

第1次应用介绍课

—开关（受控电阻）在电阻电路中的应用

—数字系统的基本单元

纸笔计算器

1 数字系统简介

- 为什么需要数字系统？（课前自学）
- 表示逻辑的两种方法

2 用MOSFET构成逻辑门电路

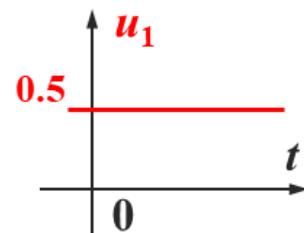
- MOSFET（原理和模型）
- 用MOSFET构成逻辑门电路
- MOSFET构成逻辑门电路的功率分析
- CMOS

体系结构

| | | |
|---|------|------------------------|
| 1 | 2.21 | 绪论, 变量 (L1) |
| | 2.24 | 元件约束和拓扑约束 (L2) |
| 2 | 2.28 | 等效变换 (L3) |
| | 3.3 | 习题课 (R1) |
| 3 | 3.7 | 应用介绍: 开关在电阻电路中的应用 (A1) |
| | 3.10 | 运算放大器 (L4) |
| 4 | 3.14 | 二端口网络 (L5) |
| | 3.17 | 习题课 (R2) |

本讲重难点

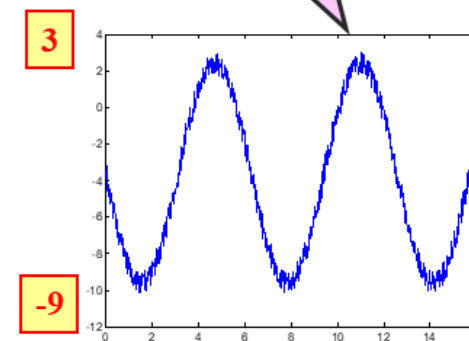
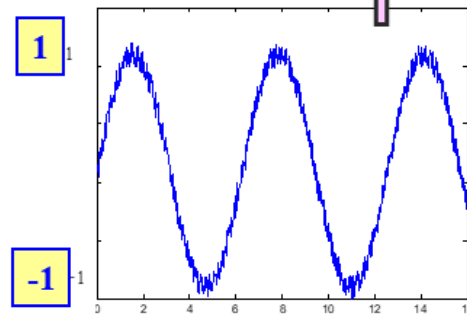
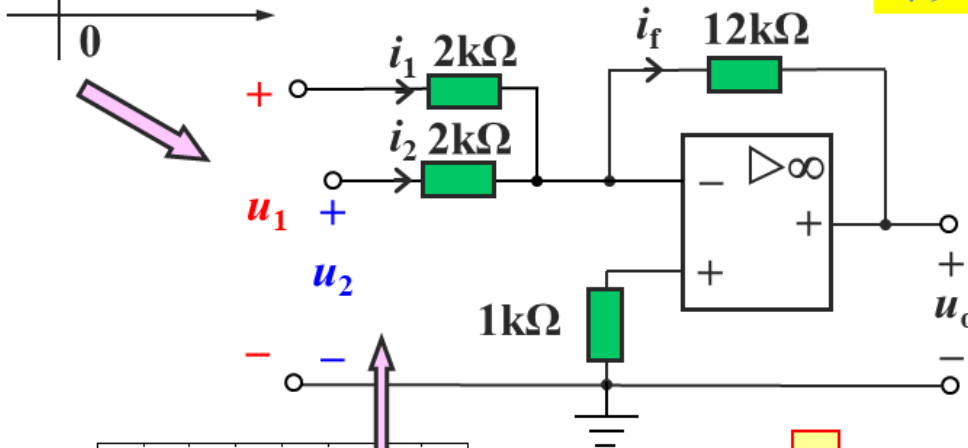
- MOSFET的外特性
- 不同工作区域上，MOSFET的等效电路



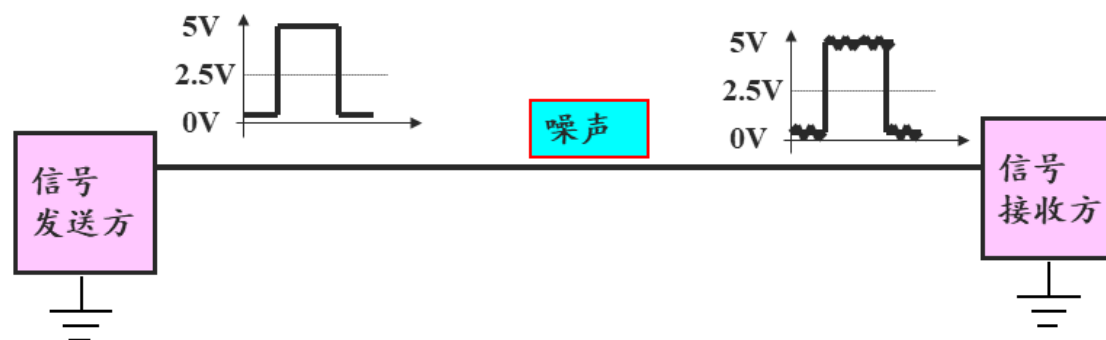
$$u_o = -6(u_1 + u_2)$$

模拟系统的问题:

噪声使得信号失真!



