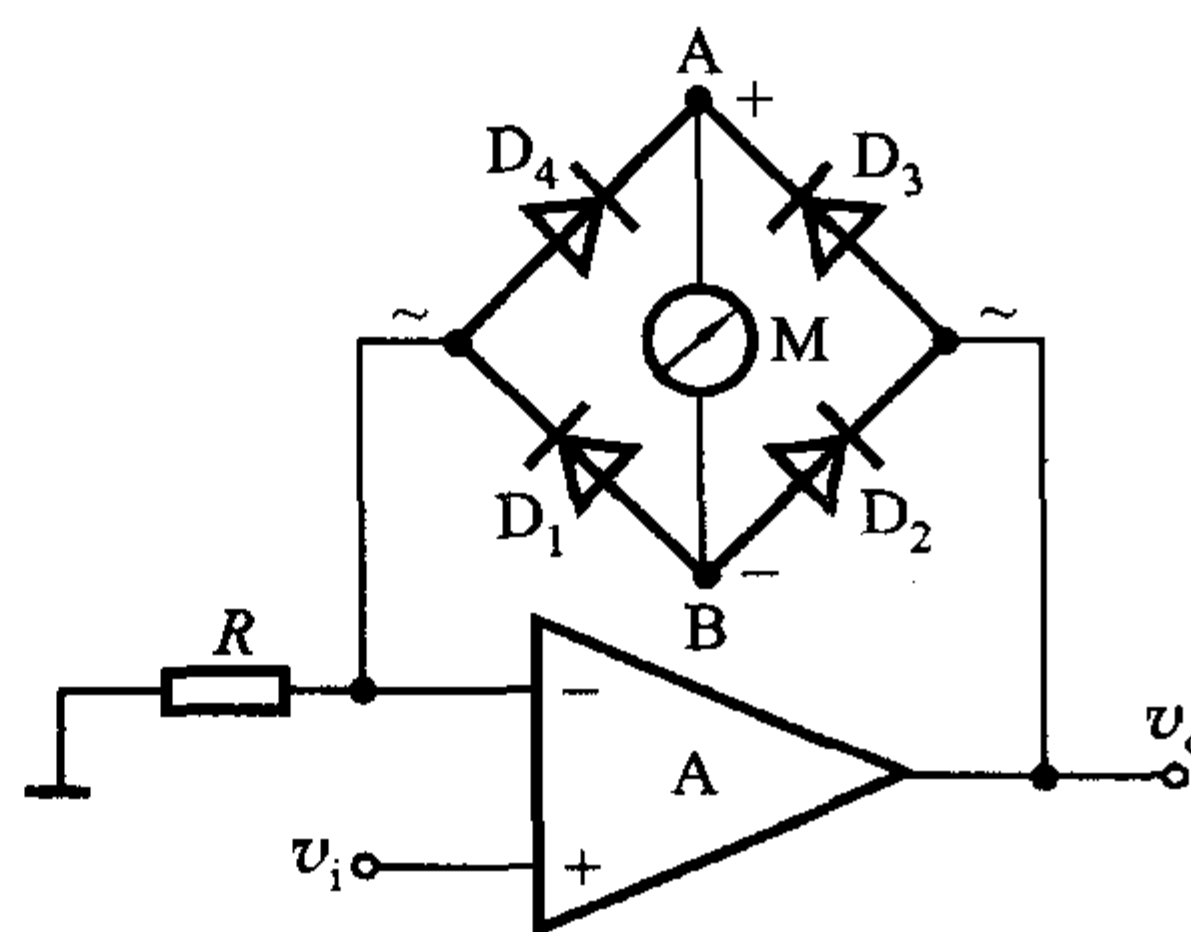
10.1.5 图题 10.1.5 是一高输入阻抗交流电压表电路，设 A、D 都为理想器件，被测电压 $v_i = \sqrt{2} V_i \sin \omega t$ 。(1) 当 v_i 瞬时极性为正时，标出流过表头 M 的电流方向，说明哪几个二极管导通；(2) 写出流过表头 M 电流的平均值的表达式；(3) 表头的满刻度电流为 $100 \mu\text{A}$ ，要求当 $V_i = 1 \text{ V}$ 时，表头的指针为满刻度，试求满足此要求的电阻 R 值；(4) 若将 1 V 的交流电压表改为 1 V 的直流电压表，表头指针为满刻度时，电路参数 R 应如何改变？

10.1.6 如图题 10.1.6 所示电路中， A_1 组成一线半波整流电路， A_2 组成一加法电路，二者构成一线性全波整流电路。(1) 试画出其输入 - 输出特性 $v_o = f(v_s)$ ；(2) 试画出 $v_s =$

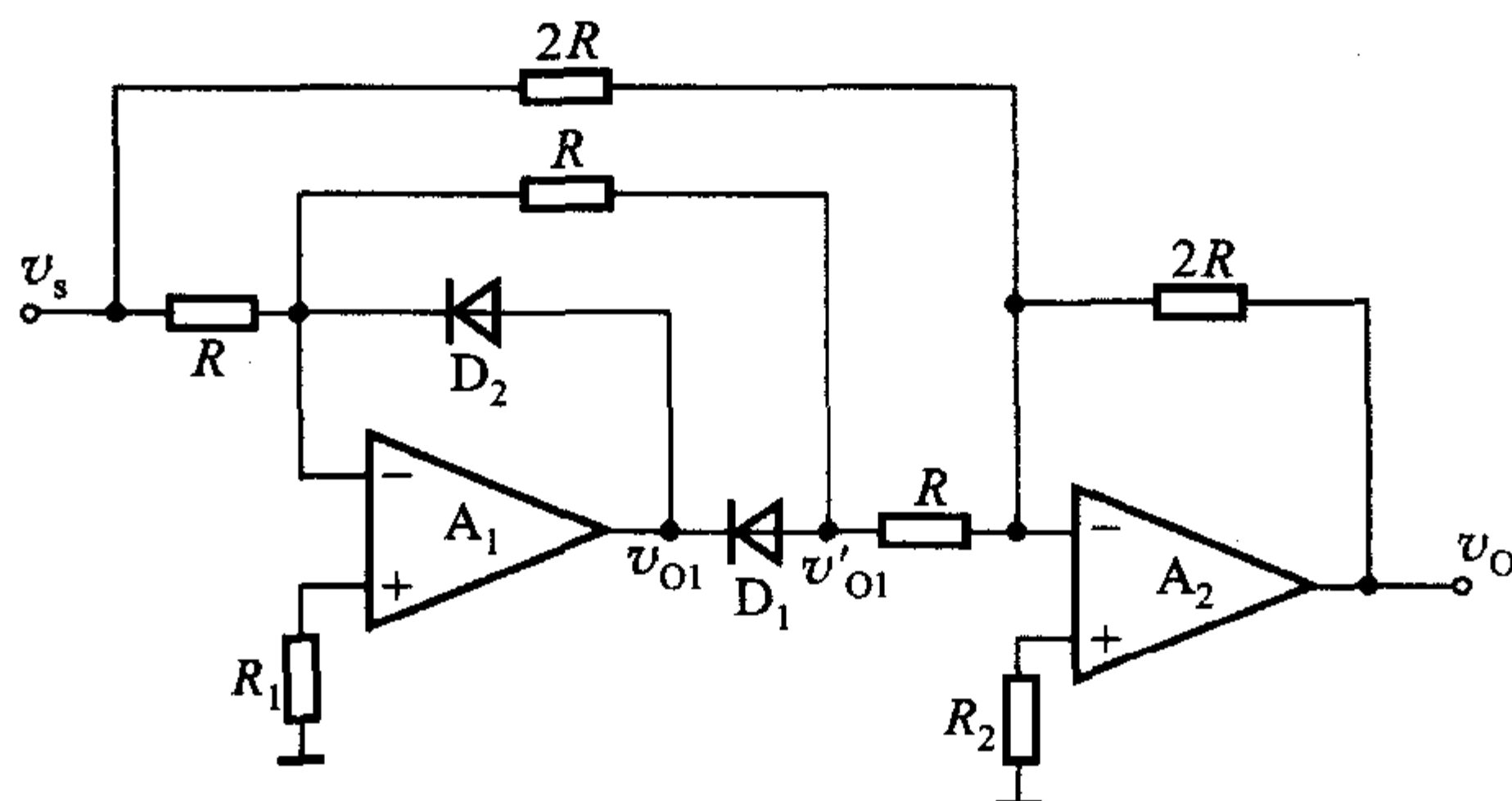
$10\sin \omega t(\text{V})$ 时 v'_{o1} 和 v_o 波形；(3)说明此电路具有取绝对值的功能。



