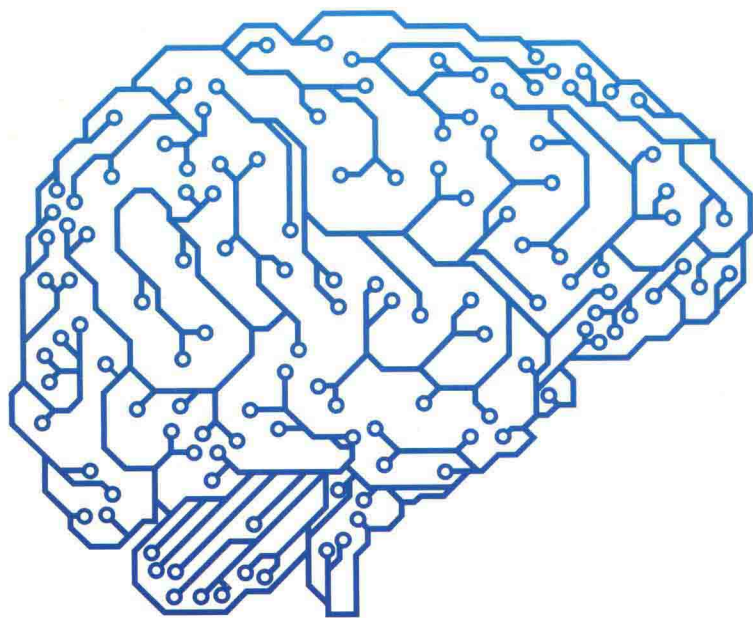


2014年教育部高教司
——微软公司校企合作专业综合改革资助项目



The Structure of
Computational Thinking

计算思维

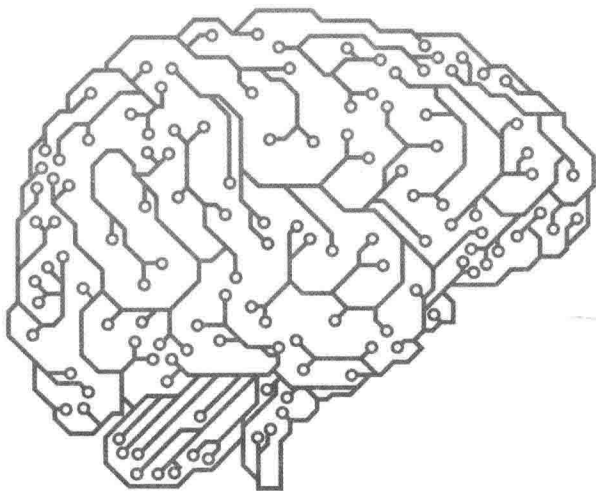
的结构

董荣胜 | 著

 中国工信出版集团

 人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

2014年教育部高教司
——微软公司校企合作专业综合改革资助项目



The Structure of
Computational Thinking

计算思维 的结构

董荣胜 | 著

人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (C I P) 数据

计算思维的结构 / 董荣胜著. — 北京 : 人民邮电出版社, 2017.8
ISBN 978-7-115-45765-3

I. ①计… II. ①董… III. ①电子计算机 IV. ①TP33

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第118876号

内 容 提 要

这是一本讲述计算思维的入门书, 适合大学新生, 以及所有希望提高问题求解、系统设计和人类行为理解能力的人阅读。

本书的结构建立在计算机方法论的结构框架之上, 重点放在计算机科学中的不同抽象层次的“自动有效进行”方面, 着力于一般(类)问题的有效求解。这样做的好处是: 一方面, 从类问题求解的思维模式上帮助大学新生顺利过渡到大学学习中来; 另一方面, 强调计算机科学中抽象层次的概念, 可以降低不同学科人们沟通的复杂程度, 将问题集中到各自学科关键的元素上, 进而促进各学科的深度交叉融合。

本书是中国大学 MOOC “计算思维的结构”课程的配套教材, 配合线上课程, 会取得更好的学习效果。

-
- ◆ 著 董荣胜
责任编辑 邹文波
责任印制 陈 犇
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市丰台区成寿寺路 11 号
邮编 100164 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市中晟雅豪印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 11.25 2017年8月第1版
字数: 299千字 2017年8月河北第1次印刷

