教研员论坛

基于SOLO分类理论的科学思维考查层级框架初建与启示*

——以北京市新高考(2020—2023年)物理试题为例

张 健 (北京市朝阳区教育科学研究院 北京 100021)
李春密 (北京师范大学物理系 北京 100875)

摘 要 文章基于SOLO分类理论建构科学思维能力考查层次框架并以北京市2020—2023年新高考物理试题为研究对象,从横向与纵向两个角度分别研究了这四年试题整体思维水平层次分布与变化、不同知识组块的思维水平层次分布与变化、不同题型的思维水平层次分布与变化,发现北京高考物理紧跟新高考命题理念,凸显价值引领、素养导向、能力为重、知识为基,试题思维结构要求稳定。在研究基础上提出三点教学启示,以期能够帮助物理教师提升教学质量,有效落实学科核心素养。

关键词 SOLO理论 物理等级考 试题分析 物理思维
文章编号 1002-0748(2024)9-0044 **中图分类号** G633·7 **文献标识码** B

科学思维是高中物理学科核心素养的构成要素之一,是具有意识的人脑对科学事物(包括科学对象、科学现象、科学过程、科学事实等)的本质属性、内在规律及事物间的相互联系的间接和概括的反映,包括模型建构、科学推理、科学论证和质疑创新四要素。这些是物理学科在探索自然和建构理论体系过程中运用的典型思维方式,也是学生学习和运用物理知识和方法过程中必备的思维能力。科学思维的发展遵循"螺旋式上升"的规律,它是即将进入高等学校的学习者在面对与物理相关的问题时所必须具备的综合能力,也是高考物理必须重点考查的内容。

通过梳理文献发现,目前关于高考物理对科学思维能力考查的研究较少。本文拟基于SOLO分类理论建构科学思维能力考查层次划分框架并以北京市2020—2023年新高考物理试题为例,对近四年北京高考物理试题科学思维考查层次进行分析统计,进而探讨促进物理思维发展的有效策略。

1 基于SOLO分类理论建构科学思维考查层级框架

1.1 SOLO分类理论概述

SOLO是"Structure of Observed Learning Outcome"的首字母缩写,其含义为"可观察到的学习结果结构",它是根据学生在回答问题时思维表现的程度,用来评价学生学习能力的一种理论[1]。该理论将学生解决问题时的思维结构层次进行由简单到复杂的分类,包括:前结构水平P、单点结构水平U、多点结构水平M、关联结构水平R和抽象拓展结构水平E,如图1所示。

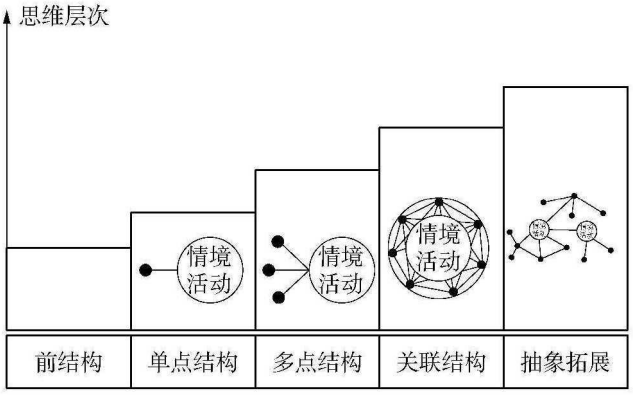

图1 SOLO思维结构层次示意图

中国高考评价体系的"四翼"规定了高考命题的要求,即分别从基础性、综合性、应用性和创新性的角度评价学生素质达成度,这四种层次的内涵分别与SOLO分类理论的单点结构水平、多点结构水

* 基金项目:本文系北京市教育科学"十三五"规划课题"基于核心素养的高中物理实验教学的创新设计与案例开发"(项目编号:CDDB21240)的研究成果。

中国知网 https://www.cnki.net

平、关联结构水平和抽象拓展结构水平相对应。《普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)》学业水平对科学思维的5级水平要求与SOLO分类等级也有对应关系:水平1对应单点结构水平;水平2和水平3对应多点结构水平;水平4对应关联结构水平;水平5对应抽象拓展结构水平。

