

学术观点

计算概念谱系：算势、算力、算术、算法、算礼*

刘宇航¹ 张菲²¹中国科学院计算技术研究所²美国康奈尔大学

关键词：算势 算力 算术 算法 算礼

引言

计算概念具有丰富的内涵，但由于概念体系不完善导致的名实之间的矛盾，在日常交流中计算概念内涵的丰富性往往不能被准确全面地反映。计算概念看似简单，实则不然。计算不不只是指加减乘除；进一步说，计算也不只是指数值计算；更进一步说，计算也不仅仅是指数学。究竟什么是计算，计算概念包含哪些方面，这些方面之间具有怎样的关系，这些问题似乎比较基本，但答案并非显而易见。计算概念包括数学理论、机械装置、电气装置等方面，具有计算理论、计算技术、计算机器等不同内容，涉及中国古代数学的算法、西方数学的形式推理等。准确理解计算概念，涉及包括数学、物理学在内的整个科学体系的深层次的核心内容，需要正确把握科学与艺术、机械与巧思、几何与代数、人脑与电脑、人类智能与人工智能、工艺基础与上层建筑、证明与计算^[1]、功能与性能等一系列范畴对之间的关系。

计算概念因为计算技术本身具有深刻、普遍的影响力而在社会生活和科学研究中被高频使用，因此计算概念的准确性、完备性十分重要，但目前仍存在较多问题：算力和算法是人们经常使用的概念，

但实际上算力本身的定义并不清晰——算力是指计算机系统峰值计算能力，还是指某个应用的计算能力？假如是指计算机系统峰值计算能力，那么是指哪一指令类型的计算能力？算力是否受算法的影响？算术和算法的联系和区别是什么？相对经典计算来说，量子计算提升了计算的哪个方面？如何以统一的视角看待经典计算和量子计算？在计算概念中，如何体现作为计算机系统设计者的人的作用？诸如此类的问题很重要，但使用目前的计算概念很难清楚地回答，因为除了应用程序千变万化、计算机指令集中指令类型丰富多样、计算能力是关于多个因素的多元函数等客观因素外，还包括计算概念体系尚不完善。长期以来，我们对西方主导的计算概念采取“拿来主义”的做法，没有及时对现有计算概念进行审视、梳理、重构和补遗。本文吸收、借鉴和应用我国古代思想，基于中国传统思想文化对计算概念进行对应与分类，提出了计算概念谱系。

计算概念谱系化的意义

计算概念体系的完备性及准确性，在文化发展和社会交流中具有重要作用。语言是思维的外壳。

* 本文受权节选自：刘宇航，张菲. 计算概念谱系：算势、算力、算术、算法、算礼[J]. 中国科学院院刊，2022，37(10):1500-1510.

概念的缺位或粗糙影响思维的表达。东西方有着不同的历史文化特点，发展进程不完全同步，在计算技术领域也是如此。清末数学家李善兰在翻译西方著作时，首创了汉语中原来并不存在的“微分”“积分”“函数”等名词。1923年，物理学家胡刚复教授将“entropy”翻译为“熵”，这个字之前在汉语中并不存在。计算机科学家夏培肃院士是英文 bit（位）、memory（存）的首次中文翻译者，中国科学院计算技术研究所原研究员许孔时是英文 software（软件）的首次中文翻译者。诸如此类的概念创新，为汉语世界引入了高频使用的新元素，都具有重要开创意义。计算概念谱系化，就是建立计算概念的“光谱”，即将原来笼统的计算概念解剖为多个子概念，这些子概念均有客观存在的对应物，而且这些对应物之间的区分与转化十分重要。也正因为这样，谱系化就显得十分必要。