定价: 49.80 元

读者服务热线: (010)81055256 印装质量热线: (010)81055316

反盗版热线: (010)81055315

广告经营许可证: 京东工商广登字 20170147 号

第 1 章 绪论 1	3.3 理论形态..... 38
1.1 计算思维概述..... 2	3.4 设计形态..... 39
1.2 计算思维的结构..... 5	3.5 3 个学科形态的内在联系..... 40
1.3 计算机方法论概述..... 8	3.6 计算机语言的发展及其 3 个学科 形态的内在联系..... 42
习题 1..... 10	3.6.1 自然语言与形式语言..... 42
第 2 章 计算学科的基本问题 12	3.6.2 图灵机与冯·诺依曼计算机..... 44
2.1 汉诺塔问题..... 12	3.6.3 机器指令与汇编语言..... 50
2.2 算法复杂性中的难解性问题..... 14	3.6.4 虚拟机..... 52
2.3 证比求易算法..... 14	3.6.5 高级语言..... 54
2.4 P=NP?..... 15	3.6.6 应用语言..... 55
2.5 RSA 公开密钥密码系统..... 16	3.6.7 自然语言..... 56
2.6 停机问题..... 19	习题 3..... 58
2.7 旅行商问题与组合爆炸问题..... 21	第 4 章 计算学科的核心概念 61
2.8 找零问题、背包问题与贪婪算法..... 23	4.1 算法..... 61
2.9 GOTO 语句与程序的结构..... 24	4.1.1 算法的历史简介..... 61
2.10 哲学家共餐问题与计算机的 资源管理..... 26	4.1.2 算法的定义和特征..... 62
2.11 两军问题与计算机网络..... 27	4.1.3 算法实例..... 63
2.11.1 两军问题..... 27	4.1.4 算法分析..... 66
2.11.2 互联网软件的分层结构..... 28	4.1.5 常用的两类算法：搜索与排序..... 71
2.12 人工智能中的若干哲学问题..... 29	4.2 数据结构..... 77
2.12.1 图灵测试..... 29	4.2.1 数据结构的基本概念..... 77
2.12.2 西尔勒的“中文屋子”..... 31	4.2.2 基于 Vcomputer 机器的 数据结构概述..... 78
2.12.3 计算机中的博弈问题..... 31	4.2.3 基于 Vcomputer 机器的 数据的逻辑结构..... 79
习题 2..... 33	4.2.4 基于 Vcomputer 机器的 数据的存储结构..... 83
第 3 章 计算学科的 3 个学科形态 34	4.3 数据的存储和表示..... 86
3.1 一个关于“学生选课”的例子..... 34	4.3.1 补码在计算机中的表示..... 87
3.1.1 对“学生选课”例子的 感性认识..... 34	4.3.2 图像..... 89
3.1.2 对“学生选课”例子的 理性认识..... 36	4.4 数据的编码、校验..... 90
3.1.3 “学生选课”系统的工程设计..... 37	4.4.1 字符、字符串和汉字..... 91
3.2 抽象形态..... 38	4.4.2 奇偶校验算法..... 92

4.5	CC1991 报告提取的核心概念	93	第 6 章 计算学科中的系统	
	习题 4	95	科学方法	128
第 5 章 计算学科中的数学方法		99	6.1 系统科学与系统科学方法	128
5.1	数学的基本特征	99	6.1.1 系统科学的基本概念	128
5.2	数学方法的作用	100	6.1.2 系统科学遵循的一般原则	130
5.3	计算学科中常用的数学		6.1.3 常用的几种系统科学方法	131
	概念和术语	100	6.1.4 实例	131
5.3.1	集合	100	6.2 软件开发中使用系统科学方法的原因	132
5.3.2	函数和关系	102	6.2.1 人固有能力的局限性以及	
5.3.3	代数系统	103	使用工具后产生的力量	132
5.3.4	构造计算学科的逻辑电路的		6.2.2 复杂性	133
	基础——布尔代数	104	6.2.3 软件系统的复杂性	134
5.3.5	一位加法器的设计	105	6.2.4 软件开发的系统化方法	
5.3.6	定义、定理和证明	108	需要遵循的基本原则	135
5.3.7	必要条件和充分条件	109	6.3 使用系统方法的思考	137
5.4	证明方法	109	习题 6	138
5.4.1	直接证明法和间接证明法	109	第 7 章 跨学科的计算问题案例	139
5.4.2	反证法	110	7.1 社会与职业中 3 个典型的计算问题	139
5.4.3	归纳法	111	7.1.1 职业化	139
5.4.4	构造性证明	112	7.1.2 道德的选择	140
5.5	计算学科构造性的基础		7.1.3 检举	140
	——递归和迭代	112	7.2 割圆术的计算问题	141
5.5.1	递归	113	7.2.1 割圆术的形式化描述	142
5.5.2	迭代	115	7.2.2 割圆术的步骤	142
5.6	随机数和蒙特卡洛方法	116	7.2.3 实例	143
5.6.1	随机数	116	7.2.4 使用 Raptor 模拟割圆术	144
5.6.2	蒙特卡洛方法	118	7.3 森林火灾的计算问题	145
5.7	公理化方法	119	7.3.1 森林火灾的形式化描述	146
5.7.1	理论体系	119	7.3.2 模拟森林火灾的步骤	146
5.7.2	公理化方法的基本概念	120	7.3.3 实例	147
5.7.3	实例	121	7.4 多普勒效应的计算问题	149
5.8	计算学科的形式化方法	122	7.4.1 多普勒效应的形式化描述	149
5.8.1	形式系统的组成、基本		7.4.2 模拟多普勒效应的步骤	150
	特点和局限性	122	7.4.3 实例	150
5.8.2	形式化方法概述	123	7.5 小世界网络模型的计算问题	151
5.8.3	形式规格	124	7.5.1 小世界网络重连的形式化描述	151
5.8.4	形式验证	125	7.5.2 模拟小世界网络重连的步骤	152
习题 5		126	7.5.3 实例	152

7.6 科赫曲线.....	154	7.8.1 烟花模拟的形式化描述.....	162
7.6.1 科赫曲线的形式化描述.....	154	7.8.2 烟花模拟问题的粒子系统模型 中粒子运动的相关方程.....	163
7.6.2 模拟生成科赫曲线的步骤.....	155	7.8.3 烟花模拟的步骤.....	164
7.6.3 实例.....	155	7.8.4 使用 Raptor 对烟花模型 进行仿真.....	164
7.6.4 使用 Raptor 模拟科赫曲线.....	155	7.9 俄罗斯方块游戏.....	167
7.7 向日葵种子生长模拟.....	157	7.9.1 俄罗斯方块游戏的形式化描述.....	167
7.7.1 预备知识.....	158	7.9.2 构建一个俄罗斯方块模型 的算法步骤.....	168
7.7.2 向日葵种子生长模拟的 形式化描述.....	158	7.9.3 使用 Raptor 模拟俄罗斯 方块游戏.....	168
7.7.3 模拟向日葵种子生长的步骤.....	159	习题 7.....	171
7.7.4 实例.....	159	参考文献	173
7.7.5 使用 Raptor 模拟向日葵 种子生长.....	159		
7.8 烟花模拟.....	161		

