

建模·串联·整合:基于学习进阶理论的物理实验教学探索^{*}

——以“电池电动势和内阻的测量”教学为例

王亚栋 (杭州市钱塘高级中学 浙江 310000)

摘 要 文章尝试以“电池电动势和内阻的测量”为例,基于学习进阶理论,将建模思想串联于各个知识点,让学生在学习过程中,不断完善模型,完成知识与方法整合,能力自然地进阶至高水平。通过建模·串联·整合的教学方法促进学生科学思维发展的路径,探索物理实验教学的创新方法。

关键词 学习进阶 物理实验教学 模型建构 串联 整合

文章编号 1002-0748(2026)9-0019

中图分类号 G633·7

文献标识码 B

1 教学背景与问题提出

《普通高中物理课程标准(2017 年版)》明确提出物理学科核心素养,在“科学思维”这一素养中,将模型建构作为关键能力。传统物理实验教学中,“电池电动势和内阻的测量”实验常面临两大困境:

一是学生对实验原理的理解不透彻,对结论和公式“死记硬背”居多,缺乏模型建构与误差分析的深度思维;

二是传统教学设计往往跨度过大,学生由于缺乏思维进阶的方法,难以形成系统认知结构。基于学习进阶理论以建模为核心,探索实验本质教学新路径,为破解上述问题提供了理论支撑。为此笔者基于学习进阶理论尝试聚焦建模能力开展实验教学,挖掘实验内在,揭示思维方法,以期发展学生的科学思维。

2 学习进阶与物理实验教学的关系

学习进阶理论源于美国科学教育改革,融合了布鲁纳的“螺旋式课程设计”,维果斯基的“最近发展区理论”等,郭玉英等学者将其本土化,建构了科学概念理解发展的层级模型,将核心概念分为经验层、映射层、关联层、系统层、整合层^[1]。

对比和总结各学者提出学习进阶定义,学习进阶一般呈现为围绕核心概念展开的一系列概念序

列,另一个维度,学习进阶描述的是学生思维的逐级深化,认知从简单到复杂,从零散到系统。教师在进行教学设计时要思考“阶”是什么,使每一个“阶”都成为学生前一步学习的生长点和后一步学习的落脚点,学生拾级而上^[2],思维不断地进阶发展。这一理论可与模型建构教学实践相契合,如图 1 所示。

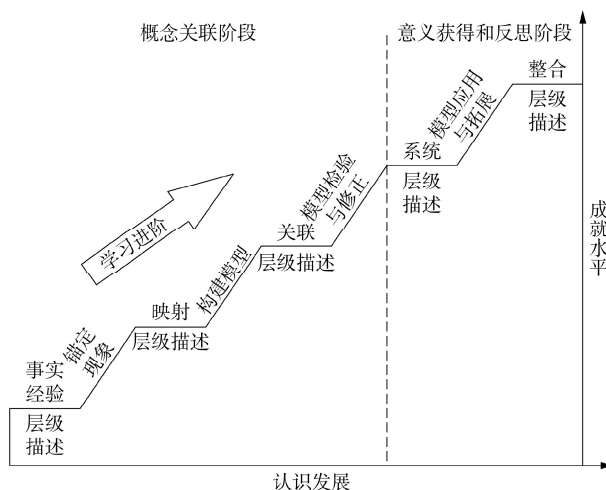


图1 以模型建构为支架的学习进阶

基于学习进阶理论的物理实验教学,可巧妙融合建模教学,从而发展学生模型建构关键能力。本研究将学习进阶理论与物理实验教学结合,形成“实验—建模—进阶”三位一体构建认知进阶框架。

^{*} 基金项目:本文系浙江省 2024 年教研规划课题“指向科学高阶思维的高中物理课例研究”(课题编号:G2024035)和浙江省 2026 年教研规划课题“基于学习进阶的高中物理建模教学路径研究”(课题编号:G2026031)的阶段性研究成果。