计算概念的谱系

我国古代曾经产生的深刻的哲学思想和技术思想，可用于审视当代的计算技术现状，有助于我们深入理解计算概念的内涵、重新梳理建立计算概念的体系。社会的运行与治理的过程类似于计算的过程，具有并发、秩序等属性，因此古代先贤的社会思想可被计算技术领域借鉴。冯友兰在《中国哲学简史》中对中国古代哲学思想进行了系统的归纳梳理^[5]：“西周封建社会根据两条原则办事，一条是‘礼’，一条是‘刑’。礼是不成文法典，以褒贬来

控制‘君子’即贵族的行为。刑则不然，它只适用于‘庶人’，即平民。所以《礼记》中有：‘礼不下庶人，刑不上大夫。’”这里实现了二分类，其中“刑”是法家的研究对象，又可以一分为三。冯友兰^[5]指出，“韩非是法家最后的也是最大的理论家，在他之前，法家已经有三派，各有自己的思想路线。一派以慎到为首，慎到与孟子同时，他以‘势’为政治和治术的最重要的因素；一派以申不害为首，强调‘术’是最重要的因素；一派以商鞅为首，最重视‘法’。‘势’指权力、权威，‘法’指法律、法制，‘术’指办事、用人的方法和艺术，也就是政治手腕。”韩非认为，“这三者都是不可缺少的”。

与上述历史思想相对应（见表1），计算概念可以细分为多个组分，分别是算势（computational potential）、算力（computational power）¹、算术（computational arithmetic）、算法（computational algorithm）、算礼（computational ritual），它们构成了计算概念的谱系。通过这个谱系，能够深刻、全面地理解和把握计算概念内涵本身具有的各个方面及其相互关系。这5个组分中，算礼具有鲜明的中国文化特点，算势与算力做了区分，算法与算术做了区分。这些区分能够清晰地反映计算技术领域的痛点，有助于讨论解决这些痛点对应的挑战性问题。

算势

算势是某种理想状态或条件下最大的潜在计算能力，不同数量级的算势能求解的问题复杂度也有数量级的差异。作为法家“势”派的代表，慎子曰：“飞

表1 计算概念细分与中国古代思想的对应

中国古代思想	中国古代思想细分	对应计算概念的细分
礼	礼是不成文法典，以褒贬来控制“君子”即贵族的行为	算礼强调计算的系统可被人脑直接评估
刑	以慎到为代表，强调“势”（权力、权威）	算势强调计算速度意义上的潜能，算力强调实际获得的计算能力
	以申不害为代表，强调“术”（办事用人的方法和艺术）	算术强调计算的技巧，如中国乘法使用了与印度乘法不同的技巧
	以商鞅为代表，强调“法”（法律、法制）	算法强调计算的机械的规则

¹“算力”的更准确的英文翻译是“computility”，详见本术语文章。

龙乘云，腾蛇游雾，云罢雾霁，而龙蛇与蚂蚁同矣，则失其所乘也。”^[6]待求解问题与计算能力之间的关系，就像飞龙与云彩之间的关系。

算势是社会生产力的一个重要指标，足够的算势是应用程序或计算任务能够运行的基础。据《2020全球计算力指数评估报告》显示，计算力指数平均每提高1个百分点，数字经济和国内生产总值（GDP）将分别增长0.33%和0.18%。2016年，谷歌旗下DeepMind公司研发的人工智能机器人AlphaGo横空出世，击败了世界著名围棋棋手李世石，技惊四座。但不能忽视的是，训练AlphaGo花费了价值约3500万美元的计算资源。2018年，谷歌提出含有3亿参数的双向语言表征模型（BERT），将自然语言处理推向了一个前所未有的新高度，但仍然是以足够的计算能力作为基础。

每一个量级的算势对应一个可求解的问题域（以下简称“可解域”）；随着算势增大，可解域也在增大（见图1）。对于算势 A 和算势 B ，它们对应的可解域分别是 Q_A 和 Q_B ，若 $A < B$ ，则 $(Q_B - Q_A)$ 包括的是算势 B 能够求解而算势 A 不能够求解的问题。 $(Q_B - Q_A)$ 体现了算势增加对求解某些问题具有的不可替代的使能作用。算势的单位是随应用程序而变化的。例如：对浮点操作密集型应用程序来说，算势的单位是“每秒浮点操作数”（FLOPS）；对于事务处理密集型应用程序来说，算势的单位是“每秒事务数”（transactions per second）。

