
数字逻辑

课程性质

- “数字逻辑”是计算机各专业必修的一门重要技术基础课。
- 该课程在介绍有关数字系统基本知识、基本理论、及常用数字集成电路的基础上，重点讨论数字逻辑电路分析与设计的基本方法。
- 从计算机的层次结构上讲，“数字逻辑”是深入了解计算机“内核”的一门最关键的基础课程。

本课程“数字逻辑”在计算机学科体系中的地位

研究逻辑器件，即“逻辑门”的外部功能；并由“门”构建功能级部件，如加法器、计数器或控制器等

数字逻辑

系统结构

网络...

计算机组成原理

...

模电

离散数学

数理逻辑...

电路

电工原理

...

高数

英语

物理

计算机文化基础

计算机专业课

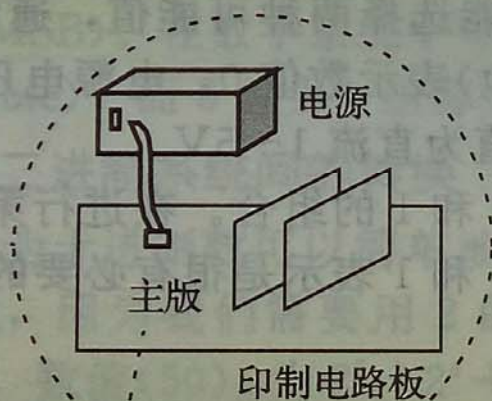
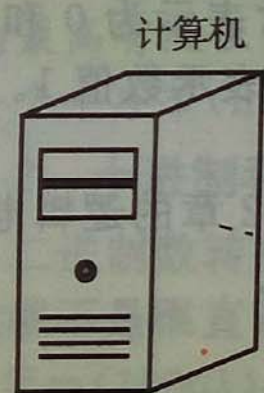
(由此开始)

计算机专业基础课

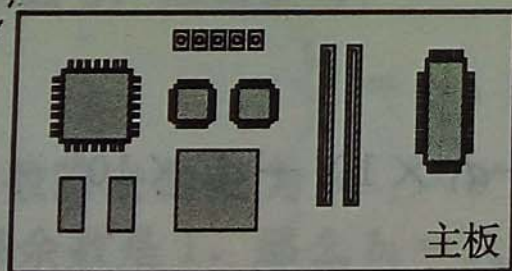
电信类基础课

电类专业基础课

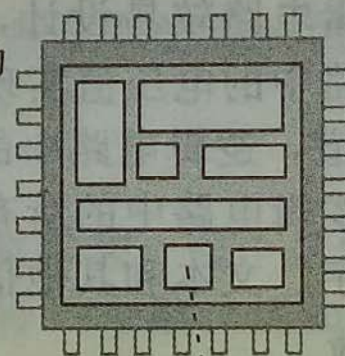
公共基础课



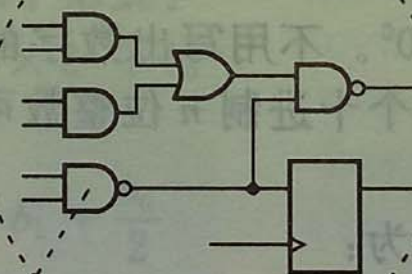
集成电路、
连接器和
元器件



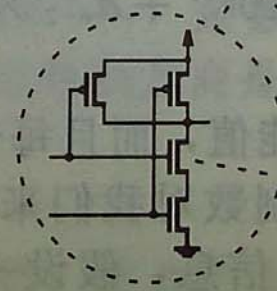
芯片中的
子电路



逻辑门



晶体管电路



芯片中的
晶体管



a)

b)

教学目标

- 了解组成数字计算机和其它数字系统的各种数字电路
- 能熟练地运用基本知识和理论对各类电路进行分析
- 通过本课程的学习，能根据设计要求完成各种逻辑部件的设计，掌握对数字系统硬件进行分析、设计和开发的基本技能。

教学安排

□ 教学时数

- 72学时（授课56学时，实验16学时）

□ 教学内容

- 数字逻辑基本知识、基本理论；
- 逻辑电路分析与设计；
- FPGA、CPLD
- Verilog HDL 硬件描述语言

教材

数字逻辑基础与Verilog设计（原书第3版）

作者：（加）斯蒂芬·布朗（Stephen Brown），

（加）斯万克·瓦拉纳西（Zvonko Vranesic）

译者： 吴建辉

丛书名： 国外电子与电气工程技术丛书

出版社： 机械工业出版社

ISBN： 9787111537281

出版日期： 2016 年6月



参考书:

《FPGA数字逻辑设计教程——Verilog》

作者 [哈斯凯尔 \(Richard E. Haskell\)](#)，[汉纳 \(Darrin M. Hanna\)](#) 著 [郑利浩](#)，[王荃](#)，[陈华锋](#) 译；[电子工业出版社](#)

《数字逻辑基础》陈光梦 复旦大学出版社

《数字电路设计及verilog HDL 实现》西安电子科技大学

考核:	期末考试	50%
	实验	20%
	出勤	10%
	作业	10%
	项目	10%

如何学好数字逻辑？

□ 掌握课程特点

■ 本课程是一门既抽象又具体的课程

□ 在逻辑问题的提取和描述方面是抽象的,而在逻辑问题的实现上是具体的。因此,学习中既要务虚,又要务实。

■ 理论知识与实际应用结合十分紧密

□ 该课程各部分知识与实际应用直接相关,学习中必须将理论知识与实际问题联系起来。真正培养解决实际问题的能力。

如何学好数字逻辑？

□ 掌握课程特点

■ 逻辑设计方法十分灵活

- 数字系统中，逻辑电路的分析与设计具有很大的灵活性。
- 许多问题的处理没有固定的方法和步骤，很大程度上取决于操作者的逻辑思维推理能力、知识广度和深度、以及解决实际问题的能力。
- 换言之，逻辑电路的分析与设计具有较大的弹性和可塑性。

如何学好数字逻辑？

□ 重视课堂学习

- **认真听课：**听课时要紧跟教师授课思路，认真领会每一个知识要点，抓住书本上没有的内容，琢磨重点与难点。
- **做好笔记：**适当地记录某些关键内容，尤其是那些重点、难点、疑点，以便课后复习、思考
- **主动思考：**听课时围绕教师所述内容及提出的问题，主动思考问题，寻找自己的见解。

如何学好数字逻辑？

□ 培养自学能力

- **认真阅读教材内容：**通过阅读教材，理解各知识要点，吃透难点，建立各部分知识之间的相互联系。
- **善于总结、归纳：**注意及时总结所学知识，归纳出各部分的重点和难点，力求深入透彻地了解。
- **加强课后练习：**通过做练习，不仅可以巩固所学知识，而且能暴露学习中存在的问题，迫使自己做更深入的了解。

如何学好数字逻辑？

□ 注重理论联系实际

- 将书本知识与工程实际统一：学习中注意书本知识与工程应用存在的差别，将理论与实际统一。

- 将理论知识与实际应用结合：学习的目的是应用。因此，应从社会需求出发，将所学知识用于解决实际问题。

□ 加强理论结合实践，一边学一边做。

实验教学、仿真软件（Multisim 虚拟电子实验室）、logisim。Verilog HDL

主要内容:

