

## 第8章 粒计算方法论

姚一豫 (Yiyu Yao)

加拿大 里贾纳大学

### 8.1 引言

粒计算研究虽然受到很多关注<sup>[1-24]</sup>, 但仍有不少学者持有怀疑和批评的态度。在很多场合, 经常会碰到非常尖锐的质问和批评。例如, 粒计算研究的范围和目的是什么? 粒计算的思想在很多学科中都有体现, 粒计算的研究是不是缺少独创性? 它在科学中的价值是什么? 粒计算中的粒和聚类分析中的类具有相似的特征和结构, 粒计算的方法也和聚类中的方法相似, 粒计算和聚类分析是不是一回事? 粒计算是不是一些方法、算法、计算模式和工具的简单组合或重新包装?

在粒计算的发展中, 有几个重要工作。其一, 粒计算这个概念是在模糊集研究的环境下提出的<sup>[12]</sup>, 主要结果是一个基于词计算的粒计算模型。其二, 粗糙集理论的研究<sup>[25-32]</sup>给出了一个具体的粒计算模型, 它将粒与分类、学习紧密地结合起来。其三, 人工智能中关于粒度 (granularity)<sup>[33-35]</sup>、抽象 (abstraction)<sup>[36-42]</sup>和多层次问题求解 (hierarchical problem solving)<sup>[43-45]</sup>的研究给出了另一个粒计算模型, 它将粒计算与人类认知与机器智能联系起来。商空间理论可以看作是该方向的一个结果<sup>[46-48]</sup>。从粒计算前十年所发表的文章看, 粒计算研究的主要工作是围绕在粗糙集、模糊集和聚类分析上进行的<sup>[49-51]</sup>。国内很多的研究是基于商空间问题求解理论<sup>[20,24,46-48,52,53]</sup>。因此, 大家认为粗糙集、模糊集和商空间理论是粒计算的主要三大理论<sup>[54]</sup>。

粒计算概念的提出是基于模糊集, 这限制了粒计算的发展, 例如, 人工智能中的粒计算思想并没有受到应有的关注<sup>[55,56]</sup>。粒计算研究应走出模糊集和粗糙集的圈子。三大理论的观点也没有真正地反映粒计算的深度、广度及普适性。如果粒计算是一个新学科, 那么它的研究不应该是几个现有理论的组合, 而应该有自己的思想、方法和理论体系, 这要求为粒计算这个概念赋予新的意义。粒计算三元论<sup>[11,57-66]</sup>的提出和相关研究<sup>[16,17,67]</sup>可以看作是这样一个尝试。

粒计算三元论的主要成分是多视角、多层次粒结构和粒计算三角形。粒结构反映多视角、多层次分析与理解。粒结构的产生可以有两种解释。客观解释认为现实世界中众多实体和系统都具有多层次结构。粒结构是对现实世界的真实反映。主观解释认为粒结构是人强加在现实世界上的, 其目的是降低认知负担并简化问题求解。也就是说, 世界本来是无结构的, 而人对现实世界的认识是有结构的。因此, 粒结构的构造往往依赖于每个人所掌握的知识和曾有的经历。粒计算三角形将粒计算研究分成三个侧面: 粒计算的哲学思想是结构化思维, 粒计算的方法论是结构化问题求解, 粒计算的计算模式是结构化信息处理。三元论强调哲学、方法论和计算模式

的互相支持。也就是说，粒计算不仅仅是计算而且是该计算的哲学、方法论。当前粒计算的主要研究是计算理论和模式，三元论试图避免这种偏向。粒计算虽然借鉴于很多学科，但并不是现有学科的简单组合，而是更高层次上的有机聚合。

粒计算是一种粒化的思维方式及方法论。虽然粒化思想存在于各个学科中，但还没有抽象和提炼出来，因而不能被人们更有效地利用。粒计算研究试图将各个学科的粒处理思想进行整理、抽象及结合，从而获得更高一层的、系统的、与具体学科知识无关的粒计算原理。从这个观点看，聚类分析可以认为是粒计算思想的一个具体实现，而粒计算是聚类分析思想在另一个层上的抽象。借助于粒、层、序这些与专业知识相对独立的概念，粒计算可以提供描述方法论的通用语言，使得更多的人能够更有效地应用粒计算原理去解决各种各样的问题。粒计算是一种信息处理模式，这种模式是粒化及分层思想在机器问题求解中的具体实现。粒信息处理接近人类信息处理，其过程可能更容易理解。因而，粒计算研究在人类问题求解和机器问题求解中都占有重要的地位。

可以这么说，粒计算研究有自己独特的问题和目标，它不是针对一个具体学科，而是试图给出一套适应于各个领域的哲学思想、方法论和信息处理方式。通过哲学、方法论和信息处理三个侧面的讨论，希望对粒计算有一个整体的、高层次上的认识；通过对不同学科中的方法与策略进行整理、综合与归纳，希望在粒计算框架下对它们赋予新的意义；通过对现有结果的重新解释与组合，希望建立一个新的研究领域。

关于粒计算方法论的研究并不是很多，因此本章的主要目的是讨论粒计算方法论并给出一个具体的自顶向下的渐进计算方法。掌握基于粒计算的系统化和结构化研究方法也许比学习一个具体问题更重要。因此，本章和读者分享关于粒计算方法论的体会，从方法论的角度理解和应用粒计算思想。

