·教材与教法·

类比推理的思维机制及其在物理教学中的应用

陈志豪[1] 宋昕昊[2] 姚建欣[1]
(1. 北京师范大学物理学系,北京 100875; 2. 北京师范大学教育学部,北京 100875)

摘 要: 类比推理是在科学研究和物理教学中均具重要地位的科学思维方法.对类比推理的相关研究进行综述,明确类比推理的主要成分、内在机制及常用策略,并以此为基础分析学生进行类比推理时的思维机制.结合对普通高中物理教科书中的类比推理内容进行分析发现,在高中阶段类比推理多用于电磁学领域,且教科书中使用项目优先策略略多于结构匹配策略.以库仑定律为例详细阐述了类比推理在物理教学中的应用过程,并为教科书的修订及一线教师的教学提出了建议.

关键词: 科学思维;科学推理;类比推理;物理教育

类比推理是在科学研究和物理教学中均具重要地位的科学思维方法.在科学研究中,类比推理是科学研究中发现新事物、解决研究瓶颈的常用手段.在物理教学中,类比推理能帮助学生利用熟悉的事物认识不熟悉的事物,是学生学习和理解复杂抽象概念的有效途径.然而,类比推理组成成分与内在机制较为复杂,且类比推理不是严格的逻辑推理,不恰当的应用易使学生落入误区.因此,本文对类比推理的理论机制进行综述,分析教科书中蕴含类比推理的内容,并为类比推理在物理教学中的应用提供具体案例和建议.

1 理论基础

类比推理是从较为熟悉的对象(一般称为源)的已知属性推出另一相似对象(一般称为靶)也具有这种属性的过程.[1]包含相对完整的核心要素与应用恰当的操作策略是成功进行类比推理的关键.

1.1 类比推理的核心要素

很多学者都探讨了类比推理的核心要素.早期的研究中,Sternberg 认为类比推理由编码、推理、映射、应用和反应组成.编码指的是建立源和靶的表征;推理是推出源及其属性间的关系;映射是建立源和靶之间的联系;应用是将推理所得的关系代入靶上;反应是回答靶的属性.Sternberg 通过 A:B::C:D 式类比任务(根据 A 与 B 的关系,由 C 推断出缺失的 D)证实了映射在类比推理中的必要性.[2] Gick 和 Holyoak 在 A:B::C:D 式类比的基础上增添了情境,设计了问题解决类比任务,即给予被试一个或多个包含问题及解决方案的故事后,要求被试解决一个具有类似解决方案的新问题.[3] Holyoak 等的后续研究提出,检索、映射和学习是问题解决类比的 3 种成分.[4]对靶进行编码可以为检索提供线索,因此编码是检索中不可或缺的一部分.此外,成功的映射并不代表将源的属性完全照搬到靶上,需要一个迁移过程调整源的部分属性,使其适用于靶.他们通过数学问题解决的类比任务,证实了迁移是区别于映射的独立成分,将类比的成分扩充至 4 种.通过问题解决类比任务,Gick 和 Holyoak 还提出了类比推理的新成分——图式.图式通过抽象多个相似问题的解决方案所得,能用于解决类似的问题.

我国学者也对类比推理的要素和机制进行过系统探讨.田世昆和胡卫平将类比推理分成了 5 个要素:(1) 确定本象;(2) 寻找类象;(3) 将本象与类象进行比较,找出其相似关系;(4) 根据本象的已知信息,对相似关系进行重整化处理;(5) 将类象的有关知识类推到本象(图 1).[5]其中,类象和本象即源和靶.对相似关系的重整化处

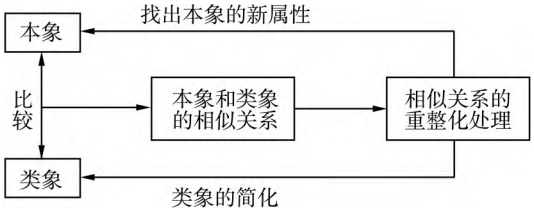


图 1 类比推理的动态结构简图

基金项目: 本文系北京市教育科学“十四五”规划课题“学习进阶视角下的学生科学思维发展研究”(项目编号: BECA21112)研究成果.

通信作者: 姚建欣(1989—),男,山东济南人,北京师范大学物理学系副教授,博士,研究方向为物理教育研究,电子信箱: yaojianxin@bnu.edu.cn.

