·教育理论研究·

刍议物理思维与数学思维的差异性

——也谈基础教育阶段“为什么物理难学又难教？”

冯 杰 韩笑天 叶彬恩
（上海师范大学天华学院，上海 201815）

摘 要：本世纪初以来，困惑我国基础教育界的一大难题是“物理难学又难教”. 物理思维与数学思维的差异性体现在物理思维具有个性化的特征上. 我们的物理教师和数学教师似乎很少关注此点，也很少从课程、教材、教法 3 个层面进行这方面的对比研究，或许这是难题的症结之一之所在.

关键词：物理思维；数学思维；个性化；差异性

著名的钱学森之问：“为什么我们的学校总是培养不出杰出人才？”这是关于中国教育事业发展的一道艰深命题. 人们普遍认为，这需要整个教育界乃至社会各界共同破解. 众所周知，近 20 年来，我国的基础教育进行了大张旗鼓的两轮课程改革，却出现了全国人民的焦虑之问：“为什么物理难学又难教？”我们要问：“物理真是难学又难教吗？”难道也需要整个教育界乃至社会各界共同破解吗？特别是新高考方案的实施，这个“物理难”之问似乎已经成为全社会的“共识”了，凡事皆有因，缘由究竟在哪里呢？

按照目前国际上通行的学科分类，数学被认定为是真正的自然科学，是宇宙的语言. 数学思维无疑是独特的、抽象的和艰深的. 然而，在我国基础教育阶段，为什么没有出现“数学难学又难教”的全国人民焦虑之问呢？让我们从基础教育阶段的课程、教材、教法三位一体的角度，仔细分析物理思维与数学思维的个性化特征，看看物理思维与数学思维的差异性，或许不难找到难题的某些症结之奥秘.

1 什么是思维

我们知道，思维是人的一种高级的心理活动形式. 按照现代信息论观点和脑科学的最新研究成果，思维是人脑对新输入信息与脑内储存知识经验进行一系列复杂的心智操作过程；从认知的角度，思维是人脑借助于语言和相应媒体符号对事物的概括和间接的反应过程；从认识论的角度，思维是以感知为基础又超越感知界限的高级意识活动.

人的思维活动（涉及所有的认知或智力活动）的目的是要探索与发现事物的内部本质联系和规律性. 随着对各个领域涉及思维活动特点的深入研究，科学家们发现了逻辑思维即抽象思维、形象思维（具象思维）、顿悟思维（灵感思维）、创新思维等思维形式的许多新特点.

基础教育阶段特别是理科学科的教与学，所依据的基本上是传统意义的逻辑思维形式，涉及的主要范畴有分析与综合、比较与分类、归纳与演绎、模拟与类比、概括与抽象等，其是对事物的间接反映，这符合学校教育间接性特点. 同时又要基于青少年已有的知识、经验和情怀，借助于其他媒介手段（教师、各类课程和教学资料）的作用，使中学生获得知识、技能、方法和情怀，认识客观事物，推测未知的事物，发展其能力，达成既定的教学目标.

2 什么是物理思维

物理思维的起点是哲学. 从哲学的范畴看，辩证法包括十一对范畴：物质与意识、运动与静止、时间与空间、对立与统一、质变与量变、肯定与否定、本质与现象、内容与形式、必然与偶然、原因与结果和可能与现实，其中直接与物理学内容相重叠的有运动与静止、时间与空间和原因与结果 3 对范畴. 认识论包括认识与实践、感性与理性、真理与谬误、绝对真理与相对真理 4 对范畴，而认识与实践、感性与理性两对范畴一直是贯穿物理学研究、发展和物理教学的主线，特别是中学物理的教与学，更是几乎无时无刻不是运用逻辑学的思维形式、思维规律、思维方法这 3 对范畴.

2.1 物理学学科的逻辑结构

物理学具有哲学、知识和实证的复杂逻辑结

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

构. 物理学的逻辑范畴可以分为 4 个层面,其一是物质的基本形态层面:实物与场或曰粒子与场(波)是其主要形式. 其二是物质的根本属性层面:运动的绝对性、运动描述的相对性以及各种低级运动形式的特殊性是其研究对象;这两个层面是基于哲学的角度. 其三是物理学理论体系的内容层面:即力学、热学、电磁学、光学、现代物理学(原子物理学、量子物理学和相对论)5 大领域的实验、概念、规律和原理. 从课程的内容角度看,无论是初中、高中还是大学,基本上是相同的,只是目标和深浅度不同. 其四是狭义的逻辑分类学角度,可以把物理学理论体系概括为 4 大"概念范畴":实物与场、粒子与波、时间与空间、运动与静止. 这应该是物理学独特的逻辑结构,显然与数学不同.