1.2　课程标准对科学思维的学业水平要求

高中物理课程标准对科学思维的描述中主要涉及模型建构、科学推理、科学论证、质疑创新四个要素;同时在学业质量水平中将科学思维分为五个层次进行“质性”描述,这与SOLO分类理论的五个层级存在着一定的对应关系,具体见表1。

表1　科学思维水平与SOLO分类等级对应关系

水平	质量描述	SOLO层次	具体说明
水平1	能说出一些所学的简单物理模型;知道得出结论需要科学推理;能区别观点和证据;知道质疑和创新的重要性	单点结构	了解基本模型、概念属于单点结构
水平2	能在熟悉的问题情境中应用所学的常见的物理模型;能对比较简单的物理问题进行分析和推理,获得结论;能使用简单和直接的证据表达自己的观点;具有质疑和创新的意识	单点结构/多点结构	使用单一/多个证据表达观点属于单点/多点结构
水平3	能在熟悉的问题情境中根据需要选用所学的恰当的模型解决简单的物理问题;能对常见的物理问题进行分析,通过推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据表达自己的观点;能对已有观点提出质疑,从不同角度思考物理问题	多点结构	多角度思考问题、多方式表征问题、多方法解决问题,属于多点结构
水平4	能将实际问题中的对象和过程转换成所学的物理模型;能对综合性物理问题进行分析和推理,获得结论并作出解释;能恰当使用证据证明物理结论;能对已有结论提出有依据的质疑,采用不同方式分析解决物理问题	关联结构	对问题的多个方面进行整合分析,推理并得出结论,属于关联结构
水平5	能将较复杂的实际问题中的对象和过程转换成物理模型;能在新的情境中对综合性物理问题进行分析和推理,获得正确结论并作出解释;能考虑证据的可靠性,合理使用证据;能从多个视角审视检验结论,解决物理问题具有一定的新颖性	抽象拓展结构	在新颖情境中整合多方证据,综合推理得出结论,获取未知信息,属于抽象拓展结构

通过比较分析,可以发现课程标准对科学思维的学业水平要求和SOLO分类理论划分的等级都是从低层次向高层次的逐渐进阶。课程标准是以经验性的语言对学生的科学思维学习结果进行刻画,而SOLO分类理论将学习结果作为评价目标,以所需知识点数量及关联关系评价学习的复杂程度,评价指标更明确,实操性更强。

1.3　基于理论构建科学思维考查层次框架

基于SOLO分类理论和高中物理学业水平要求对高考试题科学思维的考查层次进行划分是一个很好的尝试,表2中根据解决问题的情境复杂程度、所需知识点数量及知识间的关联程度等要素构建了科学思维考查层级划分的框架结构。

表2　科学思维能力层次划分框架

SOLO层次	情境复杂度	问题解决所需知识点数量	学生科学思维水平的描述
单点结构(U)水平	简单情境	1个	根据问题线索只需要调动某一知识点或某种基本能力便可解决问题
多点结构(M)水平	真实情境但比较熟悉	≥2个且知识间相互独立	根据问题线索调动两个及以上的知识点或技能解决问题,知识点间不需要分析整合
关联结构(R)水平	真实情境但不熟悉	≥2个且知识间相互关联 R1水平:2~3个 R2水平:≥4个	在正确观念引领下,综合应用两个及以上的知识点或技能解决应用性问题,需将各知识点分析综合并有机联系起来
抽象拓展(E)水平	新颖情境	≥3个	在开放的综合情境中调动多个知识点或技能,建构新模型并拓展联想题目未涉及的知识,进行多角度的分析和推理,进而创造性地解决问题,形成创造性的结果或结论

中国知网　https://www.cnki.net

在研究中发现，不同关联结构层次的试题对学生的思维水平要求程度不同。有的问题情境需要调动两个知识点并进行推理演算即可获得结论；有的问题情境则需要调动四个甚至更多的知识点进行综合分析、推理演算。为了更精准地反映高考试题的梯度设计，笔者将关联结构水平进一步亚分类，分为R1水平和R2水平。