- 1、数字逻辑基础
- 2、逻辑电路入门
- 3、数的表示和算术运算电路
- 4、组合电路
- 5、触发器、寄存器
- 6、同步时序电路
- 7、数字系统设计
- 8、异步时序电路

1. 数字逻辑基础

数字系统的基本概念

数字系统的基本概念

1.1.1 数字系统

一、信息与数字

我们正处在一个信息的时代！请问：信息的概念是什么？

信息的概念：

人们站在不同的角度，对“信息”给出了不同的解释。诸如，“信息是表征物理量数值特征的量”，“信息是物质的反映”，“信息是人类交流的依据”，...，广义的说，“信息是对客观世界所存在的各种差异的描述”。

请问：信息有何特征？

信息特征：传输能力、存储能力、处理能力（智能）

传输（跨越空间的信息传播）：例如，邮递、电话、电视、Internet 等。

存储（跨越时间的信息传播）：例如，文字、书籍、照相、录音、录像等。

处理（对信息进行加工）：例如，算盘、计算器和计算机。

大自然赋予人类的处理能力太优秀，而传输和存储能力不足！

信息的最佳表达形式是什么？

数字是信息的最佳表达形式！

1、可与各种信息形式进行转化

（转化成人能接受的信息：文字、声音、图形、图像、视频；

机器能接受的信息：电流、电压、声音、触觉等）

2、可表达人的思想、办法、事物的规律（程序的巨大能力）

3、可以单一的形式进行处理、传输、存储

（可以说，没有其它的形式可以与数字比美！）

我们正处在一个数字化的信息时代！

数字控制、数字录音、数据通讯、数字计算、数字电视、数字广播、
数字相机、数字摄像、数字城市、数字流域、数字地球

我们共同生活在数字化的环境中！

二、数字系统

什么是数字系统？

数字系统是一个能对**数字信号**进行存储、传递和加工的实体，它由实现各种功能的数字逻辑电路相互连接构成。

例如，数字计算机。

1、数字信号

若信号的变化在时间上和数值上都是离散的，或者说断续的，则称为离散信号。离散信号的变化可用不同的数字反映，所以又称为数字信号，简称为数字量。

例如，学生成绩记录，工厂产品统计，电路中开关的状态等。

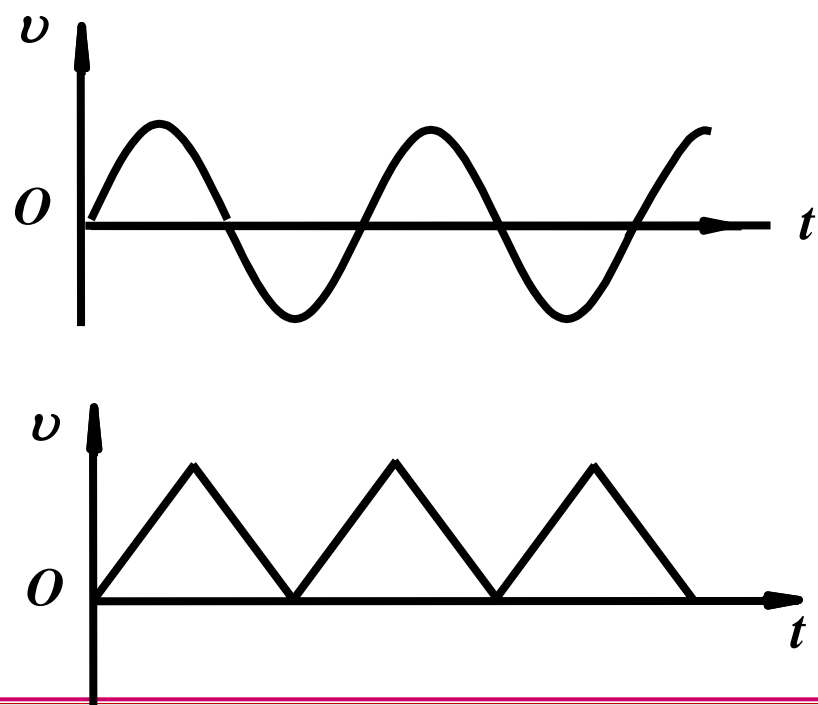
数字系统只能处理数字信号，当数字系统要与模拟信号发生联系时，必须经过模/数(A/D)转换和数/模(D/A)转换电路，对信号类型进行变换。

