

第一章

应用型大学物理实验课程的建设

第一节 物理学与人类文明的关系

物理学是研究物质、能量和物质间的相互作用的学科，是关于自然界最基本形态的学科。它研究宇宙间物质存在的各种基本形式、内部结构以及相互作用，研究它们的性质、运动和转换，从而认识这些结构的组元及其整体的运动和转换的基本规律。

一、物理学与科学技术之间的关系

物理规律具有最大的普适性，物理学是自然科学中的基础学科。

1999年3月召开的第23届国际纯粹与应用物理联合会（IUPAP）代表大会通过的决议指出：

物理学是一项国际事业，它对人类未来的进步起着关键的作用。对物理学教育的支持和研究，对所有国家来说都是重要的，理由如下。

（1）学习和研究物理学是一项激动人心的智力探险活动，它鼓舞着年轻人，并扩展着我们关于大自然知识的疆界。

（2）物理学发展着未来进步所需的基本知识，而技术进步将持续驱动着世界经济发动机的运转。

（3）物理学为科学进步和技术的发明应用提供了训练有素的人才。

（4）物理学在培养化学家、工程师、计算机科学家及其他物理科学和生物医学科学工作者的教育中，是一个重要的组成部分。

（5）物理学扩展和提高我们对其他学科的理解，诸如空间科学、信息科学、地球科学、农业科学、化学、生物学、环境科学及天文学和宇宙学等，这些学科对世界上所有民族都是至关重要的。

（6）物理学提供了应用于医学的新设备和新技术所需的基本知识，如计算机层析术（CT）、磁共振成像、正电子发射层析术、超声波成像和激光手术等，改善了人们的生活质量。

物理学是技术发展的主要源泉，三次产业革命（蒸汽机、电气化、信息化）均来自物理学或与物理学紧密相关。

第一次产业革命以1774年蒸汽机的发明为标志，主要由纺织机改革引起的动力需求产

生了近代的**纺织业和机械制造业**，使得人类进入到利用机器延伸和发展人类体力劳动的时代。其科学技术的**理论基础**是伽利略自由落体定律、开普勒行星运动三大定律和牛顿在《自然哲学和数学原理》中建立的完整力学体系。

第二次产业革命是以 1875 年发电机应用为工业标志的**电气化**，实现了生产方式的电气化。其**理论基础**是 1820 年的电磁现象（电动机原理），1831 年的电磁感应定律（发电机原理）和 1840 年的电磁波理论。

第三次产业革命是以 1946 年发明的计算机为标志的新信息技术革命，其核心是以微电子技术为基础的**电子信息技术**，实现了生产方式的自动化，并向信息化、智能化方向发展，包括新材料、新能源、生物工程、海洋工程、航空航天技术和电子信息技术等。其**理论基础**是量子力学和相对论。

二、物理学认识框架对自然科学世界图景的影响

物理学不仅是整个自然科学和现代工业技术的基础，也是人类认识真实世界的起点和描述自然界的方法，不同时期的人们生活在当时物理学认识框架形成的自然科学世界图景里，采用当时的物理学工作语言、概念和物理图像来描绘世界并用于工作和生活，特别是近代，物理学所带来的应用技术已经前所未有地改变着人类的生活方式。

1. 物理学三种认识框架的变迁

物理学的认识框架主要是指空间、时间以及把空间、时间与万物运动联系在一起的数学关系。所有的框架都是在一定的历史范畴下出现的，它所承载的也是在当时历史条件下人类所认识的主要事物。亚里士多德、牛顿、爱因斯坦都在自己所属的时代建立了各自的框架，把当时人们关心的大部分问题放入了他们的框架。

亚里士多德把空间描绘得像一座堂皇的古建筑，在那里可以容纳各种不同类型的物，并按照当时人们所能理解的方式描述了这些物的运动。在亚里士多德框架中对可见事物的那些具体安排，随着时代的进步都被改变了。但是到现在，科学家们仍采用亚里士多德提出的三段式逻辑规则，即公理—逻辑演绎—逻辑结果。

随着人类认识的扩展，框架内的格子被装得越来越满，渐渐的，人们发现很多新的东西装在这个框架里实在不合适，于是有人试图寻找新的框架来包容新的事物。要推翻一个旧的物理世界框架，真正困难的是建立一个可以代替它的框架，因为这涉及的面实在太广，要改变认识理念非同寻常。第二个物理学框架经过伽利略等人的努力，最后由牛顿在 17 世纪完成。牛顿的物理世界的框架简洁又精确，时间、空间、物（用质量表示）这三个量，用万有引力、运动定律和一套微积分运算，竟然把从亚里士多德时代起一直说不清楚的宇宙图景用一些公式精确地计算了出来。

近代物理学的认识框架是相对论时空框架，爱因斯坦把时间和空间简单地用光速 C 联系在一起，推翻了 17 世纪以来把经典力学当作全部物理学甚至是全部自然科学最终基础的那种僵化观念。

经历了这样三个阶段的发展，近代科学经历实验化、数学化后，基本上具备了预测的能力。现代科学以一种实验的方式，通过对世界进行数学还原的处理，实现了对个体和自然事物的控制和掌握。

2. 自然科学世界图景与人类文明

物理世界的三大时空框架与数学上的三个大的发展阶段相关联，并和人类文明的三个历史时期相对应。可以说，不同的认识框架产生了不同的描述逻辑语言和计算方式，而这些语言和数学又进一步丰富自身并影响着不同阶段的人类文明。

在不同时期，亚里士多德、托勒密、欧几里得和哥白尼都用同样的初等数学语言来讨论宇宙的构造。在那个时空框架里，物的结构都是在空间上建立起来的，时间在数学上还只是不连续的数列，万物的图画都是静止的，或者是不连续的，这样的自然科学图景称为静态的或准静态的，由此导致的人类文明也有相似的特征。那个时期人类的社会形态也限制了人们对自然认识图景的更新。

用力和速度构成世界图景的最基本要素，以变量和函数来表达概念及规律，使牛顿的世界图景动了起来。牛顿定律把以前认为截然不同的地面运动规律和天体运动规律概括在一个严密的理论里，使人类第一次意识到天体运动是有规律可循的，自然是认识的。这是人类从神学思想中解脱出来，树立科学世界观的开端，其历史意义巨大。牛顿图景采用经典数学逻辑进行分析推理，其最大进步是对时间的处理，时间不再是一个个不连续的点，而成了实数轴上连续变化的变量。正是这种时空框架和数理逻辑体系，使得人类开始拥有了预测的能力和改变自然的技术力量。由此人们的生存方式因技术而改变，人类的文明也随着理念的改变而变化。

牛顿图景是工业社会的象征，其机械自然观中理性的思维方法，至今仍在广阔领域内发挥着巨大作用。牛顿时代的科学家们认为任何物理量都是时间的连续函数，这种函数关系就像瞬时速度那样简单，但他们把宇宙万物僵化成像箭一样占有固定不变的空间大小和形状的“物质”，是对物的僵化，这是导致牛顿物理世界和工业文明僵化的根源。经典物理曾经的辉煌成就，使得牛顿的物理学框架持续不断地影响着人们，直到现在许多人头脑里对自然的认识仍是这个僵化的视窗，甚至大部分人意识不到由这个僵化科学产生的哲学理念对现代人类文明的负面影响。现代地球环境的恶化、落实可持续发展观所面临的困局也许正是这种僵化延伸的后果。

3. 构建自洽和谐的知识体系是现代人自我强大的根基

作为现代的大学生，应充分认识现代物理基础理论对从事技术和管理工作的意义，应确信严格的物理逻辑推理和实验技能的训练是成为工程师不可缺少的，应清晰理解现代科学的认识图景是构建自洽和谐知识体系和世界观的基石，拥有知行合一的底蕴为自我生命的提升提供了扎实的基础，也是面对未来挑战的能力。