2.2 物理课程的逻辑特点

我们常常说物理学有 6 大特点:其一是物理学是一门实验科学,其二是物理学是一门严密的理论科学,其三是物理学是一门定量的精密科学,其四是物理学是一门基础科学,其五是物理学是一门带有方法论性质的科学,其六是物理学是一门蕴涵着特殊文化的科学. 对此已经有成熟的讨论,此不做赘述,但是其是本文立论基础之一.

从目前大中学校的物理课程角度,物理学的 5 大领域的内容是按照螺旋结构分成 5 个完整循环的,即初中物理、高中物理、大学普通物理学、理论物理学(四大力学)和现代物理学(量子场论和相对论). 那么从科学方法或曰教与学的方法或曰思维方法的角度,可以这样来认识物理学科教学的逻辑特点:初中物理(自然常识的一部分)根植于实验归纳+形象思维、高中物理(物理学基础知识)根植于逻辑演绎+实验归纳;普通物理学(力热电光原)根植于源于实验归纳的系统化基本知识+逻辑演绎;理论物理学(四大力学)根植于源于高等数学直接对物理学基本定律和原理的结构化逻辑演绎;现代物理学(场论与相对论)根植于哲学化的假说和理想实验+逻辑演绎. 其中数学起到了一定超前的和不可替代的作用,但是最后还必须由物理学的实证来完成.

2.3 物理课程学习的思维特征

物理思维具有独特的个性化特征,主要体现在 8 个方面:模型化、多级性、多向性、表述的多样性、思维的转换、假设与验证、等效思维和实践性. 比如,模型化特征. 这是对物理现象进行高度精细化的抽象和概括的一种逻辑形式,是形成物理概念基础性思维. 因为物理学以自然界物质的结构和最普遍的运动形式为研究内容. 对于那些纷繁复杂的物理事物,首先就需要抓住其主要特征,而舍去那些次要因素,形成一种经过抽象概括了的理想化的"物理典型",在此基础上才能够建立物理概念、发现物理规律. 如何掌握好物理模型的思维,是学生学习物理的困难所在之一. 又比如,表述的多样性特征. 因为物理规律的表述可以用文字,也可以用公式,还可以借助于图像,有些问题直接可以用图示. 每一种表述,不仅仅是一种"语言",同样是一种思维. 而且物理概念、规律和原理的定性表述比其定量的数学公式重要得多(对此,并没有引起我国高中物理教师的普遍关注). 再比如,等效思维方法. 把复杂的物理对象等效为一个简洁或简单的物理模型,可以跨越思维"鸿沟"、加速物理思维进程或激发创新思维,在高一物理阶段特别重要. 例如,运动的相对性、矢量的合成与分解、等效电路等.

正是这些个性化的物理思维特征,决定了物理的教与学的思维特征不同于数学的.

3 什么是数学思维

应该说数学思维的起点更是哲学. 从哲学的 11 对范畴看,其中直接与数学内容相重叠的范畴是多于物理学的. 比如运动与静止、质变与量变、肯定与否定、本质与现象、内容与形式、必然与偶然、原因与结果、可能与现实 7 对范畴都与数学的研究对象有交集. 而认识论的认识与实践、感性与理性、真理与谬误、绝对真理与相对真理 4 对范畴一直是贯穿数学研究和教学的主线. 数学教学也是几乎无时不用逻辑学的思维形式、思维规律、思维方法这 3 对范畴,但是其内涵和应用形式却与物理思维有很大不同.

