

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！



Part 19 直流电源

原作者：b站up主—这个ximo不太冷

直流电源

直流电源概述

电子电路中的直流电源主要分为两种，线性稳压电源和开关稳压电源；

线性稳压电源即调整管（晶体管）工作在放大区（线性区），优点是输出纹波小，结构简单；缺点是效率低，一般体积较大，例如电子电路实验室中的电源设备；

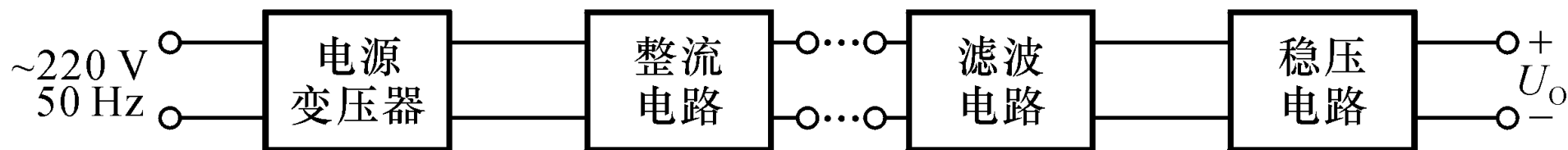
开关稳压电源即调整管（晶体管）工作在开关状态，优点是效率高，体积小成本低，缺点是输出纹波相对较严重，例如手机的充电器（电源适配器）；

模电课程重点关注的是线性稳压电源，开关型电源（又称开关变换器）的更多相关内容在《电力电子技术》课程中会继续展开讲解；

直流电源

要理解每个组成部分的主要作用！

线性稳压电源的基本结构



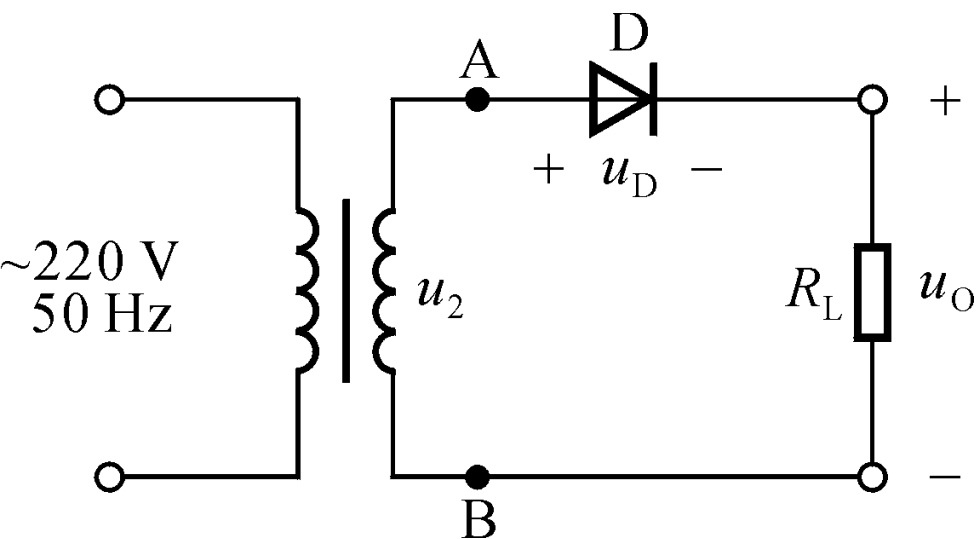
线性稳压电源主要由变压器、整流电路、滤波电路、稳压电路组成：

- 变压器：交流—交流，改变电压大小（一般为降压）；
- 整流电路：交流—直流，将交流正弦波电压转换为单一方向的脉动电压，既含有直流分量又含有交流分量；
- 滤波电路：滤去交流分量，即减小电压的脉动，使输出电压平滑；
- 稳压电路：使输出电压不受电网侧扰动和负载扰动，具有稳定性；

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

整流电路

单相半波整流电路



耐压要看峰值，耐流要看平均值；
1.1倍考虑电网波动，留有裕量；

工作原理：

正半周 D 导通 —— $u_o = u_2$ ；

负半周 D 截止 —— $u_o = 0$ ；

输出电压为正弦半波，峰值为 $\sqrt{2}U_2$ ；

平均值 —— “面积除以横轴跨度”

因此输出电压平均值为 $\frac{\sqrt{2}U_2 \times 2}{2\pi}$
即约为 $0.45U_2$ ；

输出电流平均值与输出电压平均值满足欧姆定律
(原因 —— 纯阻性负载) ；

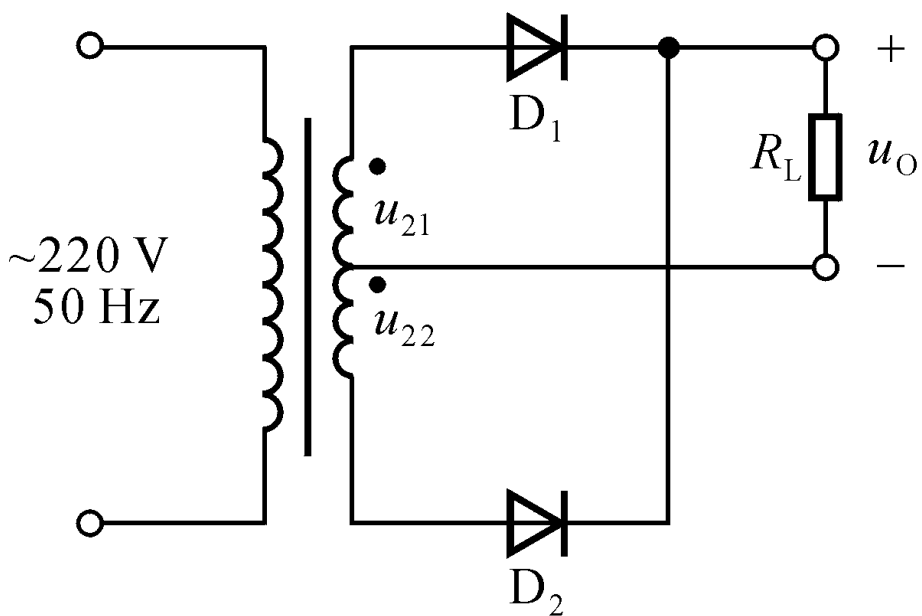
二极管电流应力 —— 1.1倍的输出电流平均值；

二极管电压应力 —— 1.1倍的输出电压峰值；

原作者：b站up主——这个ximo不太冷

整流电路

单相全波整流电路



工作原理：

正半周 D1 导通 —— $u_o = u_{21} > 0$;