3 教学流程重构

学习进阶理论是基础,建模教学是核心,通过基本观念与科学思维串联,达成知识的整合与能力的进阶。基于此,将每个教学关键流程与“阶”一一对应,如图 2 所示,实现教学流程、科学建模过程与学习进阶点的融合,帮助学生理解物理概念、掌握规律并形成问题解决能力。

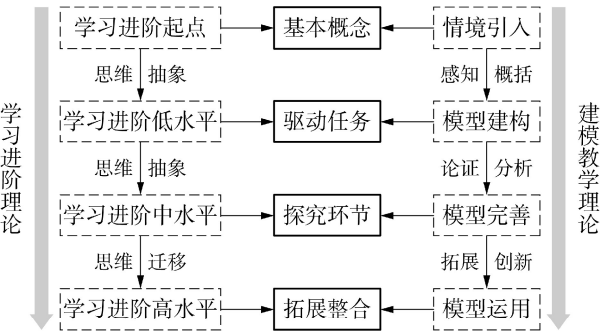


图 2 教学流程、科学建模过程与学习进阶的对应关系

笔者以人教版《高中物理(必修三)》第十二章第 3 节“电池电动势和内阻的测量”为例,基于学习进阶理论,探索物理实验教学的创新方法。通过建模、串联、整合的教学步骤,为学生搭建一个个“阶”,促进学生科学思维发展,符合当前教育改革的方向。

3.1 学习进阶点分析

笔者从进阶起点、进阶终点、进阶关键点与进阶策略四个方面对实验“电池电动势和内阻的测量”的核心内容进行进阶分析如表 1 所示。学习进阶的起点是学生已有的物理观念与外显的心智模型,经过物理建模的教学过程,最终将模型运用看作学习进阶的终点^[3]。在此基础上,找到本节课的进阶关键点与进阶策略,将其串联于各个知识点,从而指导本节课的课堂教学。

表 1 实验“电池电动势和内阻的测量”的核心内容的学习进阶分析

主题	进阶分析	分析内容
电池电动势和内阻的测量	进阶起点	描述闭合电路欧姆定律;理解 $U-I$ 图象的物理意义
	进阶终点	能分析实验中存在的误差,并能提出减小误差的方法;能将公式法、图象法、等效电路法熟练掌握并迁移
	进阶关键点	从公式到实验,理解实验的原理;设计实验方案并规范实验操作;尝试分析实验系统误差,并提出如何减小误差

续 表

主题	进阶分析	分析内容
电池电动势和内阻的测量	进阶策略	(1) 教师从教材 $U-I$ 图象斜率平缓的特点引入教学,使学生形成认知冲突,实现理论与实验相结合。 (2) 在实验过程中建立等效电路模型,并为本实验内接法与外接法的系统误差分析提供有效理论支架。 (3) 将等效电路模型串联各个知识点,形成本实验的大整合,也可以形成跨实验的小整合

3.2 进阶建模层级设计

学生不易掌握抽象化的实验概念,需要将已有的心智模型中类似的概念作为新概念的的生长点,再通过许多过渡概念组成的“阶”逐级深入,最终达成对目标概念的深度理解^[3]。进阶变量不仅仅是简单的“测电池电动势和内阻”的概念进阶,也需要深化“等效电路”模型建构。笔者将概念进阶层级和模型建构关键点有效整合,完善建模层级设计,如表 2 所示。

表 2 实验“测电池电动势和内阻”进阶模型层级设计

实验“测电池电动势和内阻”概念进阶		“等效电路”模型建构		
进阶层级	授课环节	进阶目标	模型建构步骤	模型图片
经验	描述闭合电路欧姆定律,了解公式的物理含义	唤醒旧知	插图引入,创设情境	
映射	计算教材 $U-I$ 图象斜率,结合图象斜率平缓的物理含义,引发认知冲突	能分析成因,引发探究欲		
关联	基于 $U-I$ 图象斜率平缓原因,提出实验改进方案。基于实验改进方案分组完成实验,得出结论	初步建立等效电路模型	实验探索,外显模型	
系统	通过公式法、图象法、等效电路法多种维度,详细分析本实验中内接法与外接法的系统误差	整合多种方法,完善等效电路模型	科学探究,完善模型	

