中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

中科院计算所
INSTITUTE OF COMPUTING TECHNOLOGY

计算机科学导论

概述-1

课程介绍
计算思维的特征

徐志伟
中科院计算所 中国科学院大学
zxu@ict.ac.cn

提纲

- 课程介绍
  - 教学目的、方法、目标
- 计算思维特征
  - 外部特征：ABC
  - 内部特征：Acu-Exams-CP（对计算思维的十种理解）
- 计算机与计算过程
  - 计算机的冯诺依曼模型
  - 计算过程及其演变
  - 正确、巧妙、实用的计算过程
    - Acu-Exams实例

课件中可能包含素材引用，特此致谢！

什么是计算机科学

- 计算机科学是研究计算过程的科学
  - 计算过程是信息变换（信息运动）的过程
    - 自然科学研究物质运动和能量运动
    - 计算机科学研究信息运动
  - 计算过程是通过操纵数字符号变换信息的过程
    - 每一个计算过程都是一个数字符号操作步骤序列
- 计算思维是计算机科学工作者的专业思维方式
- 计算机科学与计算思维是一回事
  - 本课程学习入门知识

1. 课程管理信息

- **任课教师**：徐志伟、张家琳
  - zxu@ict.ac.cn
  - zhangjialin@ict.ac.cn
- **教科书**（双语教育，课堂以中文为主）
  - 计算机科学导论，清华大学出版社
  - 英文版：https://link.springer.com/book/10.1007/978-981-16-3848-0
  - 课程网站：SEP，http://cs101.ucas.edu.cn/中文/
    - 今天发的辅助材料：中英文名词索引、英文教科书下载流程
- **助课教师**：
  - 实验课助教：郭城、何昆、李奉治、李振营
  - 答疑助教：董可昕、郭泓锐、吕星宇、姚森瀚，俞子舒（平台助教）
- **成绩**：平日成绩×60% + 期末考试成绩×40%
  - **平日成绩**：实验，作业，课堂参与，交流等

教学日历

可能会根据疫情情况变化进行调整，请大家留意微信群和课程网站的通知

周次	理论课（周五上午）		实验课（周五下午）	截止时间（周日23:30）
1	2月25日	领域概述	无	
2	3月4日	程序设计与执行	无	作业1
3	3月11日	程序设计与执行	编程基础	
4	3月18日	逻辑思维	编程基础	作业2
5	3月25日	逻辑思维	编程基础	编程基础实验报告
6	4月1日	逻辑思维	图灵机	
7	4月8日	算法思维	图灵机	作业3
8	4月15日	算法思维	图灵机	图灵机实验报告
9	4月22日	算法思维	无	
10	4月29日	期中回顾	无	作业4
11	5月6日	系统思维	信息隐藏	
12	5月13日	系统思维	信息隐藏	
13	5月20日	系统思维	信息隐藏	作业5
14	5月27日	网络思维	个人作品	信息隐藏实验报告
15	6月3日	端午节放假		
16	6月10日	网络思维	个人作品	
17	6月17日	网络思维	个人作品	作业6
18	6月24日	期末总结	无	个人作品报告
19-20	考试周			

徐志伟简介

- 1982年获成都电讯工程学院学士学位， 1984年获美国普度大学硕士学位，1987年获美国南加州大学博士学位
- 研究领域：计算机系统结构、分布式系统
  - 曾任曙光超级服务器、国家高性能计算环境、网格操作系统、低熵云计算系统等多个国家和欧盟科研项目的技术负责人
- 历任曙光信息产业有限公司总工程师，中科院计算所研究员、副所长、总工程师、学位评定委员会主席、学术委员会主任，中国科学院大学教授
- 学术兼职：
  - 曾任教育部大学计算机教指委委员，IEEE Transactions on Computers、 IEEE Transactions on Services Computing等国际期刊编委
  - 现任Journal of Computer Science and Technology主编，《计算机研究与发展》主编
- 教材与著作：
  - 《Scalable Parallel Computing》(McGraw-Hill)
  - 《操作系统：原理、技术与编程》(机械工业出版社)
  - 《网格计算技术》(电子工业出版社)
  - 《电脑启示录》(清华大学出版社)
  - 《计算机科学导论》(清华大学出版社)
  - 《Computational Thinking》(Springer)

张家琳简介

- 教育经历：
  - 2006/09 – 2010/06，清华大学 高等研究院，博士
    - 导师：姚期智教授
  - 2002/09 – 2006/06，清华大学物理系基础科学班，本科
- 工作经历：
  - 2012/08 – 至今，中国科学院计算技术研究所副研究员，研究员
  - 2010/08 – 2012/08，南加州大学计算机科学系博士后
    - 合作导师：滕尚华教授
- 研究方向
  - 理论计算机科学、算法设计与分析、复杂性理论、近似算法、在线算法、组合优化、计算博弈论、量子算法等

