

我国物理建模教学的问题剖析与对策建议

周莹莹 李 维

摘要：随着核心素养时代的到来，物理建模教学的热度持续升高。当前，我国的物理建模教学存在一些偏误，主要表现为教师对模型和建模有所忽视、物理模型和其他相关概念被混为一谈、建模教学和习题教学被画上等号。基于对上述问题成因的剖析，物理建模教学应以课程模型为起点和根基，使学生获得建模元知识；以原始问题为抓手，发展学生建构新模型的能力；关注重要建模技能和方法，全方位评价学生的建模能力。

关键词：建模教学；物理模型；原始问题；可视化技能

一、背景与现状：国际潮流与国内趋势

（一）国际科学建模教学概述

科学建模教学萌芽于20世纪80年代，从“基于模型的教学”（model-based teaching）到“基于建模的教学”（modeling-based teaching），相关的理论与实践研究不断完善。鉴于其对学生的知识学习与创造性思维发展的促进作用，科学建模在科学教育与科学研究领域具有同等重要的地位。^[1]¹⁷

在国际范围内，建模教学模式的发展主要经历了三个阶段。^[2]第一阶段始于20世纪80年代，概念转变是彼时科学教育领域的研究热点。建模作为一种帮助学生理解科学知识的工具应运而生，即让学生通过口头语言或文本符号等形式将建模过程概念化，从而描述或解释科学现象。20世纪90年代，科学探究成为科学教育领域的热议话题，建模教学进入了第二阶段。作为科学探究的重要工具，建模能为学生提供参与探究的实践机会，而科学探究又能反过来加深学生对模型和建模作用的理解。随着核心素养时代的到来，建模教学进入了第三阶段。科学实践能力成为科

学教育的核心目标，建模教学也从过程取向转为素养取向，强调在解决问题的过程中发展学生的建模元知识和建模实践能力。可见，建模教学的目标逐渐丰满、完善，对学生提出了更高阶的认知挑战。

（二）物理建模教学在我国的发展

早在1996年，《全日制普通高级中学物理教学大纲（供试验用）》就提到了物理模型，要求教师应“通过概念的形成，规律的得出，模型的建立，知识的运用等，培养学生抽象和概括、分析和综合、推理和判断等思维能力以及科学的语言表达能力”，要求学生“能运用所学的概念、规律和模型等知识对具体问题进行分析”。^[3]2003年，《普通高中物理课程标准（实验）》要求学生“认识物理实验、物理模型和数学工具在物理学发展过程中的作用”^[4]，但并未阐明学生的建模水平应达到何种程度。《普通高中物理课程标准（2017年版）》（以下简称“2017版课标”）将模型建构作为科学思维素养的关键要素之一，并对不同水平的建模能力表现进行了具体描述。^[5]

可以看到，我国课程标准（教学大纲）对物

理模型的要求逐步明确和深入,物理模型与建模教学逐渐走进大众视野。一些学者和一线教师也开始意识到物理模型和建模的重要性,从教学方法和评价方式两方面进行了探索与实践^[6],如通过建模教学培养学生的建模知识与能力,将建模教学与深度学习、学习进阶、信息技术、翻转课堂和项目式学习等相结合。

二、问题与成因：物理建模教学实施的困境

(一) 物理建模教学的问题所在

随着物理建模教学受到越来越多的关注,教学实践中的问题也不断浮现。通过对相关文献资料的查阅,笔者发现我国物理建模教学主要存在三个方面的问题。

首先,对建模教学“视而不见”。许多理论和规律的建立都以物理模型为基础,模型和建模在物理学的发展过程中扮演着重要的角色。然而,纵观当下的物理课堂,许多学生“身在此山中”却“不识庐山真面目”,即知道物理概念和规律,却不知其中包含的物理模型;能通过科学实验进行探究,却意识不到自己在建构物理模

型。由于教师缺少对知识中所包含的模型及建模思想方法的挖掘,他们在物理教学中只关注到了知识和探究活动这些露出海面的“冰山一角”,而忽略了隐匿其下的模型和建模过程。

其次,对物理模型“张冠李戴”。通过检索发现,相关研究中物理模型与建模教学等词出现的频率逐年升高。但一些研究者将“正交分解法求合力”“同一直线上速度变化量的计算”等题目求解方法归纳成“问题模型”^[7],从相似的物理习题中总结出“答题模型”。将“解题模板”“数学方法”等归为物理模型的做法曲解了物理模型的本义,导致物理模型的概念泛化。