负半周 D2 导通 —— $u_o = -u_{22} > 0$;

输出电压为正弦全波，峰值为 $\sqrt{2}U_2$;

(假设 $U_{21} = U_{22} = U_2$)

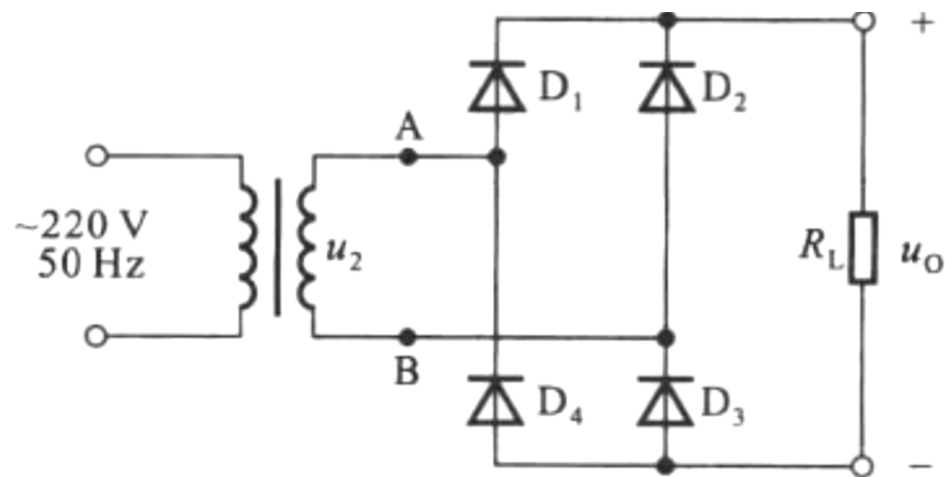
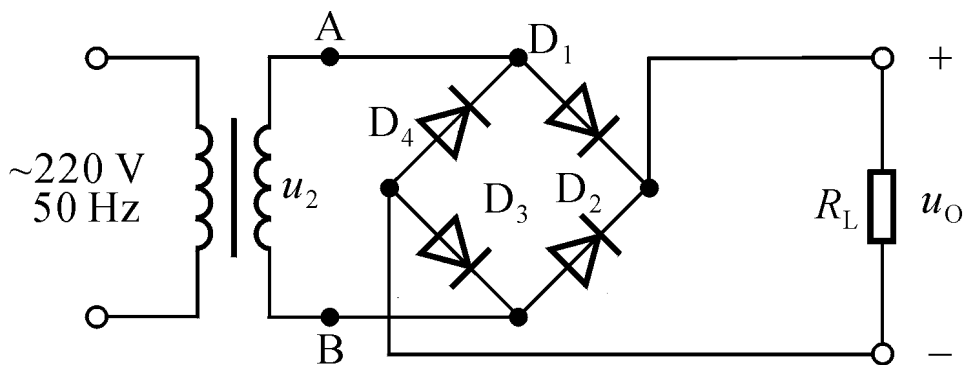
由于是全波，因此输出电压平均值为单相半波时的 2 倍，即 $0.90U_2$; 输出电流平均值与输出电压平均值满足欧姆定律，同样为单相半波时的 2 倍;

每个二极管的平均电流是输出电流平均值的一半，
(原因：每个二极管只有半个周期导通)
因此其二极管电流应力与单相半波时相同;

每个二极管承受的最大反向电压是变压器副边的峰峰值，
(原因：一个截止时另一个导通，与副边短路等电位)
因此其二极管电压应力为单相半波的 2 倍;

整流电路

单相桥式整流电路



工作原理:

结构 —— 两个桥臂，每个桥臂上下两个管；
两个管共阴（D1&D2），两个管共阳（D3&D4）

正半周 D1、D3 导通 —— $u_o = u_2 > 0$;

负半周 D2、D4 导通 —— $u_o = -u_2 > 0$;

