**文章编号:**1005-4642(2025)05-0042-07



摘 要:通过整合计算机图形学的高效渲染机制,为光学仿真提供了全新的视角和工具集,通过对光学现象的建模 和基于物理原理的计算,实现逼真的视觉效果.以衍射、干涉等光学现象为例展示了仿真结果,验证了该方法的有效性, 适应不同研究与设计的需求.

随着现代科学技术的不断发展,光学仿真在 科学研究、工程设计和教育教学等领域中扮演着 越来越重要的角色<sup>[1-3]</sup>.光学仿真是指利用计算 机模拟光学系统的行为和性能,以便学生更好地 理解实际光学系统的工作原理和优化系统设计. 在光学技术日益复杂化的背景下,光学仿真已成 为不可或缺的关键技术手段.因此,积极探索应 用性、研究性和创新性实验教学光学仿真方式,对 培养学生实践科学研究、应用能力和科学创新能 力具有重要意义<sup>[4]</sup>.

波动光学作为光学领域的重要分支,涉及光 波的衍射、干涉等现象,其仿真涉及复杂的数学物 理模型和计算方法.然而,传统的光学仿真多集 中于使用专门的光学仿真软件或者数值计算方 法,存在计算效率低、可扩展性差等缺点.基于 Matlab App Designer 开发的光学仿真平台可对 一些典型的光学实验进行仿真<sup>[5]</sup>,但是图形渲染 质量和参数灵活性还有所欠缺.使用 Matlab GUI 可对干涉和衍射实现仿真<sup>[6]</sup>,但是相应的运 行平台有限,扩展性差.使用数值计算方法对光 学层析成像中的光学现象进行仿真<sup>[7]</sup>,提高了仿 真精度,但是计算效率较低,难以实时更新和渲 染,不利于实时观察与学习.基于专业光学软件 Zemax 的光学仿真实验平台<sup>[8]</sup>,由于高度依赖 DOI:10.19655/j. cnki. 1005-4642. 2025. 05. 006

Zemax 软件,灵活性较低. 近年来计算机图形学 特别是渲染管线技术已走向完善与成熟,可以高 效、实时地仿真出高质量的光照、阴影、纹理、反射 等效果<sup>[9]</sup>. 渲染管线技术也基于图形编程接口 (如 OpenGL,DirectX 等)允许灵活编程,可以直 接在各种平台实现仿真效果,极大地扩展了应用 场景.

鉴于此,本文基于渲染管线的波动光学仿真 方法,结合光学理论、数学模型和计算机图形学渲 染管线的绘制原理,建构了更为高效、精确且直观 的仿真框架,以实现对光波传播、衍射、干涉等现 象的逼真模拟.通过结合波动光学仿真与渲染管 线原理,并充分利用其在计算机中渲染图形图像 的优势,满足对光学仿真在复杂性、精确度和效率 方面的要求,进一步展现了光学仿真在科研、工程 及教育领域的广泛应用潜力.

#### 1 方法与原理

### 1.1 光学仿真的概念

光学仿真是指利用计算机模拟光的行为和光 学系统的性能,以便理解、分析和预测光学现象的 技术手段.光学仿真可以在虚拟环境中模拟光的 传播、衍射、折射、干涉等现象,以及光学器件(如 透镜、反射镜、光栅等)的性能和特性.

收稿日期:2024-07-12;修改日期:2024-12-31

基金项目:南京邮电大学教改项目(No. JG00722JX30);江苏省省级 STITP 项目

作者简介:宋 叶(2003-),女,青海海西人,南京邮电大学教育科学与技术学院 2021 级本科生. E-mail:2227437338 @qq.com

通信作者:王增旭(1973-),男,安徽灵璧人,南京邮电大学理学院讲师,硕士,研究方向为大学物理实验教学和虚拟仿 真技术. E-mail:wangzengxu@njupt.edu.cn

光学仿真通常利用计算机图形学和数值计算 方法,结合光学理论,通过数值模拟光的传播过程 和光学器件的行为,从而实现对光学现象的模拟 和分析.其基本流程包括:

1)物理原理.光学仿真基于物理原理,需要 考虑如折射、反射、干涉、衍射、偏振等光学现象.

2)模型建立.光学仿真需先建立目标光学系统的数学模型,包括系统的几何结构、光学元件的特性参数、光场的传播规律等.模型的建立需要考虑光学系统的复杂性和实际应用需求.

