

第二十三届江苏省高校大学生物理与实验科技作品创新竞赛

第二大类: 自选类

2.2 虚拟仿真

研究报告



比赛类别: 自选类

比赛选题: 虚拟仿真

比赛题目: 基于 Unity 的迈克尔逊干涉及偏振移相

测量温度场的虚拟仿真平台设计

目录

一、 选题背景与意义	1
1.1 背景	1
1.2 意义	1
1.3 目标定位	2
二、 物理原理	2
2.1 基础实验: 迈克尔逊干涉仪测量激光波长	2
2.2 拓展实验: 偏振移相法测量火焰动态温度场	3
2.2.1 轴对称火焰温度场建模	4
2.2.2 气体温度与折射率关系	5
2.3 PMI 前端偏振编码原理	6
2.4 4-f 系统、朗奇光栅与分析偏振检测原理	6
2.5 相位解算、阿贝尔投影与火焰温度反演原理	7
三、 虚拟物理仿真平台的开发过程	9
3.1 开发工具	9
3.2 设计思路	10
3.2.1 开发原则	10
3.2.2 设计框架与流程	11
3.2.3 用户界面设计	13
3.2.4 用户交互设计	14
3.2.5 场景建模与动画设计	15
3.3 基于三维建模的实验仪器建立	16
3.3.1 创建基本结构	17
3.3.2 设计光路	17
3.3.3 添加细节和修饰	18
3.4 基于 Unity 3D 的基础实验过程仿真	18
3.4.1 场景搭建	18
3.4.2 激光光路模拟	19
3.4.3 粗调与精密读数设置	19
3.4.4 三点校准与反射镜调节	20
3.4.5 干涉条纹模式切换	21
3.4.6 干涉圆环实时显示	22
3.4.7 细调读数与条纹变化联动	23

3.4.8	数据记录与自动计算	23
3.4.9	实验评分与结果反馈	23
3.5	基于 Unity 3D 的拓展实验过程仿真	25
3.5.1	拓展实验场景搭建	25
3.5.2	火焰动态温度场对象设计	25
3.5.3	PMI 前端偏振编码设计	26
3.5.4	4-f 系统与朗奇光栅设计	26
3.5.5	相移校准与三幅图样显示界面	26
3.5.6	相位解算与温度场重建界面	27
3.5.7	Python 拓展图像服务设计	28
3.6	基于 Unity 3D 的 UI 界面开发	28
3.6.1	新建脚本并编写交互方法	28
3.6.2	挂载脚本到操作对象	28
3.6.3	设置按钮事件	29
3.6.4	预习界面与 AI 助教面板设计	29
3.6.5	记录面板与数据处理面板设计	29
3.6.6	进入拓展实验按钮与场景切换	29
3.6.7	最终测试与界面优化	30
四、	设计重难点	30
4.1	光学仪器三维建模	30
4.2	干涉条纹实时仿真	30
4.3	精密读数与条纹变化联动	30
4.4	数据记录与评分系统设计	30
4.5	拓展实验偏振移相光路设计	31
4.6	Unity UI 与场景切换设计	31
五、	仿真程序的使用方法	31
5.1	登录与实验选择	31
5.2	预习导学与 AI 助教使用方法	32
5.3	基础实验使用方法	34
5.4	拓展实验使用方法	34
5.5	练习模式与考试模式说明	35
六、	数据处理	36
6.1	基础实验波长计算	36
6.2	不确定度与误差分析	36

6.3	拓展实验条纹建模与相位解算	37
6.4	折射率扰动与火焰温度场重建	38
七、	程序结果的分析与评价	39
7.1	仿真实验效果.....	39
7.2	结果的物理意义	40
7.3	合理性	40
7.4	有效性	40
7.5	可拓展性.....	41
7.6	局限性	41
7.7	改进思路.....	41
八、	电脑配置要求	42
九、	创新点	42
十、	结论	43
十一、	成员分工	44
十二、	参考文献	44
附录:	Python 相位图到温度热力图算法	46

一、选题背景与意义

1.1 背景

光学实验是大学物理实验教学中的重要组成部分,其中迈克尔逊干涉仪实验兼具基础性、综合性和拓展性。通过该实验,学生能够直观理解光的干涉、光程差、等倾干涉、条纹移动以及精密位移测量等物理概念。传统迈克尔逊干涉仪实验通常用于测量 He-Ne 激光波长,也可进一步拓展到折射率变化、微小位移和温度场扰动等问题的测量研究。

然而,传统线下实验在教学过程中仍存在一定局限。首先,真实光学仪器成本较高,精密调节部件较多,学生在初次接触时容易因操作不熟练导致光路难以调通。其次,干涉条纹对环境扰动较敏感,仪器振动、空气流动、光源稳定性和机械回程误差都会影响实验现象。再次,部分物理过程具有抽象性,例如光程差变化与干涉环冒出或消失之间的对应关系、温度场引起折射率变化再引起相位变化的链条,仅依靠板书和二维图示难以形成直观认识。

已有迈克尔逊干涉仿真和光学虚拟仿真实验平台研究表明,通过三维场景、参数调节和实验现象可视化,可以帮助学生理解干涉图样随光学参数变化的规律,提升实验预习和课堂演示效果 [8, 9]。基于上述问题,我们利用 Unity 3D 构建了迈克尔逊干涉仪虚拟仿真实验平台。平台以基础实验为起点,实现了开启激光器、粗调定位、三点校准、干涉条纹观察、细调读数、数据记录和自动计算等完整流程;同时在此基础上设计了面向火焰动态温度场检测的偏振移相拓展实验,将迈克尔逊干涉仪从传统的测波长实验拓展到透明气体瞬态温度场测量场景。该设计既保留了基础实验的教学训练价值,又增强了实验内容的前沿性和可拓展性。

1.2 意义

本虚拟仿真实验平台的意义主要体现在实验教学、学习体验和技术开发三个层面。

在实验教学层面,平台通过三维建模和实时交互将抽象的光学原理转化为可观察、可操作的实验过程。学生可以在虚拟环境中反复练习光路调节、读数记录和数据处理,在不受仪器数量和实验场地限制的情况下掌握实验流程。平台能够准确模拟干涉条纹随可动镜位移变化的现象,并将读数、条纹变化量和最小二乘拟合结果实时关联,有助于学生理解镜面位移、条纹变化数和激光波长之间的定量关系。

在学习体验层面,平台提供练习模式和考试模式,兼顾预习、训练和考核需求。两种模式均启用得分系统并记录学生操作;练习模式提供步骤提示、实时读数和当前得分显示,帮助学生及时发现问题并逐步熟悉实验操作;考试模式隐藏操作提示和实时得分,通过限时独立操作与实验结束后的成绩详情评价学生表现。相比单纯观看视频或阅读实验指导书,这种交互式学习方式更接近真实实验过程。

在技术开发层面,平台综合运用了 Unity 3D 场景搭建、光路可视化、Shader 干涉条

纹仿真、UI 交互、相机切换、数据处理和评分系统等技术。尤其在拓展实验模块中,平台引入偏振移相法、4-f 系统、朗奇光栅、CCD 同步采集和逆阿贝尔变换,构建了从火焰温度变化到折射率变化、投影相位、相移干涉图和圆形照射区域温度场重建的完整演示链路。该思路借鉴了单次曝光偏振移相测量动态温度场的研究路线 [1], 为后续开发更多光学测量类虚拟仿真实验提供了基础。

1.3 目标定位

本作品定位为大学物理实验教学辅助资源和光学测量拓展实验虚拟仿真平台。平台面向正在学习大学物理实验、光学干涉测量和虚拟仿真实验开发的学生,也可作为教师课堂演示和实验预习资源。

平台设计目标包括以下三个方面。第一,通过虚拟仿真还原迈克尔逊干涉仪的基本结构和实验操作,使学生能够完成基础实验中激光器开启、粗调定位、三点校准、细调读数、数据记录和自动计算等操作。第二,在基础实验已调通的前提下,进一步构建偏振移相火焰动态温度场测量拓展实验,使学生理解气体温度、密度、折射率、投影相位和干涉图变化之间的联系,并认识轴对称假设和激光照射区域对可测温度场范围的限制。第三,通过 UI 引导、物体高亮、相机切换、自动评分等交互功能,增强平台的教学性、操作性和反馈性。

二、物理原理

2.1 基础实验: 迈克尔逊干涉仪测量激光波长

迈克尔逊干涉仪利用分束镜将一束相干光分为两束,两束光分别经固定反射镜和可动反射镜反射后再次合束。若两束光之间存在光程差,则在观察屏上形成干涉条纹。当可动镜沿光路方向移动时,两束光的光程差发生变化,干涉圆环会从中心不断冒出或消失。

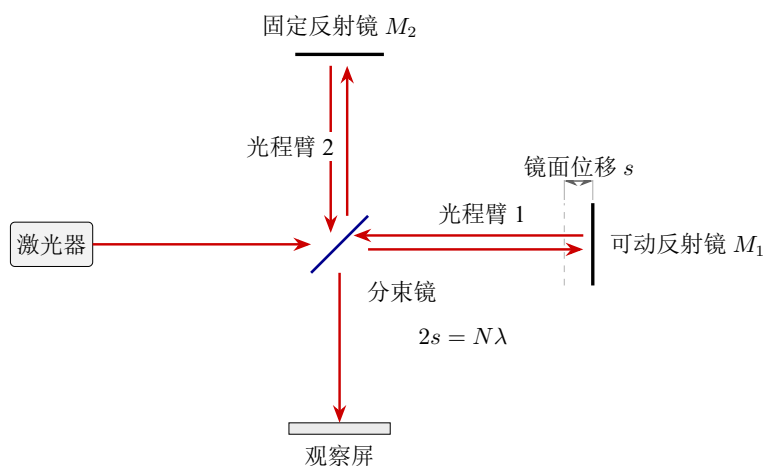


图 1 迈克尔逊干涉仪基础光路原理图

在等倾干涉条件下, 若可动镜移动距离为 s , 由于光束往返通过该光程, 两束光之间的光程差变化为

$$\Delta L = 2s. \quad (1)$$

当干涉条纹变化 N 个圆环时, 光程差变化满足

$$2s = N\lambda, \quad (2)$$

因此激光波长可由

$$\lambda = \frac{2s}{N} \quad (3)$$

计算得到。

在平台基础实验中, 学生在 $N_i = 0, 20, 40, 60, 80, 100$ 等节点记录读数 d_i 。数据处理采用最小二乘法建立读数与条纹变化数之间的线性关系

$$d_i = a + bN_i, \quad i = 0, 1, \dots, 5, \quad (4)$$

其中 b 表示每变化一个条纹对应的镜面读数变化。由 $2s = N\lambda$ 可知, 当 d_i 的单位为 mm 时, 激光波长可由

$$\lambda = 2b \times 10^6 \text{ nm} \quad (5)$$

得到。该方法利用全部六个记录点估计斜率, 同时可输出拟合值、残差和拟合优度, 便于学生理解数据处理和误差分析过程。

2.2 拓展实验: 偏振移相法测量火焰动态温度场

动态温度场是指在观测时间窗口内, 被测透明介质内部温度分布及其随时间变化的过程。火焰和受热空气均属于折射率随温度快速变化的透明气体介质。温度升高会引起气体密度和折射率下降, 进而改变测量光束的光程与干涉相位。因此, 本平台以酒精灯火焰作为温度扰动对象, 利用偏振移相干涉法重建圆形激光测量窗口内的瞬态温度分布。

实验中的 He-Ne 激光仅作为低功率探测光使用, 不作为火焰的加热来源。由于激光半径为 $R_L = 1 \text{ cm}$, CCD 能够获得的相位信息和最终重建结果均限定在圆形有效视场

$$\Omega_L = \{(x, z) \mid x^2 + z^2 \leq R_L^2\}.$$

圆外区域没有有效探测光通过, 因而不参与温度反演。程序中环境温度取 $T_0 = 298.15 \text{ K}$, 环境空气折射率取 $n_0 = 1.000271$, 温度显示色标固定为 $25\text{--}520^\circ\text{C}$, 便于比较不同测量高度下的反演结果。酒精灯火焰在数学模型中作为完整火焰存在, 圆形激光视场只是其中的局部测量窗口; 因此平台显示的温度热力图表示窗口内温度场, 不能直接外推为完整火焰全场。

2.2.1 轴对称火焰温度场建模

为使单方向投影数据能够通过逆阿贝尔变换恢复局部场, 本实验对火焰横截面采用轴对称近似。令 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 表示距火焰中心轴的径向距离, $z \in [-R_L, R_L]$ 表示圆形激光窗口内的局部高度坐标, h 表示从灯芯底部向上的完整火焰真实高度。模型先建立完整酒精灯火焰, 再截取局部测量窗口:

$$h = h_m + z, \quad h_m \in [25, 50] \text{ mm}, \quad h_m^0 = 45 \text{ mm}.$$

其中 h_m^0 为默认测量中心高度, Unity 中通过灯光高度旋钮调节该值, 鼠标滚轮每次约对应 1 mm 的测量高度变化。完整火焰总高取 $H = 60 \text{ mm}$, 最大半径取 $R_{\max} = 9 \text{ mm}$, 火焰包络半径写为

$$R_f(h) = R_{\max} \left[\max \left(\sin \frac{\pi h}{H}, 0 \right) \right]^{0.46}.$$

在该完整火焰坐标中, 温度场写成中心内焰背景、中心热羽流、外焰高温带和外侧热空气扩散项的平滑叠加:

$$T(r, z, t) = T_0 + \chi_L(r, z) S(h) F(h, t) \left\{ B_f(r, h) [\Delta T_i G_i + \Delta T_c G_c + \Delta T_o G_o] + \Delta T_a B_a(r, h) G_a \right\}, \quad (6)$$

其中 $\chi_L(r, z)$ 为圆形激光窗口掩膜, 当 $r^2 + z^2 \leq R_L^2$ 时取 1, 否则取 0。各径向分布采用连续高斯或 Sigmoid 函数:

$$\begin{aligned} G_i &= \exp \left[-\frac{r^2}{2\sigma_i^2(h)} \right], & G_c &= \exp \left[-\frac{r^2}{2(0.52R_f(h) + 1 \text{ mm})^2} \right], \\ G_o &= \exp \left[-\frac{(r - r_o(h))^2}{2\sigma_o^2(h)} \right], & G_a &= \exp \left[-\frac{(r - r_o(h) - 2.2 \text{ mm})^2}{2(2.4\sigma_o(h))^2} \right], \\ r_o(h) &= 0.77R_f(h), & B_f &= \left[1 + \exp \frac{r - R_f(h)}{1.8 \text{ mm}} \right]^{-1}, \\ B_a &= \left[1 + \exp \frac{r - R_f(h) - 2.8 \text{ mm}}{2.4 \text{ mm}} \right]^{-1}. \end{aligned}$$

这里 $S(h)$ 表示“底部较弱、中上部较强、顶部软衰减”的高度包络, 小幅动态波动写为

$$F(h, t) = 1 + 0.018 \sin(2\pi \cdot 0.75t + 2.6h/H).$$

程序中取 $\Delta T_i = 145^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_c = 80^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_o = 360^\circ\text{C}$ 、 $\Delta T_a = 65^\circ\text{C}$, 并将有效温度显示范围限制在日常酒精灯外焰量级。该模型使中心内焰区域温度低于外焰反应区, 外焰之外再平滑过渡到环境空气; 在二维 x - z 截面中, 轴对称外焰环表现为左右两条随高度向中心收拢的高温带。模型不是燃烧流体力学数值求解, 而是满足轴对称反演条件、用于验证完整光学测量链路的参数化真实场。

2.2.2 气体温度与折射率关系

在开放空间近似恒压条件下, 理想气体状态方程给出

$$\frac{\rho(r, z, t)}{\rho_0} = \frac{T_0}{T(r, z, t)}.$$

Gladstone-Dale 关系表明气体折射率增量与密度近似成正比:

$$n - 1 = K_{GD}\rho.$$

对环境空气有 $n_0 - 1 = K_{GD}\rho_0$, 其中 n_0 和 T_0 分别为环境空气折射率和环境温度。将火焰局部关系 $n - 1 = K_{GD}\rho$ 与环境空气关系相除, 并代入 $\rho/\rho_0 = T_0/T$, 即可同时消去密度 ρ 和 Gladstone-Dale 常数 K_{GD} , 得到火焰局部温度与折射率的关系

$$n(r, z, t) - 1 = (n_0 - 1) \frac{T_0}{T(r, z, t)}. \quad (7)$$

因此相对于环境空气的折射率扰动为

$$\Delta n(r, z, t) = n(r, z, t) - n_0 = (n_0 - 1) \left[\frac{T_0}{T(r, z, t)} - 1 \right].$$

对于升温火焰区域有 $\Delta n < 0$, 即火焰温度越高, 空气密度和折射率越低。反演获得局部折射率后, 绝对温度由

$$T(r, z, t) = \frac{(n_0 - 1)T_0}{n(r, z, t) - 1} \quad (8)$$

计算得到。

标准迈克尔逊干涉法可以精密测量沿光路方向的平均温度变化, 但难以直接展示局部空间分布 [3]。偏振移相法能够同步获得多幅相移干涉图, 更适合火焰、热羽流等快速变化的二维温度场测量 [1, 2]。因此, 本平台采用加起偏器的迈克尔逊干涉仪作为相位测量前端, 并在其输出端配置四分之一波片形成偏振编码光; 该 PMI 部分位于 4-f 系统之前, 后续再通过 4-f 系统、朗奇光栅、三路分析偏振片和 CCD 成像面实现单次曝光三步相移测量。

