
数字逻辑电路

数字逻辑基础

电子物理与器件教育部重点实验室
等离子体与微波电子学研究所

张小宁



第一节：数字逻辑概述

第二节：数制与编码

第三节：逻辑代数基础

第四节：数字逻辑门电路



学习内容及要求:

- ① 区别模拟与数字表示法,了解数字技术的优点和不足
- ② 熟练掌握数制及其相互转换方法
- ③ 熟练掌握数字系统中数与编码的表示和运算
- ④ 掌握逻辑代数的相关概念、基本运算、定律、基本定理和基本规则,逻辑函数的基本表达式、标准形式
- ⑤ 熟练掌握逻辑函数的化简方法
- ⑥ 熟悉数字逻辑门电路与集成电路



1. 数字逻辑概述

视频 指导 合集

1. 什么是数字系统
2. 数字技术的起源与发展
3. 数字信号的描述方法
4. 数字逻辑电路的特点及分类

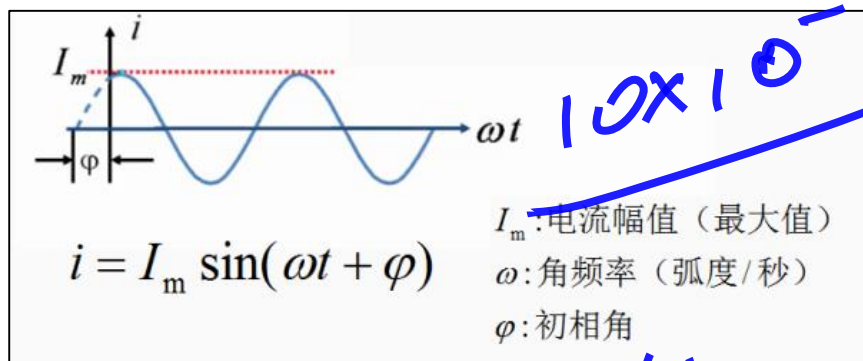
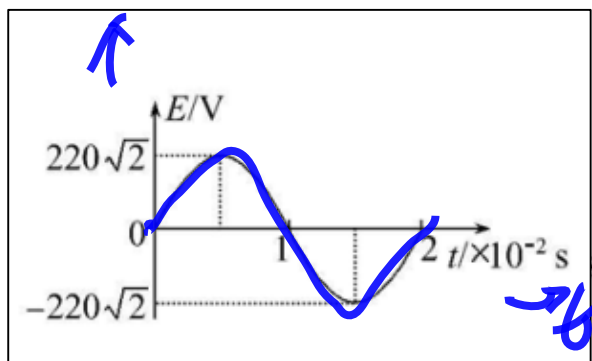


1. 什么是数字系统

物理量的表示方法

AC 220V 有效值 \rightarrow 50Hz

(1) **模拟量表示法**: 用电压、电流或与所反映的数量成比例的表头的移动来表示。(模拟量: 数值可在一定的范围内连续变化)。



特点: (1) 时间上的连续性: 任意时刻都有一个相对值; (2) 量上的连续: 任意时刻可以是一定范围内的任意值, 如: 水位, 电压, 电流, 温度, 亮度, 颜色等

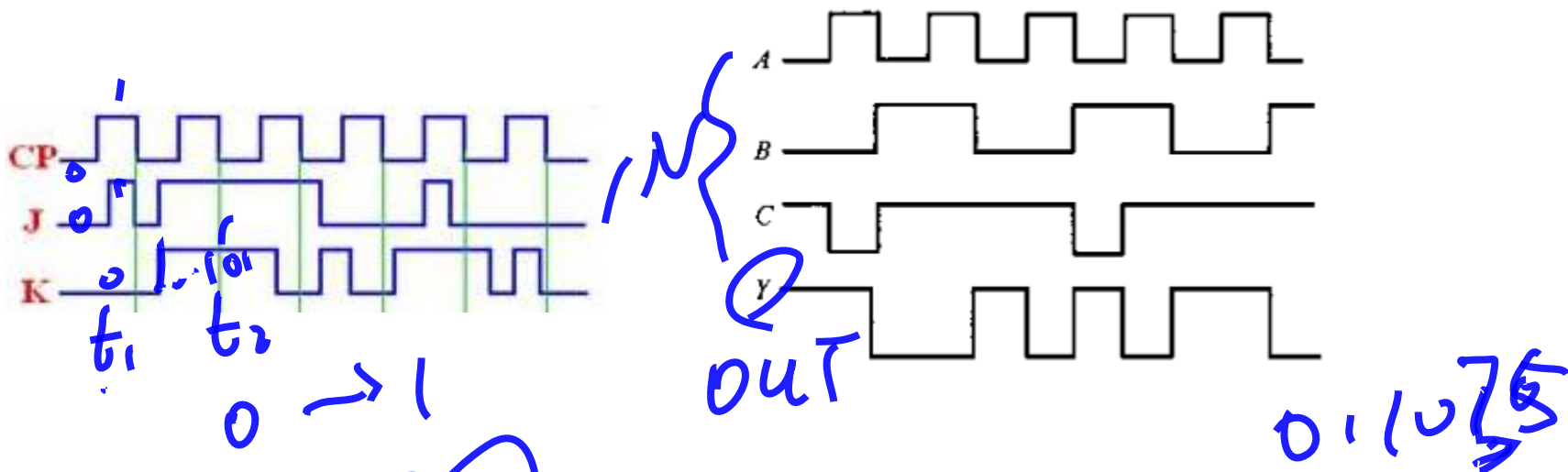
缺点: 很难度量; 容易受噪声干扰; 难以保存

优点: 可以用精确的值表示事物。



1. 什么是数字系统

(2) 数字表示法: 数量不是用可连续变化的指示仪表而是用数字符号来表示。



非连续的，离散的。(1) 时间上的离散: 变量只在某些时刻有定义；(2) 量上的离散: 变量只能是有限集合的一个值，如：开关位置：ON/OFF，逻辑值0/1。

优点：(1) 更多的灵活性，更快更精确的计算；(2) 容易实现存储；(3) 误差监测和修正；(4) 容易最小化。

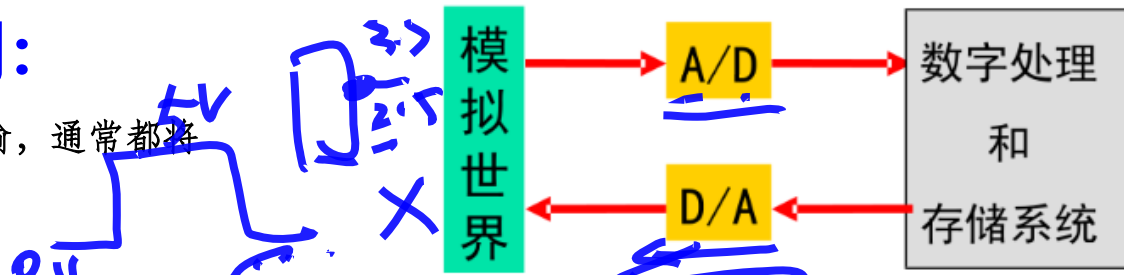
Handwritten annotations: 0.1010 , 2^{-x} , and a diagram showing a sequence of bits $0, 1, 1, 1$ with arrows pointing to them.