注意：客观世界中的大量信号都是连续量。例如，温度、压力、流量等。可以对它们进行模拟、转化！

模拟信号与数字信号

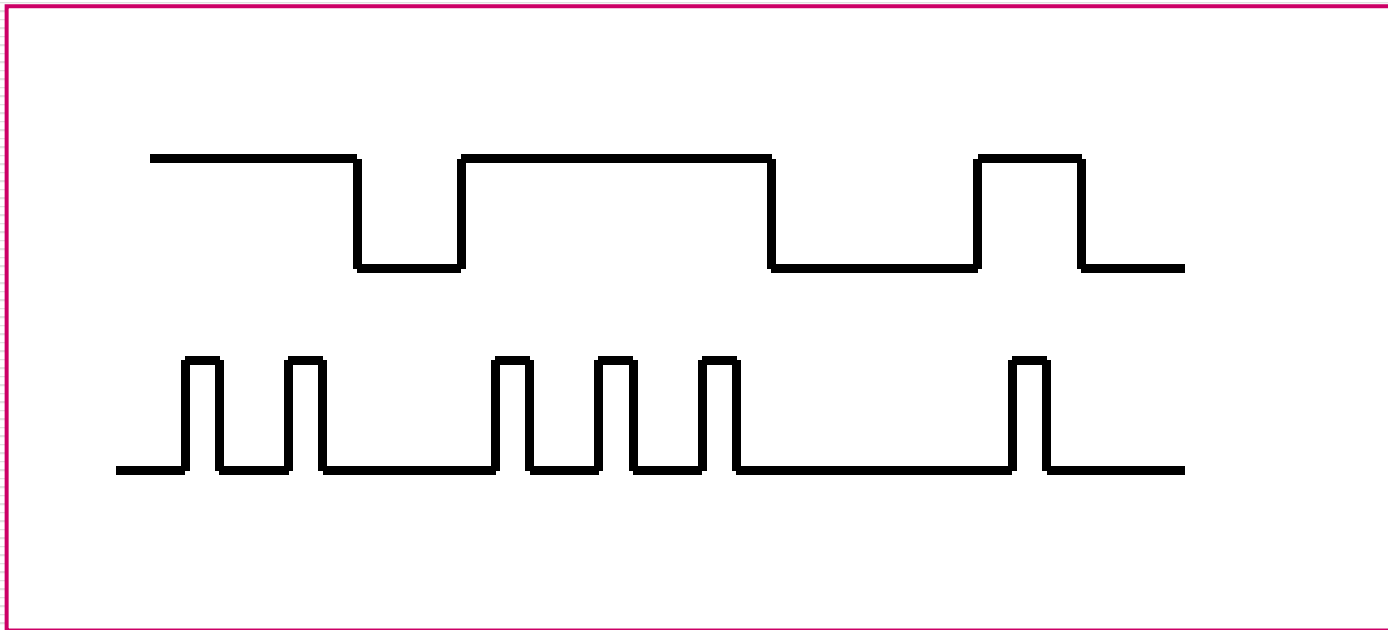
模拟信号

---时间和数值均连续变化的电信号，如正弦波、三角波等



数字信号

---在时间上和数值上均是离散的信号。

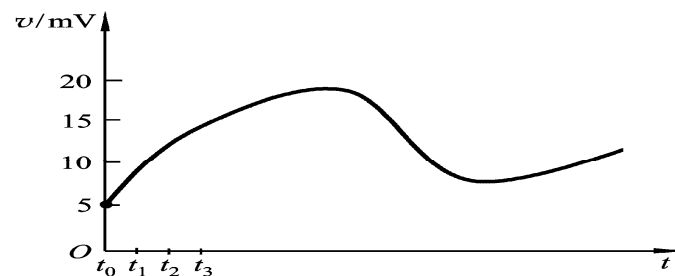
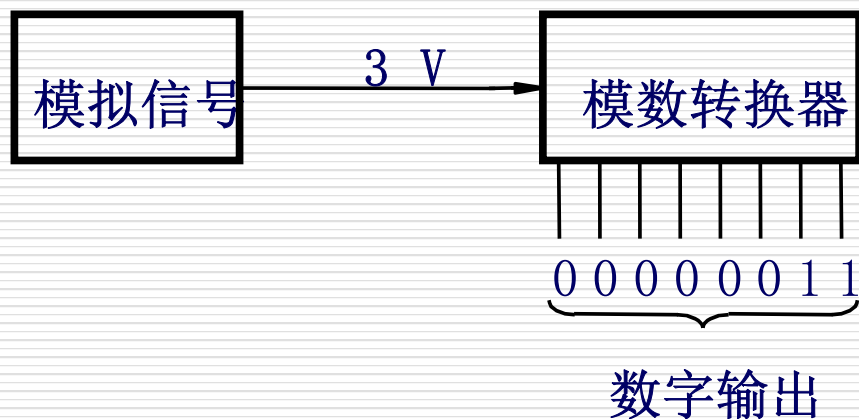


- 数字电路和模拟电路：工作信号，研究的对象不同，分析、设计方法以及所用的数学工具也相应不同

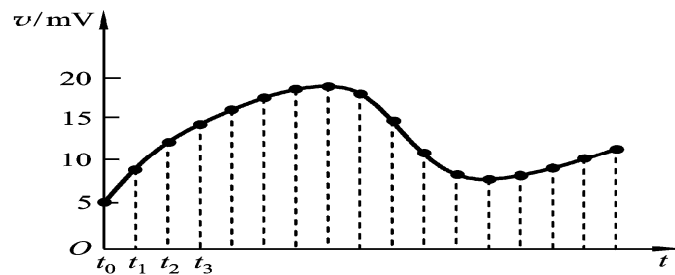
模拟信号的数字表示

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。

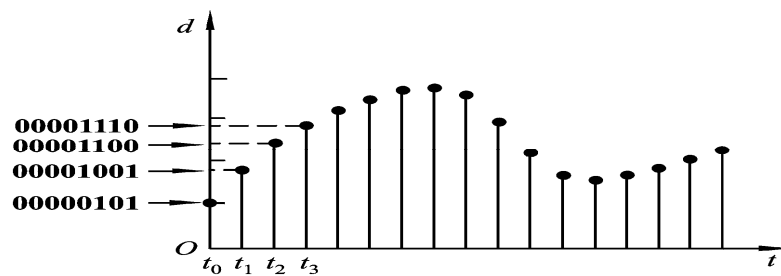
模数转换的实现



(a)



(b)



(c)

数字量(digital variable)——在时间^和数量上的变化都离散的物理量。

数字信号(digital signal)——表示数字量的信号。

数字电路(digital circuits)——工作在数字信号下的电路。

如：时钟、自动生产线上送出零件量的检测等。

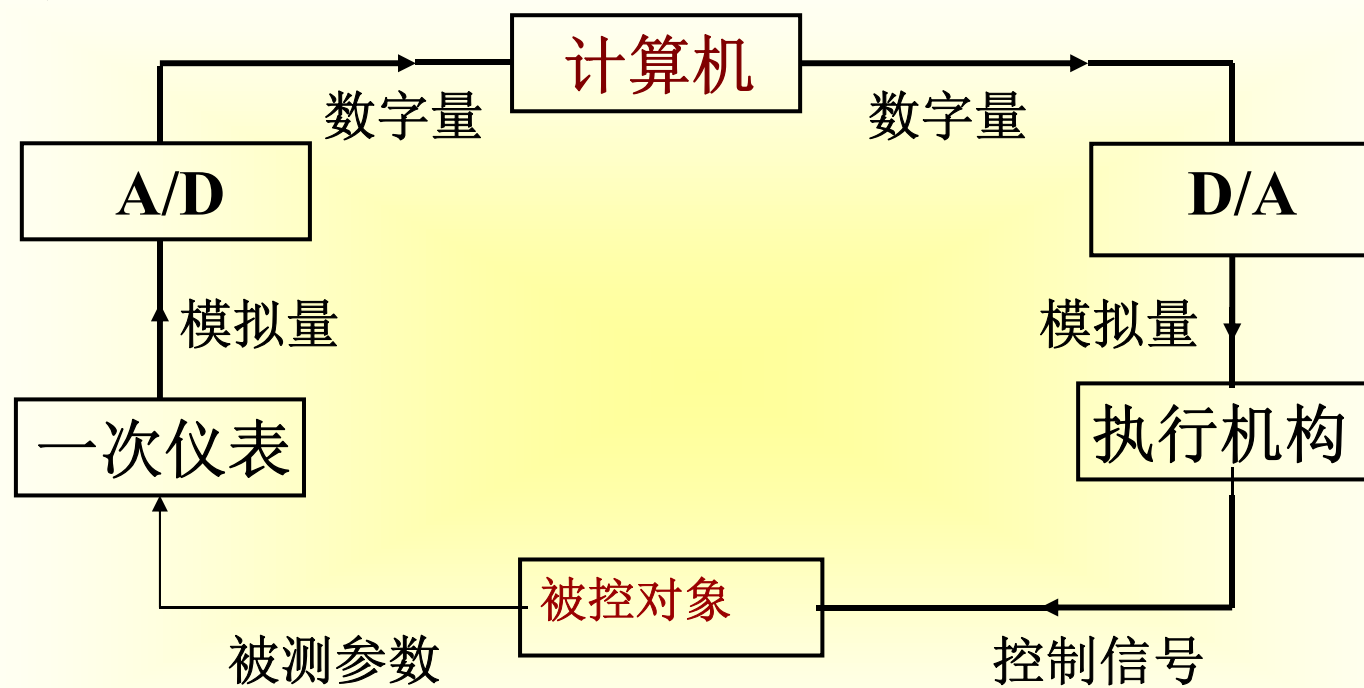
模拟量(analog variable)——在时间^或数值上连续变化的物理量。

模拟信号(analog signal)——表示模拟量的信号。

模拟电路(analog circuits)——工作在模拟信号下的电路。

如：温度、压力变化。

例如,某控制系统框图如下:



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

a 、在电路中用低、高电平表示0、1两种逻辑状态

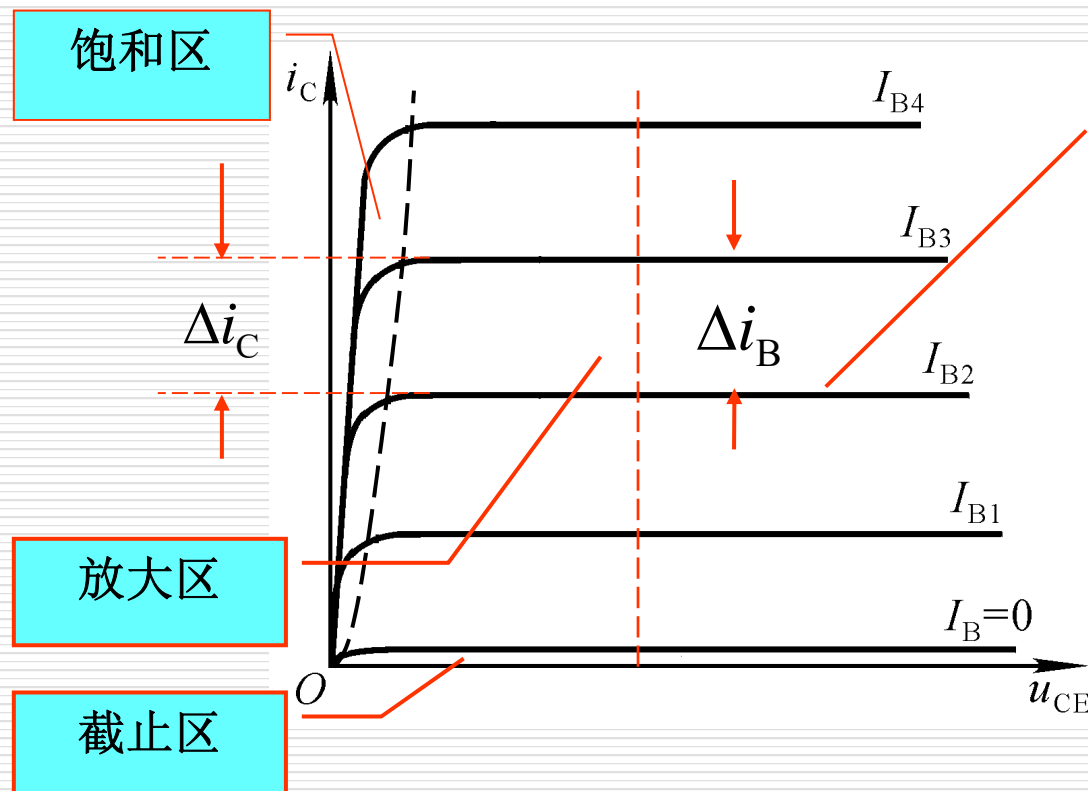
逻辑电平与电压值的关系（正逻辑）

电压 (V)	二值逻辑	电 平
+5	1	H(高电平)
0	0	L(低电平)

输出特性

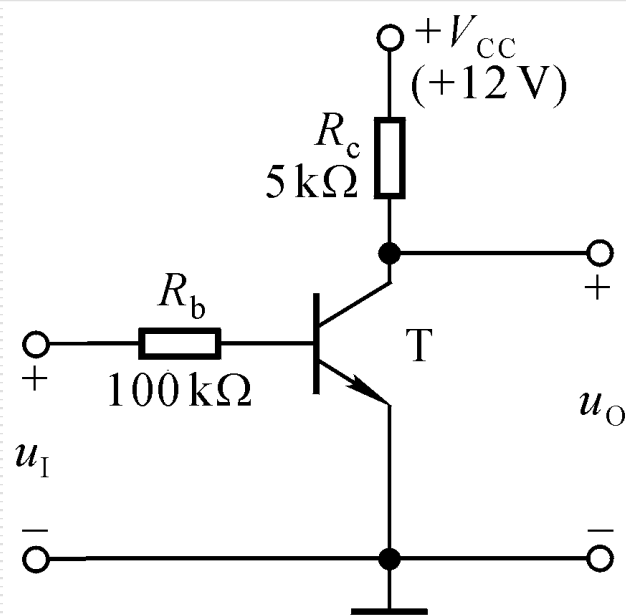
$$i_C = f(u_{CE}) \Big|_{I_B}$$

对应于一个 I_B 就有一条 i_C 随 u_{CE} 变化的曲线。



为什么 u_{CE} 较小时 i_C 随 u_{CE} 变化很大？为什么进入放大状态曲线几乎是横轴的平行线？

$$\beta = \frac{\Delta i_C}{\Delta i_B} \Big|_{u_{CE}=\text{常量}}$$



通过 u_{BE} 是否大于 U_{on} 判断管子是否导通。

$$i_B = \frac{u_I - U_{BE}}{R_b} = \left(\frac{5 - 0.7}{100} \right) \text{mA} = 43 \mu\text{A}$$

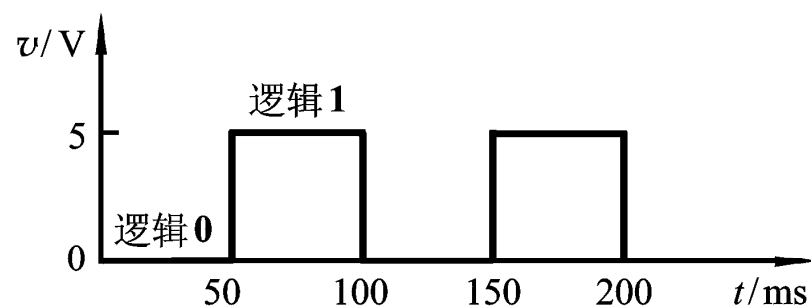
$$i_{C\max} = \frac{V_{CC}}{R_c} = \left(\frac{12}{5} \right) \text{mA} = 2.4 \text{mA}$$

临界饱和时的 $\beta = \frac{i_{C\max}}{i_B} \approx 56$

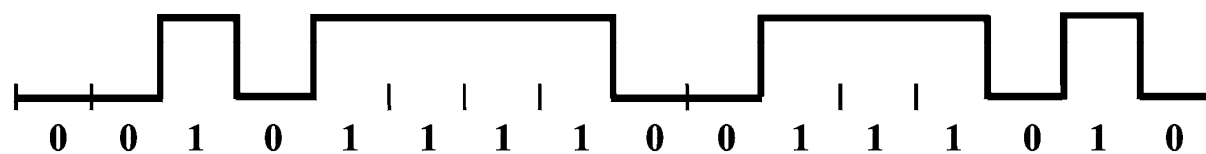
1. 分别分析 $u_i = 0\text{V}$ 、 5V 时 T 是工作在截止状态还是导通状态；
2. 已知 T 导通时的 $U_{BE} = 0.7\text{V}$ ，若 $u_i = 5\text{V}$ ，则 β 在什么范围内 T 处于放大状态？在什么范围内 T 处于饱和状态？

数字波形

数字波形-----是信号逻辑电平对时间的图形表示.