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

理是指为了使类象的知识能够适用于本象，从类象和本象之间的若干相似关系中选择合适的关系进行类比推理.国内外学者提出的类比推理要素异曲同工.寻找类象即检索，寻找类象和本象的相似关系即映射，将类象的知识推到本象与迁移类似.

通过归纳以往的研究，Holyoak 指出，类比推理是检索较为熟悉的对象（源）的已知属性，映射迁移以得出另一相似对象（靶）属性的过程（图 2）.检索是根据靶的属性寻找合适的源.映射是对齐源和靶的各属性，建立起源和靶之间的联系.结构良好的映射需在满足结构连续（源和靶需形成平行结构和对应关系）的基础上，以要素间的关系为中心系统匹配形成属性体系.[6] 迁移是在映射的基础上将源的属性移到靶上，推论是通过选择和调整这些属性，得出靶具有的属性.在进行类比推理时，需将具体的类比物间的关系抽象成图式，这将有助于类比迁移和个体类比推理能力的发展.

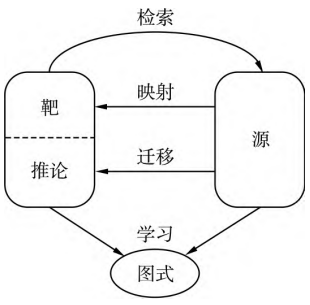
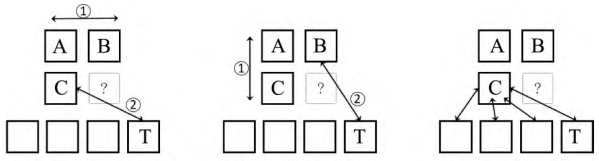


图 2　类比推理的主要组成部分

以卢瑟福原子模型与太阳系的类比为例.检索是根据卢瑟福原子模型的特点，寻找适合用作类比的源，即太阳系；映射是找出原子模型与太阳系一一对应的相似之处，例如电子与原子核对应诸行星与太阳，电子质量远小于原子核对应行星质量远小于太阳等；迁移是将太阳系具有的属性，例如行星绕太阳公转、行星与太阳之间的相互作用力服从万有引力定律等迁移到原子模型上，从而得出原子也具有类似属性的推论，即电子绕原子核转动、电子与原子核之间的相互作用力服从平方反比律（库仑定律）等；最后，将这两个模型与其属性间的关系抽象成图式，即小球绕大球公转以及它们之间服从平方反比律等关系抽象成图式，将有助于学生日后进行类似的类比推理，增强学生的类比推理能力.

1.2　类比推理的操作策略

当前对类比推理的操作策略研究中，眼动技术是核心技术手段.Vendetti 等利用眼动技术，通过 A∶B∷C∶D 式类比任务提出了项目优先策略、结构匹配策略和语义限制策略 3 种类比推理的策略（图 3）.[7] 项目优先策略即在 A∶B∷C∶D 式类比任务中，将优先确定的 A 与 B 的关系迁移至 C 和候选项中以寻找与 C 相匹配的 D，即在任务解决中先关注 AB，后关注 CD；结构匹配策略则以 A 与 C 之间的映射作为确立 B 和候选项之间关系的依据，呈现出一种先 AC 后 BD 的任务解决模式；使用语义限制策略的被试首先关注 C 和候选项，随后关注点在各选项间转换.Starr 等在研究[8] 中发现：成人最常使用的是项目优先策略；儿童则倾向使用语义限制策略.研究同时表明项目优先策略在问题解决过程中更有效，语义限制策略是不成熟的类比推理策略.



(a) 项目优先策略　(b) 结构匹配策略　(c)语义限制策略

图 3　3 种类比推理策略

1.3　类比推理的内在机制

类比推理作为一种高阶思维形式，其内在机制较为复杂.Holyoak 和 Thagard 提出多重限制理论，指出类比推理的发生需满足相似性限制、结构性限制和目的性限制等多种限制.其中，相似性限制是指源和靶所具有的属性的直接相似；结构性限制是指源和靶的各属性要建立起连续的、一对一的对应，与结构映射理论中的结构连续性类似；目的性限制指的是类比推理使用者的目标要与类比推理的目的建立起联系.[1] Gentner 和 Markman 提出的高水平知觉理论，强调结构映射理论中的结构连续性，并将人的知觉分高、低两种水平，在类比推理中，低水平知觉负责建立源和靶的表征，而高水平知觉则负责处理两个表征的结构连续性，即形成平行及一对一的对应关系，进而产生最后的类比.[9] 上述内在机制能够解释类比推理的发生过程，为在课堂教学中设置类比推理环节奠定了理论基础.