3)数值计算.光学仿真通常涉及大量的数值 计算,如求解折射、反射、干涉和衍射等问题.这 些计算需要基于数学模型和物理原理,采用数值 方法进行求解,以模拟光学系统的行为.

4)可视化.光学仿真结果通常通过光学图像的方式呈现,以便直观地理解光学现象.可视化包括光场的分布图、光路追迹、光学元件的成像效果等,从而帮助用户分析和评估系统的性能.

5)优化设计.光学仿真可以优化光学系统的 设计,通过调整和优化系统参数和元件布局等,可 以改善系统的性能和效率,满足不同的应用需求.

#### 1.2 渲染管线的基本原理

渲染管线是计算机图形学中将三维场景转换 为二维图像显示到计算机中的一系列步骤的统称.它是图形渲染的核心,主要用于处理几何数 据、光照、纹理映射等任务,最终生成图像输出. 渲染管线<sup>[10]</sup>通常分为以下几个阶段:

1)几何处理.这一阶段负责处理场景中的几 何信息,包括顶点变换、视图变换和投影变换等操 作.这些变换将三维坐标转换为二维坐标,并进 行裁剪以适应视口.

2)光栅化. 在光栅化阶段,几何信息被转换 为屏幕上的像素或片元. 每个片元包含位置、颜 色、深度以及纹理坐标等信息.

3) 片元处理. 片元处理直接决定了最终图像 的外观和质量. 片元着色器负责计算每个片元的 最终颜色值,在这一阶段起关键作用. 通过对片 元着色器的操作,可以实现各种视觉效果,从简单 的颜色变换到复杂的光照和材质效果. 片元处理 直接影响最终显示的效果. 片元着色器在渲染管 线中的作用非常关键,因为其决定了每个像素的 最终颜色值,因此对最终图像的外观和质量具有 直接影响. 通过调整片元着色器中的计算和操 作,可以实现各种各样的视觉效果,从简单的颜色 变化到复杂的光照效果.

#### 1.3 基于渲染管线的光学仿真

对最终呈现在屏幕上的光学图像,任意一点 的光学特性都可以用光强和颜色来大致模拟.对 于许多光学现象,可以推导出光强公式.这些推 导可基于光的波动理论、几何光学、电磁理论等, 具体取决于所研究的光学现象的性质.

而对于上述提到的计算机图形渲染管线中的 光栅化阶段之后,几何信息被转化为二维屏幕空 间内的片元. 每个片元包含了对应像素的基本属 性,如位置、颜色、深度、光照以及可能的纹理坐标 等信息.在进行光学仿真计算时,片元着色器负 责计算这些片元的颜色值,而颜色值的确定依赖 于光强和颜色的模拟.因此,可以基于渲染管线, 尤其是其中的片段着色器,利用光强公式以及颜 色等信息,对光学现象进行模拟仿真.同时,基于 光学的物理原理对光强公式进行推导,通常涉及 波动光学或几何光学的理论知识,这些公式可以 通过对光的波动性质或光线的传播路径进行数学 建模,因此可以不关注最终的光学现象,仅从形成 光学现象的原理出发实现最终的仿真,这样可以 充分利用图形编程得到更加真实、严谨的仿真效 果. 基于渲染管线的波动光学仿真流程如图 1 所示.



图 1 基于渲染管线的波动光学仿真流程

}

## 2 仿真结果与分析

## 2.1 衍射仿真

衍射是重要的光学现象,描述了光在通过孔 隙或物体边缘时发生的偏折现象.衍射是光的波 动性质的直接体现,这里首先基于渲染管线的方 法实现衍射现象的仿真.

以单缝衍射为例,由上文的分析可知,仿真需 要明确在渲染管线中片元着色阶段需要的单缝衍 射的光强公式,单缝衍射的光强公式通常由夫琅 禾费衍射公式给出,其表达式为

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi ax}{\lambda l}\right)}{\frac{\pi ax}{\lambda l}} \right], \tag{1}$$

式中, $I_0$ 为入射光强度,a是缝孔宽度, $\lambda$ 是光波 长,l为观察屏到狭缝的距离, $\diamond \alpha = \frac{\pi a x}{\lambda l}$ 称为衍射 参数.