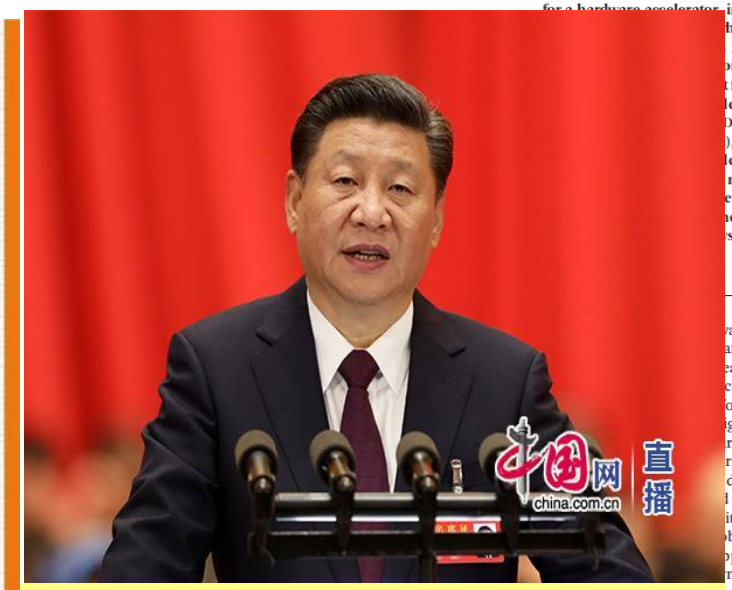
教师是专业社区志愿者

- 全球最大的三个计算机学会
  - **ACM**，大约10万名会员
    - Association for Computing Machinery
    - 国际计算机学会
    - 旗舰期刊：Communications of ACM
  - IEEE CS，大约6万名会员
    - **IEEE Computer Society**
    - IEEE计算机学会
    - 旗舰期刊：Communications of ACM
  - **CCF**，大约7万名会员
    - China Computer Federation
    - 中国计算机学会
    - 旗舰期刊：《中国计算机学会通讯》

2. 课程目的

- 培养世界眼光的信息社会专业人才
  - 不论是不是计算机专业
- 聚焦**新发展阶段**的创造性学习
  - 2035-2050年同学们约31~46岁
  - CACM**研究亮点论文**
    - 14年只有1篇 → 成为常态

中国科学院2009年



习大大（2017）
2035年：跻身**创新型国家前列**
2050年：建成世界科技强国

DOI:10.1145/2996862
To view the accompanying paper, visit doi.acm.org/10.1145/2996864

Technical Perspective
If I Could Only Design One Circuit ...

By Kurt Keutzer

UC-Berkeley教授评述

DOI:10.1145/2996864

DianNao Family: Energy-Efficient Hardware Accelerators for Machine Learning

Cambricon 寒武纪

By Yunji Chen, Tianshi Chen, Zhiwei Xu, Ninghui Sun, and Olivier Temam

Abstract

Machine Learning (ML) tasks are becoming pervasive in a broad range of applications, and in a broad range of systems (from embedded systems to data centers). As computer architectures evolve toward heterogeneous multi-cores composed of a mix of cores and hardware accelerators, designing hardware accelerators for ML techniques can simultaneously achieve high efficiency and broad application scope.

While efficient computational primitives are important for a hardware accelerator, inefficient memory transfers can ...hput, energy, or cost advantages ... Amdahl's law effect, and thus, ...order concern, just like in proces... ...t factored in accelerator design on ...le, we introduce a series of hard... ...DianNao family) designed for ML ..., with a special emphasis on the ...lerator design, performance, and ... number of representative neural ...e to achieve a speedup of 450.65x ...e energy by 150.31x on average ...stem (a member of the DianNao ...

能效提升1000倍

...ards heterogeneous multi-cores ...and accelerators, designing hard... ...ealize the best possible tradeoff ...ciency is becoming a prominent ...or which category of applications ...ign accelerators? Together with ...rds accelerators, a second simul... ...rend in high-performance and ...developing: many of the emerg... ...l embedded applications, from ...ition to automatic translation, ...botics rely on *machine learning* ...plication comes together with a ...ning (ML) where a small number ...eural networks (especially *deep* ...ve been proved in the past few ...across a broad range of applica... ...a unique opportunity to design ...ant application scope as well as ...iency.[4]

...ls are mostly executed on multi... ...Us,[7] or on FPGAs.[2] However, the domains, such as image processing, also propose efficient implementations of some of the computational primitives used by machine-learning techniques, such as convolutions.[37] There are also ASIC implementations of ML techniques, such as Support Vector Machine and CNNs. However, all these works have first, and successfully, focused on efficiently implementing the computational primitives but they either voluntarily ignore memory transfers for the sake of simplicity,[37, 43] or they directly plug their computational accelerator to memory via a more or less sophisticated DMA.[2, 12, 19]

While efficient implementation of computational primitives is a first and important step with promising results, inefficient memory transfers can potentially void the throughput, energy, or cost advantages of accelerators, that is, an Amdahl's law effect, and thus, they should become a first-order concern, just like in processors, rather than an element factored in accelerator design on a second step. Unlike in processors though, one can factor in the specific nature of memory transfers in target algorithms, just like it is done for accelerating computations. This is especially important in the domain of ML where there is a clear trend towards scaling up the size of learning models in order to achieve better accuracy and more functionality.[16, 24]

In this article, we introduce a series of hardware accelerators designed for ML (especially neural networks), including DianNao, DaDianNao, ShiDianNao, and PuDianNao as listed in Table 1. We focus our study on memory usage, and we investigate the accelerator architecture to minimize memory transfers and to perform them as efficiently as possible.

2. DIANNAO: A NEURAL NETWORK ACCELERATOR

Neural network techniques have been proved in the past few years to be state-of-the-art across a broad range of applications. DianNao is the first member of the DianNao accelerator family, which accommodates state-of-the-art neural

The original version of this paper is entitled "DianNao: A Small-Footprint, High-Throughput Accelerator for Ubiquitous Machine Learning" and was published in *Proceedings of the International Conference on Architectural Support for Programming Languages and Operating Systems (ASPLOS)* 49, 4 (March 2014), ACM, New York, NY, 269–284.