图题 10.1.4



图题 10.1.5



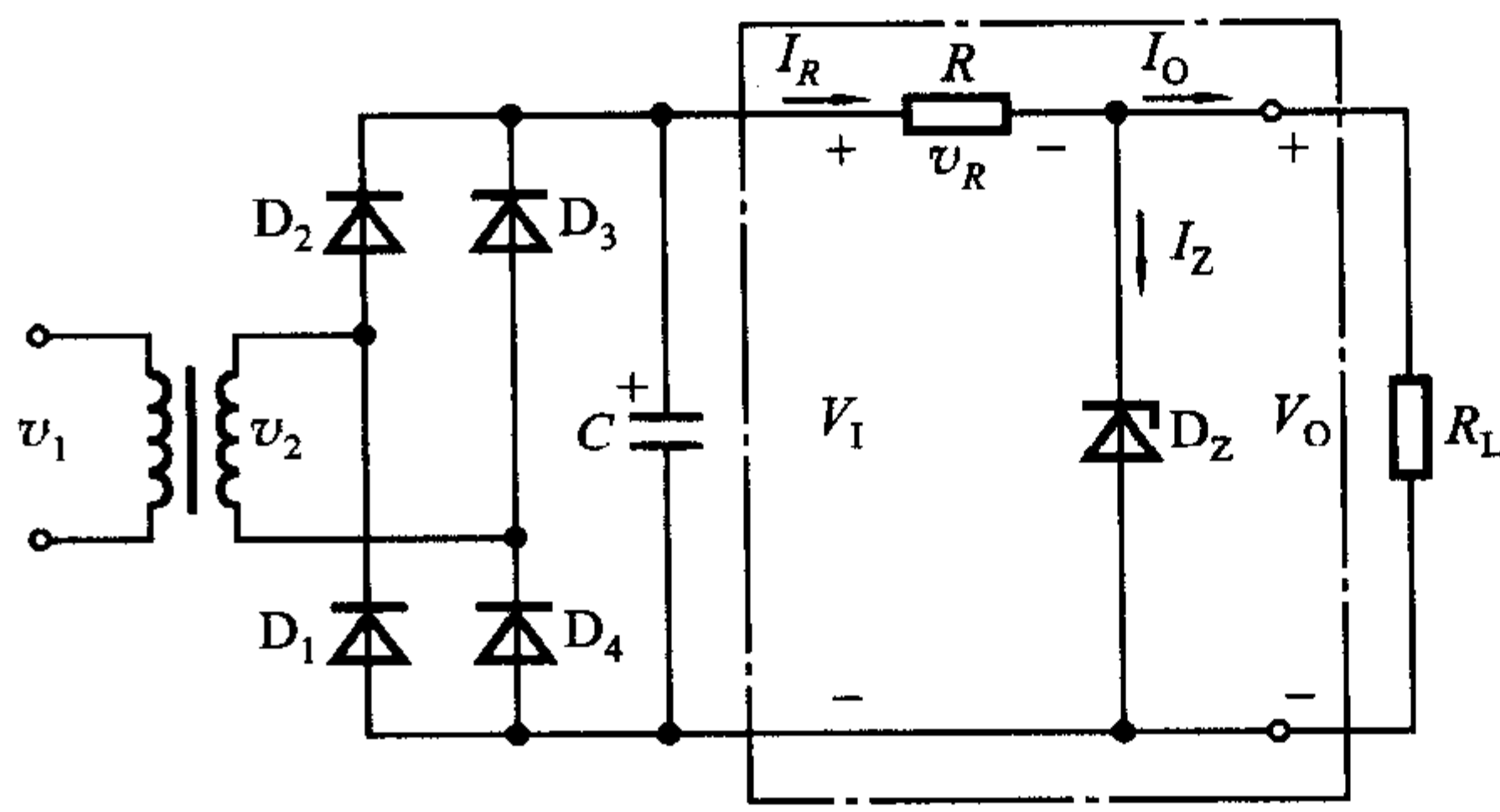
图题 10.1.6

10.2 串联反馈式稳压电路

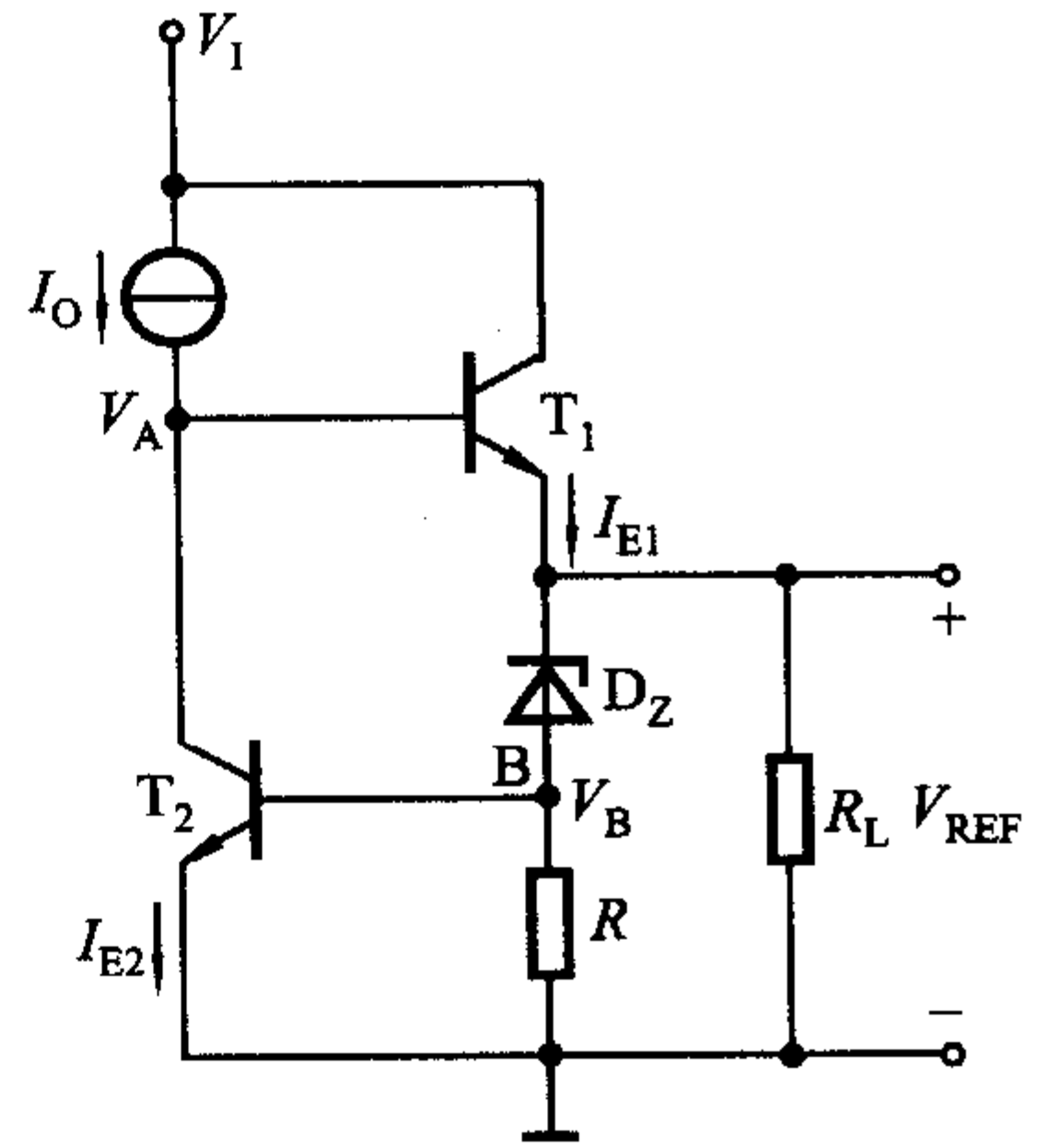
10.2.1 并联稳压电路如图题 10.2.1 所示，稳压管 D_z 的稳定电压 $V_z = 6\text{V}$ ， $V_1 = 18\text{V}$ ， $C = 1000\mu\text{F}$ ， $R = 1\text{k}\Omega$ ， $R_L = 1\text{k}\Omega$ 。(1)电路中稳压管接反或限流电阻 R 短路，会出现什么现象？(2)求变压器二次电压有效值 V_2 、输出电压 V_o 的值；(3)若稳压管 D_z 的动态电阻 $r_z = 20\Omega$ ，求稳压电路的内阻 R_o 及 $\Delta V_o/\Delta V_1$ 的值；(4)将电容器 C 断开，试画出 v_1 、 v_o 及电阻 R 两端电压 v_R 的波形。

