

# 计算思维的层级加工理论假说及教育启示

郝晓鑫<sup>1</sup>, 李艳<sup>2</sup>, 耿凤基<sup>2</sup>

(1.浙江大学 心理与行为科学系, 浙江 杭州 310058;

2.浙江大学 教育学院, 浙江 杭州 310058)

**[摘要]** 计算思维是21世纪人才必须具备的一项关键问题解决技能。当前关于计算思维的认知本质尚不清楚,给教育实践带来一系列挑战,如缺乏统一的教学框架和明确的评估准则等。为此,研究从已有理论共识和观点出发,基于算法与问题解决的相关理论,深入分析了计算思维问题解决的层级加工特性。在此基础上,借鉴层级加工的相关认知理论,进一步提出计算思维层级加工的理论假说,其核心观点是,计算思维的认知本质在于对不同抽象层级的信息或子问题及其之间的关系进行加工。从认知与神经机制来看,计算思维层级加工需要卷入不同的认知控制模式来调控工作记忆对层级信息进行持续性维持和选择性更新,在神经机制上导致大脑认知控制脑区的持续性和瞬时性高激活。伴随这些信息加工活动对认知资源的消耗,将导致认知负荷,引起大脑默认网络脑区的抑制程度增强。这些理论观点将为计算思维的认知、教学与测评提供启示,并可在后续实证研究中采用交叉学科的研究范式进行检验。

**[关键词]** 计算思维; 问题解决; 层级加工; 认知控制; 认知神经机制

**[中图分类号]** G434 **[文献标志码]** A

**[作者简介]** 郝晓鑫(1994—),女,山西长治人。博士,主要从事计算思维、教育神经科学研究。E-mail:yezishangu@zju.edu.cn。耿凤基为通信作者,E-mail:gengf@zju.edu.cn。

## 一、引言

随着人工智能时代的来临,计算思维被视为继阅读、写作和算术之外的另一项基本素养<sup>[1]</sup>。当前,许多国家和机构正积极投入大量的人力和物力资源,致力于培养个体的计算思维。例如,多个国家将编程教育纳入K-12阶段的课程标准中,各种编程学习平台(如Scratch)如雨后春笋般涌现,计算思维竞赛活动(如Bebras)正在全球范围内蓬勃开展<sup>[2-3]</sup>。

在过去的十几年里,研究者在计算思维的教学与测评实践领域积累了丰富的研究成果,但是仍然无法很好地回答如何认识、培养和评估计算思维的问题<sup>[4]</sup>。具体表现为:存在众多的计算思维定义、缺乏统一的计算思维教学指导框架、未能建立明确的计算思维评估标准以及计算思维科学研究的信效度难以检验等<sup>[5]</sup>。

越来越多的研究者意识到,为了更好地应对这些挑战,必须深入探索计算思维的核心认知基础,回答涉及计算思维认知本质的关键问题<sup>[6-7]</sup>。

## 二、计算思维的内涵及理论观点

当前,关于计算思维的内涵存在不同的解读视角。其中有一类代表性的观点将计算思维视为一种问题解决的思维方式,强调通过抽象、分解和算法思维等心理过程来生成一系列算法步骤。

### (一)问题解决视角下的计算思维

计算思维一词最早出现在1980年Papert的著作*Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*中<sup>[8]</sup>。他在书中强调,在Logo编程环境中,学生通过测试和调试代码来发展对学习和思考的理解,这被认为是计算思维概念的最初阐释<sup>[9]</sup>。2006年,美国卡

耐基梅隆大学的周以真教授明确提出计算思维是人类解决问题的一种方式,而非让人类像计算机一样思考<sup>[10]</sup>。在借鉴吸收了其他学者的观点后,她进一步将计算思维界定为构思问题,并以能被智能代理(人或计算机)有效执行的方式来形成问题解决方案的思维过程<sup>[11]</sup>。美国国家研究委员会(NRC)将计算思维定义为将复杂问题分解成一系列在功能上相互独立且更为简单的子问题,以便使用高效自动化的解决方案来处理这些子问题的思维过程<sup>[12]</sup>。此外,国际技术教育协会(CSTA)和计算机科学教师协会(ISTE)提出的操作性定义中详细描述了计算思维所涉及的问题解决过程和步骤<sup>[13]</sup>。

### (二) 计算思维的关键在于处理层级抽象

在众多认知要素中,“抽象”被广泛视为是计算思维的基石。一方面,当前关于计算思维的定义几乎都涉及了抽象要素。抽象是计算思维的心智工具<sup>[14]</sup>。计算思维的关键在于创建抽象对象并定义它们之间的关系<sup>[15]</sup>。另一方面,作为一种认知过程,抽象能够有效支持计算问题的解决。例如,Muller和Haberman将算法问题解决中的抽象描述为模式识别、黑盒化和结构识别三个过程<sup>[16]</sup>。

在计算机科学领域,抽象是通过信息隐藏的方式来实现的,由此引入了“层级”的概念。周以真指出,“像计算机科学家一样思考”需要在多个抽象层级上处理信息<sup>[14]</sup>。计算思维的关键在于定义和处理不同层级的抽象及其之间的关系<sup>[14]</sup>。然而,这一理论观点在后续研究中未能得到进一步检验。其中一个可能的原因是,周以真对于层级抽象的探讨是在整个计算机科学的范畴下进行的,未能明确阐释层级抽象在计算思维问题解决情境中是如何体现的。

