

高等院校计算机应用系列教材

计算思维与人工智能基础

付 菊 孙连山 主 编

郭文强 任喜伟 副主编

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是高校计算思维通识教育类课程的入门教材,以基于计算机的问题求解为主线,以计算思维能力培养为目的,从全新的视角组织教学内容,突出计算理论与计算机科学方法。全书共7章,分别介绍了计算与计算思维、信息表示、计算机系统、程序设计基础——Python 编程入门、信息传递与信息安全、人工智能基础、机器学习等内容。

本书内容丰富、结构清晰、语言简练、图文并茂,具有很强的实用性和可操作性,可作为高等学校本科生的第一本计算机课程教材,也可作为大中专院校计算机课程的教材或教学参考书。对各类计算机教育者、从事计算机各方面工作的人员,本书也是一本很有价值的参考书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。
版权所有,侵权必究。举报:010-62782989, beiqinquan@tup.tsinghua.edu.cn。

图书在版编目(CIP)数据

计算思维与人工智能基础 / 付菊, 孙连山主编. —北京: 清华大学出版社, 2022.9
高等院校计算机应用系列教材
ISBN 978-7-302-61717-4

I. ①计… II. ①付… ②孙… III. ①计算方法—思维方法—高等学校—教材②人工智能—高等学校—教材 IV. ①O241②TP18

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2022)第 155926 号

责任编辑: 王 定
封面设计: 高娟妮
版式设计: 思创景点
责任校对: 成凤进
责任印制: 丛怀宇

出版发行: 清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>
地 址: 北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编: 100084
社 总 机: 010-83470000 邮 购: 010-62786544
投稿与读者服务: 010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn
质 量 反 馈: 010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者: 三河市科茂嘉荣印务有限公司

经 销: 全国新华书店

开 本: 185mm×260mm 印 张: 14.75 字 数: 341 千字
版 次: 2022 年 9 月第 1 版 印 次: 2022 年 9 月第 1 次印刷
定 价: 59.80 元

产品编号: 092650-01



P R E F A C E

随着信息社会的快速发展和计算机技术在各行各业的深入应用，以人工智能、区块链、物联网、云计算、大数据等为代表的新一代信息技术正与各传统学科深度交叉融合。在新形势下，“计算思维”已经成为新工科的核心思维之一。大学计算机基础类课程如何适应新形势的变化，如何在加强计算思维能力培养的同时将新一代信息技术更好地融入课程内容，是许多高校教师不断探索的目标。

为此，我们组织编写了这本《计算思维与人工智能基础》教材，从初学者的角度组织教学内容，基本思路是以计算思维为导向，以问题求解所依赖的计算机系统为基础，以 Python 程序设计为桥梁，延伸到新一代信息技术的相关内容，展示计算机科学的基础概念、原理和方法。根据以上设计思路，本教材的内容共分为 7 章。

第 1 章介绍了计算与自动计算，计算的本质，计算思维的定义、特征、基本概念以及应用。

第 2 章介绍了数制的概念、转换，数值信息编码，字符信息编码以及多媒体信息编码。

第 3 章介绍了计算模式的演变，从逻辑门到处理器的演变，机器执行程序的过程，资源竞争与调度，云计算与大数据的基础知识。

第 4 章介绍了程序设计语言的基础知识，并以 Python 为例，介绍了搭建 Python 开发环境的步骤，Python 基础语法，Python 函数的定义、调用过程、编程，Python 常用的标准库。

第 5 章介绍了计算机网络的概念、分类、设备，信息节点身份标识，TCP/IP 协议，网络资源共享协议，物联网，网络安全与信息安全，区块链技术及应用等。

第 6 章介绍了人工智能的定义、发展、研究内容与应用领域，知识和知识表示，知识推理，搜索策略等。

第 7 章介绍了机器学习的基本概念与分类，机器学习系统的基本结构，机器学习的一般过程，包括样本和样本空间，任务分类，数据预处理，损失函数，模型选择，泛化、误差及拟合，正则化，优化算法以及评估验证等。

本书定位于问题导向，在结构设计上，每章开头都采用了“问题导入”，每章结尾都设置了“思考习题”，构成了具有鲜明特色的问题导向框架。通过这一系列环节的设计，形成了一个科学问题链，引领读者在学习的过程中分析问题、深入思考，掌握“问题求解”方法。

本书内容全面，由浅入深，同时紧密结合新一代信息技术的发展，并采用计算机专业写作手法，避免了交叉过于通俗而专业讲解不足的问题。本书可以适应多层次分级教学，

以满足不同学时教学和适应不同基础学时的学习。在教学中，可以根据实际教学学时数和学生的基础选择教学内容。

本书由付菊和孙连山任主编并通稿，郭文强和任喜伟任副主编，吕舒、刘斌、程雪红、李翔、方辉参与编写，其中付菊、孙连山、任喜伟负责第1~3章的编写，任喜伟、吕舒、刘斌、程雪红、李翔负责第4~5章的编写，郭文强、付菊、孙连山、方辉负责第6~7章的编写。在本书编写过程中，陕西科技大学计算思维与人工智能基础课程团队的各位老师提出了许多非常好的建议，在此表示感谢！

由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请同行和读者批评指正。

本书免费提供教学课件，读者可通过扫描下列二维码下载学习。



教学课件

编 者

2022 年 5 月



C O N T E N T S

第 1 章 计算与计算思维	1
1.1 计算与自动计算.....	3
1.1.1 计算机的早期历史.....	3
1.1.2 电子计算机.....	8
1.1.3 量子计算机.....	11
1.2 计算的本质.....	12
1.2.1 计算的概念.....	13
1.2.2 可计算与不可计算.....	15
1.2.3 计算的复杂性.....	16
1.3 计算思维.....	17
1.3.1 什么是计算思维.....	18
1.3.2 计算思维的应用.....	19
1.4 习题.....	20
第 2 章 信息表示	21
2.1 数制.....	22
2.1.1 数制的概念.....	23
2.1.2 数制的转换.....	25
2.2 数值信息编码.....	27
2.2.1 带符号整数的编码.....	28
2.2.2 带符号实数的编码.....	29
2.3 字符信息编码.....	30
2.3.1 西文字符编码.....	31
2.3.2 中文字符编码.....	32
2.4 多媒体信息编码.....	35
2.4.1 图形图像信息数字化.....	35
2.4.2 声音信息数字化.....	36
2.5 习题.....	37

第 3 章 计算机系统	39
3.1 计算模式的演变.....	40
3.1.1 图灵机模型.....	40
3.1.2 冯·诺依曼计算机模型.....	45
3.2 从逻辑门到处理器.....	47
3.2.1 布尔逻辑和逻辑门.....	47
3.2.2 算术逻辑单元.....	52
3.2.3 寄存器和内存.....	53
3.2.4 中央处理单元(CPU).....	55
3.3 机器如何执行程序.....	57
3.4 资源竞争与调度.....	60
3.4.1 存储体系.....	61
3.4.2 文件系统.....	63
3.4.3 操作系统.....	65
3.5 云计算与大数据.....	66
3.5.1 云计算.....	66
3.5.2 大数据.....	69
3.6 习题.....	71
第 4 章 程序设计基础——Python	
编程入门	72
4.1 程序设计语言.....	73
4.2 初识 Python.....	74
4.2.1 安装 Python 解释器.....	74
4.2.2 编写 Python 程序.....	75
4.2.3 运行 Python 程序.....	76
4.3 Python 基础语法.....	77
4.3.1 常量和变量.....	77
4.3.2 赋值.....	77