造成所谓知识无用、高分低能的因素之一是由于所学知识没有形成一个有机的“大厦”。虽然头脑里装了很多的东西，但却好似倒塌后的砖瓦碎片堆积在那里，这些杂乱无章的知识，既没有一个大的框架支撑它们，也没有气血供养形成活生生的整体，产生不了新的事物，又何来创新？就像四大发明，在历史的背景下被缩成了个案，戈壁滩上孤零零地耸立着四个石碑——造纸术、印刷术、指南针、火药，周围没有茂密森林形成相互联系的学科体系，其下没有支撑它们成长的绿草茵茵的丰厚底蕴。

知识要变得有创造力，就需要建构认知的框架，牢固扎根在普适性很广、很强的公理体系之上，再将框架作为骨骼，把那些知识化为机体中的细胞，以逻辑推理和数理演算连

接它们，构建成脉络清晰、输运顺畅的“大厦”。然后，“大厦”中被选择的知识又能够在实践情境中恰当地按照事物运转的序列植入工作过程中，用过程性知识将那些陈述性知识链接起来，生成和集成“为完成一件工作任务并获得工作成果而进行的一个完整的工作程序”，实现完整的思维过程的训练。就像计算机那样，需要哪个资料按照其编号就能够快速准确地找到，各个部分相互协作，能够生长出新的细胞，能够发现新的知识，也能够产生新的技术。

但是如前面所述，目前大部分人还无法建构一个合理的、现代的自然科学世界图景代替经典的认识框架，观念中仍摆脱不开牛顿的认识框架。自然科学各种旧的、新的理念充斥在人们的脑海中，大多数人面前的自然科学世界图景是不完整、不自洽的。这种不和谐、不完整体现在现代人类的文化中，紧张、变动、浮躁是两种自然科学世界图景之间过渡中的景象。

三、科学、技术和工程的相互关系

1. 科学、技术、工程

科学的核心是科学发现，技术的核心是技术发明，工程的核心是工程建造。

(1) 科学重在发现，奠定创新基础

科学是关于自然界、人类社会和人自身的规律的事实、原理、方法和观念的知识体系以及创建这个知识体系的社会活动。科学的任务是发现规律，提出理论，认识世界，解释世界。唯有系统全面地认识世界，才能应用知识去寻找方法、发明产品。因此，科学在创新过程中处于基础性地位。

(2) 技术重在发明，推动产业革新

技术是根据生产实践或科学原理而发展成的各种工艺操作方法和技能，以及相应的材料、设备、工艺流程等。技术的任务是发展或开发出新的方法、手段、措施或途径。

技术是一种变革世界的能力。古代技术主要来自生产实践，现代技术则更多的是根据一定的科学原理，为达到一定的应用目的，所发展和开发出来的方法和手段。技术，包括材料技术、产品技术、设计技术、工艺技术、生产工序技术以及手工技术等。技术体现为三种形态：物质形态（如工具、设备等），知识形态（如图纸、资料、图书等，也可以说是信息形态），人才形态（科学家、工程师、技术员、技术工人等技术人才）。显然，人才是技术的核心，有了人才就可以创造出物质形态和知识形态的技术。

(3) 工程重在建造，改变世界面貌

英国机械工程师学会理事长 Andrew Ives 在 2006 国际机械工程教育大会上明确提出：“工程是为了一种明确的目的，对具有技术内容的事物进行构思、设计、制作、建立、运作、维持、循环或引退的过程及其过程所需的知识”。

美国工程教育协会(ASEE) 将工程定义为一种运用科学和数学原理、经验、判断和常识来造福人类的艺术，一种通过生产技术产品或系统以满足具体需要的过程。

工程研究的目的是任务不是获得新知识，而是获得新的人工物，是要将人们头脑中的观念形态的东西转化为现实，并以物的形式呈现出来，其核心在于观念的物化。在工程实践中，工程活动在主体头脑中的关于新的人工物的图景是清晰、明确的，它通过计划、设计以图纸和模型的形式预先显现在人们的观念中。

虽然技术开发具有明确的目的，但所开发的技术在未来的应用却不是唯一的。一项通用技术开发出来以后，除了一开始具有相对确定的应用领域之外，还可以迅速转移到其他应用领域中去，如原子能技术的开发直接目的是制造原子弹，但后来主要被应用于核能发电。

2. 科学、技术、工程的相互关系

科学、技术、工程是三个不同的对象，有本质的区别，然而科学、技术、工程三者之又有着紧密的联系，见下表 1-1。

表 1-1 科学、技术、工程的相互关系一览表

比较的依据		科学	技术	工程
相互区别	研究的目的是任务	认识世界，揭示自然界的客观规律，解决自然界“是什么”“为什么”的问题	改造世界，实现对自然物和自然力的利用；解决自然界“做什么”“怎么做”的问题	改造世界，将头脑中的观念形态的东西转化为现实，以物的形态呈现出来
	研究的过程和方法	追求精确的数据和完备的理论，从认识的经验水平上升到理论水平；主要运用实验、归纳、演绎、假说等方法	追求比较确定的应用目标。利用科学理论解决实际问题，认识由理论向实践转化；多用预测、设计、试验、修正等方法	工程目标的选择、工程方案的设计和工程项目的实施等，其实现过程为综合集成
	成果性质和评价标准	知识形态的理论或知识体系，具有公共性或共享性；评价是非正误，以真理为准绳	科学知识和生产经验的物化形态，发明、专利、诀窍、图纸、样品或样机，具有商品性；评价利弊得失，以功利为尺度	遵循“目标—计划—实施—监控—反馈—修正”路线评价成败，工程达不到预期目标就意味着失败
	研究取向和价值观念	好奇取向，与社会现实联系相对较弱；价值中立	任务取向，与社会现实关系密切；处处渗透，时时体现价值	用好与坏、善与恶评价，在各方利益间权衡
	研究规范	普遍性、公有性、无私性、创造性和有条理的怀疑主义	以获取经济和物质利益为目的；保密和专利	团结、协作，团队精神
相互联系	学科体系	基础科学—技术科学—工程技术		
	研究过程	基础研究→应用研究→开发研究		
	一体化	科学—技术—生产		
	生产力	潜在的、知识形态的生产力→现实的、直接的、物质的生产力		
	认识过程	从实践到理论，第一次飞跃→从理论回到实践中去，第二次飞跃		
	重要关系	三者都是人与自然关系的中介，在历史进程中融合发展，并与社会相互作用		
	其他	科学技术化，技术科学化，技术工程化，工程技术化；三者的整体化、社会化、国际化		

四、技术与技能

在中文的语境中技术一词，一是指“人类在利用自然和改造自然的过程中积累起来并在生产劳动中体现出来的经验和知识，也泛指其他操作方面的技巧”，二是指“技术装备”。而关于技能，则常被称为“掌握和运用专门技术的能力”，也被称为技艺、才能。

所以，技术包括两个组分：一是基于人的技术，可称为具身的技术，表现为技能；二是基于物的技术，可称为去身的技术。即技能是与人有关的技术，是技术的一部分。

技能层次的研究显示，技能自身也具有层次递进的关系，涵盖新手、高级初学者、胜任、精通、专长、大师、实践智慧七个阶段。

技能中有大量无意识的或尚未经过反思的个人经验，既难以通过语言、文字和符号等进行逻辑说明，也难以通过正规形式在社会中传递，在实践活动中，往往以所谓的“默会知识”方式存在，技师“所知道的”远比他们能说的要多。而且相对于这种默会知识，精确知识的发现离不开默会知识，思维以及科学本身是由远远超越动物智力范围的默会知识指导的。默会知识实际上支配了人类的全部认识活动，是人类获得显性知识的向导。

在大学教育中显性知识得到了成功地传授，而行为和观察以及科学研究中的技艺还处于无法编码和不可言述的阶段，这种默会知识的习得是按照不可言传的实践方式进行的。

深刻理解技术和技能之间随动、伴生、互动的关系，充分认识技术与技能的本质，进而明晰实验学习的特点，更好地体会大学物理实验课程的教学模式和实验教学过程的系统化方式以及本教程的运用方法，自觉培养工程技术人员应具备的创新能力和跨界整合能力。