## 三、算法与问题解决的层级理论

计算思维涉及理解和生成一系列算法步骤来解决问题。算法的层级抽象模型明确了算法方案在不同抽象层级的体现。其中,在问题层和程序层,本研究基于问题空间理论和计算机程序的层级抽象框架,详细分析了计算思维问题解决的层级加工特点。在此基础上,层级复杂性理论为探测和量化计算思维的层级加工过程提供了理论依据。

### (一) 算法的层级抽象模型

算法的层级抽象模型描述了算法概念在不同抽象层级的表现形式<sup>[17]</sup>。具体而言,在问题层,算法被视为一种问题解决的方法或策略,通过分析问题的特性、目标和约束条件,以确定合适的解决方案;在对象

层,算法被视为一个独立的实体对象,其内部实现过程被封装成一个黑盒子,从而隐藏了算法实现的具体细节;在程序层,算法被视为一个具体可执行的过程,表现为基于不同编程语言的计算机程序;在执行层,计算机程序被进一步转化为计算机硬件可理解和执行的机器语言。

### (二) 问题空间理论

根据问题空间理论,当问题的初始状态和目标状态被明确定义时,问题求解可以被看作在一个抽象的问题空间中不断搜索中间状态的过程。相应地,人们通过一系列操作来实现不同问题中间状态的转换。这些操作就形成了问题解决方案。Knoblock指出,层级分解是一种有效搜索问题中间状态的方法<sup>[18]</sup>。通过层级搜索,可以将复杂问题逐步分解为更小、更易处理的子问题,并通过解决每个子问题来逐步逼近最终的任务目标。基于该理论,计算问题解决可以被视为将复杂问题分解为一系列具有不同抽象层级的子问题,并为这些子问题提供相应算法解决方案的过程。

### (三) 计算机程序的层级抽象框架

类似于自然语言,计算机程序是按照层级语法规则进行组织的<sup>[19]</sup>。为了更好地理解和教授计算机程序中广泛存在的层级结构,研究者提出计算机程序的层级抽象框架<sup>[20]</sup>。该框架从结构(包括文本和算法结构)和功能两个维度描述了计算机程序中逐渐复杂的层级抽象。从文本结构来看,存在单个语言元素(如变量名)—完整的语义单元(如赋值语句)—程序块(如循环体结构)—完整的程序文本等不同粒度的层级结构;从算法结构来看,程序始于每条指令所实现的算法操作,多条指令被封装为方法或函数,这些函数或方法之间可以相互调用和访问,从而实现更为复杂的算法表达。此外,该模型还考虑了计算机程序的结构—功能二元性。这意味着计算机程序不仅在语法结构上是按照层级组织的,而且在功能实现方面,不同粒度的程序结构也存在层级调用关系。例如,主函数可以通过调用子函数来实现特定功能。

### (四) 层级复杂性理论

任意一个复杂任务都可以被分解为一系列具有明确层级关系的子任务。为了描述这些子任务之间的关系,研究者区分了任务的水平复杂性和层级复杂性<sup>[21]</sup>。具体而言,水平复杂性仅与子任务的数量有关,而与执行顺序无关;相反,层级复杂性被定义为高层级任务递归协调低层级子任务的次数。层级复杂性的增加源于高层级任务以一种特定而非随意的方式来协调和组织一系列低层级子任务。这里,我们以计算机程

