

## 人才培养

# “后摩尔”和大数据时代的计算机系统设计方法学

刘宇航

中国科学院计算技术研究所

特邀专栏作家

关键词：计算机系统设计方法学 历史思维 计算思维  
数据思维 结构思维

编者按：在芯片成为我国“卡脖子”技术的背景下，如何快捷地大规模培养计算机系统领域的设计人才，是一个亟待解决的现实问题。我们以“蒙太奇”剪辑的方式，邀请了《计算机系统设计方法学（历史-计算-数据-结构）》一书的作者、中国科学院计算技术研究所刘宇航副研究员和包云岗研究员，为该书作序的中国工程院院士李国杰和中国科学院院士陈国良，围绕这一主题展开探讨，以期加快计算机系统领域人才培养进程，优化培养路径。

## 引言

问：《计算机系统设计方法学（历史-计算-数据-结构）》<sup>[1]</sup>近期正式出版了，请简要介绍一下撰写这本书的初衷。

刘宇航：在芯片成为我国“卡脖子”技术的背景下，如何培养计算机系统领域的设计人才，是一个亟待解决的现实问题。任何事物或事件总是与特定的时间和空间关联在一起，并给予特定的意义。1946年现代计算机诞生，2006年计算思维被正式提出<sup>[2]</sup>，目前我们处于一个新的时间节点。人类已步入21世纪的第三个10年，计算机科学与技术正处于一个新的历史关口，面临百年未有之大变局。

包云岗：我们在工程项目上取得了一些“阶段性成果”，希望通过此书初步尝试构建工程与科学

之间的桥梁。

问：此书主要关注我们这个时代的哪些新特征呢？

刘宇航：我们所处的时代之所以新，是由多个新因素决定的，体现为多个新特征<sup>[3]</sup>。例如摩尔定律（Moore's Law）、登纳德缩微定律（Dennard's Scaling Law）逐渐失效，需要创新更多的体系结构，而不是粗放地扩张硬件资源；绿色、低功耗、高能效，成为衡量计算机系统质量的重要指标；大数据应用逐渐增多，数据密集型计算成为常态，数据科学的概念逐渐形成；智能手机成为用户使用最多的客户端形式，使边缘计算和云计算之间产生更多的博弈；芯片技术和超级计算机成为大国竞争的重要筹码；量子计算、智能芯片均在蓬勃发展；等等。上述因素不仅正在快速发展，而且相互作用、叠加

作用, 工业界需要能适应和反映这些变化的计算机系统, 学术界和教育界需要训练和培养掌握计算机系统设计方法学的设计者, 以弥合工业界计算机系统研发的人才缺口。

**问:** 是的, 这是一个重要需求, 要想办法解决。那么, 计算机系统设计方法学具体指什么?

**刘宇航:** 随着计算机复杂性的提高, 计算机科学理论研究者、应用程序编写者、体系结构设计者之间呈现出愈来愈强的分化, 三者之间往往缺乏相互了解更谈不上深刻理解, 导致出现理论成果难以被实际应用, 软硬件协同设计和优化难以展开等弊端。解决这些弊端的根本途径是让每个人从不同的角度认识计算机系统这个共同的研究对象。多角度的不同视图组合在一起, 就构成了以全局观、整体观为核心的计算机系统观。认识论和方法论是统一的。《计算机系统设计方法学(历史-计算-数据-结构)》这本书论述的是计算机系统观, 是认识论, 同时也是应用、理解和设计计算机系统的方法学(methodology)。读者读完此书后, 可以带着这个“武器”, 运用计算的办法和数据观点解释、改造世界, 设计计算机系统和芯片体系结构, 开发计算机软件并进行性能优化, 通过四种思维及组合解决科学问题和现实问题。

**问:** 相比具体的方案或实物产品, “思维”这个概念比较抽象, 例如计算思维尽管很重要且被广泛传播, 但理解和把握计算思维似乎并不容易, 能否简要地说一下什么是思维?

**刘宇航:** 此书中的思维, 是指设计者在设计活动中进行思考的模式或范式(thinking patterns或mindsets)。设计者在设计活动中尽管可能存在随机性成分较多的头脑风暴, 但更多的是有规律可循的, 这种思维上的规律性经过系统化总结后就变成了方法学。计算机是一种机器, 和所有其他机器一样都是人类设计和制造的, 因此计算机的“智能”究其来源, 只能是人类本身的“智能”, 更具体地说, 只来源于人类从事计算机科学研究和应用时所呈现和