最后,对物理建模“模糊不清”。在习题教学中,建模与解题常被混为一谈。图1是某教师从习题教学中总结提炼的建模过程。他将“电磁感应现象”“感生问题”和“平衡状态”等看作物理模型,并将从题目中区分识别这些“物理模型”的过程当作建模过程。这种将解题思路、推演过程等归为物理模型的做法,导致解题与建模的边界模糊不清。

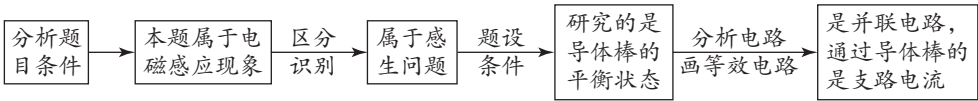


图1 某教师从习题教学中总结提炼的建模过程

(二) 物理建模教学的问题成因

为清除上述建模教学的阻碍,我们须追本溯源。笔者认为,以上问题的成因主要有三个方面。

首先,建模教学进入我国的时间不长,相关研究未成气候。2017 版课标虽然明确了模型与建模的相关要求,但国内关于建模教学的研究仍存在自发、零散和不成系统等问题。对建模教学理解的偏误导致教师难以有效实施建模教学,不能充分发挥其重要作用。

其次,传统教学观念根深蒂固,难以转变。从“双基”到三维目标再到核心素养,我国的教育教学理念更加全面、逐渐丰满,更适应时代的发展与我国的国情。然而,知识与技能扎根已久,其重要作用深入人心,科学思维和方法作为“后起之秀”难以撼动其“至高”地位。2017 版课标颁布后,新修订的物理教材更加凸显科学方

法的作用,但在课堂教学中加以落实还需要教师更新教学观念,提升教学能力。

最后,发展建模教学的土壤有限,养分不足。“应试教育”的藩篱在一定程度上阻滞着建模教学与科学教育的融合,学习重记忆轻理解、解题重套路轻思维、探究重形式轻思考等问题都与建模教学的需求相悖。此外,学生在物理课堂中面对的许多问题都已经过简化或模型化的处理,缺少参与建模的机会。因此,在面对原始物理问题时,学生薄弱的问题解决能力导致他们无法从给定情境中分离出要研究的对象及其性质。^[8]这种不良体验也会逐渐加重学生对于物理抽象难懂、脱离实际的刻板印象。

三、剖析与澄清：模型与建模的本质及辨析

回溯物理模型的本源,剖析建模教学的本质,是有效实施建模教学的基础和前提。

（一）何为物理模型

《牛津物理学词典》将模型定义为“为抓住物理系统的本质而对其进行的简化描述，以使数学问题得到解决”^[9]。查有梁将物理模型定义为“根据物理学的方法和目的，借助物质或思维形式对原型客体本质的重现”。可见，物理模型是对现实世界中的物质或现象等原型客体的反映和

简化性描述。物理模型的本质取决于模型建构者的研究目的；其形式可能是物质的也可能是观念的；其功能是以自身为“中介”简化原型客体，以便借用数学等工具得出客观规律以及物质间的联系等科学结论（见图2）。因此，物理模型既可以促进理论的产生与发展，也能为应用概念和理论干预现实世界提供工具。^[10]