第 1 章

绪 论

伟大的计算原理是美国 ACM 前主席 Denning 教授，2003 年在 *Communications of the ACM* 上发表的《伟大的计算原理》(*Great Principles of Computing*) 一文中提出的一个旨在弘扬计算机科学的概念框架。

Denning 认为，计算 (Computing) 是一门关于信息处理的科学，现在大量的事实表明，它是一门人工科学，又是一门自然科学。如果我们将不同学科领域存在的问题当作一个计算问题，从计算的角度揭开这些问题的神秘面纱，就有可能推动这些领域的发展，比如生命科学、化学、金融学，甚至法律。而计算原理正是推动这些发展的关键。以前，我们对计算的描述，往往侧重其核心的技术，比如编程、计算机制图、网络、高性能计算等。而如果按“伟大的计算原理”描述计算，其好处如下。

- (1) 提供理解物理、社会或者其他现象的新方式。
- (2) 指出解决问题的新途径。
- (3) 强调创造知识，而不是使用信息。
- (4) 提高创造和创新能力。
- (5) 为计算机科学课程的教学提供新的方法，激发同学们的兴趣和爱好。

Denning 分析了计算技术，以确定它们所依据的原理，在《伟大的计算原理》一文中将计算的原理划分为五个类别：计算 (Computation)、通信 (Communication)、协作 (Coordination)、自动化 (Automation)、记忆 (Recollection)；2009 年 6 月 Denning 又在 *Communications of the ACM* 上发表了论文《超越计算思维》(*Beyond Computational Thinking*)，增加了评估 (Evaluation) 和设计 (Design) 两个类别，总共有 7 个类别。

计算原理的类别就像是一个计算知识领域的窗口。每个窗口都有各自的视角，从不同窗口看，会发现一些相同的素材。比如，可以从协作的角度来了解网络协议，也可以从通信的角度了解网络协议，还可以从记忆的角度来了解网络协议。Denning 相信，这 7 个类别现在是完整的，并具有持久的影响力。

我国教育部高等学校大学计算机课程教学指导委员会在综合考虑周以真教授和 Denning 教授研究成果的基础上，在《大学计算机基础课程教学基本要求》(高等教育出版社，2016 年 1 月出版)中给出了计算思维表述体系，如表 1.1 所示。表中增加了周以真教授非常强调的重要学科原理，即“抽象原理”，给出了相应的 42 个核心概念，对掌握的重点也做了相应的说明。

表 1.1 计算思维表述体系

分类	关注点	相关核心概念	掌握重点
计算	可计算性和计算复杂性	计算模型、可计算性、计算复杂性	了解计算发展的历史；了解图灵机、可计算性、计算复杂性等基本概念
抽象	关注对象的本质特征	抽象、抽象层次、概念模型、实现模型	理解抽象及其过程；了解概念模型与形式模型；掌握利用模型对问题进行分析 and 建模的方法；了解抽象层次及虚拟机概念
自动化	信息处理的算法设计	算法、程序；迭代、递归；启发式策略、随机策略；智能	理解算法、程序的概念；掌握迭代、递归等基本方法；了解典型问题算法的求解策略
设计	可靠和可信系统的构建	分解、复合、折中、可靠性、安全性、重用性	了解分解、复合、试错、折中等设计系统的基本方法；了解信息封装、接口、原型系统等概念；了解实现重用性、安全性、可靠性的思想
评估	复杂系统性能的评价	评价指标与基准、瓶颈、冗余、容错、性能仿真	了解度量系统性的指标和常见方法；理解瓶颈、冗余、容错的概念；了解可视化建模与仿真
通信	不同过程和对象间的可靠信息传递	信息及其表示、信息量(熵)、编码与解码、信息压缩、信息加密，校验与纠错、协议	理解信息编码思想；理解信息在计算机内的表示与存储方式；掌握基本编码方法；了解通信可靠性保障的基本思想
协作	多个自主计算实体间的有效配合和时序控制	同步、并发、并行、事件、服务	理解并发、并行、同步、死锁、事件服务的概念；了解常见的协同策略与机制
记忆	信息的表示、存储和检索	数据类型、数据结构、数据组织、检索与索引、局部性与缓存	理解常用数据类型和数据结构的概念；了解数据类型、数据结构与算法和程序的相互关系；掌握选择数据类型和数据结构的方法；了解提高数据管理、访问效率的常用方法

1.1 计算思维概述

关于计算思维，周以真教授发表了 2 篇重要论文，分别为 2006 年发表在 *Communications of the ACM* 上的《计算思维》(*Computational Thinking*) 和 2008 年发表在英国皇家学会《哲学汇刊》(*Philosophical Transactions of the Royal Society*) 上的《计算思维和关于计算的思维》(*Computational Thinking and Thinking about Computing*)。在第 1 篇论文中，周以真给出了计算思维的一个总的定义，并对计算思维具体是什么、其特征是什么进行了描述。第 2 篇论文探讨了计算思维的本质。