如果仅用两个值来表示信号会怎么样？



发送方认为：

- (1) 低于2.5V的信号表示发送0
- (2) 高于2.5V的信号表示发送1

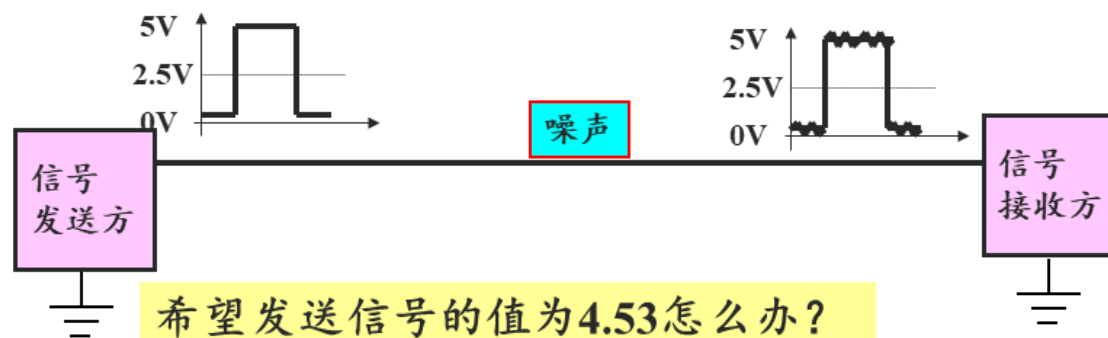
接收方认为：

- (1) 低于2.5V的信号接收0
- (2) 高于2.5V的信号接收1

数字系统的优点：

可以在一定程度上消除噪声的影响！

最简单数字系统的问题在哪里？

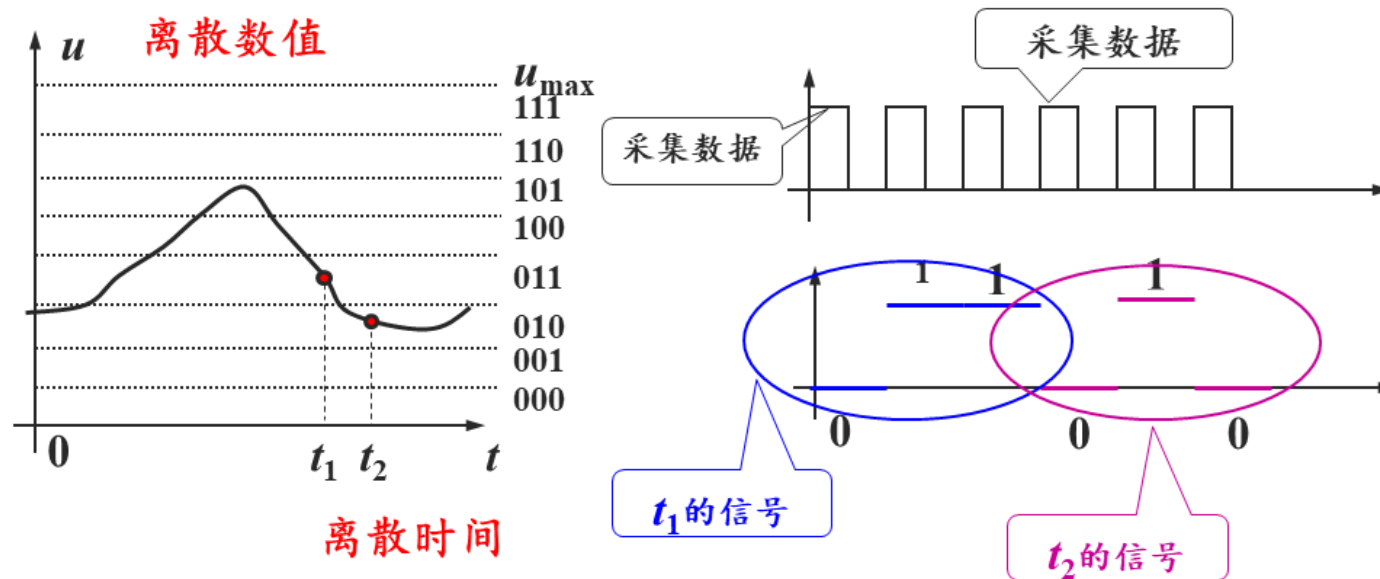


数字系统必须解决的问题：

如何“精确”地表示信号的值？

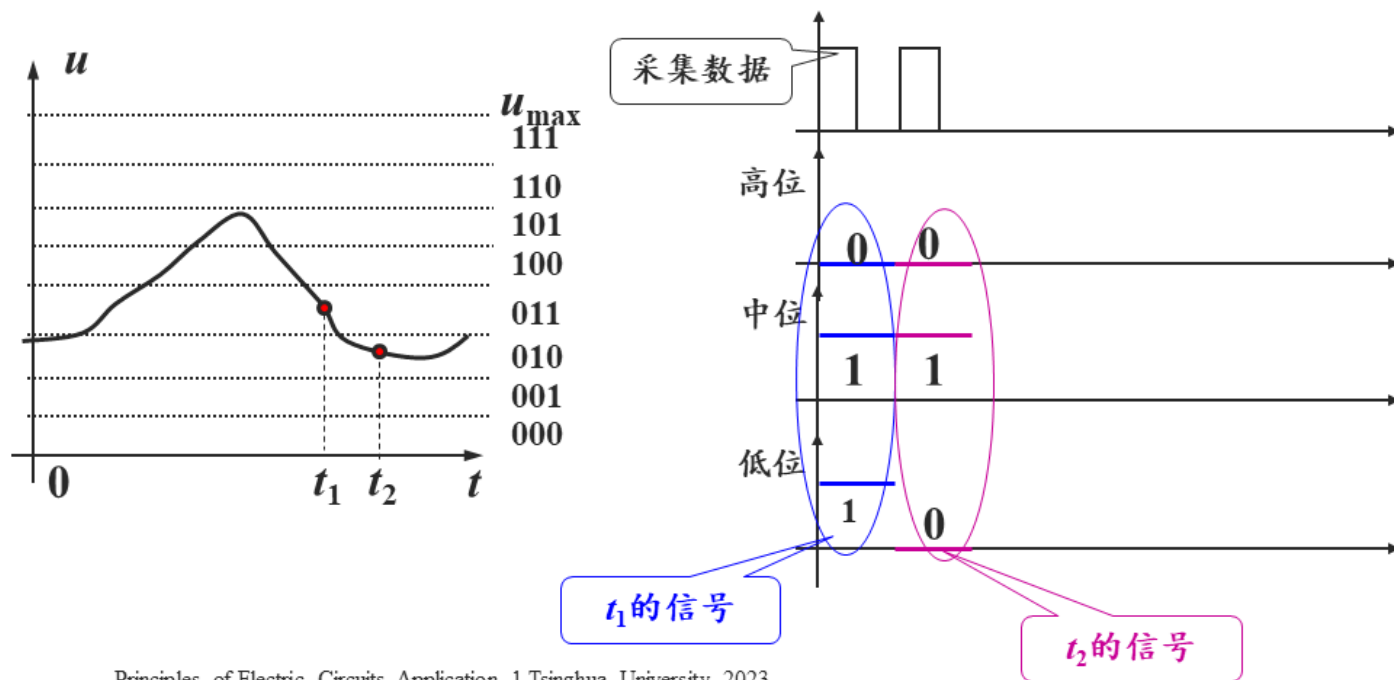
数字系统精确表示信号的法1

用1根线来表示信号的值
每3个时钟周期显示一个值(信号值域被切成 $2^3=8$ 份)



数字系统精确表示信号的法2

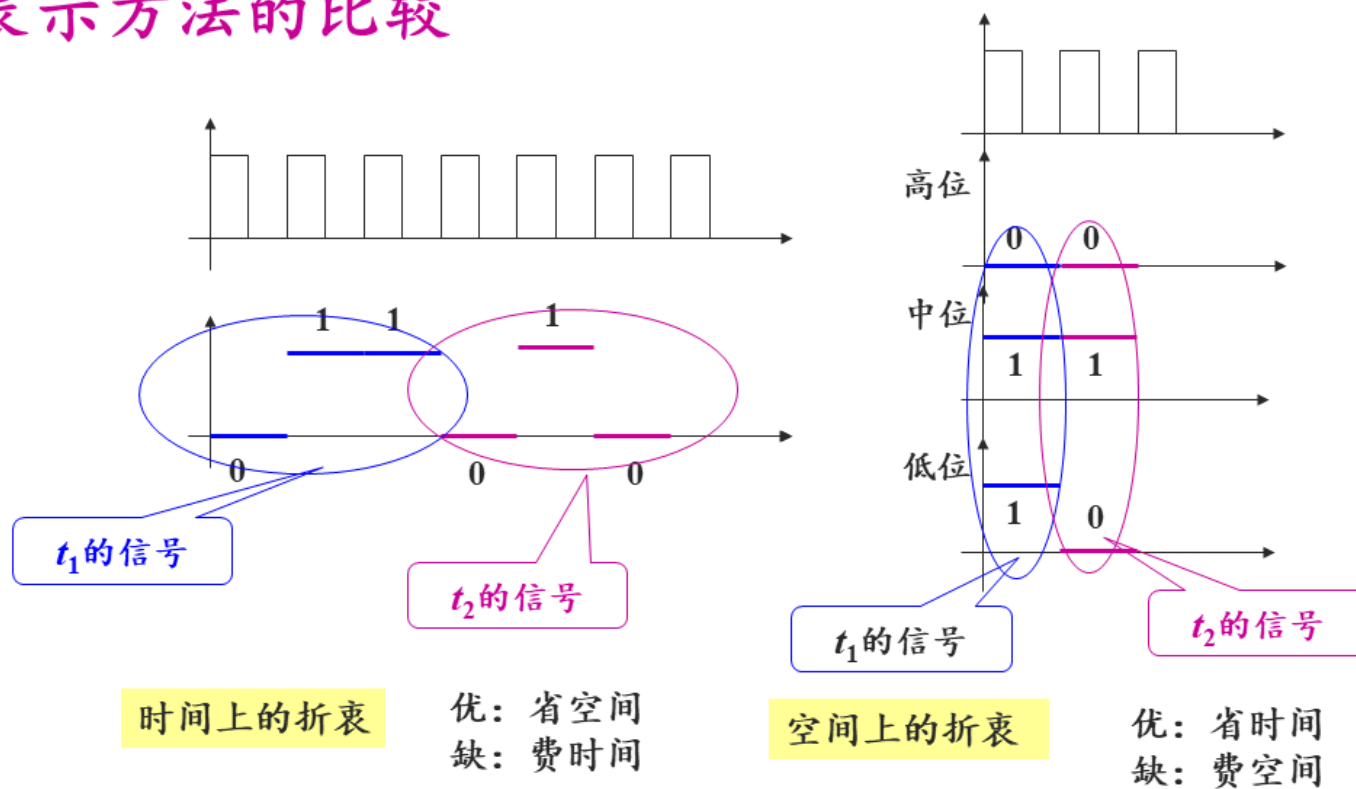
用3根线来表示信号的值得(信号值域被切成 $2^3=8$ 份)
每1个时钟周期显示一个值



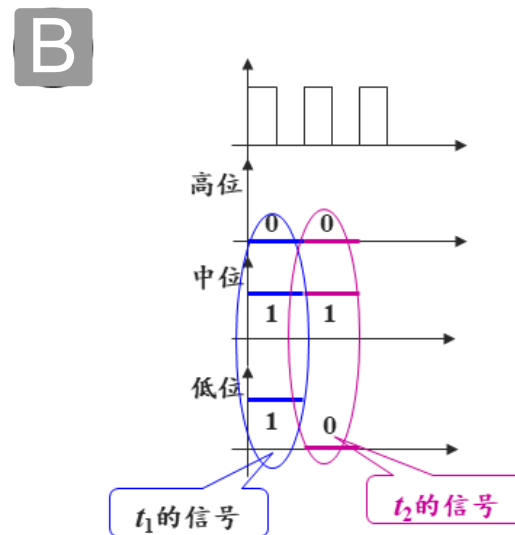
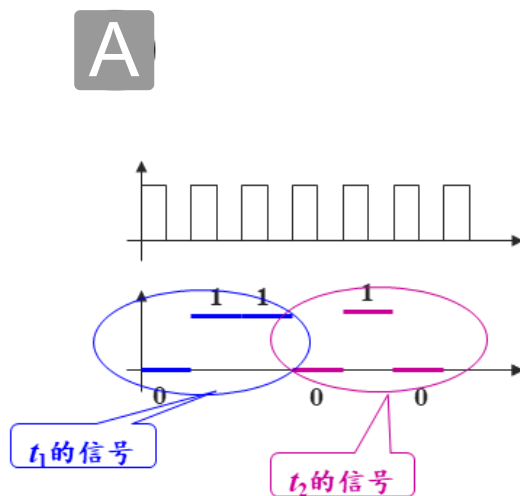
Principles of Electric Circuits Application 1 Tsinghua University 2023

