

《形式化方法》课程建设探索与实践^{*}

张广泉

苏州大学计算机科学与技术学院, 苏州, 215006

摘要 形式化方法是计算机科学的一个传统研究方向, 是保证计算机软硬件系统正确性与安全性的一种重要方法。随着形式化方法应用在工业界的影响不断增大, 以及计算思维 2.0 的渗透性进一步带动了形式化方法与其他学科方向的交叉融合, 已越来越体现形式化方法教育的必要性与可行性。本文针对目前国内外形式化方法教育现状, 从课程知识体系、教学模式创新、课程思政、教学资源建设、通专融合培养计算思维与创新思维能力等方面进行探索与实践。

关键词 形式化方法, 课程知识体系, 课程思政, 敏捷教学模式, 教学资源建设, 计算思维 2.0

Exploration and Practice of Course Construction of Formal Method

Zhang Guangquan

School of Computer Science and Technology, Soochow University, Suzhou 215000, China
gqzhang@suda.edu.cn

Abstract—Formal method is a traditional research direction of computer science and an important method to ensure the correctness and security of computer software and hardware system. With the increasing influence of the application of formal methods in industry and the permeability of Computational Thinking 2.0, the cross integration of formal methods and other disciplines has been further driven, which has increasingly reflected the necessity and feasibility of formal method education. In view of the current situation of formal method education at home and abroad, this paper explores and practices from the aspects of curriculum knowledge system, teaching mode innovation, curriculum ideology and politics, teaching resources construction, and the integration of general and specialized training of computational thinking and innovative thinking ability.

Key words—formal method, curriculum knowledge system, curriculum ideology and politics, agile teaching mode, teaching resources construction, Computational Thinking 2.0

1 引言

软件是信息系统的灵魂, 是“工业 4.0”和“中国制造 2025”的使能和驱动。小到一个智能传感器、一块智能手表, 大到一座智慧城市、一张智能电网, 都依赖于软件系统的驱动与驾驭。为推进产业结构优化升级, 加快培养软件人才的步伐, 近年来, 教育部大力发展高校软件工程教育, 软件工程已从最初的计算机科学与技术的一个学科方向调整为包括软件理论理论与方法、软件工程技术、软件服务工程和领域软件工程等四个学科方向的独立的一级学科。

软件工程理论与方法是构建软件工程一级学科的理论基石, 作为软件工程理论与方法的核心内容之一, 形式化方法是保证计算机系统正确性与安全性的一种重要方法, 是具有严格数学基础的软件和系统开发方法, 支持软件与系统的规约、设计、验证与演化等活动。作为一个学科方向, 它研究形式化方法的数学基

础、形式系统的表达能力、形式系统的推理系统及其可靠性和完备性, 以及在计算系统开发和生命周期各个阶段的理论、方法、技术、工具和应用方式等。随着软件可信需求的不断增长, 形式化方法的重要性和关注度日益提高。迄今为止, 已有 12 位学者因为或部分因为形式化方法的研究工作而获图灵奖。

形式化方法是一个基础性和交叉性很强的学科方向, 它与计算机科学的其他分支如计算理论、编程语言、软件工程、计算机安全等都密切相关; 近年来, 形式化方法又与人工智能、网络空间安全、量子计算、生物计算、控制理论、电子自动化设计等多个领域和方向交叉融合, 得到更加广泛的应用。

随着形式化方法应用在工业界的影响不断增大, 形式化方法教育也越来越受到国内外计算机教育界的重视, 如 2004 年 ACM 和 IEEE-CS 联合制订的软件工程教程《SE2004》以及 2005 年教育部发布《中国软件工程学科教程》均将“形式化方法”列为软件工程专业核心课程。

^{*}基金资助: 江苏省高等教育教学改革研究课题、苏州大学高等教育教改(重点)研究课题。

2 国内外教育现状

形式化方法的工业应用需求和教学过程实践的经验积累,已越来越体现出形式化方法教育的必要性和可行性。从20世纪90年代初起,形式化方法教育就引起了欧美教育界的高度重视和关注。英国、德国、法国、意大利、荷兰、西班牙等国家高校相继为研究生开设形式化方法的课程,并推广至本科生教育。20世纪90年代中期,美国高校也开展了形式化方法教育研究,并在美国顶尖的35所大学的软件工程学科实施研究生和本科学生的形式化方法教育实践。