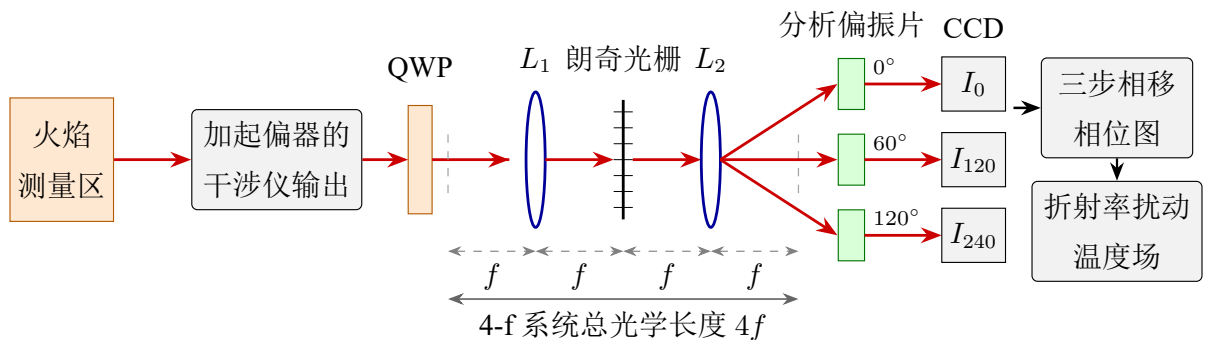


图 2 偏振移相火焰动态温度场测量光路原理图

2.3 PMI 前端偏振编码原理

PMI 前端采用加起偏器的迈克尔逊干涉仪, 使入射光具有确定的线偏振态; 火焰折射率扰动使两臂合束后的干涉光携带待测相位差。在干涉仪输出端加入四分之一波片 QWP 后, 待测相位被编码到输出光的偏振状态中, 从而形成一束携带相位信息的偏振编码光 [1]。

2.4 4-f 系统、朗奇光栅与分析偏振检测原理

4-f 系统由两片焦距相同的透镜组成, 两片透镜之间的距离为 $2f$ 。第一片透镜将输入图像变换到频谱面, 第二片透镜再将频谱信息重新成像到像面。若在频谱面放置朗奇光栅, 光束会发生衍射并形成多个衍射级次, 经过第二片透镜后在 CCD 像面上形成多幅并排相同的干涉图像。

本实验利用 4-f 系统和朗奇光栅将 PMI 前端输出的一束偏振编码干涉光复制成三路成像光束。三路光束对应 -1 级、 0 级和 $+1$ 级衍射光, 再分别通过三个不同角度的分析偏振片, 便可在 CCD 上同时得到三幅相移干涉图。该方法本质上是用空间分束代替时间逐次拍摄, 可以避免动态温度场随时间变化导致的相位误差 [1, 4]。

设火焰折射率变化引起的待测相位为 $\phi(x, z)$, 分束后的分析偏振片角度为 θ , 则对应支路的干涉光强可表示为

$$I_{\theta}(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos [\phi(x, z) + 2\theta], \quad (9)$$

其中 $a(x, z)$ 表示背景光强, $b(x, z)$ 表示调制度项。式(9)描述的是 PMI 前端之后的分析偏振检测结果: 物光携带的相位信息 $\phi(x, z)$ 被保留下来, 而分析偏振片角度 θ 会引入 2θ 的可控相移。

当三路分析偏振片角度分别设置为 0° 、 60° 、 120° 时, 对应相移分别为 0° 、 120° 、 240° 。因此, 可以在同一时刻得到三幅相移干涉图

$$I_0(x, z) = a + b \cos \phi, \quad (10)$$

$$I_{120}(x, z) = a + b \cos \left(\phi + \frac{2\pi}{3} \right), \quad (11)$$

$$I_{240}(x, z) = a + b \cos \left(\phi + \frac{4\pi}{3} \right). \quad (12)$$

若朗奇光栅的光栅常数为 d_g , 入射光波长为 λ , 透镜焦距为 f , 则相邻衍射级次在像面上的间隔可近似表示为

$$x_0 \approx \frac{\lambda f}{d_g}. \quad (13)$$

在真实系统中, 不同衍射级次的亮度会受到光栅频谱包络影响, 因此实验处理中通常需要进行条纹归一化和相位图校正。对于本平台的教学演示, 重点放在“频谱面分束-像面并

排成像—三幅图同步采集”的物理链路上。在 Unity 仿真中, 可以通过调整光栅常数、透镜焦距和 CCD 成像面位置, 使三幅相移图在图像平面上并排排列且互不重叠。

2.5 相位解算、阿贝尔投影与火焰温度反演原理

由三幅相移干涉图可通过三步相移算法求得包裹相位。根据相移为 $0, 2\pi/3, 4\pi/3$ 的三幅图, 相位可写为

$$\phi_w(x, z) = \text{atan2}\left(\sqrt{3}[I_{240}(x, z) - I_{120}(x, z)], 2I_0(x, z) - I_{120}(x, z) - I_{240}(x, z)\right). \quad (14)$$

其中 $\text{atan2}(Y, X)$ 根据分子和分母的符号确定相位所在象限, 输出范围为 $(-\pi, \pi]$ 。三幅图中的黑白灰度仅表示干涉光强, 并不与温度一一对应。由于式(14)得到的是包裹相位, 相位值在 $-\pi$ 与 π 之间会发生跳变, 因此需要沿图像的横向和纵向进行二维相位展开。设火焰测量态和无火焰参考态分别解得的包裹相位为 ϕ_w^m 和 ϕ_w^r , 则连续相位可写为

$$\phi_m(x, z) = \text{unwrap}[\phi_w^m(x, z)], \quad (15)$$

$$\phi_r(x, z) = \text{unwrap}[\phi_w^r(x, z)]. \quad (16)$$

其中上标 m 表示 measurement, 即点燃火焰后的测量态; 上标 r 表示 reference, 即无火焰参考态。两者相减可以消去系统固定条纹, 但相位展开后仍可能残留一个由展开起点和全局相位零点造成的常数项。若圆形测量窗口边缘存在可判定为环境空气的区域 Ω_{edge} , 程序用该区域的中位数作为边缘常值校正量:

$$C_{\text{edge}} = \text{median}_{(x,z) \in \Omega_{\text{edge}}} [\phi_m(x, z) - \phi_r(x, z)], \quad (17)$$

$$\Delta\phi(x, z) = \phi_m(x, z) - \phi_r(x, z) - C_{\text{edge}}. \quad (18)$$

这样得到的 $\Delta\phi(x, z)$ 才只表示火焰折射率变化引起的投影相位差。若某一测量高度下边缘区域仍被火焰覆盖, 则不把整圈边缘强行设为零, 而只在可识别的空气边缘或无火焰参考区域上估计 C_{edge} , 避免把真实热扰动误扣除。

为了使火焰引起的条纹弯曲便于观察, 正向仿真在测量相位中加入固定系统参考相位 $\phi_{\text{sys}}(x, z)$ 。该参考相位表示镜面微小倾斜和弱曲率造成的背景条纹, 在无火焰参考图和火焰测量图中保持不变, 因而会在参考相位扣除时被消去, 不参与温度计算。参考相位的作用类似真实干涉仪中有意保留的背景载频: 没有它时图像会接近均匀灰度, 条纹弯曲不易观察; 有了它以后, 火焰造成的相位扰动表现为条纹局部偏折。

令 $\text{OPD}(x, z)$ 表示单程光束沿视线方向 y 穿过火焰时, 由折射率变化引起的投影光程差:

$$\text{OPD}(x, z) = \int_{\Gamma} \Delta n(x, y, z) dy. \quad (19)$$

其中 $\Delta n = n - n_0$ 为相对于环境空气的折射率扰动, Γ 表示探测光在视线方向穿过火焰的路径。OPD 的单位为长度, 物理意义是“折射率变化沿光路积分后等效增加或减少的

光程”。迈克尔逊测量臂中的光束往返通过火焰区域, 因此通过次数取

$$N_{\text{pass}} = 2.$$

若仿真中为了便于显示条纹弯曲而使用无量纲相位显示增益 gain , 则投影相位与单程投影光程差满足

$$\Delta\phi(x, z) = \frac{2\pi}{\lambda} N_{\text{pass}} \text{gain} \text{OPD}(x, z), \quad \text{OPD}(x, z) = \frac{\lambda\Delta\phi(x, z)}{2\pi N_{\text{pass}} \text{gain}}. \quad (20)$$

式中 λ 为激光波长, N_{pass} 表示探测光通过火焰区域的次数, gain 仅用于仿真显示和数值尺度放大, 不代表新的物理相位来源。式(19) 和式(20) 表明, CCD 测得的是沿光路积分后的投影信息, 而不是某一点的局部折射率。

设固定高度 z 的火焰横截面近似轴对称, 即 $\Delta n = \Delta n(r, z)$, 其中 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ 。此时投影光程差是局部折射率扰动的正阿贝尔变换:

$$\text{OPD}(x, z) = 2 \int_x^{R_L} \frac{\Delta n(r, z) r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr. \quad (21)$$

式(21) 中的因子 2 来自轴对称截面的前后两侧光路贡献。由于单个方向的相位图只提供沿 y 方向积分后的投影量, 若没有轴对称近似, 仅凭一幅投影无法唯一恢复二维截面内部的局部折射率分布。引入轴对称条件后, 可由逆阿贝尔变换恢复局部径向折射率扰动:

$$\Delta n(r, z) = -\frac{1}{\pi} \int_r^{R_L} \frac{\partial \text{OPD}(x, z) / \partial x}{\sqrt{x^2 - r^2}} dx. \quad (22)$$

实际离散图像中的微分运算会明显放大噪声。设相邻像素间距为 Δx , OPD 测量误差为 ε_i , 则一阶差分中会出现

$$\frac{(\text{OPD}_{i+1} + \varepsilon_{i+1}) - (\text{OPD}_i + \varepsilon_i)}{\Delta x} = \frac{\text{OPD}_{i+1} - \text{OPD}_i}{\Delta x} + \frac{\varepsilon_{i+1} - \varepsilon_i}{\Delta x}.$$

噪声项被 Δx 除以一次; 像素越密, Δx 越小, 高频噪声越容易被放大。并且式(22) 的分母 $\sqrt{x^2 - r^2}$ 在积分下限附近趋近于零, 会进一步增强局部误差。因此 Python 后端不直接计算式(22) 的数值微分, 而是建立离散阿贝尔投影矩阵并采用一阶平滑 Tikhonov 正则化求解。

具体地, 将半径方向划分为若干环带, 认为第 j 个环带内折射率扰动近似为常数 $q_j \approx \Delta n(r_j, z)$ 。对第 i 条视线, 正阿贝尔投影可离散写为

$$\text{OPD}_i = \sum_j A_{ij} q_j, \quad \mathbf{OPD} = A\mathbf{q}, \quad (23)$$

其中 A_{ij} 表示第 i 条视线穿过第 j 个同心环带的等效弦长。若直接用最小二乘求 $\mathbf{q}$, 噪声会导致相邻环带的解剧烈振荡。为此加入一阶平滑约束 $D\mathbf{q}$, 其中 D 为一阶差分矩阵, $D\mathbf{q}$ 表示相邻环带折射率扰动的差值。Tikhonov 正则化求解的是

$$\mathbf{q}^* = \arg \min_{\mathbf{q}} (\|A\mathbf{q} - \mathbf{OPD}\|_2^2 + \alpha \|D\mathbf{q}\|_2^2). \quad (24)$$

第一项要求计算投影 $A\mathbf{q}$ 尽量接近测得的 **OPD**, 第二项要求相邻半径处的 Δn 不出现不合理的剧烈跳变, α 控制“贴合数据”和“保持平滑”之间的权衡。对式(24)关于 $\mathbf{q}$ 求导并令导数为零, 得到正规方程

$$(A^T A + \alpha D^T D) \mathbf{q}^* = A^T \mathbf{OPD}. \quad (25)$$

由此求得 $\mathbf{q}^*$ 后, 即得到离散半径位置上的 $\Delta n(r_j, z)$ 。恢复 $n(r, z) = n_0 + \Delta n(r, z)$ 后, 再由式(8)得到火焰绝对温度。平台最终显示的圆形温度热力图确实由最近一次三幅相移干涉图重新反演得到, 预设火焰温度场仅用于正向生成观测数据和评价反演误差。该结果只表示半径 1 cm 的激光有效视场, 不能外推为圆外完整火焰温度分布。

三、虚拟物理仿真平台的开发过程

3.1 开发工具

本平台主要采用 Unity 3D 完成实验场景搭建、交互脚本编写、UI 界面开发和仿真程序发布。仪器模型主要使用 Blender 建模后导入 Unity, 再完成材质、贴图、光照、碰撞体和交互脚本挂载。Unity 端程序逻辑采用 C# 编写, 重点包括相机切换、元件移动控制、基础实验干涉条纹参数更新、读数记录、自动计算、模式评分和 AI 助教界面等模块。拓展实验中的三幅相移条纹与温度场分析图不由 Unity Shader 直接计算, 而由独立 Python 图像服务 `MichelsonFlameInnovationServer.py` 生成。该服务通过本机端口 5000 与 Unity 通信; AI 助教与基础实验拟合服务仍由原有后台模块分别提供。

表 1 平台开发工具表

工具类型	软件名称	主要作用
三维建模工具	Blender	创建迈克尔逊干涉仪、光学平台、透镜、反射镜、旋钮和支架等模型
虚拟仿真平台	Unity 3D	搭建实验场景, 实现光路显示、干涉条纹、交互控制、数据处理和评分反馈
脚本编辑器	Visual Studio 2022	编写 C# 脚本, 实现按钮事件、仪器调节、自动计算和 UI 交互
AI 助教后端	Python + Flask + Ollama	提供本地问答接口, 支持学生围绕实验原理、仪器操作和数据处理进行即时提问
拓展图像计算	Python + NumPy、OpenCV、Matplotlib	根据轴对称火焰模型生成三幅相移干涉图, 并由图像反演圆形激光视场内的火焰温度场
图像处理工具	Photoshop	制作 UI 背景、图标、按钮素材和实验报告插图
文档编写工具	LaTeX	撰写研究报告、整理公式和图表说明

3.2 设计思路

3.2.1 开发原则

平台开发遵循以下原则。

第一, **物理合理原则**。平台中光路传播、干涉条纹变化、读数计算和温度场反演流程均基于光学实验原理设计, 避免单纯动画演示造成物理逻辑断裂。

第二, **操作友好原则**。平台通过步骤提示、面板开关、按钮交互和高亮反馈降低学生初次操作难度。学生点击控制对象后可使用鼠标滚轮或键盘进行调节。

第三, **教学反馈原则**。基础实验中设置练习和考试两种模式, 两种模式均记录学生预习测验、操作过程、读数过程和计算过程并进行评分。练习模式实时显示当前得分并提供操作提示, 考试模式隐藏实时得分与操作提示, 在实验结束后给出成绩详情, 帮助学生发现问题。

第四, **拓展创新原则**。平台不是仅停留在传统测波长实验, 而是在已调好的迈克尔逊

干涉仪基础上扩展偏振移相火焰动态温度场测量模块, 体现虚拟仿真实验的开放性和延展性。

第五, **智能导学原则**。平台新增预习导学界面和 AI 助教入口, 将预习导学、AI 助教、仪器认知、实验训练、实验考核和拓展实验组织在同一侧边导航中。学生在正式进入实验前可以先阅读导学内容、查看仪器说明, 也可以通过 AI 助教提出与实验原理、调节步骤和数据处理有关的问题, 形成“预习-答疑-训练-考核-拓展”的学习闭环。

3.2.2 设计框架与流程

本平台整体架构由四个层次构成: 底层三维模型层、核心物理仿真层、用户交互层和数据反馈层。底层三维模型层负责构建光学平台、激光器、反射镜、分束镜、透镜、光栅、CCD 等实体对象; 核心物理仿真层负责干涉条纹显示、条纹变化、相位扰动和温度场重建; 用户交互层负责按钮、面板、相机切换和物体移动; 数据反馈层负责读数记录、自动计算、评分报告和结果显示。

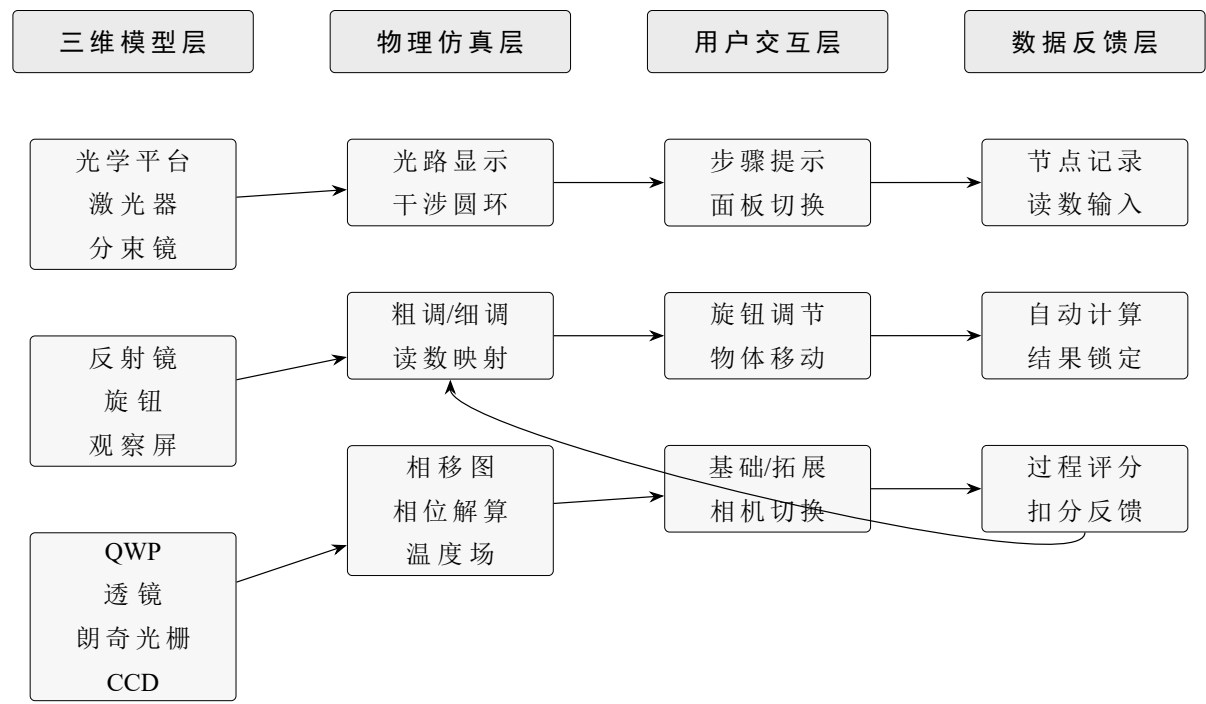


图 3 平台总体架构图

在程序实现上, 基础实验由光源控制、三点校准、粗调、细调、读数盘、条纹显示和数据处理脚本协同完成。其中 KnobControl 负责激光开关与高度对中, MirrorAlignmentController 与 ExperimentModeManager 负责三点校准和干涉模式切换, M1CoarseKnobController、SimpleFineKnobController、CoarseDialByCubeZ 和 PrecisionDialByCubeZ 建立可动镜位移、旋钮角度和读数之间的映射, InterfereUIController 将光程差、镜面倾斜量 and 对比度写入干涉条纹材质。数据反馈层由 DataRecordingExamBridge、DataProcessingCalcCore、DataProcessingAutoCalc 和 ExamScoreM

anager 构成,用于记录节点、计算结果并生成成绩反馈。

在智能导学和拓展实验可视化方面,平台采用“Unity 前端 + Python 本地服务”的方式扩展功能。AI 助教由 Unity 端 AIAssistantRealUI 发送 JSON 问题到 Flask 服务,后端再调用本地 Ollama 模型并返回中文答案;火焰拓展图像服务则根据轴对称温度模型计算折射率扰动、正阿贝尔投影和投影相位,输出三幅并排的相移干涉图,并在处理请求到达后从三幅图重新反演温度场。该设计使 Unity 主程序保持较轻量,同时便于后续替换 AI 模型或改进物理图像算法。

