



基于 IYPT 赛题的“凸透镜组隐形系统” 中学物理项目式学习设计

龚雨昕 王 强

(扬州大学物理科学与技术学院 江苏 扬州 225009)

潘昭辉

(扬州中学 江苏 扬州 225009)

(收稿日期:2022-11-25)

摘要:根据“强基计划”背景下的高中拔尖人才培养或者学科竞赛训练的物理教学需求,运用黑箱模型与光学传输矩阵对2022年IYPT的“invisibility(隐形)”竞赛题深入分析并做简化处理,将竞赛题与项目式教学深度融合,形成“凸透镜组隐形系统”项目式学习设计.引导中学生利用光学透镜折射及成像原理,理解并探索“光学隐形”问题,增强运用物理知识和科学探究方法解决实际问题的能力,并培养自主学习和创新思维习惯.

关键词:高中物理;项目式学习;IYPT竞赛题;凸透镜组隐形系统

1 研究背景与意义

“强基计划”背景下的高中拔尖人才培养进入高考备考与学科竞赛双重并举的新时代,能够培养选拔综合素质优秀的学生服务于国家重大战略需求,但是与之对接的中学创新人才培养训练体系却并不成熟.近年来,物理学科教学逐渐注重对核心素养的培养,要求加强学科纵向衔接和横向配合,推动跨学段整体育人、跨学科综合育人.作为一种新兴的教育教学模式,项目式学习以真实问题或者精心设计的实际问题为背景和导向,正好契合了拔尖人才培养和核心素养发展新需求.引入项目式教学,还可以从一定程度上改变过分注重知识传授的倾向,实现知识建构与能力提升相统一的价值追求;有学者指出^[1],新高考背景下的项目学习不再是常态教学以外的补充,而是主要的教学方式.

部分IYPT、CUPT的竞赛题非常贴近生活又具有较强的研究意义,如果将此类竞赛题根据高中阶段的实际情况适度简化、改编,使竞赛题与中学物理项目式教学深度融合,由浅入深地把物理学科的相关知识点巧妙设置其中,就能够更好地让中学生在探究科学问题过程中实现知识、能力和价值观培养.这不失为中学物理项目式教学的有效策略.

2 项目问题的提出

时至今日,“invisibility(隐形)”技术依旧在光学、工程学和材料学等领域引起广泛研究^[2-3],但是其技术要求的复杂性使众多对于“光学隐身”技术感兴趣的中学生望而却步.那么,我们能不能引导中学生利用更简单的方法观察到“隐形”现象,并综合运用相关的光学知识对此现象进行解释呢?本文根据高中阶段拔尖人才培养和学科竞赛的现实教学需求,对2022年IYPT的invisibility(隐形)竞赛题(双凸透镜可以用来扭曲光线并使物体消失,研究改变透镜的属性和物体的几何形状会如何影响物体被检测到的范围)进行深入分析并做简化处理,改编成相应的项目式学习命题“探究凸透镜组隐形系统”.按照项目式学习的一般流程^[4],要求学生理解隐形技术的光学原理^[5],并尝试在实际问题中探究隐形现象.本项目旨在将学生的培养从“解题能力”转移到“解决问题能力”上来,在真实问题情境中解决科学问题,达到“学科纵向衔接和跨学段整体育人”的创新人才培养要求.

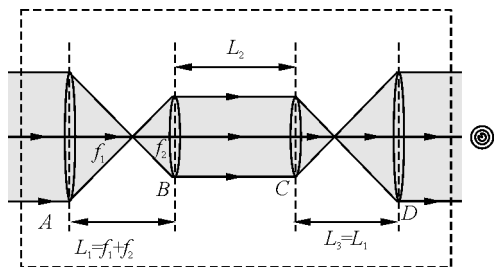
3 凸透镜组隐形原理

所谓“隐形”,是指物体所在的空间好像被周围

的介质所取代,从而在某些方向上表现为“物体不存在”.这是目前科学研究中“光学隐形”方法的基本思想,而凸透镜组系统的“隐形”也不例外^[6].