由于形式化方法学习曲线长,高强度运用需要较高的门槛。目前国内各高校形式化方法教育还相对薄弱,其课程教学困难较多、难度较大,各高校在教学实践过程中,普遍存在教师难教、学生难学的现象,教学质量和教学效果很难达到预期教学目标。目前,国内形式化方法教育主要面临如下几个问题:

(1) 课程教材稀缺。尤其缺乏适合本科生的形式化方法教科书。

(2) 实验环境缺少。在形式化方法教育中,为了提高学生学习的兴趣和课程教学的效果,相关支撑工具和实验环境是必不可少的,但我们却很难发现有价值的支撑工具。主要原因在于这些工具从认识到使用都需要花费很大的精力,当然开发相应的教学支撑工具也是需要花费较大的精力。

(3) 应用环境缺乏。软件工程是形式化方法的主要工业应用领域。国内软件企业近些年有很大的发展,但相当一部分企业仍然停留在个人英雄时代,很少需要团队合作或者是不需要大规模的合作。所以形式化方法在这里无法真正得到推广,结果一些大的企业也只有从国外引进人才或者引进人才后再进行培训。

目前,国内多数高校的形式化方法教育主要还是在程序设计、数据结构等基础课增加形式化概念的讨论,在离散数学、算法、软件工程等后续专业课程突出形式化方法与主流方法的关系和结合,真正开展专业的形式化方法教育的高校很少。

3 课程知识体系

形式化方法最早可追溯到20世纪50年代后期关于程序设计语言编译技术的研究。当时J.Backus提出BNF描述Algol60语言的语法,涌现了各种语法分析程序自动生成器以及语法制导的编译方法,使得编译系统的开发从“手工艺制作方式”发展成具有牢固理论基础的系统方法。

形式化方法的研究高潮是从20世纪60年代后期开始的,针对当时所谓的“软件危机”,人们提出种种

解决方法,归纳起来有两类:一是采用工程方法来组织、管理软件的开发过程;二是深入探讨程序和程序开发过程的规律,建立严密的理论,以期能用来指导软件开发实践。前者导致“软件工程”的出现和发展,后者则推动了形式化方法的深入研究。形式化方法的基本内容主要包括:

(1) 形式建模(formal modeling):通过构造系统 S 的形式模型 M 来刻画系统及其行为模式。

(2) 形式规约(formal specification):通过定义系统 S 必须满足的一些属性 φ 如安全性、活性等来描述系统约束。

(3) 形式验证(formal verification):证明刻画系统 S 行为的模型 M 确实满足系统的形式规约 φ (即验证 $M \models \varphi$)。

3.1 形式建模

计算机系统可分为串行和并发两大类,分别有不同的建模方法。串行系统(也称顺序系统)是一种较常规形式的系统,其在计算终止后产生一个最终结果。因而,通常将串行系统看作是从初始状态到终止状态(或终止结果)的一个函数,因此,一个串行系统可以通过其输入-输出关系来描述,即连接可能的初始状态到可能的计算结果之间的条件,这类系统可通过Z、VDM、B等方法进行建模。

计算机界的并发现象始于20世纪60年代,其中并发的概念由C.A.Petri于1962年首先提出。若一个系统内部发生的两个事件之间没有因果关系或可以按任意次序发生,则称此两个事件是并发的,存在并发事件的系统称为并发系统;如操作系统、控制系统、交互系统等。较串行系统而言,并发系统要复杂得多,这些系统很难规约、实现和验证,主要原因是系统与其环境之间以及系统本身的并行进程之间交互的复杂性,在交互的精确时间上的微小变化可能会导致完全不同的行为。

人们对并发系统的这种新特性缺乏认识和理解,常常产生困惑甚至混乱。如何为实际的并发系统设计和分析提供坚实的理论基础、提高其可信性,是今后几十年计算机科学和软件工程面临的重大挑战。我们认为首先需要建立能够描述并发系统行为的计算模型,即并发模型。一方面,为了适合验证需要,模型应能捕捉到系统与正确性有关的行为特征;另一方面,为了简化和缩减被检测的系统,不使验证过于复杂,模型抽象时应该去掉一些不影响验证属性正确性的细节。例如,为数字电路建模时,通常按照门和布尔值进行推理,而不是实际的电压层;同样,在分析通信协议时,我们集中于消息的交换,而忽略实际的消息