从教学流程上看,基础实验按照“先调光路、再取读数、后处理反馈”的顺序组织。学生进入基础实验后先选择练习模式或考试模式,开启光源并完成高度对中;随后将粗调读数调至 50 mm 附近,通过三点校准使光点重合;切换到干涉条纹模式后,再细调得到清晰圆环。正式记录前,学生需要保持连续同向旋转以消除空程差,先记录初始读数 d_0 ,再在 $N = 20, 40, 60, 80, 100$ 时依次记录 d_1 至 d_5 。最后由平台完成数据处理、自动计算、误差分析和评分反馈。

表 2 基础实验标准操作流程

步骤	操作环节	平台实现与考查重点
1	进入基础实验并选择模式	两种模式均启用评分逻辑;练习模式显示操作提示和实时得分,考试模式隐藏提示与实时得分
2	开启光源与高度对中	打开激光器,调节光源高度,使光束进入分束镜中心区域
3	粗调定位	将读数调节至 50 mm 附近,建立后续细调读数基准
4	三点校准	调节反射镜,使观察屏上三个光点重合,完成准直
5	条纹观察与细调	切换干涉条纹模式,微调反射镜或细调机构,得到清晰圆环
6	消除空程差	初始记录前保持连续同向旋转,避免反向回拨带来的回程误差
7	节点读数记录	记录 d_0 ,并在 $N = 20, 40, 60, 80, 100$ 时记录 d_1-d_5
8	数据处理与反馈	自动计算波长、相对误差和不确定度,生成误差分析与评分反馈

3.2.3 用户界面设计

平台 UI 主要包括预习导学界面、实验步骤提示区、数据记录区、数据处理区、成绩反馈区和拓展实验结果展示区。预习界面采用深色科技风格侧边导航,依次设置“预习导学、AI 助教、仪器认知、实验训练、实验考核、拓展实验”六个入口,使学生可以在正式操作前完成知识预习、智能问答和模块选择。界面实现中使用 TextMeshPro 输入框和文本组件显示读数、计算结果与扣分信息,并通过面板显隐控制减少同时显示的信息量,使学生既能观察三维仪器,又能读取关键参数。

基础实验主界面将三维仪器场景与步骤提示、当前读数、条纹变化数 N 、数据记录和处理按钮组织在同一视图中,便于学生边操作边核对实验状态。

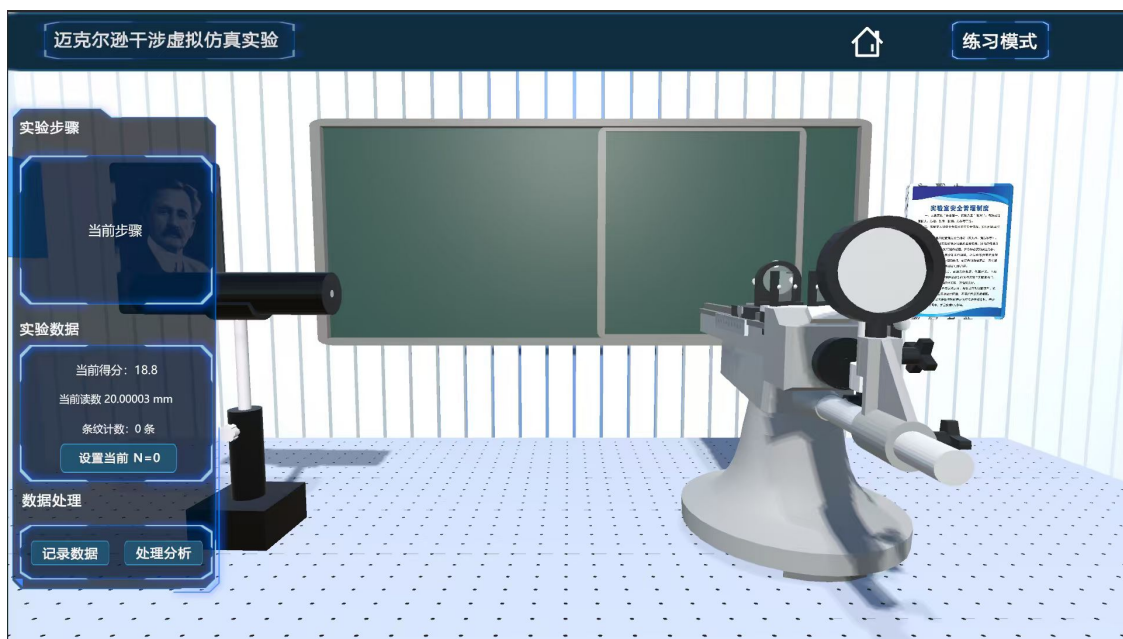


图 4 基础实验主界面图

拓展实验导学界面集中说明拓展实验目的、偏振移相原理和操作步骤,作为学生由基础测波长实验进入火焰动态温度场测量模块的过渡入口。



图 5 拓展实验导学界面图

3.2.4 用户交互设计

平台提供多种交互方式。对于需要移动的元素, `OpticalElementController` 和 `ObjectController` 支持点击选中、材质高亮和键盘方向输入移动; 粗调、细调和反射镜调节等精密操作则通过鼠标滚轮完成。平台还通过按钮实现实验模式切换、记录面板打开、数据处理、结束考试和进入拓展实验等功能。练习模式和考试模式均自动评分, 其中练习模式在操作过程中实时显示当前得分。

以光源调节为例, 学生选中激光器后通过鼠标滚轮改变光源高度, 界面同步显示光束位置和当前操作提示。

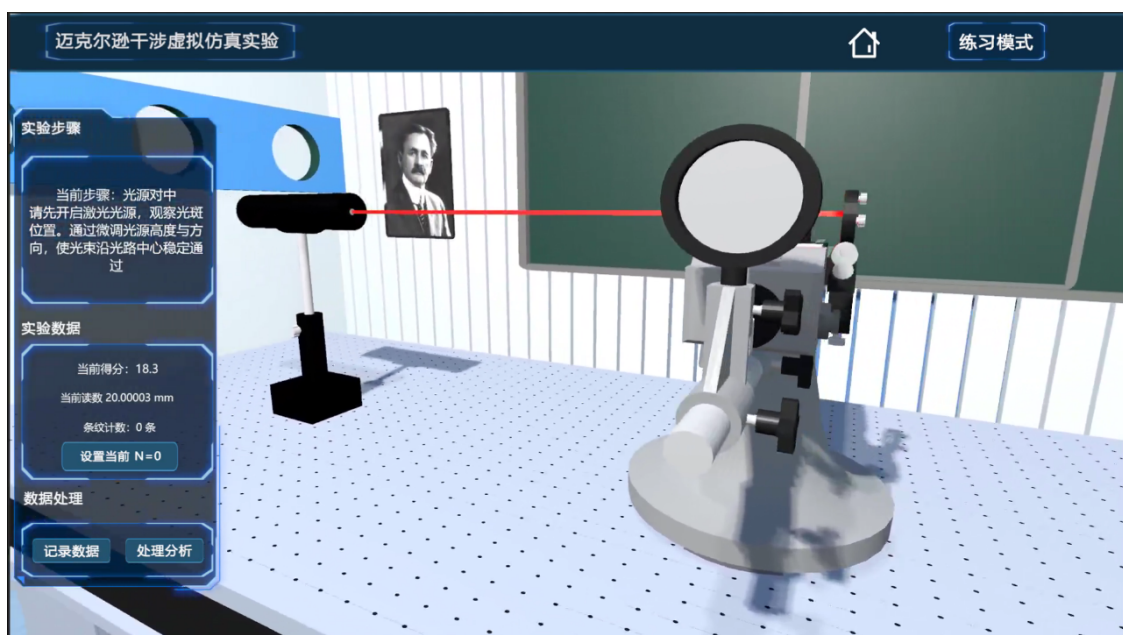


图 6 光源高度调节界面图

3.2.5 场景建模与动画设计

实验场景以真实光学平台为基础,包括光学桌面、支架、激光器、分束镜、反射镜、观察屏、粗调机构、细调机构、火焰测量区、透镜、光栅和 CCD 屏幕等。基础实验中重点表现激光在迈克尔逊干涉仪中的传播路径和干涉圆环变化;拓展实验中重点表现探测光穿过火焰后产生的相位扰动、三路成像光束和 CCD 同步采集结果。

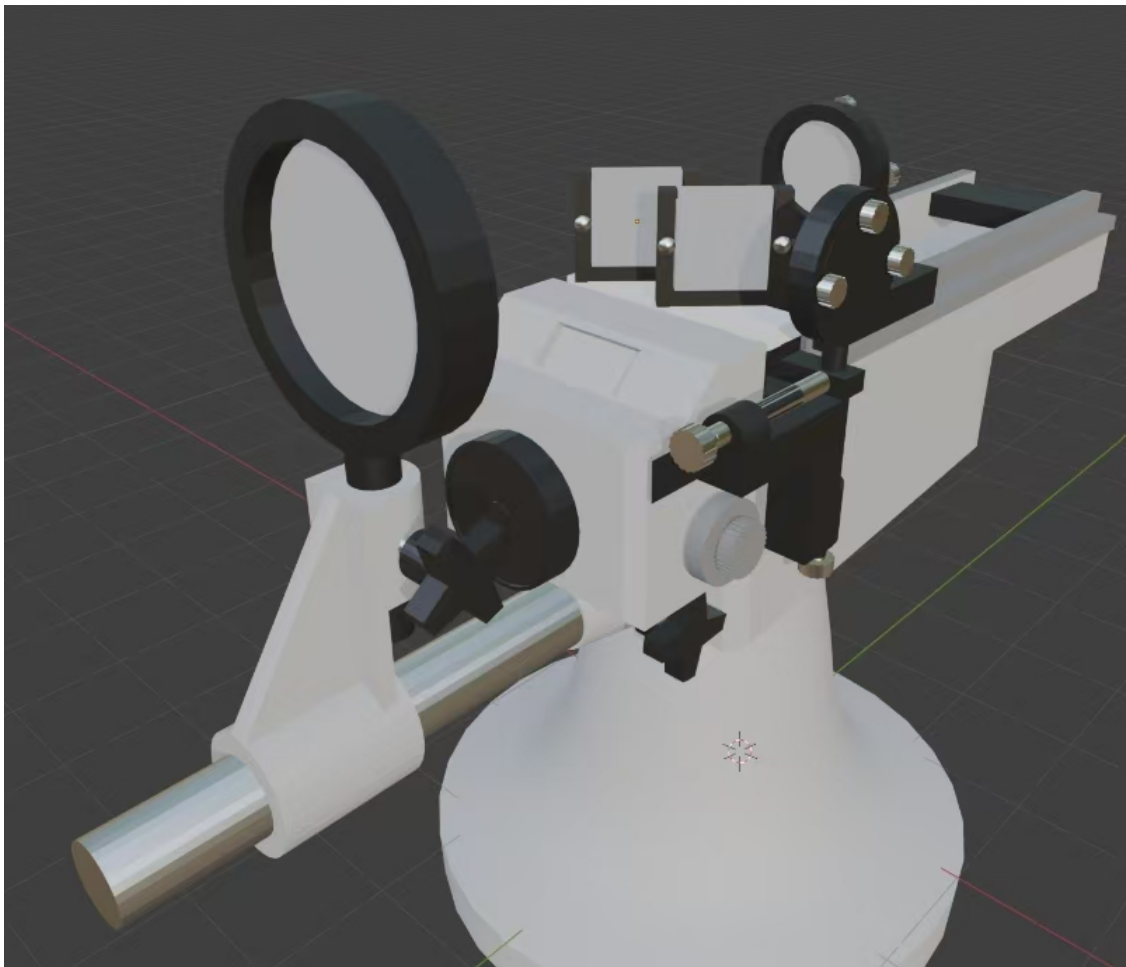


图 7 实验仪器三维模型整体图

3.3 基于三维建模的实验仪器建立

平台中的仪器模型需要兼顾真实性和运行效率。在建模过程中,对于反射镜、透镜、旋钮和刻度盘等关键部件,保留其外形特征和读数细节;对于不直接参与交互的支架和底座,适当简化几何结构,减少模型面数,提高程序运行流畅度。

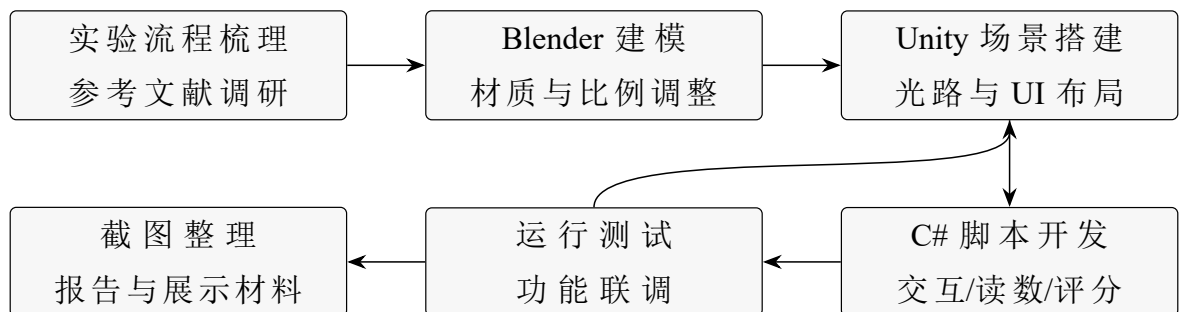


图 8 平台开发流程图

3.3.1 创建基本结构

首先建立光学平台、激光器、反射镜支架、分束镜支架和观察屏等基本结构。光学平台采用带孔桌面, 便于表现仪器摆放位置; 反射镜和透镜支架采用可调节结构, 便于后续在 Unity 中实现旋转和移动交互。

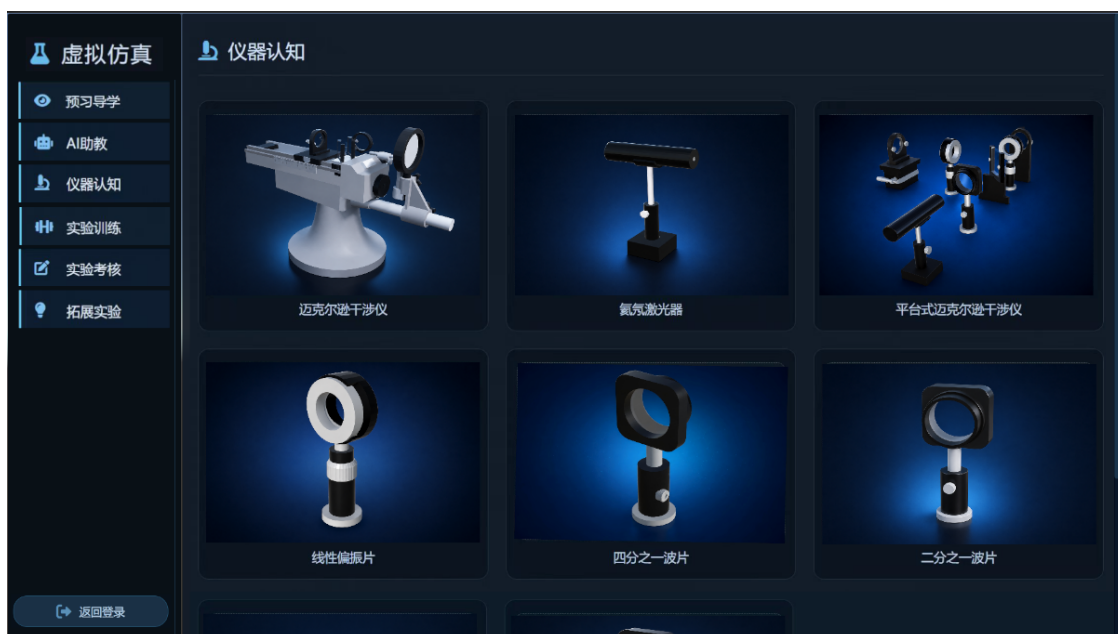


图 9 基础与拓展实验仪器模型认知界面图

3.3.2 设计光路

在三维场景中,光路采用红色 LineRenderer 和半透明光束对象进行表示。基础实验中, 激光器发出的光束经分束镜分成两束, 分别进入固定臂和可动臂, 返回后重新合束并在观察屏上形成干涉图样。拓展实验中, 输出光束继续进入偏振移相模块、4-f 系统、朗奇光栅和 CCD 成像面。