3.1 透镜组设置与平行光模型

参见图1(a)和(b),透镜组由焦距为 f_1 、规格相同的双凸透镜(A、D)和焦距为 f_2 、规格相同的双凸透镜(B、C)构成,外形尺寸较大的透镜A、D的焦距 f_1 大于较小透镜B、C的焦距 f_2 .按照A、B、C、D的顺序从左向右依次摆放,并保证与主光轴保持一致,A、B之间距离记为 L_1 ,B、C之间距离为 L_2 ,C、D之间的距离为 L_3 .透镜组放置采取A、B、C、D四透镜组的完全对称设计,所以有 $L_1=L_3$,光线通过透镜C、D的过程可以看做通过透镜A、B的逆过程.在理想的、平行于主光轴的平行光(下文简称理想平行光)入射条件下,要让A、B两个凸透镜之间距离 L_1 为A、B两个透镜的焦距之和,即 $L_1=f_1+f_2$.



(a) 理想平行光入射条件下的全范围光路图



(b) 透镜组实物图

图1 透镜组光路与实物图

不难看出,光线在通过透镜组(A、B、C、D)前后传播方向没有发生改变,好像透镜组并不存在一样.在B、C两个透镜大小合适的前提下,理论上平行光经过透镜后通过的全范围为图1(a)中阴影部分,这也就意味着如果物体被放置到了此光路通过的范围之外,就处在了系统中光线“绕过”的位置,通过透镜D看到的只有透镜A前方的背景.这

就是透镜组系统使物体“隐形”的核心原理.

平行光模型一方面揭示了透镜组中光线传播路径和视野盲区的存在,即如何隐藏物体本身;另一方面它揭示了“隐形”的意义:如果把透镜组看成一个黑箱,如图2所示,那么黑箱的作用就是重新安排光线传播的全过程,即如何重现被隐藏物体后面的背景,从而使得观察者和背景之间好像只有空气.而如何有效地构建这种黑箱,也是大多数光学隐形设计中思考的重要问题^[7].

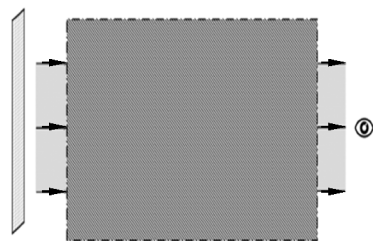


图2 黑箱模型

3.2 黑箱模型的光学矩阵

(1) 光学矩阵概念

在非平行光线入射时若要确定隐形区域,就需要通过光学矩阵计算出透镜A、B间距离 L_1 和B、C之间的距离 L_2 .近轴光学中光线传输的一般矩阵形式为

$$\begin{pmatrix} r_o \\ r'_o \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} r_i \\ r'_i \end{pmatrix}$$

其中, r_i 和 r_o 分别表示物、像的离轴距离, r'_i 和 r'_o 分别表示其离轴角度,透镜、介质对于光线的作用可以表达为 2×2 的传输矩阵

$$T = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix}$$

T矩阵内各个元素涵盖了光学元件或传播介质等的性质.传输矩阵有折射矩阵和平移矩阵:折射矩阵描述光线经过透镜的折射行为,比如焦距为 f 的薄透

镜对光线的作用可用 $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$ 表示;平移矩阵描述光线传播中的平移行为,比如长为 l 的均匀介质

对光线的作用可用 $\begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 表示,在空气中 $n=1$,则

有 $\begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.

如果光线依次通过光学系统的子部分 1、2、3、 \dots 、 i (子部分可以为凸透镜等光学元件,也可以是介质),那么各个子部分会对光线传输进行依次变换.我们不妨记光学系统的总体传输矩阵为

$$T_{\text{总}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

各子部分的传输矩阵记为 T_1 、 T_2 、 T_3 、 \dots 、 T_i ,由矩阵乘法可得

$$T_{\text{总}} = T_i \cdot \dots \cdot T_3 \cdot T_2 \cdot T_1 = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}$$

虽然矩阵概念在中学数学选修部分有所涉及,但是用矩阵的方法来描述光线传输行为对于中学生来说是陌生的,需要教师预先进行铺垫.