五、物理实验在物理学发展中的重要作用

物理学的发展是人类进步的推动力之一，物理学的研究内容极其广泛，涉及的时间从宇宙的诞生到无尽的未来，涵盖人们认识范围的尺度，小到 10^{-19}m ，大到 100 亿光年或 10^{26}m ，相差 10^{45} 数量级。实验物理和理论物理是构成物理学研究的两大支柱，实验物理在推动物理学发展过程中有着明显的重要作用，两者密切相关、相辅相成、互相促进，形象地说恰如鸟之双翼、人之双足，不可或缺。物理学正是靠着实验物理和理论物理两大分支的相互配合、相互激励、相互促进，相辅相成地探索前进。

物理学是自然科学的基础，实验物理则是物理学的基础。当实验上有新的发展或者实验方法有改进、测量精度有提高的时候，每个物理理论都要重新接受验证、检验或修正，使得物理学所探索的各种现象的领域不断地精确和扩大。

(1) 诺贝尔物理学奖从 1901 年第一次授奖至今已有百余年的历史，获奖者中因实验物理学方面的伟大发现或发明而获奖的占三分之二以上，由此可见实验物理在物理学发展中的重要地位。

(2) 物理规律的建立过程体现出了实验物理的重要性。1924 年法国人德布罗意提出实物粒子具有波动性的伟大假设，这个大胆而美妙的假说就像一道光照亮了最难解开的物理学之谜。但是要被人们接受，还得通过实验的结果来验证。1927 年美国科学家戴维孙和革末通过电子在晶体上的衍射实验证明了德布罗意波，从而打开了量子物理的大门。

历史事实雄辩地说明了实验结果在物理学概念的提出、理论规律的确立及被公认的过程中所占据的重要地位和所起的关键作用。

可以毫不夸张地说，没有实验物理就没有物理学的发展。正是由于实验手段的不断进步、仪器精度的不断提高、实验设计思想的巧妙创新等，才使得人类在认识自然界的历程中不断探索、发现，进而攀登上更高的高峰。

第二节 大学物理实验课程的任务和要求

第四次工业革命的主要特征是技术的融合，消除物理世界、数字世界和生物世界之间的界限，而物理技术、数字技术和生物技术是此次工业革命的三大支撑技术。物理学不仅是工程技术的基础，也是在培养创新人才、现代工程师过程中不可被其他学科所替代的一门学科。作为一名工程应用型技术人员，其物理基础的厚薄影响到他在工作中的适应性、创造性和后劲。

大学物理实验课是高等学校理工类专业对学生进行科学实验基本训练的必修基础课程，是本科生接受系统实验方法和实验技能训练的开端。

教育部物理基础课程教学指导分委员会在 2010 年颁布了《理工科类大学物理课程教学基本要求》和《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(以下简称《基本要求》)，确定了我国高等学校理工类专业中“大学物理”和“大学物理实验”课程的地位、作用和任务。

《基本要求》中指出，大学物理实验课覆盖面广，具有丰富的实验思想、方法、手段，同时能提供综合性很强的基本实验技能训练，是培养学生科学实验能力、提高科学素质的重要平台。它在培养学生严谨的治学态度、活跃的创新意识、理论联系实际和适应科技发展的综合能力等方面具有其他实践类课程不可替代的作用。

一、大学物理实验课程的任务和要求

1. 大学物理实验课程的具体任务

(1) 培养学生的基本科学实验技能，提高学生的科学实验基本素质，使学生初步掌握实验科学的思想和方法。训练和培养学生的科学思维和创新意识，使学生掌握实验研究的基本方法，提高学生的分析能力和创新能力。

(2) 提高学生的科学素养，培养学生理论联系实际和实事求是的科学作风，认真严谨的科学态度，积极主动的探索精神，遵守纪律、团结协作、爱护公共财产的优良品德。

2. 教学内容的基本要求

大学物理实验应包括普通物理实验（力学、热学、电磁学、光学实验）和近代物理实验，具体的教学内容和基本要求如下：

(1) 掌握测量误差的基本知识，具有正确处理实验数据的基本能力。

掌握测量误差与不确定度的基本概念，能逐步学会用不确定度对直接测量和间接测量的结果进行评估。

掌握处理实验数据的一些常用方法，包括列表法、作图法和最小二乘法等。随着计算机及其应用技术的普及，应包括用计算机通用软件处理实验数据的基本方法。

(2) 掌握基本物理量的测量方法。

例如，长度、质量、时间、热量、温度、湿度、压强、压力、电流、电压、电阻、磁感应强度、发光强度、折射率、电子电荷、普朗克常量、里德堡常量等常用物理量及物性参数的测量，注意加强数字化测量技术和计算技术在物理实验教学中的应用。

(3) 了解常用的物理实验方法，并逐步学会使用。

例如，比较法、转换法、放大法、模拟法、补偿法、平衡法和干涉法、衍射法等方法，以及在近代科学研究和工程技术中广泛应用的其他方法。

(4) 掌握实验室常用仪器的性能，并能够正确使用。

例如，长度测量仪器、计时仪器、测温仪器、变阻器、电表、交/直流电桥、通用示波器、低频信号发生器、分光仪、光谱仪、常用电源和光源等常用仪器。

(5) 掌握常用的实验操作技术。

例如，零位调整、水平/铅直调整、光路的共轴调整、消视差调整、逐次逼近调整、根据给定的电路图正确接线、简单的电路故障检查与排除，以及在近代科学研究与工程技术中广泛应用的仪器的正确调节。

(6) 适当介绍物理实验史料和物理实验在现代科学技术中的应用知识。

3. 能力培养的基本要求

(1) 独立实验的能力——能够通过阅读实验教材、查询有关资料和思考问题，掌握实验原理及方法，做好实验前的准备；正确使用仪器及辅助设备，独立完成实验内容，撰写合格的实验报告；培养独立实验的能力，逐步形成自主实验的基本能力。

(2) 分析与研究的能力——能够融合实验原理、设计思想、实验方法及相关的理论知识对实验结果进行分析、判断、归纳与综合。掌握通过实验进行物理现象和物理规律研究的基本方法，具有初步的分析与研究的能力。

(3) 理论联系实际的能力——能够在实验中发现、分析问题并学习解决问题的科学方法，逐步提高综合运用所学知识和技能解决实际问题的能力。

(4) 创新能力——能够完成符合规范要求的设计性、综合性内容的实验，进行初步的具有研究性或创意性内容的实验，激发学生学习主动性，逐步培养创新能力。

4. 分层次教学的基本要求

上述教学要求，可通过开设一定数量的基础性实验、综合性实验、设计性或研究性实验来实现。这三类实验教学层次的学时比例大致分别为 60%、30%、10%。

(1) 基础性实验：主要学习基本物理量的测量、基本实验仪器的使用、基本实验技能和基本测量方法、测量的不确定度及数据处理的理论与方法等，可涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等各个领域的内容。

(2) 综合性实验：指在同一个实验中涉及力学、热学、电磁学、光学、近代物理等多个知识领域，综合应用多种方法和技术的实验。此类实验的目的是巩固学生在基础性实验阶段的学习成果，开阔学生的眼界和思路，提高学生对实验方法和实验技术的综合运用能力。

(3) 设计性和研究性实验：根据给定的实验题目、要求和实验条件，由学生自己设计方案并基本独立完成全过程的实验。研究性实验：组织若干个围绕基础物理实验的课题，由学生以个体或团队的形式，以科研方式进行的实验。

二、大学物理实验的基本测量方法

物理实验由三个基本部分构成，即在实验室里人为再现自然界的物理现象、寻找物理规律和对物理量进行测量。因此，物理实验与物理测量有着紧密的联系，在任何物理实验中几乎都含有测量物理量的内容。测量的最终目的是获得物理量的精确值，物理实验的最终目标是探索物理规律，测量不能替代物理实验，而物理实验中必须有测量。