计算思维的提出，对美国教育界和科学界均产生了重要影响，并促成了美国国家科学基金(NSF) 两个重大计划 CPATH 和 CDI 的产生。

2007 年，美国 NSF 启动了旨在振兴美国计算教育的国家计划——CPATH (CISE Pathways to Revitalized Undergraduate Computing Education)，该计划旨在通过“计算思维”从根本上改变美国大学计算教育的现状。

2008 年，美国 NSF 又启动了一个涉及所有学科的以计算思维为核心的国家重大科学研究计划 CDI (Cyber-Enable Discovery and Innovation)，计划将计算思维拓展到美国的各个研究领域。美国 NSF 希望通过 CDI 等研究计划，使人们在科学与工程领域以及社会经济技术等领域的思维

范式发生根本性的改变。基金会确信,这种思维范式的改变将会为美国产生更多新的财富,并最终提高美国人民的生活质量。

2011年,NSF又启动了CE21(The Computing Education for the 21st Century)计划,该计划建立在CPATH成功的基础上,其目的是提高K-14(中小学和大学一、二年级)老师与学生的计算思维能力。

2015年12月10日,经美国参众两院投票通过,美国总统在白宫签署了名为“让每个学生取得成功的法案(Every Student Succeeds Act, ESSA)”,将以计算思维培养为核心的计算机科学提高到与数学、英语等同的重要地位,并投入巨资在美国国内广泛推行。

计算思维的提出,同样引起了中国计算机界的重视。2010年7月19日至20日,C9高校联盟(包括北京大学、清华大学、浙江大学、复旦大学、上海交通大学、南京大学、中国科技大学、哈尔滨工业大学、西安交通大学)在西安交通大学举办了首届“九校联盟(C9)计算机基础课程研讨会”。陈国良院士在会议上做了“计算思维能力培养研究”的报告。

会议研讨了国内外计算机基础教学的现状和发展趋势,并就如何增强大学生计算思维能力的培养,进行了充分的交流和认真的讨论,2010年9月在《中国大学教学》杂志上发表了影响深远的《九校联盟(C9)计算机基础教学发展战略联合声明》,旗帜鲜明地把“计算思维能力的培养”列为计算机基础教育的核心任务。2012年5月,教育部高教司在合肥工业大学召开了“大学计算机”课程改革研讨会,会上明确了大学计算机课程要像大学数学、大学物理一样,成为大学的基础性课程。这是教育部对非计算机专业大学计算机课程的新要求。

针对国内外计算机教育发展的新动向,2012年春节刚过,教育部高等学校计算机科学与技术专业教学指导委员会、中国计算机学会教育专业委员会、全国高等学校计算机教育研究会召开了一次主任(理事长)扩大会议,就计算思维能力的培养进行了研究。认为“随着信息化的全面深入,无处不在、无事不用的计算使计算思维成为人们认识和解决问题的重要基本能力之一。一个人若不具备计算思维的能力,将在从业竞争中处于劣势;一个国家若不使广大受教育者得到计算思维能力的培养,将在激烈竞争的国际环境中处于落后地位。计算思维,不仅是计算机专业人员应该具备的能力,而且也是所有受教育者应该具备的能力。计算思维,也不简单类比于数学思维、艺术思维等人们可能追求的素质,它蕴含着一整套解决一般(类)问题的方法与技术。因此,作为教育部计算机教育的咨询与指导机构和计算机教育专业社团,我们有责任来推动计算思维观念的普及,促进在教育过程中对学生计算思维能力的培养,为提高我国在未来国际环境中的竞争力做出贡献。”会议发表了“积极研究和推进计算思维能力的培养”报告。

在对计算思维进行了长达5年的跟踪研究和教学实践的基础上,教育部高教司在2012年设立了“以计算思维为切入点的大学计算机课程改革项目”。2013年5月,教育部高等学校大学计算机课程教学指导委员会的新老两届主任和副主任共聚深圳,就进一步推动项目进展,在高校计算机教育中加强计算思维的研究和教育进行了深入的讨论,并在深圳发表旨在大力推进以计算思维为切入点的计算机教学改革的宣言,即“计算思维教学改革宣言”。

宣言开篇写道:一个古老而又年轻的概念,计算思维的概念,正在科技界和教育界萌发、激荡和蔓延。所到之处,彻底更新和改变了现在被广泛认同的一些理论和认识。一种新的关于计算和计算机科学的观点正在以雷霆万钧之势荡涤着旧有的传统,焕发出面向新时代和新技术的崭新面貌。从事计算机科学、思维科学、教育科学、社会科学、人文科学等各方面的专家,围绕着不同的要求和目的被吸引到这一领域里来。这种共同的兴趣正酝酿着新的重大的理论革命和技术飞跃,一种全新的对计算机科学的理解和应用的年代已经展现在我们面前。

现在，人们已经认识到计算思维的重要性了，文化正在改变。中国一些学者甚至进一步地指出，计算思维的培育是教育改革，乃至科技改革的一个重要突破口，或者说，是中国科教战线的“诺曼底”。

为了充分地理解计算思维，下面，我们分别介绍计算思维的定义、计算思维的特征、计算思维的本质、计算思维的结构等内容。

周以真教授在《计算思维》中给出了计算思维一个总的定义，该定义被国际学术界广泛采用。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。为便于理解，文中又给出了计算思维更详细的7种描述和6大特征，如表1.2和表1.3所示。