2　高考物理试题科学思维水平考查层次例析

北京市从2020年进入物理选考的“新高考模式”，这四年的高考命题突出“价值引领、素养导向、能力为重、知识为基”的命题理念，已初步形成“简单题有新意、中档题有综合、难题深入不复杂”的命题风格，对于新高考的试题命制发挥着引领示范作用。本研究分析了2020年至2023年的四份试题，共129题。

例1　(2022年第1题)氢原子从某激发态跃迁到基态，则该氢原子　　(　　)

(A) 放出光子，能量增加

(B) 放出光子，能量减少

(C) 吸收光子，能量增加

(D) 吸收光子，能量减少

分析：本题以学生熟悉的氢原子模型为素材创设简单情境，问题指向单一，学生只需要调动氢原子能级跃迁理论这一知识点就可以正确解决问题，因此本题所考查的科学思维水平属于单点结构水平(U)。

例2　(2022年第6题)2021年5月，“天问一号”探测器成功在火星软着陆，我国成为世界上第一个首次探测火星就实现“绕、落、巡”三项任务的国家。“天问一号”在火星停泊轨道运行时，近火点距离火星表面2.8102 km、远火点距离火星表面5.9105 km，则“天问一号”　　(　　)

(A) 在近火点的加速度比远火点的小

(B) 在近火点的运行速度比远火点的小

(C) 在近火点的机械能比远火点的小

(D) 在近火点通过减速可实现绕火星做圆周运动

分析：本题选取我国航天成就“天问一号”为素材创设真实情境，解决问题需要结合情境画出示意图，学生需要调动开普勒行星运动定律和万有引力定律、万有引力做功等知识推理分析得出结论。试题中的知识之间相互独立，无需整合分析，因此本题所考查的科学思维水平属于多点结构水平(M)。

例3　(2023年第7题)自制一个原、副线圈匝数分别为600匝和190匝的变压器，原线圈接12 V的正弦交流电源，副线圈接额定电压为3.8 V的小灯泡。实际测得小灯泡两端电压为2.5 V。下列措施中有可能使小灯泡正常发光的是　　(　　)

(A) 仅增加原线圈匝数

(B) 仅增加副线圈匝数

(C) 将原、副线圈匝数都增为原来的两倍

(D) 将两个3.8 V小灯泡并联接入副线圈

分析：本题选取“探究变压器原、副线圈电压与匝数的关系”实验为素材创设真实但比较熟悉的情境，通过呈现真实的实验数据，引导学生运用理想变压器公式和电路两部分知识综合分析实验误差的来源，实现对设计方案的评价。因此本题所考查的科学思维水平属于关联结构水平(R1)。

例4　(2020年第13题)在同一竖直平面内，3个完全相同的小钢球(1号、2号、3号)悬挂于同一高度；静止时小球恰能接触且悬线平行，如图2所示。在下列实验中，悬线始终保持绷紧状态，碰撞均为对心正碰。以下分析中正确的是　　(　　)

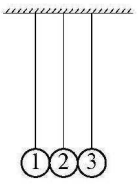

图2

(A) 将1号移至高度h释放，碰撞后，观察到2号静止、3号摆至高度h。若2号换成质量不同的小钢球，重复上述实验，3号不能摆至高度h

(B) 将1、2号一起移至高度h释放，碰撞后，观察到1号静止，2、3号一起摆至高度h，释放后整个过程机械能和动量都守恒

(C) 将右侧涂胶的1号移至高度h释放，1、2号碰撞后粘在一起，根据机械能守恒，3号仍能摆至高度h

(D) 将1号和右侧涂胶的2号一起移至高度h释放，碰撞后，2、3号粘在一起向右运动，未能摆至高度h，释放后整个过程机械能和动量都不守恒

分析：本题选取牛顿摆为素材创设真实但比较熟悉的情境，通过拉起更多数量的球、更换质量不同的钢球、对钢球涂胶使其粘在一起等情景设置，引导学生综合运用动量守恒、机械能守恒和碰撞规律等深入分析实验现象背后蕴含的物理原理，考查学生融会贯通、综合解决问题的能力。本题所考查的科学思维水平属于关联结构水平(R2)。

