促进有效的问题解决的教学策略

ChandralekhaSingh clsingh@pitt.edu 物理学与天文学系，匹兹堡大学，美国 ORCID#:0000-0002-1234-5458

AlexandruMariesmariesau@ucmail.uc.edu辛辛那提大学物理学系，美国 ORCID编号:0000-0001-5781-7343

KennethHeller heller@umn.edu 明尼苏达大学物理学与天文学学院，美国 ORCID#:0000-0002-4944-0563

Patricia Heller helle002@maroon.tc.umn.edu 明尼苏达大学课程与教学系，美国 ORCID#:0000-0002-5102-2440

帮助学生成为熟练的问题解决者，是许多从入门到高阶物理课程的主要目标。事实上，认知科学家常常借助物理学研究专家与新手问题解决者在问题解决策略上的差异，因为在这个领域，人们对什么构成良好的问题解决有较为一致的看法。由于物理定律以简洁的数学形式呈现，成为物理问题解决专家不仅意味着学习如何展开并诠释这些物理定律，还意味着能够在解决问题时将其应用于各种不同情境。物理学专家必须拥有组织良好的相关物理学和数学概念知识结构，并能够在解决复杂问题时管理认知负荷、进行元认知。本章将回顾物理问题解决专业能力方面的基础研究，随后讨论有关促进有效问题解决的教学策略的研究，以及通过专业发展改变物理教师和助教的教学实践、以促进和支持有效问题解决方法所面临的挑战。

关键词：问题解决、元认知、认知负荷。知识组织

引言

物理学旨在通过发现并解决自然环境中的问题，来理解我们的自然环境。因此，问题解决是每门物理课程的核心。此外，解决问题的过程本身与一切有意义的学习都密不可分（Shuell, 1990年）。本章简要介绍改进学生问题解决能力的教学策略所依据的研究基础（必然无法面面俱到），并举例说明其中一些策略。问题解决教学的基础源自以下领域的研究：

哲学、教育、心理学、神经科学和计算机科学；这些领域相互交织，构成了认知科学这一跨学科领域。在参考文献中，我们选择了物理教育研究（PER）从业者易于理解的研究成果，并列出一系列引文，追溯问题解决教学研究基础的源头。对于PER研究者而言，挑战在于确定如何让真正的教师在真实的物理课堂中，面向真正的学生，常态化地实施能够促进有效问题解决的教学。

本章接下来的各节包括：问题解决：通向物理教育研究的简史；什么是问题；什么是问题？；影响问题解决的因素；构建实践教学；将问题解决融入教学设计；关于促进学生对问题解决的态度的动机因素；助教和教师的专业发展：关于问题解决的信念；关联教学框架；结论；以及参考文献。

当然，教学并非发生在真空中，而是受到机构因素的制约，也需要改变教师的做法和学生的期望。我们指出，一些常见教学做法会阻碍有效的问题解决能力的培养，由此带来种种挑战；同时，也指出教师需要接受专业发展培训来应对这些挑战。

问题解决：通向物理教育研究的简史

我们的出发点是认知科学对问题解决的定义：“当通往目标的路径尚不确定时，朝着目标前进的过程”（Martinez．1998年）。这一过程包括不断完善概念知识的表

关于理解人类问题解决行为的书面历史，至少可以追溯到亚里士多德（Quarantotto，2020年）。略过之后两千年间的重要发展，我们来到20th 世纪初，见证杜威（1910）、皮亚杰（1967）、维果茨基（1978年）和波利亚（1945）的重要著作。他们的研究展示了定性研究的价值：通过案例研究、以实物为引导的访谈和人类学观察，促使人们进行自我反思。到20th 世纪末，以Hebb（1949）的研究为代表，人们对大脑功能的认识不断深化，与……的发展相伴而行。

人工智能由图灵（1950年）开创，旨在推动对问题解决机制的研究，这一研究属于认知科学这一新领域。认知科学发展早期，问题解决方面的一些奠基性进展以物理学为背景（例如Simon，1974；Simon 和 Simon，1978年；Larkin 等人，1980；Chi 等人，1981）。

为了揭示问题解决由哪些要素构成，研究人员开始比较优秀问题解决者（称为专家）与较弱问题解决者（称为新手）所采用的方法（Newell et al., 1958, Chase & Simon, 1973, deJong andFergusson-Hessler, 1973, Simon, 1974, Larkin &Simon, 1987年, Chi, etal.,1981, Heller & Reif,1982, 1984年, Eylon & Reif, 1984年, Sweller, 1988, Simon &Simon, 1978年,Bassok& Holyoak,1989）。研究发现，专家与新手之间的差异远不只是知识量的差异。专家在解决问题时所使用的认知过程与新手大不相同，甚至会关注问题情境中的不同信息（Bransford, 2000年）。

与任何早期研究一样，这些开创性研究也存在程序上的困难。例如，让新手和专家解答同一道题，看似可以进行直接比较。然而，对新手而言可解的物理学题目，对专家来说却算不上问题。对专家而言，解决路径或许有多种选择，但并不令人困惑。可以给新手和专家一道超出两者所涉领域范围的题目，但专业能力具有领域特异性。接下来还要面对如何判定谁是该领域专家的难题。例如，经验丰富的物理学教授通常被视为解决物理学领域问题的专家。然而，一名物理学研究生几乎肯定比大一新生更擅长解决物理学问题，那么他算专家吗？一个人解决问题时，是否只能是新手或专家?

如今我们知道，问题解决表现存在一个从初学者到专家乃至更高水平的范围（Dreyfus, 2004年）。这一范围可划分为若干中间阶段：新手、进阶初学者、胜任者、熟练者和专家。这种分类并非独一无二，也不是离散的、线性的或连续的。不过，它为讨论教学提供了一套语言。在任何领域，从新手成长为专家至少需要十年的刻意练习（Ericsson 等，1993年）；这一时间跨度远超单门课程，甚至单个教育机构的课程体系所能涵盖的范围。这意味着，教学能够帮助学生朝着专业能力迈进，但他们很可能在仍处于我们的教育体系中时尚未达到专业水平。假设教育体系中的教学达到最佳水平，那么我们预计，大多数经验丰富的高中物理教师或物理学教授会是专家或熟练的问题解决者；大多数研究生助教会达到胜任或熟练水平；而大多数刚开始学习物理学的学生则处于新手或进阶初学者阶段。

什么是问题?

将问题解决定义为“当通往目标的路径尚不确定时，朝着目标前进的过程”（Martinez, 1998年），这一表述假定存[illegible]函盖了相当复杂的内容（Anderson，2000年）。通往目标的路径之所以不确定，通常是因为人们最初认为目标界定不清。澄清或修正目标往往是问题解决中最重要的环节；这一过程会持续下去，直到得出解决方案并为其提供论证。澄清目标意味着识别出

情境的关键特征，并将其与非关键的表面特征区分开来（Chi 等，1981）。一旦问题解决者确定了情境的关键特征，就可以判断这些特征受到问题情境的哪些限制。

一个问题是否属于问题，并不取决于其解决方案的复杂程度，而取决于问题解决者的视角，因为路径的不确定性取决于观察者。这就将目标导向的问题分为两类：问题和练习题。练习题有一个对解决者而言清晰的目标，并与可能的解决路径选择相联系。练习题可能很难解决，需要经过许多步骤才能得出解决方案，甚至还需要学习新技术。解决练习题是学习和自动化问题解决所需技能的重要工具。然而，仅仅解决练习题并不能提供解决问题所需的经验。

影响问题解决的因素

帮助学生发展为物理学专家，需要理解影响问题解决的三个相互关联的因素：元认知、知识组织和信息加工。图1展示了一些基础研究，这些研究探讨了这些因素如何影响教学。这三个因素是问题解决的基本构成要素，都会影响学生在解决问题时的大脑活动，即认知负荷。我们认识到，我们对问题解决研究的组织方式只是众多方式之一。事实上，我们引用的研究往往跨越了这些组织界限。

