

计算机模拟的模型观与实验观辨析

An Analysis of the Model View and Experimental View in Computer Simulation

任思腾 /REN Siteng

(北京大学医学史与医学哲学系, 北京, 100191)
(Department of History and Philosophy of Medicine, Peking University, Beijing, 100191)

摘要: 科学家常常在实验的意义上谈论计算机模拟, 部分哲学家则倾向于将其视为基于模型的演算和推理。这两种立场各自倾向于将计算机模拟界定为解题技术和仿真系统。模型观和实验观的差异一方面源自不同的哲学预设, 另一方面受到不同类型模拟方法实践活动的影响。通过对上述观点的分析讨论可以发现, 模型观和实验观并不矛盾, 而是体现了计算机模拟在认知和实践层面的不同的特征。综合来看, 可以将计算机模拟理解为基于模型构建的实验系统。借助方法论谱系的视角, 能够从物质性特征出发进一步说明计算机模拟的实验属性。

关键词: 计算机模拟 科学模型 科学实验

Abstract: While scientists often talk about computer simulation in an experimental sense, some philosophers tend to regard it as model-based calculation and reasoning. These two positions define computer simulation as problem-solving technique and simulation system respectively. On the one hand, the difference between the model view and the experimental view stems from different philosophical presuppositions; on the other hand, it is influenced by different types of simulation approaches and practical activities. Through an analysis and discussion of the above views, it can be shown that the model view and the experimental view are not contradictory, but reflect different characteristics of computer simulation in cognitive and practical levels respectively. Therefore, computer simulation can be understood as an experimental system built on models. From the perspective of methodology spectrum, the experimental characteristics of computer simulation can be further explained from the characteristics of materiality.

Key Words: Computer simulation; Scientific models; Scientific experiment

中图分类号: N032; G424.31 DOI: 10.15994/j.1000-0763.2025.08.006 CSTR: 32281.14.jdn.2025.08.006

自20世纪后半叶以来, 计算机模拟已然成为科学研究的基础方法和常用工具之一。科学哲学家同样关注到了这一蓬勃发展且成果丰硕的研究方法。但围绕计算机模拟方法的哲学特征仍有争议。一个突出的分歧在于, 科学家和科学史家常常在实验的意义上谈论计算机模拟, 而一部分科学哲学家则更倾向于将其视为

基于模型的演绎推理。

实验和建模通常分属于两类不同的研究方法。计算机模拟为什么能够兼具二者的属性, 以至于学界长期同时存在两种立场? 其差异会导致哪些不同的认识论和方法论? 为此, 本文首先梳理两种立场对于计算机模拟的界定——解题技术和仿真系统, 并阐明其各自背后的哲

基金项目: 教育部哲学社会科学研究重大课题攻关项目“工程科学哲学基本理论问题研究”(项目编号: 23JZD006)。

收稿日期: 2024年6月7日

作者简介: 任思腾(1994-)女, 吉林桦甸人, 北京大学医学史与医学哲学系博士后, 研究方向为一般科学哲学、科学实验方法论。Email: siteng_ren@hsc.pku.edu.cn

学预设以及对应的具体模拟方法类型。其次,从模型观和实验观出发,说明它们各自的适用范围和潜在问题,并说明为何最好将计算机模拟理解为基于模型构建的实验系统。最后,借助方法论谱系的视角,基于连续变化特征建立的实验谱系观念,进一步把握计算机模拟的实验特征。

一、计算机模拟的两种定义

1. 作为解题技术的计算机模拟

在计算机模拟诞生初期,研究者视之作为一种突破性的解题技术,如:“模拟必然涉及使用那些接近于模拟系统中的随机波动的数学表达式和方程;而这些表达式和方程非常复杂,以至于没有大型电子计算机的帮助是不可能解决的。”“模拟所解决的问题的特点是数学上的难解性。这些问题通常涉及很多变量、参数,复杂函数,以及随机变量。因此,模拟是能够求助的最后手段。”^{[1], [2]}

作为解题技术的计算机模拟具有两个主要特点。首先,计算机模拟可以为那些难解的数学问题(intractable problem)^①给出数值解。其次,只有在数学模型或目标系统过于复杂而无法直接进行分析时,使用计算机模拟才是正当的。该定义预示着三个哲学观点:

其一,计算机模拟弥补了人类计算能力的不足。难解性源于人们在应对特定数学问题求解解析解时的认知局限,计算机模拟能够通过数值计算来获得模型的近似结果,从而突破这一限制。并且,随着机器运算能力的提高,这一近似可以越来越精确。

