

江苏省精品教材

教育部高等学校电工电子基础课程教学指导委员会推荐教材
电子信息学科基础课程系列教材



电路理论基础

(第3版)

邢丽冬 潘双来 编著

清华大学出版社



扫描全能王 创建

电路基本概念和基本定律.

1. 电路 = 电气器件的联接

2. 基本电气量 = 电流, 电压, 功率, 能量.

3. 参考方向 = 分析电路前任意指定.

4. 电压 = 电势差 (电位差)

5. 电压方向 = 高电位点指向低电位点.

6. 参考节点位 = 零电位.

7. 关联方向 = 电流参考方向与电压参考方向一致

8. 元件吸收电能量 = 电场力对电荷做功 = 正电荷从 '+' 极移到 '-' 极.

9. 元件向电路提供电能量 = 正电荷从 '-' 极移到 '+' 极 = 非电场力对电荷做功

10. 电功率 $P > 0$, 吸收功率. $P < 0$, 元件发出功率. $\Rightarrow$ 条件: u, i 为关联方向.

11. 元件 $\left\{ \begin{array}{l} \text{有源元件} = \text{电压源, 电流源} \Rightarrow \text{产生能量} \\ \text{无源元件} = \text{电阻, 电感, 电容元件} \Rightarrow \text{吸收能量} \end{array} \right.$

12. 元件 $\left\{ \begin{array}{l} \text{二端子元件} = \text{与外电路连接钮为2个} \\ \text{多端子元件} \end{array} \right.$

13. 电阻 $R = \frac{1}{G} \rightarrow$ 电导. 电导单位西门子 (S). 简称西.

14. $\left\{ \begin{array}{l} \text{开路} \Rightarrow R = \infty \Rightarrow \text{伏安特性与 } u \text{ 轴重合} \end{array} \right.$

$\left\{ \begin{array}{l} \text{短路} \Rightarrow R = 0 \Rightarrow \text{与 } i \text{ 轴重合} \Rightarrow \text{无论电流 } i \text{ 为何值, 电压 } u \text{ 总为零} \end{array} \right.$

15. 非双向性元件 $\Rightarrow$ 电阻通入不同方向的电压, 通过它的电流不同.



16. 线性电容: $q = C \cdot u$ 电容单位法拉(F), $1\text{pF} = 10^{-12}\text{F}$ (皮法)

17. 线性电容的库伏特性为直线.

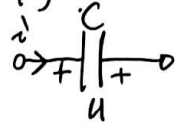


18. 极板间电流为位移电流, 导线中电流为传导电流, 两者是连续的.

19. $i = \frac{dq}{dt} = \frac{d(Cu)}{dt} = C \cdot \frac{du}{dt} \Rightarrow$ 电流 i 与电压变化率成正比.

20. $u(t) = u(t_0) + \frac{1}{C} \int_{t_0}^t i(\xi) d\xi$ $u(t_0) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^{t_0} i(\xi) d\xi$

21. 电压与电流方向关联. 电容元件吸收功率. $p_{\text{吸收}} = u \cdot i = u \cdot C \cdot \frac{du}{dt}$



22. 电容吸收电荷 $W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_{\text{吸收}} d\xi = \int_{t_1}^{t_2} u \cdot C \cdot \frac{du}{d\xi} d\xi = C \cdot \int_{u(t_1)}^{u(t_2)} u \cdot du(\xi)$
 $= \frac{1}{2} C u^2(t_2) - \frac{1}{2} C u^2(t_1)$

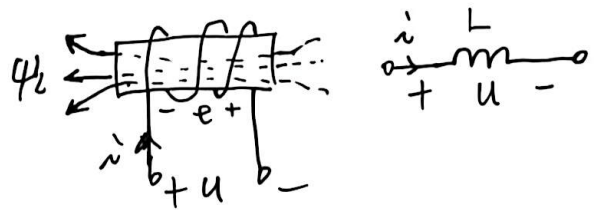
23. 某个时刻 t 的电容器中所储存的电场能量为. $W(t) = \frac{1}{2} C u^2(t)$

24. 电感元件: 线圈通过电流 i , 产生磁通 ϕ_L , 磁通与线圈 N 匝交链, 形成磁通链 ψ_L .
(自感磁通). (自感磁通链)

$$\psi_L = N \cdot \phi_L$$

25. 自感磁通链. $\psi_L = L \cdot i$. 磁通单位是韦伯(Wb). 电感单位亨利(H). 简称亨.