表 1.2

计算思维的 7 种描述

(1) 计算思维是通过约简、嵌入、转化和仿真等方法，把一个看来困难的问题重新阐释成一个我们知道问题怎样解决的思维方法
(2) 计算思维是一种递归思维，是一种并行处理，是一种把代码译成数据又能把数据译成代码的方法，是一种多维分析推广的类型检查方法
(3) 计算思维是一种采用抽象和分解来控制庞杂的任务或进行巨大复杂系统设计的方法，是基于关注点分离（Separation of Concerns）的方法
(4) 计算思维是一种选择合适的方式去陈述一个问题，或对一个问题的相关方面建模，使其易于处理的思维方法
(5) 计算思维是按照预防、保护及通过冗余、容错、纠错的方式，并从最坏情况进行系统恢复的一种思维方法
(6) 计算思维是利用启发式推理寻求解答，即在不确定情况下的规划、学习和调度的思维方法
(7) 计算思维是利用海量数据来加快计算，在时间和空间之间、在处理能力和存储容量之间进行折中的思维方法

表 1.3

计算思维的 6 大特征

(1) 概念化，不是程序化。计算机科学不是计算机编程。像计算机科学家那样去思维意味着远远不仅限于能为计算机编程，还要求能够在抽象的多个层次上思维
(2) 根本的，不是刻板的技能。根本技能是每一个人为了在现代社会中发挥职能所必须掌握的。刻板技能意味着机械的重复。当计算机科学解决了人工智能的大挑战——使计算机像人类一样思考之后，思维真的可以变成机械。然而，就时间而言，所有已发生的智力，其过程都是确定的。因此，智力无非也是一种计算。这就要求人们将精力集中在“有效”的计算上，最终造福人类
(3) 人的，不是计算机的思维。计算思维是人类求解问题的一条途径，但决非要使人类像计算机那样思考。计算机枯燥且沉闷，人类聪颖且富有想象力，是人类赋予计算机激情。配置了计算设备，我们就能用自己的智慧去解决那些计算时代之前不敢尝试的问题，实现“只有想不到，没有做不到”的境界。计算机赋予人类强大的计算能力，人类应该好好利用这种力量去解决各种需要大量计算的问题
(4) 数学和工程思维的互补与融合。计算机科学在本质上源自数学，因为像所有的科学一样，它的形式化基础建筑于数学之上。计算机科学又从本质上源自工程，因为我们建造的是能够与实际世界互动的系统，基本计算设备的限制迫使计算机科学家必须计算性地思考，而不能只是数学性地思考。构建虚拟世界的自由使我们能够超越物理世界的各种系统。数学和工程思维的互补与融合很好地体现在抽象、理论和设计3个学科形态（或过程）上
(5) 是思想，不是人造品。不只是我们生产的软硬件等人造物将以物理形式到处呈现并时时刻刻触及我们的生活，更重要的是计算的概念，这种概念被人们用于问题求解、日常生活的管理，以及与他人进行交流和互动
(6) 面向所有的人、所有地方。当计算思维真正融入人类活动的整体以致不再表现为一种显式之哲学的时候，它将成为现实。就教学而言，计算思维作为一个问题解决的有效工具，应当在所有地方、所有学校的课堂教学中都得到应用

计算思维吸取了问题解决所采用的一般数学思维方法，现实世界中巨大复杂系统的设计与评估的一般工程思维方法，以及复杂性、智能、心理、人类行为的理解等的一般科学思维方法。

计算思维建立在计算过程的能力和限制之上，由机器或人执行。计算方法和模型使我们敢于去处理那些原本无法由个人独立完成的问题求解和系统设计。

计算思维最根本的内容，即其本质 (Essence) 是抽象 (Abstraction) 和自动化 (Automation)。计算思维中的抽象完全超越物理的时空观，并完全用符号来表示，其中，数字抽象只是一类特例。

与数学和物理科学相比，计算思维中的抽象显得更为丰富，也更为复杂。数学抽象的重大特点是抛开现实事物的物理、化学和生物学等特性，仅保留其量的关系和空间的形式，而计算思维中的抽象却不仅仅如此。

计算思维中的抽象最终是要能够机械地一步一步自动执行。为了确保机械的自动化，就需要在抽象的过程中进行精确和严格的符号标记和建模，同时也要求计算机系统或软件系统生产厂家能够向公众提供各种不同抽象层次之间的翻译工具。

抽象层次是计算思维中的一个重要概念，它使我们可以根据不同的抽象层次，进而有选择地忽视某些细节，最终控制系统的复杂性；在分析问题的时候，计算思维要求我们将注意力集中在感兴趣的抽象层次，或其上下层；另外，对各抽象层次之间的关系人们也应该有一个初步的了解。

计算思维提出后，不少国家，如美国、英国，以及中国的学术组织举办过一系列的学术研讨。其中，2010年，在美国 NSF 的资助下，美国国家研究委员会 (NRC) 召开了一系列会议，给出了《关于计算思维的本质和适用范围的工作报告》(Report of a workshop on the scope and nature of computational thinking)，报告给出了“计算思维”的五个公开问题 (Open Questions)：计算思维的结构问题、计算思维者的识别问题、计算思维与技术之间的关系问题、计算思维的教学方法问题与计算思维相关的计算社团的角色问题。其中，第一个问题，也即“计算思维的结构问题”是最重要的核心问题，下面做简单介绍。