从人类认识和研究自然界的层次角度,物理学是研究自然界最低的层次学科:物质的基本运动形式和物质最基本的结构(分子、原子以下). 化学是研究物质的性质、组成、结构、变化和应用的科学(分子原子以上). 生物学是研究自然界所有生物的起源、演化、生长发育和遗传变异等生命活动的规律和生命现象的本质,各种生物之间、生物与环境之间相互联系的学科. 经济学是研究人类赖以"衣食住行用娱乐安全"等"商品或财富的生产、分配、交换、消费的循环和演变过程"的基础学科. 所有这些学科(自然、社会和人类思维等)都直接或间接地被数学抽象为单一、纯粹和一般化的模式——成为数学的研究对象.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

3.1 数学学科的逻辑结构

通过以上讨论，对比物理学，数学具有哲学、知识和纯粹的单一逻辑结构. 数学的逻辑总范畴从研究对象的角度可以分为两个层面：纯粹数学和应用数学. 研究其自身提出的问题的（如哥德巴赫猜想等）是纯粹数学（又称基础数学）；研究来自现实世界中的数学问题的是应用数学. 从数学是宇宙自然语言的角度，纯粹数学与应用数学的界限并不那么明显. 一方面由于纯粹数学中的许多对象，追根溯源是来自解决自然界问题的. 比如，从宏观的宇宙学到微观的量子领域；另一方面，为了要研究从现实世界（人类社会）提出的数学问题，纵向的，大到如天文学、力学、物理学和工程学等，小到分子、原子的运动；横向的，如网络、动力系统、信息传输和经济数学模型等，都需要数学科学从更抽象、更纯粹的角度来考察，才有可能得到答案和解决.

从纯粹的抽象思维的角度，可以分为“数”与“形”两大范畴，而且这两大范畴是交错或交织在一起的. 即数学“模型”的建立，使得数学研究的对象在“数”与“形”的基础之上可以扩充到这个宇宙，包括自然和人类社会的各种“关系”，如“语言”“程序”“DNA 排序”“选举”和“动物行为”等，最后又都复归抽象为数学的“数”与“形”，从而构成了数学科学研究的全部内涵.

数学学科理论体系一般由数论、代数学、几何学、拓扑学、数学分析、微分方程、泛函分析、概率论与数理统计和离散数学等构成一个发展动态的逻辑结构. 如果按照上述物理学从狭义的逻辑分类学角度，则数学的理论体系可以更加简洁无比地概括为两大“概念范畴”：数、形. 这是数学作为宇宙语言最独特的逻辑结构，显然与物理学有很大差异.

3.2 数学课程的逻辑特点

我们常说：数学是自然界的普适语言. 数学更严格的定义是：研究宇宙数量、结构、变化、空间以及信息等概念的一门学科，也就是说数学的本质是各种运动形式在空间形式及其数量关系的概括. 所以，数学也具有 6 大特点：其一是高度的抽象性，其二是逻辑上的严密性，其三是数量上的精密性，其四是深刻上的辩证性，其五是应用的广泛性，其六是与物理学一样，数学也是一门蕴涵着特殊文化的科学.

目前基础教育阶段的数学课程结构，与物理学有基本相同的、也有较大差异的. 基本相同的是课程结构也是螺旋结构的 5 个完整循环，即小学数学、初中数学、高中数学、大学基础数学、现代数学理论. 小学、初中和高中都是代数、几何和统计与概率 3 大领域的逐步深入、扩展和初步应用（数学建模）. 与物理学课程的差异有：其一，课程内容下移：小学一年级就有数学课程，初二（8 年级）才有物理课程. 其二，在初中和高中的数学课程里是没有高等数学的拓扑学、微分方程和泛函分析等学科. 这样在中学阶段，暂时没有许多相应的“数学观念”. 其三，初、高中数学课程中没有像初、高中物理的系统性实验. 这样不仅没有根植于实验归纳、理想实验和假说等思维方法的学习，而且没有实验技能训练和实验方法的学习机会. 这显然是数学课程与物理课程的很大不同. 其四，有趣的是现代数学理论的高度发展和抽象，比如拓扑学理论及其应用等，需要物理学的超前假说，并最后还必须由物理学的实证来完成.

3.3 数学课程学习的思维特征

数学思维的内涵是指转化与划归、一般与特殊、函数与映射、归纳与类比、想象与直觉、数学归纳法、数学演绎法、数学反驳法和公理化方法等逻辑范畴. 我国义务教育和高中的数学教学课程标准中都明确指出，数学思维能力主要是指：会观察、实验、比较、猜想、分析、综合、抽象和概括；会用归纳、演绎和类比进行推理；会合乎逻辑地、准确地阐述自己的思想和观点；能运用数学概念、思想和方法，辨明数学关系，形成良好的思维品质. 所以，数学思维是多种逻辑思维能力的综合运用.

