Advances in Education 教育进展, 2026, 16(11), 595-603
Published Online November 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/ae
https://doi.org/10.12677/ae.2026.16112420

Hans汉斯

基于过程挖掘的高中物理课堂形成性评价路径研究

——以“闭合电路的欧姆定律”为例

诸锐斌，周月煊

杭州师范大学物理学院，浙江 杭州

收稿日期：2026年10月4日；录用日期：2026年11月3日；发布日期：2026年11月10日

摘 要

为考察高中物理课堂形成性评价在连续教学中的展开方式，研究选取七节“闭合电路的欧姆定律”公开课，依据引出、回应、识别和利用四阶段框架及细分活动编码761个评价事件，划分77个评价片段，借助过程挖掘整理片段内的完整路径，并比较数据解释、猜想检验与公式推导任务中的评价安排。结果显示，引出与回应合计占事件总数的77.27%；在有后续事件的学生回应中，47.47%接再次引出，31.99%接利用证据。38个片段在利用证据后仍出现引出或回应，占49.35%。77个片段形成59种完整路径，其中47种仅出现一次；路径既有回答后利用和多轮取证后利用，也有利用后再次取证。三个课例中，教师追问分别指向数据间的数值关系、实验条件与方案，以及能量关系的数量表达。研究表明，课堂评价的接续随教学任务和学生回答而变化；教师可将学生观点外显、追问判断依据，并在适当节点使用已经取得的回答。

关键词

高中物理，形成性评价，过程挖掘，课堂评价路径，同课异构

Research on Formative Assessment Paths in High School Physics Classrooms Based on Process Mining

—A Case Study of “Ohm’s Law for a Complete Circuit”

Ruibin Zhu, Yuexuan Zhou

School of Physics, Hangzhou Normal University, Hangzhou Zhejiang

Received: October 4, 2026; accepted: November 3, 2026; published: November 10, 2026

文章引用: 诸锐斌, 周月煊. 基于过程挖掘的高中物理课堂形成性评价路径研究[J]. 教育进展, 2026, 16(11): 595-603.
DOI: 10.12677/ae.2026.16112420

Abstract

To investigate how formative assessment unfolds in continuous instruction in high school physics classrooms, this study selected seven open classes on "Ohm's Law for a Complete Circuit". This study examined the progression of formative assessment in high school physics classrooms. Based on a four-stage framework—eliciting, responding, recognizing, and using—along with its sub-activities, 761 assessment events were coded and divided into 77 assessment episodes. Process mining was employed to organize the complete pathways within each episode, and the assessment arrangements were compared across three task types: data interpretation, hypothesis testing, and formula derivation. The results showed that eliciting and responding together accounted for 77.27% of all events; Among responses with a subsequent event, 47.47% led to another elicitation and 31.99% to the use of evidence. In 38 episodes (49.35%), elicitation or responding occurred again after evidence had been used. The 77 episodes formed 59 complete pathways, of which 47 appeared only once; these pathways included use-after-answer, use-after-multiple-evidence-gathering, and re-gathering evidence after use. In the three lesson cases, teachers' follow-up questions targeted, respectively, the numerical relationships among data, experimental conditions and designs, and the quantitative expression of energy relationships. The study indicates that the continuation of classroom assessment varies with instructional tasks and student responses; teachers can make student ideas explicit, probe the grounds for judgments, and use already-obtained responses at appropriate junctures.

Keywords

High School Physics, Formative Assessment, Process Mining, Classroom Assessment Path, Heterogeneous Lesson Design for the Same Content

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

在物理课堂中，教师通过提问、实验和推导了解学生的想法，根据学生的回答、操作和解释判断其理解程度，并据此安排后续教学，这一过程是形成性评价研究关注的对象[1]。相关研究将评价行为分为引出、回应、识别和利用四个阶段[2]，国内研究也通过课堂案例分析非正式形成性评价的实施[3]。

序列分析能够呈现相邻行为之间的联系，一轮问答之后教学怎样继续，则需要按时间记录多次交流的先后顺序。过程挖掘以时间记录的事件日志为基础，可以还原活动的完整顺序。本文以七节"闭合电路的欧姆定律"公开课为案例，按四个阶段及细分活动编码评价事件，整理片段内的完整路径，考察学生回应之后的接续、反馈之后的再次取证，以及数据比较、猜想检验和公式推导三类任务中的评价过程，为课堂提问、反馈与教研提供参考。