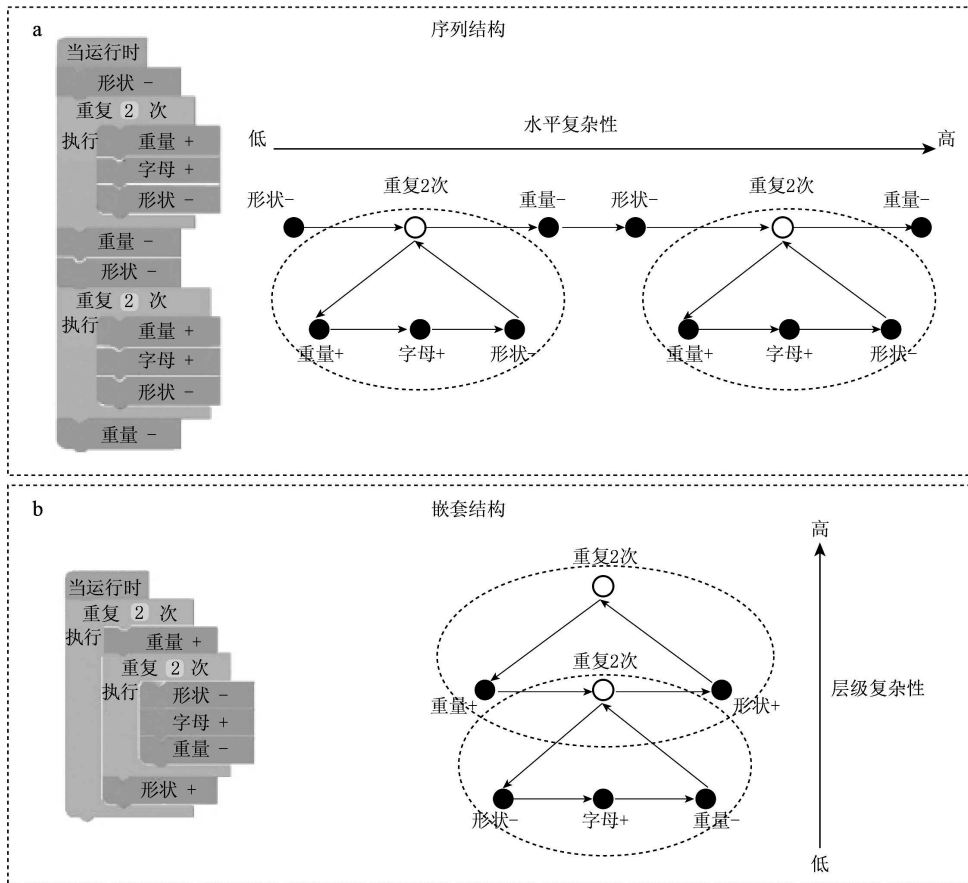


图1 计算机程序的层级复杂性示例

序中广泛存在的嵌套和序列结构为例,并借用图论中“节点”和“边”的概念来直观呈现这两种程序结构的层级表征。在本文中,嵌套结构是指将一个重复控制结构放置于另一个重复控制结构内部。与之相对应,当两个重复控制结构被上下放置时,就形成了序列结构<sup>[22]</sup>。如图1所示,当程序片段中包含相同数量的指令时,嵌套结构相较于序列结构具有更大的层级复杂性,表现为前者需要跨越更多抽象层级来组织代码指令,并且在指令执行过程中涉及更多的迭代跳转。相反,在特定的抽象层级上,序列结构相较于嵌套结构具有更大的水平复杂性。

#### 四、层级加工的相关认知理论

在计算思维的层级问题解决过程中,不同的认知控制模式将调控工作记忆,以实现层级信息的持续性维持和选择性更新。伴随这一认知过程对认知资源的消耗,会导致认知负荷的产生。在神经机制上,这些认知活动将引起大脑认知控制网络和默认网络的广泛参与。

##### (一) 认知控制的双重机制模型

认知控制是个体调控自身行为和心理过程来实现目标导向的认知活动。根据双重机制模型,存在前瞻性和反应性两种控制模式<sup>[23]</sup>。其中,前瞻性控制是

在目标刺激出现之前,个体以持续性和预期性的方式主动维持与任务相关的信息,并利用这些信息进行早期选择和准备。与之相对,反应性控制作为一种“延迟纠正”机制,仅在外界环境发生变化时被调动,以支持个体根据当前情境做出灵活反应和及时调整。认知神经科学领域的研究表明,在执行目标导向的问题解决任务时,大脑的认知控制网络,包括背外侧前额叶和后顶叶皮层构成的额顶网络、以岛叶前部和前扣带回作为核心区域的突显网络以及丘脑和基底神经核等皮层下结构(如图2a的深色区域所示),会参与其中<sup>[24]</sup>。这些认知控制脑区的持续性和瞬时性激活模式分别承担了前瞻性和反应性控制的认知神经基础<sup>[25]</sup>。

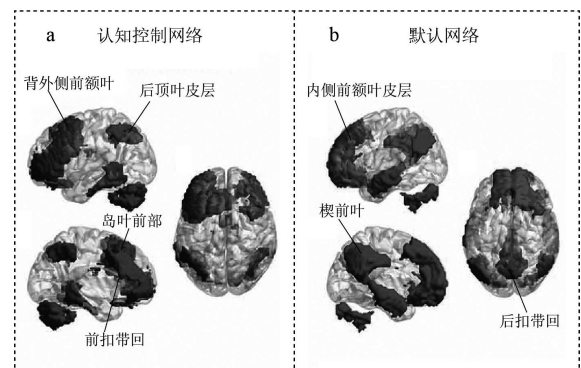


图2 认知控制网络和默认网络涉及的脑区

## (二) 层级加工的工作记忆计算模型

O'Reilly 和 Frank 提出层级加工的工作记忆计算模型<sup>[26]</sup>。该模型基于大脑前额叶和基底神经节之间的功能交互,揭示工作记忆系统处理层级信息的三种认知机制。具体而言,快速更新机制支持个体将低层级的任务信息快速编码到工作记忆中;稳健维持机制支持个体将高层级任务信息持续维持在工作记忆中,并避免受到低层级任务信息或无关刺激的干扰;选择性更新机制支持个体在特定时刻更新工作记忆中的某些信息,而保持其他信息不变。从神经基础来看,快速更新和稳健维持两种认知机制对前额叶的调用是冲突的,因此,依赖基底神经节的动态门控机制来实现两种操作模式之间的灵活转换<sup>[27]</sup>。

## (三) 认知负荷理论及其神经基础

认知负荷理论关注如何利用人类的工作记忆和长时记忆系统来有效处理信息。该理论的提出基于一系列信息存储、重组、处理和提取原则。根据资源消耗原则,任务执行过程中会消耗大量的认知资源,从而导致认知负荷<sup>[28]</sup>。因此,认知负荷被定义为个体在执行任务时所需要付出的心理努力或消耗的认知资源。研究表明,随着任务层级复杂性的增加,个体所产生的认知负荷也随之增大<sup>[29]</sup>。

在认知神经科学领域,研究者通过监测大脑默认网络的活动水平来评估认知负荷<sup>[30]</sup>。默认网络包括内侧前额叶皮层、后扣带回以及楔前叶等脑区(如图 2b 的深色区域所示)。这些区域在休息、思维漫游或未专注于任务时表现为正激活状态,而在任务执行过程中被抑制。默认网络的负激活水平越高,说明执行特定任务消耗的认知资源越多,认知负荷越大。

