

基于 ETA 教学模型面向卓越拔尖人才培养的大学物理教学改革

董梅峰 宋新祥 刘冰

(中国石油大学(华东)理学院, 山东 青岛 266580)

摘要 本文基于 ETA 教学模型开展研究性“教”和“学”, 提出面向卓越拔尖人才培养的教学模式, 构建大学物理知识体系, 以知识为载体, 采用课内课外、模拟仿真和现实实验有机结合, 实现挑战性教学, 让学生沉浸式学习科研思维和方法, 进行科研训练, 培养学生的多维能力。

关键词 卓越拔尖人才; ETA; 研究性教学; 挑战性教学; 模拟仿真

REFORM OF UNIVERSITY PHYSICS TEACHING BASED ON ETA TEACHING MODEL FOR CULTIVATING OUTSTANDING TALENTS

DONG Meifeng SONG Xinxiang LIU Bing

(College of Science, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580)

Abstract This paper explores research on “teaching” and “learning” using the ETA teaching model. It aims to develop a teaching mode for cultivating top-notch talents, construct a college physics knowledge system, and use knowledge as a carrier. By combining in class and out of class activities, simulations, and real experiments, it achieves challenging teaching. This approach allows students to immerse themselves in learning scientific research thinking and methods, conduct research training, and develop multidimensional skills.

Key words outstanding and top-notch talents; ETA; research teaching; challenging-based teaching; simulation

2025年3月6日, 习近平总书记在民盟民进教育界联组会上的重要讲话中强调, 强化教育对科技和人才的支撑作用; 2024年9月9日在全国教育大会上强调 2035年建成的教育强国应当具有强大的思政引领力、人才竞争力和科技支撑力等。由此可见, 目前国际竞争的核心是科技和人才, 因此思政引领下的卓越拔尖创新人才的培养尤为迫切。

随着 2009 年基础学科拔尖学生培养试验计划和 2019 年“六卓越——拔尖”计划 2.0 的实施^[1], 各高校积极行动、深入推进改革^[2-9], 建设基础学科卓越拔尖学生培养基地, 开展一流课程(金课)建设; 《教育强国建设规划纲要(2024—2035年)》^[10]中指出完善拔尖创新人才发现和培养机制, 在战略急需和新兴领域, 探索国家拔尖创新人才培养新模式, 打造一流核心课程。而一流核心

收稿日期: 2025-05-07

基金项目: 校级教改项目“深度融合价值塑造、能力培养与知识传授、构建 AI 赋能的大学物理课程体系”(项目编号: CM2024049); 2025 山东省本科教学改革研究项目“人工智能+光电信息”复合型人才培养模式研究”(项目编号: M2024063)。

通信作者: 董梅峰, dongmf@upc.edu.cn。

引文格式: 董梅峰, 宋新祥, 刘冰. 基于 ETA 教学模型面向卓越拔尖人才培养的大学物理教学改革[J]. 物理与工程, 2025, 35(4): 104-111.

Cite this article: DONG M F, SONG X X, LIU B. Reform of university physics teaching based on ETA teaching model for cultivating outstanding talents[J]. Physics and Engineering, 2025, 35(4): 104-111. (in Chinese)

课程建设中,最基础、最本质、最关键的部分是课程内容和教学方式^[11],物理学作为基础核心课程,其课程内容和教学模式对培养卓越拔尖人才具有重要的意义。

ETA (experiment-theory-application) 教学模型由北京大学穆良柱教授提出,基于该模型同时提出了 ETA 物理教学法和 ETA 物理学习法^[12-15]。概言之,物理的认知由实验物理 (Experimental Physics) 认知、理论物理 (Theoretical Physics) 认知和应用物理 (Applying Physics) 认知三个阶段组成。基于 ETA 物理教学模型构建的教学内容和教学过程,具有一定的深度、广度和挑战度,能训练科学认知能力,构建科学认知模型、训练科学方法、培养创新能力、养成科学精神,有助于培养卓越拔尖人才。

1 基于 ETA 面向拔尖人才培养的教学模式

物理学的发展过程是人类对自然界各种物理现象本质的科学探究认知过程,往往是某种自然现象 (Natural Problem) 率先引起了物理学家的研究兴趣,经过高度抽象模型化并搭建实验 (Experimental) 进行定量的研究,从而得到现象背后的本质理论 (Theoretical),最后将得到的理论进行实际应用 (Applying) 解释自然现象,同时采用科学思维方法进行拓展研究应用,开展前沿挑战性问题 (Challenging Problem) 探索研究。物理学的发展经历了观察自然现象——设计实验——得出理论——理论应用——再实验、再理论、再应用直至科学前沿的螺旋式上升的历程,如图 1 所示。教