一般来说，小学生是掌握形状、方位、比较、排序、图形和拼摆等能力. 初中学生数学能力主要包括：数感和符号感、空间观念、统计观念、初步的推理能力以及分析和解决实际问题的能力等. 高中学生的数学能力主要包括：空间想象能力，逻辑思维能力，运算能力，分析问题与解决问题的能力，数学探究与创新能力以及数学建模能力等. 研究表明：数学思维能力强的人，基本体现在两种层面上，其一是数学联想力，其二是数字敏感度. 两种层面都具有公理化特征.

4 物理思维与数学思维的差异性与同一性

从哲学、逻辑学和研究方法等角度，物理思维与数学思维的差异性是显著的. 比如，教学实践表明：数学学习的高原期比物理学习的高原期要短得多. 这是目前我国普通大众认为“物理难学又难教”的主要感性依据. 但是，作为教育工作者，我们必须贯彻基本的科学观念，即物理与数学都是自

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

然科学的有机组成部分，物理思维与数学思维存在着天然的同一性和本质的共性. 牛顿的经典物理学名著的书名就是《自然哲学的数学原理》，整个宇宙是自然哲学的统一体. 现代物理学的发展必须借助于现代数学，二者已经“融为一体”.

4.1 物理学与数学的学科知识交集

从理论物理学的角度看数学，数学是物理学的表征，物理学是数学的实证模型：只要数学方程是自洽的，则必然有物理的自然客观模型与之对应，只是尚未发现而已. 从物理学应用的角度看待数学，物理学是当代技术之源，但必须通过数学进行标准化. 因此，当代最伟大的数学家之一陈省身教授，极力赞成“物理”与“数学”是一家，他曾赋诗一首写道：

物理几何是一家，共同携手到天涯.
黑洞单极穷奥秘，纤维联络织锦霞.
进化方程孤立异，对偶曲率瞬息空.
筹算竟有天人用，拈花一笑不言中.

4.2 物理学与数学的 3 次重要结合

物理思维与数学思维的同一性还体现在物理学的发展历史之中. 第 1 次是物理学与欧几里得几何的结合，诞生了经典力学、天文学. 比如，牛顿的《自然哲学的数学原理》有大量的几何图式；第 2 次是物理学与微积分的结合，构建了“完美”的经典物理学. 比如，拉格朗日的《分析力学》没有一张图，其后，诞生并逐步完善了数学物理方法. 第 3 次是物理学与现代数学（微分几何）的结合创建了近代物理学和相对论，比如，爱因斯坦的《广义相对论》. 量子力学中的概率、算子、特征值、群论等基本概念和结论似乎都是数学上“预先”准备好了的. 所以，数学对第 3 次科学革命起到了有力的推动作用. 因此，数学是创立和发展物理学理论的主要工具. 从技术革命的角度，物理学理论的应用要借助数学工具，比如，实现单位的标准化和统一等. 自 20 世纪初以来，物理学与数学就是互相促进和共同发展的.

4.3 中学物理课程与中学数学课程的差异

物理学的理论体系是由实验、定律、定理和原理构成的，所以，中学物理的力学、热学、电磁学、光学、原子物理学是以实验为先导，从概念、规律、和原理出发，在哲学层面把物理学理论体系概括为 4 大“概念范畴”：实物与场、粒子与波、时间与空间、运动与静止. 已经超越了逻辑学层面，进入了哲学层面，是脑动和技能型手动的结合.

数学的理论体系是由公理、定义、定理和推论构成的. 可以说，中学数学的代数、数论、几何、数理统计初步等都是相关学科的预备性知识，是以数学建模为后导的. 这方面完全不同于物理学. 基础教育阶段，没有涉及泛函分析、微分方程特别是三类偏微分方程. 虽然中学数学也借助于逻辑学，却完全局限于“算术”的层面，只有脑动，没有技能型的手动.

由此可见，如果不涉及微积分，中学数学的内容形式与大学数学的内容形式完全不同，但是，中学物理的内容形式与大学物理的内容形式几乎完全重合. 这是因为：其一，内容差异. 物理的课程螺旋结构内容是相同的，数学的不完全相同. 其二，难度差异. 初、高中课程内容的难度台阶，物理特别大，数学不明显. 其三，逻辑差异. 物理是实时情境推理，数学是固定纯粹推理. 其四，思维差异. 物理有赖于个性，具体体现是抽象化的具象、具象化的抽象；数学有赖于直接的具象，然后转化为具象化的抽象. 其五，直接应用物理的定义、定律和定理，可能无法得出物理问题结论，或者得出的正确结论是“歪打正着”（个性化物理思维路径并不正确）；数学直接可以应用公理、定义和定理，就可以得出正确的结论，数学几乎不会出现“歪打正着”现象.