1. 什么是数字系统

模拟量和数字量的区别:

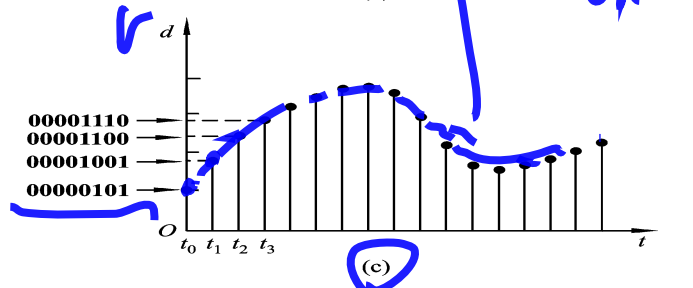
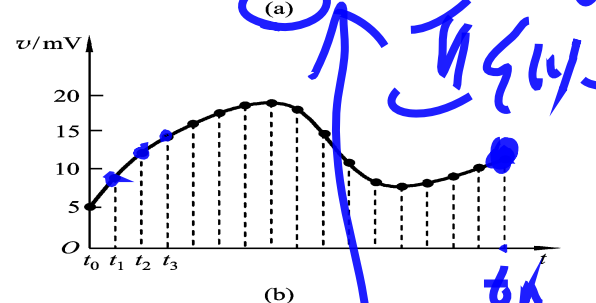
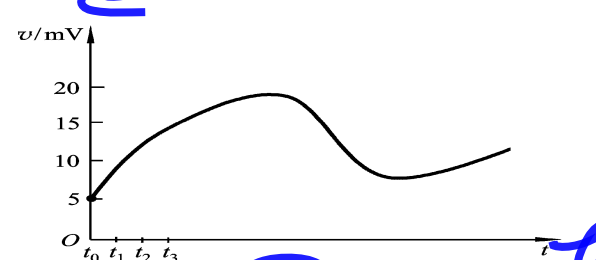
- 由于数字信号便于存储、分析和传输，通常都将模拟信号转换为数字信号。
- 模拟量=连续；数字量=离散(步进)
- 数字表示具有离散性，当阅读数字量的值时，不存在模棱两可情况。模拟量的值常有解释的余地。



用数字量传递加工处理信息，进行算术运算和逻辑运算的电路称为数字电路，或数字系统。

由于它具有逻辑运算和逻辑处理功能，所以又称数字逻辑电路。

现代的数字电路由半导体工艺制成的若干数字集成器件构造而成。逻辑门是数字逻辑电路的基本单元。数字电路可以分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两大类。





1. 什么是数字系统

自然界中多数是模拟量，为什么还要多次一举？

数字 → 模拟

一、模拟信号有无穷多种可能的波形，同一个波形稍微变化就成了另一种波形，而数字信号只有两种波形(高电平和低电平)，这就为信号的接收与处理提供了方便。

二、模拟信号由于它的多变性极容易受到干扰，其中包括来自信道的和电子器件的干扰，模拟器件难以保证高的精度(如放大器有饱和失真、截止失真、交越失真，集成电路难免有零点漂移)。而数字电路中有限的波形种类保证了它具有极强的抗干扰性，受扰动的波形只要不超过一定门限总能够通过一些整形电路(如斯密特门)恢复出来，从而保证了极高的准确性和可信性。而且基于门电路、集成芯片所组成的数字电路也简单可靠、维护调度方便，很适合于信息的处理。

数字电路的特点:

- 稳定性好
- 可靠性高
- 可长期存储
- 便于计算机处理
- 便于高度集成化





2. 数字技术的起源与发展

(1) 数字的出现

- 数字在古代文明中均是独立存在的：
 - ✓ 古埃及：使用两种不同的系统表示分数，一是埃及分数（与二进制记数系统无关）；二是荷鲁斯之眼分数，在这一系统下，以赫卡特为单位的分数值表示成 $1/2$ 、 $1/4$ 、 $1/8$ 、 $1/16$ 、 $1/32$ 和 $1/64$ 等二进制分数的和。
 - ✓ 印度：印度学者平甲拉(公元前两世纪左右)通过二进制方法来研究韵律诗。他的二进制中用到的是长短音节(一个长音节相当于两个短音节)，有些像摩尔斯电码。
 - ✓ 莱布尼茨前的西方先驱：1605年，弗朗西斯·培根提出了一套系统，可以把26个字母化为二进制数。此外他补充道，这个思路可以用于任何事物：“只要这些事物的差异是简单对立的，比如铃铛和喇叭，灯光和手电筒，以及火枪和类似武器的射击声”。
 - ✓ 莱布尼茨和中国的《易经》：莱布尼茨关于二进制的论文全名是《论只使用符号0和1的二进制算术，兼论其用途及它赋予伏羲所使用的古老图形的意义》（1703年）。类似于现代二进制计数系统，莱布尼兹的系统使用0和1。
 - ✓ 布尔代数，开关代数
- 数字采用十进制，阿拉伯数字

十进



2. 数字技术的起源与发展

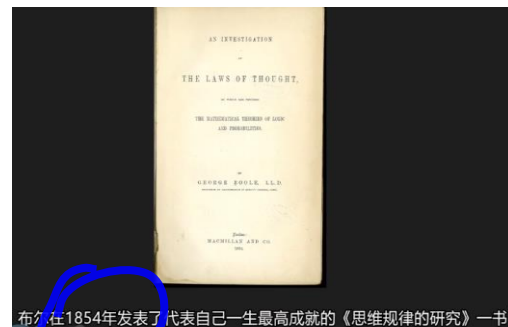
(2) 布尔代数的诞生



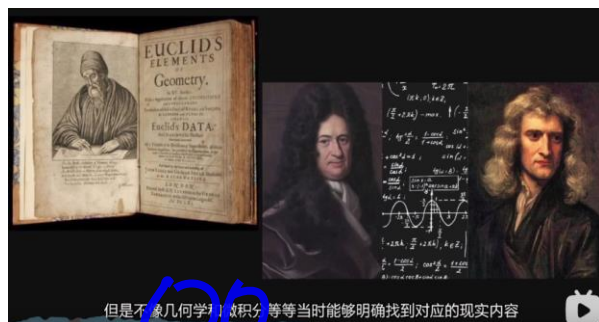
一名叫乔治·布尔的小学老师



因为不满当时的数学教材而开始钻研数学并准备推出自己的教材



布尔在1854年发表了代表自己一生最高成就的《思维规律的研究》一书



但是不像几何和微积分等等当时能够明确找到对应的现实内容



很多改变世界的东西最初被提出的时候都会被认为无用且怪异的

1854年，英国数学家乔治·布尔发表了一篇里程碑式的论文，详细介绍了一种代数学化的逻辑系统，标志着布尔代数的诞生，完美的把逻辑推理符号化。它是一种描述客观事物逻辑关系的数学方法，是从哲学领域的逻辑学发展而来的。他提出的逻辑演算在后来的电子电路设计中起基础性作用。

0 1 或非

Boole, George. [An Investigation of the Laws of Thought on Which are Founded the Mathematical Theories of Logic and Probabilities](#) Macmillan, Dover Publications, reprinted with corrections [1958]. New York: Cambridge University Press. 2009 [1854] [2016-07-14]. ISBN 978-1-108-00153-3..