学中遵循物理学发展历程,采用 NP-ETA-CP 教学模式,让学生在课内课外沉浸式地进行科研训练,有助于培养卓越拔尖创新人才。

2 NP-ETA-CP 教学内容设计思路案例

经过各种形式选拔后的拔尖学生在智力和能力方面是超群的,在教学内容上需要与学生能力相匹配的“挑战性教学内容”,清华大学林健教授提到要保证卓越拔尖人才核心能力和素养的培养与提升^[5],必须提高课程学业的挑战度,挑战性教学内容满足四个重要的特点,即趣味性、前沿性、综合性、开放性的特点。挑战性教学内容首先要能激发学生的兴趣,正如陈发虎院士专访时谈到^[9],拔尖创新人才做科研创新的天赋关键是激发学生的科研兴趣,进而激发他们的潜能;NP-ETA-CP 的教学内容从有趣的自然现象入手,最后落脚点为有趣的前沿科学研究问题,这些内容不仅能激发学生的兴趣和潜能,在兴趣的引领下也能保证走的更远,最后发展成为其志趣。

下面以大学物理“振动”知识模块教学为例说明 NP-ETA-CP 教学内容的设计思路。

2.1 从 NP 到 E 的教学设计

引导学生认识自然界有趣的振动现象,例如:秋千的振动、声带的振动、心脏的跳动、耳朵鼓膜的振动等自然现象;同时鼓励学生自行探索自然界有趣的振动现象。引导学生抓住周期性运动这个主要因素,设计弹簧振子或单摆等实验装置引入课堂开展小组研究性“教”和“学”。

2.2 建立理论 T 认知

在小组实验探究的基础上,引导学生在思维上高度抽象理想化建立物理模型,首先忽略各种摩擦阻尼因素,抓住周期性运动现象的本质,从受力上分析得出简谐振动的规律

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (1)$$

再在简谐振动的基础上考虑实际振动最终会停止的本质,考虑振子的速度不是太大的情况下阻力的表示形式,从力学上分析得出阻尼振动的规律

$$-kx - \gamma \frac{dx}{dt} = m \frac{d^2x}{dt^2} \quad (2)$$

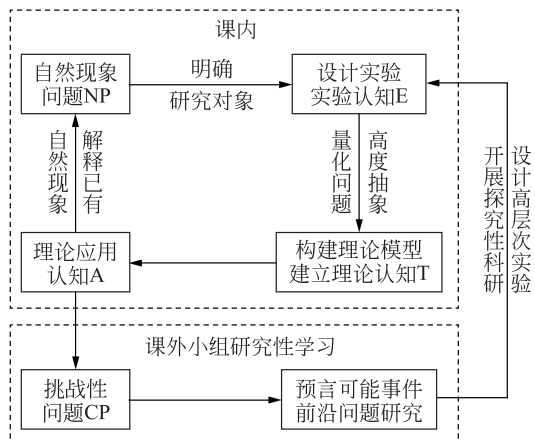


图1 NP-ETA-CP 教学模式示意图

其中, γ 为阻力系数。

最后若要考虑使实际振动保持周期性振动永不停止, 在阻尼振动的基础上受到一个动力的作用, 例如受到一个周期性外力 $F_0 \cos \omega t$, 从力学上分析得出受迫振动的规律

$$-kx - \gamma \frac{dx}{dt} + F_0 \cos \omega t = m \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (3)$$

2.3 理论应用 A 认知

引导学生利用得到的物理规律解释自然现象, 同时让学生多角度思考物理理论的拓展应用方向, 例如在物理规律模拟仿真可视化、不同数学表达形式、不同应用领域等角度去思考理论的应用, 并在课外进行科研训练。

2.3.1 物理规律模拟仿真可视化研究

科学研究离不开软件模拟, 科学计算能力是卓越拔尖创新人才必备的一项能力, 利用科学软

件模拟仿真有助于把抽象、复杂、综合性物理问题进行可视化研究, 同时也可进行前沿物理问题的研究, 并形成研究性报告。实践表明学生把抽象复杂的物理规律模拟仿真出静态或动态可视化图像的时刻, 大都感到眼前一亮, 提高了问题研究的趣味性, 激发学生进行深入研究兴趣。

教师在课内课外引导学生利用科学计算软件实现物理规律的可视化研究, 例如用 MATLAB 软件引导学生探究单摆的最大角位移对振动周期的影响, 如图 2 所示。由图 2(a) 可以看出最大摆角小于 5 度时振动周期可以认为保持不变, 既可以视为简谐振动; 图 2(b) 显示当最大摆角大于 10 度之后振动周期就随最大摆角的变化而变化了, 即不能视为简谐振动。通过计算机模拟仿真可以让学生直观的看到并理解简谐振动小角度的条件。由图 2(c) 和图 2(d) 可以让学生直观的看到