续 表				
进阶层级	授课环节	进阶目标	模型建构步骤	模型图片
整合	从简单到困难,将内接法与外接法类比到安阻法与伏阻法。 从单一到系统,将“测电池电动势和内阻”与“伏安法测电阻”进行跨实验串联	模型迁移,实现知识与方法整合	扩展整合,模型迁移	

3.3 建模流程设计

笔者依据课程标准、教材分析和学情分析,从课本插图引入,以改进实验方案为驱动任务,初建等效电路模型,再将等效电路模型串联于各进阶建模活动,学生在经历“体验—冲突—探索—建模—完善—迁移”的教学流程中,最终完成知识整合,能力自然地进阶至高水平,如图 3 所示。

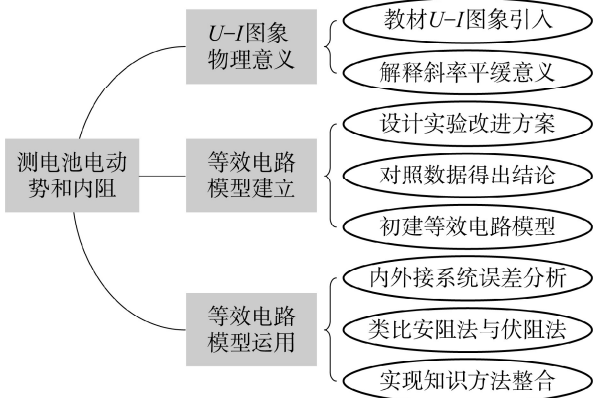


图 3 实验“测电池电动势和内阻”进阶建模流程图

3.4 教学环节设计

3.4.1 锚定起始点:插图引入,创设情境

笔者通过对比人教版 2019 年版(新课标)与 2004 年版教材发现:新教材中给出的 $U-I$ 图象(见图 4)斜率非常平缓,而老教材图象(见图 5)斜率更陡。从误差角度分析,老教材的图象更为合理。通过图 4 中图象斜率的计算,学生不难得出内阻约为

$0.55\,\Omega$,并猜测实验对象是一节干电池。笔者认为,新教材意图从更常见的真实情境出发,而非直接给出“完美方案”。那么能否把这作为“阶”,激发学生深入探索,为后续学生建构模型,思维进阶做铺垫呢?

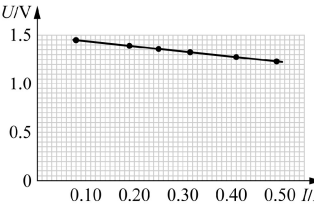


图 4 人教版 2019 年版教材插图

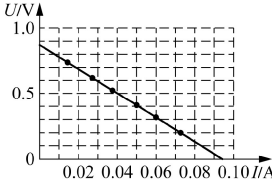


图 5 人教版 2004 年版教材插图

师:我们观察到图 4 中图象的斜率平缓,斜率平缓的物理意义是什么?内阻 r 大约等于多少?

学生进行计算。

师:大家根据计算结果,猜想一下实验对象是什么?

生:根据电动势约 $1.50\,\text{V}$,内阻约 $0.55\,\Omega$,猜测实验对象是一节干电池。

师:大家是否觉得 $U-I$ 图象斜率如此平缓不太合理?

生:是的,刚才估读的时候,得看得很仔细才可以,这样会存在很大的读数误差。

师:那么为了测一节干电池的电动势和内阻,如何改进实验方案呢?

设计意图:教师带领学生复习闭合电路欧姆定律与 $U-I$ 图象的物理意义,此时学生处于进阶起点。教师以教材插图斜率平缓为切入点,引出需要能力的发展才能解决的具体任务情境,再通过一系列提问,使学生产生认知冲突,激发学习兴趣,搭建思维进阶的台阶。

3.4.2 把握冲突点:实验探索,外显模型

根据 $U-I$ 图象斜率平缓这个特点,提出实验改进方案,学生会想到加入保护电阻的想法,通过设计驱动任务让学生去探索,设计实验方案并完成实验,在实验是实现模型初建。

师:有没有办法,把 $|k|$ 变大呢?