内容。合理抽象后的计算模型，可以帮助我们深入认识并发系统的本质特性，并为并发系统的形式规约和验证打下基础。

迄今为止，并发系统的计算模型已有许多种。如迁移系统（及其扩展）、自动机（及其扩展）、Petri 网（及其扩展）以及基于进程代数的 CSP、CCS 等。

3.2 形式规约

软件开发首先需要确定“做什么(what to do)”，而非“怎么做(how to do)”，这个阶段称为软件需求。需求规约就是以一种清晰、简明、一致且无歧义的方式，刻画客户或用户所需系统中所有重要方面的一组陈述，这是软件开发最重要和最困难的阶段。一方面，规约是客户或用户与软件开发人员之间的接口界面，可看作是他们之间的一种契约合同；另一方面，规约也是设计和编制程序的出发点和验证程序是否正确的依据。事实上，我们判断最终所开发出的系统（程序）是否正确，就是通过验证它是否满足其需求规约来进行的。

按形式化的程度，需求规约的描述可采用非形式化、半形式化和形式化三类方式。非形式化方式是指采用自然语言描述系统需求。尽管它易为用户理解，但可能存在矛盾、二义性、含糊性、不完整陈述以及抽象层次的混杂等问题，因而常导致需求描述错误，从而引起用户或客户对交付的系统不满意。此外非形式化方式也难以提供自动化支持。形式规约(也称形式规范或形式化描述)是用具有精确语义的形式化语言描述系统需求(性质)，对形式规约通常要讨论其一致性和完备性等性质。

与系统建模类似，形式规约也可以分为面向串行程序的与面向并发程序的。对于串行程序而言，可看作是从初始状态到终止状态的一个函数，这种初始状态和终止状态之间的关系特性是静态的而非动态的，可采用前后断言法、Hoare 逻辑等一阶逻辑以及代数方法对其进行规约。

由于并发程序比串行程序表现出更为复杂的行为，其状态随着时间的推移不断改变，且可能不断影响外部环境，这种持续不终止的动态行为是经典一阶逻辑和 Hoare 逻辑所不能描述的。时序逻辑是关于随着时间变化而不断改变其值的动态变元（也称时序变元）的一种模态逻辑。它除了含有经典逻辑的逻辑联结词和量词外，还包含一些时序算子。时序逻辑具有很强的表达能力，一些重要的并发系统属性，如安全性（指“坏的”事件永远不会发生，如部分正确性、互斥性、无死锁性等）、活性（指“好的”事件终将发生，如终止性、完全正确性、响应性等）都可以用时

序逻辑公式表达。A.Pnueli 于 1977 年首次提出将时序逻辑应用于并发程序的规约和推理并因这一贡献而荣获 1996 年图灵奖。目前时序逻辑已广泛应用于并发、实时和混成系统的规约和验证。

3.3 形式验证

形式验证与形式规约之间具有紧密的联系，形式验证就是验证已有的软件(系统)的模型 M 是否满足其规约 φ (即 $M \models \varphi$)，它也是形式化方法所要解决的核心问题。

形式验证方法主要也有两类方法，一类是以逻辑推理为基础的演绎验证(deductive verification)，另一类是以穷尽搜索为基础的模型检测(model-checking)。

演绎推理用逻辑公式描述系统及其性质，通过一些公理或推理规则来证明系统具有某些性质。其逻辑推理方法主要有自然推演、归结、Hoare 逻辑及时序演算。常见演绎推理工具有机器定理证明器或检验器如 ACL2、HOL、PVS、TLV、Coq 等；演绎验证的优点是既可以验证有穷状态系统，也可以使用归纳的方法来处理无限状态的问题，并且证明的中间步骤使用户对系统和被证明性质有更多的了解。这类方法不足之处是不能做到完全自动化验证，对于稍微复杂的系统，自动化的推理就难以胜任，只适宜较小系统的验证，故难以被工业界接受。