输出电压为正弦全波，峰值为 $\sqrt{2}U_2$ ；

由于是全波，因此输出电压平均值为单相半波时的 2 倍，
即 $0.90U_2$ ；输出电流平均值与输出电压平均值满足欧姆定律，
同样为单相半波时的 2 倍；

每个二极管的平均电流是输出电流平均值的一半，
(原因：每个二极管只有半个周期导通)
因此其二极管电流应力与单相半波时相同；

D1 截止时，D2 导通，而 D1、D2 共阴极；
即每个管子截止时的端电压就是副边电压；
因此其二极管电压应力与单相半波时相同；

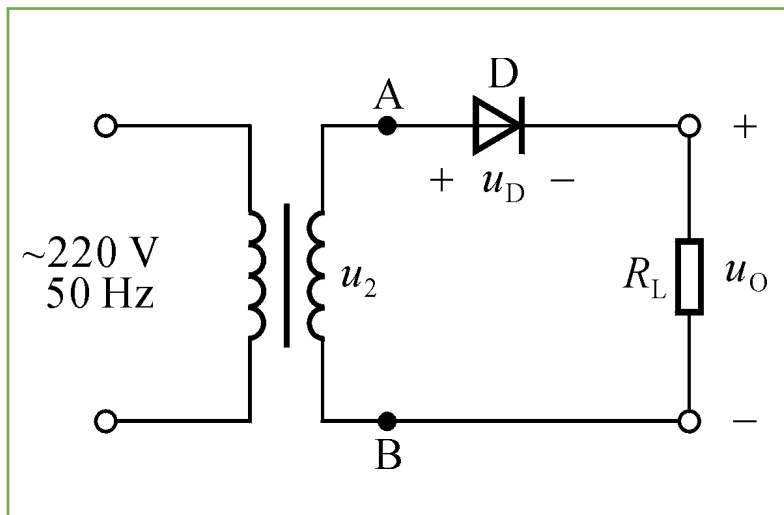
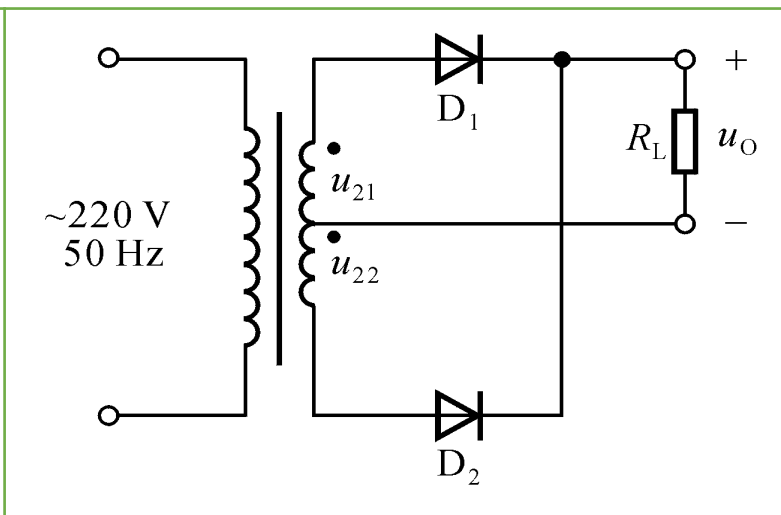
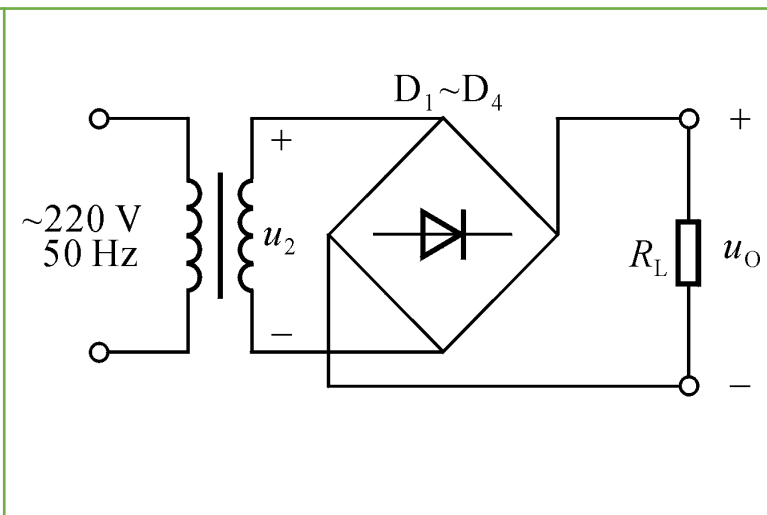
这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
 课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

不要死记硬背结论！
 最重要的是掌握整流电路工作的原理，
 会判断二极管的工作状态！

整流电路

整流电路小结

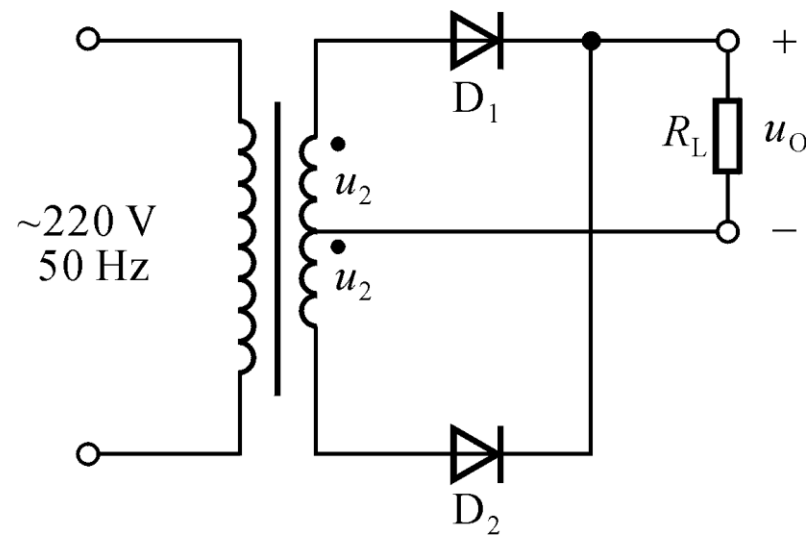
		
$U_{o(av)} = 0.45U_2 \quad I_{o(av)} = \frac{0.45U_2}{R_L}$	$U_{o(av)} = 0.90U_2 \quad I_{o(av)} = \frac{0.90U_2}{R_L}$	$U_{o(av)} = 0.90U_2 \quad I_{o(av)} = \frac{0.90U_2}{R_L}$
$I_F > 1.1 \times I_{o(av)}$ $U_{RM} > 1.1 \times \sqrt{2}U_2$	$I_F > 1.1 \times 0.5 \times I_{o(av)}$ $U_{RM} > 1.1 \times 2 \times \sqrt{2}U_2$	$I_F > 1.1 \times 0.5 \times I_{o(av)}$ $U_{RM} > 1.1 \times \sqrt{2}U_2$

整流电路

例 1

电路如图所示，变压器副边电压有效值为 $2U_2$ ；

- (1) 画出 u_2 、 u_{D1} 和 u_O 的波形；
- (2) 求出输出电压平均值 $U_{O(AV)}$ 和输出电流平均值 $I_{O(AV)}$ 的表达式；
- (3) 求解变压器副边电流的有效值表达式；
- (4) 二极管的平均电流 $I_{D(AV)}$ 和所承受的最大反向电压 U_{rmax} 的表达式；
- (5) 二极管选取时电流应力 I_D 和电压应力 U_R 应满足什么条件？