8

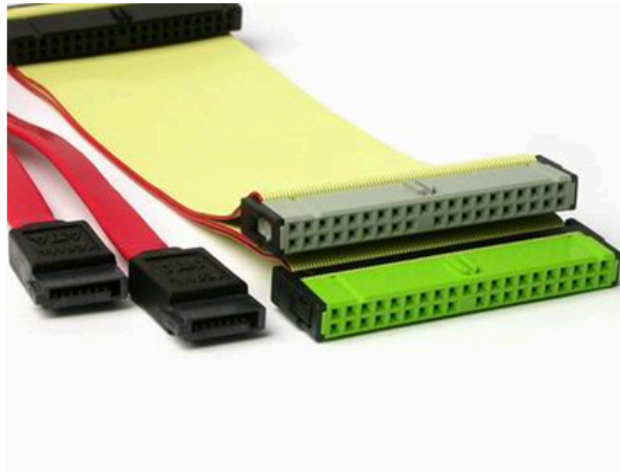
两种表示方法的比较



前述两种表示方法，你觉得哪种适用于**高速场合**？



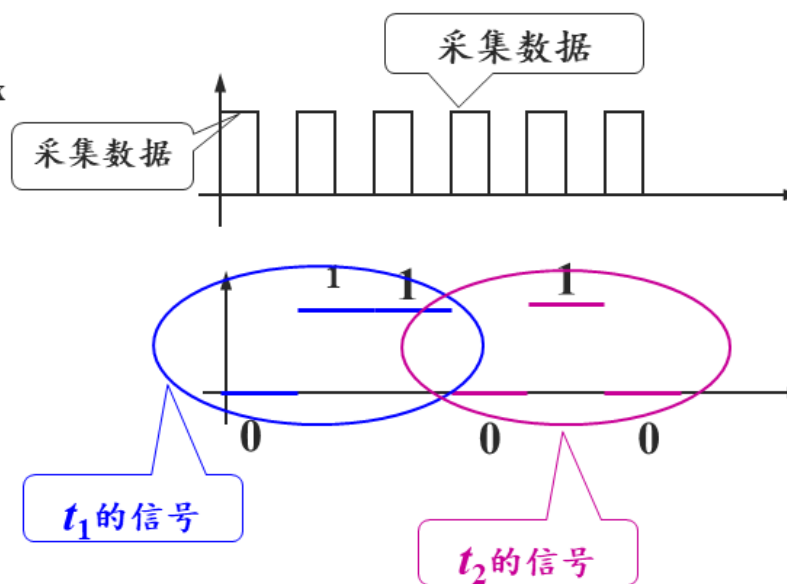
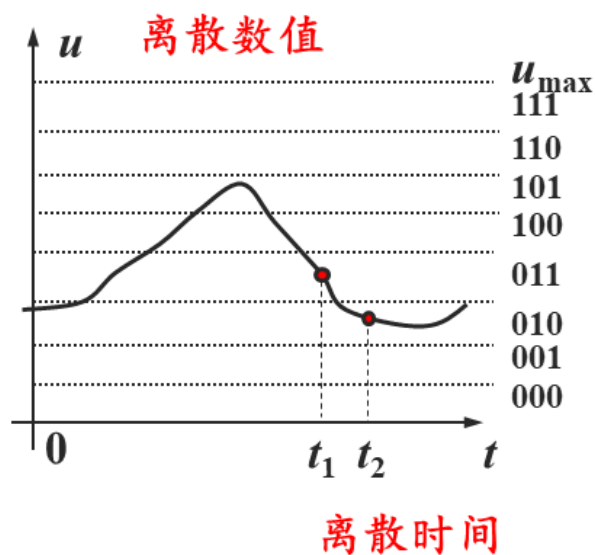
课后自行网页检索PATA/SATA



觉得太low?

每10个周期显示一个值呢?
每20个周期显示一个值呢?

每1个周期 $1\mu\text{s}$ 呢?
每1个周期 1ns 呢?



数字系统所要讨论的问题

- 组合逻辑
 - 输入→输出（安理会表决、加法器）
- 时序逻辑
 - 输入+系统当前状态→输出（计数器）
- 模拟信号与数字信号的转换
 - Analog-Digital-Converter(ADC)、DAC
- 时钟信号的获取

计算机

1.2 表示逻辑的两种方法

逻辑表达式

$$Y_1 = \overline{A}$$

Y_1 与 A 相反

$$Y_2 = A \cdot B$$

A 、 B 同为1时 Y_2 为1

$$Y_3 = A + B$$

A 、 B 同为0时 Y_3 为0

真值表

| A | B | Y_1 | Y_2 | Y_3 |
|-----|-----|-------|-------|-------|
| 1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 | 1 |

如何根据逻辑表达式获得真值表？

$$Y = A \cdot (B + C)$$

Step1: 制表

Step2: 写出所有A、B、C的组合

Step3: 根据每个组合写出对应的Y

| <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>Y</i> |
|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

单选题 1分

对于表达式 $Y = \bar{A} \cdot (B + \bar{C})$ 来说, 有___种使得输出为1的输入 ABC 的取值组合

A

1

B

2

C

3

D

4

16

如何根据真值表获得逻辑表达式？

| <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>Y</i> |
|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

怎样才能保证不漏也不多？

一种思路是：

整体：所有输出为1的子表达式
之“或”就是整个表达式

局部：每一个输出为1的子表达式，
等于所有变量(或其否)为1之“与”

如何根据真值表获得逻辑表达式？

| <i>A</i> | <i>B</i> | <i>C</i> | <i>Y</i> |
|----------|----------|----------|----------|
| 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 1 |
| 1 | 1 | 0 | 1 |
| 1 | 1 | 1 | 1 |

该思路具体的方法是：

Step1: 写出所有使得 Y 为1的 A 、 B 、 C 组合方式

$$\bar{A}\bar{B}C \rightarrow Y = 1$$

$$A\bar{B}\bar{C} \rightarrow Y = 1$$

$$ABC \rightarrow Y = 1$$

方法不唯一

表达式不唯一

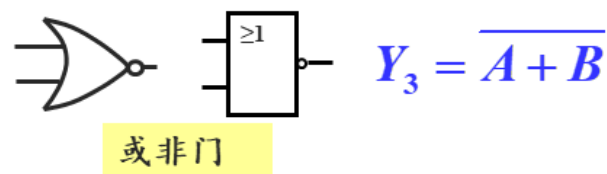
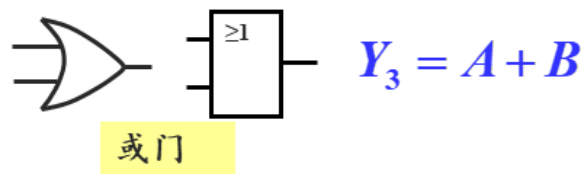
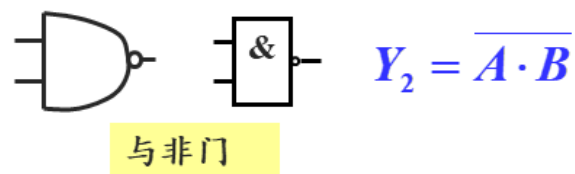
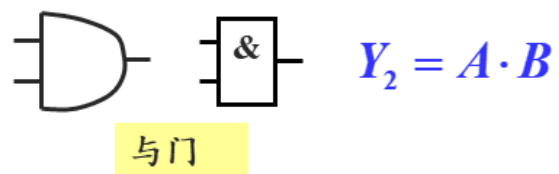
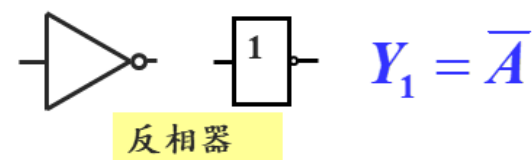
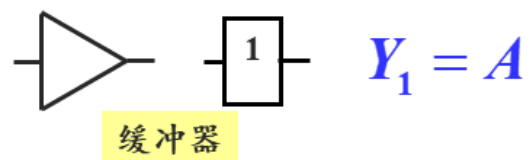
Step2: 将这些组合用“或”运算连接起来

$$Y = \bar{A}\bar{B}C + A\bar{B}\bar{C} + ABC$$

Step3: 利用某种方式化简得到的逻辑表达式

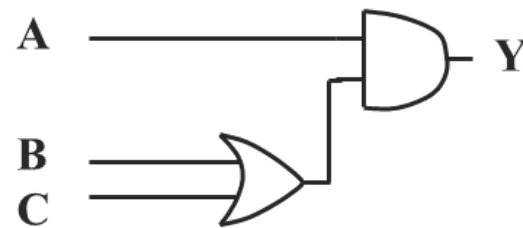
$$Y = A(B + C)$$

几种最常用的逻辑门



逻辑表达式的逻辑门实现

$$Y = A(B + C)$$



$$Y = A(B + C)$$

2.1 MOSFET (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor)

小：线宽10nm

Intel i7 CPU
60亿个晶体管
(双极、MOS)



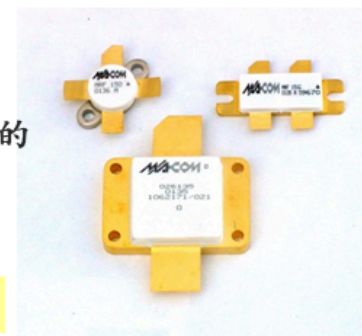
CPU供电电路
中的MOSFET



吴刚耳机放大器
日立N沟道
2SK214型
MOSFET



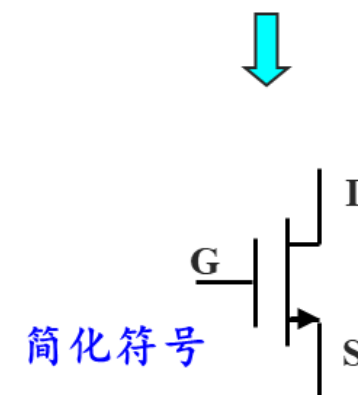
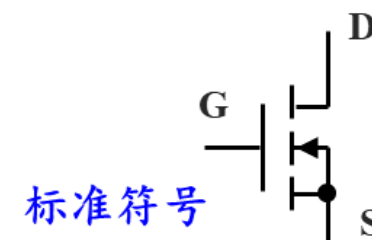
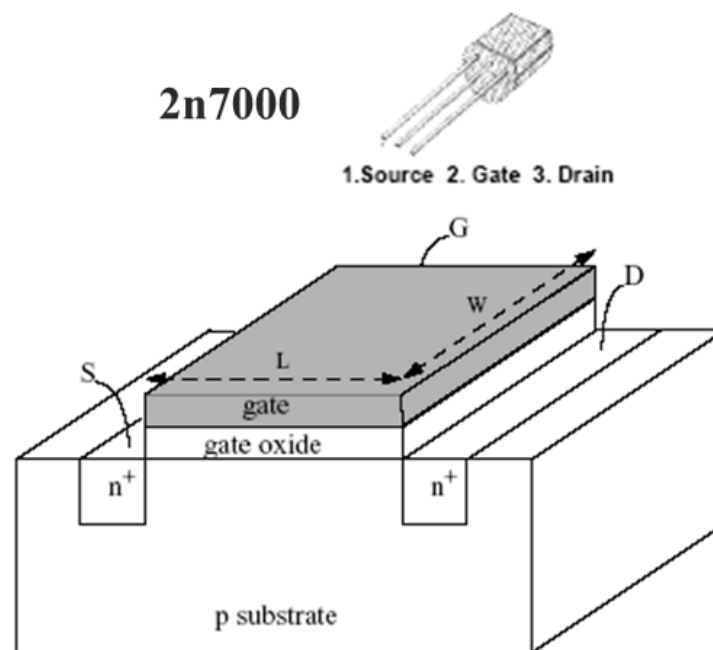
承载电压几百V
流通电流几百A的
功率MOSFET