26. 电感的感应电压 $u = \frac{d\psi_L}{dt}$



27. 感应电压与电流关系. $u = L \cdot \frac{di}{dt}$.
(不是感应电流)

28. 楞次定律: 磁通变化产生的感应电动势其方向总是企图产生感应电流来阻止磁通变化.

29. 电感的吸收电荷. $W(t_1, t_2) = \int_{t_1}^{t_2} p_{\text{吸收}} d\xi = \int_{t_1}^{t_2} i \cdot L \cdot \frac{di}{d\xi} d\xi = \frac{1}{2} L i^2(t_2) - \frac{1}{2} L i^2(t_1)$

30. 某个时刻电感中所储存的磁场能量为 $W(t) = \frac{1}{2} L i^2(t)$

当 i 增加. 元件吸收能量并全部转化为磁场能量.



31. 如果线圈中的电阻不可忽略, 则用线性电阻元件和线性电感元件的串联组合作为模型

32. 非线性电感元件 $\Rightarrow$ 具有铁心的线圈, 放入铁心, 电感量会明显增大且电感不再是常数

33. 电流与感应电压关系. $i(t) = \frac{1}{L} \int_{t_0}^t u(\xi) d\xi + i(t_0)$ $\leftarrow u = L \frac{di}{dt}$

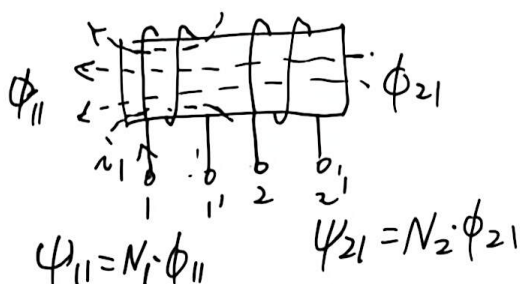
$\downarrow$ 也是电感两端可测量的电压.

34. 互感(耦合电感): 线圈的磁通和感应电动势由邻近线圈电流变化引起.

35. 磁耦合: $\Rightarrow$ 一个线圈产生的部分磁通穿过另一线圈,

36. ψ_{11} 为自感磁通链, ψ_{21} 为互感磁通链.

$$\psi_{11} \gg \psi_{21}$$



37. 互感系数. $M_{21} = \frac{\psi_{21}}{i_1} \Rightarrow$ 互感磁通链与施感电流成正比

单位为 H (亨).

38. 如果线圈2有电流, 则线圈2对线圈1的互感系数 $M_{12} = \frac{\psi_{12}}{i_2} = \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2}$

39. 互感的互易性质 $\Rightarrow M_{12} = M_{21} = M$

40. 耦合系数 $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

41. 线圈密绕 $\Rightarrow$ 每匝磁通相同.

42. 全耦合. $k=1. \Rightarrow$ 每个线圈产生的磁通全部穿过另一个线圈.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \Rightarrow k^2 = \frac{M^2}{L_1 L_2} = \frac{M_{21} \cdot M_{12}}{L_1 \cdot L_2} = \frac{\frac{N_2 \phi_{21}}{i_1} \cdot \frac{N_1 \phi_{12}}{i_2}}{\frac{N_1 \phi_{11}}{i_1} \cdot \frac{N_2 \phi_{22}}{i_2}} = \frac{\phi_{21} \cdot \phi_{12}}{\phi_{11} \cdot \phi_{22}}$$

当 $\phi_{21} = \phi_{11}, \phi_{22} = \phi_{12}$, 则 $k=1$.