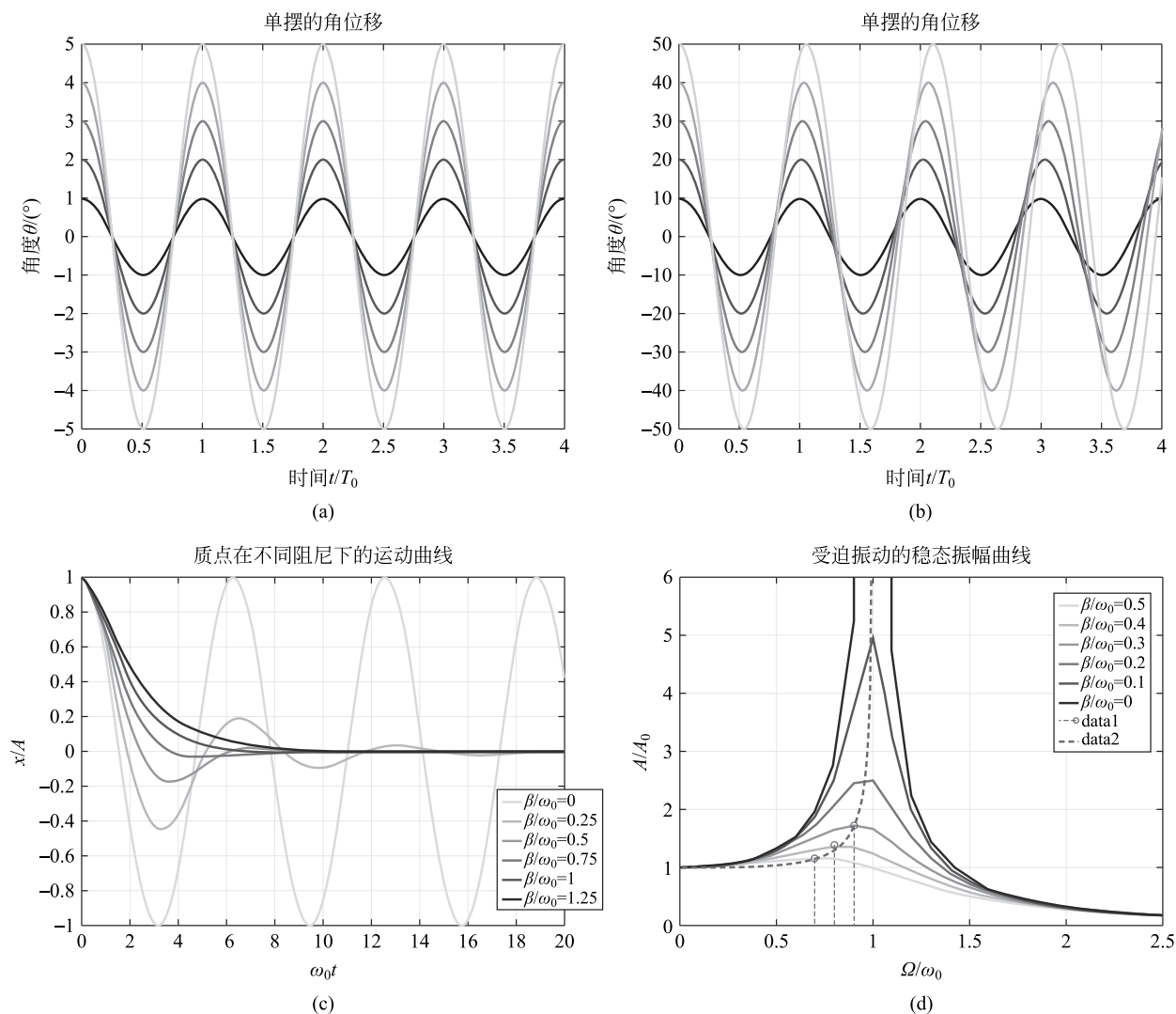


图 2 振动可视化模拟仿真图

在不同阻尼下的振动情况以及受迫振动位移共振的情况。

2.3.2 物理规律不同数学表达形式——厄米和非厄米物理问题

同一物理规律可以采用不同的数学工具进行描述,不同的描述形式有助于洞察物理规律的本质内涵,有助于物理规律拓展应用到前沿研究领域。

例如,简谐振动不考虑振动系统与外界的能量交换,因此,简谐振动系统可视为一个封闭系统。式(1)可写为

$$\ddot{x} + \omega^2 x = 0 \quad \text{或} \quad \ddot{x} = -\omega^2 x \quad \left(\text{其中} \frac{k}{m} = \omega^2 \right)$$

上式可以变为下面的矩阵形式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

进一步可以写为

$$i \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } u = \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix}$$

则方程变为

$$i \frac{d}{dt} u = J u \quad (4)$$

其中,矩阵 J 的转置共轭还是 J 本身,所以矩阵 J 是厄米矩阵,该物理问题属于厄米物理问题。

阻尼振动系统有能量损失,是一个开放系统。式(3)可写为

$$\ddot{x} - \Gamma \dot{x} + \omega^2 x = 0 \quad \text{或} \quad \ddot{x} = -\omega^2 x + \Gamma \dot{x}$$

$$\left(\text{其中: } \frac{k}{m} = \omega^2, \Gamma = -\frac{\gamma}{m} \right)$$

类比前面简谐振动的推导,上式可写成下面的矩阵形式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega^2 & \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix}$$