## 五、计算思维层级加工理论假说

本研究从计算思维的问题解决视角及其关键在于处理层级抽象的理论观点出发,以算法与问题空间理论以及层级加工的相关认知理论为基础,提出计算思维层级加工的理论假说。该假说旨在深入分析计算思维层级加工的认知本质及其背后的认知机制,并可通过认知神经科学的证据进行检验。

### (一) 计算思维层级加工假说的理论基础

计算思维是个体通过生成算法步骤来解决问题的思维过程。算法方案可以在不同抽象层级上表征。在问题层,个体通过层级搜索将复杂问题逐步分解为子问题以形成算法方案,这需要对不同抽象层级的子问题及其之间的关系进行处理。在程序层,算法方案被表征为按照层级结构组织的计算机程序,理解这些

计算机程序需要对不同粒度的程序结构及其功能进行处理。可见,在计算问题解决过程中,不论是在问题空间中进行层级搜索,还是生成和理解按照层级结构组织的计算机程序,都充分体现了层级加工的特性。此外,将算法封装为独立对象并进行调用本身也是层级加工的体现。换言之,无论在何种抽象水平上,层级加工始终都是贯穿计算问题解决的核心认知过程。这种层级加工反映出信息“计算”的本质,并从问题解决的视角呼应了计算思维的关键在于处理层级抽象的观点。特别是,层级复杂性理论为量化和探测计算思维的层级加工过程提供了理论依据。具体而言,可以通过考查个体生成和理解具有不同层级复杂性的代码片段来解决计算问题时的层级加工过程。

为了进一步分析计算思维层级加工的心理认知机制,我们借鉴了其他领域关于层级加工的相关理论。其中,认知控制的双重机制模型和层级加工的工作记忆计算模型启示我们,计算思维问题解决过程中,个体需要调用前瞻性和反应性两种控制模式来调控工作记忆,以支持对高层级子问题的持续性维持以及不同层级子问题的选择性更新。在神经机制上,大脑认知控制网络的持续性和瞬时性激活模式将为此提供支持。同时,伴随信息处理操作对认知资源的消耗,会导致认知负荷的产生,在神经机制上引起大脑默认网络的抑制程度增强。

综上所述,如图 3 所示,本研究在计算思维的问题解决视角以及处理层级抽象观点的基础上,结合算法与问题解决的层级理论,深入剖析了计算思维的层级加工特性。在此基础上,层级加工的相关认知理论为分析计算思维层级问题解决的心理认知机制及大脑神经基础提供了理论依据。

### (二) 计算思维层级加工假说的基本内容

#### 1. 计算思维问题解决的层级加工本质

Turing 指出,如果人类的思维(信息)能够被分解为可计算的基本单元,那么计算机将有能力像人类一样解决问题<sup>[31]</sup>。这种信息的可计算属性支持人脑和计算机以类似的方式来处理信息,本质上是对信息的层级加工,即将信息组合成更大的信息结构或分解为更小的组成部分。类似地,在问题解决领域,现实世界中大多数问题都可以被不断分解为更小的子问题,形成层级结构。计算思维涉及运用一系列的心理工具,如抽象和分解,在问题空间中高效地搜索问题中间状态及其解决方案。这些问题中间状态对应于不同抽象层级的子问题。其中,分解有助于将复杂问题转变为一系列更具操作性的子问题;而抽象则强调通过隐藏