国科大同学的Peers是全球英才

- 哈佛大学计算机科学导论课程

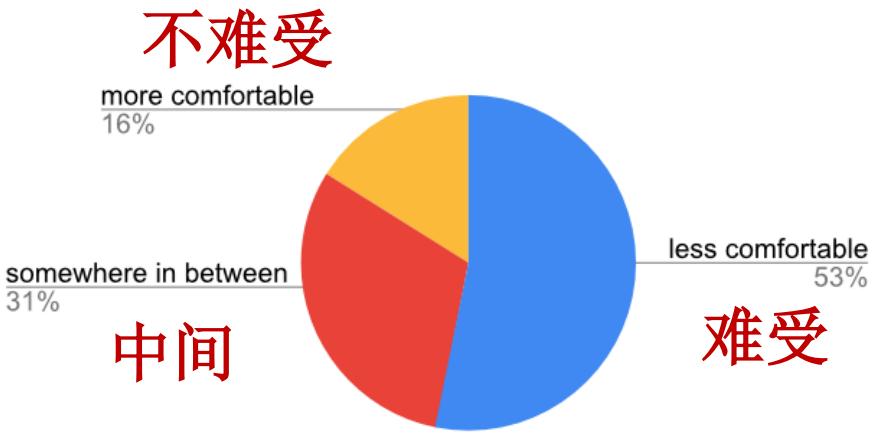
This is **CS50**
Harvard College
Spring 2021
"11 weeks, 10-20 hours per week"

Week 0 Scratch
Week 1 C
Week 2 Arrays
Week 3 Algorithms
Week 4 Memory
Week 5 Data Structures
Week 6 Python
Week 7 SQL
Week 8 HTML, CSS, JavaScript
Week 9 Flask
Week 10 Ethics

700名学生上大课
+
助教辅助自学

Accordingly, plan to
- watch lectures on Mondays,
- submit quizzes by Tuesdays,
- attend class on Tuesdays,
- submit labs by Thursdays,
- optionally attend tutorials on Wednesdays, Thursdays, Fridays, Saturdays, and/or Sundays, and
- submit problem sets by Sundays.

与其他同学相比，
只有我觉得课程难吗？



大多数同学每周花10小时做作业
10+ hours per week on problem sets

本课程是大课，不是“水课”

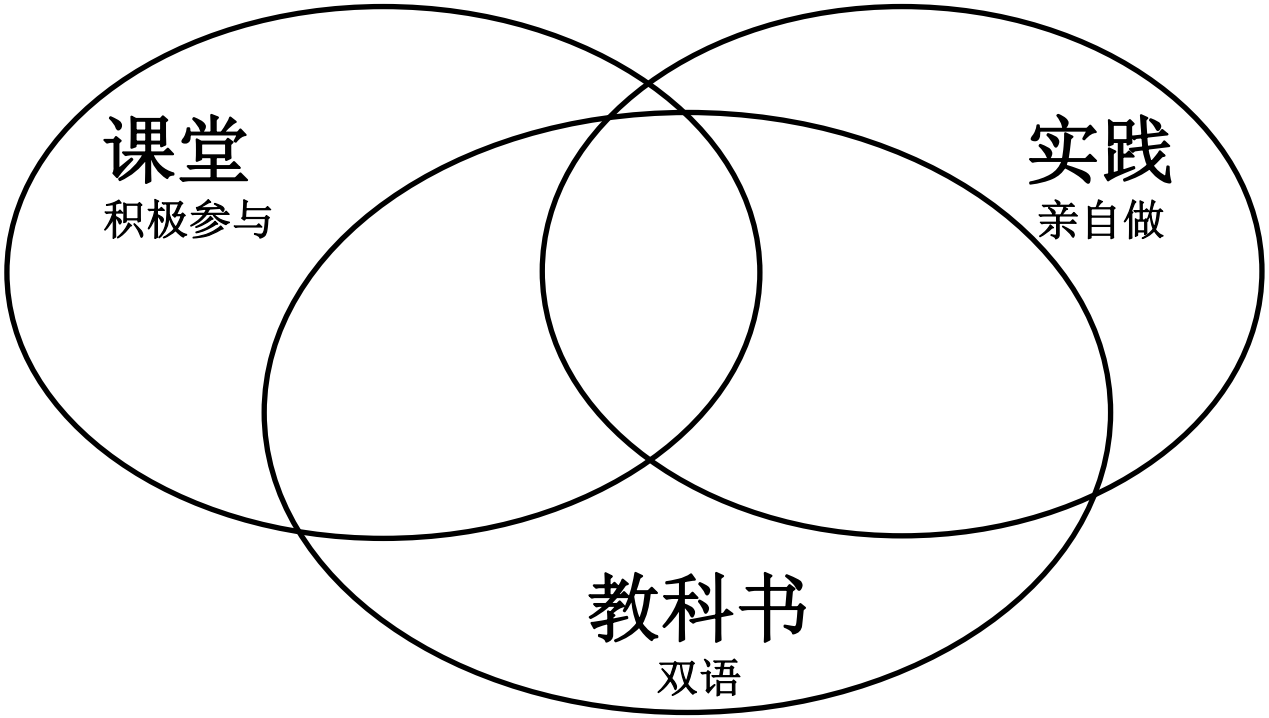
- 融合了**胜任力教育、高德纳测试**
  - 能够陈述概念、举例说明，并能举一反三
    - 加法器 vs. 减法器
  - 大部分需要动手动脑，不是单靠“背诵”
  - 本周课后任务
    - 安装Linux+VS Code+Go编程环境并运行hello.go程序
    - 提升能力：学会问问题（ask for help）
      - 有问题请与助教交流（课程有助教值班制度）