拥有的“智能”, 这就是我们要论述的“计算机系统设计的四个思考维度”。

**包云岗:** 此书并不是阐述某项具体的技术, 更多的是为读者展现和剖析计算机系统领域中不同的思维方式。此书的选题因为具有基础性、通用性和概括性, 能够对广大从事基础研究的研究者和具体设计的实践者起到启发、指导和参考作用。对于同一事物, 人类在不同时期可能给予截然不同的评价。我们强调用辩证的眼光看待事物, 看待选择, 看待新旧。柏拉图认为“思维是灵魂的自我谈话”; 爱因斯坦认为“思维世界的发展, 在某种意义上, 就是对惊奇的不断摆脱”。艺术与技术的一个重要区别在于前者具有极大的随机性, 而后者具有极大的确定性。我们总结归纳了人类从事计算机科学的思维, 从广大的随机性中梳理出一些规律, 整理出一些确定性的东西, 弥合“人”与“物”的鸿沟、艺术与技术的鸿沟、“形式主义”与“实用主义”的鸿沟、抽象与具体的鸿沟、“随机性、偶然性”与“确定性、必然性”的鸿沟。

## 意义

**问:** 请陈国良老师谈一下, 怎样看待计算思维在计算机教育中的作用? 计算思维或者更多的思维能否有助于解决我国的“卡脖子”问题?

**陈国良:** 科学思维是一切科学研究和技术发展的创新灵魂。2006年3月, 时任美国卡内基梅隆大学计算机科学系主任、美国计算机学会(ACM)会士和美国电气与电子工程师协会(IEEE)会士周以真(Jeannette M. Wing)教授在《美国计算机学会通讯》(CACM)上提出计算思维<sup>[3]</sup>, 产生了较大的影响力。多年来, 我一直倡导计算思维, 曾同周以真教授面对面交流。我之所以倡导计算思维, 是因为在各国(包括我国和美国)的计算机教育中仍存在问题。互联网的普及使计算机科学技术呈现泛在化、大众化的发展趋势。计算机的易用性和自身技术的巨大进步, 使很多人质疑大学计算机教育的必要性。很多人认为我国当前的芯片“卡脖子”问题仅仅是工艺制造问题, 而不是体系结构设

计问题。这些认识实际上都是由于不能准确完整地  
了解计算机学科的内涵而造成的。

**问：**从大学计算机教育意义的角度看，教授计算机系统设计方法学的意义是什么？为什么要在计算思维的基础上考虑历史思维、数据思维和结构思维？

**陈国良：**大学计算机教育的意义不是让学生被动地接受关于计算机的知识，而是要培养和塑造能够主动创造知识的大脑。计算机设计方法学是设计的一般思想，不是设计的具体结果。教授计算机系统设计方法学，对于大学计算机教育来说，是一种新尝试，具有重要意义。我们应该纠正计算机科学等同于计算机编程，认为计算机科学的基础理论已完成，剩下的只是工程问题等错误观点，端正我们对计算机科学的认知。

计算思维自提出以来已经过去了十多年。从计算技术的角度看，人类社会正处于多个新特征汇聚、迸发和叠加的新时代，并将持续相当一段时期。工艺水平提高带来的资源红利越来越少，延续摩尔定律的难度越来越大，“存储墙”问题日益严重，大容量、非结构化的大数据应用将不断涌现，云计算中大规模的分布式资源共享带来了性能和用户体验的不确定性，新型存储介质层出不穷，新的计算模型（如量子计算、DNA 计算）在短期内难以实现产业化等。这些新特征都需要与之适配的计算机系统设计方法学。

**李国杰：**人们常说：“授人以鱼，不如授之以渔”，这是说，教给他既有的知识，不如教给他解决问题的方法。书店里传授知识的书很多，但真正教人解决问题的书很少，涉及计算机系统设计方法的书几乎没有。而这本书既不是一章一节地讲授计算机系统结构的专业知识，也不是教你如何一步一步地设计一台简单的计算机，而是从思维模式的角度阐述计算机体系结构设计过程的规律，所以书名叫作《计算机系统设计方法学（历史 - 计算 - 数据 - 结构）》。请注意，方法学比具体的方法高一个层次，是对设计方法的归纳与总结。历史上最早提出方法学概念的是哲学家笛卡尔，他于 1637 年出版了译

本名为《方法论》的哲学论著，这本书中提出的“化繁为简”的方法，对西方人的思维方式产生了极大的影响，至今仍是科学研究的主要方法。

科研人员和工程师为什么要重视“方法学”？知识关注“是什么（know what）”，而方法学关注“怎么做（know how）”，本质上是提高运用知识解决问题的能力。“知”的归宿是“行”，“知行合一”必须有解决问题的能力。我国的高等教育只有从传统意义上的素质教育转向能力教育，才能实现与新产业革命的人才需求对接。一个人的能力很大程度上取决于他的思维模式，思维僵化、眼光狭窄的人很少具备做大事、做难事的能力。我国计算机界的科研水平逐年提高，但与国际上计算机学科的开创者们相比，我国计算机学者在思维的高度、广度和深度上还有相当大的差距。此书通过剖析图灵、冯·诺依曼等大师的心路历程，让读者清楚地看到我国计算机学者与国际计算机学科开创者在这方面的差距。在国际竞争日益激烈、科技界强调自立自强的今天，阅读这种令人脑洞大开的书，颇有裨益。