2　学生的类比推理

学生在进行类比推理时，尽量系统地考虑源、靶、检索、映射、迁移、推论、图式等要素，有助于其类比推理的完成.但对于学生而言，系统地考虑上述 7 个成分十分困难.对于学生的类比推理开展的实证研究发现：学生在靶领域的先验知识将影响学生对类比的理解和类比推理的效果.例如 Vosniadou 和 Skopeliti 通过让三年级、五年级、六年级和大学生分别阅读含类比和不含类比的科学文本，得出学

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

生的先验知识是类比理解的重要预测因素，且类比理解和先验知识与学生科学解释的进步呈正相关.[10]学生对源领域的了解同样重要，Braasch 和 Goldman 的研究表明，对源领域更熟悉的学生在阅读类比文本时出现误解的可能性更小.[11]

概况而言，学生进行类比推理时经常遇到以下困难：(1) 由于知识和经验的不足，学生较难独立地通过检索找到合适的源.(2) 由于映射过程依赖工作记忆，[12]当源的关系复杂程度超出学生的工作记忆时，映射会难以进行.(3) 学生容易忽略源和靶的不同之处，在迁移过程中误认为源与靶的属性完全一致.(4) 学生在抽象图式时往往只能注意到类比物之间的表面特征相似，而忽略其关系相似.

3 教学内容分析

现行高中物理课程中哪些内容是培养学生类比推理能力的典型载体？为回应此问题，本文以 M 出版社 2019 年版普通高中物理教科书为例，梳理与分析必修与选择性必修 6 册教材中的类比推理相关内容.

本文对于教科书中类比推理内容的遴选标准是：用学生已学过的知识或较熟悉的事物作为源进行类比，以帮助学生更容易掌握新物理知识(靶)的内容.例如教科书必修第 3 册中第 33 页使用等高线类比等势面，等高线是学生已经学过的地理知识，而等势面则是相似的新物理知识，两者类比可以帮助学生理解等势面.即使等高线不属于物理概念，但该类比能帮助学生掌握等势面这一物理概念，因此等高线与等势面的类比仍被本文界定为类比推理内容.教科书对类比推理的应用共计 17 处，如表 1 所示.

表 1 M 版高中物理教科书类比推理内容分析

	所处章节	源	靶	类比推理策略
必修第 1 册	第 1 章 运动的描述 第 4 节 速度变化快慢的描述——加速度	速度	加速度	项目优先策略
	学生实验	天线	激光干涉仪	结构匹配策略
必修第 2 册	第 5 章 抛体运动 第 4 节 抛体运动的规律	研究直线运动的思路	研究平抛运动的思路	项目优先策略
	第 6 章 圆周运动 第 3 节 向心加速度	直线运动中得到加速度的方法	匀速圆周运动得到加速度的方法	项目优先策略
	第 7 章 万有引力与宇宙航行 第 5 节 相对论时空观与牛顿力学的局限性	长河与房间	时间与空间	结构匹配策略
必修第 3 册	第 9 章 静电场及其应用 第 2 节 库仑定律	万有引力定律	库仑定律	结构匹配策略
	第 9 章 静电场及其应用 第 2 节 库仑定律	质点	点电荷	结构匹配策略
	第 10 章 静电场中的能量 第 1 节 电势能和电势	重力势能	电势能	结构匹配策略
	第 10 章 静电场中的能量 第 2 节 电势差	等高线	等势面	项目优先策略
	第 10 章 静电场中的能量 第 2 节 电势差	位置的高低	电势的高低	结构匹配策略
	第 10 章 静电场中的能量 第 5 节 带电粒子在电场中的运动	平抛运动	带电粒子在电场中的偏转运动	结构匹配策略
	第 11 章 电路及其应用 第 3 节 实验：导体电阻率的测量	盘山公路	螺旋测微器	项目优先策略