10.2.2 有温度补偿的稳压管基准电压源如图题 10.2.2 所示，稳压管的稳定电压 $V_z = 6.3\text{V}$ ，BJT T_1 的 $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。 D_z 具有正温度系数 $+2.2\text{mV}/^\circ\text{C}$ ，而 BJT T_1 的 V_{BE1} 具有负温度系数 $-2\text{mV}/^\circ\text{C}$ 。(1)当输入电压 V_1 增大(或负载电阻 R_L 增大)时，说明它的稳压过程和温度补偿作用；(2)基准电压 $V_{REF} = ?$ 并标出电压极性。

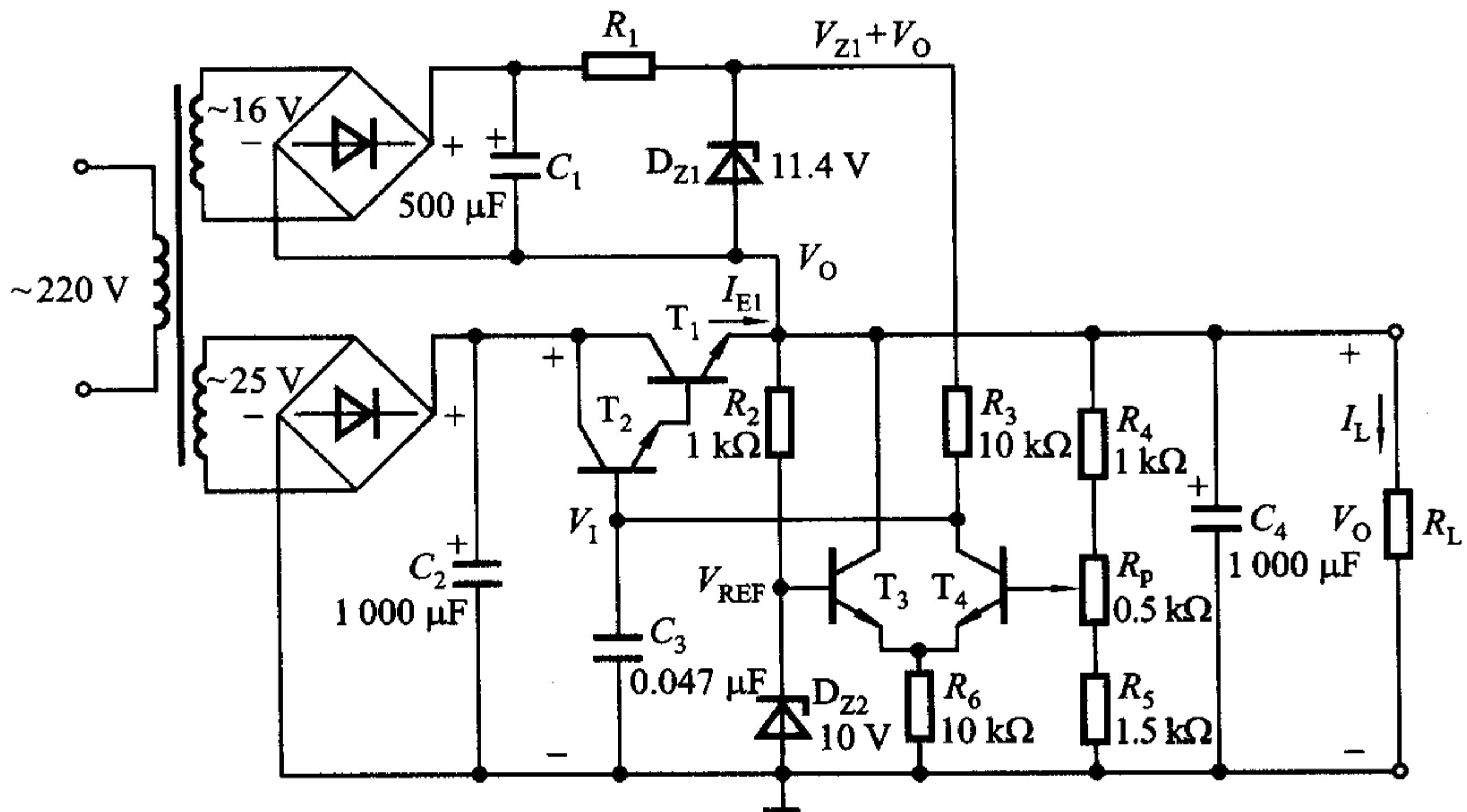
10.2.3 直流稳压电路如图题 10.2.3 所示，已知 BJT T_1 的 $\beta_1 = 20$ ， T_2 的 $\beta_2 = 50$ ， $V_{BE} = 0.7\text{V}$ 。(1)试说明电路的组成有什么特点；(2)电路中电阻 R_3 开路或短路时会出现什么故障；(3)电路正常工作时输出电压的调节范围；(4)当电网电压波动 10% 时，问电位器 R_p 的滑动端在什么位置时， T_1 管的 V_{CE1} 最大，其值为多少？(5)当 $V_o = 15\text{V}$ ， $R_L = 50\Omega$ 时， T_1 的功耗 $P_{C1} = ?$



