基于心智模型研究的高中生物理深度学习评价*

——以静电场为例

张　玲　　黄致新

（华中师范大学物理科学与技术学院　湖北 武汉　430079）

肖潇雨

（华中师范大学物理科学与技术学院　湖北 武汉　430079；

重庆市八中宏帆初级中学　重庆　400030）

（收稿日期：2020－12－15）

摘　要：心智模型能体现学生的认知结构. 为了把握学生在教学过程中的认知发展进而反馈指导教学活动，文章对 W 市 3 所中学学生以问卷与访谈相结合的调查方式统计分析了高中生学习静电场时存在的心智模型，并采用 SOLO 分类理论，对心智模型的深度学习层次进行了评价. 结果表明：学生通过现有的认知结构来发展科学的静电场心智模型存在困难，并且在概念接收、模型构建的过程中会因为主体差异而造成各种心智模型的出现；而相比于 SOLO 分类方法，不同心智模型对应的深度学习等级的高低用传统赋分法评价有其局限性.

关键词：静电场　心智模型　认知结构　深度学习　评价

近年来，基于模型的探究式教学正在成为科学教学的一种新范式，其中，心智模型作为重要的理论框架得到广泛关注[1]. 2012 年，美国明确将心智模型写入课程文件，用于指导修订新一轮科学课程标准[2]. 目前国内教育研究领域对中学生心智模型的研究整体较少，尤其物理学科，因此，有必要开展相应的研究工作.

然而，心智模型有着内隐的认知结构特质，这使得人们只能通过学习者的外在表现间接推知其心智模型发展情况. 这种特质和 SOLO 分类理论的评价体系是相联系的：SOLO 分类理论最初由比格斯（J. B. Biggs）在皮亚杰发展阶段理论的基础上提出. 该理论指出，一个人的总体认知结构是不可测的，而当一个人回答某个问题时所表现出来的结构却是可测的[3]，在此理论基础上，按照 T. W. Smith 的建议[4]，将 5 个 SOLO 层次划分为浅层学习和深度学习两种水平，前结构、单点结构、多点结构与浅层学习对应，关联结构和抽象扩展结构则与深度学习对应. 由此，我们可以根据学生在某个具体问题所表现出来的结构所具有的一致性来对心智模型做等级划分，建立学生心智模型与 SOLO 分类层次的联系，进而开展促进学生深度学习的研究，探索科学教育的新范式，实现高效教学.

本研究以静电场为例，具体关注：学生有关静电场的学习中构建了哪些心智模型？如何使用 SOLO 分类理论评价其科学化程度？静电场心智模型的构建结果反映了学生怎样的学习困难与教学问题？

1　静电场知识的心智模型调查

1.1　研究对象

研究对象为 W 市 A 中学、B 中学和 C 中学 383 位高二、高三年级学生. 为了样本更具代表，进行抽样的 3 所学校层次各异.

1.2　研究方法

本研究参考了目前广泛应用的电磁学概念测试卷 CSEM 和 BEMA，编制并使用高中生电学静电场概念调查问卷以深入探查高中生有关静电场部分物理学习的心智模型. 结合个案访谈，采用质性和量化结合的研究方法进行心智模型调查研究.

问卷将静电场的测试内容划分为电荷、电场、电场力、静电平衡、电势差 5 个维度，在量表改进过程中根据专家与高级物理教师的建议对问卷进行修订，

* 华中师范大学社科项目“中学生物理学习能力提升机制及相关教学资源开发研究”资助，项目编号：20202198092

最终确定题目由 13 道选择题组成，其克伦巴赫系数为 0.790，具有较高信度.

2　心智模型调查结果

学生心智模型从类别上可划分为科学心智模型和非科学心智模型. 科学心智模型即专家把科学概念按照普适化的规则转化为外界存在的概念模型，对高中物理来说就是课堂中及课本上所阐述的物理概念、物理推理等. 与之相对的则是非科学心智模型. 根据问卷作答结果，静电场知识的心智模型如表 1 所示，其中非科学的心智模型用“”表示区别.

值得一提的是，学生有时错选并不是因为选择了非科学心智模型，而是由于不当应用科学心智模型，这在下文被称作“不完备的心智模型”.