2. 研究设计

2.1. 课例与资料

研究选取网络公开的七节"闭合电路的欧姆定律"省赛优质课录像作为分析对象。各课时长 40~45 min，教学均围绕闭合电路中的电压、电流和能量关系展开。本组课例的课题相同，教学内容可比，实验安排与推导方式的差别则提供了不同的评价情境。课例按 L01~L07 编号，教师和学校信息匿名处理，分

析资料包括录像转写材料和据此形成的编码结果。各课的时长与编码数量见表 1。

Table 1. Number of lesson case materials and evaluation codes
表 1. 课例资料与评价编码数量

课例	视频时长(分:秒)	评价事件数	评价片段数
L01	43:49	193	20
L02	42:38	136	8
L03	44:55	90	7
L04	42:20	106	11
L05	43:38	87	7
L06	40:01	98	13
L07	44:59	51	11
合计	—	761	77

2.2. 评价事件的划分与编码

课堂中的师生交流是连续的，教师的一次提问可能引出回答、追问和解释，这些行为前后相连，单独看任何一个都难以说明评价怎样进行。若要将七节课放在一起比较，需要先确定统一的记录单位。本研究以评价事件为基本单位，按行为在当前互动中的功能记录：教师为了解学生想法而提问或布置任务，记为引出证据(E)；学生通过回答、操作或书写提供信息，记为回应(S)；教师复述、澄清或展示学生观点，记为识别证据(R)；教师依据已有信息反馈、解释或安排检验，记为利用证据(U)。四个阶段的观察内容、细分活动与判定要点见表 2。

Table 2. Stages, activity types, and coding criteria of formative assessment
表 2. 形成性评价的阶段、细分活动与判定要点

阶段	观察内容	细分活动	判定要点
E 引出证据	教师提出问题或任务，了解学生想法，如要求说明电压变化、比较实验数据、解释能量关系	概念表述、概念应用、观察报告、预测假设、解释原因、数据解读、提供证据、证据关联、评价证据、比较观点、实验设计、低信息提问	按提问或任务要求学生处理的内容判定
S 学生回应	学生通过回答、操作或书写呈现信息，如报告测量结果、提出猜想、说明实验方案、列式推导	学生回应(记录口头、书写、操作等呈现方式)	按学生呈现学习信息的方式记录
R 识别证据	教师复述、澄清或外显学生观点，如重述电压和的判断、展示小组数据、将口头关系写成等式	简单复述、重述提升、澄清含义、比较观点、观点外显、识别分布	按教师处理学生观点的方式判定
U 利用证据	教师根据已有信息反馈或安排后续学习，如补充实验条件、组织猜想检验、根据回答解释能量转化	结果判定、改进反馈、促进建构、证据关联、组织论证、观点检验	按教师依据学生信息推进学习的方式判定

同一阶段的行为在内容上差别显著，如教师提问可能要求学生表述概念，也可能要求解读数据，仅凭 E、S、R、U 四个大阶段看不出学生处理的是什么内容。因此，每个阶段之下再按活动的具体内容细分：E 阶段记录教师要求学生处理的内容，例如概念表述、数据解读或实验设计；S 阶段记录学生以口头、书写或操作呈现的信息；R 阶段记录教师处理学生观点的方式，例如简单复述、重述提升或观点外显；U 阶段记录教师依据学生信息推进学习的方式，例如改进反馈、证据关联或组织论证。

研究涉及的评价事件的阶段划分依据 Ruiz-Primo 和 Furtak 的引出、回应、识别和利用(ESRU)框架[2]。E、R、U 阶段的细分活动则借鉴其 CRESST 报告中的教师策略分类[4]，并结合物理课堂的内容确定了中文名称和判定规则。以教师提问为例，辨别物理量属性与依据给定数据计算比值、比较变量关系涉及的内容不同，分别归入概念表述和数据解读。教师将实验结果与物理解释联系起来时，记为证据关联。

教师连续讲解、课堂管理以及没有真实回应机会的自问自答不包含学生的学习信息，不计入评价事件。多个事件合起来构成评价片段，围绕同一个问题或同一份数据连续展开的互动记为一个片段，教师转入新的学习任务时开始新的片段。