43. 互感电压 $\Rightarrow$ 线圈1中的磁通变化在线圈2中产生的感应电压, 记为 u_{m21} .

$$u_{m21} = \frac{d\psi_{21}}{dt} = \frac{M_{21} di_1}{dt} = M \frac{di_1}{dt}$$

44. 同名端 (对应端): 两个耦合线圈中一对端钮通入的电流方向相同时, 它们产生的磁通是增强的, 用“·”或“×”标记.

45. 线圈总电压: $U_1 = U_{L1} + U_{m12}$ [U_1 : 总电压, U_{L1} 为线圈1的自感电压, U_{m12} 为线圈2对线圈1产生的感应电压 (即互感电压)]

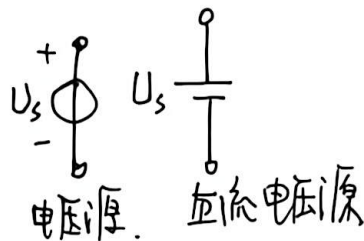
46. 耦合电感元件 $\Rightarrow$ 具有耦合的两个线圈是一个整体.
(变压器, 互感器)

47. 外特性 $\Rightarrow$ 对外的伏安关系是一组表达式: $\Rightarrow \begin{cases} U_1 = U_{L1} \pm U_{m12} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt} \\ U_2 = U_{L2} \pm U_{m21} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt} \end{cases}$

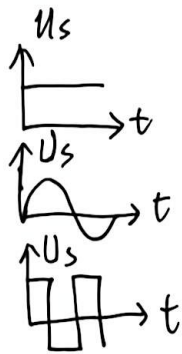
48. 电源 $\Rightarrow$ 提供电量或信号.

49. 有源元件 $\begin{cases} \text{电压源} \\ \text{电流源} \end{cases} \Rightarrow$ 二端元件 $\Rightarrow$ 元件电压与通过它的电流无关.
(独立元件)

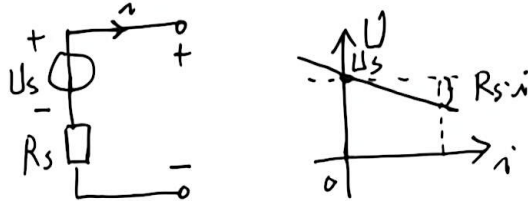
50. 直流电压源 $\Rightarrow$ 电压源的电压 U_s 为常数.



51. 电压源 $\begin{cases} \text{直流电压源} \\ \text{波形电压源} \\ \text{方形电压源} \end{cases}$

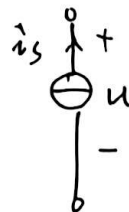


52. 实际电压源 $\Rightarrow$ 蓄电池, 发电机都有内阻, 随着电流变化, 输出电压略有变化, 用电压源与电阻串联组合为实际电压源模型.



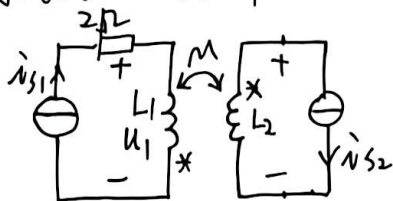
53. 电流源 $\Rightarrow$ 元件中电流与外电路, 元件中电压无关.

54. 直流电流源 $\Rightarrow$ 电流源电流为常数. $i_s = I_s$.



55. $\begin{cases} \text{短路时, 电流源的端电压 } u=0, \text{ 而 } i=i_s \\ \text{断路时, 电压源的电流 } i=0, \text{ 端电压为 } u_s \end{cases}$

56. 耦合电感电路的互感电压的方向判断 $\Rightarrow$ L_1 线圈中的电流会从同名端流入 L_2 线圈.