其二,计算机模拟的结果是数学模型的直接结果。如果计算机模拟仅仅是一种解题技术,那么在认识论上更重要的自然是“题目”,因此预先给定的数学模型具有优先地位;同时,解题技术并不会反过来影响到题目自身。虽然实际上在进行模拟之前,必然涉及对问题模型的修改(如将连续体系离散化),但这些处理

应该尽可能地少,只进行最简单和最必要的修改。该观点的典型态度是:“模拟并不会比预先给定的数学假设更好。”([3], p.14)

其三,计算机模拟继承了数学模型的表征能力。换言之,延续第二点,模拟无法超越数学模型所能实现的表征范围。甚至有人认为,由于计算机模拟在求解过程中必须采取近似,因而其表征能力相比于原始模型会受到更多的限制。例如,在模拟Lotka-Volterra模型时,计算机无法处理无限大的种群,只能用非常大但数量有限的变量作为替代。

总的来说,将计算机模拟视为解题技术意味着它只是待解数学模型的一部分。因而与计算机模拟相关的认识论问题都可以由成熟的科学模型理论给出回答。由此,弗里格(R. Frigg)等人认为“计算机模拟几乎没有带来新的哲学问题。”^[4]另一方面,作为原先给定数学问题的求解工具,计算机模拟原则上并不会产生超过该模型之外的知识,因此其在认识论上也不具备更高的价值。但是,这样的哲学立场似乎很难让我们理解如今计算机模拟方法的重要科学价值——因为计算机模拟还能够以仿真系统的面貌发挥超越数学模型的作用。

2. 作为仿真系统的计算机模拟

在这一立场中,计算机模拟主要用来推演目标系统的发展过程,以动态可视化方式呈现不同条件下的行为模式。除了最终的“解题结果”之外,更重要的是建模和编程过程如何具体实现,以及新知识的产生方式。虽然此时仍然需要用到计算机求解数学难题的能力,但它只是必要的辅助手段;模拟的首要目标是对系统的仿真。

现代博弈论的创始人之一舒比克(M. Shubik)认为:“对系统的模拟指的是通过对模型或模拟器的操作,来对系统进行表征。可以通过研究该模型的运行来推断有关实际系统或其子系统的行为的属性”。([5], p.909)类似地,香农总结道:“模拟指的是设计一个真实系统的模型,并用这个模型进行实验的过程,其目的

①参考全国科学技术名词审定委员会(术语在线) <https://www.termonline.cn>的关键词搜索“intractable problem”。

是了解系统的行为,或评估系统(在一个或一组标准所施加的限制内)运行时的各种策略”。([6], p.2)

比较来看,作为仿真系统的计算机模拟预设了如下哲学观点:

其一,计算机模拟应与预先给定的数学模型加以区分。一方面,对系统的建模工作构成了计算机模拟的一部分,而不是对给定的模型进行求解计算;另一方面,仿真模拟的实际过程往往涉及多个模型和数据库,并要求对它们之间的系统关系进行协调。因而此时计算机模拟不再仅是某个特定数学模型的求解工具,而是涵括了建模、试验、调试、迭代、仿真等多个环节的完整流程,具有很高的整体性。

其二,计算机模拟对目标系统提供了独立的表征。相比之下,计算机模拟的表征并非继承自数学问题,而是与目标系统相关联。因此,模拟体现了系统的整体性质,这不仅包括我们关心的初始数学问题(如:在改变某一变量时,系统会如何变化?),更涵盖了数据库、集成模块等模拟所需的必要组成部分。尤其是当目标系统具备复杂性时,任意一个局部的数学模型都无法提供对该系统的准确完整表征,而必须由完整的模拟过程和结果来体现;同时,模拟自身也会由于探索和迭代的过程产生自身的复杂性。([7], p.136)

其三,计算机模拟可以生产新的知识。仿真模拟在产生关于真实世界中复杂系统的新知识方面展示出了强大的能力,而不仅仅是输出数学模型的演绎和运算结果。^[8]因此,计算机模拟具备知识生产的能力,在认识论上应该与模型和实验等其他方法具有同等的地位,而不是处于劣势。([9], p.591)