进一步可以写为

$$i \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ \omega & i\Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix}$$

$$\text{令 } u = \begin{bmatrix} \omega x & i\dot{x} \end{bmatrix}, J = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ \omega & i\Gamma \end{bmatrix}$$

则方程变为

$$i \frac{d}{dt} u = J u \quad (5)$$

其中,矩阵 J 的转置共轭不等于 J 本身,所以矩阵 J 是非厄米矩阵,该物理问题属于非厄米物理问题。这种数学描述形式可拓展应用到其他研究领域,例如在量子力学中薛定谔方程为

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \hat{H} \Psi \quad (6)$$

其中, $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + U$ 在矩阵量子力学中称为哈密顿算符或能量算符。以一维哈密顿算符 $\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} + U$ 为例,可以证明哈密顿算符是厄米算符。第一项 $\hat{T} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ 为动能算符,由于算符是作用在波函数上的,对任意两个波函数 $\Psi(x)$ 和 $\phi(x)$,动能算符是厄米算符的条件为 $(\Psi(x), \hat{T}\phi(x)) = (\hat{T}\Psi(x), \phi(x))$ 两个内积相等,引导学生经过两次分部积分可以证明上面两个内积相等,即动能算符为厄米算符,由于势能函数 U 是实函数,易证势能算符也为厄米算符,由于两个厄米算符之和仍为厄米算符,所以哈密顿算符为厄米算符,因此封闭系统的量子力学问题是厄米问题,对于开放的量子系统是非厄米问题。

算符。第一项 $\hat{T} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2}$ 为动能算符,由于算符是作用在波函数上的,对任意两个波函数 $\Psi(x)$ 和 $\phi(x)$,动能算符是厄米算符的条件为 $(\Psi(x), \hat{T}\phi(x)) = (\hat{T}\Psi(x), \phi(x))$ 两个内积相等,引导学生经过两次分部积分可以证明上面两个内积相等,即动能算符为厄米算符,由于势能函数 U 是实函数,易证势能算符也为厄米算符,由于两个厄米算符之和仍为厄米算符,所以哈密顿算符为厄米算符,因此封闭系统的量子力学问题是厄米问题,对于开放的量子系统是非厄米问题。

2.3.3 不同应用领域的应用——场与物质的作用

把物理规律应用到不同的研究领域,有助于解决综合性挑战问题,培养学生的创新能力和发散思维。例如引导学生把受迫振动应用到“场”(磁场、光场等)与物质作用的研究领域。当电子距离原子实比较近的时候,电子主要受该原子实的束缚力作用,电子的运动主要受到该原子实的势场影响,此时电子的行为与孤立原子中电子的行为相似。可以把孤立原子看成是一个所谓的零级近似,把其他原子势场的影响看成微扰,这种方法称为紧束缚近似。在紧束缚模型下,电子在围绕原子核做受迫振动的过程中受 3 个力的作用,即原子核对电子的作用力(对应谐振子项)、阻力(对应阻尼项)、策动力(对应外场项),其受迫振动的动力学方程为

$$m_e \frac{d^2 x}{dt^2} + \gamma m_e \frac{dx}{dt} + Kx = -eE_0 e^{-i\omega t}$$

由上述公式可以讨论外场(例如光场)与物质作用的性质。求解上述动力学方程可得

$$x = \frac{e/m_e}{\omega^2 + \gamma i \omega - \omega_0^2} E_0 e^{-i\omega t}$$

其中, $\omega_0^2 = \frac{K}{m_e}$ 称为本征频率。

由 $\mathbf{p} = -e\mathbf{x}$, 考虑到材料内部单位体积内由 N_0 个原子, 则单位体积所有原子的电偶极矩的和也就是电偶极矩为 $\mathbf{P} = N_0 \mathbf{p}$, 令 $\omega_p^2 = N_0 e^2 / \epsilon_0 m_e$ 称为材料的体等离子频率, 可得

$$\mathbf{P} = N_0 \mathbf{p} = \frac{\epsilon_0 \omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (7)$$

由电磁学知识得知

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \mathbf{E} = \epsilon_0 (\epsilon_r - 1) \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (8)$$

由式(7)(8)可得

$$\epsilon_r = 1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega} \quad (9)$$

真空中的光速 $c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$, 介质中的光速 $v =$

$\frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \epsilon_r \mu_r}} = \frac{c}{n}$, 所以 $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$, 考虑到光在弱磁质(非铁磁质)中传播, 此时相对磁导率 $\mu_r \approx 1$, 所以介质的折射率为

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r} \approx \sqrt{\epsilon_r} = \sqrt{1 + \frac{\omega_p^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\gamma\omega}} \quad (10)$$

折射率出现了虚部, 虚部描述吸收特性, 虚部较大意味着进入金属内部的光会迅速被吸收并转化为其他形式的能量, 这也是金属在光学应用中需要考虑的重要因素, 例如在设计光学滤波器时, 需要根据金属的虚部来选择合适的材料, 以实现对特定波长光的吸收和过滤。