模型检测是一种基于算法的属性验证方法，使用状态空间搜索的办法来全自动地检验一个系统(模型)是否满足其属性规约。该方法由 E.M.Clarke、E.A.Emerson、Queille 和 Sifakis 在 1980 年代初期提出并于 2007 年获得图灵奖。如何应对系统“状态空间爆炸(state space explosion)”是模型检测的关键问题。在这方面已有一些重要的方法被相继提出，这些方法大致可分为结构化方法、符号化方法和抽象方法三类。

模型检测方法的优点在于它有全自动化的检测过程且验证速度快，并且如果一个性质不满足，它能给出这个性质不满足的理由。我们即可据此对系统描述进行改进。由于该方法是全自动的，不需人工指导或技巧，故易于被非专业人士所掌握和使用。目前常见的模型检测工具主要有 SPIN、SMV、UPPAAL、PRISM 等；该方法自提出以来，进展迅速，且已经在集成电路和通信协议等实际系统设计的验证方面取得了一定的成功，其理论与技术得到了工业界和学术界的广泛关注，目前，许多世界著名大公司如 AT & T、Fujitsu、Inter、IBM、Microsoft、Lucent、Motorola、Siemens 等纷纷在其产品设计和开发过程中使用模型检测技术，并在很多复杂的实例研究中发挥了关键性的作用。

4 教学模式创新

当前的高校计算机课程教学中,始终存在着如教学内容单一、教材滞后、教学理念不够科学、教学评价机制不够完善等问题,严重影响了计算机教育的可持续发展。计算机人才的可持续培养在信息化社会建设进程中有着至关重要的作用,传统的计算机人才培养模式已经无法满足社会对人才的需求,如何科学培养高素质的有可持续竞争力的计算机人才是如今亟需解决的重大问题。

4.1 敏捷教学

近年来,我国高等工程教育改革逐渐吸收国际主流工程教育发展的经验,提出了敏捷教学的新概念、新模式。借鉴“敏捷”概念,可以在“互联网+”背景下的新时代人才培养需求中,将大学培养目标和学生个人志趣相结合,加强教学过程中的师生互动,灵活组织教学资源 and 教学活动,促进教学内容与环节的快速交替迭代和精准协同优化,实现个性化创新人才培养。这种以学生发展为中心、主动响应学生与社会需求变化而进行的教学内容与组织形式不断变化的教学形态被称为敏捷教学模式。以形式化方法课程为例:

(1) 形式化方法课程知识点的组织,从课程内容构成大框架角度来看相对固定,虽然在一个学期的授课过程中,一般不会有太大变化。但对于课程建设来说,则是需要“不断变化”的。因为形式化方法学科领域中不断涌现新的技术、方法,新的问题不断被发现。在课程讲授内容中必须结合前沿技术,反映国内外形式化方法领域中的研究动态。因此每一学期的课程内容和知识点的组织结构,都需要根据前沿技术的发展、研究动态的变化而“变化”。

(2) “变化”还体现在动态的教学内容分解、课程环节编排和教学内容迭代。形式化方法课程教学内容包括形式化领域的基本知识、关键技术和最新发展动态,通过深入浅出的方法提高学生对内容的理解;教师按照课程知识点脉络进行教学内容、教学环节编排时,一方面要和前沿技术相结合,另一方面要和相关的科研方法相结合,使学生在掌握基础概念、前沿技术的同时,还学习科研方法,提升学生的创新思维能力和意识。同时以案例和问题的形式引出新知识,将学生在教学环节中的问题进行整理、总结和反馈。这种动态反馈使学生更容易掌握课程学习脉络,教师能够及时了解学生对知识点的掌握情况和学习需求,可以提前对教学内容进行针对性的更新迭代。这种动态的教学模式能够满足“互联网+”背景下形式化方法课程的教学要求。

在形式化方法课程建设过程中引入敏捷教学模

式,关键在于对教学内容、教学单元和知识点按不同粒度进行有效“分割”设计。粒度过大会导致教学知识点内容庞大,不利于在教学过程中采用微课等形式进行教学,粒度过细则导致教师工作量过大。有效“分割”设计教学内容、教学单元和知识点“因材施教”,成为在课程建设中引入敏捷教学模式成功与否的关键。