4.3.3	数据类型	78	5.4.4	网络入侵	136
4.3.4	输入和输出	81	5.4.5	网络防御	137
4.3.5	运算符和表达式	82	5.5	区块链技术的应用	141
4.4	程序结构	83	5.6	习题	142
4.4.1	顺序结构	83	第6章 人工智能基础	144	
4.4.2	选择结构	84	6.1	初识人工智能	145
4.4.3	循环结构	87	6.1.1	人工智能的定义	145
4.5	代码的封装	92	6.1.2	人工智能的发展	147
4.5.1	模块化程序设计思想	92	6.1.3	人工智能的研究学派	149
4.5.2	自定义函数	93	6.1.4	人工智能研究的基本内容	151
4.6	Python 组合数据类型	97	6.1.5	人工智能的主要应用领域	151
4.6.1	列表	97	6.2	知识表示与推理	162
4.6.2	元组	98	6.2.1	知识表示	162
4.6.3	字典	99	6.2.2	知识推理	168
4.6.4	集合	100	6.3	搜索策略	170
4.7	Python 常用的标准库	102	6.3.1	搜索的基本概念	170
4.7.1	turtle 库	102	6.3.2	盲目搜索	172
4.7.2	math 库	105	6.3.3	启发式搜索	173
4.8	习题	108	6.3.4	博弈	175
			6.3.5	高级搜索	179
第5章 信息传递与信息安全	109		6.4	习题	182
5.1	认识计算机网络	110	第7章 机器学习	183	
5.1.1	计算机网络的概念	110	7.1	机器学习概述	183
5.1.2	计算机网络的分类	110	7.1.1	机器学习的基本概念	184
5.1.3	计算机网络设备	115	7.1.2	机器学习的意义	184
5.2	信息传递	117	7.2	机器学习的分类	185
5.2.1	网络节点身份标识	117	7.2.1	有监督学习	185
5.2.2	网络节点数据传输协议	121	7.2.2	无监督学习	185
5.2.3	网络资源共享协议	125	7.2.3	强化学习	186
5.3	物联网	126	7.3	机器学习系统	186
5.3.1	身边的物联网	126	7.3.1	机器学习方法的三要素	186
5.3.2	物联网的感知与识别技术	126	7.3.2	机器学习系统的基本结构	188
5.3.3	物联网的定位技术	128	7.4	机器学习的步骤	189
5.4	网络与信息安全	131	7.4.1	机器学习的一般过程	189
5.4.1	信息安全概述	132	7.4.2	样本和样本空间	191
5.4.2	加密与解密	134			
5.4.3	计算机安全	136			

7.4.3 任务分类	193	7.4.8 正则化	208
7.4.4 数据预处理	194	7.4.9 优化算法	215
7.4.5 损失函数	197	7.4.10 评估验证	219
7.4.6 模型选择	201	7.5 习题	225
7.4.7 泛化、误差及拟合	204		

第 1 章

计算与计算思维



问题导入

计算与计算机无处不在

什么是计算机？计算机是否限定于人们常见的台式机和笔记本型电脑？其实不然。

(1) 多种形态的计算机。计算机自 20 世纪 40 年代诞生以来，已经发生了很多、很大的变化，从最初大如楼房的“电子管计算机”，到普通个人使用的“台式计算机”；从便于携带的“笔记本型电脑”，到如今人们随身携带的各种电子设备，如智能手机、平板电脑、导航仪、可穿戴设备等。

(2) 内嵌于设施/设备中的各种计算机。随着现代化技术的发展，各种服务设施如汽车、火车、飞机、轮船等，各种设备如制造业的机床、医疗诊断用的 CT(断层扫描仪)等，也都内嵌了各种各样的计算机来计算并控制设施/设备的运行。各种机器的“大脑”(计算机控制系统)就是计算机。目前，计算机控制系统已经成为体现设施/设备智能化、尖端化程度的关键点和竞争点。

(3) 计算机不仅包括硬件，还包括软件。计算机不仅包括看得见摸得着的硬件，还包括摸不着但看得见的可操作的软件。计算机软件(software，也称软件)是计算机系统程序及其文档，是计算机硬件与用户之间的接口界面，用户主要通过软件与计算机进行交流。

图 1-1 以“华为应用”和“淘宝网”为例，绘制了两个软件应用场景图。其中左图反映的是“华为应用”中相关产品的生态系统，它聚集了众多软件供应商，为其终端设备开

发并提供软件，并通过“华为商城”聚集和销售软件产品。用户通过购买华为的终端设备进而连接到“华为商城”，通过“应用商店”购买开发商提供的软件。这种销售渠道提供了软件开发、软件销售与软件购买、软件分发与软件更新等一系列不需要借助传统媒介(例如纸质说明书、光盘等)的新方式，即一切通过网络来提供和服务。这种生态体系体现了软件的一种作用。右图反映的是“淘宝网”的典型电子商务应用场景。它一方面聚集了众多实体商品供应商在网上开店，并进行网上店铺的管理；另一方面聚集了众多的用户，用户通过浏览网上店铺及其中的商品，进行商品购买与支付等。此类基于互联网销售实体商品的场景，体现了计算机软件的另一种应用。

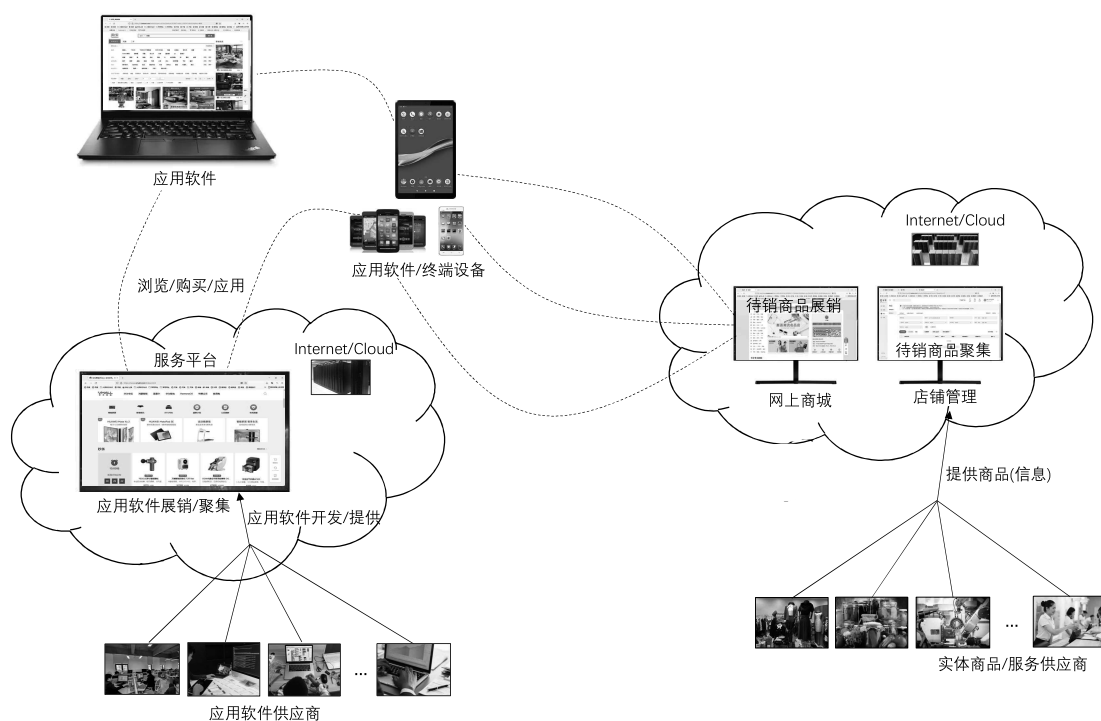


图 1-1 软件应用场景

以上两个应用场景表明，现代计算机系统已经改变了人们很多生活与工作习惯。从这个角度而言，计算机硬件只是一个载体，即用户赖以使用软件的载体，而软件则体现了计算机的丰富功能。同样的计算机硬件，装载不同的计算机软件则将拥有不同的功能。

(4) 计算机是能够执行“程序”的机器。简单来讲，计算机就是能够执行“程序”，完成各种各样“自动计算”的机器，包括了硬件和软件。硬件是构成计算机的各个元件、部件和装置，软件则是指运行于硬件上的各种“程序”。

1.1 计算与自动计算

简单的计算,如我们从小开始学习和训练的算术运算: $2+5=7$, $3\times 6=18$, $9-3=6$, $6\div 2=3\cdots\cdots$,是由数值和运算符形成运算式,按运算符的计算规则对数值进行计算并获得结果。我们不断学习和训练两方面的内容:一是用各种运算符及其组合来表达对数值的变换,即熟悉各种运算式;二是能按照运算符的计算规则对前述的运算式进行计算并得到正确的结果。这种运算式的计算是需要人来完成的,可被称为人计算。