虚部影响金属表面等离子体激元的激发和传播。表面等离子体激元是金属表面自由电子集体振荡与光波相互作用形成的一种电磁模式, 虚部会影响其激发效率、传播距离和损耗等特性。在纳米光子学等领域, 利用金属的这一特性可以实现光的局域增强、亚波长光学器件等应用, 虚部的大小直接关系到这些应用的性能和效果。

当施加一个均匀的外磁场 $\mathbf{B}_0$ 时, 在上面讨论的受迫振动的基础上, 还要考虑洛伦兹力 $e\mathbf{v} \times \mathbf{B}_0$, 通过求解动力学方程, 可以讨论更多有趣的现象, 例如法拉第旋光效应现象和经典 Zeeman 效应现象。

2.4 挑战性问题 CP

在上述应用思路拓展的基础上, 学生具备了物理实验认知、物理理论认知和物理应用认知, 具

备了一定的科研思维和方法, 进一步引导鼓励学生以小组为团队在课外开展挑战性问题研究, 进行科研训练, 积累知识、科研能力、科研方法和科研素养, 从而培养学生的创新能力。根据教学内容合理设置挑战性问题有助于卓越拔尖创新人才的培养。

例如基于上述振动的拓展应用, 可以进一步引导学生在以下前沿开展挑战性问题研究。自然界中真实的物理系统, 由于耗散现象普遍存在, 存在能量、粒子和信息的丢失, 物理量的守恒性往往受到破坏, 此时物理系统是开放系统, 在开放的量子系统中引入非厄米哈密顿量将带来极大方便^[16-18], 哈密顿量在开放系统中是非厄米的。非厄米哈密顿量在一定条件下仍可保证系统能量本征值为实数^[19-20]。非厄米系统的能量本征值是复数, 可作为传统量子力学理论在复数域的拓展。非厄米系统与开放和耗散系统联系紧密, 它具有诸多新奇性质、现象和应用, 引起了广泛的研究兴趣。典型的非厄米哈密顿量包括宇称-时间对称哈密顿量和赝厄米对称哈密顿量, 这些哈密顿量以各种各样的特性引起了人们的广泛关注, 如奇异点^[21-25]、非厄米拓扑^[26]、非厄米趋肤效应^[27]、非厄米光学系统^[28]等。

基于受迫振动的场与物质的相互作用可以预言很多有趣的现象, 例如负折射率^[29]、电磁感应透明^[30]等, 在光速调控、量子信息方面也有很多应用。

3 NP-ETA-CP 教学实现“三观”培养

2020 年教育部关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》^[31] 的通知中指出, 要落实立德树人的根本任务, 必须将价值塑造、知识传授和能力培养三者融为一体, 帮助学生塑造正确的世界观、人生观、价值观。

世界观是对世界(包括自然、社会和思维等)的根本看法, NP-ETA-CP 教学注重引导学生从客观的自然现象入手研究现象背后的物理规律, 并以实验验证作为有力的证据, 有助于学生对自然界的规律有一个客观的认知, 形成科学的世界观。

人生观是对人生目的、意义和生活方式的态度, NP-ETA-CP 教学中会涉及许多国内外科学家(吴有训、邓稼先、郭光灿、潘建伟、薛其坤、法拉

第、普朗克等)的故事、科学家的精神引导学生形成科学的人生观。例如在讲授康普顿散射时,引入吴有训先生在科研与教育等领域所做出的贡献和宝贵的科学精神有助于学生形成科学的人生观。

价值观是衡量事物重要性的尺度。NP-ETA-CP 教学引导学生抓住重要核心有价值的问题进行有效研究,例如质点、刚体、简谐振动、简谐波、理想气体等物理模型的建立都是在引导学生抓住核心问题,核心问题的规律清楚了,次要的问题迎刃而解,例如由于自然界中任何物质都可以视为由无数个质点构成,质点的运动规律清晰了之后,所有物质的运动规律就迎刃而解了,有助于形成科学的价值观。

4 NP-ETA-CP 教学实现科学思维方法和科学精神的培养

NP-ETA-CP 按照物理学家探索物理规律的认知过程设计教学内容,用科学思维方法引导学生去认识、分析、解决问题,例如类比法、控制变量法、主次法、等效法、图像法、建模法、复杂问题拆分法、逻辑归纳法、逆向思维法、微扰法、猜想假说法等多种科学思维方法。例如在讲授磁矩在外磁场中受磁力矩平衡时,可用微扰法分析稳定的平衡态和不稳定的平衡态;例如前面提到的力学中的厄米和非厄米问题可以与量子领域以及电路中厄米和非厄米物理问题进行类比,从而可以用设计非厄米电路的实验方法探究量子领域的非厄米问题。