3. 小结

上述两种界定的主要分歧在于是否将计算机模拟限制在待解数学问题模型之内。解题技术立场认为计算机模拟只是生成待解数学问题演绎结果的工具;仿真系统立场则将视角放宽,关注对系统进行仿真时的完整过程和功能,从而赋予模拟独立的方法论地位。从这一点出发,继而产生了对计算机模拟本体论意义和认识论

价值的不同判断:将计算机模拟作为解题技术会限制其功能和认知的范围;如果关注仿真系统的整体性,那么模拟能够构建表征目标系统的模拟模型,并且带来新的知识。

上述两种定义的差异一方面源自哲学预设,另一方面则与计算机模拟自身发展的历史路径和方法上的多样性有关。目前,模拟主要分为三大类:(1)基于微分方程的建模(Equation Based Modelling, EBM),如传统的系统动力学模型,以离散事件差分方程来描述确定或随机系统;(2)基于随机过程和概率分布的建模,包括排队论、蒙特卡洛方法、布朗运动动力学、马尔可夫模型和离散事件仿真,等等;(3)基于主体的建模(Agent Based Modelling, ABM),包括元胞自动机、糖域模型和社会生态模型,等等。([10], pp.13-14) 这些不同的类型随着计算机模拟的诞生和发展依次出现。从历史来看,计算机模拟始于20世纪下半叶核物理研究的实际需求:求解描述高度非线性现象的数学方程,如中子散射过程。^[11]此时,模拟的对象系统较为简单和理想化,因此常用的方法是EBM,其作为解题技术的工具性特征较为突出,也是当时使用模拟的主要目的。随着研究对象复杂性的不断增加,以及计算机模拟方法向其他研究领域的扩展,ABM以及混合形式的多尺度模拟在新的研究场景中日益发展成熟并取得重要成果,这类应用则更加符合第二类界定中所强调的综合性与复杂性,并且成功地产生了新的知识。因此,对计算机模拟采取哪一种界定,最好结合运用该方法时所对应科学问题的时代和语境的具体特征加以说明。

二、计算机模拟是模型演绎还是实验探索?

在科学史和科学哲学讨论的语境中,伽里森(P. Galison)开启了关于计算机模拟本性的争论:在区分了实验和理论的方法论地图上,计算机模拟应该处于什么位置?此后,学界发展出了模型观和实验观两种主要用于分析计算机模拟哲学特征的视角。([12], p.120)

模型观认为狭义的计算机模拟指的就是解题技术,广义上则包含了被求解的数学模型及其问题。^[4]随着模型观的发展,研究者更具体地刻画了计算机模拟作为模型的特征,也开始注重在实践层面拓展讨论模拟建模对传统数学建模的超越性。实验观则更关注计算机模拟作为仿真系统在实验语境下的功能和特征,强调其具备与实验同等的认识论能力和特性,并将其与思想实验、实验室实验等其他实验方法进行对比分析。^[13]

1. 模型观的主要立场

模型观注重讨论模拟的建模过程及其性质。例如,汉弗莱斯(P. Humphreys)的定义^①主要刻画的是模拟所具备的运算能力以及其使用的模型的表征能力,提出如强调计算能力的“计算模型”概念(computational model)。([14], p.110)雷纳德(J. Lenhard)用“模拟建模”(simulation modeling)将计算机模拟描述为一种新的数学建模类型。^[7]贝斯巴特(C. Beisbart)提出模拟是关于实验的模型,从而与在其中进行的实验本身进行区别。^[15]

温斯伯格(E. Winsberg)和汉弗莱斯等人指出,计算机模拟作为新的建模手段,不仅在科学研究中具有新颖性,同时要求给出新的形而上学、认识论和方法论。^{[14], [16]}弗里格等人对此提出了反对意见。^[4]他们认为,计算机模拟在这几个维度确实提出了科学哲学问题,也提供了新的科学实践特征和问题语境,但这些问题绝非计算机模拟独有的:对科学模型的既往研究已经提出并回应了这些问题。

笔者赞同在理解计算机模拟时需要充分利用现有的科学哲学理论,但计算机模拟不能完全“还原”为科学模型的传统研究;事实上,弗里格举出的科学模型的既往研究,同样高度依附于不同学科的具体语境,如生物学、经济学等;并不存在一个普遍适用的模型理论足以回答所有不同类型的模型的哲学问题。因此,

我们需要辨别计算机模拟与传统模型观念的差异,并且审慎地考虑这些差异多大程度上要求我们重新给出回答。

随着研究者对作为仿真系统的计算机模拟的关注,相比起早期的模型观,他们对于模拟特征的说明在以下方面进一步深入:

首先是更加关注建模过程的整体性和复杂性。模型不再只是给定的数学问题,或是根据理论设置的理想化场景。在模拟开展之前,研究者必须对数学模型进行改造。一个标准的模型改造流程至少包括对一个或多个数学方程的离散化,以及引入一系列提高运算性能和实现可视化的辅助方法。根据实际研究问题的差异,对原先给定数学模型的改造程度也各不相同。例如在多尺度模拟的情境中,由于模拟需要同时引入不同理论背景下的方程,并在交界处采取因地制宜的连结方式,因此,不能认为初始的数学模型就蕴含了最后计算机模拟的模型。^[17]计算机模拟模型的建模过程因此与一般的理论模型截然不同。([7], p.21)更一般地说,计算机模拟模型应当看作是由初始数学模型、现实世界数据库、随机数生成器以及兼容性建模调整等资源所重构的综合模型。进一步,模型的综合和改造的复杂性要求我们说明新的表征是如何实现的。

其次,模型由静态转向动态,更加注重时间性,从而展现系统的动力学表现。哈特曼(S. Hartmann)和汉弗莱斯后期的研究都在对计算机模拟的定义中引入了时间性和动力学要求。^[18]该要求同时强调了可视化的表征输出:为了获得对变化过程机制的理解,不能只将结果以数据列表的形式输出。同时,在ABM中,研究者关心的系统涌现性往往只在动态可视化的演化过程中才是可以识别的。([14], p.113)

最后,模型观更加需要说明计算机模拟能否以及如何生产关于系统的新知识。早期模型观的一个推论是,模拟只能揭示现有理论和知

①该定义如下:系统S提供了对对象或过程B的核心模拟,当S是一个具体的计算设备,通过时间过程产生可计算模型的解.....该模型正确地动态或静态地表示了B。.....当某些行为的核心模拟和核心模拟输出的正确表征同时存在时,我们就得到了该行为的完整计算机模拟。同样,经适当变通后,对一个系统的完整模拟也是如此。

识所蕴含的推论,而不能提供关于世界的新知识。温斯伯格认为这种观点夸大了模型自身的表征能力,并且过分简化了模拟在产生数据时的复杂推理过程。([9], p.578)此外,模拟还可以提供关于某些证据存在性的高阶证据(High-order evidence),揭示新的现象(如涌现)及其产生的具体机制。[8]

2. 实验观中模拟的特点

在计算机模拟的仿真系统立场中,将模拟与实验联系起来是一种普遍的倾向。冯·诺伊曼将计算机模拟视为耗时耗力的物理实验的替代物。蒙特卡洛算法的设计者乌拉姆(S. Ulam)将模拟看作是“理论中的实验”(experiments in theory):“给定一个偏微分方程,我们可以建立一个合适的游戏模型,通过进行这些游戏来得到该方程结果的统计分布,也就是说,通过实验。”[11]更重要的是,模拟的实验结果可以为现实世界提供预测和参照,其结论在经验层面是可检验的,同时具有一定的外部有效性。

笔者认为,科学家偏好于实验观的理由可以总结为计算机模拟具备突破三个层面限制的能力。首先,计算机模拟能够突破真实性的限制。模拟构建了新的虚拟实验室,为原则上无法研究的问题带来了新的可能性。干预是获得关于因果关系的可靠知识的核心手段,[19]然而许多重要的研究对象原则上却无法实施可控实验干预,如人类社会、经济系统和全球气候。借助计算机模拟,气象学家已经能够构建出虚拟的气象系统并加以干预。[20]例如,在对风暴的发展形成过程的模拟中,计算机可以在数以万计的坐标位置上设置和测量温度、压力、湿度和风速等变量,按照一定的时间间隔记录它们的变化情况。这远远超过了发射一组气象气球所能获得的数据规模,从而能够有充分的信息来揭示风暴发生时的精确现象和细节。接下来,我们可以进一步研究各种可能的干预对系统的影响:如果向大气中添加一定量的碳,全球气候将会发生什么变化?如果全球平均温度升高一度,将会发生什么?模拟干预的实验结果可以与实际观测的数据相结合,从而帮助探