图题 10.2.1



图题 10.2.2



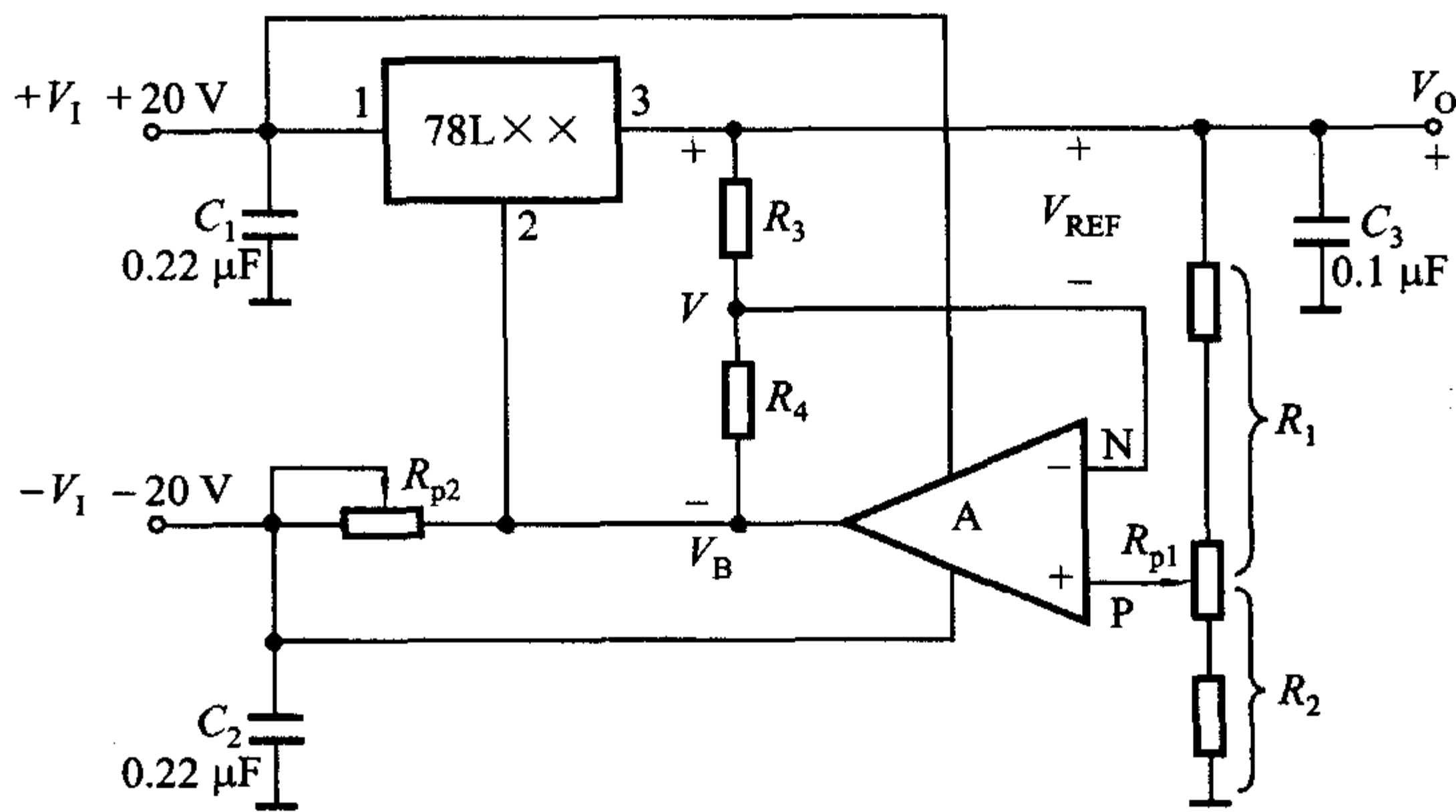
图题 10.2.3

10.2.4 输出电压的扩展电路如图题 10.2.4 所示。设 $V_{32} = V_{xx}$ ，试证明

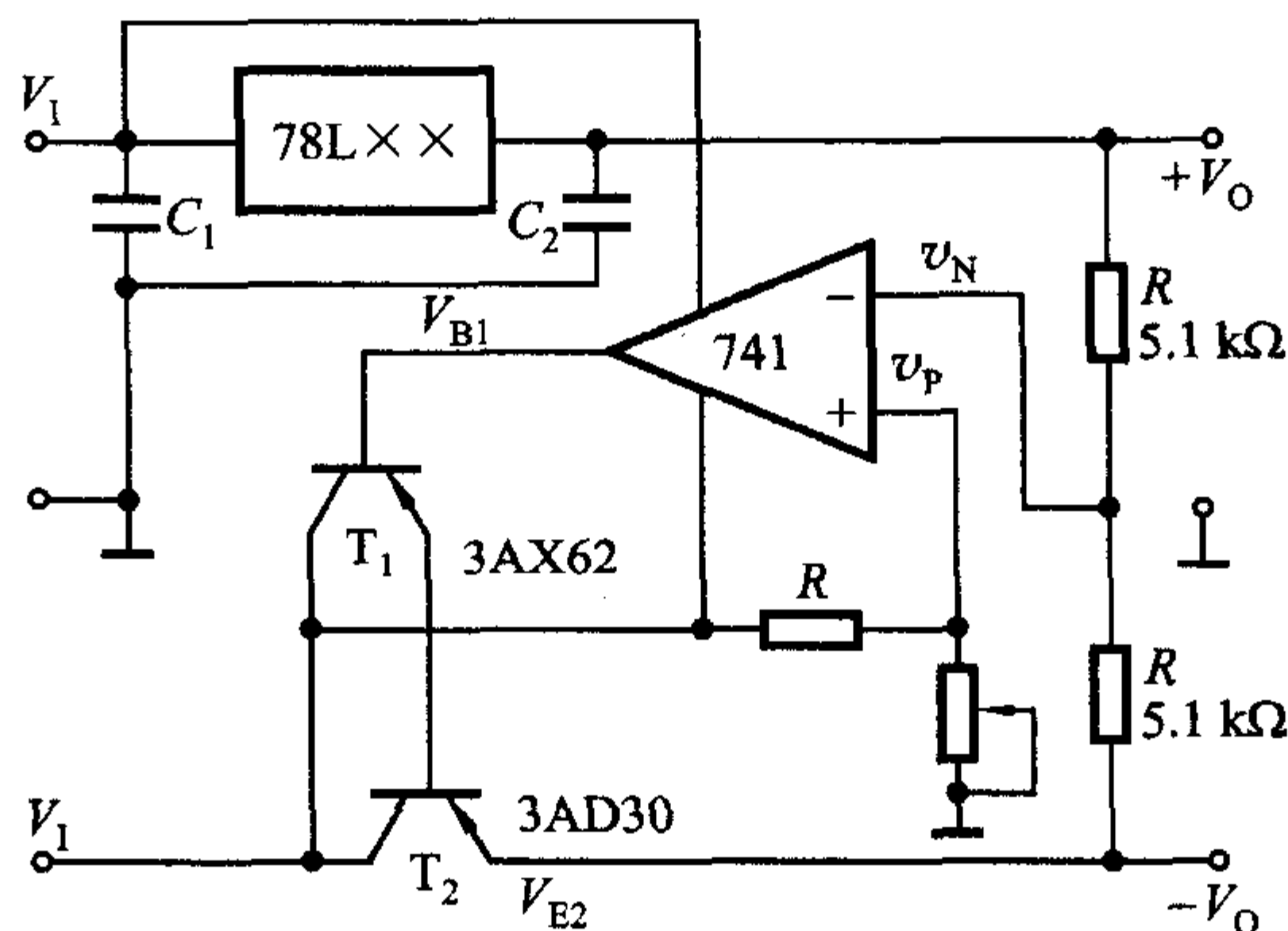
$$V_O = V_{xx} \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} \right) \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$$

10.2.5 图题 10.2.5 是具有跟踪特性的正、负电压输出的稳压电路、78Lxx 为正电源输出电压 $+V_O$ ，试说明用运放 741 和功放管 T_1 、 T_2 使 $-V_O$ 跟踪 $+V_O$ 变化的原理(正常时 $+V_O$ 和 $-V_O$ 是绝对值相等的对称输出)。

10.2.6 图题 10.2.6 是由 LM317 组成输出电压可调的典型电路，当 $V_{31} = V_{REF} = 1.2 \text{ V}$ 时，流过 R_1 的最小电流 I_{Rmin} 为 $(5 \sim 10) \text{ mA}$ ，调整端 1 输出的电流 $I_{adj} \ll I_{Rmin}$ ， $V_1 - V_O = 2 \text{ V}$ 。(1) 求 R_1 的值；(2) 当 $R_1 = 210 \Omega$ ， $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ 时，求输出电压 V_O ；(3) 当 $V_O = 37 \text{ V}$ ，