在 NRC 的研讨会上，关于计算思维的本质和所应用的领域范围，与会者 (包括来自美国科学院、美国工程院和美国医学院的国家顾问) 提出了许多不同的观点。

虽然与会人员没有明确表示不同意与自己不同的计算思维观点，但是几乎每一个人都在坚持他们自己的观点，强调计算思维在某个特别方面的作用或者是对某个个体的重要特性。因此，为了达成一致，与会人员提出了计算思维的结构问题，该问题涉及计算思维的核心是什么，计算思维的组成元素是什么，不同元素之间的逻辑关系是什么等内容。

与会人员认为，一个符合逻辑的计算思维结构有助于计算思维的应用和发展。这个问题将引发后续关于计算思维本质的结构、伟大计算原理的结构框架以及计算机方法论的结构框架等 3 种具有代表性的计算思维结构的讨论，这种讨论会进一步加深人们对计算思维的理解。

1.2 计算思维的结构

根据周以真的定义，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。

这样，问题来了，这里指的计算机科学的基础概念是什么，其中最为核心的基础概念又是什么？如果回答是“算法”，则有可能将我们又带回传统计算机科学认识的老路，也即计算机科学=程序设计。

美国 ACM 前主席 Denning 在《超越计算思维》一文中就是根据这个问题，对周以真教授提出的计算思维给了如下两个否定：

- (1) 计算思维不是计算机科学独有的特征；
- (2) 计算思维不能充分地代表计算机科学的特征。

Denning 认为，他提出的“伟大的计算原理”能够做到这两点。

近年来，我国教育部高等学校计算机类教学指导委员会力推学生系统能力的培养，也从一个侧面对计算思维的作用隐含地提出了不同意见。的确如此，尽管算法，或者更广泛地说程序设计，对于计算机科学而言非常重要，但只是其中实践方面的一个部分。

Denning 认为，系统、模型、创新这些内容也是计算机科学实践方面的重要内容，并与程序设计具有同等的地位，过分地强调程序设计不利于计算机科学的发展。Denning 担心，周以真提出的计算思维如果讲不清楚的话，就有可能将我们带回我们曾一直想逃避的老路上去，也即计算机科学=程序设计。

美国国家科学基金会注意到了关于“计算思维”认知的不同意见，2008 年春，委托美国国家研究委员会对“计算思维的本质和适用范围”进行研讨，研讨会邀请了包括美国科学院、美国工程院和美国医学院的代表参会，参会人员计算思维在各自领域的重要作用进行了肯定，2010 年 4 月总结整理后的报告《关于计算思维的本质和适用范围的工作报告》由美国国家科学院出版社出版，报告认为计算思维认知的关键在于确定什么是计算思维的基本元素，元素之间的关系又是如何，从而引出了计算思维的结构问题。

一个领域的结构问题向来就是一个迷人的问题，如果这个结构能用公理系统来描述，就是最理想的了，现在我们知道，根据哥德尔定律，在一个足够复杂的系统中，建立一个绝对完备的系统是不现实的，但这不等于我们不追求这种系统，当然可以对完备性的要求适当地放宽，即使在完备性方面有点“不足”，也是令人神往的。

想必周以真教授也深知其中的道理。2008 年 7 月，周以真教授又在英国著名期刊《英国皇家学会哲学学报》上发表论文《计算思维与关于计算的思维》，对计算思维的本质进行了讨论，给出了抽象（Abstraction）和自动化（Automation）的两个概念，明确了计算思维的本质是抽象和自动化，也就是计算思维中最重要的两个元素，在《关于计算思维的本质和适用范围的工作报告》推出后，周以真教授在其宣讲用的 PPT 文档中，用抽象（含抽象层次）和自动化构建了计算思维的结构图。

大家注意，Denning 的两个“NO”不是说周以真提出的计算思维不好，而是说，Denning 自己提出的“伟大的计算原理”更能充分地展示计算机科学的伟大。其实，周以真是从思维这个层面给出计算思维本质的结构，Denning 是从原理出发给出计算思维的结构框架，显然，还可以从思想方法这个层面给出计算思维的结构框架，这就是本书推荐的一种有效的计算思维教学框架，也即“计算机方法论”的结构框架。本书认为，周以真给出的计算思维本质结构框架、Denning 给出的“伟大的计算原理”结构框架，以及本书推荐的“计算机方法论”的结构框架是三种具有代表性的计算思维结构框架。下面分别简单介绍。

1. 计算思维本质的结构框架

2006 年 3 月，周以真发表《计算思维》一文，给出计算思维的定义，并对计算思维的特征进行了描述。2008 年 7 月，周以真发表论文《计算思维与关于计算的思维》，指出计算思维的本质是抽象和自动化。2010 年后，她给出了计算思维本质的结构框架图（见图 1.1）。

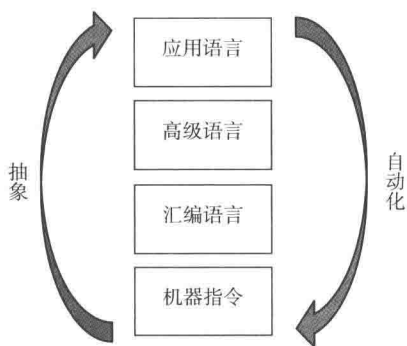
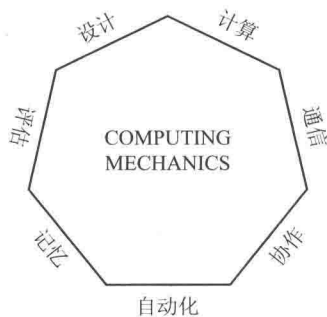