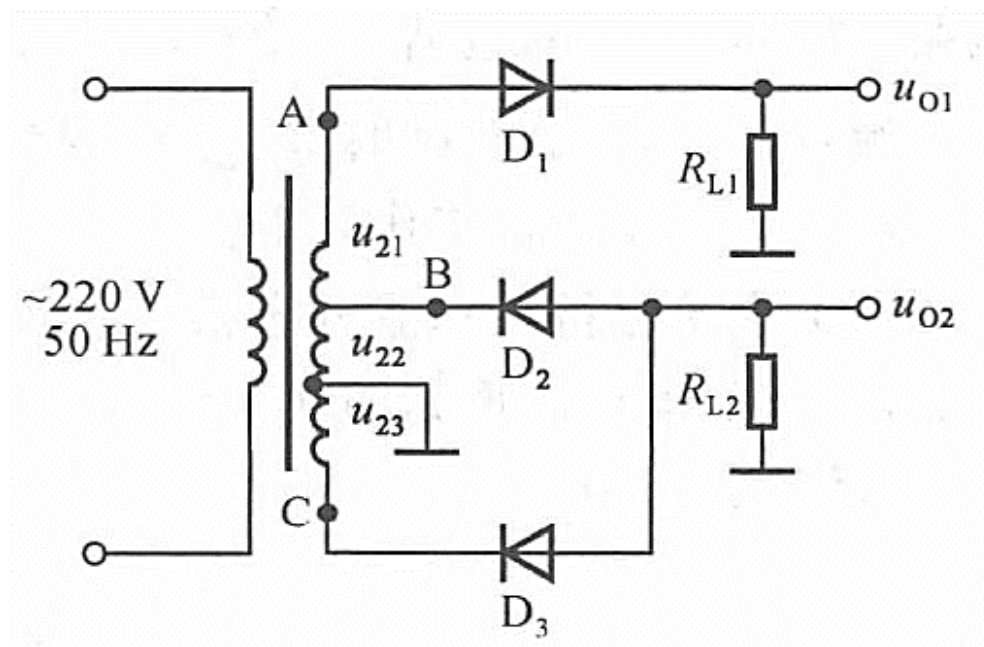


整流电路

例 2

电路如图所示，变压器副边电压有效值为 $U_{21} = 60\text{V}$ ，
 $U_{22} = U_{23} = 30\text{V}$ ；

- (1) 画出 u_{O1} 和 u_{O2} 的波形；
- (2) 求出输出电压平均值 $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ ；
- (3) 考虑电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，则二极管 D_1 、 D_2 、 D_3 的最大反向电压如何选取？
- (4) 若在 R_{L2} 两端并联一个电容 C ，且满足 $R_{L2}C = 2T$ (T 为电网电压周期)，则 $U_{O2(\text{AV})}$ 为多少？

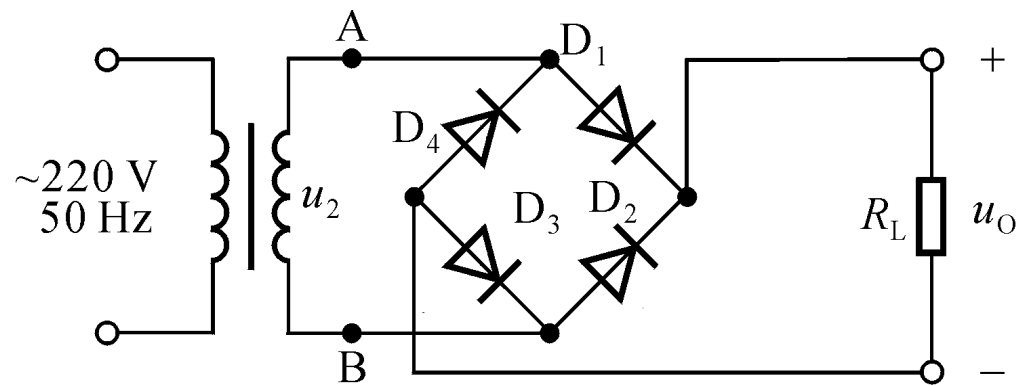


整流电路

例 3

电路如图所示，已知变压器二次电压有效值 $U_2 = 30\text{V}$ ，负载电阻 $R_L = 100\Omega$ ，试问：

- (1) 输出电压与输出电流平均值各为多少？
- (2) 当电网电压波动范围为 $\pm 10\%$ ，二极管的最大整流平均电流 I_F 和最高反向工作电压 U_{RM} 至少应选取多少？
- (3) 若整流桥中的二极管 D_1 开路或短路，则分别产生什么现象？

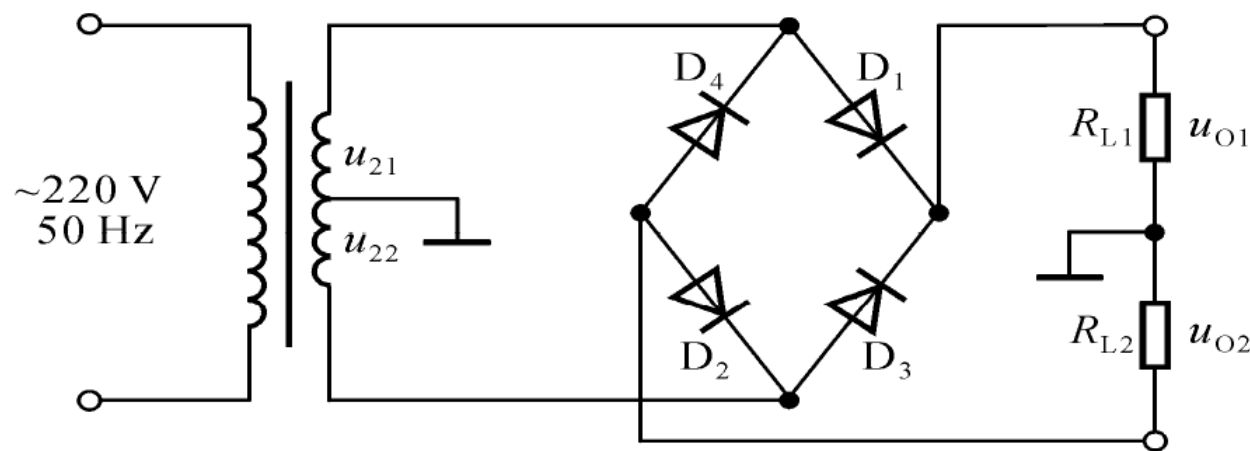


整流电路

例 4

电路如图所示；

- (1) 若变压器副边电压有效值为 $U_{21}=20\text{V}$, $U_{22}=20\text{V}$, 则 $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ 各为多少？
- (2) 若变压器副边电压有效值为 $U_{21}=18\text{V}$, $U_{22}=22\text{V}$, 则 $U_{O1(\text{AV})}$ 和 $U_{O2(\text{AV})}$ 各为多少？
并绘制此时 u_{O1} 和 u_{O2} 的波形；

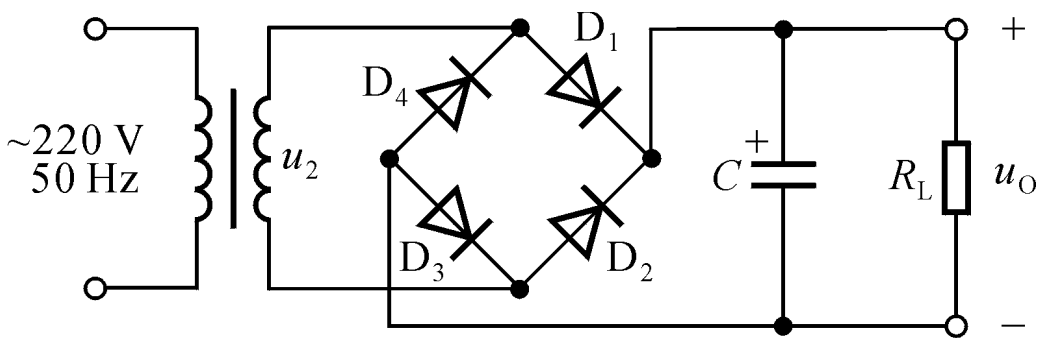


请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

滤波电路

思考：直流电源中的滤波电路属于哪一基本类型？
(低通/高通/带通/带阻？)