图题 10.2.4

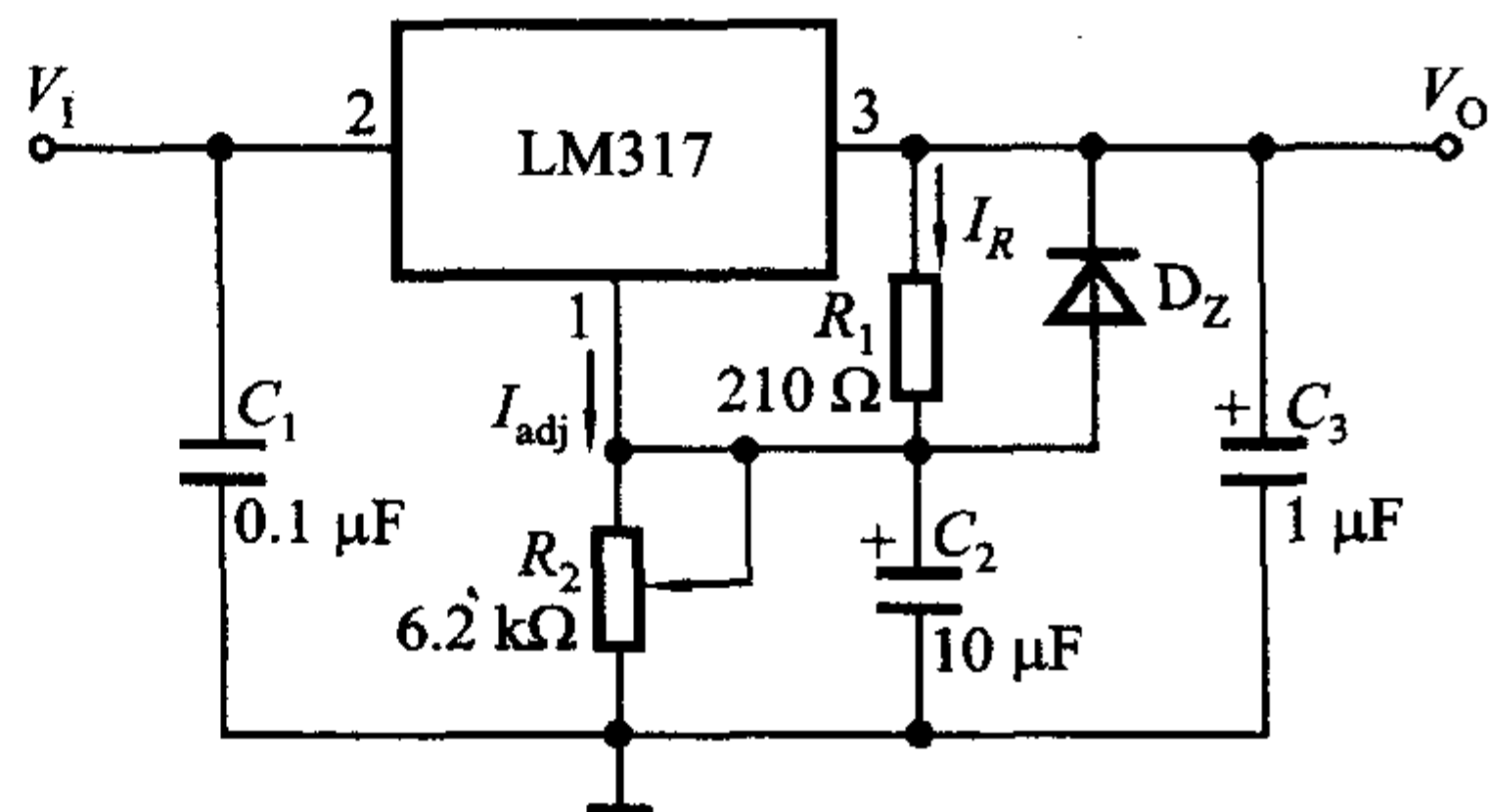


图题 10.2.5

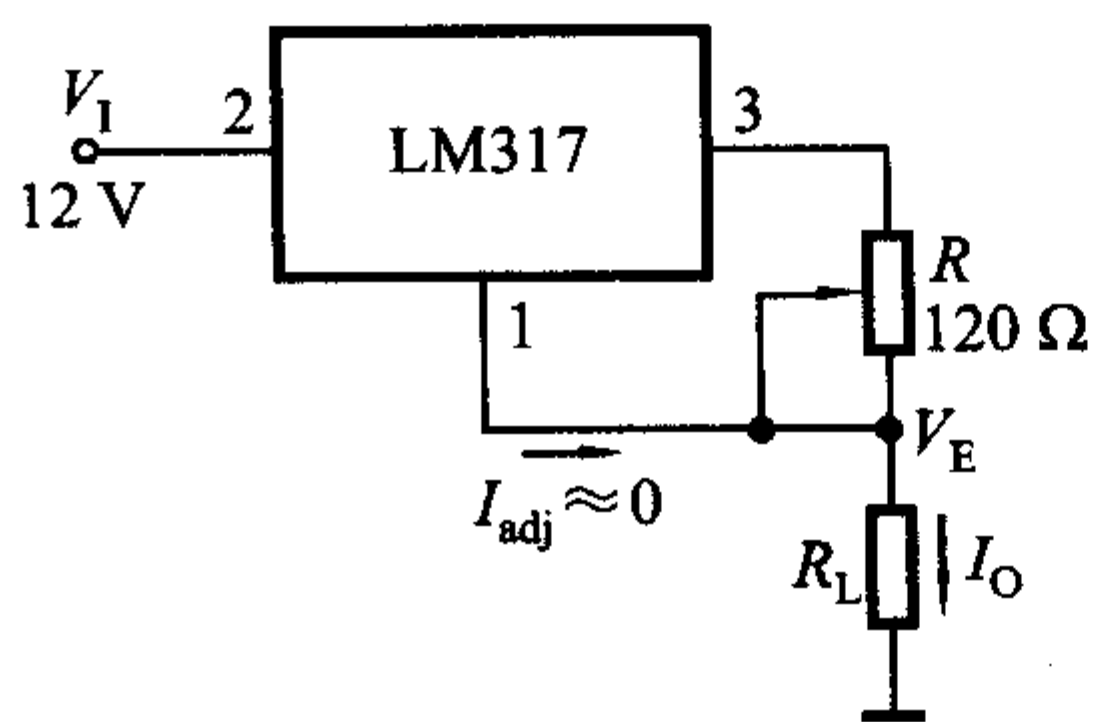
$R_1 = 210 \Omega$ 时, $R_2 = ?$ 电路的最小输入电压 $V_{Imin} = ?$ (4) 调节 R_2 从 0 变化到 $6.2 \text{ k}\Omega$ 时, 输出电压的调节范围。

10.2.7 可调恒流源电路如图题 10.2.7 所示。(1) 当 $V_{31} = V_{REF} = 1.2 \text{ V}$, R 从 $0.8 \sim 120 \Omega$ 改变时, 恒流电流 I_0 的变化范围如何? (假设 $I_{adj} \approx 0$); (2) 当 R_L 用待充电电池代替, 若 50 mA 恒流充电, 充电电压 $V_E = 1.5 \text{ V}$, 求电阻 $R_L = ?$