表 1　学生静电场知识的心智模型调查结果

概念	心智模型	具体内容
电荷	电荷守恒模型	电荷既不能被创造，也不能被消灭，只能从一个物体转移到另一个物体
	“抽象介质”模型	将介质视作解题时一种导电、不导电的条件限制
	绝缘体模型	绝缘体分子中可以自由移动的带电粒子极少，可以忽略在外电场作用下自由电荷移动所形成的宏观电流
	导体模型	与绝缘体相对比，金属对带电粒子束缚作用小而允许其运动
电场力	作用力与反作用力模型	运用牛顿第三定律判断出两个静止点电荷组成系统中另一个电荷所受电场力的大小、方向
	电场—电场力模型	有电场才有电场力，根据电场强度定义式 $E=\frac{F}{q}$ 判断电场、电场力的方向
电场	电场叠加模型	对不同的点电荷电场矢量叠加
	“电荷量几何叠加”模型	忽略电场的矢量性，把系统内电荷量几何叠加后的“净电荷量”作为电场的“新场源”
	“电场自作用”模型	没能区别场点、源点，认为场源电荷自己也在合电场中受力
	电场(线)有源模型	根据电场线判断电场的性质，认为有电场必有净电荷；或根据电场线判断场源电荷的性质，认为电场强度越大则电荷密度越大、距离场源越近
静电平衡	静电平衡模型	运用静电平衡的导体特征的推论判断导体电场、电荷分布等
	电场动态叠加模型	运用电场强度叠加原理对导体内部电势、电荷分布特点等进行动态分析
电势差	“电势差绝对值”模型	明确电势差是标量，大小由公式 $U=Ed$ 确定；但忽略电势差的正负区别，直接由公式得到电势差的绝对值大小
	“距离”模型	以几何距离远近判断电势高低；对匀强电场，用两点在电场线方向的直线距离乘以电场强度计算两点间电势差

3　基于心智模型的深度学习评价

3.1　心智模型的分析过程

以考查静电平衡概念的题为例，介绍分析过程.（注：例 1 和例 2 选项相同）

【例 1】空心金属球为电中性（无多余电荷）突然将少量负电荷放置在该金属球上 P 点处. 如果在几秒钟后查看这些多余负电荷，下列情况中可能发生的一项是（　　）

【例 2】绝缘空心球为电中性（无多余电荷）突然将少量负电荷放置在该空心球上 P 点处. 如果在几秒钟后查看这些多余负电荷，下列情况中可能发生的一项是（　　）

A. 所有的多余电荷仍分布在 P 点附近

B. 多余的电荷已均匀分布在球体的外表面上

C. 多余的电荷已均匀分布在球体内、外表面上

D. 大部分电荷仍在点 P 处，但剩余的多余电荷会扩散到球体上

E. 这些多余的电荷已不存在

依据学生问卷调查的答案选项，结合访谈得出学生的心智模型，如表 2 和表 3 所示.

表 2　例 1 心智模型

题目选项	心智模型	占百分比/%
B	静电平衡模型/导体模型＋电场动态叠加模型	62.1
C	电场动态叠加模型 /不完备的静电平衡模型	18.3
D	抽象介质模型	11.4
其他	不完备电荷守恒模型	8.2

表 3　例 2 心智模型

题目选项	心智模型	占百分比/%
A	作用力与反作用力模型＋绝缘体模型 /抽象介质模型	41.9
B	抽象介质模型＋静电平衡模型	18.9
C	电场动态叠加模型 /不完备的静电平衡模型	17.4
其他	抽象介质模型＋不完备的电荷守恒模型	21.8

例 1 和例 2 作为“姊妹”题考查学生对静电平衡和导体、绝缘体的知识理解.

由表 2 和表 3 可知，不同学生选择相同的选项可能会构建出不同的心智模型. 对选择例 1 中选项 C 的学生访谈，发现其思维过程：电荷放在导体上→引用静电平衡电荷均匀分布结论→电荷在内外表面均可分布，显示了对静电平衡模型的不完备使用，类似的还有例 2 的选项 C；对例 2 中选项 B，访谈发现学生的思维则是：电荷放在绝缘体上→静电平衡电荷均匀分布结论，完全忽略介质导体/绝缘体的影响. 与此相反，部分学生显示出独立构建静电平衡模型的能力，采用了电场动态叠加模型：电荷放在导体上→电场叠加→电荷受电场力作用，然而，由于对导体模型的认识差异，带来解决例 1 时，选择正确选项 B 和错误选项 C 的区别. 例 1 和例 2 考查的另外一个重点是导体和绝缘体的区别. 一些学生意识到多余电荷之间的作用力与反作用力会导致其相互分离，却不知道电荷在介质中如何运动，或者忽略了介质的影响，或者使用了不完备的导体、绝缘体模型，从而选择两题中的选项 A 和选项 D. 最后指出，还有很少的学生概念模糊，无法正确使用电荷守恒模型.

3.2　心智模型的评价设计

笔者试图将学生在解决问题过程中的思维结构进行可视化表征，通过学生对具体问题的假设解释来探究其认知结构水平. 具体方法是采用 SOLO 分类理论评价心智模型，并根据 T. W. Smith 的建议，分析本文研究对象的深度学习等级.