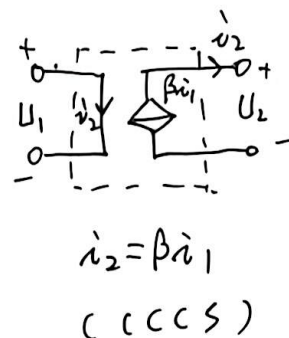
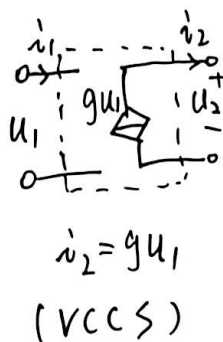
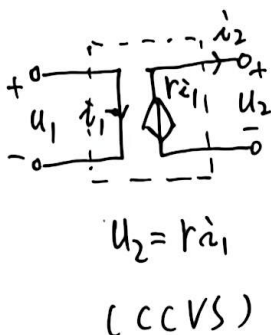
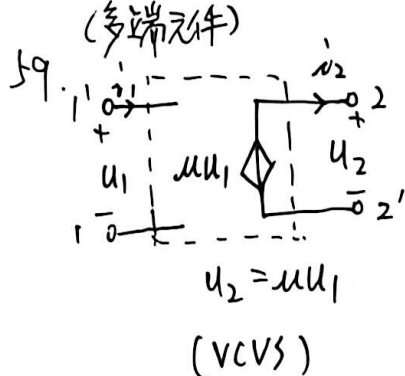


由于 i_{s1} 从 L_1 的“ $\times$ ”的一端流入, 则 i_{s1} 从 L_2 的“ $\times$ ”的一端流入 $\Rightarrow$ 则在 L_2 中, i_{s1} 流向与 L_2 的端压相反.

$$\Rightarrow u_{m21} = -M \frac{di_1}{dt}$$

57. 电源 $\begin{cases} \text{独立电源} \\ \text{受控源} \end{cases} \begin{cases} \text{受控电压源} \\ \text{受控电流源} \end{cases} \begin{cases} \text{电压控制型电压源 VCVS (压控电压源)} \\ \text{电流控制型电压源 CCVS} \\ \text{电压控制型电流源 VCCS} \\ \text{电流控制型电流源 CCCS} \end{cases}$

58. 受控源: 电源的电压和电流不是给定的时间函数, 而是由电路某部分的电流或电压控制. (多端元件)



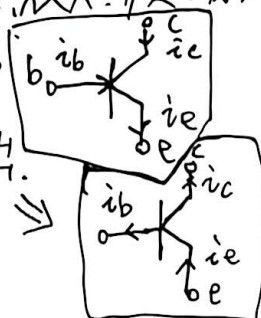
60. 受控源的功率 $\begin{cases} 1-1' \text{ 端: 由于 } u_1=0 \text{ 或 } i_1=0, \therefore 1-1' \text{ 端不吸收功率, 也不发出功率.} \\ 2-2' \text{ 端: 若有电阻, 则电阻将获得功率. } P_{2\text{吸}} = \frac{(u u_1)^2}{R} \end{cases}$

61. 受控源的应用 $\Rightarrow$ 晶体管, 场效应管, 运算放大器等多端器件.

62. 双极型晶体管 $\Rightarrow$ 晶体管 $\Rightarrow$ 晶体三极管 $\Rightarrow$ 检波, 整流, 放大, 开关, 稳定作用.

63. 晶体三极管 $\begin{cases} \text{NPN型} \Rightarrow \text{电流从 } c \text{ 和 } b \text{ 流入, } e \text{ 极流出} \\ \text{PNP型} \Rightarrow \text{电流从 } e \text{ 流入, 从 } c \text{ 和 } b \text{ 极流出.} \end{cases}$

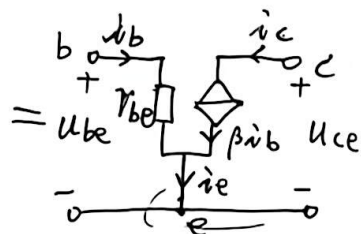
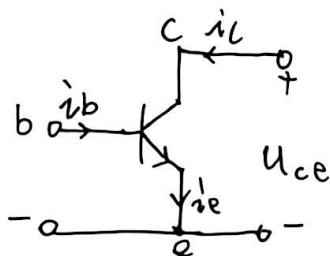
$\hookrightarrow$ 三个电极: 发射极 e , 基极 b , 集电极 c .



