

# 探骊探索性实验的建模历程<sup>\*</sup>

石 尧 (首都师范大学教育学院 北京 100048;清华附中志新学校 北京 100083)  
尹 迪 (北京市第八十中学管庄分校 北京 100123)  
路海波 (东直门中学 北京 100007)  
孙 越 (北京二零一中学 北京 100084)

**摘 要** 立足模型建构的问题表征理论,对探索性实验的建模历程进行了研究,并根据探索性实验的特点,将其分为赋值表征、知识表征、抽象表征、图像表征、实物表征、实验表征、方法表征和数学表征八个表征环节,最后结合各表征间的密切联系,从超循环理论出发,对探索性实验的模型建构历程进行了系统描述,将其刻画为一个三级嵌套循环的过程。

**关键词** 探索性实验 科学建模 建模历程 模型表征 超循环理论

**文章编号** 1002-0748(2025)2-0021

**中图分类号** G633·7

**文献标识码** B

## 1 问题提出

自 21 世纪以来,世界各国纷纷启动新一轮的科学教育改革,并不约而同地将发展学生模型意识与建模能力作为改革的核心目标<sup>[1]</sup>。科学建模是科学的关键特征,建模能力是科学素养的核心组成部分<sup>[2]</sup>。有研究者甚至将科学直接定义为科学建模的过程,认为描述、解释和预测宏观或微观自然现象的实质就是建立和使用科学模型<sup>[3]</sup>。于是,基于学生模型建构能力的培养,我国教育工作者们开展了大量的研究,并取得了丰硕的成果。然而我们发现,这些关于科学建模的研究大都是围绕问题解决而开展的,对于科学实验领域的建模研究却鲜有涉及。有鉴于此,本文将着力探讨“探索性实验”中涉及的模型建构历程。所谓“探索性实验”,是由教师给出实验课题,学生自己拟定实验方案,独立完成实验的观测和分析,从而发现“新”现象,解释“新”现象,并得出他们原本不知道的规律性认识的实验<sup>[4]</sup>。

## 2 探索性实验中的建模历程研究

### 2.1 研究的理论依据

在我国学者关于科学建模历程的众多研究中,首都师范大学邢红军及其团队提出的模型建构问题表征理论<sup>[5]</sup>颇具特色。他们以系统科学的协同学理论为基础,基于“模型建构的本质是问题解决”这一思

路,以描述信息呈现方式的“表征”为刻画建模过程的手段,从而构建了问题表征取向的模型建构历程。研究中将模型建构的过程看作是一个连续与突变、独立与关联、协同与竞争、控制与自发、必然与偶然相结合的自组织表征过程,从而将模型建构的过程分成“抽象表征、图像表征、赋值表征、知识表征、方法表征、数学表征”六步表征环节(见图 1),并结合“人骑自行车转弯角度”问题,对各表征环节的内涵予以了系统解读。由于科学建模问题表征理论是以具体的物理学科为研究基点,以原始物理问题为研究载体,因而使其具有着鲜明的学科性、良好的生态效度以及极强的可操作性。同时,该理论还是基于我国教育教学当中存在的现实问题而创生的本土化理论,深深地扎根于我国的教育教学实践当中,而不是对外域教学理论的简单演绎,所以其葆有着强大的生命力,对我们开展探索性实验的建模研究具有很好的参考意义。

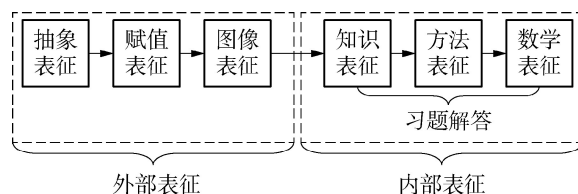


图 1 问题表征取向的模型建构过程

“建模教学之父”海斯特斯曾言,科学研究(或学习)的过程就是对自然世界建模的过程。就探索性

<sup>\*</sup> 基金项目:本文系北京市教育科学“十四五”规划 2023 年度青年专项课题“基于项目学习的高中物理单元教学模式的实践研究”(立项编号:CDCA23145)的研究成果。