实际编码时，由一名编码者依据录像和转写划定 775 个候选事件，两名编码者独立完成编码。核对分歧后保留 761 个评价事件，划分为 77 个评价片段，两人的编码一致性为阶段编码的 Cohen's κ 为 0.893~1.000，细分行为编码的 κ 为 0.730~0.835。

2.3. 评价路径的整理与统计

已有研究以序列分析考察相邻行为之间的联系[5]，相邻行为统计难以说明一轮问答之后教学怎样继续。过程挖掘从时间记录的事件日志出发，可以还原活动的完整顺序[6] [7]。

按这一思路，本研究将片段内的事件按时间排列，得到一条由 E、S、R、U 组成的序列。例如，E-S-E-S-U 表示“教师引出证据，学生回应——教师再次引出并得到回应——教师利用这些信息组织教学”。整理序列时，相邻的同类事件合并为一个，教师连续提问、中间没有学生回应时，两次提问记为一个 E。学生回答之后教师再次提问则保留，表示评价进入了新一轮。合并后的序列就是该片段的完整路径。

统计以事件和片段为单位。事件计数用于比较七节课各阶段与各类活动的构成，并结合细分活动考察利用证据后的接续；完整路径用于比较片段内多轮交流的先后顺序。某一阶段之后各类行为的比例以该阶段具有后继事件的次数为分母，片段比例以 77 个片段为分母。正文选取三个片段说明评价在具体任务中的展开，选取时兼顾任务类型和片段内的多轮交流。

3. 课堂形成性评价的总体特征

3.1. 评价活动以提问和学生回应为主

七节课共记录引出证据 281 次、学生回应 307 次、识别证据 51 次、利用证据 122 次，分别占评价事件的 36.93%、40.34%、6.70%和 16.03%。学生的回应有口头回答，也有测量、记录和列式等学习活动；引出证据与学生回应合计占全部事件的 77.27%。各课的事件构成见图 1。

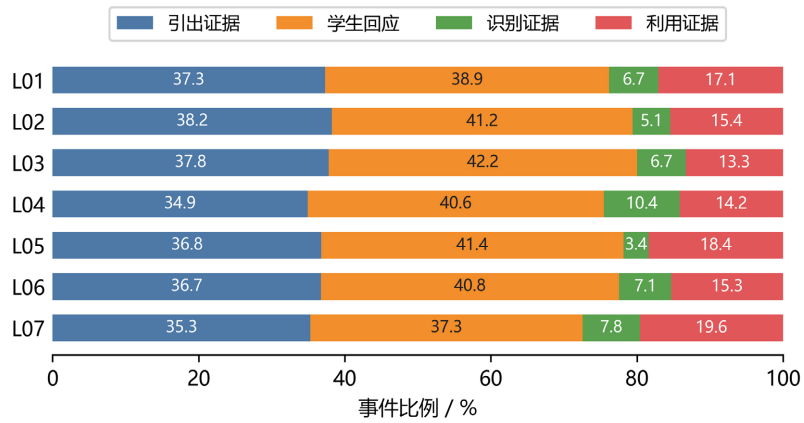
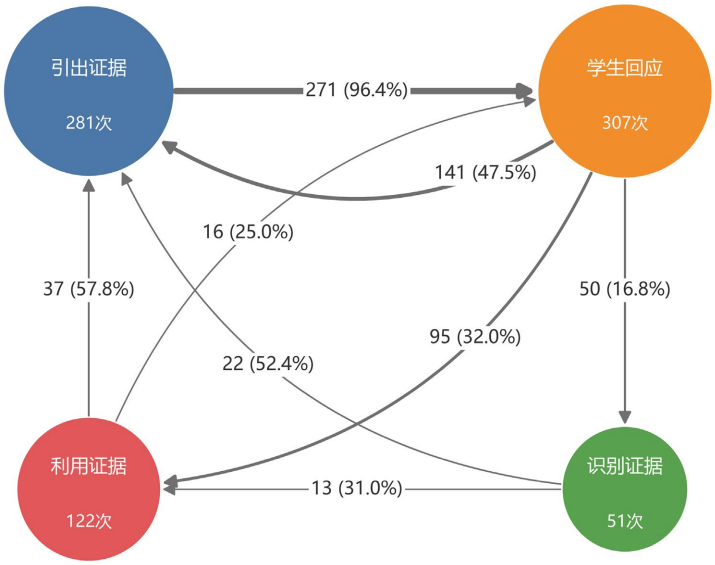