究因果关系。

其次,计算机模拟能够突破时间性的限制。对于大部分宏观复杂系统,其演化规律需要经历很长的时间跨度才会逐渐显现。现代科学活动中时间资源的有限极大地制约了对长周期现象的研究活动。在另一个极端,一些物理、化学和生物的微观现象发生过程非常短,现有的仪器和设备无法准确观察。借助计算机模拟,在适当构建的系统模型之中,研究者可以以相当大的自由度对时间进行任意调控,从而实现对极短时间间隔到极长时间跨度的观测。

最后,计算机模拟能够突破实践性的限制。在许多场景中,我们需要用计算机模拟来替代真实的实验,如实验的成本过于高昂(如干预国家经济体系),结果的不确定性和安全风险较大(如受控核聚变),实验过程耗时长(如观测沙丘的运动轨迹),违背伦理要求(如观察流行病的发生和扩散过程),实践上不可行(从不同角度观测星系、跟踪地震过程),等等。出于这些实践性的限制原因,我们无法进行直接的实验,因此借助计算机模拟构建一个替代系统,并在这一虚拟的实验室中进行实验。这一思路与物理学中采用与理想条件近似的实验体系,以及生物学中用模式生物替代真实自然种群等替代性实验设计具有类似的逻辑。

可以看到,实验观念中计算机模拟所触及的哲学问题已经超出了模型理论的应对范围,而是需要实验方法论来加以回答。例如,如何构建人工替代体系?如何判断该体系与真实对象的相似性?如何检验实验结论的可靠性?如何界定实验结论的内外有效性?等等。需要说明的是,笔者并非认为实验方法论就足以回答计算机模拟的全部相关哲学问题。关键在于,在计算机模拟的语境下,我们首先需要澄清什么是“在模型上实现的实验”,即对模拟实验的本体论和方法论特征进行适当刻画。回答该问题的一种可能进路是诉诸于物质性的连续谱视角(见第三节)。

3. 模拟的独立性

还有一部分学者认为,不应该试图将模拟划归至建模或实验这两个传统范畴之中。例如,

尽管更加有争议性, 贝斯巴特等人在思想实验的意义上讨论计算机模拟, 强调其用于呈现论证的功能, 讨论模拟作为思想实验的极限形式。^{[21], [22]} 阿尔瓦拉多 (R. Alvarado) 引入技术哲学的视角, 提出将模拟是一种工具。他将模拟在实验研究中扮演的角色类比为实验室, 并强调实验室作为平台的工具属性与实验本身的差异。^[23]

为了建立关于计算机模拟的独立哲学说明, 不仅需要能够充分说明模拟与建模和实验的相似之处, 还需要说明其差异。这样做的好处是我们可以获得更加清晰的概念界定, 并且保留计算机模拟自身的独特性。但坏处在于可能很难找到根本性的差异——否则关于模拟的讨论就不会产生模型/实验之争了。温斯伯格给出了一种综合方案: 计算机模拟既代表了一种表征性的实体 (representational entity), 同时也是一种与实验有相似性的实践活动。这样一来, 模型观和实验观即是本体论上同一枚硬币的两个侧面。^([9], p.583) 笔者认为, 在方法论层面, 我们同样可以放弃以非此即彼的方式来看待现有方法, 而是采取连续谱的视角来理解不同研究方法之间的相对关系, 即: 从特定维度出发, 辨析各类方法的属性相对强弱, 从而分析它们各自的胜场。

从科学实践和科学方法的视角来看, 模型观和实验观各自体现了今天科学技术中应用的计算机模拟的本体论和认识论特征。因此, 计算机模拟确实具有独特的中介属性, 这意味着它提供了连结理论、模型、实验的平台, 并且发挥了重要的工具性作用。基于此, 对计算机模拟的研究可以在此基础上沿着其不同方面的特性加以深入。接下来笔者希望进一步讨论如

何理解计算机模拟在实践活动中的实验性。

三、连续谱视角: 基于模型构建的实验系统

计算机模拟具有突出的混合属性。例如, 物理学家罗利克 (F. Rohrlich) 认为, 计算机模拟的方法论“处于传统的理论科学与实验和观察的经验方法之间”。^([24], p.507) 如何刻画这种中间地位? 摩根 (M. S. Morgan) 通过分析不同类型的计算机模拟中模型“卷入”物质性的程度, 在纯粹的模型演绎和实验推理之间建立了连续变化的谱系。^[25] 这一连续谱视角对于理解计算机模拟的哲学角色具有启发性。通过对经济学和生物学中计算机模拟的实际应用案例的考察, 她将模型实验和物质世界的实验室实验连接起来, 构成同一个方法谱系的两级, 物质性则是构建该连续谱的基本维度。该实验谱系可以理解为一个由物质性强弱程度来定义的坐标轴。坐标轴两端分别是完全不具备物质性的“模型实验”, 和完全物质性的“实验室实验”, 如下图1。

