

计算机科学技术研究中的创新思维方法

赵沁平*

北京航空航天大学虚拟现实技术与系统全国重点实验室, 北京 100191

* 通信作者. E-mail: zhaoqp@buaa.edu.cn

收稿日期: 2025-02-25; 修回日期: 2025-04-09; 接受日期: 2025-06-12; 网络出版日期: 2025-08-08

摘要 创新是人类独有的顶级智能和实践活动, 是智能的最高体现. 创新需要反复思索、尝试, 不断解决问题才能实现. 思维是人类智能的核心, 是实现创新的基础, 科技创新依赖持续深入的思维活动. 本文从意图创新的实用目标出发, 归纳了作者多年来在计算机科学技术领域, 指导研究生开展研究过程中不断尝试, 并取得成效的一些创新思维方法和思索策略, 供研究生们参考.

关键词 计算机科学, 科学研究, 创新思维

1 引言

创新是人类独有的顶级智能和实践活动, 是智能的最高体现. 科技创新需要反复思索, 反复尝试, 产生灵感、顿悟, 不断解决问题才能实现. 这也是当前人工智能取得巨大进展, 深刻改变着人类的生产和生活方式, 但尚不能自行实现科技创新, 不能自行突破人类认知边界的原因.

思维是人类智能的核心, 是实现创新的基础, 科技创新依赖持续深入的思维活动. 一般认为, 关于思维的探究发端于古希腊哲学家们的思辨, 科学意义上的现代研究则始于 19 世纪末, 采用自然科学实验方法研究心理现象. 此后人们从脑科学、心理学、哲学、逻辑学等不同方向对思维的过程、机理和方法进行广泛研究, 并出现了针对创新思维的探索. 我国钱学森曾在 20 世纪 80 年代中期深入思考思维学问题, 并倡导建立思维科学学科.

近年来, 关于创新思维的研究不断增多, 具有代表性地, 如文献 [1] 解析了如何通过“物理学的第一性原理”重构问题, 打破思维惯性; 文献 [2] 论述了如何通过批判性思维质疑假设和逻辑漏洞, 从而发现创新机会; 文献 [3] 提出一种“颠覆式创新”理论, 以解释为何大企业常被小型创新公司颠覆; 文献 [4] 探讨了如何从自然界寻找颠覆性技术灵感, 如基因编辑 CRISPR 的发现; 文献 [5] 梳理出适合工程领域的 40 项发明原则; 文献 [6] 系统阐述了设计思维的五大步骤; 文献 [7] 通过航天案例, 揭示了如何在资源约束下实现突破性创新.

创新思维是一个充满待解决问题的蓝海研究领域. 我仅从意图创新的实用目标出发, 将多年来在计算机科学技术领域, 自己以及指导研究生开展研究过程中不断尝试, 并取得成效的一些创新思维方法和思索策略总结成文, 以期抛砖引玉, 丰富、提高其内容, 供研究生们在探索创新过程中参考.

引用格式: 赵沁平. 计算机科学技术研究中的创新思维方法. 中国科学: 信息科学, 2025, 55: 2072–2077, doi: 10.1360/SSI-2025-0086
Zhao Q P. Innovative thinking methods in computer science and technology research. Sci Sin Inform, 2025, 55: 2072–2077, doi: 10.1360/SSI-2025-0086

2 科技创新的对象、类型与条件

科技创新的对象有自然界事物和人界事物两大类, 计算/计算机系统是人界的独特事物; 从认知角度, 科技创新对象有已知理论/论断和未知未解对象两类. 科技创新的成果有三大类: 发现自然规律、技术发明, 以及对已有科学理论和技术的完善, 前两者是原始创新.

进行科技创新, 首先必须了解所研究的对象. 通过大量的观测、文献阅读、数据采集、分析实验, 深刻了解所研究对象的特性、存在条件、与其他事物的关系, 以及已有研究成果等. 科技创新需要经历持续思维、反复尝试、不断破解问题的曲折过程, 因此, 创新者必须具有强烈的好奇心和追求目标的激情, 具有坚持不懈、不惧挫折的毅力、扎实的基础理论和较宽的知识面, 特别是丰富的想象力. 正如爱因斯坦所说: 我没有特别的才能, 只有强烈的好奇心; 不是我聪明, 只是我喜欢寻根究底地追求问题; 要善于思考、思考、再思考, 我就是靠这个方法成为科学家的; 想象力比知识更重要, 想象力是科学研究的实在因素; 坚持不懈就是天才.