2. 数字技术的起源与发展

数字
存在数

(3) 开关电路的诞生

香农论文

1937年，克劳德·香农在麻省理工大学完成了其电气工程硕士学位论文，用继电器和开关实现了布尔代数和二进制算术运算。论文《继电器与开关电路的符号分析》（A Symbolic Analysis of Relay and Switching Circuits），其中香农的理论奠定了数字电路的理论基础。香农凭这篇论文于1940年被授予美国阿尔弗雷德·诺贝尔协会美国工程师奖。哈佛大学的哈沃德·加德纳称，香农的硕士论文“可能是本世纪最重要、最著名的硕士学位论文”。

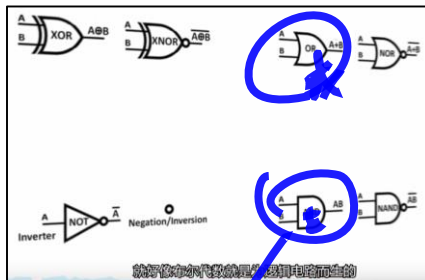
写进



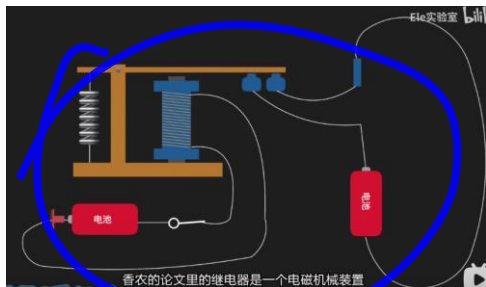
1938年的美国又一个天才香农



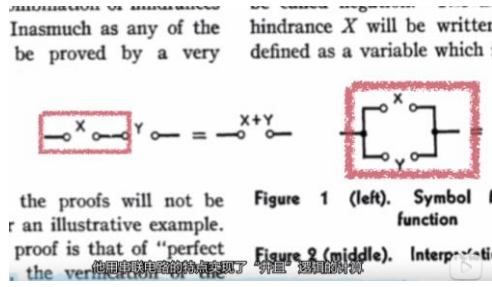
第一次尝试把布尔代数应用在在电路系统中



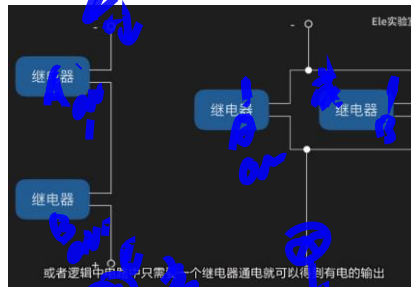
数字逻辑门电路就是由继电器电路产生的



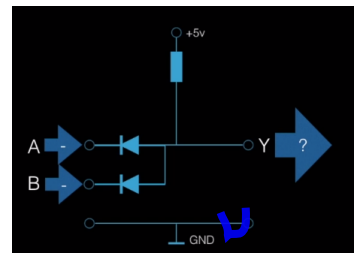
香农的论文里的继电器是一个电磁机械装置



他用继电器真的就实现了“异或”逻辑电路



或者逻辑中只需要一个继电器通电就可以得到有电的输出



Shannon, Claude Elwood. A symbolic analysis of relay and switching circuits. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology. 1940 [2016-07-14].



2. 数字技术的起源与发展

(4) 数字系统中为什么要采用二进制

(1) 易于实现

数字电路里的状态是由开关来控制，开关只有开和关两种状态，而二进制也只有"0"和"1"两种状态，很容易用电子元件实现。因此采用二进制来表示，0表示低电平，1表示高电平，或者反过来表示的也有。

为 → 有代号
→ 开关 → 二进制
0/1

(2) 简化运算

二进制数加法和乘法仅各有3条运算规则($0+0=0$, $0+1=1$, $1+1=10$ 和 $0\times 0=0$, $0\times 1=0$, $1\times 1=1$)运算规则简单，有利于简化内部结构，提高运算速度。

与或非

(3) 适合逻辑运算

二进制只有两个数码，正好与逻辑代数中的“真”和“假”相吻合。因此能更方便地进行逻辑运算（与、或、非、判断、比较、处理等）。

0 1

(4) 易于转换

二进制数能很容易地转换成八进制、十六进制，也能转换成十进制。

2 → 10 2ⁿ

(5) 简单可靠，准确性高

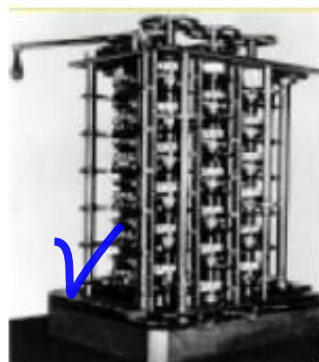
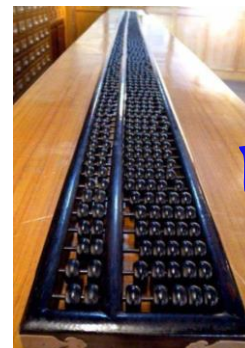
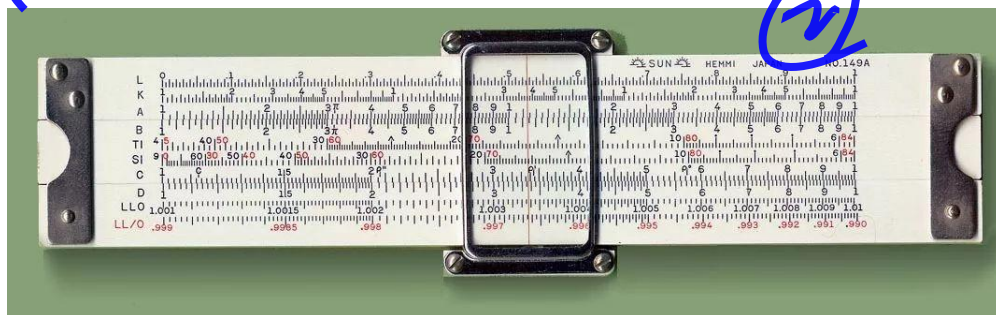
二进制数运算简单、识别方便，因为每位数据只有高低两个状态，当受到一定程度的干扰时，仍能可靠地分辨出它是高还是低。



2. 数字技术的起源与发展

数字逻辑器件和“计算机”的发展

- 最早的计算用具“计算机”：算盘，计算尺；机械计算器具（加法机，差分机）；机电计算机（使用继电器设计自动计算机）
- 1937年11月，任职于贝尔实验室的乔治·斯蒂比兹（George Stibitz，1904-1995），美国，“数字计算机之父”，发明了用继电器表示二进制的设备。它是第一台二进制电子计算机。
- 1853年到1946年？计算机的发展正在进行中…

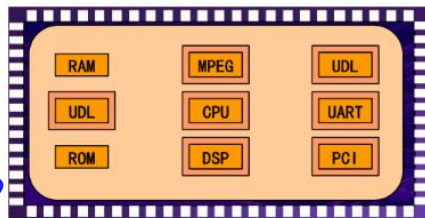
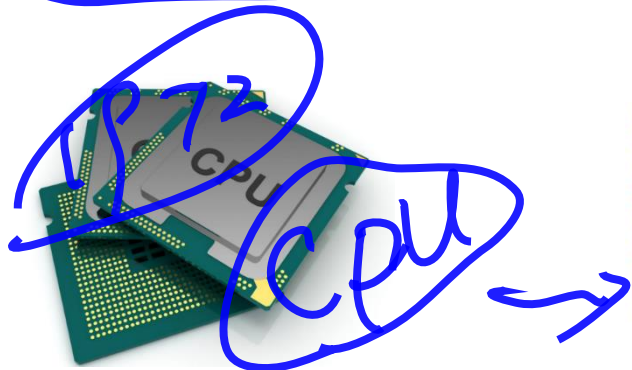
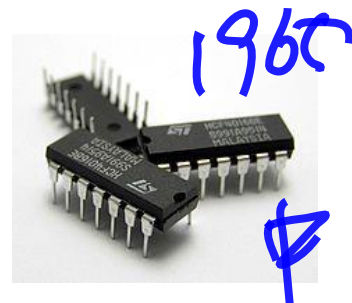
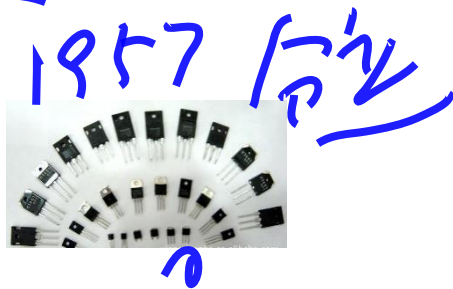