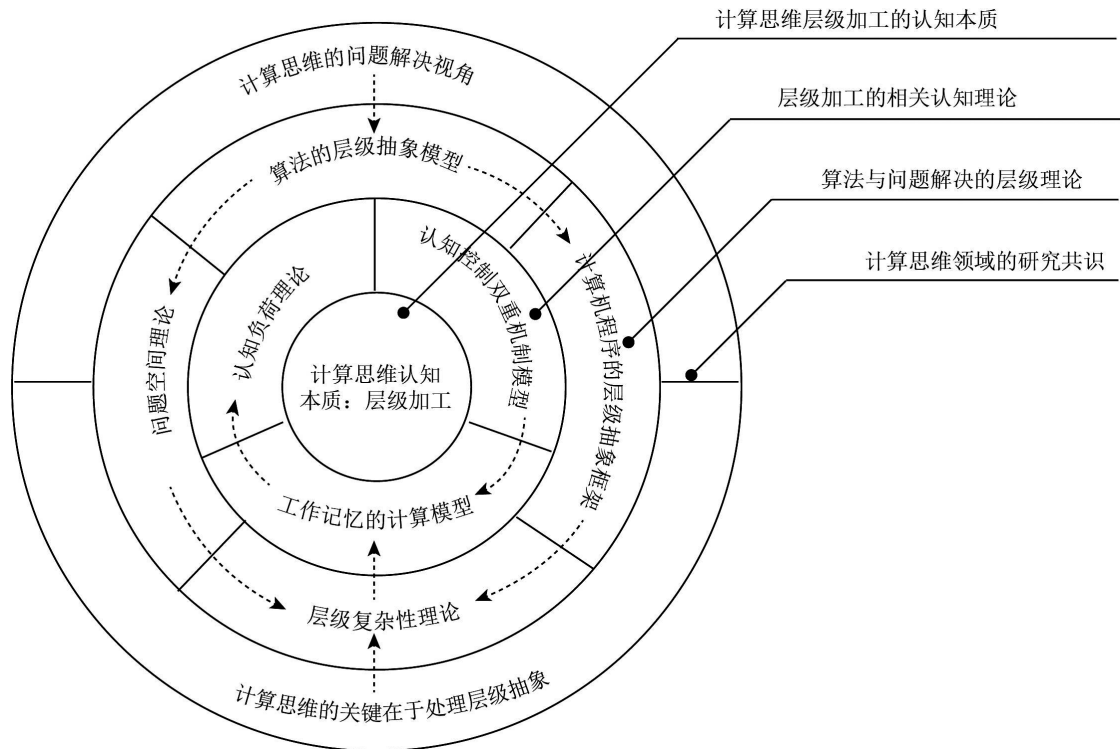


图3 计算思维层级加工假说的理论基础

和过滤无关细节,形成对每个子问题的抽象表征。这种抽象和分解过程不断进行,最终形成包含多个抽象层级的问题空间。通常,高层级的子问题数量较少、持续时间较长且更加抽象;相反,低层级的子问题数量较多、持续时间较短且更为具体可执行。在解决计算问题时,个体需要在同一层级上按照既定顺序依次处理各个子问题,并跨越不同抽象层级来协调子问题之间的关系,以便有效整合各个子问题的解决方案来解决整体问题。

对于给定的计算问题,可以采用具有不同层级复杂性的算法方案来解决,并生成相应的代码片段。为了说明这一点,让我们考虑图4a中所示的计算问题。该任务的总体目标是编写指令来引导蜜蜂移动并采集所有的花蜜。为了解决这个问题,我们设计了三组不同的算法方案,并展示了这些算法方案在问题空间中的层级表征(如图4e~g所示)以及所对应的代码片段(如图4b~d所示)。在图4e中,所有代码指令都按顺序列出,各指令之间没有层级关系。相比之下,在图4f中,我们使用“重复4次”控制结构作为更高层级的指令来协调多个低层级的具体指令,如“向前移动”“采花蜜”“向右转”等。类似地,如图4g所示,这些低抽象层级的具体指令还可以进一步形成层级结构。对比这三组代码片段可以发现,图4d中的代码片段具有最高的层级复杂性,但是由于涉及更少的代码指令,因而比图4b和4c中的代码片段具有更高

的效率。

实际上,计算思维层级加工的特性已经在当前关于计算思维的教学与测评实践中有所体现。在编程学习过程中,初学者通常使用简单的序列结构来组织代码命令。随着编程学习经验的积累,他们逐渐掌握了更为复杂的编程概念,通过层级方式来组织代码指令以提高问题解决效率。举例来说,Code.org编程学习平台(<https://studio.code.org/s/express-2019>)涵盖了序列、循环、条件、函数、变量以及计数循环等不同抽象水平的学习单元。在变量单元的学习中,学习者通过定义变量而不是直接赋值的方式来动态改变嵌套循环的重复次数,从而引入了更高层级的抽象。另外,许多计算思维测评工具评估了个体理解和编写包含多个抽象层级的代码片段的能力。例如,尽管并非有意设计,计算思维测试题目在层级复杂性上仍存在差异。实证研究结果表明,儿童在层级抽象水平较低的题目上的正确率显著高于层级抽象水平较高的题目,说明他们在处理更加复杂的层级关系时存在认知困难<sup>[32]</sup>。

## 2. 计算思维层级加工的认知与神经机制

在明确了计算思维的层级加工特性基础上,需要进一步揭示其底层认知机制,回答哪些认知要素或心理活动支持了计算思维问题解决的层级加工过程。来自其他认知领域的研究表明,前瞻性和反应性认知控制模式均参与了层级任务加工<sup>[33]</sup>。具体而言,前瞻性控