(2) 用光学矩阵描述黑箱模型

我们不再对具体光路进行分析,而是将透镜组整体作为一个黑箱看待.黑箱范围内光学器件对光线的最终总体效果就等同于使光线穿过空气;即黑箱是一个无焦系统,对光束没有净发散或净聚焦作用,系统的等效焦距为无限大.根据无焦系统相关要求,此刻有约束条件 $L_1 = f_1 + f_2$.同时,根据上述光学矩阵相关理论,且透镜组为对称系统有 $L_1 = L_3$,我们不难得出

$$T_{\text{总}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & L_1 + L_2 + L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

其中, $T_{\text{总}}$ 表示透镜组对光线的总体效果,矩阵 $\begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ 表示空气介质($n=1$)时光线传播特性.同时,我们用矩阵形式把透镜组对光线的作用表示出来,其中包含透镜 A、B、C、D 以及 AB 段、BC 段、CD 段空气介质.可得

$$T_{\text{总}} = T_7 T_6 T_5 T_4 T_3 T_2 T_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_3 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & L_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f_1} & 1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

根据先前设定 $L_1 = f_1 + f_2 = L_3$, 则有

$$T_{\text{总}} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L_2 f_1^2 - 2f_1 f_2 (f_1 + f_2)}{f_2^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L_2 f_1^2 - 2f_1 f_2^2 - 2f_1^2 f_2}{f_2^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

结合上面式(1)、(3),可得隐形参量条件为

$$T_{\text{总}} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2L_1 + L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 2(f_1 + f_2) + L_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{L_2 f_1^2 - 2f_1 f_2 (f_1 + f_2)}{f_2^2} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

结合无焦系统和位置约束条件 $L_1 = f_1 + f_2 = L_3$, 且 $f_1 + f_2 \neq 0$, 则可获得透镜组摆放的准确位置条件

$$\begin{cases} L_1 = L_3 = f_1 + f_2 \\ L_2 = \frac{2f_2(f_1 + f_2)}{f_1 - f_2} \end{cases} \quad (5)$$

这一结果说明,当透镜间的距离满足式(5)时,透镜组拥有了使特定范围内物体“隐形”的效果^[8].

(3) 讨论与展望

应该注意的是,我们目前建立的模型仍有待优化.在实际中可隐形区域还受到诸多因素影响,例如透镜大小、透镜摆放位置、透镜焦距 f 和物体的几何形状等.这些细节可留给学生继续深入验证、探索.

4 “凸透镜组隐形系统”项目式学习设计

具体的“凸透镜组隐形系统”项目设计流程可参照夏雪梅博士在《项目化学习设计:学习素养视角下的国际与本土实践》一书中的设计框架^[9],如图3所示.

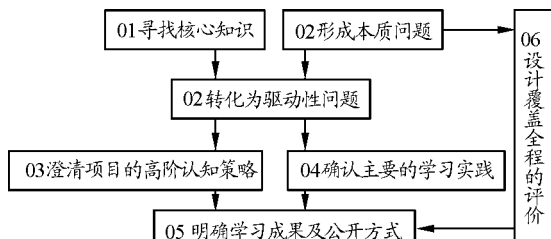


图3 项目化学习构建过程模式

首先,应该引导学生确定选题内涵,甄别核心知识和本质问题,并转化为驱动性问题.本教学设计紧扣2022年IYPT的invisibility竞赛题,对“隐形”现象进行深入分析并做简化处理,并提炼出相应的项目式驱动问题:探究凸透镜组系统隐形原理.紧接着引导学生采取适合的探究策略和学习方式.对于高中阶段学力相对有限的学生,在开始研究前需要预先进行必要的科学指导:一方面,通过分析题目帮助学生理清题目要点;另一方面进行知识补充,补充相关的物理知识和数学工具.项目式教学过程中注重学生自主探究,需要让学生根据赛题给定的开放性情境确定恰当的切入点,通过“实验+理论”的方式进行探索,并开展小组合作、互相交流,需留给学生充足时间思考和探索.本项目具体实施过程参见表1.

在“1 核心知识及本质问题发掘”部分,考察学生抽象概括能力,要求学生对“隐形”的题干进行拆分,发掘背后本质问题.在“2 驱动性问题”部分,考

察学生分析能力,要求学生对题干中“隐形”现象进行深入分析,并划分阶段进行研究.在“3.1 探究策略”部分,考察学生推理能力,要求学生根据现象及必要的已知光学折射相关知识、物理基础,对实际问题进行逻辑推理和论证,建立模型并得出相关结论,能正确地表达实验原理.在“3.2 学习实践”部分,通过实验与理论相结合在实践探索中理解“隐形”原理,独立完成实验并得出结论,最后对项目进行汇报、总结.在“4 实践评价要点”部分,突出考查学生对于“隐形”问题的理解,并考查相关理论计算、实验设计与验证以及项目总结情况.