## 8.2 粒计算是方法论

孔子讲“工欲善其事，必先利其器。”老子讲“授人以鱼，不如授之以渔，授人以鱼只救一时之及，授人以渔则可解一生之需。”这些道理用于科学研究，可以这样理解：前者强调工具的重要性，科学的发展常常基于使用新的工具，要做好研究必须掌握和使用有效的工具，这样才会事半功倍；后者强调人脑的重要性，掌握、获取知识的方法比掌握、获取现成的知识更为重要。科学研究既是合理使用工具，更是有效地使用自己的大脑，两者缺一不可。虽然这些道理我们都知道，但却很难融汇到血液里并应用于研究中。我们往往过分强调和依赖研究工具而不注重充分地发挥大脑的优势，更注重具体的知识或结果而忽略了获取知识的方法。在科研中，知其然不知其所以然的现象经常发生，我们更多的关注怎样做而没有深究为什么做。对于粒计算的某些误解和怀疑，从很大程度上讲，可以从这些侧重点中找到解释。也就是说，对粒计算研究工作的评价，我们是从技术角度出发，追求短期、简单和直接的应用。比如，更关注粒计算的具体结果能否马上用来解决当前的具体问题，

或更关心粒计算研究能否很快发表几篇文章。如果从哲学思想和方法论角度看, 就会发现粒计算不仅是工具也是方法论, 如果能够合理使用于科研中就能达到事半功倍的效果。从长远的角度看, 这比解决一个具体问题或发表一两篇文章都重要的多。

我们花大量的时间学习具体理论和工具, 但很少接触研究方法论。比如, 花很多时间学习笛卡尔坐标系, 但对他的方法论却了解不深。关于方法论, 笛卡尔在《谈话方法》中给出了下面四条规则<sup>[68]</sup>:

*第一条是: 凡是我没有明确地认识到的东西, 我决不把它当成真的接受。也就是说, 要小心避免轻率的判断和先入之见, 除了清楚地呈现在我心里、使我根本无法怀疑的东西以外, 不要多放一点别的东西到我的判断里。*

*第二条是: 把我所审查的每一个难题按照可能和必要的程度分成若干部分, 以便一一妥为解决。*

*第三条是: 按次序进行我的思考, 从最简单、最容易认识的对象开始, 一点一点逐步上升, 直到认识最复杂的对象; 就连那些本来没有先后关系的东西, 也给他们设定一个次序。*

*最后一条是: 在任何情况之下, 都要尽量全面地考察, 尽量普遍地复查, 做到确信毫无遗漏。*

其中第二、三条规则非常简明地给出了粒计算的核心思想, 即, 问题求解的一个主要策略是粒化, 另一个是分层有序处理。笛卡尔方法论是从逻辑学、几何学和代数学中发现的, 他在这些学科中的很多贡献归功于该方法论的具体应用。更重要的是, 笛卡尔方法论对科学的发展有奠基性作用。

如果只熟悉笛卡尔的具体结果, 却没有掌握他的方法论, 那么可能会限制自己的研究。粒计算方法论给出了粒计算研究的一个新角度和新应用, 粒计算思想可以用来训练我们的大脑进行结构化思维, 从而使我们更有效地解决问题。

有人也许会说, 既然笛卡尔在几百年前就已经给出粒计算的基本思想, 是否还有必要将粒计算作为一种方法论研究。从粒计算的角度看, 笛卡尔给出了一个非常抽象和粗粒度层面上的描述, 有必要将这种描述更进一步地细化, 这样就可以获得多层次、多粒度的描述。不同层次可以适合于不同人群, 这样不论是初学者还是专家都可以应用粒计算思想。所以说, 还是需要从不同层次、不同粒度上将粒计算作为一种方法论进行研究和探讨。

很多时候, 我们更关心粒计算的直接应用, 想知道怎样用粒计算解决一个具体问题。由于没有关于该问题的背景知识, 因此并不能马上给出一个解决方案和满意的回答, 这往往让人感到失望, 并觉得粒计算似乎很难应用。粒计算思想有高层次上的指导作用, 这种指导性比一个具体解决方案更有价值, 因此, 应该更关注粒思

维和粒处理思想。

我研究粒计算的最大收获在于哲学层次和方法论的思考及它们对自己科研和写作的启示。第一，粒计算研究迫使自己阅读其它学科文献。比如，从哲学、心理学、认知科学中，可以找到粒计算的思想及它在人类智能和信息处理所占有的重要地位。通过学习人类粒信息处理方式，可以更有意识地培养粒思维能力，更有效地解决问题。第二，粒计算研究使我认识到方法论的重要性。将粒计算作为一种方法论，使我对科学研究有新的认识。比如，科学研究不仅仅是学习现有知识，还要学习获得这种知识的方法，从而增加获取新知识的可能性。第三，三元论的一个重要部分是多层次、多视角的粒结构。这种粒结构给出了对一个问题的结构化描述，从而导出了结构化理解和处理。将粒计算思想用到科学研究中，可以给出一个研究课题的多层次结构化描述，也可以获得对一个学科更清晰的结构化理解，还可以写出好结构的文章。通过粒结构，也可以对自己所学的知识进行归纳整理。