大：10cm

MOSFET —— n沟道增强型

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor



投票 最多可选1项

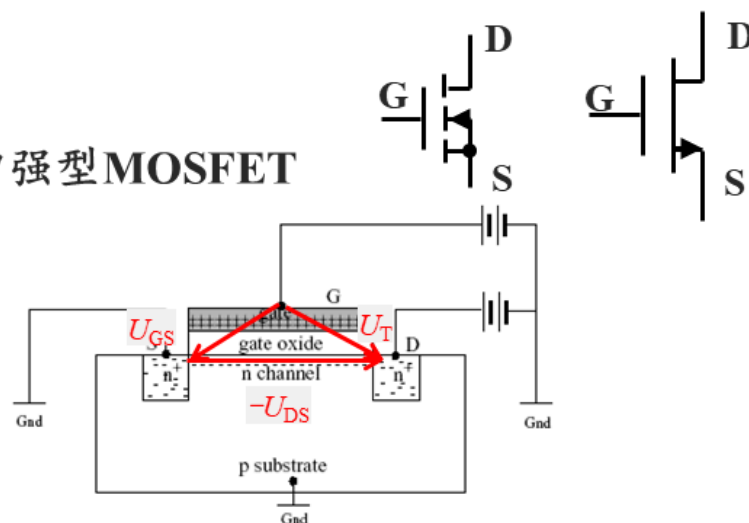
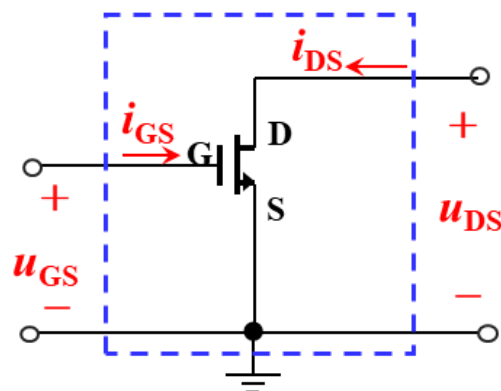
关于L2课后推送中MOSFET仿真的视频，你是
(不是问MOSFET原理是否明白，是外特性是否明白)

- A 没看
- B 看了一遍，没明白
- C 看了一遍/或多遍，大致明白了
- D 看了一遍/或多遍，自己也做了仿真，基本明白了

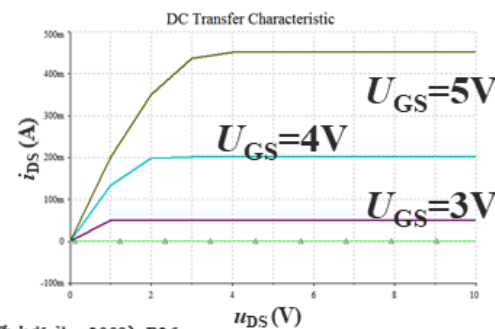
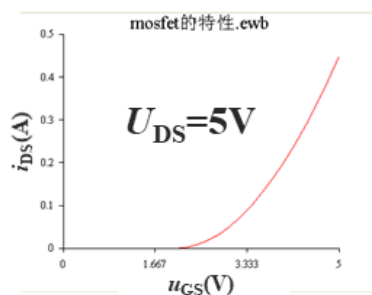
MOSFET的运行

Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor

n沟道增强型MOSFET

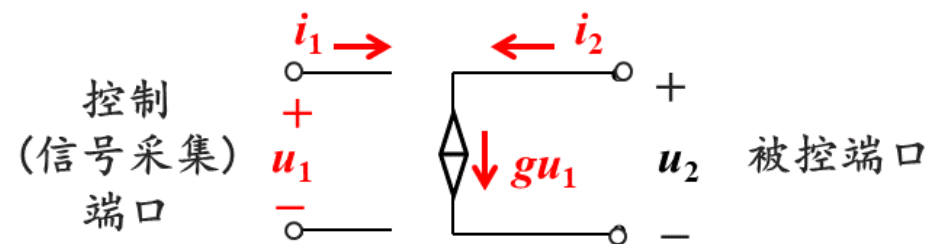


氧化物绝缘(MOS); U_{GS} 增加-导电沟道(FET, n沟道增强型), U_T ; GSD名称;
导电沟道 \longleftrightarrow 带阀门的水管; U_{DS} 增加-夹断, $U_{GS}-U_T$; 两种符号



感兴趣的话, 阅读《电路原理导学及习题解答》(朱桂萍等, 清华大学出版社, 2009) P26
Principles of Electric Circuits Application 1 Tsinghua University 2023

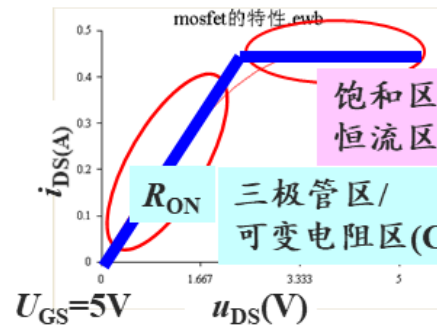
24



为什么要有一个开路的控制端口？
 希望对电路进行无损的电压采样
 L3等效变换讨论

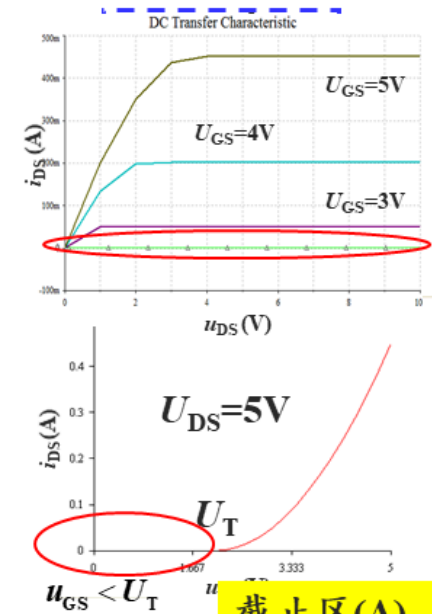
怎样才能有一个开路的控制端口？
A1 MOSFET、L6运算放大器

MOSFET的性质



$$u_{DS} > (u_{GS} - U_T) > 0$$

$$(u_{GS} - U_T) > u_{DS}$$



截止区(A)

$$(u_{GS} - U_T) < 0$$

➤ $(u_{GS} - U_T) > 0$ 以后，MOSFET的D、S间开始导通。

➤ 导通后 $(u_{GS} - U_T) < u_{DS}$ 的时候，MOSFET的D、S间呈电流源特性。

u_{GS} 与 i_{DS} 呈二次方关系

$$i_{DS} = \frac{K(u_{GS} - U_T)^2}{2}$$

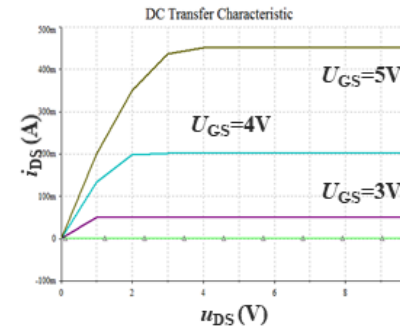
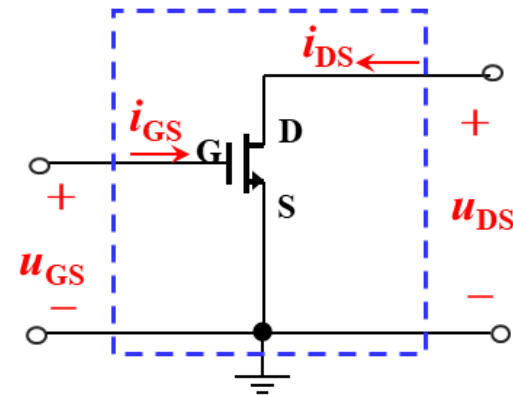
➤ 导通后 $u_{DS} < (u_{GS} - U_T)$ 的时候，MOSFET的D、S间呈电阻特性。 什么量级？

单选题 1分

N沟道增强型MOSFET，在给定较大的 u_{GS} 下(比如5V)，随 u_{DS} 的增加，该元件会先经过____区，再到达____区

A 电阻，电流源

B 电流源，电阻



单选题 1分

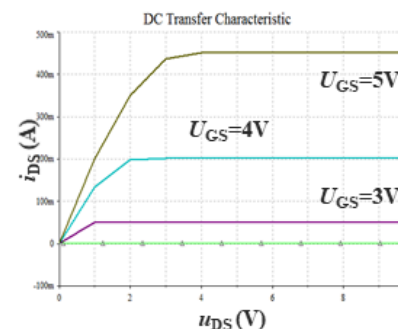
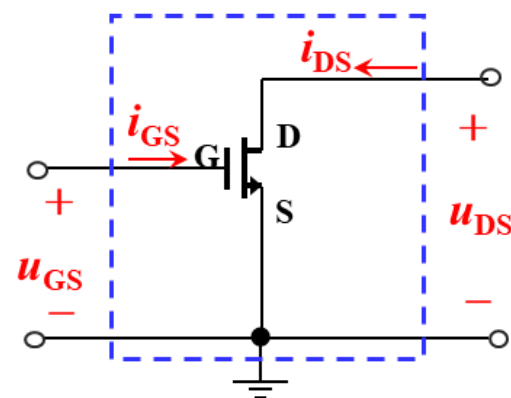
N沟道增强型MOSFET, 在给定的 u_{DS} 下, (比如2V) 随 u_{GS} 的增加, 该元件会从截止区逐渐过渡到____区和____区

A 电阻, 电流源

B 电流源, 电阻

粗略地说,
如何(对于某个给定的 u_{DS} (比如2V))改变 u_{GS} ,
使得D-S之间可视为压控开关的开和关?