64. 晶体管 $\Rightarrow$ 可用线性受控源等效替代.

$$i_c = \beta \cdot i_b$$

$$i_e = i_b + i_c = (1 + \beta) \cdot i_b$$

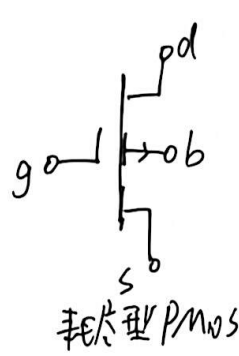
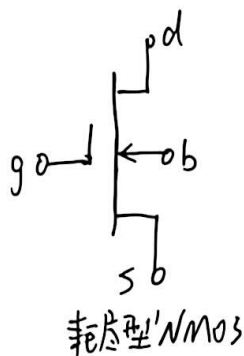
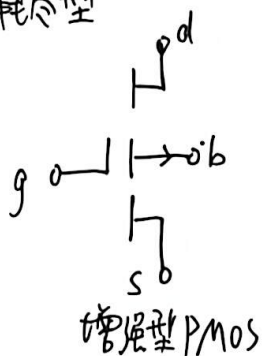
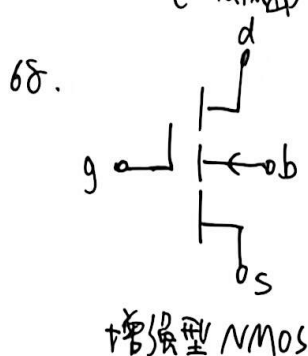


65. 场效应管 (Field effect transistor, FET) $\Rightarrow$ 利用电场效应控制电流的半导体器件.

66. 场效应管 $\left\{ \begin{array}{l} \text{结型场效应管 (junction~) JFET} \\ \text{(四端元件)} \end{array} \right.$

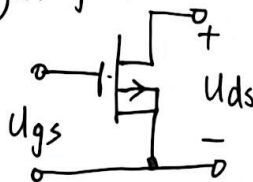
绝缘型场效应管 (insulated gate~) IGFET $\Rightarrow$ 金属氧化物半导体三极管

67. MOS管 $\left\{ \begin{array}{l} \text{N沟道} \left\{ \begin{array}{l} \text{增强型} \Rightarrow \text{漏极与源极之间没有原始导电沟道} \\ \text{耗尽型} \end{array} \right. \\ \text{P沟道} \left\{ \begin{array}{l} \text{增强型} \\ \text{耗尽型} \end{array} \right. \end{array} \right.$ (b极流入) (d) (s) (metal-oxide-semiconductor~) MOSFET. 简称MOS管. (b极流出)

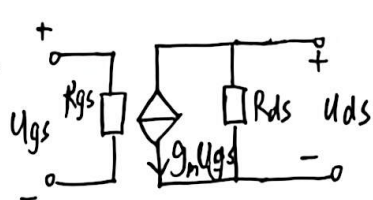


69. 场效应管 $\left\{ \begin{array}{l} \text{栅极 (g)} \\ \text{漏极 (d)} \\ \text{源极 (s)} \\ \text{衬极 (c)} \end{array} \right. \Rightarrow \text{场效应管是电压控制器件} \Rightarrow \text{需要合适的栅源电压 } u_{gs}$
 $\Rightarrow \text{漏极输出等效恒流源 } g_m u_{gs}$

70. 共源接法. $\Rightarrow$ b极与s极连接在一起, 构成三端元件.

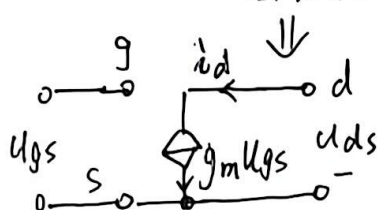


71. 低频小信号场效应管.