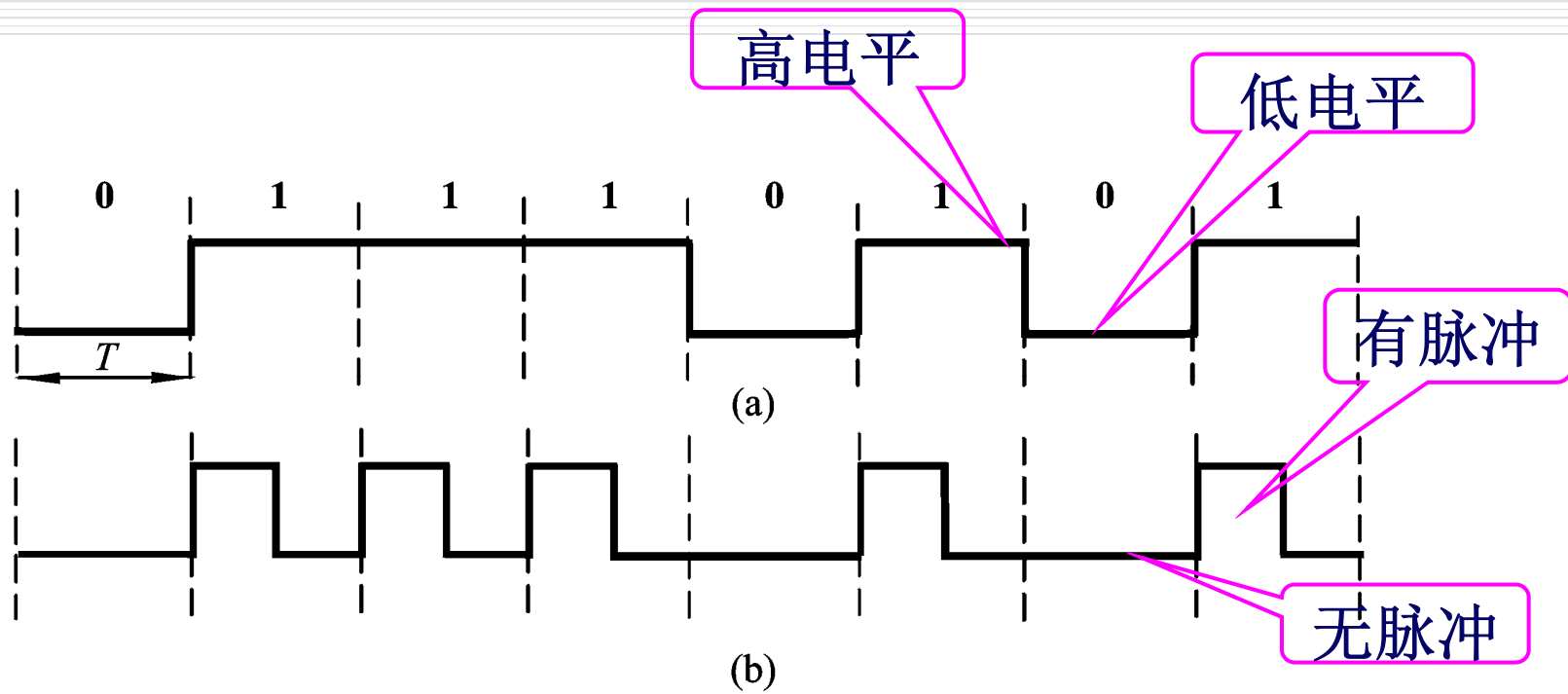
(a)



(b)

(a) 用逻辑电平描述的数字波形 (b) 16位数据的图形表示

(1) 数字波形的两种类型：*非归零型 *归零型



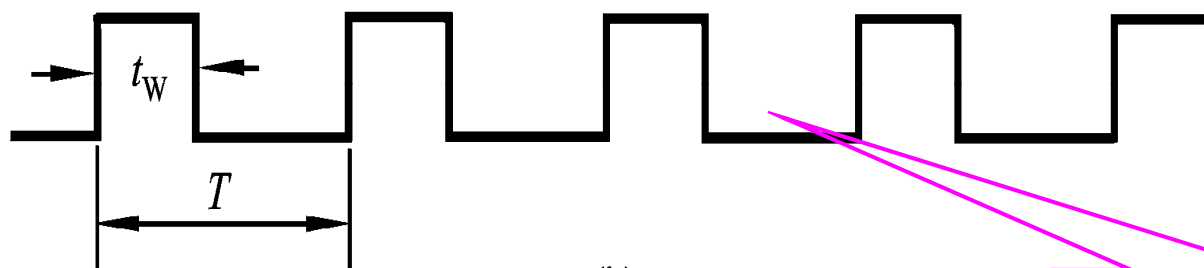
比特率 ———— 每秒钟传输数据的位数

(2) 周期性和非周期性

非周期性数字波形



(a)



(b)

周期性数字波形

2、数字逻辑电路

用来处理数字信号的电子线路称为**数字电路**。由于数字电路的各种功能是通过逻辑运算和逻辑判断来实现的，所以数字电路又称为**数字逻辑电路**或者**逻辑电路**。

数字逻辑电路具有如下特点：

(1) 电路的基本工作信号是二值信号。它表现为电路中电压的“高”或“低”、开关的“接通”或“断开”、晶体管的“导通”或“截止”等两种稳定的物理状态。

(2) 电路中的半导体器件一般都工作在开、关状态。

(3) 电路结构简单、功耗低、便于集成制造和系列化生产；产品价格低廉、使用方便、通用性好。

(4) 由数字逻辑电路构成的数字系统工作速度快、精度高、功能强、可靠性好。

由于数字逻辑电路具有上述特点，所以，数字逻辑电路的应用十分广泛。

随着半导体技术和工艺的发展，出现了数字集成电路，集成电路发展十分迅速。

数字集成电路按照集成度的高低可分为小规模（SSI）、中规模（MSI）、大规模（LSI）和超大规模（VLSI）几种类型。

1. SSI (Small Scale Integration) 小规模集成电路:

逻辑门数小于10 门(或元件数小于100个);

2. MSI (Medium Scale Integration) 中规模集成电路:

逻辑门数为10 门~99 门(或元件数100个~999个);

3. LSI (Large Scale Integration) 大规模集成电路:

逻辑门数为100 门~9999 门(或元件数1000个~99999个);