电容滤波电路



线性稳压电源中的滤波电路一般是无源滤波网络，
即由电感、电容、电阻元件组成的滤波网络；

滤波网络的作用是将整流电路输出的既含有直流成分又含有交流成分的信号中的交流成分滤去，
减小电压的脉动，使输出电压的波形变得平滑；
最理想的情况即只保留直流成分；

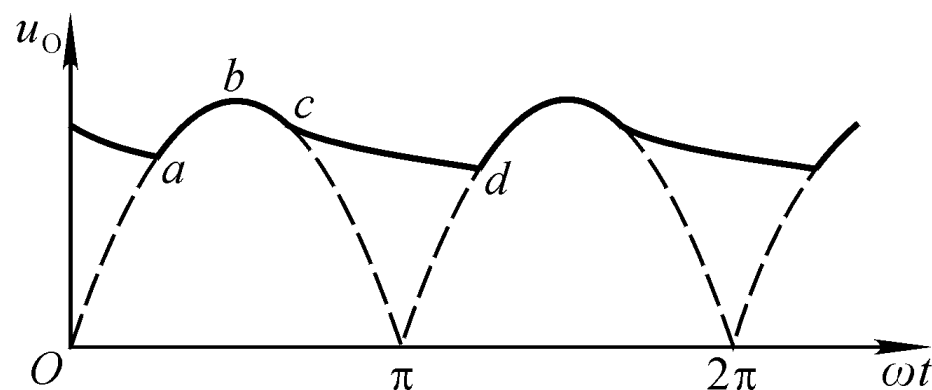
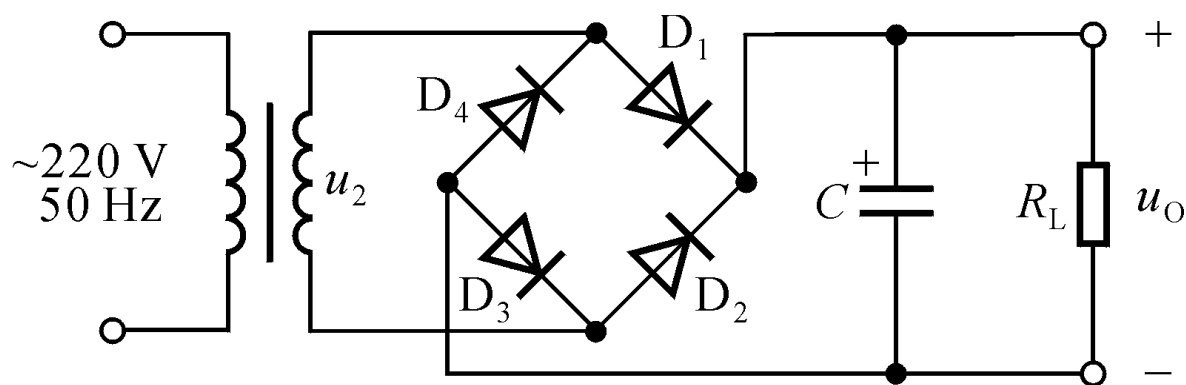
滤波电路有很多种，本小节我们只研究最简单的
电容滤波电路，即在整流电路的输出端直接并联
一个电容；