## 8.3 多层次粒结构

粒计算的核心概念之一是多层次和多视角粒结构<sup>[63,65]</sup>。基于粒结构的描述给出结构化多层次理解，这种理解指导逐步分层问题求解。

### 8.3.1 多层次

多层次粒结构是粒计算的基本概念，它的基本成分是粒和层，它的结构描述粒与粒、粒与层及层与层之间的关系和联系。在问题描述和求解的某一阶段，粒是讨论的基本单元或焦点。粒度是粒的一个主要特征，在不同应用中它可以解释为大小、抽象度或复杂度。不同的粒可以按其粒度进行排序。每一层由相同粒度或相似特征的粒组成，每一个粒提供一个局部、部分的描述，该层中所有的粒合起来提供一个全局、完整的描述。一个层的粒度由其所包含粒的粒度决定，不同层可按其粒度构成一个偏序关系，其结果就是一个多层次粒结构。

多层次粒结构的基本思想可以地图为例，通过不同粒度来解释。世界地图中的粒是众多的国家，国家地图中的粒是多个省、直辖市、自治区等，而一个省地图的粒是该省的所有县、市，而城市地图又可以分成很多区。世界地图描述国家及国家间的联系，国家地图描述省、直辖市、自治区之间的联系，省地图描述了该省所有县、市之间的联系，城市地图描述区之间的联系。不同详细程度的地图，不仅给出了地图的不同版本，同时也构造了一个多层次的粒结构。每一种地图适用于完成某一类特定的任务。

粒结构对同一个问题提供多种描述。层的个数并不固定。在构造粒结构的过程中多个层可以合并成一个层，类似的，一个层也可以分割为多个层。但是，不同层的描述必须一致。低层描述的问题必须在高层中有其对应的描述。对于同一个问题，高层所提供的解决方案可以看成是对低层更详细解决方案的指导。低层所包含的粒比高层的粒具有更多细节信息，从粒化角度看，低层是高层的细化；高层是低层的抽象，高层中的粒可以通过低层的粒详细解释。相邻两层互相影响，高层通常控制并规范低层，相反，低层解释和限制高层。

由于不同层给出了问题的不同描述，因而在不同的层中可以使用不同的词汇和语言来定义和讨论，也可以采用不同的问题求解方法。为降低复杂度，在给定时刻，粒计算一般考虑三层，即，当前层、上一层和下一层。粒的内在属性、外在属性及环境属性是刻画粒的重要手段。在当前层中，粒相对独立并松散连接，需要考虑粒的环境属性；在上一层中，当前层的粒是作为一个整体，需要考虑它的外部属性；在下一层中，当前层的粒分解为很多小粒，需要考虑它的内在属性。

层之间至少存在两个基本转化操作。细化或移入(zoom-in)操作将高层的抽象表示或描述转化为低层的具体表示或描述；粗化、抽象或移出(zoom-out)操作将低层的具体表示或描述转化为高层的抽象表示或描述。在抽象操作中，一个重要的特性是忽略细节特征，从而保留关键特征。因此，粒结构通过提供不同层次的抽象和具体细节，完成了对问题的结构化描述。粒结构是粒计算结构化方法的基础。

粒结构有效地描述两种部分和整体的关系。站在层的角度上看，粒是部分而层是整体；站在粒结构的角度上看，层是部分而粒结构是整体。构造一个有效的粒结构不是一件很容易的事，也很难一气呵成，往往需要多次尝试和不断修改。从诠释循环(Hermeneutic circle)的观念看，对整体的深刻理解是建立在对部分理解的基础上，而对部分的理解必须在对整体理解的环境下完成；对部分的理解和对整体的理解相互依赖，构成一个循环。因此，粒结构的构造和理解是一个螺旋式的上升过程，从一个粗糙、不完整的粒结构逐步构造一个完美的粒结构。

### 8.3.2 多视角

不同层次的粒通过粒度组织起来，可以构成一个有序的多层次结构(hierarchy)。一个多层次结构是对问题的一种描述或观点，称为视角(view)。用多个多层次结构描述同一个问题，将形成多视角(multiview)。单个视角代表对问题的局部理解，也称为局部视角，多视角代表对问题的不同角度的描述和理解，是多个局部视角的组合。

从人类问题求解的角度看，对于同一个问题，不同的人会有不同的观点。人脑

对于同一个问题有着不同的理解和处理方式, 从这点来看粒计算所采用的多视角是合理的。事实上, 单视角是多视角的组成元素, 多视角是单视角的组合、优化, 它们对问题求解都有其独特的贡献。

单视角对问题理解具有一定的局限性, 因此需要多视角从全局的角度理解问题。对于一个复杂系统, 需要从不同的角度来理解, 因此会形成多个局部视角。例如, 系统管理员从安全、权限的角度考虑一个信息系统, 可能会关注系统的用户角色、访问权限和访问策略, 以应对安全威胁。而系统运营商从经济学角度考虑该系统, 可能会从企业级用户、个人用户、服务等角度考虑系统的运营效益。这些局部视角就逐步构成了多视角。但是, 一个多层次结构只能表示对问题的局部理解, 代表问题理解的某一方面, 因此往往带有一定的局限性。例如, 考虑安全的视角可能不适用于解决系统的效益问题, 而考虑经济效益的视角可能不适用于解决系统的安全问题。局部视角并不能覆盖复杂系统的方方面面, 可能会产生各种问题理解的“盲区”。因此, 就需要将多个视角优化、组合起来, 才可能获得对复杂系统的全面理解。