图 1.1 计算思维本质的结构框架图

2. “伟大的计算原理”结构框架

2003年11月，Denning在《ACM通讯》杂志上发表文章《伟大的计算原理》，给出了最初的5个伟大原理：计算、通信、协作、自动化、记忆（见图1.2）。2009年6月，他又在《ACM通讯》杂志发表文章《超越计算思维》，增加了评估和设计两个伟大原理，将“抽象”原理放在设计原理之中，Denning认为，“伟大的计算原理”包含了周以真提出的“计算思维”的内容。2015年1月，Denning根据“伟大的计算原理”结构框架（见图1.2）撰写了名为“伟大的计算原理”的教材，并由麻省理工学院出版发行。



3. 计算机方法论的结构框架

2001年7月，在上海召开的CC2001工作研讨会上，本书作者介绍了“计算机科学与技术方法论”，2002年9月出版教材《计算机科学与技术方法论》，并给出了计算机方法论的公理化描述。根据计算机方法论的结构框架，2007年9月撰写出版了教材《计算机科学导论：思想与方法》，2009年，由计算机方法论结构框架构建的“计算机科学导论”课程被评为国家级精品，2011年该教材入选国家“十二五”规划教材，2015年7月该教材第3版出版发行。本书也建立在计算机方法论的结构框架之上，结构基本一致，只是更强调计算思维习惯的养成，以及跨学科的交融（见图1.3）。

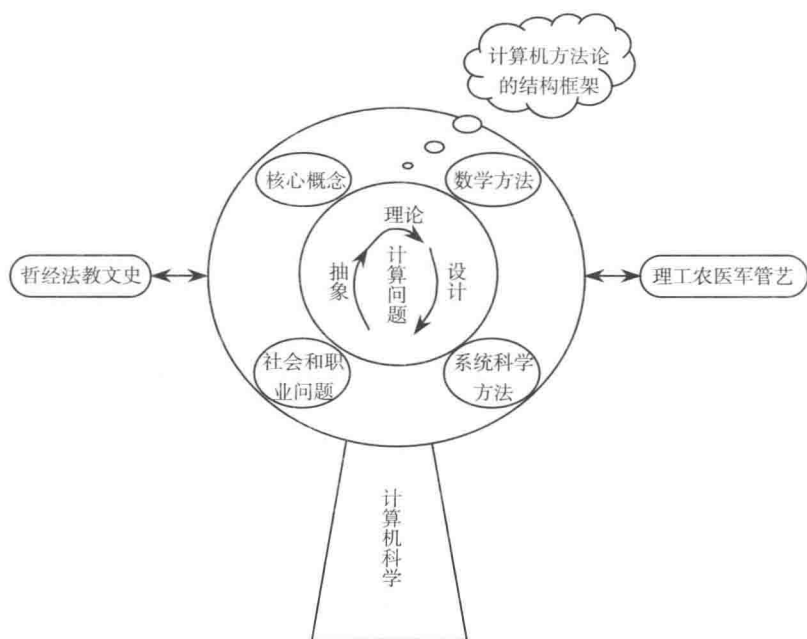


图 1.3 计算机方法论的结构框架图

1.3 计算机方法论概述

计算机方法论 (Methodology of Computer Science, MCS) 是一个具体的科学技术方法论, 它将一般科学技术方法论中最基本的 C (Cognition, 认知) 和 P (Practice, 实践) 两个元组改为更具体的 A (Abstraction, 抽象)、T (Theory, 理论)、D (Design, 设计), 因此, 它是一个五元组, 即:

$$MCS = \langle Q, A, T, D, F \rangle$$

其中:

- (1) Q 是一个包含子集 A 、 T 、 D 的集合。
- (2) A 是计算学科中所有属于“抽象”概念的集合。
- (3) T 是计算学科中所有属于“理论”概念的集合。
- (4) D 是计算学科中所有属于“设计”概念的集合。
- (5) F 表示由 Q 到它自身的一个关系。

认知与实践以及其相互关系是一般技术方法论研究的核心内容。计算机方法论研究的核心内容, 其实也就是一般技术方法论研究的核心内容, 只不过具体化为计算学科的抽象 (感性认识)、理论 (理性认识) 和设计 (实践) 3 个过程及其内在联系所要研究的内容。

由于“科学研究从问题开始”与“认识以实践为基础”是从不同角度得出的不同命题, 而其本质是一致的。因此, 我们可以将科学问题从抽象、理论和设计 3 个过程中提取出来, 构成与 3 个过程具有相同地位的重要内容。

计算机方法论遵循一般科学技术方法论的普遍原理, 但是, 它又不同于一般科学技术方法论。

一般科学技术方法论在学科认识中具有一般性的指导意义; 而计算机方法论直接面对和服务

于计算学科的认识过程，它是我们认知计算学科的工具。就某种意义而言，计算机方法论的建立正是计算学科成熟的标志之一。

计算机方法论的研究不仅具有理论意义，也具有现实意义，它能促进计算学科的发展，有助于计算学科的建设与人才培养。下面，从五个方面来概括它的意义。

(1) 有助于我们正确理解计算学科中所蕴含的科学思维方法。

抽象、理论和设计是计算机方法论中最基本的3个概念。3个学科形态的划分，反映了人们的认识从感性认识（抽象）到理性认识（理论），再回到实践（设计）中来的科学思维方法，并有助于我们从方法论的高度来认知计算学科。