例5　(2021年第19题(2))如图3所示，电源电动势为E，线圈自感系数为L，电路中的总电阻为R。闭合开关S，发现电路中电流I随时间t的变化

中国知网　https://www.cnki.net

规律与情境1中物体速率 v 随时间 t 的变化规律类似。类比①式，写出电流 I 随时间 t 变化的方程；并在图4中定性画出 $I-t$ 图线。

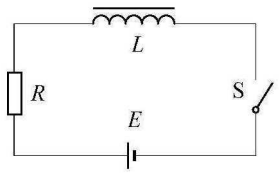

图3

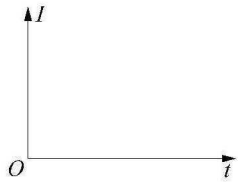

图4

分析：本题分别选取了“有阻力落体”和“通电自感”两个熟悉的学习探究情境，充分展现了不同物理情境所蕴含的物理规律形式的相似性，引导学生对不同情境所涉及的物理量、物理过程、功能关系等不同维度进行类比，考查学生对不同情境的内在物理规律的理解、对思想方法的深入领悟。通过创新设问方式，侧重考查学生迁移创新的能力。因此本题所考查的科学思维水平属于抽象拓展结构水平(E)。

3　利用科学思维能力层次框架分析高考试题

北京市2020—2023年高考物理试卷结构稳定，题型和题量几乎不变，分为14道选择题、2道实验题和4道解答题，试题分值分布保持不变。本文利用上述建构的科学思维能力层级框架对这四年试题进行了横剖和纵贯的研究，以期发现新高考物理试卷命题的规律和发展趋势。

3.1　北京卷近四年试题思维层次分析

笔者另邀请了三位经验丰富的物理教师依据上述框架分别对近四年的高考试题进行科学思维层次水平划分，通过多次研讨与检验最终定级。在定级结果的基础上统计出2020—2023年北京市高考物理试题的科学思维层次分布，进行纵贯分析。

纵观这四年高考试题都涉及SOLO分类理论的四种层次，单点结构水平试题强调基础性、多点结构水平试题强调应用性、关联结构水平试题突出综合性、抽象拓展结构试题强调创新性，这与新高考评价理念是一致的。由图5容易发现多点结构水平R1试题在每年试卷中的比例最高，这类试题要求学生从整体上把握问题，将多个信息和多个知识点或技能联系起来，这种综合所学解决问题的能力既符合高校选拔人才的标准，也是未来社会人才需要的终身素养[2]，因此备受命题组专家青睐。