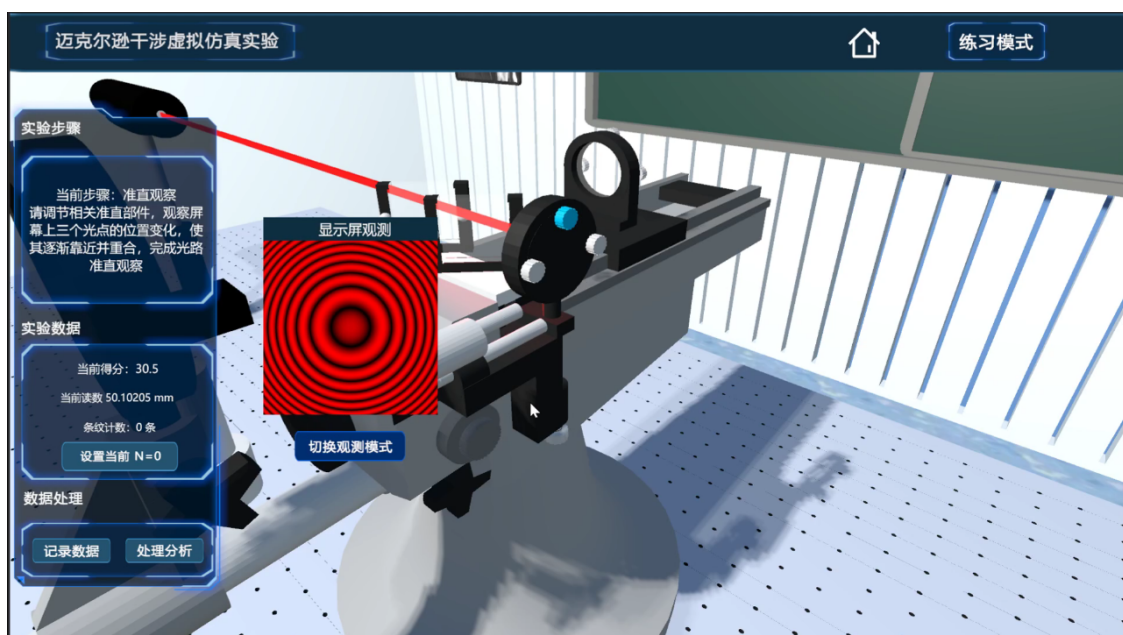


图 10 基础实验光路设计图

3.3.3 添加细节和修饰

为了增强真实感和操作辨识度,平台为旋钮、刻度盘、读数尺和仪器标签添加了细节纹理。粗调旋钮和精密读数盘保留刻度显示,便于学生练习读数;观察屏和 CCD 面板采用独立材质,用于显示干涉条纹和处理结果。

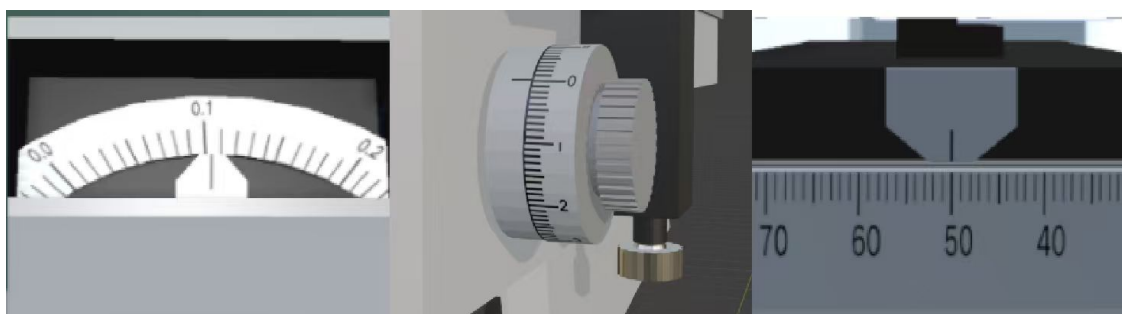


图 11 细节与纹理图

3.4 基于 Unity 3D 的基础实验过程仿真

3.4.1 场景搭建

将三维模型导入 Unity 后,首先完成场景布局。实验仪器按照真实迈克尔逊干涉仪结构放置在光学平台上,设置主相机、辅助相机、方向光和 Canvas UI。通过相机视角和 UI 面板配合,学生可以从整体视角观察实验装置,也可以通过局部视窗查看读数盘和观察屏细节。

3.4.2 激光光路模拟

平台通过脚本和光束对象显示激光传播路径。激光器由 **KnobControl** 控制, 点击旋钮可切换灯光和光束显隐, 灯开后才能通过鼠标滚轮调节激光高度。脚本根据激光器高度与目标高度的偏差判断是否完成对中, 并把光源开启和高度对中状态送入两种模式共用的评分系统。

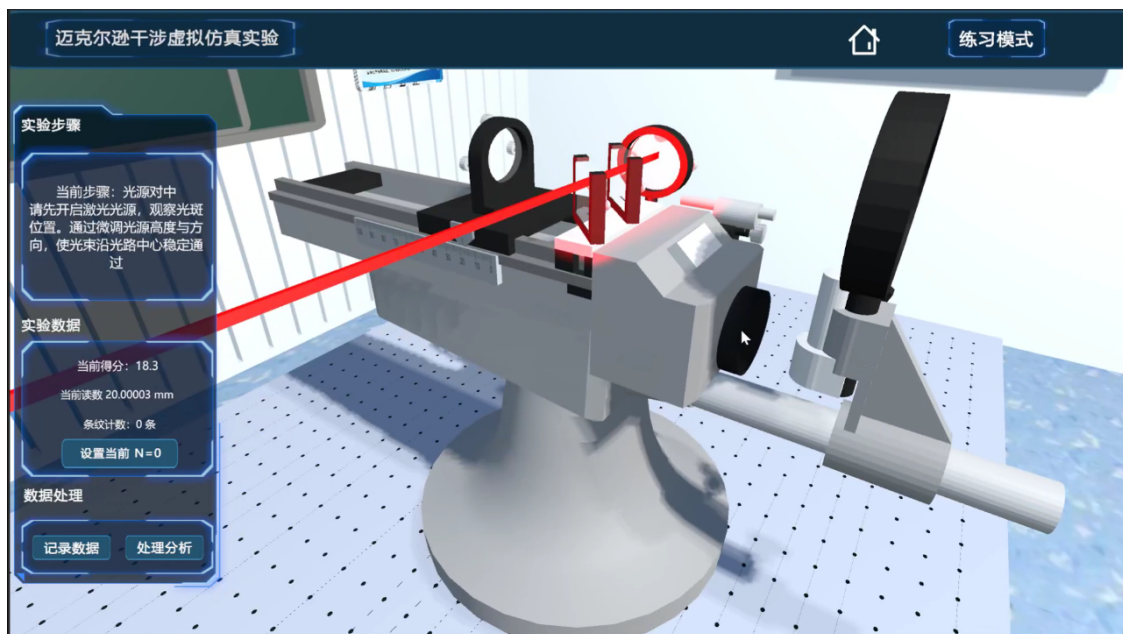


图 12 激光光路传播与基础光路对图中图

3.4.3 粗调与精密读数设置

粗调定位用于设置可动反射镜的初始位置。学生点击粗调旋钮后, **M1CoarseKnobController** 接管鼠标滚轮输入, 带动可动镜平台及其关联物体沿光路方向平滑移动, 同时更新干涉图的粗调光程差参数。粗读数由 **CoarseDialByCubeZ** 根据位移反推, 拟合关系写为 $z = \text{intercept} - \text{slope} \times \text{reading}$ 。精密读数由 **PrecisionDialByCubeZ** 与细调脚本联动, 进入细调时锁存粗读数基准, 之后由高精度逻辑位移连续推进读数, 避免粗细调切换时读数跳变。

粗调界面用于观察可动镜平台的大范围定位状态和粗调读数变化。

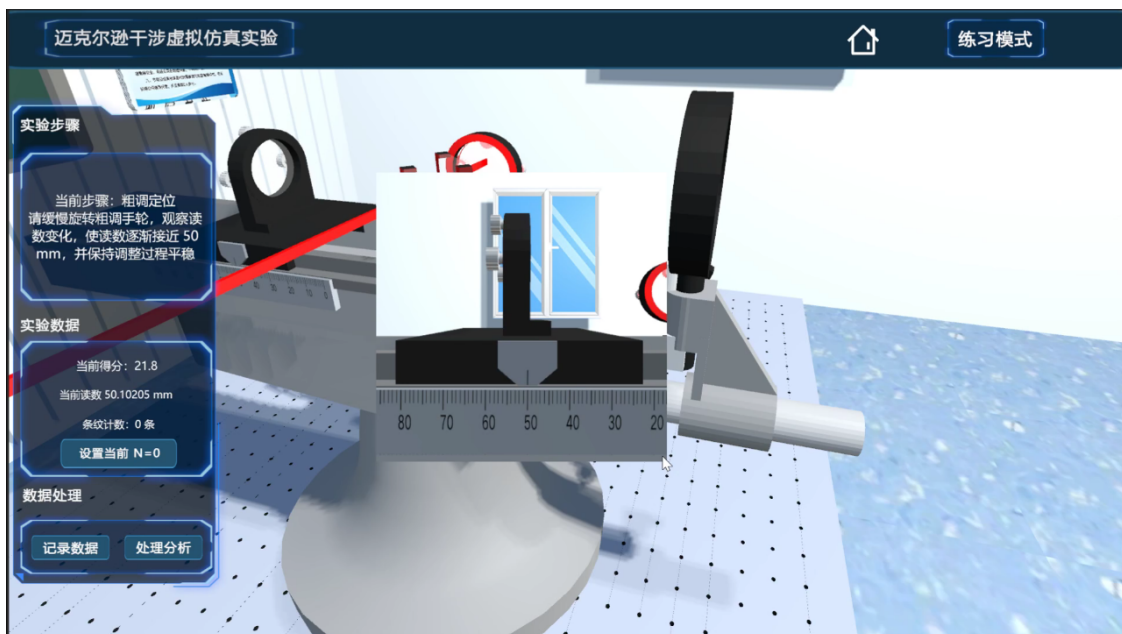


图 13 粗调定位界面图

完成粗调定位后,精密读数界面进一步显示细调机构、刻度盘和当前读数,用于条纹变化过程中的精细测量。



图 14 精密读数界面图

3.4.4 三点校准与反射镜调节

三点校准用于完成光路准直。系统在进入校准时给观察屏上的光点设置初始偏移,学生选择反射镜调节旋钮后, `MirrorAlignmentController` 根据鼠标滚轮改变水平或竖直方向偏移,使三个光点逐渐靠近并重合。当偏移量小于设定阈值时, `ExperimentModeManager` 才允许切换到干涉条纹观察模式,这一限制使虚拟流程与真实实验中“先准直、

后观察条纹”的操作顺序一致。



图 15 三点校准界面图

3.4.5 干涉条纹模式切换

三点校准完成后,学生点击“切换观测模式”按钮进入干涉条纹观察模式。系统隐藏三点校准光点显示, 启用干涉圆环显示界面。切换过程中脚本会给镜面倾斜量和细调光程差加入小扰动, 使学生仍需进行细调, 而不是直接得到完全理想的圆环。此时观察屏上出现等倾干涉圆环, 学生可通过细调机构观察干涉环随光程差变化而冒出或消失。

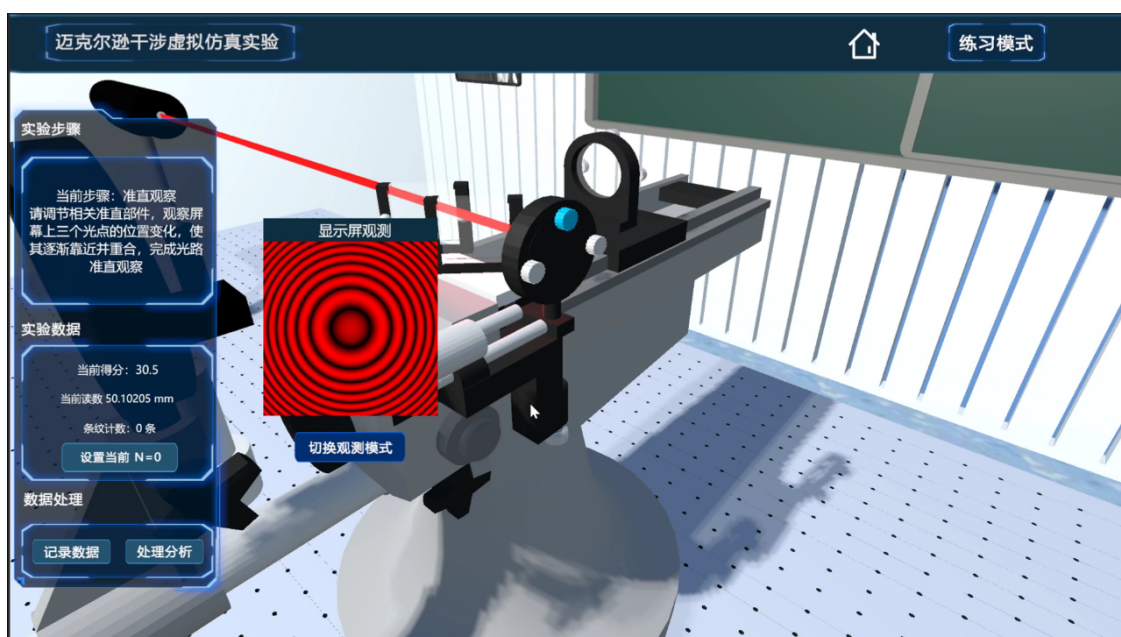


图 16 干涉条纹观察界面图

3.4.6 干涉圆环实时显示

基础实验观察的是迈克尔逊干涉仪两臂返回光形成的等倾干涉。将固定镜关于分束镜所成的虚像与可动镜视为两块等效反射面, 当两等效镜面近似平行且存在轴向间距 d 时, 以夹角 θ 返回的光线具有近似光程差

$$\delta(\theta) = 2d \cos \theta.$$

观察透镜将传播方向映射到观察面位置。设观察面归一化坐标为 $\mathbf{p} = (p_x, p_y)$, 径向坐标为 $\rho = \sqrt{p_x^2 + p_y^2}$, 则程序使用 $\theta = \arctan(\rho/f)$ 建立观察半径与入射角之间的关系。考虑镜面微小倾斜及细调相位后, Shader 中每个像素采用的总相位写为

$$\Phi(\mathbf{p}) = \frac{2\pi}{\lambda} \left[2d_b \cos\left(\arctan \frac{\rho}{f}\right) \tau_x p_x + \tau_y p_y \right] + \frac{4\pi d_f}{\lambda},$$

其中, $d_b = D_0 + D_{\text{Coarse}}$ 为基础不等臂量与粗调量之和, $d_f = D_{\text{Fine}}$ 为细调对应的单程镜面位移, τ_x 和 τ_y 表示两方向的等效镜面倾斜量。由两束相干光叠加, 像素光强可表示为

$$I(\mathbf{p}) = \frac{I_s}{2} [1 + V \cos \Phi(\mathbf{p})],$$

其中, I_s 为显示亮度系数, V 为条纹可见度。明纹满足 $\Phi = 2m\pi$, 暗纹满足 $\Phi = (2m+1)\pi$ 。

当镜面倾斜量为零时, 相位仅与 ρ 有关, 因此等相位轨迹为同心圆。在近轴条件下, $\cos \theta \approx 1 - \theta^2/2$ 且 $\theta \approx \rho/f$, 从而有

$$\Phi(\rho) \approx \frac{4\pi d_b}{\lambda} - \frac{2\pi d_b}{\lambda f^2} \rho^2 + \frac{4\pi d_f}{\lambda}.$$

该式说明圆环相位关于观察半径平方近似线性。粗调量 D_{Coarse} 改变 ρ^2 项系数, 因而主要改变圆环疏密和尺度; 细调量 D_{Fine} 以整体相位偏移的形式作用于整幅图像, 因而使圆环从中心连续冒出或向中心消失。可动镜移动距离 s 时, 往返光程差改变 $2s$, 相位改变 $4\pi s/\lambda$; 当 $s = \lambda/2$ 时相位改变 2π , 对应一个完整条纹从中心冒出或消失, 这也是基础实验利用条纹变化数测量波长的依据。

当 $\tau_x p_x + \tau_y p_y$ 不为零时, 等相位圆环发生偏移和畸变; 倾斜项占主导时, 局部条纹逐渐接近平行直纹, 用于反映三点校准和镜面调节状态。为模拟真实干涉在两臂光程差偏离最佳位置后可见度降低的现象, **InterfereUIController** 还采用

$$V = V_{\max} \exp \left[-\frac{(d_{\text{total}} - d_{\text{best}})^2}{d_{\text{width}}^2} \right]$$

计算显示对比度。程序每帧将 λ 、 f 、 d_b 、 d_f 、 τ_x 、 τ_y 、 V 和亮度写入 **MichelsonInterfereUI.shader**, 再由片元着色器逐像素计算 Φ 与 I , 因而显示结果并非预先制作的圆环贴图, 而是由当前光路调节状态实时生成的干涉图样。

3.4.7 细调读数与条纹变化联动

细调模式中, 学生通过鼠标滚轮控制可动镜微小移动。SimpleFineKnobController 以固定步长更新可动镜逻辑位移和 DFine, 并根据细调光程差相对零点的变化计算当前条纹变化数 N 。学生点击“设为零点”后, 系统将当前条纹状态作为 $N = 0$ 的起点, 后续显示“冒出”或“消失”的条纹数量。脚本还记录空程差消除和反向回拨次数, 并将其送入两种模式共用的操作评分系统。

3.4.8 数据记录与自动计算

当条纹变化达到 $N = 0, 20, 40, 60, 80, 100$ 时, 学生在数据记录表中输入对应读数并点击“记录数据”按钮。DataRecordingExamBridge 会寻找距离当前真实条纹数最近的目标节点, 在允许偏差范围内记录后台真实圈数、真实读数和 student 输入内容。点击“处理分析”后, 系统将 d_0 至 d_5 送入 DataProcessingCalcCore, 用最小二乘法拟合 $d_i = a + bN_i$, 统一计算斜率、截距、实验波长、残差、拟合优度和合成标准不确定度, 再由 DataProcessingAutoCalc 填入数据处理面板并锁定结果输入框。