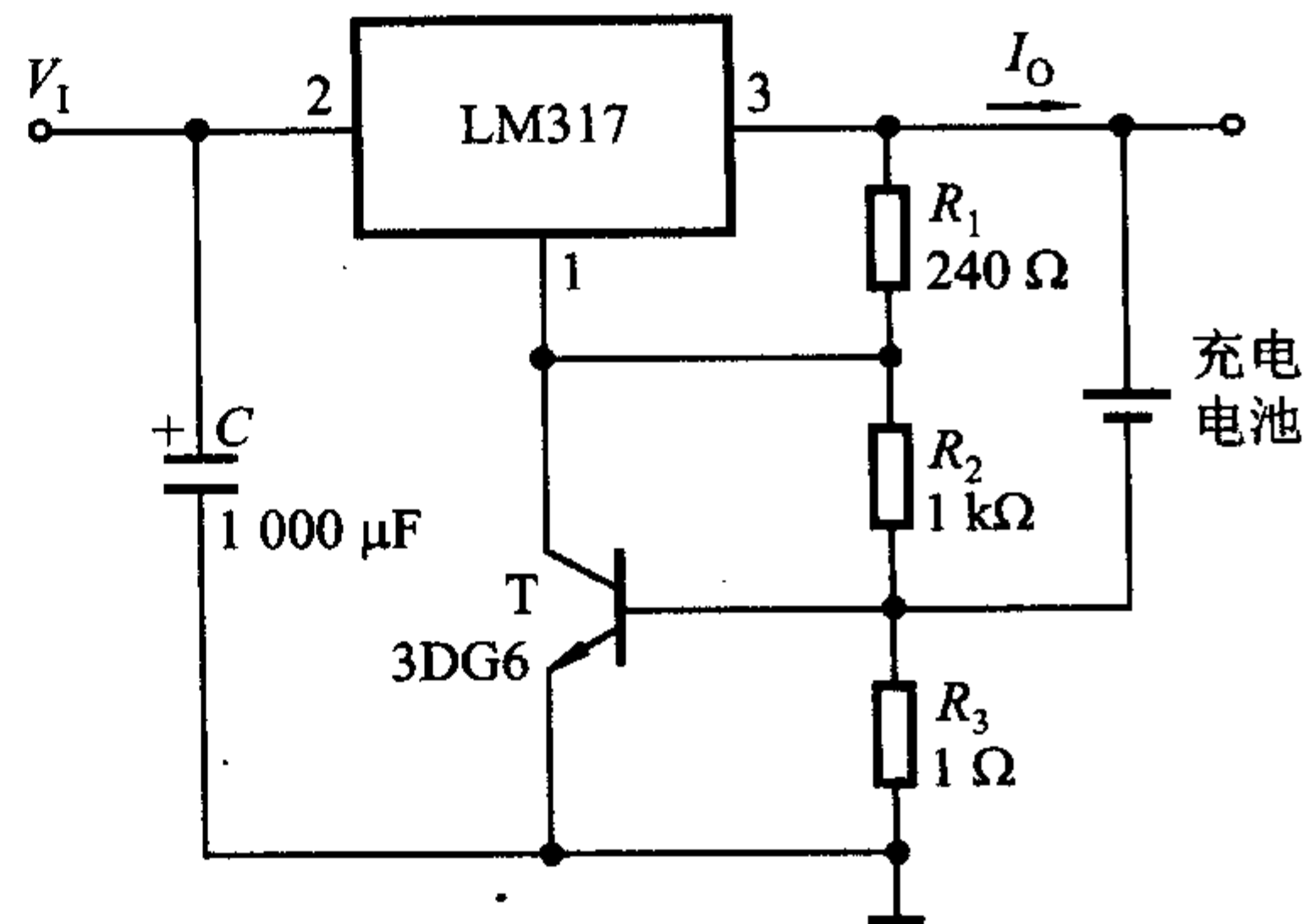
10.2.8 图题 10.2.8 是 6 V 限流充电器, BJT T 是限流管, $V_{BE} = 0.6 \text{ V}$, R_3 是限流取样电阻, 最大充电电流 $I_{OM} = V_{BE}/R_3 = 0.6 \text{ A}$, 说明当 $I_0 > I_{OM}$ 时如何限制充电电流。



图题 10.2.6



图题 10.2.7



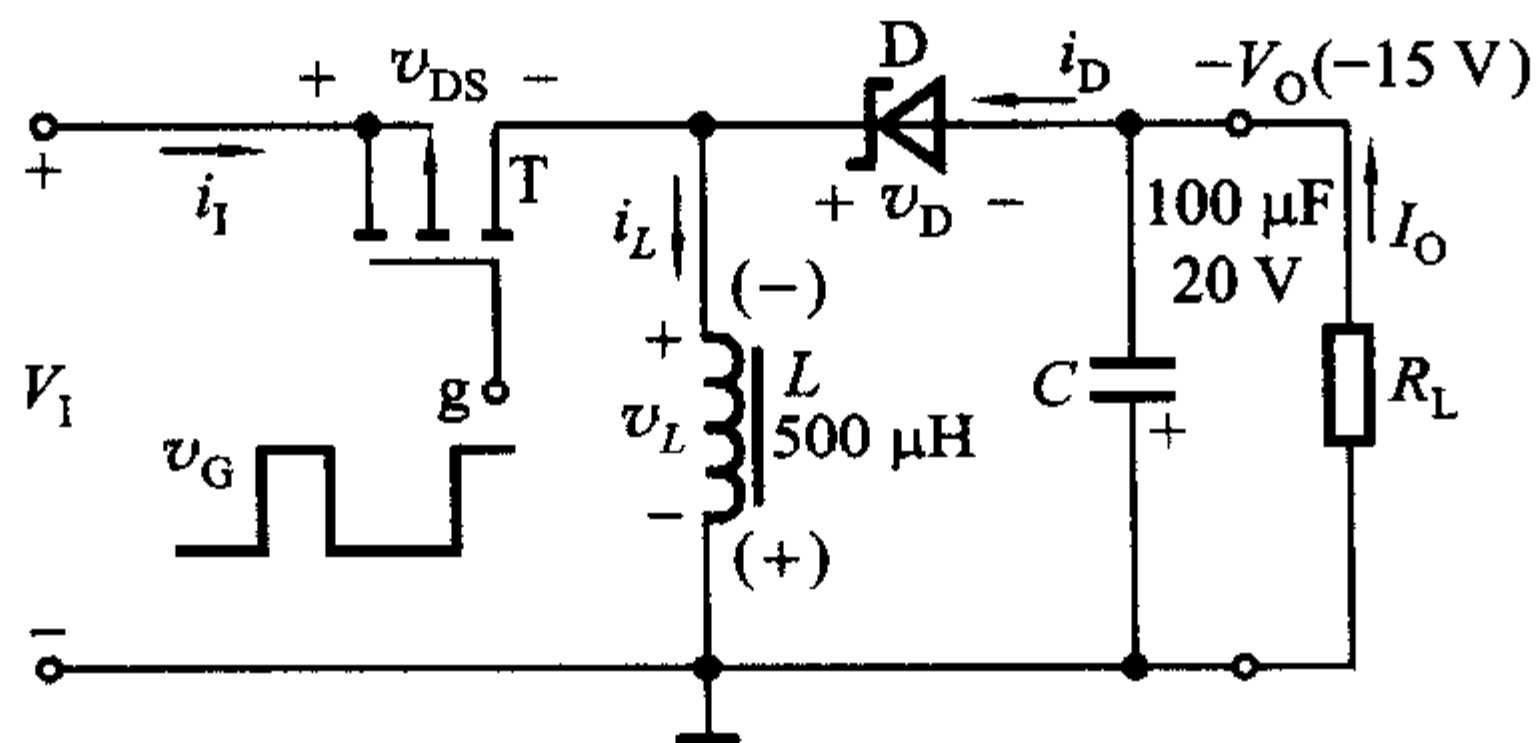
图题 10.2.8

10.3 开关式稳压电路

10.3.1 电路如图 10.3.1 所示, 开关调整管 T 的饱和压降 $V_{CES} = 1\text{ V}$, 穿透电流 $I_{CEO} = 1\text{ mA}$, v_T 是幅度为 5 V 、周期为 $60\text{ }\mu\text{s}$ 的三角波, 它的控制电压 v_B 为矩形波, 续流二极管 D 的正向电压 $V_D = 0.6\text{ V}$ 。输入电压 $V_1 = 20\text{ V}$, v_E 脉冲波形的占空比 $q = 0.6$, 周期 $T = 60\text{ }\mu\text{s}$, 输出电压 $V_0 = 12\text{ V}$, 输出电流 $I_0 = 1\text{ A}$, 比较器 C 的电源电压 $V_{CC} = \pm 10\text{ V}$, 试画出电路中, 当在整个开关周期 i_L 连续情况下 v_T 、 v_A 、 v_B 、 v_E 、 i_L 和 v_0 的波形(标出电压的幅度)。