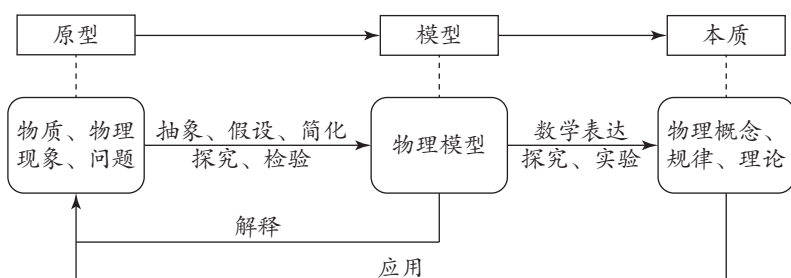


图2 模型的中介作用

（二）物理规律、数学模型是物理模型吗

模型、理论和规律等名词经常被混用，但实际上，它们之间存在着本质区别。物理理论和定律具有相似性，二者都是基于假设检验和科学证据对物理现象或规律所作的描述或解释，定律还要求借助精确的数学语言对自然规律进行描述。物理模型一般隐藏在概念和规律中，不会被显性表达。显化的公式和概念是“表”，其中包含的物理模型则是“里”，二者并不等同。以库仑定律为例，当带电体之间的距离比它们自身的大小大得多时，我们可以建构点电荷模型，简化对静电力问题的研究。相应地，当我们试图用库仑定律描述带电体之间的相互作用力时，带电体也须符合点电荷模型建立的条件。

数学是使科学研究由定性转向定量的必备工具，是科学的“语言”。数学模型的作用是描述科学情境中的经验关系，离开了科学情境中的经验关系，数学模型也就失去了其意义。因此，数学模型也不等同于物理模型。例如，珀塞尔曾批判了这样一种电场定义方法：“要求 q_0 是无限小的检验电荷，令 E 为 q_0 趋近于0时 F/q_0 的极限。”他认为：“这样做所可能带来的任何严格意味都是幻想的，要记住，在现实世界，我们从未见到过比 e 更小的电荷！”^[11]因此，尽管物理模型的表达离不开数学模型，但离开了物理情境的数学模型无异于“没有内容的语言”，物理建模教学须谨防脱离科学情境的错误倾向。

（三）何为物理建模

物理模型的本质决定了物理建模是对复杂的事物和过程删繁就简、去粗取精，抓住问题本质的高度抽象过程。从实践情境角度出发，建模是一种通过建构、使用模型对自然或人为系统进行表征或预测的实践活动。^[12]从思维活动角度出发，建模是一种重要的科学思维方法，是基于经验事实建构物理模型的抽象概括过程。^{[1]viii}不同学者对建模的定义不同，其差别主要体现在是采用外部活动形式的视角还是内部思维方法的视角。笔者融合这两种视角，将物理建模视为“为了对物理系统进行表征或预测，基于经验事实对物理系统进行抽象、概括，并包含产生、使用、修改和拒绝物理模型等过程的科学实践活动”。

（四）习题教学等同于建模教学吗

习题教学经常被一些教师视作建模教学，导致解题也常被视作建模。如果将解决原始问题的过程比作收玉米，那么将长在玉米秆上的玉米棒变为干净的玉米粒，需要进行掰棒、剥皮、去须、脱粒等一系列操作。其中，掰棒、剥皮、去须等过程相当于建模，其目的是通过简化、抽象、分解以获得去粗取精的玉米棒（即物理模型）；而脱粒则相当于推演、计算，是基于已有模型来解决问题。在大多数情况下，学生面对的是干净的玉米棒，即结构良好的习题，命题者已经完成了抽象、设置物理量、估测等建模过程，学生在此基础上进行推演计算就能得到答案。^[13]

因此,习题教学并不一定是建模教学,过于“模型化”的习题反而会剥夺学生参与建模的机会。

四、对策与路径:物理建模教学的方法探寻

建模教学发端于西方国家,我国在引入时须对其进行改良,以防“水土不服”。我国的物理课程以知识为主线,要实现“以知识为中心”到“以建模为中心”的教学跃迁绝非易事,因此,应循序渐进地将建模教学渗透至物理课堂之中。为此,笔者立足我国物理教学的现状和特点提出以下建议。

(一)以课程模型为起点和根基,使学生获得建模元知识

物理课堂中模型与建模的“隐性化”特征导致学生对物理模型的存在和建模活动的开展并无太多意识,因而缺乏对模型和建模本质的清晰认识与理解,即缺乏建模元知识。^[14]建模元知识与建模实践能力是建模能力的两大基本要素,前者是后者发展的基础,二者相辅相成,互促共进。为使学生获得建模元知识并为建模实践能力的发展打好基础,基于课程模型开展建模教学是较为合理的教学逻辑起点。