Figure 1. Composition of formative assessment events across seven lessons
图 1. 七节课形成性评价事件构成

四类事件中，提问和回应是为了拿到学生的学习信息，识别与利用则关系到这些信息会不会进入后续教学。后两者合计占 22.73%，其中识别证据的 51 次有 50 次紧接在学生回应之后，利用证据也多由回应引出。

3.2. 学生回应之后以继续提问为主

307 次学生回应中，297 次在所属片段内还有后续事件。教师再次引出证据 141 次，占 47.47%；进入证据利用 95 次，占 31.99%；识别学生观点 50 次，占 16.84%；相邻学生继续回应 11 次，占 3.70%。接续的问题多要求补充观察、比较数据或说明理由，识别与利用则表现为复述、展示学生观点或依据回答组织检验。七节课整体的阶段接续关系见图 2。



注：圆的大小对应各阶段的事件数，箭头宽度表示接续次数，标签为次数与来源阶段内的条件比例。

Figure 2. Transitions between assessment stages in the seven lessons
图 2. 七节课形成性评价阶段之间的接续关系

学生回应之后，教师再次引出证据，问题仍围绕本课的实验与推导任务。按表 2 的细分活动统计，引出证据中数据解读 77 次、观察报告 55 次、概念应用 48 次，其余为解释原因、实验设计、预测假设等类别。这些提问多将学生刚给出的回答当作新的起点，下一问的材料往往就是来自学生刚报出的读数、刚作出的判断或刚理清的关系。例如，L02 在 12:13 要求学生将刚报出的两段电压与电源两端电压作比较，L03 在 38:45 要求各组把内外电压之和与电动势对照，都属于这类接续。近一半的回应之后接的均是这样的提问，而进入利用证据的不到三分之一。利用证据之前，E、S 的中位数各为三轮，122 次利用证据中有 89 次前面已经有两轮以上的问答。学生回答之后，教师往往还会追问几次，反馈、解释和检验多出现在这些追问之后。

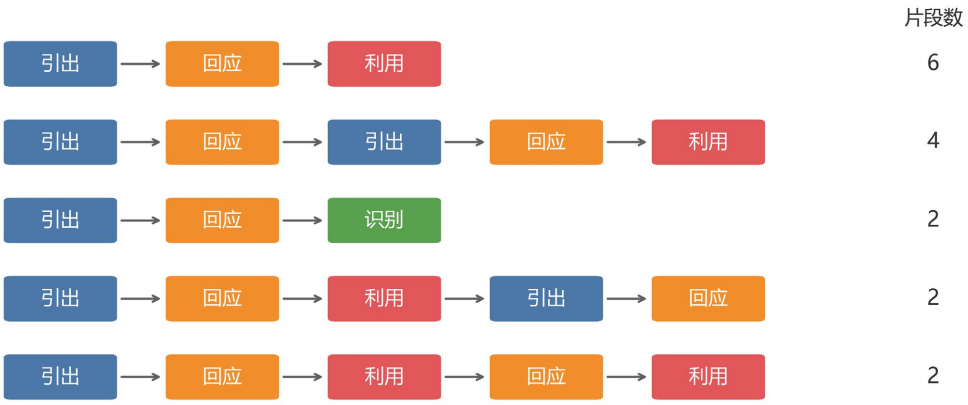
3.3. 反馈之后继续获取学生信息

77 个评价片段中，38 个片段在利用证据之后再次出现引出或回应，占 49.35%。同一片段可能有多次利用，按事件顺序统计每一次利用之后的去向：利用证据之后紧接有其他行为的情况共 64 次，其中 37 次接引出证据、16 次接学生回应。观点检验多伴随继续取证，27 次中有 25 次接引出或回应；将数据与

物理解释联系起来的证据关联则较多出现在片段收束时，34 次中有 24 次位于片段末尾。识别证据之后同样多次回到引出证据(22 次)或进入利用证据(13 次)。在这些课例中，教师给出解释、反馈或检验之后，通常会继续了解学生的想法，并根据新的信息安排后续教学。

3.4. 完整路径的几种常见形态

将 77 个片段的事件序列按前述规则整理后，共得到 59 种完整路径，其中 47 种只出现一次，32 个片段包含引出、回应、识别和利用四个阶段。图 3 列出五种出现次数较多的路径及其片段数。