5 物理逻辑与数学逻辑的教学差异性举例

教学实践表明，我们必须从逻辑层面分析物理逻辑与数学逻辑的教学差异性. 所谓逻辑（Logic）是一个外来词语音译，指的是思维的规律和规则，也指研究思维规律的学科即逻辑学，包括辩证逻辑、形式逻辑和数理逻辑（符号逻辑）. 它们都是通过人的逻辑思维途径而达成. 逻辑指的是思维的规律和规则，逻辑思维（Logical thinking）是人们在感性认知阶段（感觉、知觉、表象）基础上，借助于理性认识阶段（概念、判断、推理）的思维形式能动地反映客观现实的认识过程. 它是作为对认识者的思维及其结构以及起作用的规律的分析而产生和发展起来的. 只有经过逻辑思维，人们才能达到对具体对象本质规定的把握，进而认识客观世界，是人的认识的高级阶段，但是，逻辑思维具有个体思维的规律性和差异性.

5.1 “概念”学习的差异

概念是思维的基本形式之一，是逻辑思维进入理性认识阶段的起点. 概念是反映客观事物的一般的、本质特征的思维形式. 人类在形成概念认识过程中，需要把所感觉到的事物的共同特点抽出来，加以概括，就成为概念.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

在基础教育阶段，数学中的“概念”是公理中规定了的，大量采用了归纳的方法，是“死的”；比如，“数域”“直角三角形”“反函数”等等，其定义都是一种“程式化”的思维，是一种纯粹化的或机械化的逻辑推理.

而物理学中的“概念”是实验（情境）中抽象出来的，是“活的”，比如，“力”“杠杆”“电场强度”等等，其定义是一种“情境化”的思维或个性化的逻辑推理.

因此，高中同年级的物理“概念”的建立过程和定义程序比数学的复杂得多和难得多. 这或许是物理比数学“难学又难教”的教学层面的原因之一.

5.2 “规律”学习的差异

规律亦称法则，是在一定的条件下，客观事物发展过程中的本质要素之间的联系. 规律具有必然性、普遍性、客观性和永恒性特点.

在基础教育阶段，数学中的“规律”来自于公理中的定义、定理和推论；比如，“实数的四则运算”“直角三角形的勾股定理”“三角函数法则”等. 这些直接演绎的过程是单纯的和纯粹的思维过程，是没有或者不需要客观实际情境过程对应的. 比如，如果熟记直角三角形的角边关系的公式（公理），你不仅能够无误地推出三角函数各种角边关系公式，如倍角关系、半角关系、和差化积等，而且会轻松地求解此类题目. 只要将相关的定义、定理、运算法则熟记熟背，即可灵活运用.

物理学中的“规律”必须是通过实验（情境）进行归纳或证明的. 比如牛顿第二定律、动量守恒定律和法拉第电磁感应定律等. 不仅条件严格，而且其情境是理想化的，即需要进行一系列的思维加工. 其内容是客观化的，需要实际的情境，即需要物理实验与其对应. 正是其情境的理想思维加工和内容客观化的实验情境，必然要求物理学习者的思维过程和思维成果具有个性化特质. 比如，受力分析可以用不同的分解方法、矢量的方向也与规定的正方向进行比较、守恒律的运用更需要清晰始末状态. 如果熟记牛顿三定律及其相关公式（比如，牛顿第二定律 $F=ma$，为简单计，这里只用标量式），你可能会推导动能定理表达式 $F_{外}=ma=m\frac{v_2{}^2-v_1{}^2}{2s}$，$W=F_{外}s=\frac{1}{2}mv_2{}^2-\frac{1}{2}mv_1{}^2$，但是，你或许根本都不会做基本的动力学题目，因为前者只是数学，而后者就是物理学. 所以，不同于数学，物理学中的“规律”是一种个性化物理情境、个性化技能、个性化思维方法和个性化思维过程的综合实践活动，需要的是个性化的逻辑推理. 而且物理规律有 3 个层次：定律、定理和原理，同时其表征有 3 种形式，除了文字的定性表述，另外两种都是数学方法——解析式和图像.