在物理实验中，把具有共性的测量方法叫作物理实验中的测量方法。

一切描述物质状态和运动的物理量都可以从几个最基本的物理量中导出，而这些基本物理量的定量描述只有通过测量才能得到。将待测的物理量直接或间接地与作为基准的同类型物理量进行比较，得到比值的过程叫作测量。

物理实验方法与物理实验中的测量方法之间是有联系和区别的。所谓物理实验方法，是指依据一定的物理现象、物理规律和物理原理，设置特定的实验条件，观察相关物理现象和物理量的变化，研究物理量之间关系的手段。而测量方法是指对物理实验中的某个物理量的具体测定方法，即如何根据要求，在给定的实验条件下，尽可能地减小测量误差，使获得的测量值更为精确的方法。可以看出物理实验方法是一个较大范畴中的概念，而物理实验的测量方法则是上述这一大范畴下的一级范畴中的概念。任何物理实验都离不开物理量的定量测量，所以实验方法和测量方法两者之间相辅相成、相互依存。

测量的精确度与测量方法和手段密切相关。同一种物理量，在量值的不同范围采用的测量方法不同，比如高值电阻、中值电阻、低值电阻的阻值测量就需要不同的仪器并采用不同的测量方法获得。即使在同一范围内，精确度的要求不同也可以有多种测量方法，选

用何种方法取决于待测物理量在哪个范围以及实验对测量精确度的要求。

随着人类对物质世界更深入地了解，待测物理量的内容越来越广泛、精度要求越来越高，随着科学技术的发展，测量方法和手段也越来越丰富、越来越先进。

1. 比较法

比较法就是将被测物理量与标准量进行比较而得到测量值的方法。它是物理测量中最普遍、最基本、最常用的测量方法。

(1) 直接比较测量法：把待测物理量 X 与已知的同类物理量或标准量 S 直接比较，直接读数得到测量数据。这种比较通常要借助仪器或标准量具，例如用米尺测量长度。

(2) 间接比较测量法：当一些物理量难以用直接比较法测量时，可以利用物理量之间的函数关系将待测物理量与同类标准量进行间接比较而测量出。比如温度计、电表等，借助一些中间量或将被测物理量进行某种变换，来间接实现比较测量。例如，用李萨如图形测量交流电信号频率就是先将被测信号和标准信号同时输入示波器并转换为特殊的图形后，再由标准信号的频率换算出被测信号的频率。

2. 放大法

在测量中有时由于被测物理量太小，用给定的某种仪器进行测量会造成很大的误差，甚至无法被实验者或仪器直接感知和反映，此时可以借助一些方法将待测量放大后再进行测量。放大被测量物理量所用的原理和方法便称为放大法。

(1) 累积放大法：在被测物理量能够简单重叠的条件下，将它展延若干倍后再进行测量的方法。比如，在转动惯量的测量中，用微秒计测量三线摆的周期时，不是测一次扭转周期的时间，而是测出连续 50 次扭转的摆动时间；单摆测量重力加速度的摆动时间也如此。

(2) 机械放大法：利用机械部件之间的几何关系，使标准单位量在测量过程中得到放大的方法。分光计上的角游标以及螺旋测微计都是用这种方法进行精密测量的典型例子。

(3) 电学信号放大法：在电磁类实验中，微小的电流或电压常需要用电子仪器将被测信号加以放大后再测量。由于电信号的放大很容易实现，因而这种方法应用相当广泛。

(4) 光学放大法：一是被测物通过光学仪器形成放大的像，便于观察判断。例如，常用的测微目镜、读数显微镜等，这些仪器在观察中只起放大视角作用，并非把实际物体尺度加以变化，所以并不增加误差。因而许多仪器都在最后的读数装置上加一个视角放大设备以提高该仪器的测量精度。二是通过测量放大后的物理量，间接测得本身极小的物理量。光杠杆就是一种常见的光学放大系统，它可测量长度的微小变化。

3. 平衡法

平衡态是物理学中的一个重要概念。在平衡态下，许多复杂的物理现象可以用较简单的形式加以描述，一些复杂的物理关系亦可以变得十分简明，实验会保持原始条件，观察会有较高的分辨率和灵敏度，从而容易实现定性和定量的物理分析。

所谓平衡态，其本质就是各物理量之间的差异逐步减小到零的状态。判断测量系统是否已达到平衡态，可以通过“零示法”测量来实现，即在测量中，不是研究被测物理量本身，而是让它与一个已知物理量或相对参考量进行比较，通过检测并使这个差值为“0”，再用已知量或相对参考量描述待测物理量。利用平衡态测量被测物理量的方法就称为平衡



法。例如，利用惠斯通电桥测量电阻就是平衡法的典型例子。

4. 补偿法

补偿法也是物理实验中常用的测量方法之一。所谓补偿指的是某一系统若受某种作用产生 A 效应，受另一种同类作用产生 B 效应，如果由于 B 效应的存在而使 A 效应显示不出来，就叫作 B 效应对 A 效应进行补偿。利用补偿的概念来进行测量的方法叫作补偿法。补偿法往往要与平衡法、比较法结合使用，大多用在补偿法测量和补偿法校正这两个方面。

把标准值 S 选择或调节到与待测物理量 X 值相等，用于抵消（或补偿）待测物理量的作用，使系统处于补偿状态，此时的测量系统，待测物理量 X 与标准值 S 具有确定的关系，这种测量方法称为补偿法。

5. 转换法

许多物理量，由于属性关系无法用仪器直接测量，或者即使能够进行测量，测量起来也很不方便且准确性差，为此常将这些物理量转换成其他能方便、准确测量的物理量来进行测量，之后再反求待测量，这种测量方法叫作转换法。

(1) 参量转换测量法：利用各种参量间的变换及其变化的相互关系，把不可测的量转换成可测的量。

在设计 and 安排实验时，当预先估计不能达到要求时，常常另辟蹊径，把一些不可测量的物理量转换成可测量的物理量。有时某些物理量虽然可以测定，但很难精确测量，或所需要的条件苛刻或所需要的测量仪器复杂、昂贵等，如果换个途径，事情就变得简单多了，于是我们可以在一定范围内找到那些易于测量的量，绕开不易测量的量，实行变量代换。比如，利用阿基米德原理测量不规则物体的体积或密度。

(2) 能量转换测量法：利用换能器（如传感器）将一种形式的能量转换为另一种形式的能量来进行测量的方法，一般来说是将非电学物理量转换成电学量。

6. 模拟法

模拟法是以相似性原理为基础，从模型实验开始发展起来的，研究物质或事物物理属性或变化规律的实验方法。

在模拟法描绘静电场实验中，就是用稳恒电流场的等势线来模拟静电场的等势线，这是因为电磁场理论指出，静电场和稳恒电流场具有相同的数学方程式。而我们知道，直接对静电场进行测量是十分困难的，因为任何测量仪器的引入都将明显地改变静电场的原有状态。

7. 干涉法

应用相干波干涉时所遵循的物理规律，进行有关物理量测量的方法称为干涉法。利用干涉法可进行物体的长度、薄膜的厚度、微小的位移与角度、光波波长、透镜的曲率半径、气体或液体的折射率等物理量的精确测量，并可检验某些光学元件的质量等。

三、大学物理实验在创新型人才培养中的作用

从科学发展的进程看，人的科学素质有三个主要方面：求知欲望；科学思维和创造能力；严谨的科学作风和坚忍不拔的精神。

人类自从有思想以来，就想认识客观世界，这就是人的求知欲望。科学的形成和发展

过程正是人类永恒的、强烈的求知欲望的结果。

科学的发展依赖于人的思维和创造能力，正如爱因斯坦在《物理学的进化》中所述：科学的发展过程是人类通过思维和观念大胆地探求客观世界的过程。从物理学的发展来看，牛顿时代最重要的成就之一是“场”概念的提出，它揭示了描绘物理现象最重要的不是带电体，也不是粒子，而是带电体之间和粒子之间的“场”。如果没有很强的科学思维和创造能力，“场”的概念是不可能被提出和理解的，“场”的概念摧毁了旧观念，促进了 20 世纪相对论、量子理论的伟大发现和发展。因此，科学发展史证明了科学思维和创造能力是人的科学素质的核心组成部分。