在实际应用中,计算规则可以学习与掌握,但应用计算规则进行计算则可能超出了人的计算能力,即人知道规则但却没有办法得到计算结果。要解决这个问题,一种方法是研究复杂计算的各种简化的等效计算方法,使人可以计算并求得结果,这是数学家要研究的内容;另一种方法是设计简单的规则,让机器重复地执行来自动完成计算,即采用机器来代替人按照计算规则自动计算,这就是计算机科学家要研究的内容——如何实现自动计算。

1.1.1 计算机的早期历史

人类自古以来就在不断地发明和改进计算工具,从古老的“结绳计数”到算盘、计算尺、手摇计算机,再到1946年第一台电子计算机诞生,经历了漫长的岁月,推动着计算技术的发展。从总体上来看,计算技术的发展经历了计算工具→计算机器→现代计算机等三个历史阶段。

1. 计算工具

人类最早的计算工具也许是手指和脚趾,因为这些计算工具与生俱来,无需任何辅助设备。但手指和脚趾只能实现计算,不能存储计算结果,并且局限于0~20的数值计算。

1937年,在摩拉维亚(捷克东部)地区,人们发现了一根40万年前(旧石器时代)幼狼的前肢骨,有7英寸长,上面“逢五一组”,有55道很深的刻痕,这是迄今为止所发现的人类发展史上最早的计数工具。1963年,在山西朔州峙峪旧石器遗址出土了一些2.8万年前的兽骨,这些兽骨上刻有条痕,并且有“分组”的特点,说明当时的人们对数目已经有了一定的认识。

(1) 十进制计数法。在人类古代计数体系中,除巴比伦文明的楔形数字为十六进制,玛雅文明为二十进制外,几乎全部为十进制。公元3400年,古埃及已有十进制计数法,但是只有1~10的数字符号,没有“位值”(数符位置不同,表示的值不同)的概念。

在陕西半坡遗址(距今6000年以上)出土的陶器上,已经辨认的数字符号有“一”“二”“三”…“十三”等,如图1-2所示。

商朝时,已经有了比较完备的文字记数系统。在商代甲骨文中,已经有了一、二、三、

四、五、六、七、八、九、十、百、千、万这 13 个记数单字。在商代的一片甲骨文上可以看到,“547 天”记为“五百四旬又七日”,这是最早表明中国人使用十进制计数法和“位值”概念的典型案例。

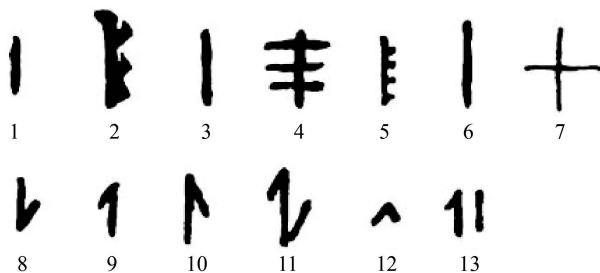


图 1-2 半坡陶符

(2) 算筹。算筹是中国古代最早的计算工具之一,成语“运筹帷幄”中的“筹”就是指算筹。南北朝科学家祖冲之(公元 429—500 年)借助算筹,成功地将圆周率计算到了小数点后第 7 位(图 1-3 左图为数字的算筹表示法)。算筹可能起源于周朝,在春秋战国时期已经非常普遍了。根据史书记载和考古材料发现,古代算筹实际上是一些差不多长短和粗细的小棍子。

形式 \ 数字	1	2	3	4	5	6	7	8	9
纵式	丨	＝	＝	＝	＝	＝	＝	＝	＝
横式	一	＝	＝	＝	＝	＝	＝	＝	＝

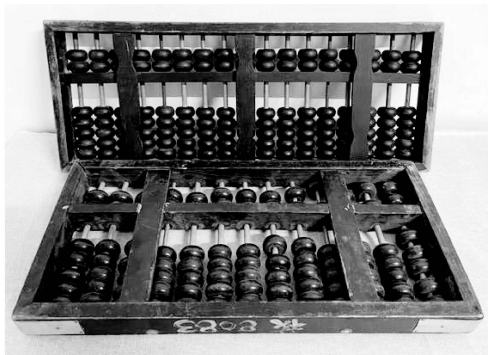


图 1-3 数字的算筹表示法(左图)和算盘(右图)

(3) 九九乘法口诀。中国使用“九九乘法口诀”(简称“九九表”)的时间较早,在《荀子》《管子》《战国策》等古籍中,能找到“三九二十七”“六八四十八”“四八三十二”“六六三十六”等语句。可见早在春秋战国时期,九九表已经开始流行了。九九表广泛用于算筹中进行乘法、除法、开方等运算,到明代改良用在算盘上。中国发现最早的九九表实物是湖南湘西出土的秦简木牍,上面详细记录了九九乘法口诀。与今天的乘法口诀不同,秦简上的九九表不是从“一一得一”开始,而是从“九九八十一”开始,到“二半而一”结束。

九九表是早期算法之一,它的特点是:只用一到十这 10 个数符;九九表包含了乘法的交换性,如只需要“八九七十二”,不需要“九八七十二”;九九表只有 45 项口诀。

(4) 算盘。“算盘”一词并不专指中国的穿珠算盘,如图 1-3 右图所示。从文献资料看,许多文明古国都有过各种形式的算盘,如古希腊的算板、古印度的沙盘等。但是,它们的影响和使用范围都不及中国发明的穿珠算盘。从计算角度看,算盘主要有以下进步。

- ① 建立了一套完整的算法规则, 如“三下五去二”。
- ② 具有临时存储功能(类似于计算机中的内存), 能连续运算。
- ③ 出现了五进制, 如上档一珠当五。
- ④ 使用方便, 工作可靠。

2013 年, 中国穿珠算盘被联合国公布为人类非物质文化遗产。

2. 计算机器

算盘作为主要计算工具流行了相当长的一段时间, 直到 18 世纪, 欧洲科学家兴起研究计算机器的热潮。当时, 法国数学家笛卡尔(Rene Descartes)预言: “总有一天, 人类会造出一些举止与人一样的‘没有灵魂的机械’来。”

(1) 机器计算的萌芽。1614 年, 苏格兰的数学家约翰·纳皮尔(John Napier)发明了对数, 对数能够将乘法运算转换为加法运算(他还发明了简化乘法运算的纳皮尔运算)。

1623 年, 德国的谢克卡德(Wilhelm Schickard)教授在给天文学家开普勒(Johannes Kepler)的信中, 设计了一种能做四则运算的机器(注: 没有实物佐证)。

1630 年, 英国的威廉·奥特雷德(William Oughtred)发明了圆形计算尺。

(2) 帕斯卡加法器。1642 年, 法国数学家帕斯卡(Blaise Pascal)制造了一台能进行 6 位十进制加法运算的机器, 如图 1-4 左图所示。这台机器在巴黎博览会展出期间引起了轰动。加法器发明的意义远远超出了机器本身的使用价值, 它证明了以前认为需要人类思维的计算过程, 完全能够由机器自动化实现。从此欧洲兴起了制造“思维工具”的热潮, 帕斯卡的加法器没有存储器, 用现在的观点来看, 它是不可编程的机器。

故宫博物院收藏有 6 台帕斯卡型加法器, 估计是康熙年间来华的法国传教士与我国科学家共同研制的。清代对计算器有很大的改进, 它可以做四则运算(与莱布尼茨计算机相似), 并且将最初帕斯卡加法器的 6 位数计算扩展到了 12 位数计算。

(3) 莱布尼茨的二进制思想。1664 年, 德国科学家莱布尼茨(Gottfried Wilhelm Leibniz)研制了一台机器, 这台机器能够驱动轮子和滚筒执行更复杂的加减乘除运算, 如图 1-4 右图所示。莱布尼茨描述了一种能够解代数方程的机器, 并且能够利用这种机器生成逻辑上的正确结论。他希望这台机器能够使科学知识的产生变成全自动的推理演算过程, 这反映了现代数理逻辑演绎和证明的思想。