$\Rightarrow$ 由于输入电阻 R_{gs} 和漏极电阻 R_{ds} 为高电阻

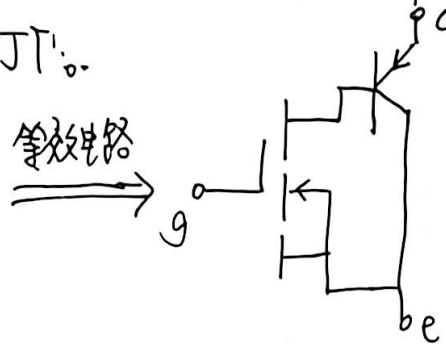
$\downarrow$
可看成开路, 则等效图如下



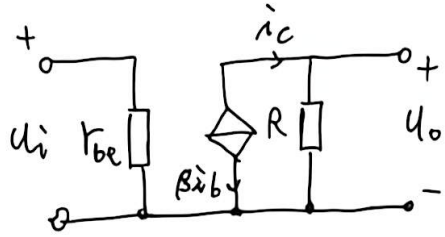
72. 绝缘栅双极晶体管 (Insulated Bipolar Transistor) IGBT $\Rightarrow$ 结合 MOSFET 与 BJT 特性, 既有 BJT 的输出导通特性, 又像 MOSFET 有电压控制型器件。
 $\Rightarrow$ 在高电压、大电流应用上, 取代了 MOSFET 和 BJT。

73. IGBT 的三个极

- 栅极 g.
- 集电极 c.
- 发射极 e



74. 晶体管放大器

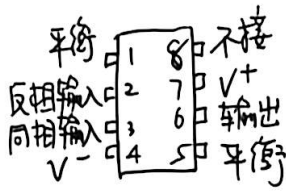


$$\begin{aligned} i_b &= \frac{u_i}{r_{be}} \\ i_c &= \beta \cdot i_b \\ u_o &= i_c \cdot R \end{aligned} \Rightarrow \text{电压增益 } \frac{u_o}{u_i} = \frac{i_c \cdot R}{i_b \cdot r_{be}} = \frac{\beta \cdot r_{be} \cdot R}{r_{be} \cdot r_{be}} = \frac{\beta \cdot R}{r_{be}} = \frac{50 \times 4}{1} = 200$$

放大倍数 $\beta = 50$, $r_{be} = 1k\Omega$, $R = 4k\Omega$
 $\Rightarrow$ 电压增益与 β 成正比, 与 R/r_{be} 比值成正比。

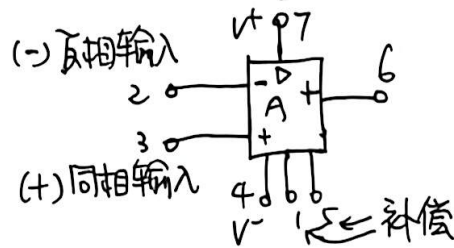
75. 运算放大器 (简称运放) $\Rightarrow$ 具有很高放大倍数的电路单元 $\Rightarrow$ 分立元件形式 / 集成电路形式 (单芯片)
 (有源元件)

76. 双列八引脚集成芯片 (DIP) $\Rightarrow$



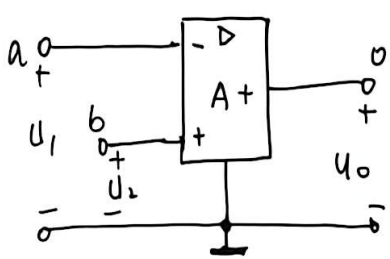
$\Rightarrow$ 1, 5 $\rightarrow$ 一般不外接元件
 7 $\rightarrow$ 正电源端
 4 $\rightarrow$ 负电源端

电路符号



$\Rightarrow$ 两个输入端, 一个输出端
 同相 $\rightarrow$ 输入与输出极性相同
 反相 $\rightarrow$ 输入与输出极性相反
 V^+ 与 V^- 联接直, 流偏置电压

77. 差模输入电压 ($u_2 - u_1$)



(此图未画出正电源 V^+ , 负电源 V^-)

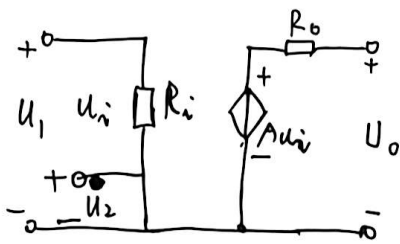
当差模输入电压 ($u_2 - u_1$) 在一定范围内 $\Rightarrow$ 放大器对输入信号无失真放大。