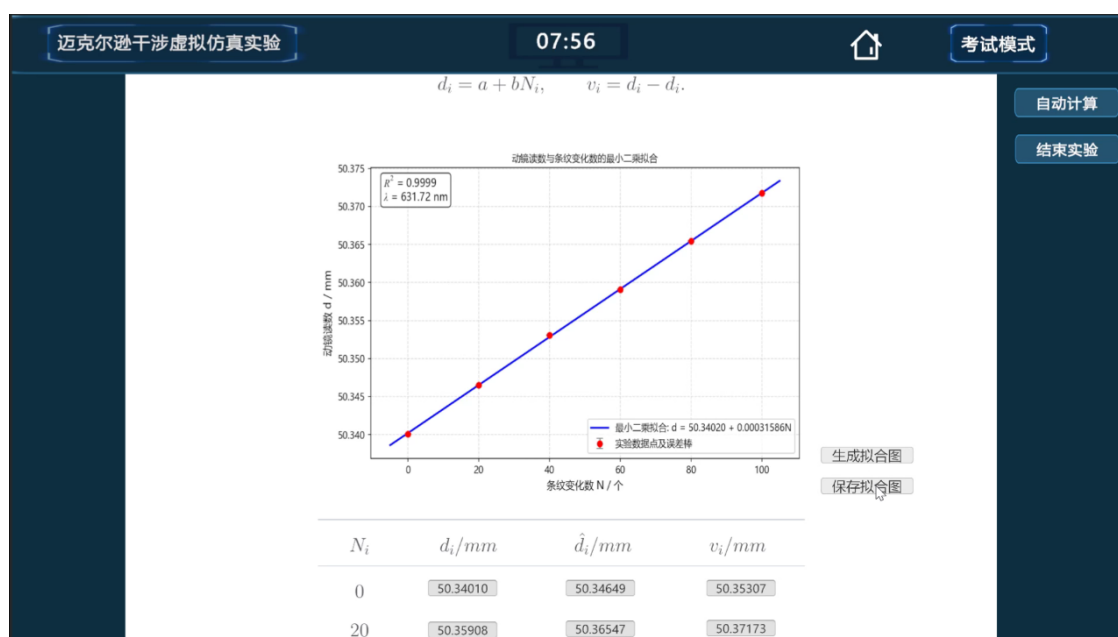


图 17 基础实验数据记录与自动计算界面图

3.4.9 实验评分与结果反馈

练习模式和考试模式共用同一套评分系统, 从预习测验、基础操作、过程读数和计算结果四个方面评价学生表现, 权重分别为 10%、35%、30% 和 25%。预习测验用于检查学生进入实验前对仪器结构、干涉原理和操作流程的掌握情况; 基础操作用于评价光源调节、粗调定位、准直、条纹细调、空程差消除和回程差控制; 过程读数用于检查各记录节点的圈数对应关系、读数误差和有效数字; 计算结果用于评价最小二乘拟合步骤、波长计算、拟合优度和不确定度结果的完整性与准确性。练习模式在操作过程中实时显示当前

得分并提供操作提示, 便于学生及时纠正错误; 考试模式隐藏实时得分和操作提示, 在实验结束后统一显示总分、分项得分和扣分原因。

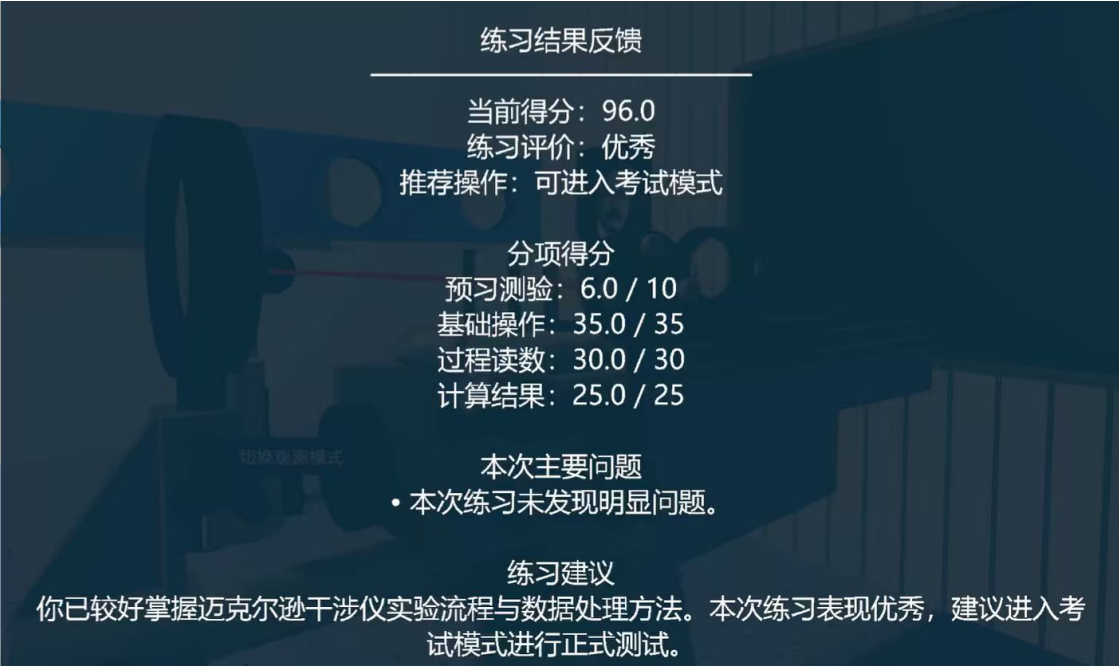


图 18 基础实验成绩反馈界面图

表 3 练习与考试模式共用评分细则

评分模块	权重	评分要点
预习测验	10%	由五道预习选择题构成,每题 20 分。系统记录学生是否完成预习测验及其原始得分,并按 10% 折算进入总成绩。
基础操作	35%	光源调节: 开启光源并完成高度对中。粗调定位: 刻度值调至 50 mm 附近。准直操作: 完成三点校准。条纹细调: 切换模式后继续微调至清晰条纹。空程差消除: 初始记录前连续同向旋转超过设定读数。避免回程差: 记录全程无反向回拨。记录规范: 按 $N = 0, 20, 40, 60, 80, 100$ 的节点记录。
过程读数	30%	对每个记录节点分别检查 N 值是否与当前条纹变化数对应、学生读数与后台真实读数的绝对误差是否在阈值内,以及读数是否保留小数点后 5 位有效数字。若节点和读数正确但有效数字格式错误,单独扣除格式分;若前两项已错误,不再重复扣除有效数字格式分。
计算结果	25%	计算规范占该模块 50%,要求最小二乘拟合、波长计算、残差、拟合优度和不确定度各空填写完整;计算正确占该模块 50%,要求各结果与后台标准结果的误差小于设定阈值。

3.5 基于 Unity 3D 的拓展实验过程仿真

3.5.1 拓展实验场景搭建

拓展实验建立在基础迈克尔逊干涉仪已经调节完成的前提下。点击“进入拓展实验”按钮后,系统切换到拓展实验相机,隐藏基础实验部分 UI,保留稳定输出光路,并显示偏振移相火焰动态温度场测量模块。拓展场景中新增火焰测量对象、四分之一波片、4-f 透镜组、朗奇光栅、位于分束光路后的三路分析偏振片和 CCD 成像面。

拓展实验的操作设计分为“基础光路调节-相移校准-火焰测量”三个阶段。第一阶段在场景中调节并对齐两片凸透镜和朗奇光栅,使三者处于同一直线上。第二阶段由系统在无火焰参考态下完成相移校准并显示三幅相互错开的背景相移图样;该阶段仅用于获得参考相位,不生成温度热力图。第三阶段点燃火焰并进入热场测量,此时所有器件已就位,学生可通过灯光高度调节对象改变圆形测量窗口在完整火焰中的高度位置,并观察火焰折射率扰动造成的条纹弯曲;只有在火焰测量态下点击“处理分析”后,系统才按六步显示相移图、相位解算、投影光程差、逆 Abel 反演和半径 1 cm 圆形视场内的温度场反演结果。

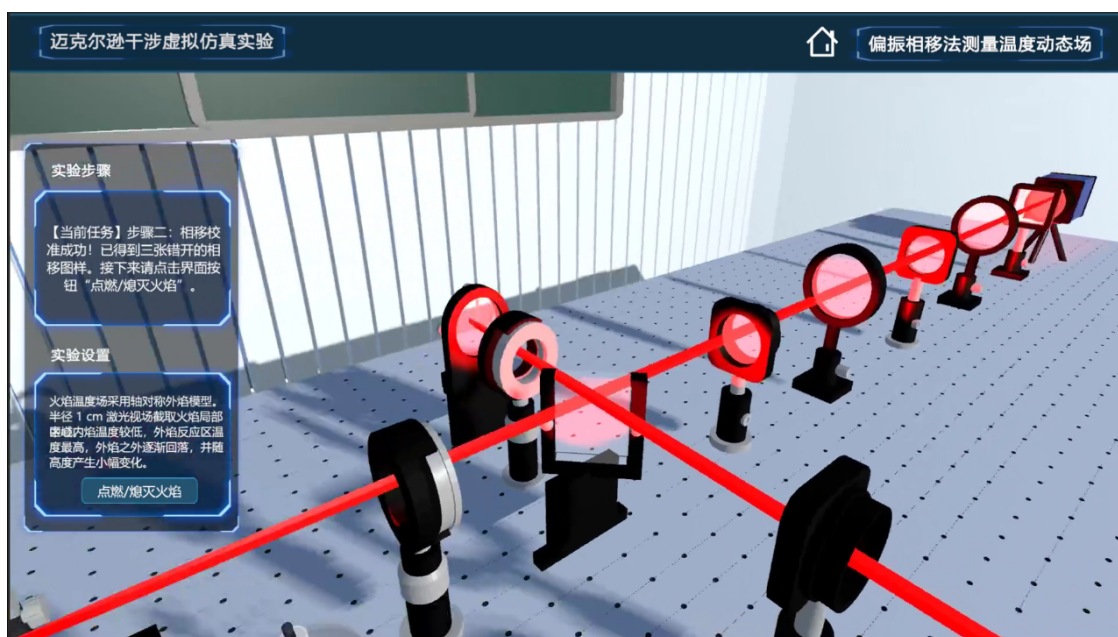


图 19 拓展实验完整光路场景图

3.5.2 火焰动态温度场对象设计

拓展实验选用酒精灯火焰及其周围受热空气作为被测对象。火焰具有温度变化快、空间梯度明显和折射率扰动可观测等特点,适合用于展示单次曝光偏振移相测量的优势。Python 后端在完整酒精灯火焰坐标中建立满足轴对称条件的参数化温度场 $T(r, h, t)$, 再根据 Unity 端传入的测量中心高度截取半径 1 cm 的圆形激光视场。该模型中中心内焰温度相对较低,外焰反应区温度较高,外焰之外逐渐回落到环境空气温度,并包含小幅动态

脉动。Unity 端负责显示火焰对象、光路和测量高度调节, 后端负责由温度场生成光学观测数据。

激光在该模型中仅作为探测光。最终温度反演只针对半径 1 cm 的圆形激光视场, 圆外火焰不被当前光束直接测量。默认测量中心位于火焰高度 4.5 cm 处, 可通过场景中的灯光高度旋钮在 2.5–5.0 cm 范围内调节; 鼠标滚轮每次调节约 1 mm。火焰的轴对称假设既是建立正向投影模型的条件, 也是使用单方向逆阿贝尔变换恢复局部折射率的必要条件。



图 20 酒精灯火焰三维模型图

3.5.3 PMI 前端偏振编码设计

在加起偏器的迈克尔逊干涉仪输出端设置四分之一波片, 形成携带待测相位的偏振编码光。该偏振编码前端即为本平台中的 PMI 部分, 只位于 4-f 系统之前。线性分析偏振片不属于 PMI 系统, 而是在 4-f 与朗奇光栅完成三路空间分束后, 作为相移检测器件分别放置在三路成像光束中。

3.5.4 4-f 系统与朗奇光栅设计

4-f 系统由两片透镜和频谱面上的朗奇光栅构成。平台中学生可点击透镜或光栅, 使用交互脚本沿设定方向调整位置。系统通过目标位置判断元件是否放置正确。朗奇光栅启用后, 原本一束偏振编码光被复制成三路并排成像光束。

3.5.5 相移校准与三幅图样显示界面

在 4-f 系统分出的三路成像光束中分别设置 0° 、 60° 、 120° 的分析偏振片后, CCD 上可显示相移为 0° 、 120° 、 240° 的三幅干涉图。当两片凸透镜和朗奇光栅完成对齐后, 系统进行相移校准; 校准成功时, CCD 区域仅显示三幅相互错开的无火焰参考图样, 用于记录参考相位, 此时不进行温度场反演。

3.5.6 相位解算与温度场重建界面

平台在拓展实验数据处理区展示三幅相移干涉图,并在点击“处理分析”后按六步依次显示三步相移、相位展开与参考扣除、投影光程差、逆阿贝尔反演和温度换算结果。该流程使学生能够直观理解“温度场-折射率-投影相位-相移图-局部温度场”的正向与反向计算关系。相位数据面表示条纹相位或条纹级数,不是温度;最终彩色热力图才是完成折射率反演和 Gladstone-Dale 换算后的圆形测量窗口温度场。

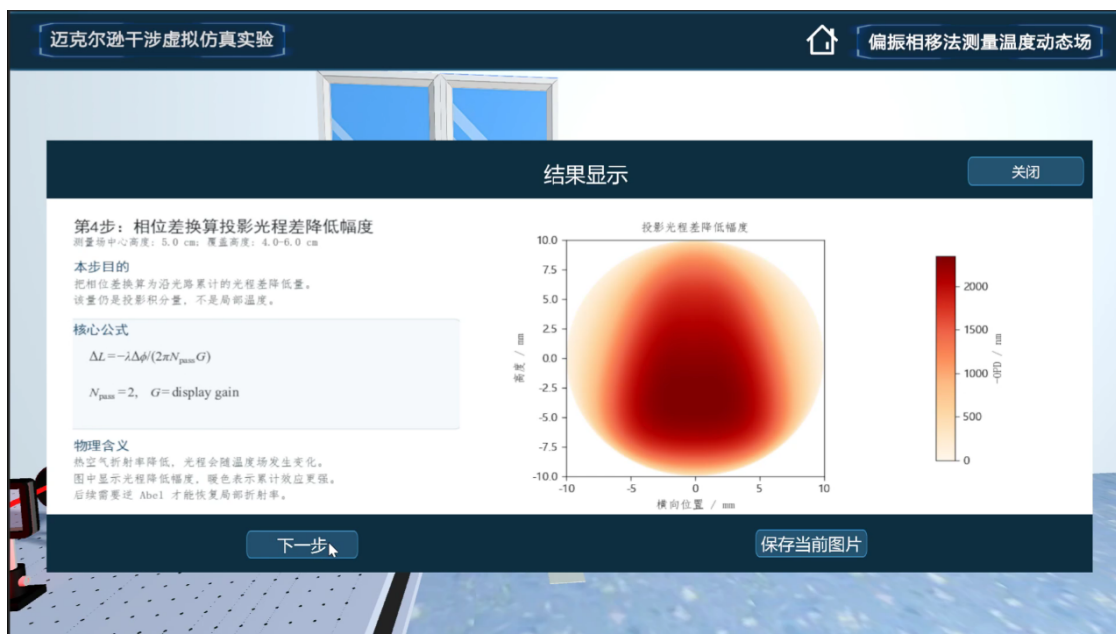


图 21 火焰温度场反演过程图

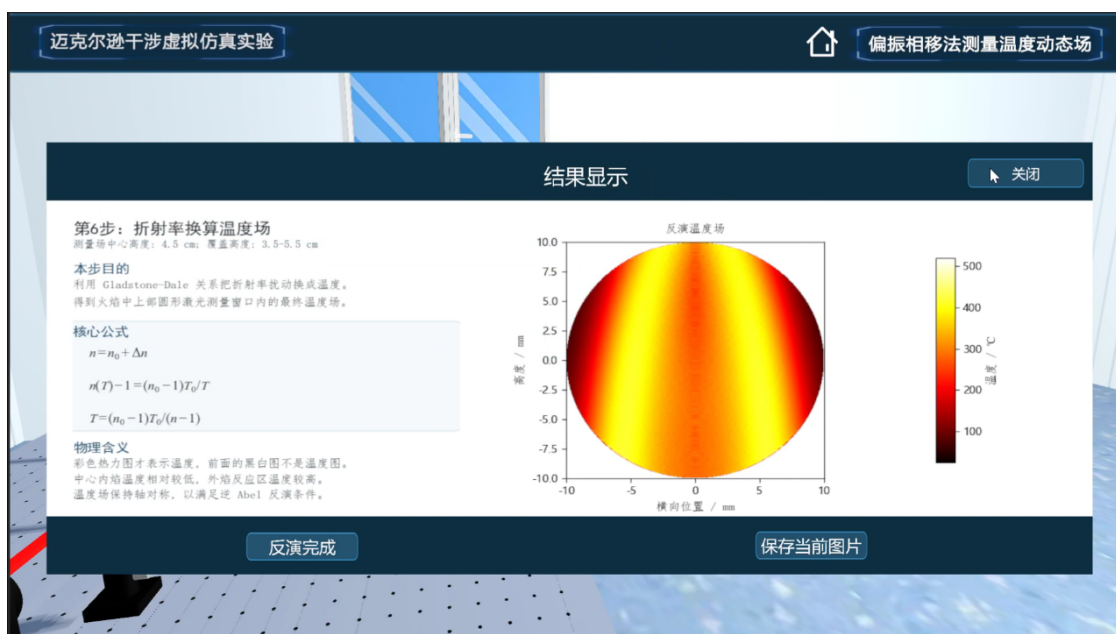


图 22 圆形火焰温度场反演结果图

3.5.7 Python 拓展图像服务设计

为了使拓展实验中的干涉图不只停留在静态贴图,平台在独立 Python 服务 MichelsonFlameInnovationServer.py 中实现火焰图像计算模块。Unity 场景中的 MichelsonUIHandler.cs 在本机 127.0.0.1:5000 建立 TCP 连接,每次向后台发送实验阶段、测量中心高度或反演步骤编号、显示增益三个单精度浮点数。当第二个参数为非负数时,后台将其解释为当前测量中心高度;当第二个参数为负数时,后台按其绝对值返回六步反演过程中的相应步骤图。后台首先在完整酒精灯火焰模型中截取局部轴对称温度场,依据理想气体与 Gladstone-Dale 关系计算负折射率扰动,再进行正阿贝尔投影和迈克尔逊双程相位计算,最终生成 I_0 、 I_{120} 、 I_{240} 三幅并排相移干涉图。处理分析请求到达后,后台从最近一次三幅相移图重新解算相位,扣除无火焰参考相位,计算投影光程差,实施正则化逆阿贝尔变换并输出六步过程图和最终圆形温度场。