物理学的发展过程是许多科学家追求真理勇攀科学高峰的过程,NP-ETA-CP 教学模式按照物理学家科学研究的思路进行教学,教学中学生能深刻体会物理学家在探究物理现象背后蕴藏的物理本质规律过程中体现出来的追求真理、不怕失败、团队协作、勇攀科学高峰等科学精神,同时也可以厚植爱国主义情怀,激发学生科技报国的家国情怀和使命担当。例如在讲授法拉第电磁感应定律时,引入他不断尝试各种实验方案的故事,坚持了十年之久,凭借着坚韧不拔的毅力和对科学真理的执着追求,终于发现了电磁感应的实验现象;例如在讲授霍尔效应时,可拓展引入薛其坤院士团队生长和测量了超过 1000 个样品,克服了重

重障碍,从实验上首次观测到量子反常霍尔效应,该成果发表在美国《科学》(Science)杂志。薛其坤院士强调说:“这是我们团队精诚合作,联合攻关的共同成果,是中国科学家的集体荣誉”。

5 结语

面向卓越拔尖创新人才的 NP-ETA-CP 教学模式遵循物理学发展的规律,教学中采用 ETA 教学方法,通过课堂内外以小组进行科研学习和科研训练实践,激发学生的兴趣、潜能,培养实践能力、创新能力和热爱科学积极探索的精神,培养学生的发散思维、抽象思维、逆向思维、创造思维等科学思维能力,掌握类比、分类、主次、高度简化、转化、归纳、猜想等科学研究方法。

实践发现小组团队的教学方式不仅让学生把科学知识、科学计算能力和解决问题的技能结合起来,同时也能培养学生有效的沟通协作、撰写报告、创新以及为复杂问题寻找解决方案的能力。特别是小组团队通过课外合作研究性学习,将知识和能力应用于实践,真正实现互助学习、自主学习,实现头脑风暴,有助于解决具有挑战性的开放问题。

通过 NP-ETA-CP 教学模式在本校卓越班、拔尖班、理科实验班和本研一体班的实践,得到了师生的认可,上述班级参加校级、国家级创新项目的人数较之前显著增加,本研一体班的学生较之前更容易上手科研。实践成果证明 NP-ETA-CP 在培养卓越拔尖创新人才方面是行之有效的一种教学模式。

参 考 文 献

- [1] 教育部高等教育司. 中国高等教育的质量革命启动实施“六卓越一拔尖”计划 2.0 有关情况[EB/OL]. [2019-04-29]. http://www.moe.gov.cn/fbh/live/2019/50601/sfcl/201904/t20190429_379943.html
Department of Higher Education Ministry of Education. The quality revolution of higher education in China has been launched, and the implementation of the “Six Excellences and One Top” Plan 2.0 is underway[EB/OL]. [2019-04-29]. http://www.moe.gov.cn/fbh/live/2019/50601/sfcl/201904/t20190429_379943.html. (in Chinese)
- [2] 杨丹,康国政,崔凯,等. 分类分层,自主培养,构建研究型行业特色高校卓越拔尖人才培养体系[J]. 高等工程教育研究, 2024,(5):1-5.

