

# 模型——现代科学的核心方法

孙 小 礼

构建模型,把模型用作认识客体和制造产品的手段,这是人类在认识自然和塑造人工自然的实践过程中的—大创造。模型方法已成为现代科学的核心方法。

本文从方法论的角度,对于科学模型这一现代核心方法在以下四个方面作—概要论述。

## 一、什么是科学模型及其两大类型

科学模型是人们按照特定的科学研究目的,在一定的假设条件下,用物质形式或思维形式再现原型客体的某种本质特征,诸如客体的某种结构属性、功能、关系、过程,等等。通过对物质形式或思维形式的科学模型的研究,来推知客体的某种性能和规律。这种借助于模型来获取、开拓和深化关于客体的认识的方法,就是科学研究中常用的模型方法。

### (1)物质形式的科学模型,有天然的与人工的两类

天然模型,即寻找一种天然存在的与客体在主要性能上具有相似性的实物,作为客体的模拟物或替代物来进行科学研究。最为典型和运用得最多的是生物模型,其方法论作用表现在两个方面。—方面,生物常具有人类所没有的许多奇妙的器官和功能,给人以启示,使人们想到模仿生物的某种器官来构思和建造能够服务于人类的某种产品或工程,从而形成了生物科学与技术科学的交叉学科——仿生学。某种生物体常常就是某种人造产品的最初的模型。例如,飞鸟曾是飞机设计的雏型。另—方面,生物又常具有与人类类似的器官和功能,因此在研究人体的时候,常常需要以某种生物作为模型,即借助于生物模型来获取和深化对于人体的认识。现在,关于人体生理学的许多知识都是通过研究—些哺乳动物(如猴、狗、兔、猫、鼠等)的器官和机制得到的,这已成为人体生理学的基本研究方法。

人工模型,即制造—种人工的与客体具有某种本质相似性的实物,运用这种模型来进行模拟实验或模型实验。人工模型在工程技术中和科学研究中都大量地经常地使用着。工程技术中的实物模型,其特点是它们所模拟的是人们所设计的希望建造出来为人的某种需要服务的工程或产品,如水坝、桥梁、房屋、船舶、飞机、人造卫星、宇宙飞船等等。从人们构思、设计到建造成功,中间必须制作多种模型,进行大量模型实验,通过对模型的不—断比较和不—断修改,才能按照较优或最优的设计进入实际的工程建设和产品生产,从而达到人们原定的或修改了的目标。模型在工程技术中显示出必不可—缺的巨大作用。这已为人们普遍了解。

在科学认识活动中,不但对于那些不能直接进行观察的微观世界和宇宙世界的客体,需要

制作人工模型进行实验研究,就是对于人体这样的研究对象,现在也越来越多地制作人工的实物模型进行模拟研究。这种趋势,主要是由于人类科学知识的增长和物质技术手段的进步,使得对于象人体器官这样一些复杂客体制作人工模型有了可能。同时,也是因为以生物作为人体的模型进行研究,也常常具有难以克服的缺陷,加之一些高等哺乳动物本身也是人类珍贵的保护对象而不宜太多地加害于它们,所以,产生了制作人工模型的实际需要。

## (2) 思维形式的科学模型

对要研究的客体,按照一定的研究目的,经过科学的分析而抽象出它的本质属性和特征,构造一种思维形式的模拟物,即思维模型,常表现为理想的、数学的、理论的形态。在近现代科学认识活动中,经常运用这种抽象的科学模型来进行分析、推理和演算,从而获得关于客体的规律性知识。常用的思维模型大体有以下几种形式。

**理想模型**,这是对客体所作的一种科学抽象,也是一种简化和理想化。实际客体都是具有多种属性的。然而当它作为特定的研究对象,针对某种目的,从某种角度进行研究时,有许多没有直接关系的属性和作用便可不予考虑。例如,我们从力学角度研究引力作用下物体的位置移动时,只需考虑质量这一最重要的属性,抽象出质点模型。只要我们所考察的物体运动只涉及其位置移动,并且所涉及的空间尺度比物体自身的尺度大得多时,都可以用质点模型来代表所研究的客体。但是,当我们要研究的客体运动,需要涉及它自身的转动时,质点模型便不适用了,于是又抽象出刚体模型。刚体表示一种形状不变的物体。真实的物体在受到力的作用时多少会发生形状的变化,当这种形变可以忽略不计时,便可看成刚体,所以刚体也是一种简化了的理想模型。只要我们所研究的运动只涉及平移和转动,而不涉及物体的形变时,刚体便是很有效的力学模型。但是,需要考虑物体的形变时,刚体模型就不适用了,于是又抽象出理想的弹性体模型,等等。