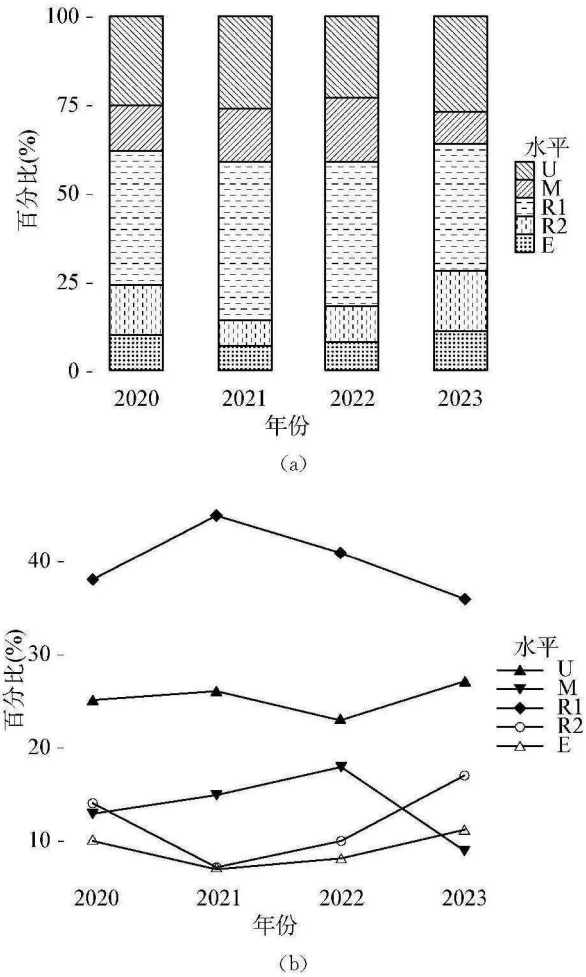

图5　北京高考物试题思维层次分布

通过One-way ANNOVA分析，研究了不同思维水平的题目占比的年际差异，结果发现U、M、R1、R2、E这五个思维层次水平的题目占比在各年之间没有显著差异(P值均大于0.05)，说明北京市高考物理试卷对科学思维水平的考查要求平稳、试卷结构相对稳定。图5(b)直观反映出R2水平和E水平试题分值比例呈上升趋势，足见北京市高考物理试题对学生创新能力、归纳—演绎能力等高阶思维能力的重视；U水平试题虽有升有降，但总体趋势平稳，它主要是作为试卷难度调控的技术手段出现的；M水平试题一般起到扩大考核知识面、增加知识点覆盖率的作用，它在2021年达到峰值后呈现下降趋势，这正体现了新高考理念——“考查内容不再只是针对学生拥有知识的多少及深浅，而是在价值引领和必备知识的基础上，突出对关键能力、思维品质和学科素养的考查，引导拔尖创新人才培养培育”[3]。

3.2　不同知识组块的思维水平层次分析

笔者根据高中物理知识体系将试题分为力学、

中国知网　https://www.cnki.net

电磁学、热光原和实验四大组块，并研究了每一知识组块所考查的思维层次比例在各年之间的变化，结果呈现如图6所示。力学和电磁学作为高中物理主干知识在高考中占有很高比例，这两大组块知识包含各层思维水平的考查，且均以R1水平试题为主，约占大类50%，这要求学生调动较少的知识点进行分析归纳进而得出结论，有助于调控试卷的整体难度；R2水平试题比例呈上升趋势，这与高考命题变化趋势一致。热光原作为非主干知识在高考中多以U水平、M水平试题考查为主，体现高考知识内容的全面性。实验题考查的技能或知识点相对独立不复杂，因此几乎没有R2水平试题。但北京高考注重在实验题部分设置新颖的设问方式，促进学生主动思考，灵活迁移解决问题，如设计方案“通过滴水法测重力加速度”或论述分析“小灯泡伏安特性曲线的变化原因”等，注重对学生创新思维的考查，因此会出现E水平试题。