电容滤波电路

思考：

如果没有负载电阻（空载，负载电阻开路），
输出电压会发生什么现象？

电容滤波电路的基本原理



电容的电压不能突变；

$|u_2| > u_c$ 整流电路工作 —— 电网侧向电容充电；

$|u_2| < u_c$ 整流电路截止 —— 电容向负载电阻放电；

电容回路的时间常数越大，充放电速率越慢，电压波形变化得越平缓，即脉动越小，
因此交流成分越少，输出电压越接近直流电压，电压平均值增大。

输出电压的平均值背下来即可，为经验值
无需掌握推导过程！

电容滤波电路

电容滤波电路的计算小结

单相半波整流电容滤波电路

$$R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2}, U_{o(av)} = U_2$$

单相全波整流电容滤波电路

$$R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2}, U_{o(av)} = 1.2U_2$$

单相桥式整流电容滤波电路

$$R_L C = (3 \sim 5) \frac{T}{2}, U_{o(av)} = 1.2U_2$$

若负载开路，即空载，则稳态时输出电压的平均值为变压器副边的峰值（原因：负载开路，没有放电回路）

$$U_{RM} > 1.1 \times 2\sqrt{2}U_2$$

$$U_{RM} > 1.1 \times 2\sqrt{2}U_2$$

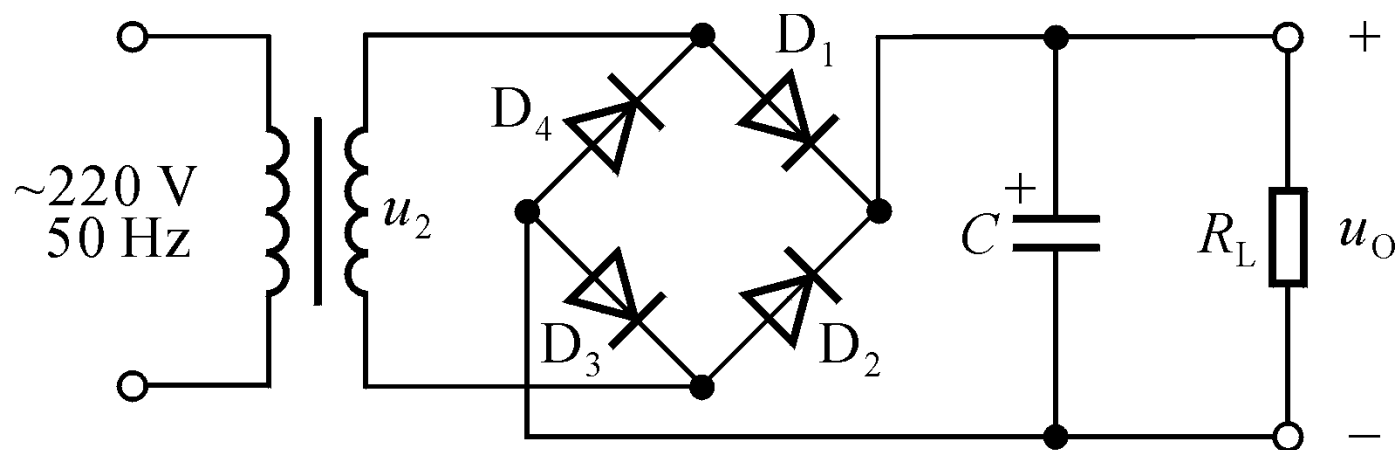
$$U_{RM} > 1.1 \times \sqrt{2}U_2$$

思考：这个地方为什么要乘以 2？（二极管阴极侧为电容，电容电位不能突变）

电容滤波电路

例 5

单相桥式整流电容滤波电路如图所示，已知变压器副边电压有效值为 10V ，求解下列情况时，负载输出电压的平均值 $U_{O(AV)}$ 大小：



(1) 正常情况

(2) 电容虚焊（开路）

(3) 空载（负载电阻开路）

(4) 一个整流管开路

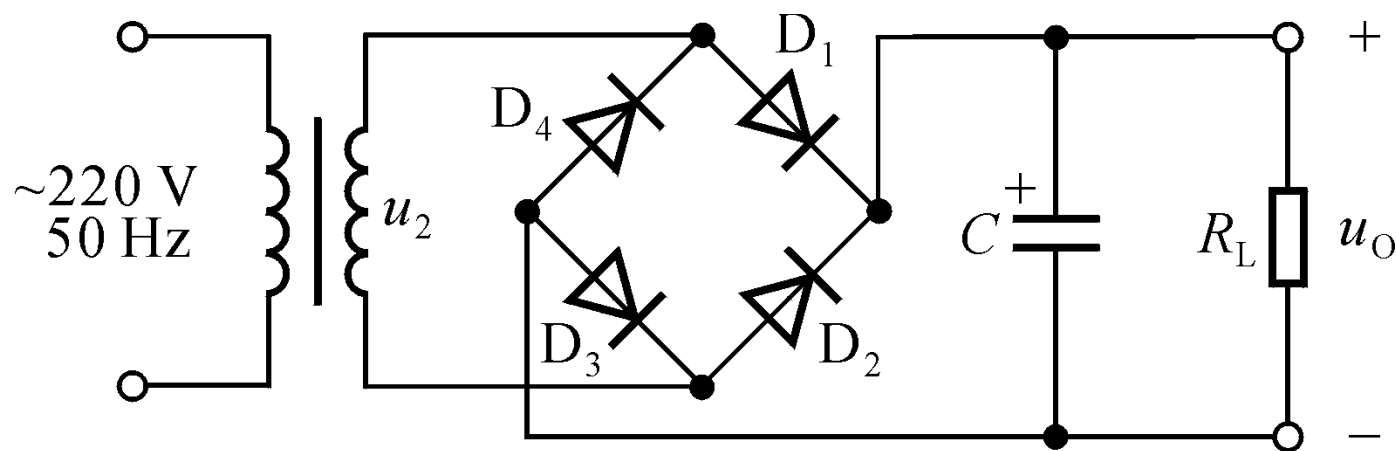
(5) 一个整流管和滤波电容同时开路

(6) 一个整流管接反

电容滤波电路

例 6

单相桥式整流电容滤波电路如图所示，已知变压器副边电压有效值为 10V ，分析输出电压平均值为以下值时，电路可能发生了什么故障：



(1) 14.1V

(2) 9V

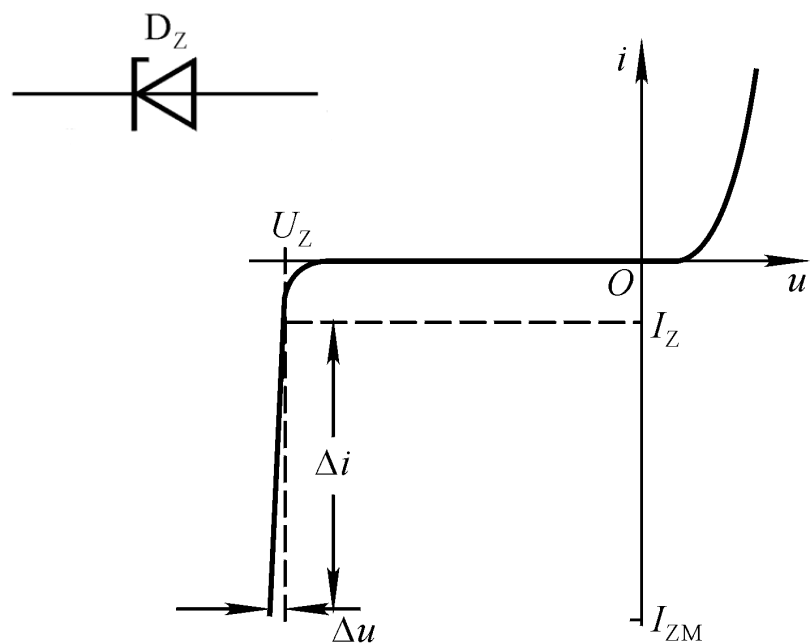
(3) 4.5V

(4) 10V

(5) 0V ，变压器烧坏

稳压管 —— 回顾

○ 稳压二极管的伏安特性和工作状态



正向导通： $u > 0$

反向截止： $u < 0$ 且 $|u| < U_Z$ ，即假设 $|u| = U_Z$ 而 $|i| < I_{Zmin}$

反向击穿——稳压区： $|u| = U_Z$ ， $I_{Zmin} < |i| < I_{Zmax}$

反向击穿——烧毁： 假设 $|u| = U_Z$ 而 $|i| > I_{Zmax}$

稳压管 —— 回顾

○ 稳压管的主要参数

稳定电压 U_Z ：即稳压管工作在稳压区的反向击穿电压

稳定电流 I_Z ：即稳压管工作在稳压区的最小允许电流，也可记作 I_{Zmin} ，电流大小低于此值无法稳压；

额定功耗 P_{ZM} ：稳压管工作在稳压区的最大允许功率，功率大于此值时稳压管会烧坏；这一参数同时对应着稳压管稳压区的最大允许电流 I_{ZM} （ I_{Zmax} ）；