$\downarrow$
 输出信号与输入电压成正比

$$u_o = A(u_2 - u_1)$$

A 为运算放大器的开环增益

78. 运算放大器 $\Rightarrow$ 用电压控制电压源模拟,

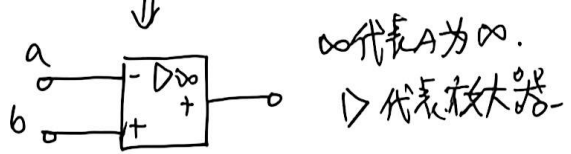


U_o 为有限值, $U_o = AU_i - U_{Ro}$

$\because R_i = \infty$, a 与地相当断开, a 输入端无电流,
 b 与地直接接通, b 输入端也无电流,

$\therefore U_i = U_2 - U_1 = 0$. $\therefore A \rightarrow \infty$ 且 $R_o \rightarrow 0$.

$\Downarrow$
理想运放.



79. 理想运放特征: $\Rightarrow$ 虚断和虚短同时满足,

① 输入端无电流, 相当断路, 但内部接通 $\rightarrow$ 虚断路 (虚断)

② 输入端强制为 0, a, b 两点等电位, 相当短路, 但无电流 $\rightarrow$ 虚短路 (虚短)

$\Rightarrow b$ 端接地, 因为虚短特性, a 点电位为零, $\Rightarrow a$ 点为虚接地 (虚地)

80. 第一类约束 $\Rightarrow$ 元件自身约束 $\Rightarrow$ 欧姆定律 $\Rightarrow$ VAR 约束

第二类约束 $\Rightarrow$ 元件相互连接给元件与元件之间电压、电流约束 $\Rightarrow$ 拓扑约束 $\Rightarrow$ 基尔霍夫定律
 KVL - KCL

81. 支路 $\Rightarrow$ 同一电流和每个支路 $\left\{ \begin{array}{l} \text{含源支路} \\ \text{无源支路 (至少有一元件)} \end{array} \right.$

82. 节点 $\Rightarrow$ 三条或三条以上支路的联接点

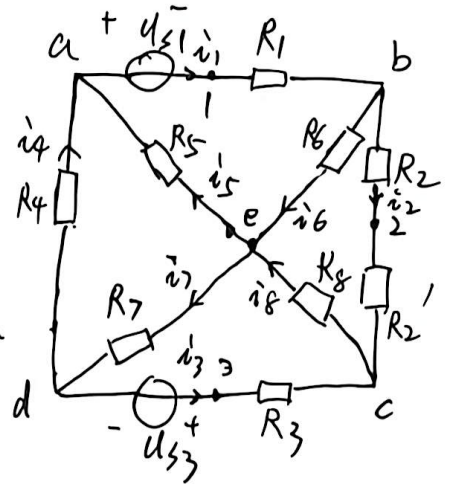
83. 回路 $\Rightarrow$ 由支路构成闭合路径

84. 广义回路 $\Rightarrow$ 可构成回路, 但未构成实际回路, 如 $a \rightarrow e \rightarrow a$ (虚假回路)

85. 网孔 $\Rightarrow$ 回路内部不再含有支路的回路.

86. 集总电路 (集总参数电路) $\Rightarrow$ 若元件的一端流入电流等于另一端流出电流, 且两端电压是单值

$\Downarrow$
该电路可视为各网孔.



87. 基尔霍夫电流定律 (Kirchhoff's Current Law, KCL): 在集总电路中, 对任一节点, 所有支路的电流代数和为 0. $\sum i = 0$.

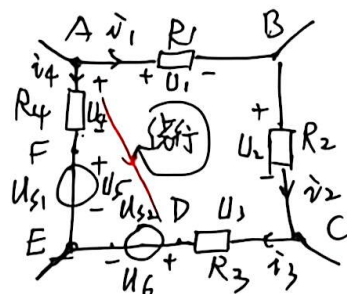
或 $\sum i_{in} = \sum i_{out}$



88. 闭合面 $\Rightarrow$ 广义回路 (广义节点) $\Rightarrow$ 流出节点的电流为正, 流入节点的电流为负.