实验而言,一方面实验探索的过程在本质上就是一种科学研究的过程,因此可以用模型建构问题表征理论的观点来刻画其模型建构的历程;另一方面,由于探索性实验自身的操作性、实践性、外显性等特点,又与一般问题解决中的建模过程存在着一定的差异。进一步从认知心理学角度而论,模型建构的过程是一种对信息的整合与加工过程,于是依据人脑对信息加工方式的不同,可以对探索性实验中的建模过程与问题解决中的建模过程进行分辨。具体而言,认知心理学把信息加工的方式分为数据驱动和概念驱动两类。其中,概念驱动是一种自上而下的加工方式,它以科学理论与经验事实的矛盾及科学理论自身的矛盾作为科学研究的起点,以理论分析产生的问题作为加工对象;数据驱动是一种自下而上的加工方式,它以观察及科学事实的发现作为科学研究的起点,以科学研究数据作为加工对象<sup>[6]</sup>。据此不难发现,问题解决的建模过程属于自上而下的概念驱动,而实验探索的建模过程则属于自下而上的数据驱动。

综上所述,探索性实验与问题解决间的密切关系启示我们可以采用“表征”的方式来刻画探索性实验中的模型建构过程,而两者信息加工方式的不同,又启示我们应结合探索性实验的自身特点,在建模表征的类型以及表征的前后次序方面做出一定的调整。

## 2.2 探索性实验的建模表征研究

我们在汲取模型建构问题表征理论“合理内核”的基础上,结合探索性实验强调实验设计、动手实验、数据处理等特点,以及学科专家、中学生等群体在探索性实验中的实际建模表现,梳理出探索性实验在建模历程中涉及的八个表征环节,即赋值表征、知识表征、抽象表征、图像表征、实物表征、实验表征、方法表征和数学表征。下面结合一个探索性实验的建模案例来阐述各表征的内涵。问题如下:在考虑弹簧质量的情况下,请对原有弹簧振子周期公式  $T = \frac{2\pi M}{k}$  予以修正。其间自选实验器材,设计实验方案,并完成数据的收集与分析。

### (1) 赋值表征

赋值表征是模型建构中特有的表征,本质上是一种假设思维,强调从已有的情境信息出发,对研究系统提出的一种带有推测意义的猜想。对探索性实验的模型建构而言,赋值表征的出发点在于找到与实验探索有关的,且便于测量的物理量,从而确立实验的测量目标,为实验的开展指明方向。在很多情况下,探索性实验中的因变量与自变量较为隐晦,抑

或无法直接测量,而赋值表征的任务就是根据情境信息,从中发掘、提取与区分各种变量,并配合知识表征将无法直接测量的变量,赋值为可以直接测量的中间变量,最终通过实验完成对因变量与自变量的数据采集。对于修正“振子周期”的探索性实验,虽然弹簧振子质量与弹簧周期在题目中已明确提及,但仍需要学生结合已有知识,找到真正的因变量——钩码质量  $m$ ,并赋值出辅助周期  $T$  计算的中间变量——振动次数  $n$  和振动总时长  $t$ 。

### (2) 知识表征

知识表征是确定模型建构需要使用的科学概念和科学规律并加以运用的过程。在探索性实验的模型建构中,知识表征发挥着连接间接测量量与直接测量量的桥接作用。这是因为,探索性实验的结果来源于对所测实验数据的归纳与分析,但很多物理量由于实验器材的限制而无法直接测量,这就需要通过知识表征,借助物理知识间的逻辑关系,将那些无法直接测量的量转化为可以直接测量的中间变量,并在最后的数据处理中,再次通过知识表征,将这些中间变量还原为探索需要的因变量与自变量。可见,知识表征与赋值表征的联系紧密,对赋值表征有着引导的作用。对于修正“振子周期”的探索性实验,学生需要通过知识表征,结合“周期”的物理学定义,判断弹簧振子完成一个周期振动的过程,并测量出完成周期性振动的次数,记录振动的总时间,从而求得弹簧振子的振动周期。