将式(1)嵌入到渲染管线中,并将其作为变量 赋予 *RGB* 分量中的 *R* 分量,对单色光的颜色进 行仿真. 然后再赋予不同参数的具体数值,例如 输入 λ=650 mm,就可以模拟红光单缝衍射的效 果. 通过改变参数值,可以得到各种情况下单缝 衍射的仿真图样,如图 2 所示.



图 2 红光单缝衍射图样

在渲染管线的编程中,关键代码如下: half4 frag(v2f i): SV\_Target

```
{
```

```
float x = i. uv. x;
```

```
float y = i. uv. y;
```

```
half4 col = tex2D(_MainTex, i. uv);
```

```
float distance = 40 * abs(x-0.5);
```

```
float alpha= Pi * 0.1 * (distance/500)/0.00065;
```

float intense = 20 \* (sin(alpha)/alpha) \* (sin(alpha)/alpha);

col.rgb \* = half3(intense, 0, 0) \*\_Color.rgb; return col;

通过对参数赋予具体数值可以得到理想的效 果,体现了渲染管线技术的高效实时渲染的优势, 尤其对于复杂的光学场景来说,渲染管线的运用 允许在理解物理现象后,通过实时调节参数观察 仿真结果的变化.

同理,对于白光的单缝衍射仿真,只需类比红 单色光的仿真方式,将白光近似拆解成若干种光 的合成,并分别对这些光进行波长的赋值和 RGB 的模拟,最终进行效果的叠加.在与单色光同样 的参数数据下,白光的单缝衍射的仿真图样如图 3 所示:





## 2.2 干涉仿真

干涉是波动光学中的现象,是指2个或多个 光波相遇时相互作用的结果.干涉可以产生明暗 条纹、干涉条纹、干涉图案等视觉效果.在干涉现 象中,光波的波峰与波谷相遇时会相互抵消,光强 减弱或消失;而波峰与波峰、波谷与波谷相遇时会 相互叠加,光强增强.

2.2.1 双缝干涉实验

双缝干涉是指当光波通过2个非常接近的缝隙时,会在空间中相互叠加,形成干涉图样.双缝 干涉的光强分布公式为

$$I = I_0 \left[ \frac{\sin\left(\frac{\pi ax}{\lambda l}\right)}{\frac{\pi ax}{\lambda l}} \right]^2 \cos^2\left(\frac{\pi dx}{\lambda l}\right), \qquad (2)$$

式中,d是两缝之间的中心距离, $\cos^2\left(\frac{\pi ax}{\lambda l}\right)$ 反映

了由于光波在每个缝隙中传播时产生的相位差.

与单缝衍射类似,将式(2)放入渲染管线的片 元着色器阶段,模拟红光的效果,并在最终为相关 参数赋予适当的数值,可以得到不同参数下的红 光双缝干涉效果,如图4所示.



图 4 红光双缝干涉图样

同理,类比白光单缝衍射,仅需要将合成白光 的若干种色光的效果模拟出来,并使用红光双缝 干涉中光强公式的参数值,即可得到不同条件下 的白光双缝干涉效果,如图 5 所示.



图 5 白光双缝干涉图样

出于计算量的考虑,以上白光双缝干涉图样 的计算中做了近似,并没有进行所有波长的计算, 仅选择了7种单色光的波长作为参数进行计算, 干涉图样的色彩变化不完全连续.

## 2.2.2 迈克耳孙干涉实验

迈克耳孙干涉实验是光的干涉性质的重要应用,对迈克耳孙干涉实验图样进行仿真可以直观 地理解光的干涉原理和波动性质.迈克耳孙干涉 实验的图样形状多样、变化复杂<sup>[11-12]</sup>,直接从数 学表达式的角度来仿真图样具有一定难度.而如 上文分析,基于渲染管线的波动光学仿真方法可 以从原理的角度仿真图样,利用实时渲染的优势, 实现图样的精准仿真和实时控制.