1. 显化课程模型,加深对模型本质的理解

在基础教育阶段,学生接触到的并不一定都是完备的物理模型,更多的是课程模型。课程模型即基于学生的思维、认知水平以及教学需要简化而成的物理模型。^[15]例如,在初中阶段,理想电源是只提供电能而本身不消耗电能的元件,其内阻可以忽略不计;到了高中阶段,则需要考虑电源的内阻,电源可被视为一个没有电阻的理想电源与纯电阻的串联组合。

物理知识中蕴藏着丰富的课程模型,深入挖掘这些课程模型并对其进行显性化处理,有助于学生建模元知识的获得。为此,教师在讲解概念规律时,须突出其中所包含的课程模型及其作用,并引导学生对原型和模型进行比较,明确模型的适用范围和局限性。例如,对于牛顿第一定律,“物体不受外力作用”是一种理想状态,在现实中几乎不可能实现,但在理想化实验中则可将一些外力忽略,从而通过逻辑推理得出结论。在教学中,要强调牛顿第一定律建立在质点模型的基础上。否则,就无法解释为什么在忽略一切

摩擦时旋转的陀螺虽不受外力作用,却能保持匀速转动而非处于静止或匀速直线运动状态。

2. 建构课程模型,体会建模过程与思想

致知在格物,物格而后知至。科学知识的发现与理解离不开对事物本质的探究。要以科学模型为中介实现“致知”,须以“格物”为出发点,赋予学生开展科学探究和建构模型的机会。

在传统探究式教学的基础上,应将建模教学的思想融入其中。即在探究过程中,让学生先观察物理现象,再讨论对此建构物理模型时应忽略或关注哪些因素,应满足什么条件,从而合理设计实验;在分析数据、解释现象、总结规律时,应明确规律或概念建立在哪些课程模型的基础上,分析使用这些模型的优劣;在探究结束后,应组织学生进行讨论,对实验过程中建构模型的合理性进行评估,确定概念和规律的适用条件与范围,并让学生在情境中应用模型解决问题。

以自由落体运动模型的建构为例。通过实验验证影响物体下落快慢的主要因素是空气阻力后,学生可以发现,若忽略空气阻力对物体的影响,物体的下落遵循大致相同的规律。因此,在定量探究前,应帮助学生明确所研究的模型是只受重力的物体从静止开始下落的运动过程。但这种情况只能在真空中发生,当在有空气的环境中进行探究时,只能选取受空气阻力影响较小的物体以达到近似的效果,从而排除空气阻力的影响。若物体本身体积较小、质量分布均匀,则可以被简化为质点模型,在研究时只关注物体上某一点的速度变化即可。在得到自由落体运动规律后,可以让学生估算橡皮从课桌边缘落到地面所用的时间,并思考如果这一情境发生在月球上,橡皮下落的时间又是多少。

以课程模型为载体的建模教学会使学生经历像科学家一样的建模过程,体会科学家的建模思想,并对知识形成更深刻的理解。需要说明的是,由于课程模型已被给定,因此对学生创造性思维、建模能力等方面的要求相对较低。^{[1]204}

(二)以原始问题为抓手,发展学生建构新模型的能力

要培养学生的建模能力,不能让他们一味地依赖课程模型这一“学步车”,还要为他们提供

陌生的问题情境，让他们在此基础上建构新模型，为高阶建模能力的发展提供机会。

1. 创设“真实”问题情境，加强科学与现实世界的联系

知识学习与知识应用之间的割裂是学校教育的常见弊病。作为受教育者，学生可能因缺乏主动探索、应用和表达的机会，导致无法体会学习与探索的乐趣，所学的知识也与现实脱节。^[16]同时，学生接触到的习题大都经过了高度“模型化”的处理，因此缺少亲自建模的机会。为学生提供更加真实的科学教育环境是解决问题的重要突破口。真实的科学教育（authentic science education）意味着要尽可能地贴近科学本身^[17]，使学生能像科学家一样思考和探索。因此，教师需要鼓励学生参与科学探究和推理，支持学生获得对经验世界的理解。考虑到课堂教学时空和资源的限制，学生无法也无须处在完全真实的问题情境中。原始问题是现实世界中未经简化或理想