注：每行对应一种完整片段路径，相邻同类事件已合并；图中选列 5 种，全部共有 59 种。

Figure 3. Five complete evaluation paths and their frequencies of occurrence
图 3. 五种完整评价路径及出现次数

按结尾和接续，这五种路径呈现出三类安排(字母依次表示引出、回应、识别和利用)。第一类以利用学生的信息结束，包括 ESU 和 ESESU，共 10 个片段，教师在得到一轮回答后直接概括或检验，或者在再问一轮之后才使用这些信息。第二类以识别学生观点结束，即 ESR 的 2 个片段，教师复述或展示学生的回答，片段中没有出现利用证据的环节。第三类是在利用之后回到学生，包括 ESUES 和 ESUSU，共 4 个片段，ESUES 在反馈后重新提问并获得回答，ESUSU 在两次利用之间保留了一次学生回应。多数路径只出现一次。七节课的引出绝大多数都有学生回应，差别主要出现在学生回应之后和利用证据之后。

4. 评价路径在三类教学任务中的展开

4.1. 片段一：数据比较中的多轮取证

片段一取自 L05。电压关系的实验探究要求学生将仪表读数转化为对物理规律的判断。这一片段属于“多轮取证后利用”，教师在连续几轮提问和学生回应之后，才把获得的信息用于概括规律。该片段从 06:20 持续至 13:20，包含 14 个评价事件。教师先安排学生观察改变外电阻和内电阻时的内外电压变化并记录数据；学生在 08:16 至 10:04 之间报告多组读数，其中一组为外电压约 1.64 V、内电压约 0.45 V。数据汇总后，教师要求学生分析记录的两组数据并说明实验结果。

12:44，学生报告改变外电阻时三组电压和约为 2.09 V、2.02 V 和 1.96 V，判断这些数值趋近一个定值。教师随即追问这个定值与什么量接近，学生把它与电源电动势联系起来，又报告改变内电阻时三组电压和约为 1.96 V、1.97 V 和 1.99 V。到 13:20，教师结合两组数据说明，在实验误差范围内内外电压之和等于电源电动势。

这一片段的问题沿着数据关系推进，先判断同组数据的共同特点，再说明定值的物理含义，然后纳

入另一种实验条件下的数据。学生提供的信息由读数发展为对数量关系的解释，教师据此完成规律概括。评价与实验分析在同一过程中展开，学生报告的数据成为结论的依据，有助于学生将实验测量与物理规律联系起来。

4.2. 片段二：猜想检验中的方案追问

片段二取自 L01，同样探究内外电压之和。这一片段在“多轮取证后利用”的基础上加入了方案讨论，教师围绕学生提出的猜想和测量方案连续追问，方案设计、数据汇总和结论形成均有评价参与。该片段从 18:38 持续至 31:30，包含 25 个评价事件。18:38，教师提出内外电压之和是否为定值的问题，并追问这个定值与什么有关。学生提出电压和为定值、与电源本身有关的猜想。教师复述这一猜想后，补充测量结果可能具有偶然性的另一种解释，要求学生设计实验作出判断。

21:26，学生说明方案，分别测量内电压和外电压并求和，通过多次测量判断是否为定值。教师追问怎样改变条件获得不同数据，学生在 22:09 提出调节滑动变阻器，教师补充改变电池内部横截面积的办法，并组织小组实验。方案在交流中逐渐具体，包括测量对象、条件变化和数据处理办法。

各组完成测量并上传数据后，教师将六个小组的数据依次投屏，汇总的电压和约为 0.99 V、0.97 V、0.94 V、0.86 V、0.78 V 和 0.80 V，随后要求学生依据数据概括结论。30:38，学生回答每组内外电压之和为定值。30:59，学生提出电压和可能与电池材料有关。31:01，教师指出当前数据对这一关系的支持不明显，并补充电解液和电极材料等变量。课堂由同一电池的数据比较进入不同电池之间的比较。

在这一片段中，教师顺着学生对定值的判断、对测量办法的回答和对材料关系的推测，依次把讨论引向定值的含义、条件的变化和新的实验变量，下一轮讨论的主题由学生的回答生成。与片段一相比，这一片段中的评价从数据分析延伸至了方案完善，问答持续更久，教师也从学生对测量办法的说明中了解到他们在条件控制上的想法。