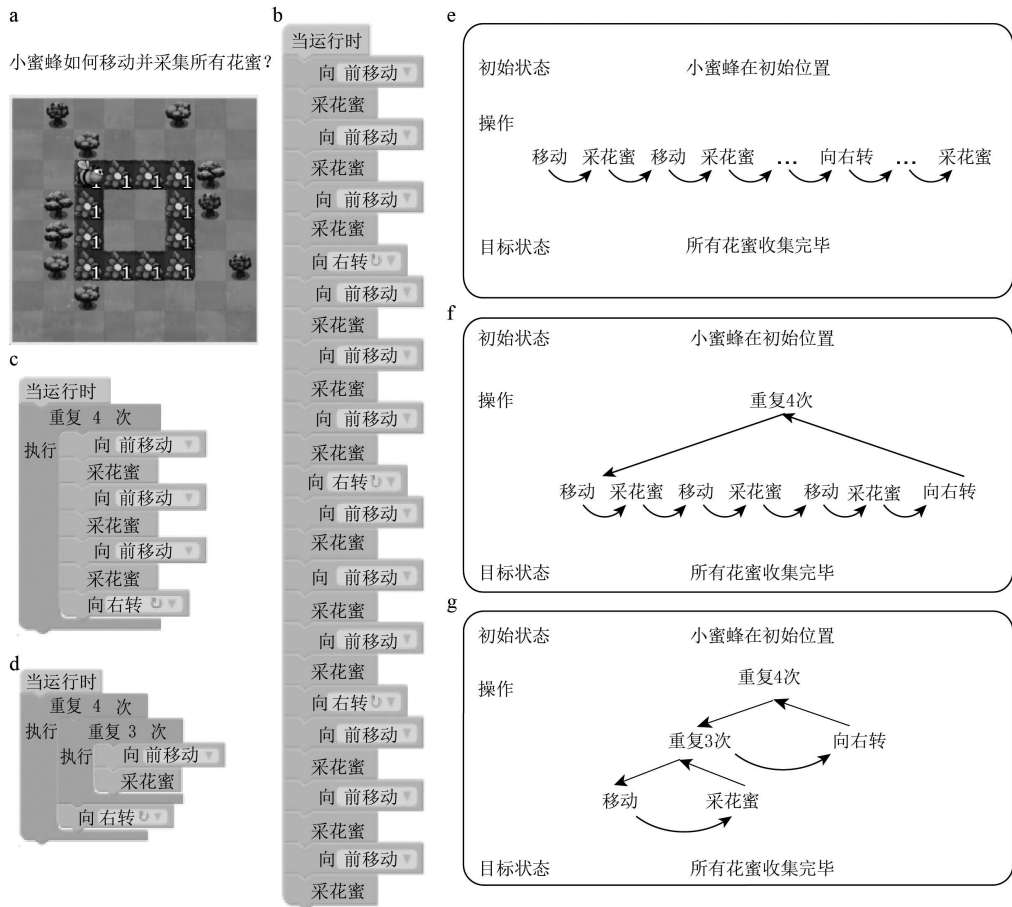


图4 不同层级复杂性的代码片段在计算问题解决中的应用

制涉及在工作记忆中持续性维持高层级任务信息,并避免受到低层级任务信息或任务无关信息的干扰;反应性控制则涉及调控工作记忆对低层级的任务信息进行快速更新,以及在不同层级之间跳转时选择性地更新某些信息。在神经活动层面上,认知控制相关脑区的持续性和瞬时性激活模式被认为承担了前瞻性和反应性控制的神经基础。基于此,我们提出,计算思维层级加工同样依赖认知控制系统基于不同的操作模式来调控工作记忆,以实现高层级信息的持续性维持和层级跳转信息的选择性更新。这些认知活动将在神经机制上分别引起认知控制脑区的持续性和瞬时性高激活。此外,在工作记忆中处理层级信息需要消耗大量认知资源,将导致认知负荷的产生,神经机制上表现为大脑默认网络抑制程度的增强(如图5所示)。

在其他认知领域,嵌套结构常被用来创设任务的层级复杂性<sup>[29]</sup>。计算思维领域也存在大量的嵌套结构,如函数调用和嵌套循环等。在处理嵌套结构时,个体需要调用前瞻性控制来持续维持内外层控制结构的重复次数,并确保在执行单个指令时不受干扰。同时,在内外层控制结构的跳转位置处需要调用反应性控制来选择性更新当前的重复次数,以便选择和判断接

下来将要执行的指令。我们推测,随着层级复杂性的增加,个体的认知控制系统将面临更大的挑战。已有研究发现,学习经验会影响个体在层级任务加工过程中对于不同认知控制模式的选择和依赖<sup>[34]</sup>。因此,我们进一步考虑了编程学习经验这一变量对计算思维层级加工的影响,旨在从神经活动层面揭示编程学习如何重塑个体在计算思维层级加工过程中所引发的大脑活动模式和激活水平。

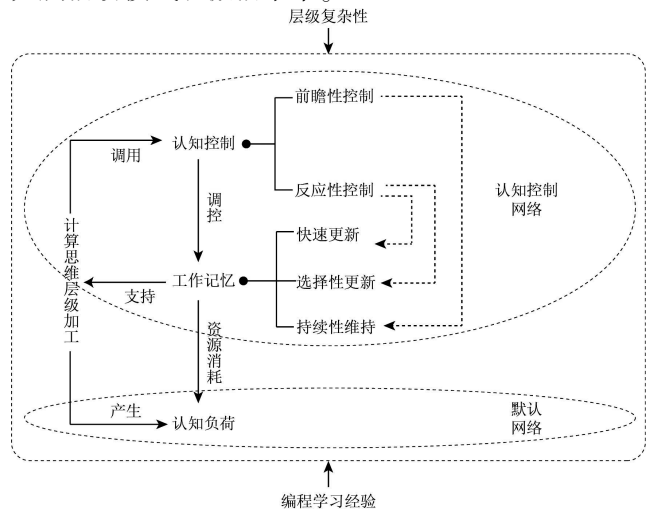


图5 计算思维层级加工的理论假设

## 六、教育启示

本研究通过融合教育学、心理学和认知神经科学的相关理论,提出计算思维层级加工的理论假说,旨在揭示计算思维的认知本质及其背后的心理认知机制。这一理论假说的提出有助于解释计算思维问题解决的认知过程,并进一步转化为一系列教育原则,用于指导计算思维的教学与测评实践。

### (一) 认知层面

计算思维层级加工理论假说为理解计算思维问题解决的认知本质及其底层的心理认知机制提供了崭新视角。根据这一理论,计算思维可以被定义为个体通过层级加工的方式生成和理解一系列算法步骤来解决问题的过程。这种层级加工既体现了信息计算的特点,也反映出计算思维问题解决的思维过程。从认知机制来看,计算思维层级加工依赖认知控制系统来维持和更新层级信息。具体而言,前瞻性控制负责调控工作记忆系统在一段时间内持续维持高层级信息,而反应性控制则支持在工作记忆中选择性更新不同层级跳转信息并快速更新低层级信息。伴随这些认知过程对认知资源的消耗,将导致认知负荷。从神经机制来看,计算思维层级加工会引发大脑认知控制脑区表现出持续性和瞬时性激活模式,同时导致大脑默认网络的抑制程度显著增强。此外,任务层级复杂性和编程学习经验将会影响计算思维的层级加工过程。特别是支持计算思维层级加工的各种心理过程和认知要素可能构成了计算思维与其他高级认知能力之间存在概念重叠或相关关系的认知基础。