### (3) 抽象表征

抽象表征是对研究系统进行去粗取精、去芜存菁的加工和改造过程。它旨在抓住影响研究系统的主要因素,忽略影响研究系统的次要因素,进而获得关于研究系统的本质认识。由于实验的真实性和模型的抽象性之间存在一条无形的鸿沟,因此探索性实验建模中的抽象表征就要设法消弭这种疏离对峙。具体而言,在对探索性实验进行抽象表征时一定要明确,在实验误差允许范围内,研究系统的哪些特征不该简化,哪些特征可以简化,以及可以简化到何种程度等。比如,在利用光电门与遮光片测量瞬时速度的实验中,由于物体通过遮光片的时间极短,因此可以将其运动过程抽象为“匀速直线运动”模型,从而用平均速度计算瞬时速度。再者,对于修正“振子周期”的探索性实验,我们根据建模目的,展开对研究系统的抽象,其间忽略振子的体积和弹簧的宽度,而考虑弹簧的质量以及弹簧的长度。

### (4) 图像表征

图像表征是把抽象出来的研究系统用图像的形

式进行表达的过程,它不受时间顺序与逻辑顺序的束缚,可以一次性地呈现出构成事物的各种要素,是认知主体对事物全貌和本质结构的感知。问题解决建模的图像表征注重对问题情境的想象与复现,与之不同,探索性实验建模的图像表征则指向实验方案的设计与执行过程的规划,亦即学生要将大脑中构思好的实验情境与操作过程以图像符号的形式进行展现,由于实验过程具有一定的复杂性,所以表征实验设计的图像往往是以多幅图组合的形式来呈现的,并且在图像旁还会对一些操作步骤配以相应的文字说明。可以说,相较问题解决建模中的图像表征,探索性实验建模的图像表征融入了更多的创造性元素。如图 2 所示便是修正“振子周期”的图像表征,可以看到图中阐述了实验的次数、需要改变的自变量,以及对完成一个周期振动的说明。

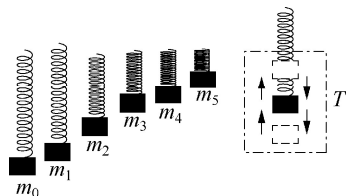


图 2 探索性实验建模的图像表征

#### (5) 实物表征

实物表征是探索性实验的模型建构中所特有的表征,是一个将实验设计转化为实验现实的过程,它有力支撑了后续实验的开展。与常规分组实验中教师直接提供实验器材不同,探索性实验的器材必须由学生独立寻找并完成组装,从而用实际物体来表征先前的实验设计。需要指出的是,实物表征中对实验器材的选取尤为“苛刻”,除了要将设计实验时选用的各种实验器材找全找齐,并组装好外,器材的简易性、可操作性,以及实验效果的显著性均要有所考虑。有时实验设计中规划好的实验器材,会因实验效果的不明显而在实物表征中做出相应的调整与修改,甚至学生还要自己动手进行简易实验器材的制作。如在我们列举的建模案例中,虽然题中已给出“弹簧振子”,但对于充当振子的钩码,以及适合实验操作的弹簧都需要学生自己在实践中去挑选,以确保实验效果的科学性与显著性。

#### (6) 实验表征

实验表征和实物表征一样,也是探索性实验建模中所特有的表征。如果说此前的实物表征是一种静态的表征,只需将各种实验器材准备并组织好,那么实验表征则属于一种动态的表征,它是对实验方

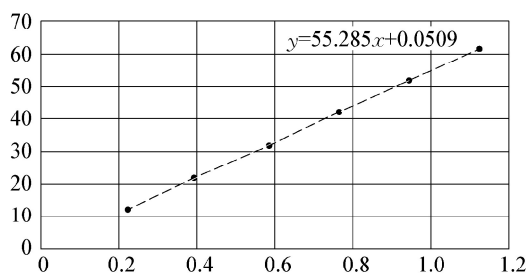
案的动作表达,是整个探索性实验建模的核心,实验获取的数据精确与否直接关系到后续实验结论的准确性。并且,实验表征对操作者的实验技能也提出了较高的要求,即要根据先前规划好的实验方案,完成实验的操作、现象的记录与数据的收集等一系列任务,有时甚至会结合实验的具体情况去调整与更换涉及的实验器材。就操作步骤而言,实验表征可概括为“控制干扰量,改变自变量,测量因变量”三个子环节。在修正“振子周期”的探索性实验中,学生就要经历保持弹簧质量不变、改变作为振子的钩码质量、记录振子完成全振动的次数以及振动总时间等步骤。