学生很快能想到,干电池串联保护电阻 R_0 可以实现。

师:那么如何设计实验方案,请同学们分组合作完成。

驱动任务:“纸上得来终觉浅,绝知此事要躬行”,给予器材:电源、开关、学生电压表、学生电流表、 $0-20\,\Omega$ 滑动变阻器、电阻箱、导线,小组同学讨

论设计方案,再进行实验。笔者用电阻箱代替普通定值电阻,并告诉学生电阻箱使用方法,通过此举为学生学习进阶搭建台阶。

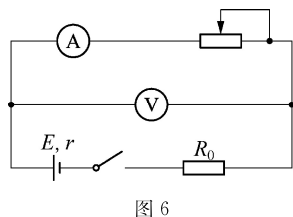


图 6

表 3 原始实验数据

$R_0 = 0 \Omega$	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
电流 I/A	0.08	0.12	0.16	0.20	0.30	0.40	0.50
电压 U/V	1.39	1.37	1.32	1.29	1.20	1.11	1.05
$R_0 = 1 \Omega$	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
电流 I/A	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
电压 U/V	1.26	1.19	1.09	0.99	0.89	0.81	0.73
$R_0 = 3 \Omega$	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦
电流 I/A	0.06	0.10	0.14	0.18	0.22	0.28	0.30
电压 U/V	1.22	1.07	0.90	0.73	0.58	0.44	0.28

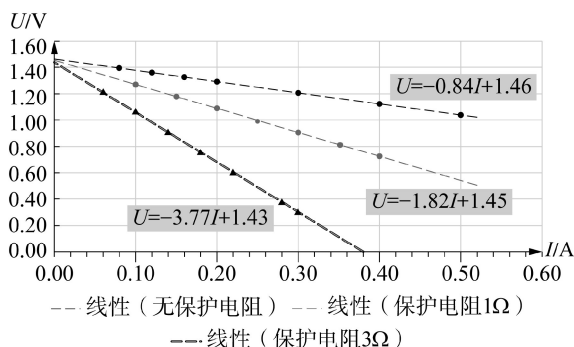


图 7 加入不同保护电阻的实验对比图

某一组学生在展示成果时,不满足于单一数据,而是进行了对比实验:分别取 $R_0 = 0 \Omega$, $R_0 = 1 \Omega$, $R_0 = 3 \Omega$, 实验方案见图 6,原始数据见表 3,将数据输入 Excel,通过对散点图添加趋势线,发现图象呈一条直线。根据数据拟合图象,并得出直线方程,三次实验对比结果如图 7 所示,最终根据斜率计算求得干电池内阻。

师:根据图 7 的观察,我们思考 $U-I$ 图象的斜率表示什么?

生:发现三次实验的图象斜率是不同的,原因是 R_0 的取值不同,那么图象斜率对应 $r+R_0$,好比是用保护电阻把电池做“旧”了。

师:我们再来理论推导下,根据图 6 所示电路结构,闭合电路欧姆定律 $U = E - Ir$ 应修正成 $U = E -$

$Ir - IR_0 = E - I(r+R_0)$,再将公式变成 $U = -(r+R_0)I + E$,结合图象的意义,截距仍然表示电动势,但是斜率的绝对值表示的是 $r+R_0$ 。我们可否通过等效电路的思想来理解呢?