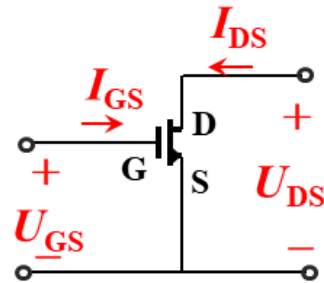
此处可以有弹幕



总结

本讲中MOSFET工作于1或3

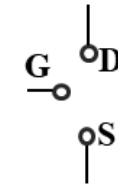
检验方式见L8



1. 截止区

条件 $(u_{GS} - U_T) < 0$

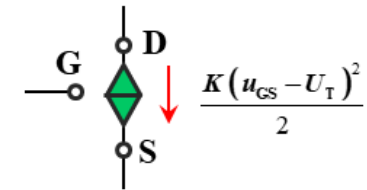
性质 $i_{DS} = 0$



2. 恒流源区

条件 $0 < (u_{GS} - U_T) < u_{DS}$

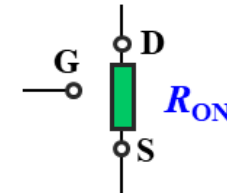
性质 $i_{DS} = \frac{K(u_{GS} - U_T)^2}{2}$



3. 电阻区

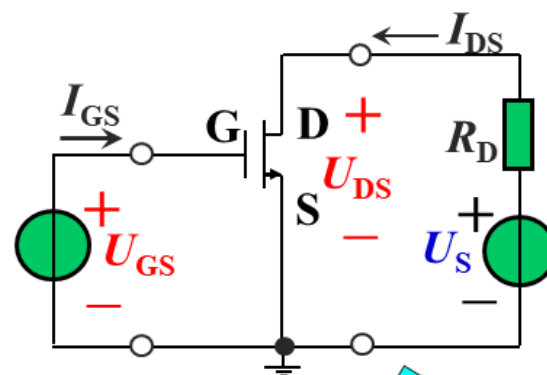
条件 $(u_{GS} - U_T) > u_{DS}$

性质 R_{ON}

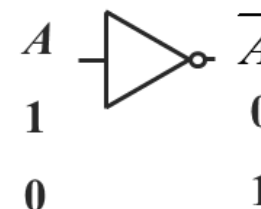


所有信号
都从G级进入

2.2 用MOSFET构成逻辑门



反相器



我们希望:

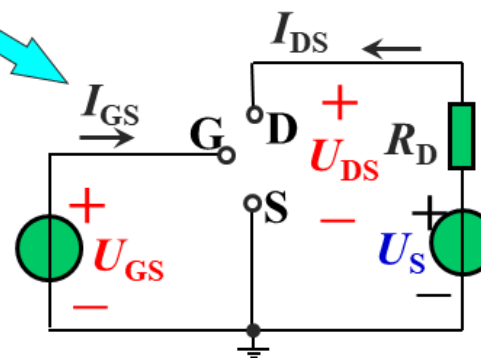
- (1) 输入 U_{GS} 为 “0” 时, 输出 U_{DS} 为 “1”
- (2) 输入 U_{GS} 为 “1” 时, 输出 U_{DS} 为 “0”

输入 U_{GS} 为 “0” 时

假设:

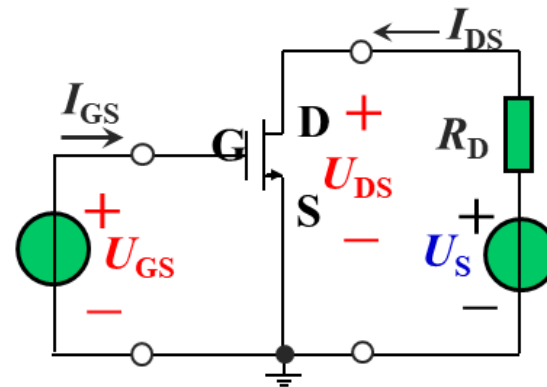
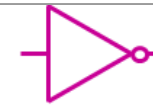
“0” \leftrightarrow 接近 0V

“1” \leftrightarrow 接近 5V

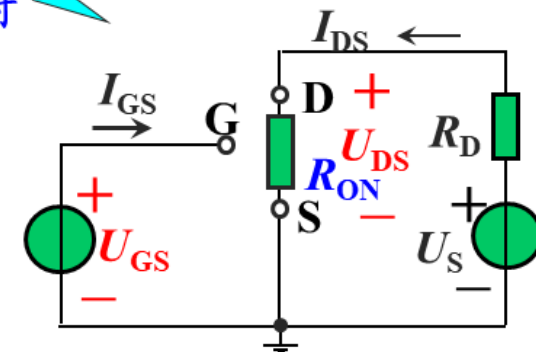
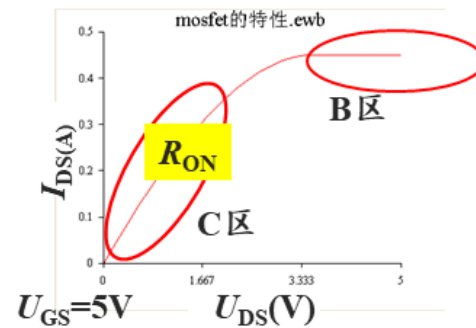
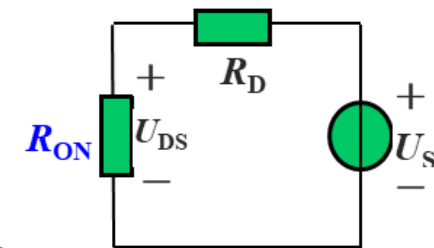


输出 U_{DS} 为 “1”

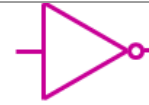
反相器 (Inverter)



输入 U_{GS} 为 “1” 时

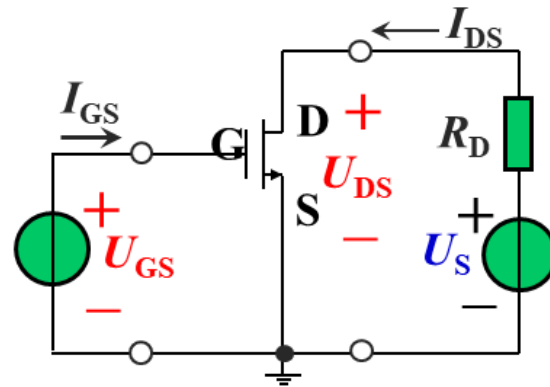


反相器 (Inverter)

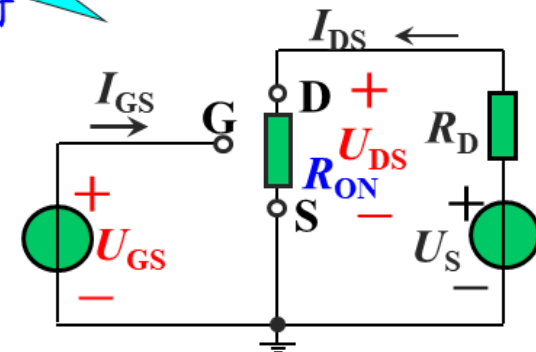
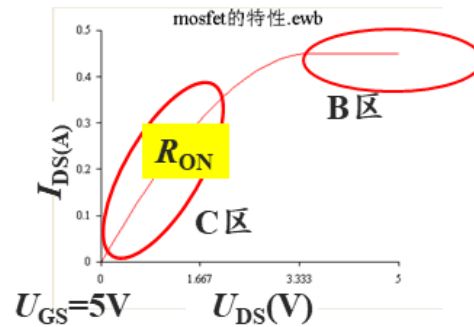
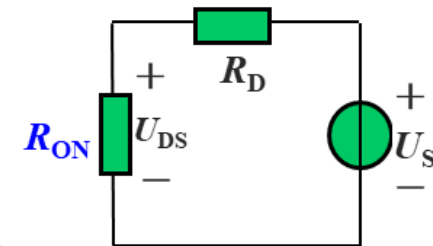


此处可以有弹幕

如何保证 U_{GS} 为“1”时，输出 U_{DS} 为“0”？



输入 U_{GS} 为“1”时

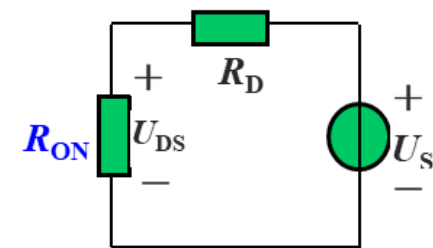
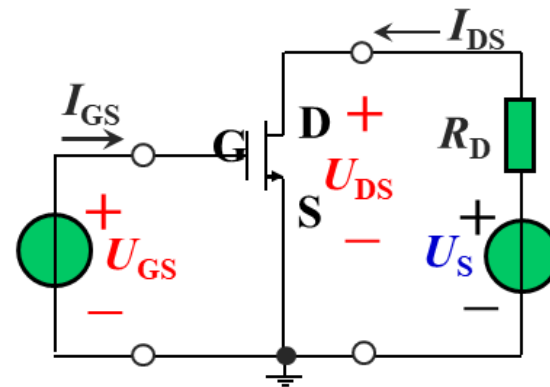


反相器 (Inverter)