这或许是物理比数学“难学又难教”的教学层面的原因之二.

5.3 “原理”学习的差异

原理是具有普遍意义的最基本的规律. 科学的原理，由实践确定其正确性，可作为其他规律的基础. 初等数学的原理有加法原理、乘法原理、抽屉原理等等. 初等物理的原理有功能原理、杠杆原理、动能定理和惠更斯原理等等. 我们仅仅从名称上就不难发现，无论是内容还是从内涵，数学的原理比物理的原理简易得多. 就表现形式看，物理的原理比数学的原理要简单得多，但是其内涵和具体应用策略上，物理的原理比数学的原理要复杂得多，主要体现在物理思维的个性化特质上.

比如，组合数学中抽屉原理（鸽巢原理），其“实践情境”：桌上有 10 个苹果，要把这 10 个苹果放到 9 个抽屉里，无论怎样放，我们会发现至少会有一个抽屉里面放不少于 2 个苹果. 这一现象就是我们所说的“抽屉原理”. 我们可以进行数学简单而纯粹的抽象：“如果每个抽屉代表一个集合，每 1 个苹果就可以代表 1 个元素，假如有 $n+1$ 个元素放到 n 个集合中去，其中必定有一个集合里至少有 2 个元素.”第一抽屉原理的应用 1 及其证明. 把多于 $n+1$ 个的物体放到 n 个抽屉里，则至少有一个抽屉里的东西不少于 2 件. 证明：用反证法——如果每个抽屉至多只能放进一个物体，那么物体的总数最多是 $n\times1$，而不是题设的 $n+k(k\geqslant1)$，故不可能.

在这里，研究对象是具体的、纯粹的和有形的“抽屉”和“苹果”，而可以被抽象为任意内涵的“元素”，虽然逻辑的推理是严谨、第次而且明显的（1 个示意图可以表征研究对象），但是，其推理过程是单一的（至少有一个抽屉里的东西不少于 2 件“元素”）；从逻辑方法上，也用到反证法，其逻辑关系清晰，结论也很简单[$n+k(k\geqslant1)$不可能]，没有复杂的情境内涵. 即数学思维具有具体的、机械的和纯粹的特点.

下面对比看看物理学波动理论的惠更斯原理和惠更斯-菲涅耳原理.

惠更斯原理：任意时刻球形波面上的每一点都是一个次级球面波的次波源，次波的波速与频

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

率等于初级波的波速和频率，此后每一时刻的次波波面的包络就是该时刻总的波动的波面. 原理的核心概念是次波源，而且是“点波源”. 原理的应用结论：介质中任一处的波动状态是由各处的波动决定的. 原理的表述和结论都很简洁，其过程的内涵却不是简单的，因为要应用“球面波”和“叠加”两个概念.

在这里，研究对象是具体的、客观的和无形的“机械波的反射、折射和衍射现象”（机械波中，只有水波是有形的），虽然逻辑的推理也是严谨、第次而且浅显的（机械波遇到障碍物时如何传播），但是，其推理过程却不是单一的. 其一，次波源——点波源发出的球面波，如图 1 所示. 其二，叠加的含义是什么——物理矢量的一种加减法，是独立作用原理为前提的，其物理因素是次波面的“叠加”. 其三 ，从逻辑方法上，必须考虑实际的物理情境，即次波面的“叠加”必须在一定的范围内，即如果在远离障碍物的地方继续使用“次波源”，会发现波可能会有绕到“后背”的后退波. 这显然是违背了实际情况的错误. 因此，虽然该原理的逻辑关系清晰，但是结论却不像数学那样的单一：（1）对象是情境式的；（2）对象的结论是有范围的，因果关系是有条件的；（3）惠更斯原理的次波假设没有涉及波的时空周期特性：即没有波长、振幅和位相等概念；（4）没有关注衍射的物理现象和物理机制. 这显然是不完备的. 实际上，衍射区域有明暗相间的条纹出现，所以，后来菲涅耳在惠更斯原理的基础上，补充了“次波相干叠加”的物理原理，给出了次波相位和振幅的定量表示式. 这就是惠更斯-菲涅耳原理. 此时，该原理呈现的不仅有清晰完整的内涵，而且物理思维具有情境的、分析的和个性化的特点.