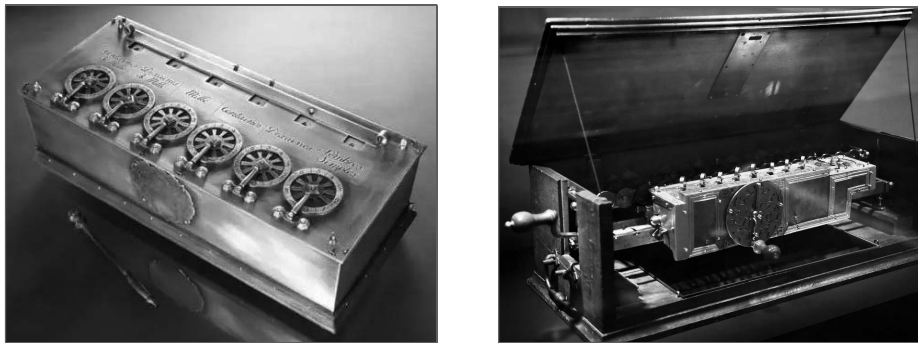


图 1-4 帕斯卡发明的加法器(左图)和莱布尼茨发明的四则运算机器(右图)

1679年，莱布尼茨在《1与0，一切数字的神奇渊源》的论文手稿中断言：“二进制是具有世界普遍性的、最完美的逻辑语言。”1701年，他写信给北京的神父闵明我(Domingo Fernández Navarrete, 西班牙)和白晋(Joachim Bouvet, 法国)，告知自己发明的二进制可以解释中国《周易》中的阴阳八卦，莱布尼茨希望这能够引起他心目中“算术爱好者”康熙皇帝的兴趣。莱布尼茨的二进制具有四则运算功能，而八卦则没有这项功能，因此它们本质上并不相同。

(4) 巴贝奇自动计算机。18世纪末，法国数学界调集了大批数学家组成人工手算流水线，经过长期的艰苦工作，终于完成了17卷《数学用表》的编制。但是手工计算的数据表格出现了大量错误，这极大地刺激了英国剑桥大学的著名数学家查尔斯·巴贝奇(Charles Babbage)。巴贝奇经过整整10年的反复钻研，终于在1822年研制出第一台差分机。差分机由英国政府出资，工匠克里门打造，有约25 000个零件，重达4吨。1862年，伦敦世博会展出了巴贝奇的差分机。差分机是现代计算机设计的先驱。

巴贝奇的设计思想是利用“机器”将计算到表格印刷的过程全部自动化，全面消除人为错误(如计算错误、抄写错误、校对错误、印刷错误等)。差分机是一种专门用来计算特定多项式函数值的机器，“差分”的含义是将函数表的复杂计算转化为差分运算，用简单的加法代替平方运算。差分机专用于编辑三角函数表、航海计算表等。

1837年，巴贝奇开始专心设计一种由程序控制的通用分析机。他先后提出过大约30种不同的分析机设计方案，并对各种方案都绘出了图纸，图纸上零件数量多达几万个。巴贝奇希望分析机能自动计算有100个变量的复杂算题，每个数达25位，速度达到每秒钟运算一次。巴贝奇的朋友爱达(Ada)女士在描述分析机时说：“我们可以毫不过分地说，分析机编织的代数图案就像杰卡德(Jacquard)提花机编织的鲜花和绿叶一样。在我们看来，这里蕴含了比差分机更多的创造性。”

分析机是第一台通用型计算机，它具备现代计算机的基本特征。分析机采用蒸汽机作为动力，驱动大量齿轮结构进行计算工作。分析机由四部分组成。

① 存储器，巴贝奇将其称为“堆栈”(store)，采用齿轮式寄存器保存数据，存储器大约可以存储1000个50位的十进制数。

② 运算器，巴贝奇将其命名为“工场”(Mill)，它包含一个算术运算单元，可以进行四则运算、比较、求平方根等运算，为了加快运算速度，巴贝奇设计了进位机制。

③ 输入和输出部分，分析机采用穿孔卡片读卡器进行程序输入，采用打孔输出数据。

④ 进行程序控制穿孔卡片，分析机采用与杰卡德提花机类似的穿孔卡片作为程序载体，用穿孔卡片上有孔或无孔来表示一个位的值，它可以运行“条件”“转移”“循环”等语句，程序类似于今天的汇编语言。

分析机的设计思想非常具有前瞻性，在当今计算机系统中依然随处可见，如采用通用型计算机设计，而非专用机器(差分机是专用机器)；核心引擎采用数字式设计，而非模拟式设计；软件与硬件分离设计(通过穿孔卡片变成)，而非一体化设计(如ENIAC通过导线和开关编程)。阿兰·麦席森·图灵(Alan Mathison Turing)在《计算机器与智能》一文中评价道：“分析机实际上是一台万能数字计算机。”巴贝奇以他天才的思想，划时代地提出了

类似于现代计算机的逻辑结构，他也因此被人们公认为“计算机之父”。分析机将抽象的代数关系看成可以由机器实现的实体，而且可以机械地操作这些实体，最终通过机器得出计算结果。这实现了最初由亚里士多德和莱布尼茨描述的“形式的抽象和操作”。

在多年研究和制造实践中，巴贝奇创作了世界上第一部计算机专著《分析机概论》。分析机的设计理论非常先进，它是现代程序控制计算机的雏形。但遗憾的是，这台分析机直到巴贝奇去世也没有制造出来。

(5) 布尔与数理逻辑。英国数学家布尔(George Boole)终身没有接触过计算机，但他的研究成果却为现代计算机设计提供了重要的数学方法。布尔在《逻辑的数学分析》和《思维规律的研究——逻辑与概率的数学理论基础》两部著作中，建立了一个完整的二进制代数理论体系。

布尔的贡献在于：

① 将亚里士多德的形式逻辑转化成一种代数运算，实现了莱布尼茨对逻辑进行代数演算的设想。

② 用 0 和 1 构建了二进制代数系统(布尔代数)，为现代数字计算机提供了数学方法。

③ 用二进制语言描述和处理各种逻辑命题，将人类的逻辑思维简化为二进制代数运算，推动了现代数理逻辑的发展。

3. 现代计算机

现代计算机是指利用电子技术代替机械或机电技术的计算机，经历了许许多多科学家 70 多年的接力发展，其中最重要的代表人物有英国科学家阿兰·麦席森·图灵(Alan Mathison Turing)和美籍匈牙利科学家冯·诺依曼(John von Neumann)，图灵是计算机科学理论的创始人，而冯·诺依曼则是计算机工程技术的先驱人物。

美国计算机协会(ACM)于 1966 年设立了“图灵奖”，目的是奖励对计算机事业做出重要贡献的个人；国际电子和电气工程师协会(IEEE)于 1990 年设立了冯·诺依曼奖，目的是表彰在计算机科学与技术领域具有杰出成就的科学家。

(1) ENIAC 计算机。第二次世界大战时期，宾夕法尼亚大学莫尔学院 36 岁的莫克利(John Mauchly)教授和他的学生埃克特(Presper Eckert)成功地研制出了 ENIAC 计算机。ENIAC 采用大约 18 000 个电子管，10 000 个电容器，7000 个电阻，1500 个继电器，耗电 150kW，重达 30t，占地面积 170m²，如图 1-5 所示。

(2) 冯·诺依曼与 EDVAC 计算机。1944 年，冯·诺依曼专程到莫尔学院参观了还未完成的 ENIAC 计算机，并参加了为改进 ENIAC 而举行的一系列专家会议。他提出了 EDVAC 计算机设计方案。

1945 年，冯·诺依曼发表了计算机史上著名的 *First Draft of a Report on the EDVAC* (EDVAC 计算机报告的第一份草案)论文，这篇手稿为 101 页的论文被称为“101 报告”。在 101 报告中，冯·诺依曼提出计算机的五大结构，以及存储程序的设计思想，奠定了现代计算机的设计基础。



图 1-5 ENIAC 资料图

1952 年, EDVAC 计算机投入运行, 它主要用于核武器理论计算。EDVAC 的改进主要有以下两点:

- ① 为充分发挥电子元件的高速性能, 采用了二进制。
- ② 将指令和数据都存储起来, 让机器自动执行程序。

现代计算机诞生后, 基本元器件经历了电子管、晶体管、中小规模集成电路、大规模和超大规模集成电路等发展阶段(有专家认为它们是四代计算机)。计算机运算速度显著提高, 存储容量大幅增加。同时, 软件技术也有了较大发展, 出现了操作系统、编译系统、高级程序设计语言、数据库等系统软件, 计算机应用开始进入到许多领域。