算势是因时因地而变的——每个时代都有自己的算势，每个国家或地区也都有自己的算势。2022年我国提出并开始实施“东数西算”工程，该工程与“西气东输”“西电东送”“南水北调”等一样都是资源跨区域调配战略工程。针对我国算势分布总体呈现出“东部不足、西部过剩”的不平衡局面，引导中西部利用能源优势建设计算基础设施——“数据向西，算力向东”，服务东部沿海等算力紧缺区域，以解决我国东西部算势分布不均衡、供需不平衡的问题。

算势的概念可以促进我们理解经典串行计算、经典并行计算、量子计算之间的联系和区别：经典并行计算（或超级计算）相对于串行计算，是为了

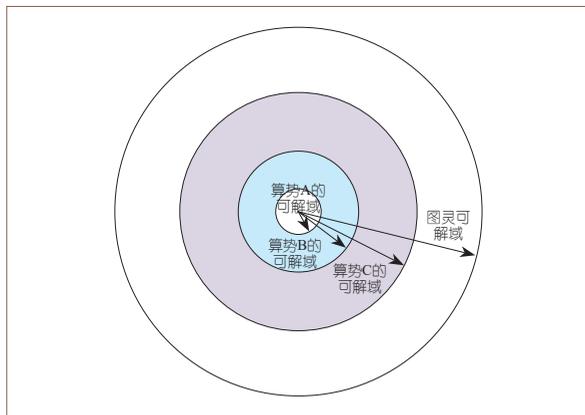


图1 可解域随着算势的增加而不断膨胀

增加算势；量子计算相对于经典计算，也是为了增加算势。需要指出的是，1936年图灵研究判定性问题时提出的图灵机模型是串行的^[7]。但经典并行计算、量子计算不会改变问题的不可求解性，也就是说，如果一个问题在串行图灵机上不可求解的，那么使用经典并行计算、量子计算仍然不可解（见图1）。

算力

算力是应用程序能实际获得的计算能力，其上界是算势。算力来源于算势，受限于算势，但不等同于算势。如何弥合两者之间的鸿沟，实现从算势到算力的高效转化，是包括计算机系统结构和系统软件在内的整个计算机学科需要研究解决的核心问题。算势转化为算力的过程依赖很多条件或因素，如应用程序的特征、运行环境的特征、多处理器之间负载是否均衡等。一方面，要注意算势的基本限制作用，尽量提高算势；另一方面，要注意算势向算力的充分转化，尽量充分利用算势。这两个方面目标一致，不可偏废一方。

各种类型的计算机都存在算势向算力转化不充分的问题（见表2）。例如，在超级计算机上，普通用户的很多程序往往效率较低。2022年图灵奖得主杰克·唐加拉（Jack Dongarra）参与编制的线性系统软件包（LINPACK）成为评测超级计算机的工具，但该工具只代表较为理想的情况，因为其中包含良好的局部性、易开发的并行性特点的大量稠密矩阵计算。高性能共轭梯度基准测试（HPCG）则代表

表2 算势与算力之间存在不同程度的鸿沟

应用程序	负载特征	评测重点	应用匹配
LINPACK	规则、浮点密度高	浮点运算平均上界	稠密矩阵计算、深度学习
HPCG	非规则、浮点密度低	浮点运算平均下界	稀疏矩阵计算
Graph500	非规则、定点	数据移动能力	大数据应用
Gordon Bell奖应用	高可扩展	算法大规模扩展能力	特殊案例