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

续表

	所处章节	源	靶	类比推理策略
必修第 3 册	第 13 章 电磁感应与电磁波初步 第 1 节 磁场 磁感线	电场线	磁感线	项目优先策略
	第 13 章 电磁感应与电磁波初步 第 2 节 磁感应强度 磁通量	电场强度	磁感应强度	项目优先策略
	第 13 章 电磁感应与电磁波初步 第 4 节 电磁波的发现及应用	水波	电磁波	项目优先策略
选择性必修第 3 册	第 1 章 分子动理论 第 4 节 分子动能和分子势能	重力势能	分子势能	项目优先策略
	第 2 章 气体、固体和液体 第 1 节 温度和温标	力学的状态参量	热学的状态参量	项目优先策略

从类比推理的领域分布看，教科书中的类比推理主要集中在电磁学领域.电磁学领域中的物理概念较为抽象，学生难以通过生活经验或实验获得足够的直观感知，类比推理能降低学生对新物理概念的认知难度.此外，电和磁之间具有对称性.学生在学习磁场时用电场进行类比，不仅能使学生更易于掌握磁场中的物理概念，还有助于使其认识到电和磁的本质关联.[13]

从类比推理的策略看，教科书中出现的 17 处类比推理中，10 处使用项目优先策略，7 处使用结构匹配策略.项目优先策略多用于通过学过的知识类比新知识，而结构匹配策略则多用于通过生活中熟悉的事物进行类比.项目优先策略需先明确源的属性，在使用学生已学知识类比新知识时，明确源属性的过程能帮助学生回顾以前学过的知识，因此项目优先策略适用于以学生的先验知识作为源的类比推理.结构匹配策略直接寻找源与靶的联系，适用于学生较熟悉的源.物理课堂教学中类比推理策略的选择应取决于学生对源的熟悉程度.

4 应用案例

物理学是高度对称的科学，大多物理概念和规律之间具有一定的相似性，适合使用类比推理进行教学.本文以库仑定律为例，示范类比推理在物理教育中的应用过程.

学习库仑定律时处于静电场学习的起始阶段，由于不具备完善的静电场逻辑体系，也不太了解静电场领域解决问题的方法，学生对库仑定律的学习容易产生困难.万有引力定律与库仑定律的相似性为学生搭建了一座由力学通往电磁学的桥梁.教科书不仅在正文中将万有引力定律和库仑定律进行了类比，还在补充内容中说明了类比推理在发现新规律上的重要作用以及类比推理的局限性.

教学过程中对源和靶映射的建立需将行星和电子运动的特征放在同一水平线上，形成平行结构及一一对应关系(表 2).随后，引导学生在映射的基础上，完成由行星运动的特征向电子运动特征的迁移，得到电子运动的完整特征.使用万有引力定律类比库仑定律的过程有几点注意事项：其一，万有引力定律与库仑定律属于物理学不同领域，在进行库仑定律的教学时，应先帮助学生进行检索，使学生联想到能用运动学中的行星绕太阳运动类比电磁学中的电子绕原子核运动.其二，库仑定律与万有引力定律学习时间间隔较长，需对万有引力定律的相关内容进行复习回顾.其三，将万有引力定律迁移到电子运动的过程需作出一定的修改.由于迁移过程中，质点被调整为点电荷，因此需使用电荷量替换质量，用静电常数 k 替换引力常数 G.要正确地进行迁移，需引导学生意识到质点模型和点电荷模型的本质.其四，库仑定律属于实验定律，且类比推理并不属于严格的逻辑推理，需使学生意识到类比得出的库仑定律需进行实验检验.

表 2 行星与电子运动的特征对应

	绕太阳运动的行星	绕原子核运动的电子
抽象模型	质点	点电荷
相互作用力	万有引力	库仑力
相互作用规律	与两物体质量乘积成正比，与距离的平方成反比	
表达式	$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$	

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

5 讨论与建议

类比推理是学习新概念和规律的一种有效手段.类比推理作为一种高阶思维活动,其组成成分与内在机制较为复杂,且由于类比推理并不属于严格的逻辑推理,不恰当地使用容易导致学生迷思概念的产生.[14]因此,建议进行类比推理教学和教科书修订时考虑以下方面.

(1) 了解类比推理思维机制.