1.1.2 电子计算机

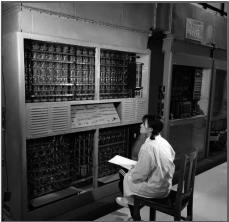
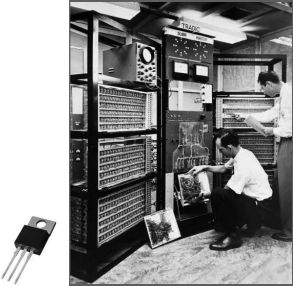
1946 年, 世界上第一台电子计算机在美国宾夕法尼亚大学诞生。之后短短的几十年里, 电子计算机经历了几代的演变, 并迅速渗透到人类生活和生产的各个领域, 在科学计算、工程设计、数据处理以及人们的日常生活中发挥着巨大的作用。电子计算机被公认为是 20 世纪最重大的工业革命成果之一。

计算机是一种能够存储程序, 并按照程序自动、高速、精确地进行大量计算和信息处理的电子机器。科技的进步促使计算机的产生和迅速发展, 而计算机的迅速发展又反过来促进了科学技术和生产水平的提高。电子计算机的发展和应用水平, 已经成为衡量一个国家科技水平和经济实力的重要标志。

1. 电子计算机的发展

计算机的发展阶段通常以构成计算机的电子器件来划分, 至今已经历了四代, 目前正在向第五代过渡。每一个发展阶段在技术上都是一次新的突破, 在性能上都是一次质的飞跃。电子计算机的分代如表 1-1 所示。

表 1-1 电子计算机的分代

阶 段	特 征	图 示
第一代电子管计算机(1946—1958 年)	(1) 采用电子管元件，体积庞大，耗电量高，可靠性差，维护困难； (2) 计算速度慢，一般为每秒一千次到一万次运算； (3) 使用机器语言，几乎没有系统软件； (4) 采用磁鼓、小磁芯作为存储器，存储空间有限； (5) 输入/输出设备简单，采用穿孔纸带或卡片； (6) 主要用于科学计算	 
第二代晶体管计算机(1959—1964 年)	(1) 采用晶体管元件，体积大大缩小，可靠性增强，寿命延长； (2) 计算速度加快，达到每秒几万次到几十万次运算； (3) 提出了操作系统的概念，出现了汇编语言，产生了 Fortran 和 COBOL 等高级程序设计语言和批处理系统； (4) 普遍采用磁芯作为内存储器，磁盘、磁带作为外存储器，容量大大提高； (5) 计算机应用领域扩大，除科学计算外，还用于数据处理和实时过程控制	
第三代集成电路计算机(1965—1970 年)	(1) 采用中小规模集成电路软件，体积进一步缩小，寿命更长； (2) 计算速度加快，可达每秒几百万次运算； (3) 高级语言进一步发展，操作系统的出现使计算机功能更强，计算机开始广泛应用在各个领域； (4) 普遍采用半导体存储器，存储容量进一步提高，而体积更小、价格更低； (5) 计算机应用范围扩大到企业管理和辅助设计等领域	
第四代大规模和超大规模集成电路计算机(1971 年至今)	(1) 采用大规模(large scale integration, LSI)和超大规模集成电路(very large scale integration, VLSI)元件，与第三代计算机相比体积进一步缩小，在硅半导体上集成了几十万甚至上百万个电子元器件，可靠性更好，寿命更长； (2) 计算速度加快，可达每秒几千万次到几十亿次运算； (3) 软件配置丰富，软件系统工程化、理论化，程序设计部分自动化； (4) 发展了并行处理技术和多机系统，微型计算机大量进入家庭，产品更新速度加快； (5) 计算机在办公自动化、数据库管理、图像处理、语言识别和专家系统等各个领域大显身手，计算机的发展进入了以计算机网络为特征的时代	 

20 世纪 80 年代曾提出第五代计算机的概念：用超大规模集成电路和其他新型物理元件组成的可以把信息采集、存储、处理、通信与人工智能结合在一起的智能计算机系统。这种计算机能面向知识处理，具有形式化推理、联想、学习和解释的能力，并能直接处理声音、文字、图像等信息。目前，已经在研究的有超导计算机、光子计算机、量子计算机、生物计算机、纳米计算机、神经计算机、智能计算机等。

2. 电子计算机的分类

科学技术的发展带动了计算机类型的不断变化，形成了不同种类的计算机。不同的应用需要不同类型的计算机支持。最初计算机按照结构原理分为模拟计算机、数字计算机和混合式计算机三类，按用途又可以分为专用计算机和通用计算机两类。专用计算机是针对某类应用而设计的计算机系统，具有经济、实用、有效等特点(例如铁路、飞机、银行使用的专用计算机)。通常所说的计算机是指通用计算机，例如学校教学、企业会计做账和家用计算机都是通用计算机。

对于通用计算机而言，通常按照计算机的运行速度、字长、存储容量等综合性能进行分类，有以下几种。

(1) 超级计算机。超级计算机就是常说的巨型机，主要用于科学计算，运算速度在每秒亿万次以上，数据存储容量很大，结构复杂、价格昂贵。超级计算机是国家科研的重要基础工具，在军事、气象、地质等诸多领域的研究中发挥着重要的作用。目前，国际上对高性能计算机最权威的评测机构是世界超级计算机协会的 TOP500，每年公布一次世界 500 强排行榜。2022 年 5 月 30 日，第 59 届国际超算大会发布的最新 TOP500 榜单中，我国的神威太湖之光位列第六，天河二号位列第九，共 173 台超级计算机进入 TOP500，占全球 34.6%，排名第一。

(2) 微型计算机。大规模集成电路与超大规模集成电路的发展是微型计算机得以产生的前提。日常使用的台式计算机、笔记本型计算机、掌上型计算机等都是微型计算机。目前微型计算机已经广泛应用于科研、办公、学习、娱乐等社会生产、生活的方方面面，是发展最快、应用最为普遍的计算机。

(3) 工作站。工作站也是微型计算机的一种，它是一种高档的微型计算机。工作站通常配置有容量很大的内存储器 and 外存储器，主要面向专业应用领域，具备强大的数据运算与图形、图像处理能力。工作站主要是为了满足工程设计、科学研究、软件开发、动画设计、信息服务等专业领域而设计开发的高性能微型计算机。需要注意：这里所说的工作站不同于计算机网络系统中的工作站，后者是网络中的任一用户节点，可以是网络中的任何一台普通微型机或终端。

(4) 服务器。服务器是指在网络环境下为网上众多用户提供共享信息资源和各种服务的高性能计算机。服务器上需要安装网络操作系统、网络协议和各种网络服务软件，主要用于为用户提供文件、数据库、应用及通信方面的服务。

(5) 嵌入式计算机。嵌入式计算机是嵌入到对象体系中，实现对象体系智能化控制的专用计算机系统。例如车载控制设备、智能家居控制器，以及日常生活中使用的各种家

用电器都采用了嵌入式计算机。嵌入式计算机系统以应用为中心，以计算机技术为基础，并且软硬件可裁剪，适用于对应系统的功能、可靠性、成本、体积、功耗有严格要求的场合。

1.1.3 量子计算机

量子计算机是一类遵循量子力学规律进行高速数学和逻辑运算、存储及处理量子信息的物理装置。当某个装置处理和计算的是量子信息，运行的是量子算法时，它就是量子计算机。

在传统经典计算机中，信息是用一串 0 和 1 形成的比特编码。10 比特可以给出 2^{10} 或 1024 种 0 和 1 组合，代表 0 到 1023 之间的一个数。相比之下，一个量子位能够同时代表 0 和 1(即叠加态)，因此，10 个量子位能同时编码全部 1024 个数字。量子位可从具有不同量子态的物理学系统中产生。用激光或微波操纵这些系统，能产生两个或更多的量子叠加态。将许多量子连接起来即可编码大量数据，如图 1-6 所示。