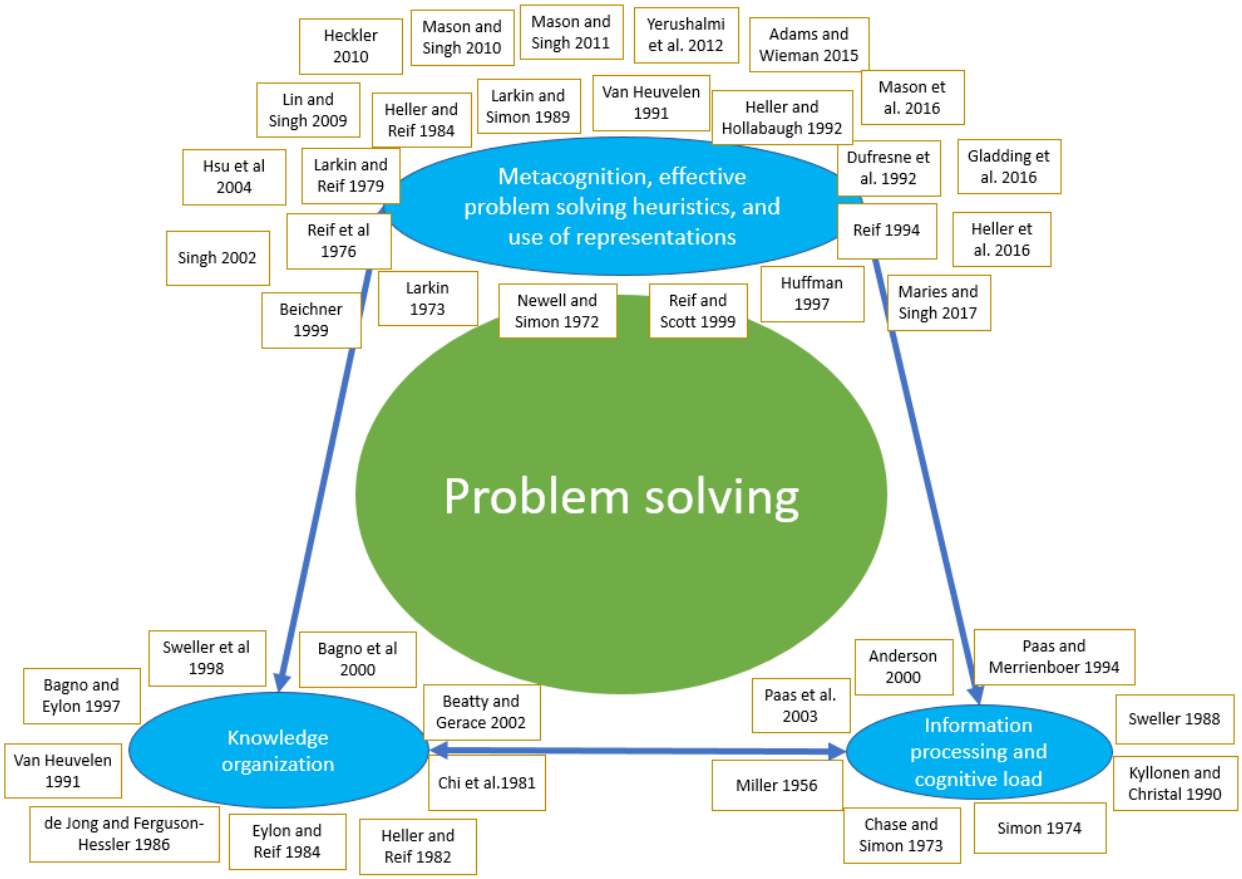


图 1. 与物理问题解决教学中三个关键议题相关的研究：1）信息加工与认知负荷；2）知识组织；3）元认知。

元认知的作用

由于问题解决的过程是由一系列决策交织而成的，熟练的问题解决者需要有意识地掌控需要做出哪些决策，以及如何做出这些决策。这种对思维决策进行控制和监控的过程称为元认知（Flavell, 1976, Schoenfeld, 1987, Jacobs & Paris, 1987, Schraw, 1998, Morphew等人, 2020）。事实上，问题解决本身也可以称为一种元认知技[illegible]　广义而言，问题解决中运用的三种主要元认知技能是计划、监控和评价。计划包括在着手解决问题之前，选定一个目标以及实现该目标的适当策略。监控是指觉察朝着问题解决方案目标推进的进展。评价则是不断评估解决方案的价值。监控和评价技能使问题解决者能够随着解决过程的推进调整计划，甚至改变目标。新手问题解决者在解决物理问题时，并未意识到元认知的必要性，这限制了他们运用元认知的能力。要提升至胜任水平，学生必须在问题解决过程中运用更多元认知。有些学生会自然而然地做到这一点，但大多数学生需要通过教学明确了解元认知过程。当学生变得更擅长……

对于问题解决者而言，使用元认知是有代价的。它会显著增加认知负荷，可能限制他们的熟练度，并加剧他们的挫败感（Sweller，2019年）。因此，需要采用教学技巧，让学生练习运用元认知，同时又不显著增加他们的认知负荷。

信息加工与认知负荷的限制

由于问题解决与元认知彼此交织，认知负荷管理便成为教学中的重要议题。认知科学早期的研究提出，人类认知架构包含两个主要组成部分（Anderson，1995）：长时记忆（LTM）和工作记忆（WM）。工作记忆是信息加工发生的地方，其存储容量有限，包含 7±2 个“槽位”（Miller，1956）。每个槽位可以容纳一条信息，也可以容纳指向一个完整概念或过程的链接。另一方面，长时记忆的存储容量似乎不受限制。在问题解决过程中，工作记忆会接收来自感觉缓冲区（例如眼睛、耳朵、双手）和长时记忆的输入（Sweller，2011年）。由于任一时刻能够处理的工作记忆槽位数量很少，因此将信息组织成更大的“组块”很有优势，每个组块只占用一个槽位（Kyllonen 与 Chirstal，1990年；Kail 与 Salthouse，1994年）。例如，随着时间推移，学生可以形成一个关于如何求解联立方程的大型信息加工组块，而它只占用一个工作记忆槽位。人们认为，工作记忆的运作机制存在于大脑前额叶皮层的神经结构中（Funahashi，2017年）

Sweller的研究成果之一（Sweller，1988）是，在没有指导和支持的情况下，许多学生会使用无序的目的-手段分析来解决问题。从广义上说，这种方法意味着持续考虑目标，以及解决方案相对于该目标所处的当前状态。对于新手而言，这种问题解决过程就是缩小目标与当前状态之间的距离。当组织得当时，目的-手段分析，或逆向推理，是专家解决问题的重要工具。例如，工程师（Dorst K.，2015b）和课程[illegible]ins & McTighe，2005年）将这一过程称为逆向设计。这种方法通常与另一种专家方法——正向推理——形成对比；正向推理从对情境的定性分析开始，并通过连续的转换，将其转化为更具体的表征，从而导向一个解决方案。逆向推理通常比正向推理带来更大的认知负荷，尤其是对于处于或低于胜任水平的学生。专家会结合逆向推理和正向推理来解决问题。然而，新手没有能够进行正向推理的层级化知识结构。

工作记忆活动似乎也在解释刻板印象威胁的负面影响方面发挥中介作用。刻板印象威胁是指女性和其他代表性不足的学生在解决物理问题时，因担心符合社会刻板印象而常常感受到的威胁，它会影响问题解决表现（Beilock等人，2006年，2007年）。高度依赖工作记忆的问题解决技能会受到这种焦虑的严重影响，因为焦虑本身也占用工作记忆（Maloney等人，2014年）。焦虑越强，工作记忆中可用于所需问题解决信息加工的空间就越少。

知识组织的作用

认知科学家很早就开始研究知识组织。早期研究采用出声思维协议，考察专家（如物理学教授）和新手问题解决者如何组织和提取知识，以解决同一个问题（Chi 等人，1981；Heller和Reif，1982，1984）。这些出声思维访谈有时会被明确用于重构专家和新手的知识结构表征（例如，见图2）。专家以物理学基本原理为核心组织知识，并将其置于层级的顶端，其下是更多辅助概念。这种围绕物理学基本原理和概念形成的层级化知识组织，能够有效地产生解决问题的正确方法。新手的知识结构则较为零散，基本原理与问题的表面特征混杂在一起。在新手解决问题时，学生的知识结构中往往并非缺少相关知识，而是根据问题陈述中有关如何解决问题的线索，这些知识能否被检索到、是否容易提取。

另一项关于知识组织的早期研究（de Jong 和 Fergusson-Hessler，1986年）发现，在物理学课程中表现良好的学生会根据物理学原理对问题进行分类（例如，这是一个牛顿第二定律问题），而表现不佳的学生则会根据问题情境，即所谓的表面特征，对相同的问题进行分类（例如，这是一个斜面问题）。这种基于知识组织方式的分类方法也在数学领域得到重复验证（Schoenfeld 和 Herman，1982年）。较新的研究还对大量入门课程学生进行了问题分类研究，发现这些学生会沿着一个连续谱对问题进行分类（Singh，2009a，Mason 与 Singh，2011年）。有些学生对问题的分类方式与专家非常相似，另一些则更接近新手，其余学生则处于两者之间的连续谱上。这项研究也在量子力学背景下得到重复验证（Lin 和 Singh，2010年）。这表明，设计良好的分类任务可以用于帮助学生围绕基本原理组织知识（Docktor 等，2012年，Mason 与 Singh，2016年b），也可以用于评估（Hardiman 等，1989年，Singh，2009b，Mason 与 Singh，2011年）。



图2. 根据新手/专家在出声思维访谈中解决 Chi 等人，1981 年提出的同一道问题时的访谈内容，推断出的新手（上）和专家（下）的知识组织。

Eylon 和 Reif（1984年）的研究也揭示了层级化知识组织对于提升学生问题解决能力的重要性。在这项研究中，学生学习了相同的内容，但知识分别以层级式或顺序式呈现。研究发现，当知识以层级式方式呈现时，学生在后续任务中的表现显著更好。研究者得出结论："层级化组织应有助于完成涉及大量信息检索的复杂任务。"其他研究者（如 de Jong 和 Fergusson-Hessler，1986年）也提出，光有知识还不够；知识还必须以有用的方式组织起来，才能在问题解决过程中得到适当提取。

将问题解决过程组块化，使其适用于大类问题，这称为构建启发式方法。按范围由小到大排列，启发式方法的例子包括绘制受力图、使用矢量等表征、运用牛顿第二定律，或运用经典力学。较大的分类（如经典力学）包含嵌套其中的启发式方法。随着学生构建起范围更广的概念和启发式方法，解决问题所需的元认知程度会降低，认知负荷也会减轻。换言之，培养物理学专长需要将问题解决作为学习机会，并熟练运用少数几条物理定律来解决各种各样的问题。

构建实践教学

物理教育研究的目标是为所有学生构建一种更有效的物理学学习方式，在本例中即问题解决。物理教育研究无论直接还是间接，都有助于实现这一目标。检验这些研究的标准，是能否构建可衡量且成功的教学结构，并涵盖学生和教师的多样性。为说明构建这些结构的进展，我们概述当前总体的教学框架——认知学徒制。当然，实践教学必须满足在真实机构中工作的真实学生和教师的需求。因此，我们将提及实施任何问题解决方案都必须应对的两个难题。在下一节《将问题解决融入教学设计》中，我们将举例说明经过测验、在具有生态效度的情境下对大量学生实施的成功的问题解决教学。我们强调，篇幅有限，无法面面俱到，因此许多重要的教学方法未能纳入。

认知学徒制：一种教学框架

此时，认知学徒制（Collins 等人，1989年）是最佳的通用教学模型。作为一种实证模型，它将传统学徒制的特征与认知科学的研究成果相结合，从而构建出一个有效教学的框架。认知学徒制的总体原则是，学习必须置于一个对学生而言真实、对学科内容而言正宗的情境中。认知学徒制的行动由教师对其学生当前能力以及其最近发展区范围的了解所指导（维果茨基，1978年）。采用这一框架的教学由四项行动组成：示范；指导；支架和逐步撤除支架。对于问题解决而言，示范是展示学生如何解决问题的行动，这些问题既用于练习，也用于评估。示范通过教师解答一个示例来完成

在全班面前进行示范、提供视频、在课堂上与学生进行苏格拉底式对话，或分发例题解答。要想取得成效，示范必须展示学生可以如何解决问题，而不是教师可能会如何解决问题。在所有情况下，示范都必须让学生看见通常不可见的元认知和信息加工心理过程。

指导是在学生参与解决课堂讲授中示范过的类似问题时所给予的个性化反馈。它建立在学生的行动和认知过程中，而不是向他们展示“正确的做法”。接受指导时，学生必须及时获得反馈，这些反馈可以来自同伴、教师助理或设计良好的计算机程序。支架是暂时性的教育结构，旨在帮助学生搭建一座智力桥梁，使其从当前的知识状态迈向下一个可达到的水平。支架提供了“辅助轮”，让学生能够练习那些他们尚未准备好主动开始的技能。它弥补了学生知识和信心上的空缺，使他们能够练习教师所期望的、且处于学生最近发展区内的更高层次问题解决能力。逐步撤除支架是指随着特定知识的建构，逐渐减少支架、指导和示范（例如 Heller & Heller 2010年）。当教学的辅助措施逐渐减少，使学生能够独立尝试所期望的表现水平时，就会发生逐步撤除支架。

认知学徒制的行动并非按顺序进行，也并非每次都需要所有学生参与。例如，在体验过如何运用层级化知识组织的示范后，学生可能会想独立尝试。如果尝试未成功，他们可以接受更多指导，或观察更多示范。在认知学徒制框架下，问题解决有助于学生形成稳固的物理知识结构，使他们能够将一种情境与另一种情境联系起来（Lin & Singh，2013年a，2013年b，Whitcomb 等，2021年）。例如，在适当的支架支持下，学生可以逐渐学会认识到，所有经典力学问题本质上都是相同的，尽管它们可能具有截然不同的表面特征和难度。认知学徒制的行动并非按顺序进行，也并非每次都需要所有学生参与。例如，在体验过如何运用层级化知识组织的示范后，学生可能会想独立尝试。如果尝试未成功，他们可以接受更多指导，或观察更多示范。