敏捷教学实行非线性组合及混合式并行的教学内容编排,制定多元化和各具特色的教学方案。敏捷教学是一种理论、知识、能力、素质等全方位全过程深度融合的教学体系、一种不断激发增长学生潜能优势的教学过程。敏捷教学终将导致面向学生终生可持续竞争力与职业发展的开放式服务型教育形态的产生。

4.2 课程思政

在课堂教学实践中,需全过程融入课程思政、课程育人,有机融合思政元素与专业知识。

教师在专业知识传授过程中,要正确认识到价值引领的重要性,树立全课程育人理念,结合形式化方法发展动态及国家战略发展重要性等内容,将课程思政、课程育人贯穿到专业课程体系中。在理论教学环节中,讲述我国计算机科学家在形式化领域取得的成就,如中国科学院软件研究所唐稚松院士在20世纪70年代末、80年代初设计的世界上第一个可执行的时序逻辑语言XYZ/E,荣获国家自然科学基金一等奖。通过宣讲老一辈计算机科学家的爱国情怀,培养学生精益求精的“大国工匠”精神,激发学生科技报国的家国情怀和使命担当。

5 教学资源建设

5.1 教材建设

目前国内形式化方法教材十分稀少,缺乏比较全面、系统介绍形式化理论、方法和应用的教材。已出版的同类代表性教材的主要不足之处:

(1) 采用专门语言或方法教学。即仅仅围绕一些特殊或专门的形式化方法/语言进行教学,例如,Z语言、B方法、VDM语言、Petri网、逻辑及程序证明等;教材仅仅包含了单一的方法或语言,学生难以对形式化方法有广泛的认识和全面的了解。

(2) 采用综合内容课程教学。即围绕某一个主题或知识单元,开展多种形式化方法/语言的教学。教材内容覆盖面广,但形式化方法基本理论和基本原理的深度不够,学生仅仅掌握和了解形式化方法的一些符号和较浅显的技术;容易使学生产生误解,认为形式化方法仅仅是认识事物的一种符号表示方法,难以把形式化方法与计算机软、硬件系统的实际开发过程联系

起来,学生很难达到学以致用,教学与实践的偏差较大。

除了上述两种情况外,还有个别通过引进、翻译的形式化方法书籍,内容覆盖面较宽泛、有一定深度,且不限于形式化方法,还包括软件测试等内容,主要面向研究生教育层次,而不太适合本科生阶段使用。

软件工程学科快速发展对形式化方法的应用需求将愈来愈强,现有的教材内容难以适应社会和市场对形式化方法人才的需求。

《形式化方法导论》(清华大学出版社,2015年第1版,配套有电子课件)一书在充分吸收国内外形式化方法前沿研究成果、科学系统地归纳相关知识的相互联系与发展规律的基础上,根据作者多年从事形式化方法教学和科研的实践撰写而成。全书共12章,分为上、中、下三篇,分别阐述形式化建模、规范和验证方法。教材的主要特色与创新点:

(1) 通过详细分析和梳理,提炼出形式化方法核心、本质的原理、方法和技术,其中自动机和时序逻辑是贯穿全书内容的两大重要基础。

(2) 重点阐述以模型检测为主要内容的形式验证方法,使学生在有限的学时范围内,能有效地掌握形式化方法自动化部分的核心内容。

(3) 注重实践与应用,详细介绍 SPIN/UPPAAL/PRISM 等典型形式验证工具的使用方法,并结合实例分析,达到理论学习与实际应用的有机结合。

该教材自出版以来,受到国内形式化方法与软件工程相关领域高校教师和学生的广泛关注,目前已被全国多所高校选用作为高年级本科生和研究生的教材和重要参考书。经过教学实践检验,使用效果良好,曾获苏州大学精品教材奖,在2020年11月的首届中国软件大会形式化方法教育论坛上受到与会同行专家好评。但与其他课程相比,由于形式化方法基本内容高度抽象,学习难度较大;因此,为了更好地适应本科生学习形式化方法的需求,有必要对教材做进一步修改完善。同时教材第1版出版至今已六年,这期间形式化方法又有许多重要的新进展,如信息物理系统(Cyber-Physical Systems, CPS)的形式化方法已成为近年来国内外计算机科学与软件工程领域的一个研究热点。CPS 作为“德国工业 4.0”、“美国工业互联网”、“中国制造 2025”等一系列国家级战略规划的关键技术,目前已成为支撑和引领全球新一轮产业变革的核心技术体系。美国在2016年发布的《21世纪 CPS 教育报告》认为 CPS 是一个新的工程师职业,强调了 CPS 教育的重要性和紧迫性。作为江苏省高校重点建设教材,该教材将继续修订完善,及时补充反映形式化方法学科最新知识、技术和成果的内容,与时俱进。

5.2 微课建设

“翻转课堂”是信息技术与教育教学深度融合的一条有效路径,它以微课为主要载体,将知识传授的过程放在课外,让学生在课前自主完成对知识点的学习和掌握,而课堂上则以答疑互动、提升学生能力为目标,有针对性地设计和开展课堂教学活动的一种新型教学模式。以形式化方法微课程建设为例:

(1) 以视频为主要载体,针对《形式化方法》课程的重点、难点内容和实验操作、疑难问题解答等进行相关教学资源与教学活动的设计,可以供学生进行自主学习。

(2) 涵盖《形式化方法》课程的主要教学内容。每个微视频时长8-10分钟;知识点之间形成网状结构,保证知识点之间的联系性。

(3) 建设《形式化方法》微课程网站,提供配套微课程的微教案、微课件、微习题、学习指南等辅助性教学资料等;网站将提供课程展示、教学与学习、作业与测试、监控与评价和师生交互等网络学习功能,并对资源服务与网络学习的各个环节都提供了有力的支持。

以学生发展为中心,从学习者的“学”出发,充分实现“以教为主”向“以学为主”转变,“以课堂为主”向“课内外结合”转变,加强师生互动;探索基于微课的翻转课堂教学模式改革,对于构建线上线下相结合的混合式教学模式,推进信息技术与教育教学深度融合具有重要的意义。

6 通专融合、培养计算思维与创新思维能力

2006年,美国卡内基·梅隆大学计算机科学系主任 J.M.Wing(周以真)教授在 ACM 通讯上发表了题为《计算思维》的文章,首次提出了“计算思维是运用计算机科学的基础概念去求解问题、设计系统和理解人类的行为。它包括了涵盖计算机科学之广度的一系列思维活动。”计算思维这一概念提出后,立即得到美国教育界的广泛支持,也引起了欧洲的极大关注。目前,计算思维已成为国际计算机界广为关注的一个重要概念,也是我国计算机教育界重点研究的课题之一。

计算思维是人类科学思维活动固有的组成部分。人类在认识世界、改造世界过程中表现出了三种基本的思维特征,即实证思维、逻辑思维和计算思维。以能行性、构造性、模拟性为特征的计算思维方式在现代科学的形成过程中逐步清晰。随着计算机技术的出现及其广泛应用,更进一步强化了计算思维的意义和作用。计算科学已经和理论科学、实验科学并列成为推进社会文明进步和科技发展的三大手段。

联合国教科文组织在 2019 年发布的《人工智能教育报告》中指出,虽然计算思维明显属于计算机科学领域,但它是一种在其他学科中普遍应用的能力。2019 年出版的阐述中国计算机教育发展与改革的《计算机教育与可持续竞争力》(简称“蓝皮书”)指出,计算思维是以信息和信息运动为认知对象和操作对象的思想及方法论,因此是涵盖所有学科的第三种科学思维范式。

作为计算机和软件学科的核心认知能力,计算思维能力绝不仅仅是编程能力,也不纯粹是掌握某些程序设计语言,还包括应用软件来创新解决问题以及由此所需的创新思维能力。计算思维与创新思维等其它认知能力相互融合、相互作用、相互影响、不可分离,已成为目前大学通识教育的重要组成部分和新时代大学生必备的核心竞争力,