虽然多视角提供对问题的全局理解, 但是在问题求解的特定阶段, 只需要考虑单视角, 以便有效地降低问题求解的复杂度。考虑问题的某个方面时, 可以采用相应的特殊视角, 忽略问题的其它方面, 即, 忽略其它视角。这种问题简化策略, 在问题求解的特定阶段, 根据不同的局部目标, 忽略当前不关心的视角, 而仅关注特定的一个或几个视角, 就极有可能简化问题并提高求解效率。

## 8.4 粒计算模式

多层次粒结构隐含基于序关系的三个粒计算模式, 即, 自顶向下, 自底向上, 自中向外的模式<sup>[65]</sup>。它们是人类信息处理三种常用模式, 也是计算机信息处理的典型方法<sup>[69-77]</sup>。

### 8.4.1 自顶向下

自顶向下模式是由概念模型驱动的处理模式<sup>[72]</sup>。它要求对问题有全面的认识, 即, 对问题有一个概念模型, 并以它驱动处理。从粗粒度开始, 自顶向下模式将一个问题逐步细化为更小的问题。它是分析思维的实现, 即, 通过分析, 一个较大的粒被分解为若干较小的粒。自顶向下模式要求对问题首先要有一个比较全面的整体把握, 否则不可能产生有意义的细分。也就是说, 整体特性决定了细分的有效性。如果对整体没有认识, 也就不可能产生更进一步的细化。在自顶向下的细化过程中,

高层对低层有指导和限制作用。在很多时候，人们一开始对整体并没有一个很深的理解，因而不可能采用自顶向下的模式。

软件开发和结构化程序设计都可以看作是自顶向下的过程<sup>[78-82]</sup>。一个系统或程序可以用不同语言进行不同粒度的描述。一个软件系统的主要功能可以用自然语言描述；这个主要功能可以分解成若干子功能，它们对应不同的系统模块，由模块组成的结构可以通过分层图来描述；实现每个模块的过程可以用流程图或伪代码表示；最终，伪代码可以转化为程序设计语言代码。这给出了一个多层次、自顶向下的开发过程。逐步细化的每一步都要求对当前层有一个全面的认识，而这种认识必须基于还没有实现的下一层，对程序员来说是一个很大的挑战。这也正是自顶向下模式的弱点。

科技写作也可以看作是一种自顶向下过程<sup>[83-86]</sup>。文章的标题给出了文章的主题。该主题通过若干章节表示出来，各章节标题是对文章主题的细化。整篇文章是对主题更详细的阐述。一篇好文章的结构是粒结构，既是多层次的也是多视角的。也就是说，对文章的主题需要一个多层次的描述，也需要一个多视角的讨论。文章的写作过程就是这个粒结构的构建和描述过程。同样的思想也可以用于数学定理证明及描述<sup>[87,88]</sup>。

虽然写程序、写文章和描述数学证明有很大区别，但它们在高层上采用相同的方法，即，使用粒计算原理。这也说明，自顶向下的粒计算模式可用于不同问题。

## 8.4.2 自底向上

自底向上模式实现综合思维，即由部分构建整体。当对一个问题没有全面认识之前，可以先研究它的某些部分。通过对很多部分的理解，可以将它们整合成一个更高层次上的整体。这样，很多子问题可以自底向上合成，最终达到对整个问题的理解。这种由局部到整体的方法在探索阶段很有效。由于没有整体的指导，自底向上的模式往往会产生一些无用的中间结果，这是自底向上模式的弱点。

自底向上模式也常常用到程序设计及软件开发。当对一个大系统没有完全掌握的时候，程序员可以先实现一些子系统，最终将子系统组织起来形成一个更大的系统。这样，一个大系统就自底向上逐步建立起来。

自底向上是一种数据驱动的模式<sup>[72]</sup>。该模式在科学研究中有很重要的作用。很多研究都是基于观察数据，从自底向上逐渐抽象、建模并建立理论。科技写作也会用到自底向上模式。最初的文章并不一定有一个非常漂亮的粒结构。该粒结构是自底向上逐步构造出来。用另一句话说，文章的论点、论据等是自底向上逐层整理出来。文章的主题不一定是一开始就有的，而是从观察到的数据中逐渐抽取出来的。

### 8.4.3 自中向外

在实际中, 整体的信息可能是不完备的, 由于没有全部的知识, 不可以简单地采用自顶向下模式; 由于有某些知识, 也不宜于采用自底向上模式。如果已知的信息能有效的描述问题的某一层, 就可以以该层为起始点, 向上、向下同时展开, 这给出了自中向外的模式<sup>[69,75]</sup>。

自中向外模式的一个重要问题是有效地选择起始层, 这往往和一个人的知识和经历有关。不同层给出不同的描述和表示, 太抽象会增加理解的难度, 太具体则会受到细节的干扰, 选对了层可以轻松地解决问题。

### 8.4.4 不同模式的组合

自顶向下、自底向上和自中向外是三种基本粒计算模式。它们各有所长, 也各有其短, 并不一定适用于每一个问题, 也并不一定适用于问题求解的每个阶段。更实用的粒计算模式是这些基本模式的组合和交替使用。