3 科技创新的起步

科技创新首先面临的是选定研究对象. 如果选择自然界或人界事物 (计算机应用创新必然涉及), 就需深入了解问题、确定具体目标, 然后大量观测、获取数据, 进行数据挖掘、计算、模拟仿真, 开始创新研究. 对计算/计算机系统的研究者来说, 有三大永恒的目标, 即如何使得计算机系统更高效、更聪明、更适人. 计算的对象是表征自然界和人界事物, 或由两者产生的各类数据, 内容丰富多彩, 可能的方法无限, 是产生创新的源泉.

如果针对已有理论/论断开展进一步研究, 必然要持理性批判思维, 质疑其正确性, 或发现其局限性. 若怀疑正确性, 就寻找有说服力的反例; 若不满其局限性, 可对其进行改进, 或提出新的理论/论断. 特别要指出的是, 怀疑已有理论/论断, 找到其与客观实际不符之处, 从而推翻该理论/论断, 也是一种创新工作.

例1 找到马希文在可计算理论研究中提出的一条公理的反例, 从而推翻了他的论断.

马希文^[8] 针对丘奇-图灵论题的公理化问题, 在 M.Blum 4 条公理的基础上, 提出了一条新的公理:

一组可计算函数 $\{f_i\}$ 如果有最小上界 g , 则 g 也是可计算的.

我们选择一个不可计算函数 g , 其定义域 D 是可数无限的. 取该定义域的一个有限部分 D_1 作为新的定义域, 可以得到函数 f_1 , $f_1 < g$. 由于 D_1 是可数有限的, 因此 f_1 是可计算的. 再将 D_1 在 D 上适当扩大为 D_2 , 可得到函数 f_2 , 则有 $f_1 < f_2$, 且 $f_2 < g$. 如此重复可以得到一组可计算函数 $\{f_i\}$, $\{f_i\}$ 的最小上界显然是 g , 而 g 是一个不可计算函数. 因此, 马提出的公理是不成立的.

4 科技创新的思维方法

4.1 概念形成

概念形成、判断、推理是思维的 3 种基本形式, 各自代表了理性认识的一个阶段. 概念的形成是人类认识过程由感性认识上升到理性认识的一次质的飞跃. 对概念进行定义是明确问题、研究问题的基础, 定义概念的方法和水平直接影响后续的创新研究.

采用聚类等方法, 科学地在所研究对象领域形成新的概念, 给出新概念的科学生定义, 并对其进行科学分类, 就是一种创新. 用于分类的特征应当是所属领域的一些本质特性. 对于计算机学科来说, 要尽可能选用数据类型、信息流向、计算模型等计算特征进行分类.

例2 计算机体系结构有许多分类方法,其中之一是以指令流和数据流为特征,将计算机系统分为如下4类:

单指令流单数据流 (single instruction stream single data stream, SISD) —— 冯·诺依曼体系结构;

单指令流多数据流 (single instruction stream multiple data stream, SIMD) —— 向量(阵列)机;

多指令流单数据流 (multiple instruction stream single data stream, MISD) —— 流水线处理;

多指令流多数据流 (multiple instruction stream multiple data stream, MIMD) —— 多处理机系统.

还有一种是以指令的驱动方式(计算模型)为特征,将计算机系统分为控制驱动、数据驱动和需求驱动3类.

如下关于虚拟现实系统中虚拟实体的分类,就不是依计算特征进行的分类:虚拟现实中的实体分为动态实体和静态实体;虚拟战场环境中的实体有人在环实体、CGF(计算机生成兵力)和实况实体3类.

4.2 演绎法 – 窄化方法

演绎是逻辑思维的基本方法之一,证明一个对象属于某一概念,因而断定该对象具有此概念的所有内涵属性,是从整体到个体的逻辑推理,其结论是必然性的,即前提为真,结论一定为真.

在计算机研究领域应用演绎/窄化方法,可对适用范围(外延)较宽,但效率相对较低的算法,增加一些属性条件(内涵),缩小范围,得到效率较高的算法,如下式所示:

$$\begin{aligned} G(x) &| \Gamma(G(x) \text{ 的属性集}), \\ &\downarrow \Gamma \cup \Gamma', \\ G'(x) &| \Gamma \cup \Gamma'. \end{aligned}$$

虚拟现实技术中的分层次优化就是运用窄化方法的典型例子.

4.3 归纳法 – 泛化方法

归纳是逻辑思维的基本方法之一,将若干同类对象的共同属性断定为该类所有对象的整体属性,是从个体到整体的逻辑推理.其结论是或然性的,即前提为真,结论不一定为真.

计算机研究领域中的归纳方法,是将考虑因素较多,适用范围较窄的算法,应用于忽略某些因素属性后,泛化了的领域范围,如下式所示.显然,泛化后的算法结果不一定正确.

$$\begin{aligned} G(x) &| \Gamma \cup \Gamma', \\ &\uparrow \Gamma, \\ G'(x) &| \Gamma. \end{aligned}$$

许多机器学习采用了归纳方法,深度学习过程中的泛化就是典型的例子.