### (二) 教学层面

根据计算思维层级加工理论假说,在培养计算思维时,应当充分考虑层级加工的特性及相关因素的影响,如个体的认知发展水平、学习内容的层级复杂性以及支持层级加工的教学策略等。首先,在将计算思维引入 K-12 阶段甚至更低水平的幼龄阶段时,教育工作者应当充分考虑不同年龄阶段学习者的认知控制和工作记忆发展水平。其次,学习内容的组织应当遵循从较低抽象层级逐渐过渡到较高抽象层级的原则。为此,需要充分考虑不同编程概念的抽象程度。教师通过灵活组合不同的编程概念来创设更加复杂的

问题情境。从教学策略的设计来看,需要为学习者提供适切的教学策略或学习支架,以支持他们对层级信息的加工。例如,在教授“嵌套循环”这一编程概念时,可以在内外层重复控制结构的跳转处设计学习提示,以减轻学习者在工作记忆中维持和操作当前重复次数的认知负荷。

### (三) 测评层面

计算思维层级加工的认知本质有助于回答计算思维“测什么”和“怎么测”的问题,从而为评估计算思维提供客观统一的测量标准。具体而言,可以通过考查学习者在解决计算问题时生成和理解具有不同层级复杂性代码片段的任务表现来衡量他们的计算思维。此外,通过客观量化计算思维测评题目的层级复杂性,可以帮助研究者确定题目的难度梯度。这种方式将层级复杂性视作一项独立的测量指标,以支持对不同研究中计算思维测评结果的横向比较,而不必受限于特定的测评内容或形式的差异。最后,通过考查不同年龄阶段学习者在计算问题解决过程中的层级加工能力,有助于从认知发展的角度对计算思维的发展轨迹进行纵向比较和追踪。同时,层级复杂性原则同样适用于计算机科学之外的其他学科领域,从而为在跨学科问题情境中(如 STEM 教育)评估计算思维提供了科学依据。

## 七、结束语

总体上,学界关于计算思维认知本质界定的模糊和理论研究的滞后,给计算思维领域的科学研究和教育实践带来一系列严峻的挑战。为此,本研究基于计算思维领域的已有研究共识、算法与问题解决的层级理论以及层级加工的相关认知理论,提出计算思维层级加工的理论假说。该理论假说揭示了计算思维层级加工的认知本质,并从认知控制和认知负荷两个维度阐明了计算思维层级加工的认知机制。同时,其他认知因素,如任务的层级复杂性和个体的编程学习经验等对计算思维层级加工的影响也被考虑在内。这一理论假说的提出,对于深化当前关于计算思维的认知、教学与测评等方面的研究具有重要启示。在后续研究中,需要跨学科融合不同领域的研究范式和技术手段,以便在不同实验情境中对上述理论假说进行实证检验。

### [参考文献]

- [1] 北京开放大学地平线报告 K12 项目组.2017 地平线报告:新技术驱动教学创新的趋势、挑战与策略[J].人民教育,2017(21):71-75.
- [2] 康建朝.芬兰中小学编程教育的缘起、实践路径与特征[J].电化教育研究,2021,42(8):101-107,115.
- [3] 朱珂,贾彦玲,冯冬雪.欧洲义务教育阶段发展计算思维的理论与实践研究[J].电化教育研究,2019,40(9):89-96,121.