#### (7) 方法表征

方法表征是确定模型建构中需要使用的方法科学并加以运用的过程。科学方法可以分为思维方法和学科方法两类<sup>[6]</sup>,而方法表征中提及的方法一般是指学科方法,它是学科知识与思维方法的结合体,各门学科都有自己独特的学科方法。在学科方法的二级分类中,物理实验中涉及的学科方法又可分为收集实验数据的方法和处理实验数据的方法。前者包括控制变量法、留痕法、累积法等,后者包括曲线改直法、外推法、平均值法等,只有熟练运用各种学科方法,才能顺利完成模型的建构。在“修正振子周期”实验的数据处理中,学生要先运用“曲线改直”法,即探究钩码质量  $m$  与振动周期平方( $T^2$ )的关系,从而将不易确定函数关系式的  $m-T$ “曲线图象”转化为“一次函数图象”;然后再利用“外推法”,从  $m-T^2$  图象的截距中得到弹簧在简谐振动周期计算中的有效质量。

#### (8) 数学表征

数学表征是指在模型建构过程中选择恰当的数学工具,并进行必要推导时所运用的数学步骤,数学表征促进了模型的定量化表达,增强了模型的精准性与间接性。需要说明的是,不同于问题解决建模的数学表征中会涉及大量的演绎推导与方程求解,探索性实验注重数据间关系的归纳与整合,其建模中的数学表征主要涉及函数解析式的得出与解读,从而更为详细地描述实验数据间的定量关系,即先以图象的形式表达因变量与自变量间的关系,然后运用已知的函数图象对关系图象进行拟合,同时修正实验数据收集时产生的误差,最后依据合适的函数图象计算得出相应的数学解析式。譬如,在“修正振子周期”的探索性实验中,就是以钩码质量  $m$  和振动周期的平方  $T^2$  分别作为  $x$  轴与  $y$  轴,用“坐标点”在坐标系中表达各组数据,然后通过“直线拟合”的方式,借助数学计算,最终得出  $m$  与  $T^2$  的函数解析式(见图 3)。

图 3  $m-T^2$  的函数表达式

### 2.3 探索性实验的建模过程刻画

不难发现,各表征之间并不是简单的线性演进关系,而是存在着复杂的交互、循环与迭代。邢红军也在模型建构的问题表征理论中明确指出<sup>[5]</sup>,各表征间绝非相互孤立,而是存在密切的联系。人们在科学建模时,往往会在不同表征间进行转换,直至完成模型建构。于是,为了更好地描述探索性实验建模表征间的循环特点,我们以超循环理论为基础,展开对探索性实验中模型建构过程的系统刻画。

超循环理论由德国化学家、诺贝尔奖获得者艾根于 1970 年创立。该理论深入探讨了生命起源中的生物信息起源问题,围绕“核酸—蛋白质难题”,提出了研究复杂系统的循环式因果观与循环等级学说<sup>[8]</sup>。其中,艾根指出在生命现象中包含着许多由酶的催化作用所推动的基层循环,而这些基层循环又组成了更高层次的循环,即超循环,最终形成一个“大循环”嵌套“小循环”的体系。而在一个超循环的系统中,每个复制单元既能指导自身的复制,又能对下一个中间物的产生提供催化帮助。虽然超循环理论是一种关于生命起源的理论,但该理论却揭示出具有自组织结构的系统所具有的内在规律。

另一方面,脑科学研究显示,人脑大约有 860 亿个神经元,可以看作是一个具有自组织结构的系统。鉴于此,我们可以借助超循环理论的观点来系统刻画人脑在探索性实验中的模型建构过程,即将人脑在探索性实验中的模型建构过程看作是一个由三级循环组成的自组织过程(见图 4)。