生成结果以 400×1200 的 RGB 字节流返回,其中三幅 400×400 图像横向拼接。Unity 收到完整字节流后,使用 Texture2D.LoadRawTextureData 加载纹理,并在显示端完成必要的翻转或旋转校正。该服务将 NumPy、OpenCV 和 Matplotlib 计算放在 Unity 外部执行,Unity 仅负责实验阶段控制、参数发送和结果显示。为了便于比较不同测量高度下的温度差异,后台温度图统一采用 $25\text{--}520^\circ\text{C}$ 的固定色标,实际反演分布随当前激光测量窗口高度变化。

3.6 基于 Unity 3D 的 UI 界面开发

3.6.1 新建脚本并编写交互方法

平台通过多个 C# 脚本实现 UI 与实验对象的交互。例如, CameraModeSwitcher 负责练习模式与考试模式下 UI 对象显隐和考试布局切换; SceneLoadController 和入口按钮脚本负责基础实验、拓展实验与主页之间的场景加载; OpticalElementGroupController 和 ObjectController 实现点击物体后高亮并沿指定方向移动; MichelsonUIHandler 负责拓展实验与 Python 后台通信、六步反演图像显示和测量高度传递; MultiLaserSwitch 将灯光高度旋钮的滚轮调节映射为测量中心高度; MenuManager 管理预习界面侧边菜单与内容卡片切换; AIAssistantRealUI 负责 AI 助教聊天面板、快捷问题按钮和后端请求; DataProcessingAutoCalc 和 DataProcessingExamScorer 完成最小二乘自动计算与计算结果评分; ExamScoreManager 汇总预习测验、基础操作、过程读数 and 计算结果得分。

3.6.2 挂载脚本到操作对象

脚本编写完成后,将其挂载到对应的空物体、按钮或仪器对象上。为了便于管理,平台设置 DataManager、ExamSystem 等管理对象,统一管理 UI 面板、评分系统和实验流程。需要参与统一控制的对象通过 Inspector 数组进行绑定,例如相机切换脚本中配置进入拓

展实验时关闭和打开的对象, 移动脚本中配置随主物体一起移动和一起高亮的对象。

3.6.3 设置按钮事件

在 Unity 的 Button 组件中添加 OnClick 事件, 将目标对象拖入事件槽并选择对应函数。例如, “记录数据” 按钮调用 RecordCurrentData, “处理分析” 按钮调用自动计算函数和考试系统提交函数, “进入拓展实验” 按钮调用 EnterInnovationExperiment 完成相机切换、Canvas 相机重设和对象显隐。通过按钮事件, 平台实现了从 UI 到实验逻辑的联动。

3.6.4 预习界面与 AI 助教面板设计

预习界面以侧边导航作为一级入口, 将预习导学、AI 助教、仪器认知、实验训练、实验考核和拓展实验组织为可切换卡片。脚本 MenuManager 在开始运行时为每个菜单按钮绑定切换事件, 点击后只显示对应内容卡片, 并将滚动视图复位到顶部, 使不同学习模块之间切换清晰。

AI 助教面板采用聊天气泡式布局。Unity 端 AIAssistantRealUI 读取输入框内容或快捷问题按钮内容, 将问题打包为 JSON 后通过 UnityWebRequest 发送到 `http://127.0.0.1:5050/ask`。Python 端 MichelsonCentralServer.py 使用 Flask 提供 /ask 接口, 并调用本地 Ollama 的 qwen2.5:7b 模型生成回答。系统提示词将回答范围限定在迈克尔逊干涉仪实验原理、仪器结构、光路调节、三点校准、条纹观察、数据处理和拓展实验逆阿贝尔温度场反演等内容, 从而保证 AI 回答服务于实验学习。界面还设置发送、清空、等待提示和错误反馈, 当本地 AI 服务未启动时能够给出连接失败提示。

3.6.5 记录面板与数据处理面板设计

数据记录面板用于输入 d_0 至 d_5 读数, 并显示目标条纹变化数 N 。数据处理面板按新算法配置 34 个结果输入框, 依次显示 $\bar{N}$ 、 $\bar{d}$ 、斜率 b 、截距 a 、拟合方程、实验波长、相对误差、拟合值、残差、拟合优度、合成标准不确定度和相对不确定度。自动计算完成后, TableInputHandler 或输入框自身被设为不可编辑状态, 防止结果被误修改; 同时 DataProcessingExamScorer 会将计算得分提交给 ExamScoreManager。

3.6.6 进入拓展实验按钮与场景切换

基础实验完成后, 学生可点击“进入拓展实验”按钮进入偏振移相温度场测量模块。按钮触发后, 场景加载脚本切换到拓展实验场景, 拓展场景中的 MichelsonUIHandler 接管相移图显示、酒精灯点燃/熄灭、处理分析和结果保存等操作。练习/考试模式的 UI 显隐与布局由 CameraModeSwitcher 根据入口选择同步设置, 从而保证不同模式下的左侧面板、倒计时、实时得分和操作提示保持一致。

3.6.7 最终测试与界面优化

平台完成后,对按钮功能、相机切换、输入框锁定、仪器点击、物体移动、数据提交和评分反馈进行了多次测试。根据测试结果调整 UI 位置、字体大小、面板透明度和交互逻辑,使平台更加稳定和易用。

四、设计重难点

4.1 光学仪器三维建模

迈克尔逊干涉仪包含较多精密部件,如分束镜、固定反射镜、可动反射镜、粗调旋钮、细调旋钮、读数尺和观察屏等。模型既要具有足够真实的外观,又不能因面数过高影响程序运行。因此,在建模过程中需要对关键可交互部件保留细节,对非关键结构进行适当简化。

拓展实验新增的 QWP、4-f 透镜组、朗奇光栅、分束后的三路分析偏振片和 CCD 也需要在空间位置上满足光路逻辑。特别是 4-f 系统中透镜和光栅的相对位置,需要与后续三路成像效果相对应,这是建模与光学原理结合的重点。

4.2 干涉条纹实时仿真

干涉条纹并不是静态图片,而应随可动镜位移、波长、光程差和倾斜量实时变化。为了实现这一效果,平台采用 Shader 控制干涉图案。脚本将当前读数和可动镜位移传入 Shader 参数,从而实现干涉圆环的连续冒出或消失。该部分的难点在于既要保证物理规律合理,又要使视觉效果清晰稳定。

4.3 精密读数与条纹变化联动

基础实验中,学生需要在指定条纹变化节点记录读数。因此,系统必须建立真实读数、旋钮角度、可动镜位移和条纹变化数 N 之间的映射关系。若映射关系不一致,就会出现读数变化方向与条纹变化方向相反、评分结果不准确等问题。平台通过统一后台真实读数来源,保证读数显示、条纹变化和评分系统的一致性。

4.4 数据记录与评分系统设计

为了使练习模式和考试模式均具有评价功能,平台不仅要读取学生输入的表格数据,还要记录预习测验完成情况以及每次点击“记录数据”时的真实圈数和真实读数。评分系统根据目标节点是否完整、真实圈数偏差、读数绝对误差、有效数字和数据逻辑一致性计算过程读数得分。计算结果部分则通过自动计算脚本将结果提交给评分系统。练习模式实时显示得分,考试模式仅在结束后显示成绩详情;该设计的重点是保证预习记录、UI 输入、后台记录和评分逻辑之间的同步。

4.5 拓展实验偏振移相光路设计

拓展实验需要在加起偏器的迈克尔逊干涉仪输出端形成偏振编码光, 并接入后续偏振移相测量光路。该部分难点在于将火焰折射率扰动、QWP 偏振编码、4-f 系统与朗奇光栅空间分束、三路分析偏振片、CCD 成像和逆阿贝尔反演串联为一个完整的教学流程。为了便于学生理解和完成操作, 平台将用户操作归纳为基础光路调节、无火焰参考态相移校准和火焰热场测量三个阶段: 学生先对齐两片凸透镜与朗奇光栅, 再观察校准后显示的三幅无火焰参考图样; 校准阶段不生成温度热力图, 最后点燃火焰, 通过灯光高度旋钮改变测量窗口在完整火焰中的位置, 并点击“处理分析”按六步完成投影相位与局部温度场分析。

4.6 Unity UI 与场景切换设计

基础实验和拓展实验属于同一平台的两个模块。若所有 UI 同时显示, 界面会显得混乱。因此, 平台通过入口按钮和场景加载脚本切换基础实验、拓展实验与预习界面, 并在各场景内部按练习/考试模式控制 UI 显隐和布局。该部分需要处理场景加载、Canvas 绑定、模式状态传递、物体显隐和交互脚本之间的关系, 保证切换后仍能正常进行元件移动、数据记录、评分和拓展实验结果显示。

五、仿真程序的使用方法

本平台的使用过程分为登录与预习导学、AI 助教答疑、基础实验操作、拓展实验操作和结果查看五个部分。程序既可用于练习模式, 也可用于考试模式, 两种模式均启用评分系统。练习模式提供步骤提示、读数辅助和实时得分显示; 考试模式隐藏操作提示和实时得分, 启用倒计时并在实验结束后显示成绩详情。若启用 AI 助教和 Python 拓展图像服务, 需要先在本地启动对应的 Python 程序和本地 Ollama 模型。

5.1 登录与实验选择

学生进入程序后, 在登录界面输入账号和密码, 或选择游客登录进入平台。随后进入预习与实验选择界面。该界面左侧为“虚拟仿真”功能导航, 包括预习导学、AI 助教、仪器认知、实验训练、实验考核和拓展实验六个模块。学生可根据学习阶段选择不同入口: 预习导学用于了解实验目标和原理, 仪器认知用于认识光学元件, 实验训练用于进入显示提示与实时得分的练习模式, 实验考核用于进入隐藏提示与实时得分的考试模式, 拓展实验用于进入偏振移相火焰动态温度场测量拓展模块。



图 23 用户注册与登录界面图

5.2 预习导学与 AI 助教使用方法

预习导学模块用于呈现实验目的、实验原理、注意事项和操作流程, 学生可在正式进入实验前完成基础知识准备。

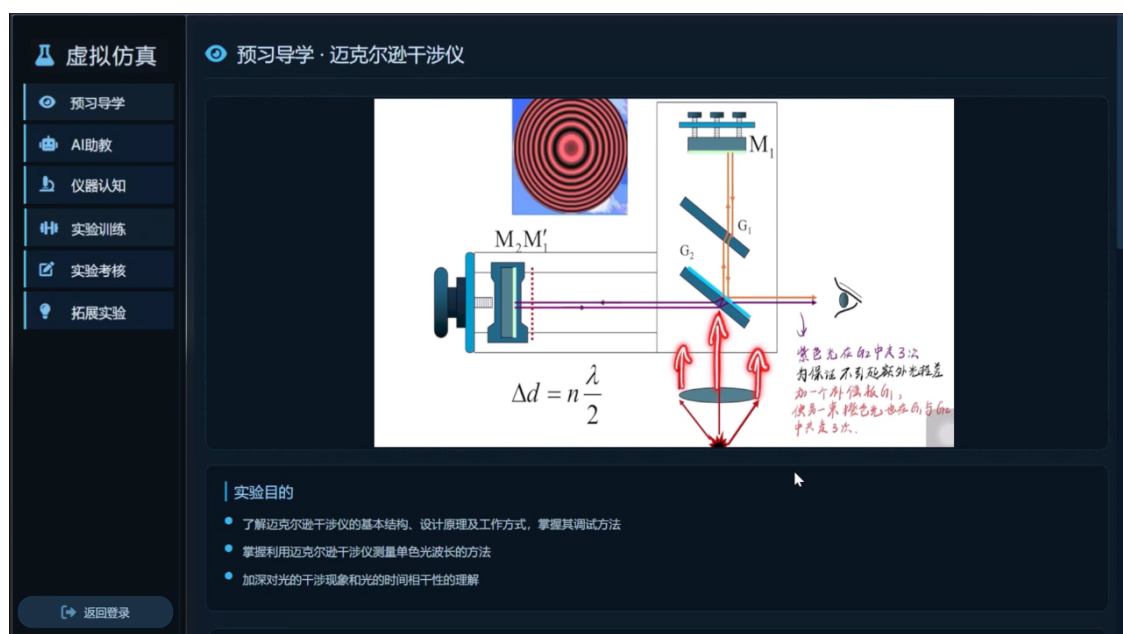


图 24 预习导学界面图

完成导学内容后, 学生可进入预习测验, 通过选择题检查对迈克尔逊干涉原理、仪器作用和条纹变化规律的掌握情况, 测验结果作为两种模式中预习测验评分的依据。



图 25 预习测验界面图

AI 助教模块用于即时答疑, 学生可以在输入框中提出问题, 也可以点击快捷问题, 如“为什么要进行三点校准”“如何消除空程差”“条纹冒出和消失代表什么”“实验数据如何处理”等。Unity 端将问题发送给本地 AI 服务后, 聊天区显示“正在思考中”, 服务返回后以 AI 气泡形式展示回答。

AI 助教的使用流程为: 先启动本地 Ollama 服务并准备 qwen2.5:7b 模型, 再运行 `MichelsonCentralServer.py`, 最后在 Unity 预习界面中打开 AI 助教面板。若后端未启动或模型不可用, Unity 会显示连接失败或后端返回为空的提示, 便于调试。该模块适合用于学生课前预习、实验中遇到操作疑问时查询, 以及课后复习数据处理步骤。



图 26 AI 助教问答界面图

5.3 基础实验使用方法

基础实验正式操作流程如下。

- 1) 进入基础实验, 根据学习目标选择练习模式或考试模式。
- 2) 开启激光器并调节光源高度, 使激光束进入分束镜中心区域。
- 3) 旋转粗调旋钮进行粗调定位, 将可动镜读数调节到 50 mm 附近。
- 4) 调节反射镜角度, 使三个光点逐渐重合, 完成三点校准。
- 5) 点击“切换观测模式”按钮进入干涉条纹观察模式。
- 6) 点击细调按钮进入细调模式, 微调获得清晰干涉圆环。
- 7) 初始记录前保持连续同向旋转, 消除空程差并避免回程差。
- 8) 记录 $N = 0$ 时的初始读数 d_0 , 再在 $N = 20, 40, 60, 80, 100$ 节点输入对应读数 d_1-d_5 , 并点击“记录数据”。
- 9) 点击“处理分析”按钮, 系统自动计算波长、相对误差和不确定度。
- 10) 完成误差分析后点击“结束实验”按钮, 查看成绩和扣分说明。

5.4 拓展实验使用方法

拓展实验从已调好的迈克尔逊干涉仪输出光路开始。若使用 Python 实时生成相移图和温度场图, 需要先启动 `MichelsonFlameInnovationServer.py`, 使本地图像计算服务处于监听状态。学生点击“进入拓展实验”按钮后, 程序切换到拓展实验场景。基本操作流程如下。

- 1) **基础光路调节。**在场景中调节并对齐两片凸透镜和朗奇光栅, 使三者处于同一直线上。

- 2) **相移校准**。在无火焰参考态下完成校准后, CCD 显示三幅相互错开的背景相移图样, 用于记录系统参考相位; 校准阶段不生成温度热力图。
- 3) **火焰热场测量**。点燃火焰后, 学生可观察三幅图中同步出现的条纹弯曲。Unity 通过场景中的灯光高度调节对象控制测量中心高度, 默认高度为 4.5 cm, 可在 2.5–5.0 cm 范围内调节, 鼠标滚轮每次约对应 1 mm。点击“处理分析”后, 系统按六步依次显示三幅相移图、包裹相位、参考相位扣除、投影光程差、逆 Abel 反演和温度换算结果; 完成后可调节测量高度并重复实验。

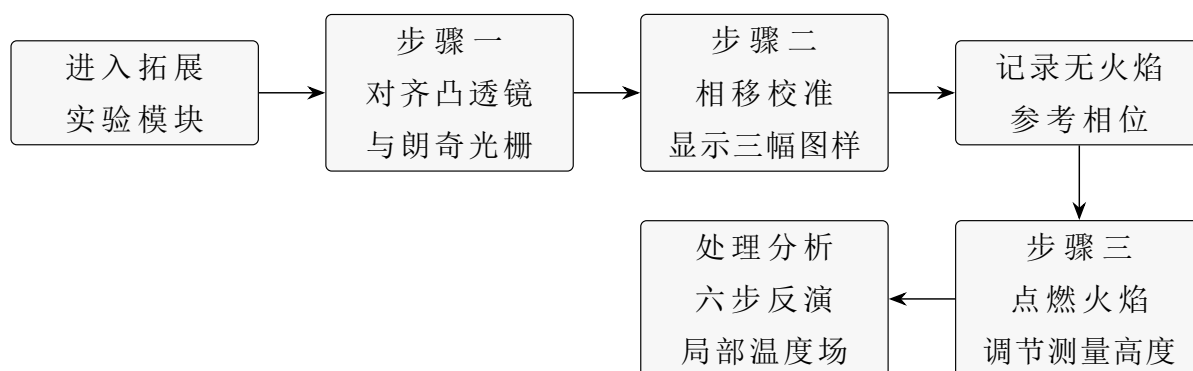


图 27 拓展实验操作流程

5.5 练习模式与考试模式说明

练习模式和考试模式均启用相同的得分系统, 总成绩按照预习测验 10%、基础操作 35%、过程读数 30%、计算结果 25% 进行折算。练习模式提供当前步骤提示、读数辅助和仪器说明, 并在操作过程中实时显示当前得分, 便于学生根据反馈及时纠正错误。考试模式隐藏操作提示和实时得分, 显示倒计时, 学生需要独立完成预习测验、实验操作、数据记录 and 数据处理; 结束实验后, 系统统一显示总分、分项得分和扣分点。