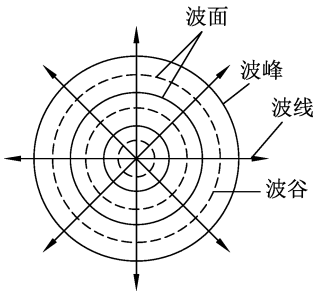

图 1　点波源

实际上，物理规律和物理原理的教学方法并没有任何差异，都需在物理实验基础上展开教学过程. 这一点显然与数学原理的教学方法不同. 这或许是物理比数学“难学又难教”的教学层面的原因之三.

6　结语

最后，作为本文中心论点的又一佐证，再举一例，即我们对解析式 $F=ma$ 的数学意义和物理意义进行简单的比较. 从数学的角度，$F=ma$ 就是一个方程，3 个量中哪一个是未知数无关紧要，其形式无论是 $F=ma$，还是 $F-ma=0$，都不会影响方程的解，小学数学就可以得出结果. 而且 3 个量是等价的，其因果关系可以互逆，即其时空反演是对称的. 然而，从物理学的角度，$F=ma$ 是牛顿第二定律数学公式（定量表达式），姑且不说该方程是高中物理的重点知识，其教与学需要运用控制变量法进行科学探究实验展开，仅方程 $F=ma$ 的本身就包含了 3 层涵义. 第一层：$F=ma$ 是一个矢量式，即 $\boldsymbol{F}_{外}=m\boldsymbol{a}$，而且 $\boldsymbol{F}_{外}=\sum_{i=1}^{n}\boldsymbol{f}_i$ 是系统所受的“合外力”，物理意义非常清晰和具体. 第二层：方程 $F=ma$ 是质点动力学严格因果关系的表示，即左边是力 F，右边是运动状态的改变，$a=\frac{v_2-v_1}{t_2-t_1}$，即物理量在方程的不同位置，其物理意义是不同的. 第三层：该方程或等式 $F=ma$ 两边的物理意义是惯性参考系中质点动力学物理规律因果律的表示. 左边 F 合外力是质点运动产生的“因”，右边的 ma 是质点的运动状态变化，即在惯性参照系中，物体所受合外力不等于 0，该物体的运动状态一定发生了变化：是“因”产生的“果”. 因此，$F=ma$ 与 $F-ma=0$ 这两个方程有本质的区别. 其一：$F-ma=0$ 中的 $F-ma$ 是合力，即 ma 也是一个“力”. 其二：参照系不同，显然 $F=ma$ 是惯性参照系，而 $F-ma=0$ 是非惯性参照系，即 ma 是非惯性参照系的“惯性力”，等式 $F-ma=0$ 的右边等于 0，表示在非惯性参照系中，该“质点”的运动状态并没有发生变化. 因此，对于牛顿第二定律 $F=ma$ 的层次分析和物理内涵，如果我们的物理教师不能够如此地把握，只是一味地要求学生做题，学生可能在相当长的时间内也难以或者根本不可能领会和掌握. 结合这个典型的例子并综上讨论，对于“物理难学又难教”的社会焦虑，我们显然需要给出明确的结论：答案应该是“物理难学不难教！”问题在于我们的物理教师是否名副其实的物理学的学科教师.

参考文献：

1　中华人民共和国教育部. 义务教育物理课程标准（2011 年版）[S]. 北京：北京师范大学出版社，2012.
2　中华人民共和国教育部. 义务教育数学课程标准（2011 年版）[S]. 北京：北京师范大学出版社，2012.
3　中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准（2017 年版 2020 年修订）[S]. 北京：人民教育出版社，2020.

（下转第 12 页）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

利用 Excel 图表处理文档中的数据，拟合图像找寻 $T-g$ 的函数关系，如图 10 所示.

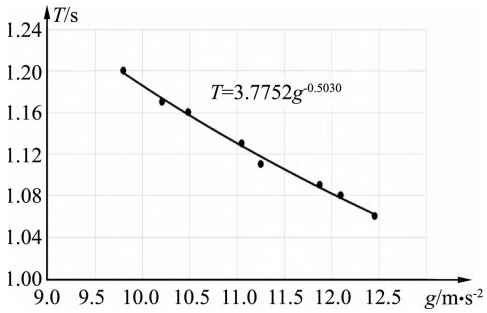

图 10　Excel 拟合找寻 $T-g$ 的函数关系

通过实验数据的处理，用趋势线和显示公式分析得出：在其他条件不变的情况下，单摆的周期 T 与重力加速度 g 的平方根成反比.