化处理的问题，既能加强科学学习与现实世界之间的联系，又能为学生提供建模的机会，是较为理想的建构新模型的素材。

2. 以解决原始问题为主线，经历模型建构过程

当建模被视为一项科学实践活动时，“建构”这一动作的完成并不意味着活动的结束，还需通过表达、评估、修正等步骤使模型更加完善，通过应用发挥模型的解释和预测功能。由于开展完整的建模教学较为耗时耗力，且难度相对较高，教师可以围绕原始问题开展小型建模活动，以便让学生有机会亲自建构新模型。

为指导教师设计与开展科学建模教学活动，贾斯蒂（Justi）和吉尔伯特（Gilbert）提出“建模的模型”（model of modelling）框架（见图3）。教师可以根据建模活动的性质和教学条件，从中选择部分步骤和阶段加以整合实施。

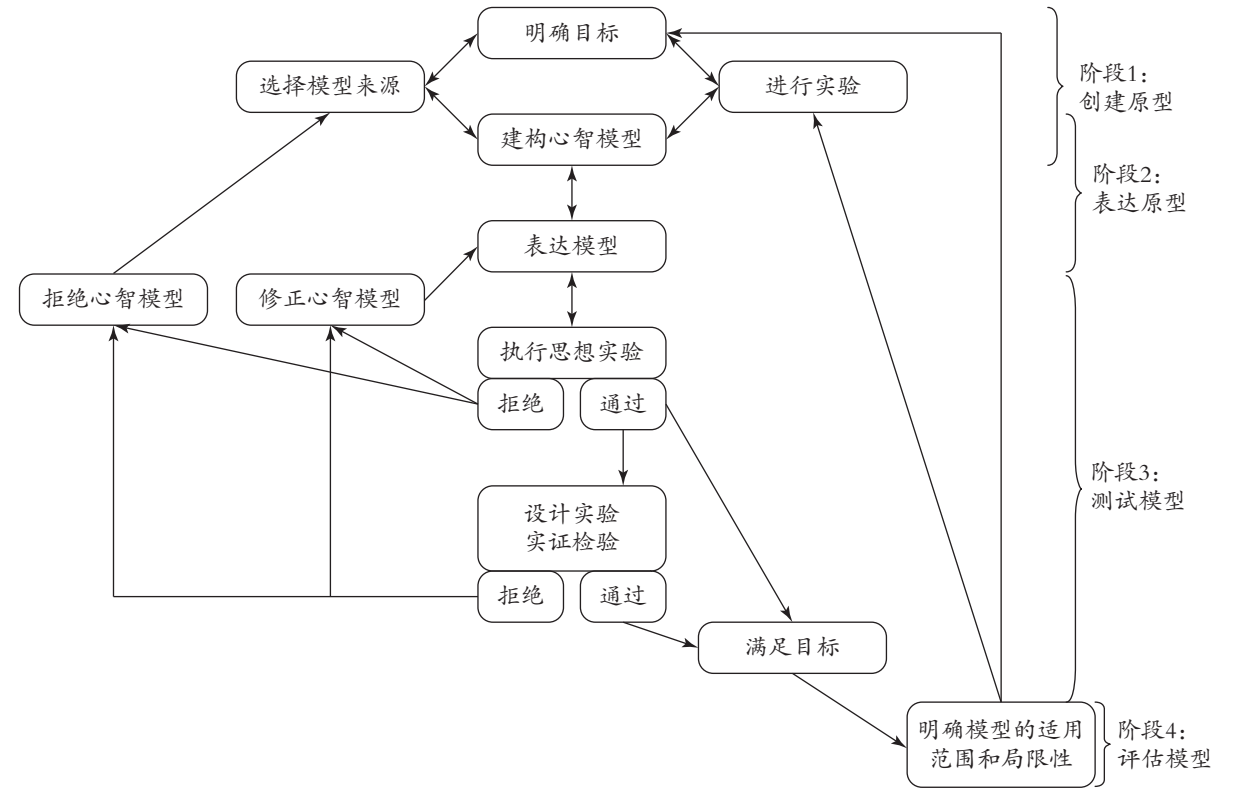


图3 “建模的模型”框架

首先，创建原型（proto-model）的过程即学生在头脑中建构心智模型的过程。对于原始问题，学生需从中抽取、分离出待解决的问题，明

确建模应达到的目标，并在此基础上通过查阅教材或开展观察、实验等方式搜寻相关证据以支持心智模型的建构。其次，将心智模型用于交流和

评估,需要借助口头语言、文字描述或图画与表格等表征载体。再次,模型的有效性需要经过实验的检验。此时,可以直接开展思想实验,借助逻辑推理证伪模型或测试无法进行实证的模型。^[18]虽然思想实验对学生思维水平的要求较高,但这种从具体到抽象的过渡训练能促使学生的认知水平由具体运算阶段上升至形式运算阶段。^[19]之后,若条件允许,可继续进行实证,检验模型能否满足建模目标。最后,模型若通过了实证检验,说明它在目标条件下具有适用性,但在其他情况下是否适用还有待商榷。为防止错误地使用模型,还须考察其适用范围,进行合理评估。

例如,在学习光的反射定律后,可以让学生解决如下问题:为了让顾客方便地看到脚上所穿的鞋,商场中试鞋镜的尺寸应有多大?如何摆放?首先,学生需要讨论试鞋镜的功能,即让不同身高的顾客站在试鞋镜附近都能较方便地看到脚上所穿的鞋,并尽量节省材料。继而通过估测人的身高、人与试鞋镜的距离等物理量建构物理模型,通过画光路图、仿真模拟等方式表达模型,据此探寻合适的解决方案。随后,对各种解决方案加以检验,可以为学生提供一个平面镜,让他们亲身体验不同方案的效果。最后,学生需要对各自的方案进行评估,深入探讨方案优劣的影响因素及改进方法。