2. 数字技术的起源与发展

数字技术的发展

- 第一代：1946-1957，电子真空管：电子管体积大、重量重、耗电大、寿命短。目前在一些大功率发射装置中使用。
- 第二代：1957-1964，晶体管
- 第三代：1965-1972，中小规模集成电路
- 第四代：1972-? 大规模，超大规模
- 第五代：系统芯片(System-on-Chip, SoC)，网络芯片 (Network-on-Chip, NoC)



SoC GPU
A100



2. 数字技术的起源与发展

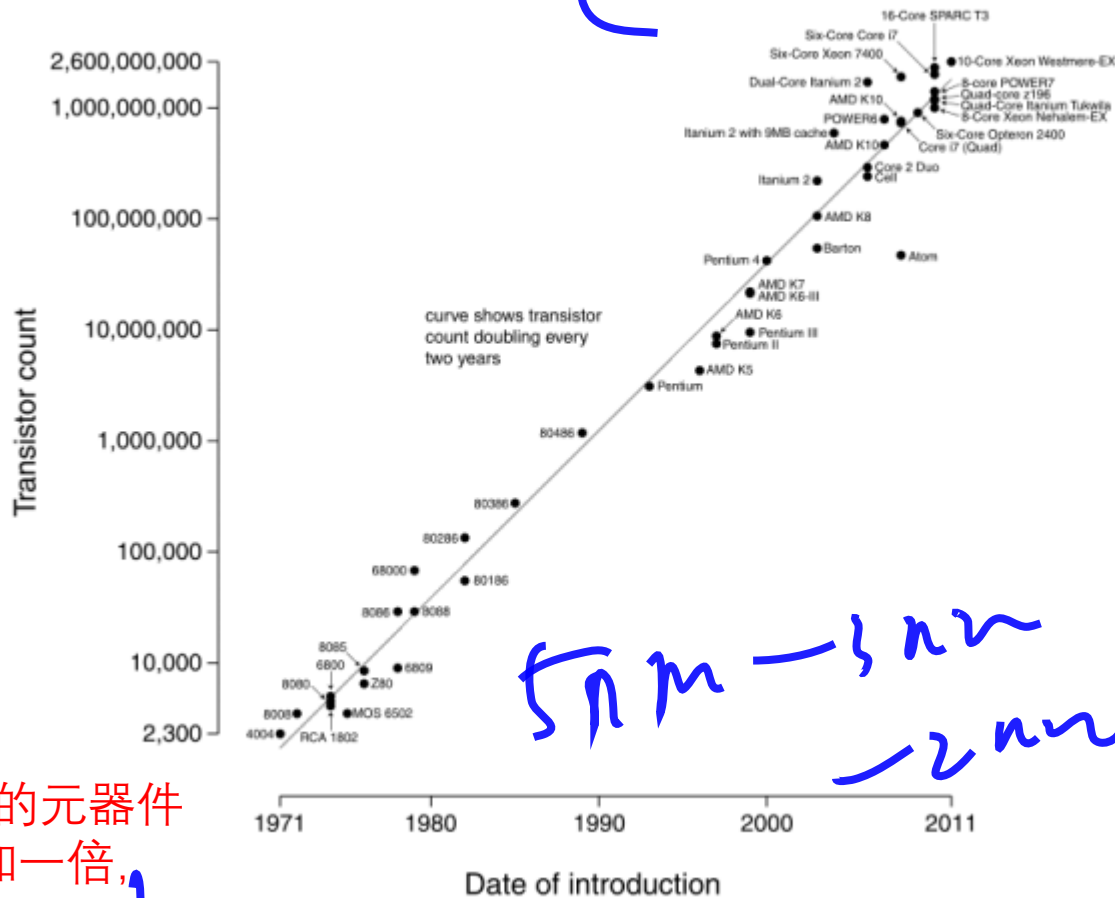
摩尔定律

- Moore's Law: The number of transistors per integrated circuit would double every 18 month.
- 这个论断是在第一块平面集成电路产生4年以后的1965年做出的。
- 当时认为这个发展趋势将持续到1975年。
- 事实上，这个发展规律在目前仍是正确的。
- 按目前发展趋势，这个规律仍将有效至少20年。