(2) 有助于总结和提升计算学科所积累的各种方法与经验。

计算学科自20世纪40年代诞生以来，科学家们在不到百年的时间里取得了大量的里程碑式的科学成果，使该学科得到了迅猛的发展。这些成果所包含的研究方法更是一份宝贵的财富。

然而就大多数研究者而言，研究成果是他们自觉追求的目标，而方法则是为取得成果而采取的手段。一旦研究工作获得成功，大多数研究者对于自己的科研成果的价值甚为清楚，而对获得成果所使用的方法却重视不够，一般很少有人自觉地将自己的研究方法加以系统的总结和提升，使它们成为具有普遍意义的思想工具。

计算机方法论的任务就是要系统地总结和提升这些方法，使它们成为具有普遍意义的思想工具，从而被计算领域的工作者所掌握，以便使我们更好地从事该领域的工作。

(3) 有助于促进计算学科的发展。

从计算学科的发展来看，计算学科的每一个重要进展几乎都与研究方法的改进密切地联系着，计算学科每个领域的发展总是与那一时期的研究方法的发展水平相适应。

例如，在20世纪50年代，程序设计受当时技术的限制，如果说程序设计采用了一定的方法的话，那就是技巧；60年代末期由于软件危机以及硬件的发展，出现了规范化的程序设计；70年代末期，形成了以结构化方法为主的系统开发方法；80年代人们发现，由于行业间语言的障碍，要弄清用户的需求有困难，于是提出了原型化的思想方法；90年代开始，随着人们认识的进一步深化，提出了目前占主导地位的面向对象的思想方法。

新的思想方法是不会凭空产生的，它是对已有方法进行改进的结果，从以上研究方法的发展来看，它符合实践、认识、再实践、再认识的一般规律。也就是说，它需要我们对现有方法进行深入研究，在肯定它们具有认识功能的同时，又注意到它们的局限性，要根据研究对象的特点与需要，对研究方法进行改进，实现方法上的突破，从而促进学科的发展。

(4) 有助于确立正确的思想原则，把握正确的研究方向。

恩格斯在其著作《自然辩证法》中说过：不管自然科学家采取什么样的态度，他们还是得受哲学的支配。问题只在于他们是愿意受某种坏的时髦的哲学来支配他们，还是愿意受一种建立在通晓历史及其成就的基础上的理论思维的支配。一个研究者如果不具备正确的理论思维形式，不以正确的思想方法作指导，在具体的研究实践中可能会常常碰壁，甚至对理应手的研究成果也可能视而不见、置若罔闻。

计算机方法论是在一般科学技术方法论的指导下建立的，它吸收了其他学科已有的方法论成果，遵守共同的方法论原则。同时，它又是解决计算学科特殊矛盾所需的、有着计算学科特点的、相对独立的方法论，它直接面对和服务于计算学科的认识过程，使人们对计算学科的认识逻辑化、程序化、理性化和具体化，它有助于我们在计算学科的研究中确立正确的思想原则，把握正确的研究方向。

(5) 有助于计算学科的建设 and 人才培养。

如何进行计算学科的建设，是一个长期以来争论的问题。计算机方法论从计算学科的基本问题，学科的抽象、理论和设计 3 个过程，学科的核心概念，数学方法，系统科学方法，形式化技术，以及社会和职业的问题等方面出发，深刻地揭示了计算学科的本质，有助于我们对计算学科的认识，从而有助于计算学科的建设。

计算专业的学生如能在大学的学习中系统地接受学科方法论的指导，以了解、懂得研究工作的一般程序、操作技术与正确的思维方法，无疑有助于自己的成长。

习 题 1

1.1 美国 ACM 前主席 Denning 在《超越计算思维》一文中对周以真教授提出的计算思维给了哪两个否定？ ()

- A. 计算思维不是计算机科学独有的特征
- B. 计算思维没有解决“计算机科学=程序设计”这个认知上的误区
- C. 计算思维不能充分地代表计算机科学的特征
- D. 计算思维没有体现计算机科学特有的设计和评估两个特征

1.2 美国 ACM 前主席 Denning 给出的两个否定，不是说周以真提出的计算思维不好，而是说，Denning 自己提出的“伟大的计算原理”更能充分地展示计算机科学的伟大。其实，周以真是从____这个层面给出计算思维本质的结构，Denning 是从____出发给出计算思维的结构框架，显然，还可以从____这个层面给出计算思维的结构框架。 ()

- A. 思想方法、原理、思维
- B. 原理、思想方法、思维
- C. 思维、原理、思想方法
- D. 原理、思维、思想方法

1.3 2010 年，在美国 NSF 的资助下，美国国家研究委员会 (NRC) 召开了一系列会议，给出了《关于计算思维的本质和适用范围的工作报告》(Report of a workshop on the scope and nature of computational thinking)，报告给出了“计算思维”的五个公开问题 (Open Questions)。其中最重要的核心问题是____。 ()

- A. 计算思维相关的计算社团的角色问题
- B. 计算思维的结构问题
- C. 计算思维者的识别问题
- D. 计算思维与技术之间的关系问题

1.4 计算思维的结构问题涉及以下哪两个方面。 ()

- A. 计算思维与技术的关系
- B. 计算思维的组成元素
- C. 计算思维不同元素之间的逻辑关系
- D. 计算思维者的识别问题

1.5 下面不属于计算思维特征的是____。 ()

- A. 是思想，不是人造品