第一级循环是由相邻两个关系密切的表征所组成的基层循环,它反映了表征间的交互关系与反复迭代,其循环结果表现为生成一个对后续表征具有促进作用的物化产品。探索性实验中的建模过程共包含了四对基层循环,通过赋值表征和知识表征间的循环交互,帮助人们明确探索性实验的测量目标,得出记录实验数据的表格,为后续的实验设计指明方向;通过抽象表征与图像表征的循环交互,帮助人

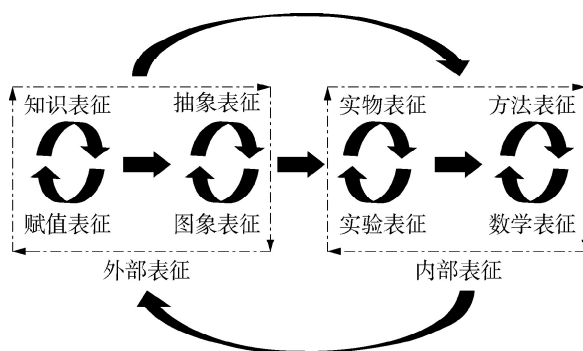


图 4 探索性实验的模型建构过程

们确定测量目标量的方法,形成指导实验开展的蓝图,保证后续探索性实验的顺利开展;通过实物表征与实验表征的循环交互,帮助人们将实验设想付诸实践,采集研究所需的变量数据,为研究结论的得出提供数据支撑;通过方法表征与数学表征的循环交互,协助人们揭示出数据间隐含的因果逻辑,得到表达物理量关系的函数解析式。

有研究指出,模型建构可以分为外部表征和内部表征两个部分,其中外部表征是由知觉系统直接觉察到的情境信息,它能激活知觉操作,觉察问题结构所属的类型,形成对问题前景的预见和认知偏好;内部表征则能激活深层认知操作和记忆中的某种认知机制,经过想象、推理等操作过程形成对问题解决前景的预见和认知偏好<sup>[5]</sup>。于是,上述两部分就构成了探索性实验建模过程的第二级循环。其中外部表征包括赋值表征、知识表征、抽象表征与图像表征,通过外部表征间的自循环将帮助人们完成探索性实验的最终设计,做好实验前的完满准备,使实验研究走在正确的方向上;内部表征包括实物表征、实验表征、方法表征与数学表征,内部表征间的自循环将帮助人们得到探索性实验的最终结果,得出原本不知道的规律性认识。

从更为宏观的层面鸟瞰整个建模过程,模型建构中的外部表征部分与内部表征部分彼此间还构成了一个更大范围的循环,亦即第三级循环过程。概而言之,学生在觅得探索性实验的最终答案后,往往会和身边的同学分享自己的探索成果,此时会出现学生各自探索结果不同的情况,于是就会驱动学生展开对实验的下意识反思,也就是学者们在科学建模教学中提及的模型检验环节与模型修订环节<sup>[9][10]</sup>。当学生检查“实验操作”与“实验处理”环节无误后,自然而然地就会追思与考量实验的设计过程,并在优化实验设计后,再次进行实验操作与数据处理,直至得到公认的实验结论,由此便形成了探索性实验在外部表征与内部表征这一更大范围层面

的循环迭代。同时第三级循环还意味着模型建构的各表征之间也存在着“跃迁式”的联系,举例而言,虽然知识表征与赋值表征在探索性实验的模型建构中联系紧密,但这并不意味着,知识表征与其他表征之间就不存在着任何关系,如不对数学表征中的函数方程式做出知识表征层面的有效解释,那么这个方程仅仅是数学公式,而毫无物理意义。由于第三级大循环的存在,我们认为,将各“表征过程”称为“表征元素”似乎更为恰当,这是因为,“表征元素”的称呼方式在语义学层面降低与弱化了各表征间的逻辑顺承性,以及机械的因果联系,转而突出了模型建构中的循环与迭代,更符合自组织过程的特点。

### 3 结 语

吉尔伯特指出,科学本身是一个模型建构的过程,而学习科学是学生学习建模的过程<sup>[11]</sup>,于是揭示模型建构的历程就成为了教育学家们孜孜不倦的追求。对此,我们认为,科学建模历程的刻画不应仅仅停留在经验反思的层面,而应既有坚实的理论作基础,亦有真实的建模案例作依托。正所谓“上顶天有理论,下着地有实践”。故而我们在此次对“探索性实验建模过程”的研究中以邢红军的科学建模问题表征理论为研究参照,以具体探索性实验中的模型建构过程为研究对象,以超循环理论为表达模型建构过程的理论依据,通过表征的形式,将探索性实