自顶向下的分析方法在从高层次向低层次切换的时候也许非常有用, 自底向上的综合方法用于从低层次向高层次切换, 自中向外的模式考虑几个相邻层的关系。在问题求解过程中, 在不同时刻需要使用不同的粒计算模式。在探索阶段, 自底向上和自中向外模式可能有效; 对于最终结果的描述, 自顶向下的方法可以有效地给出内在结构。在任何一个时期, 如果没有足够的结果, 可以应用自底向上的方法得出具体结果; 如果有足够的结果, 可以使用自顶向下的方法进行分类整理。三种模式可以交替使用, 最终得到一个有效的粒计算方法。

在科学研究和科技写作中, 自底向上模式可用于收集和整理素材, 自顶向下模式可用于文章写作, 自中向外模式可用于文章修改过程。在计算机编程中, Knuth<sup>[82]</sup>简明地总结道“……自顶向下和自底向上是两个相反的方法, 前者侧重程序解释, 而后者侧重程序构造”。

粒计算模式的应用可以从学科发展中观察到。科学研究常常是自底向上的探索过程, 一个学科也并不都是从上到下, 井井有条的发展起来。更多的时候是先研究具体问题, 通过它们的综合和拓广逐步形成一个学科。可以说, 一个学科是由很多科学家自底向上逐步建立起来, 在这个过程中, 他们并不一定对该学科的最终内容非常了解。当该学科发展到一定的阶段, 积累了一定的结果, 就需要用自顶向下的方法对这些结果进行归类, 从而对该学科的现状得到一个全面认识。严格的说,

科学发展是这两种模式不断交互使用、螺旋上升的一个过程。

## 8.5 渐进计算基本算法

自顶向下粒计算模式可以给出一个具体的渐进计算模型<sup>[89-92]</sup>。通过细-粗这样的粒度关系, 可以获得多层次粒结构。渐进计算基于粒结构给出一个粒化 (*granulation*) 序列。如果  $G_2$  是粒化  $G_1$  的细化,  $G_3$  是  $G_2$  的细化, 以及  $G_n$  是  $G_{n-1}$  的细化, 那么序列  $G_1, G_2, \dots, G_{n-1}, G_n$  是一个  $n$  层的粒结构。自顶向下渐进计算的方法是使用这种多层次粒结构的方法之一。其主要方法是一层层地从最粗的粒化  $G_1$  处理到最细的粒化  $G_n$ 。

自顶向下渐进计算包括两项基本任务, 一是构造多层次粒结构, 二是使用粒结构计算。多层次粒结构可以通过自顶向下逐层构造的方法构造。基于一个多层次粒结构, 渐进计算方法自顶向下逐层搜索问题的解。首先可以在较粗的粒化中找到非精确解, 然后使用它在较细的粒化中指导搜索更精确的解。重复该过程直到发现满意的解。这两项自顶向下逐步计算的基本任务也可以同时进行。

自顶向下计算模式可以加快解决问题的过程。高层中粒的个数通常小于低层中粒的个数。相对而言, 在高层中搜索问题解通常比低层快。找到一个高层的解, 可以用它指导低层搜索, 这样可以避免低层搜索时不必要的工作。

渐进计算算法包括以下基本要素:

- 问题的多种表达。这是渐进计算的基础。事实上, 渐进计算是对高层抽象描述到低层具体描述的一系列细化过程。
- 粒化的细化操作。粒化的细化操作将较粗的描述转换成较细的描述。细化操作的一个主要特点是保留多个不同描述的一致性。
- 解的细化操作。解的细化操作是将高层非精确、近似解逐步修正到低层更精确解的渐进过程。
- 评估函数。评估函数衡量在某层中解的适应度。当搜索到可满足的解时, 渐进计算过程将终止。

BPC算法 (Basic Progressive Computing Algorithm)是包含以上要素的基本渐进计算算法。BPC中粒化的细化操作和解的细化操作分别定义为 *granulation\_refinement* 和 *solution\_refinement*。  $G_0$  和  $P_0$  分别是粒化 ( $G$ ) 和解 ( $P$ ) 的初始值。在第一步中,  $G_1 = \text{granulation\_refinement}(G_0)$  构造最粗的粒化,  $G_1$  是粒化序列  $G_1, G_2, \dots, G_n$  的第一个粒化,  $P_1 = \text{solution\_refinement}(P_0, G_1)$  是解序列  $P_1, P_2, \dots, P_n$  的第一个解。BPC使用适应度函数 *fitness* 衡量一个解, 当找到满意解时, 该过程停止。有时粒化本身是一个解, 在这种情况下, 解细化步骤可以简单地使用  $G_k$ 。

BPC算法是自顶向下模式的具体实现, 它既可以用于人类问题求解也可以用于机器问题求解。人类问题求解的例子有程序设计和科技写作等, 机器问题求解的例子

有变精度逻辑 (variable precision logic) [93]、渐进图像传输 (progressive image transmission) [94-96]和渐进近似聚集查询 (progressive approximate aggregate query) [97]等。

#### BPC 算法 (基本渐进计算算法)

##### 算法开始

$k \leftarrow 0$ ;

初始化  $G_0$  和  $P_0$ ;

##### 重复

$k \leftarrow k + 1$ ;

$G_k = \text{granulation\_refinement}(G_{k-1})$ ;

$P_k = \text{solution\_refinement}(P_{k-1}, G_k)$ ;

$F_k = \text{fitness}(P_k)$ ;