使用点扩散光源,迈克耳孙干涉实验可以看 作是 2 个虚光源和在空间进行非定域干涉<sup>[12-13]</sup>, 空间某点到虚光源 S<sub>1</sub> 和 S<sub>2</sub> 的距离用  $r_1$  和  $r_2$  表 示,基于干涉原理,两光源的干涉场中,任意一点 的光强为

 $I = I_1 + I_2 + 2I_1 I_2 \cos(\Delta \phi)$ , (3) 化简后可得到:

$$I = 4I_0 \cos^2 \left[ \frac{\pi}{2} (r_2 - r_1) \right], \qquad (4)$$

式中 r<sub>2</sub>-r<sub>1</sub> 即光屏上任意一点到 2 个虚光源的 光程差,因此由上述结论可得,对迈克耳孙干涉实 验图样的仿真最终简化为求光屏上任意 1 点到 2 个虚光源的光程差.因此,可以建立合适的空间 坐标系,将迈克耳孙干涉仪上各种参数的变化,如 反射镜螺钉的调节、动镜位置的调节、定镜下方的 水平垂直拉杆等,抽象出数学模型再加上几何运 算,最终归结到对虚光源空间坐标的调整上,从而 直接实现对迈克耳孙干涉图样的仿真,并利用渲 染管线的实时渲染和高精度计算的特点,完成图 样的精准控制和数据的精准读取.

利用虚拟仿真迈克耳孙干涉仪测量氦氖激光 波长,其干涉图样如图 6 所示.



图 6 迈克耳孙干涉实验图样

#### 2.2.3 薄膜干涉

薄膜干涉现象由光波在薄膜的2个界面上的 反射和折射引起.当光波入射到薄膜时,一部分 光会在薄膜的2个表面反射,形成2束相干光波. 这2束光波在空间中相遇时会发生干涉.薄膜干 涉在制造光学薄膜、涂层以及光学仪器的抗反射 膜等方面具有重要应用.

在薄膜干涉中,光束在薄膜层内部多次反射和折射,最后在表面层产生干涉现象,从而造成了 肥皂泡多彩的现象.由 Snell 定理可以确定反射 角和折射角的关系, $n_0 \sin \theta_0 = n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ , 下脚标 0 表示外部介质,1 表示薄膜介质,2 表示 内部介质,也代表选取1层薄膜干涉进行仿真.

由菲涅耳公式可知,光在不同介质界面上反射和透射时,不同偏振状态的光波(即s偏振光和 p偏振光)会有不同的反射和透射系数.

对于 s 偏振光, 菲涅耳反射和透射系数为

$$r_{s} = \frac{n_{1} \cos \theta_{1} - n_{2} \cos \theta_{2}}{n_{1} \cos \theta_{2} + n_{2} \cos \theta_{2}}, \ t_{s} = \frac{2n_{1} \cos \theta_{1}}{n_{1} \cos \theta_{1} + n_{2} \cos \theta_{2}},$$

$$(5)$$

对于 p 偏振光,菲涅耳反射和透射系数分别为

$$r_{\rm p} = \frac{n_2 \cos \theta_1 - n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}, \ t_{\rm p} = \frac{2n_1 \cos \theta_2}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2},$$
(6)

其振幅的表现形式为

$$A_{k} = t_{0|1} t_{1|2} r_{0|1}^{k} r_{1|2}^{k}, \qquad (7)$$

式中, $t_{0|1}$ 和 $t_{1|2}$ 表示菲涅耳透射系数, $r_{0|1}$ 和 $r_{1|2}$ 表示菲涅耳反射系数,k表示 1|2和0|1表面反射的次数.

由于不同介质间的多次反射、折射,需要考虑 光波的相位差<sup>[14]</sup>:

$$\varphi_k = k \left[ \frac{2\pi}{\lambda} (2n_1 \delta \cos \theta_1) + \Delta_{1|0} + \Delta_{1|2} \right], \quad (8)$$

式中, $\delta$ 是薄膜厚度, $\lambda$ 是光的波长, $\Delta$ 为光反射时 发生的相位变化.最终,薄膜干涉现象的光强分 布公式可以通过振幅叠加后的平方取实部得到, 因此对k从0~∞求级数和,得到

$$I = \frac{n_2 \cos \theta_2}{n_0 \cos \theta_0} \Big| \sum_{k=0}^{\infty} A_k e^{i\varphi_k} \Big|^2.$$
(9)

这样就可以得到单个波长的光的薄膜干涉仿真效 果,但是此时的效果并不真实,因为对于现实生活 中的薄膜来说,其厚度并不绝对光滑平整,因此需 要对薄膜的厚度加粗糙噪声,来模拟最后扭曲变 化的形状.同时,使用了计算机图形学和光学中 用来描述表面对光的反射特性的数学模型 BRDF,即双向反射分布函数<sup>[15]</sup>.使用 BRDF 模 型可以在给定的入射角度和观察角度下,得出表 面对光的反射强度,这样可以更好地模拟类似薄 膜或者油膜在不同观察视角下,显示出的不同 效果.