4.4 类比法 – 联想迁移方法

类比是逻辑思维的基本方法之一,将已有的,并且与所研究对象相似的其他对象的属性和相关理论,迁移处理为所研究对象的属性和理论,是从一类个体到另一类个体的逻辑推理.其结论是或然性的.

$$\begin{aligned} \Pi &\sim \Gamma, \\ G(x)|\Pi &\Rightarrow F(x)|\Gamma. \end{aligned}$$

机器学习中的迁移学习就是采用了类比法.

例3 类比 LOD, 提出 LOL, LOI 方法.

为降低图形系统的负载, 对景物依视距不同使用多种细节水平的几何表示, 称为细节层次 LOD 技术, 是运用分层窄化方法的案例.

类比上述思想, 我们在虚拟环境光照处理中, 引入了光照层次 LOL 的概念, 使光源 (如路灯、广场灯等) 在不同空间距离中具有不同的表现方式, 有效提升了虚拟环境处理效率; 为解决分布交互仿真的网络拥塞控制, 则提出了对传输数据划分兴趣层次的 LOI 方法, 大幅提高了分布式虚拟现实应用的实时性.

4.5 结合方法

将针对同一问题的两种不同解决方法有机结合, 从而得到新的方法:

$$E(x), F(x) \Rightarrow G(E(x), F(x)).$$

或者将一种方法引入到另一方法的某一要素中, 得到更有效的新方法:

$$G(x, y), F(x) \Rightarrow G(x, F(z)).$$

例4 我们将人工智能中逻辑式与函数式两种程序设计风格的要素相结合, 给出一种新型程序设计语言 KLND; 将类比信息引入启发式搜索, 得到基于类比推理的启发式搜索方法^[9].

4.6 尝试逆向思维

自然界的规律是简洁的, 对称性、对偶性、矛与盾是普遍存在的现象. 有意识地在研究问题时尝试对称、反对称和逆向思维, 进行猜想或想象, 有时会得到创新灵感.

例如, 由数据驱动想到需求驱动, 由深度优先搜索想到宽度优先搜索等.

4.7 证明数学结构与设计高效算法

一般来说, 对象域具有数学结构才可能有高效算法. 因此, 将所研究对象进行数学抽象, 尝试证明对象域中的数学结构 (序关系、等价类、各种代数结构等), 然后基于对象的数学性质设计高效算法, 是计算类创新的可行思维方法.

例5 发现类比匹配中的等价类, 得到快速匹配算法.

一般匹配等价于子图同态问题, 是 NP 难解的. 我们在设计类比推理中的相似对象搜索算法时, 定义了匹配的名集和映射名集, 同时证明了存在等价类, 从而给出了一种快速匹配算法.

4.8 研究特殊点

将研究对象进行数学抽象, 然后在论域中尝试寻找某些特殊点, 如极值点、临界点、奇点、不动点等, 研究这些点上与众不同的特殊性质和特殊作用, 往往会有新的发现而导致创新.

4.9 发现基本元素

发现构成研究对象的基本元素或影响所研究问题的主要因素, 在计算机科学领域, 则是发现或构造不同软件系统的原语, 是可行的创新思维方法.

例如, 有人抽象出人体运动的一些基本动作, 有人发现了影响嗅觉的若干种基本味道, 进而为构造动作数字人和味觉发生器提供了基础模型. 指令集是计算机系统最基本的执行原语, X86, ARM, RISC 等目前几种重要指令架构都属于基础软件的原语创新.

4.10 模型化

模型是对现实世界中的复杂对象、现象或过程, 聚焦其本质特征, 进行简化所得到的抽象化表示. 模型化有助于人们通过特定的形式理解、预测、分析、解决复杂问题. 模型种类繁多, 常用的有数学模型、图模型、物理模型、计算模型等. 以计算/计算机系统为研究对象, 如果能将所研究对象形式化、符号化, 给出数学或计算模型, 证明其数学性质, 对其运行过程进行计算机仿真, 会导致较深刻的结果和创新.

例6 分析逻辑电路险象的传统方法是判断型布尔差分法^[10], 该方法对一个给定的输入向量, 可以判定其是否会产生险象, 但不能用来求解可能产生险象的全部输入向量.

我们提出一种三值逻辑及三值逻辑方程做为检测逻辑电路险象的数学模型, 在该模型中, 逻辑电路函数 f 的值可以是 0, 1 或 $1/2$. 函数值 $1/2$ 表示电路处于过渡状态, 可能产生险象.