师生共同得出:等效电路的本质是将复杂电路中的多个元件(如电池和保护电阻)看作一个整体,简化电路模型。如果我们将该实验中的干电池和保护电阻看成整体,能联想到该整体的等效内阻就是 $r+R_0$,如图 8 所示,这与之前学习过的电表的改装原理相通。

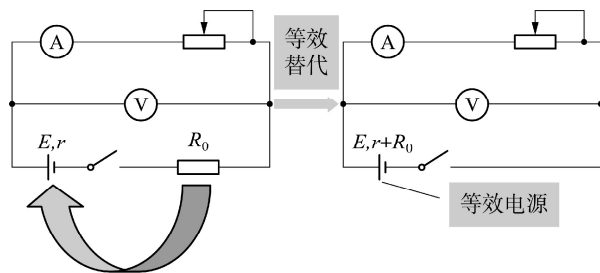


图 8

设计意图:以改进实验方案为驱动任务,让学生在实验中对自己的想法加以论证,在此过程中又迸发出新的问题,学生的探索欲被充分点燃。在实验过程中学生充分思考发现问题,并通过合作交流解决问题,自然而然地建立了等效电路模型,在实践中迈向进阶中水平。

3.4.3 突破障碍点:科学探究,深化模型

本实验的系统误差分析是考试的重点,也是学生进阶的障碍点。通过公式法、图象法、等效电路法多个维度,先详细分析内接法的系统误差。再尝试分析外接法的系统误差,最终整合知识体系。

(1) 内接法系统误差分析

师:我们学习过伏安法测电阻,由于指针式电流表和电压表内阻的影响,会产生一定的系统误差。对于图 9 所示的伏安法内接法,大家觉得哪个表的读数不准,存在怎么样的误差呢?

生:电流表测的是流过电池内阻的电流,准确。但是电压表的读数存在问题,其所测并非路端电压 U ,原因是电流表的分压。

师生共同得出:考虑到电流表的分压,公式 $U = E - Ir$ 应修正成 $U = E - Ir - IR_A$,再将公式变成 $U = -(r+R_A)I + E$,画出 $U-I$ 图(见图 10),结合图象意义,截距仍然表示电动势,但是斜率的绝对值表示的是 $r+R_A$,即 $E_{\text{测}} = E$, $r_{\text{测}} = r + R_A$ 。

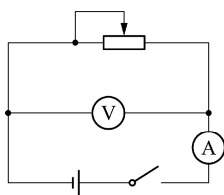


图 9

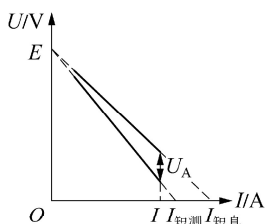


图 10

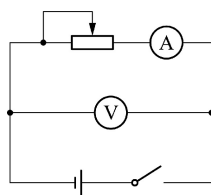


图 12

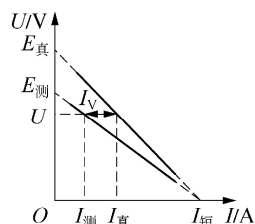


图 13

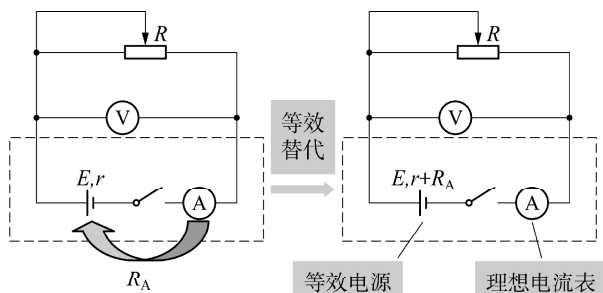


图 11

师:既然电流表的内阻对测量结果有影响,怎样能让电压表测的就是路端电压 U 呢,用等效电路模型试一试?

生:把电流表拆分成一个无电阻的纯表头和 R_A ,将 R_A 合并到电池内部进行等效处理,易得 $|k| = r + R_A$,思维导图如图 11 所示。

师生共同得出:若电池为大内阻,选择内接法,误差较小。但存在特殊情况:若 R_A 取值确定,可直接选择内接法,但需对结果进行修正,即 $r = |k| - R_A$ 。

设计意图:首先分析内接法的系统误差,是因为学生刚经历了实验方案的改进,这样衔接更为自然。在此过程中,学生通过公式法、图象法、等效电路法分别分析内接法的系统误差,形成知识的有效整合。

(2) 外接法系统误差分析

师:对于图 12 所示的伏安法外接法,大家觉得哪个表的读数不准,存在怎样的误差呢?