在双向反射分布函数中,定义半角向量为

$$H = \frac{L+V}{\parallel L+V \parallel},\tag{10}$$

式中,*L*是归一化的光源方向向量,*V*是归一化的观察方向向量.定义锐度为

*s*<sub>Val</sub> = [max(0,*N*,*H*)×0.5+0.5]<sup>*n*</sup>, (11) 式中,*N* 是归一化的表面法线向量,*n* 是控制高光 锐度的指数.

將上述模型与菲涅耳效应原理结合,可以得 到不同参数(包括薄膜内外介质的折射率、薄膜的 厚度)的薄膜干涉的仿真结果,如图 7 所示.



图 7 薄膜干涉仿真结果

然而,有些光学现象的数学表达式可能非常 复杂,计算成本较高,因此需要对公式进行简化或 适当近似.不仅如此,图形学中的模型和实时渲 染的目标可能会采用一些抽象的近似模型,而不 是严格的物理模型.例如:在白光干涉的实验中, 无法将可见光的所有波长都加以计算,只能选取 最具代表性的几种色光的波长来进行计算,这样 就可以在不需要较高算力的同时,获得较好的仿 真效果.

### 3 实验教学的应用

基于本文提出的方法,开发了多种仿真实验, 以迈克耳孙实验虚拟仿真软件为例,其操作界面 如图 8 所示.虚拟仿真仪器的教学全景式呈现了 迈克耳孙干涉仪的调整方法和相应的光学现象, 细节部分可以根据需要放大呈现,使学生更加快 速准确地掌握其操作方法和实验原理,提升该实 验的教学效果.



图 8 迈克耳孙干涉实验仿真界面

实验以 50 个条纹为间隔,在虚拟仪器上通过 读取刻度尺、读数窗和细调转轮上的读数得到如 表 1 所示的数据.应用公式  $\lambda = \frac{2}{3 \times N} \overline{\Delta l}$ 可以计算 出波长  $\lambda = 632.0$  nm,可以看出虚拟仿真仪器的 结果和真实仪器的结果一致.

表1 虚拟仿真仪器测量波长数据

次数	$l/\mathrm{mm}$	$\Delta l/\mathrm{mm}$
1	50.344 66	0.047.49
2	50.360 51	0.047 42
3	50.376 27	0.017.00
4	50.392 08	0.047 30
5	50.407 87	0.047.49
6	50.423 70	0.047 43

## 4 结束语

本文提出了基于渲染管线的波动光学仿真方 法,将计算机图形学与光学原理相结合,实现了高 效、精确和逼真的光学现象模拟,可以在开发虚拟 仿真光学实验软件时方便地使用.通过详细阐述 渲染管线的各个阶段以及如何在片元着色器中嵌 入光强公式,验证了这种方法在干涉与衍射中的 有效性和准确性.仿真结果显示,利用渲染管线 不仅可以实现复杂的光学现象模拟,还具有较高 的计算效率和可扩展性.这种方法为光学仿真提 供了新途径,特别是在处理大规模数据和复杂算 法时,展现出了独特的优势和应用前景.

