

指向计算思维培养的物理竞赛教学探讨 ——以矩阵光学解决复杂成像问题为例

姜晓斌¹ 尹承平²

(¹ 东莞市东莞中学松山湖学校, 广东 东莞市 523808; ² 华南师范大学物理学院, 广东 广州 510006)

摘 要 在新工科背景下, 物理竞赛教学不仅承载着选拔功能, 更应关注学生建模能力与计算思维的培养。面对竞赛中日益复杂的非傍轴与多元件光学系统, 传统的光追踪法常因计算繁琐而掩盖了物理图像。本文引入矩阵光学算法, 将其作为连接物理模型与数学算法的桥梁。通过对比分析传统几何法与矩阵法的逻辑路径, 并以第 40 届全国中学生物理竞赛复赛第 1 题为例, 展示了矩阵法在处理“黑箱”光学系统时的独特优势。此外, 本文进一步探讨了如何利用 Python 语言辅助矩阵运算, 实现从“手算推导”到“计算机模拟”的教学进阶, 为物理竞赛教学提供了新的视角与实践路径。

关键词 矩阵光学; 计算思维; 物理竞赛; Python 模拟; 复杂光路系统

DOI: 10.27024/j.wlygc.2025.08.31.02

EXPLORATION OF PHYSICS COMPETITION TEACHING ORIENTED TOWARD COMPUTATIONAL THINKING CULTIVATION : TAKING MATRIX OPTICS SOLVING COMPLEX IMAGING PROBLEMS AS AN EXAMPLE

JIANG Xiaobin¹ YIN Chengping²

(¹ Songshan Lake School, Dongguan Middle School, Dongguan, Guangdong 523808;

² School of Physics, South China Normal University, Guangzhou, Guangdong 510006)

Abstract In the context of emerging engineering education, physics competition teaching should not only serve the function of talent selection but also emphasize the cultivation of students' modeling ability and computational thinking. When dealing with increasingly complex multi-element optical imaging systems in competitions, traditional ray-tracing methods often involve cumbersome calculations, which may obscure the underlying physical picture. This paper introduces matrix optics as a bridge between physical modeling and mathematical algorithms. By comparing the logical paths of traditional geometrical methods and matrix-based methods, and by taking the first problem of the 40th National High School Physics Competition Semifinal as an example, this paper demonstrates the advantages of the matrix method in analyzing “black-box” optical systems. Furthermore, the paper explores how Python can be used to assist matrix operations and realize a teaching progression from manual derivation to computer simulation. This study provides a new perspective and practical ap-

收稿日期: 2025-08-31; 修回日期: 2026-04-09; 出版日期: 2026-05-20

通信作者: 姜晓斌, 3308709592@qq.com。

引文格式: 姜晓斌, 尹承平. 指向计算思维培养的物理竞赛教学探讨——以矩阵光学解决复杂成像问题为例[J]. 物理与工程, 2026, 36(3): 269-272.

Cite this article: JIANG X B, YIN C P. Exploration of physics competition teaching oriented toward computational thinking cultivation: Taking matrix optics solving complex imaging problems as an example[J]. Physics and Engineering, 2026, 36(3): 269-272. (in Chinese)

proach for integrating computational thinking into physics competition teaching.

Key words matrix optics; computational thinking; physics competition; Python simulation; complex optical system

几何光学是中学物理竞赛的重要板块。随着竞赛试题难度的提升,涉及多透镜组合、非均匀介质及厚透镜的复杂光学系统问题屡见不鲜。传统的解题范式通常依赖于“作图辅助+逐面计算”,即对每一个光学界面分别应用折射定律或高斯公式。这种方法虽然直观,但在处理多元件系统时,计算量随元件数量线性增长,且符号法则极易出错,往往让学生陷入繁琐的代数运算之中,而忽视了对系统整体物理特性的把握。