科学研究离不开科学抽象,理想模型作为科学抽象的结果,在各门科学中比比皆是。诸如,数学中的点、线、面;物理学中的理想流体、理想晶体、点电荷、绝对黑体;化学中的理想溶液;生物学中的模式细胞;等等。由于这些理想模型反映了客体的本质属性,因而它们同时也是各门科学中的基本概念。

**数学模型**,这是对所研究的问题进行一种数学上的抽象,即把实际问题用数学的符号语言表述成一个待解的数学问题,亦称为数学模型。数学模型一般是以抽象的理想模型为基础建立起来的。建立数学模型的基本点就是要寻求这一实际问题与某种数学结构的对应关系。

建立数学模型时要寻找的数学结构可能是数学科学中原来就有的,也可能是由研究者根据实际需要来创立的。后者即所创建的数学结构,在应用中经受锤炼、在理论上日臻完善以后,就转化为数学中的新结构。从古代的欧氏几何到微积分与微分方程、抽象代数、拓扑学、非欧几何、泛函分析、微分几何、概率论与数理统计、以至模糊数学、突变论、分形几何等等、等等,不断发展着的数学,为人们提供着越来越丰富多样的数学结构。由于科学研究对象之日益复杂,对已有数学结构综合交错的运用,以及广泛使用电子计算机,直接用计算机语言来模拟实际问题,建立计算机仿真模型,已成为当今数学模型发展的特征和趋向。

**理论模型**,这是对所研究的对象领域中的基本问题及其有关问题,在积累了相当多的科学事实和经验知识的基础上,系统地进行分析 and 综合,提出基本概念,据此推理,对这一领

域中的一系列重要问题作出理论上一以贯之的回答和说明,并且提出新科学预见。这样的理论模型通常表现为一种科学学说。

在自然科学中,特别是在比较成熟的严密科学中,理论模型是定量化的,也就是说,是包括了数学模型的,能从一定的基本概念和数量关系出发,进行推理和演算,对有关的各种问题和现象,作出定量的回答和解释,并能作出指明一定误差范围的科学预测。

理论模型,一般只能根据研究者所掌握的已有的有限的科学事实和科学知识来建立,而要用它去涵盖更多的事实,并演绎出新的事实即预言,实际上其中必然含有假设的推测的成分。因此,作为一种科学学说的理论模型,一般具有假说性质,是一种“假说—演绎体系”。

半经验半理论模型,在建立理论模型时,如果其中含有明显的或相当数量的经验成份,实际上就是形成了一种理论加经验或数学加经验的模型。运用这种半经验半理论模型可以进行半定量半定性的研究。

现代科学的理论模型一般希望具有数学形式,但是,在很多情况下,特别对于十分复杂的对象系统,不仅涉及的变量和参量的数目甚多,而且其中有许多因素是难以测量和定量化的,于是人们常常根据经验,或在经验与理论相结合的基础上,对这些因素作出某种量的估计,提出某种概念和假设。这时虽然也能运用某种数学结构,也能进行推理和演算,但是所得到的结果只能理解为半定性半定量的,不能作为严格的量的分析的依据,只是提供定性的参考性推论。这种半经验半理论模型,在科学技术中大量地使用着,尤其对于复杂系统的研究,象生物体、人体以及社会系统等,实际上只有采用这种模型进行定量分析与定性分析相结合的综合研究方法才是最有效的。

## 二、建立模型的方法论原则

在科学认识活动中,模型是主体与客体之间的一种特殊的中介。一方面,模型是主体即科学研究工作者所创建的、用来研究客体的工具或手段;一方面,模型又是客体的代表或替身,是主体进行研究的直接对象。所以,模型身兼二者,既是工具,又是对象。或者说,科学模型具有工具性与对象性双重性质。那么,如何利用模型来研究客体呢?这里我们提出三个建立模型的方法论原则。

### (1)相似性与简单性的统一

科学模型作为研究对象,是为了能够把对模型的研究结果有效地外推到原型客体,因此,必须要求模型与原型具有相似性,而且是本质上的相似性。同时,模型作为研究手段,是为了便于运用已有的各种知识和方法,伸展主体的各种才能,因此要求模型与原型相比,具有明显的简单性。要使相似性与简单性有机地统一起来。

从相似性来说,我们不可能也不必要要求模型与原型全面相似,即在外部形态、质料、结构、功能等所有特征上都一一相似。但是必须按照所要研究问题的性质和目的,使模型与原型具有某种本质上的相似性,也就是在基本的主要的方面具有相似性。建立模型的过程,也是对原型客体进行科学抽象的过程。要在尽可能周密地进行具体分析的基础上,分清主次。要敢于和善于舍弃次要的无关大局的细节,抓住本质性的东西,从而找到解决问题的关