直到  $F_k$  满足适当条件;

##### 算法结束

## 8.6 结论

方法论是粒计算研究的一个重要方向<sup>[65,67]</sup>。通过方法论的研究<sup>[68,98,99]</sup>, 可以更清楚地认识粒计算的作用和意义。粒计算所提供的粒思维与粒推理、粒分析、粒处理等方法将武装每一个人, 从而能更有效地解决实际问题。粒计算方法论也有助于设计和实现更智能化的机器和系统。同经典的阅读、写作和算术一样, 粒计算是一个适用于所有人的方法和技能<sup>[65]</sup>。

## 参考文献

- [1] Bargiela A, Pedrycz W. Toward a theory of granular computing for human centered information processing. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2008, 16(2): 320-330.
- [2] Bargiela A, Pedrycz W (Eds.). Human-Centric Information Processing through Granular Modeling. Berlin: Springer, 2009.
- [3] Inuiguchi M, Hirano S, Tsumoto S (Eds.). Rough Set Theory and Granular Computing. Berlin: Springer, 2003.

- [4] Keet C M. A formal theory of granularity, PhD Thesis. KRDB Research Centre, Faculty of Computer Science, Free University of Bozen-Bolzano, Italy (2008), [http://www.meteck.org/files/AFormalTheoryOfGranularity\\_CMK08.pdf](http://www.meteck.org/files/AFormalTheoryOfGranularity_CMK08.pdf) (accessed June 8, 2008)
- [5] Lin T Y, Yao Y Y, Zadeh L A (Eds.). Data Mining, Rough Sets and Granular Computing. Heidelberg: Physica-Verlag, 2002.
- [6] Pedrycz W, Chen S M (Eds.). Granular Computing and Intelligent Systems Design with Information Granules of Higher Order and Higher Type. Intelligent Systems Reference Library, Berlin: Springer, 2011.
- [7] Pedrycz W, Skowron A, Kreinovich V (Eds.). Handbook of Granular Computing. New Jersey: Wiley, 2008.
- [8] Yao J T. Novel Developments in Granular Computing: Applications for Advanced Human Reasoning and Soft Computation. Hershey: IGI Global, 2010.
- [9] Yao Y Y. Granular computing: basic issues and possible solutions// The 5th Joint Conference on Information Sciences, North Carolina, USA, 2000, 186-189.
- [10] Yao Y Y. A partition model of granular computing// Lecture Notes in Computer Science 3100. Berlin: Springer, 2004, 232-253.
- [11] Yao Y Y. Granular computing: past, present and future// The 2008 IEEE International Conference on Granular Computing, Hangzhou, China, 2008, 80-85.
- [12] Zadeh L A. Towards a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. Fuzzy Sets and Systems, 1997, 90(2): 111-127.
- [13] 邓蔚, 王国胤, 吴渝. 粒计算综述. 计算机科学, 2004, 31(Z2): 178-181.
- [14] 李道国. 信息粒: 计算理论、模型与应用研究. 山西: 山西科技出版社, 2006.
- [15] 李道国, 苗夺谦, 张东星, 张红云. 粒度计算研究综述. 计算机科学, 2005, 32(9): 1-12.
- [16] 李鸿. 粒计算的基本要素研究. 计算机技术与发展, 2009, 19(11): 89-93.
- [17] 李鸿. 粒计算的四面体模型. 计算机工程与应用, 2009, 45(28): 43-47.
- [18] 梁吉业, 李德玉. 信息系统中的不确定性与知识获取. 北京: 科学出版社, 2005.
- [19] 苗夺谦, 范世栋. 知识的粒度计算及其应用. 系统工程理论与实践, 2002, 22(1): 48-56.
- [20] 苗夺谦, 王国胤, 刘清, 林早阳, 姚一豫. 粒计算: 过去、现在与展望. 北京: 科学出版社, 2007.
- [21] 王国胤, 张清华. 不同知识粒度下粗糙集的不确定性研究. 计算机学报, 2008, 31(9): 1588-1598.
- [22] 王国胤, 张清华, 胡军. 粒计算研究综述. 智能系统学报, 2007, 2(6): 8-26.
- [23] 谢克明, 逯新红, 陈泽华. 粒计算的基本问题 and 研究. 计算机工程与应用, 2007,

43(16): 41-44.