物理概念及其表达所用的数学

物理学的一个重要方面，是熟练地在物理概念与表达这些概念的数学之间建立恰当联系（Reif, 1995）。遗憾的是，数学计算可能既繁琐又容易出错，导致数学这一物理问题解决中占比不大的部分，在学生心中显得格外重要。允许学生使用现代技术进行算法计算，可以减轻计算带来的部分压力，同时仍然重视数学的重要性。例如，几乎任何复杂的数学过程，例如求解一组联立方程，都可以简化为一行软件代码。物理学界早已认识到教学中存在这一计算陷阱（例如 Oerlein 1937、Crane 1966、Crane 1969），但直到在元认知、信息加工和知识组织的框架下进行研究，人们才普遍认识到它的深远影响。大多数提出的教学解决方案都基于

关注问题构建、学生解题构建指导、同伴指导（例如 Heller et al, 1992a）、Heller & Hollabaugh, 1992b）、计算机指导（例如 Ryan et al, 2016）、评分（例如 Henderson 2004）以及提供指导的助教（Lawrenz et al 1992）的支架设计。然而，一种长期解决方案可能是通过让学生更广泛地使用计算工具，在保持物理学数学属性的同时减少学生的计算（Caballero et al 2021）。

教师和学生的不同策略

教师与学生在问题解决方面的定性差异，会给物理教师带来困难，并可能导致所谓的“专家盲点”（Nathan et al., 2001）。这种差异使教师难以从学生的角度评估问题的难度，也难以为学生学习提供支架。由于任何对学生而言可解决的作业对教师来说都不构成问题，教师构建答案的过程通常并不能代表教师自己或学生解决问题的方式。因此，旨在引导学生经历教师可能采用的解题过程的教学，往往无法让学生获得必要的练习，从而达到问题解决熟练度的下一个层级（Singh, 2002, Yerushalmi, et al. (2007)）。即使教师把问题当作自己需要解决的问题来处理，他们的许多问题解决过程也已变得自动化且不经意识（Schraw, 1998, Schoenfeld, 1987, Jacob & Paris, 1987）。教师没有意识到自己采用了某些问题解决过程，因此无法向学生明确讲解这些过程（Reif, 1995）。结果是，学生不知道这些问题解决决策的存在，由此产生了学生普遍感受到的“无从下手”。为弥补教师的专家盲点造成的学习差距，教师可以让学生在解决问题时进行出声思维，并对学生的问题解决过程进行认知任务分析（Chipman et al., 2000）。这项分析有助于教师识别自身的盲点，并提供支架，帮助学生练习提升熟练度所必需的问题解决过程（Reif, 1995, Dufresne et al., 1992, Hsu & Heller, 2005）。这是一个例子，说明有关问题解决的研究如何帮助教师理解学生在解决物理问题时所感受到的挫败感。研究还可以提出教师如何通过识别缺失的问题解决过程，帮助学生克服这种挫败感。

将问题解决融入教学设计

以下教学策略已成功用于提升学生在物理课程中的问题解决能力。无论是否有意，这些策略都运用了认知学徒制模型的大部分特征。这些策略旨在降低解决问题所需的认知负荷，帮助学生建立层级化知识组织，和／或发展元认知技能。许多研究检验了可用于示范和指导过程中的各种支架。

关注学生的概念困难

研究问题解决的研究者大多强调对问题进行初步定性（即概念性）分析的重要性，这并不令人意外（例如，Heller & Reif, 1984, Reif, 1995, Heller & Hollabaugh 1992a, Beichner 1999, Huffman 1997, Koedinger & Nathan, 2009, Docktor et al 2015, Ryan et al., 2016）。然而，学生对物理学抱有根深蒂固但错误的看法（McDermott, 1991）。这些替代性概念或错误概念会妨碍学生成功解决问题。

同伴教学（Mazur，1997年）通过围绕解决学生错误观念的概念性问题组织讲课，重构基础物理课程，使其重点转向定性推理。学生以电子方式回答这些问题。在看到其他人的回答后，学生讨论自己的结果，并重新提交答案。随后，讲师可以对此进行讲解。课程还在考试中强调了这种推理。学生在概念性问题上的表现显著提高。此外，如果定量问题计入课程成绩，那么在讲课中强调概念理解也会略微提高学生解决定量问题的表现。对于传统教学且高度侧重定量问题解决的班级，以概念性辅导取代传统习题课（后者强调定量问题解决）也取得了类似的结果（McDermott，2001年）。

教学设计中关注学生概念困难的另一个例子，是一种“整合问题解决、概念理解和知识结构构建”的方法（Bagno& Eylon，1997年；Bagno etal. 2000年）。其目标是帮助学生围绕关键概念组织知识，并运用这些知识解决问题，从而发展层级化知识组织。该方法的一个主要特点是，通过问题解决引导学生构建自己的知识结构，并绘制如图1所示的概念图，将主题的核心概念联系起来。学生解决问题，反思与这些问题相关的核心概念，并以不同形式呈现这些概念。随后，他们发展并阐释这些概念，以克服概念困难，并将这些知识应用于解决新问题。为了巩固这些知识，他们将新概念与其已有知识的图谱联系起来。这一实施发现，学生能够从明确建立力学概念与电磁学概念之间的联系（通过概念图）中受益。这与ALPS-kit 方法相似，后者包含明确的活动，让学生组织所学概念，并将其与先前活动中的概念联系起来（Van Heuvelen，1991a）。

运用类比推理

类比推理可以成为帮助学生学习物理问题解决的一种有用方法，尤其是在他们具有强烈的替代性概念时（Holyoak，1985；Novick，1988；Clement，1998；Lin 与 Singh，2011年a，2011年b；Singh，2008a，2008b）。比较两个尽管表面特征不同却具有非常相似解决方案的问题，有助于学生认识其底层结构（Lin 与 Singh，2011年a）。当学生解决同构问题时，这有助于强化一般性的有效的问题解决策略（Lin 与 Singh，2013年a，2013年b；Docktor 等，2012年；Mason 与 Singh，2016年b）。例如，在一个定量问题之前解决一个

同构的概念性问题有助于学生认识到，问题解决大多是概念性的，而概念性问题和定量问题一样，需要同样细致的推理（Singh，2008c）。

下一节将举例说明如何通过支架，让学生练习成为更优秀的问题解决者所必需的重要要素。然而，只有当对学生的评分能够抑制他们以简略或随意的方式尝试解决问题，并奖励他们明确展现对物理表征、层级知识结构和问题求解提纲的运用时，这种练习才会发生。关于教师对问题解决的看法的研究表明，大多数物理教师更青睐简短、未加解释且主要以数学形式呈现的解决方案，也不会奖励组织良好且解释充分的问题解决过程（Henderson 等人，2004年）。

构建有用的表征

在物理学中，有用的表征取决于问题情境。例如，对于涉及牛顿定律的基础力学问题，Reif 建议，表征应将研究系统与其环境区分开来，呈现其运动，并识别作用于该系统的相互作用：首先识别无需接触的远程力，然后识别接触点处的接触力（Reif, 1995）。随后，利用系统描述建立方程，以表征问题中的物理学。接着利用这些方程求出问题的目标。

在物理案例研究概览（OCS）方法（VanHeuvelen，1991a）中，学生首先练习使用示意图和图表来表征物理概念。只有在学生获得了足够的使用这些表征的经验之后，他们才会从数学角度探究这些概念，并将其用于问题解决（Van Heuvelen1991b）。这种方法使学生能够将构建表征的过程结合起来，形成启发式方法，从而在之后用于问题解决时减轻其认知负荷（Larkin和 Simon，1987年）。表征产物本身将信息外化，从而扩展了工作记忆（Zhang& Norman，1994年）。最近，其他人也将这种方法应用于交互式计算机与视频教程。这些教程与个别人工辅导结合使用，以激励学生完成教程时，能够改善学生的问题解决能力。然而，在学习或完成家庭作业时，学生往往不会使用这些教程进行刻意练习（Marshman 等人，2020年a）。一种相关的实施方式（Koenig 等人，2022年）将互动教程的过程与视频中的真人示范结合起来，该真人会在需要时出现。尽管仍处于测验阶段，但按需交替进行电子辅导和示范——这与认知学徒制更加一致——似乎更能成功地激励学生坚持下去。

构建层级化知识结构

层级分析工具（HAT）是一个示例（Dufresne et al., 1992），是一款要求学生遵循通用层级方法解决问题的计算机辅导程序。首先，一个

问题解决方案中，学生会面对一系列定义明确的问题，并从中选择适用于该问题的总体原理。他们对后续问题的回答会引导其选择能够导向解决方案的子原理。随着学生作出选择，HAT 软件会给出与每个选择一致的方程。由学生自行求解通过这一概念分析生成的方程。研究人员发现，使用 HAT 工具的学生与采用传统方式解决问题的学生在问题解决方面存在显著的表现差异，并得出结论：这种类型的定性分析会显著改善问题解决行为。

学习个人助理（PAL）软件（Reif &Scott, 1999）是计算机导师的一个例子，它引导学生完成牛顿力学力学问题的整个问题解决过程。它将引导学生构建问题的物理表征的导师功能，与强制使用层级知识结构的导师功能相结合，从而使学生构建解决问题所需的方程。这一过程还与互惠教学过程（Palincsar& Brown,1983）相结合，在该过程中，学生成为计算机的导师。在这一有限的实现中，使用 PAL的学生在解决入门力学问题时，表现得与接受人类导师辅导的学生一样好，并且优于在常规课堂中接受教学的学生。

为问题解决方案搭建支架

为学生提供支架（Wood 等人，1976年），是降低学生在问题解决过程中因高强度的信息加工和元认知而产生的认知负荷的常见方法，也是引导学生进入维果茨基（1978年）的最近发展区的一种途径。一种常见的支架是为学生提供通用的问题解决框架，通常以工作表的形式呈现（Chi & Glaser，1985，Hardiman 等人，1989，Heller 等人，1992a，Reif，1995，Dufresne 等人，1997，van Someren 等人，1998，Van Heuvelen & Zou，2001，Rosengrant 等人，2005，Warnakulasooriya 等人，2007，Singh，2008c，Nguyen 等人，2010，DeVore 等人，2017，Maries & Singh，2018a，2018年b）。该框架引导学生以系统的方式处理问题。对于包含“求最终动量”等物理线索的简短问题陈述，框架包含四个步骤：（1）用物理学术语描述问题，包括有用的表征，以及已知量、未知量和约束条件的列表；（2）制定解决目标的详细计划，包括选择可能有助于得出解决方案的相关原理或概念，并写下导向解决方案的逻辑或数学步骤；（3）执行计划；（4）检查答案是否合理。另一方面，更贴近现实的问题通常不包含提示其解决方案所需物理概念和原理的词语，而且其定量目标可能并未明确定义。解决这类问题需要先通过一个起始步骤明确问题的重点（Heller 等人，1992a，Heller & Heller（2010）。这一步需要通过绘制情境草图来澄清问题，草图中可包含可能重要的物理量，并确定一个一旦计算出来便能解决问题的量。尽管该框架按顺序排列，但在每个阶段，都会引导学生主动评估自己的行动对实现目标的作用，并在进展停滞时调整先前的行动。