了大量实际应用中常出现的不易扩展和开发局部性的稀疏计算和访存模式。测试基准 Graph500 代表了数据密集型应用的情况。戈登·贝尔 (Gordon Bell) 奖应用则代表了算法优化所能带来的效率提升。

算术

算术是关于数值的算法，是狭义的算法，也是最基本、最顾名思义的算法。算术强调四则运算、开方、乘方等计算的技巧。例如，冯·诺伊曼在1945年的EDVAC研制报告中就用了多个章节分别讨论这些方面^[9]。中国乘法和印度乘法就使用了不同的技巧。以两位数和三位数乘法为例，中国乘法建立在逐位相乘的基础上（见图2）；印度乘法建立在与100求差值的基础上，将对角线上的数字之和作为结果的高位，将差值的乘积作为结果的低位（见图3）。从中可以直观地感受到中国乘法和印度乘法使用了不同的技巧。

算法

算法是广义的计算方法，包括数值算法、非数值算法，强调计算的机械的规则。吴文俊等创立和发展了数学机械化^[3]。只有机械化，才能由计算机自动去执行。

尽管算法是由人脑设计，但人脑本身不善于执行机械的规则；同时，大量的问题往往容

易通过机械的规则（即通过算法而不是巧思）来解决。

算法强调2个方面，具备5个特征。2个方面为：（1）功能——能否计算；（2）性能——能以多快的速度计算。5个特征为：（1）有穷性（finiteness）——必须在有限的步骤内终止；（2）确定性（definiteness）——每一步骤必须被精确地、严格地定义，不能有歧义性；（3）输入（input）——有0个或多个输入；（4）输出（output）——至少有1个输出；（5）能行性（effectiveness）——涉及的操作必须足够基本，以致在原理上能用铅笔和纸在有限的时间内完成。

以上5个特征中的能行性涉及一个内容深刻的重要学科方向——可计算性理论^[4]。可计算性理论是很多计算机从业者较为欠缺的知识。可计算性理论中有很多结论与没有经过这方面训练的人的直觉相反，这样的结论实例有：（1）可计算的本质是递归；（2）算法的数量是可数的（而实数的数量是不可数的）；（3）不存在一般过程能够在有限步内判定一个计算过程是否是算法。一个给定的问题是否存在对应的算法，是一个关于“是否可解”的问题；如果存在对应的算法，怎样找出或构造出这个算法，是一个关于“如何求解”的问题。这往往涉及人类对于问题所处领域的理解，也就是通常所说的“know-how”，即技术诀窍、专业知识、私家配方（秘方）。

计算机、算法都是人脑设计的，人工智能归根结底是人类智能的外化（externalization）和自动化（automation）。钱学森在1957年发表的《论技术科学》^[3]中阐述，“……技术科学工作中最主要的一点是对所研究问题的认识。只有对一个问题认识以后才能开始分析，才能开始计算。但是什么是对问题的认识呢？这里包含确定问题的要点在哪里，什么

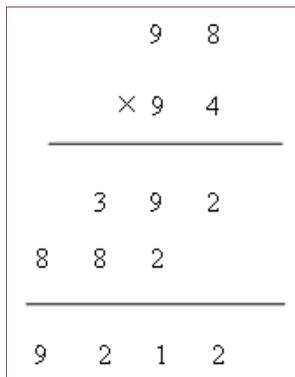


图2 中国乘法算术

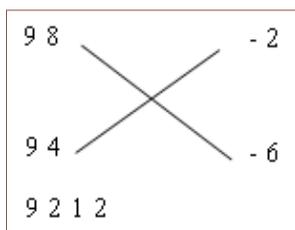


图3 印度乘法算术

是问题中现象的主要因素，什么是次要因素；哪些因素虽然也存在，可是它们对问题本身不起多大作用，因而这些因素就可以略而不计。要能做到这一步，我们必须首先做一些准备工作，收集有关研究题目的资料，特别是实验数据和现场观察的数据，把这些资料印入脑中，记住它，为做下一阶段工作的准备，下一个阶段就是真正创造性的工作了。创造的过程是：运用自然科学的规律为摸索道路的指南针，在资料的森林里，找出一个道路来。这条道路代表我们对所研究的问题的认识，对现象机理的了解。也正如在密林中找道路一样，道路决难顺利地一找就到，中间很可能要被不对头的踪迹所误，引入迷途，常常要走回头路……把问题认识清楚以后，下一步就是建立模型……有了模型了，再下一步就是分析和计算了……”