## 参考文献:

- [1] 贺文俊,欧阳名钊,王洋,等.基于虚拟仿真的"物理 光学"混合式教学模式探索[J].教育教学论坛, 2022(35):145-148.
- [2] 何文森,杨华军,蔡杨伟男,等.光学设计仿真教学 与实践教学互补性研究[J].实验室研究与探索, 2017,36(7):164-167,195.
- [3] 陈神飞,吴沛榆,李鹏飞,等. 物表光谱作用机理:光 学仿真与实测验证[J]. 照明工程学报,2023,34 (2):17-25.
- [4] 高峰,杨正,曲佳皓,等. 有限资源约束下实验教学 资源的优化策略研究[J]. 实验技术与管理,2023, 40(S1):16-19.
- [5] 张兴坊,梁兰菊. 基于 MATLAB App Designer 的 光学干涉实验仿真平台的设计与教学应用[J]. 实 验科学与技术,2023,21(6):8-13.
- [6] 张兴坊.大学物理光学仿真实验可视化教学平台的 设计与实践[J].中国现代教育装备,2024(5):56-58.
- [7] 余善恩,杨文东,李华军.基于数值仿真的光学层析 成像传感器结构研究[J].激光与光电子学进展, 2022,59(22):309-317.
- [8] 许晓赋,杨秀珍,郑飞杰,等. 基于 Zemax 软件的光 学仿真实验平台的设计探究[J]. 洛阳师范学院学 报,2022,41(5):27-30.
- [9] 罗瑞平,盛步云,黄宇哲,等.基于数字孪生的生产 系统仿真软件关键技术与发展趋势[J].计算机集 成制造系统,2023,29(6):1965-1982.
- [10] 叶子鹏,夏雯宇,孙志尧,等.从传统渲染到可微渲染:基本原理、方法和应用[J].中国科学:信息科学,2021,51(7):1043-1067.
- [11] 郭东琴,陈文博,张胜海. 迈克耳孙干涉仪非定域 干涉条纹分析[J]. 大学物理,2020,39(3):39-43.
- [12] 张朝晖.迈克耳孙干涉仪与光学自相关测量[J]. 物理实验,2023,43(1):49-63.
- [13] 李东临,杨硕,赵昶,等.点光源条件下迈克耳孙非 定域干涉条纹的分析[J].北京石油化工学院学 报,2015,23(3):63-66.
- [14] 刘家明.再谈半波损失和薄膜干涉[J].大学物理,2024,43(2):16-22.
- [15] 白鹏涛,孙兴伟,董祉序,等. 基于改进的微面元偏振 BRDF 模型的粗糙表面偏振反射特性分析[J]. 激光杂志,2022,43(8):24-29.

## Wave optics simulation based on rendering pipeline

SONG Ye<sup>a</sup>, LIU Bin<sup>a</sup>, ZHAO Penglin<sup>a</sup>, WANG Zengxu<sup>b</sup>, LI Yongtao<sup>b</sup>

(a. College of Education Science and Technology; b. College of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: The efficient rendering mechanisms of computer graphics were integrated to provide a new perspective and toolset for optical simulation. By modeling optical phenomena and performing calculations based on physical principles, realistic visual effects could be achieved. Taking diffraction and interference phenomena as examples, the simulation results demonstrated the method's effectiveness. The method was flexible enough to meet the various research and design needs.

Key words: wave optics; optical simulation; computer graphics; rendering pipeline

[编辑:郭 伟]

(上接 34 页)

# Teaching mode of modern physics experiments with preview report + result defense oriented to level-3 normal certification

FU Silie<sup>a,b,c,d</sup>, TANG Jiyu<sup>a,b</sup>, LIU Zhaohui<sup>a,b</sup>, PENG Li<sup>a,b</sup>, GU Min<sup>a,b</sup>, DING Geman<sup>a,b</sup>, HUANG Wei<sup>a,b</sup>, WU Xianqiu<sup>a,b</sup>

(a. School of Physics; b. National Demonstration Center for Experimental Physics Education (South China Normal University); c. Key Laboratory of Atomic and Subatomic Structure and

Quantum Control; d. Guangdong Basic Research Center of Excellence for Structure and Fundamental Interactions of Matter, South China Normal University, Guangzhou 510006, China)

Abstract: Under the background of level-3 normal certification, it was difficult for the traditional teaching model to meet the dual requirements of level-3 normal certification, i. e. cultivating the scientific and teaching literacy of outstanding normal physics students. Thus, the new teaching mode of preview report + result defense was actively explored as a replacement for tradiditonal experiment teaching. The new teaching mode was student-oriented and guided by cultivating outstanding normal physics students based on OBE educational concept. In the new teaching model, the preview report focused on cultivating the teaching literacy of normal students, while the result defense emphasized cultivating the scientific literacy. Meanwhile, from the traditional model of writing to writing + speaking, students had successfully shifted from passive to active learning. The series of teaching outcomes demonstrated that the new experimental teaching mode has effectively achieved the goal of synchronously cultivating the scientific literacy and teaching literacy of outstanding normal physics students.

**Key words**: modern physics experiment; level-3 normal certification; preview report + result defense; OBE

[编辑:郭 伟]