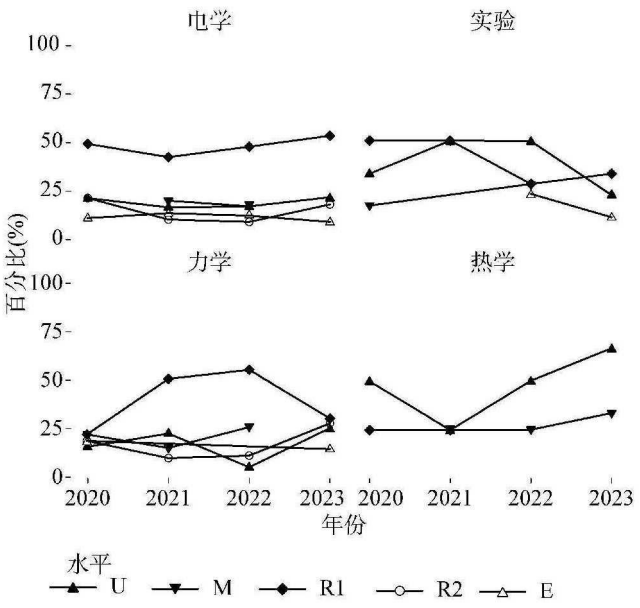

图6　不同知识组块思维层次分布

3.3　不同题型的思维水平层次分析

笔者根据题型和难度将试题分为选择题、实验题和解答题1&2、解答题3和解答题4五种类型并研究了每种类型题目所考查的各思维层次占比在各年之间的变化，结果如图7所示。选择题注重关联结构R1和R2水平的考查，平均占比约50%；2022年试题以单点结构水平和多点结构水平考查为主，学生客观题的得分率为0.74，远好于主观题部分[4]；2023年考查R1和R2水平的试题占比接近70%，解决问题要求的知识结构化程度高、综合应用能力强，学生客观题的得分率为0.68；研究表明考生在选择题上的发挥情况与总分有非常大的关联性。实验题注重单点结构U和关联结构R1水平的考查，关注基本实验能力和发展能力，有利于引导教学加强实验能力培养；近两年实验题创新设问方式，注重实验原理的迁移应用，思维水平要求较高，或将成为新高考实验题的命题趋势。解答题1&2(即高考第17、18题)试题难度相当，主要考查力学、电磁学核心知识，基本以U和R1水平试题为主，突出“基础性”考查，引导学生打牢知识基础。解答题3(即高考第19题)主要以R1、R2和E水平试题为主，突出“综合性”和“应用性”考查，如2022年第19题的(3)问要求学生根据题目建构一个全新的“能量球”模型解释地球温度不变的原因；2023年第19题选取“负离子空气净化装置”为素材创设生活实践类问题情境，要求学生根据题意建构“类平抛”和“小船过河”运动模型，依据题意假设建构“瞬间平衡”过程模型，综合各板块知识，凸显对综合能力的要求。解答题4和解答题3在北京命题中有“分散把关”的特点，两题难度高低具有不确定性，但解答题4通常涉及E水平考查，如2022年第20题的(3)问要求学生依据霍尔元件的工作原理，设计出利用该原件测量地磁场磁感应强度大小和方向的具体方案，因为北京地区地磁场方向与地平面有一定的夹角，使得这一任务具有很大的挑战性，考查学生探索新方法、积极解决问题的能力，引导教学从“解题”向“解决问题”转变、从“做题”向“做人做事”转变，突出创造性思维培养[5]。

4　试题科学思维结构分析对物理教学的启示

高考物理试卷命题要根据问题情境的复杂程度、知识和技能的结构化程度、思维方式或价值观念的综合程度呈现不同思维结构的问题，考查学生在不同复杂程度情境中运用重要概念、思维、方法和观念等解决问题的能力[6]，充分发挥高考评价引导教学的核心功能，这也为物理教学带来了诸多启示。

第一，突出主干知识，建构学科体系。基于SOLO分析可知新高考试题注重关联结构水平R考查，要求学生将物理知识融会贯通、学以致用，这启发我们教学中要注重整合教学，打通内容之间、模块之间、学科之间的壁垒，形成具有内在逻辑关系的整体网络。如以“守恒思想”为例，通过创设α衰变情境，明确各种守恒定律的内容与判定条件；然后引导学生分析动量守恒问题，结合物理学史、科技前沿发展等情境理解其具体应用；再从冲击摆入手分析