生:电压表测的是路端电压 U ,准确。但是电压表的内阻对测量结果也会存在问题,其所测并非真实的干路电流,原因是电压表中内阻的分流。

师生共同得出:考虑到电压表的分流,公式 $U = E - Ir$ 应修正成 $U = E - \left(I + \frac{U}{R_V}\right)r$,将该公式变形成 $U = -\frac{rR_V}{r+R_V}I + \frac{R_V}{r+R_V}E$,画出 $U-I$ 图(见图 13),结合图象意义,截距表示为 $\frac{R_V}{r+R_V}E$,斜率的绝对值表示为 $\frac{rR_V}{r+R_V}$,即 $E_{\text{测}} = \frac{R_V}{r+R_V}E$, $r_{\text{测}} = \frac{rR_V}{r+R_V}$ 。

师:既然电流表的读数有问题,怎样能让电流表测出的就是流过内阻的电流呢?我们可不可以仿照内接法的研究方法呢?

生:我们可以把电池和电压表当成整体,等效对象如图 14 虚框内。

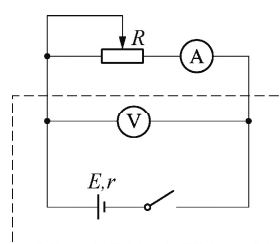


图 14

师:如果把图 14 虚线框内的部分当成整体,你认为它的电动势和内阻是多少?

生:等效内阻是 r 与 R_V 并联,即 $\frac{rR_V}{r+R_V}$,但是电动势该怎么看呢?

师:我们可以这样思考,把虚线内的部分看作黑匣子,我们用多用表测它的电压,测得的电压是 $\frac{R_V}{r+R_V}E$,这就是黑匣子系统的电动势了。

师生共同得出:若电池为小内阻,选择外接法,误差较小。但也有特殊情况:若 R_V 取值确定,可直接选择外接法,但需对结果进行修正。

设计意图:模型建构和学习进阶并非一蹴而就,都需要不断地完善与优化。外接法与内接法无论在知识层面还是方法层面都存在很强的关联性,在教学中将它们串联起来,有利于学生整合孤立的知识体系。在此过程中,学生将初步建立的等效电路模型得以运用,在运用过程中夯实基础,不仅实现知识层面的整合,也实现了模型的完善。

3.4.4 寻找串联点:扩展整合,完善模型

从简易到困难,将内接法与外接法类比到安阻法与伏阻法。从单一到系统,将“测电池电动势和内阻”与“伏安法测电阻”进行跨实验串联。

(1) 安阻法与伏阻法

师:请看图 15,这样的方法称之为安阻法,它也可以实现实验目的,那它可以等效为内接法还是外接法?

生:由于电流 I 和电阻箱 R 已知,就知道了 U ,相当于在电阻箱 R 处并联一个理想电压表,所以其电路可等效为图 9 中的内接法。

师:因为结构相似,图 15 和图 9 有相同的测量效果,即 $E_{\text{测}} = E$, $r_{\text{测}} = r + R_A$ 。

师:再看图 16,这样的方法称之为伏阻法,请大家再思考,这个电路图可以等效为内接法还是外接法?

生:由于电压 U 和电阻箱 R 已知,就知道了 I ,相当于在电阻箱 R 处串联一个理想电流表,所以其电路可等效为图 12 中的外接法。

师:因为结构相似,图 16 和图 12 有相同的测量效果,即 $E_{\text{测}} = \frac{R_V}{r + R_V} E$, $r_{\text{测}} = \frac{r R_V}{r + R_V}$ 。

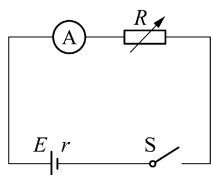


图 15

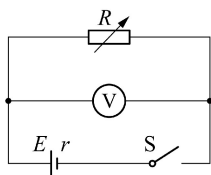


图 16

设计意图:安阻法与伏阻法的系统误差分析无论是通过公式法还是图象法都是极具挑战的,不仅难度大,方法还不唯一。通过等效电路模型这个串联点,把内接法类比到安阻法,把外接法类比到伏阻法,这样的设计基于最近发展区理论,具备教学可行性。学生在模型迁移的同时完成了知识整合,发展了类比推理的科学思维,能力的进阶水到渠成。

(2) 对“内”与“外”字的理解

师:图 9 所示测量电路我们为什么将它命名为内接法呢,依据是什么?