Intel公司创建人之一戈登·摩尔

Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

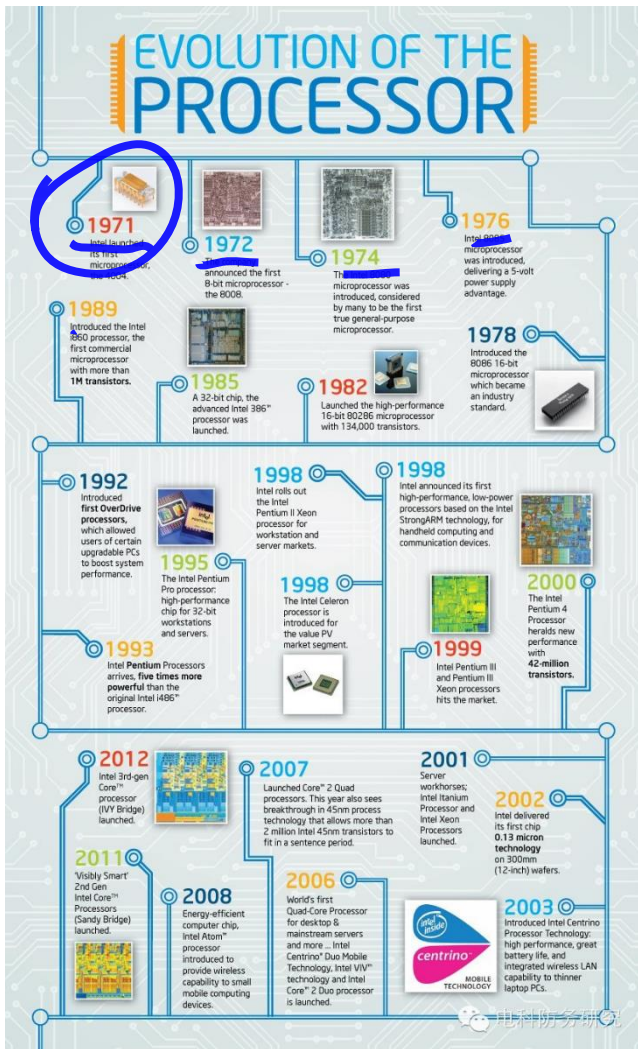


当价格不变时，集成电路上可容纳的元器件的数目，约每隔18-24个月便会增加一倍，性能也将提升一倍。

价格下降

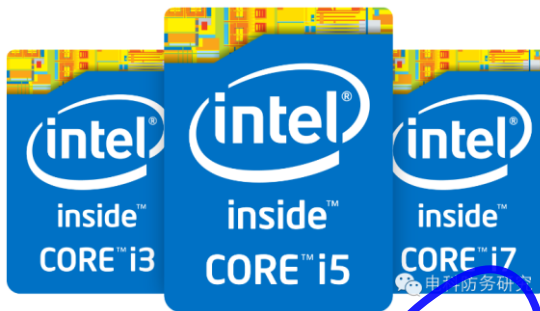


2. 数字技术的起源与发展



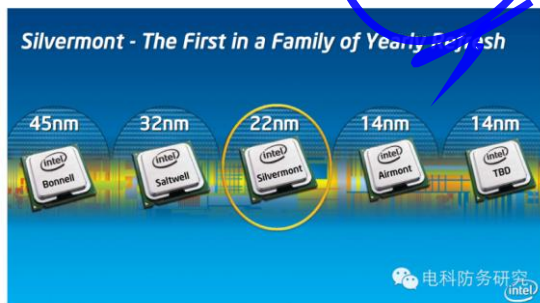
CPU

2011年：重新确定处理器产品架构



制程

2012年：发布22纳米工艺和第三代处理器



使用22nm工艺的处理器你热功耗普遍小于77W，使得处理器的散热需求大幅下降，提升了大规模数据运算的可靠性，并降低了散热功耗。

一代2K

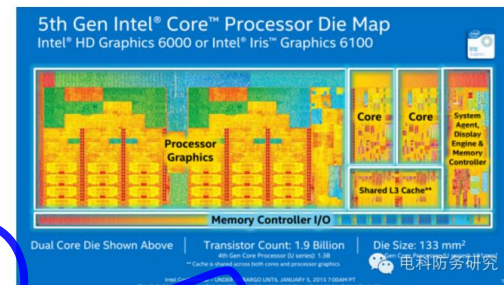
2014年：首发桌面级8核心16线程处理器



2014年9月上市的i7-5960X处理器是第一款基于22nm工艺的八核心桌面级处理器，拥有高达20MB的三级缓存，主频达到3.5GHz，热功耗140W。此处理器的处理能力可谓超群，浮点运算能力是普通台式电脑的10倍以上。随着这一“怪兽”处理器的问世，INTEL公司在处理领域与AMD的距离越拉越大，已经完全形成了一家独大的局面。

2015年是微电子的新时代——14nm工艺产品正式上市

虽然说2014年9月14nm Broadwell处理器已经推出，但仅仅属于低功耗的Core M移动处理器系列。但随着E5-2650v5的到来，Intel 14nm处理器终于迎来了新一轮的爆发，第五代Core系列处理器正式登场。新处理器除了拥有更强的性能和功耗优化外，同时支持Intel RealSense技术，带来更加强大的体感交互体验。



3nm

http://www.360doc.com/content/15/0411/07/21966267_462329844.shtml



2. 数字技术的起源与发展

总结:

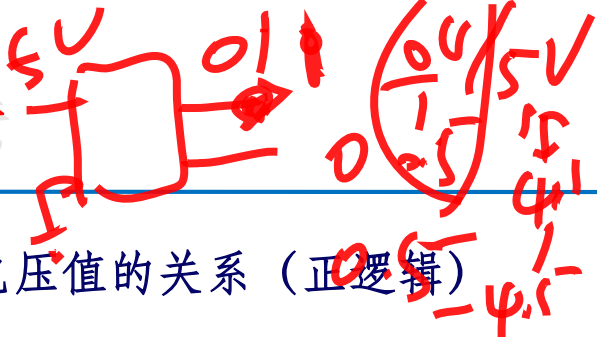


A	B	C
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

- ① 数字电路的基础是数字逻辑。数字系统是基于数字逻辑来设计的，数字逻辑设计的数学基础是布尔代数，数字电路的设计所有行为都必须符合布尔代数的原理，因此数字电路中的逻辑表达式也叫布尔表达式。
- ② 布尔代数把逻辑表述映射到符号，采用数学方法处理逻辑推理。香农的开关代数，把布尔代数和开关联系在一起，第一次提出Bit（比特）的概念。
- ③ 数字电路最基础的设计方法是“真值表法”，就是推算各种布尔表达式的值。
- ④ 逻辑运算归结为三个操作“与或非”，两个结果0和1。在数字系统中，任何复杂的逻辑，都可以用“与”、“或”、“非”三种最基本的逻辑组合变化而来。0和1正好跟数字电路的高、低两个电平相对应，也与晶体管的开、关相对应，任何数字和文本、声音、图形图像等复杂信息都可以用二进制的数字化代码来表示的。
- ⑤ 晶体管适合制造大规模集成电路，CMOS晶体管擅长二值处理，数字逻辑为二值，这几个因素综合在一起的结果就是数字集成电路普遍采用二进制。
- ⑥ 尽管构成逻辑代数系统的元件极为简单，却能描述数字系统中任何复杂的逻辑电路。另外布尔代数还有一些公理如交换律、吸收率、分配律、结合律等等，数字电路设计中经常根据这些公理来做电路的变换和优化，以达到提高性能或节省面积、降低功耗的目的。



3. 数字信号的描述方法



(1) 二值数字逻辑和逻辑电平

二值数字逻辑 0、1 数码表示数量时称二进制数,表示事物状态时称二值逻辑

表示方式: 在电路中使用低、高电平表示 0、1 两种逻辑状态。电压幅值不是问题,只要是二值的。

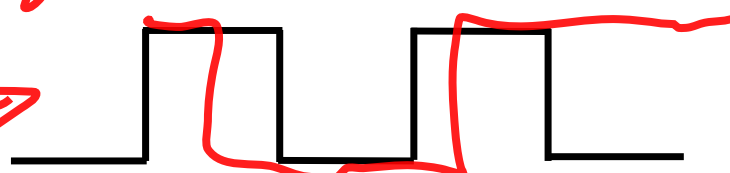
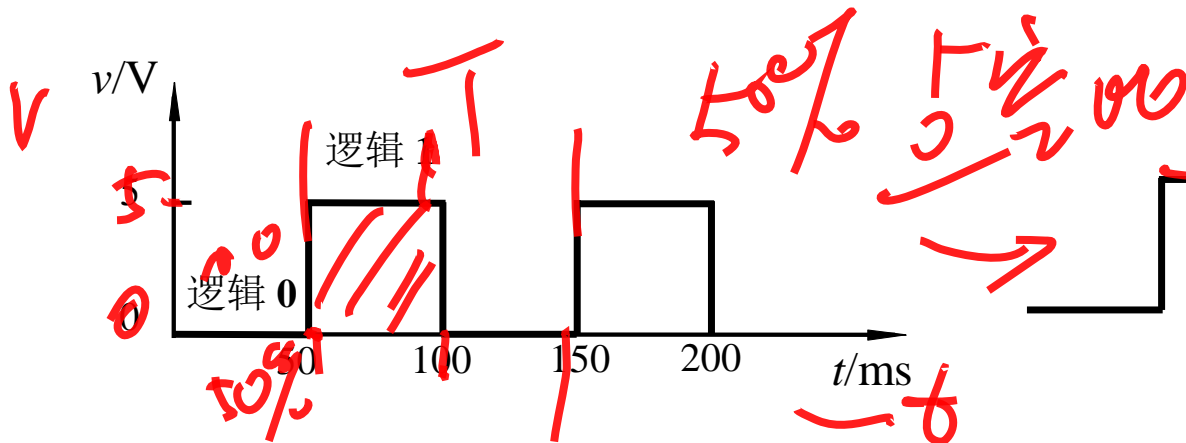
逻辑电平与电压值的关系 (正逻辑)

电压(V)	二值逻辑	电平
+5... 4.75 - 5.25V	1	H(高电平)
0... 0.7V	0	L(低电平)

数字波形: 信号逻辑电平对时间的图形表示。

(a) 用逻辑电平描述的数字波形

(b) 数字波形的常规表示





3. 数字信号的描述方法

(2) 数字波形的两种类型:

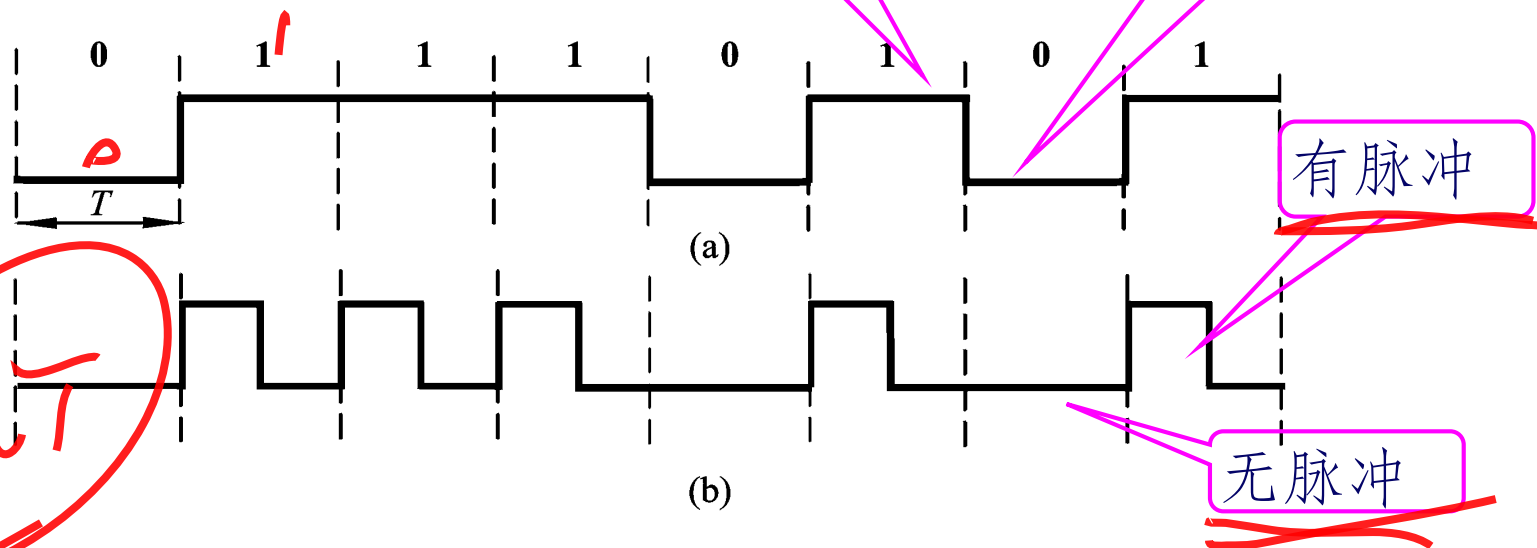
(a) 归零型

(b) 非归零型

0
1

高电平

低电平



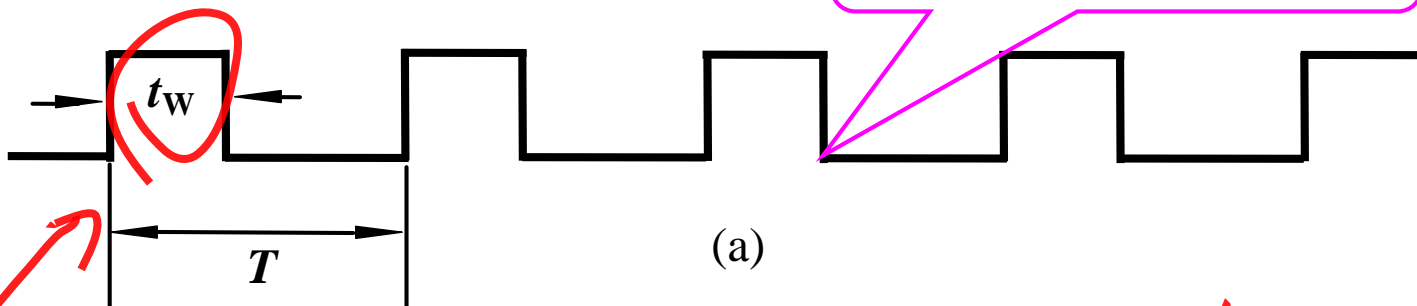
比特率 ----- 每秒钟传输数据的位数



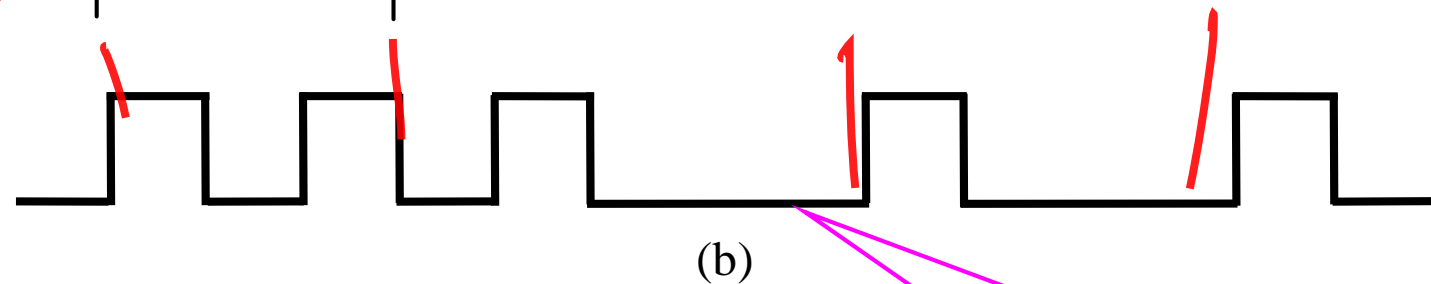
3. 数字信号的描述方法

(3) 周期性和非周期性

周期性数字波形



(a)



(b)

$$q(\%) = \frac{t_w}{T} \times 100\%$$

非周期性数字波形

概 X



3. 数字信号的描述方法

例: 某通信系统每秒钟传输1544000位(1.544兆位)数据, 求每位数据的时间。

解: 按题意, 每位数据的时间为

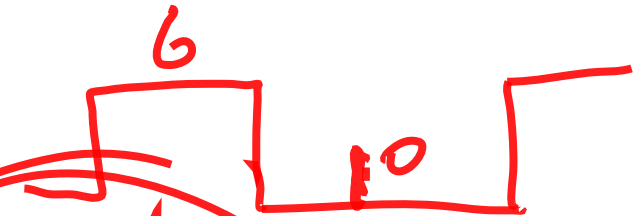
$$\left[\frac{1.544 \times 10^6}{\text{s}} \right]^{-1} = 647.67 \times 10^{-9} \text{s} = 648 \text{ ns}$$

n. bit/s 0!0!
位 bit

例: 设周期性数字波形的高电平持续6ms, 低电平持续10ms, 求占空比q。

解: 因数字波形的脉冲宽度 $t_w=6\text{ms}$, 周期 $T=6\text{ms}+10\text{ms}=16\text{ms}$ 。

$$q = \frac{6\text{ms}}{16\text{ms}} \times 100\% = 37.5\%$$



例: 串口通讯: 9600 bits/s 什么含义?