中国知网　https://www.cnki.net

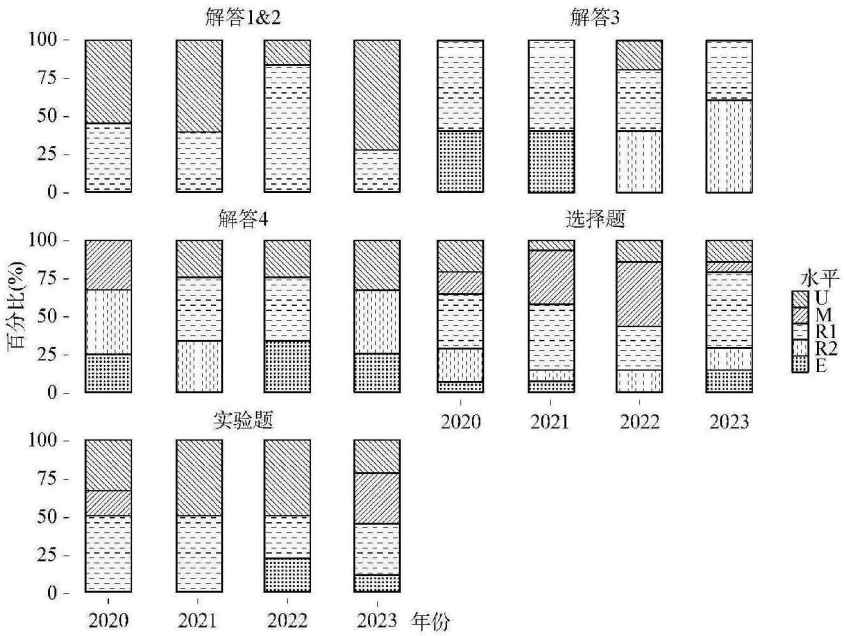

图7　不同题型思维层次分布

整个过程的动量变化、机械能变化，总结系统机械能守恒的条件，从功能关系出发深化对机械能守恒定律的理解，推广至电场中电势能、重力势能和动能总能量守恒的问题。最后从感应起电现象入手，分析电荷守恒问题，在此基础上利用电荷守恒的思想分析恒定电流电路中串联和并联的电流规律；进一步拓展研究流量与通量的问题[7]。结构化的知识是迁移应用和创造性思维发展的基础，可谓“源头活水”！

第二，创设问题情境，发展思维结构。问题情境是指真实的问题背景，是以问题或任务为中心构成的活动场域。教学中要注意选取与日常生活及生产实践密切相关的“生活实践情境”，如研究“人荡秋千时如何不借助外力而越荡越高?”问题；选取源于真实研究过程或科技前沿相关的“学习探究情境”，如物理学史中的重大研究发现[8]或我国的尖端科技——电磁弹射技术的发展、FAST望远镜等。学生在解决情境问题时要经历信息加工、模型建构、推理论证、审辩质疑等过程(如图8所示)，贯通了学生的思维链路，内化了思维程序，优化了思维结构，有效地促进了科学思维素养的发展。

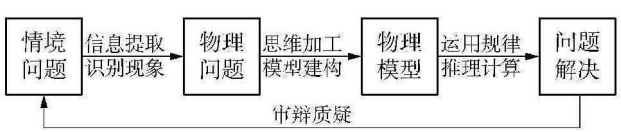

图8　解决情境问题的思维过程

第三，重视思想方法，促进创造迁移。2022年高考第20题(3)问利用霍尔原件测量地磁场强度、2023年高考第19题(2)问计算不同颗粒的收集率看似都不在日常授课范围，但仔细分析发现，它们都是课内讲授的“矢量合成”思想的延续和扩展。可见物理思想方法是一种思维体系，是学生高效获取知识的手段，是贯通各模块知识的纽带，具有更高的概括性和适用性，它是帮助学生将所学知识向陌生情境问题进行迁移的能力基础[7]。因此在日常教学中应弱化题型训练，强化物理学思想方法的教学；要减少规律分类的习题，增加思想方法分类的练习，为提高学生迁移应用能力提供机会。

参考文献

[1] John B. Biggs. 学习质量评价：SOLO分类理论(可观察的学习成果结构)[M]. 高凌飚，译. 北京：人民教育出版社，2018.
[2] 教育部考试中心. 中国高考评价体系说明[M]. 北京：人民教育出版社，2019.
[3] 中国高考报告学术委员会. 中国高考报告(2024年)[M]. 北京：新华出版社，2023.
[4] 北京教育考试院. 北京市高考、学业水平等级考评价研究报告(2022年)[M]. 北京：开明出版社，2022.
[5] 张健. 促进创造性思维发展的物理实验教学策略与实践[J]. 物理教学，2023(9)：7　8.
[6] 中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准(2017年版2020年修订)[S]. 北京：人民教育出版社，2020.
[7] 张健，王华，李春密. 基于物理思想方法的专题复习单元设计　以“守恒思想”为例[J]. 物理教学，2023(3)：12　16.
[8] 张健，王华，李春密. 基于教科书物理学史素材发展学生核心素养的教学策略研究[J]. 物理教师，2021(11)：7　12.

中国知网　https://www.cnki.net