一旦认知学徒制中必要的逐步撤除支架环节发生，且问题解决过程不再有支架支持，就应鼓励学生在着手解决问题之前，先写下解决方案的提纲

。评分时奖励学生，会鼓励他们即使在支架撤除之前也列提纲。这样可以将纸张纳入工作记忆，并让学生通过归类问题解决的各个部分来练习组块化，同时保持认知负荷在可控范围内。（Heller 等人, 1992a）。对于不习惯进行连续数学推导或有数学焦虑的学生来说，列提纲在任何复杂计算中都特别有用（Foley 等人, 2017）。这一过程类似于编写伪代码；编写伪代码被建议用于构建软件（Hatziapostolou 与 Paraskakis（2008）. 并且一直以来都是写作的一种工具。

问题解决后的反思

任务完成后的元认知反思过程，是人们修复、组织并拓展其知识结构的机制。遗憾的是，在大多数教学环境中，学生没有时间或激励去进行这一过程。引导学生接触这一过程的一种方法，是在测验结束或完成作业后，为学生提供有意义的激励，让他们诊断自己在问题解决中的错误。在关于学生完成测验后的研究中，帮助学生从错误中学习的最佳干预方式，是提供有意义的奖励，但只给予最低限度的支架。（Yerushalmi 等人，2012a，2012b）。在这项实验中，学生可以纠正自己的错误，以取回某道题失分的50%。然而，获得问题详细解答的学生，表现不如只能利用自身资源、教科书和笔记的学生）。获得过多外部支持的学生，似乎只是肤浅地完成了反思任务，并未真正理解其背后的物理概念。另一项研究（Brown 等人，2016）表明，即使向高水平学生提供正确解答，他们也未必能从错误中学习。

在学生解决问题后，鼓励他们反思问题解决过程的另一种方法是让他们与同伴一起反思（Mason 与 Singh, 2010年a, 2016年a）。在这种做法中，激励机制是竞赛。学生先独立解决问题，然后以三人小组的形式合作，选出“最佳”解决方案。各小组选出的解决方案彼此竞争。随后通过全班讨论，选出一个获胜方案，该方案最能体现有效的问题解决策略。与更传统的课程相比，这类活动能让学生运用更广泛的有效问题解决方法。

合作小组问题解决

合作小组问题解决是一种完整的基础物理课程结构，涵盖了认知学徒制的所有特征（Heller 与 Heller 2010年）。该课程结构以现有研究以及来自学生的定量和定性数据为基础（Heller 等人, 1992a, Heller 与 Hollabaugh, 1992b）。课程逐步发展，其最初目标是帮助学生培养一种可推广的问题解决方式，强调物理学的概念结构及其数学属性。

示范是在讲座中进行的，讲座将物理概念作为问题的解决方案加以介绍。讲师将这些概念与先前学过的概念结合起来，示范如何解决真实且使用自然语言、以避免物理提示的问题，这类问题称为情境—

丰富型问题。讲师通过阐述外在的问题解决过程和内在的决策过程，示范问题解决。讲座中会进行非正式的同伴指导，学生与邻座组成小组，偶尔共同确定讲师的问题解决方案中的下一步，或回答强调与待解决问题相关的替代性概念的概念性问题。正式指导则在实验课和讨论课中进行，学生按指定组成混合能力小组，每组 3 人，由一名助教管理 6 个小组。在这两种课堂形式中，学生都在同一小组内解决情境丰富型问题，主要区别在于，实验课中的问题解决方案会给出预测，并在实验中进行检验。

合作小组被用于为更接近专家的解决问题方式提供支架，并减轻伴随而来的认知负荷（Sweller, 1988, Johnson & Johnson 2009）。Heller 与 Hollabaugh 发现，当学生在能力水平混合的合作小组中运用明确的策略进行问题解决时，比独自学习获益更多。在这种方法中，学生遵循一套规定的问题解决框架（Polya, 1945, Heller & Reif, 1984），该框架依据对学生问题解决方案的分析进行了修改。这种方法包括可视化步骤和物理学描述步骤，学生在此过程中创建物理表征并构建概念层级。学生以三人小组的形式运用这一框架解决情境丰富的问题，小组成员分别担任明确体现解决问题所需元认知实践的角色：协调者、质疑者和检查员／记录员。他们通过定性视频研究得出三人是最佳小组人数；研究中记录了不同规模的小组在解决问题时的互动情况（Heller et al, 1992a, Heller and Hollabaugh, 1992b）。

他们之所以开发情境丰富型问题，是因为这类问题更接近人们在现实世界中可能遇到的情况，同时也因为它们是教授问题解决的良好载体：当问题具有挑战性时，学生更有可能认识到系统化方法的益处。这些问题通常涉及多个概念（Badeau 等人，2017年；Lin 与 Singh，2011年b、2013年a；Ibrahim 等人，2017年a、2017年b；Ibrahim 与 Ding，2021年；Yerushalmi 等人，2012a、2012b），因而需要建立概念层级。对于这类问题，学生能够从多种视角中受益，并在协作小组中分担认知负荷（Zhang 与 Norman，1994年；Zhang，1997年）。为了促进个体学习并避免搭便车，学生每周承担不同角色非常重要，而且小组成员应大约每3周更换一次。Heller 与 Hollabaugh 发现，在认知学徒制环境中，使用带有必要支架的情境丰富型问题开展协作学习（Heller 与 Heller，1995年）时，学生的问题解决能力会随时间推移而提高，且处于问题解决发展各阶段的学生都能从中受益（Heller 等人，1992年a；Heller 与 Hollabaugh，1992年b）。其他机构也对这一方法进行了测试，发现它不仅能大幅提升学生的问题解决能力，还能增强其概念理解，而且效果可与专为此目的设计、广泛接受的课程工具相媲美（Cummings 等人，1999年）。

物理学中的定量与概念理解整合（ICQUIP）

基于物理学中概念知识与定量知识的协同作用，研究者提出了一个专门针对物理学的框架，称为“物理学中的定量与概念理解整合”（Justice,

2019年），简称 ICQUIP。ICQUIP 框架立足于这样一个事实：为了学习物理学并运用定量工具培养推理能力，必须为学生提供充分的机会，让他们解读符号方程并据此进行定性推断。如果不明确关注物理学习中概念与定量层面的整合，定量问题解决就可能沦为数学练习，而非培养推理能力、构建稳固知识结构的机会（Ding 等，2011年）。遗憾的是，在缺乏明确指导与支持的情况下，许多学生会利用表面线索和提示解决物理问题，实质上是通过模式匹配来应用概念。事实上，许多传统物理学课程奖励按部就班的问题解决策略，许多学生会盲目地运用这些策略。许多教师认为，学生知道概念分析、决策或计划、计划评估以及对问题解决过程的反思，与定量问题解决方案的实施阶段同样重要。然而，一些研究者（McDaniel 等，2016年）发现，主要侧重于学生小组讨论概念性问题的互动式课程，并不一定能提升问题解决表现，这凸显了在让学生参与互动活动时，整合概念性与定量问题解决的重要性。

一种与 ICQUIP 框架相符的有效方法，是先进行定量问题解决，再进行概念性问题解决（Singh, 2008c）。这些概念性问题可以促使学生根据刚刚解决的定量问题作出定性推断。设计概念性问题时，要特别注意探查常见的错误观念，并促使学生辨别容易混淆的概念。将 ICQUIP 框架融入更广泛的认知学徒制模型十分重要。换言之，示范、指导与支架，以及逐步撤除支架，有助于学生从整合概念与定量的问题解决过程中学习并举一反三。可以让学生在小组中有机会解决相互关联的定量问题和概念性问题，并为他们提供适当的支架。之后，在家庭作业中逐渐减少支架，以帮助学生培养自主性。

以往研究表明，结合定量问题与概念性问题的问题解决，是一种有效的教学策略，可以减少概念困难，并帮助学生形成对物理学的功能性理解（Singh 2008c, Reinhart et al., 2022）。例如，在一项基础物理的对照研究中，一些学生只做概念性问题，另一些学生则做成对的定量问题和概念性问题。与只做定性问题的学生相比，同时做两类问题的学生正确回答两类问题的比例大致相同，而且远高得多（Singh 2008c）。在定量问题上也进行练习的学生，其概念性问题的表现显著提升；结合与学生的讨论，这表明当学生同时面对两类问题时，许多人认识到两者的相似之处，并借助定量问题的解决方案来解决概念性问题。

在高等物理学中教授问题解决

研究表明，许多与基础物理中的问题解决相关的问题也适用于高等物理（Singh & Zhu，2009），例如，学生仍必须有效地使用

问题解决策略，将问题解决作为学习机会，并围绕核心概念和原理分层组织自己的知识。此外，虽然高年级学生可能熟练掌握基础物理中使用的微积分，但在解决物理问题时，运用更高阶数学可能会带来认知负担。因此，应仔细考虑如何将数学融入课程，使其与学生当前的知识水平相符，避免他们在解决问题时出现认知超负荷，并使他们能够按照 ICQUIP 框架整合概念性知识与定量知识。例如，在量子力学中，学生遇到的困难类型与基础物理中的困难类似（Marshman & Singh，2018年）。

一项研究（Bilak 和 Singh，2007年）发现，入门课程学生和研究生在涉及导体与绝缘体的概念性问题上表现相当。另一项研究（Maries 和 Singh，2013年）比较了高年级本科生和研究生运用不同表征学习电磁学的熟练度，结果发现，尽管学生能够用数学方法计算散度和旋度，但两组学生都难以通过图形识别它们。这些研究表明，高年级学生可能更擅长某些类型的数学运算，但许多人仍难以解决概念性问题；这再次凸显了教学中兼顾概念性与定量问题解决的重要性。此外，在从错误中学习方面，与入门课程学生类似，高年级学生也能从明确的激励中受益，促使他们改正错误；如果没有这种激励，他们在期中考试到期末考试期间面对类似问题时，平均而言几乎没有进步（Brown 等人，2016年）。

一项研究（Lin 和 Singh，2010年）让高年级本科生和量子物理教师根据解决方案的相似性对量子力学问题进行分类。研究发现，教师的表现如预期般出色，而学生的分类则呈现出很大的多样性。另一项研究（Justice，2019年）中，高年级本科生学习了融合定性与定量内容的量子力学辅导材料，随后参加概念性问题后测；他们的表现与只学习定性辅导材料的学生相近。这一发现与物理学研究生形成对比：后者学习融合定性与定量内容的辅导材料后，在概念性问题上的表现显著更好（Justice，2019年）。高年级本科生和研究生表现不同的一个可能原因，是学习融合式辅导材料时所承受的认知负荷。本科生在数学准备程度上的差异可能更大，因此其中一些人从融合式辅导材料中获益较少，并且在学习过程中可能出现认知超负荷。另一方面，研究生的数学准备程度可能更好，因此不太可能出现类似的认知超负荷。这一发现强调，为高年级学生设计学习材料时，考虑认知负荷的重要性。