4. VLSI (Very Large Scale Integration) 超大规模集成电路:

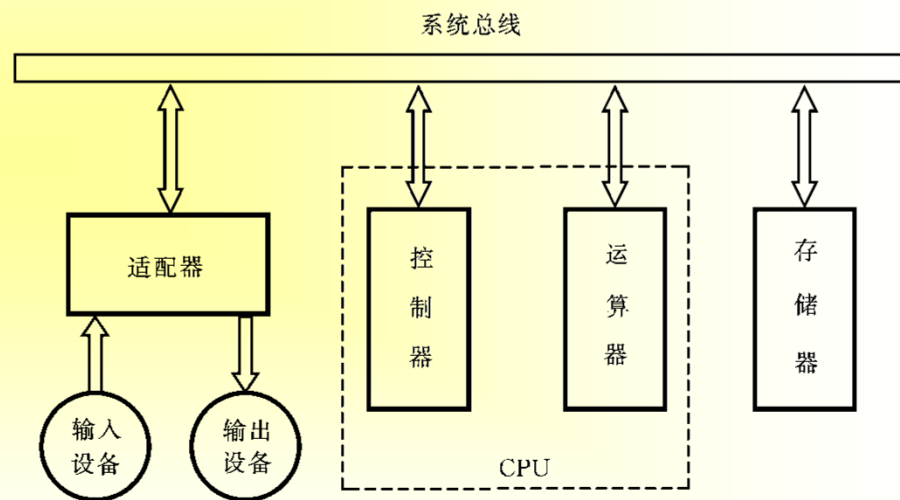
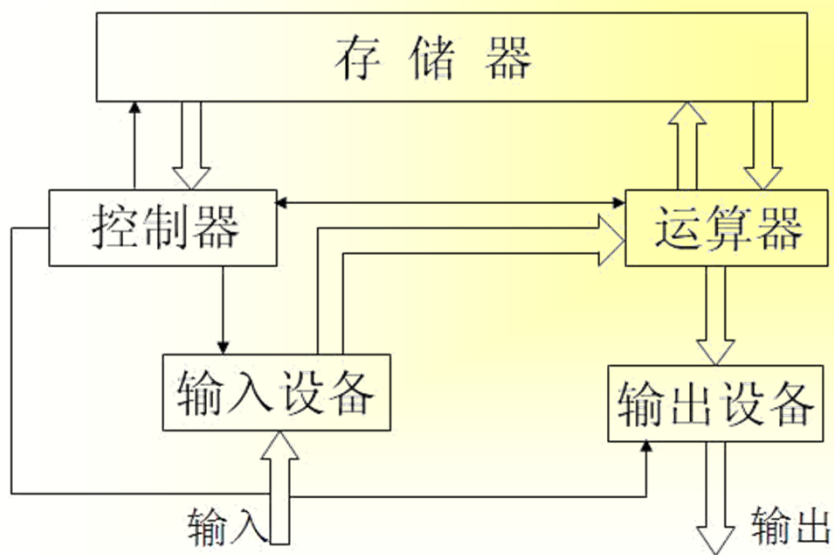
逻辑门数大于10000 门(或元件数大于100000个)。

3、数字计算机及其发展

(1) 数字计算机

数字计算机是一种能够自动、高速、精确地完成数值计算、数据加工和控制、管理等功能的数字系统。

结构框图如下：



总线结构

(2) 计算机的发展

数字计算机从1946年问世以来，其发展速度是惊人的。根据组成计算机的主要元器件的不同，至今已经经历了四代。具体如下表所示。

数字计算机的划代

划 代	主要元器件	生产时间	国 家
第一代	电子管	1946年	美 国
第二代	晶体管	1958年	美 国
第三代	小规模集成电路	1964年	美 国
第四代	中、大规模集成电路	1971年	美 国

发展趋势：速度↑、功能↑、可靠性↑、体积↓、价格↓、功耗↓。

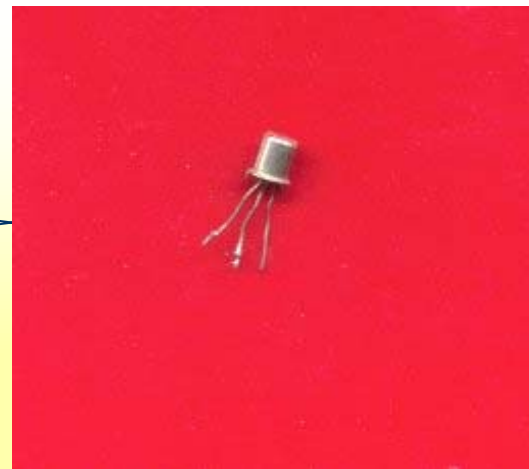
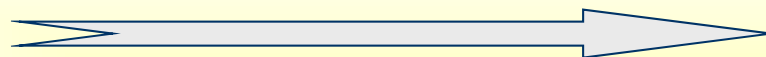
你了解组成各代计算机的主要元器件吗？

电子管



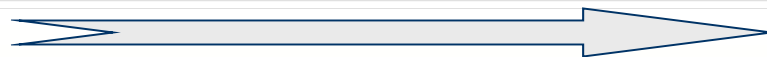
第一台数字计算机ENIAC共用了18000多个电子管，70000多个电阻，10000多个电容，6000多个开关；整个系统长若30米，高3米，宽1米，占地面积达150平米，重若30吨，耗电若150千瓦；做一次加法若200微秒，一次乘法若2000微秒。

晶体管



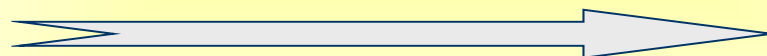
晶体管是第二代计算机的主要元器件。例如，国产121机。该机的运算器、控制器、存储器被分为三个大机柜，加上外围设备后，需占用几十平米的机房。

小规模
集成电路

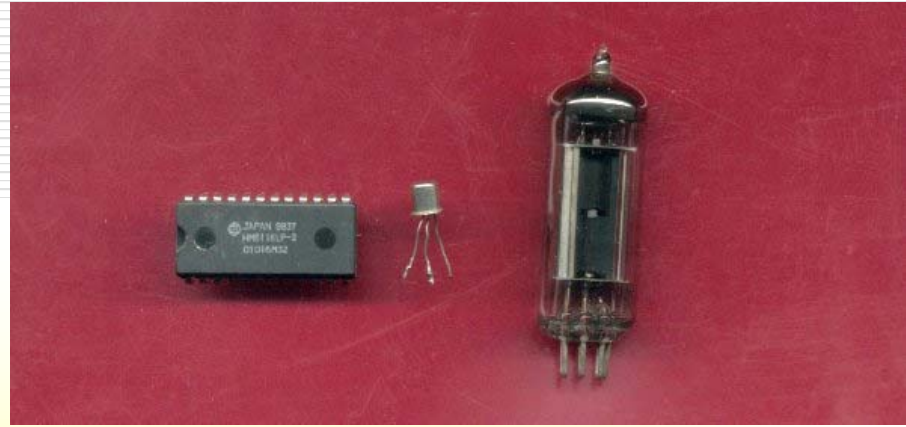


小规模集成电路是第三代计算机的主要元器件。例如，国产130机。该机的运算器、控制器、存储器被分为三块插件板组装在同一机柜中，使整机体积大大缩小。

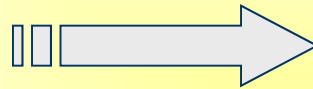
大规模
集成电路



中大规模集成电路的出现，导致了第四代计算机的问世。典型产品是微型计算机！



想一想！
比较一下！



发展趋势：速度↑、功能↑、可靠性↑、体积↓、价格↓、
功耗↓。

广泛使用的微型计算机、单片机是建立在超大规模集成电路基础之上的。
其CPU的集成规模如何？

以几乎淘汰的产品个人计算机为例，PC机CPU芯片80X86的集成规模如下表所示：

80X86系列的集成规模

芯 片 型 号	集 成 度
8 0 8 6	2.9 万个晶体管
8 0 2 8 6	13.5 万个晶体管
8 0 3 8 6	32 万个晶体管
8 0 4 8 6	120 万个晶体管
8 0 5 8 6	320 万个晶体管
⋮	⋮