3. 学习方法：知行合一

聚焦入门知识

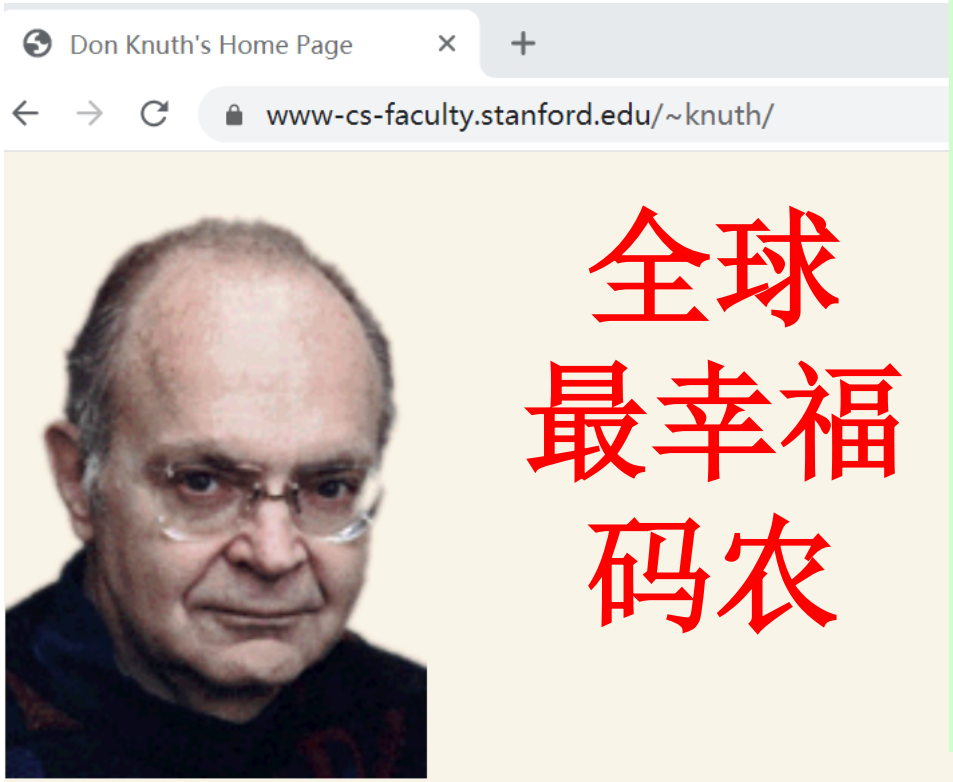
化学	计算机科学
化学反应	计算过程
元素周期表	抽象栈

- 教科书：基本内容
- 课堂：教科书难点+新内容+活内容
- 实践：六次习题+四次实验
  - 针对有基础同学，另外提供三个进阶实验
    - 班级快排与递归实现、指针与矩阵、哈希与链表



高德纳测试

1. 编写程序在计算机上正确执行
2. 结伴手算（人是比特精准的计算机）
3. 思维实验（thought experiments）



全球最幸福码农

"The **ultimate test** of whether I **understand something** is if I can **explain it to a computer**. I can say something to you and you'll nod your head, but I'm not sure that I explained it well. But the computer doesn't nod its head. It repeats back exactly what I tell it. **In most of life, you can bluff, but not with computers**."

我是否理解某项知识的终极测试，是看我能否向计算机讲清楚

Donald Knuth, Feb 2020

Susan D'Agostino. The Computer Scientist Who Can't Stop Telling Stories. Quanta Magazine. April 16, 2020. https://www.quantamagazine.org/computer-scientist-donald-knuth-cant-stop-telling-stories-20200416.

4. 教学目标

- 了解领域概貌，掌握入门知识
- 细化为逐步深入的四个目标
  - “扫盲”
  - 提升胜任力
  - 理解基础知识点
  - 领悟计算思维

4.1 “扫盲”

- 初步懂得行话，能与计算机专业人士交流
  - 服务器是什么？服务器有鼠标键盘显示器吗？为什么？
  - U盘是用来存放信息的。为什么U盘是I/O设备，不是存储器？
  - http://cs101.ucas.edu.cn/中文/ 到底是怎么回事？
  - 气候变化的计算机模拟结果是科学结果吗？
  - 如何求非规则形状物体的体积？（了解一种新的科学范式）
- 课堂讲授的六大单元
  - 领域概述
  - 初识程序与计算机
  - 逻辑思维
  - 算法思维
  - 系统思维
  - 网络思维

学语文掌握了200~300字

学语文掌握了1000~1500字

掌握基本词汇

- **数**（number）也称为数值（value）。计算机科学将所有事物表示为数并对数进行各种操作，从输入数值产生输出数值。
- **数位**（digit）是表示数值（number）的基本**数字**。我们最熟悉的是十进制数位（decimal digit）。例如，十进制数279有三个十进制数位，分别是2、7、9三个数字，它们合起来代表二百七十九这个数值。
- **比特**（bit或binary digit）是二进制数位，即取值为0或1的数位。例如，二进制数1110有四个比特，分别是1、1、1、0。二进制数1110等价的十进制数是14。
- **数字符号**（digital symbol）是可由一个或多个比特表示的记号，用于表示一个抽象或具体的事物。每一个数字符号本质上都会表示为一个二进制数。数用一个**字**（word）表示，所需比特数称为**字长**（word length）。
- **字节**（byte）特指八个比特构成的数字符号。字节的字长是8。
- **字符**（character）是一类特殊的数字符号，表示某种文明的文本（text）。本书重点关注两类字符集：表示英文文本的ASCII字符集，包含A、b、7、$等字符；以及表示全球文本的Unicode字符集，包含A、Θ、㋡、中、￥等字符。
- **算法**（algorithm）是一组有穷的规则，给出求解问题的数字符号操作步骤序列。
- **程序**（program）是算法的编程语言表示，也就是说，程序是采用某种计算机语言表示的算法。**代码**（code）是指一部分程序，可大到包括整个程序。**软件**（software）包括程序及说明程序的文档。
- **数据**（data）是一组数字符号。
- 当程序或数据被持续存放在计算机中时，它们被称为**文件**（files）。持续存储是指，当计算机下电后，数据文件和程序文件不会丢失。
- **数据类型**（data type）是特定类型的数据在计算机中的表示及其操作规则。本书主要关注五种数据类型：布尔值、整数、字符、数组、切片。
- **控制抽象**（control abstractions）说明多个操作的顺序。本书主要关注五种控制抽象：运算优先级、串行顺序、条件判断、循环、函数调用（包括递归调用）。