- [4] 郁晓华,王美玲.计算思维培养之路还有多远?——基于计算思维测评视角[J].开放教育研究,2020,26(1):60-71.
- [5] EZEAMUZIE N O, LEUNG J S C. Computational thinking through an empirical lens: a systematic review of literature [J]. *Journal of educational computing research*, 2022,60(2):481-511.
- [6] SELBY C, WOOLLARD J. Computational thinking: the developing definition[C]//*Proceedings of the 18th Annual SIGCSE Conference on Innovation and Technology in Computer Science Education*. New York: ACM, 2013:1-6.
- [7] 冯友梅,王昕怡,刘晓蕊,等.计算思维不是什么:论计算思维的边界及其何以成为信息技术学科的立足之本[J].电化教育研究,2023,44(1):84-90.
- [8] PAPER S. *Mindstorms: children, computers, and powerful ideas*[M]. New York: Basic Books, 1980:285-286.
- [9] 李芒,杨宇轩.人非机器:对计算思维本质的认识[J].开放教育研究,2023,29(2):55-60.
- [10] WING J M. Computational thinking[J]. *Communications of the ACM*, 2006,49(3):33-35.
- [11] WING J M. Research notebook: computational thinking—what and why[J]. *The link magazine*, 2011,6:20-23.
- [12] National Research Council. Report of a workshop on the pedagogical aspects of computational thinking [M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 2011:33-35.
- [13] ISTE & CSTA. Computational thinking in K-12 education leadership toolkit [EB/OL]. [2024-05-31]. <https://docs.microsoft.com/en-us/archive/blogs/alfredth/computational-thinking-leadership-toolkit>.
- [14] WING J M. Computational thinking and thinking about computing[J]. *Philosophical transactions of the Royal Society A: mathematical, physical and engineering sciences*, 2008,366(1881):3717-3725.
- [15] National Research Council. Report of a workshop on the scope and nature of computational thinking[M]. Washington, D.C.: National Academies Press, 2010:13.
- [16] MULLER O, HABERMAN B. Supporting abstraction processes in problem solving through pattern-oriented instruction [J]. *Computer science education*, 2008,18(3):187-212.
- [17] PERRENET J, GROOTE J F, KAASENBROOD E. Exploring students' understanding of the concept of algorithm: levels of abstraction[J]. *ACM SIGCSE bulletin*, 2005,37(3):64-68.
- [18] KNOBLOCK C A. Search reduction in hierarchical problem solving [C]//*Proceedings of the Ninth National Conference on Artificial Intelligence*. California: AAI Press, 1991.
- [19] FITCH W T, HAUSER M D. Computational constraints on syntactic processing in a nonhuman primate [J]. *Science*,2004,303(5656):377-380.
- [20] SCHULTE C. Block model: an educational model of program comprehension as a tool for a scholarly approach to teaching[C]//*Proceedings of the Fourth International Workshop on Computing Education Research*. New York: ACM, 2008: 149-160.
- [21] COMMONS M L. Introduction to the model of hierarchical complexity[J]. *Behavioral development bulletin*, 2007,13(1):1-6.
- [22] HAO X X, XU Z Y, GUO M Y, et al. The effect of embedded structures on cognitive load for novice learners during block-based code comprehension[J]. *International journal of STEM education*, 2023,10(1):1-16.
- [23] BRAVER T S. The variable nature of cognitive control: a dual mechanisms framework [J]. *Trends in cognitive sciences*, 2012,16(2):106-113.
- [24] DOSENBACH N U F, FAIR D A, COHEN A L, et al. A dual-networks architecture of top-down control [J]. *Trends in cognitive sciences*, 2008,12(3):99-105.
- [25] ZHU C D, HAN J H. The higher, more complicated: the neural mechanism of hierarchical task switching on prefrontal cortex[J]. *Brain sciences*, 2022,12(5):645.
- [26] O'REILLY R C, FRANK M J. Making working memory work: a computational model of learning in the prefrontal cortex and basal ganglia[J]. *Neural computation*, 2006,18(2):283-328.
- [27] CHIEW K S, BRAVER T S. Context processing and cognitive control: from gating models to dual mechanisms [M]//EGNER T. *The Wiley handbook of cognitive control*. Chichester: John Wiley & Sons, 2017:143-166.
- [28] CHEN O H, CASTRO-ALONSO J C, PAAS F, et al. Extending cognitive load theory to incorporate working memory resource depletion: evidence from the spacing effect[J]. *Educational psychology review*, 2018,30(2):483-501.



- [29] FITCH W T, MARTINS M D. Hierarchical processing in music, language, and action: lashley revisited[J]. *Annals of the New York academy of sciences*, 2014,1316(1):87–104.
- [30] JENKINS A C. Rethinking cognitive load: a default–mode network perspective[J]. *Trends in cognitive sciences*, 2019,23(7):531–533.
- [31] TURING A M. On computable numbers, with an application to the entscheidungs problem [C]//*Proceedings of the London Mathematical Society*. London: Oxford University Press, 1937,2(1):230–265.
- [32] ROMÁN–GONZÁLEZ M, PÉREZ–GONZÁLEZ J C, JIMÉNEZ–FERNÁNDEZ C. Which cognitive abilities underlie computational thinking? Criterion validity of the computational thinking test[J]. *Computers in human behavior*, 2017,72:678–691.
- [33] YU Q H, CHAU B K H, LAM B Y H, et al. Neural processes of proactive and reactive controls modulated by motor–skill experiences[J]. *Frontiers in human neuroscience*, 2019,13:404.
- [34] MA X, DING N, TAO Y, et al. Syntactic complexity and musical proficiency modulate neural processing of non–native music[J]. *Neuropsychologia*, 2018,121:164–174.

## The Hierarchical Processing Theory Hypothesis of Computational Thinking and Its Educational Implications

HAO Xiaoxin<sup>1</sup>, LI Yan<sup>2</sup>, GENG Fengji<sup>2</sup>

(1.Department of Psychology and Behavioral Sciences, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058;  
2.College of Education, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310058)

**[Abstract]** Computational thinking is a key problem–solving skill that talents in the 21st century must possess. At present, the cognitive nature of computational thinking is still unclear, which brings a series of challenges to educational practice, such as the lack of a unified teaching framework and clear assessment criteria. To this end, this study starts from existing theoretical consensus and viewpoints, based on the relevant theories of algorithms and problem–solving, and deeply analyzes the hierarchical processing characteristics of problem–solving in computational thinking. On this basis, drawing on the relevant cognitive theories of hierarchical processing, this study further proposes a theoretical hypothesis of hierarchical processing in computational thinking, the core point of which is that the cognitive essence of computational thinking lies in processing information or sub–problems at different levels of abstraction and their interrelationships. From the perspective of cognitive and neural mechanisms, the hierarchical processing of computational thinking requires the involvement of different cognitive control modes to regulate the working memory for the sustained maintenance and selective updating of the hierarchical information, which leads to continuous and instantaneous high activation of the cognitive control area of the brain in the neural mechanism. The consumption of cognitive resources accompanied by these information processing activities will lead to cognitive load and increase the degree of inhibition in the default network of the brain. These theoretical viewpoints will provide insights for the cognition, teaching and assessment of computational thinking, and can be tested in subsequent empirical studies using an interdisciplinary research paradigm.

**[Keywords]** Computational Thinking; Problem Solving; Hierarchical Processing; Cognitive Control; Cognitive Neural Mechanism