## 内涵

**问：**在你们看来，《计算机系统设计方法学（历史 - 计算 - 数据 - 结构）》这本书论述的方法学的核心要点是什么？有哪些特色？

**陈国良：**“历史、计算、数据、结构”（History Calculation Data Structure, HCDA）正四面体，具体可解释为：

第一，历史是体系结构设计的起点，也是体系结构设计的归宿。与黑格尔提出的“哲学就是哲学史”命题一样，该书提出“体系结构设计方法学就是体系结构设计史”，体系结构设计方法学是设计历史的思想，体系结构设计史是设计思想的历史。

第二，计算是设计的体系结构呈现的功能，是用户求解问题时最关心的内容。狭义地看，计算对应冯·诺依曼体系结构五大部件中的运算器；但是，从系统论的整体观点看，计算是整个机器呈现的功能。

第三，数据是计算的初始对象，也是计算的

间产物和最终产物。狭义地看，数据对应冯·诺依曼体系结构五大部件中的存储器、输入/输出设备；但是，在机器运行时，数据遍布全部五大部件。数据传输带来的时延、功耗对机器的性能产生重要影响。

第四，体系结构不是机器物理载体自身，而是在抽象层次上高于物理机器载体，是机器物理载体的逻辑本质。体系结构贯通计算与数据，组织五大部件，体系结构除了关注五大部件各自的性质，还尤其关注五大部件之间的关联、协同、匹配、均衡。

**问：**那么，历史、计算、数据、结构这四个方面相互具有怎样的关系？

**陈国良：**这四个方面构成一个有机的体系，相应的四种思维构成了一个思维体系——“正四面体设计方法学”。历史思维为其他三种思维提供动机基础和工作基础。计算思维和数据思维要通过结构思维完成具体实现。正四面体的顶点、棱、面在设计方法学上分别有具体的意义。

**李国杰：**近几年国内许多学者都在谈论和提倡计算思维，该书作者通过分析和归纳，认为计算机系统设计者除了应具有计算思维，还应具有历史思维、数据思维和结构思维，这种扩展是有道理的。如同黑格尔提出的“哲学就是哲学史”一样，体系结构设计方法学就是体系结构设计史。今天的设计者必须了解计算机发展的历史，只有知道来龙去脉，才能融会贯通、推陈出新。

数据是信息处理的对象，在数据倍增速度超过摩尔定律的时代，系统设计者必须了解大数据的特征和需求。结构决定性能、功耗、安全等属性，结构化程序设计曾经是软件理论研究的主题，如今网络的出路也在于结构化，结构思维必然是系统设计的主线。如果在历史、计算、数据、结构四个维度都能畅通地行走，就能成为一个有作为的计算机系统设计者。

一个复杂的计算机系统充满各种矛盾，存储和计算、分布和集中、异步和同步、批量处理和流式处理等都是矛盾点。该书各章内容都围绕计算机系统内的各种矛盾展开。用矛盾论的思维方法理解计算机系统，是计算机系统科研人员成长的必经之路。

计算机系统的主要工作就是在对立统一的各种矛盾中优化，系统的优化实际上就是各种参数的权衡（tradeoff），如果科研人员不具备全局的、动态的辩证思维，就会顾此失彼、因小失大。

## 展望

**问：**作为领域专家，你们对《计算机系统设计方法学（历史—计算—数据—结构）》一书的年轻作者有怎样的印象？你们对我国计算机系统的未来有怎样的期许或希望？

**陈国良：**该书作者提出了“历史、计算、数据、结构”四位一体的计算机系统设计方法学，拓展和推广了计算思维。2009年，我在中科院计算所第一次见到刘宇航时，他还是一个埋头调试计算机电路的研究生，现在已成长为一名稳重踏实、勤于思考的副研究员，开始指导研究生了。在计算思维被提出十几年后，我很高兴地看到我国学者在同样的刊物CACM上提出了正四面体设计方法学，更难能可贵的是，他们不辞辛劳地、详尽地将方法学以专著的形式出版，广泛地促进了我国计算机体系结构设计领域的发展。