- YANG D, KANG G Z, CUI K, et al. Categorized and stratified self-cultivation: Constructing a cultivation system of excellence and top-notch talents in industry-characteristic research university[J]. *Research in Higher Education of Engineering*, 2024, (5): 1-5. (in Chinese)
- [3] 王世强,葛丽丽,宋艳. 拔尖创新人才培养背景下高等教育学业评价改革探索及实践[J]. *中国大学教学*, 2024, (12): 43-49.
- WANG S Q, GE L L, SONG Y. Exploration and practice of higher education academic evaluation reform under the background of cultivating top notch innovative talents[J]. *China University Teaching*, 2024, (12): 43-49. (in Chinese)
- [4] 李芹,杨坪萍,郭丽君,等. 基于卓越拔尖人才培养的生化实验教学改革[J]. *实验室研究与探索*, 2024, 43(12): 127-130, 160.
- LI Q, YANG P P, GUO L J, et al. Teaching reform of biochemistry experiments for cultivating excellent and outstanding talents[J]. *Research and Exploration in Laboratory*, 2024, 43(12): 127-130, 160. (in Chinese)
- [5] 林健. 面向“六卓越——拔尖”人才培养的挑战性学习[J]. *清华大学教育研究*, 2020, 41(2): 45-58.
- LIN J. The challenge-based learning for “Six Excellence and One Top-notch” talent training[J]. *Tsinghua Journal of Education*, 2020, 41(2): 45-58. (in Chinese)
- [6] 田雪,徐小利,范雨婷. 我国拔尖创新人才培养研究现状、热点与前沿——基于 Cite Space 可视化分析[J]. *高等理科教育*, 2024, (6): 66-75.
- TIAN X, XU X L, FAN Y T. Status quo, hotspots and frontier of China's top innovative talents—Visualization analysis based on CiteSpace[J]. *Higher Education of Sciences*, 2024, (6): 66-75. (in Chinese)
- [7] 张辉蓉,覃若男. 我国拔尖创新人才自主培养政策的实践样态、现实困境与破解策略——基于政策网络理论的视角[J/OL]. *西南大学学报(社会科学版)*, 1-13[2025-03-12].
- ZHANG H R, TAN R N. Practice, dilemma and strategies of independent cultivation policy for top-notch innovative talents in China—From the perspective of policy network theory[J/OL]. *Journal of Southwest University (Social sciences Edition)*, 1-13[2025-03-12]. (in Chinese)
- [8] 余华,吴宵宵,赵爽,等. 物理学拔尖学生创新综合素质提升: 理论解析、南开实践与路径优化[J]. *高等理科教育*, 2023, (5): 31-36.
- YU H, WU X X, ZHAO S, et al. Improving the innovative comprehensive quality of talent training in physics: Theoretical analysis, Nankai practice and path optimization[J]. *Higher Education of Sciences*, 2023, (5): 31-36. (in Chinese)
- [9] 赵春晖,李世萍,赵宗孝. 鼓励超越: 拔尖创新人才培养之道——陈发虎院士专访[J]. *高等理科教育*, 2024, (2): 1-7.
- ZHAO C H, LI S P, ZHAO Z X. Encouraging excellence: The path to cultivating top-notch innovative talent—An interview with academician Chen Fahua[J]. *Higher Education of Sciences*, 2024, (2): 1-7. (in Chinese)
- [10] 中华人民共和国教育部,中共中央、国务院印发《教育强国建设规划纲要(2024—2035年)》[EB/OL]. (2025-01-19) [2025-01-23]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xxgk/moe_1777/moe_1778/202501/t20250119_1176193.html. Ministry of Education of the People's Republic of China. The Central Committee of the Communist Party of China and the State Council have issued the “Outline of the Plan for Building an Education Strong Country (2024—2035)” [EB/OL]. (2025-01-19) [2025-01-23]. http://www.moe.gov.cn/jyb_xxgk/moe_1777/moe_1778/202501/t20250119_1176193.html. (in Chinese)
- [11] 赵志宏,姚山季,庄雷. 一流课程教学质量保障研究[J]. *中国大学教学*, 2025, (Z1): 103-107.
- ZHAO Z H, YAO S J, ZHUANG L. Research on quality assurance in first-class course teaching[J]. *China University Teaching*, 2025, (Z1): 103-107. (in Chinese)
- [12] 穆良柱. 什么是 ETA 物理认知模型[J]. *物理与工程*, 2020, 30(1): 29-33.
- MU L Z. What is ETA physical cognition model[J]. *Physics and Engineering*, 2020, 30(1): 29-33. (in Chinese)
- [13] 穆良柱,华靖. ETA 物理教学法应用案例之静电场篇[J]. *物理与工程*, 2021, 31(6): 3-10.
- MU L Z, HUA J. How to teach static electric field using ETA cognition model[J]. *Physics and Engineering*, 2021, 31(6): 3-10. (in Chinese)
- [14] 潘崇佩,李文华,徐音,等. 基于 ETA 教学模型的辐射与物质相互作用及屏蔽原理虚拟仿真实验设计[J]. *实验技术与管理*, 2024, 41(11): 114-122.
- PAN C P, LI W H, XU Y, et al. Virtual simulation experiment design of radiation-matter interaction and shielding principle based on ETA teaching model[J]. *Experimental Technology and Management*, 2024, 41(11): 114-122. (in Chinese)
- [15] 姜永静,武晓霞,郑月峰,等. ETA 物理教学法在大学物理实验教学中的应用——以弦振动与驻波实验教学为例[J]. *物理与工程*, 2024, 34(4): 91-97.
- JIANG Y J, WU X X, ZHENG Y F, et al. Application of ETA physical teaching method in college physics experiment teaching—Taking the string vibration and standing wave experiment teaching as an example[J]. *Physics and Engineering*, 2024, 34(4): 91-97. (in Chinese)
- [16] DING P, YI W. Two-body exceptional points in open dissipative systems[J]. *Chinese Physics B*, 2022, 31(1): 72-76.
- [17] HU Z X, XIA R X, SABREKAIS C A. A quantum algorithm for evolving open quantum dynamics on quantum computing devices[J]. *Scientific Reports*, 2011, 10(1): 3301.