健。

从简单性来说,就是要化繁为简、化难为易,使复杂事物有可能通过比较简单的模型来进行研究。对于客体所处的状态、环境和条件,进行分析比较,作出一些合理的简化假设,以便能够运用已有的科学知识和科学工具,或便于创造新的科学方法,使模型成为有效的研究手段。对于物质形式的科学模型,就是要便于进行调控、观测等实验性操作;对于思维形式的科学模型,就是要便于进行逻辑推理和数学演算等理论性操作。

模型必须具有简单性,才能够实行操作,实际发挥作用。但是简化不是主观随意的、必须合理和适度,以不丧失模型与原型本质上的相似性为原则。也就是说,必须坚持简单性与相似性相统一的原则,这是建立科学模型的第一要义。

### (2) 可验证性

模型是否具有与原型本质上的相似性?模型是否具有合理的简单性?这些是需要加以验证的。如果一个模型不具有可验证性,就不是一个科学模型,是没有方法论意义的。

一般说来,只要模型具有可操作性,就有具体的操作过程,并能取得具体的研究结果,这结果是可以与实际进行对照和比较的,因而就是可检验的。科研工作者应主动地自觉地利用模型的可检验性对之进行检验。如果通过检验发现了模型的缺陷,就要对模型进行修改,甚至代之以新的模型。如果模型经受了检验,也需要进而从理论上论证其科学性。

科学模型的验证,需要一个过程,有时要经历相当长的时间。像质点模型,首先是牛顿在研究万有引力定律时使用的,质点充分体现了简单性与相似性的统一,然而这个在现代科学家手中运用自如的质点,在历史上却使人们困惑了二十年之久。

### (3) 多种知识和方法的综合运用

建立模型,运用和检验模型,都没有刻板的程序和固定的方法,需要科研工作者综合地灵活地使用多种多样的知识和方法,充分发挥自己的创造性思维能力。

塑造一个有效的科学模型,既要严格地以原型为依据,又要广开思路,敢于提出大胆设想,它是艰苦的科学思维和科学劳动的成果,又是令人赞赏的富有魅力的科学艺术品,是多种知识、多种思维和多种方法相综合的产物。科研工作者要充分发挥想象力,善于联想和类比,善于捕捉灵感或直觉突然闪现的新思路、新观念;也必须充分发挥科学抽象和逻辑推理的力量,进行严谨的归纳和演绎,进行科学的分析和综合。总之,要使经验方法与理论方法结合,逻辑思维与非逻辑思维并用。科学模型能起作用,正因为其中凝结着科研工作者的经验、思维、知识、方法和技巧,是智慧和勤奋的结晶,是科学中多种知识和方法的综合。

## 三、科学模型的多重功能

### (1) 科学模型的研究纲领作用

科学模型只有在人们对于客体已具有一定认识、积累了一定知识、数据和资料的基础上才有可能建立起来。建立模型是对已有的经验、知识进行去伪存真、去粗取精的思维加工过程。模型本身体现为对客体的已有认识的总结,是科学认识的一种阶段性成果。然而,模型作为科学工作者的创造,又加进了人们的新的猜测和假设,含有新的思想和概念,因此,

科学模型,特别是理论模型又是进一步研究客体的新起点。

运用新的理论模型,是否能对过去已知的事实,作出回溯性的科学解释,是否能说明更多的事实,并且能预见新的事实?这一系列问题需要以新的模型为出发点,一方面设计实验,一方面进行理论的推导和计算,有目的有计划地把实验研究和理论研究全面推开。因此,对于科学研究来说,一个新的理论模型实际上能起到一种研究纲领的作用。无怪乎有的科学家说:建立一个模型;比一千个事实还重要。

### (2)科学研究的间接方法

人类面对着一个无限广阔和无限丰富的客观世界,其中能够直接观察实验进行研究的客体只占少数,大多数对象需要采用间接研究的方法,借助于既具有客观依据又带有主观想象的模型来开展研究,逐步推进认识。