科学要求人类必须有严谨的科学作风和坚忍不拔的精神。因为在探求客观世界的过程中，实践才是检验真理的唯一标准，科学上的每一个想象，都必须用实验来验证。任何结果不论如何吸引人，假如与实际不符，都必须放弃。科学来不得半点虚伪和骄傲。

科学的发展是无止境的，它既需要研究相关现象之间的相互的一致性来加以类推，又需要将已解决的问题和未解决的问题联系起来，有些共同的特征常常隐藏在外表差异背后，必须有严谨的科学作风和坚忍不拔的苦干精神，才能发现这些共同点，并在此基础上建立新的理论、新的观念和新的方法，促进科学的不断发展。

科学发展的历史长河证明了物理学的起源和发展促进了自然科学各个领域的建立和发展，物理学的思维和观念已渗透在各个学科、各个领域。例如，21 世纪被誉为生命科学的世纪，物理学中的基本观念、基本思维方法，包括实验的误差理论与数据处理的方法都在生命科学领域得到了应用和发展。因此，物理学在培养人的科学素养方面具有十分重要的地位，物理实验是其中的重要环节。

人才科学素养培养的是思维和创造能力，人的思维和创造能力有“硬”和“软”两个方面。

从理论的角度看，“硬”的方面表现为基本概念的掌握、推理演绎的能力、运算的技巧与能力；“软”的方面表现为物理概念的系统理解与深化、比较和综合的能力等。

从实验的角度看，“硬”的方面表现为基本实验技能与动手能力、现代技术的应用水平；“软”的方面表现为实验课题的选择、实验的设计思想和实验方法等。

多少年来，物理实验教学的课程体系和教学内容从“硬”和“软”两个方面培养学生的思维和创造能力，激发他们强烈的求知欲望，树立严谨的科学作风和坚忍不拔的精神。物理实验在人才科学素养培养中起着重要的作用。

第三节 新工科大学物理实验课程的建设

物理学是一门面向理工科各专业学生的重要必修基础课程。大学物理类课程在培养学生的科学素质，包括科学思维方法、科学研究方法和创新精神以及灵活运用数学工具等方面，都具有独特的优势。学习物理及其实验的过程中形成的坚实物理基础、深刻物理思想以及良好的学习能力，是一个优秀专业技术人才必须具备的科学素质。另外，当今世界科技发展速度十分迅猛，越来越多的物理学先进原理被应用于各行业的生产研发领域，对于应用型本科院校培养的人才群体更是需要直接面对生产领域的科学技术问题，具有足够的物理学知识基础就显得尤为重要。

一、专业训练与普及教育的不同

在大学物理及实验课程的学习过程中，将从知识与技能、过程与方法、情感态度与价值观三个维度帮助学习者初步树立工程意识，自觉地探索将物理原理和方法运用于工程技术实际问题的途径；培养从实际出发提出问题、分析问题和解决问题的能力；训练自主学习的方法，培养自主建构知识网络的能力，为终身学习打好基础；更重要的是在受教育的过程中感受专业化训练对工程师的重要性，体会专业教育与普及教育的区别，提高专业素养和科学素质。

任何学科的方法范式和概念术语体系都是经由无数专业工作者千锤百炼所发展完善的严密的符号体系，它不仅沟通时具有精准的特点，还具有交流的高效率。

很多进入大学的新生对物理学充满憧憬和兴趣，头脑中常常有天马行空的奇思妙想。但是，他们需要认识专业的科学工作者与业余的科学爱好者之间的分别就在于能否进入科学共同体。业余科学爱好者所欠缺的不是他们的观点或发现是否正确，而是能否用正确的方式表达和思考。业余科学爱好者最大的障碍就在于他们不掌握学术的术语，其他人要理解他们的概念必须从头梳理，耗时耗力。而且由于他们的思考没有使用精准的概念体系，一个重要概念在思考的过程中其内涵和外延随都可能发生着变化而不自知。

一个没有进入或者拒绝进入科学共同体的业余科学爱好者在一个信息冗余的时代越来越没有价值。任何非专业人士想做出有价值的科学成就和技术发明及工程成就，就得接受专业的学术训练，接受科学共同体的概念术语体系和方法范式。

与高中的普及性教育不同，在大学专业教育中，可以采用比喻、拟人等教学方法，但那只是一个指代，最终要以专业的术语严密地表达和阐述；为了防止表达概念术语的歧义，很多时候应采用生涩的词汇甚至数学的符号或式子来定义，不能因为是应用型专业就忽视专业化的学术训练。在大学物理实验的教学过程中我们应建立对数学和物理的严格性的理解和敬畏，同时在心理上培养对严格性的亲切感，通过实验教学形成专业的概念术语体系和方法范式，并能够用数理逻辑语言去严密地描述我们感觉到的东西。

二、在实验过程中认识精确科学的范式

精确科学所包含的高等数学知识和实验理念已融入大学物理及其实验的教学中。

1. 由经验科学到精确科学

人类的科学、技术、工程已经由经验阶段发展到精确阶段。经验从实践中来，一般以定性为特征，很少采用精确数字描述，基本不用数学知识，至多采用初等数学知识。工业化时代的早期，在企业和工厂，技术人员在生产和管理中，往往以经验为主，这时技能和动手操作往往谈不上精确，但是那些精细的高技能却蕴含了精密的高精尖，这些高技能难以在人群中被模仿和推广。以经验为主要核心技能的生产至少存在 3 个问题：一是由于定性的“经验”往往带有一定的主观性，因而以经验为基础的推理或判断失误概率较大，容易导致错误的结果；二是定性的“经验”导致精确重复实验的难度很大，“经验”和相关技术的传承成为难题，导致大量优秀技术失传；三是在经验科学阶段，定性归纳推理成为主要的推理范式，由于没有采用精确的高等数学进行抽象概括和演绎推理，因而要揭示本质性的自然规律几乎没有可能。

伽利略把数学方法与实验测量相结合，将理论和实验相互印证，开创了现代精确科学的研究范式，它是现代一切自然科学的一般研究范式。该范式要求对实验和理论进行客观、

精确定量，任意可重复地循环对比、修正和提高，从而不断提升理论与实验的精确程度和符合程度，最终揭示宇宙客观规律。

2. 现代精确科学的研究范式

人类能够观察得到薄膜上的彩色干涉条纹应该相当早，但对光的波动性的认识却是在1801年由托马斯·杨的双孔干涉实验确立的，这之间至少隔了几千年。在之前的研究中，人们无法在薄膜彩色条纹的观察中获得在实验室里的人工可控的实验装置和实验手段，也就无法由经验升华为科学原理。托马斯·杨以其奇思妙想的实验装置和对双缝干涉、牛顿环的实验研究，以及菲涅尔等人的努力，最终构建了完善的光的干涉和衍射理论，精确地解释了实验结果。后来科学家们由定量的光的干涉原理剖析薄膜的条纹，建立了两种薄膜的物理模型和相应的能观察到稳定干涉图样的光源模型，从而精确定量地阐释了复杂的薄膜干涉，并认识了普通光源的发光机制。

现代精确科学的研究范式如下，可以循环往复。

- (1) 精确实验，总结实验规律。
- (2) 提出假说，定量解释实验规律。
- (3) 根据假说，利用数学演绎和逻辑推理，获得推论或预言。
- (4) 对推论或预言进行客观、精确定量、任意可重复的实验检验。
- (5) 修改理论及假说。
- (6) 通过实验检验假说和理论。