**李国杰：**一本讲思维规律的书，如果只有空洞的哲学教条，读者读起来可能会觉得索然无味。该书的两位作者刘宇航和包云岗，都是三四十岁的青年科学家，都工作在计算机系统研究的一线。在这本书中，他们把具体的技术融入抽象的说理中，既能像学术专著一样做到术语精准，又像科普书那样通俗生动。作者还将一些最前沿的学术进展嵌入到历史脉络的梳理中，让读者穿越历史与未来，别有一番感触。

**陈国良：**全书视角统一，撰写认真，内容严谨，注重思想性，用统一的视角重新审视各种具体工作，发掘它们之间的内在联系和统一性，对包括图灵和冯·诺依曼的大量原始文献进行了考证，提出了很多新观点和新理解。该书提出的新设计方法学将有助于教育者、研究者、工程开发者更好地理解与设计新型的计算机系统结构，适应新时代的挑战。希

望以此为起点和依托，培养出更多的目前我国紧缺的计算机系统方面的人才。

**李国杰**：摩尔定律的作用从2000年左右开始放缓，到2018年，摩尔的预测与目前的集成电路能力之间的差距已有15倍。计算机性能提高的希望寄托在系统结构的改进与创新上，计算机架构师将迎来一个激动人心的黄金时代，20世纪60年代，从科学计算的负载中归纳出定点与浮点，是计算技术的重大突破。现在需要对动态变化、不确定的智能应用负载做出新的科学抽象，归纳出适合新应用的指令系统、微体系结构、执行模型和应用程序编程接口（Application Programming Interface, API）界面。今后10年内，通过系统结构学者和工程师的努力，计算机系统的性能再提高1000倍、计算机系统性功耗比提高几个数量级是完全可能的，中国学者应该为此做出无愧于时代的贡献。

## 结束语

**问**：这是一本专业书籍，还是一本科普书籍？哪些读者能从中受益？

**刘宇航**：此书介绍的设计方法学是思维意义上的，读者对象不限于计算机专业研究者，还包括当前以及将来一切有志于了解、应用或研究计算机的人。具体来说，包括三类读者：一是初学者，对他们来说，计算机是需要了解和认知的人类文明标志物之一；二是应用者，包括大学理工科以及社会科学中需要把计算机作为辅助工具的人员，他们对计算机的理解不够深入，对他们来说，计算机是应用工具；三是研究者，包括计算机学科各个分支的研究人员，他们深耕计算机的某些分支，但对计算机系统可能缺乏整体性的把握。该书如果能够让更多的人对计算机系统包括芯片系统（SoC）领域的问题和方法有更深入的理解、思考和感悟，就达到目的了。

**包云岗**：针对上述读者对象，此书在撰写时有以下3点考虑：（1）坚持具体与一般的统一，讲具体的技术，也讲一般的方法，讲宏观的思想，把“技

术—方法—思想”统一成一个从具体到抽象、从特殊到一般的完整体系。（2）坚持专业性与科普性的统一，注重专业性，术语精准，有理论深度，也注重科学普及与启发性，注重生动、通俗、形象。（3）坚持前沿与历史的统一，介绍学术界最先进的成果和工业界最新的解决方案，也梳理历史脉络，在历史中把握、定位和认知前沿。

**李国杰**：一般的科普书为了照顾多数读者，概念讲述得往往不够严谨，而此书特别重视概念的精确性，澄清了一些似是而非的模糊观念。例如，什么是算法、什么是计算方法、操作系统是不是算法、算法可不可以有随机性，等等，该书都梳理清楚了。由于该书的作者在计算机系统结构方面做过深入的研究，该书不只介绍了他人的成果和观点，也阐述了作者自己的科研成果和标新立异的技术观念，比如，计算与数据的对称性，局部性是并发性的特例，并行性与局部性是互斥关系，标签化冯·诺依曼体系结构，可区分、可隔离、可优先调度（Distinguishable Isolatable Priority Scheduling, DIP）能力的猜想，等等。该书内容庞博、思想深刻，值得一读。 ■



**刘宇航**

CCF 高级会员，CCCF 特邀专栏作家，CCF 职业伦理和学术道德委员会常务委员。中科院计算所副研究员。主要研究方向为计算机体系结构、高性能计算、存储系统、智能并发系统。主页：[liuyuhang.cc](http://liuyuhang.cc)，[liuyuhang@ict.ac.cn](mailto:liuyuhang@ict.ac.cn)

## 参考文献

- [1] 刘宇航, 包云岗. 计算机系统设计方法学（历史—计算—数据—结构）[M]. 北京：高等教育出版社，2022.
- [2] Wing J M. Computational Thinking[J]. *Communications of the ACM*, 2006, 49(3): 33-35.
- [3] Liu Y, Sun X H, Wang Y, et al. HCDA: from Computational Thinking to a Generalized Thinking Paradigm[J]. *Communications of the ACM*, 2021, 64(5): 66-75.

（本文责任编辑：郭得科）