300 波特

波特率 COM1

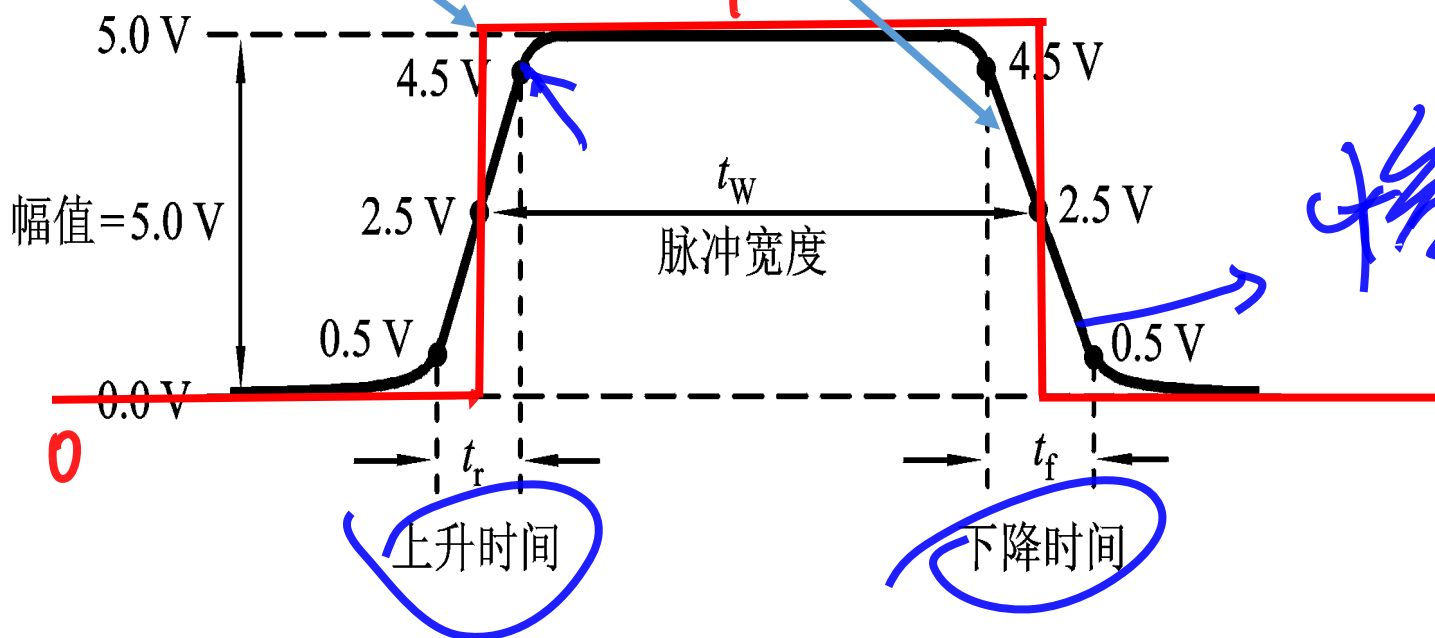


3. 数字信号的描述方法

(4) 实际脉冲波形及主要参数: 对数字逻辑电路的意义?