5 结论及展望

通过合理设计教学环节,可以一定程度上改变项目式学习过程中过于强调接受学习、机械训练的现状,可以有效激发学生兴趣,引导学生主动参与、乐于探究,为学生进一步进行科学探索打好基础.

表1 “探究凸透镜组隐形系统”项目学习具体实施过程

项目化学习环节	项目式教学要点
1 核心知识及本质问题发掘	一、核心知识点 透镜组“隐形”现象中光线的传输; 二、分阶段进行本质问题发掘 (1) 透镜相关知识; (2) 矩阵知识以及光学矩阵; (3) 利用光学矩阵推导“隐形”条件
2 驱动性问题	本项目的总驱动问题是“探究凸透镜组系统隐形原理”,并分解为下列子驱动问题: (1) 子问题一:如何描述光线在透镜组中的传输? (2) 子问题二:如何描述“隐形”概念并形成物理模型? (3) 子问题三:如何量化确定透镜组“隐形”的距离条件?
3.1 探究策略	一、“理论+实验”模式 结合理论分析和实验探究,让学生理解“隐形”理想模型. 二、小组交流,师生互动 将班级学生分为若干组并确定小组长.教师引导学生将各阶段的项目任务详细整理出,并及时在每个子驱动问题前后给予评价和指导,保证任务顺利进行. 三、由浅入深,层层递进 对3个子驱动问题合理划分研究与阶段. (1) 对于子问题一:复习回顾初高中透镜、折射等知识,并将单透镜的情况进行延伸,进一步拓展研究透镜组中光线传播情况,通过实验器材进行验证. (2) 对于子问题二:首先在教师引导下学生于理想平行光条件下初步探讨隐形现象的成因,然后引导学生归纳出“隐形”现象的概念以及黑箱模型; (3) 对于子问题三:在黑箱模型基础上,教师引导学生分析隐形的条件要素,学生自主探究用光学矩阵计算隐形现象条件,并通过实验检验

续表 1

项目化学习环节	项目式教学要点
3.2 学习实践	<p>学生独立理解“隐形”题干含义,进行拆分发掘背后本质问题,并将总驱动任务拆分成数个子问题研究任务.</p> <p>(1) 任务一:探究光线在透镜组中的传播</p> <p>针对一部分较简单的内容,可以由会做的学生进行演示,作图讲解相关知识点;待全部学生掌握后,老师再组织学生互相讨论多个透镜、非平行光的复杂情况.</p> <p>(2) 任务二:探究“隐形”现象并形成物理模型</p> <p>① 学生通过理想平行光作图研究“隐形”的可能原因,并用透镜组器材进行自主探索:学生从最右侧透镜看向背景,微调凸透镜位置直至通过凸透镜组观察到正立、等大、清晰背景.</p> <p>② 随后分别从两侧向中间逐渐挡住各枚凸透镜间光线,看手指的距离小到何程度时像开始有被遮挡的部分,找到手指间距能达到最小的位置,感受隐形的大致范围,见图 4.</p> <p>③ 学生通过理想平行光作图和实际实验,分析“隐形”的可能原因.</p> <p>④ 学生在教师引导下发现平行光理论存在缺陷,并进一步用黑箱解释“隐形”.</p> <p>(3) 任务三:量化确定透镜组“隐形”的距离条件</p> <p>① 学生在教师引导下补充学习光学矩阵知识;</p> <p>② 学生通过理论计算获得透镜组放置的距离关系为</p> <p>透镜 A、B 之间距离</p> $L_1 = f_1 + f_2$ <p>透镜 B、C 之间距离</p> $L_2 = \frac{2f_2(f_1 + f_2)}{f_1 - f_2}$ <p>透镜 C、D 之间距离</p> $L_3 = f_1 + f_2$ <p>③ 实验设计与验证</p> <p>实验仪器:光具座、半径 5 cm,焦距 15 cm 的双凸透镜两只、半径 4 cm,焦距 10 cm 的双凸透镜两只、背景光板、铅笔、夹持台.</p> <p>实验过程:参考图 1(a),将 4 只凸透镜按顺序安装凸透镜到光具座,焦距大的凸透镜在外,焦距小的凸透镜在内,并且调节凸透镜的高度使其达到光学共轴,将光板放在最后一个凸透镜前适当距离处作为观察用的物体.根据计算出的结果摆放凸透镜.</p> <p>实验验证:通过 4 个特定凸透镜的合理排布位置,使放置透镜组后能背景所成的像与原背景大小一致,且当观察者处在最佳观察位置及稍微移动时,可以保持物体隐藏不可见的状态,定量验证透镜组“隐形”的距离条件.</p> <p>(4) 任务四:对项目教学进行总结、点评</p> <p>① 学生总结:描述光线在透镜组里的传播情况;通过黑箱模型表述“隐形”概念,并表述透镜组系统使物体“隐形”的核心原理;表述透镜组“隐形”的距离条件以及推导过程.</p> <p>② 教师点评:帮助学生回顾对于理论的推导;引导学生总结归纳运用到的知识点;回顾实验环节出现的问题和不足;总结“隐形”模型特点与应用</p>
4 实践评价要点	<p>紧扣该驱动项目中的核心驱动问题和 3 个子问题考查评价项目效果.</p> <p>① 是否能将“隐形”物理现象表述清楚,能否制定可行的研究方案;</p> <p>② 是否能把握“隐形”物理现象的产生机理并进行相应计算;</p> <p>③ 是否能进行合理的实验设计,能否验证理论计算结果;</p> <p>④ 是否能对项目实施进行充分合理的总结</p>