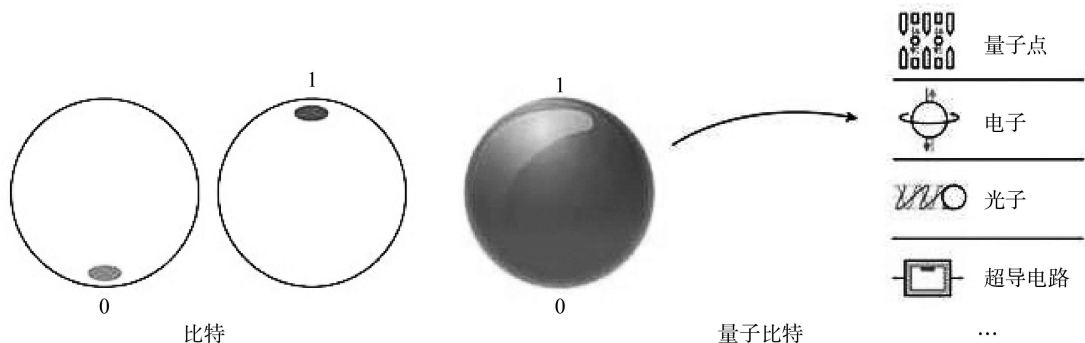


图 1-6 比特和量子比特

经典计算机以单个比特为基础运行，得出或为 0 或为 1 的结果。相比之下，量子比特调用所有量子位的整个叠加态，将之转化为两个依然能编码所有数字的叠加态。在这些操作中，量子系统必须被保护起来不受干扰，避免量子态以外的改变而导致叠加态错误或消失，如图 1-7 所示为经典逻辑门与量子逻辑门的对比。



图 1-7 经典逻辑门和量子逻辑门

算法是为了解决一个问题而进行的一系列操作。量子算法能够利用叠加态带来的平行性，这意味着它可以同时分析所有可能性，而不是一个一个分析——就像能同时扫描多张名片来寻找某个名字一样。量子算法给出每张名片为“正确”名片的概率。迭代几次之后，目标名片的累积概率将会比别的名片都高。即使需要运行多次，这种算法也比经典搜索快得多。数据库越大，其优势也越大，如图 1-8 所示。

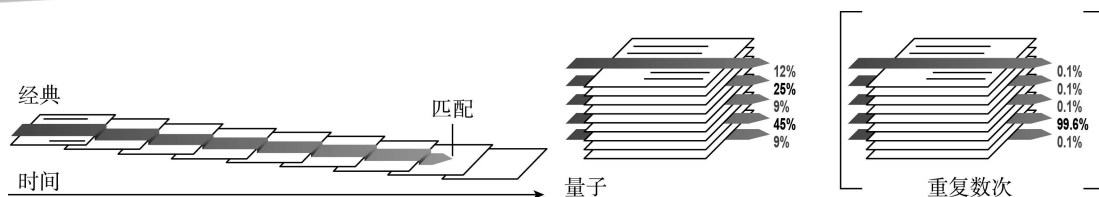


图 1-8 扫描多张名片来寻找某个名字

目前，量子计算机还不会取代经典计算机，但量子计算机在执行对经典计算机来说太过复杂的任务方面表现出众，比如在巨大的数据库中展开搜索，或者对大数进行质因数分解。后者难度极高，因此成为保护人们在线活动的加密技术的基础。最简短的经典计算机要花数千年才能求出的质因数，一台量子计算机只需要数周即可求出。量子态也可用于构建更安全的通讯系统。应用量子计算机的一种方式是用它来计算其他量子系统的行为。例如，量子计算机可被用于全面理解分子的化学性质，要做到这一点，需要了解其电子的量子力学特性；或用于寻找蛋白折叠的最优结构。

2017年5月3日，中国科学院潘建伟团队构建的光量子计算机实验样机的计算能力已超越早期计算机。此外，中国科研团队完成了10个超导量子比特的操纵，成功打破了目前世界上最大位数的超导量子比特的纠缠和完整的测量记录。

2020年6月18日，中国科学院宣布，中国科学技术大学的潘建伟、苑震生等在超冷原子量子计算和模拟研究中取得重要进展——在理论上提出并实验实现原子深度冷却新机制的基础上，在光晶格中首次实现了1250对原子高保真度纠缠态的同步制备，为基于超冷原子光晶格的规模化量子计算与模拟奠定了基础。这一成果于2020年6月19日在线发表于学术期刊《科学》上。

2020年12月4日，中国科学技术大学宣布本校潘建伟等人成功构建了76个光子的量子计算原型机“九章”，求解数学算法高斯玻色取样只需200秒，而目前世界最快的超级计算机要用6亿年。这一突破使中国成为全球第二个实现“量子优越性”的国家。12月4日，国际学术期刊《科学》发表了该成果，审稿人评价这是“一个最先进的实验”“一个重大成就”。

2021年2月8日，中科院量子信息重点实验室的科技成果转化平台合肥本源量子科技公司，发布了具有自主知识产权的量子计算机操作系统“本源司南”。

1.2 计算的本质

计算的本质是用符号模拟现实世界。而计算机的本质是通过不断执行计算来模拟现实世界。当我们要求解一个问题时，是因为要“计算”才去找“计算机”，还是因为要使用“计算机”才考虑如何“计算”？当然是前者。计算才是根本，因为计算机是没有生命的，人需要考虑它能做和不能做的事情。

1.2.1 计算的概念

人类的进化促成了计算的产生,社会的进步和科学技术的发展推动着计算的不断演变和发展。计算存在于人们的学习和生活中,一直伴随着我们,例如计算路径有多远、花了多少钱……这些现象的本质有一个共同点:凡是可计算的前提是事物之间存在某种关系。

通常我们对计算的感觉只是个抽象的数学概念,而实施计算又是非常具体的规则,那么,计算的科学定义是什么?

1. 计算的定义

计算是构建在一套公理体系上的、不断向上演化的规则,例如四则运算 $3+2=5$, $3\times 4=12$, $8\div 4=2$, $9-(2\times 4)=1$ ……它的公理体系应该是由数字、基本运算符、组合规则三部分组成。抽象地描述计算应该是基于规则的符号集合的变换过程,即从一个按规则组织的符号集合开始,再按照既定的规则一步步地改变这些符号集合,经过有限步骤之后得到一个确定的结果。

从熟悉的函数概念来理解计算,一个任意的函数变换就是一个计算。例如,对于函数 $y=f(x)$,当给出一个 x 值,通过按规则的计算就可以得到结果 y 值。从数学的意义上说,这个函数是一系列可能的输入和输出的二元组,通过确定的函数计算使每一个输入值得到相应的输出结果。

又如:①两数求和的函数,它的输入是成对的数值,通过求和计算,它的输出就是两个输入数值的和;②排序函数,对于每一个输入表,通过排序计算,会得到有相同条目的但已经按照预定的规则排好序的输出表。

由此可见,计算的形式是相同的,但计算的内容则与所解决的问题相关。所以计算永远是面向问题的,不存在任何一种包揽万物的计算。所以说“计算思维是人的,而不是计算机的思维”。

2. 计算的分类

在计算这个问题上有两种范式:①计算理论的研究,侧重于从数学角度证明表达能力和正确性,比较典型的图灵机、Lambda 演算、Pi 演算都属于这个范畴;②计算模型的研究,侧重于对真实系统的建模和刻画,比如冯·诺依曼模型、BSP 模型、LogP 模型等。

计算与人类总是在同步前进。曾经,人们对计算的理解只是传统的算术行为或者单纯的数值计算,所有计算工具也只为完成数值计算而产生。随着科学技术的发展和社会需求的牵引,计算的概念被极大地泛化,由于现代学科包罗万象、分类繁多,每个学科都需要进行大量的计算,使得冠以“计算”的词语层出不穷。计算不再仅仅指数值计算,还包括非数值计算以及各种应用推动的数据处理的过程。例如,从技术的角度有云计算及大数据、数据库、多媒体数据处理等;从应用的角度有生物计算、量子计算、网格计算、仿真计算、社会计算、情感计算等。

3. 计算的过程

在图灵机模型中(详见 3.1.1), 计算就是计算者(人或机器)对一条无限长的纸带上的符号串执行指令, 一步步地改变纸带上某位置的符号(如图 1-9 所示), 经过有限步骤, 最后得到一个满足预先规定的符号串的变换过程。这个模型的关键是形式化方法, 即用“纸带符号串→控制有限步骤→读/写头→结果”这一形式成功地表述了计算这一过程的本质。