教师需多了解类比推理的思维机制,为类比推理的组成要素中学生缺少或不熟练的部分提供支架,帮助学生掌握类比推理的一般方法.例如,学生刚接触类比推理时并不能检索到合适的源,教师可以直接为学生提供源,或者提供一些额外的线索帮学生寻找合适的源.

(2) 由源选择恰当类比推理策略.

应根据学生对源的熟悉程度选用不同的类比推理策略.先说明源属性的项目优先策略多用于由旧知识向新知识进行类比,而直接联系源于靶的结构匹配策略则多用于由生活经验向新知识进行类比.类比推理策略的选择不仅决定了学生能否完成类比推理,而且对学生类比推理得到结果的正误有深刻影响.

(3) 结合学生学情选择合适的源.

源的选择是学生进行类比推理的重要一环.教科书中具有一定的类比推理内容,能为教师提供参考.但能使用类比推理进行教学的内容远不止教科书中呈现的 17 处.教师在进行额外的类比推理教学时,应结合学生的实际情况,在学生熟悉的事物中合理地选择源进行类比推理.一个合适的源不仅能反映出物理概念的本质,使物理教学顺利进行,还能引发学生的学习兴趣.教师应注意,相似性不是选择源的唯一依据,仅追求表面相似性容易造成学生的误解,导致结果适得其反.

(4) 强化教科书中类比推理系统性.

现行的教科书中存在较多使用类比推理引入新物理概念或规律的内容.这些内容能够有效地帮助学生基于源的属性进行推理,从而使学生建立对靶的认识.但在物理学习过程中,元认知与认知同样重要.将类比推理作为一种科学推理显化地提供给学生,不仅能够规范学生类比推理的操作步骤,还能培养学生的科学思维.笔者建议教科书将类比推理内容进行梯度设计,以系统化地呈现类比推理内容.在早期使用时,介绍类比推理的基本过程,搭建脚手架一步步指导学生进行类比推理.随着学生进行类比推理的次数不断增多,逐渐撤去对学生的辅助,直到学生能独立完成类比推理,并在此过程中渗透对类比推理局限性的反思.

参考文献:

1 Holyoak K J, Morrison R G. The Oxford handbook of thinking and reasoning[M]. New York: Oxford University Press, 2012.
2 Sternberg R J. Component processes in analogical reasoning[J]. Psychological Review, 1977, 84(4), 353－378.
3 Gick M L, Holyoak K J. Analogical problem solving [J]. Cognitive Psychology, 1980, 12(3), 306－355.
4 Novick L R, Holyoak K J. Mathematical problem solving by analogy [J]. Journal of Experimental Psychology. Learning, Memory, and Cognition, 1991, 17(3), 398－415.
5 田世昆,胡卫平. 物理思维论[M]. 南宁:广西教育出版社, 1996.
6 Gentner D, Holyoak K J, Kokinov B N. The analogical mind: Perspectives from cognitive science[C]. Cambridge, Mass: MIT Press, 2001.
7 Vendetti M S, Starr A, Johnson E L, et al. Eye movements reveal optimal strategies for analogical reasoning [J]. Frontiers in Psychology, 2017(8):1－9.
8 Starr A, Vendetti M S, Bunge S A. Eye movements provide insight into individual differences in children's analogical reasoning strategies[J]. Acta Psychologica, 2018(186): 18－26.
9 Gentner D, Markman A B. Structure mapping in analogy and similarity [J]. American Psychologist, 1997, 52(1): 45－56.
10 Vosniadou S, Skopeliti I. Evaluating the effects of analogy enriched text on the learning of science: The importance of learning indexes[J]. Journal of Research in Science Teaching, 2019, 56(6): 732－764.
11 Braasch J L G, Goldman S R. The role of prior knowledge in learning from analogies in science texts [J]. Discourse Processes, 2010, 47(6): 447－479.
12 Waltz J A, Lau A, Grewal S K, et al. The role of working memory in analogical mapping[J]. Memory & Cognition, 2000, 28(7): 1205－1212.
13 田成良,李凯波.类比迁移建概念 相互关联成观念——以"磁感应强度"教学为例[J].物理教师,2018,39(10):31－33.
14 杨华军,史献计.物理教学的类比思维策略[J].物理教师,2020,41(8):19－21.

(收稿日期: 2023－12－03)

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net