在 SOLO 分类理论的评价方法中，需结合题目线索和学生思维进行分析和编码. 参考《普通高中物理课程标准(2017 年版)》，把静电场的知识点进行汇总，作为 SOLO 分类理论的核心关联结构对象. 考虑到某些知识点是更基础知识点推导出来的二级结论，用 Z_{fi} 表示涉及的基本知识点，其中 f 代表基础(fundamental)，Z_{di} 表示已经关联过的结论性的知识点，其中 d 代表推论(deduction)；而将题目的相关条件作为辅助关联结构对象，其中显性条件用 X_i 表示，而题目未给出的相关条件或假设(隐性条件)用 Y_i 表示；用“→”表示对象之间的关联，具体的关联素材编码如表 4 所示.

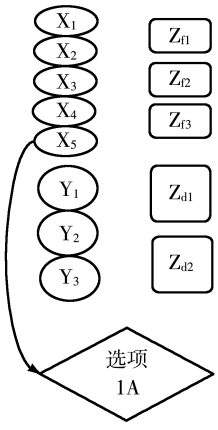
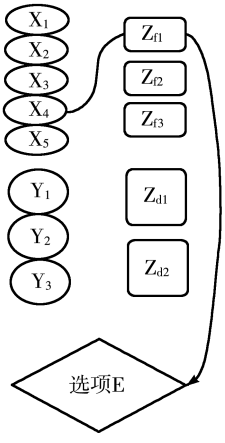
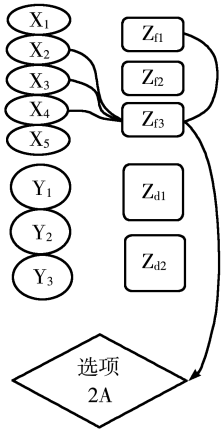
表 4　SOLO 分类对象的素材编码

符号	素材
X_1	空心金属球
X_2	空心绝缘球
X_3	电中性
X_4	少量负电荷
X_5	几秒之后观察
Y_1	点电荷
Y_2	球有内外表面
Y_3	球对称性
Z_{f1}	电荷守恒定律
Z_{f2}	库仑定律
Z_{f3}	电场与电场力
Z_{d1}	静电平衡
Z_{d2}	介质导电性

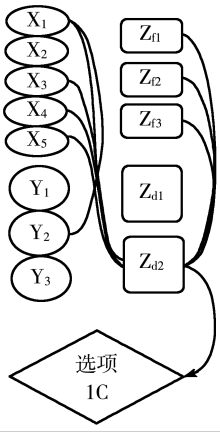
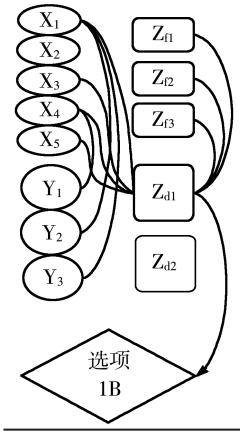
根据不同对象间的关联程度，划分学生部分心智模型的思维结构层次如表 5 所示. 在前结构层次上，学生不能将素材对象 X_i 与调用对象 Z_i(代指 Z_{fi} 和 Z_{di})、Y_i 建立联系或者建立了错误联系. 单点结构只是将 X_i 与 Z_i 单一联系. 多点结构则将 X_i 与 Z_i

多点机械式联系. 关联结构则是把 X_i 和 Z_i 复合联系在一起进而形成一个概念体系. 而抽象拓展结构层次则是把 X_i, Y_i, Z_i 复合联系起来并进一步综合其间关系.

表 5　SOLO 层次统计概况及心智模型划分

学习结构	SOLO 层次	学习水平	心智模型
	前结构	浅层学习	无模型
	单点结构	浅层学习	不完备的电荷守恒模型
	多点结构	浅层学习	抽象介质模型

续表 5

学习结构	SOLO 层次	学习水平	心智模型
	关联结构	深层学习	电场动态叠加模型
	抽象拓展结构	深层学习	静电平衡模型

从表 5 可以看出,随着调用对象的增多以及关联的复杂化,学生的 SOLO 层次也逐渐提高,实现了由浅层学习到深度学习的过渡. 从表中无模型到最终的静电平衡模型的图示,能直观知道学生采用某种心智模型时所对应的学习水平以及达到抽象扩展结构所欠缺的因素:调用对象和桥接方式,这些因素往往是教师不易察觉而对学生十分重要的.

3.3　评价结果及分析

沿用例 1 和例 2 的研究方法,针对静电场 13 道题目学生构建的心智模型进行可视化表征,统计了 SOLO 层次、学习水平和该题学生占比 3 个维度的研究数据. 考查非科学心智模型以探究影响学生科学化建模学习的因素,摘选其中 7 种的深度学习评价如表 6 所示.