三大类真实计算机

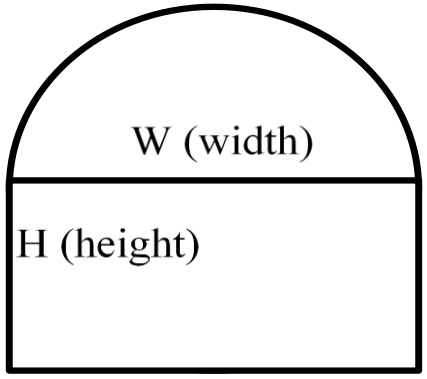
- **客户端计算机**（我们最熟悉的）
- **服务端计算机**（在机房里边的）
- 嵌入式计算机（我们看不见的）

- 贝尔定律：十年出一小类
  - **超级计算机**（supercomputer）
  - 大型机（mainframe）
  - 小型机（minicomputer）
  - 机群（cluster）
  - 工作站（workstation）
  - 微型机（microcomputer）
  - **便携计算机**（portable）
  - 个人专用终端（dedicated device）
  - 智能手机（smart phone）
  - 可穿戴计算机（wearable computer）

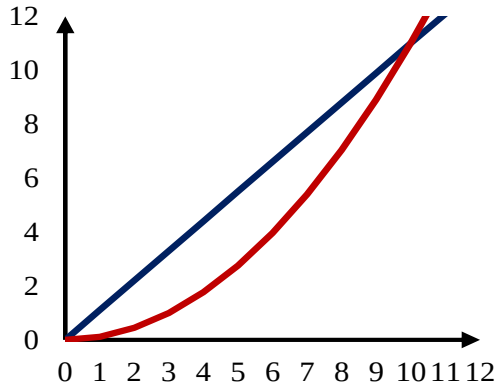
本课程用到**标红的计算机类别**

了解一种新的科学范式

- **计算**是**理论**探索、**实验**研究之外的第三种科研范式
- 比特精准的逐步计算过程可求解很多问题
  - Can solve problems unsolvable before
    - **Demo** to show the computational process of computing the size of the panda area, by accessing the dynamic webpage panda.html
    - https://teacher.solid.things.ac.cn:7243/public/web/panda_area.html



(a) School Mathematics
Regular shapes



(b) College Mathematics
Curly shapes

(c) Computer Science
Irregular shapes

郭泓锐提供的例子

4.2 提升胜任力

- 2021年，ACM与IEEE-CS联合发布了《计算课程体系规范》（Computing Curricula 2020，简称CC2020）

- 主要特征：知识本位教育 → 胜任力本位教育

  胜任力 = 知识 + 技能 + 品行

  Competency = Knowledge + Skills + Dispositions

  品行是能力、效率！

- 医学

  胜任力 = 医学 + 医术 + 医德

- 计算机科学胜任力体现为：用计算思维（1）求解问题的能力，以及（2）创造性表达的能力

品行：想象力、责任心

徐志伟老师:

您好!

我是课后提问您问题的那个同学。我的具体问题是：我们的英文文本可以被隐藏和复原，这较容易被理解。但为什么我后来隐藏中文文本也可以被隐藏和复原？它的编码究竟是如何编制的？

后

控

星宇，

你提出了一个很妙的想法。已经有一些初步进展了，同行称为“DNA存储”。
如你有兴趣，请搜索“DNA存储”，或读一下《国家科学评论》的最新综述：
DNA Storage: Research Landscape and Future Prospects
https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa007

干得好！

徐志伟

-----原始邮件-----
发件人:lvxingyu <lvxingyu20@mails.ucas.ac.cn>
发送时间:2021-06-07 19:38:57 (星期一)
收件人: "徐志伟" <zxu@ict.ac.cn>
抄送:
主题: 回复: 关于计算机科学导论课后问题的自主探索与解答（续）

（接上封邮件）老师好，在您的启发下我突然又想到一个问题，就是生物的DNA是一串“嘌呤-嘧啶对”，每个“嘌呤-嘧啶对”有四种不同的取法，如果分别标记成0，1，2，3的话，那DNA就可以等效地用一串四进制数表示了，这样的话，也可以把这个大数隐藏到文件里面，这是不是对生物信息的隐藏？... 我是不是也可以把我想要隐藏的信息通过修改DNA中的“冗余片段”实现隐藏？更进一步地，我让这个DNA控制发育成一个生命体，比如小白鼠，看起来它跟其它的小白鼠没什么不一样，但它却成了一个“**活体U盘**”，无时无刻不携带着一段有用的信息！甚至可以通过克隆这只小白鼠实现信息的克隆与传递。