一项关于高年级本科生和研究生的鼓舞人心的研究发现
是在量子力学的背景下，他们能够在没有任何指导的情况下，自主地将所学从一种情境迁移到另一种情境（Maries等人，2017年，2020年）。这或许表明，高年级本科生已发展出足够的元认知技能，能够辨识底层概念；也说明在其他问题解决情境中，帮助他们将所学从一种情境迁移到另一种情境是可能的。

促进问题解决的动机因素考量

在任何实际的课堂环境中，激励所有学生采用有效的问题解决方法都至关重要。我们必须认识到班上学生的多样性，以及他们的背景如何影响他们对课堂的感受，以及他们与同伴和学习材料互动的程度。研究表明，刻板印象威胁（Wheeler & Petty，2001年；Appel & Kronberger，2012年；Marchand & Taasoobshirazi，2013年）会对受刻板印象影响的群体成员在许多STEM学科中的表现和参与度产生负面影响，例如女性以及种族和族裔少数群体学生。缺乏归属感和自我效能感低下（即对自身解决问题能力的信念）等问题会对学习产生不利影响（Marshman 等人，2018年b；Binning等人，2020年）。尤其是在物理问题解决中，学生可能不相信自己有能力取得成功，这会影响他们参与其中的动机；而当他们确实着手解决问题时，焦虑可能会耗损他们本就有限的工作记忆（Maloney等人，2014年）。此外，学生可能认为自己无法成为“硬科学”领域的专家问题解决者，并且由于智力是不可改变的，尝试也毫无意义；换言之，他们可能持有固定型思维（Dweck，2007年；Yeager & Dweck，2012年）。对于缺乏榜样、并且不确定自己是否具备成为专家问题解决者所需能力的代表性不足群体学生而言，这些问题尤其值得关注。为了让所有学生都能有意义地参与问题解决，教师必须营造公平且包容的学习环境。

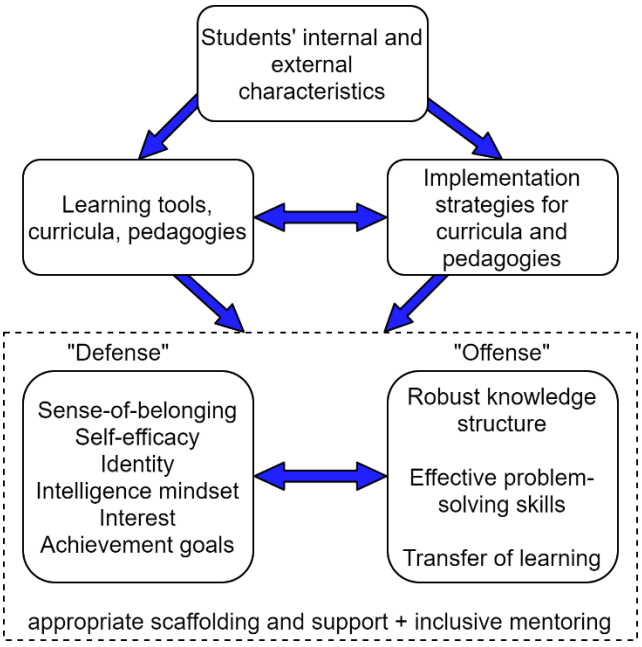


图3 包容且公平环境中的物理学习整体生态系统（HELPIEE）框架。

在这方面，一个值得参考的框架是图3所示的包容且公平环境中的物理学习整体生态系统（HELPIEE）（Cwik & Singh，2021年）。该框架强调，在选择和实施学习工具、课程与教学法时，我们不仅应考虑学生的初始特征，还应像国际象棋或网球指导一样，同时关注防守与进攻。在这里，培养学生的“进攻能力”指的是教师通常关注的方面，即帮助学生学习有效的问题解决方法、培养迁移所学的能力，并建立稳固的知识结构。“防守”则指物理教师通常未曾考虑、但在代表性不足的学生学习问题解决的过程中可能造成特别不利影响的问题。它指的是增强学生的

归属感、自我效能感，以及将自己视为能够在物理学领域取得优异成绩的人所具有的身份认同，并培养成长型思维，也就是说，大脑就像肌肉一样，人可以通过

努力且巧妙地学习来提升智力（Yeager & Dweck，2012年）。此外，较强的物理学自我效能感、身份认同和成长型思维有可能提高学生对物理学的兴趣和成就目标。如果教学设计不致力于增强学生的“防御力”，例如营造公平包容的环境——其中可以包括在课程开始时采取干预措施，以提升学生的归属感、思维模式等（Paunesku等人，2015年；Yeager和Walton，2011年；Binning等人，2020年），随后强化社会归属感以及人人都能学习物理学的思维信息，那么许多代表性不足的学生就不太可能充分受益于旨在培养问题解决能力的教学法和课程。此外，强调问题解决是学习物理学的重要工具，以及大脑的成长需要人们应对具有挑战性的问题并从错误中学习，这有助于培养成长型思维，并提升学生解决问题的热情。

学生对问题解决的态度

学生对问题解决的态度会影响他们参与问题解决的方式。例如，如果学生不相信物理学问题的答案应当合理，那么他们在解决问题后很可能不会检查答案。如果学生认为物理学只是由彼此孤立的事实和公式组成的集合，那么他们很可能会形成公式中心型的问题解决方法。因此，在帮助学生学习物理问题解决的同时，了解学生对问题解决的态度和方法，并努力加以改善，是十分重要的。与学生对问题解决的态度相关的，还有他们对物理学知识本质的态度和信念（即认识论信念）。这些信念包括：物理学是否应当具有直观意义，是否应当适用于现实世界中的事物，问题解决是否包括理解答案的意义，学习是否意味着记忆解决方案还是理解物理学，等等。每当通过 MPEX（Redish 等，1998年）或 C-LASS（Adams 等，2006年）等工具，在教学前后对这些方面进行调查时，通常会发现学生的态度有所恶化，即变得更加偏离物理学专家的态度。然而，重要的是要认识到，物理学课程的教学方式实际上往往会促使学生的态度恶化。Hammer（Hammer，1989年）讲述了“Ellen”的故事：她最初有动力将自己在物理学中学到的内容与直觉相协调，并能够运用这些概念对世界进行推理；但随着课程以抽象的方式进行教学，她逐渐感到沮丧，最终放弃了理解物理学，只专注于熟练识别应当使用的正确公式。

从入门课程到高级课程，学生对问题解决的态度和方法各不相同（Cummings 等人，2004年；Mason与Singh，2010b）。例如，对于以下陈述：“在寻找相应的方程之前，我总是先确定问题中涉及的物理学原理”，62%的入门课程学生表示赞同。虽然可以对此持积极看法，因为超过一半的学生具有类似专家的态度，但这确实意味着，38%的学生正在学习一门课程，而在这门课程中，他们并不认为确定原理很重要。同样，55%的学生同意以下陈述：“当我解决物理学/天文学问题时，我总是明确思考问题所依据的概念。”这些问题与一个被描述为“元认知和问题解决乐趣”的因素有关。在一项研究中（Good 等人，2019年），研究者比较了入门课程中男学生和女学生对问题解决的态度和方法。

研究发现，女学生通常更看重较好的问题解决方法，而且从课程开始到结束，她们的信念没有变化；相比之下，男学生的信念则有所减弱。访谈表明，对于诸如“解决物理问题时，我常发现先画一幅图或示意图来呈现问题中描述的情境很有用”这样的条目，女学生通常表示认同，并指出她们总会画示意图，因为否则她们认为自己可能无法正确解决物理问题（Good 等人，2019年）。访谈还表明，女性对物理问题解决的自我效能感较低，可能部分促成了她们采用更好的问题解决方法。不过，教师可以利用女学生良好的问题解决方法，帮助她们成为熟练的问题解决者。Good 等人（Good 等人，2018年b）还比较了基础物理课程和天文学课程中学生的态度及问题解决方法。他们发现，天文学学生对问题解决持有更积极的态度。访谈表明，天文学中更有趣、更吸引人的情境至少部分解释了这一发现。本研究指出，教师应考虑在物理问题中采用更有趣、更吸引人的情境，包括那些对学生更有意义的情境（而不是选择诸如斜面上的箱子这样的情境）。

助教和教师的专业发展：对问题解决的看法

为了对物理学中有效的问题解决教学产生更大的影响，开展面向未来教育者的专业发展（Maries, 2020）以及面向当今教授的专业发展至关重要。要使这些项目取得成功，了解物理教师和助教对问题解决的看法十分重要。

好消息是，R1级大学的物理教师认为，问题解决是物理课程的核心目标，而解决问题需要概念理解（Yerushalmi 等人，2007年、2010年；Henderson 等人，2007年）。研究人员对六位教师进行了访谈（Yerushalmi 等人，2007年），发现教师对“典型”学生的期望相对较低，他们认为这些学生常常采用较差的问题解决策略。这里存在一个明显的矛盾：教师虽然重视问题解决，并认为它很重要，但似乎又认为只有少数入门课程学生有能力学会这一技能。另一个明显的矛盾是，他们期望学生在通过问题解决进行学习时能够反思，但其教学通常并未为反思而设计，而且他们没有意识到自己在帮助学生培养元认知技能方面所发挥的作用。他们认为学生应该靠自己做到这一点。与此类似，Hora 的一项研究（Hora，2014年）调查了本科院校56位数学和科学教师的看法。研究揭示了教师对学生学习的一般看法，以及对学生通过解决问题进行学习的看法。其中包括：学生通过练习和坚持、向他人阐述自己的想法、观点和问题解决过程，能够学得最好；而通过积极动手参与学习材料，最能促进学习。

然而，尽管一些教师对问题解决有着积极有效的看法（Yerushalmi 等人，2007年、2010年；Hora，2014年），但在给物理问题评分时，他们的做法可能并没有那么有效。Henderson 等人（Henderson 等人，2004年）发现，教师评分时有时会采用不利于学生学习问题解决的做法。具体而言，在评阅例题解答时，教师有时会给简短的解答较高评价；评分时也会自行承担举证责任，而没有鼓励学生展示解题过程。他们不愿因学生简短的三行解答中没有错误而扣分，但却愿意因另一名学生在完整展示步骤并采用有效的问题解决策略时出现的约分错误而扣分。这会向学生传递错误的信息。换言之，学生可能会因为展示解题过程时出错而受到惩罚，从而认为最好的解答是尽量少展示过程，以免被扣分。