(上接第 60 页)

宙减速膨胀模型,但最近的研究表明宇宙正在加速膨胀。为了解释这一现象,需要用到广义相对论,描述宇宙形态的引力场方程中,爱因斯坦添加的宇宙学常数  $\Lambda$  “死灰复燃”,宇宙学常数  $\Lambda$  已成为诠释暗能量的主流模型。

除了暗物质,科学家设想宇宙间存在一种神秘的“能量”,它恰好补充理论密度与实际密度的差值,这种能量又带有“斥力”的性质,可抵抗引力,推动宇宙加速膨胀,这种能量叫作暗能量。暗物质与暗能量在名称上易混淆,但有显著的区别:暗物质有引力作用,促使宇宙膨胀减速;而暗能量有抵抗引力的作用,促使宇宙膨胀加速。由于目前宇宙由暗能量主导,故宇宙在加速膨胀。

### 4 试题反思与启示

北京高考物理科目注重考察物理建模的过程,这要求学生在面对各种实际情境时,要抓住主要问

题,从中提炼和构建出理想化的物理模型。这是高中物理学科核心素养的重要组成部分。此外,高考物理紧贴前沿物理科学热点问题,基于教材,又高于教材,巧妙地将这些热点问题融入试题背景中,让学生在考场上充分经历前沿科学探究的过程,感受科学的魅力与挑战。这体现了高考作为高中生最后一课,其独特的育人价值所在。

### 参考文献

- [1] 周莹莹,李维.我国物理建模教学的问题剖析与对策建议[J].中小学教材教学,2023(9):10—16.
- [2] Schwarz C V, Reiser B J, Dams E A, et al. Developing a learning progression for scientific modeling: making scientific modeling accessible and meaningful for learners [J]. Journal of Research in Science Teaching, 2009(6):632—654.
- [3] Gilbert J K, Justi R. Modelling-based teaching in science education [M]. New York, NY: Springer, 2016.
- [4] 邢红军.高中物理探索性实验的设计理论[J].课程·教材·教法,1999(9):32—35.
- [5] 邢红军.论科学建模的问题表征理论及其启示[J].课程·教材·教法,2023(2):116—122.
- [6] 武孔春.概念驱动的加工与数据驱动的加工——科学信息是怎样进化的[J].自然杂志,2002(3):178—181.
- [7] 邢红军.科学方法纳入《课程标准》:基础教育课程改革的重大理论问题[J].教育科学研究,2013(7):5—12.
- [8] 梁志华.生命起源的超循环理论的方法论启示[J].医学与哲学,1994(6):22—24.
- [9] 邱美虹,曾茂仁.台湾科学教育发展——以科学建模教学为例[J].中国科技教育,2024(2):24—27.
- [10] Hestenes D. Toward a modeling theory of physics instruction [J]. American journal of physics, 1987(5):440—454.
- [11] Gilbert S W. Model building and definition of science [J]. Journal of Research in Science teaching, 1991(28):73—79.

题,从中提炼和构建出理想化的物理模型。这是高中物理学科核心素养的重要组成部分。此外,高考物理紧贴前沿物理科学热点问题,基于教材,又高于教材,巧妙地将这些热点问题融入试题背景中,让学生在考场上充分经历前沿科学探究的过程,感受科学的魅力与挑战。这体现了高考作为高中生最后一课,其独特的育人价值所在。

**致谢:**本文由北京市海淀区教师进修学校崔琰老师指导。

### 参考文献

- [1] 彭前程,黄恕伯.物理(必修第二册)[M].北京:人民教育出版社,2019:68—69.
- [2] 赵凯华,罗蔚茵.新概念物理教程:力学(第二版)[M].北京:高等教育出版社,2004:347—351.
- [3] 方励之,李淑娴.宇宙的创生[M].北京:科学出版社,2004:18—28.