我们可以在三个层次上辨识特定计算机模拟过程所涉及物质性, 分别是输入、干预和输出 (见表1)。输入即对研究对象的建模。该模型可以是对真实物质对象的复现 (如对一块牛臀骨样本进行切片后建模), 也可以是由真实统计数据填充的理想化模型 (如使用牛臀骨的平均观测数据来调整栅格化模型)。在干预的实施上, 可以根据干预的具体形式和参数的取值来源涉入不同程度的物质性。在实验结果的输出上, 模拟不仅可以获得常见意义上的虚拟输出, 如果借助与真实世界一致的数学模型

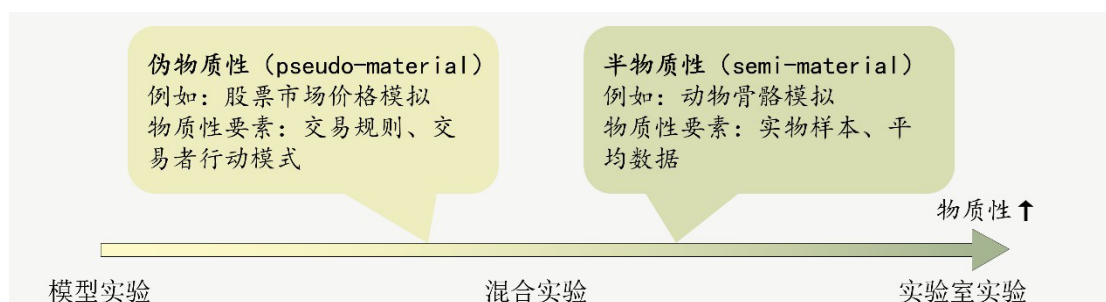


图1 物质性维度的模型-实验方法谱系

(如模拟股票市场),也可以通过虚拟模型获得近似物质性的输出(即模拟结果与真实世界的目标具有相同的统计学特征)。

从最初的蒙特卡洛方法到如今的多尺度建模技术,计算机模拟随着研究者的创新和改进不断扩充着自身的种类。谱系视角的优势在于只约束了两端的极限情形,同时可以容纳不断发展出的新方法,基于选定的特征维度与相近的类型形成对照关系,从而保留了计算机模拟在科学实践中的丰富特征。

摩根的谱系建立了一个很好的方法论图示,使我们能够通过连续变化的维度去理解现如今变化多样的实验方法之间的关联和区别。但谱系观念的另一个后果是:居于中间位置的计算机模拟始终在物质性方面落后于与实验室实验。由此,摩根和劳什(S. Roush)等人进一步认为,物质性的缺乏意味着模拟在认识论上处于劣势地位。^[26]这引发了关于计算机模拟认识论地位的哲学争论。反对者们则通过质疑物质性层面的近似性判断标准来论证计算机模拟并不劣于传统实验。^[27]

应当注意,模拟的认识论劣势实际上源自两个前提:其一,物质性越强,该方法的认识论价值就越高;其二,计算机模拟应当尽可能地在物质性层面接近传统实验室实验。这样一来,由物质性所表征的计算机模拟的“实验性”程度决定了其认识论价值和地位,这使得计算机模拟成为了缺乏理想实验时的不充分替代品。这一结论显然与今天计算机模拟在科学研究中体现出的价值并不相符。因此,笔者建议不必接纳这两个前提:首先,不应该在物质性维度上附加规范性约束,而应该将其还原为对实践特征的具体刻画。其次,谱系的图示除了能够说明不同方法之间的连续性,同时也保留

了方法之间的独立性和不可替代性。正如可见光光谱那样,不同的颜色虽然是光波长的连续变化,但同时我们仍可以识别其独立性。类似地,每种实验方法在特定研究场景中具有不可替代的功能和优势。

四、计算机模拟作为基于模型构建的实验系统

基于上述讨论,笔者认为,最好将计算机模拟理解为基于模型构建的实验系统。模拟必然包含建模的过程;如果没有模型,模拟的运行、校正和演示都无从谈起。此处的模型既可以是根据理论构建的理想化模型,也可以是复现物质对象和系统的近似描述模型。模型承接并综合了多个来源的既有知识,其中至少包含了现有的理论知识、来自真实世界的经验数据和唯象定律、调试和迭代过程的试错经验,等等。根据这些知识,研究者可以设定模拟系统中行动单元的智能程度、自治单元之间的交互关系、系统结构的抽象方式。