表 6　非科学心智模型的深度学习评价

心智模型	SOLO 层次	学习水平	该题学生占比/%
“不完备的电荷守恒模型”	单点结构	浅层学习	3.5

续表 6

心智模型	SOLO 层次	学习水平	该题学生占比/%
“电势差绝对值模型”	单点结构	浅层学习	25.2
“电荷量几何叠加模型”	单点结构	浅层学习	4.6
“抽象介质模型”	多点结构	浅层学习	35.2
“电场自作用模型”	多点结构	浅层学习	3.4
“距离模型”	多点结构	浅层学习	24.5
“不完备的静电平衡模型”	关联结构	深层学习	11.2

分析发现：非科学心智模型基本都处于浅层学习水平，反应了静电场对于学生而言，在前结构基础上构建科学心智模型是困难的；同时，他们对应的 SOLO 层次处于单点结构和多点结构阶段，这意味着结构的不稳定性，当有新的认知冲突发生时，学生很容易又构建新的心智模型，难以保持一致性. 其中有 3 种心智模型占比突出值得关注，分别是“抽象介质模型”(35.4%)、“电势差绝对值模型”(25.2%)和“距离模型”(24.5%). 前者导致学生在分析静电平衡这种涉及电荷运动的题目时出现错误，往往不是因为没有掌握电场相关的知识，而是因为没有建立电荷在介质中运动的微观图像；后两者则显示了学生对静电场章节知识进行抽象综合时的能力不足，缺乏对“电场”的认识，容易将电势理解为两点间增加量，或是将距离与能量消耗的概念迁移进行非科学心智模型构建[5,6].

4　研究结论及建议

通过以上调查研究的结果分析，并结合我们在教学实践中的反馈信息和实践效果，得出以下结论和建议：

(1)大多数学生构建的心智模型处于浅层学习的水平，表明学生通过现有的认知结构来发展科学的静电场心智模型存在困难. 一方面电场、电势、介质等概念对于初学者而言是抽象、全新的，很难通过迁移、类比构建知识框架；另一方面，教师已经熟悉物理语言而容易忽视自己与学生认知水平的差异，难以把握重难点. 特别地，本文发现 3 种心智模型：“抽象介质模型”“电势差绝对值模型”和“距离模型”在静电场的教学中需要特别重视.

(2)不同层次的心智模型可以用来解决相同试题. 比如例 2 的正确答案选项 A，采用“作用力与反作用力模型＋绝缘体模型”是正确的解答方法，达到了 SOLO 分类关联结构的层次，属于深层学习等级；但是同样可以采用“抽象介质模型”把介质的绝缘体属性抽象为一种题目条件而不加以理解物理内涵，即“绝缘体中电荷不能移动”，也能得出正确答案，但后者只属于多点结构的浅层学习水平. 传统赋分法很难克服这种局限性，甚至带来教学活动中对学生学习层次的误判，而 SOLO 分类评价理论则能直观看到思维的结构层次，为我们提供了一个可行的改进方案.

(3)心智模型的构建是一个动态发展的过程，学生不会机械式被动地接收外界输送的信息，而是要经历一个认知偏差、主动矫正的过程. 在这个过程中，或者由于关键知识要素的丢失，或者由于矫正过程的学生偏好，或者由于模型重构时客观存在的多种可能，造成多样的心智模型的出现. 比如：“电荷量几何叠加模型”丢失了电场的矢量性；“抽象介质模型”选择将导体/绝缘体当作导电/不导电的题目条件进行简单处理；“电场自作用模型”认为点电荷激发的场也会对自身产生作用，这虽然不被场的观点排斥，但却不是真实的电磁场遵循的物理规律. 如何对学生的这种主动性加以引导以完成科学的模型构建，需要更进一步的研究.

在科学建模教学中，对学生的心智模型采用 SOLO 分类方法进行深度学习评价，分析模型建构过程的关键节点，从而进行反馈指导，实现高效教学，本文或许可以作为一个参考.

参 考 文 献

1　张静，郭玉英. 从模型进阶到思维发展：物理建模教学设计与实践[J]. 课程・教材・教法，2020，40(2)：113～118

2　Eric Brewe. Modeling theory applied: Modeling Instruction in introductory physics[J]. American Journal of Physics，2008，76(12)：1155～1160

3　J. B. 彼格斯，K. F. 科利斯. 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，2010. 24～32

4　Smith TW, Colby SA. Teaching for Deep Learning[J]. The Clearing House, 2007, 80(5): 205～211

5　肖潇雨，黄致新. 心智模型研究——国外物理教育研究领域的新亮点[J]. 物理通报，2020(1)：2～10

6　陈玉洁，黄致新，王琴. 面向深度学习的大学物理学习评价——以大一学生解决某一力学问题为例[J]. 大学物理，2020，39(3)：63～68