图 4 通过手指间距感受隐形的大致范围

参考文献

- [1] 林雪敏. 将项目化学习融入物理学科教学的设计路径[J]. 物理教师, 2022, 43(3): 16-18.
- [2] 刘健. 基于变换光学的隐形斗篷研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [3] M. McCall. Transformation optics and cloaking[J]. Contemp. Phys, 2013, 54: 273-286.
- [4] 周洋平, 陆建隆. 项目化学习下高中生 ICT 素养培养模式建构——以 IYPT 备赛过程为例[J]. 物理教师, 2021, 42(9): 93-96.
- [5] 岳凌月, 琚鑫. 浅谈利用光学中的隐形现象培养学生科学思维能力[J]. 物理通报, 2020(1): 52-56.
- [6] G. Gbur. Invisibility physics: Past, present, and future[J]. Prog. Optics, 2013, 58: 65-114.
- [7] 张宗权, 李永放, 黄育红, 等. 折射反射法光学隐形装置[P]. 陕西: CN108847104A, 2018-11-20.
- [8] Joseph S. Choi and John C. Howell, Paraxial ray optics cloaking[J]. Opt. Express, 2014, 22: 29 465-29 478.
- [9] 夏雪梅. 项目化学习设计: 学习素养视角下的国际与本土实践[M]. 北京: 教育科学出版社, 2018.
- [10] 黄海森. 光学隐形技术原理[J]. 中国新技术新产品, 2022(1): 73-75.
- (上接第 94 页)
- [6] 王文蕊, 赵品晖, 胡文军, 等. 基于 ADDIE 模型的“运筹学”课程思政探索与实践[J]. 物流技术, 2022(7): 134-138.
- [7] 王凯, 张钰. 基于 ADDIE 模型的概率论与数理统计在线课程思政教学方法研究[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2022(2): 98-101, 128.
- [8] 赵德成. 新课程实施中的情感、态度与价值观评价[J]. 课程. 教材. 教法, 2003(9): 10-13.
- [9] 檀慧玲, 王玥. 论立德树人监测与评价的关键要素与制度体系[J]. 课程·教材·教法, 2021(12): 115-121.
- [10] 沈志辉. 高中物理“学科德育”的元素与图谱及其意义探讨[J]. 物理通报, 2020(5): 6-8.

A Case Study on Ideological and Political Teaching in Thermal Course Based on ADDIE Model

QIU Di KONG Hongyan

(School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119)

Abstract: Ideological and political teaching is an effective means to realize “educating people for the Party” and “educating talents for the country”. Thermal is one of the required courses for undergraduates majoring in physics, and its knowledge content contains rich ideological and political elements. Based on the ADDIE model, this paper constructs the ideological and political teaching design process of heat course. From the two levels of analysis (A) and design (D), the ideological and political elements and materials in the knowledge content are mined, and the effective fusion point of thermal knowledge and ideological and political elements is designed. From two aspects of development (D) and implementation (I), prepare teaching cases and give implementation suggestions; Finally, from the perspective of the evaluation (E) of the ideological and political effect of Thermal course, developing observation and questionnaire evaluation tools for ideological and political teaching in this section, in order to provide suggestions and references for colleges and universities to carry out ideological and political teaching of Thermal course.

Key words: ADDIE model; thermal course; curriculum ideology and politics; teaching cases