师:我们将公式 $U = E - Ir$ 变形为 $r = \frac{(E-U)}{I}$, 我们如何理解这个变形公式呢?

生: $(E-U) = U_{\text{内}} = U_r + U_A$, 所以 $r_{\text{测}} = \frac{U_r + U_A}{I} = r + R_A$ 。

学生恍然大悟,这个结果与之前公式法、图象法、等效电路法得到的结果一致,同时与“伏安法测电阻”中内接法的测量值类似,只是该实验测的是电池内阻,至此理解“内”字。

师:我们再看图 12,为什么把它命名为外接法呢?

师生共同得出:将公式 $U = E - Ir$ 变形为 $r = \frac{(E-U)}{I}$, 如图 15 所示,如果把电池和电压表看成整体,那么 $(E-U)$ 就是整体分到的电压, I 也是该整体的电流,可得 $r_{\text{测}} = r$, $R_V = \frac{r R_V}{r + R_V}$, 这与“伏安法测电阻”中外接法的测量值类似,至此理解“外”字。

设计意图:课堂最后,笔者字斟句酌,让学生回味“内”与“外”字,感受物理实验的内涵思想。将“测电池电动势和内阻”与“伏安法测电阻”两个电学实验形成跨实验串联,这不仅是知识层面的串联,更是方法层面的串联,呼应本文主题——建模·串联·整合。先建立等效电路模型,再将建模思想串联于各个知识点,进而不断地深化完善模型,让学生在体验中完成知识整合,能力自然地进阶至高水平。

4 总 结

学生学习能力的进阶是循序渐进的,在每个关键点有了台阶就更容易“跳一跳摘到桃子”,教师应基于学生所处的进阶水平选择合适的教学内容和教学策略,这有利于学生进阶水平的提升,如图 17 所示。

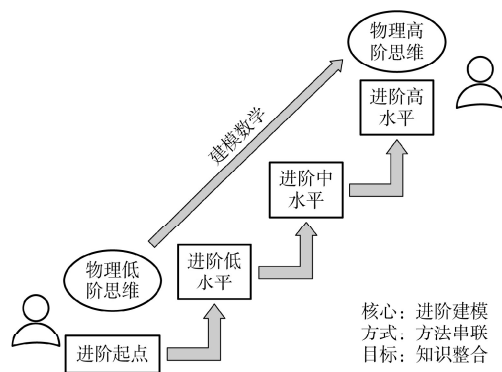


图 17

在当前发展物理学科核心素养目标的大背景下,科学建模能有助于培育学生的核心素养,那么如何将模型建构融入物理实验教学就是一线教师亟待解决的问题。本研究即以“电池电动势和内阻的测量”实验为例,探讨通过建模·串联·整合的教学方法促进学生科学思维发展的路径,探索物理实验教学的创新方法。

参考文献

- [1] 郭玉英,姚建欣. 基于核心素养学习进阶的科学教学设计[J]. 课程·教材·教法, 2016(11): 64—70.
- [2] 张鹭. 基于学习进阶理论指向物理概念建模教学的研究与实践——以“向心力”为例[J]. 物理通报, 2023(1): 44—49.
- [3] 顾红霞,蒋文远. 以模型建构促进物理概念进阶的实践与思考[J]. 中学物理, 2021(6): 2—5.
- [4] 柯晓露,宋静. 学习进阶与科学论证整合的物理概念教学——以“库仑定律”为例[J]. 物理教学探讨, 2020(2): 6—9.
- [5] 人民教育出版社 课程教材研究所 物理课程教材研究开发中心. 普通高中教科书教师教学用书物理必修(第三册)[M]. 北京: 人民教育出版社, 2019: 90.