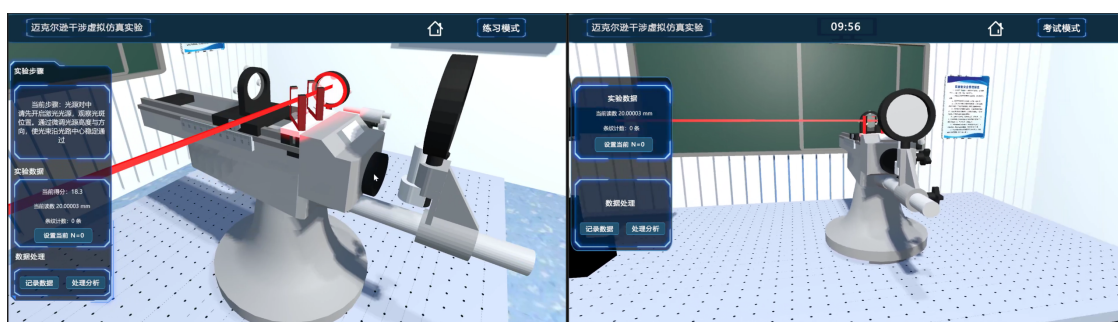


图 28 练习模式与考试模式界面对比图

六、数据处理

6.1 基础实验波长计算

基础实验中, 数据处理的输入为 $d_0, d_1, d_2, d_3, d_4, d_5$ 六个读数, 对应的条纹变化数为 $N_i = 0, 20, 40, 60, 80, 100$ 。程序首先检查六个输入框是否均为有效数字, 再由统一计算核心生成后台标准结果。平台采用最小二乘法拟合线性关系

$$d_i = a + bN_i, \quad i = 0, 1, \dots, 5, \quad (26)$$

其中 b 为镜面读数随条纹变化数增加的斜率。令

$$\bar{N} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 N_i, \quad \bar{d} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^5 d_i, \quad (27)$$

则斜率和截距分别为

$$b = \frac{\sum_{i=0}^5 (N_i - \bar{N})(d_i - \bar{d})}{\sum_{i=0}^5 (N_i - \bar{N})^2}, \quad a = \bar{d} - b\bar{N}. \quad (28)$$

由于镜面位移引起的光程差变化为其两倍, 当 b 的单位为 mm/条纹时, 实验波长为

$$\lambda = 2b \times 10^6 \text{ nm}. \quad (29)$$

平台将拟合方程、斜率、截距和波长结果同步填入数据处理面板, 使学生能够直接观察读数-条纹变化数之间的线性关系。

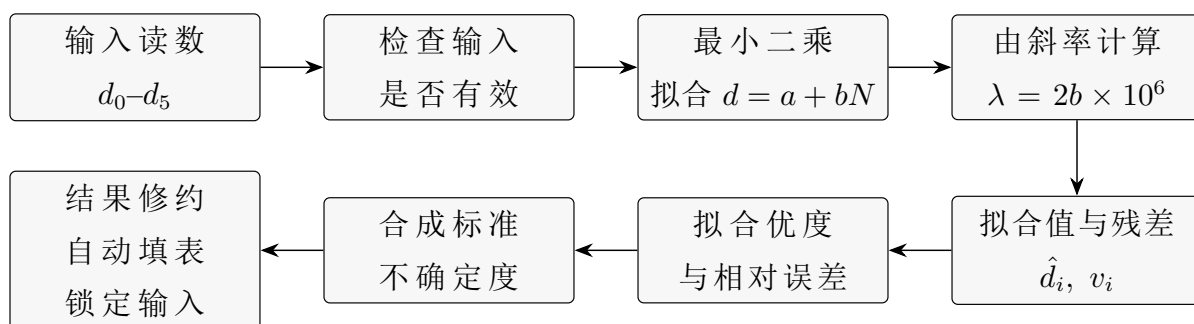


图 29 基础实验数据处理流程图

6.2 不确定度与误差分析

完成拟合后, 平台计算拟合值与残差

$$\hat{d}_i = a + bN_i, \quad v_i = d_i - \hat{d}_i. \quad (30)$$

拟合优度采用

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^5 v_i^2}{\sum_{i=0}^5 (d_i - \bar{d})^2} \quad (31)$$

表示,用于反映 d - N 线性关系的符合程度。残差标准差为

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^5 v_i^2}{6-2}}, \quad (32)$$

由此得到斜率的 A 类不确定度

$$u_A(b) = \frac{s}{\sqrt{\sum_{i=0}^5 (N_i - \bar{N})^2}}. \quad (33)$$

仪器读数引入的 B 类不确定度取 $u_B(d) = 0.00004 \text{ mm}$, 传播到斜率后为

$$u_B(b) = \frac{u_B(d)}{\sqrt{\sum_{i=0}^5 (N_i - \bar{N})^2}}, \quad u_c(b) = \sqrt{u_A^2(b) + u_B^2(b)}. \quad (34)$$

由于 $\lambda = 2b \times 10^6 \text{ nm}$, 波长的合成标准不确定度为

$$u_c(\lambda) = 2 \times 10^6 u_c(b). \quad (35)$$

相对误差为

$$E = \frac{|\lambda - \lambda_0|}{\lambda_0} \times 100\%, \quad (36)$$

其中 $\lambda_0 = 632.8 \text{ nm}$ 为 He-Ne 激光理论波长。程序中将理论波长、仪器误差项和修约规则封装在同一计算核心中,自动给出波长、不确定度和相对误差。最终结果输入框在自动填入后被锁定,既避免学生误修改自动结果,也便于两种模式共用的评分系统直接读取计算提交状态。



图 30 不确定度与误差计算流程图

6.3 拓展实验条纹建模与相位解算

Unity 前端负责展示光路、元件调节与 CCD 结果, Python 后端负责火焰温度场、相移条纹和反演结果计算。正向仿真首先根据式(6)建立轴对称火焰温度场 $T(r, z, t)$, 再依据式(7)计算局部折射率扰动 $\Delta n(r, z, t) < 0$ 。随后利用式(21)进行正阿贝尔投影, 得到 CCD 视线方向的单程投影光程差 $OPD(x, z)$ 。

迈克尔逊测量臂中的探测光往返通过火焰, 因而火焰投影相位为

$$\phi_{\text{flame}}(x, z) = \frac{2\pi}{\lambda} N_{\text{pass}} \text{gain} OPD(x, z), \quad N_{\text{pass}} = 2.$$

为模拟真实干涉仪中由镜面微倾和弱曲率造成的可见背景条纹, 后端构造固定系统参考相位

$$\phi_{\text{sys}}(x, z) = 2\pi \left[\frac{N_f}{2} \frac{x}{R_L} c_z \frac{z}{R_L} + c_q \left(0.55 \frac{x^2}{R_L^2} - 0.25 \frac{z^2}{R_L^2} \right) \right].$$

总测量相位为 $\phi_m = \phi_{\text{sys}} + \phi_{\text{flame}}$ 。其中 ϕ_{sys} 只用于形成稳定背景条纹, 在反演时通过无火焰参考图扣除。

为模拟 PMI 前端与后续三路分析偏振片共同形成的输出, 后端按照

$$I_k(x, z) = a(x, z) + b(x, z) \cos[\phi_m(x, z) + \delta_k], \quad \delta_k \in \left\{ 0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3} \right\} \quad (37)$$

生成 I_0 、 I_{120} 和 I_{240} 三幅图像。代码同时考虑缓慢变化的照明强度、条纹调制度和小幅灰度噪声。三幅图经圆形激光孔径裁剪和并排拼接后发送至 Unity CCD 界面, 用于模拟 4-f 系统、朗奇光栅和三路分析偏振片在单次曝光下形成的同步相移条纹。

反向重建不直接读取预设温度数组, 而是从最近一次三幅相移图重新计算式(14)。程序使用双参数反正切函数完成象限判断, 分别沿图像两个方向实施相位展开, 再减去由三幅无火焰参考图解算的参考相位 [1, 5, 6]。随后按式(18) 扣除边缘空气区的中位常值项, 以去除相位展开零点造成的整体偏移。若圆形测量窗口的上下边缘在部分高度下仍可能位于火焰区域内, 程序只在可识别为空气的边缘区域估计该常值, 不把整圈边缘强行设为零。所得连续火焰投影相位用于计算投影光程差, 并作为逆阿贝尔反演的输入。

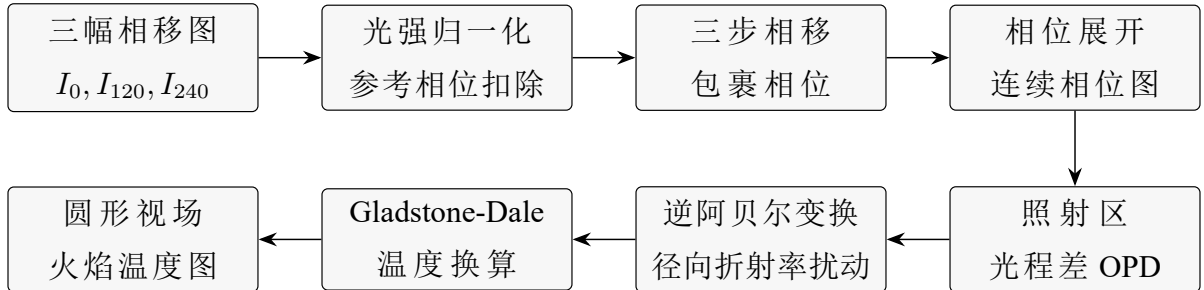


图 31 拓展实验温度场反演流程图

6.4 折射率扰动与火焰温度场重建

由参考相位扣除后的连续相位可得到单程投影光程差

$$\text{OPD}(x, z) = \frac{\lambda \Delta \phi(x, z)}{2\pi N_{\text{pass}} \text{gain}}, \quad N_{\text{pass}} = 2.$$

其中 λ 为激光波长, N_{pass} 为探测光通过火焰的次数, gain 为仿真中用于增强条纹弯曲可见性的显示增益。程序首先对 $\text{OPD}(x, z)$ 与 $\text{OPD}(-x, z)$ 求平均, 以抑制噪声造成的左右非对称分量。随后将径向区域划分为若干环带, 建立离散投影关系

$$\text{OPD} = A \Delta n.$$

第 j 个环带对第 i 条视线的弦长贡献为

$$A_{ij} = 2 \left[\sqrt{\max(r_{j+1/2}^2 - x_i^2, 0)} - \sqrt{\max(r_{j-1/2}^2 - x_i^2, 0)} \right].$$

由于直接求逆会放大条纹噪声与相位展开误差, 程序采用一阶平滑 Tikhonov 正则化:

$$\Delta \mathbf{n}^* = \arg \min_{\mathbf{q}} (\|A\mathbf{q} - \mathbf{OPD}\|_2^2 + \alpha \|D\mathbf{q}\|_2^2), \quad (38)$$

其闭式线性方程为

$$(A^T A + \alpha D^T D) \Delta \mathbf{n}^* = A^T \mathbf{OPD}.$$

其中 D 为一阶差分矩阵, α 为正则化系数。火焰升温时应满足 $\Delta n \leq 0$, 因此程序结合物理允许范围对解进行约束, 再由式(8) 恢复绝对温度。径向温度结果被插值回二维 x - z 坐标, 并施加半径 $R_L = 10 \text{ mm}$ 的圆形激光掩膜。平台最终按六步输出相移图、相位图、投影光程差、折射率扰动和圆形测量窗口温度场。对应界面已在前述拓展实验仿真模块中展示, 本节重点说明由投影相位到局部温度场的数值计算过程。

七、程序结果的分析与评价

7.1 仿真实验效果

本平台实现了迈克尔逊干涉仪基础实验和偏振移相火焰动态温度场测量拓展实验两个模块。基础实验模块中, 学生可以完成开启激光器、粗调定位、三点校准、切换干涉条纹模式、细调观察、数据记录和自动计算等完整流程。相关脚本已经形成从“物体调节-读数显示-条纹变化-后台记录-自动评分”的闭环, 因而平台不仅能展示实验现象, 也能追踪学生操作质量。拓展实验模块中, 学生可以在已调好的输出光路基础上观察火焰折射率扰动引起的条纹弯曲, 并理解三幅相移图同步采集、投影相位解算和火焰温度场重建过程。与仅展示静态光路的仿真相比, 该模块更强调动态温度场的空间投影信息和同步采集思想。

平台在操作过程中能够实时显示激光光路、干涉条纹、当前读数和条纹变化数。练习模式同时显示实验步骤提示和当前得分, 便于学生边操作边修正; 考试模式隐藏提示和实时得分, 并根据学生预习测验、操作、数据记录和数据处理过程生成成绩详情。其中预习测验、基础操作、过程读数和计算结果分别按 10%、35%、30% 和 25% 折算计分, 扣分点能够具体对应到预习完成情况、光源对中、粗调窗口、准直、空程差、节点记录、有效数字和最小二乘计算结果等环节。

新增预习界面后, 平台的学习入口更加完整。学生可以从“预习导学”了解实验目标, 从“仪器认知”认识主要光学元件, 通过“AI 助教”进行即时问答, 再进入实验训练、实验考核或拓展实验。AI 助教由 Unity 前端和 Python 本地模型服务共同实现, 能够围绕三点校准、空程差、条纹变化和数据处理等常见问题给出针对性解释。拓展实验中的 Python

图像服务能够根据火焰模型生成三幅相移干涉图, 并从相移图反演圆形激光视场内的温度场, 使动态温度场测量从文字说明进一步变为可观察、可比较的图像结果。

7.2 结果的物理意义

基础实验结果体现了可动镜位移与干涉条纹变化之间的关系。当可动镜发生位移 s 时, 光程差变化为 $2s$, 每变化一个波长就会引起一个干涉环的冒出或消失。因此, 通过记录若干条纹变化数对应的读数, 并拟合读数与条纹变化数之间的线性关系, 可以计算激光波长。

拓展实验结果体现了火焰动态温度场对光学相位的影响。开放空间近似恒压时, 火焰温度升高导致气体密度和折射率下降, 探测光往返通过火焰后产生附加投影相位, 进而使背景干涉条纹发生弯曲。通过偏振移相法和三步相移算法, 可以由三幅同步相移图解算投影相位分布; 在轴对称近似下, 再通过逆阿贝尔变换恢复径向折射率扰动, 并依据 Gladstone-Dale 关系获得圆形激光视场内的局部温度场。

7.3 合理性

平台的基础实验流程符合真实迈克尔逊干涉仪实验的操作逻辑。先开启激光器并调节光源高度, 再进行粗调定位、三点校准、干涉条纹观察和细调读数, 最后进行数据处理和结果分析。数据计算采用最小二乘法拟合 $d-N$ 关系, 并结合残差、拟合优度和不确定度分析完成波长测量, 与大学物理实验的数据处理要求一致 [10]。

拓展实验中, PMI 前端、4-f 系统、朗奇光栅、分束后的分析偏振片和 CCD 同步采集的设计符合动态温度场干涉测量的基本原理。参考研究中, 位于 4-f 系统之前的 PMI 前端与后续 4-f 光栅分束、分析偏振检测系统配合, 可在单次曝光中得到三幅相移干涉图, 并用于火焰动态温度场的相位反演 [1]。平台的正向仿真严格经过“温度-折射率-正阿贝尔投影-双程相位-三幅相移图”链路, 反向重建严格经过“三幅图-相位-投影光程差-正则化逆阿贝尔-折射率-温度”链路。由于测量信息来自半径 1 cm 的激光照射区域, 圆形掩膜之外不显示推断温度, 从而避免将局部测量结果误解释为完整火焰全场。

7.4 有效性

平台能够将理论学习、实验操作、数据处理和评分反馈结合起来。学生在虚拟环境中可以观察光路, 操作仪器, 输入数据并得到计算结果。对于容易出错的读数和计算环节, 系统不只检查前端输入, 还保存后台真实条纹数和真实读数, 因此能够区分“没有到达指定节点”“读数填写偏差过大”“有效数字不规范”和“计算结果错误”等不同问题。AI 助教的加入进一步增强了预习和复习环节, 使学生在遇到概念性问题时能够立即获得实验相关解释; Python 图像服务则增强了拓展实验结果的动态生成能力。该平台在实验预习、课堂演示和课后复习中均具有较好的有效性。

7.5 可拓展性

本平台具有较强的可拓展性。在基础实验方面,后续可以增加空气折射率测量、薄膜厚度测量和微小位移测量等拓展实验。在拓展实验方面,可以进一步引入基于流体力学与燃烧反应的火焰温度模型、多视角层析重建和实验相机标定,也可拓展到热羽流、烟气和透明流体温度扰动等对象。平台还可以扩展 VR 操作、自动生成实验报告、教师端成绩管理等功能。

7.6 局限性

由于虚拟仿真需要兼顾运行效率和教学展示,平台中的部分物理过程仍进行了理想化处理。例如,当前火焰采用满足轴对称条件的参数化模型,尚未求解完整燃烧反应与流体传热过程;干涉条纹虽加入光强不均匀和小幅噪声,仍不能完全包含真实实验中的机械振动、光源不稳定和复杂空气扰动。拓展实验的测量结果仅对应半径 1 cm 的激光照射区域,不能直接代表圆外完整火焰温度场。AI 助教依赖本地模型和提示词约束,回答质量仍需要结合教师审核和实验讲义进行校正; Python 后端服务也要求运行端提前配置依赖环境。

7.7 改进思路

后续将从三个方面改进平台。第一,进一步提高物理模型精度,引入更真实的噪声、光强不均匀和仪器误差模型。第二,优化交互体验和界面设计,增加更细致的步骤引导、错误提示和实验报告自动生成功能。第三,将 AI 助教与实验知识库、评分反馈和学生错题记录进一步结合,使其从通用问答扩展为更具有针对性的实验学习助手。