教学反思：如何改变重力加速度？引导学生形成等效场的观念：原来在竖直方向上受到恒定外力（重力），想办法把这个恒定的外力增大，由于质量 m 不变，就相当于 g 变大. 如何实现呢？通过分析让学生体会到可以采用改变通过电磁铁的电流来模拟等效重力场的变化，相当于改变了 g 大小，根据 $g=\frac{G}{m}$ 间接测量 g. 培养学生的理解能力，巧妙利用等效思想，培养了学生模型建构、推理论证能力.

综上所述：对单摆周期的研究，学生通过“实验与探究”来完成，培养学生的创造力，激发学生学习物理的热情和探索自然的乐趣，而且在培养学生科学探究这一关键能力的同时，也有益于学生科学态度和责任的养成.

4.5　实践应用，拓展创新

（1）介绍计时器：利用等时性.

惠更斯在 1656 年首先利用摆的等时性发明了带摆的计时器（1657 年获得专利权）.

（2）介绍秒摆. 利用单摆准确地测定各地的重力加速度的方法：由 $T=2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$ 得 $g=\frac{4\pi^2 l}{T^2}$，测出单摆的摆长和周期就可求重力加速度.

（3）拓展练习：图 11 为一双线摆，长度均为 l 的两根线一端都拴在小钢球的同一点，另一端分别固定在天花板上，与竖直方向的夹角均为 θ，小球的直径为 D. 现垂直纸面往外拉动小钢球，让小钢球摆动一个微小的角度后由静止释放. 求当小钢球在垂直纸面的平面内做简谐运动时的周期. $\left(T=2\pi\sqrt{\frac{l\cos\theta+\frac{D}{2}}{g}}\right)$

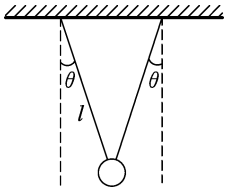

图 11

教师指出：可以自制双线摆测重力加速度的实验教具来解决圆锥摆的问题.

教学反思：利用物理学史，让学生充分领略科学研究历程，树立正确的科学价值观，培养创新意识. 注重知识应用与拓展，加深对单摆公式应用的理解，提高学生解决问题的能力.

5　结束语

总之，基于关键能力培养促进素养提升的物理教学，要对标高考评价体系和课程标准，领悟关键能力的培育要素，明确教学目标，深度挖掘教学资源，把学科教学与信息技术高度融合，引领学生高效学习，提升物理教学效益.

参考文献：

1　教育部考试中心. 中国高考评价体系[M]. 北京：人民教育出版社，2019.
2　程力，李勇. 基于高考评价体系的物理科考试内容改革实施路径[J]. 中国考试，2019(12)：41－47.
3　左祥胜. 基于高考评价体系下的物理试题特点及对教学启示——以 2020 年全国卷、北京卷、山东卷试题为例[J]. 物理教师，2021，42(05)：69－73，76.
4　中华人民共和国教育部. 普通高中物理课程标准（2017 年版 2020 年修订）[S]. 北京：人民教育出版社，2020.
5　陈剑峰，陈金贵，林萍，陈素英. 单摆周期定量探究仪的创新设计[J]. 物理教学探讨，2017，35(08)：54－57.
6　葛德成. 创新实验设计，提高学生的物理学科核心素养[J]. 物理教师，2020，41(04)：52－55，62.
7　孙春成. 基于 U 型过程促进高中物理深度学习——以“单摆”教学为例[J]. 物理教师，2021，42(05)：15－17.

（收稿日期：2022－03－05）

（上接第 7 页）

4　中华人民共和国教育部. 普通高中数学课程标准（2017 年版 2020 年修订）[S]. 北京：人民教育出版社，2020.
5　彭前程. 普通高中教科书・物理[M]. 北京：人民教育出版社，2020.
6　章建跃. 普通高中教科书・数学[M]. 北京：人民教育出版社，2020.
7　张三慧. 大学物理学（第 2 版）[M]. 北京：清华大学出版社，1999.
8　同济大学数学系. 高等数学（第 7 版）[M]. 北京：高等教育出版社，2014.
9　梁昆淼. 数学物理方法（第 4 版）[M]. 北京：高等教育出版社，2010.

（收稿日期：2022－02－16）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net