4.3. 片段三：公式推导中的解释接续

片段三取自 L07。从能量角度推导闭合电路的欧姆定律，需要学生把电源做功与内外电路的能量转化联系起来。这一片段对应“利用之后的再次引出”，教师在解释能量转化之后，重新要求学生用数量关系表达同一内容。该片段位于 22:52 至 26:37，包含 11 个评价事件。教师先问电源增加的电势能是否只在外电路中减少，学生作出否定判断；教师追问还有哪一部分消耗电势能，学生回答电源内阻部分也有消耗。教师据此说明，内外纯电阻将减少的电势能转化为焦耳热。

24:06，教师要求从总能量守恒判断非静电力做功与内外电路消耗的关系。24:34，学生回答非静电力做的总功等于内外电路消耗的电势能之和。24:36，教师将学生的口头关系写成含 Q、I、R、r 和 t 的等式。24:43，教师追问电荷量与电流的关系，并要求列式推导电路中电流、电动势和电阻之间的关系。26:25，学生列出 $Eq = I^2Rt + I^2rt$，并代入 $q = It$，得到 $I = E/(R + r)$。教师随后重述学生的代换过程，概括闭合电路的欧姆定律及其适用条件。

这一片段的评价出现在解释与推导的衔接处。教师的解释接续了学生对内电路的认识，随后的提问要求学生用数量关系表达刚讨论的内容，学生先说明能量在哪里转化，再说明各部分能量怎样相等，然后完成符号代换。教师从回答和列式中了解学生对能量去向、守恒关系和数学表达的掌握情况，学生则在同一个片段中完成了从语言解释到等式表达，再到符号推导的建构。

4.4. 三类任务的评价安排比较

三个片段中的评价安排见表 3。三类任务要求学生提供的证据不同，教师的追问各有侧重。在数据解

释类片段中，教师追问的是数值之间的关系和这些数值的物理含义。在方案讨论片段中，教师更关心条件怎么改变、数据怎样处理。在公式推导中，教师则要求学生能够换一种表达并完成符号运算。

Table 3. Assessment practices in three instructional episodes
表 3. 三个教学片段中的评价安排

教学任务	学生提供的信息	教师的接续安排	后续学习内容
L05 电压数据比较	多组电压和及其接近定值的判断	追问与电动势的关系，联系两类实验条件	根据数据概括内外电压关系
L01 猜想与方案讨论	电压和猜想、测量方案及数据解释	组织检验，追问改变条件的方法，说明结论依据	完善方案，比较数据与实验条件
L07 能量关系推导	内电路能量消耗的判断与能量关系	解释能量转化，要求列式并完成代换	从口头解释进入定量推导

三个片段中，教师的追问都接续学生刚刚提供的信息，学生的回答逐步成为后续教学的依据。在数据比较任务中，教师通过证据关联，将多轮问答获得的测量结果用于概括电压规律；方案讨论与公式推导中的反馈和解释则接续到了实验实施和数量表达，教师也从后续的操作和列式中继续了解学生的理解。L01 的两次改进反馈回应了不同的讨论内容。教师在学生说明测量方案后补充改变条件的办法，组织检验；数据汇总后又回应材料关系的猜测，指出现有数据对这一关系的支持不明显，并补入新的实验变量。教师根据任务进程和学生已经提供的信息安排后续活动，使取证与利用证据贯穿实验探究和公式推导的过程。

5. 教学建议

在七节课的评价过程中，学生提供的信息要成为后续教学的依据，教师需要完成三件事：将学生的观点外显出来、让提问引出判断依据、在追问之后及时使用学生已经提供的回答。这三项动作与响应性教学研究强调的教师对学生观点的关注与使用一致[8]。

5.1. 外显学生观点

将学生的观点复述或展示出来，其他小组方能在后续讨论中加以引用；而在七节课中，这一动作出现得最少。学生给出数据、判断或方案后，教师可及时固定观点，例如将关键判断板书、把某一组的读数抄入全班共用的表格，或将口头的能量关系写成含 Q、I、R、r 和 t 的等式。L01 在各组完成测量后将六个小组的数据依次投屏，再请学生概括结论。L07 把学生说出的能量守恒关系写成等式，再要求完成推导。记录时保留学生的原话要点，教师的补充另行说明，学生能够看清观点的来源。由此可见，将学生的回答外显出来，能够为全班的讨论提供共同材料，也有助于教师了解学生的理解情况。