↓

$$I_{ZM}(\text{即 } I_{Zmax}) = \frac{P_{ZM}}{U_Z}$$

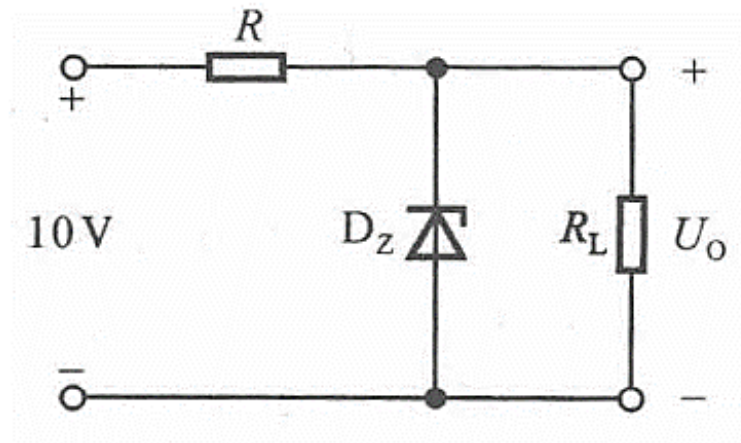
原作者：b站up主 这个ximo不太冷

请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

稳压管稳压电路

例 7

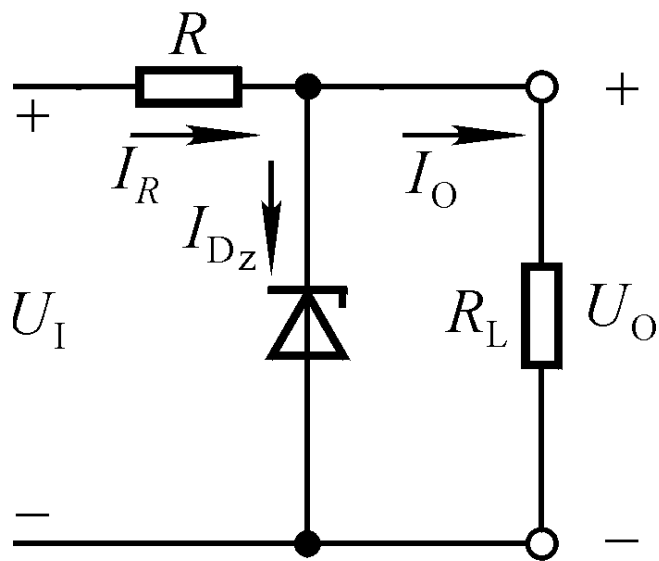
如图所示，已知稳压管稳压值为 6 V ，稳定电流的最小值 $I_{Z\min}=5\text{ mA}$ ；负载电阻为 $5\text{ k}\Omega$ ；求解当电阻 $R=500\Omega$ 或 $2\text{ k}\Omega$ 时两种情况下的 U_O 各为多少？



原作者：b站up主—这个ximo不太冷

稳压管稳压电路

○ 稳压管稳压电路的工作原理



稳压的目标主要是抑制来自电网侧即输入侧以及负载侧即输出侧的扰动，即输入电压波动（电网电压波动）和负载电流波动；

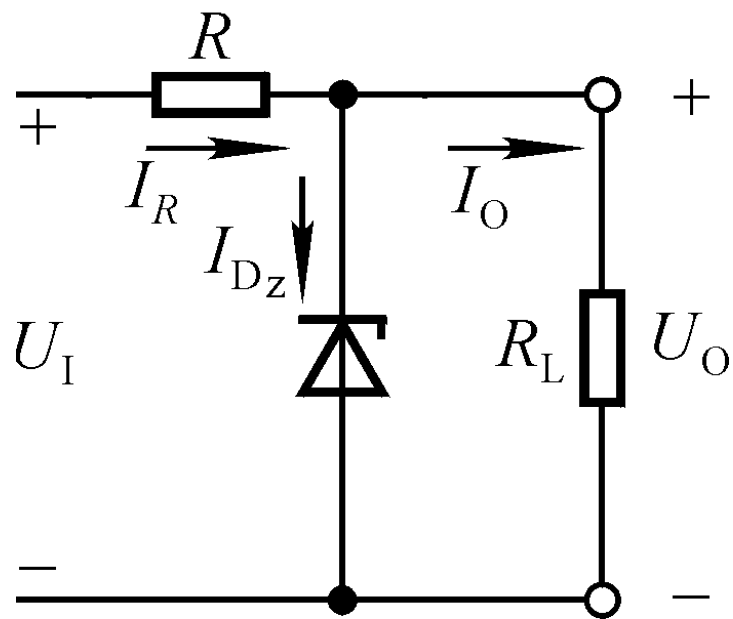
$$U_I = U_R + U_O$$

$$I_R = I_{DZ} + I_L$$

$$I_R = \frac{U_R}{R}$$

稳压管稳压电路

○ 稳压管稳压电路的工作原理 —— 小结



限流电阻 R 上的电压和输出电压之和被输入电压钳位（KVL），输入电压即前级滤波电路的输出电压；稳压管支路电流等于流过限流电阻 R 的电流与负载电流之差（KCL）；

当输入电压有扰动 \uparrow / \downarrow 时，通过限流电阻 R 上电压变化补偿；
当负载电流有扰动 \uparrow / \downarrow 时，通过稳压管支路的电流变化补偿；

电路由于 **KCL 和 KVL 的相互限制** 会抑制扰动，具有**负反馈效应**，实现稳压；

稳压管稳压电路

○ 稳压管稳压电路电路参数的选择

电路参数选择的基本原则 —— 稳压管工作在稳压区，即稳压管所在支路的电流要满足 $I_Z < I_{DZ} < I_{ZM}$ 即 $I_{Zmin} < I_{DZ} < I_{Zmax}$ 即 $I_{Zmin} < I_{DZ} < P_{ZM} / U_Z$ ；

① 输入电压 U_I 的选择：根据经验值， $U_I = (2 \sim 3) U_Z$ ，因此设计直流电源电路时，实际是“从后往前”设计，根据稳压电路的输出电压要求来确定整流滤波电路的输出电压，从而确定前级电路的参数；

② 稳压管的选择：

稳压管的稳压值即为输出电压的大小 —— $U_Z = U_O$ ；

由于稳压管支路的电流的作用是补偿负载电流的变化，因此稳压管支路的电流变化范围要大于给定的负载电流变化范围 —— $I_{ZM} - I_Z > I_{Lmax} - I_{Lmin}$ ；

稳压管稳压电路

思考：

如果计算出的 R 的最小值大于 R 的最大值，
即区间为空集，
说明什么？
(说明稳压管选择不当，
应重新选择稳压管)