上面描述的就是人脑构思或构造算法的过程。算法的构思或构造处于人类认识客观世界的最前沿，算法离不开人脑进行的“创造性的工作”，实际上“希尔伯特计划”²失败的原因就在于此，即判定问题的答案是否定的^[7]；也就是说，不存在一般过程能够在有限步内判定一个计算过程是否是算法。

算礼

人脑与计算机之间存在着紧密联系，又存在着内在机制和语义沟通上的鸿沟。人脑具有与计算机不同的特点。相对计算机，人脑有直觉、大局观，但不善于快速精确计算和记忆。计算机是实现或执行人工智能算法的载体；同时，人工智能算法又可以用来设计计算机。但就根源来说，计算机、人工智能算法都是人脑的设计结果，而设计过程本质上就是计算。但是，对大多数研究和设计人员来说，计算机系统长期以来是一个“黑箱”，缺乏可分析的抽象，人脑很难精确、全面地分析。以深度学习为代表的很多人工智能算法存在一个长期以来为人诟病的弊端：人工智能算法是一个“黑箱”，可解释性、透明性、可分析性不强。人脑设计的产物反而不能

被人脑理解，成为一个亟待破解的悖论。

算礼是关于计算如何在计算机系统中进行的制度规范，比算法更接近人脑，更关注计算机系统的整体，强调计算的系统可被人脑直接评估^[8]。算法是关于单一应用内部计算方法的说明，聚焦于应用个体；算礼除了考虑每个算法之外，还考虑运行在同一系统之上的多个算法之间的协调有序，聚焦于系统整体。高通量计算、低熵数据中心都体现了这一点。高通量计算并不关注单个应用或单个请求的性能，而是关注大批量高并发的应用或请求的整体吞吐量。对个体应用而言，其性能一般比理想时（即单独运行时）差，但相对低通量时的排队延迟导致的不可服务性来说，性能有了很大的提升。

算礼是不成文的，相对算法而言是软性的，但其褒贬意义上的影响力不可替代。褒贬就是评估（evaluation），通过褒贬，社会系统之中多个主体之间的关系得到调节和规范，社会系统可以在很多发展可能之中筛选出符合礼的那一种。原型系统实现和基准程序测试往往需要较大的时间成本和资源成本。一方面，设计空间和应用空间都极其庞大，进而设计空间与应用空间的笛卡尔积更加庞大；另一方面，原型系统实现和基准程序测试缓慢。两者造成尖锐的矛盾，增大了实现应用程序与系统结构之间良好匹配的难度。因此，需要通过算礼，在原型系统实现和基准程序测试之前，就能够分析出该系统的主要性质，进而筛掉不合适的候选系统，大幅度提高设计敏捷度，加速人类智能向人工智能的转化、外化、物化的过程。

算礼的必要性毋庸置疑，算礼的可行性需要加强研究。算礼要解决的问题是，在不依赖机器的条件下，如何开展计算机这样的复杂系统的顶层设计。需要解决人脑思维所需要的元素的命名与抽象问题，要能反映计算机系统的实际状况，又要便于人脑记忆与推理。诸如模型、分治、分层、模块化、经验法则等思想或技术可以被运用于此过程，以势能或加速人脑进行系统顶层设计和敏捷开发。