模型一旦完成,我们就具备了实验对象和测试平台。接下来,与传统实验类似,研究者可以在其中进行干预和观测活动,并输出实验结果。按照实验干预的实现方式、实验结果的实际性质等要素,不同模拟方法具备不同程度的物质性,从而占据了连续谱的不同位置。

基于上述对计算机模拟的基本观点,可以看到模拟具有如下典型的实验特征。

(1) 计算机模拟提供了可以开展干预和观察的“虚拟实验室”。伽里森有预见性地指出,即便是最早期的蒙特卡罗算法也“不仅仅是低级的数值计算方案,而是构建了替代性的现实(alternative reality)——有时甚至是一个

表1 各类模拟方法的物质性程度分析

类型 物质性程度 环节	模型实验	真实数学模型 (如股票市场)	仿真建模 (如动物骨骼)	实验室实验
输入(建模)	非物质性	非物质性	半物质性	物质性
干预	非物质性	非物质性	非物质性	物质性
输出(结果)	非物质性	(近似)物质性	非物质性	物质性

更好的现实——从而能够开展实验”。([12], pp.119-120) 该替代性现实处于传统实验室或是理论领域之外,一定程度上构成了“平行世界”,突破传统实验的约束。同时,虚拟实验室中的各要素都是可测量、可计算的,其精确性不仅使得其中的实验结果可以对照真实世界,也为下一步的模型修正及理论计算提供了基础。

(2) 计算机模拟的结果具备实验结果的类似特性,如可重复性和外部有效性。由于虚拟实验室依附于算法、程序和数据库存在,其调节、干预和演变的过程可以反复重现,因此一旦成功,模拟就是严格可重复的^①。([7], p.26) 外部有效性意味着模拟的结果能够推广至真实世界,其发生的规律是近似的,而非仅在虚拟实验室之内成立。实现外部有效性的前提是模拟在建模和干预的过程中充分应用了背景知识和经验数据,故而实验系统具备了足够的物质性。

(3) 计算机模拟能够提供因果机制证据。基于此,计算机模拟几乎成为了研究复杂系统的最主要方法。^[28]对复杂系统直接进行干预通常不切实际,而还原式的拆解分析会破坏涌现等系统的整体特性。通过计算机模拟的建模和实验,在虚拟实验室中重构复杂系统的“数字孪生体”(digital twins)可以说是研究系统整体性质的最优方案。计算机模拟能够展示和保留系统演化过程中的具体信息,提供涌现等非还原现象产生的因果机制证据。这一特性使得模拟在演化博弈论和计算社会科学等领域中得到了充分的应用。

结 论

结合当今的科学实践活动,在探究和理解计算机模拟这一极具潜力的研究方法时,最好采取广义的、灵活的实验观念,将其视为基于模型构建的实验系统。采取该立场有如下益处:

从类型上看,如今计算机模拟技术的应用前景在于建立可干预的实验模型,而不仅仅是

提供计算和解题的功能;

从哲学讨论来看,模型观和实验观是模拟的不同侧面。计算机模拟兼具模型演绎推理和实验探索实践风格,具有重要的方法论和认识论价值;

从科学实践研究案例来看,计算机模拟在诸多研究领域提供了全景“虚拟实验室”,为复杂系统视角下的自然和社会活动的演化过程和因果机制认知提供了有效的工具,弥补了这些领域中经典实验方法的功能空缺。

[参 考 文 献]