5.2. 让提问引出学生的判断依据

有些提问只能得到是、不是或一个读数，学生回答完，教师仍然不知道他为什么这样判断。把提问改成指向依据的问法，同一个问题就能同时得到判断和理由。如“电压和是不是定值”可以改成“你根据哪几组数据判断它是定值”，“这个结论对不对”可以改成“哪几组数据支持这个结论”。学生报告测量结果时，同样可以接着问这组数据是在什么条件下得到的、和哪一组可以比较。L05 中，学生报告几组电压和接近定值，教师追问这个定值接近哪个物理量，学生将数据与电源电动势联系起来，这一步的信息正是由一个指向依据的问题引出的。指向依据的提问将学生的判断与数据、条件联系起来，有助于学生说明理由，也便于教师了解学生的思考过程。

5.3. 追问要有止损点

在七节课中，学生回答之后继续提问是最常见的处理方式。在连续追问后，如果学生仍未说清判断

依据，教师可以先整理已有回答，指出目前能够确认的结论和仍需检验的问题，再安排下一项学习任务。L01 的处理接近这一做法，学生依据各组数据回答内外电压之和为定值，随后推测这个和与电池材料有关，教师把已确认的判断作为本次实验的结论，同时指出现有数据对材料关系的支持不明显，补入电解液和电极材料等变量，将讨论方向转向不同电池之间的比较。将追问停下来并及时使用学生的回答，能够让学生在课堂推进中看到自己回答的作用，也有助于教师根据学生的实际水平安排下一步教学。

6. 研究结论和反思

本文以七节“闭合电路的欧姆定律”公开课为对象，依据引出、回应、识别和利用四阶段框架编码 761 个评价事件，并借助过程挖掘整理 77 个评价片段的完整路径。提问与回应构成课堂评价活动的主要部分，学生回答之后教师往往继续提问，反馈之后也会继续获取学生信息。完整路径呈现出一轮回答后利用、多轮取证后利用以及利用后再次取证等安排，这些安排分布在不同教学任务中，为教师根据任务特点安排提问和反馈提供了参照。

对教师而言，本文提供的分析方式可以用于回看课堂，围绕一个核心问题查看学生的回答、教师的接续和下一项任务，检查评价是否落在任务的关键判断上，学生的信息是否值得进入后续教学。

本研究选取的七节课均为同一课题的省赛公开课，课例类型较为集中。后续研究可将同题常态课纳入比较，考察不同教学条件下学生回答与教师接续的关系。在观察问答的同时，可结合教师和学生手势、目光、身体朝向以及教具、板书的使用开展多模态分析，补充课堂互动的细节。将概念测评、作业和学生作品与课堂片段对照，亦可以考察学生理解的变化，为不同教学任务下评价方式的选择积累依据。

参考文献

[1] Black, P. and Wiliam, D. (2009) Developing the Theory of Formative Assessment. *Educational Assessment, Evaluation and Accountability*, **21**, 5-31. https://doi.org/10.1007/s11092-008-9068-5

[2] Ruiz-Primo, M.A. and Furtak, E.M. (2006) Exploring Teachers' Informal Formative Assessment Practices and Students' Understanding in the Context of Scientific Inquiry. *Journal of Research in Science Teaching*, **44**, 57-84. https://doi.org/10.1002/tea.20163

[3] 董泽华. 初中科学课堂非正式形成性评价的案例研究[J]. 全球教育展望, 2023, 52(9): 80-93.

[4] Ruiz-Primo, M.A. and Furtak, E.M. (2004) Informal Formative Assessment of Students' Understanding of Scientific Inquiry. CSE Report 639, CRESST. https://cresst.org/wp-content/uploads/R639.pdf

[5] Furtak, E.M., Ruiz-Primo, M.A. and Bakeman, R. (2017) Exploring the Utility of Sequential Analysis in Studying Informal Formative Assessment Practices. *Educational Measurement*: *Issues and Practice*, **36**, 28-38. https://doi.org/10.1111/emip.12143

[6] van der Aalst, W.M.P. (2016) Process Mining: Data Science in Action. 2nd Edition, Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-662-49851-4.

[7] 李金鹏, 刘聪, 李会玲, 等. 基于过程挖掘的分层学习行为模型发现方法[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 118-128.

[8] Gouvea, J. and Appleby, L. (2022) Expanding Research on Responsive Teaching. *CBE—Life Sciences Education*, **21**, fe2. https://doi.org/10.1187/cbe.22-03-0064