矩阵光学通过引入光纤状态向量和系统变换矩阵,将几何光学的变换过程抽象为代数运算。这种方法不仅具有高度的程式化特征,更与计算机科学中的线性代数运算相契合。本文旨在探讨将矩阵光学引入中学物理竞赛教学的必要性,并通过典型赛题解析与计算机模拟,阐述其在培养学生抽象建模能力与计算思维方面的独特价值。

1 两种范式的比较研究:从几何直观到代数建模

1.1 逻辑路径的差异

在教学实践中,学生处理复杂光路时常感到困惑。这主要是因为传统方法和矩阵方法代表了两种截然不同的思维路径:

1) 传统光路追踪法

遵循入射光线 L_{in} 到界面 1,形成中间像 1,再到界面 2,……,直到形成最终的像的串行逻辑。每经过一个界面,都需要重新确定物距、像距以及正负符号。其思维核心是“几何作图”,对图形依赖度极高。

2) 矩阵光学法

遵循入射光线经过中间仪器进行 $ABCD$ 矩阵变换,再输出新的光线矩阵的系统逻辑。将整个光学系统视为一个“黑箱”,通过各元件矩阵的连乘得到系统总矩阵。其思维核心是“代数建模”,一旦系统矩阵确定,任意输入光线的行为便完全确定。

1.2 运算效率与容错性对比

为了直观展示两种方法的差异,我们构建一个包含两个薄透镜(焦距分别为 f_1, f_2 ,间距为 d)的典型共轴系统进行对比分析,如表 1 所示。

2 案例分析:复杂“黑箱”系统的矩阵求解

第 40 届全国中学生物理竞赛复赛第 1 题是一道极具代表性的题目。该题考察了一个封装在手机内部的透镜组,学生无法得知内部具体结构,只能通过外部测量反推系统参数。这正是矩阵法“黑箱”思维的最佳应用场景。

2.1 问题建模

如图 1 所示,题目将手机镜头等效为一个理想透镜组,但主点 H, H' 的具体位置未知。实验通过移动物体(刻度尺),在两个不同物距下成像。传统方法需要设法求出主点位置,而矩阵方法则将整个虚线框内的透镜组视为一个整体进行建模。

我们定义光线状态向量为 $\begin{pmatrix} y \\ \theta \end{pmatrix}$,其中 y 为光线离轴高度, θ 为光线与光轴夹角(近轴近似)。

表 1 传统解法与矩阵解法的多维度对比

比较维度	传统光路追踪法	矩阵光学法
思维模式	局部处理:关注每一个界面的折射细节	整体建模:关注系统的输入输出传递函数
计算复杂度	需联立求解 N 个高斯公式方程组,中间变量多	仅需进行 2×2 矩阵连乘,无中间变量干扰
符号法则	需对实虚物像反复判定正负,极易混淆	统一笛卡尔坐标系,符号自动包含在代数符号中
对主点的依赖	必须先通过繁琐推导确定主点位置才能简化计算	无需预知主点,通过矩阵元素 C 直接求得等效焦距

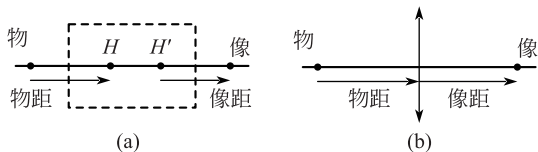


图1 手机内部透镜组(“黑箱”模型)与等效薄透镜物理参数对比示意图

(a) 透镜组(“黑箱”模型); (b) 等效薄透镜

注:图1(a)“透镜组”虚线框表示将手机内部复杂的多元件透镜组视为一个“黑箱”,其中 H 与 H' 分别为该透镜组的物方主平面与像方主平面。由于内部结构未知,主点位置及主平面间距均无法直接测量。图1(b)“薄透镜”为将其等效为单一薄透镜时的光路坐标系设定。采用矩阵光学方法时,可将包含 H 与 H' 的“黑箱”整体抽象为一个系统传递矩阵 $\tilde{M}$,从而避开对主点具体位置的探究