² 由大卫·希尔伯特（David Hilbert）在1920年提出的一个关于公理系统相容性的严谨证明的数学计划。

计算概念谱系组分的相互关系

计算概念谱系将计算概念的内涵细分，形成一个立体的相互联系的有机整体（见图4）。算势、算力、算术、算法、算礼是同一事物（计算）的不同方面，它们有不同的侧重点，又有相同的目的或价值取向，即为了计算系统更快、更好地完成待求解的应用问题。图4是一个三角双锥，算术、算法、算礼3个因素构成一个三角形，本质上是计算的映射面，其上部和下部各有一个顶点，下部顶点是算势，上部顶点是算力，算势向算力的转化是计算的主线（映射线），计算的映射面的状况决定了算势向算力的转化率。

算礼是算法的前序，算法是算术的推广，算势是算力的基本限制。我们需要攻克高端光刻机技术，不断地改进工艺，扩大算势；同时，我们要通过跨层垂直优化^[10]等技术提高算势向算力的转化率，在算势不变或增加缓慢时，仍可获得较高的算力。

算势与算术、算法之间有着微妙的互补或替代关系。例如，当算势足够大的时候，算势的强大可以弥补算术的笨拙，所以此时算术或算法技巧是否巧妙高明未必很重要，只起到锦上添花的作用；当算势不充分，如芯片制造工艺被“卡脖子”或者东西部算势不均衡时，算术或算法性能优越就非常必要，应起到雪中送炭的作用。

人工智能来源于人，最终又服务于人，因此计算的内涵在各个方面、环节之间的转化率问题至关重要。

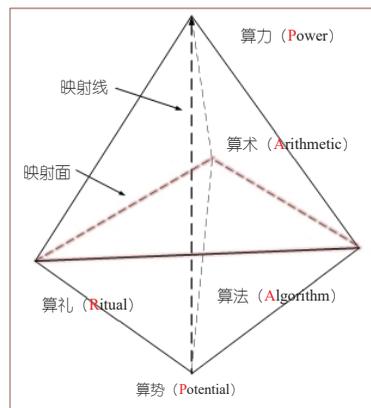


图4 计算概念谱系

算礼关注人类智能向人工智能的转化，建立人脑与电脑之间的桥梁；算法关注输入与输出之间的转化过程，建立已知与未知之间的桥梁；算礼与算法均提供转化可能、提高

转化效率。算势与算力之间有不同程度的鸿沟，存在转化的问题；算力与人类日益增长的美好生活需求之间也存在鸿沟，存在转化的问题。

结束语

计算概念具有重要作用，需要我们建立清晰的谱系以彰显其丰富的内涵。将中国传统思想文化的优秀部分与现代科技的重要概念无缝衔接，有助于发扬和彰显传统文化的真理性和真理性，同时也有助于使用传统文化词汇来思考现代科技问题。 ■

资助项目：中国科学院战略研究与决策支持系统建设专项（GHJ-ZLZX-2021-06）。



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。中国科学院计算技术研究所副研究员。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。liuyuhang@ict.ac.cn



张菲

美国康奈尔大学生物统计与数据科学硕士。主要研究方向为计算机科学、统计学、数据科学。

参考文献

- [1] 吉尔多维克. 计算进化史[M]. 劳佳, 译. 北京: 人民邮电出版社, 2017.
- [2] 钱学森. 论技术科学[J]. 科学通报, 1957, 2(3): 97-104.
- [3] 吴文俊. 几何定理机器证明的基本原理: 初等几何部分[M]. 北京: 科学出版社, 1984.
- [4] 蔡天新. 数学传奇: 那些难以企及的人物[M]. 北京: 商务印书馆, 2016.
- [5] 冯友兰. 中国哲学简史[M]. 涂又光, 译. 北京: 北京大学出版社, 2013: 150-153.
- [6] 韩非. 韩非子·难势[M]. 北京: 中华书局, 2015.

更多参考文献: <http://dl.ccf.org.cn/cccf/list>

（本文责任编辑：刘云浩 郭得科）