稳压管稳压电路电路参数的选择

③ 限流电阻的选择：保证 $I_{DZmin} > I_Z$ 且 $I_{DZmax} < I_{ZM}$

\downarrow \downarrow \downarrow \downarrow
实际的最小值 参数 实际的最大值 参数

电网电压最低且负载电流最大时，稳压管的电流最小；

$$I_{DZmin} = \frac{U_{Imin} - U_Z}{R} - I_{Lmax} > I_Z \quad R < \frac{U_{Imin} - U_Z}{I_Z + I_{Lmax}}$$

电网电压最高且负载电流最小时，稳压管的电流最大；

$$I_{DZmax} = \frac{U_{Imax} - U_Z}{R} - I_{Lmin} < I_{ZM} \quad R > \frac{U_{Imax} - U_Z}{I_{ZM} + I_{Lmin}}$$

分析的
基础：

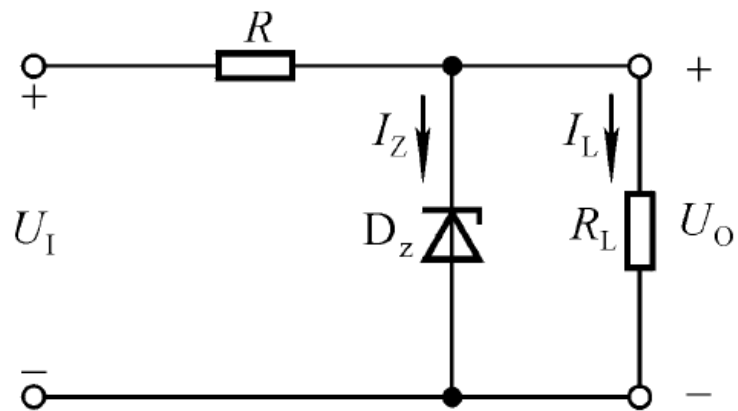
$$\begin{aligned} U_I &= U_R + U_O \\ I_R &= I_{DZ} + I_L \\ I_R &= \frac{U_R}{R} \end{aligned}$$

这两个结果不需要背下来！
掌握基本原理，
现场分析推导即可！

稳压管稳压电路

例 8

在如图所示的稳压电路中，已知稳压管的稳定电压 U_Z 为 6V，最小稳定电流 $I_{Z\min}$ 为 5mA，最大稳定电流 $I_{Z\max}$ 为 40mA；输入电压 U_I 为 15V，波动范围为 $\pm 10\%$ ；限流电阻 R 的大小是 200Ω ；为了保证稳压电路正常工作，负载电流的范围是多少？

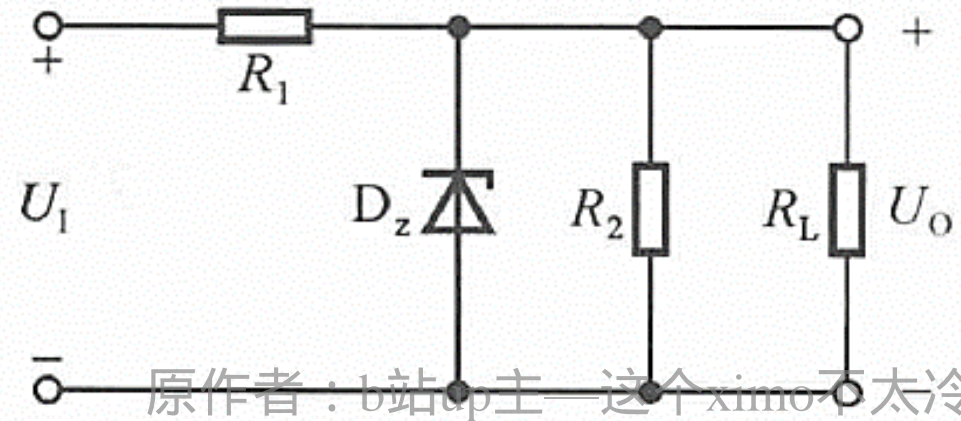


稳压管稳压电路

例 9

在例 8 的基础上，根据计算结果，空载时电路无法正常工作；为了使稳压电路空载时能够正常工作，可以在负载的两端并联一个保护电阻，如图所示；若其他条件不变：

- (1) 保护电阻 R_2 的大小应如何选取？
- (2) 按照上面的原则选取保护电阻后，负载电阻阻值的变化范围是多少？



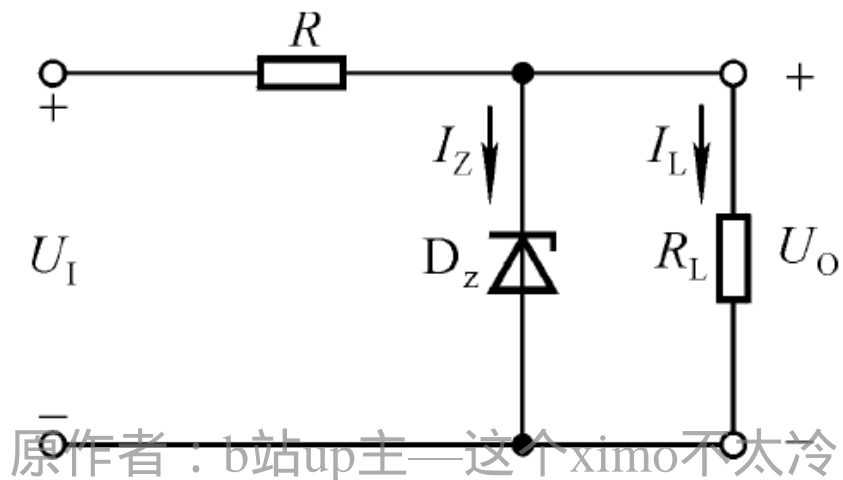
稳压管稳压电路

例 10

在如图所示的稳压管稳压电路中，已知输入电压 U_I 为 15V，波动范围为 $\pm 10\%$ ；稳压管的稳压电压 U_Z 为 6V，稳定电流 I_Z 为 5mA，最大耗散功率 P_{ZM} 为 180mW；限流电阻 R 为 250Ω ；负载电流 I_L 为 20mA；回答下列问题：

(1) 当 U_I 变化时，稳压管中电流的变化范围为多少？

(2) 若负载电阻开路，则将发生什么现象？为使电路能够空载工作，在不改变电路结构的前提下应如何改变电路参数？



请同学们不要将课件上传至网上的各个公共平台，谢谢！
课件中存在的错误可以在b站私信反馈给我，不胜感激！

直流电源 —— 小结

- 直流电源（线性稳压电源）的组成部分及各个环节的作用；
- 常见的几种整流电路的工作原理与计算分析；
- 电容滤波电路的工作原理与计算分析；
- 稳压管稳压电路的工作原理与计算分析；