10.3.2 电路给定条件如上题, 当续流二极管反向电流很小时, 试求(1)开关调整管 T 和续流二极管 D 的功耗;(2)当电路中电感器 L 和电容器 C 足够大时, 忽略 L、C 和控制电路的损耗, 计算电源的效率。

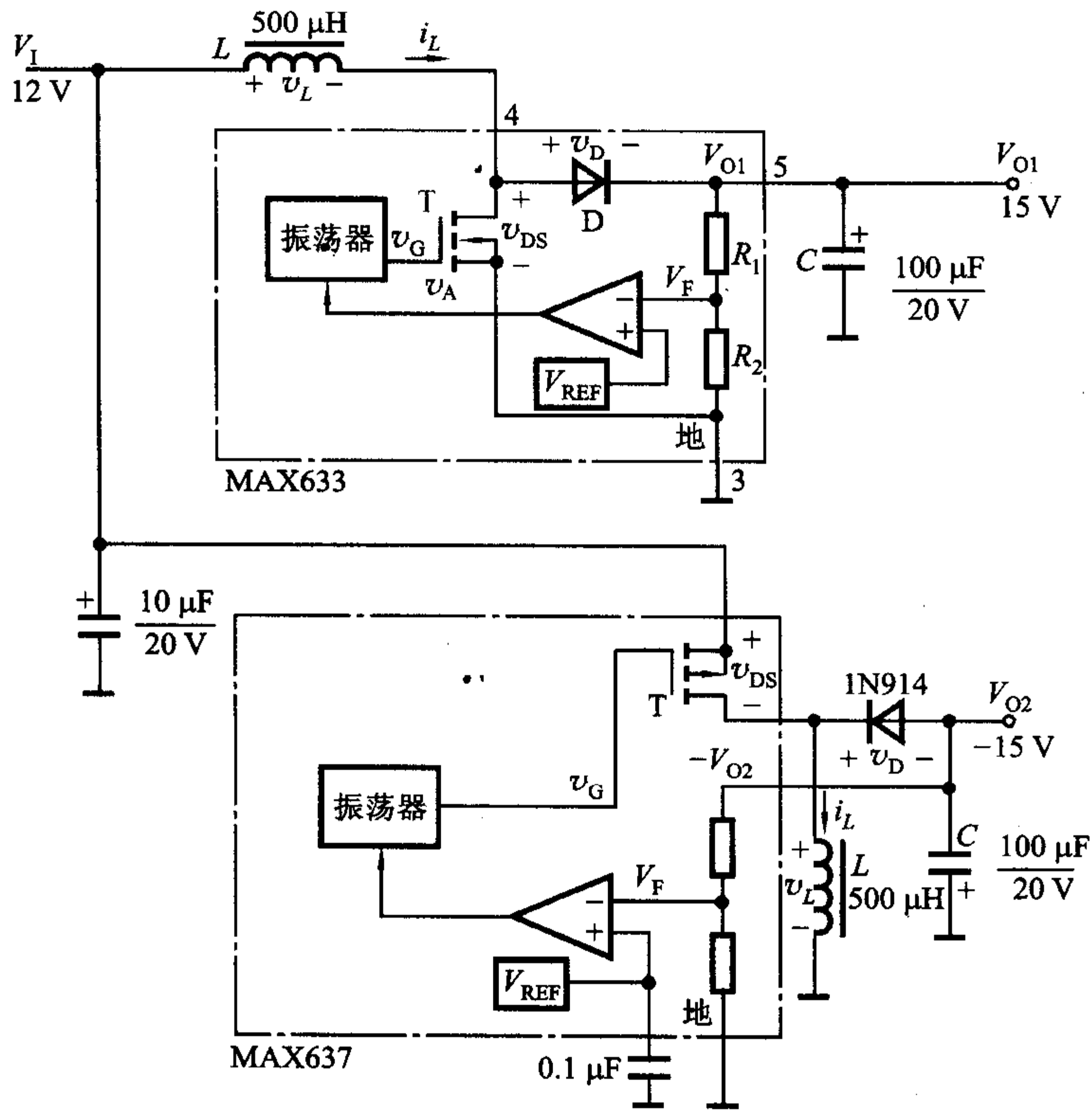
10.3.3 反相(反极性)型开关稳压电路的主回路如图题 10.3.3 所示^①, 已知 $V_1 = 12\text{ V}$, $V_0 = -15\text{ V}$, 控制电压 v_G 为矩形波, 电路中 L、C 为储能元件, D 为续流二极管。(1)试分析电路的工作原理; 已知 V_1 的大小和 v_G 的波形, 画出在 v_G 作用下, i_L 在整个开关周期连续情况下 v_D 、 v_{DS} 、 v_L 、 i_L 和 v_0 的波形, 并说明 v_0 与 v_1 极性相反。



图题 10.3.3

① 该电路的占空比 $q < 0.5$ 时, $V_0 < V_1$; $q > 0.5$ 时, $V_0 > V_1$, 即控制 q 可使电路用于降压或升压场合。

10.3.4 图题 10.3.4 所示是利用集成的升压型 MAX633 和反极型 MAX637，外接电感 L 电容 C 和二极管 D 组成的由 +12 V 汽车电池产生供给运放的 ± 15 V 电源的低功率开关电源，试分析电路的工作原理，当 MOSFET 控制电压 v_c 为矩形波时，在整个开关周期电感电流 i_L 连续情况下分别画出升压型和反极型两组开关稳压电路 v_D 、 v_{DS} 、 i_L 、 v_L 、 v_o 和 V_o 的波形。



图题 10.3.4

* 10.3.5 电路如图 10.3.1 所示，当电路中开关频率 $f_k = \frac{1}{T}$ 和电感 L 较小时，试分析在整个开关周期 T 电感电流 i_L 有断流条件下的工作特性，当 v_B 的波形和 V_I 已知时，画出 v_B 、 i_L 、 v_E 和 v_o 的波形。

10.4 SPICE 仿真习题

SP10.4.1 整流、滤波、稳压电路如图题 10.2.1 所示。设正弦电压 v_2 的振幅为 17 V，频率为 50 Hz，二极管采用 1N4148，稳压管用 1N750，它的 $V_Z = 10$ V， $I_{Z(\min)} = 1$ mA。当负载电流为 50 mA ($R_L = 200 \Omega$) 时，试分析：(1) $C = 1\ 000 \mu\text{F}$ ，正常稳压时， R 的取值范围，并绘出输出电压波形；(2) $R = 40 \Omega$ ，正常稳压时， C 的取值范围，并绘出输出电压波形。

SP10.4.2 绝对值电路如图题 10.1.6 所示， A_1 、 A_2 采用 $\mu\text{A}741$ ，二极管 D_1 、 D_2 用 1N4148，电路中 $R = 10 \text{ k}\Omega$ ，运放工作电压为 ± 12 V，且同相端电阻为零。试用 SPICE 分

析：(1)当输入电压 $v_s = \sin 2\pi \times 1000t$ (V) 时，绘出 v_{o1} 、 v_o 波形；(2)求 $v_s - v_o$ 的传输特性。