在评分方面，助教也表现出类似的不情愿（Marshman 等人，2018a，Marshman 等人，2020b）；由于他们通常负责对学生作业进行评分，因此他们的评分实践可能会适得其反，不利于学生学习问题解决。此外，需要注意的是，与高等物理相比，助教可能会以不同的方式看待基础物理中的问题解决。例如，Marshman 等人（Marshman等人，2017年）发现，研究生助教对普通物理入门课程学生和高等物理学生有着不同的期望，并且由于他们认为入门课程学生没有能力在解决物理问题时使用有效的问题解决策略，因此很可能会对入门课程学生采取宽松得多的评分标准。具体而言，助教认为，在高等物理中，系统地进行问题解决更为重要；但这对入门课程学生而言并非必需，而且也可能超出他们的能力范围。因此，了解有关研究生助教关于问题解决的观念的研究非常重要。由于研究生助教最近还是基础物理课堂中的学生，因此人们可能会认为，助教关于教授问题解决的信念会受到他们之前的物理教师的影响。

此外，助教对教与学的信念可能受到自身作为学习者的经历以及对自己有益的教学方式影响。例如，在实验教学情境中，助教认为学生的学习方式与自己当年的学习方式相似，并采用曾对自己有效、但未必有益于学生的教学策略（Seung，2012）。此外，助教认可教育研究提出的教学策略，但有时会将其搁置，转而采用自己认为恰当的教学方式，例如，他们认为应该在黑板上仔细演算问题，向学生讲解如何解决问题（Seung，2012）。同样，助教自身的问题解决方法也可作为判断其对学习以及问题解决教学之信念的依据。此外，Mason 与 Singh（Mason 与 Singh，2010b）发现，尽管近 90% 的研究生表示，在解决入门物理问题时会明确思考底层概念，但约 30% 的研究生表示，解决入门物理问题只需要采用“套公式计算”策略。对研究生的访谈表明，他们解决入门问题时，这些问题对他们而言实际上只是练习题，而非真正的问题（也就是说，解决方案对研究生来说“显而易见”，他们无需运用对入门课程学生而言不可或缺的有效问题解决方法）。由于助教能立即识别解决入门问题所需的原理，

他们会认为入门问题解决不需要太多思考或反思。然而，若从自己的角度而非物理入门课程学生的角度来思考问题的难度，可能会妨碍他们帮助物理入门课程学生学习有效的问题解决。这些发现表明，负责教授习题课或实验课的助教可能不会示范、指导或评估推理过程的阐释或反思，因为这些对他们解决入门物理问题并非必需，尽管它们对物理入门课程学生大有裨益。

Lin 等人（Lin 等人，2013）研究了助教对于借助例题解答来学习和教授问题解决的信念。这项研究揭示了助教所陈述的目标与实际做法之间存在差异。例如，当助教被要求评估三个不同版本的例题解答时，许多人都看重那些有助于学生培养有效的问题解决方法的特点。谈及在基础物理教学中使用例题解答时，大多数助教都表达了过程导向的学习目标（即帮助学生在问题解决方法上变得更有条理，并更好地将问题解决作为学习工具）。然而，他们自己设计的例题解答并不具备有助于学生学习有效的问题解决方法的特点。当助教没有意识到其所陈述的目标与实际做法之间的冲突时，他们往往更倾向于结果导向的解答（即没有阐明推理过程的解答）。评分情境中也可能出现类似的差异：助教可能对评分在学习过程中的作用抱有积极的信念，但采用的评分做法却与这些信念不一致，甚至可能没有意识到这种差异。

此外，关于问题解决教学，既有研究表明，助教更倾向于使用拆分成若干部分的问题，而非情境丰富型问题（Good 等人，2018a，2020年）。虽然拆分成若干部分的问题最初有助于为学生提供支架（Collins 等人，1989年），但应逐步撤去这些支架，以帮助学生培养独立解决问题的能力。事实上，助教认为情境丰富型问题几乎毫无用处，即使是在学生协作学习的情境下也是如此。还应认识到，学生评价在多大程度上会影响助教的教学决策。例如，助教可能希望培养学生的推理和问题解决能力，但又担心学生不喜欢这种做法并提出抱怨。因此，他们会采取折中的做法，介于自己想做的和认为学生会喜欢的之间（Chini 和 Al-Rawi，2012年）。不过，仍有希望。结构完善的导向培训和支持体系若能强调助教对学生学习的重要性，并让他们讨论和体验基于研究的教学，助教便会对此作出积极回应（Lawrenz 等人，1992年）。尤其重要的是，应让助教承担与其教学知识和物理知识相匹配的教学角色，使他们能够取得成功，并成长为能够胜任教学的新一代教师。

Other Related Frameworks

还有一些与问题解决密切相关的其他框架。我们此前没有纳入这些框架，因为它们传统上并未被称为问题解决研究（尽管它们会引用问题解决研究）。例如，认识论游戏框架（Tuminaro & Redish, 2007年, Hu et al., 2019年）与学生在

进行问题解决时的行为有关。该框架试图理解学生在解决问题时如何运用物理学和数学概念，以及如何将二者融合。一些已识别的游戏与专家使用的特定类型策略有关，例如在定性分析中使用图示，这与 Tuminaro 和 Redish 所说的“图像分析游戏”相似。一些认识论游戏研究探讨学生如何将数学与物理学融合，另一些则涉及意义建构与理解，或概念与定量、物理学与数学等方面的融合（Eichenlaub & Redish, 2019年）。此外，双加工理论框架（Kahneman, 2013年, Kryjevskaia et al., 2021年）关注解决问题时快速（反射性）和缓慢（反思性）的思维过程。在问题解决研究中，专家能够进行反思并运用有效的问题解决策略；而新手在解决问题时往往缺乏反思，需要通过支架支持来学习如何进行反思。

此外，值得注意的是，这里讨论的许多与问题解决相关的有效方法之所以对学生的学习十分重要，是因为他们正在接受成为科学家的训练，而这些方法也能帮助他们解决真实的科学问题（Price 等，2021年；Leak 等，2017年）。例如，Price 等人（Price 等，2021年）访谈了来自众多学科的 52 位成功科学家和工程师，了解他们在所在学科中解决真实问题时所采用的问题解决行为，并据此制定了一个决策框架，其中包含 29 项在科学和工程各学科中普遍存在的不同决策。许多决策都与上文讨论的内容密切相关，例如，问题的界定与计划、解决方案的解释与选择，以及反思，均属于该框架的一部分。与本文的讨论类似，他们主张在更广泛的认知学徒制模型中采用刻意练习模型，并建议教师提供培训机会，让学生参与作出其框架中的 29 项决策。他们还指出，由于这些决策来自专家对其如何解决所在学科中的真实问题的讨论，因此在教授问题解决时，对于要求学生完成的某一具体任务而言，只有其中一部分决策是相关的。

结论

帮助学生掌握有效的问题解决策略，已被视为许多面向理工科专业学生的物理课程中的一项明确目标。在教学中明确融入经研究验证的、促进问题解决的方法十分重要。了解有效问题解决的所有不同方面，有助于指导教学设计。人们已开发出许多工具，而学生能否有意义地使用这些工具，取决于这些工具如何激励学生，以及它们如何融入课程的学习目标、教学设计和评估之中。为了凸显问题解决研究对教学的影响，过去十年间，许多图书出版商尝试在其最受欢迎的教材中融入一些基于研究的方法。尽管这些方法在多大程度上确实改善了学生学习尚不明确，但这仍然是一项令人鼓舞的发展。

参考文献

Adams, W. 等（2006年）。用于测量学生关于物理学和物理学习的信念的新工具：科罗拉多州科学学习态度调查。《物理评论：物理教育研究》，2，010101。Anderson, J.（1995年）。学习与记忆。纽约：Wiley。Anderson, J.（2000年）。问题解决。载于 J. Anderson（编）。认知心理学及其影响（第239–278页）。纽约：Worth。Appel,M.与Kronberger, N.（2012年）。刻板印象与成就差距：测验前的刻板印象威胁。教育心理学评论，24，609。Badeau, R.等（2017年）。什么对已解例题有效：将自我解释和类比比较拓展到综合问题。《物理评论：物理教育研究》，13，020112。Bagno, E.与 Eylon,B.（1997年）。从问题解决到知识结构：电磁学领域中的一个例子。《美国物理学杂志》，65(8)，726-736。Bagno,E. 等（2000年）。从碎片化知识到知识结构：连接力学和电磁学领域。《美国物理学杂志》，67(7)，S16-S26。Bassok,M. 与 Holyoak,K.（1989年）。代数和物理学中同构主题之间的跨领域迁移。J.Exp. Psych.:学习、记忆与认知，15(1)，153-166。Beichner, R.（1999年）。“目标导向的问题解决”。取自 https://projects.ncsu.edu/per/archive/GOALPaper.pdf Beilock,S.、McConnell,A.、Rydell,R.（2007年）。刻板印象威胁与工作记忆：机制、缓解及溢出效应。J. Exp. Psych.: Gen.，136(2)，256-276。Beilock, S.等（2006年）。关于刻板印象威胁的因果机制：不严重依赖工作记忆的技能仍然会受到威胁吗？Pers. ~~Soc.Psych. Bull.，38，1059-1071。Bilak,J.与 S~~ingh,C.（2007年）。改善学生对导体和绝缘体的概念理解。《美国物理联合会会议论文集》，951，49-52。Binning,K. 等（2020年）。改变社会情境以促进大学科学课程中的公平：一种生态归属干预。《心理科学》，31(9)，1059-1070。Bransford,J. 等（2000年）人们如何学习：大脑、心灵、经验与学校：扩展版。美国国家科学院出版社。Brown, B. 等（2016年）。通过明确激励纠正错误来提高量子力学学习表现。《物理评论：物理教育研究》，12，010121。Caballero, M.、Engelhardt L.、Knaub A.、KucheraM.、Lopezdel Puerto,M.、Lunk, B.、Roos, K.、Zimmerman, T.（2021年）， PICUP虚拟顶点会议报告，Hilborn, R. 编，Partnershi

p

本科物理学中的计算整合，
https://www.compadre.org/picup//events/pdfs/2021_PICUP_Capstone_Report_Final_Final_220 5
02.pdf。Chase, W., & Simon, H. (1973). 国际象棋中的知觉。《认知心理学》，4, 55-81。