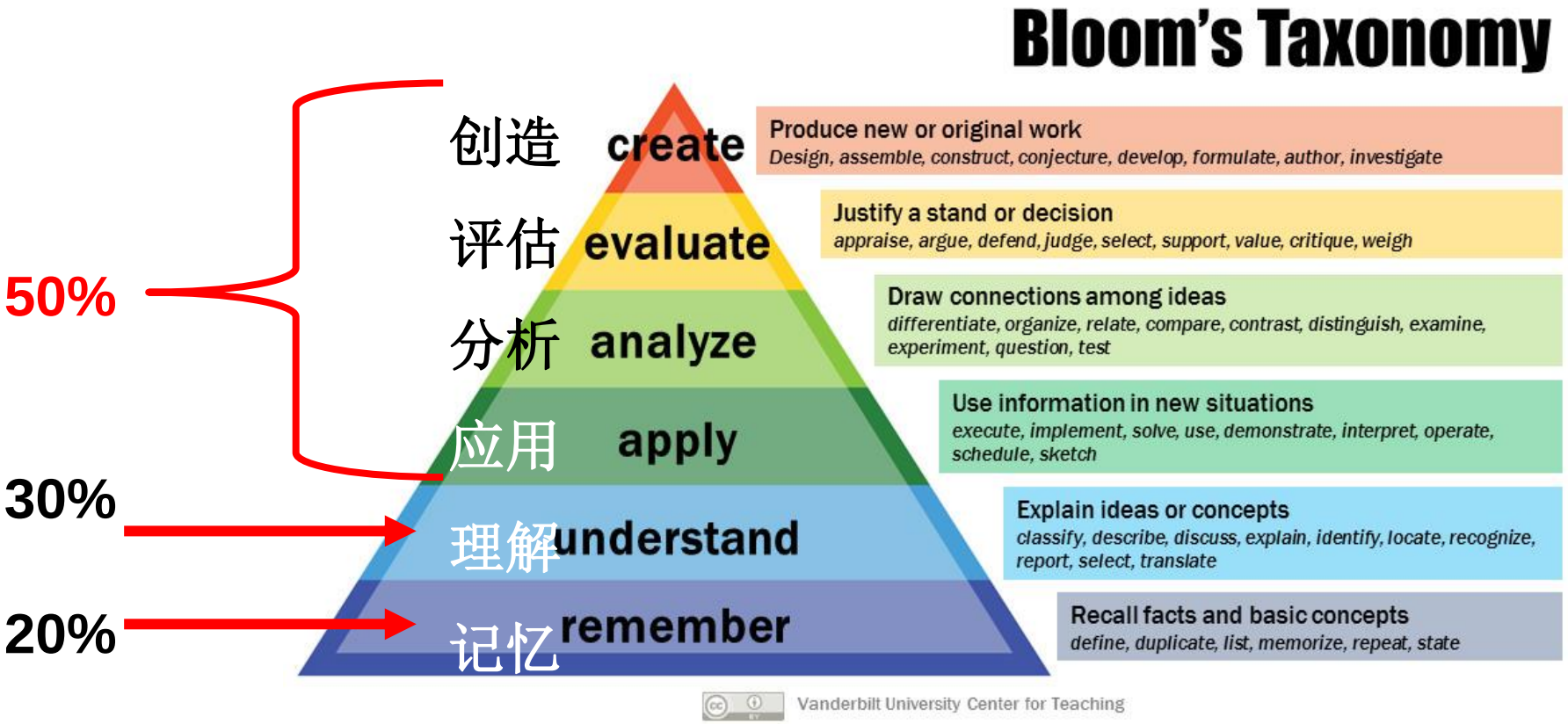
也就是说，我既可以**把一只小白鼠隐藏到《蒙娜丽莎》里面，也可以把《蒙娜丽莎》隐藏到小白鼠里面**？

我觉得是一个奇妙的想法，但不知道有啥用，以及这玩意儿应该也很费钱……不过抑制不住想跟您分享一下我的不成熟的想法 :-)

吕星宇
2021.6.7

聚焦入门知识，但提升布鲁姆层级

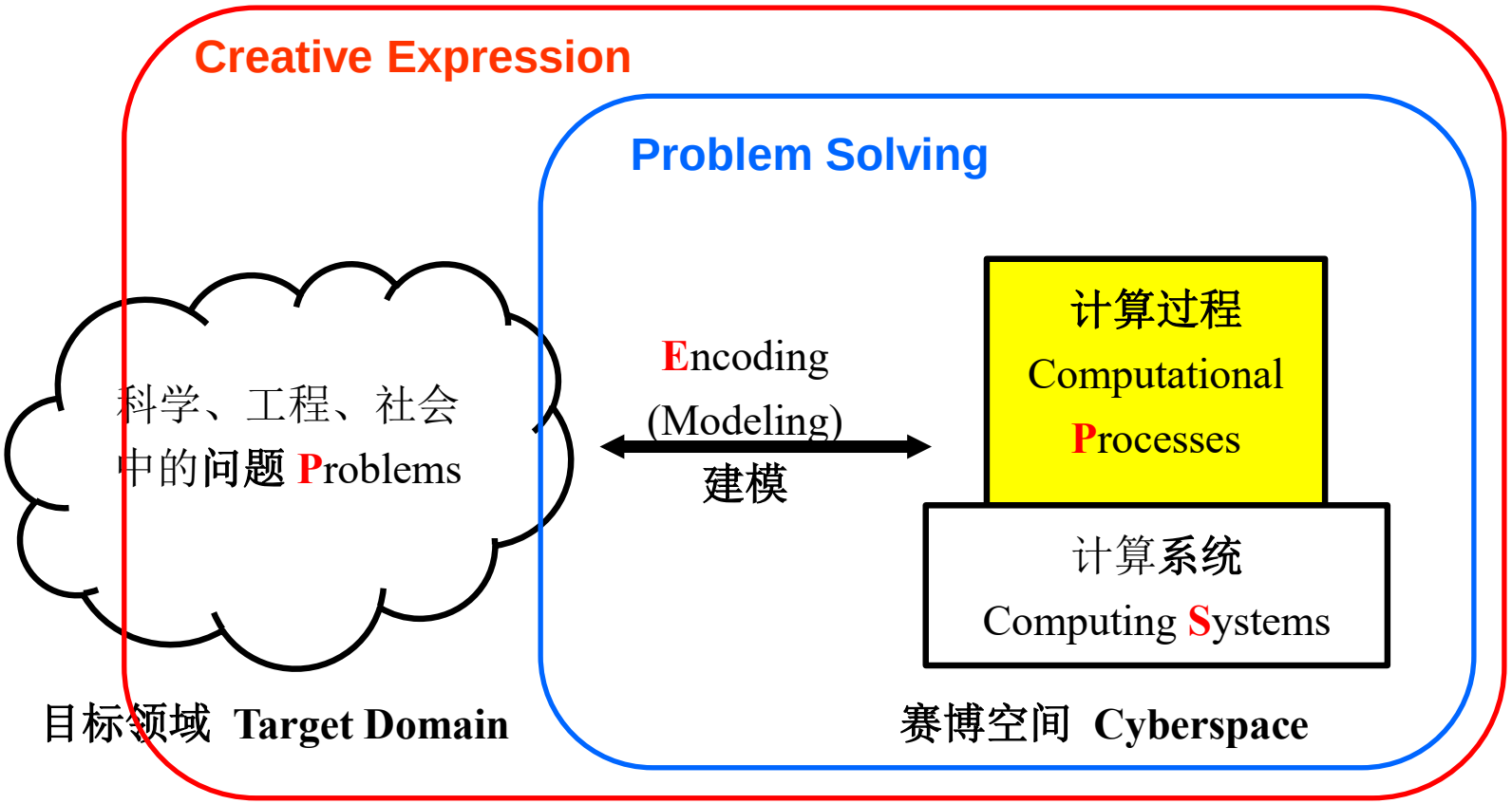
- 内容不求全面，但求本质
  - 如“切片”概念强调结构体实现的**动态数组**本质，忽略了“容量”细节
- 从“背诵、拷贝”提升到“理解”、“创造”层级