在80586CPU中，密集程度如何呢？大约用500个晶体管串接起来才能绕人的头发丝一周！

逻辑电路的类型和研究方法

一、数字逻辑电路的类型

根据一个电路是否具有记忆功能，可将数字逻辑电路分为组合逻辑电路和时序逻辑电路两种类型。

组合逻辑电路：如果一个逻辑电路在任何时刻的稳定输出仅取决于该时刻的输入，而与电路过去的输入无关，则称为组合逻辑(Combinational Logic)电路。

由于这类电路的输出与过去的输入信号无关，所以不需要有记忆功能。例如，一个“**多数表决器**”，表决的结果仅取决于参予表决的成员当时的态度是“赞成”还是“反对”，因此属于组合电路。

又如，生活中使用的**号码锁**。

时序逻辑电路: 如果一个逻辑电路在任何时刻的稳定输出不仅取决于该时刻的输入，而且与过去的输入相关，则称为时序逻辑(Sequential Logic)电路。

由于这类电路的输出与过去的输入相关，所以要用电路中记忆元件的状态来反映过去的输入信号。例如，一个统计串行输入脉冲信号个数的“**计数器**”，它的输出结果不仅与当时的输入脉冲相关，还与前面收到的脉冲个数相关，因此，计数器是一个时序逻辑电路。

又如，生活中使用的**电话**。

时序逻辑电路按照是否有统一的时钟信号进行同步，又可进一步分为**同步时序逻辑电路**和**异步时序逻辑电路**。

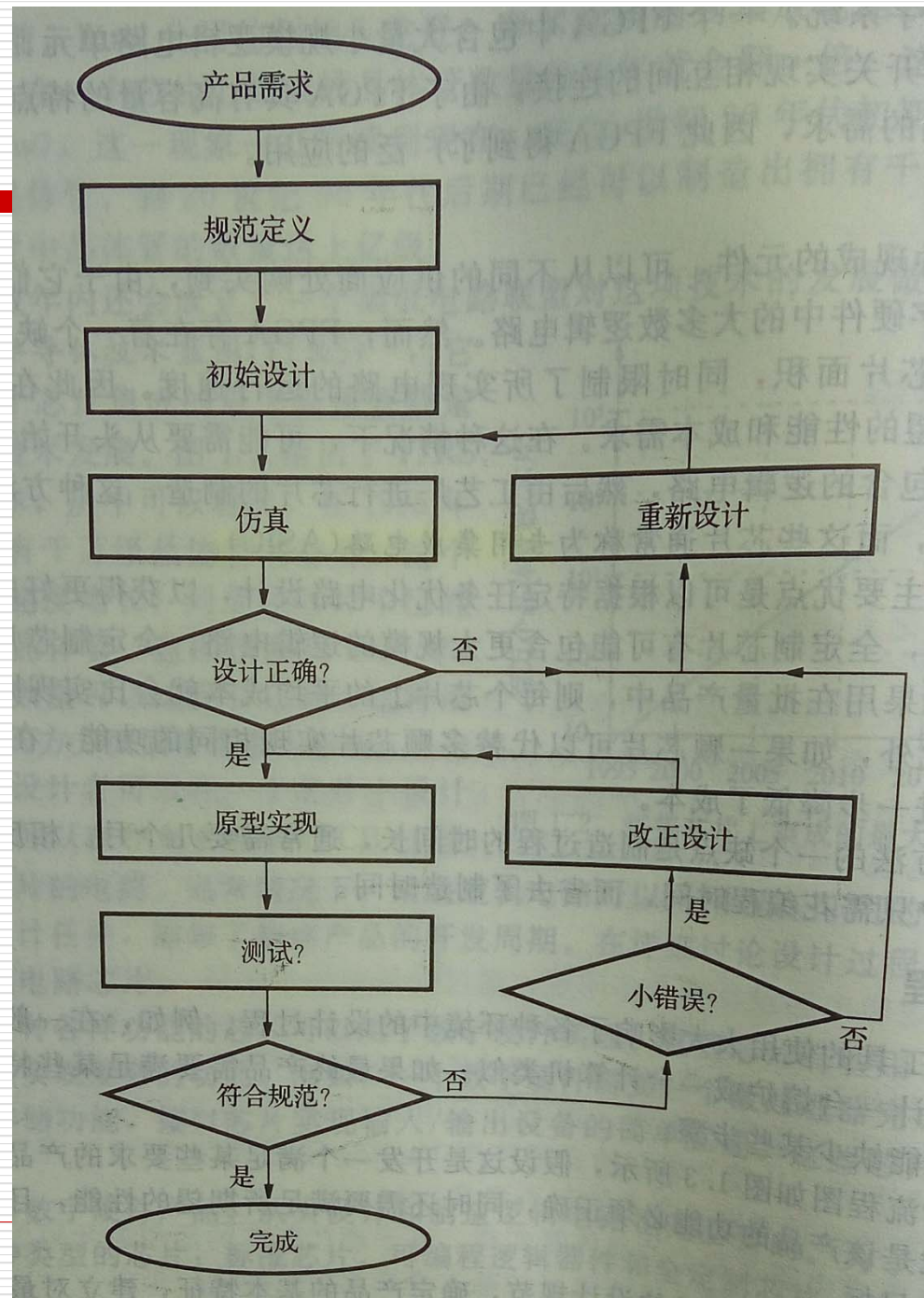
二、数字逻辑电路的研究方法

对数字系统中逻辑电路的研究有两个主要任务：一是分析，二是设计。

逻辑分析：研究一个已有逻辑电路的逻辑功能和性能。

逻辑设计：根据提出的逻辑功能，在给定条件下构造出实现预定功能的逻辑电路称为逻辑设计。

注意：逻辑电路分析与设计的方法随着集成电路的迅速发展在不断发生变化！



1. 传统法

传统法：传统方法是建立在小规模集成电路基础之上的，它以技术经济指标作为评价一个设计方案优劣的主要性能指标，设计时追求的目标是如何使一个电路达到最简。

如何达到最简呢？在**组合逻辑电路设计**时，通过逻辑函数化简，尽可能使电路中的逻辑门和连线数目达到最少。而在**时序逻辑电路设计**时，则通过状态化简和逻辑函数化简，尽可能使电路中的触发器、逻辑门和连线数目达到最少。

注意：一个最简的方案并不等于一个最佳的方案！

以逻辑代数作为基本理论的方法始终是最基本的方法！

2. 采用中、大规模集成组件进行逻辑设计的方法

由于中、大规模集成电路的不断发展，使芯片内部容纳的逻辑元器件越来越多，因而，实现某种逻辑功能所需要的门和触发器数量已不再成为影响经济指标的突出问题。

采用中、大规模集成组件去构造满足各种功能的逻辑电路时，如何寻求经济合理的方案呢？必须注意：

- ▲ 充分了解各种器件的逻辑结构和外部特性，做到合理选择器件；

- ▲ 充分利用每一个已选器件的功能，用灵活多变的方法完成各类电路或功能模块的设计；

- ▲ 尽可能减少芯片之间的相互连线。

3. 用PLD进行逻辑设计的方法

各类可编程逻辑器件(PLD)的出现，给逻辑设计带来了一种全新的方法。人们不再用常规硬线连接的方法去构造电路，而是借助丰富的计算机软件对器件进行编程烧录来实现各种逻辑功能，给逻辑设计带来了极大的方便。