SP10.4.3 串联(降压)型开关稳压电路如图 10.3.1 所示，将开关管 BJT 改为 P 沟道增强型 MOSFET，且源极接 V_1 。设电路中输入电压 $V_1 = (10 \sim 15)$ V，输出电压 $V_o = 5$ V，输出最大电流 $I_{o_{max}} = 100$ mA，基准电压 $V_{REF} = 3.5$ V，三角波电压 v_T 的幅值为 $0 \sim 10$ V。取样电阻 $R_1 = 10$ k Ω ， $R_2 = 20$ k Ω 。电容 $C = 100$ μ F，电感 $L = 220$ μ H。试求：(1)当 v_T 的频率 $f_T = 50$ kHz 时，绘出 v_A 、 v_T 、 v_G 、 v_{DS} 、 v_D 、 i_L 和 v_o 的波形，并求 v_o 的纹波值；(2)分别观察输入电压和负载变化时，输出电压的稳压特性；(3)当 $f_T = 5$ kHz 时，观察 v_o 的纹波电压，并与(1)的结果比较。

11

电子电路的计算机辅助分析与设计

引 言



在电子电路设计过程中，设计人员根据给定的电路功能和技术指标，确定最终设计方案(包括电路结构和元器件参数)时，检验设计是否满足预定要求的传统方法是，用人工对电路进行估算并在实验板上组装电路进行实际测试。这一过程往往需要反复多次才有可能得到最佳方案。随着电路规模的增大，这种方法无论在分析精度，花费的人力、物力还是在时间等方面均难以与实际要求相适应。电子电路 CAD 技术可以根据电路的结构和元器件参数，对电路进行仿真，获得电路的技术指标，从而可以快速、方便、精确地评价电路设计的正确性，节省大量的时间和费用。同时，还可以进行传统方法难以进行或无法进行的容差分析、灵敏度分析、最坏情况分析、温度特性分析等，进一步提高电路设计的质量。本章通过例题简要介绍使用国内外比较流行的通用电路分析软件 SPICE(参阅附录 A)，进行电子电路分析与设计的过程，作为电子电路计算机辅助分析与设计的入门。

11.1 电子电路 SPICE 程序辅助分析

用 SPICE 对电路进行仿真, 可获得电路中各节点和支路的响应特性, 它们包括文本方式输出的结果和各种波形及曲线。通过对这些结果的分析, 就可得知电路的功能和技术指标, 从而对电路有一个全面的了解。SPICE 程序的辅助分析既可得到人工分析无法得到的分析结果, 又可以避免实际测试费用高、周期长的缺点。

下面举例说明使用 SPICE 分析电子电路的过程。

例 11.1.1 共射 - 共基串接差分放大电路如图 11.1.1 所示, 所有 BJT 均选择 2N2222 (NPN 型硅管) 模型 (β 最大值为 255.9), 稳压管选用 D1N750 ($V_Z = 4.7\text{ V}$)。试用 SPICE 程序分析: (1) 电路的 Q 点; (2) 当温度从 $0\text{ }^\circ\text{C} \sim 80\text{ }^\circ\text{C}$ 变化时 $T_1 \sim T_4$ 的 I_C 及 V_{CE} 的变化情况; (3) 求单端输入、单端输出时的差模电压增益、共模电压增益和共模抑制比; (4) 求电路的幅频响应。如果没有共基 (T_3, T_4) 电路时, 共射差分式放大电路的幅频响应又将如何? (5) 求电路的电压传输特性; (6) 输入电压幅值为 10 mV 、频率为 1 kHz 的正弦信号, 求输出波形; (7) 将输入正弦波的幅值改为 100 mV , 再求输出波形, 并观察 FFT 变换后的频谱图。同时进行傅里叶分析, 求出非线性谐波失真系数^① (分析到 10 次谐波)。

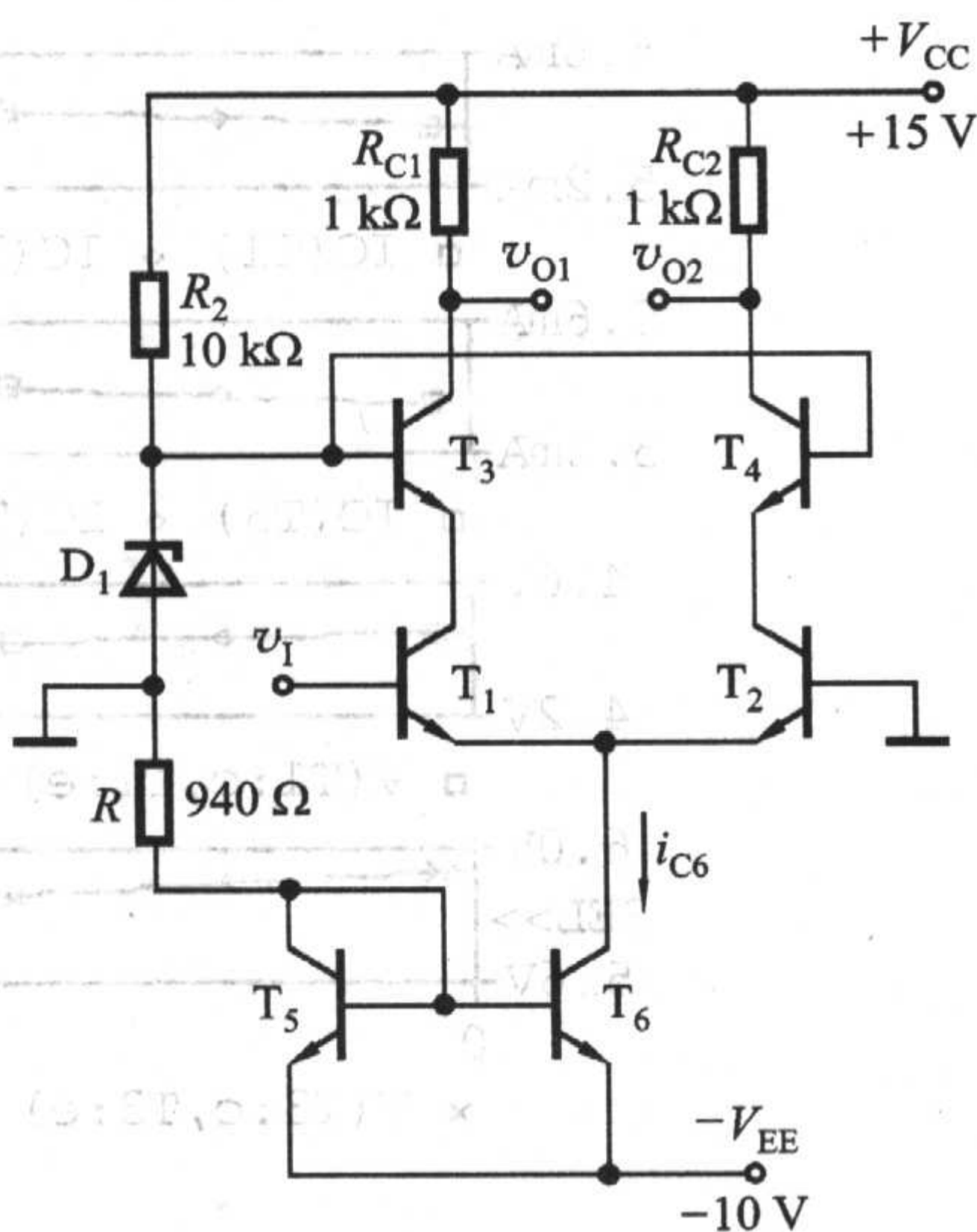


图 11.1.1 共射 - 共基串接差分放大电路

解: 首先在 SPICE 仿真程序中新建一个仿真项目 (Project), 画出电路并设置好各元件和信号源的参数, 再进行各项指标分析。

(1) 电路的 Q 点分析。设置 Bias Point 分析, 在输出文件中可以得到如下

^① 也称为非线性失真系数或谐波失真系数。