(三) 关注重要建模技能和方法,全方位评价学生的建模能力

一些关键的建模技能和方法是学生顺利完成建模任务的必备工具,因此,教师须重点关注这些技能和方法的培养,并将其纳入建模能力的评价体系之中。

1. 以类比推进建模,发展可视化技能

杜特(Duit)提出,模型是被表征事物中成分到目标的映射,它本身就是与被表征事物的类比,因此也可以说模型是类比推理的产物。^[20]无论是学习课程模型还是建构新模型,类比既可以加深学生对新旧模型和知识间关系的理解,又可以成为建构新模型的思想来源。此外,通过对模型和原型的类比,以批判性的眼光留下二者的“同”,修正或重建二者的“异”,可使模型更加完善。研究表明,学生使用自己的类比方式解决

问题比被动地理解提供给他们模型更有利于发展类比能力。^[21]因此,给学生展现大量的类比过程,不如为学生提供亲自类比建模的机会。当面对陌生问题时,学生可能会因为缺乏认知基础而“被迫”地启动创造力,着眼未知的领域去寻找相关的结构或功能,为无法解释的内容创造新的原型进行类比。从这个意义上来看,类比是建构新模型的起点^[22],而建模活动是培养类比能力和创造力的重要载体。

学生通过类比等方式建构的心智模型只存在于头脑中,是内隐的、抽象的想法。此时,需要借助可视化技能将心智模型具象化为物理模型,以实现思想的交互与传播。同时,由于建模过程需要学生分析、综合、抽象、概括、推理等高阶思维的参与,而通过模型和建模过程的可视化能使隐性、抽象的知识显性化、形象化,所以,可视化是一种行之有效的降低建模难度的方法。^[23]

为了发展学生的可视化技能,既要在平时的建模活动中鼓励学生用草图、手势、语言描述、实体模型等来表征自己的模型,又要教给学生一些必备的表征方式,如规范的表格、示意图等。随着现代信息技术的发展和计算机的普及,计算机模拟工具已经被广泛地用作科学建模的可视化支架。^[24]例如,借助仿真模拟软件模拟实验、检验模型或进行预测。此外,还应引导学生解释模型的数学含义,加强学生对不同表征方式的感知能力,以提高他们应用模型解决问题的能力。