随着对于计算思维理论的深入研究,以及实践应用的经验增长,关于计算思维的本质内涵也有了越来越深刻的认识,计算思维不仅仅是计算机科学家解决问题的思想方法,也是所有科学家在使用计算时所具有的思维模式,它的关键是计算模型。而在物理学、生物学等不同的学科里,计算模型具有不同的形式和性质。计算思维是覆盖所有学科的思维模式,并且在不同学科中有不同的表现和内容。

近年来,由于信息技术的快速发展,人类社会由传统的物理世界和人类世界组成的二元空间,进入了物理世界、人类世界和信息世界的三元空间,并且正在向物理世界、人类世界、信息世界和智能体世界的四元空间变化。大数据和人工智能等新领域迈入了科学和社会舞台的中心,促进了 AI 赋能的新时代发展。针对大范围和大数量的信息分析,以及各种人工智能体的研究、设计 and 应用,产生了许多新的计算模型、算法形式和计算技术,这些进展推动了计算思维更加系统和深刻的认知,进入了新的发展时期,即计算思维 2.0 时代。

计算思维 2.0 的渗透性也带动了形式化方法与其他学科的交叉融合。在每一个学科里,都蕴含着丰富的计算思维内容,当代物理学、生物学等各学科也提出了一些新的计算模型,并且对于学科的发展起到了创新甚至革命的作用。例如在生物研究领域,计算建模和分析已经成为一种重要方法,例如 *Naïve T cell differentiation* 的时序行为建模和分析。这些研究有力地促进了形式化方法发展,也促进了医疗生命科学的发展,并为医工结合交叉提供了一个明确的方向。

在当今软件日益成为社会基础设施的时代,形式化方法将与人工智能、网络空间安全、量子计算、生物计算等领域和方向交叉融合,得到更加广阔的应用。

7 结束语

本文在分析目前国内外高校形式化方法教育现状的基础上,构建了形式化方法课程的基本内容与知识体系,融入课程思政、课程育人;提出了以学生发展为中心的敏捷教学新形态,探索基于微课的翻转课堂教学改革,构建线上线下相结合的混合式教学模式,推进信息技术与教育教学的深度融合;建设并不断完善形式化方法优质教材,最后探讨了通识教育与专业教育有机融合,培养学生计算思维与创新思维能力以及带动形式化方法与其他学科交叉融合的作用和意义。

参考文献

- [1] 国家自然科学基金委员会,中国科学院编. 中国学科发展战略: 软件科学与工程[M]. 北京: 科学出版社, 2021. 1
- [2] 计算机教育 20 人论坛报告编写组. 计算机教育与可持续竞争力[M]. 北京: 高等教育出版社, 2019. 1
- [3] 教育部软件工程学科课程体系研究课题组. 中国软件工程学科教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005. 5
- [4] 王戟, 詹乃军, 冯兴宇等. 形式化方法概貌[J]. 软件学报, 2019, 30(1): 33-61
- [5] CCF 形式化方法专业委员会. 形式化方法的研究进展与趋势[C]. 中国计算机学会年度进展报告, 2018: 1-64
- [6] J. M. WING. Computational Thinking[J]. Communications of the ACM, 2006, 49(3):33-35.
- [7] 陈国良, 李廉, 董荣胜. 走向计算思维 2.0[J]. 中国大学教学, 2020. 4:24-30
- [8] 古天龙, 董荣胜. 欧洲高校计算机专业的形式化方法课程教学[J]. 计算机教育, 2008. 10:99-103
- [9] 古天龙. 软件开发的正式化方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005. 1
- [10] 缪淮扣, 陈怡海. 软件形式规格说明语言---Z[M]. 北京: 清华大学出版社, 2012. 11
- [11] 李均涛. 高校计算机专业形式化方法课程教学研究[J]. 大学教学, 2012, 1(2): 73-74
- [12] 张广泉. 面向校企合作的软件工程人才培养模式探讨与实践[J]. 计算机教育, 2008. 21: 29-32
- [13] 《软件形式化方法》课程教学改革与探索[J]. 计算机科学, 2013, 40(11): 74-77
- [14] 张广泉. 形式化方法导论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2015. 12
- [15] 沈波, 张世永, 钟亦平. 无线传感器网络分簇路由协议[J]. 软件学报, 2006, 17(7): 1588-1600