上述精确科学研究范式由伽利略率先倡导、后人不断完善而成，故也被称为“伽利略科学研究范式”，它是现代一切自然科学的一般研究范式。

3. 精确科学的三个特征

“客观”是指科学实验结果的客观性，即只要实验条件严格一致，实验结果便唯一确定，与实验操作者、实验进行的时间或地点等均没有关系。

“精确定量”要求科学实验必须用数字、函数或微分方程精确定量地描述和演绎。

“任意可重复”是指在时间、体力、脑力、资金、仪器设备等允许的范围内，可任意次重复实验过程。

4. 精确科学对实验重复次数的选取法则

精确科学并没有将“可重复”上升至“无限可重复”，不仅代表实验重复次数的提升，更规定独立科学对实验重复次数的选取法则。从“无限可重复”理性地降至“任意可重复”，表明科学实验的重复次数的有限性和相对性，体现了科学的真实意义所在，也告知了科学的局限性。

在精确科学研究范式中，有一个过程十分苛刻：利用数学演绎和逻辑推理获得理论或预言，并与更精确的实验进行客观、精确定量、任意可重复的反复验证。换言之，精确科学不仅要求实验测量越来越精确，还要求理论越来越能够精确描述、计算、演绎并预测实验规律，揭示实验现象背后的深层物理规律。

所以，在学习物理知识、潜心进行物理实验的过程中，高等数学和物理实验相辅相成，是体会和学习精确科学的基础，在这个体会过程中以大学物理及实验的教学为载体，在获

取专业需要的物理知识的同时，更汲取了精确科学思想和方法。

三、精确实验越来越与微分方程紧密联系在一起

16世纪以后，以微积分为代表的现代高等数学开始诞生并不断发展，为精确科学的发展提供了强有力的支持。可以说，几百年来，精确科学紧紧伴随着高等数学的发展而发展。

高等数学的基本特征：一是高度的抽象性和严密的逻辑性；二是应用的广泛性与描述的精确性；三是研究对象的多样性与内部的统一性。

1. 偏微分方程是某些宇宙真理的数学表达

爱因斯坦的相对论是精确科学的理论典范，其中采用的现代高等数学知识包括微积分、线性代数、张量分析、群论、拓扑学、微分几何等，其所得结论的精确度令世人赞叹不已。迄今为止，诸如“引力红移”“光线弯曲”等已得到极高精确实验的验证。2015年9月14日，来自LIGO/VIRGO合作组的三位科学家雷纳·韦斯、基普·索恩、巴里·巴里什通过精确度很高、实验难度极大的LIGO实验直接探测到并且发现了引力波，获得了2017年的诺贝尔物理学奖。

随着精确科学的不断发展，一个又一个宇宙客观真理相继被揭示。人们发现，在时空中，宇宙客观真理一般由偏微分方程描述。

精确描述宇宙客观真理的是一个不同种类的偏微分方程。根据不同的边界条件，经过严格且巧妙的数学求解和演绎，便可获得一个又一个科学问题，创造一个又一个人类文明的奇迹。因此，这些偏微分方程当之无愧地被誉为“宇宙客观真理的化身”。

2. 精确科学与实验误差

事实上，精确的实验测量数据与严密逻辑的高等数学演绎，两者将实验与理论进行客观、精确定量、任意可重复地循环验证；而实验数据的测量越精确，重复次数越多，与高等数学精确演绎结果越吻合，越能揭示本质性宇宙客观规律，由此建立的科学理论也越逼近宇宙客观真理。

同时，通过大学物理和大学物理实验的学习能认识到：精确是相对的，不精确是绝对的。所谓精确，是一个相对的概念，并具有鲜明的时代特征。

放大电路的 H 参数模型的几种电路模型，由简入繁，体现的正是电子线路由低频到高频、再到微波，越来越精确的工程发展历程。

数学是精确的，它可无限逼近绝对精确值，然而，当采用数学这一工具（包括大型计算机）计算实际科学问题时，必须建立简化模型，进行近似计算，不可能绝对精确。

由于受仪器设备精确度极限、周围环境变化、人为因素等影响，人类所进行的一切实际科学实验均存在误差，从来没有绝对精确而无误差的科学实验。科学的任务并不是消除误差，而是减小误差，将误差减小至实际应用的允许范围之内。

科学素养的形成，若没有精确科学的训练就缺少了科学理念的核心；创新能力的培养，若没有精确科学的支撑就很难站得高、看得远。对精确科学技术工程的认识不足，将对信息化时代的产业和经济发展造成负面影响。

四、知识与技能

现代认知心理学认为人类后天习得的能力可以用广义的知识来解释。广义知识可分为

陈述性的和程序性的两大类。

1. 陈述性知识与程序性知识

1) 陈述性知识

陈述性知识主要反映事物的状态、内容和特征以及变化原因，需要有意识地提取线索，可以用语言陈述的知识，属于反映客观世界“是什么”“为什么”“怎么样”的知识。

陈述性知识表现为一系列的概念、命题、法则、定理和理论等。比如，“鸟是有羽毛的卵生动物”，这是回答“是什么”的知识。

2) 程序性知识

程序性知识是反映活动的具体过程和操作步骤的知识，不需要有意识地提取线索，很难用语言陈述，属于对“怎么做”和“做什么”之类的客观活动的反映，

程序性知识在头脑中的表现与存储方式为产生式，而陈述性知识在头脑中的表现与存储方式为表象、命题和图式。

所谓产生式是指一种“条件-行动”规则，是人能执行的一组内隐的智力活动，简单地说就是关于办事的一系列操作活动的知识，即是由概念、规则构成的操作系统。其基本原理是当一定的条件满足后，就能产生一定的行动。

3) 陈述性知识和程序性知识与能力培养

能力是“顺利实现某种活动的心理条件，它表现在人所从事的各种活动中，并在活动中得到发展”。知识的学习，尤其是程序性知识的学习，对能力的发展将起到至关重要的作用。因此，弄清程序性知识的获得方式，就找到了一种具体的可以操纵的培养能力的方式。

认知心理学家把信息在头脑中呈现和记载的方式统称为认知的表征。陈述性知识主要以命题、网络或图式的方式表征，以知识的静态方式储存在个体的头脑中；程序性知识则主要以产生式的方式表征，以知识的动态系统来存储。程序性知识是凭借外部条件而进行反映活动的知识，且这种反映具有快速、独特、灵敏、灵活迁移等特征，充分体现了创造活动的基本特点。

所以，从现代认知心理学的知识来看，程序性知识是创新能力的重要成分，这是由程序性知识的性质、获得、表征和再现决定的。

程序性知识即“关于怎么办”的知识，是问题解决的核心知识，它体现了一个人的创造能力。培养学生的创新能力，不仅要求学生知道“是什么”，更要求他们知道“如何做”，因此，要重求他们视程序性知识对人的思维训练的作用。程序性知识是在陈述知识的基础上内化、转化而来的，是陈述性知识的升华。如何使学生的陈述性知识转化为程序性知识，这是培养学生创新能力的关键。但是，并不是所有的陈述性知识都可以转化为程序性知识。

陈述性知识是创新能力形成的重要基础，程序性知识是创新能力的重要成分。

有效获得程序性知识是高校进行创新型人才培养的必要途径。

2. 程序性知识与技能

现代认知心理学从信息加工的角度认为技能的实质就是程序性知识。

技能的教学应该试图先揭示技能学习的内部机制，站在信息加工论的角度，认为技能的学习也应是一种信息处理的过程，技能的本质就是一种关于如何操作的步骤、程序，与

陈述性知识的学习同属于信息加工，都有某种共性。

1) 程序性知识与技能的区别

程序性知识既然属于知识，就应当是解决“知与不知”“识与不识”的问题。技能主要是指通过练习而获得的符合法则的活动方式，主要是解决“能与不能”“熟悉与不熟悉”的问题。知道该怎么做，说明我们头脑中存有“怎么做”的程序性知识，但知道怎么做不一定“能做，能熟练地做”，“知”属于认知层面的，而“能”属于实践层面的，两者有差距，“纸上谈兵”属于知道怎么打仗，但不一定能打仗、打好仗。程序性知识对于技能的掌握固然重要，但不是技能本身，真正掌握技能，不仅要求获得程序性知识，而且要求获得活动经验。程序性知识的掌握要求不一定要非常牢固，有些东西只要知道就行了，不一定非得要求非常熟练地掌握，但技能的掌握要求非常娴熟，这是实践的需要。