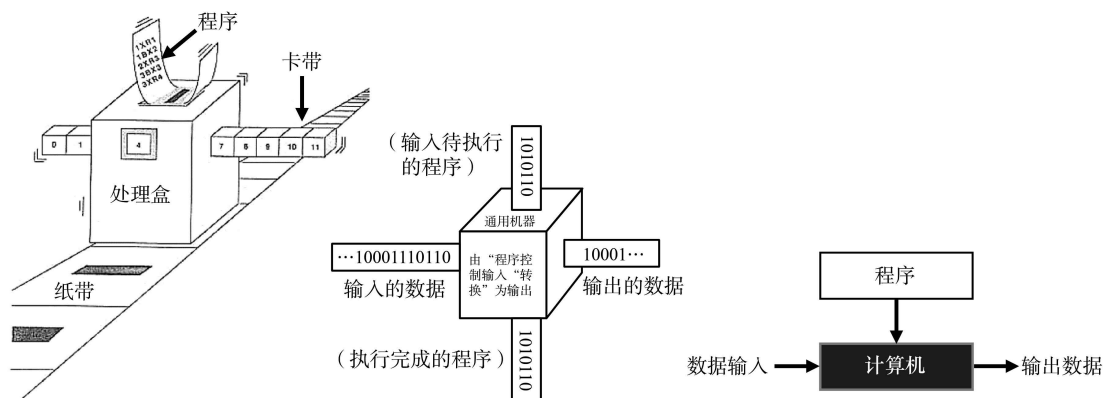


图 1-9 图灵机装置和原理(左图)及图灵机模型(右图)

以计算机下棋为例说明, 一个简单的井字棋如图 1-10 所示。计算机的计算主要是建立在一个状态空间树(博弈树)的搜索方式上。在博弈过程中, 计算机需要操作的数据对象是每走一步棋后形成的新的棋盘状态(格局), 对每一个格局来说, 它的下一步棋都有若干不同的走法, 这样一层一层就形成了一个状态空间树。计算机按照事先约定的判断规则(算法)就可以得到自己的选择, 这就是计算机下棋的形式化描述过程。

从计算机下棋的例子可见, 计算很像一个解释器, 我们将数据和代码放入其中, 经过解释器的运行, 最后得到一个结果。下棋对弈过程中每一步的计算, 其输入就是前一步棋完成后形成的棋盘状态, 而输出就是行动决策, 如图 1-11 所示。这个过程中最重要的是建立解释器的计算模型, 而这个模型就是一种建立在数学描述之上的形式化方法, 和图灵机的“纸带符号串→控制有限步骤→读/写头→结果”一样。

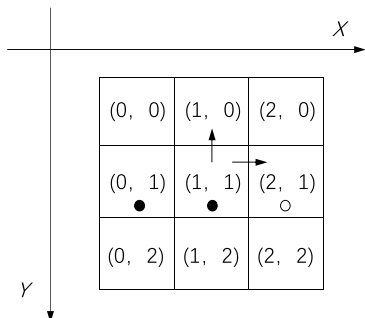


图 1-10 井字棋示意图

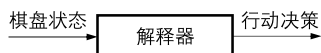


图 1-11 计算解释器

不同的解释器对应着不同的计算模型，比如符号计算和数值计算，就各自对应自己的解释器，通过不同的计算模型得出各自需要的结果。它们的计算模型不同，但是本质是相同的：计算过程符号化。

图灵论题的另一意义在于：揭示了计算所具有的执行过程的本质特征，或者说计算思维的过程性特征，因为并非所有的问题都可以用这种机械方式最终得到解决。

无论计算的本质是什么，一个不可忽视的事实是：对各种不同计算的实现，首先是人的计算思维活动，是计算的过程化、形式化思维活动的表达，体现为算法、程序或软件。其实，计算的本质就是通过演化产生新的信息，计算机只是将演化规则实现而已。

1.2.2 可计算与不可计算

理论思维是科学方法的重要组成部分，而理论源于数学，数学的定义是理论思维的灵魂，定理和证明则是它们的精髓。

1. 什么问题不可计算

由图灵的研究结论可以引出一个关于“可计算性”的定义：一个可计算问题是“当且仅当它在图灵机上经过有限步骤之后可以得到正确的结果”，这一结论就是著名的图灵论题。根据这一论题，通常人们把所面临的问题分为可计算问题与不可计算问题两大类。那么什么问题不可计算？

例如，图灵“停机”问题就是不可计算的：给定一段计算机程序和一个特定的输入，判断该程序最终是否能够停机。事实上，如果该问题可计算，那么编译程序可以在运行程序之前判断该程序是否存在死循环，而计算机无法分辨死循环程序和一个只是“运行很慢”的程序。

实际上，无法用计算机解决的问题有无穷多，停机问题只是其中一个。例如，“判断一台计算机是否有病毒程序”这个问题也是不可计算的。因为到目前为止，所有的病毒检测程序都是对比和查找已有的病毒，对于不断出现的新病毒并没有确切的算法能够检测。这就如同医生只能对已有的疾病做出诊断，而对未来可能出现的新型疾病以及疾病的变种却无法预知。如果要证明一个问题不可计算，方法应该是：证明它如果可以计算，那么停机问题就可以计算。

2. 问题的可计算性判断

与不可计算问题一样，可计算问题也有无穷多种。判断哪些问题可计算，这是计算机科学中的一个基本问题。在数学与计算机科学中，有一个“能行过程”的概念，它主要是针对所要解决的问题是否存在能行方法，以此来判断可计算问题是否实际可解。

无论是在数学上还是工程上，解决问题的过程就是问题状态发生变化的过程。如果以参数形式来描述问题状态，那么解决问题的过程就可以看作是一个参数变化的过程，如表 1-2 所示。这个过程中，如果输入参数和输出结果的对应关系是明确的，则说明这个过程是可行的，也就是说这个问题是可计算的。

表 1-2 解决问题的参数变化过程

过程时间	问题状态	参数形式
开始	初始状态	输入参数
结束	结束状态	输出结果

对于某些问题，允许存在一些输入参数，但却不存在明确的输出结果。在这种情况下考虑其能行方法，只针对有效输入即可。如果存在针对有效输入的能行方法，那么该问题也是可计算的。

通常，如果要说明一个问题是可计算的，就必须给出该类问题存在能行过程的证明。例如，设 m 和 n 是两个正整数，且 $m > n$ 。求 m 和 n 的最大公约数的欧几里得算法，可以通过以下过程表示。

步骤 1: 以 n 除 m 得余数 r 。 //求余数
 步骤 2: 若 $r=0$ ，则输出答案 n ，过程终止；否则转到步骤 3。 //判断余数是否为 0
 步骤 3: 把 m 的值变为 n ， n 的值变为 r ，重复上述步骤。 //变换参数值

上述过程由 3 个步骤组成，输入参数为正整数 m 和 n ；每个步骤后的描述是明确的，并且可以证明过程终止时输出数据为 m 和 n 的最大公约数。过程的每一个步骤都可以通过一些可实现的基本运算(判断)完成，整个过程经过有穷步后终止。因此，求 m 和 n 的最大公约数的欧几里得算法是一个能行的过程，即求 m 和 n 的最大公约数的问题是可计算的。

1.2.3 计算的复杂性

对于数学和计算机应用科学来说，平常我们关心的是计算机需要花多长时间去解决一个问题，即可计算且能在有限时间有解。换句话说，就是这个问题有多复杂？

可计算未必能有完全解。因为这里的可计算问题仅仅是来自理论思维上的可计算，图灵机模型中的“有限步骤”是一个过于宽松的限制，它甚至包括了需要计算好几百年才能完成的问题。所以图灵机模型只能看作是概念模型，却不是实际上的“通用机”。因此，还需对可计算问题的复杂性进行判断。

20 世纪 70 年代，库克(Stephen Cook)将可计算问题进一步分为可解和难解两类：一个问题是实际可计算的，当且仅当它能够在图灵机上经过多项式步骤得到正确结果。这就是著名的库克论题，它界定了计算机的实际计算能力限度。超过这个限度的问题一般被认为是难解问题，其中一个典型的难解问题是汉诺塔问题。

印度有一个古老的传说：在贝拿勒斯(位于印度北部)的圣庙里，有一块黄铜板上插着三根宝石针，如图 1-12 所示。印度教的主神梵天在创造世界的时候，在最左侧一根针上从下到上地穿好了由大到小的 64 片金片，这就是所谓的汉诺塔。

不论白天黑夜，总有一个僧侣按照下面的法则移动金片：一次只移动一片，不管在哪根针上，小片必须在大片上面。僧侣们预言，当所有的金片都从梵天穿好的那根针上移到最右侧那根针上时，世界就将在一声霹雳中消失，而梵塔、庙宇和众生也都将同归于尽。