八、电脑配置要求

表 4 电脑配置要求表

硬件/软件	参数/版本
操作系统	Windows 10 / Windows 11
CPU 配置	Intel Core i5 及以上, 推荐 i5-12490F 或同级别处理器
显卡	NVIDIA GTX 1650 及以上, 推荐 RTX 2060 或同级别显卡
系统内存	8 GB 及以上, 推荐 16 GB
系统硬盘	500 GB 及以上
建模工具	Blender
开发工具	Unity 2022.3.62f1
脚本编辑器	Visual Studio Community 2022
Python 环境	Python 3.x, 需安装 Flask、flask-cors、requests、NumPy、OpenCV、Matplotlib
本地 AI 服务	Ollama, 推荐准备 qwen2.5:7b 模型用于 AI 助教问答

九、创新点

1. **基础实验与拓展实验一体化。**平台不仅实现了迈克尔逊干涉仪测量激光波长的基础实验, 还在此基础上拓展了偏振移相火焰动态温度场测量拓展实验, 形成由基础训练到创新应用的完整教学链条。
2. **火焰温度场完整光学反演链路。**平台将火焰温度、气体密度、折射率扰动、阿贝尔投影、相位变化和干涉图变化联系起来, 并从三幅相移图重新反演圆形激光视场内的温度场, 使学生能够直观理解干涉测量在透明气体温度诊断中的应用。
3. **PMI 前端与 4-f 光栅系统结合。**拓展实验在加起偏器的迈克尔逊干涉仪输出端通过 QWP 形成偏振编码光, 再利用 4-f 系统、朗奇光栅和分束后的三片分析偏振片实现三幅相移图的同步采集, 体现“空间换时间”的测量思想。
4. **AI 助教嵌入预习流程。**平台在预习界面中加入 AI 助教模块, Unity 前端通过本地 Flask 服务连接 Ollama 模型, 支持学生围绕实验原理、仪器调节和数据处理进行即时问答。

5. **Python 后端生成与反演拓展实验图像。**独立 Python 图像服务既能根据轴对称火焰模型生成三幅相移干涉图,又能通过参考相位扣除、正则化逆阿贝尔和 Gladstone-Dale 换算得到温度结果,便于展示正向观测和反向重建之间的联系。
6. **读数-条纹-评分闭环。**平台将粗调读数、精密读数、条纹变化数和后台评分状态关联起来,学生的操作过程能够被实时记录并反馈到成绩系统中。
7. **多层次交互设计。**平台实现了预习导航、物体高亮、鼠标滚轮移动、相机切换、面板显隐、自动计算和成绩反馈等功能,提升了虚拟实验的操作体验。
8. **可拓展的脚本化平台框架。**平台将相机切换、元件移动、数据计算、模式评分、AI 问答和图像生成拆分为相对独立的脚本模块,后续可以在现有框架上继续添加空气折射率测量、微小位移测量、不同透明介质温度场测量、VR 交互和教师端管理等内容。

十、结论

本文设计并开发了基于 Unity 的迈克尔逊干涉及偏振移相测量温度场的虚拟仿真平台设计。平台以迈克尔逊干涉仪测量激光波长为基础实验,实现了激光器开启、粗调定位、三点校准、干涉条纹观察、细调读数、数据记录、自动计算和练习与考试模式评分等功能。通过该模块,学生能够在虚拟环境中完整掌握迈克尔逊干涉仪的基本操作和数据处理方法。

在基础实验的基础上,平台进一步设计了偏振移相火焰动态温度场测量拓展实验。该实验以酒精灯火焰及周围受热空气作为动态相位扰动对象,通过 4-f 系统、朗奇光栅、三路分析偏振片和 CCD 成像面实现三幅相移干涉图同步采集。Python 后端依据轴对称火焰模型、理想气体关系和 Gladstone-Dale 公式生成折射率场,经正阿贝尔投影和迈克尔逊双程相位模型生成三幅观测图,再从三幅图完成相位解算、参考相位扣除、投影光程差计算、正则化逆阿贝尔和圆形照射区域温度场重建。该模块将传统干涉实验拓展到透明气体动态温度场测量应用,提高了实验内容的创新性和综合性。

平台还增加了预习导学界面和 AI 助教模块,并通过 Python 服务扩展本地智能问答和拓展实验图像计算能力。预习界面将预习导学、AI 助教、仪器认知、实验训练、实验考核和拓展实验统一组织,使学习路径更加清晰;AI 助教能够围绕实验知识进行即时答疑;火焰拓展图像服务能够生成单次曝光三步相移图,并从相移图反演圆形激光视场内的温度场,增强了拓展实验的动态表现力。

总体来看,本平台兼具物理原理展示、实验操作训练、智能预习答疑、数据处理计算和学习反馈功能,能够作为大学物理实验预习、课堂演示和课后复习的辅助资源。后续将继续优化物理模型精度、完善拓展实验反演算法、增强 AI 助教的知识库约束并改进交互体验,使平台更加接近真实实验并具备更强的教学推广价值。

十一、成员分工

成员 A: 主要负责 Blender 三维建模和 UI 界面设计, 包括光学仪器模型制作、场景视觉风格调整、界面布局与部分素材设计。

成员 B: 主要负责 Unity 程序开发, 包括基础实验场景搭建、交互脚本编写、光路显示、读数联动和数据处理功能实现。

成员 C: 主要负责 Unity 程序开发, 包括实验流程控制、相机与对象切换、练习与考试模式评分系统、界面交互和程序测试优化。

成员 D: 主要负责物理实验报告撰写和拓展实验设计, 包括物理原理整理、偏振移相火焰动态温度场测量方案设计、数据处理流程和报告结构完善。

成员 E: 主要负责 PPT 制作和视频录制, 包括作品展示材料整理、演示流程设计、录屏拍摄和答辩展示内容制作。

以上分工为项目开发中的主要任务划分。在实际制作过程中, 五位成员相互协作, 共同完成平台搭建、测试、展示材料制作和报告完善。

十二、参考文献

参考文献

- [1] Serrano-García D I, Martínez-García A, Toto-Arellano N I, Otani Y. Dynamic temperature field measurements using a polarization phase-shifting technique[J]. Optical Engineering, 2014, 53(11): 112202.
- [2] 陈强华, 周胜, 丁锦红, 韩文远, 孔祥悦, 罗会甫. 基于多步相移法和偏振干涉光学层析光路的三维温度场测量 [J]. 光学学报, 2022, 42(7): 0712004.
- [3] Ge X, Zielińska J A, Maldonado S. High-precision interferometric measurement of slow and fast temperature changes in static fluid and convective flow[EB/OL]. arXiv:2308.03162, 2023.
- [4] Toto-Arellano N I, Martínez-García A, Serrano-García D I, et al. Slope measurement of a phase object using a polarizing phase-shifting high-frequency Ronchi grating interferometer[J]. Applied Optics, 2010, 49(33): 6402-6408.
- [5] Servin M, Estrada J C, Quiroga J A. The general theory of phase shifting algorithms[J]. Optics Express, 2009, 17(24): 21867-21881.
- [6] Ghiglia D C, Pritt M D. Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms and Software[M]. New York: Wiley-Interscience, 1998.
- [7] Shakher C, Nirala A K. A review on refractive index and temperature profile measurements

- using laser-based interferometric techniques[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(6): 455-491.
- [8] 张兴坊, 刘凤收, 梁兰菊. 迈克尔逊干涉仿真平台的设计与应用 [J]. 大学物理实验, 2023, 36(1): 119-123.
- [9] 郑乐, 郑雪丽, 杨骏骏, 等. 光学虚拟仿真实验平台的设计与实现 [J]. 物理实验, 2024, 44(3): 39-43.
- [10] 杨文星, 姚平, 吴望生等. 大学物理实验 [M]. 北京: 北京大学出版社, 2022.
- [11] Unity Technologies. Unity User Manual 2022.3[EB/OL].
- [12] Harrison Ferrone. Unity 和 C# 游戏编程入门 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2022.

附录: Python 相位图到温度热力图算法

A.1 算法输入、输出与计算方向

火焰拓展实验后台包含正向仿真与反向重建两个方向。正向仿真先在完整酒精灯火焰坐标中建立轴对称温度场 $T(r, h, t)$, 再根据 Unity 传入的测量中心高度 h_m 截取半径 $R_L = 10 \text{ mm}$ 的圆形局部测量窗口, 依次计算气体折射率、正阿贝尔投影、双程投影相位和三幅相移干涉图, 用于生成 Unity 中显示的仿真观测数据。反向重建则以最近一次生成的火焰相移图和无火焰参考相移图为输入, 重新解算投影相位, 再经参考相位扣除、投影光程差换算、正则化逆阿贝尔和 Gladstone-Dale 温度换算得到温度热力图。因此, 最终温度图不是将预设温度数组直接着色显示, 而是从三幅相移干涉图重新反演得到。

反向算法输入为火焰测量图 $I_0^f(x, z)$ 、 $I_{120}^f(x, z)$ 、 $I_{240}^f(x, z)$, 无火焰参考图 $I_0^r(x, z)$ 、 $I_{120}^r(x, z)$ 、 $I_{240}^r(x, z)$, 以及波长 λ 、通过次数 $N_{\text{pass}} = 2$ 、显示相位增益 gain 、测量中心高度 h_m 、径向采样位置 r_i 、环境温度 T_0 和环境折射率 n_0 。输出为半径 $R_L = 10 \text{ mm}$ 圆形视场内的二维温度矩阵 $T(x, z)$ 。Matplotlib 仅负责将数值矩阵绘制为六步过程图和伪彩色温度图。

A.2 正向仿真: 从火焰温度场到三幅相移图

正向仿真首先按式(6)在完整火焰坐标中计算火焰温度, 并通过 $h = h_m + z$ 截取当前测量高度附近的局部窗口, 再由

$$n(r, z, t) = 1 + (n_0 - 1) \frac{T_0}{T(r, z, t)}$$

得到局部折射率。相对于环境空气的折射率扰动 $\Delta n = n - n_0$ 为负值。对每一高度实施正阿贝尔投影:

$$\text{OPD}(x, z) = 2 \int_x^{R_L} \frac{\Delta n(r, z) r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr.$$

随后计算火焰双程投影相位

$$\phi_{\text{flame}}(x, z) = \frac{2\pi N_{\text{pass}} \text{gain}}{\lambda} \text{OPD}(x, z), \quad N_{\text{pass}} = 2,$$

并与固定系统参考相位相加。三幅同步相移图由

$$I_k = a + b \cos(\phi_{\text{sys}} + \phi_{\text{flame}} + \delta_k), \quad \delta_k = 0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3}$$

生成。无火焰参考图使用同一 ϕ_{sys} , 但令 $\phi_{\text{flame}} = 0$ 。

A.3 反向重建: 从相移干涉图到连续投影相位

首先将三幅 8 位图像归一化到 $[0, 1]$, 再分别对火焰测量图和无火焰参考图使用三步相移公式计算包裹相位:

$$\phi_w(x, z) = \text{atan2}\left(\sqrt{3} [I_{240}(x, z) - I_{120}(x, z)], 2I_0(x, z) - I_{120}(x, z) - I_{240}(x, z)\right).$$

atan2 同时利用分子和分母的符号判断象限, 得到范围为 $(-\pi, \pi]$ 的相位。程序分别沿两个图像轴执行相位展开, 将相邻像素间由 2π 周期引起的跳变转换为连续相位:

$$\phi_m = \text{unwrap}(\phi_w^f), \quad \phi_r = \text{unwrap}(\phi_w^r).$$

无火焰参考相位用于扣除系统背景倾斜、固定条纹和全局相位常数。随后在边缘空气区 Ω_{edge} 上取中位数常值

$$C_{\text{edge}} = \text{median}_{(x,z) \in \Omega_{\text{edge}}} [\phi_m(x, z) - \phi_r(x, z)],$$

火焰连续投影相位差为

$$\Delta\phi(x, z) = \phi_m(x, z) - \phi_r(x, z) - C_{\text{edge}}.$$

该步骤的作用是校正相位展开后的整体零点漂移。由于圆形测量窗口的上下边缘在部分测量高度下仍可能位于火焰中, 程序只使用可识别为空气的边缘区域估计 C_{edge} , 不把整圈边缘假定为环境零点, 并将圆外未测区域置零。

A.4 投影光程差、正则化逆阿贝尔与温度换算

由于迈克尔逊测量臂中的光往返通过火焰, 且后台生成条纹时使用了显示增益 **gain**, 反演时需同时除去通过次数与显示增益。单程投影光程差为

$$\text{OPD}(x, z) = \frac{\lambda \Delta\phi(x, z)}{2\pi N_{\text{pass}} \text{gain}}, \quad N_{\text{pass}} = 2.$$

在每一高度 z 上采用局部轴对称近似后, 理想投影满足

$$\text{OPD}(x, z) = 2 \int_x^{R_L} \frac{\Delta n(r, z) r}{\sqrt{r^2 - x^2}} dr.$$

程序先对 $\text{OPD}(x, z)$ 与 $\text{OPD}(-x, z)$ 求平均, 抑制离散相位误差中的非对称分量, 再将积分区域划分为若干同心环带。设第 j 个环带的内外边界为 $r_{j-1/2}$ 和 $r_{j+1/2}$, 则离散阿贝尔投影矩阵元素为

$$A_{ij} = 2 \left[\sqrt{\max(r_{j+1/2}^2 - r_i^2, 0)} - \sqrt{\max(r_{j-1/2}^2 - r_i^2, 0)} \right],$$

离散投影关系为

$$\mathbf{OPD} = A \Delta \mathbf{n}.$$

直接求逆容易放大相位噪声, 因此程序采用带一阶平滑约束的 Tikhonov 正则化

$$\Delta \mathbf{n} = \arg \min_q (\|A\mathbf{q} - \mathbf{OPD}\|_2^2 + \alpha \|D\mathbf{q}\|_2^2),$$

其线性方程形式为

$$(A^T A + \alpha D^T D) \Delta \mathbf{n} = A^T \mathbf{OPD}.$$

其中, D 为一阶差分矩阵, α 为正则化系数。火焰升温导致折射率下降, 因而物理解应满足 $\Delta n \leq 0$ 。程序将反演结果限制在由环境温度与最高有效温度决定的折射率范围内, 再根据

$$T(r, z) = \frac{(n_0 - 1)T_0}{n_0 + \Delta n(r, z) - 1}$$

换算绝对温度。最后将径向结果插值回二维观察坐标并施加圆形激光视场掩膜, 得到用于绘制热力图的 $T(x, z)$ 。

A.5 Python 核心实现

以下代码为 `MichelsonFlameInnovationServer.py` 中相位图到火焰温度场核心算法的整理版本。代码省略 Socket 通信、图像排版和 Matplotlib 绘图部分, 保留与温度反演直接相关的计算步骤。

```

1 import numpy as np
2
3 def air_index_from_temperature(T, T0, n0):
4     return 1.0 + (n0 - 1.0) * T0 / T
5
6 def temperature_from_air_index(n, T0, n0):
7     return (n0 - 1.0) * T0 / (n - 1.0)
8
9 def build_abel_matrix(radial_edges):
10     r = 0.5 * (radial_edges[:-1] + radial_edges[1:])
11     A = np.zeros((len(r), len(r)))
12     for i, x in enumerate(r):
13         for j in range(i, len(r)):
14             outer = np.sqrt(max(radial_edges[j + 1]**2 - x**2, 0.0))
15             inner = np.sqrt(max(radial_edges[j]**2 - x**2, 0.0))
16             A[i, j] = 2.0 * (outer - inner)
17     return A
18
19 def solve_wrapped_phase(i0, i120, i240):
20     f0 = i0.astype(np.float64) / 255.0
21     f120 = i120.astype(np.float64) / 255.0
22     f240 = i240.astype(np.float64) / 255.0
23     numerator = np.sqrt(3.0) * (f240 - f120)
24     denominator = 2.0 * f0 - f120 - f240
25     return np.arctan2(numerator, denominator)
26
27 def inverse_abel_regularized(projected_rz, radial_edges, alpha):
28     A = build_abel_matrix(radial_edges)
29     count = len(radial_edges) - 1
30     D = np.diff(np.eye(count), axis=0)
31     lhs = A.T @ A + alpha * (D.T @ D)
32     rhs = A.T @ projected_rz
33     return np.linalg.solve(lhs, rhs)
34
35 def unwrap_2d(phase):
36     return np.unwrap(np.unwrap(phase, axis=0), axis=1)
37
38 def phase_images_to_flame_temperature(

```

```

39     flame_images, reference_images, x, z, r, radial_edges,
40     laser_radius, wavelength, pass_count, display_gain,
41     ambient_temperature, ambient_index, alpha):
42     flame_phase = unwrap_2d(solve_wrapped_phase(*flame_images))
43     reference_phase = unwrap_2d(solve_wrapped_phase(*reference_images))
44     phase_delta = flame_phase - reference_phase
45
46     x_grid, z_grid = np.meshgrid(x, z, indexing="ij")
47     radius = np.sqrt(x_grid**2 + z_grid**2)
48     aperture = radius <= laser_radius
49     # 无火焰参考图已经扣除了系统背景相位; 圆外区域不参与测量。
50     phase_delta = np.where(aperture, phase_delta, 0.0)
51
52     projected_opd = (
53         phase_delta * wavelength /
54         (2.0 * np.pi * pass_count * display_gain)
55     )
56
57     pos = np.where(x >= 0.0)[0]
58     neg = np.where(x <= 0.0)[0][::-1]
59     count = min(len(pos), len(neg))
60     symmetric_opd = 0.5 * (
61         projected_opd[pos[:count], :] +
62         projected_opd[neg[:count], :]
63     )
64
65     projected_rz = np.empty((len(r), len(z)))
66     for column in range(len(z)):
67         projected_rz[:, column] = np.interp(
68             r, x[pos[:count]], symmetric_opd[:, column]
69         )
70
71     delta_n_rz = inverse_abel_regularized(
72         projected_rz, radial_edges, alpha
73     )
74     delta_n_rz = np.minimum(delta_n_rz, 0.0)
75     local_index = ambient_index + delta_n_rz
76     temperature_rz = temperature_from_air_index(
77         local_index, ambient_temperature, ambient_index
78     )
79
80     temperature_xz = np.empty((len(x), len(z)))
81     for column in range(len(z)):
82         temperature_xz[:, column] = np.interp(
83             np.abs(x), r, temperature_rz[:, column],
84             left=temperature_rz[0, column],
85             right=ambient_temperature
86         )
87
88     return np.where(aperture, temperature_xz, ambient_temperature)

```