89. 闭合面的电流代数总和为 0. $\Rightarrow$ 对 n 节点电路, 可写出 $(n-1)$ 个独立 KCL 方程.

90. 基尔霍夫电压定律. $\Rightarrow$ 在任意电路中, 任何时刻, 沿任一回路, 构成回路的所有支路电压代数和恒为零. $\sum u = 0$. $\Rightarrow$ 规定: 电压参考方向与回路绕行方向一致为正, 反之为负.



91. KVL 也适用广义电路. $\Rightarrow$ ADEFA 或 ABCDA

设 AD 间电压为 U_{AD} . $\Rightarrow U_{AD} + U_6 - U_5 - U_4 = 0$. 或 $U_1 + U_2 + U_3 - U_{AD} = 0$.

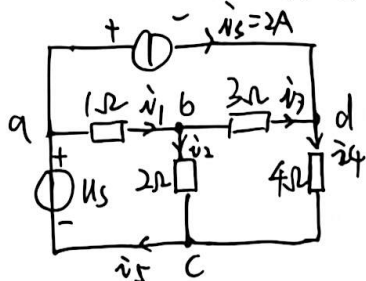
92. 基尔霍夫电压定律与路径无关.

93. 对 n 个节点, b 条支路的电路可列出 $(b-n+1)$ 个独立 KVL 方程. $\Rightarrow$ 上图只解到一个 KVL 方程.

94. 电阻电压降代数和等于电压源电压升代数和. $\sum R_k i_k = \sum U_{sk}$

沿任一回路绕行方向.

95. 例题.



$i_4 = 1A$. $U_5 = ?$

$b=6, n=4$. 独立方程数 $6-4+1=3$ 个.

对于节点 d. $i_5 + i_3 = i_4 \Rightarrow i_5 = -1A$.

对于回路 bdc. $U_{bd} + U_{dc} = U_{bc}$

$$1\Omega \cdot i_4 + 4\Omega \cdot i_4 = i_2 \cdot 2\Omega$$

$$-1A \cdot 3\Omega + 1A \cdot 4\Omega = i_2 \cdot 2\Omega$$

$$\Rightarrow i_2 = 0.5A$$

对于节点 b. $i_1 = i_2 + i_3 = 0.5A - 1A = -0.5A$

对于回路 abca. $U_{ab} + U_{bc} = U_5$

$$(-0.5A) \cdot 1\Omega + 0.5A \cdot 2\Omega = 0.5V$$

对于节点 c. $i_5 = i_2 + i_4 = 0.5A + 1A = 1.5A$, U_5 与 i_5 非关联.

$\therefore$ 电压源功率 $P_{发} = U_5 \cdot i_5 = 0.5V \times 1.5A = 0.75W$

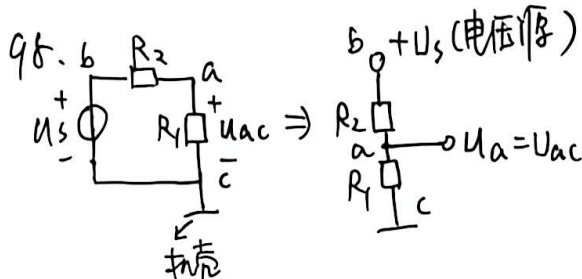
对于 abda. $U_5' = U_{ab} + U_{bd} = -3.5V$. U_5' 与 i_3 关联.

$\therefore$ 电流源功率 $P_{0.2} = 3.5V \times 2A = 7W \Rightarrow$ 实际发出.

(U_5 与 i_5 关联. 乘积为正表示吸收, 若关联为负表示发出. 非关联为正也表示发出)

96. 参考节点: 电路往往接地而称为地. 又称为参考节点 (零点, 零电位).

97. 电位 (节点电压): 各节点与参考节点之间的电压降.



扫描全能王 创建