例如,对于不再重复出现的现象,只能收集这一事件所留下的一些痕迹和某些间接得来的信息,加上人们的联想与假设,构建出实物的和思维的模型来开展实验研究和理论研究。像对已经灭绝的物种如恐龙的研究,对人类的起源、生命的起源、地球和太阳系以及诸种天体的起源等等的研究,都只能模拟当时的环境条件,运用模型来进行。对于只能依靠科学仪器观测,获得部分信息的微观世界和宇观世界的现象,只能依靠已经积累到的数据资料,加上一些猜测和假设,构建模型来开展研究,像对原子内部、原子核内部以及远离地球的星系都是借助模型来逐步加深认识的。对于人体、人脑这样的研究对象,出于对人身健康和伦理道德的考虑,只能借助某种天然相似物或建造人工模型来加以研究。至于在工程设计中,对于人们期望制造的人工客体,必须先通过模型进行大量试验和演算,才能作出科学的合理的设计和施工方案,更是众所周知的了。

### (3)抽象模型与思想实验

思想实验作为与科学实验相辅相成的一种理论研究方法,早已显示了它在科学发现中的作用。这是一种与实际实验程序相类似的逻辑推理方法,是运用抽象模型,按照实际实验的格局和步骤展开的思维活动。实验对象、实验设备、实验条件等都是些假想的思维模型;实验操作是在思维中进行的推理。思想实验的结果实际上是思维操作亦即逻辑推理的结果。思想实验之所以重要,是因为它能成为实际实验的逻辑补充。实际实验是物质实践活动,因为受到种种物质条件限制,对于研究对象、环境条件只能作到相对的简化、纯化和强化,而思想实验则可以作到绝对理想化、绝对的简化、纯化和强化,例如,在实际实验中人们只能达到一定程度的真空,相当程度的光滑表面等等,而在思想实验中人们可以设想绝对真空、完全光滑等等。而思想实验可以超越具体物质条件的限制,在思维中达到某种理想的、极限的境地,亦即用这种特殊的逻辑推理方法超越实际实验的局限,把实际上终止了的实验在思维中继续进行下去,从而获得新的结论。伽利略之发现惯性定律正是实际实验与思想实验相结合的产物。爱因斯坦在建立狭义相对论和广义相对论时也巧妙地运用了思想实验。

由于思想实验是一种严密的逻辑推理,它能使实验逻辑化,不但是建立新概念、新理论的一种发现工具,同时也是揭露旧理论、旧概念的逻辑矛盾的一种批判工具。

### (4)数学模型与计算机实验

电子计算机作为一种强有力的计算手段进入人类认识活动以后,不但使得许多复杂困难

的数学问题能够求得数值解,而且它还表现为一种认识手段,以计算机实验来部分地取代实际实验,或作为实际实验的补充,能起到发现规律、检验理论、预测新现象的作用。

所谓计算机实验,就是把所要研究问题的数学模型转换为能输入计算机进行数值运算的形式,或直接建立计算机仿真模型,在计算机上通过系统地变换参量作大量数值计算,经过分析比较从而作出某种结论或作出科学发现。计算机实验又称数学实验或计算机仿真实验。对于许多难以在实验室里进行模拟研究的现象,像天文学中的超新星爆发过程、地质学中的地壳运动过程、分子生物学中一些大分子的复杂行为,等等,都可以在计算机上通过数学模型来模拟,对各种可能的理论解释和预测在计算机实验中进行比较和分析。

#### (5) 研究复杂系统的关键步骤

现代科学研究的对象呈现着愈来愈复杂的趋势。而研究复杂系统的有关问题,最为有效的或者说是关键性的步骤,就是建立半经验半理论模型。为此要善于把与研究的问题有关的各学科的理论知识和有关专家的经验知识、直觉判断结合起来,把有关的各种数据、信息与计算机技术结合起来。首先,通过专家群体研究和讨论,分析问题的症结所在,形成初步的定性判断,作出经验性假设,按照系统科学的思想 and 观点把问题纳入系统框架,界定系统环境,确定环境变量和状态变量,建立系统的模型。其次,进行计算机仿真实验,研究系统在不同输入下的输出、系统的动态特征及其未来行为等。然后在这样的系统分析的基础上进行系统优化,亦即找出使系统具有我们所希望的性能的最优项较优的解决方案。对于这样得到的定量结果,再由各有关专家共同讨论分析、判断其可信程度,以便调整参量和修改模型。通过这样的工作步骤并重复多次以后,使经验性假设上升到以定量分析为依据的定性判断,达到这样的理性认识,才能对问题作出比较可信的结论。

正象对比较简单的系统建立数学模型,往往不能只用一个方程式,而需要建立联立方程组那样,对于复杂系统则往往需要建立多个模型,构成联立模型组,这样才能涵盖所要研究的复杂内容。模型组的建立和求解,都需要依靠计算机和计算机实验。