https://cft.vanderbilt.edu/guides-sub-pages/blooms-taxonomy/

求解问题的“活力”方法论

- “活力”：PEPS，即Problem ↔ Encoding ↔ Process ↔ System
- 问题求解：问题大体上已经给定　　大部分内容
- 创造性表达：往往需要自己定义问题　　个人作品



问题求解实例

- 设计一个算法，并编写一个Go程序，能够处理文件，将一个文本文件hamlet.txt隐藏在一个图像文件Autumn.bmp中

- 新图片与原图片没有可见区别

HAMLET

DRAMATIS PERSONAE

CLAUDIUS king of Denmark. (KING CLAUDIUS:)

HAMLET son to the late, and nephew to the present king.

…..

ACT ISCENE I Elsinore. A platform before the castle.

…..

PRINCE FORTINBRAS Let four captains
Bear Hamlet, like a soldier, to the stage;
For he was likely, had he been put on,
To have proved most royally: and, for his passage,
The soldiers' music and the rites of war
Speak loudly for him.
Take up the bodies: such a sight as this
Becomes the field, but here shows much amiss.
Go, bid the soldiers shoot.
[A dead march. Exeunt, bearing off the dead
bodies; after which a peal of ordnance is shot off]

原图片

隐藏得不好的结果图片

隐藏得好的结果图片

个人作品实例——创造性表达

- 每个同学创建自己的动态网页作品（**演示**）
  - 猫猫指挥家
  - 绮
- 提升学习能力

2020级物理系李思悦同学创建“猫猫指挥家”
花了三天，50%构思、设计，50%编码
155行代码

2021级生物系董可昕同学创建“绮”
“绮 2.0”版172行代码
“绮 3.0”版215行代码

4.3 理解基础知识点（横：范围）

美国科学院与工程院《计算机科学基础报告》，2004

- “计算机科学是研究计算机以及它们能干什么的一门学科。它研究**抽象计算机**的能力与局限，**真实计算机**的构造与特征，以及用于求解问题的无数**计算机应用**。”
  - 计算机科学涉及**符号**及其操作；
  - 关注多种**抽象**的创造和操作；
  - 创造并研究**算法**；
  - 创造各种**人造结构**，尤其是不受物理定律限制的结构；
  - 利用并应对**指数增长**；
  - 探索计算能力的**基本极限**；
  - 关注与人类**智能**相关的复杂的、分析的、理性的活动。

理解基础知识点（横：范围）

美国科学院与工程院《计算机科学基 4

图灵机 自动机

冯诺依曼模型
笔记本电脑

- “计算机科学是研究计算机以及它们能干什么的一门学科。它研究**抽象计算机**的能力与局限，**真实计算机**的构造与特征，以及用于求解问题无数**计算机应用**。”

个人作品

信息隐藏GO程序

  - 计算机科学涉及**符号**及其操作；

数字符号

  - 关注多种**抽象**的创造和操作；

从电路到算法的
各种抽象

命题逻辑
谓词逻辑

  - 创造并研究**算法**；
  - 创造各种**人造结构**，尤其是不受物理定律限制的结构；
  - 利用并应对**指数增长**；

斐波那契数列递归程序
P与NP

  - 探索计算能力的**基本极限**；

图灵机不可计算问题
哥德尔不完备定理

  - 关注与人类**智能**相关的复杂的、分析的、理性的活动。

抽象栈（竖：融会贯通）

- 能够设计一台计算机做加法循环程序，求斐波那契数F(50)

```
var fib [51]int
fib[0] = 0                    // initialize fib[0] and fib[1]
fib[1] = 1
for i := 2; i < 51; i++ {     // for循环：iteratively compute fib[i]
    fib[i] = fib[i-1] + fib[i-2]
}
```