2) 程序性知识与技能的关系

程序性知识属于认知经验，是在实践中形成的；实践技能需要认知经验的指导，否则会走弯路。对于程序性知识与技能的关系，可以用互相支撑来概括。程序性知识的掌握有助于获得技能，技能的获得有助于概括出理性的更合理的程序性知识。技能与程序性知识的交互提升才能从根本上提高人的认识能力和实践能力。只顾技能练习，不总结为程序性知识，不能提高实践能力；只顾程序性知识的学习，而不注重技能训练，不能提高认识能力。不是说所有的技能都要上升到理论高度，都有必要清楚地阐述描绘出来，比如如何“挥手做再见”，就没有必要概括为程序性知识。也不是说所有的程序性知识都要上升到技能的高度，比如，如何做“五位以上的乘法”，只要知道就行了，没有必要转化为技能。有的认知经验的获得是满足人的需要（如好奇心、求知欲），不需要转化为技能，而有的是为将来的实践做准备，需要转化为实践性的技能而在实践中发挥它的效用。

3. 程序性知识的习得过程

物理陈述性知识是关于“是什么”的知识，主要关于物理的概念、规律、公式、单位等方面；物理程序性知识是关于“怎么做”的知识，是解决问题时的一套操作步骤，主要关于物理技能、算法，以及何时使用物理知识等方面。

获得程序性知识的过程体现了知识学习的连续性和完整性，也体现了能力的养成途径。

1) 认知阶段

在学习一种新的程序性知识的初级阶段，学生作为新手主要通过教师的讲解示范，自己的感知、理解来形成对问题的最初步表征。同时，在头脑中形成动作的映向，能进行初步的实践，即获得程序性知识的陈述性形式。此阶段的一个明显特征是学生说出一步或是想到一步，才执行一步，他们对每一步骤都有相当清晰的认识，在出错时能及时纠正，能得到最终的结果。所以，在这一阶段的程序性知识是可以通过纸笔测试进行测量的。

2) 联系阶段

在这一阶段，学生的操作从在陈述性知识指导下的一系列操作逐渐转变为不再具有这种陈述性特征的行动步骤。教师指导学生将程序较复杂的技能分解成单个动作进行练习，并将所有单个的动作连锁进行学习。通过多次练习和变式练习逐步减少和消除多余动作、遗漏动作和各种动作之间的干扰。使上一个动作的结果成为下一个动作的刺激，使最初所做的关于该程序性知识的陈述表征转变为特殊领域的程序性知识，并使构成该程序各部分的产生式联结得以增强。

3) 自动化阶段

在这一阶段,学生对整套程序性知识的操作变得得心应手,动作的控制以肌肉运动感觉为主,规则完全支配人的行为,并能够根据具体情况的变化,灵活地应用程序性知识进行创造性的实践活动和在实践活动中创造性地使用这些程序性知识。在认知心理学家看来,在第二阶段得以程序化的特定领域的程序性知识,在第三阶段获得了进一步的精致和协调。

随着对程序性知识的掌握,对行为的有意识控制会越来越少。达到这种程度时,人们不再需要对自己的行动做出缜密的思考,也随之丧失了清楚地解释自己为什么做出这些行为的能力。这也是有时新手向专家请教时,专家反而说不清楚其中缘由的原因。在认知心理学家看来,这一阶段实际上是一种辨别的过程。也就是说,某一领域的专家在掌握技能的过程中,会变得越来越善于识别各种条件以及它们之间的细微差别,从而使行动变得越发适宜和精确。

总之,程序性知识的获得分为三个阶段:第一阶段,新信息的输入与建构;第二阶段,通过规则的变式练习,实现概念和规则由组织的初级向组织高度化的发展过程;第三阶段,程序性知识发展到高级阶段,规则达到自动化,并完全支配人的行为。

五、重构应用型工科专业的“大学物理实验”课程

“大学物理实验”课程是高等学校理工科专业必修的基础课程,为各应用型本科专业发展和人才培养目标的实现服务,即以“培养具有现代职业素养、适应地方经济发展和行业技术进步的基层应用型工程技术人才”为根本目标,在“大学物理实验”课程中落实“重品德、实基础、强能力、高素质、善应用”的人才培养模式,以学生为中心、社会需求为导向、能力为本位,构建符合学校定位与培养目标的应用型大学物理实验教学体系。

1. 重构应用型大学物理实验课程的指导思想

新建应用型本科院校面临三种转型任务:“专科型”“学术型”向“本科型”转变;在“高职高专型”与“综合性理科型”向“应用型”发展;“传统教育型”向“互联网+教育”发展。这三种叠加的转型发展现状迫切需要对原有课程体系进行改革与重组。应用型工科专业以逆向设计正向实施的思路,根据产业发展对人才的需求制定人才培养方案,依据新经济、新技术、新产业对专业建设的需求及产业人才需求的调研,设置课程体系和教学内容。所以,应用型高校的大学物理实验教学中心的建设与发展应适应新工科专业转型发展的需求,“大学物理实验”课程重构的核心是教学内容。

以应用型工科教育思想和学校各专业发展对人才的需求重构大学物理类课程教学内容,并通过对课程内容的筛选、设计、调整与整合,使得教育思想和办学理念得以落实、落细、落小。将“培养规格与行业标准相融合”“教学内容与工程实际相融合”“教学过程与工作过程相融合”“教学场所与真实工厂相融合”“教师队伍与工程师队伍相融合”这五个产教融合理念贯穿在课程设置、教学大纲、教学内容、教学方法等方面,筛除陈旧,凝练精华,跨越烦琐的中间曲折过渡陈述,缩短科学理论与工程技术之间的距离,重构课程教学内容:将专业课程里的工程案例作为实例,以知识和能力、过程和方法、情感态度和价值观作为课程重构的核心,并在教学中注重思想、能力、知识三者并重。积极探索和实践理工融合、理工互动的教育教学方式,选拔各专业教师融合到大学物理和大学物理实验教学团队中,并让大学物理教师和大学物理实验教师承担相近的专业课程,形成良性

的互动。

将新工科的教学理念运用到教学的整个过程中，实验项目的教学内容参照工程实践案例，实验教学管理和教学过程尽量贴近工作过程，实验报告吸纳工程方案的特点。建立新工科应用型实验的教学模式，在信息化技术的支持下，解构出实用的工程流程、程序、系统中的物理知识与实验技能，再将其融入实验教学过程中并系统化。通过大学物理及实验的教学，为学生奠定广义工程建模的基础；在分组实验中锻炼良好的协作能力，使学生能够在广义工程活动中与同行以及社会公众进行有效的沟通，在多样性的团队中作为个体、成员或负责人能够有效地发挥作用；具备理解操作说明书和撰写报告、设计文档等能力，培养在专门技术领域进行自主学习和终身学习的能力。

2. 实验课程的解构与重构

目前，按照结构类型的课程有学科知识系统化课程和工作过程系统化课程两种。

1) 学科知识系统化课程

学科知识系统化课程，即基于学科知识结构的课程，是由学科知识构成的、以结构逻辑为中心的学科体系，它以传授实际存在的显性知识（陈述性知识），即理论性知识为主，解决“是什么”（事实、概念等）和“为什么”（原理、规律等）的问题。这是传统课程构成的方式，是所有专业共同的普适性的课程范式。

学科知识系统化课程基于学科知识结构对知识进行排序，追求知识的范畴、结构、内容、方法、组织以及理论的历史发展的有序。按照这样的排序方式进行结构化处理后的课程，本质上是一种基于知识储备的课程。

2) 工作过程系统化课程

工作过程系统化课程是由实践情境构成的、以过程逻辑为中心的行动体系课程，强调的是获取自我建构的隐性知识即程序性知识，主要解决“怎么做”和“怎么做更好”的问题。这是培养应用型人才的一条主要途径。