- [24]张燕平, 罗斌, 姚一豫, 苗夺谦, 王国胤, 张铃, 张钺. 商空间与粒计算-结构化问题求解理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010.
- [25]Pawlak Z. Rough Sets. *International Journal of Computer and Information Sciences*, 1982, 11(5): 341-356.
- [26]Pawlak Z. *Rough Sets, Theoretical Aspects of Reasoning about Data*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [27]韩素青, 赵岷. *Reduct理论*. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [28]刘清. *Rough集与Rough推理*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [29]苗夺谦, 李道国. *粗糙集理论、算法与应用*. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [30]张文修, 梁怡, 吴伟志. *信息系统与知识发现*. 北京: 科学出版社, 2003.
- [31]张文修, 仇国芳. *基于粗糙集的不确定决策*. 北京: 清华大学出版社, 2005.
- [32]张文修, 吴伟志, 梁吉业, 李德玉. *粗糙集理论与方法*. 北京: 科学出版社, 2001.
- [33]Euzenat J. Granularity in relational formalisms - with application to time and space representation. *Computational Intelligence*, 2001, 17: 703-737.
- [34]Hobbs J R. Granularity// *The 9th International Joint Conference on Artificial Intelligence*, Los Angeles, USA, 1985: 432-435.
- [35]McCalla G, Greer J, Barrie B, Pospisi P. Granularity hierarchies. *Computers & Mathematics with Applications*, 1992, 23: 363-375.
- [36]Colburn T, Shute G. Abstraction in computer science. *Minds & Machines*, 2007, 17: 169-184.
- [37]Fröer P, Hazzan O, Manes M. Revealing the faces of abstraction. *International Journal of Computers for Mathematical Learning*, 1997, 2: 217-228.
- [38]Giunchiglia F, Walsh T. A theory of abstraction. *Artificial Intelligence*, 1992, 56: 323-390.
- [39]Holte R C, Choueiry B Y. Abstraction and reformulation in artificial intelligence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2003, 358: 1197-1204.
- [40]Kramer J. Is abstraction the key to computing? *Communications of the ACM*, 2007, 50: 36-42.
- [41]Saitta L. A Theme Issue "The abstraction paths: from experience to concept". *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2003: 358: 1173-1307.
- [42]Zucker J D. A grounded theory of abstraction in artificial intelligence. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2003, 358: 1293-1309.

- [43] Bacchus F, Yang Q. Downward refinement and the efficiency of hierarchical problem solving. *Artificial Intelligence*, 1994, 71: 43-100.
- [44] Holte R C, Mkadmi T, Zimmer R M, MacDonald A J. Speeding up problem-solving by abstraction: a graph oriented approach. *Artificial Intelligence*, 1996, 85: 321-361.
- [45] Knoblock C A. *Generating Abstraction Hierarchies: An Automated Approach to Reducing Search in Planning*. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1993.
- [46] Zhang B, Zhang L. *Theory and Applications of Problem Solving*. Amsterdam: North-Holland, 1992.
- [47] Zhang L, Zhang B. The quotient space theory of problem solving. *Fundamenta Informatcae*, 2004, 59(2-3): 287-298.
- [48] 张铃, 张钺. 问题求解理论及应用-商空间粒度计算理论及应用(第2版). 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [49] Yao J T. A ten-year review of granular computing// The 2007 IEEE International Conference on Granular Computing, San Jose, USA, 2007, 734-739.
- [50] Yao J T. Recent developments in granular computing// The 2008 IEEE International Conference on Granular Computing, Hangzhou, China, 2008, 74-79.
- [51] Yao J T. On granular computing research// 张燕平, 罗斌, 姚一豫, 苗夺谦, 王国胤, 张铃, 张钺. 商空间与粒计算-结构化问题求解理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010, 144-156.
- [52] 刘贵龙. 粗集商空间的格论性质. *计算机工程与科学*, 2004, 26(12): 82-90.
- [53] 王国胤, 张清华. 分层递阶商空间的结构分析与不确定性度量// 张燕平, 罗斌, 姚一豫, 苗夺谦, 王国胤, 张铃, 张钺. 商空间与粒计算-结构化问题求解理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010, 64-90.
- [54] 张铃, 张钺. 粒计算+结构分析=商空间方法// 张燕平, 罗斌, 姚一豫, 苗夺谦, 王国胤, 张铃, 张钺. 商空间与粒计算-结构化问题求解理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010, 1-37.
- [55] Yao Y Y. Artificial intelligence perspectives on granular computing// Pedrycz W and Chen S M (Eds.). *Granular Computing and Intelligent Systems Design with Information Granules of Higher Order and Higher Type*. Intelligent Systems Reference Library, Berlin: Springer, 2011, 13:17-34.
- [56] 刘清. 基于粒计算的AI中问题求解的研究. *计算机科学*, 2003, 30(5): 11-12.
- [57] Yao Y Y. Granular computing. *Chinese Journal of Computer Sciences*, 2004, 31(z2): 1-5.
- [58] Yao Y Y. Perspectives of granular computing// The 2005 IEEE International Conference on Granular Computing, Beijing, China, 2005, 85-90.
- [59] Yao Y Y. Three perspectives of granular computing. *Journal of Nanchang Institute of*

Technology, 2006, 25(2): 16-21.

[60] Yao Y Y. The art of granular computing// Lecture Notes in Artificial Intelligence 4585. Berlin: Springer, 2007, 101-112.

[61] Yao Y Y. The Rise of granular computing. Journal of Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition), 2008, 20(3): 299-308.

[62] Yao Y Y. A unified framework of granular computing// Handbook of Granular Computing. New Jersey: Wiley, 2008, 401-410.

[63] Yao Y Y. Integrative levels of granularity// Human-Centric Information Processing through Granular Modeling. Berlin: Springer-Verlag, 2009, 31- 47.

[64] Yao Y Y. Human-inspired granular computing// Novel Developments in Granular Computing: Applications for Advanced Human Reasoning and Soft Computation. Hershey: IGI Global, 2010.

[65] 姚一豫. 粒计算三元论// 张燕平, 罗斌, 姚一豫, 苗夺谦, 王国胤, 张铃, 张钺. 商空间与粒计算-结构化问题求解理论与方法. 北京: 科学出版社, 2010, 115-143.