令

$$f(X) = \frac{1}{2}.$$

通过求解上述三值逻辑方程, 可以得到逻辑函数 $f(X)$ 表示的逻辑电路可能产生险象的全部输入向量 (X_1, X_2, \dots, X_n) .

4.11 模拟人的思维方法

将人脑和人类的思维过程计算建模化是计算机科学和人工智能创新的源泉, 是建模化方法的重要目标, 所以单独列为一条.

人工神经网络、深度学习就是对人脑神经元系统和人类学习过程的模拟.

例7 人工智能研究者将人类的“知道”模型化为一组“知道”的公理:

- (1) a 知道的 P 都是真的: $KaP \rightarrow P$;
- (2) a 知道 P , 则 a 就知道 a 知道 P : $KaP \rightarrow KaKaP$;
- (3) a 知道 $P \rightarrow Q$, 则 a 知道 P 时就知道 Q : $Ka(P \rightarrow Q) \rightarrow (KaP \rightarrow KaQ)$.

4.12 工具化与芯片化

针对所研究对象领域的特定需求, 制定需求规范、设计算法和交互界面, 实现可完成一定任务的软件工具; 把某种算法进行改造, 设计、实现为专用或嵌入式芯片. 这是计算机科技人员特有的两类创新形式和创新途径.

例如, 前者有跨平台文件压缩工具 7-Zip、矢量图形编辑器 Inkscape、开源加密工具 VeraCrypt 等; 后者有专为加速深度学习, 优化张量运算的 Google TPU、汽车电子专用芯片恩智浦 NXP S32K 系列、专用传感器处理芯片 ADI ADuCM360 等.

4.13 运用计算思维

计算机科学技术的目标是用计算机系统辅助或代替人处理问题, 因此计算机研究者应有的基本思维就是用计算理论尝试解释、模拟、解决遇到的一切问题, 以及针对各种现象, 追寻问题根源, 用软件定义一切, 提出计算解决方案.

5 结语

本文给出了计算机科学技术领域中一些可供尝试的创新思维方法, 但是要牢记, 创新没有确定的路径, 更没有捷径, 需要多阅读、多实践、多思索. 坚持, 坚持, 再坚持, 某一天会顿悟, 产生灵感, 这个时间也许需要数年.

参考文献

- 1 Brooks M. What's next for quantum computing. MIT Technology Review, 2023
- 2 Bailin S. Critical thinking and science education. Sci Education, 2002, 11: 361–375
- 3 Christensen C M, Raynor M E, McDonald R. What is disruptive innovation? Harvard Business Review, 2015
- 4 The Wyss Institute at Harvard University. Addressing Grand Challenges. Published online, 2024
- 5 Altshuller G. And Suddenly the Inventor Appeared: TRIZ, the Theory of Inventive Problem Solving. Worcester: Technical Innovation Center, 1996
- 6 Auernhammer J, Roth B. The origin and evolution of Stanford University's design thinking: from product design to design thinking in innovation management. J Product Innov Manag, 2021, 38: 623–644
- 7 Szajnfarder Z. Innovation pathways in technology intensive government organizations: insights from NASA. Dissertation for Ph.D. Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2011
- 8 马希文. 什么是可计算性. 计算机研究与发展, 1988, 11: 16–19
- 9 Wang J L, Zhao Q P. A heuristic search method by analogy. Comput Sci, 1998, 25: 33–37 [王军玲、赵沁平. 一种基于类比的启发式搜索方法. 计算机科学, 1998, 25: 33–37]
- 10 He D Q, Zhao Q P. Three-valued logic equations and the detection of function hazard in combinational switching circuits. J Beijing Univ Aeronaut Astronaut, 1995, 21: 38–44 [何大庆、赵沁平. 三值逻辑方程和组合逻辑电路函数险象的检测. 北京航空航天大学学报, 1995, 21: 38–44]

Innovative thinking methods in computer science and technology research

Qinping ZHAO*

State Key Laboratory of Virtual Reality Technology and Systems, Beihang University, Beijing 100191, China

* Corresponding author. E-mail: zhaoqp@buaa.edu.cn

Abstract Innovation is the unique and top-tier intellectual and practical activity of humanity, representing the pinnacle of intelligence. It requires repeated contemplation, experimentation, and continuous problem-solving. Thinking is the core of human intelligence and the foundation for realizing innovation. Technological innovation, in particular, is a process of ongoing and profound thinking. This article, starting from the practical goal of intentional innovation, summarizes some innovative thinking methods and strategies that the author has continuously tried and achieved certain success in guiding graduate students in the field of computer science and technology over the years. These are provided for the reference of graduate students.

Keywords computer science, scientific research, innovative thinking