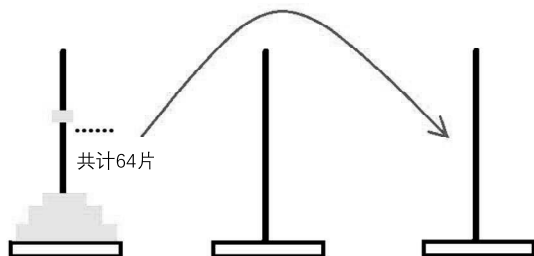


图 1-12 汉诺塔问题

考虑一下把 64 片金片由一根针上移动到另一根针上，并且始终保持上小下大的顺序，那么需要多少次移动呢？这里需要用递归的方法，假设有 n 片金片，移动次数是 $f(n)$ ，显然有：

$$f(1)=1, f(2)=3, f(3)=7, \text{ 且 } f(k+1)=2f(k)+1。$$

此后不难证明 $f(n)=2^n-1$ 。假设有 64 片，即当 $n=64$ 时，共需多长时间或者说共需要移动多少次？按每秒钟移动一次计算，一个平年 365 天有 31 536 000 秒，闰年 366 天有 31 622 400 秒，平均每年有 31 556 952 秒，总共需要 18 446 744 073 709 551 615 秒，即 5845.54 亿年以上。而地球存在至今也不过 45 亿年，太阳系的预期寿命据说也就百亿年，真的过了那么久，地球上的一切生命，连同梵塔、庙宇可能都已经不知去向了。

由上面的例子可见，衡量可解问题的复杂度是计算机运行程序时要执行的运算数量，这个数量是决定所用时间的关键。例如，用程序对一个数列排序，这个问题可计算，但是问题复杂度却依赖于数列中元素的个数，如果元素个数也有 5000 多亿，就很难有解了。

1.3 计算思维

人们尝试在许多学科领域中应用计算思维解决问题。当人们提出易被计算机解决或者通过大数据分析探寻内部规律的难题时，表明他们正在运用计算思维进行思考。计算思维带动了计算生物学、计算化学等领域的发展，同时也带来了能够运用在文学、社会研究和艺术方面的全新技术。计算思维很早就已来到我们身边，存在于我们生活各处。

例如，计算尺的发明是受到人们将复杂运算转换为简单计算的思维的启发，也就是把乘法变为加法来计算，如图 1-13 所示。

$$\begin{array}{r} 8 \\ \times 25 \\ \hline 40 \\ + 16 \\ \hline 200 \end{array}$$

图 1-13 乘法变加法

又如，图灵提出用机器来模拟人们用纸笔进行数学运算的过程，他把这样的过程看成两个简单的动作：①在纸上写或擦除某一个符号；②把注意力从纸上的一个位置移动到另一个位置。图灵构造出这台假想的、被后人称为“图灵机”的机器可用十分简单的装置模拟人类所能进行的任何计算过程。

1.3.1 什么是计算思维

如何绘制人类完整的 DNA 序列？威廉·莎士比亚的著作是否全部是亲笔所著？是否能编写出可自主作曲的智能电脑程序？以上这三个现实问题有什么共性吗？要想回答这些问题，需要使用所谓的计算思维。那么，什么是计算思维呢？

1. 计算思维的定义

2006 年 3 月，美国卡内基梅隆大学(CMU)周以真(Jeannette M. Wing)教授在美国计算机权威期刊 *Communications of the ACM* 上提出并定义了计算思维(computational thinking)。周以真认为：计算思维是运用计算机科学的基础概念进行问题求解、系统设计以及人类行为理解等涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动。

国际教育技术协会(ISTE)和计算机科学教师协会(CSTA)在 2011 年给计算机思维做了一个可操作性的定义，即计算机思维是一个问题解决的过程，该过程有以下几个特点。

- (1) 拟定问题，并能够利用计算机和其他工具的帮助来解决问题。
- (2) 符合逻辑地组织和分析数据。
- (3) 通过抽象(如模型、仿真等)再现数据。
- (4) 通过算法思想(一系列有序的步骤)，支持自动化的解决方案。
- (5) 分析可能的解决方案，找到最有效的方案，并且有效地应用这些方案和资源。
- (6) 将该问题的求解过程进行推广，并移植到更广泛的问题中。

2. 计算思维的特征

周以真教授对计算思维的基本特征进行了如下描述。

(1) 计算思维是人的，不是计算机的思维方式。计算思维是人类求解问题的思维方法，而不是要使人类像计算机那样思考。

(2) 计算思维是数学思维和工具思维的相互融合。计算机科学本质上源于数学思维，但是受计算设备的限制，迫使计算机科学家必须进行工程思考，不能只是数学思考。

(3) 计算思维建立在计算过程的能力和限制之上。需要考虑哪些事情人类比计算机做得好？哪些事情计算机比人类做得好？最根本的问题是：什么是可计算的？

(4) 为了有效地求解一个问题，我们可能要进一步问：一个近似解是否就够了呢？是否允许漏报和误报？计算思维就是通过简化、转换和仿真等方法，把一个看似困难的问题，重新阐述成一个我们知道如何解决的问题。

(5) 计算思维采用抽象和分解的方法，将一个庞杂的任务分解成一个适合计算机处理的问题。计算思维选择合适的方式对问题进行建模，使其易于处理。在我们不必理解系统

每一个细节的情况下，就能够安全地使用或调整一个大型的复杂系统。

由此可以看出：计算思维以设计和构造为特征，是运用计算机科学的基本概念，进行问题求解、系统设计的一系列思维活动。

1.3.2 计算思维的应用

计算思维是一个高度跨学科的内容，我们可以在任何学科中找到其相关的应用，如表 1-3 所示。

表 1-3 计算思维在各个领域中的应用

计算思维概念	应用领域
将问题分解为多个部分或步骤	文学：通过对韵律、韵文、意象、结构、语气、措词与含义的分析来分析诗歌
识别并发现模式或趋势	经济：寻找国家经济增长和下降的循环模式
开发解决问题或任务步骤的指令	烹饪艺术：撰写供他人使用的菜谱
将模式和趋势归纳至规则、原理或见解中	数学：找出二阶多项式分解法则
	化学：找出化学键(类型)及(分子间)相互作用规律

在表 1-3 中，所有技能都是计算思维涉及的技能或概念，这些技能被应用到文学、经济、烹饪艺术和音乐中。就本质来说，计算思维是计算机科学家的基本技能和思维方式。然而我们可以将它应用在任何学科领域或主题，并且，可以在设计流程或算法以解决问题过程中，随时应用这些思维技巧。

那么如何绘制人类基因序列呢？答案是借助算法与电脑程序给 DNA 中数以百万计的碱基对进行排序。如何破解莎士比亚著作之谜呢？答案是通过计算机分析莎士比亚作品的词汇、主题和风格，能够确认莎士比亚确实编著了自己名下所有的作品，实至名归。至于如何实现智能作曲的问题，则可以通过计算思维发现已有音乐作品的存在方式与规律，编写程序，生成全新的音乐作品。今天的人类所面临的全球重大问题，都需要跨学科来解决。

在计算机科学中，抽象是一种被广泛使用的计算思维方法。在本书中介绍的冯·诺依曼体系结构就是对现代计算机体系结构的一种抽象认识。在冯·诺依曼体系结构中，计算机由内存、处理单元、控制单元、输入设备和输出设备等五部分组成。这一体系结构屏蔽了实现上的诸多细节，明确了现代计算机应该具备的重要组成部分及各部分之间的关系，是计算机系统的抽象模型，为现代计算机的研制奠定了基础。

此外，借助于数学抽象(即数学模型)，我们可以编写程序。程序设计就是把客观世界问题的求解过程映射为计算机的一组动作。用计算机能接受的形式符号记录我们的设计，然后运行实施。动作完成，得出的数据往往也不是问题解的形式，而是解的映射。例如，在交通控制程序中用高级语言输出的红、绿、黄信号灯多半是 1、2、3 这样的数字信号。

1.4 习题

1. 简述电子计算机发展的几个阶段，以及每个阶段的主要特征。
2. 简述计算思维的概念、计算思维的本质，并举例说明。
3. 计算的本质是什么？
4. 如何判断一个问题的可计算与不可计算？