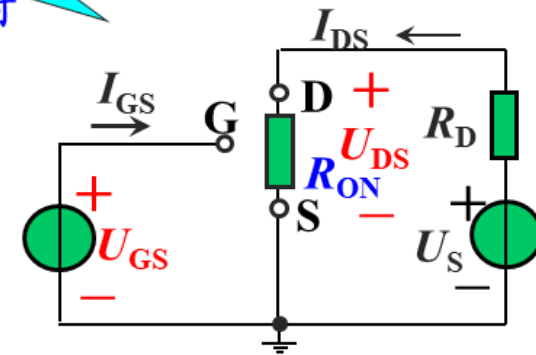
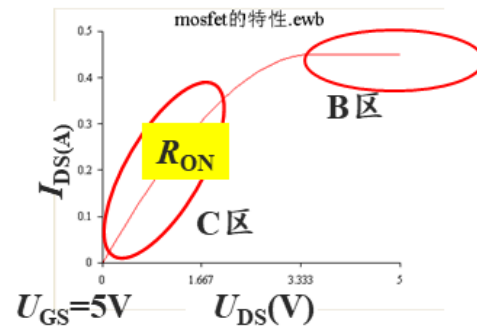


$$R_{ON} \ll R_D$$

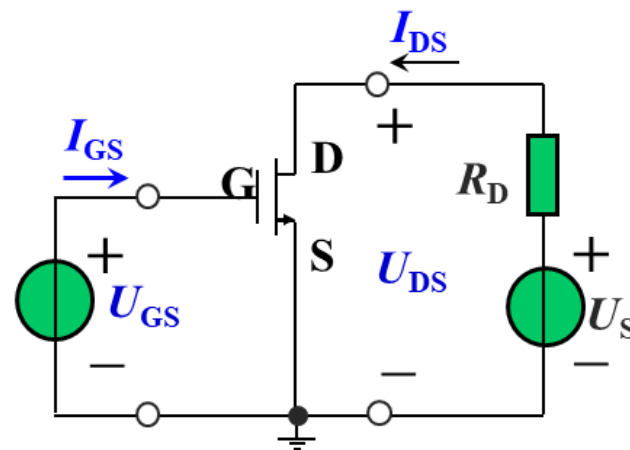
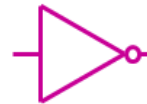
如何保证 U_{GS} 为 “1” 时，输出 U_{DS} 为 “0” ？



输入 U_{GS} 为 “1” 时



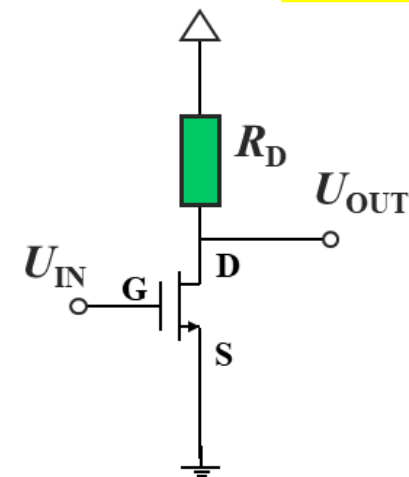
反相器



如何构成缓冲器？



看仿真

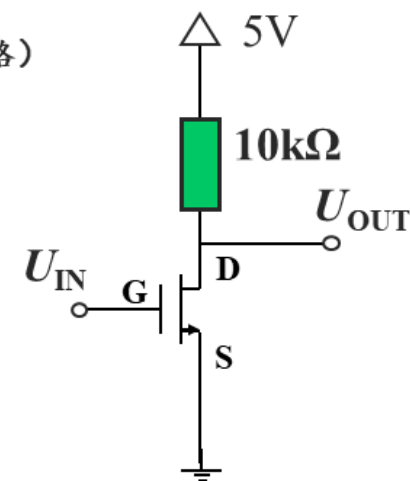


所有信号
都从G级进入

单选题 1分

已知 $R_{ON}=10\Omega$, U_{IN} 为信号“1”时, 该电路(整个电路)消耗的功率为____mW

- A 25
- B 0.21
- C 2.31
- D 2.5**



进一步问题:
为什么计算这个功率的时候,
不考虑 U_{out} 流出的电流?

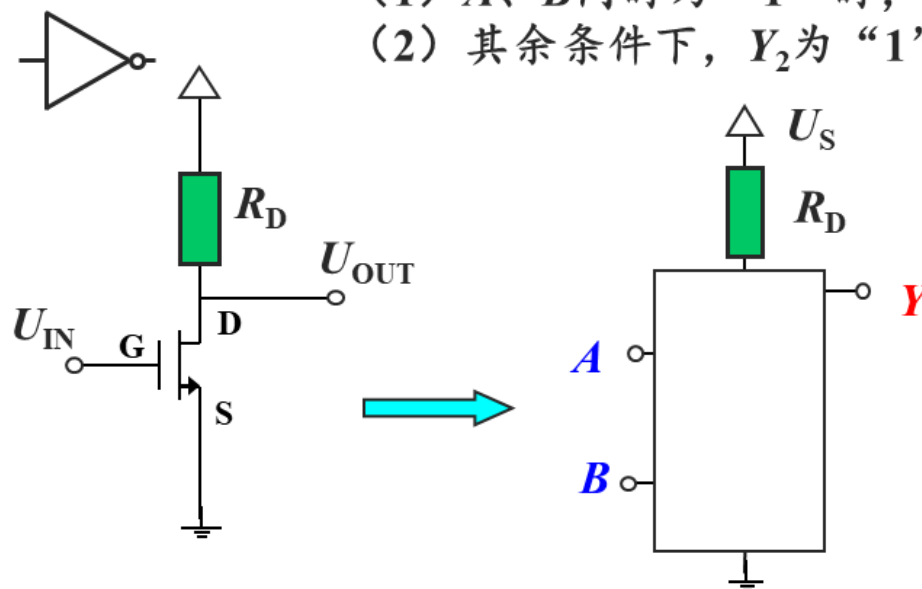
此处可以有弹幕

与非门 (NAND)

$$\text{NAND Symbol} \quad Y_2 = \overline{A \cdot B}$$

我们希望：

- (1) A 、 B 同时为“1”时， Y_2 为“0”；
- (2) 其余条件下， Y_2 为“1”。



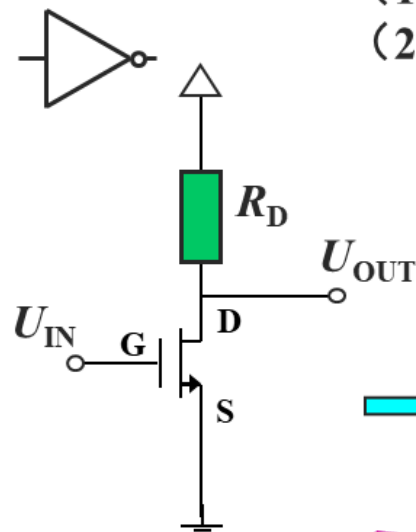
此处可以有投稿

与非门 (NAND)

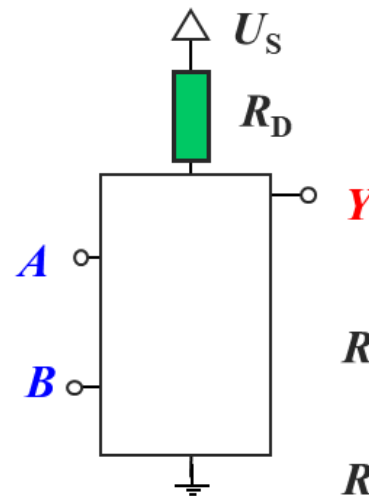
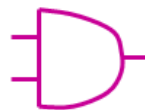
$$Y_2 = \overline{A \cdot B}$$

我们希望：

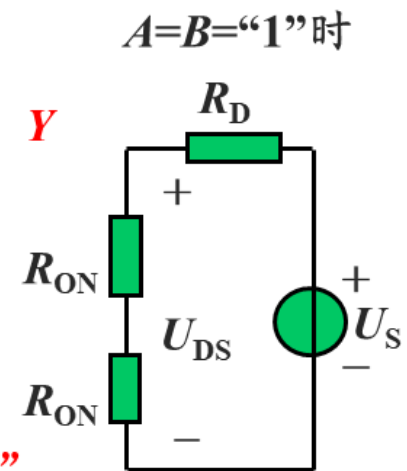
- (1) A 、 B 同时为“1”时， Y_2 为“0”；
- (2) 其余条件下， Y_2 为“1”。



如何构成与门？



串联 \leftrightarrow “与”

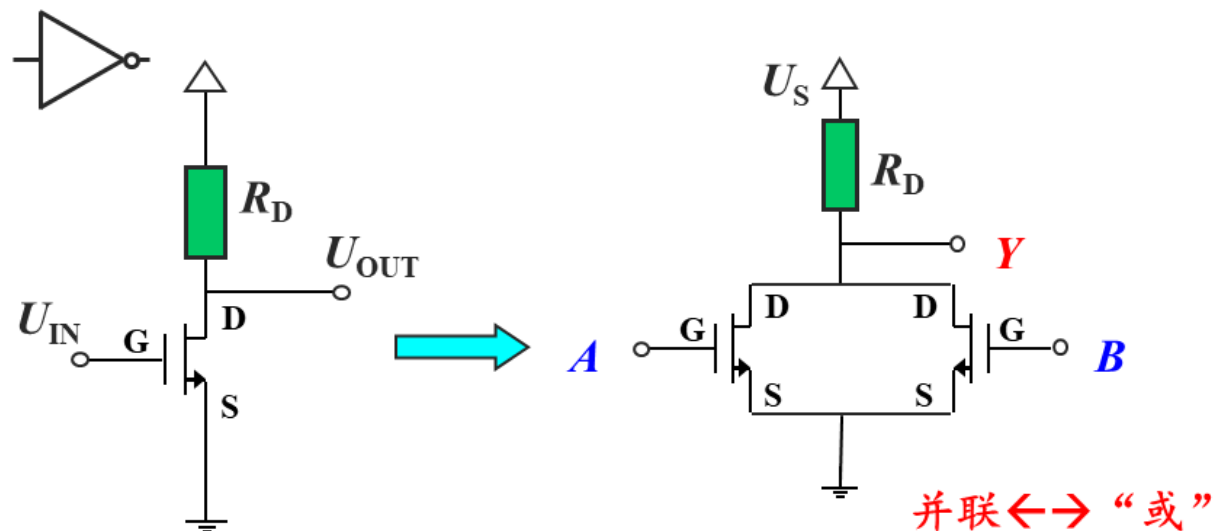


或非门 (NOR)

$$\Rightarrow Y_3 = \overline{A + B}$$

我们希望:

- (1) A 、 B 同时为“0”时, Y_2 为“1”
- (2) 其余条件下, Y_2 为“0”

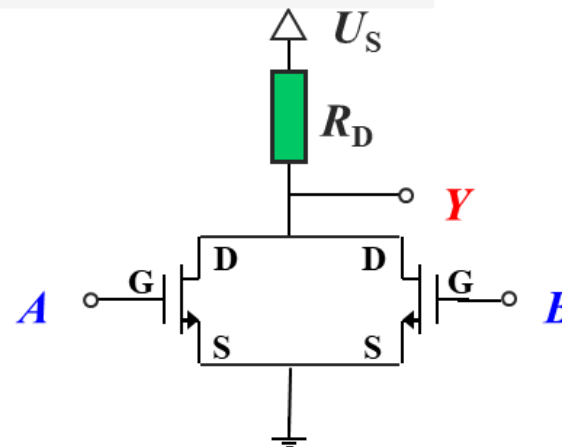


Principles of Electric Circuits Application 1 Tsinghua University 2023

38

单选题 1分

下面哪个条件下，
整个电路消耗的功率最大？
(最先答对的3位同学有红包)



- ☐ A $A=0, B=0$
- ☐ B $A=0, B=1$
- ☐ C $A=1, B=0$
- ☒ D $A=1, B=1$

例子：安理会某投票表决系统

- 能源12班某同学受联合国委托开发一套安理会投票表决系统。要求用**5V电源**、**MOSFET**、**电阻器**、**发光二极管**和**单刀双置开关**来构成该系统。
 - 安理会由中、美、俄、法、英5国组成。
 - 每个国家只能有两种投票方式：赞成、反对。
 - 只有5个国家全部投赞成票，提案才能通过。

Step 1: 逻辑表达式

法1: 先写真值表, 然后根据真值表得到逻辑表达式。

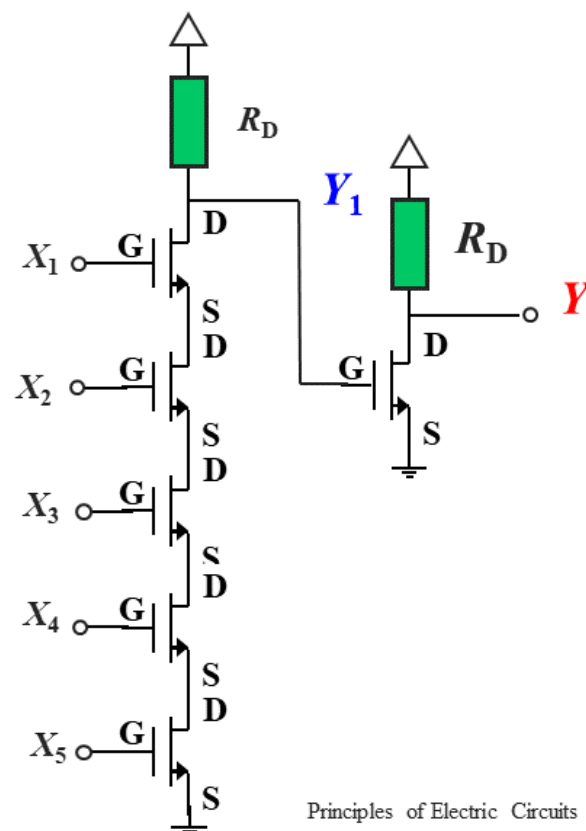
法2: 直接得到逻辑表达式。

$$Y = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5$$

其中, X_1 、.....、 X_5 分别代表5个国家的投票情况, 均为逻辑值。

“1”为赞成, “0”为反对。

Step 2: 写成能够用MOSFET 实现的逻辑门的组合



$$Y_1 = \overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5}$$

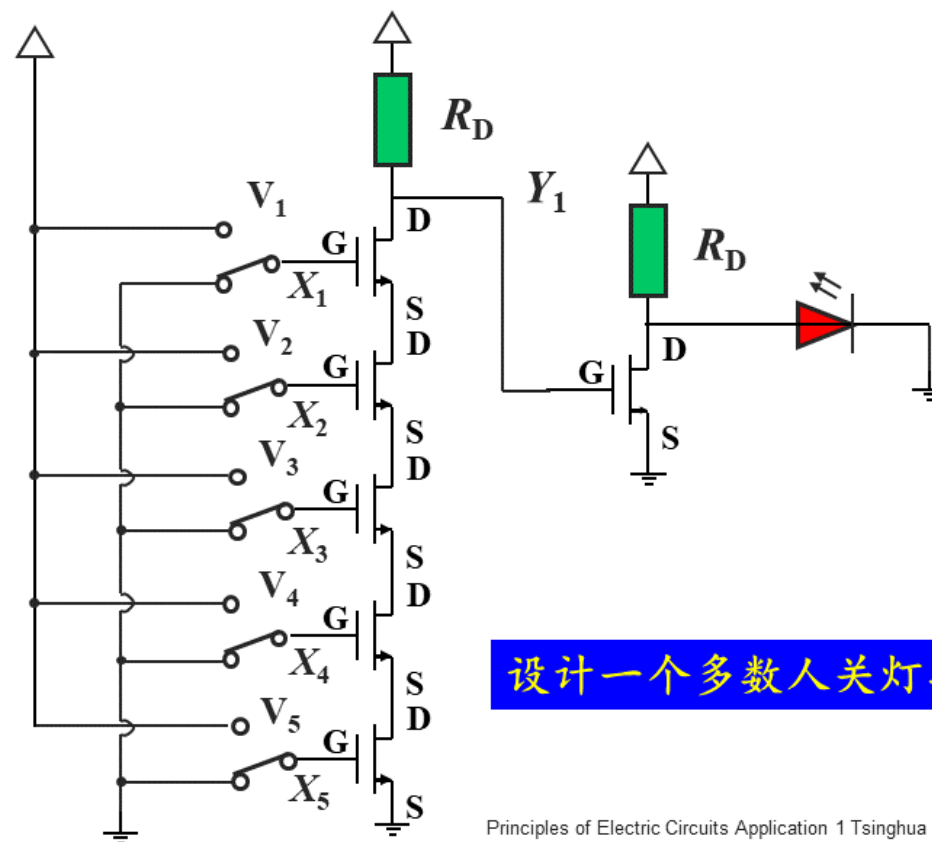
$$Y = \overline{\overline{X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \cdot X_5}}$$

$$Y = \overline{Y_1}$$

Principles of Electric Circuits Application 1 Tsinghua University 2023

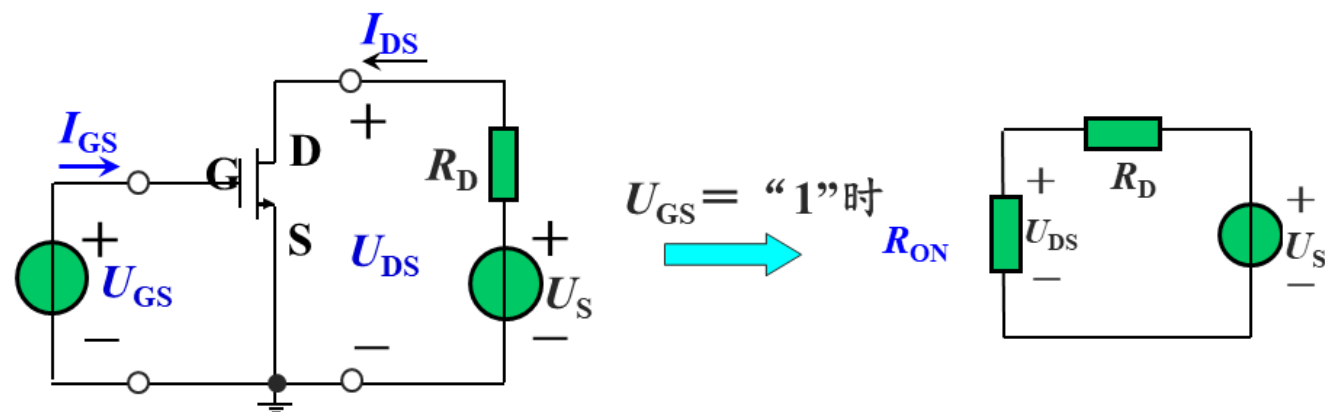
42

Step 3: 构成最终的投票系统



设计一个多数人关灯投票系统？

2.3 用MOSFET构成逻辑门电路的功率分析



设 $U_S = 5V$, $R_L = 100k\Omega$, $R_{ON} = 10\Omega$

$$W_{\text{GATE_ABSORB}} = \frac{U_S^2}{R_D + R_{ON}} \approx \frac{25}{10^5} = 0.25\text{mW}$$

单选题 1分

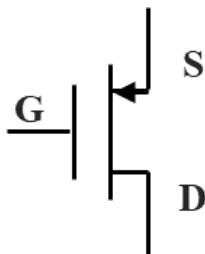
$$W_{\text{GATE_ABSORB}} \approx 0.25\text{mW}$$