4. 电子设计自动化（EDA）

面对日益复杂的集成电路芯片设计和数字系统设计，人们不得不越来越多地借助计算机进行辅助逻辑设计。目前已进入电子设计自动化阶段，不少人认为EDA技术已成为计算机科学中的一个独立的学科。

EDA是[电子设计自动化](#)(Electronic Design Automation)的缩写，在20世纪60年代中期从[计算机辅助设计](#)(CAD)、计算机辅助制造(CAM)、计算机辅助测试(CAT)和计算机辅助工程(CAE)的概念发展而来的。

20世纪90年代，国际上电子和计算机技术较为先进的国家，一直在积极探索新的电子电路设计方法，并在设计方法、工具等方面进行了彻底的变革，取得了巨大成功。在电子技术设计领域，[可编程逻辑器件](#)(如[CPLD](#)、[FPGA](#))的应用，已得到广泛的普及，这些器件为[数字系统](#)的设计带来了极大的灵活性。这些器件可以通过软件编程而对其硬件结构和工作方式进行重构，从而使得硬件的设计可以如同软件设计那样方便快捷。这一切极大地改变了传统的[数字系统设计](#)方法、设计过程和设计观念，促进了EDA技术的迅速发展。

EDA技术就是以计算机为工具，设计者在EDA软件平台上，用硬件描述语言（HDL）完成设计文件，然后由计算机自动地完成逻辑编译、化简、分割、综合、优化、布局、布线和仿真，直至对于特定目标芯片的适配编译、逻辑映射和编程下载等工作。

电路设计方法伴随器件变化从传统走向现代

a) 传统的设计方法:

采用**自下而上**的设计方法；由人工组装,经反复调试、验证、修改完成。所用的元器件较多，电路可靠性差,设计周期长。

b) 现代的设计方法:

现代**EDA**技术实现硬件设计软件化。采用**从上到下**设计方法，电路设计、 分析、仿真 、修订 全通过计算机完成。

EDA (Electronics Design Automation)技术

EDA技术以计算机为基本工具、借助于软件设计平台，自动完成数字系统的仿真、逻辑综合、布局布线等工作。最后下载到芯片，实现系统功能。使硬件设计软件化。

1、设计：

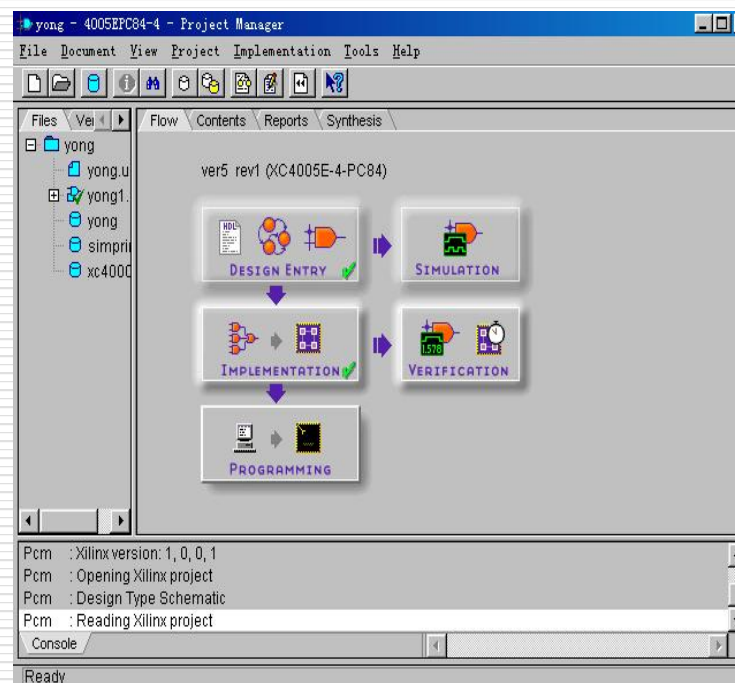
在计算机上利用软件平台进行设计

设计方法

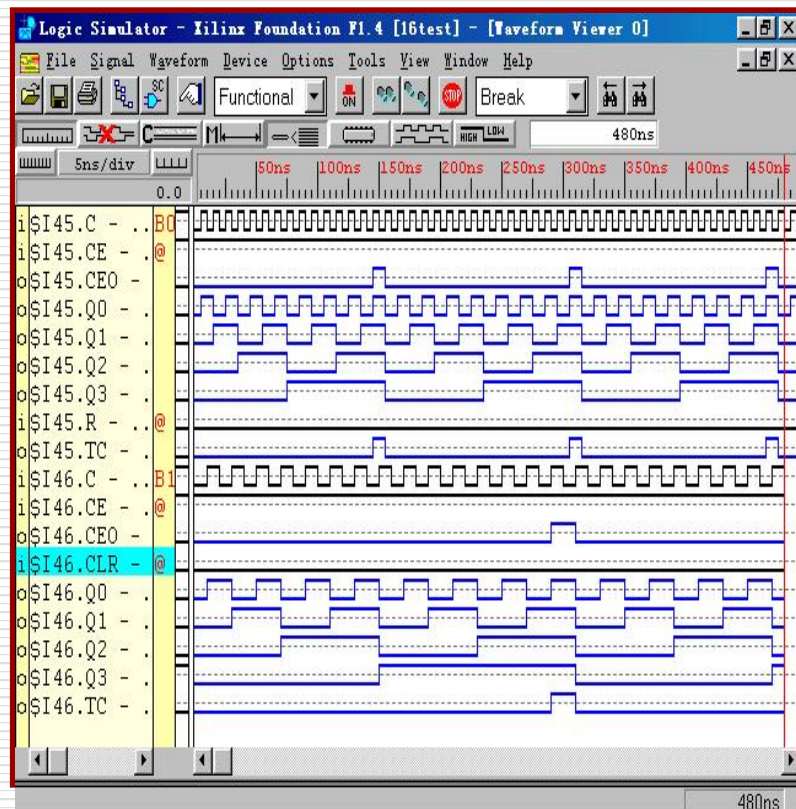
原理图设计

VerlogHDL语言设计

状态机设计



2、仿真



3、下载



4、验证结果

有三个理由让我们来学习相关理论：

首先，尽管可以通过 CAD 工具自动执行优化逻辑电路的任务以适应特定设计目标，但设计者仍然需要给出逻辑电路的最初描述。如果设计者描述的电路先天不足，那么最终产品的质量也好不了。

其次，今天的 CAD 工具直接运用了数学理论和规则来设计和巧妙地处理逻辑电路。如果不掌握基础理论，CAD 工具的用户就不可能了解工具究竟在做什么。

第三，CAD 工具提供了多种可选的处理步骤，供用户在设计过程中调用。设计者通过检查 CAD 工具产生的最终电路是否满足所需目标，来选择要使用的选项。而设计者决定在某种情况下该不该选用某选项的唯一途径，就是了解选中那个选项后 CAD 工具将在原来的基础上再做些什么，这就意味着设计者必须熟悉底层基础理论。