- [1] Durán, J. M. 'A Formal Framework for Computer Simulations: Surveying the Historical Record and Finding Their Philosophical Roots'[J]. *Philosophy & Technology*, 2021, 34: 105-127.
- [2] Teichroew, D., Lubin, J. F. 'Computer Simulation-Discussion of the Technique and Comparison of Languages'[J]. *Communications of the ACM*, 1966, 9(10): 723-741.
- [3] Simon, H. A. *The Sciences of the Artificial*[M]. 3rd Ed. Cambridge: MIT Press, 1996.
- [4] Frigg, R., Reiss, J. 'The Philosophy of Simulation: Hot New Issues or Same Old Stew?'[J]. *Synthese*, 2009, 169(3): 593-613.
- [5] Shubik, M. 'Simulation of the Industry and the Firm'[J]. *The American Economic Review*, 1960, 50(5): 908-919.
- [6] Shannon, R. E. *Systems Simulation: The Art and Science*[M]. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1975.
- [7] Lenhard, J. *Calculated Surprises. A Philosophy of Computer Simulation*[M]. New York: Oxford University Press, 2019.
- [8] Parker, W. S. 'Evidence and Knowledge from Computer Simulation'[J]. *Erkenntnis*, 2022, 87: 1521-1538.
- [9] Winsberg, E. 'A Tale of Two Methods'[J]. *Synthese*, 2009, 169(3): 575-592.
- [10] 薛霄. 复杂系统的计算实验方法——原理、模型与案例[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- [11] Keller, E. F. 'Models, Simulation and "Computer Experiments"'[A], Radder, H. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*[C], Pittsburgh: University of

^①实际上,能否稳定地重复同时也是检验模拟是否成功的标志。例如,成功地复现地球大气的风和压力关系标志着首个气象计算机模拟系统的建立。

- Pittsburgh Press, 2003, 198–215.
- [12] Galison, P. 'Computer Simulations and the Trading Zone'[A], Galison, P., Stump, D. J. (Eds.) *The Disunity of Science. Boundaries, Contexts, and Power*[C], Stanford: Stanford University Press, 1996, 118–157.
- [13] Saam, N. J. 'What is a Computer Simulation? A Review of a Passionate Debate'[J]. *Journal for General Philosophy of Science*, 2017, 48: 293–309.
- [14] Humphreys, P. *Extending Ourselves. Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [15] Beisbart, C. 'Are Computer Simulations Experiments? And if Not, How Are They Related to Each Other?'[J]. *European Journal for Philosophy of Science*, 2018, 8: 171–204.
- [16] Winsberg, E. 'Simulations, Models, and Theories: Complex Physical Systems and Their Representation'[J]. *Philosophy of Science*, 2001, 68(3): S442–S454.
- [17] 邵嘉诚、郭贵春. 多尺度模拟的方法论意义[J]. 自然辩证法研究, 2022, 38(7): 3–8; 22.
- [18] Hartmann, S. 'The World as a Process: Simulation in the Natural and Social Sciences'[A], Hegselmann, R., Müller, U., Troitzsch, K. G. (Eds.) *Modelling and Simulation in the Social Sciences From the Philosophy of Science Point of View*[C], Dordrecht: Kluwer, 1996, 77–100.
- [19] Pearl, J. *Causality: Models, Reasoning, and Inference*[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [20] Lewis, J. M. 'Clarifying the Dynamics of the General Circulation: Phillips's 1956 Experiment'[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79(1): 39–60.
- [21] Beisbart, C. 'How can Computer Simulations Produce New Knowledge?'[J]. *European Journal for Philosophy of Science*, 2012, 2: 395–434.
- [22] Chandrasekharan, S., Subramanian, V., Nersessian, N. J. 'Computational Modeling: Is This the End of Thought Experimenting in Science?'[A], Frappier, M., Meynell, L., Brown, J. R. (Eds.) *Thought Experiments in Philosophy, Science and the Arts*[C], London: Routledge, 2013, 239–260.
- [23] Alvarado, R. 'Computer Simulations as Scientific Instruments'[J]. *Foundations of Science*, 2022, 27: 1183–1205.
- [24] Rohrlich, F. 'Computer Simulation in the Physical Sciences'[A], Fine, A., Forbes, F., Wessels, L. (Eds.) *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association 1990, Vol.2*[C], East Lansing: Philosophy of Science Association, 1991, 2: 507–518.
- [25] Morgan, M. S. 'Experiments Without Material Intervention: Model Experiments, Virtual Experiments, and Virtually Experiments'[A], Radder, H. (Ed.) *The Philosophy of Scientific Experimentation*[C], Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, 2003, 216–235.
- [26] Roush, S. 'The Epistemic Superiority of Experiment to Simulation'[J]. *Synthese*, 2018, 195(11): 4883–4906.
- [27] 彭文青. 传统实验比计算机模拟在认知上更优越?[J]. 自然辩证法通讯, 2018, 40(6): 36–43.
- [28] 邴全民. 探索复杂性的计算途径[J]. 自然辩证法研究, 2002, 18(6): 40–42; 71.

[责任编辑 王巍 谭笑]