一颗i7 CPU中大约有10亿个晶体管，如果这些晶体管均为n沟道增强型MOSFET并且构成反相器，则这颗CPU消耗的功率大约为：

- ☐ A 25W
- ☐ B 2.5kW
- ☒ C 25kW
- ☐ D 250kW

对现在的你来说，这就是个数字
但对于设计i7 CPU的人来说
这意味着什么？

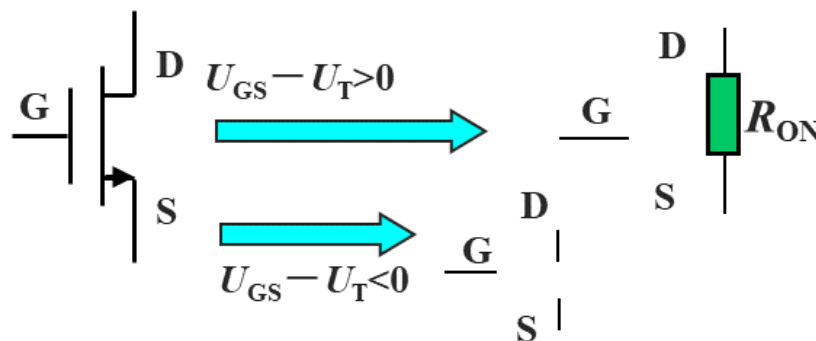
2.4 CMOS



此处可以有投稿

p沟道增强型MOSFET

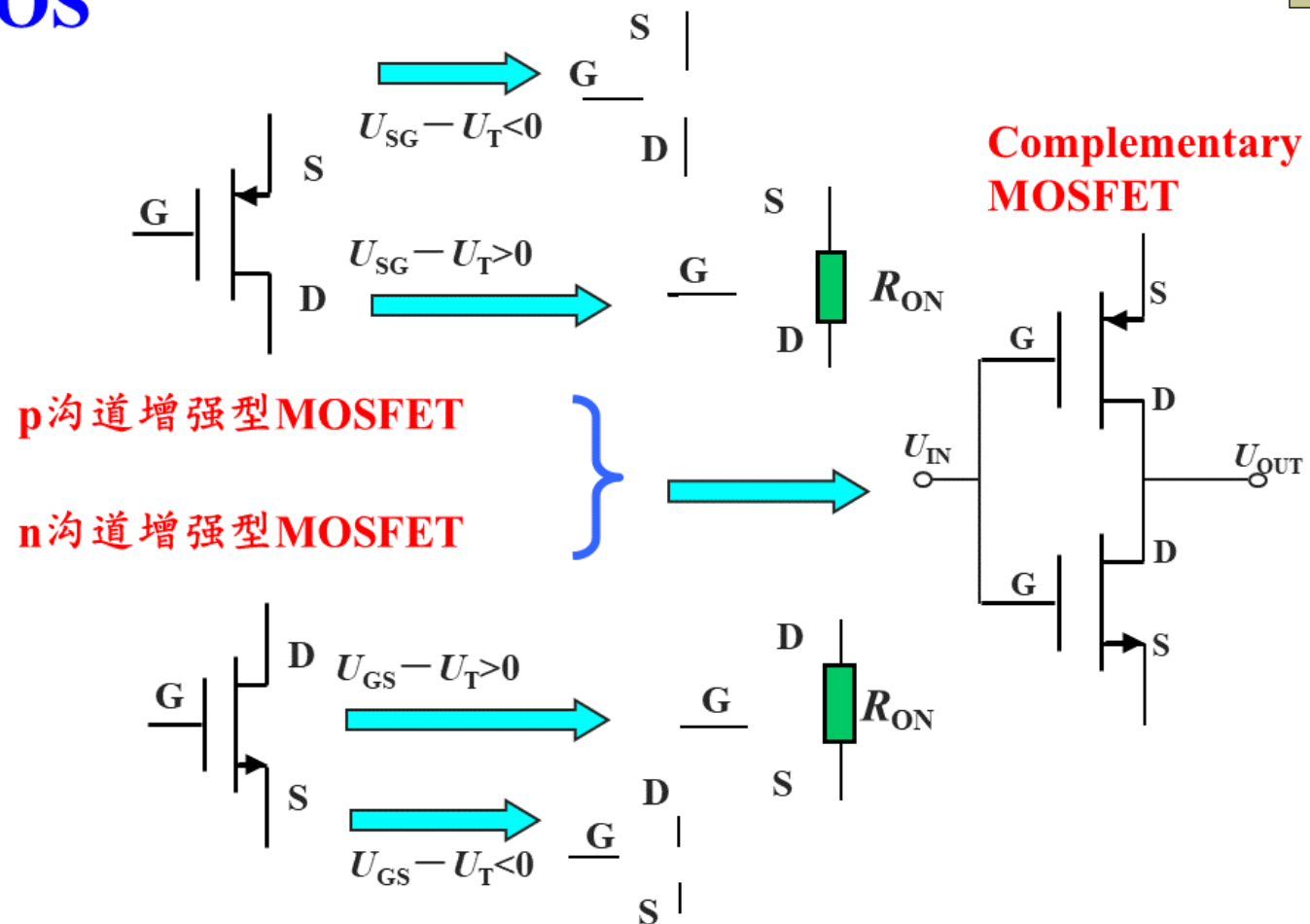
n沟道增强型MOSFET



Principles of Electric Circuits Application 1 Tsinghua University 2023

46

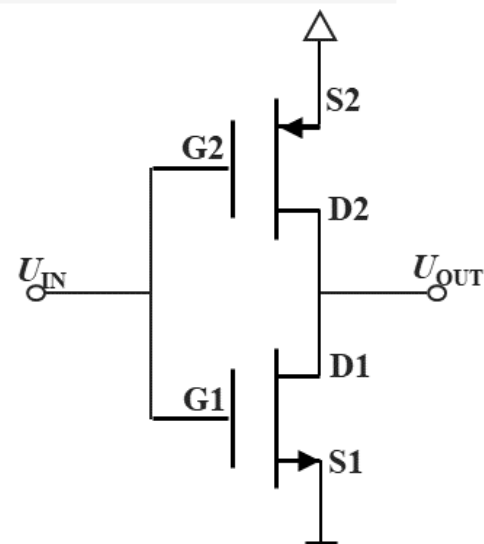
2.4 CMOS



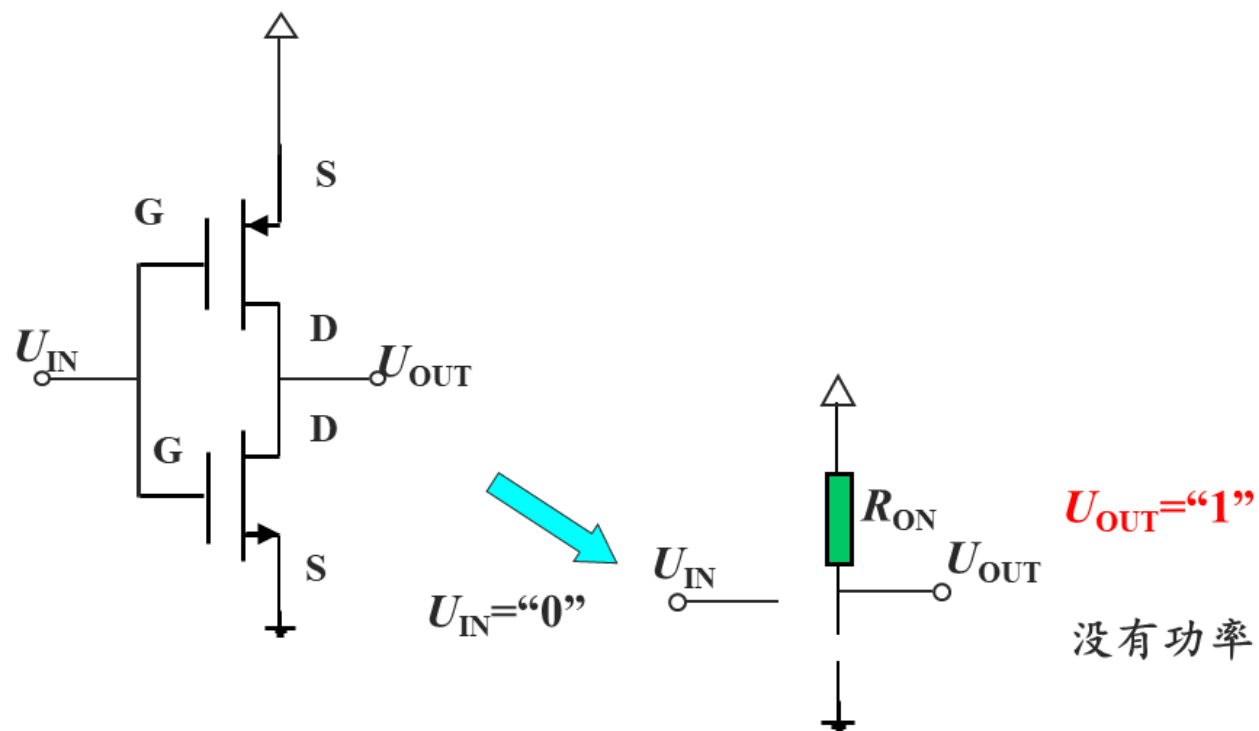
单选题 1分

U_{IN} 为“0”时，
S2和D2之间是什么？

- ☐ A 电阻 R_{ON}
- ☐ B 受控源
- ☒ C 开路



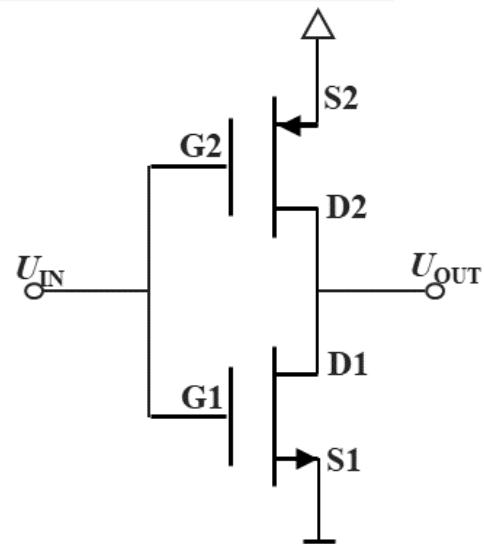
CMOS反相器



单选题 1分

**U_{IN} 为“1”时，
S2和D2之间是什么？**

- A 电阻 R_{ON}
 B 受控源
 C 开路



CMOS反相器