#### (6) 模型研究对实践的指导作用

模型是对实际客体的科学抽象,具有简化和理想化的特点。在模型上进行研究的结果,一般优于实际情况。这样,就能以科学模型所提供的优化条件作为追求目标,使人们找到了在实践中怎样改善客体及其环境,以争取达到最佳或较佳效果的方向和途径。

在工程设计中,模型对实践的指导作用尤为直接和明显。所谓设计,就是首先制作模型,或者使设计方案模型化,通过在模型上反复试验和测算,并不断加以修改,直到确知能够顺利施工和保证产品达到预期要求时才能正式投入生产。

通过科学模型预测某一事物的未来发展情况,无论是作出短期的还是长期的、定性的或是定量的预测,对于人们的实践活动都有重要意义。例如,我国学者近十几年来根据我国国情,对人口问题建立数学模型,通过科学计算,对我国人口增长趋势作出了比较具体的数字预测,不但为人口控制的决策提供了一定的科学依据,而且对制定经济发展规划也有参考价值。

### 四、模型的多样性与局限性

当不同的人、不同的科学共同体,或采集到客体的不同信息,或采用了不同的思路,不

同的方法,或依据了不同的科学概念、假说等理论知识,或加进了不同的想象和猜测,都可能构建出不同的模型。因此,在科学认识活动中表现出两方面的情况。一方面,对同一研究对象,常有多模型并存,形成相互竞争或对峙的局面;另一方面,对同一问题的认识深化过程,实际上也就是多种模型逐个更迭的过程。

如果不同的科学模型,各从不同的方面反映了客体的本质属性,通过不同的操作,各被一些实验所证实,就都是成功的有价值的并具有竞争力的模型。它们可能在不同的历史时期分别占过上风,但总的说来,是处于相互对峙、争执不下的局面。历史说明,这种情况往往不可能由一个模型取代另一个模型,而只能由一个更高级的综合了各方优点的模型所取代。像光的波动说与微粒说的长期对峙,便是一个突出的例子、它们终于被光的波粒二象性理论所取代。

在对客体的实际认识过程中,常常是不同模型的并存与更迭交替出现。例如在对原子的研究过程中,1910年以前曾经提出过长岗的土星模型、勒纳德的中性微粒模型、里兹的磁原子模型、汤姆森的实心带电球模型等,而以汤姆森的原子模型最有成效。但它不能解释1906年由卢瑟福,首次观测到的 $\alpha$ 射线的散射现象,不久就被卢瑟福提出的原子模型所取代。但这一新原子模型也同样遇到了种种困难,比如怎样解释原子的稳定性等问题,于是它又被玻尔建立的模型所代替。玻尔模型当时虽然倍受称赞,但又有明显的局限性,以后又被量子力学对原子结构的处理方法所取代。这一系列原子模型的嬗替,正是体现了人们对原子结构的认识在逐步深刻和精确,至今还在继续认识过程中。

在充分认识科学模型在人类认识活动中的重要地位和作用的同时,还必须清醒地认识到模型方法的局限性。作为科学模型,虽然具有与客体在本质上的相似性,但毕竟只是一种相似物,相似的程度有高有低,有时可能离原型还有极大的差距。模型本身固有的这种内在局限性,决定了模型方法的作用是有限的,依靠模型方法绝不可能穷尽对客体的认识。用模型方法取得研究结果连同模型本身都是需要检验的。再好的科学模型也只是一种阶段性的认识成果,模型方法的实质不止是建构模型,还要用不断改进的模型,去逐步逼近实际客体。科学工作者在运用模型方法时,要自觉立足于检验,致力于模型的改进、改进、再改进。

我们在这里强调模型方法的局限性,并不是要降低或冲淡科学模型的作用,相反,正因为模型方法是现代科学的核心方法,“牵一发而动全身”,模型的好坏,将对科研工作的全局发生重大影响,所以科学工作者必须正视和有意识地去克服模型的缺陷,不断改善模型,才能充分而又恰当地发挥科学模型的种种功能。

(作者单位:北京大学科学与社会研究中心)

(上接第19页) 英雄豪侠慷慨悲歌的气概和人格审美,《佛国记》所展示的舍身求法的精神等;许多优秀的作品达到了那个时代创作的高峰,至今仍能引起我们心灵的震颤,因而具有永恒的魅力和永久的生命;许多优秀的作品通过改编,许多思想资料通过加以新的诠释,不仅可以保持其反映民族精神特性的本质,亦可以显示出其新的意义。这种赋予传统文化以现代化的时代精神的新诠释,固然是世界化的,但同时又是高度民族化的。

(作者单位:湖北省社会科学院哲学研究所)