[66] 姚一豫. 粒计算的艺术// 苗夺谦, 王国胤, 刘清, 林早阳, 姚一豫. 粒计算: 过去、现在与展望. 北京: 科学出版社, 2007, 1-20.

[67] 李鸿. 粒化思维研究. 滁州学院学报, 2010, 12(5): 18-22.

[68] 笛卡尔. 谈谈方法. 王太庆译. 北京: 商务印书馆, 2001.

[69] Allen J I, Fulton E A. Top-down, bottom-up or middle-out? avoiding extraneous detail and over-generality in marine ecosystem models. Progress in Oceanography, 2010, 84: 129–133.

[70] Ginat D. Starting top-down, refining bottom-up, sharpening by zoom-in. ACM SIGCSE Bulletin, 2001, 33: 28–31.

[71] Kintsch W. An overview of top-down and bottom-up effects in comprehension: the CI perspective. Discourse Processes, 2005, 39: 125–128.

[72] Lindsay P H, Norman D A. An Introduction to Psychology, 2nd edition. New York: Academic Press, 1977.

[73] Newell A, Simon H A. Human problem solving. Englewood Cliffs, N J:Prentice-Hall, 1972.

[74] Solso R L, MacLin M K, MacLin O H. Cognitive Psychology (7th edition). New York: Allyn and Bacon, 2005.

[75] Shiu L P, Sin C Y. Top-down, middle-out, and bottom-up processes: a cognitive perspective of teaching and learning economics. International Review of Economics Education, 2006, 5: 60–72.

[76] Sun R, Zhang X. Top-down versus bottom-up learning in cognitive skill acquisition. Cognitive Systems Research, 2004, 5: 63–89.

- [77] Wolfe J M, Butcher S J, Lee C, Hyle M. Changing your mind: on the contributions of top-down and bottom-up guidance in visual search for feature singletons. *Journal of Experimental Psychology*, 2003, 29: 483–502.
- [78] Dahl O J, Dijkstra E W, Hoare C A R. *Structured Programming*. New York: Academic Press, 1972.
- [79] Kernighan B W, Plauger P J. *The Elements of Programming Style*. New York: McGraw-Hill, 1978.
- [80] Ledgard H F, Gueras J F, Nagin P A. *PASCAL with Style: Programming Proverbs*. New Jersey: Hayden Book Company, 1979.
- [81] Wirth N. Program development by stepwise refinement. *Communications of the ACM*, 1971, 14(4): 221-227.
- [82] Knuth D E. Literate programming. *The Computer Journal*, 1984, 27(2): 97-111.
- [83] Flower L S. *Problem-Solving Strategies for Writing*. New York: Harcourt Brace Jovabovich, 1981.
- [84] Flower L S, Hayes J R. Problem-Solving Strategies and the Writing Process. *College English*, 1977, 39(4): 449-461.
- [85] Minto B. *The Pyramid Princile: Logic in Writing and Thinking*. London: Prentice Hall/Financial Times, 2002.
- [86] Yao Y Y. Structured writing with granular computing strategies// The 2007 IEEE International Conference on Granular Computing, San Jose, USA, 2007: 72-77.
- [87] Friske M. Teaching proofs: a lesson from software engineering. *American Mathematical Monthly*, 1995, 92: 142-144.
- [88] Leron U. Structuring mathematical proofs. *American Mathematical Monthly*, 1983, 90(3): 174-185.
- [89] Yao Y Y, Luo J G. Top-Down Progressive Computing// Proceedings of RSKT, 2011.
- [90] Luo J G, Yao Y Y. Granular space state search// Advances in Artificial Intelligence, 24th Canadian Conference on Artificial Intelligence, Canadian AI 2011, LNCS (LNAI) 6657, 2011, 285-290.
- [91] Zhou B, Yao Y Y. In Search for effective granularity with DTRS// Proceedings of the 9th IEEE International Conference on Cognitive Informatics (ICCI'10), 2010, 464-470.
- [92] Yao Y Y, Deng X F. Sequential three-way decisions with probabilistic rough sets// The 10th IEEE International Conference on Cognitive Informatics and Cognitive Computing, 2011.
- [93] Michalskia R S, Winstonb P H. Variable precision logic. *Artificial Intelligence*, 1986, 29: 121-146.

姚一豫(Yiyu Yao), 粒计算方法论.

苗夺谦, 李德毅, 姚一豫, 王国胤, 张燕平, 吴伟志, 梁吉业, 于达仁, 王睿智. 不确定性与粒计算.  
北京: 科学出版社, 2011, 150~163.

---

- [94]Chee Y K. Survey of progressive image transmission methods. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 1999, 10(1): 3-19.
- [95]Ireton M A, Xydeas C S. A progressive encoding technique for binary images// *IEE Colloquium on Low Bit Rate Image Coding*, London, 1990, 11/1-11/4.
- [96]Tong F H, Zhang D. A new progressive colour image transmission scheme for the World Wide Web. *Computer Networks and ISDN Systems*, 1998, 30: 2059-2064.
- [97]Lazaridis I, Mehrotra S. Progressive approximate aggregate queries with a multi-resolution tree structure// *Proceedings of the 2001 ACM SIGMOD international conference on Management of data*, 2011, 401-412.
- [98]Beveridge W I B. *The Art of Scientific Investigation*. New York: Vintage Books, 1967.
- [99]Polya G. *How to Solve It* (2nd edition). Princeton: Princeton University Press, 1957.