(a) 理想脉冲波形

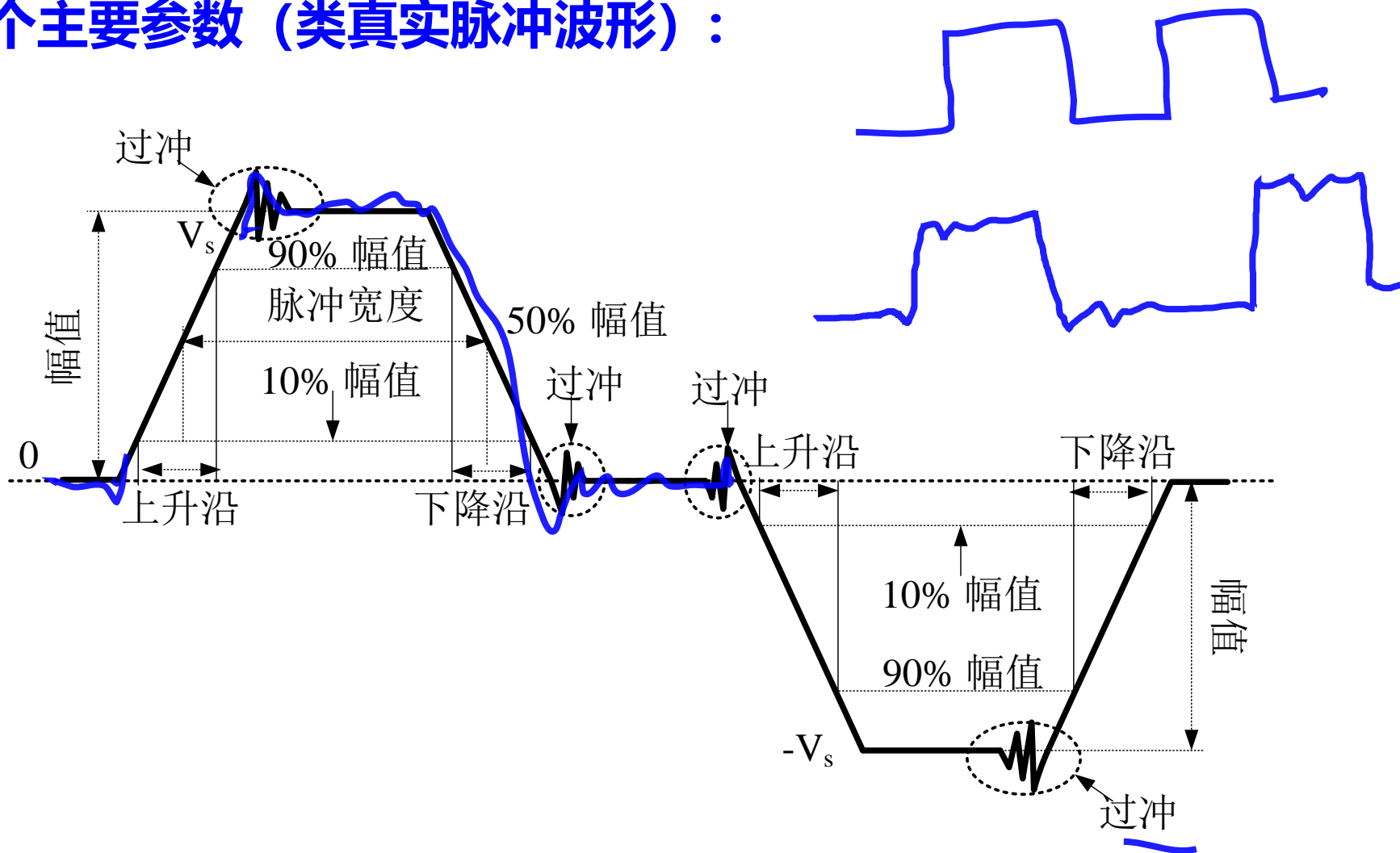
(b) 非理想脉冲波形





3. 数字信号的描述方法

几个主要参数（类真实脉冲波形）：



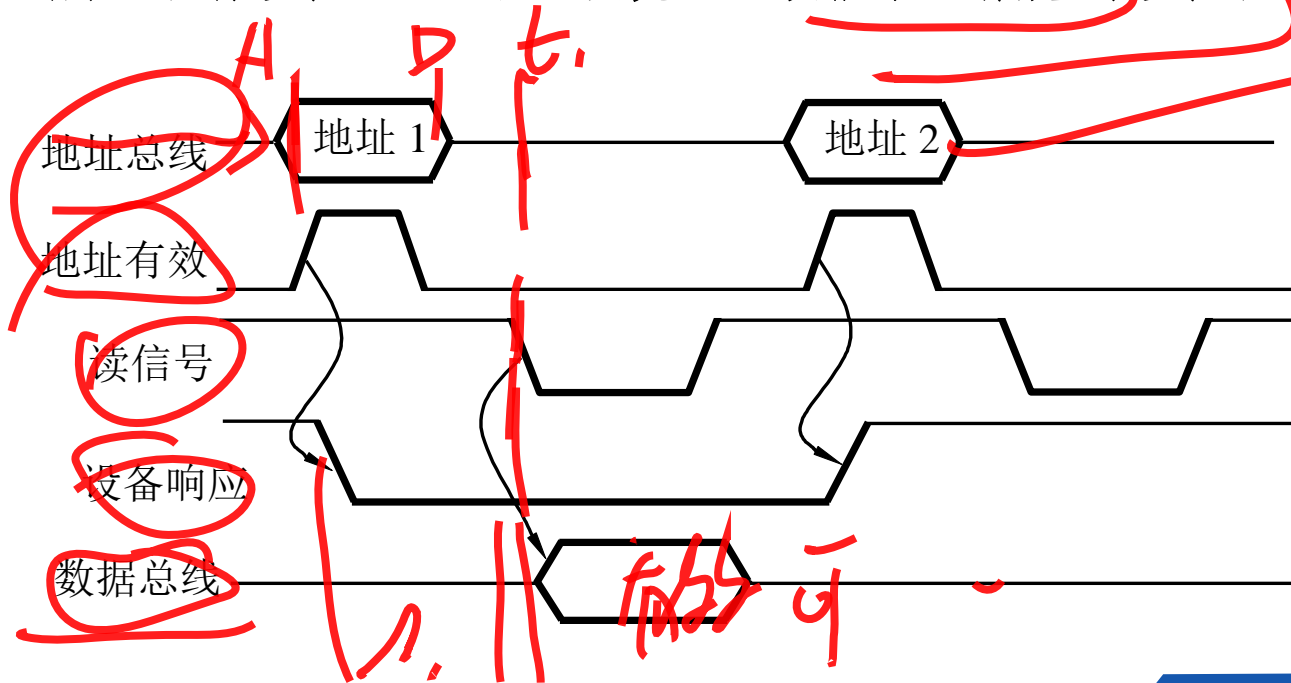


3. 数字信号的描述方法

(5) **定时图**: 表明多个输入信号的先后顺序。

由于各信号的路径不同，这些信号之间不可能严格保持同步关系。为了保证可靠工作，各信号之间通常允许一定的时差，但这些时差必须限定在规定的范围内，各个信号的时序关系用时序图表达。

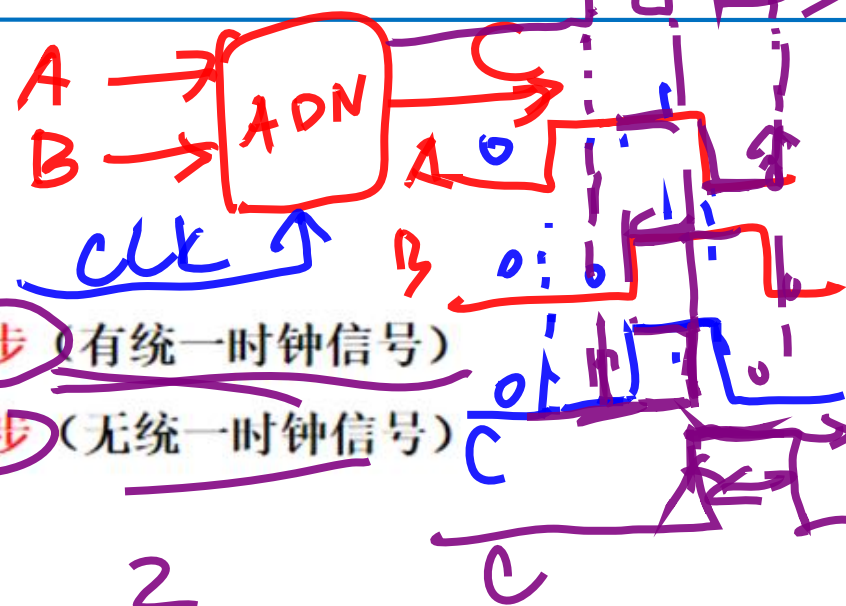
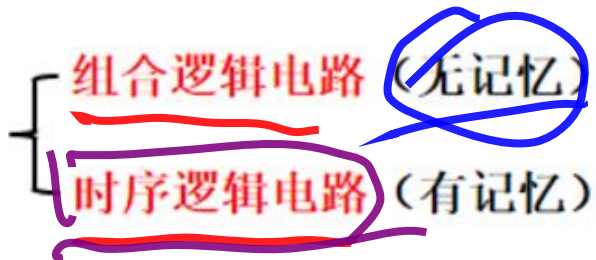
某微处理器应用的定时图-“地址”要先于“读信号”有效一定时间





4 数字逻辑电路的特点及分类

数字逻辑电路按功能分：



组合逻辑电路：简称组合电路，它由最基本的逻辑门电路组合而成。特点是：输出值只与当时的输入值有关，即输出唯一地由当时的输入值决定。电路没有记忆功能，输出状态随着输入状态的变化而变化，类似于电阻性电路，如加法器、译码器、编码器、数据选择器等都属于此类。

时序逻辑电路：简称时序电路，它是由最基本的逻辑门电路加上反馈逻辑回路（输出到输入）或器件组合而成的电路，与组合电路最本质的区别在于时序电路具有记忆功能。时序电路的特点是：输出不仅取决于当时的输入值，而且还与电路过去的状态有关。它类似于含储能元件的电感或电容的电路，如触发器、锁存器、计数器、移位寄存器、存储器等电路都是时序电路的典型器件。



4. 数字逻辑电路的特点及分类

按电路有无集成元器件来分:

可分为分立元件数字电路和集成数字电路。

分立
集成

按集成电路的集成度进行分:

可分为小规模集成数字电路(SSI)、中规模集成数字电路(MSI)、大规模集成数字电路(LSI)和超大规模集成数字电路(VLSI)。

十

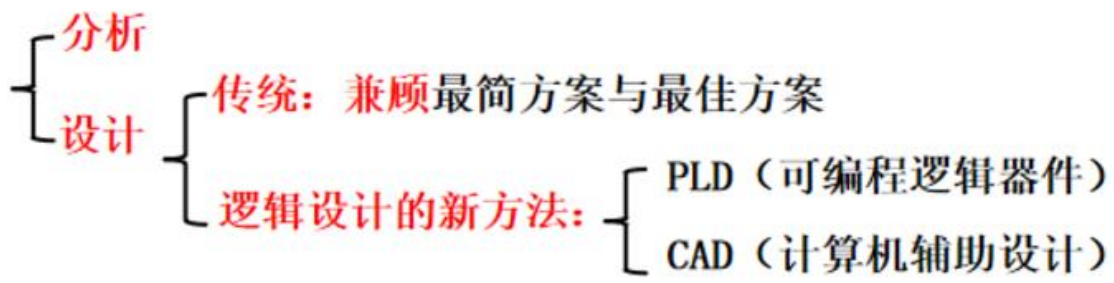
电子学羊朝

按构成电路的半导体器件来分类:

可分为双极型数字电路 (TTL, Transistor-Transistor-Logic) 和单极型数字电路 (MOS), 不是正负极性。

数字电路中研究的主要问题是输出信号的状态 (“0” 或 “1”) 和输入信号 (“0” 或 “1”) 之间的逻辑关系, 即电路的逻辑功能。

数字电路的研究方法是逻辑分析和逻辑设计, 所需要的工具是逻辑代数。 (在正逻辑下, “0” 是低电平, “1” 是高电平, 高低电平没有明确的界限)





下一节内容:

数制与编码