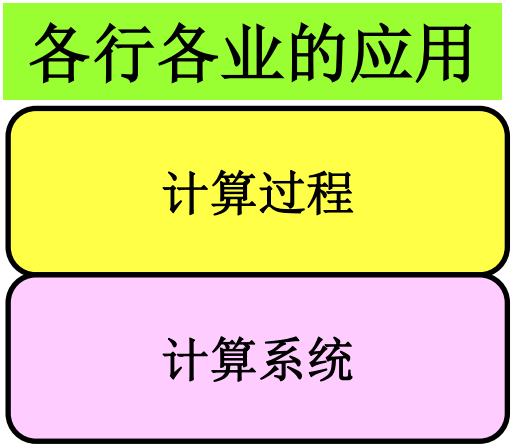
$$F(n)=\begin{cases}0 & n=0\\ 1 & n=1\\ F(n-1)+F(n-2) & n>1\end{cases}$$

数字符号	比特、字节、十进制数、十六进制数、整数、数组、BMP 图像。	
软件	**算法**	巧妙的信息变换方法。例如信息隐藏算法。
	程序	算法的代码实现。例如实现信息隐藏算法的 hide.go 程序。
	进程	运行时的程序。例如在 Linux 环境中的 hide 进程。
	指令	程序的最小单位，计算机能够直接执行。
硬件	**指令流水线**	每条指令都通过“取指-译码-执行”三个操作阶段组成的指令流水线得以自动执行。所有指令都由这一种机制执行，指令流水线由若干时钟周期组成。
	时序电路	等同于**自动机**，说明每一个时钟周期的操作。时序电路由组合电路与存储单元组成，理论上等同于**图灵机**。
	组合电路	实现二值逻辑表达式（**布尔逻辑表达式**）。

从算法到电路实现：　　跳转指令，寻址模式；电路只考虑加法。避免繁琐

4.4 领悟计算机思维的特征

- 理解：计算机科学是研究**计算过程**的科学
- 外部特征：ABC
  - **A**utomatic Execution 计算过程在计算机上**自动执行**
    - 是当代计算机科学的基础理论假设
      - 图灵：可计算数是机器可以自动写出每一个数字的数
    - 是高速计算的必要条件
      - 用算盘手工计算不可能高速
  - **B**it Accuracy **比特精准**
    - 计算过程的每一个比特都是正确的
  - **C**onstructive Abstraction
    构造性抽象
    - 系统为应用和计算过程提供抽象，以便
      - 简洁表达应用的计算过程
      - 比特精准转换，“应用→底层过程”
        应用能够比特精准地自动转换成由计算机底层操作构成的计算过程

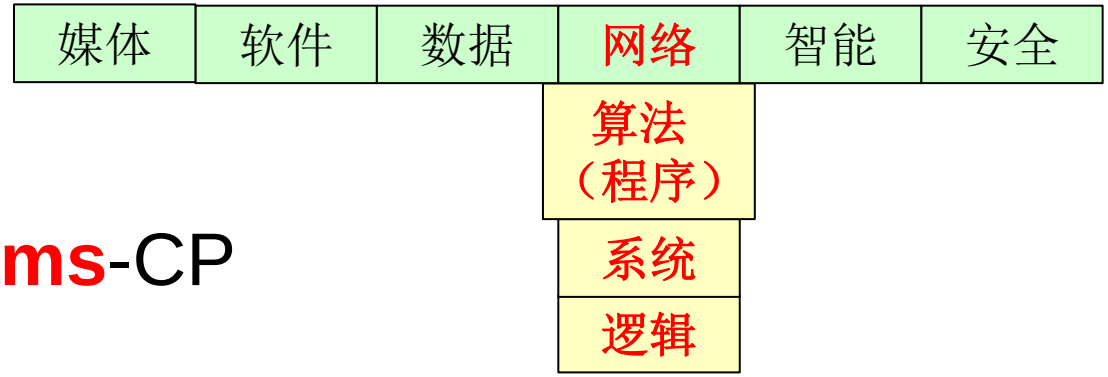


计算思维的特征

- 内部特征： **Acu-Exams**-CP
  敏锐审视

(**A**): Automatically execution	**自动执行**。计算机能够自动执行由离散步骤组成的计算过程。
(**C**): Correctness	**正确性**。计算机求解问题的正确性往往可以精确地定义并分析。
(**U**): Universality	**通用性**。计算机能够求解任意可计算问题。
(**E**): Effectiveness	**构造性**。人们能够构造出聪明的方法让计算机有效地解决问题。
(**X**): Complexity	**复杂度**。这些聪明的方法（算法）具备时间/空间复杂度。
(**A**): Abstraction	**抽象化**。少数精心构造的计算抽象可产生万千应用系统。
(**M**): Modularity	**模块化**。多个模块有规律地组合成为计算系统。
(**S**): Seamless Transition	**无缝衔接**。计算过程在计算系统中流畅地执行。
(C): Connectivity	**连通性**。很多问题涉及用户/数据/算法的连接体，而非单体。
(P): Protocol Stack	**协议栈**。连接体的节点之间通过协议栈通信交互。

计算思维的特征



- 内部特征： **Acu-Exams**-CP

逻辑思维：保证计算过程是正确的（比特精准的）
Logic thinking makes computational processes correct

算法思维：创造巧妙的计算过程
Algorithmic thinking makes computational processes smart

系统思维：使计算过程变得实用
Systems thinking makes computational processes practical

它们是整体：计算思维是一首交响乐

谢谢 Thank You

Q&A

zxu@ict.ac.cn

中科院计算所
INSTITUTE OF COMPUTING TECHNOLOGY