所谓工作过程是指个体或团队“为完成一件工作任务并获得工作成果而进行的一个完整的工作程序”，“是一个综合的、时刻处于运动状态但结构相对固定的系统”。显见，工作过程系统化课程正是对课程本质——过程的回归。

工作过程系统化课程以工作过程为参照系整合陈述性知识与程序性知识，关注工作的方式、内容、方法、组织以及工具的历史发展，强调有生命的“机体”（个体）对知识的构建过程，应与“机体”在工作过程中的行动实现融合。它以程序性知识为主、陈述性知识为辅，不再片面强调建立在静态学科体系之上的显性理论知识的复制与再现，而是着眼于隐含在动态行动体系之中的、整合了实践知识与理论知识的工作过程知识的生成与构建。

3) 由学科体系的解构到行动体系的重构

由上可见，学科体系课程的载体以显性知识为主，由于其关注对知识逻辑的排序，呈现的显性知识大都为结构明晰的陈述性知识，虽然也有程序性知识，但很多隐性知识无法展现在课程的教学内容中；学科体系课程的教学方式往往难以从存储知识的模式转变为应用知识的模式。因此，若以陈述性知识为主的教学，往往导致学生在课堂上听得津津有味，课下却不会做作业，因为有很多程序性知识仍被隐藏着没有被学生获得。

实践性知识所面对的“只可意会、不可言传”的内外部话语转化困境，成为专业教育与实践训练难以跨越又必须面对的认知屏障。

程序性知识往往隐匿在工程过程中，学生能够通过工作过程习得。工作过程作为应用知识的结构，关注的是工作的对象、方式、内容、方法、组织以及工具的历史发展。将学科体系课程解构重塑为行动体系课程，就是从一种存储知识的结构走向应用知识的结构。这样，课程的教学过程不再是搭建一个存储知识的仓库，而是构建了一种应用知识的过程。

所以，以工作过程为脉络的实验课程，先解构原先的学科知识系统化课程，将储存在单元、章节中按照学科结构系统化排列的知识点分解出来，将它们分置于预设的工作过程的一系列步骤中，并且以行动体系的视角将那些隐性的程序性知识点尽可能地显露出来，由实践情境构成以过程逻辑为主线的行动体系，实现“怎么做”和“怎么做更好”的目标。

工作过程系统化学习不是简单地复制实际的工作过程，而是对这些客观存在的工作过程予以系统化的教学处理。工作过程系统化课程是综合性的整体结构，教学是在工作过程这一应用知识的整体性结构中展开的，其目的是使学习者在掌握专业能力（学会知识、学会技能）的同时，习得方法能力（学会学习、学会工作）和社会能力（学会共处、学会做人）。在基于工作过程的学习过程中，这三个能力不是分离的，与能力相关的技能、知识、价值观的学习均集成于应用知识的工作过程中。

由此，工作过程系统化课程在教学中将能够避免三种弊病：一是强调了工作过程的实践，却“割裂”了完整的工作过程；二是强调工作任务的完成，却“脱离”了实际的工作过程；三是强调了工作过程的定向，却“照搬”了单一的工作过程。

4) 大学物理实验课程的构成

传统的学科知识结构与工作过程结构之间，不是摒弃而是解构与重构的关系：对原有的以存储知识为主的学科体系结构予以解构，在以应用知识为主的行动体系结构即工作过程结构中进行重构。由于突显程序性知识，似乎知识的数量增多了，其实知识的总量没有变化，只是由隐性变为显性，知识的排序方式发生了变化，集成于应用知识的过程之中了。

工作过程系统化是对学科知识系统化进行“有距离观察”，以解放与扩展传统的知识序列课程的视野，寻求现代创新的知识关联与分离的路线，确立新的课程内容定位与支点，凸显课程的应用型教育特色。所以，工作过程系统化课程内容的序化过程，实际上是伴随学科体系的解构而在行动体系中进行重构的过程。

大学物理实验课程借鉴学科知识系统化课程和工作过程系统化课程这两个体系的优势，重构实验课程的教学体系。大学物理实验课程的整个教学过程，以实验项目为教学核心，每一个实验项目就是一个教学工作过程，而在具体的实验项目之前和之后，采用新的学科知识结构布设“大学物理实验基础知识”和“大学物理实验课程复习”，发挥学科知识系统化课程的长处；而每一个实验项目则按照工作过程重构，在实验原理中强调实验的设计思想、实验仪器的实现技术；在实验内容中关注实验方法，凸显实验的特定条件下如何运用一定的技术，达成观察相关物理现象和物理量变化、研究物理量之间关系的技术手段；在实验步骤中突出实验测量方法，思考和训练如何按照一定的规程尽可能减小测量误差，认识获得测量值更为精准的物化的方法、步骤及程序；在实验报告中完成正确处理实验数据的能力和撰写工程方案的能力。整个课程所有的实验项目进行系统化设计，将大学物理

实验课程教学的具体任务、基本要求分置于每一个实验项目的教学过程中，构成综合性的整体性结构。

5) 系统化工作过程实现多个层次的比较学习

在课时有限的情况下，大学物理实验课程的教学内容不能按照学科知识结构的逻辑来选取，也就是与以往的实验教材以力学、热学、电磁学、光学和近代物理学为主要领域而设置的面面俱到的实验项目不同，也与有些按照基础性、综合性、设计性和研究性实验来设置课程单元不同，本实验课程选择具有可迁移性、可替代性、可操作性的实验项目作为课程载体，虽然实验项目的数量有限，但绝非是杂乱无章的项目、模块等形式的堆砌。这些精选的实验项目分设不同的章，同一章中设置若干个具有比较学习特征的学习情境（实验项目），在一个实验项目中又包含若干个具有比较学习特征的实验内容，所有的实验项目具有相同的实验教学过程。

现代认知心理学认为个体只有通过多次比较学习，才能实现迁移和内化。在比较学习中要在同一范畴或同一参照系框架内进行比较，做到形式同一、内涵同一。在比较学习中工作过程的重复，在于通过“熟能生巧”的训练，习得需要的实验能力。在比较学习中所谓内容不重复，指的是工作过程的对象有差异性 or 层次性变化。在工作过程同一性的基础上实现针对多个对象的系统化工作过程学习，让学生在比较、迁移和内化的过程中学会思考，学会发现问题、分析问题和解决问题，旨在训练学生思维过程的完整性。这是一种基于方法论的结构设计。

由于实验课程所具有的特点，在大学物理实验课程工作过程系统化设计中，每一个实验项目的整个教学过程中学生学习的时间在 8~12 学时之间，在实验室的实际教学时间一般需要 4 学时。每一个项目的实验内容既有同等层次的“重复”，也有“非重复”的递进式实验内容；等精度测量中一个物理量的测量按照测量的原则要测量多次。这样的教学设计符合工作过程系统化课程的“比较学习三原则”，即比较必须三个以上；比较必须属于同一范畴；比较中重复的是步骤而非内容。在本书中每一实验项目就是一个学习情境，其中，不同实验项目以及同一实验项目中都具有“基础层次——教师讲解，学生照着做”“应用层次——教师指导，学生学着做”“综合层次——教师引路，学生独立做”这三个层层递进的内容，还预留“创新层次——师生探讨，学生创新独立做”的实验内容。这些在课程教学设计中体现在网上预习、实验操作前期、实验操作后期。

六、新工科应用型“大学物理实验”课程的教学载体

1. 课程载体

课程载体是源于教学任务且具有典型的教学工作过程特征，并经过高于教学工作过程的转换所构成的符合教育教学原理，能传递、输送或承载有效信息的物质或非物质的形体。

课程载体是学习情境的具体化。它包括两个要素：一个是载体呈现的形式，对于专业课程，其载体的形式可以是项目、案例、模块、任务等，而对于基础课程，其载体的形式可以是活动、问题等；另一个是载体呈现的内涵，对专业课程载体的内涵设计，可以是设备、现象、零件、产品等，而基础课程载体的内涵则可以是观点、知识等。

2. 课程载体与思维训练

一般，学习者在大学的初期学习阶段具有两种不同的思维特征：一种是逻辑思维很