- [18] ASHIDA Y, GONG Z, UEDA M. Non-Hermitian physics[J]. *Advances in Physics*, 2020, 69(3): 249-435.
- [19] BENDER C M. Making sense of non-Hermitian Hamiltonians (Article)[J]. *Reports on Progress in Physics*, 2007, 70(6): 947-1018.
- [20] MOSTAFAZADEH A. Pseudounitary operators and pseudounitary quantum dynamics[J]. *Journal of Mathematical Physics*, 2004, 45(3).
- [21] 唐原江, 梁超, 刘永椿. 宇称-时间对称与反对称研究进展[J]. *物理学报*, 2022, 71(17): 32-43.
TANG Y J, LIANG C, LIU Y C. Research progress of parity-time symmetry and anti-symmetry[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71(17): 171101. (in Chinese)
- [22] 张禧征, 王鹏, 张坤亮, 等. 非厄米临界动力学及其在量子多体系统中的应用[J]. *物理学报*, 2022, 71(17): 44-56.
ZHANG X Z, LANG C, LIU Y C, et al. Non-Hermitian critical dynamics and its application to quantum many-body systems[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71(17): 174501. (in Chinese)
- [23] 白凯. 非线性非厄米奇异点的研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2023.
BAI K. Exploring non-linearity in exceptional singularities of non-Hermitian systems[D]. Wuhan: Wuhan University, 2023. (in Chinese)
- [24] 耿琳琳, 袁锦波, 程文等. 非厄米力学系统基本原理与研究进展[J]. *力学进展*, 2024, 54(1): 1-60.
GENG L L, YUAN J B, CHENG W, et al. Fundamental principles and research progress of non-Hermitian mechanical systems[J]. *Advances in Mechanics*, 2024, 54(1): 1-60. (in Chinese)
- [25] KLAUCK F U J, HERINRICH M, SZAMEIT A, et al. Crossing exceptional points in non-Hermitian quantum systems[J]. *Science advances*, 2025, 11(2): eadr8275.
- [26] ZHU X L, PENG T, et al. Non-Hermitian quasicrystal-line topological insulators[J]. *Physical Review B*, 2025, 111(3): 035305.
- [27] TEO H T, MANDAL S, LONG Y, et al. Pseudomagnetic suppression of non-Hermitian skin effect[J]. *Science Bulletin*, 2024, 69(11): 1667-1673.
- [28] SURJAN P R, SZABADOS A, GOMBAS A. Real eigenvalues of non-hermitian operators[J]. *Molecular Physics*, 2024, 122: e2285034.
- [29] 许森东. 艾里涡旋光束通过负折射率介质的传输特性[J]. *激光技术*, 2022, 46(6): 850-854.
XU S D. Study on propagation properties of vortex Airy beams through negative index medium[J]. *Laser Technology*, 2022, 46(6): 850-854. (in Chinese)
- [30] 夏刚, 张亚鹏, 汤婧雯, 等. 电磁感应透明条件下里德伯原子系统的亚稳动力学[J]. *物理学报*, 2024, 73(10): 175-183.
XIA G, ZHANG Y P, TANG J W, et al. Metastable dynamics of Rydberg atomic system under electromagnetically induced transparency[J]. *Acta Phys. Sin.*, 2024, 73(10): 104203. (in Chinese)
- [31] 教育部关于印发《高等学校课程思政建设指导纲要》的通知[EB/OL]. 2020-06-01. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html.
Ministry of Education of the People's Republic of China. Notice of the Ministry of Education on Issuing the Guiding Outline for Ideological and Political Construction of Higher Education Curriculum [EB/OL]. 2020-06-01. http://www.moe.gov.cn/srcsite/A08/s7056/202006/t20200603_462437.html. (in Chinese)

(上接第 92 页)

- [8] 李祺, 徐天一, 李孟国, 等. 项目式实践教学与课程思政的融合探索——以电工电子综合课程设计课为例[J]. *大学教育*, 2023(3): 84-86.
LI Q, XU T Y, LI M G, et al. Integrating project-based learning with curriculum ideology and politics: A case study of comprehensive electrical and electronic course design[J]. *University Education*, 2023(3): 84-86. (in Chinese)
- [9] 张洪玉, 尹文生, 柴智敏. 结合“三位一体”的理实一体化教学模式探索[J]. *高教学刊*, 2024, 10(28): 21-24.
ZHANG H Y, YIN W S, CHAI Z M. Exploring a trinity-integrated theory-practice teaching model: Synergizing knowledge, skills, and values in pedagogical innovation[J]. *Journal of Higher Education*, 2024, 10(28): 21-24. (in Chinese)
- [10] 曹蓉, 奚家米, 倪小勇. 基于交叉融合理念的地方综合性大学实践教学体系构建[J]. *中国大学教学*, 2023(8): 71-75.
CAO R, XI J M, NI X Y. Constructing an Interdisciplinary practice-oriented teaching system in regional comprehensive universities: A convergence-based approach[J]. *China University Teaching*, 2023(8): 71-75. (in Chinese)
- [11] 朱健民. 新时代如何加强课程、教材及学习者的融合[J]. *中国大学教学*, 2018(9): 93-96.
ZHU J M. Enhancing curriculum-materials-learner convergence in the new era: A tripartite integration framework for digital-age education[J]. *China University Teaching*, 2018(9): 93-96. (in Chinese)
- [12] 施星君. “两翼”产教融合体建设的理论研究综述、实践探索及推进策略[J]. *教育与职业*, 2024, 1069(21): 46-53.
SHI X J. Industry-education convergence ecosystem with dual wings: A systematic review, practical implementation, and strategic roadmap for integrated development[J]. *Education and Vocation*, 2024, 1069(21): 46-53. (in Chinese)