2. 为发展建模能力而评价,兼顾过程和结果

建模教学是对学生的知识、技能、交流合作意识、发散性思维等多方面素质的综合培养,不能从单一视角对学生的建模能力进行评价。

在内容上,主要是对建模过程和建模结果进行评价。前者主要以学生在建模活动中的语言交流、推理分析等动态过程为对象,而后者则更关注建模完成后的作品或成果。在日常教学中,应以促进学生建模能力的发展为目标,将两方面的评价内容有机融合。例如,除了关注建模结果与目标的適切性,也要考查学生的建模元知识。当学生能用多种方式表征同一模型或用不同方案验证模型时,应予以表扬,并鼓励他们阐明自己建构模型的思路和依据。

在方式上,可以在纸笔测验的基础上,加入画示意图、口头解释等方式,这既能更加全面地考查学生的建模能力,又能发展学生的可视化技能。

参考文献:

- [1] GILBERT J K, JUSTI R. Modelling-based teaching in science education [M]. Dordrecht: Springer, 2016.
- [2] 袁媛. 国际科学建模教学的发展及其促进策略 [J]. 教学与管理, 2021 (30): 113-114.
- [3] 国家教育委员会基础教育司. 全日制普通高级中学物理教学大纲(供试验用) [J]. 学科教育, 1996 (8): 17.
- [4] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(实验) [S]. 北京: 人民教育出版社, 2003: 9.
- [5] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版) [S]. 北京: 人民教育出版社, 2018: 5, 46-48.
- [6] 周莹莹. 中美高中物理建模教学的比较研究 [D]. 天津: 天津师范大学, 2021: 12.
- [7] 姜连国, 杨君. 北京卷物理建模能力考查例析 [J]. 中学物理教学参考, 2019 (11): 65.
- [8] CHI M T H, FELTOVICH P J, GLASER R. Categorization and representation of physics problems by experts and novices [J]. Cognitive science, 1981 (2): 121-152.
- [9] RENNIE R. A dictionary of physics [M]. Oxford: Oxford University Press, 2019: 119.
- [10] MORGAN M S, MORRISON M. Models as mediators: perspectives on natural and social science [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1999: 23.
- [11] 珀塞尔. 电磁学: 《伯克利物理学教程》第二卷 [M]. 南开大学物理系, 译. 北京: 科学出版社, 1979: 21.
- [12] National Research Council. Next generation science standards: for states, by states: volume 2: appendixes [M]. Washington D. C.: The National Academies Press, 2013: 2.
- [13] 邢红军, 石尧. 原始物理问题教学: 一个本土化教学理论的创生 [J]. 教育学术月刊, 2016 (9): 83-90.
- [14] SCHWARZ C V, WHITE B Y. Metamodeling knowledge: developing students' understanding of scientific modeling [J]. Cognition and instruction, 2005 (2): 165-205.
- [15] GILBERT J K. Visualization: a metacognitive skill in science and science education [M]// GILBERT J K. Visualization in science education. Dordrecht: Springer, 2005: 12.
- [16] 郑太年. 真实学习: 意义、特征、挑战与设计 [J]. 远程教育杂志, 2011 (2): 89-94.
- [17] GILBERT J K. Models and modeling: routes to more authentic science education [J]. International journal of science and mathematics education, 2004 (2): 115-130.
- [18] 王荣德. 思想实验及其在科学发展中的作用 [J]. 科学学研究, 2001 (1): 14-21.
- [19] 邢红军. 论科学教育中的模型方法教育 [J]. 教育研究, 1997 (7): 53-56.
- [20] DUIT R. The role of analogies and metaphors in learning science [J]. Science education, 1991 (6): 649-672.
- [21] COSGROVE M. A study of science-in-the-making as students generate an analogy for electricity [J]. International journal of science education, 1995 (3): 295-310.
- [22] BROWN D E, CLEMENT J. Overcoming misconceptions via analogical reasoning: abstract transfer versus explanatory model construction [J]. Instructional science, 1989, 18: 259.
- [23] 王文祥. 知识可视化在中学物理模型教学中的应用探究 [D]. 西安: 陕西师范大学, 2015.
- [24] VASCONCELOS L, KIM C M. Coding in scientific modeling lessons (CS-Model) [J]. Educational technology research and development, 2020, 68: 1247-1273.

(作者周莹莹系英国格拉斯哥大学社会与环境可持续发展学院博士研究生; 李维系天津师范大学教育学部副教授。)

(责任编辑: 郭晨跃)