Chi，M. 等（1981）。专家和新手对物理知识的分类与表征。《认知科学》，5, 121-151。Chi，M., & Glaser, R.（1985）。问题解决能力。载于 R.J. Sternberg（编），《人类能力：一种信息加工方法》（第 227–250 页）。纽约：Freeman。Chini, J., & Al-Rawi, A.（2012）。助教的信念与实践及学生感知的一致性。《美国物理联合会会议论文集》，1513, 98-101。Chipman, S. 等（2000）。认知任务分析导论。载于 J. Schraagen, S. Chipman & V. Shute（编），《认知任务分析》（第 3-23 页）。新泽西州马瓦：Lawrence Erlbaum Associates。Clement, J.（1998）。科学问题解决中生成类比的观察方法。《认知科学》，12(4), 563-586。Collins, A. 等（1989）。认知学徒制：阅读、写作与学徒实践的教学。载于 R. Glaser 和 L. Resnick（编），《认知、学习与教学：纪念 Robert Glaser 文集》（第 453-494 页）。新泽西州希尔斯代尔：Lawrence Erlbaum Associates。Crane, H.（1966）。囚犯教学实验。《美国物理学杂志》34, 799-807。Crane, H.（1969）。基础物理问题。《物理教师》7, 371-378。Cummings, K. 等（1999）。评价工作室式物理教学中的创新。《美国物理学杂志》67, 38-44。Cummings, K. 等（2004）。对问题解决的态度作为学生成功的预测因素。《美国物理联合会会议论文集》，720, 133-136。Cwik, S., & Singh, C.（2023）。本科物理学习环境中公平与包容的评估和改进研究框架与综述。物理教育研究手册，第 3 卷：物理教育研究专题,由 M. F. Taşar 和 P. Heron 编（美国物理联合会出版社，纽约州梅尔维尔，2023），第 2-1 页。de Jong, T., & Ferguson-Hessler, G.（1986）。物理学中优秀与较差新手问题解决者的认知结构。《教育心理学杂志》，78(4) 279-288。DeVore, S. 等（2017）。通过自定进度的交互式电子基础物理学习教程吸引所有学生所面临的挑战。《物理评论：物理教育研究》，13, 010127。Dewey, J.（1910）《我们如何思考》，D.C. Heath & Co. Ding, L. 等（2011）。探讨概念支架在解决综合问题中的作用。《物理评论·科学与技术教育研究》，7, 020109。Docktor, J. 等（2012）。短期干预对新手分类标准的影响。《物理评论·科学与技术教育研究》，8, 020102。Docktor, J. 等（2015）。高中物理中的概念性问题解决。《物理评论·科学与技术教育研究》，11, 020106。Dorst, K.（2015）。扩展领域中的框架创造与设计，《She Ji：设计、经济与创新杂志》1(1), 22-33。Dreyfus, S.（2004）。成人技能习得的五阶段模型，《科学、技术与社会公报》24, 177-181

Dufresne, R. 等（1997年）。用多种表征解决物理问题。Phys. Tea *ch.*, 35(5), 270-275。Dufresne, R. 等（1992年）。促使新手进行专家式问题分析：效】【。

cts

关于图式习得。《学习科学杂志》，2(3)，307–331。德韦克，C.（2007年）。数学是一种天赋吗？使女性面临风险的信念，载于S. J. Ceci和 W. M. Williams（编）。为什么科学领域没有更多女性？顶尖研究者探讨证据（第 47–55 页）。美国心理学会。Eichenlaub，M.，和 Redish，E.（2019年）。将物理知识与数学形式融合

in

物理问题解决。在 G. Pospiech、M. Michelini 和 B.-S. Eylon（编）编著的《物理教育中的数学》（第 127–151 页）中。Cham，瑞士：施普林格。Ericsson, K. 等（1993）。刻意练习在获得专家表现中的作用。《心理学评论》，100(3)，363–406。Eylon, B. 和 Reif, F.（1984）。知识组织对任务表现的影响。《认知与教学》，1(1)，5–44。Flavell, J.（1976）元认知与认知监控：认知发展研究的新领域。《美国心理学家》，34，906–911 Foley A、Herts J、Borgonovi F、Guerriero S、Levine S、Beilock S（2017）数学焦虑—表现关联：一种全球现象。《心理科学当前方向》。26(1)，52–58。Funahashi, S.（2017）前额叶皮层中的工作记忆，《脑科学》，7，49–71 Good, M. 等（2018a）。物理教学助理对不同类型入门问题的看法：理解情境丰富型和多项选择型问题的教学益处所面临的挑战。

---

ce

问题。《物理评论：物理教育研究》，14，020120。Good，M. 等（2018年b）。比较基础物理和天文学学生的态度与

nd

问题解决方法。《欧洲物理学杂志》，39，065702。Good，M. 等（2019）。传统教学或循证主动参与式教学的影响

on

基础物理男女学生对物理问题解决的态度和方法。《物理评论：物理教育研究》，15，020129。Good，M. 等（2020）。研究生助教对分步物理问题的看法：对指导的偏好盖过了问题解决中自主性的发展。《物理评论：物理教育研究》，16，010128。Hammer，D.（1989年）。学习物理的两种方法。《物理教师》，27(9)，664-670。Hardiman，P. 等（1989年）。问题分类与问题解

ing

在专家和新手之间。《记忆与认知》17，627–638。Hebb, D.（1949）《行为的组织》，John Wiley and Sons。Heller, K. & Heller, P.（1995）。《胜任的问题解决者》，一种解决问题的策略

s in

物理学（第2版）。McGraw-Hill。

Heller, K. 和 Heller, P.（2010年）。合作问题解决：用户手册。明尼苏达大学, https://www.aapt.org/conferences/newfaculty/upload/coop-problem-solving-guide.pdf。Heller, P.、Keith, R. 和 Anderson, S.（1992a）。通过合作分组教授问题解决。第1部分：小组与个人问题解决。《美国物理学杂志》，60，627。Heller, P. 和 Hollabaugh, M.（1992b）。通过合作分组教授问题解决。第2部分：问题设计与小组结构安排。《美国物理学杂志》，60，637。Heller, J. 和 Reif, F.（1982年）。物理学中的知识结构与问题解决。《教育心理学》，17(2)，102-127。Heller, J. 和 Reif, F.（1984年）。规定有效的人类问题解决过程：物理学中的问题描述。《认知与教学》，1(2)，177-216。Henderson, C. 等（2004年）。学生问题解决方案评分：传递一致信息的挑战。《美国物理学杂志》，72，164-169。Henderson, C. 等（2007年）。物理学教师关于问题解决教与学的信念与价值观。II. 测量与分析程序。《物理评论·科学与技术教育研究》，3，020110。Holyoak, K.（1985年）。类比迁移的实用性。载于 G. H. Bower（编），《学习与动机心理学》（第59-87页）。纽约：学术出版社。Hora, M.（2014年）。探究教师关于学生学习及其在教学决策中所起作用的信念。《高等教育评论》，38 (1)，37-70。Huffman, D.（1997年）。明确的问题解决策略对高中生问题解决表现及物理概念理解的影响。《科学教学研究杂志》，34(6)，551-570。Hsu, L. 和 Heller, K.（2005年）。计算机问题解决辅导工具。《美国物理联合会会议论文集》，790，197-201。Hu, D. 等（2019年）。利用认识论游戏刻画物理相关工作场所中的数学问题解决。《物理评论：物理教育研究》，15，020131。Ibrahim, B. 和 Ding, L.（2021年）。序列式与同步式综合问题解决：学生视线转换的比较。《物理评论：物理教育研究》，17，010126。Ibrahim, B. 等（2017年a）。数学复杂度各异的综合物理问题中学生的概念表现。《物理评论：物理教育研究》，13，010133。Ibrahim, B. 等（2017年b）。学生在解决定量综合问题时如何处理方程？数学复杂度对学生数学表现的作用。《物理评论：物理教育研究》，13，020120。Jacobs, J. 和 Paris, S.（1987年）。儿童对阅读的元认知：定义、测量与教学方面的问题。《教育心理学》，22，255-278。Johnson, D. 和 Johnson, R.（2009年）。教育心理学的成功案例：社会互赖理论与合作学习。《教育研究》，38(5)，365-379。Justice, P.（2019年）。运用经研究验证的学习工具帮助学生学习量子力学。博士学位论文。匹兹堡大学。

Lawrenz, F., Heller, P., Keith, R., Heller, K.（1992）培训助教：使助教的优势和能力与具体项目目标相匹配，《大学科学教学杂志》2（2），106-109。Kahneman, D.（2013）。《思考，快与慢》。（法勒、斯特劳斯与吉鲁出版社，纽约，纽约州）。Kail, R., & Salthouse, T.（1994）。加工速度作为一种心理能力。《心理学学报》，86，199-225。Koedinger, K. R., & Nathan, M. J.（2009）。文字题背后的真实情况：表征对定量推理的影响。《学习科学杂志》，13（2），129-164。Koenig, K. 等（2022）。通过互动式视频增强教程促进问题解决。《物理教师》，60，331-334。Kryjevskaia, M. 等（2021）。直觉还是理性？学生和专家两者都需要。《物理教师》，8，28-31。Kyllonen, P., & Christal, R.（1990）。推理能力就是（几乎不超出）工作记忆容量？！《智力》，14，389-433。Larkin, J., & Simon, H.（1987）。为什么一幅图示（有时）胜过千言万语。《认知科学》，11（1），65-99（1987年）。Larkin, J. 等（1980）。专家和新手的问题解决表现。《科学》，208，1335。Leak, A. 等（2017）。考察物理学密集型博士研究中的问题解决。《物理评论：物理教育研究》，13，020101。Lin, S.-Y., & Singh, C.（2010）。教授和学生对量子力学问题的分类。《欧洲物理学杂志》，31，57-68（2010年）。Lin, S.-Y., & Singh, C.（2011年a）。使用类比的挑战。《物理教师》，49（8），512-513。Lin, S.-Y., & Singh, C.（2011年b）。通过同构问题学习基础物理。Phy.

s.

Rev. ST-物理教育研究，7(2)，020104。Lin, S.-Y., & Singh, C.（2013年a）。利用同构问题对学习基础物理。

s:

从两步问题迁移到三步问题。《物理评论·科学与技术教育研究》，9，020114。Lin,S.-Y.，& Singh,C.（2013年b）。支架对帮助物理入门课程学生解决涉及强替代性概念的定量问题的影响。《物理评论·科学与技术教育研究》，11，020105。Lin,S.-Y.、Henderson、Mamudi、Singh, C.和Yerushalmi, E.（2013年）。助教对于基础物理中例题解答的信念。《物理评论专题：物理教育研究》，9，010120（2013年）。Maloney,E. 等（2014年）。焦虑与认知。《WIREs认知科学》，5，403。Marchand,G.，&Taasoobshirazi, G.（2013年）。刻板印象威胁与女性在物理学中的表现。《国际科学教育杂志》，35，3050。Maries, A.（2020年）。为下一代的主动学习做准备。载于 J. Mintzes 和 E. Walte

r

（编者）。大学科学中的主动学习：倡导循证实践（第965–983页）。柏林：施普林格·自然。

Maries, A. 和 Singh, C.（2013年）。核心研究生课程：错失的学习机会？美国物理学会。《会议论文集》，1513，382-385。Maries, A., & Singh, C.（2018年a）。学生在解决入门物理问题时，自己绘制促进性图示是否有益？以两个静电学问题为例。《欧洲物理学杂志》，39，015703。Maries, A., & Singh, C.（2018b）。两个静电学问题案例：提供图示会对物理入门课程学生的问题解决表现产生不利影响吗？《物理评论：物理教育研究》，14，010114。Maries, A. 等（2017）。互动教程在促进高等量子力学中“路径信息”推理方面的有效性。《物理评论：物理教育研究》，13，020115。Maries, A. 等（2020）。学生能否将从马赫-曾德尔干涉仪情境中学到的“路径信息”概念应用于双缝实验？《美国物理学杂志》，88（7），542-550。Marshman, E., & Singh, C.（2018）。理解量子力学中学生困难模式的框架。《物理评论：物理教育研究》，11，020119。Marshman, E. 等（2017）。基础物理与量子力学中评分方法的对比：以研究生助教为例。《物理评论：物理教育研究》，13，010120。Marshman, E. 等（2018年a）。改变助教评分实践的挑战：要求学生展示理解证据。《加拿大物理学杂志》，96（4），420-437。Marshman, E. 等（2018年b）。在入门课程中，成绩为A的女学生与成绩为C的男学生拥有相似的物理学自我效能感：这是一个警示原因吗？《物理评论：物理教育研究》，14，020123（2018年）。Marshman, E. 等（2020年a）。帮助学生从经研究验证的自主学习工具中有效学习的整体框架。《物理评论：物理教育研究》，16，020108。Marshman, E. 等（2020b）。物理学研究生助教的评分方法：相互冲突的目标与实践。《欧洲物理学杂志》，41，055701。Martinez, M.（1998）什么是问题解决？《菲德尔塔卡潘》79，605-609；Martinez, M.（2006）什么是元认知？《菲德尔塔卡潘》87，696-699。Mason, A., & Singh, C.（2010年a）。通过与同伴反思，帮助学生学习有效的问题解决策略。《美国物理学杂志》，78（7），748-754。Mason, A., & Singh, C.（2010b）。调查研究生的态度及其问题解决方法。《物理评论·科学与技术教育研究》，6，020124。Mason, A., & Singh, C.（2011）。使用分类任务评估基础物理中的专业能力。《物理评论·科学与技术教育研究》，7，[illegible]gh, C.（2016年a）。与同伴[illegible]导性反思对有效问题解[illegible]响。《物理教师》，54，295-299。Mason, A., & Singh, C.（2016b）。将问题分类作为教学工具，帮助入门课程学生学习物理学。《物理教育》，51，025009。Mazur, E.（1997）。同伴教学：用户手册。恩格尔伍德克利夫斯，普伦蒂斯霍尔。

McDaniel, M. 等（2016）。解离性的概念与定量问题解决结果 s
跨越互动参与式和传统形式的基础物理。《物理评论：物理教育研究》，12，020141。McDermott，L.（1991年，59，301）。我们所教的内容与学生所学的内容——缩小差距，《美国物理学杂志》。McDermott，L.（2001年）。2001年奥斯特奖章演讲：物理学教育研究——学生学习的关键。《美国物理学杂志》，69，1127。Miller，G.（1956年）。神奇的数字七，加减二：我们处理信息能力的某些局限。《心理学评论》，63(2)，81-97。Morphew，J. 等（2020年）。呈现风格和问题解决尝试对元认知以及从解决方案视频中学习的影响。《物理评论：物理教育研究》，16，010104。Nathan，M. 等（2001年）。专家盲点：当内容知识超越学科教学知识时。载于 L. Chen 等（编）。第三届国际会议论文集

on

《认知科学》（第644-648页）。中国北京：中国科学技术大学出版社。Newell，A. 等（1958）。人类问题解决理论的要素。《心理学评论》，65(3)，151。Nguyen，D.-H. 等（2010年）。促进学生在入门力学中跨多重表征的问题解决。《美国物理联合会会议论文集》，1289，45-48。Novick，L.（1988）。类比迁移、问题相似性与专业能力。《实验心理学杂志：学习、记忆与认知》，14(3)，510–520。Oerlein，K.（1937）。大学物理学中的数学困难。《数学教师》，30(3)，125-127。Palincsar，A. 和 Brown，A.（1983）。理解监控活动的互惠教学

s,

第269号技术报告，阅读研究中心。Paunesku, D. 等（2015）。思维模式干预措施是改善学业成绩不佳的可扩展方案。《心理科学》，26，784。Piaget, J.（1967）《六项心理学研究》，兰登书屋。Polya（1945）。《如何解题》。新泽西州普林斯顿：普林斯顿大学出版社。Price, A. 等（2021）。科学与工程领域专家问题解决过程的详细特征描述：对教学和评估的指导。《CBE生命科学教育》，20，1-15。Quarantotto, D.（2020）亚里士多德论科学作为问题解决。《Topoi》，39，857-868。Redish 等（1998）。基础物理中的学生期望。《美国物理学杂志》，66(3)，212-22。

4.

Rees, P. 等（2016）神经科学证据揭示脑可塑性的出现：对 s
教育实践的启示，《教育与儿童心理学》33，8-19。Reif, F.（1995）。密立根讲座1994年：理解并教授重要的科学思维过程。《美国物理学杂志》，63(1)，17-32。Reif, F. 和 Scott, L.（1999）。教授科学思维技能：学生与计算机辅导

ng

彼此。《美国物理学杂志》，67（9）819-831。

Reinhard, A. 等（2022年）。评估元认知事后反思练习对问题解决能力的影响。《物理评论：物理教育研究》，18，010109。Rosengrant, D. 等（2005年）。受力图——必要还是充分。《美国物理联合会会议论文集》，7

90,

177. Ryan, Q. 等人（2016）。基础物理的问题解决辅导系统：设计 an

d

可用性研究。《物理评论：物理教育研究》，12，010105。Schoenfeld。A.（1987年）。关于元认知究竟为何引起如此多的争论。载于 A. Schoenfeld（编）。《认知科学与数学教育》（第189—215页）。新泽西州希尔斯代尔：劳伦斯

e

Erlbaum Associates。Schoenfeld, A. & Herman., D. (1982). 专家和新手问题解决者的问题感知与知识结构。《实验心理学：学习、记忆与认知》8(5), 484-494。Schraw, G. (1998). 促进一般元认知意识。《教学科学》，26, 113–125。Seung. E., (2012). 物理教学助理学科教学知识发展的过程。《国际科学与数学教育杂志》，11, 1303。Shuell, T (1990) 将教与学视为问题解决，《理论与实践》，29, 102-108) Simon, H. (1974). 一个组块有多大？《科学》，183(4124), 482-488。Simon, H. & Simon, D. (1978). 解决物理问题的个体差异。载于 R. S. Siegler (编)，《儿童的思维：什么在发展？》（第 325–348 页）。Lawrence Erlbaum Associates, Inc. Singh, C. (2002). 物理直觉失效时。《美国物理学杂志》，70, 1103-1109。Singh, C. (2008a). 用同构问题评估学生在基础物理方面的专业能力，第一部分：在基础物理非直觉问题对上的表现。《物理学

.

《物理评论·科学与技术教育研究》，4，010104。Singh, C.（2008b）。使用同构问题评估学生在基础物理中的专业能力，第二部分：考察若干潜在因素对问题解决和迁移的影响。《物理评论·科学与技术教育研究》，4，010105。Singh, C.（2008c）。结合概念问题与定量问题以培养学生的专业能力。

e

在基础物理中。《美国物理联合会会议论文集》，1064，199-202，（2008）。Singh, C.（2009a）。问题分类，以评估并提高教师的熟练度……

d

学习者。《美国物理学杂志》，77(1) 73-80。Singh,C. (2009b)。问题解决与学习。《美国物理联合会会议论文集》，1140，183-197。Singh, C., & Zhu,G. (2009)。学习高等物理中的认知问题：一个来自量子力学的例子。《美国物理联合会会议论文集》，1179，63-66。Sweller,J. (1988)。问题解决过程中的认知负荷：对学习的影响。《认知科学》，12(2

),

257-285。Sweller, J.（2011年）。认知负荷理论。载于 J. Mestre 和 B. Ross（编），《学习与动机心理学》（第37-76页）。加利福尼亚州圣迭戈：Elsevier 学术出版社。

Sweller, J. 等（2019）。认知架构与教学设计：20年后。《教育心理学评论》，31，261-292。Tuminaro, J.，& Redish, E.（2007）。物理问题解决认知模型的要素：认识论游戏。《物理评论·科学与技术教育研究》，3，020101（2007）。图灵，A.（1950）机器能思考吗？《心灵》，第59卷，433–460。Van Heuvelen, A.（1991a）。概述：案例研究物理学。《美国物理学杂志》，59(10)，898-907。Van Heuvelen, A.（1991b）。学习像物理学家一样思考：基于研究的教学策略综述。《美国物理学杂志》，59(10)，891-897。Van Heuvelen, A.，& Zou, X.（2001）。功-能过程的多重表征。《美国物理学杂志》，69(2)，184-194。van Someren, M. W.，Reimann, P.，Boshuizen, H. P. A.，& de Jong, T.（1998）。《多重表征学习》。纽约州纽约市：爱思唯尔科学公司。维果茨基，L.（1978）。《社会中的心智：高级心理过程的发展》。马萨诸塞州剑桥市：哈佛大学出版社。Warnakulasooriya, R. 等（2007）。通过辅导完成基于网络的物理问题所需的时间。《实验行为分析杂志》，88，103-113。Wheeler, S.，& Petty, R.（2001）。刻板印象激活对行为的影响：可能机制综述。《心理学通报》，127，797。Whitcomb, K. 等（2021）。提高测量在线教学对学生迁移物理问题求解技能能力影响的准确性。《物理评论·科学与技术教育研究》，17，010112。Wiggins, G.，& McTighe, J.（2005）。《理解为设计》，第2版。（课程发展与督导协会 ASCD，弗吉尼亚州亚历山德里亚）。Wood, D.，布鲁纳，J.，& Ross, G.（1976）。辅导在问题解决中的作用。《儿童心理学、精神病学及相关学科杂志》，17(2)，89–100。Yeager, D.，& Dweck, C.（2012）。促进韧性的思维模式：当学生相信个人特征能够得到发展时。《教育心理学》，47，302（2012）。Yeager, D.，& Walton, G.（2011）。教育中的社会心理干预：并非魔法。《教育研究评论》，81(2)，267–301。Yerushalmi, E. 等（2007）。物理学教师关于问题解决教与学的信念与价值观。I. 绘制共同核心。《物理评论·科学与技术教育研究》，3，020109。Yerushalmi, E. 等（2012a）。当学生被要求诊断错误时，他们会怎么做？这对他们有帮助吗？I. 非典型测验情境。《物理评论·科学与技术教育研究》，8，020109（2012）。Yerushalmi, E. 等（2012b）。当学生被要求诊断错误时，他们会怎么做？这对他们有帮助吗？II. 更典型的测验情境。《物理评论·科学与技术教育研究》，8，020110（2012）。Yerushalmi, E. 等（2010）。教师在基于微积分的基础物理课程中选择问题特征的原因。《物理评论·科学与技术教育研究》，6，020108。Zhang, J.，& Norman, D.（1994）。分布式认知任务中的表征。《认知科学》，18(1)，87-122。

Zhang, J.（1997年）。问题解决中的外部表征的本质。《认知科学》，21，179- 217。