设手机镜头系统的传递矩阵为 $\tilde{M} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix}$,这里的矩阵是相对于主平面的等效矩阵,其中 $C = -\frac{1}{F}$ 为系统光焦度。

2.2 求解过程

设物体(刻度尺)位于物平面,光屏位于像平面。

从物面到像面的总传输矩阵为

$$\tilde{M}_{\text{tot}} = \tilde{M}_v \cdot \tilde{M} \cdot \tilde{M}_u = \begin{pmatrix} 1 & v \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{F} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & u \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

其中 $\tilde{M}_u, \tilde{M}_v$ 分别为物方空间和像方空间的自由传播矩阵。

展开计算得总矩阵 $\tilde{M}_{\text{tot}}$ 的 B 元素(即 2×2 矩阵右上角元素)为

$$B = u + v - \frac{uv}{F}$$

根据矩阵光学的成像条件,物点发出的所有光线必须汇聚于像点,这意味着像的高度不依赖于入射角度。对应到数学条件,即总矩阵的 B 元素必须为零

$$B = 0 \Rightarrow u + v - \frac{uv}{F} = 0 \Rightarrow \frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{F}$$

如此推导不仅简洁,而且还还原了高斯公式的代数本质。

利用横向放大率 $\beta = A$ (当 $B = 0$ 时),代入矩阵运算结果,有

$$\beta = 1 - \frac{v}{F} = -\frac{l_1}{l_2}$$

至此,我们利用矩阵法迅速建立了两组实验数据 (u_1, l_1) 和 (u_2, l_2) 与焦距 F 的关系,后续代数求解与参考答案一致,不再赘述。

分析:相对于传统解法需要反复纠结“物距是相对于透镜表面还是主点”,矩阵法直接将“主点”隐藏在了传递矩阵的定义中,学生只需要关注“从物面传播到像面”这一全过程,极大降低了学生的认知负荷。

3 教学进阶:从代数运算到计算物理

现代物理教育应加强对学生计算机辅助能力的培养。矩阵光学的引入,恰好为物理竞赛教学提供了一个引入“计算思维”的绝佳切口。在教学中,我们可以引导学生编写简单的Python代码来验证推导结果,甚至模拟更复杂的光学系统。

3.1 算法设计

我们可以定义简单的函数来生成基本光学元件的矩阵,利用numpy库进行矩阵乘法。这种教学方式能让学生从繁琐的计算中解放出来,专注于物理逻辑的构建。

3.2 Python代码示例

以下是一个通用的光学系统计算框架示例,可以用于竞赛辅导教学。

代码内容:

```
import numpy as np

# 定义基本元件矩阵
def free_space(d):
    """自由传播矩阵: d 为距离"""
    return np.matrix([[1, d], [0, 1]])

def thin_lens(f):
    """薄透镜矩阵: f 为焦距"""
    return np.matrix([[1, 0], [-1/f, 1]])

def solve_system(u, F, v_guess):
    """
    模拟光线追踪验证成像位置
    输入: 物距 u, 焦距 F, 猜测像距 v_guess
    输出: 总矩阵的 B 元素 (成像时应接近 0)
    """
    # 构建光路: 物面 → 空间 u → 透镜 F → 空间 v → 像面
    # 注意矩阵乘法顺序: 从右向左
```

```
M_sys = free_space(v_guess) * thin_lens(F) *
free_space(u)
return M_sys[0, 1] # 返回 B 元素
```

教学演示:验证第 40 届复赛题的成像条件

u_test = 20.0 # 假设物距 20cm

F_test = 10.0 # 假设焦距 10cm

v_calc = 20.0 # 根据高斯公式计算出的像距

计算 B 元素误差

```
error = solve_system(u_test, F_test, v_calc)
```

```
print(f"当 u={u_test}, v={v_calc}, F={F_test}
```

时,系统矩阵 B 元素值: {error:.4f}")

输出结果将极接近 0,验证了成像公式的正确性

输出结果:

当 $u=20.0$, $v=20.0$, $F=10.0$ 时,系统矩阵 B 元素值: 0.0000

3.3 教学价值

编写此类代码,学生可以:

(1) 验证理论:直观看到矩阵元素 $B=0$ 与成像的关系;

(2) 拓展探究:轻松修改代码以模拟厚透镜、多透镜组合甚至非傍轴光线,这是手算难以实现的;

(3) 思维升维:从“解题者”变成“设计者”,符合新工科对创新人才的培养要求。

4 结语

矩阵光学方法不仅是解决物理竞赛中复杂光

学难题的利器,更是培养学生科学思维与计算能力的有效载体。它将物理图像的几何直观与数学运算的代数严谨完美结合,并为引入计算机辅助教学提供了天然接口。在竞赛辅导中,适度引入矩阵光学,不仅能提升解题效率,更能引导学生跳出题海,站在更高的维度审视物理规律,实现物理核心素养的全面提升。

参 考 文 献

- [1] 钟锡华. 现代光学基础[M]. 北京:北京大学出版社, 2003.
ZHONG X H. Fundamentals of modern optics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. (in Chinese)
- [2] 全国中学生物理竞赛委员会. 第 40 届全国中学生物理竞赛复赛试题及参考解答[Z]. 2023.
National High School Physics Competition Committee. The 40th National Middle School Physics Competition semi-final questions and reference answers[Z]. 2023. (in Chinese)
- [3] 陈敏, 赵福利, 董建文. 光学[M]. 北京:高等教育出版社, 2018.
CHEN M, ZHAO F L, DONG J W. Optics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2018. (in Chinese)
- [4] 尤金·赫克特. 光学[M]. 秦克诚, 林福成, 译. 北京:电子工业出版社, 2019.
HECHT E. Optics[M]. Translated by QIN K C, LIN F C. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2019. (in Chinese)
- [5] 张倩, 叶晴莹, 蔡思仪, 等. 矩阵法在理想光学系统问题中的应用[J]. 物理通报, 2025.
ZHANG Q, YE Q Y, CAI S Y, et al. Application of matrix method in ideal optical system problems[J]. Physics Bulletin, 2025. (in Chinese)
- LIU Y X. Atomic physics[M]. Beijing: Higher Education Press, 2021: 8-19. (in Chinese)
- [12] 陈熙谋, 胡望雨, 陈秉乾. 逻辑与历史的一致性对物理教学的指导意义[J]. 物理通报, 1994(4):13-14.
CHEN X M, HU W Y, CHEN B Q. The guiding significance of the consistency between logic and history in physics teaching [J]. Physics Bulletin, 1994(4): 13-14. (in Chinese)
- [13] 李银. 基于“ETA 物理认知模型”建构《静电场》大单元教学设计——大学物理教学成果对中学物理教学的启迪[J]. 物理与工程, 2023, 33(1):157-161.
LI Y. Developing a comprehensive unit teaching design for “Electrostatic Field” based on the “ETA Physical Cognition Model”—Insights from university physics teaching achievements for secondary school physics education[J]. Physics and Engineering, 2023, 33(1): 157-161. (in Chinese)
- (上接第 263 页)
- [8] 李银. 在哲学视域下领会物理学科核心素养[J]. 物理与工程, 2020, 30(3): 74-78.
LI Y. Understanding the core competencies of physics from a philosophical perspective[J]. Physics and Engineering, 2020, 30(3): 74-78. (in Chinese)
- [9] 穆良柱. 什么是物理及物理文化? [J]. 物理与工程, 2019, 29(1):15-24.
MU L Z. What is physics and physical culture? [J]. Physics and Engineering, 2019, 29(1): 15-24. (in Chinese)
- [10] 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, 36(11):64-70.
GUO Y Y, YAO J X. Science teaching design based on core competency learning advancement[J]. Curriculum, Teaching Materials and Methods, 2016, 36(11): 64-70. (in Chinese)
- [11] 刘玉鑫. 原子物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2021:8-19.